

**GAZ YAKITLI OCAKLARDA KATI YÜZEYİN  
EMİSYONA VE VERİME ETKİSİ**

**Özer AYDIN**

**DOKTORA TEZİ**

**Makina Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Ekim 2005**

**SOLID SURFACE EFFECT ON EFFICIENCY AND EMISSION**

**IN GAS FIRED FURNACES**

**Özer AYDIN**

**Ph. D. Thesis**

**In Mechanical Engineering**

**October 2005**

**GAZ YAKITLI OCAKLARDA KATI YÜZEYİN  
EMİSYONA VE VERİME ETKİSİ**

**Özer AYDIN**

**Osmangazi Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca  
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı  
Enerji-Termodinamik Bilim Dalında  
DOKTORA TEZİ  
Olarak Hazırlanmıştır.**

**Danışman : Yrd. Doç. Dr. Y. Erhan BÖKE (İTÜ)**

**Ekim- 2005**

Özer AYDIN'ın DOKTORA tezi olarak hazırladığı “Gaz Yakıtlı Ocaklarda Katı Yüzeyin Emisyona ve Verime Etkisi” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Üye: Yrd. Doç. Dr. Y. Erhan BÖKE (Danışman)

Üye: Prof. Dr. Ahmet ARISOY

Üye: Prof. Dr. Metin ERGENEMAN

Üye: Prof. Dr. Kemal TANER

Üye: Yrd. Doç. Dr. İ. Yalçın URALCAN

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

**Prof. Dr. Abdurrahman KARAMANCIOĞLU**

**Enstitü Müdürü**

## ÖZET

Dünyada alternatif enerji kaynaklarının artan kullanımına karşın, toplam enerji tüketiminin çoğunu fosil yakıtların kullanımı oluşturmaktadır. Bu kullanım tehlikeli boyutlara ulaşan yanma kaynaklı hava kirliliğini beraberinde getirip günümüzün önemli problemlerinden birini oluşturmaktadır. Doğal gaz bu fosil yakıtların içinde çevre kirliliği yönünden en temiz olanıdır. Doğal gazın yanması sonucu oluşan emisyonlar içinde azotoksitler ilk sırada gelmektedir. Yanma olayında buna sebep olan ise yüksek alev sıcaklığıdır. Azotoksitler farklı mekanizmalara göre sıcaklık, konsantrasyon, oyalanma süreleri ve yakıtın kalitesi gibi yanma şartlarına bağlı olarak oluşmaktadır. Doğal gaz tüketimindeki hızlı artış nedeniyle yakma sistemlerinde verimde azalma olmadan emisyon kontrolü sağlanmalıdır. Emisyonların azaltılması için sebeplerinin kontrol altında tutulması gerekmektedir. Emisyon oluşumunda etkili bu faktörler; hava fazlalık katsayısı, yanma odası büyüklüğü, yanma gazlarının geri beslenmesi, alev sıcaklığı, yanma gazlarının soğutulmasıdır.

Bu çalışmada kazanın yanma odasına yerleştirilen dolgu malzemelerinin azotoksit ve karbonmonoksit emisyonları ile kazan verimine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalar nümerik çözümlerle karşılaştırılarak bu çözümlerin deneysel verilere yakınlığı tespit edilmiştir.

Deneysel çalışmada, 116 kW kapasiteli TS 11392 Pr EN 676 standardında brülör testi için tasarlanmış doğalgaz yakıtlı bir deney kazanına bir cebri brülör monte edilerek laboratuvar şartlarında doğal gaz yakılmıştır. Bu çalışmada ocak boyu, kazan ısı kapasitesi, hava yakıt oranı ve dolgu malzemesinin boyutu parametre olarak seçilerek hem deneysel hemde nümerik olarak incelenmiştir. Bu deney kazanında ocak boyu ayarlanarak ocak hacmi değiştirilebilmektedir.

Deneylerde, ocak içerisinde farklı noktalara yerleştirilmiş termoelemanlar ile ocak içinde alev ve yanma gazlarının sıcaklığı, bacaya yerleştirilen ölçü aletleri (gaz analizörü, termoeleman ve fark basınç ölçer) ile hava fazlalık katsayısı,

verim,  $O_2$ , CO,  $CO_2$ ,  $NO_x$ , baca sıcaklığı ve baca çekiş basıncı, su debisi, gaz debisi ve sıcaklıkları, ortam basıncı ölçülmüştür.

Nümerik çalışmada ise FLUENT CFD (Computational Fluid Dynamics) programı kullanılarak deney kazanı modellenmiştir. Yanma sonu ürünleri, alev sıcaklığı ve  $NO_x$  oluşumu sayısal olarak çözümlenerek deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Deneysel sonuçlar ocakta dolgu malzemesi kullanımının ısı geçişini ve böylece kazan ısı veriminin de arttığını göstermiştir. Bu artış dolgu malzemesinin yüzey alanının artmasıyla orantılıdır. Bu dolgu malzemelerinin kullanımı ile alev sıcaklığında azalma bunun sonucu olarak ta azotoksit emisyonlarında düşüş olmuştur. Ayrıca bu dolgu malzemeleri karbonmonoksit emisyonlarının azalmasını da sağlamıştır. Elde edilen nümerik sonuçlar, deney sonuçlarına hem alev sıcaklıkları hem de emisyonlar için kabul edilebilir yakınlıktadır.

**Anahtar Kelimeler :** Doğal Gaz, Yakma Sistemleri Dizaynı, Yanma, Azotoksit Kontrolü, Sayısal Akışkanlar Dinamiği.

## SUMMARY

Although usage of alternative energy sources increase, fossil fuels have the greatest ratio of the total energy consumption. Fossil fuel combustion causes the air pollution which becomes a great problem of the World. Natural gas is the cleanest fossil fuel in the view point of environmental pollution. The most important emission of natural gas is nitrogen oxide. The high combustion temperature causes the nitrogen oxide emission. Temperature and combustion time affect the concentration of nitrogen oxide. In recent years natural gas consumption increased and energy strategies of Turkey support the spread of the natural gas usage. Because of increasing consumption of natural gas, the emission control must be ensured without the reduction of combustion efficiency. In order to reduction of emission, the reasons of that are to be held under control. The factors which affect the emission formation are as follows; excess air ratio, combustion chamber size, combustion gas recirculation, flame temperature, cooling of the combustion gases.

In this study the effect of filling materials that placed in the combustion chamber over nitrogen oxide and carbon monoxide emissions and the boiler efficiency investigated experimentally. The experimental studies compared with numerical solutions and determined that the numerical solutions and the experimental data are similar.

In this study, a 116 kW heat capacity natural gas burner was tested on a boiler which is described in the Turkish Standard TS 11392 Pr EN 676. This type of boiler gave the opportunity to define the effect of the construction changes of the combustion chamber on the emissions. In this study, combustion chamber size, heat input capacity and excess air ratio and the geometry of the filling material were chosen as parameters and were investigated using both experimental and numerical methods. On this test facility, the combustion chamber volume was varied changing the length of that.

During the experiments, flame and combustion gases temperature in chamber, gas temperature at the inlet of the flue gas tubes, water flow rate and temperatures,

natural gas consumption and temperature, gas emissions (O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, NO, NO<sub>2</sub>) and gas draught, barometric pressure were measured.

The test boiler was modeled numerically using the CFD program FLUENT. The combustion and nitrogen oxide formation were investigated and compared with the experimental results.

Experimental results have shown that using the filling materials in the combustion chamber increased the heat transfer and the boiler efficiency. The increasing was proportional with the surface area of the filling materials. Use of this filling materials caused the flame temperature decrease and as a result of this a decrease in nitrogen oxide emissions occurred. The filling materials have also decreased the carbon monoxide emission. The numerical solutions were acceptably close to experimental results both in flame temperature and emissions.

**Key Words :** Natural Gas, Furnace Design, Combustion, NO<sub>x</sub> Control, Computational Fluid Dynamics.



## TEŞEKKÜR

Doktora çalışmalarım sırasında her konuda yardımlarını esirgmeden yapıcı yöndeki eleştirileri ve olumlu katkıları ile beni yönlendiren doktora tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. Y. Erhan Böke'ye teşekkür ederim.

Bu çalışmanın maddi kaynağı Osmangazi Üniversitesi Araştırma Fonu tarafından desteklenmiştir. Bu nedenle başta Osmangazi Üniversitesi Rektörlüğü olmak üzere Araştırma Fonu Başkanlığına ve Satın Alma Dairesi çalışanlarına çok teşekkür ederim. Proje yürütücüsü ve aynı zamanda bölüm başkanımız Prof. Dr. Soner Alanyalı'ya ve tüm proje ekibine teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışma sahamı öneren, proje hazırlanmasında yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. Metin Ergeneman'a çok teşekkür ederim. Tez çalışmasının modelleme kısmında gösterdikleri yol ve yardımlarından dolayı Prof. Dr. Metin Ergeneman ve Prof. Dr. Zekeriya Altaç'a teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Tez çalışmasının deney bölümü İTÜ Makina Fakültesi Isı Tekniği Ana Bilim Dalında gerçekleştirilmiştir. İlgili üniversitede deneylerin yapılması için gerekli izin verilmesini sağlayan o dönemde Makina Mühendisliği Bölümü Başkanı olan Prof. Dr. Ahmet Arısoy'a çok teşekkür ederim.

Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesinde görevli tüm hocalarıma ve araştırma görevlisi arkadaşlarıma gösterdikleri samimi ilişkileri ve manevi destekleri için teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemde büyük emekleri olan anneme, babama, kardeşime şükranlarımı sunarım Ayrıca, bana verdiği destekten ve gösterdiği sabırdan dolayı eşime şükranlarımı sunar ve çocuklarıma sevgilerimi iletmek isterim.

## İÇİNDEKİLER

	<b><u>Sayfa</u></b>
ÖZET .....	i
SUMMARY .....	iii
TEŞEKKÜR .....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	ix
TABLolar DİZİNİ .....	xxiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xxv
1. GİRİŞ .....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	5
3. DOĞAL GAZ YANMA ESASLARI.....	14
3.1. Yanma Esasları .....	14
3.2. Yanma Hesabı .....	18
3.3. Emisyon Oluşumu .....	22
3.3.1. Azotoksit Oluşumu.....	25
3.3.1.1. Metan yanmasında azotoksit oluşumunun hesaplanması.....	29
3.3.1.2. Azotoksit oluşumunu azaltma teknikleri.....	36
3.3.2. Karbonmonoksit Oluşumu.....	41
3.3.3. Kükürtdioksit Oluşumu .....	42
4. YANMA ODASINDA KATI YÜZEY İŞİNİMİ .....	43
4.1. Problemin Tanımı.....	43
4.2. Dolgu Malzemesi Kullanılması Durumunda Işınım İle Isı Transferi .....	44
4.3. Dolgu Malzemesi Kullanılmaması Durumunda Işınım İle Isı Transferi .....	50

## İÇİNDEKİLER (devam)

	<b><u>Sayfa</u></b>
5. DENEYSEL ÇALIŞMA .....	53
5.1. Deney Tesisatı .....	53
5.1.1. Deney tesisatı ekipmanları.....	55
5.1.2. Ölçüm cihazları .....	58
5.2. Ölçme Sistemi .....	62
5.3. Dolgu Malzemeleri.....	69
5.4. Deney Parametreleri ve Deneyin Yapılışı .....	70
6. DENEY SONUÇLARI.....	75
6.1. Deneylerde Ölçülen Sıcaklıklar.....	75
6.1.1. Alev sıcaklıkları.....	75
6.1.2. Kovan (dolgu malzemesi) yüzey sıcaklıkları.....	91
6.2. Deneylerde Ölçülen Emisyonlar .....	103
6.2.1 Azotoksit emisyonları.....	103
6.2.1.1. Bacadan yapılan ölçümler .....	103
6.2.1.2. Yanma odasından yapılan ölçümler .....	111
6.2.2. Karbonmonoksit emisyonları.....	130
6.2.2.1. Bacadan yapılan ölçümler.....	130
6.2.2.2. Yanma odasından yapılan ölçümler .....	137
6.3. Kazan Isıl Verimi .....	149
7. CFD MODELLEME VE DENEY SONUÇLARI İLE KARŞILAŞTIRMA .....	161
7.1. CFD Programının Tanıtılması .....	161
7.2. Model Hacminin Oluşturulması .....	165
7.3. Programda Seçilen Modeller .....	168
7.4. Model Sonuçları .....	173
7.4.1. Enerji dengesi .....	173

**İÇİNDEKİLER (devam)**

	<b><u>Sayfa</u></b>
7.4.2. Kütle dengesi.....	175
7.5. Model Sonuçları İle Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	175
7.5.1. Emisyonların karşılaştırılması.....	175
7.5.1.1. Azotoksit emisyonları.....	175
7.5.1.2. Karbonmonoksit emisyonları.....	183
7.5.2. Alev sıcaklıklarının karşılaştırılması.....	185
8. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	192
KAYNAKLAR.....	203
EKLER	
EK-I. Metan Yanma Mekanizmaları	
EK-II. Kazan Isıl Hesapları	
ÖZGEÇMİŞ	

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Bir iyi karıştırıcılı reaktörde metan yanmasının yüksek sıcaklıklı reaksiyon yolları ( T = 2200 K, P = 1 atm, 0.1 sn oyalanma süresi için) .....	11
2.2. Bir iyi karıştırıcılı reaktörde metan yanmasının düşük sıcaklıklı (< 1500 K) reaksiyon yolları, ( T = 1345 K, P = 1 atm, 0.1 sn oyalanma süresi için) .....	12
3.1. Farklı HFK değerlerinde farklı ocak sıcaklıkları için NO değişimi. ....	35
3.2. Farklı ocak sıcaklıklarında farklı HFK değerleri için NO değişimi. ....	35
3.3. Termik NO oluşumunun alev sıcaklığına göre değişimi. ....	36
3.4. Alevin seramik çubuklarla soğutulması. ....	37
3.5. Duman gazı resirkülasyonunun NO <sub>x</sub> azaltımına etkisi. ....	37
3.6. Ocak yükünün NO <sub>x</sub> emisyonlarına etkisi. ....	38
3.7. NO <sub>x</sub> emisyonlarının hava fazlalık katsayısı ile değişimi. ....	39
3.8. Yüksek sıcaklıkta oyalanma süresinin NO <sub>x</sub> emisyonlarına etkisi. ....	39
3.9. Gaz yakıtlı endüstriyel yanma sistemleri için NO <sub>x</sub> kontrol teknolojileri. ....	40
4.1. Ocaktaki gaz ışıınım hesabı için seçilen kontrol hacmi. ....	44
4.2. Kovan-duman gazları ve cidar arasında olan ışıınım için ısıl devre. ....	45
4.3. Alev ile cidar arasında olan ışıınım için ısıl devre. ....	50
5.1. Deney tesisatı. ....	54
5.2. Isıl kapasitenin fonksiyonu olarak ocak çapı ve uzunluğu a) Kazan ısıl kapasitesi (kW), b) Ocak uzunluğu (m), c) Ocağın yakma gücü (MW/m <sup>3</sup> ) (TS 11392 EN 676) .....	55
5.3. Deney kazanına ait ölçüler. ....	56
5.4. Deneylerde kullanılan üflemeli brülör. ....	57
5.5. Deneylerde kullanılan ölçüm cihazları. ....	58
5.6. Gaz analiz cihazının yüksek sıcaklığa dayanıklı seramik probu. ....	59
5.7. Sıcak su sayacının montaj halindeki görünüşü. ....	60
5.8. Deney tesisatındaki ölçüm cihazları ve ölçüm noktaları. ....	63
5.9. Deney düzeneğinin genel görünüşü. ....	64

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.10. Kazan yanma odasından yapılan ölçümler.....	65
5.11. Kazana bağlanan termoelemanların görünüşü .....	66
5.12. Kazan kapağına gaz analizi amacıyla açılan R100 ve R175 delikleri	
a) Kapağın dıştan görünüşü b) Kapağın içten görünüşü .....	67
5.13. Bacadan yapılan ölçümler ve yerleri .....	68
5.14. Deneyleerde kullanılan kovan adı verilen dolgu malzemeler .....	69
5.15. Kovan adı verilen dolgu maddesinin ocak içine yerleştirilmesi.....	70
6.1. Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumunda 116 kW kazan ısıll kapasitesi için alev sıcaklıklarının karşılaştırılması (Yakıt debisi =10.72 Nm <sup>3</sup> /h, HFK = 1.26, Kovan konumu = 0 cm) .....	76
6.2. Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumunda 116 kW kazan ısıll kapasitesi için alev sıcaklıklarının karşılaştırılması (Yakıt debisi =10.72 Nm <sup>3</sup> /h, HFK = 1.26, Kovan konumu = 9cm).....	77
6.3. Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumunda 116 kW kazan ısıll kapasitesi için alev sıcaklıklarının karşılaştırılması (Yakıt debisi =10.72 Nm <sup>3</sup> /h, HFK = 1.02, Kovan konumu = 0 cm) .....	78
6.4. Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumunda 116 kW kazan ısıll kapasitesi için alev sıcaklıklarının karşılaştırılması (Yakıt debisi =10.72 Nm <sup>3</sup> /h, HFK = 1.02, Kovan konumu = 9 cm) .....	78
6.5. Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumunda 87 kW kazan ısıll kapasitesi için alev sıcaklıklarının karşılaştırılması (Yakıt debisi = 8.04 Nm <sup>3</sup> /h, HFK = 1.26, Kovan konumu = 0 cm) .....	79
6.6. Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumunda 87 kW kazan ısıll kapasitesi için alev sıcaklıklarının karşılaştırılması (Yakıt debisi = 8.04 Nm <sup>3</sup> /h, HFK = 1.26, Kovan konumu = 9 cm).....	80

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<b><u>Sekil</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
<b>6.7.</b> Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumunda 58 kW kazan ısıllık kapasitesi için alev sıcaklıklarının karşılaştırılması (Yakıt debisi = 5.35 Nm <sup>3</sup> /h, HFK = 1.26, Kovan konumu = 0 cm) .....	81
<b>6.8.</b> Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumunda 58 kW kazan ısıllık kapasitesi için alev sıcaklıklarının karşılaştırılması (Yakıt debisi = 5.35 Nm <sup>3</sup> /h, HFK = 1.26, Kovan konumu = 9 cm) .....	81
<b>6.9.</b> Kazan ocak boyunun 680 mm olması durumunda 87 kW kazan ısıllık kapasitesi için alev sıcaklıklarının karşılaştırılması (Yakıt debisi = 8.04 Nm <sup>3</sup> /h, HFK = 1.26, Kovan konumu = 0 cm) .....	82
<b>6.10.</b> Kazan ocak boyunun 680 mm olması durumunda 87 kW kazan ısıllık kapasitesi için alev sıcaklıklarının karşılaştırılması (Yakıt debisi = 8.04 Nm <sup>3</sup> /h, HFK = 1.26, Kovan konumu = 9 cm) .....	83
<b>6.11.</b> Kazan ocak boyunun 680 mm olması durumunda 87 kW kazan ısıllık kapasitesi için alev sıcaklıklarının karşılaştırılması (Yakıt debisi = 8.04 Nm <sup>3</sup> /h, HFK = 1.02, Kovan konumu = 0 cm) .....	84
<b>6.12.</b> Kazan ocak boyunun 680 mm olması durumunda 87 kW kazan ısıllık kapasitesi için alev sıcaklıklarının karşılaştırılması (Yakıt debisi = 8.04 Nm <sup>3</sup> /h, HFK = 1.02, Kovan konumu = 9 cm) .....	84
<b>6.13.</b> Kazan ocak boyunun 680 mm olması durumunda 58 kW kazan ısıllık kapasitesi için alev sıcaklıklarının karşılaştırılması (Yakıt debisi = 5.35 Nm <sup>3</sup> /h, HFK = 1.26, Kovan konumu = 0 cm) .....	85
<b>6.14.</b> Kazan ocak boyunun 680 mm olması durumunda 58 kW kazan ısıllık kapasitesi için alev sıcaklıklarının karşılaştırılması (Yakıt debisi = 5.35 Nm <sup>3</sup> /h, HFK = 1.26, Kovan konumu = 9 cm) .....	86
<b>6.15.</b> Kazan ocak boyunun 550 mm olması durumunda 58 kW kazan ısıllık kapasitesi için alev sıcaklıklarının karşılaştırılması (Yakıt debisi = 5.35 Nm <sup>3</sup> /h, HFK = 1.475, Kovan konumu = 0 cm) .....	87

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<b><u>Sekil</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
<b>6.16.</b> Kazan ocak boyunun 550 mm olması durumunda 58 kW kazan ısıl kapasitesi için alev sıcaklıklarının karşılaştırılması (Yakıt debisi = 5.35 Nm <sup>3</sup> /h, HFK = 1.475, Kovan konumu = 9 cm) .....	87
<b>6.17.</b> Kazan ocak boyunun 550 mm olması durumunda 58 kW kazan ısıl kapasitesi için alev sıcaklıklarının karşılaştırılması (Yakıt debisi = 5.35 Nm <sup>3</sup> /h, HFK = 1.26, Kovan konumu = 0 cm) .....	88
<b>6.18.</b> Kazan ocak boyunun 550 mm olması durumunda 58 kW kazan ısıl kapasitesi için alev sıcaklıklarının karşılaştırılması (Yakıt debisi = 5.35 Nm <sup>3</sup> /h, HFK = 1.26, Kovan konumu = 9 cm) .....	89
<b>6.19.</b> Kazan ocak boyunun 550 mm olması durumunda 43.5 kW kazan ısıl kapasitesi için alev sıcaklıklarının karşılaştırılması (Yakıt debisi = 4.00 Nm <sup>3</sup> /h, HFK = 1.475, Kovan konumu = 0 cm) .....	90
<b>6.20.</b> Kazan ocak boyunun 550 mm olması durumunda 43.5 kW kazan ısıl kapasitesi için alev sıcaklıklarının karşılaştırılması (Yakıt debisi = 4.00 Nm <sup>3</sup> /h, HFK = 1.475, Kovan konumu = 9 cm) .....	90
<b>6.21.</b> Kovanlarda yüzey sıcaklığı ölçüm noktaları .....	91
<b>6.22.</b> Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumunda 116 kW kazan ısıl kapasitesi için kovan yüzey sıcaklıklarının değişimi (Yakıt debisi =10.72 Nm <sup>3</sup> /h, HFK = 1.26, Kovan konumu = 0 cm) .....	92
<b>6.23.</b> Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumunda 116 kW kazan ısıl kapasitesi için kovan yüzey sıcaklıklarının değişimi (Yakıt debisi =10.72 Nm <sup>3</sup> /h, HFK = 1.26, Kovan konumu = 9 cm) .....	93
<b>6.24.</b> Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumunda 116 kW kazan ısıl kapasitesi için kovan yüzey sıcaklıklarının değişimi (Yakıt debisi =10.72 Nm <sup>3</sup> /h, HFK = 1.02, Kovan konumu = 0 cm) .....	94
<b>6.25.</b> Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumunda 116 kW kazan ısıl kapasitesi için kovan yüzey sıcaklıklarının değişimi (Yakıt debisi =10.72 Nm <sup>3</sup> /h, HFK = 1.02, Kovan konumu = 9 cm) .....	94



## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
<b>6.26.</b> Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumunda 87 kW kazan ısıl kapasitesi için kovan yüzey sıcaklıklarının değişimi (Yakıt debisi = 8.04 Nm <sup>3</sup> /h, HFK = 1.26, Kovan konumu = 0 cm) .....	95
<b>6.27.</b> Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumunda 87 kW kazan ısıl kapasitesi için kovan yüzey sıcaklıklarının değişimi (Yakıt debisi = 8.04 Nm <sup>3</sup> /h, HFK = 1.26, Kovan konumu = 9 cm) .....	96
<b>6.28.</b> Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumunda 58 kW kazan ısıl kapasitesi için kovan yüzey sıcaklıklarının değişimi (Yakıt debisi = 5.35 Nm <sup>3</sup> /h, HFK = 1.26, Kovan konumu = 0 cm) .....	96
<b>6.29.</b> Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumunda 58 kW kazan ısıl kapasitesi için kovan yüzey sıcaklıklarının değişimi (Yakıt debisi = 5.35 Nm <sup>3</sup> /h, HFK = 1.26, Kovan konumu = 9 cm) .....	97
<b>6.30.</b> Kazan ocak boyunun 680 mm olması durumunda 87 kW kazan ısıl kapasitesi için kovan yüzey sıcaklıklarının değişimi (Yakıt debisi = 8.04 Nm <sup>3</sup> /h, HFK = 1.26) .....	98
<b>6.31.</b> Kazan ocak boyunun 680 mm olması durumunda 87 kW kazan ısıl kapasitesi için kovan yüzey sıcaklıklarının değişimi (Yakıt debisi = 8.04 Nm <sup>3</sup> /h, HFK = 1.02) .....	99
<b>6.32.</b> Kazan ocak boyunun 680 mm olması durumunda 58 kW kazan ısıl kapasitesi için kovan yüzey sıcaklıklarının değişimi (Yakıt debisi = 5.35 Nm <sup>3</sup> /h, HFK = 1.26) .....	100
<b>6.33.</b> Kazan ocak boyunun 550 mm olması durumunda 58 kW kazan ısıl kapasitesi için kovan yüzey sıcaklıklarının değişimi (Yakıt debisi = 5.35 Nm <sup>3</sup> /h, HFK = 1.475) .....	101
<b>6.34.</b> Kazan ocak boyunun 550 mm olması durumunda 58 kW kazan ısıl kapasitesi için kovan yüzey sıcaklıklarının değişimi (Yakıt debisi = 5.35 Nm <sup>3</sup> /h, HFK = 1.26) .....	101

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<b><u>Sekil</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
<b>6.35.</b> Kazan ocak boyunun 550 mm olması durumunda 43.5 kW kazan ısıtma kapasitesi için kovan yüzey sıcaklıklarının değişimi (Yakıt debisi = 4.00 Nm <sup>3</sup> /h, HFK = 1.26) .....	102
<b>6.36.</b> Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumunda 116 kW kazan ısıtma kapasitesinde bacadan ölçülen NO <sub>x</sub> emisyonları (Yakıt debisi=10.72 Nm <sup>3</sup> /h, HFK=1.26) .....	103
<b>6.37.</b> Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumunda 116 kW kazan ısıtma kapasitesinde bacadan ölçülen NO <sub>x</sub> emisyonları (Yakıt debisi=10.72 Nm <sup>3</sup> /h, HFK=1.26) .....	104
<b>6.38.</b> Kazan ocak boyunun 680 mm olması durumunda 87 kW kazan ısıtma kapasitesinde bacadan ölçülen NO <sub>x</sub> emisyonları (Yakıt debisi=8.04 Nm <sup>3</sup> /h, HFK=1.26) .....	106
<b>6.39.</b> Kazan ocak boyunun 680 mm olması durumunda 87 kW kazan ısıtma kapasitesinde bacadan ölçülen NO <sub>x</sub> emisyonları (Yakıt debisi=8.04 Nm <sup>3</sup> /h, HFK=1.02) .....	107
<b>6.40.</b> Kazan ocak boyunun 550 mm olması durumunda 58 kW kazan ısıtma kapasitesinde bacadan ölçülen NO <sub>x</sub> emisyonları (Yakıt debisi=5.35 Nm <sup>3</sup> /h, HFK=1.475) .....	109
<b>6.41.</b> Kazan ocak boyunun 550 mm olması durumunda 58 kW kazan ısıtma kapasitesinde bacadan ölçülen NO <sub>x</sub> emisyonları (Yakıt debisi=5.35 Nm <sup>3</sup> /h, HFK=1.26) .....	109
<b>6.42.</b> R100 ölçme çizgisi üzerinde NO <sub>x</sub> emisyonunun değişimi (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, Yakıt debisi=10.72 Nm <sup>3</sup> /h, Kovan konumu = 0 cm, HFK=1.26) .....	111
<b>6.43.</b> R100 ölçme çizgisi üzerinde NO <sub>x</sub> emisyonunun değişimi (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, Yakıt debisi=10.72 Nm <sup>3</sup> /h, Kovan konumu = 9 cm, HFK=1.26) .....	112

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<b><u>Sekil</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
<b>6.44.</b> R100 ölçme çizgisi üzerinde sıcaklık değişimi (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, Yakıt debisi=10.72 Nm <sup>3</sup> /h, Kovan konumu = 0 cm, HFK=1.26).....	113
<b>6.45.</b> R100 ölçme çizgisi üzerinde sıcaklık değişimi (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, Yakıt debisi=10.72 Nm <sup>3</sup> /h, Kovan konumu = 9 cm, HFK=1.26) .....	113
<b>6.46.</b> R175 ölçme çizgisi üzerinde NO <sub>x</sub> emisyonunun değişimi (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, Yakıt debisi=10.72 Nm <sup>3</sup> /h, Kovan konumu = 0 cm, HFK=1.26) .....	114
<b>6.47.</b> R175 ölçme çizgisi üzerinde NO <sub>x</sub> emisyonunun değişimi (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, Yakıt debisi=10.72 Nm <sup>3</sup> /h, Kovan konumu = 9 cm, HFK=1.26) .....	114
<b>6.48.</b> R175 ölçme çizgisi üzerinde sıcaklık değişimi (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, Yakıt debisi=10.72 Nm <sup>3</sup> /h, Kovan konumu = 0 cm, HFK=1.26) .....	115
<b>6.49.</b> R175 ölçme çizgisi üzerinde sıcaklık değişimi (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, Yakıt debisi=10.72 Nm <sup>3</sup> /h, Kovan konumu = 9 cm, HFK=1.26) .....	115
<b>6.50.</b> R100 ölçme çizgisi üzerinde NO <sub>x</sub> emisyonunun değişimi (Ocak boyu 680 mm, kazan kapasitesi 87 kW, Yakıt debisi=8.04 Nm <sup>3</sup> /h, Kovan konumu = 0 cm, HFK=1.26) .....	119
<b>6.51.</b> R100 ölçme çizgisi üzerinde NO <sub>x</sub> emisyonunun değişimi (Ocak boyu 680 mm, kazan kapasitesi 87 kW, Yakıt debisi=8.04 Nm <sup>3</sup> /h, Kovan konumu = 9 cm, HFK=1.26) .....	120
<b>6.52.</b> R100 ölçme çizgisi üzerinde sıcaklık değişimi (Ocak boyu 680 mm, kazan kapasitesi 87 kW, Yakıt debisi=8.04 Nm <sup>3</sup> /h, Kovan konumu = 0 cm, HFK=1.26) .....	120

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
<b>6.53.</b> R100 ölçme çizgisi üzerinde sıcaklık değişimi (Ocak boyu 680 mm, kazan kapasitesi 87 kW, Yakıt debisi=8.04 Nm <sup>3</sup> /h, Kovan konumu = 9 cm, HFK=1.26) .....	121
<b>6.54.</b> R175 ölçme çizgisi üzerinde NO <sub>x</sub> emisyonunun değişimi (Ocak boyu 680 mm, kazan kapasitesi 87 kW, Yakıt debisi=8.04 Nm <sup>3</sup> /h, Kovan konumu = 0 cm, HFK=1.26) .....	122
<b>6.55.</b> R175 ölçme çizgisi üzerinde NO <sub>x</sub> emisyonunun değişimi (Ocak boyu 680 mm, kazan kapasitesi 87 kW, Yakıt debisi=8.04 Nm <sup>3</sup> /h, Kovan konumu = 9 cm, HFK=1.26) .....	122
<b>6.56.</b> R175 ölçme çizgisi üzerinde sıcaklık değişimi (Ocak boyu 680 mm, kazan kapasitesi 87 kW, Yakıt debisi=8.04 Nm <sup>3</sup> /h, Kovan konumu = 0 cm, HFK=1.26) .....	123
<b>6.57.</b> R175 ölçme çizgisi üzerinde sıcaklık değişimi (Ocak boyu 680 mm, kazan kapasitesi 87 kW, Yakıt debisi=8.04 Nm <sup>3</sup> /h, Kovan konumu = 9 cm, HFK=1.26) .....	123
<b>6.58.</b> R100 ölçme çizgisi üzerinde NO <sub>x</sub> emisyonunun değişimi (Ocak boyu 550 mm, kazan kapasitesi 58 kW, Yakıt debisi=5.35 Nm <sup>3</sup> /h, Kovan konumu = 0 cm, HFK=1.475) .....	126
<b>6.59.</b> R100 ölçme çizgisi üzerinde NO <sub>x</sub> emisyonunun değişimi (Ocak boyu 550 mm, kazan kapasitesi 58 kW, Yakıt debisi=5.35 Nm <sup>3</sup> /h, Kovan konumu = 9 cm, HFK=1.475) .....	126
<b>6.60.</b> R100 ölçme çizgisi üzerinde sıcaklık değişimi (Ocak boyu 550 mm, kazan kapasitesi 58 kW, Yakıt debisi=5.35 Nm <sup>3</sup> /h, Kovan konumu = 0 cm, HFK=1.475) .....	127
<b>6.61.</b> R100 ölçme çizgisi üzerinde sıcaklık değişimi (Ocak boyu 550 mm, kazan kapasitesi 58 kW, Yakıt debisi=5.35 Nm <sup>3</sup> /h, Kovan konumu = 9 cm, HFK=1.475) .....	127

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<b><u>Sekil</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
<b>6.62.</b> R175 ölçme çizgisi üzerinde NO <sub>x</sub> emisyonunun değişimi (Ocak boyu 550 mm, kazan kapasitesi 58 kW, Yakıt debisi=5.35 Nm <sup>3</sup> /h, Kovan konumu = 0 cm, HFK=1.475) .....	128
<b>6.63.</b> R175 ölçme çizgisi üzerinde NO <sub>x</sub> emisyonunun değişimi (Ocak boyu 550 mm, kazan kapasitesi 58 kW, Yakıt debisi=5.35 Nm <sup>3</sup> /h, Kovan konumu = 9 cm, HFK=1.475) .....	128
<b>6.64.</b> R175 ölçme çizgisi üzerinde sıcaklık değişimi (Ocak boyu 550 mm, kazan kapasitesi 58 kW, Yakıt debisi=5.35 Nm <sup>3</sup> /h, Kovan konumu = 0 cm, HFK=1.475) .....	129
<b>6.65.</b> R175 ölçme çizgisi üzerinde sıcaklık değişimi (Ocak boyu 550 mm, kazan kapasitesi 58 kW, Yakıt debisi=5.35 Nm <sup>3</sup> /h, Kovan konumu = 9 cm, HFK=1.475) .....	129
<b>6.66.</b> Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumunda 116 kW kazan ısı kapasitesinde bacadan ölçülen CO emisyonları (Yakıt debisi=10.72 Nm <sup>3</sup> /h, HFK=1.26) .....	132
<b>6.67.</b> Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumunda 116 kW kazan ısı kapasitesinde bacadan ölçülen CO emisyonları (Yakıt debisi=10.72 Nm <sup>3</sup> /h, HFK=1.02) .....	132
<b>6.68.</b> Kazan ocak boyunun 680 mm olması durumunda 87 kW kazan ısı kapasitesinde bacadan ölçülen CO emisyonları (Yakıt debisi=8.04 Nm <sup>3</sup> /h, HFK=1.26) .....	134
<b>6.69.</b> Kazan ocak boyunun 680 mm olması durumunda 87 kW kazan ısı kapasitesinde bacadan ölçülen CO emisyonları (Yakıt debisi=8.04 Nm <sup>3</sup> /h, HFK=1.02) .....	135
<b>6.70.</b> Kazan ocak boyunun 550 mm olması durumunda 58 kW kazan ısı kapasitesinde bacadan ölçülen CO emisyonları (Yakıt debisi=5.35 Nm <sup>3</sup> /h, HFK=1.475) .....	136

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
<b>6.71.</b> Kazan ocak boyunun 550 mm olması durumunda 58 kW kazan ısıtma kapasitesinde bacadan ölçülen CO emisyonları (Yakıt debisi=5.35 Nm <sup>3</sup> /h, HFK=1.26) .....	137
<b>6.72.</b> R100 ölçüm çizgisi üzerinde CO emisyonlarının değişimi (Ocak boyu 790 mm, Kazan kapasitesi 116 kW, Yakıt debisi=10.72 Nm <sup>3</sup> /h, Kovan konumu = 0 cm, HFK=1.26) .....	139
<b>6.73.</b> R100 ölçüm çizgisi üzerinde CO emisyonlarının değişimi (Ocak boyu 790 mm, Kazan kapasitesi 116 kW, Yakıt debisi=10.72 Nm <sup>3</sup> /h, Kovan konumu = 9 cm, HFK=1.26) .....	139
<b>6.74.</b> R175 ölçüm çizgisi üzerinde CO emisyonlarının değişimi (Ocak boyu 790 mm, Kazan kapasitesi 116 kW, Yakıt debisi=10.72 Nm <sup>3</sup> /h, Kovan konumu = 0 cm, HFK=1.26) .....	140
<b>6.75.</b> R175 ölçüm çizgisi üzerinde CO emisyonlarının değişimi (Ocak boyu 790 mm, Kazan kapasitesi 116 kW, Yakıt debisi=10.72 Nm <sup>3</sup> /h, Kovan konumu = 9 cm, HFK=1.26) .....	140
<b>6.76.</b> R100 ölçüm çizgisi üzerinde CO emisyonlarının değişimi (Ocak boyu 680 mm, Kazan kapasitesi 87 kW, Yakıt debisi=8.04 Nm <sup>3</sup> /h, Kovan konumu = 0 cm, HFK=1.26) .....	144
<b>6.77.</b> R100 ölçüm çizgisi üzerinde CO emisyonlarının değişimi (Ocak boyu 680 mm, Kazan kapasitesi 87 kW, Yakıt debisi=8.04 Nm <sup>3</sup> /h, Kovan konumu = 9 cm, HFK=1.26) .....	144
<b>6.78.</b> R175 ölçüm çizgisi üzerinde CO emisyonlarının değişimi (Ocak boyu 680 mm, Kazan kapasitesi 87 kW, Yakıt debisi=8.04 Nm <sup>3</sup> /h, Kovan konumu = 0 cm, HFK=1.26) .....	145
<b>6.79.</b> R175 ölçüm çizgisi üzerinde CO emisyonlarının değişimi (Ocak boyu 680 mm, Kazan kapasitesi 87 kW, Yakıt debisi=8.04 Nm <sup>3</sup> /h, Kovan konumu = 9 cm, HFK=1.26) .....	145

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
<b>6.80.</b> R100 ölçüm çizgisi üzerinde CO emisyonlarının değişimi (Ocak boyu 550 mm, Kazan kapasitesi 58 kW, Yakıt debisi=5.35 Nm <sup>3</sup> /h, Kovan konumu = 0 cm, HFK=1.475) .....	148
<b>6.81.</b> R100 ölçüm çizgisi üzerinde CO emisyonlarının değişimi (Ocak boyu 550 mm, Kazan kapasitesi 58 kW, Yakıt debisi=5.35 Nm <sup>3</sup> /h, Kovan konumu = 9 cm, HFK=1.475) .....	148
<b>6.82.</b> R175 ölçüm çizgisi üzerinde CO emisyonlarının değişimi (Ocak boyu 550 mm, Kazan kapasitesi 58 kW, Yakıt debisi=5.35 Nm <sup>3</sup> /h, Kovan konumu = 0 cm, HFK=1.475).....	149
<b>6.83.</b> R175 ölçüm çizgisi üzerinde CO emisyonlarının değişimi (Ocak boyu 550 mm, Kazan kapasitesi 58 kW, Yakıt debisi=5.35 Nm <sup>3</sup> /h, Kovan konumu = 9 cm, HFK=1.475).....	149
<b>6.84.</b> Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumunda 116 kW kazan ısı kapasitesi için kazan ısı veriminin değişimi (Yakıt debisi =10.72 Nm <sup>3</sup> /h, HFK = 1.26).....	153
<b>6.85.</b> Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumunda 116 kW kazan ısı kapasitesi için kazan ısı veriminin değişimi (Yakıt debisi = 10.72 Nm <sup>3</sup> /h, HFK = 1.02) .....	154
<b>6.86.</b> Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumunda 87 kW kazan ısı kapasitesi için kazan ısı veriminin değişimi (Yakıt debisi = 8.04 Nm <sup>3</sup> /h, HFK = 1.26) .....	155
<b>6.87.</b> Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumunda 58 kW kazan ısı kapasitesi için kazan ısı veriminin değişimi (Yakıt debisi = 5.35 Nm <sup>3</sup> /h, HFK = 1.26) .....	155
<b>6.88.</b> Kazan ocak boyunun 680 mm olması durumunda 87 kW kazan ısı kapasitesi için kazan ısı veriminin değişimi (Yakıt debisi = 8.04 Nm <sup>3</sup> /h, HFK = 1.26).....	157

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
<b>6.89.</b> Kazan ocak boyunun 680 mm olması durumunda 87 kW kazan ısıl kapasitesi için kazan ısıl veriminin değişimi (Yakıt debisi = 8.04 Nm <sup>3</sup> /h, HFK = 1.02) .....	158
<b>6.90.</b> Kazan ocak boyunun 680 mm olması durumunda 58 kW kazan ısıl kapasitesi için kazan ısıl veriminin değişimi (Yakıt debisi = 5.35 Nm <sup>3</sup> /h, HFK = 1.26) .....	159
<b>6.91.</b> Kazan ocak boyunun 550 mm olması durumunda 58 kW kazan ısıl kapasitesi için kazan ısıl veriminin değişimi (Yakıt debisi = 5.35 Nm <sup>3</sup> /h, HFK = 1.475) .....	160
<b>6.92.</b> Kazan ocak boyunun 550 mm olması durumunda 58 kW kazan ısıl kapasitesi için kazan ısıl veriminin değişimi (Yakıt debisi = 5.35 Nm <sup>3</sup> /h, HFK = 1.26) .....	161
<b>6.93.</b> Kazan ocak boyunun 550 mm olması durumunda 43.5 kW kazan ısıl kapasitesi için kazan ısıl veriminin değişimi (Yakıt debisi = 4.00 Nm <sup>3</sup> /h, HFK = 1.475) .....	162
<b>7.1.</b> GAMBİT programında çizilen deney kazanının örneği.....	167
<b>7.2.</b> Brülörde hava ve yakıt kanalları. a) Namlu. b) Yakıt kanalı ve yakıt çıkış delikleri.....	168
<b>7.3.</b> Türbilatör.....	169
<b>7.4.</b> Ağ örgüsü yapılmış deney kazanın enine kesiti.....	169
<b>7.5.</b> PDF'in grafiksel tanımı.....	173
<b>7.6.</b> 790 mm ocak boyu 116 kW kazan ısıl kapasitesinde kovansız durum için elde edilen NO mol kesri konturları (HFK=1.26) .....	178
<b>7.7.</b> R100 ve R175 ölçüm çizgileri üzerinde NO emisyonu için deney ve model sonuçlarının karşılaştırılması (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, Kovansız durum, HFK=1.26).....	179
<b>7.8.</b> Modelde elde edilen ocak içindeki sıcaklık konturları (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, Kovansız durum, HFK=1.26).....	179



## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<b><u>Sekil</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
7.9. R100 ve R175 ölçüm çizgileri üzerinde sıcaklıklar için deney ve model sonuçlarının karşılaştırılması. (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, Kovansız durum, HFK=1.26).....	180
7.10. R100 ve R175 ölçüm çizgileri üzerinde NO emisyonu için deney ve model sonuçlarının karşılaştırılması. (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, Kovansız durum, HFK=1.02).....	181
7.11. Modelde elde edilen ocak içindeki sıcaklık konturları (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, Kovansız durum, HFK=1.02).....	182
7.12. R100 ve R175 ölçüm çizgileri üzerinde sıcaklıklar için deney ve model sonuçlarının karşılaştırılması. (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, Kovansız durum, HFK=1.02).....	182
7.13. R100 ve R175 ölçüm çizgileri üzerinde NO emisyonu için deney ve model sonuçlarının karşılaştırılması (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, 30*20 kovani, Kovan konumu = 0, HFK=1.02) .....	183
7.14. Modelde elde edilen ocak içindeki sıcaklık konturları.(Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, 30*20 kovani, Kovan konumu = 9, HFK=1.26).....	184
7.15. R100 ve R175 ölçüm çizgileri üzerinde sıcaklıklar için deney ve model sonuçlarının karşılaştırılması. (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, 30*20 kovani, Kovan konumu = 0, HFK=1.26).....	184
7.16. 790 mm ocak boyu 116 kW kazan ısı kapasitesinde kovansız durum için elde edilen CO mol kesri konturları (HFK=1.26).....	185
7.17. R100 ve R175 ölçüm çizgileri üzerinde CO emisyonu için deney ve model sonuçlarının karşılaştırılması (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, Kovansız durum, HFK=1.26).....	186
7.18. R100 ve R175 ölçüm çizgileri üzerinde CO emisyonu için deney ve model sonuçlarının karşılaştırılması (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, Kovansız durum, HFK=1.02).....	187

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<b><u>Sekil</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
7.19. Modelde elde edilen ocak içindeki sıcaklık konturları (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, Kovansız durum, HFK=1.26, Skala Maks. Değeri 1600 °C).....	188
7.20. Alev sıcaklığı için deney ve model sonuçlarının karşılaştırılması (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, Kovansız durum, HFK=1.26).....	188
7.21. T1 noktasından ocak cidarına olan radyal mesafede deney ve model sıcaklık değişimlerinin karşılaştırılması. (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, Kovansız durum, HFK=1.26).....	189
7.22. T2 noktasından ocak cidarına olan radyal mesafede deney ve model sıcaklık değişimlerinin karşılaştırılması. (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, Kovansız durum, HFK=1.26).....	190
7.23. T3 noktasından ocak cidarına olan radyal mesafede deney ve model sıcaklık değişimlerinin karşılaştırılması. (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, Kovansız durum, HFK=1.26).....	190
7.24. Alev sıcaklığı için deney ve model sonuçlarının karşılaştırılması (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, Kovansız durum, HFK=1.02).....	191
7.25. Alev sıcaklığı için deney ve model sonuçlarının karşılaştırılması (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, 30*20 kovanı Kovan konumu = 0, HFK=1.26).....	192
7.26. Ocak içinde duman gazlarının alev merkezine yönlenmesi (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, 30*20 kovanı Kovan konumu = 0, HFK=1.26).....	193

## TABLOLAR DİZİNİ

<b><u>Tablo</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
3.1. Deneilerin yapıldığı tarih itibari ile doğal gaz garanti özellikleri.....	18
3.2. Doğal gaz yakıtını oluşturan bileşenlerin molekül ağırlıkları .....	21
3.3. Emisyonlar için birim dönüşüm tablosu.....	24
3.4. Azotoksit (NO <sub>x</sub> ), Karbonmonoksit (CO), Hidrokarbon (C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> ) Konsantrasyonu ve İslilik Derecesi .....	25
3.5. Metan yanmasında azotmonoksit oluşumunun mol oranı cinsinden hesaplanan değerleri.....	34
5.1. Ölçüm cihazlarının özellikleri.....	61
5.2. 790 mm ocak boyunda deneylerin yapıldığı kazan ısıl kapasiteleri, yakıt debileri ve hava fazlalık katsayıları.....	72
5.3. 680 mm ocak boyunda deneylerin yapıldığı kazan ısıl kapasiteleri, yakıt debileri ve hava fazlalık katsayıları.....	73
5.4. 550 mm ocak boyunda deneylerin yapıldığı kazan ısıl kapasiteleri, yakıt debileri ve hava fazlalık katsayıları.....	73
5.5. Yapılan deneylerin parametrelere göre dağılımı .....	74
6.1. Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumunda yapılan tüm deneyler için bacadan ölçülen NO <sub>x</sub> emisyonları, baca sıcaklığı ve baca çekişi .....	105
6.2. Kazan ocak boyunun 680 mm olması durumunda yapılan tüm deneyler için bacadan ölçülen NO <sub>x</sub> emisyonları, baca sıcaklığı ve baca çekişi .....	108
6.3. Kazan ocak boyunun 550 mm olması durumunda yapılan tüm deneyler için bacadan ölçülen NO <sub>x</sub> emisyonları, baca sıcaklığı ve baca çekişi .....	110
6.4. Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumunda yapılan tüm deneyler için yanma odasından ölçülen NO <sub>x</sub> emisyonları ve sıcaklıklar .....	117
6.5. Kazan ocak boyunun 680 mm olması durumunda yapılan tüm deneyler için yanma odasından ölçülen NO <sub>x</sub> emisyonları ve sıcaklıklar .....	125
6.6. Kazan ocak boyunun 550 mm olması durumunda yapılan tüm deneyler için yanma odasından ölçülen NO <sub>x</sub> emisyonları ve sıcaklıklar .....	130

**TABLolar DİZİNİ (devam)**

<b><u>Tablo</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
6.7. Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumunda yapılan tüm deneyler için bacadan ölçülen CO emisyonları.....	133
6.8. Kazan ocak boyunun 680 mm olması durumunda yapılan tüm deneyler için bacadan ölçülen CO emisyonları.....	135
6.9. Kazan ocak boyunun 550 mm olması durumunda yapılan tüm deneyler için bacadan ölçülen CO emisyonları.....	137
6.10. Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumunda yapılan tüm deneyler için yanma odasından ölçülen CO emisyonları.....	142
6.11. Kazan ocak boyunun 680 mm olması durumunda yapılan tüm deneyler için yanma odasından ölçülen CO ve CO <sub>2</sub> emisyonları .....	146
6.12. Kazan ocak boyunun 550 mm olması durumunda yapılan tüm deneyler için yanma odasından ölçülen CO ve CO <sub>2</sub> emisyonları .....	150
6.13. Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumunda yapılan tüm deneyler için bacadan ölçülen CO emisyonları ve baca sıcaklıkları.....	156
6.14. Kazan ocak boyunun 680 mm olması durumunda yapılan tüm deneyler için bacadan ölçülen CO emisyonları ve baca sıcaklıkları.....	159
6.15. Kazan ocak boyunun 550 mm olması durumunda yapılan tüm deneyler için bacadan ölçülen CO emisyonları ve baca sıcaklıkları.....	162
7.1. Farklı mesh sayılarında elde edilen alev sıcaklıkları.....	170
7.2. Enerji dengesi için model ile deney verilerinin kıyaslanması .....	176
7.3. Farklı ocak boylarında kazan kontrol hacmi için kütle dengesi.....	177
8.1. CO emisyonlarının HFK ile değişimi (790 mm ocak boyu, anma ısıl gücü) .....	197
8.2. Baca sıcaklığının HFK ile değişimi (790 mm ocak boyu, anma ısıl gücü) .....	197
8.3. Kazan veriminin HFK ile değişimi (790 mm ocak boyu, anma ısıl gücü) .....	198
8.4. Alev merkezinden ocak cidarına doğru deney ve model sıcaklıklarının karşılaştırılması (790 mm ocak boyu, anma ısıl gücü) .....	199
8.5. Modelde ocak cidarına verilen enerji (790 mm ocak boyu, anma ısıl gücü) .....	200

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklamalar</u>
A	Kesit alan ( $m^2$ )
B	Yakıt miktarı ( $m^3/h$ )
C	Düzeltilme katsayısı
D	Yanma odası çapı (m)
$d_a$	Alev çapı (m)
$d_k$	Kovan çapı (m)
$d_o$	Ocak çapı (m)
E	Aktivasyon enerjisi (J/kmol)
$E_{s,c}$	Cidarın ışıınım gücü
$E_{s,d}$	Duman gazlarının ışıınım gücü
$E_{s,k}$	Kovanın ışıınım gücü
F	Şekil faktörü
$H_m$	Ortalama alev yükü ( $kW/m^3$ )
$H_u$	Yakıtın alt ısıl değeri ( $kcal/Nm^3$ )
$i_a$	Duman gazının çevre sıcaklığındaki entalpisi ( $kJ/Nm^3$ )
$i_b$	Duman gazının baca sıcaklığındaki entalpisi ( $kJ/Nm^3$ )
$K_p$	Denge sabiti
k	Reaksiyon hız sabiti ( $m^3/kmol sn$ )
L	Yanma odası uzunluğu (m)
$L_b$	Duman borusu boyu (m)
$L_e$	Eşdeğer tabaka kalınlığı (m)

**SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)**

<b><u>Simgeler</u></b>	<b><u>Açıklamalar</u></b>
MA	Bileşenlerin molekül ağırlığı (kg/kmol)
$m_i$	i bileşeninin kütle kesri
$n_i$	i bileşeninin mol oranı
$n_T$	Ürünlerin molar toplamı
R	Üniversal gaz sabiti
$R_k$	Kovanın ısı direnci
$R_{dk}$	Duman gazından kovana giderken ısı direnci
$R_{dc}$	Duman gazından cidara giderken ısı direnci
$R_{kdc}$	Kovan ve duman gazından cidara giderken ısı direnci
$R_c$	Cidarın ısı direnci
$R_f$	İleri reaksiyon hızı ( $\text{kmol/m}^3\text{sn}$ )
$R_b$	Geri reaksiyon hızı ( $\text{kmol/m}^3\text{sn}$ )
Q	Kazan ısı kapasitesi (kW)
$P_{\text{CO}_2}$	$\text{CO}_2$ gazının kısmi basıncı
$P_{\text{H}_2\text{O}}$	$\text{H}_2\text{O}$ gazının kısmi basıncı
T	Sıcaklık ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_{ag}$	Alev sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_{dg}$	Duman gazları sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_k$	Kovan yüzeyi sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_c$	Ocak cidarı sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_a$	Ortam sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C}$ )

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklamalar</u>
$T_{\text{baca}}$	Baca sıcaklığı (°C)
$V$	Ocak hacmi (m <sup>3</sup> )
$V_a$	Alev hacmi (m <sup>3</sup> )
$V_h$	Toplam hava debisi (m <sup>3</sup> /h)
$V_g$	Toplam duman gazı debisi (m <sup>3</sup> /h)
$v_{h0}$	Teorik yakma havası miktarı (Nm <sup>3</sup> / Nm <sup>3</sup> )
$v_h$	Gerçek yakma havası miktarı (Nm <sup>3</sup> / Nm <sup>3</sup> )
$v_{g0}$	Teorik özgül duman miktarı (Nm <sup>3</sup> / Nm <sup>3</sup> )
$v_g$	Gerçek duman miktarı (Nm <sup>3</sup> / Nm <sup>3</sup> )
$y$	Yanmaya katılmayan yakıt oranı
$Z_b$	Baca kaybı (%)
$Z_e$	Eksik yanma kaybı (%)
$\alpha$	Işınım yutma oranı
$\epsilon$	Işınım yayma oranı (d indisi geri dönen duman gazlarının, a indisi alev bölgesi gazlarının yayma oranını simgelemektedir)
$\epsilon_{al}$	Alevin yayma katsayısı
$\epsilon'_{H_2O}$	1 bar toplam basınçta su buharı ışınım yayma oranı
$\eta$	Kazan ısı verimi (%)
$\sigma$	Stefan Boltzman sabiti (5.67x10 <sup>-8</sup> W/m <sup>2</sup> )

**SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)****Kısaltmalar   Açıklamalar**

CFD	Computational Fluid Dynamics (Sayısal Akışkanlar Dinamiği)
CO	Karbonmonoksit
EGR	Egzoz Gazı Resirkülasyonu
HFK	Hava Fazlalık Katsayısı
kW	Kilowatt
NO <sub>x</sub>	Azotoksit
PDF	Probability Density Function (Olası Yoğunluk Fonksiyonu)
ppm	Parts per million (milyonda bir)
TS	Türk Standartlar Enstitüsü



## 1. GİRİŞ

Doğal gaz kaynağından çıkarıldığı şekilde kullanılabilen renksiz, kokusuz ve havadan hafif yanıcı bir gazdır. Doğal gaz büyük oranda metan (CH<sub>4</sub>) ve daha az oranda etan (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>) ve propan (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>) gibi hidrokarbonlardan meydana gelir. Ayrıca bileşiminde azot (N<sub>2</sub>), karbondioksit (CO<sub>2</sub>), hidrojen sülfür (H<sub>2</sub>S), ile helyum gazları da bulunabilir. Ancak hidrojen sülfür zararlı bir bileşen olduğundan, doğal gaz üretim noktasında bu bileşenden temizlenerek boru hattına pompalanmaktadır.

Dünyada doğal gaz tüketimi hızla artış göstermekte olup, doğal gaz tüketiminin dünya enerji tüketimi içerisindeki payı da artmaktadır. Doğal gaz talebi Ortadoğu ve Afrika dışında hızla artma eğilimindedir. Asya'daki gelişmekte olan ülkeler ile Güney ve Orta Amerika'da doğal gazda yüksek oranlı talep artışı beklenmektedir. 2020 yılına kadar doğal gaz tüketiminin 4.72 trilyon m<sup>3</sup>'e ulaşması beklenmektedir. Doğal gaz elektrik üretiminde giderek artan oranda kullanılmaktadır. 2020 yılına kadar, elektrik enerjisi üretimi için kullanılan doğal gaz miktarının toplam doğal gaz tüketiminin % 33'üne ulaşması beklenilmektedir. Gelişmiş ülkelerde doğal gaz yıllık tüketim artışı diğer yakıtlara göre daha yüksek olmaktadır. 2020 yılına kadar yıllık artışın % 2.1 oranında olması beklenmektedir. Gelişmekte olan ülkelerde de benzeri gelişim izlenmektedir (Oğan, 2003).

İlk defa 1986'da SSCB ile yapılan gaz antlaşmasının ardından 1987'de 500 milyon m<sup>3</sup> olarak başlayan Türkiye'nin doğal gaz tüketimi hızla artmış ve 2002'de 17624 milyon m<sup>3</sup>'e ulaşmıştır. Botaş'ın hesaplamalarına göre bu artış grafiği devam edecek 2020'de 82 milyar m<sup>3</sup>'e ulaşacaktır. Türkiye 2002 yılı için Rusya doğal gazını alan 20 Avrupa ülkesi içerisinde üçüncü büyük müşteridir (Anonim, 2004a).

Türkiye çok çeşitli enerji kaynaklarına sahip bir ülkedir. Türkiye'nin özellikle fosil yakıtların görünür rezervleri yeterli düzeyde olmadığı için 2000 yılında enerji talebinin % 34'ü yerli kaynaklar ile karşılanabilmiştir. Üretim imkanlarının çok üzerinde gerçekleşen talep artışı nedeniyle üretimin tüketimi karşılama oranının 2010 yılında % 27, 2020 yılında ise % 23 olması tahmin edilmektedir. Diğer bir deyişle yakın

gelecekte enerji tüketiminde ithalatın payının daha da artması beklenmektedir. Toplam ithalat içerisindeki kaynakların dağılımına bakıldığında doğal gazın payının 2020 yılında % 33'e ulaşacağı, petrolün ise % 60'lardan % 33'lere düşeceği tahmin edilmektedir (Anonim, 2004b).

Günümüzde doğal gaz yakacak ve hammadde olarak çeşitli alanlarda kullanılabilir. Doğal gaz ülkemizde son yıllarda çok geniş kullanım alanlarına sahip olmuştur. Genellikle elektrik, gübre, sanayi ve konut sektörlerinde kullanılmaktadır. Konutlarda yaygın olarak ısıtma amaçlı kullanımının yanı sıra sanayi kuruluşlarında enerji amaçlı kullanıma da sahiptir. Ayrıca doğal gazın giderek yaygınlaşan uygulama alanlarından biri de özellikle toplu taşımacılıkta kullanılan ulaşım araçlarında yakıt olarak kullanımınıdır.

Konutlarda ısınma amacı ile sıcak su üreten kazanlar ve radyant ısıtıcılar kullanılmaktadır. Kazanlar genel olarak çelik ve döküm kazanlar olarak ikiye ayrılır. Yanmış gazların hareket yönüne göre döküm dilimli, geri dönüşlü ve üç geçişli olmak üzere kazan çeşitleri vardır. Brülör tipine bağlı olarak geliştirilen iki farklı kazan tipi vardır. Bunlar atmosferik brülörlü ve üflemlili brülörlü kazanlardır. Atmosferik gaz brülörlerinde yanma havası, basınçlı doğalgazın bir lülede genişlemesi sırasında enjeksiyon prensibi ile çevreden emdiği hava (birincil hava) ile açık olan yakıcının altından emilen hava (ikincil hava) ile sağlanır. Üflemlili brülörlerde ise yanma havası bir vantilatör tarafından cebri olarak sağlanır.

Doğal gazın özelliklerinden biri zehirsiz olmasıdır. Fakat ortamda çok fazla birikmişse oksijen azlığından dolayı boğulma tehlikesi ortaya çıkacaktır. Havadaki doğal gaz çok az veya çok fazla ise patlama tehlikesi yoktur. Fakat % 5-15 aralığında bir karışım söz konusu olduğunda patlama tehlikesi ortaya çıkar. Havadan hafif bir gaz olduğundan gaz kaçakları hava ile karışmadan önce yükseklerde toplanır ve havalandırma bacalarından kolaylıkla dışarı atılabilirler. Doğal gazın ısı değeri  $35\ 916\ \text{kJ/m}^3$ , yoğunluğu  $0.76\ \text{kg/m}^3$ 'dür. Yanması sonucu çevreyi kirletici emisyonlar yönünden diğer yakıtlara göre temiz bir yakıttır. Bünyesinde kükürt bulundurmadığından kükürtoksitler oluşmamaktadır. Bunun yanında is ve uçan kül

parçacıklarını oluşturmaması yine önemli bir üstünlüğüdür. Yanmamış gaz olarak tarif edilen ve son derece zararlı bir gaz olan karbonmonoksit oluşumu ise son derece azdır. Yanma ürünleri içinde bulunan ve çevreye zarar veren bir başka bileşende azotoksitlerdir. Azotoksit oluşumunun ana nedenlerinden biri yanma sıcaklığının yüksek olmasıdır. Doğal gaz yanması sonucu oluşan ocak sıcaklıkları yüksek olup azotoksit emisyonları eğer önlem alınmazsa diğer yakıtlara göre daha az olmakla birlikte yine de önemli mertebededir. Doğal gazın bu bahsedilen özelliklerine ve avantajlarına ilave olarak; yakılması için ön hazırlık ve depolanma gereksinimi olmaması, otomatik kontrole uygun olması, ekonomik olması sayılabilir.

Doğal gaz kömür ve fuel oil ile karşılaştırıldığında yanma özellikleri açısından mükemmel bir yakıttır. Birim kütle başına ısıl değeri diğerlerinden daha yüksektir. Alev boyu kısa olup yanma için gereken zaman 0.4 - 0.6 saniye mertebesinde. Ocak yükünün fazla olması, alevde is ve katı tanecik radyasyonunun olmayışı nedeniyle alev radyasyon kabiliyetinin az olmasından dolayı, ocak sıcaklığı yüksektir. Doğal gazın tam yanması için gerekli fazla hava değeri düşüktür. Doğal gazın yanması sonucu duman gazları içinde yüksek oranda su buharı bulunur. Bu su buharının yoğuşmasının önlenmesi için kazan ve baca konstrüksiyonunda gerekli önlemler alınmalıdır.

Doğal gazın son yıllarda giderek artan bir şekilde konut, sanayi ve sosyal tesislerde yaygın olarak kullanılması ve dünyada artan enerji fiyatları bu yakıtın en uygun sistemlerle verimli olarak kullanımını zorunlu kılmaktadır. Bu nedenle yakma sistemlerinden verimin yüksek, yakıt tüketiminin ve emisyon değerlerinin az olması istenir.

Ülkemizde son yıllarda çok geniş kullanım olanaklarına sahip olan ve enerji politikamızda çok ağırlıklı bir yer kazanan doğal gazın, yakma sistemlerinde verimde azalma olmadan kirlenici emisyonlar yönünden optimum şekilde yakılması sağlanmalıdır. Emisyonların azaltılması için yanmaya ait ve konstrüktif büyüklüklerin ve yapının kontrol altında tutulması gerekmektedir. Bu büyüklükler aşağıdaki gibi sıralanabilir; hava fazlalık katsayısı, yanma odası büyüklüğü, yanma gazlarının geri beslenmesi, alev sıcaklığı, yanma gazlarının soğutulması. Bu çalışmada kazanın yanma

odasında ve/veya yakıcıda (brülör) yapılacak tasarımların azotoksit emisyonları ile diğer emisyonlar üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiş ve nümerik çözümlerle karşılaştırılmıştır. Bu amaçla ocak içerisine kovan adı verilen dolgu malzemeleri yerleştirilmiştir. Kovanlar silindirik bir şekle sahip olup kalınlığı 1 mm olan çelik saçtan imal edilmişlerdir. Değişik çap ve boylarda olan bu kovanlar ocak içerisinde iki farklı konumda yerleştirilmiştir. Bu dolgu malzemelerinin ocak içi sıcaklık, emisyon dağılımı ve kazan verimi gibi büyüklüklere olan etkileri incelenmiştir.

Deneysel çalışmada, maksimum ocak boyu 790 mm, maksimum kazan ısı kapasitesi 116 kW olan TS 11392 Pr EN 676 standardına göre imal edilmiş ocak boyu ayarlanabilir alev geri dönüşlü bir brülör test kazanına cebri brülör monte edilerek laboratuvar şartlarında doğal gaz yakılmıştır. Doğal gazın yanması esnasında kazan içerisinde oluşan alev özellikleri ve ortaya çıkan emisyonlar incelenmiştir. Bu çalışmada hava-yakıt oranı, ocak boyu, kazan ısı kapasitesi, kovan çapı ile boyu ve kovan konumu parametre olarak ele alınmıştır.

Yakıt sarfiyatı, hava fazlalık katsayısı, alev sıcaklığı ve ocak hacmi emisyonları etkilemektedir. Deneysel çalışmada, ocak içerisinde farklı noktalara yerleştirilmiş termoelemanlar ile sıcaklık değişimleri, bacaya yerleştirilen ölçü aletleri (gaz analizörü, termoeleman ve fark basınç ölçer) ile hava fazlalık katsayısı, verim,  $O_2$ , CO,  $CO_2$ ,  $NO_x$ ,  $SO_2$ , baca sıcaklığı ve baca çekiş basıncı ölçülmüştür. Ayrıca sistemde dolaşan su debisi, gaz debisi ve bunların sıcaklıkları ile ortam basıncı da ölçülmüştür. Aynı zamanda ocak içinde özel bir seramik proba gaz analizi yapılmıştır.

Nümerik çalışmada ise FLUENT 6.1.22 programı kullanılarak deney kazanı modellenmiştir. Yanma ve  $NO_x$  oluşumu sayısal olarak çözümlenmiş ve deney sonuçları ile karşılaştırılarak sayısal çözümleme sonuçlarının deneysel sonuçlarına yakınlığı tespit edilmiştir.

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Çalışmanın kapsamı dikkate alınarak yapılan kaynak araştırmaları doğal gazın yanması esnasında oluşan azotoksit emisyonlarının azaltılması, ocak içerisinde ışınlama ısı transferinin artırılması ve yanmanın modellenmesinde kullanılan metan yanma mekanizmaları konularında yapılmıştır. Yanma esnasında oluşan azotoksit emisyonlarının azaltılması için öncelikli hedef alev sıcaklığının azaltılmasıdır. Bu nedenle özellikle alev sıcaklığının düşürülmesi yoluyla azotoksit emisyonlarının azaltılmasına yönelik çalışmalar araştırılmıştır.

A. Hepbaşlı kazan sonundan duman gazı geri beslemesinin (baca gazı resirkülasyonu)  $NO_x$  emisyonları üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemiştir. Deneplerinde yakıt olarak doğal gaz kullanmıştır. Duman gazı geri beslemesi yaparak elde ettiği  $NO_x$  emisyonları geri beslemesiz duruma göre daha düşük çıkmıştır (Hepbaşlı, 1991).

E. Shigeta et al., ise yüksek sıcaklıklı fırınlar için direkt yakıt püskürtmesi geliştirerek 650 °C ön ısıtılmış hava ile 35 ppm (% 11  $O_2$ )  $NO_x$  seviyesi elde etmişlerdir (Shigeta et al., 1991).

M. A. Zeynalov vd. yanma odasında tam yanmanın gerçekleşebilmesi için gaz-hava karışımını iyileştirecek bir yakıcı tasarımı yapmışlardır. Bu nedenle düzlem ekranlı (yelpaze şekilli) bir doğal gaz yakıcı tasarlamışlardır. Çevreden vantilatörle emilen hava, hava borusu ile lüleden geçerek düzlem ekranın yüzeyine dik olarak çarptırılmıştır. Böylece havanın düzlem ekran üzerinde eşit bir şekilde yayılması sağlanmıştır. Teorik ve deneysel çalışmalarının sonucu olarak daha homojen bir karışım elde etmişlerdir (Zeynalov vd., 1993).

V. Dupont et al., iki farklı yakıcıda termik ve ani NO oluşumunun azaltılmasına yönelik deneysel ve modelleme çalışmaları yapmışlardır. Modelleme çalışmaları Fluent programında yapılmıştır (Dupont et al., 1993).

M. Nishimura et al., bir endüstriyel fırında yakıt ile havanın karışımını çok iyi sağlayan bir rejeneratif yakıcı kullanarak  $\text{NO}_x$  emisyonlarını incelemişlerdir. KOBELCO isimli düşük  $\text{NO}_x$  rejeneratif yakıcıdan önce bütan yakılarak yanma havası  $1100\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye çıkartılmıştır. Bu şekilde yanma odasına girmeden önce yanma havasının sıcaklığı arttırılmıştır. Klasik yakıcılarda  $\text{NO}_x$  seviyesi 108 ppm değerinde olurken bu tip yakıcıyla 56 ppm değerine düşüldüğü belirtilmektedir (Nishimura et al., 1997).

J. M. Ballester et al., LITEC deneysel fırınında düşük ve yüksek girdap enjektörleri ile hem havayı hem de yakıtı kademelendirerek  $\text{NO}_x$  emisyonu üzerindeki değişimleri incelemişlerdir. Bulunan sonuçlar klasik yakıcılarla karşılaştırılmıştır. Yakıcının kademelendirilmesi için yakıcıya biri merkezde ve 16 adet çevrede olmak üzere enjektörler yerleştirilmiştir. Merkezdeki enjektörden primer yakıt, çevredeki enjektörlerden ise sekonder yakıt püskürtülmüştür. Primer yakıt çevresi oksijence zengin olduğundan güçlü bir alev oluşturarak yanmakta ve bu alev sekonder yanma kademesi için bir pilot alev oluşturmaktadır. Farklı debilerde deneyler yapılarak  $\text{NO}_x$  emisyonları incelenmiştir. Primer yakıt oranının % 37.6 değerinde  $\text{NO}_x$  36 ppm (% 3  $\text{O}_2$ ) ölçülmüştür. Yine bu çalışmada yanma havasının  $250\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye ön ısıtılması durumundaki  $\text{NO}_x$  emisyonlarındaki değişim incelenmiştir. Havanın kademelendirilmesi ise toplam akış dağıtım valflerinin ayarlanmasıyla iki eş merkezli akıma bölüştürülerek sağlanmıştır (Ballester et al., 1997).

Y. Suzukawa et al., ısı depolamak için kullandıkları seramik bir petek ile yanma havasını ocak içerisindeki gaz sıcaklığına yakın bir sıcaklığa kadar ön ısıtmışlardır. Yüksek sıcaklığa ön ısıtılmış hava yanmasıyla  $\text{NO}_x$  azaltmanın ana fikri olarak alevde sıcak noktaların oluşmasını önlemek olduğunu ifade etmişlerdir. Bu şekilde termik  $\text{NO}_x$  emisyonlarında azalma tespit etmişlerdir. Yine bu çalışmalarında düşük  $\text{NO}_x$  yakıcısı geliştirerek düşük  $\text{NO}_x$  emisyonları elde etmişlerdir. Akış alanı hesaplamaları için Fluent sayısal akışkanlar dinamiği programını kullanmışlardır (Suzukawa et al., 1997).

L. J. Muzio and G. C. Quartucy,  $\text{NO}_x$  kontrol teknolojilerinin geliştirilmesinde önemli rol oynayan araştırmaları incelemişlerdir. Termik  $\text{NO}$  oluşumunun reaksiyon

sıcaklığına, bölgesel stokiometriye ve oyalanma zamanına bağlı olduğunu, yakıtsal NO oluşumunun ise kuvvetli bir şekilde lokal O<sub>2</sub> derişikliklerine ve zayıf bir şekilde de alev sıcaklığına bağlı olduğunu belirtmektedirler. Ayrıca laboratuvar çalışmalarının ileri alev bölgesine ikinci bir metan püskürtülmesinin NO<sub>x</sub> emisyonlarını azalttığı ifade edilmektedir. Buna benzer çalışmaların metan yerine amonyak kullanılmasıyla da yapıldığı belirtilmektedir. Hava yakıt oranının, alev sıcaklığının kontrolünün sağlanması termik NO<sub>x</sub>'i azalttığı ve az derecede de yakıtsal NO<sub>x</sub>'i azalttığı belirtilmektedir. Düşük NO<sub>x</sub> yakıcılar yakıt çıkış bölgesinde hava yakıt karışımını değiştirerek hem sıcaklık hem de stokiometri kontrolüyle NO<sub>x</sub> oluşumunu azaltırlar. Bunun için havanın ve yakıtın kademelendirilmesi olmak üzere iki metot vardır. Havanın kademelendirilmesi için yakıcı üzerinde NO<sub>x</sub> portları olarak isimlendirilen ayrı portlar yapılır ve bu portlar içinden yanma havası geçirilerek yanma kademelendirilir (Muzio and Quartucy, 1997).

S. C. Li and F. A. Williams, yakıt olarak metan kullanarak kısmen ön karışımli bir yanmada ekivalans oranlarını 1.5 ile 3.0 arasında değiştirerek NO<sub>x</sub> emisyonlarını incelemişlerdir. Hava akımına % 5'lik bir su ilavesi yaparak 1.5 – 2.0 – 2.5 – 3.0 ekivalans oranlarında elde edilen pik NO<sub>x</sub> derişiklikleri sırasıyla 60, 70, 50 ve 40 ppm olarak ölçülmüştür. Zıt akışlı yakıcıya yukarıdan tek fazlı metan-hava karışımı, aşağıdan ise su spreylili hava verilmiştir. Aşağıdaki borunun altına su spreyi üretmek için bir atomizör konulmuştur. Hava akımına sudan başka CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> ve Argon ilave edilmiştir. NO<sub>x</sub> emisyonlarını azaltmada en etkili etmenin su katılması olduğu belirtilmektedir. Ayrıca yaptıkları bu deneysel çalışmaları nümerik çalışmalarıyla karşılaştırmışlardır (Li and Williams, 1999).

E. P. Keramida, eksenel olarak simetrik iki boyutlu bir ocak geometrisinde nümerik çalışmalar yapmıştır. Yakıt olarak doğal gaz, yanma modeli olarak eddy dissipation, türbülans modeli olarak k-ε modeli kullanarak bazı radyasyon modellerini radyasyonsuz duruma göre karşılaştırmıştır. Bu radyasyon modelleri ile yapılan çözümlerde sıcaklık dağılımı bakımından deneysel verilere yakınlık sağlanmıştır (Keramida, 1999)

A. Akgüngör, TS 11392 Pr EN 676 standardına göre imal edilmiş bir brülör testi kazanında doğal gaz yakarak, kazan içerisinde oluşan alevin özelliklerini ve ortaya çıkan emisyonları incelemiştir. Deney kazanı alev geri dönüşlü bir kazan olup ocak boyu ayarlanabilmektedir. Yakıcı olarak ticari bir brülör kullanılmıştır. Termoelemanlar kullanılarak ocak içerisinden birkaç noktadan alev sıcaklıkları ile duman gazının, duman borularına ve duman sandığına giriş sıcaklıkları ölçülmüştür. Bunun dışında gaz analizörü yardımıyla bacada  $O_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ , ve  $NO_x$  emisyonları ölçülmüştür. Ocak içerisine sıcaklığa dayanıklı 1 mm kalınlıktaki çelik sac'tan yapılmış farklı çap ve boylarda bulunan "kovan" adı verilen silindirik parçalar yerleştirilmiştir. Bu kovan adı verilen dolgu maddelerinin alev sıcaklığı ve emisyonlar üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Ocak içinde yeterince ölçüm yapılamaması deney sonuçlarının yeterince değerlendirilmemesine neden olmuştur (Akgüngör, 2000).

Ş.Yılmaz, bir önceki çalışmadaki deney kazanını Fluent programında modelleyerek elde edilen sonuçları deney sonuçları ile karşılaştırmıştır (Yılmaz, 2001).

M. M. Y. Waly et al., molar bazdaki analizi % 93.06  $CH_4$ , % 3.96  $C_2H_6$ , %1.99  $N_2$ , ve % 0.99  $CO_2$  olan bir doğal gaz ile hava karışımının kısmen ön karışimli alevinin yapısı için deneyler yapmışlardır. Deneylerde sıcaklıklar termoelemanlarla, derişiklikler ise gaz örnekleme cihazı ile ölçülmüştür.  $CH_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $CO$ ,  $CO_2$  derişiklikleri gaz kromatografisi ile bulunmuştur. Yapılan araştırmada doğal gaz alevinin yapısının çeşitli yönlerden metan alevinden farklı olduğu sonucuna varılmıştır (Waly et al., 2001).

C. D. Taglia et al., 450 kW kapasiteli bir yanma odasının bilgisayar simülasyonlarına dayanan optimisasyon çalışmaları yapmıştır. Yakıcı olarak bir matrix yakıcı kullanarak ön karışimli alevin akış düzenini sağlamıştır. Optimizasyon parametreleri olarak kirletici emisyonlar, verimlilik ve konstrüksiyon basitliği ele alınmıştır. Mevcut yanma odası dizaynına ilaveten dört farklı yanma odası geometrisi tasarlanmıştır. Bu geometrilerden ikisi mevcut yanma odası geometrisinden daha iyi bulunmuştur. Akış hesaplamaları sonlu hacim metoduna dayalı Cfx-Tasc programı kullanılarak yapılmıştır. Bu tasarlanan geometrilerin birinde yakıcı yakınına bir ısı değiştirici tüp konularak yüksek sıcaklık değerleri azaltılmıştır. Diğer geometride ise



yanma odası çıkışına yakın bölgedeki akış kararsızlıklarını önlemek ve gazları toplamak için kavisli bir tasarım yapılmıştır. Böyle bir geometri ile daha düşük basınç kayıpları ve NO<sub>x</sub> emisyonları elde edilmiştir (Taglia et al., 2001).

D. P. Mishra, yanma işleminden önce ocağa giren gazın giriş sıcaklığının alev yapısına etkisini ve laminar metan-hava karışımının bir boyutlu düzlemsel ilerlemesini detaylı kimyasal kinetik ve transport modelleri kullanarak nümerik olarak çözmüştür. Yanma hızları yanmamış gazların giriş sıcaklığının fonksiyonu olarak stokiometrik karışım için hesaplanmıştır. Bulunan bu değerler Stone ve arkadaşlarının deneysel verileri ile karşılaştırılmıştır. Yanmamış gaz sıcaklığının artması ile yanma hızının artmasında rol oynayan bazı önemli bileşen ve radikaller (CH<sub>3</sub>, CHO, H, O, OH) tanımlanmıştır (Mishra, 2003).

M. İlbaş, vd., sıvı yakıt yakan bir kazanda yanma odasına yerleştirilen levhanın sıcaklık ve azotoksit emisyonu üzerindeki etkisini nümerik olarak incelemiştir. Yaptıkları bu çalışmada yanma odasına yerleştirilen levhanın, yanma odası sıcaklığını azalttığı, sıcaklığın azaldığı bölgelerde de azotoksit emisyonunun azaldığı belirtilmektedir. Bu nümerik çalışma, sayısal akışkanlar dinamiği (Computational Fluid Dynamics, CFD) alanında bir paket program olan Fluent programıyla yapılmıştır (İlbaş vd., 2003).

M. İlbaş iki boyutlu bir geometride hidrojen yanmasını Fluent programıyla modellemiştir. Bu programda mevcut iki adet radyasyon modeli ile radyasyonsuz çözümleri alev sıcaklığına etkileri açısından karşılaştırmıştır. Her iki radyasyon modelinin de kullanılmasıyla radyasyonsuz çözümlere göre daha düşük alev sıcaklığı elde edilmiştir (İlbaş, 2004).

S. Tucer, ocak içerisine konulan düz ve silindirik gövde ile bu gövdenin dışına yerleştirilmiş kanatlardan oluşan dolgu malzemelerinin ocak içerisindeki ışınlama olan ısı geçişine olan katkısını deneysel ve analitik olarak araştırmıştır. Yapılan bu çalışmada su ile temas eden ocak cidarlarına, ocak içerisinde dolgu maddesi bulunmaması durumuna kıyasla daha fazla ısı aktarıldığı analitik yolla hesaplanmıştır (Tucer, 2005).

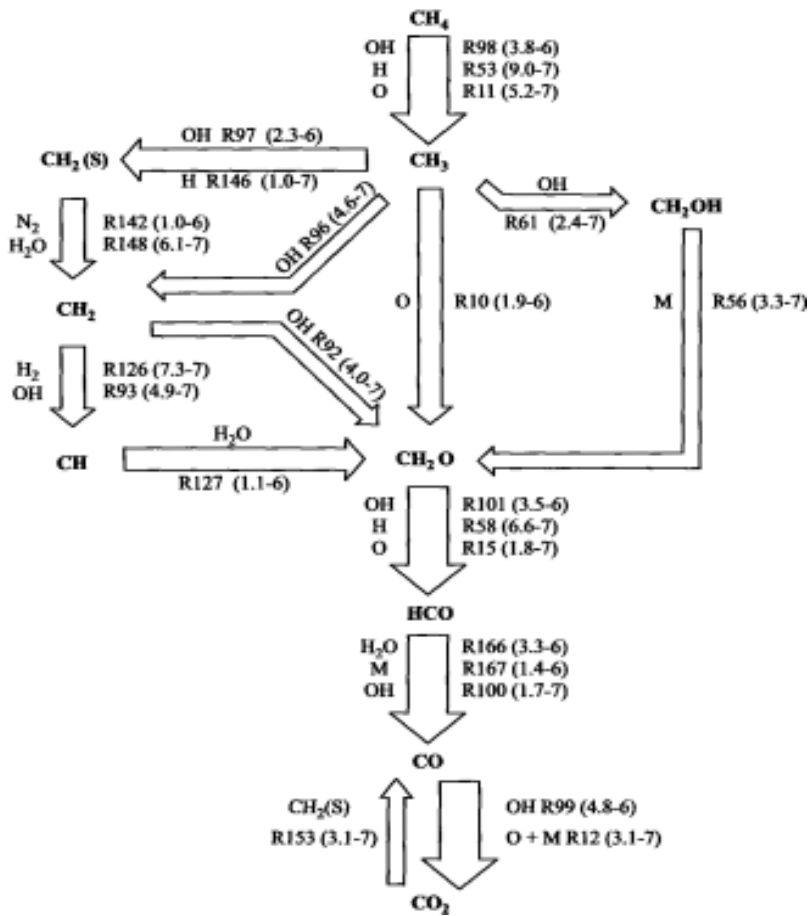
Yanma sürecinde, yakıtın yanması esnasında çok sayıda temel reaksiyon meydana gelir. Kimyasal kinetikte bir kimyasal reaksiyonun hızı, ürünlerin zamana göre derişğinin değişimi olarak tanımlanır. Temel reaksiyonlar çift yönlü olarak gerçekleşebilir. Bu şekilde gerçekleşen reaksiyonlar için net hız, reaksiyonun ileri ve geri hızları arasındaki farka eşittir. Metan yanmasını teorik olarak incelerken, yanma ürünlerinin sağlıklı bir şekilde tespiti için seçilen temel reaksiyon sayısının olabildiğince çok olması gerekir. Ancak bilgisayar hesaplama zamanını oransal olarak oldukça arttıran bu sayının en aza indirilmesi önemlidir. Reaksiyon içeren akış olaylarının kinetik modellenmesinde amaç, önce bir reaksiyon mekanizması oluşturmaktır. Bu mekanizmayı oluşturan temel reaksiyonların seçimi de amaçla doğrudan orantılıdır. Yakıttaki karbon atomu sayısına göre, detaylı kimyasal kinetik modellemelerde değişik araştırmacıların kullandıkları reaksiyon sayısı ve bileşen sayısını araştıran C. T. Bowman metan için 23 bileşen ve 58 reaksiyon kullanıldığını görmüştür (Bowman, 1986). Ancak bu sayılar belirleyici değildir. Metan yanmasına ilişkin modelleme çalışmalarında, çok farklı sayıda temel reaksiyon kullanıldığı literatürde mevcuttur.

R.W. Bilger et al., çapraz akımlı metan-hava difüzyon alevlerinin asimptotik yapısını inceledikleri araştırmalarında 58 temel reaksiyon içeren kinetik mekanizmadan, kararlı hal yaklaşımı ile metan yanmasını üç reaksiyona indirgemişlerdir (Bilger et al., 1990).

J. A. Miller et al., araştırmalarında  $CH_3O$  ve  $H_2O_2$  bileşenlerinin ilave edilerek 15 bileşenden oluşturulmuş mekanizmaya küçük mekanizma denilmektedir. Ayrıca 30 bileşene sahip mekanizmaya da tam mekanizma adı verilmektedir. Reaksiyon sayısının fazla olması, bilgisayarda hesaplama zamanını oransal olarak arttırdığından, 18 reaksiyona indirgenmiş mekanizma için kararlı hal ve denge yaklaşımları incelenerek reaksiyon sayısının daha da aza indirilmesi amaçlanmıştır (Miller et al., 1984).

Metan kimyasal kinetikleri en yaygın olarak araştırılan yakıttır. Bir grup araştırmacı GRI-Mech isiminde bir mekanizma geliştirmişlerdir. 277 temel reaksiyondan ve 49 bileşenden oluşan bu mekanizma EK-1’de verilmiştir (Turns, 2000).

Yüksek sıcaklıkta (2200 K) metanın karbondioksite dönüşmesinde en önemli kimyasal yollar Şekil 2.1’de gösterilmiştir. Burada her bir ok temel reaksiyonu, okların kalınlığı ise belirli reaksiyon yolunun önemini göstermektedir.  $\text{CH}_4$ ’den  $\text{CO}_2$ ’ye olan lineer ilerleme  $\text{CH}_4$  molekülüne OH, O ve H radikallerinin saldırmasıyla başlar ve metil radikal üretilir. Metil radikal oksijen atomu ile birleşerek formaldehit ( $\text{CH}_2\text{O}$ ) oluşturur. Formaldehite OH, O ve H saldırılarıyla CHO üretilir. Sonuç olarak CO, OH ile reaksiyon yaparak  $\text{CO}_2$ ’ye dönüştürülür. Parantez içindeki numaralar EK-1’de verilen ilgili reaksiyon için A değerini göstermektedir. Örneğin 2.6-7 numaraları  $2,6 \cdot 10^{-7}$   $\text{gmol/cm}^3\text{sn}$  değerini ifade eder (Turns, 2000).



Şekil 2.1. Bir iyi karıştırıcı reaktörde metan yanmasının yüksek sıcaklıklı reaksiyon yolları (  $T = 2200$  K,  $P = 1$  atm, 0.1 sn oyalanma süresi için)



Yakıt olarak doğal gazın yakılmasıyla oluşan  $\text{NO}_x$  emisyonlarının azaltılmasına yönelik çalışmalar, genellikle düşük  $\text{NO}_x$  yakıcıların (low- $\text{NO}_x$  burner) geliştirilmesi üzerinde yoğunlaşmıştır. Bunun yanı sıra birkaç yakıcıdan ibaret yakma sistemlerinde ise kontrol sistemleri kullanılarak yanma odasına yakıt ve hava belli oranlarda verilerek kademeli yanma çalışmaları yapılmıştır. Kademeli yanma ile daha iyi bir yanma sağlanmış ve  $\text{NO}_x$  oluşumu azaltılmıştır.  $\text{NO}_x$  oluşumu mekanizmalarından termik  $\text{NO}_x$ , toplam  $\text{NO}_x$  oluşumunda diğer mekanizmalardan daha etkin ve daha önemli bir paya sahiptir. Yüksek sıcaklık termik  $\text{NO}_x$  oluşumuna sebep olduğundan, yanma odası sıcaklığının düşürülmesi üzerine daha fazla çalışmalar yapılmıştır.

Bir diğer çalışma alanı ise ocak içerisine konulan dolgu maddelerinin ışınlama olan katkısının yanı sıra bu dolgu maddelerinin emisyonları ne yönde etkilediği üzerine olmuştur. Bu dolgu maddelerinin ocak içerisindeki ışınlama olan ısı transferini arttırdığı, alev sıcaklığını azalttığı deney ve modelleme çalışmalarıyla desteklenmiştir.

Azotoksit emisyonlarının azaltılmasına yönelik çalışmalar deneysel çalışmaların yanı sıra modelleme çalışmaları ile birlikte yürütülmüştür. Yanmanın modellenmesi için sayısal akışkanlar dinamiği alanında paket programlar mevcuttur. Bu programlarda uygun modeller kullanılarak deney sonuçlarına olan yakınlık araştırılmıştır. Bu alanda özellikle çözüm zamanını azaltmak için metan yanmasını karakterize eden yanma reaksiyonlarının sayısını azaltma çalışmaları önemli bir yer tutmaktadır. Bunun dışında bu programlarda kullanılan türbülans, radyasyon ve yanma modellerinin sıcaklık ve bileşenleri nasıl etkilediği yönünde çalışmalar yapılmıştır. Radyasyon modeli kullanılması halinde ocak sıcaklığının radyasyonsuz duruma göre daha da azaldığı görülmüştür. Sayısal akışkanlar dinamiği alanında kullanılan Fluent programı bünyesinde metan yanması için kullanılan kimyasal mekanizmalar mevcuttur.

### 3. DOĞAL GAZ YANMA ESASLARI

#### 3.1. Yanma Esasları

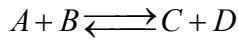
Yanma ön karışımli yada ön karışimsız (difüzyon) alev olmak üzere iki farklı modda meydana gelmektedir. Ön karışımli yanmada yakıt ve yakıcı bileşen, kimyasal reaksiyonun meydana geldiği moleküler seviyede karıştırılır. Difüzyon alevinde ise bileşenler başlangıçta ayrıldılar (Turns, 2000).

Yanma hızı gibi ölçülebilir bir parametreyi vermek ve yapılarının basitliği itibariyle difüzyon alevlerin yanma olayını da karakterize etmek için genelde deneylerde laminer ön karışımli alevler kullanılır (Alemlı, 1998).

Yanma olaylarının teorik analizinde başlıca iki temel yaklaşım mevcut bulunmaktadır. Bunlardan birincisi denge kabulüdür. Bu kabulde reaktantların reaksiyona katılmak için sonsuz uzun zamana sahip oldukları varsayılmaktadır. Bu durumda karışımın Gibbs enerjisini minimize eden koşullar (sıcaklık ve yanma ürünlerinin derişiklikleri) aranmaktadır. Bu yaklaşım kinetik çözüme göre daha basit olması ve bilgisayarlara kolaylıkla uygulanabilmesi nedeniyle yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Yanma sonucu oluşan sıcaklık seviyesi ya da bazı kararlı ürünlerin ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ) dağılımlarının bulunması hedeflendiğinde denge kabulü pratik bir yaklaşım olarak kabul edilmekte ve bu kabulde uygun sonuçlar elde edilebilmektedir. Buna karşılık yanmanın aslında dengesiz bir halde başladığı ve geliştiği bilinmektedir. Yakıt ve hava ancak sınırlı bir zaman aralığında yanma hücresinde kalabilmekte ve ürünler genellikle tam yanma hali sağlanamadan yanma odasını terk etmektedirler. Bu sonlu zaman aralığı “kalma süresi” olarak adlandırılmaktadır. Yanma işlemi sırasında kalma süresine bağlı olarak pek çok dinamikler olaya etki etmekte ve yanmanın seyrini belirlemektedir. Bunun bir sonucu olarak özellikle azotoksit, karbonmonoksit, kükürtdioksit ve is gibi kirleticilerin oluşumu ve yok oluşu incelendiğinde alev içersinde az miktarda bulunan ve buna karşılık büyük önem taşıyan çeşitli ara ürünler (O, OH) yanma kinetiğinin uğraş alanına girmektedir. Bu radikaller bir taraftan  $\text{CH}_4$  formundaki

yakıt moleküllerinin parçalanmasına sebebiyet verirken diğer taraftan da azotoksit gibi kirleticilerin oluşumlarını kontrol etmektedirler (Turns, 2000).

Reaktif bir sistemde, kütle tesir kanununa göre kimyasal bileşenlerin oluşum hızları reaksiyona giren bileşenlerin derişiklikleri ile üstel bir fonksiyonla orantılıdır.



şeklinde bir reaksiyon denklemi dikkate alındığında ileriye doğru olan reaksiyon hızı;

$$R_f = k_f [A][B]$$

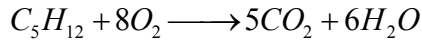
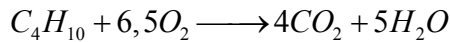
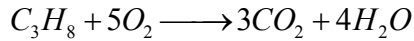
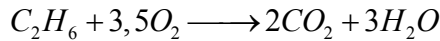
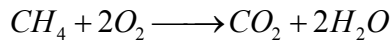
ifadesiyle tanımlanmaktadır. Burada  $R_f$  ileriye doğru reaksiyon hızını ( $\text{kmol/m}^3\text{sn}$ ),  $k_f$  reaksiyon hız sabitini ( $\text{m}^3/\text{kmol sn}$ ),  $[A]$  ve  $[B]$  ise A ve B bileşenlerinin molar derişikliklerini göstermektedir ( $\text{kmol/m}^3$ ). Burada dikkate alınan herhangi bir reaksiyona ait reaksiyon hız sabitinin belirlenmesi, yanma kinetiğinin önemli bir uğraş alanını oluşturmaktadır. Reaksiyon hız sabiti genelde Arrhenius formunda aşağıdaki şekilde tanımlanabilmektedir.

$$k_f = AT^b \exp(-E/RT)$$

Burada  $AT^b$  ifadesi frekans faktörü olarak adlandırılmaktadır. A katsayısı genel olarak  $A = 10^b$  şeklinde tanımlanmaktadır. Bu denklemde T sıcaklığı (K), E aktivasyon enerjisini (J/kmol), R ise universal gaz sabitini göstermektedir. Bir reaksiyona ait geriye doğru reaksiyon hızları ve hız katsayıları ( $R_b$ ,  $k_b$ ) yazılabilir. Herhangi bir reaksiyona ait ileri ve geri reaksiyon hızlarının farkı, sonuç olarak o reaksiyon için net reaksiyon hızını verecektir. Bir yakıtta ait ayrıntılı yanma işlemlerinin tanımlanabilmesi için çok sayıda elementer reaksiyona ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla, belirli bir yakıtın oksitlenmesi, moleküllerinin parçalanması ve aralarında kirleticilerinde bulunduğu yanma ürünlerinin açığa çıkması sürecinin karakterize edilebilmesi için bir dizi elementer reaksiyon tarif

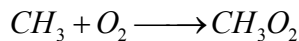
edilmekte ve bu reaksiyonlara ait  $A$ ,  $b$ ,  $E$  değerlerini veren tablolar oluşturulmaktadır. Bu tablolara yanma kinetiğinde mekanizma adı verilmektedir (Arısoy, 1995).

Yakıtın yanması esnasında çok sayıda temel reaksiyon meydana gelir. Kimyasal kinetikte bir kimyasal reaksiyonun hızı, ürünlerin zamana göre derişiminin değişimi olarak tanımlanır. Hidrokarbon yakıtlarının içerisindeki karbon ve hidrojen oksijenle birleşerek yanma oluşur. Yanma esnasında yakıt partikülleri kendilerini oluşturan hidrojen ile karbon atomlarına ayrılır ve her element havanın oksijeni ile ayrı ayrı birleşir. Stokiyometrik şartlarda karbon ve hidrojenin tam yanması halinde doğal gazda yanma reaksiyonları ise aşağıdaki gibidir;



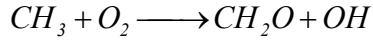
Doğal gaz içindeki karbon oranı kömürden ve fuel oilden az olmasına karşılık hidrojen oranı kömüre göre 7 kat, fuele göre 2 kat daha fazladır. Karbon oranının artması alevin rengini kırmızı yapar ve parlak kırmızı alevde radyasyonla ısı transferi daha fazladır. Hidrojen oranının artması ise baca gazındaki su buharını artırır. Ayrıca doğal gaz içindeki azot miktarı fuel oilden 35 kat, kömürden 2 kat fazladır. Diğer fosil yakıtlarda muhtelif oranlarda bulunan oksijen, kükürt, su ve kül doğal gazda hiç yoktur. Doğal gazda yanma havası oranı diğer yakıtlara göre daha azdır (Akgüngör, 2000 ).

Doğal gazı karakterize eden metan, hidrokarbonların en basit ve kararlı elemanıdır. Yanma olayında metil ( $CH_3$ ) hakim hidrokarbon radikali olmakta ve oksijenle reaksiyona girerek metil peroksit radikalleri vermektedir (Alemlı, 1998).

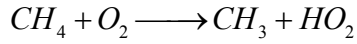




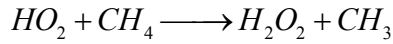
Bu radikaller sonra formaldehit ve hidroksile ayrılmaktadırlar.



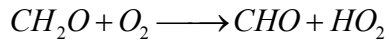
Böylece zincir çevrimlerinin üçüncüsü ortaya çıkmakta, burada ilerlemeye OH radikalleri sebep olmakta ve dejenere dallanma ara ürünü olan formaldehit türetilmektedir. Başlama muhtemelen;



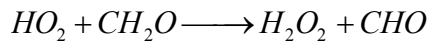
reaksiyonu vasıtasıyla sağlanmakta HO<sub>2</sub> radikalleri sonradan hidrojen peroksit meydana getirecek şekilde ayrılmaktadırlar.



Formaldehit oksijenle reaksiyona girerek dallanmaya sebep olmakta;



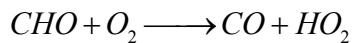
ve HO<sub>2</sub> radikalleri de bir önceki reaksiyonda olduğu gibi metanla yada formaldehitte reaksiyona girmektedirler.



Formaldehit derişikliği yeterli olduğu takdirde;



CHO radikalleri oksijenle reaksiyona girerek karbonmonoksit verirler.



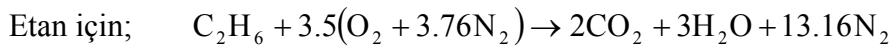
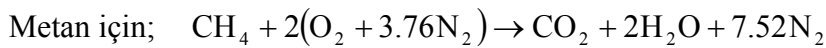
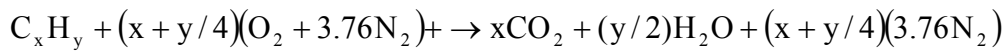
### 3.2. Yanma Hesabı

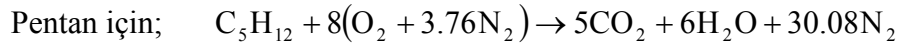
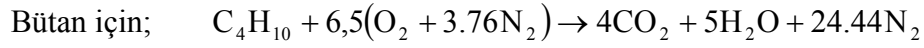
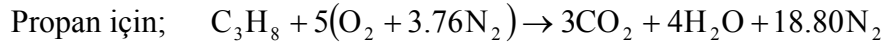
Tablo 3.1’de deneylerin yapıldığı tarihlerde BOTAŞ kurumundan alınan doğal gaz bileşimi görülmektedir.

**Tablo 3.1.** Deneylerin yapıldığı tarih itibari ile doğal gaz garanti özellikleri.

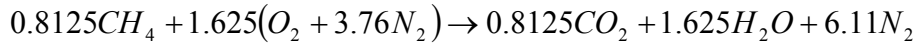
Bileşen	Mol Yüzdesi	% Dağılımı
Metan	% 85	% 81.25
Etan	% 9	% 8.60
Propan	% 1.8	% 1.72
Bütan	% 1.7	% 1.63
Pentan	% 0.8	% 0.76
Hidrojen	% 0	% 0
Kükürt	% 0	% 0
Oksijen	% 0.42	% 0.40
Karbondioksit	% 1.5	% 1.43
Azot	% 4.38	% 4.21
TOPLAM	104.60	100

Hidrokarbonların tam yanması halinde yanma reaksiyonu aşağıdaki gibi yazılır.

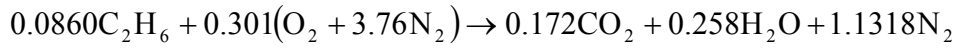




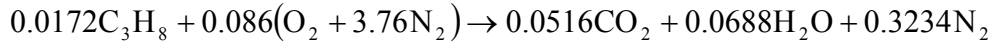
% 81.25 Metan için;



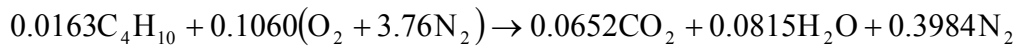
% 8.60 Etan için;



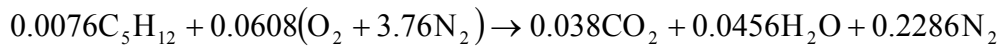
% 1.72 Propan için;



% 1.63 Bütan için;



% 0.76 Pentan için;



Yanma için gerekli Oksijen (O<sub>2</sub>) miktarı : Bileşenlerin yanması için gerekli oksijen miktarından yakıt içindeki oksijen miktarının çıkarılması ile bulunur.

$$(1.625 + 0.301 + 0.086 + 0.1060 + 0.0608) - 0.004 =$$

$$2.179 - 0.004 = 2.175 \text{ Nm}^3 / \text{Nm}^3$$

$$\text{Teorik yakma havası} = v_{h_0} = \frac{100}{21} [2.175] = 10.372 \text{ Nm}^3 / \text{Nm}^3$$

Hava fazlalık katsayısı  $\lambda$  ile gösterilecek olursa; Gerçek hava miktarı  $v_h = \lambda \cdot v_{h_0}$  formülü ile hesaplanır. Teorik duman miktarı ise yanma denklemlerinin sağ tarafındaki  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{SO}_2$  gazlarının toplamları ile bulunur. Burada azot toplamına yakıt bileşimindeki azot miktarının ilave edilmesi gerekir.

Teorik özgül duman miktarı:

$$v_{g_0} = 1.1395\text{CO}_2 + 2.0789\text{H}_2\text{O} + 8.2341\text{N}_2 + 0.065\text{SO}_2 = 11.455 \text{ Nm}^3 / \text{Nm}^3$$

Gerçek duman miktarı =  $v_g = v_{g_0} + (\lambda - 1)v_{h_0}$  formülü ile hesaplanır.

Yakıtın alt ısı değer hesabı :

$$H_u = 0.8125 \times 8560 + 0.0860 \times 15370 + 0.0172 \times 21800 + 0.0163 \times 28354 + 0.0076 \times 34899 = 9331 \text{ kcal} / \text{Nm}^3 \quad (\text{Onat, 1969})$$

Yakıtın kapalı formülünün bulunması : Yakıttaki bütün karbon (C) ve hidrojen (H) atomlarının hesaplanması ile bulunur (Borat, 1983).

$$C : 0.8125 \times 1 (\text{CH}_4) + 0.0860 \times 2 (\text{C}_2\text{H}_6) + 0.0172 \times 3 (\text{C}_3\text{H}_8) + 0.0163 \times 4 (\text{C}_4\text{H}_{10}) \\ + 0.0076 \times 5 (\text{C}_5\text{H}_{12}) = 1.139$$

$$H : 0.8125 \times 4 (\text{CH}_4) + 0.0860 \times 6 (\text{C}_2\text{H}_6) + 0.0172 \times 8 (\text{C}_3\text{H}_8) + 0.0163 \times 10 (\text{C}_4\text{H}_{10}) \\ + 0.0076 \times 12 (\text{C}_5\text{H}_{12}) = 4.158$$

$\text{C}_{1.1257}\text{H}_{3.969}$  elde edilir. Bu durumda bu doğal gaz bileşiminin metan ( $\text{CH}_4$ ) yakıtına çok yakın olduğu görülmektedir.

Bileşenlerin molekül ağırlıkları Tablo 3.2'de verilmiştir.

**Tablo 3.2.** Doğal gaz yakıtını oluşturan bileşenlerin molekül ağırlıkları.

Bileşen	MA (kg/kmol)
$\text{CH}_4$	16
$\text{C}_2\text{H}_6$	30
$\text{C}_3\text{H}_8$	44
$\text{C}_4\text{H}_{10}$	58
$\text{C}_5\text{H}_{12}$	72
$\text{CO}_2$	44
$\text{O}_2$	32
$\text{N}_2$	28
S	32
$\text{SO}_2$	64
$\text{H}_2\text{O}$	18

$$\text{MA}_{\text{YAKIT}} = \sum_i n_i \text{MA}_i = (0.8125 \times 16) + (0.0860 \times 30) + (0.0172 \times 44) + (0.0163 \times 58) + \\ (0.0076 \times 72) + (0.0143 \times 44) + (0.0040 \times 32) + (0.0419 \times 28) \\ = 19.76 \text{ kg/kmol}$$

Ürünlerin molar toplamı;  $n_T = 1.1395CO_2 + 2.0789H_2O + 8.2341N_2 = 11.455 \text{ kmol}$

Ürünlerin mol oranları;

$$n_{CO_2} = \frac{1.1395}{11.455} = 0.10$$

$$n_{H_2O} = \frac{2.0789}{11.455} = 0.18$$

$$n_{N_2} = \frac{8.2341}{11.455} = 0.72$$

Ürünlerin molekül ağırlığı,

$$MA_{ÜRÜNLER} = (0.100 \times 44) + (0.18 \times 18) + (0.72 \times 28) = 27.8 \text{ kg/kmol}$$

$$\text{Yakıttaki azot miktarı (kütle kesri)}; m_{N_2} = \frac{n_{N_2} \cdot MA_{N_2}}{MA_{YAKIT}} = \frac{0.0419 \times 28}{19.76} = 0.059$$

### 3.3. Emisyon Oluşumu

Çevre kirliliği, günümüzün en önemli sorunlarından birisidir. Doğada karşılaşılan değişik kirlenme cinsleri arasında hava kirliliği, insanı en çok rahatsız eden kirliliktir. Tarihsel açıdan insanoğlunun ilk karşılaştığı kirlilik, hava kirliliği olup, bu hususta alınan ilk önlemler, yasaklamalar, kanun ve yönetmelikler hava kirliliği konusunda yapılmıştır. Endüstrinin hızlı gelişimi, hava kirliliğinin giderek önem kazanmasına neden olmuştur. Başlangıçta bölgesel olarak görülen birçok hava kirliliği

problemi, ozon tabakası, asit yağmurları, sera olayı gibi olayların ortaya çıkması ile uluslararası sorun haline gelmiştir. Özellikle son yıllarda yoğun sanayileşmenin olduğu bölgelerde ortaya çıkan hava kirliliğinin insan sağlığını ve çevre dengesinin bozulmasını tehdit etmesi nedeniyle, ulusal ve uluslararası düzeyde çeşitli önlemlerin alınmasını gerekli kılmıştır.

Tanım olarak hava kirliliği, havada katı, sıvı ve gaz şeklindeki yabancı maddelerin insan sağlığına, canlı hayatına ve ekolojik dengeye zararlı olabilecek derişiklik ve sürede bulunması olarak verilir. Hava kirliliğinin insanlar, hayvanlar, bitkiler ve cansız yapılar üzerine etki şekli farklı derecelerde olabilmektedir. Ayrıca bu etki yaş ve cinsiyete göre de değişebilmektedir. Etki açısından canlıların ve cansızların hava kirliliğine maruz kalma süresi önemli olup, bazı kirleticilerin etkisi uzun zaman sonra ortaya çıkabilirken, bazı kirleticiler etkisi ise kısa sürede önemli hasarlara neden olabilmektedir.

Hava kirliliğinin oluşumu ve çözümü çok sayıda mühendislik dalını yakından ilgilendirmektedir. Hava kirliliğinin daha başlangıçta oluşumu ve giderilmesi, özellikle makina ve tesisat mühendisliği açısından önem kazanmaktadır. Pratik açıdan bakıldığında, hava kirliliği konusunda çalışan makina ve tesisat mühendisleri esas olarak;

- Endüstriyel bir işlem için hava kirliliği yönetmelik ve kanunlarının öngördüğü koşulları gerçekleştirmek,
- Tozların çevrede bulunan canlılar, cihazlar, tesisatlar ve yapılar üzerine yaptığı olumsuz etkileri azaltmak,
- Çeşitli işlemler için gerekli olan temiz gaz veya havanın hazırlanmasını sağlamak,
- Yararlı madde, ısı veya enerji geri kazanmak,
- Yangın, patlama veya diğer tehlikeleri azaltmak,

fonksiyonlarından bir veya birkaçı için endüstriyel gaz temizleme tesisatları ile ilgilenirler (Akgüngör, 2000).

Emisyon sınır değerleri, yakıt ve emisyon cinsine bağlı olarak farklı referans oksijen hacimsel oranında verilmiştir. Bir kazandaki yanma sonucu açığa çıkan yanma gazları analizi kazanın bacasında yapılır. Farklı kazanlarda ve aynı kazanda farklı yanma şartlarında yanma sonu gazlarının bileşimi değişmektedir. Farklı gaz analiz sonuçlarında elde edilen emisyon değerlerinin karşılaştırılması için emisyonların aynı oksijen konsantrasyonu bazına getirilmesi gerekmektedir. Referans olarak seçilen oksijen konsantrasyon değeri yakıt ve emisyon cinsine göre değişmektedir. Analiz ile belirlenen bir emisyon değerini istenen referans oksijen konsantrasyonundaki değeri aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır;

$$E_{O_2 \text{ referans}} = \frac{21 - [O_2 \text{ referans}]}{21 - [O_2 \text{ ölçülen}]} \cdot E_{\text{llen}}$$

Burada,

$E_{O_2 \text{ referans}}$  = Referans oksijen hacimsel oranındaki emisyonun değeri.

$E_{\text{llen}}$  = Analiz sonucu baca gazları içinde ölçülen emisyonun değeri.

$[O_2 \text{ referans}]$  = Referans oksijen hacimsel oranı.

$[O_2 \text{ llen}]$  = Analiz sonucu baca gazları içinde ölçülen oksijenin değeri.

Emisyonlar çeşitli birimlerde verilebilir. En çok kullanılan birimler, ppm (milyonda tanecik sayısı), hacimsel oran ( $Nm^3$  bileşen/ $Nm^3$  gaz) ve  $mg/m^3$  olarak sıralanabilir. Bu birimler arasındaki dönüşüm Tablo 3.3'de verilmiştir (Akgüngör, 2000).

**Tablo 3.3.** Emisyonlar için birim dönüşüm tablosu

1 ppm	=	$10^{-6} Nm^3/Nm^3$
1 ppm CO	=	1.25 mg CO/ $m^3$
1 ppm NO	=	2.05 mg NO <sub>2</sub> / $m^3$
1 ppm NO	=	1.34 mg NO/ $m^3$
1 ppm SO <sub>2</sub>	=	2.93 mg SO <sub>2</sub> / $m^3$



Katı, sıvı ve gaz yakıtların yakılması ile açığa çıkan yanma sonu gazları toz, karbonmonoksit, azotoksitler ve kükürtdioksit emisyonlarını içerir. Yanmanın çevre kirliliği üzerindeki olumsuz etkilerinin azaltılması için çeşitli yönetmeliklerle emisyonlara sınır değerler getirilmiştir. Türkiye’de geçerli olan yönetmelik ‘Isınmadan Kaynaklanan Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği’ dir. Avrupa’da ülkeden ülkeye değişen farklı yönetmelikler mevcuttur. Almanya’da uygulanan yönetmelik ‘TA – Luft’ adını taşımaktadır. Tablo 3.4’de gaz yakıtlar için emisyon sınır değerleri verilmiştir (Isınmadan Kaynaklanan Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği, 2005)

**Tablo 3.4.** Azotoksit ( $\text{NO}_x$ ), Karbonmonoksit (CO), Hidrokarbon ( $\text{C}_x\text{H}_y$ ) Konsantrasyonu ve İslilik Derecesi (Isınmadan Kaynaklanan Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği, 2005)

İlgili Standart	Isıl Güç (kW)	Azotoksit ( $\text{NO}_x$ ) ( $\text{NO}_2$ olarak) (mg/kWh)	Karbonmonoksit (CO) (mg/kWh)	Azotoksit ( $\text{NO}_x$ ) ( $\text{NO}_2$ olarak) (ppm, % 3 $\text{O}_2$ )	Karbonmonoksit (CO) (ppm, % 3 $\text{O}_2$ )	
RAL-UZ 80*	$\text{IG} \leq 120$	70	60	34	48	
TS ** veya EN**	$70 < \text{IG} \leq 1000$	260	-	127	-	
	$30 < \text{IG} \leq 70$	Sınıf 1***	260	-	127	-
		Sınıf 2***	200	-	98	-
		Sınıf 3***	150	-	73	-
		Sınıf 4***	100	-	48	-

\*RAL-UZ 80 Mavi Melek, Fanlı Gaz yakıcılar, RAL-Uz 80 Haziran 2002

\*\* (TS ) Türk Standartları Enstitüsü ve (EN)\*\*Avrupa Birliğinin ilgili standartları

\*\*\* (Sınıf) TS ve EN’de belirtilen sınıflar

### 3.3.1. Azotoksit oluşumu

Azotoksitler, azot (N) ve oksijen (O) elementlerinin kimyasal bileşimleridir. Toplama kavram olan azotoksitler veya  $\text{NO}_x$ , genelde azotmonoksit (NO) ve azotdioksit ( $\text{NO}_2$ ) bileşenlerini içermektedir. Azotoksitler genel olarak evsel yakma sistemleri, kuvvet santralleri ve endüstriyel tesislerde gerçekleştirilen yanma işlemleri sonucunda

açığa çıkmaktadır. Yanma işleminde azotun hemen hemen tamamına yakını NO olmakta ve bunun sadece düşük bir miktarı (< % 10 hacimsel) NO<sub>2</sub>'ye okside olmaktadır. NO'nun kalan miktarı ilk başta atmosfer içerisinde oksijen ile reaksiyona girerek NO<sub>2</sub>'ye dönüşmekte ve NO<sub>2</sub> de nitrik asit oluşturmaktadır (Arısoy, 1995).

Azotoksitler farklı mekanizmalara göre sıcaklık, konsantrasyon, oyalanma süreleri ve yakıtın kalitesi gibi yanma şartlarına bağlı olarak oluşmaktadır. Azot, yakıt içerisinde organik bağlarla ve yanma havası içerisinde molekül (N<sub>2</sub>) olarak da bulunmaktadır.

Azotoksitlerin oluşum reaksiyonları literatürde dört temel başlık altında toplanmaktadır. Bunlar termik (ısı) NO, nitrozoksit mekanizması, ani (prompt) NO ve yakıt NO oluşumlarıdır (Turns, 2000).

#### **a- Termik (Isıl) NO oluşumu**

Termik (ısı) NO oluşumu azot bileşiklerini içermeyen temiz yakıtların yanmasında atmosferin azotunun oksidasyonu sonucunda oluşmakta ve genel olarak Zeldovich yada genişletilmiş Zeldovich mekanizması ile tanımlanmaktadır. Termik NO oluşumu, hem gaz yakıt hem de sıvı yakıt yakılmasında, uygun olmayan yanma şartlarında çok yüksek NO konsantrasyonlarına sebebiyet verebilen en önemli oluşum mekanizmasıdır. Termik NO Zeldovich mekanizması ile verilen aşağıdaki reaksiyonlara göre gerçekleşmektedir (Fenimore, 1964 and Turns, 1995).



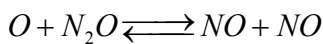
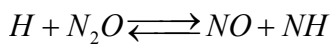
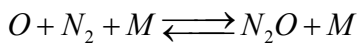
Gerek azot moleküllerinin gerekse oksijen moleküllerinin iki kollu bağlarının parçalanmaları için yüksek aktivasyon enerjileri gerektiğinden yukarıdaki reaksiyonlar özellikle 1300-1400 °C'nin üstlerinde önem kazanmaktadır. NO konsantrasyonu

sıcaklığa bağlı olarak üstel olarak artmaktadır ve adyabatik yanmada 1900 °C'nin üzerinde 3000 ve 4000 ppm arasında maksimum değerlere ulaşmaktadır. Gerçek yanma sistemlerinde adyabatik yanma şartları görülmesi de, bu sıcaklıklar yine de 1600 °C'nin üzerinde olduğundan NO oluşacaktır. Oksijenin az miktarda bulunduğu alev bölgelerinde ise bu reaksiyonlara,



reaksiyonu eklenmekte, böylelikle genişletilmiş Zeldovich mekanizması ifade edilmektedir. R.1 reaksiyonu için aktivasyon enerjisi büyüktür (319050 kJ/mol). Bu yüzden bu reaksiyon çok yüksek sıcaklık bağımlılığına sahiptir ve NO termik mekanizmayla oldukça yavaş oluşur. Bu nedenle termik NO genel olarak ileri alev bölgesinde olduğu düşünülür (Miller and Bowman, 1989). Termik NO oluşumuna etki eden diğer faktörlerde, oksijen molekülünün parçalanmasıyla açığa çıkan O atomu derişikliği ile kalma süreleri olarak tanımlanmaktadır. Yanma tekniğinde öncelikli hedef, düşük NO<sub>x</sub> oluşumlu bir yanma gerçekleştirebilmek için, alev sıcaklığının 1300°C'nin altına düşürülmesi olmalıdır.

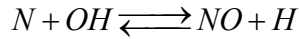
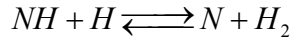
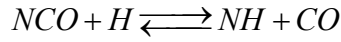
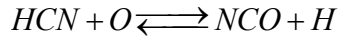
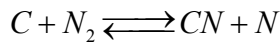
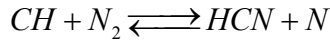
Nitrozoksit mekanizması N<sub>2</sub>-O ara mekanizması olarak da tanımlanmaktadır. Bu mekanizma ekivalans oranının 0.8'den düşük olduğu fakir karışımlarda ve düşük sıcaklık (< 800 °C) şartlarında önem arz etmektedir. Bu mekanizmanın reaksiyonları ise şöyledir:



### **b- Prompt (Ani) NO oluşumu**

Ani NO oluşumu Fenimore mekanizması ile tanımlanmaktadır. Ani NO, alev bölgesinde Zeldovich mekanizmasıyla NO oluşumundan önce hızlı bir şekilde oluşur.

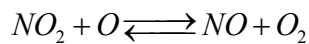
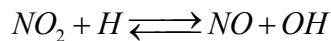
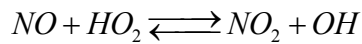
Bu nedenle Fenimore tarafından prompt ismi verilmiştir. Bu reaksiyonlarda termik NO oluşum reaksiyonuna göre daha az ısıya ihtiyaç vardır. Fenimore mekanizmasının genel çerçevesi hidrokarbon radikallerinin amin yada siyanid bileşikleri oluşturması için moleküler azot ile reaksiyona girmesidir. Bu amin (NH) ve siyanid (HCN) bileşikleri ara bileşenlere dönüşerek sonuçta NO oluştururlar (Arısoy ve Çelik, 1995).



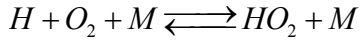
### c- Yakıtsal NO

Fosil yakacakların yakılması sonucu ortaya çıkan azotoksitlerin bir başka temel kaynağı da yakıttaki azot miktarıdır. Yakıt NO olarak nitelendirilen bu durum özellikle yapısında ağırlıkça % 0.5 –2.0 oranlarında azot içeren kömür yada kömür türevi yakıtlar için önem kazanmaktadır. Yakıt içindeki azotun hızlı bir şekilde hidrojen siyanide (HCN) ve amonyağa (NH<sub>3</sub>) dönüşmesiyle başlamaktadır. Bundan sonraki adımlar prompt mekanizması ile aynıdır (Arısoy ve Çelik, 1995).

Atmosferde azotoksit azotdioksite dönüşür. Bu da asit yağmurlarının üretiminde ve fotokimyasal duman oluşumunda çok önemlidir. Bir çok yanma prosesi önemli miktarda azotoksitlerin toplam oranlarını (NO<sub>x</sub> = NO + NO<sub>2</sub>) çevreye salıvermektedir. Atmosfere salınan yanma ürünlerinin NO<sub>2</sub> oluşturmasından sorumlu temel reaksiyonlar;



Burada HO<sub>2</sub> radikali bir üçüncü cisim reaksiyonuyla oluşur.

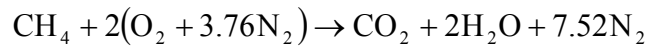


HO<sub>2</sub> radikalleri düşük sıcaklık bölgelerinde oluşur. Bundan dolayı NO<sub>2</sub> oluşumu NO molekülleri yüksek sıcaklık bölgelerinden yayındıkları ya da HO<sub>2</sub> zengin bölgelerine akışkan karışımı ile iletildiklerinde oluşur.

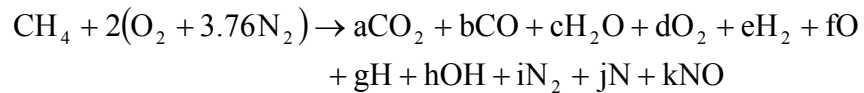
Azotoksitler canlılar için tehlikeli emisyonlar olup asit yağmurlarını oluşturduklarından ve fotokimyasal sis olarak bilinen olayın nedeni oldukları için önemli hava kirleticilerinden kabul edilmektedir. Azotmonoksit ve azotdioksit yüksek konsantrasyonlarda (> 50 ppm) zehirleyici ve öldürücü etki gösterirler. Atmosferdeki konsantrasyonları bu seviyenin çok altında olduğundan esas olarak akciğer ve solunum sistemi üzerinde etkileri vardır (Özdoğan, 1998).

### 3.3.1.1. Metan yanmasında azotoksit oluşumunun hesaplanması

Metan ve havadan oluşan bir karışımın stokiometrik şartlarda teorik yanmasında oluşan reaksiyon denklemi aşağıdaki gibidir.



Yanma sonu ürünlerinin denge karışımında yukarıdaki ürünlere ilave olarak CO, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, OH, NO, H<sub>2</sub>, H, O ve NO bileşenlerinden oluştuğu kabulü ile;



reaksiyon denklemi oluşur.

Hava fazlalık katsayısının 1 değerinde karışanların mol miktarlarını (a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k) bulmak için kütle korunumu ilkesi uygulanarak mol dengesi denklemleri yazılabilir. Bunlar;

$$\text{C dengesi için; } a + b = 1$$

$$\text{O}_2 \text{ dengesi için; } 2a + b + c + 2d + f + h + k = 4$$

$$\text{H}_2 \text{ dengesi için; } 2c + h + 2d + 2e + g = 4$$

$$\text{N}_2 \text{ dengesi için; } 2i + j + k = 15.04$$

Burada  $\text{O}_2$  ve  $\text{N}_2$  dengesi için yazılan denklemlerde eşitliğin sağ tarafı değişik hava fazlalık katsayılarında farklı değerler alır.

Kimyasal reaksiyona giren bir sistem, belirli bir sıcaklık ve basınçta, Gibbs fonksiyonu minimum değerine eriştiği zaman kimyasal dengeye ulaşır. Kimyasal reaksiyona giren bir sistemin denge karışımında karışanların mol miktarlarını belirlemek için, bilinmeyen sayısı kadar denklem olması gerekir. Burada 11 adet bileşenin mol miktarlarının bulunması için bu dört adet denklem yeterli değildir. Gerekli olan denklemler  $K_p$  (denge sabiti) bağıntılarından elde edilir. Bu bağıntılar reaksiyonlarla birlikte aşağıda verilmiştir.

$$\text{CO}_2 \leftrightarrow \text{CO} + \frac{1}{2} \text{O}_2, \quad K_{p1} = \frac{n_{\text{CO}}^{v_{\text{CO}}} \cdot n_{\text{O}_2}^{v_{\text{O}_2}}}{n_{\text{CO}_2}^{v_{\text{CO}_2}}} \left( \frac{P}{n_{\text{toplamlam}}} \right)^{v_{\text{CO}} + v_{\text{O}_2} - v_{\text{CO}_2}}$$

$$\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2, \quad K_{p2} = \frac{n_{\text{H}_2}^{v_{\text{H}_2}} \cdot n_{\text{O}_2}^{v_{\text{O}_2}}}{n_{\text{H}_2\text{O}}^{v_{\text{H}_2\text{O}}}} \left( \frac{P}{n_{\text{toplamlam}}} \right)^{v_{\text{H}_2} + v_{\text{O}_2} - v_{\text{H}_2\text{O}}}$$

$$\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \frac{1}{2}\text{H}_2 + \text{OH} \ , \quad K_{p3} = \frac{n_{\text{OH}}^{v_{\text{OH}}} \cdot n_{\text{H}_2}^{v_{\text{H}_2}}}{n_{\text{H}_2\text{O}}^{v_{\text{H}_2\text{O}}}} \left( \frac{\text{P}}{n_{\text{toplaml}}} \right)^{v_{\text{OH}}+v_{\text{H}_2}-v_{\text{H}_2\text{O}}}$$

$$\text{H}_2 \leftrightarrow 2\text{H} \ , \quad K_{p4} = \frac{n_{\text{H}}^{v_{\text{H}}}}{n_{\text{H}_2}^{v_{\text{H}_2}}} \left( \frac{\text{P}}{n_{\text{toplaml}}} \right)^{v_{\text{H}}-v_{\text{H}_2}}$$

$$\text{O}_2 \leftrightarrow 2\text{O} \ , \quad K_{p5} = \frac{n_{\text{O}}^{v_{\text{O}}}}{n_{\text{O}_2}^{v_{\text{O}_2}}} \left( \frac{\text{P}}{n_{\text{toplaml}}} \right)^{v_{\text{O}}-v_{\text{O}_2}}$$

$$\text{N}_2 \leftrightarrow 2\text{N} \ , \quad K_{p6} = \frac{n_{\text{N}}^{v_{\text{N}}}}{n_{\text{N}_2}^{v_{\text{N}_2}}} \left( \frac{\text{P}}{n_{\text{toplaml}}} \right)^{v_{\text{N}}-v_{\text{N}_2}}$$

$$\frac{1}{2}\text{N}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \leftrightarrow \text{NO} \ , \quad K_{p7} = \frac{n_{\text{NO}}^{v_{\text{NO}}}}{n_{\text{N}_2}^{v_{\text{N}_2}} \cdot n_{\text{O}_2}^{v_{\text{O}_2}}} \left( \frac{\text{P}}{n_{\text{toplaml}}} \right)^{v_{\text{NO}}-v_{\text{N}_2}-v_{\text{O}_2}}$$

$K_p$  denge sabiti bağıntıları, bileşenlerin mol miktarlarını simgeleyen harfler cinsinden aşağıdaki gibi yazılır;

$$K_{p1} = \frac{b \cdot d^{1/2}}{a} \left( \frac{\text{P}}{n_{\text{toplaml}}} \right)^{1/2}$$

$$K_{p2} = \frac{e \cdot d^{1/2}}{c} \left( \frac{\text{P}}{n_{\text{toplaml}}} \right)^{1/2}$$

$$K_{p3} = \frac{e^{1/2} \cdot h}{c} \left( \frac{\text{P}}{n_{\text{toplaml}}} \right)^{1/2}$$

$$K_{p4} = \frac{g^2}{e} \left( \frac{P}{n_{\text{toplama}}}} \right)$$

$$K_{p5} = \frac{f^2}{d} \left( \frac{P}{n_{\text{toplama}}}} \right)$$

$$K_{p6} = \frac{j^2}{i} \left( \frac{P}{n_{\text{toplama}}}} \right)$$

$$K_{p7} = \frac{k}{i^{1/2} \cdot d^{1/2}}$$

Burada  $n_{\text{toplama}} = a + b + c + d + e + f + g + h + i + j + k$  olup, P basınç değeri 1 atm. alınmıştır.

Denge sabiti değeri değişik sıcaklık değeri için termodinamik tablolardan elde edilebilir. (Çengel ve Boles, 1994)

Örneğin 1000 K sıcaklık için;  $K_p$  değeri

$$\ln K_{p1} = -23.529,$$

$$\ln K_{p2} = -23.163,$$

$$\ln K_{p3} = -26.034,$$

$$\ln K_{p4} = -39.803,$$

$$\ln K_{p5} = -45.150,$$

$$\ln K_{p6} = -99.127,$$

$$\ln K_{p7} = -9.388$$

olarak okunur.  $K_p$  değeri;

$$K_{p1} = 6.046 \cdot 10^{-11},$$

$$K_{p2} = 8.718 \cdot 10^{-11},$$



$$\begin{aligned}
K_{p3} &= 4.938 \cdot 10^{-12} \\
K_{p4} &= 5.173 \cdot 10^{-18} , \\
K_{p5} &= 2.464 \cdot 10^{-20} , \\
K_{p6} &= 8.906 \cdot 10^{-44} , \\
K_{p7} &= 8.372 \cdot 10^{-05} \quad \text{olarak bulunur.}
\end{aligned}$$

Hava fazlalık katsayısının 1 değeri ve 1000 K sıcaklık için tüm denklemler aşağıdaki gibi yazılır;

$$a + b = 1$$

$$2a + b + c + 2d + f + h + k = 4$$

$$2c + h + 2d + 2e + g = 4$$

$$2i + j + k = 15.04$$

$$K_{p1} = \frac{b \cdot d^{1/2}}{a} \left( \frac{P}{n_{\text{toplama}}} \right)^{1/2} = 6.046 \cdot 10^{-11} ,$$

$$K_{p2} = \frac{e \cdot d^{1/2}}{c} \left( \frac{P}{n_{\text{toplama}}} \right)^{1/2} = 8.718 \cdot 10^{-11} ,$$

$$K_{p3} = \frac{e^{1/2} \cdot h}{c} \left( \frac{P}{n_{\text{toplama}}} \right)^{1/2} = 4.938 \cdot 10^{-12}$$

$$K_{p4} = \frac{g^2}{e} \left( \frac{P}{n_{\text{toplama}}} \right) = 5.173 \cdot 10^{-18}$$

$$K_{p5} = \frac{f^2}{d} \left( \frac{P}{n_{\text{toplam}}} \right) = 2.464 \cdot 10^{-20},$$

$$K_{p6} = \frac{j^2}{i} \left( \frac{P}{n_{\text{toplam}}} \right) = 8.906 \cdot 10^{-44},$$

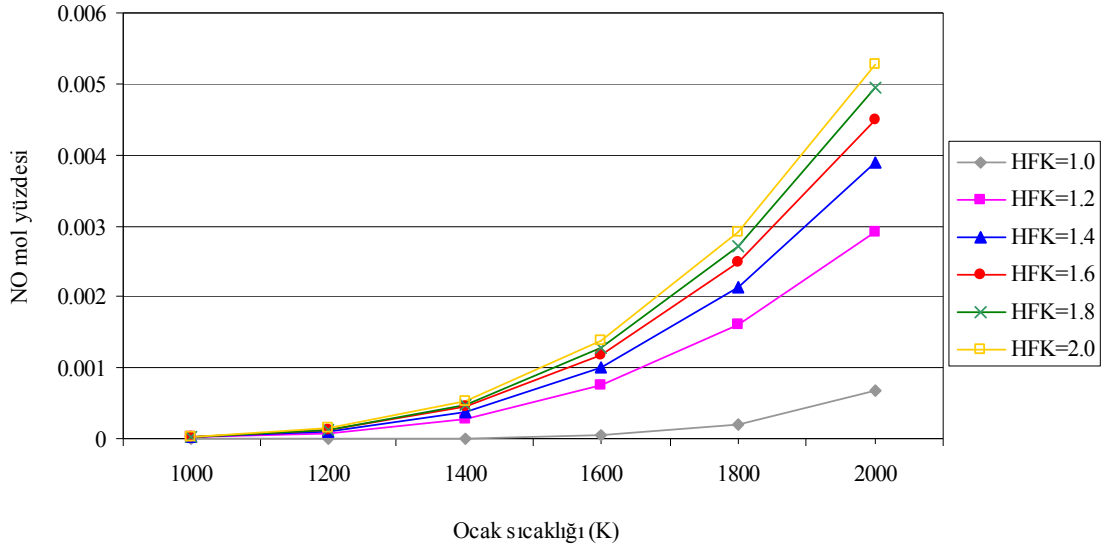
$$K_{p7} = \frac{k}{i^{1/2} \cdot d^{1/2}} = 8.372 \cdot 10^{-05}$$

Bu 11 bilinmeyenli 11 adet denklem takımı bir bilgisayar programı ile çözdürülerek bilinmeyenler bulunmuştur (Mathematica 5.0). Burada sadece azotmonoksitin (NO) mol miktarını simgeleyen k bilinmeyeninin değerleri verilmiştir. Metan yanmasında yanma sonucu azotmonoksit (NO) yanında azotdioksitlerde (NO<sub>2</sub>) oluşmaktadır. Bunların birlikte toplamı azotoksit (NO<sub>x</sub>) adını almaktadır. Fakat burada NO<sub>2</sub> için çözüm yapılmamıştır. Aşağıdaki Tablo 3.5'de değişik hava fazlalık katsayılarında ve sıcaklıklarda hesaplanan NO değerleri verilmiştir.

**Tablo 3.5.** Metan yanmasında azotmonoksit oluşumunun mol oranı cinsinden hesaplanan değerleri.

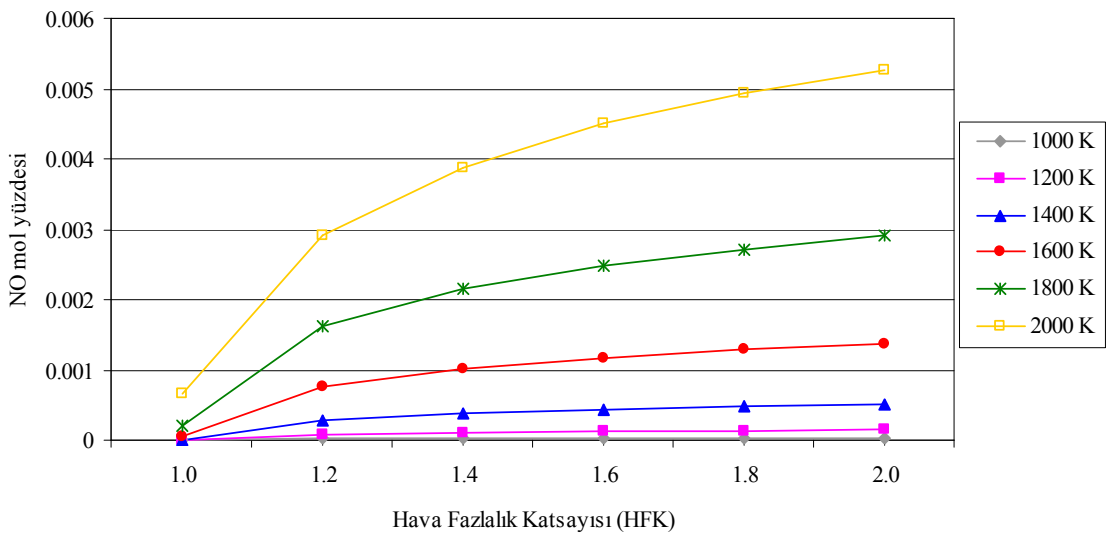
HFK	Alev Sıcaklıkları (K)					
	1000	1200	1400	1600	1800	2000
<b>1.0</b>	1.57155x10 <sup>-7</sup>	5.43795x10 <sup>-6</sup>	0.0000697212	0.000478458	0.00213553	0.00704524
<b>1.2</b>	0.000159005	0.00097971	0.00358584	0.00947784	0.0200378	0.0363352
<b>1.4</b>	0.000242889	0.00149674	0.00548039	0.0144989	0.0306997	0.055698
<b>1.6</b>	0.000318019	0.0019598	0.00717704	0.0189948	0.0402468	0.0730701
<b>1.8</b>	0.000389494	0.00240033	0.00879107	0.0232713	0.0493274	0.0896004
<b>2.0</b>	0.000459025	0.00282887	0.0103611	0.0274312	0.0581598	0.105681

NO için hesaplanan mol oranı değerleri mol yüzdesi cinsinden farklı HFK değerleri için değişik ocak sıcaklıklarında Şekil 3.1'de verilmiştir. NO oluşumunun sıcaklığa bağlı olarak artışı özellikle 1400 K ve 1600 K sıcaklıklarından sonra daha da belirgin olmaktadır.



**Şekil 3.1.** Farklı HFK değerlerinde farklı ocak sıcaklıkları için NO değişimi.

Farklı ocak sıcaklıklarında farklı hava fazlalık katsayısı değerleri için NO oluşumu Şekil 3.2’de verilmiştir. NO oluşumunu arttıran diğer bir parametre hava fazlalık katsayısıdır. Yapılan bu hesaplar hava fazlalık katsayısının artan değerleri ile NO oluşumunun da arttığını göstermiştir. Artan hava oranı her ne kadar soğuma etkisi oluştursa da reaksiyona giren azot ve oksijen miktarının artması NO oluşumunu tetiklemektedir.

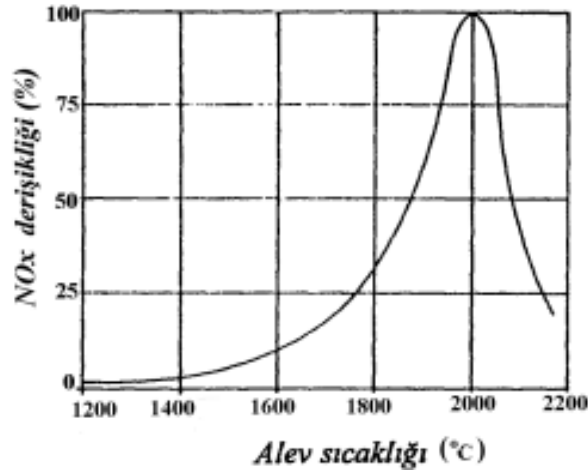


**Şekil 3.2.** Farklı ocak sıcaklıklarında farklı HFK değerleri için NO değişimi.

### 3.3.1.2. Azotoksit oluşumunu azaltma teknikleri

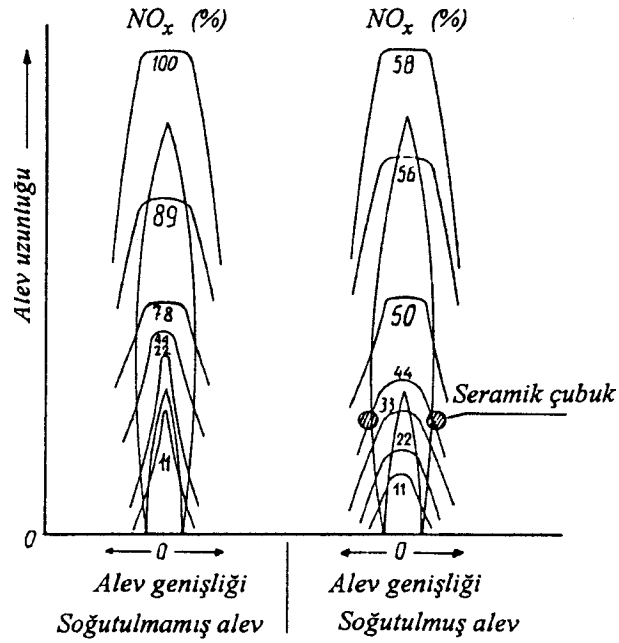
Azotoksit emisyonlarının azaltılmasına yönelik alınan bazı tedbirler ve geliştirilen bazı teknolojiler aşağıda özetlenmiştir.

**Alev sıcaklığının düşürülmesi** : Alev sıcaklığının azaltılması termik NO oluşumuna etkiyen en önemli parametredir. Alev sıcaklığının azaltılması için düşük yanma havası sıcaklığı, yanma odasının dizaynı, mevcut yanma odasındaki düzenlemeler, kademeli hava ve yakıt besleme, duman gazlarının geri beslenmesi, su-buhar püskürtülmesi ve yanma odasının ısı geçiş yüzeylerinin artırılması gibi önlemler alınmaktadır (Hepbaşlı, 1991). Şekil 3.3'de ısıl NO oluşumun alev sıcaklığına göre değişimi görülmektedir. 1300°C'nin altında ısıl NO oluşumu belirgin bir şekilde azalmaktadır.



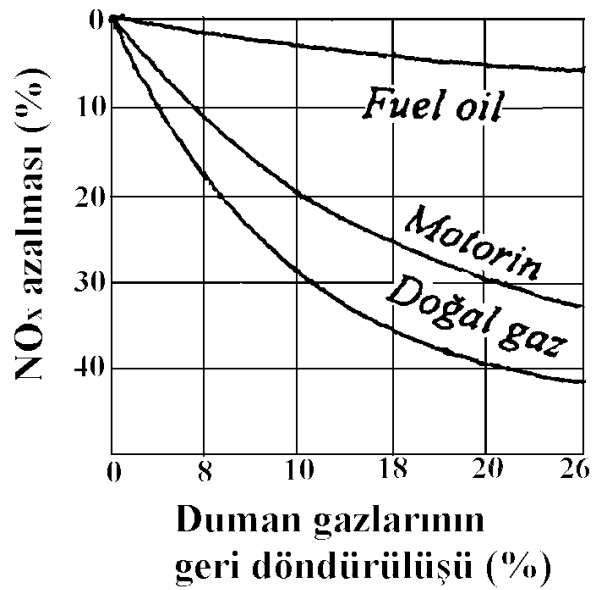
Şekil 3.3. Isıl NO oluşumunun alev sıcaklığına göre değişimi.

Şekil 3.4'de gösterildiği gibi, üflemlerli veya atmosferik brülörlü sistem içine seramik elemanlar yerleştirilerek, alevin soğuması sağlandığından NO<sub>x</sub> emisyonları % 40 oranlarında azaltılmaktadır (Yetsan, 1995).



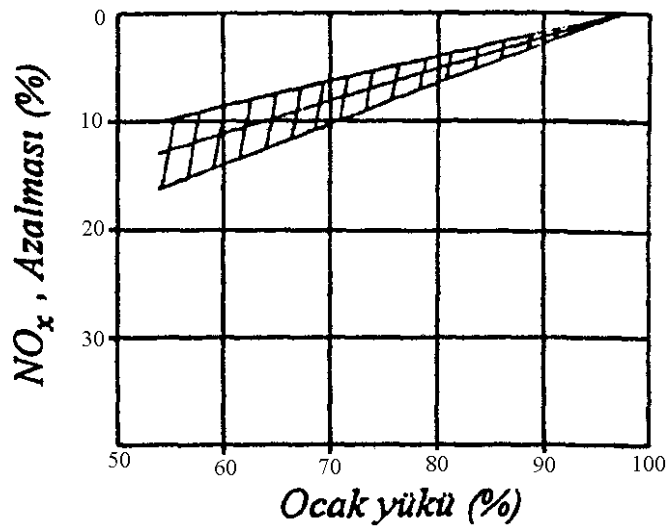
Şekil 3.4. Alevin seramik çubuklarla soğutulması.

Duman gazı geri beslemesi, yanma bölgesindeki inert gaz konsantrasyonunun artmasını sağlayarak gerek  $O_2$  kısmi basıncını gerekse de alev sıcaklığını azaltır. Duman gazı resirkülasyonunun  $NO_x$  azaltımı ile ilişkisi Şekil 3.5'de verilmiştir (Yetsan, 1995).



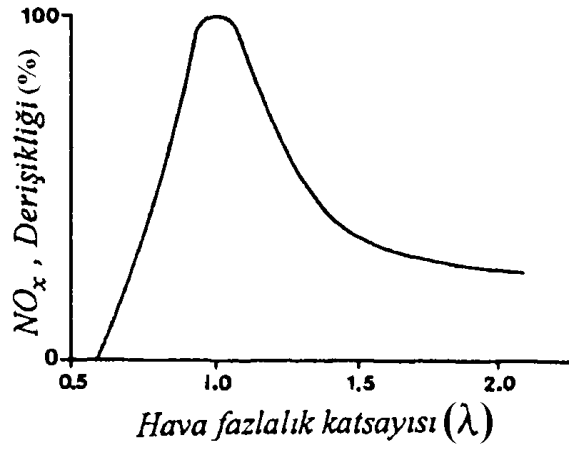
Şekil 3.5. Duman gazı resirkülasyonunun  $NO_x$  azaltımına etkisi.

Duman gazı resirkülasyonu çeşitli şekillerde yapılabilmektedir. Duman gazının brülör hacminden alevin köküne kadar olan besleme iç duman gazı geri beslemesi olarak adlandırılır. Yanma odasındaki uygun düzenekler yardımıyla duman gazlarının geri akışı kuvvetlendirilir. Diğer bir duman gazı geri beslemesinde, duman gazlarının bir kısmı ön duman sandığından alınır ve yakma havasıyla homojen olarak karıştırılır. Duman gazının beslenmesi işlemi; iki kademeli enjektörle alev köküne iletilerek, yakma havası fanının emme tarafına verilerek, ayrı bir resirkülasyon fanıyla iletilerek veya bir aspiratör yardımıyla da yapılabilmektedir. Yanma bölgesine su veya buhar püskürtülmesinin duman gazı resirkülasyonuna benzer fiziksel etkisi vardır. Hava ve yakıtın kademelendirilmesinden, az ve fazla miktarlarda havanın yanma bölgelerine dağılımı anlaşılır. Bu önlemin amacı, toplam hava fazlalığının korunmasıyla brülördeki yakma havası ihtiyacını azaltmak ve geri kalan yakma havasını diğer yerlerde yanmayanların emniyete alınması için ilave nozullarla beslemektir. Hava ve yakıt kademelendirilmesinin prensipleri düşük  $\text{NO}_x$  brülörlerinin gelişiminde ana parametredir. Yüksek bir yanma odası yükünün (maksimum brülör ısı kapasitesinin yanma odası hacmine oranı,  $\text{MW}/\text{m}^3$ ),  $\text{NO}_x$  oluşumu fazla olan yanma odası ve yakma havası sıcaklıklarının artmasına yol açar. Bundan dolayı yanma odası yüklerinde, yüksek sıcaklık bölgesinde oyalanma zamanını mümkün olduğunca az tutmak büyük önem taşır. Bunun için brülörde konstrüktif önlemler alınır ve yanma odası dizaynı yapılır. Şekil 3.6'da ocak yükünün azaltılması ile  $\text{NO}_x$  emisyonlarının azaldığı görülmektedir.



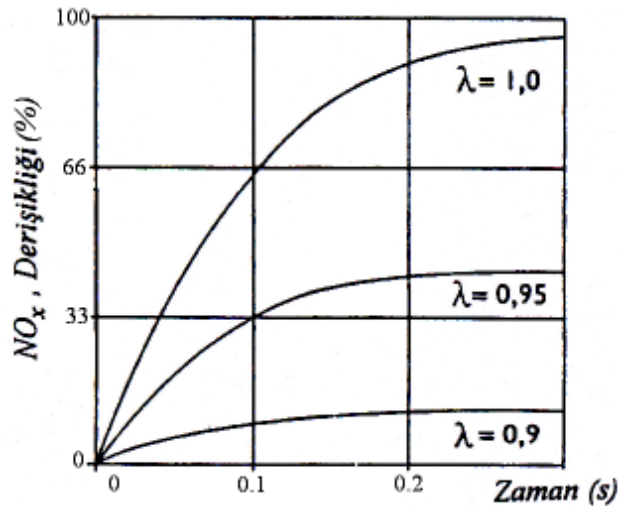
Şekil 3.6. Ocak yükünün  $\text{NO}_x$  emisyonlarına etkisi.

**Yanma bölgesindeki  $O_2$  kısmi basıncının düşürülmesi** : Bu tüm  $NO_x$  oluşum mekanizmalarını etkileyen bir parametredir. Düşük hava fazlalık katsayısı, duman gazı geri beslemesi, su-buhar püskürtülmesi, havanın ve yakıtın kademelendirilmesi gibi önlemler alınmaktadır. Hava fazlalık katsayısının arttırılması ile yanma odasına gönderilecek oksijen miktarı da artacağından buna paralel olarak da  $NO_x$  oluşumu artacaktır.  $NO_x$  oluşumunun hava fazlalık katsayısı ile ilişkisi Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.7.  $NO_x$  emisyonlarının hava fazlalık katsayısı ile değişimi.

**Yüksek sıcaklıklarda kalma süresinin azaltılması** : Bu sürenin fazla olması termik  $NO$  oluşumunu olumsuz etkiler. Kademeli hava beslenmesi, yanma odasının dizaynı gibi önlemler alınmaktadır. Şekil 3.8’de yanma ürünlerinin oyalanma süresinin  $NO_x$  emisyonuna etkisi görülmektedir (Yetsan, 1995).

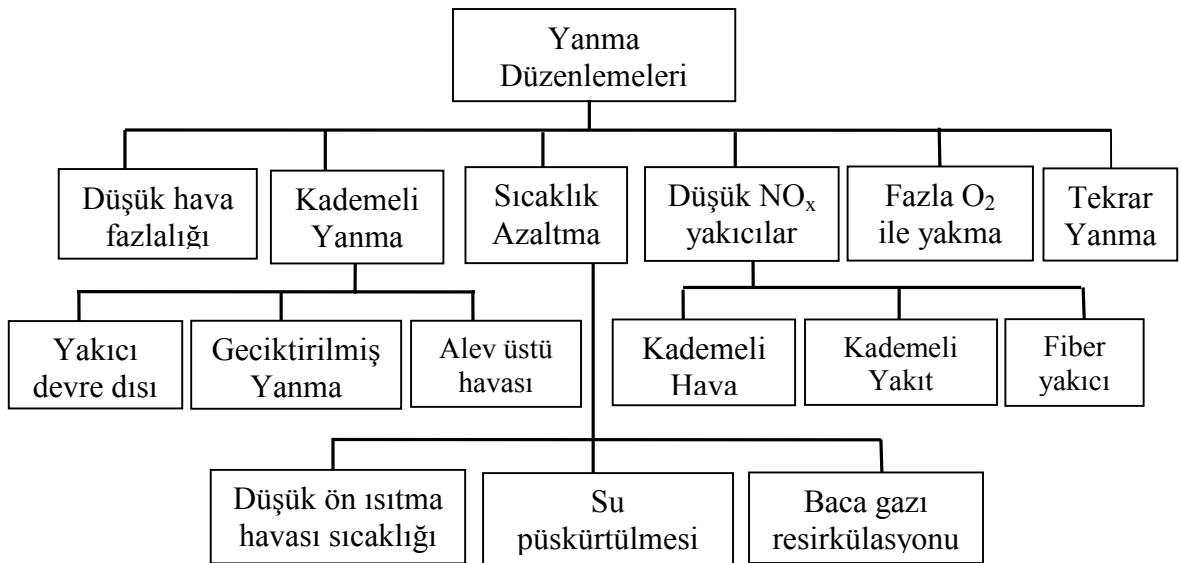


Şekil 3.8. Yüksek sıcaklıkta oyalanma süresinin  $NO_x$  emisyonlarına etkisi

**Düşük azot içeren yakıtlar kullanmak :** Bu yakıt NO oluşumunu azaltan en önemli parametredir. Bunun için düşük azot içeren yakıtlar kullanılması gerekmektedir.

Turns gaz yanması esnasında oluşan azotoksitlerin azaltılması çalışmalarını aşağıdaki Şekil 3.9'da görüldüğü gibi gruplandırmıştır. Bu gruplama çalışmaları aşağıdaki alt başlıklarda özetlenmiştir (Turns, 2000).

**Düşük fazla hava :** Isıl NO<sub>x</sub> emisyonları stokiometrik ekivalans oranlarından daha az fakirlikte en yüksek seviyededir. Bu NO<sub>x</sub> azaltma tekniğinde beslenen hava azaltılır. Fakat bu metot ile sadece NO<sub>x</sub> azaltılır çünkü aşırı hava miktarının azaltılması CO emisyonlarını yükseltir.



**Şekil 3.9.** Gaz yakıtlı endüstriyel yakma sistemleri için NO<sub>x</sub> kontrol teknolojileri.

**Kademeli yanma :** Birden çok yakıcılı bir sistemde zengin-fakir kademeli yanması oluşturmak için mevcut yakıcıların çalışmasını düzenlemek gerekir. Akışa zıt yöndeki yakıcılar zengin çalışacak, akış yönündeki yakıcılar da sadece hava sağlayacak şekilde ayarlanır. Bazı yakıcıların zengin ve biraz fakir çalışacak ya da bütün yakıcıların zengin çalışacak şekilde akış yönündeki portlardan ilave hava verilerek kademeli yanma sağlanır. Bu teknikle % 10- 40 arasında NO<sub>x</sub> azaltılır.



**Sıcaklık azaltma :** Çoğu yanma sisteminde yanma havası ısı verimi iyileştirmek için sıcak egzoz gazları ile ön ısıtılır. Bu şekilde yanma sıcaklığı azaltılır ve dolayısıyla  $\text{NO}_x$  oluşumu azalır. Su püskürtülmesi alev sıcaklığını azaltır, çünkü yanma enerjisi buharlaşmak için kullanılır. Su püskürtülmesi kavram olarak baca gazı resirkülasyonu ve seyreltme etkisi ile aynıdır. Baca gazı resirkülasyonunun etkisi hem miktarına hem de resirküle eden gazların sıcaklığına bağlıdır. Gaz ateşlemeli endüstriyel kazanlarda baca gazı resirkülasyonu ile yaklaşık olarak % 50- 85  $\text{NO}_x$  azaltılır.

**Düşük  $\text{NO}_x$  yakıcılar :** Düşük  $\text{NO}_x$  emisyonları sağlamak için yakıt ve havanın kademelendirilmesinde kullanılan yakıcılar dizayn edilir. Yakıt kademelendirilmesi bir fakir-zengin sıralı yanma prosesi oluşturur. Düşük  $\text{NO}_x$  yakıcıların diğer bir sınıfı fiber matriks yakıcılarıdır. Bu yakıcılar bir metal yada seramik fiber matriks içinde yada üzerinde ön karışımli yanmada kullanılır. Matriksden radyasyon ve iletimle ısı transferi sayesinde yanma sıcaklıkları oldukça düşüktür ve  $\text{NO}_x$  emisyonları düşüktür.

**Oksijen/gaz yanması :** Yanma sistemlerinde azot derişikliği yanma havasına oksijen ilavesiyle azaltılabilir. Yeterli büyüklükte  $\text{O}_2$  ilaveleri ile  $\text{NO}_x$  seviyeleri azaltılabilir. Eğer yanma odasına hava sızıntısı önlenebilirse saf  $\text{O}_2$  ile çalışma ideal olarak tüm ısı  $\text{NO}$  üretimini yok eder.

**Tekrar yanma :**  $\text{NO}_x$  kontrolünün bu metodunda toplam yakıtın yaklaşık % 15'i ana akış yönünde ilave edilir. Tekrar yanma bölgesi (ekivalans oranı  $\Phi > 1$ ) içinde hidrokarbon ve hidrokarbon ara reaksiyonları yolu ile  $\text{NO}_x$  azaltılır. Bu teknolojiyi kullanan yakma sistemlerinde  $\text{NO}_x$  yaklaşık % 60 azaltılır.

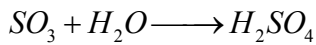
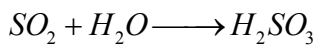
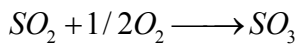
### 3.3.2. Karbonmonoksit oluşumu

Karbonmonoksit (CO); yetersiz hava, hava ve yakıt karışımının kötü olması veya yeterli büyüklükte boyutlandırılmamış yanma odası nedeniyle oluşan eksik yanma neticesinde meydana gelmektedir. Karbonmonoksit emisyonunun artması, genellikle brülörün yanlış ayarlanmasından veya hava eksikliğinden kaynaklanmaktadır. Yetersiz yanma ve yüksek karbonmonoksit oluşumunun bir diğer nedeni de çok düşük baca

çekişidir. Bu nedenle yanma odasının ve baca çekişinin ayarlanması önemlidir. Yanma gazlarının tam olarak ayarlanabilmesi için bazı atmosferik brülörlü kazanlarda yanma odasının yüksek yapılması bu amaca yönelik güzel bir örnektir. Bir başka yöntem hava-yakıt karışımının çok iyi sağlandığı ve alevin geniş yalama yüzeylerine ulaşmadan yakılarak ışınlı yolla ısı transferinin sağlandığı brülör kullanmaktır. Belli aralıklarda yakıcı bakımının yapılması, başka bir yakıt türü için imal edilen yakıcıların tercih edilmemesi, uygun baca kullanımı, yakıcıların sürekli devreye girip çıkmaları yerine modülasyonlu ve oransal olarak çalışması, birbirine uyumlu çalışacak ve gerekli test ve analizlerden geçirilmiş kazan ve brülör sistemlerinin seçimi CO emisyonlarını azaltmada takip edilen yöntemlerden bazılarıdır.

### 3.3.3. Kükürtdioksit oluşumu

Doğal gazın yapısında ve yanma sonucu oluşan atık gazlar içerisinde kükürtoksit mevcudiyeti kayda değer miktarda bulunmamaktadır. Kükürtdioksit, kükürt içeren yakıtların örneğin kömür veya sıvı yakıt yanmasında yakıtta bulunan kükürdün oksidasyonu ile oluşmaktadır. Yanmada oluşan su buharıyla kükürtdioksitin reaksiyona girmesi sonucunda ise agresif asitler meydana gelmektedir. Reaksiyonlar;



olarak gösterilebilir.  $H_2SO_4$  oldukça korozif ve çok kuvvetli bir asittir. Bu asitler atmosfere çıkmakta ve asit yağmurlarını oluşturan ana etken olarak görülmektedir.  $SO_3$  yanma gazları içinde çığ noktası sıcaklığını düşürmektedir. Bu da korozif bir etki yaptığından dolayı çıkış sıcaklığının belli bir değer altına indirilmesi istenmez.  $SO_x$  emisyonlarını azaltma yöntemleri, kükürt oranı az yakacak kullanılması, yakaktan kükürdün uzaklaştırılması, yanma odalarında kükürt giderme işlemleri ve baca gazında kükürt giderme işlemleridir. (Yılmaz, 2001).

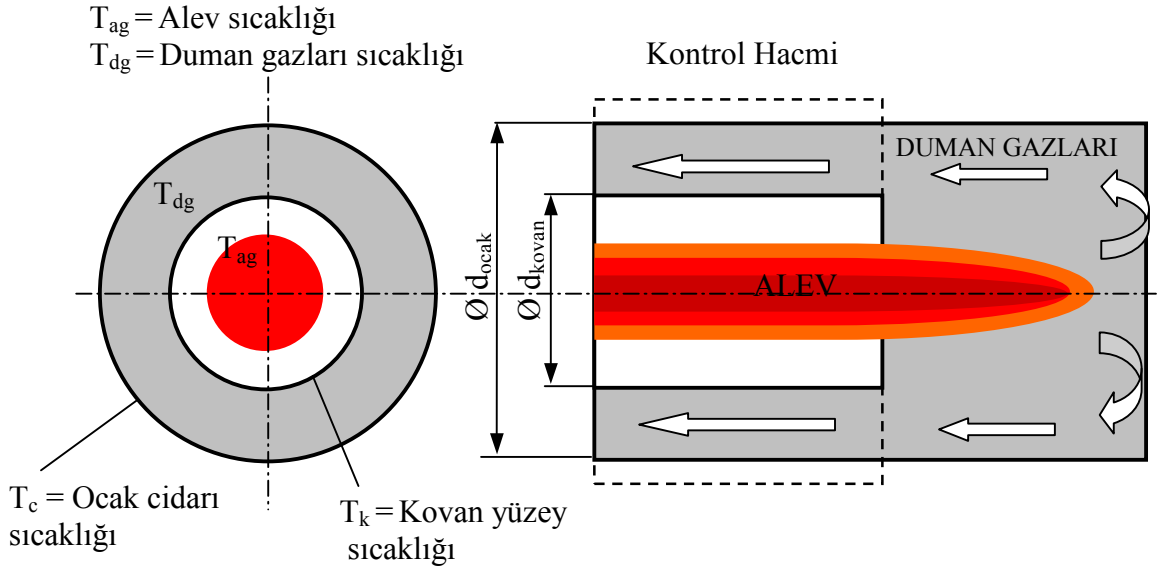
## 4. YANMA ODASINDA KATI YÜZEY IŞINIMI

### 4.1. Problemin Tanımı

Yapılan teorik hesaplamaların ve deneysel çalışmaların ışığı altında, gaz yakıtlı ocaklarda ışınlamı artırıcı katı yüzeylerden oluşan dolgu malzemeleri kullanıldığı zaman ocakta ısı geçişi artmakta ve ocak sıcaklığı da düşmektedir.

Bu bölümde ocağa kovan adı verilen dolgu malzemelerinin yerleştirilmesi halinde ocaktan duvar yüzeyine olan ışınlamla ısı transferi elektrik benzeşim metodu ile hesaplanmıştır. Kovanlar yüksek sıcaklığa dayanıklı kalınlığı 1 mm olan çelik sacdan imal edilmiş belirli çap ve uzunluklardaki silindirik malzemelerdir. Şekil 4.1’de alev geri dönüşlü bir kazanda seçilen kontrol hacmi için yapılacak olan ışınlamla ısı transferi hesabında bazı kabullerden yararlanılmıştır. Bu kabuller;

- Sürekli rejim.
- Taşınım ve iletimle ısı transferi ihmal edilmiştir.
- Işınım hesabı için ocağın kovan boyu kadar olan kısmı kontrol hacmi olarak seçilmiştir.
- Alev kovan içini tamamen doldurmakta ve sıcaklığı her noktada aynıdır.
- Duman gazları ise kovan ile ocak cidarı arasını tamamen doldurmakta ve sıcaklığı her noktada aynıdır. Gazlar hareketsiz kabul edilecektir.
- Kovan ve ocak ince cidarlıdır.
- Gazların gri cisim olduğu kabul edilecektir.  $\tau_g = (1 - \alpha_g) = (1 - \epsilon_g)$
- Ocak ağzından belli bir mesafede ocak içerisinde bulunan brülör namlusunun etkisi ihmal edilmiştir.



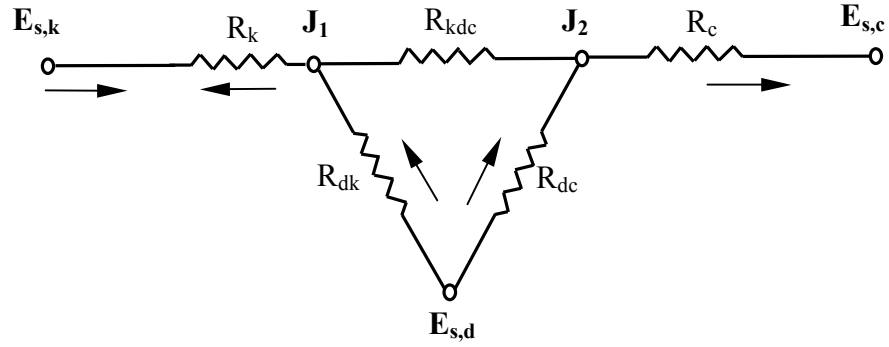
Şekil 4.1. Ocaktaki gaz ışınlım hesabı için seçilen kontrol hacmi.

Seçilen kontrol hacminde ışınlımı iki kısımda ele almak mümkündür. Birincisi kovan-duman gazları ve cidar arasındaki ışınlım ikincisi ise alev ile kovan arasındaki ışınlımdır.

## 4.2. Dolgu Malzemesi (Kovan) Kullanılması Durumunda Işınlımla Isı Transferi

### a) Kovan-duman gazları ve cidar arasında olan ışınlım

Kovan-duman gazları ve cidar arasında olan ışınlım için elektrik benzeşim aşağıdaki gibi elde edilir (Şekil 4.2). Alevden kovana olan ışınlım ise bu ısıl devrenin sol ucuna ilave edilecektir. Hesaplamalarda kullanılan alev sıcaklığı, duman gazı sıcaklığı değerleri EK-II'de verilen bir alev geri dönüşlü kazan için yapılan kazan ısıl hesapları bölümünden alınmıştır. Kovan yüzey sıcaklığı ise bu iki sıcaklık göz önünde bulundurularak kabul edilmiştir.



Şekil 4.2. Kovan-duman gazları ve cidar arasında olan ışıınım için ısıl devre.

Burada;

$E_{s,d}$  = Duman gazlarının ışıınım gücü

$E_{s,c}$  = Cidarın ışıınım gücü

$E_{s,k}$  = Kovanın ışıınım gücü

$R_k$  = Kovan ısıl direnci

$R_{dk}$  = Duman gazı kovan ısıl direnci

$R_{dc}$  = Duman gazı cidar ısıl direnç

$R_{kdc}$  = Kovan duman gazı ısıl direnç

$R_c$  = Cidar ısıl direnci

Bu dirençler aşağıdaki eşitliklerle ifade edilir.

$$R_k = \frac{1 - \varepsilon_k}{\varepsilon_k \cdot A_k},$$

$$R_c = \frac{1 - \varepsilon_c}{\varepsilon_c \cdot A_c},$$

$$R_{kdc} = \frac{1}{A_k \cdot F_{kc} (1 - \varepsilon_d)},$$

$$R_{dk} = \frac{1}{\varepsilon_d \cdot A_k \cdot F_{dk}}$$

$$R_{dc} = \frac{1}{\varepsilon_d \cdot A_c \cdot F_{dc}},$$

$\varepsilon$  = Işınım yayma oranı,  $A$  = Kesit alan ( $m^2$ ),  $F$  = Şekil faktörü

Burada  $\varepsilon$  değeri kovan ve cidar için 0.8 alınmıştır.

Duman gazları için ışınım yayma oranı ( $\varepsilon_d$ ) bulunması;

Eşeksenli iki boru olması durumunda eşdeğer tabaka kalınlığı  $L_e = 3.6 \frac{V}{A}$  olarak alınmaktadır. Ocak çapı 400 mm, kovan çapı 200 mm olduğuna göre birim boy için eşdeğer tabaka kalınlığı;

$$L_e = 3.6 \frac{(\pi/4)(d_o^2 - d_k^2)L}{\pi(d_o + d_k)L} = 0.9(d_o - d_k) = 0.9(0.4 - 0.2) = 0.18 \text{ m bulunur.}$$

$CO_2$  ve  $H_2O$  gazlarının kısmi basıncı,  $P_{CO_2} = 0.10$  bar ve  $P_{H_2O} = 0.18$  bar olduğuna göre; (Bölüm-3)

$$P_{CO_2} L_e = 0.1 \cdot 0.18 = 0.018 \text{ bar.m}$$

$$P_{H_2O} = 0.18 \cdot 0.18 = 0.032 \text{ bar.m}$$

Toplam basınç 1 bar olduğuna göre  $C_{H_2O}$  düzeltme katsayısı;  $(P_{H_2O} + P) / 2 = 0.587$  değerine göre  $C_{H_2O} = 1.1$  bulunur (Genceli, 2004).

Duman gazı sıcaklığının 900 °C kabulü ile  $\varepsilon'_{\text{H}_2\text{O}} = 0.068$ ,  $\varepsilon_{\text{CO}_2} = 0.068$  bulunur.

$$\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} = C_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \varepsilon'_{\text{H}_2\text{O}} = 0.075 \text{ elde edilir.}$$

$$\varepsilon_d = \varepsilon_{\text{CO}_2} + \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} - \Delta\varepsilon$$

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_{\text{CO}_2} \cdot \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} = 0.00508$$

$$\varepsilon_d = 0.068 + 0.075 - 0.00508 = 0.138 \text{ elde edilir.}$$

Dirençler birim boy için aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$R_k = \frac{1 - \varepsilon_k}{\varepsilon_k \cdot A_k} = \frac{1 - 0.8}{0.8 \cdot (\pi \cdot 0.2 \cdot 1)} = 0.398 \text{ m}^{-2}$$

$$R_c = \frac{1 - \varepsilon_c}{\varepsilon_c \cdot A_c} = \frac{1 - 0.8}{0.8 \cdot (\pi \cdot 0.4 \cdot 1)} = 0.199 \text{ m}^{-2}$$

$$R_{\text{kdc}} = \frac{1}{A_k \cdot F_{\text{kc}} (1 - \varepsilon_d)} = \frac{1}{(\pi \cdot 0.2 \cdot 1) \cdot 1 \cdot (1 - 0.138)} = 1.846 \text{ m}^{-2}$$

$$R_{\text{dk}} = \frac{1}{\varepsilon_d \cdot A_k \cdot F_{\text{dk}}} = \frac{1}{0.138 \cdot (\pi \cdot 0.2 \cdot 1) \cdot 1} = 11.53 \text{ m}^{-2}$$

$$R_{\text{dc}} = \frac{1}{\varepsilon_d \cdot A_c \cdot F_{\text{dc}}} = \frac{1}{0.138 \cdot (\pi \cdot 0.4 \cdot 1) \cdot 1} = 5.77 \text{ m}^{-2} \text{ elde edilir.}$$

Isıl devredeki potansiyelleri hesapla;

$$E_{\text{s,d}} = \sigma \cdot T_d^4 = 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot (900 + 273)^4 = 107343 \text{ W / m}^2$$

$$E_{\text{s,k}} = \sigma \cdot T_k^4 = 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot (600 + 273)^4 = 32934 \text{ W / m}^2$$

$$E_{\text{s,c}} = \sigma \cdot T_c^4 = 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot (90 + 273)^4 = 984 \text{ W / m}^2$$

Isıl devrede denge durumları için denklemler yazılırsa;

$$\frac{E_{s,k} - J_1}{R_k} + \frac{J_2 - J_1}{R_{kdc}} + \frac{E_{s,d} - J_1}{R_{dk}} = 0$$

$$\frac{E_{s,c} - J_2}{R_c} + \frac{J_1 - J_2}{R_{kdc}} + \frac{E_{s,d} - J_2}{R_{dc}} = 0$$

Denklemlerde sayısal değerler yerlerine konulursa;

$$\frac{32934 - J_1}{0.398} + \frac{J_2 - J_1}{1.846} + \frac{107343 - J_1}{11.53} = 0$$

$$\frac{984 - J_2}{0.199} + \frac{J_1 - J_2}{1.846} + \frac{107343 - J_2}{5.77} = 0$$

$J_1 = 30513 \text{ W/m}^2$ ,  $J_2 = 6982 \text{ W/m}^2$  elde edilir.

Duman gazından kovana ışınlama ile geçen ısı miktarı;

$$q_{dk} = \frac{J_1 - E_{s,k}}{R_k} = \frac{30513 - 32934}{0.398} = -6083 \text{ W/m}$$

Duman gazından cidara ışınlama ile geçen ısı miktarı;

$$q_{dc} = \frac{J_2 - E_{s,c}}{R_c} = \frac{6982 - 984}{0.199} = 30141 \text{ W/m}$$



### b) Alev gazları – kovan arasında ışınlım

Alevin yayma oranının ( $\epsilon_a$ ) bulunması;

Eşdeğer tabaka kalınlığı sonsuz uzunluktaki bir silindir için  $L_e = 0.9 \cdot d$  olarak verilmektedir. Alev gazlarının kovan içini tamamen doldurduğunu ve kovanı da sonsuz uzunlukta bir silindir kabul edilirse, eşdeğer tabaka kalınlığı kovan çapının  $d_k = 0.2$  m olması durumunda;

$$L_e = 0.9 \cdot d_k = 0.18 \text{ m}$$

$\text{CO}_2$  ve  $\text{H}_2\text{O}$  gazlarının kısmi basıncı,  $P_{\text{CO}_2} = 0.10$  bar ve  $P_{\text{H}_2\text{O}} = 0.18$  bar olduğuna göre;

$$P_{\text{CO}_2} L_e = 0.1 \cdot 0.18 = 0.018 \text{ bar.m}$$

$$P_{\text{H}_2\text{O}} = 0.18 \cdot 0.18 = 0.032 \text{ bar.m}$$

Toplam basınç 1 bar olduğuna göre  $C_{\text{H}_2\text{O}}$  düzeltme katsayısı;  $(P_{\text{H}_2\text{O}} + P) / 2 = 0.587$  değerine göre  $C_{\text{H}_2\text{O}} = 1.1$  bulunur. (Genceli, 2004)

Alev sıcaklığının  $1300$  °C kabulü ile  $\epsilon'_{\text{H}_2\text{O}} = 0.045$ ,  $\epsilon_{\text{CO}_2} = 0.055$  bulunur.

$$\epsilon_{\text{H}_2\text{O}} = C_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \epsilon'_{\text{H}_2\text{O}} = 0.0495 \text{ elde edilir.}$$

$$\epsilon_a = \epsilon_{\text{CO}_2} + \epsilon_{\text{H}_2\text{O}} - \Delta\epsilon$$

$$\Delta\epsilon = \epsilon_{\text{CO}_2} \cdot \epsilon_{\text{H}_2\text{O}} = 0.00248$$

$$\epsilon_a = 0.055 + 0.0495 - 0.00248 = 0.1 \text{ elde edilir.}$$

$$R_{\text{ak}} = \frac{1}{\epsilon_a \cdot A_k \cdot F_{\text{ak}}} = \frac{1}{0.1 \cdot (\pi \cdot 0.2 \cdot 1) \cdot 1} = 15.915 \text{ m}^{-2}$$

Alev gazından kovana ışınlımla geçen ısı miktarı;

$$E_{s,d} = \sigma \cdot T_d^4 = 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot (1300 + 273)^4 = 347135 \text{ W/m}^2$$

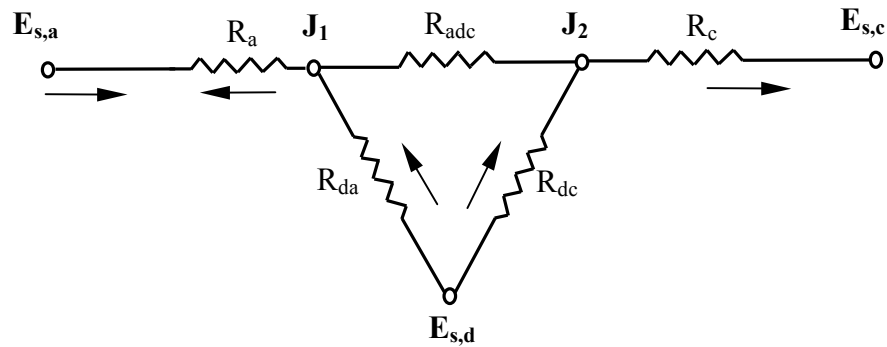
$$q_{ak} = \frac{E_a}{R_{ak}} = \frac{347135}{15.915} = 21812 \text{ W/m}$$

**Cidara ışınlımla geçen toplam ısı miktarı;**

$$q_{ak} + q_{dc} + q_{dk} = 21812 + 30141 + (-6083) = 45870 \text{ W/m}$$

#### 4.3. Dolgu Malzemesi (Kovan) Kullanılmaması Durumunda Işınlımla Isı Transferi

Alev ile cidar arasında olan ışınlım için elektrik benzeşim aşağıdaki gibi elde edilir (Şekil 4.3).



**Şekil 4.3.** Alev ile cidar arasında olan ışınlım için ısı devre.

$$E_{s,a} = \sigma \cdot T_a^4 = 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot (1300 + 273)^4 = 347135 \text{ W/m}^2$$

$$R_a = \frac{1 - \varepsilon_a}{\varepsilon_a \cdot A_a} = \frac{1 - 0.1}{0.1 \cdot (\pi \cdot 0.2 \cdot 1)} = 14.32 \text{ m}^{-2}$$

$$R_{\text{adc}} = \frac{1}{A_a \cdot F_{\text{ac}} (1 - \varepsilon_d)} = \frac{1}{(\pi \cdot 0.2 \cdot 1) \cdot 1 \cdot (1 - 0.138)} = 1.846 \text{ m}^{-2}$$

$$R_{\text{da}} = \frac{1}{\varepsilon_d \cdot A_a \cdot F_{\text{da}}} = \frac{1}{0.138 \cdot (\pi \cdot 0.2 \cdot 1) \cdot 1} = 11.53 \text{ m}^{-2}$$

Isıl devrede denge durumları için denklemler yazılırsa;

$$\frac{E_{\text{s,a}} - J_1}{R_a} + \frac{J_2 - J_1}{R_{\text{adc}}} + \frac{E_{\text{s,d}} - J_1}{R_{\text{dk}}} = 0$$

$$\frac{E_{\text{s,c}} - J_2}{R_c} + \frac{J_1 - J_2}{R_{\text{adc}}} + \frac{E_{\text{s,d}} - J_2}{R_{\text{dc}}} = 0$$

Denklemlerde sayısal değerler yerlerine konulursa;

$$\frac{347135 - J_1}{14.32} + \frac{J_2 - J_1}{1.846} + \frac{107343 - J_1}{11.53} = 0$$

$$\frac{984 - J_2}{0.199} + \frac{J_1 - J_2}{1.846} + \frac{107343 - J_2}{5.77} = 0$$

Denklemler çözülecek olursa;  $J_1 = 55278 \text{ W/m}^2$ ,  $J_2 = 9319 \text{ W/m}^2$  elde edilir.

Duman gazından aleve ışınımıyla geçen ısı miktarı;

$$q_{\text{da}} = \frac{J_1 - E_{\text{s,a}}}{R_a} = \frac{55278 - 347135}{14.32} = -20381 \text{ W/m}$$

Duman gazından cidara ışınlımla geçen ısı miktarı;

$$q_{dc} = \frac{J_2 - E_{s,k}}{R_c} = \frac{9319 - 984}{0.199} = 41884 \text{ W/m}$$

**Cidara ışınlımla geçen toplam ısı miktarı;**

$$q_{da} + q_{dc} = -20381 + 41884 = 21503 \text{ W/m}$$

Hesaplamalar ocakta kovan kullanılması halinde ocak cidarına ışınlım yoluyla aktarılan ısının arttığını göstermiştir. Kovanlı durumda ocak cidarına verilen enerji 45870 W/m iken kovansız durumda 21503 W/m'dir. Işınlımla ısı transferine katkısı olan bu kovan adı verilen dolgu malzemelerinin ocak içinde kullanılmaları durumunda kazan performansına, yanma sonu oluşan emisyonlara etkilerini araştırmak için deneysel ve nümerik çalışmalar yapılmıştır.

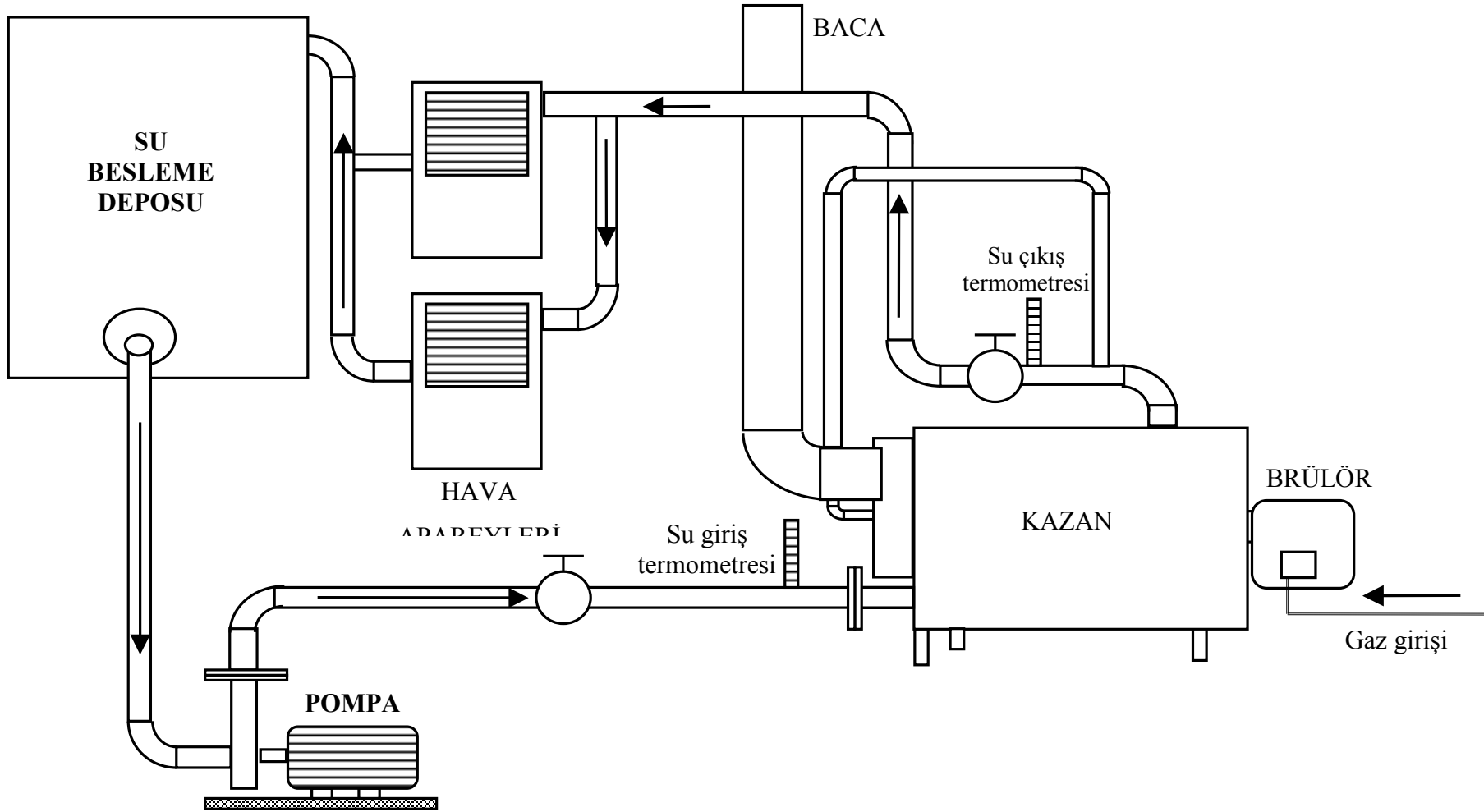
## 5. DENEYSEL ÇALIŞMA

### 5.1. Deney Tesisatı

Deney düzeneği iki kısımda incelenmiştir. Birinci kısmını doğal gazın yakılmasını sağlayan yakıcı (brülör), enerji dönüşüm sistemi (sıcak su kazanı) ve bu sistemin işletilmesi için gerekli donanım (baca, su soğutma sistemi, pompa vb.) oluşturmaktadır. Deney düzeneğinin ikinci kısmını ise bu tesisat üzerine yerleştirilen ölçüm cihazları oluşturmaktadır. Şekil 5.1’de deney tesisatını gösteren bir şema verilmiştir. Bu şekilde deney tesisatı üzerine yerleştirilen ölçüm cihazları gösterilmemiştir.

Doğal gaz hattından 21 mbar basınçta temin edilen doğal gaz, üflemeli (cebri) bir brülörde (yakıcı) hava ile karıştırılarak kazanın yanma odasında yakılmaktadır. Kazan yanma odasında oluşan alev 1. geçiş bölgesini oluşturmaktadır. Deney kazanı alev geri dönüşlü bir kazan olduğundan ocak arka duvarına (hareket edebilir ocak arka yüzeyi) çarpan duman gazları geri dönüş yapmaktadırlar. Bu duman gazlarının geçişi 2. geçiş bölgesi olarak da isimlendirilir. Bu duman gazları ön ayna bölümünde toplanır. Ön ayna kısmından 3. geçiş olarak isimlendirilen duman borularına geçiş olur. Duman borularından arka duman sandığına ilerleyen gazlar bacadan atmosfere atılır.

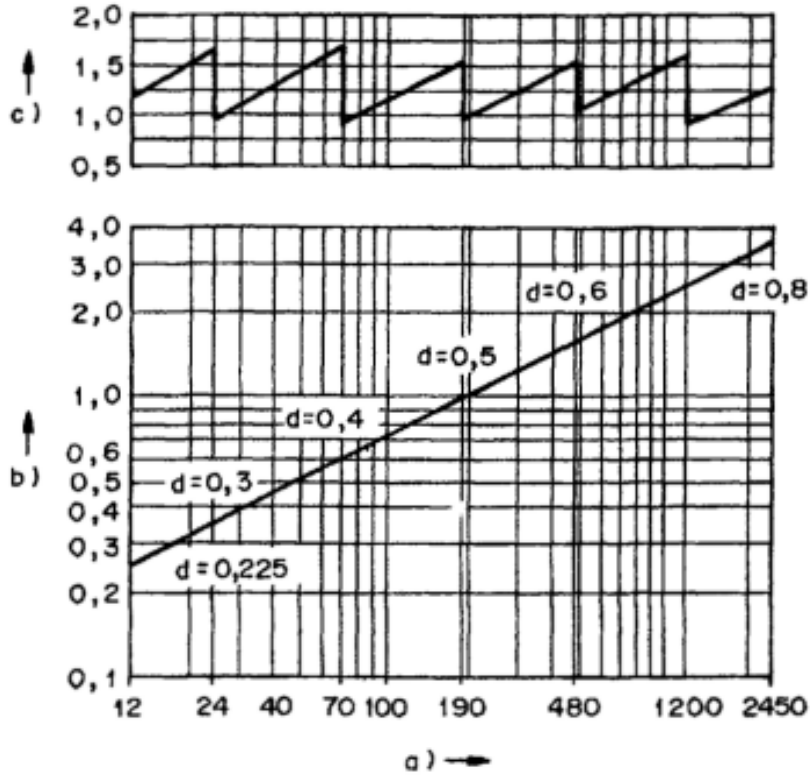
Yanma sonu gazlarının ısısı kazanda suya aktarılır ve kazandan ısınarak çıkan su soğutulmak üzere hava apareylerine gelir. Buradan besleme suyu deposuna gelen su bir pompa vasıtasıyla tekrar kazana gönderilir. Deneylerde kazana su giriş sıcaklığı 70 °C, kazandan çıkan suyun sıcaklığı ise 90 °C olacak şekilde soğutma sistemi ayarlanmıştır.



Şekil 5.1. Deney tesisatı.

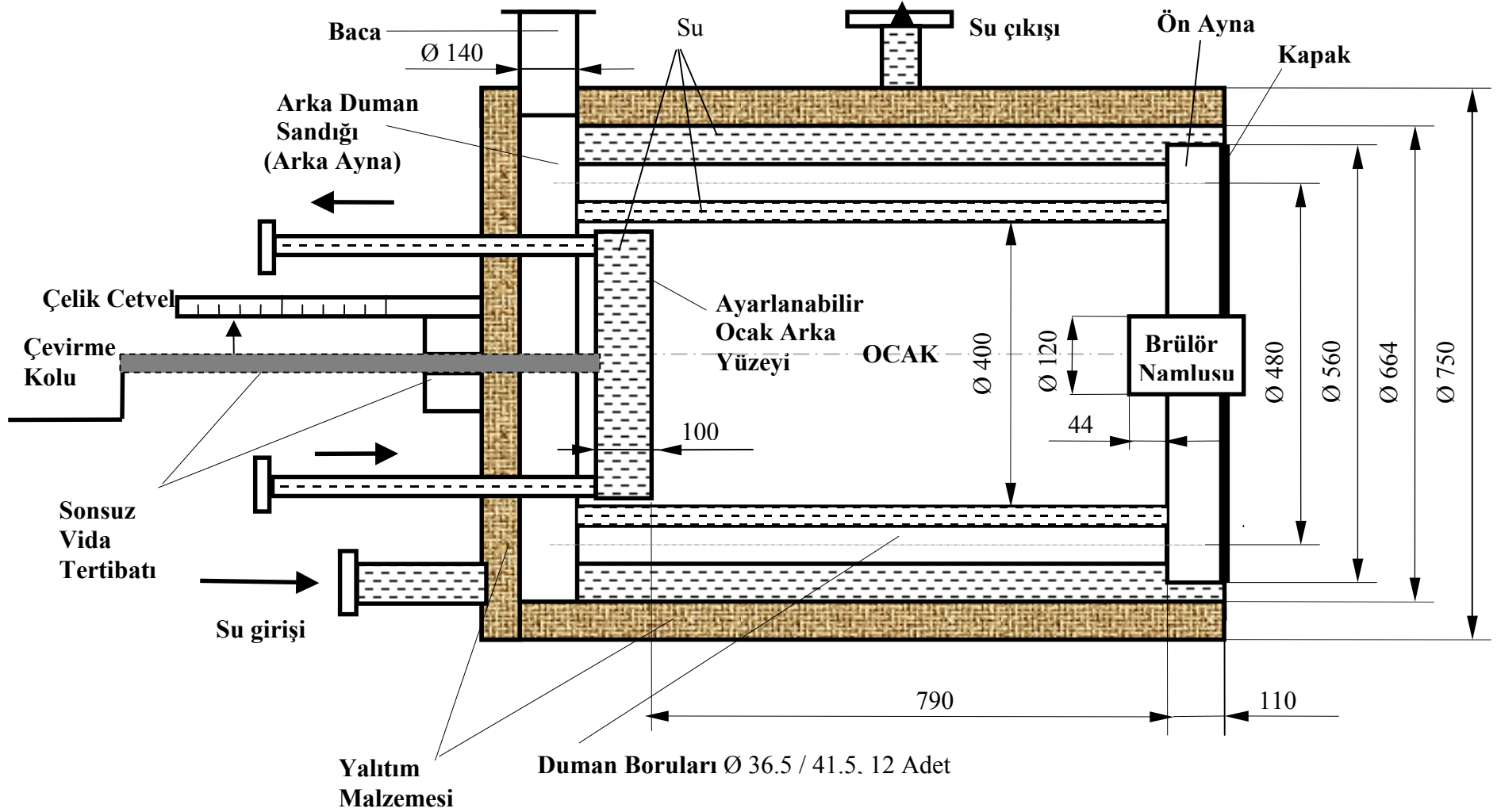
### 5.1.1 Deney tesisatı ekipmanları

**a) Kazan :** Bu çalışmada TS 11392 Pr EN 676 standardına göre imal edilmiş, ocak boyu ayarlanabilir ve en büyük ocak boyunda (790 mm) maksimum kazan ısı kapasitesi 116 kW (100 000 kcal/h) olan alev geri dönüşlü bir kazan kullanılmıştır. İlgili standart kazan ısı kapasitesinin fonksiyonu olarak ocak boyu ve çapı için gerekli ölçüleri Şekil 5.2'de görülen bir diyagram üzerinde vermektedir. Deneylerde kullanılan kazanın maksimum ısı kapasitesi 116 kW (100 000 kcal/h) olup, Şekil 5.2'de bu ısı kapasiteye karşılık gelen ocak boyu 790 mm'dir.



**Şekil 5.2.** Isıl kapasitenin fonksiyonu olarak ocak çapı ve uzunluğu. a) Kazan ısı kapasitesi (kW), b) Ocak uzunluğu (m), c) Ocağın yakma gücü ( $MW/m^3$ ) (TS 11392 EN 676, 1999).

790 mm ocak boyundaki kazan için diğer ölçüler Şekil 5.3'de verilmiştir. Bu kazanda hareketli ocak araka yüzeyi sayesinde ocak boyu ayarlanabilmektedir.



Şekil 5.3. Deney kazanına ait ölçüler



**b) Brülör :** Brülör, yakıt ile havanın bir araya getirilerek yanmanın sağlandığı yakıcıdır. Deneylerde en büyük ocak boyunda (790 mm) maksimum kazan ısı kapasitesini (116 kW) karşılayacak ve bu kazanda oluşacak karşı basıncı yenecek kadar geniş kapasite aralığına (46 - 205 kW) sahip uzun namlulu üflemlili bir brülör kullanılmıştır. Bu brülörün gaz tüketim aralığı 4.7 – 21.36 m<sup>3</sup>/h'dir. Şekil 5.4'de deneylerde kullanılan BAYMAK marka cebri brülörün resmi görülmektedir. Brülör üzerinde herhangi bir ölçüm yapılmamıştır. Hava fazlalık katsayısı ve yakıt debisinin ayarlanması için brülör üzerindeki iki farklı ayar vidası kullanılmıştır.



**Şekil 5.4.** Deneylerde kullanılan üflemlili brülör.

**c) Baca :** Yanmış gazların atmosfere atılmasını sağlar. İç çapı 13 cm olan baca çelik ve izolasyonludur.

**d) Su besleme deposu :** Sistemde dolaşan suyun depolandığı kısımdır. Hava apareylerinde soğutulan su, su besleme deposuna gelir ve buradan bir pompa vasıtasıyla tekrar kazana gönderilir.

e) **Hava apareyleri** : Kazanda ısıtılan suyun soğutulmasında kullanılmaktadırlar. Kazandan 90 °C sıcaklıkta çıkan suyun 70 °C'e düşmesi için suyun enerjisi hava apareylerinde aktarılır.

### 5.1.2. Ölçüm cihazları

Şekil 5.5'de deney düzeneğinde kullanılan gaz analiz cihazının, veri kayıt cihazının, fark basıncı ölçme cihazının, yüzey sıcaklığı ölçme cihazının ve nem ölçme cihazının fotoğrafları görülmektedir. Bunların dışında sıcaklık ölçümü için termoelemanlar kullanılmıştır.

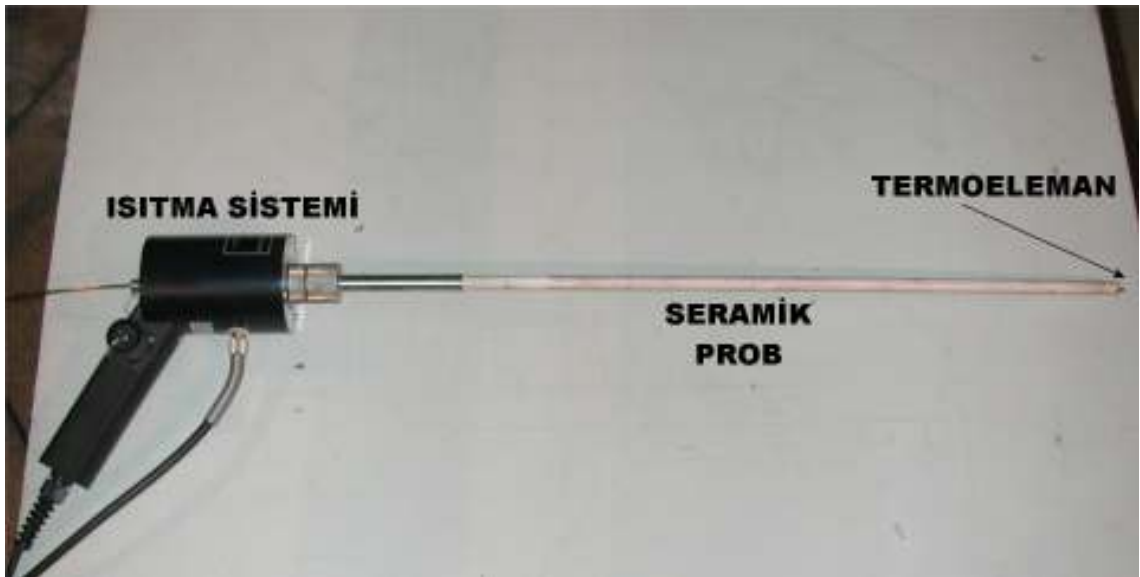


Şekil 5.5. Deneylerde kullanılan ölçüm cihazları.

a) **Veri toplama ve kayıt cihazı** : Deney düzeneğinde deney süresince sürekli ölçüm yapan cihazların oluşturduğu verilerin toplanmasını ve kaydedilmesini sağlar. Bu çalışmada deney süresince her 10 saniyede bir ölçüm alınmış ve kaydedilmiştir. Bu

cihaz 32 kanallı olup ekranında, ölçülen değerlerin zamana göre değişimi anlık olarak görüntülenmiştir. Kaydedilen veriler bir disket yardımıyla alınıp bir bilgisayarda cihazın yazılımı ile listelenmiş ve buradan Microsoft Excel programına aktarılmıştır.

**b) Gaz analiz cihazı :** O<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub> (NO+NO<sub>2</sub>), SO<sub>2</sub>, HC, H<sub>2</sub>S ve hava fazlalık katsayısı parametrelerini bacada ve yanma odasında ölçmek için kullanılmıştır. Kazanın yanma odasında yapılan ölçümler için Şekil 5.6'da görülen yüksek sıcaklığa dayanıklı seramik gaz örnekleme probu kullanılmıştır. Bu probun monte edildiği ısıtma sistemi ise emilen gazın içindeki su buharının cihazın ölçüm hücrelerine ulaşmadan yoğunlaşmasını önler. Bu seramik probun içine sıcaklık ölçümü için termoeleman yerleştirilmiştir. Bacadan yapılan ölçümler için ise çelik bir prob kullanılmıştır. Gaz analiz cihazının emisyonlar için ölçüm aralıkları; CO : 0 – 10 000 ppm, NO : 0 – 3000 ppm, NO<sub>2</sub> : 0 – 500 ppm, O<sub>2</sub> : 0 - % 25 (hacimsel), SO<sub>2</sub> : 0 – 5000 ppm, HC : 100 – 40 000 ppm, H<sub>2</sub>S : 0 – 300 ppm arasındadır.



**Şekil 5.6.** Gaz analiz cihazının yüksek sıcaklığa dayanıklı seramik probu.

**c) Fark basıncı ölçüm cihazı :** Bacada çekiş ölçümü için kullanılmıştır. 0-20 hPa ölçüm aralığına sahip olup, hassasiyeti 0.01 hPa'dır. Deney süresince kaydedilen ölçümlerin ortalaması alınmıştır.

**d) Gaz sayacı :** Kazanda deney süresince yakılan doğal gaz debisini ölçmede kullanılmıştır ve ölçüm aralığı 1-16 m<sup>3</sup>/h, hassasiyeti 0.001 m<sup>3</sup>/h'dir. Deney süresince 10 saniye aralıklarla gaz debisi ölçülmüş ve bu ölçümler kayıt sistemine kaydedilmiştir.

**e) Sıcak su sayacı :** Deney tesisatında dolaşan suyun debisinin ölçümünde kullanılmıştır. Ölçüm aralığı 0-20 m<sup>3</sup>/h, hassasiyeti 0.001 m<sup>3</sup>/h'dir. Deney süresince 10 saniye aralıklarla su debisi ölçülmüş ve bu ölçümler kayıt sistemine kaydedilmiştir. Şekil 5.7'de sıcak su sayacının tesisata bağlantısı görülmektedir.



**Şekil 5.7.** Sıcak su sayacının montaj halindeki görünüşü.

**f) Nem ölçme cihazı :** Deneylerde yakılan yakıt miktarını normal şartlara dönüştürmek için ortam neminin ölçülmesinde kullanılacaktır. Ölçüm aralığı 0...+100 RH olup hassasiyeti  $\pm$  % 3 RH'dir.

**g) Termoelemanlar :** Deney düzeneğinde istenilen noktalarda sıcaklık ölçümü için kullanılmıştır. İki farklı tip termoeleman kullanılmıştır. Bunlar; ölçüm aralığı 700 °C'ye kadar olan Nikel Krom Nikel K tipi termoeleman ve 1800 °C'ye kadar Platin Rodyum Platin S tipi termoelemandır.

Aşağıdaki Tablo 5.1'de deneylerde kullanılan ölçüm cihazlarının ölçüm aralıkları ve hassasiyetleri verilmiştir.

**Tablo 5.1.** Ölçüm cihazlarının özellikleri (Testo, 2003).

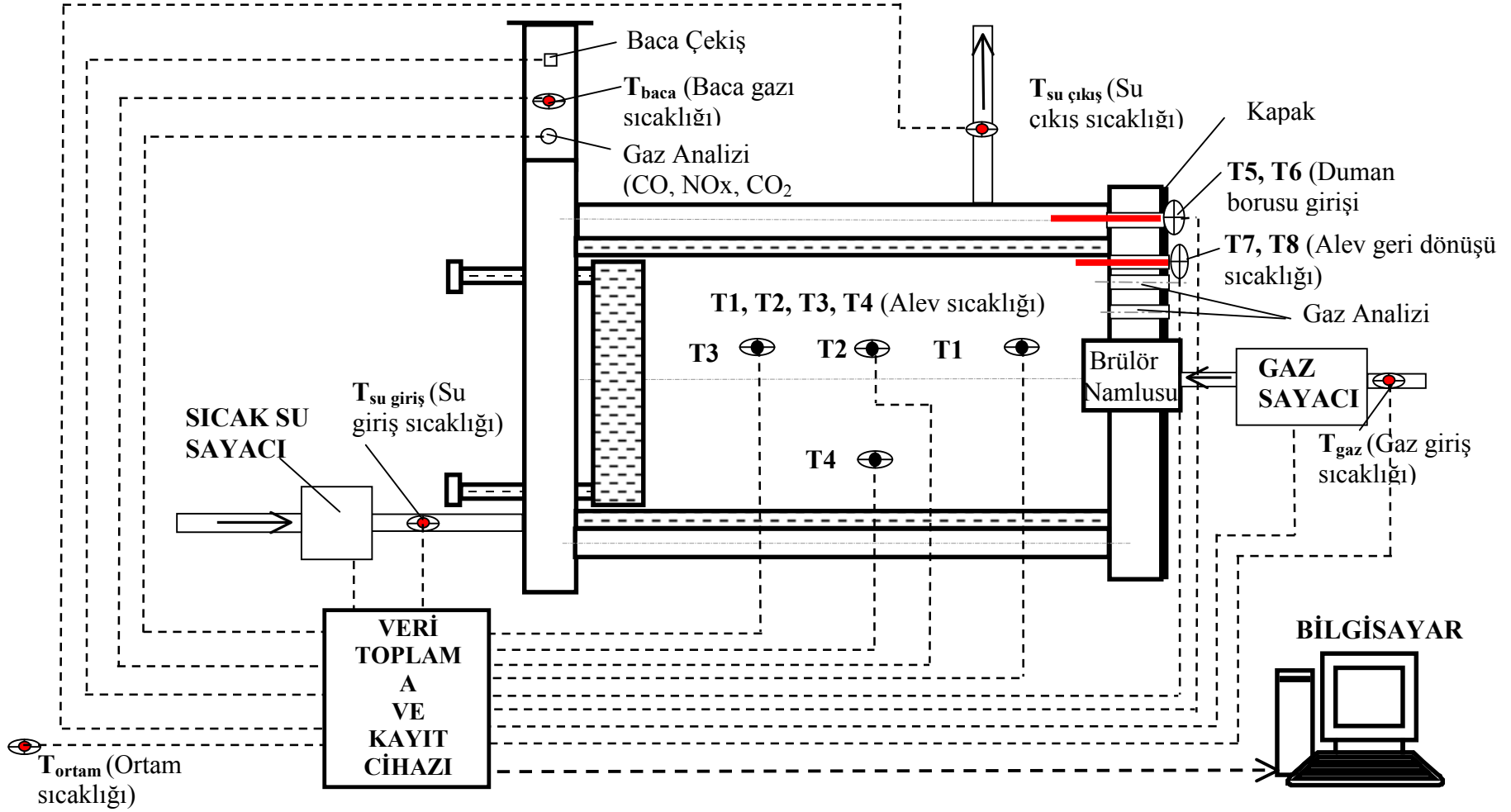
Ölçüm Cihazları	Ölçülen Büyüklükler	Ölçüm Aralığı	Ölçüm Hassasiyeti	Çözünürlük
Gaz Analiz Cihazı	O <sub>2</sub>	0 - % 25 (Hacimsel)	± % 0.8	0.01 hacimsel % O <sub>2</sub>
	CO	0 - 10 000 ppm	± % 5 mv (200 – 2000 ppm) ± % 10 mv (2001 – 10000 ppm) ± 10 ppm CO (0 – 199 ppm)	1 ppm CO
	CO <sub>2</sub>	0 - % maks. hacimsel CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub> 'den hesaplanır	0.01 hacimsel % CO <sub>2</sub>
	NO	0 - 3000 ppm	± % 5 mv (100 – 1999.9 ppm) ± % 10 mv (2000 – 3000 ppm) ± 5 ppm NO (0 – 99 ppm)	1 ppm NO
	SO <sub>2</sub>	0 - 5000 ppm	± % 5 mv (100 – 2000 ppm) ± % 10 mv (2001 – 5000 ppm) ± 5 ppm SO <sub>2</sub> (0 – 99 ppm)	1 ppm SO <sub>2</sub>
	Sıcaklık	-40 - +1200 °C	± % 5 mv (100 – 1200 ppm) ± % 10 mv (2001 – 1200 ppm) ± 0.5 °C (-40 – 99.9 °C)	0.1 °C
Veri Kayıt Cihazı	K tipi Termoeleman	-18 - +1316 °C	± 1.2 °C	-
	S tipi Termoeleman	- 260 - +1704 °C	± 1.2 °C	-
	Milivolt	- 100 - 100	± % 0.1	-
	Volt	-500 - 500	± % 0.1	
Miliamper	-1.0 - 1.0	± % 0.1		
	-10 - 10	± % 0.1		
	4 - 20	± % 0.2		
	0 - 20	± % 0.2		
Nem Ölçme Cihazı	Nem	0 - 100 % RH -20 - + 70 °C	± % 3 RH (0 – 100 %RH) ± 0.5 °C	0.1 % RH 0.1 °C
Fark Basıncı Ölçüm Cihazı	Basınç	0 - 200 hPa 0 - 20 hPa	% 5	0.1 hPa
Yüzey Sıcaklığı Ölçüm Cihazı	Sıcaklık	-100 - + 800 °C	± % 2 mv (200 – 800 °C) ± 0.2 °C (-100 – 199.9 °C)	1 °C 0.1 °C
K tipi Termoeleman	Sıcaklık	-200 - + 1370 °C	± 0.4 °C (-100 – +200 °C) ± 1 °C (-200 – -100.1 °C) ± 1 °C (-200.1 – +1370 °C)	0.1 °C
S tipi Termoeleman	Sıcaklık	-0 - + 1760 °C	± 1 °C (0 – 1760 °C)	1 °C

## 5.2. Ölçme Sistemi

Bu bölümde deney tesisatını oluşturan ekipmanların üzerlerindeki ölçüm noktaları anlatılmıştır. Şekil 5.8’de ise deney düzeneği üzerindeki ölçüm noktaları ve kullanılan ölçüm cihazlarının yerleşimi gösterilmiştir. Deneylerde yapılan ölçümlerin bazıları (sıcaklıklar, gaz ve su debileri) zamana (10 s) bağlı olarak ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Zamana bağlı olarak ölçülen değerler deney süresince veri toplama ve kayıt cihazına kaydedilmiştir. Bazı ölçümler ise (gaz analizi) anlık yapılmıştır. Gaz hattına gaz sayacı monte edilerek gaz debisi sürekli olarak ölçülmüştür. Yine gaz hattına gaz sayacından önce bir termoeleman yerleştirilerek, gaz sıcaklığı ölçülmüştür. Kazanın yanma odasında belirli aralıklarla yerleştirilen termoelemanlarla alev sıcaklığı (T1, T2, T3, T4) ölçümü yapılmıştır. Kazan kapağından yerleştirilen termoelemanlarla ise ön aynada alev geri dönüş sıcaklığı (T7, T8) ile duman boruları girişindeki gaz sıcaklığı (T5, T6) ölçülmüştür.

Kazan kapağından açılan iki farklı noktadan yanma odasında eksenel yönde belli aralıklarda gaz analizi yapılmış ve bu noktalarda sıcaklıklarda ölçülmüştür. Ayrıca kazan yanma odasında yapılan diğer bir ölçüm de yanma odasına eksenel olarak yerleştirilen ve kovan adı verilen dolgu malzemelerinin yüzey sıcaklıklarının ölçülmesidir. Kovanlar 1 mm kalınlıktaki çelik sacdan imal edilmiş silindirik malzemelerdir. Kovanların yüzey sıcaklığına ait ölçme noktalarının yerleri Şekil 5.8’de gösterilmemiştir. Kazan giriş ve çıkış suyu sıcaklıkları kazan su giriş ve çıkışına yerleştirilen termoelemanlarla ölçülmüştür. Su giriş hattına yerleştirilen sıcak su sayacı ile su debisi ölçülmüştür. Bacada gaz analizi, sıcaklık ve baca çekişi ölçümleri farklı ölçüm noktalarında yapılmıştır.

Deney tesisatını oluşturan tüm elemanların üzerlerindeki ölçüm noktaları hakkında detaylı bilgiler aşağıda verilmiştir. Şekil 5.9’da deney kazanı ve ölçme cihazlarının fotoğrafı verilmiştir.



Şekil 5.8. Deney tesisatındaki ölçüm cihazları ve ölçüm noktaları.



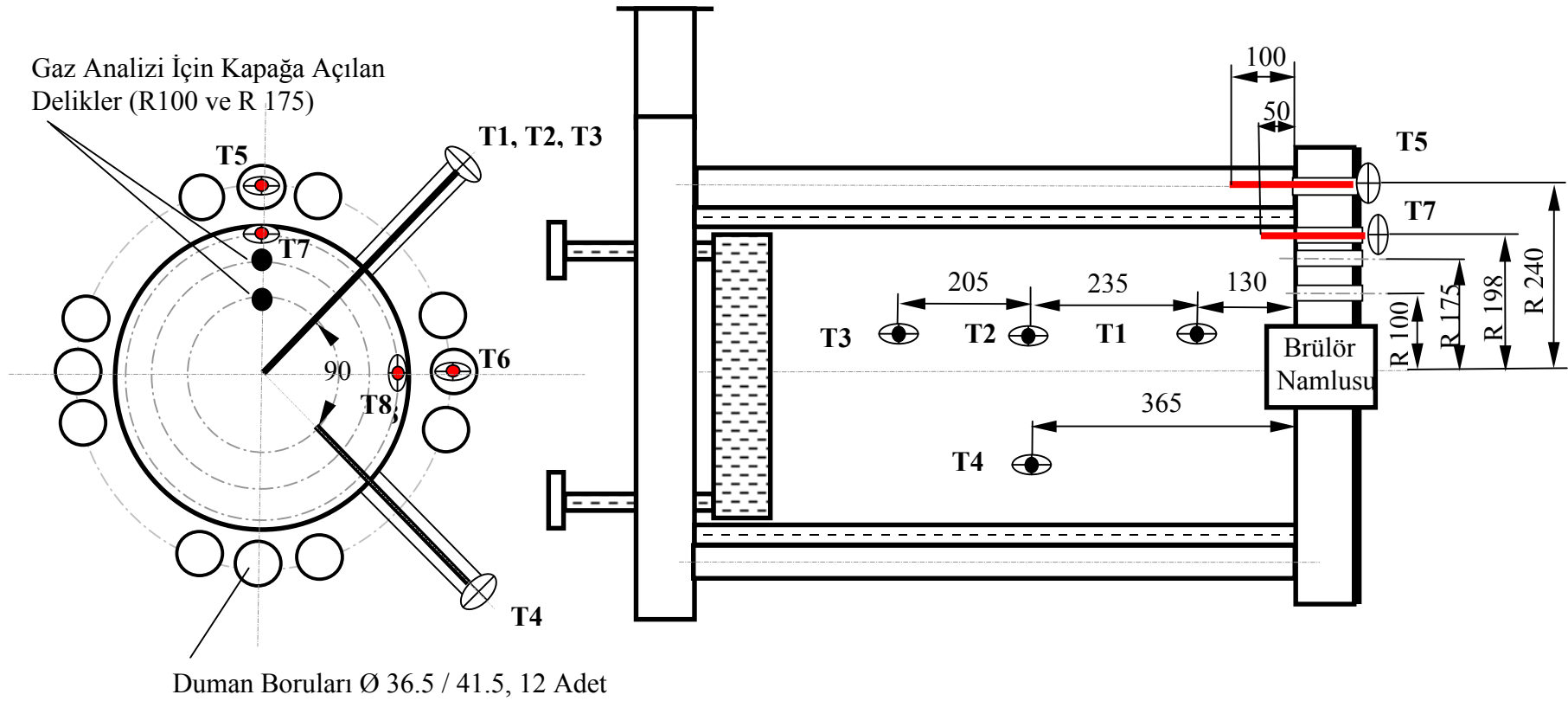


**Şekil 5.9.** Deney düzeneğinin genel görünüşü.

**a) Kazan :** Kazan yanma odasında (ocakta) yapılan ölçümler sıcaklık ölçümleri ve gaz analizidir. Kazan, ocak merkezinde alev sıcaklıklarının ve duman gazlarının sıcaklıklarının ölçülmesi için termoelemanlar yerleştirilmiştir. Ayrıca ocaktan gaz analizi yapılabilmesi için kazan kapağına iki farklı noktadan delik açılmıştır. Kazana monte edilen termoelemanların yerleşim noktaları ve gaz analizi için açılan deliklerin yerleri Şekil 5.10'da şematik olarak gösterilmiştir.

Yüksek sıcaklığa dayanıklı seramik kılıflı (1800 °C) S tipi T1, T2, T3 ve T4 termoelemanlarıyla alev merkezindeki sıcaklıklar 10 saniye aralıklarla deney süresince ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Bu termoelemanların yerleşimi Şekil 5.10'da gösterilmiştir. T4 termoelemanı ise diğer termoelemanlardan 90° farklı konumda olup T2 termoelemanı ile aynı mesafededir. Bu T4 termoelemanı ile R100 mesafesindeki alev sıcaklığı ölçülmüştür.





Şekil 5.10. Kazan yanma odasından yapılan ölçümler.

Duman gazları ve alev geri dönüş sıcaklığının ölçülmesi için maksimum ölçme sıcaklığı 700 °C olan K tipi termoelemanlar kullanılmıştır. Şekil 5.10’da görüldüğü gibi her iki ölçüm içinde iki farklı nokta kullanılmıştır. Bu noktalar arasında 90°’lik fark bulunmaktadır. T5 termoelemanı düşeyde en üst konumdaki boru içinden ölçüm alırken T6 termoelemanı ise yatayda yatay eksenin kestiği boru içinden ölçüm almaktadır. Bu termoelemanların uçları duman boruları girişinden 100 mm içeriye yerleştirilmiştir. Ön aynada alev geri dönüş sıcaklıklarının ölçülmesinde kullanılan T7 ve T8 termoelemanları, bu boruların paralelinde fakat yanma odasından sıcaklık ölçmektedirler. Bu termoelemanları uçları ise ocak ağzından 50 mm kadar içeridedir. Bütün bu noktalardan yapılan sıcaklık ölçümleri de 10 saniye aralıklarla sürekli olarak ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Şekil 5.11’de ise bu termoelemanların ölçüm yerlerine monte edilmiş hali görülmektedir.



Şekil 5.11. Kazana bağlanan termoelemanların görünüşü

Kazan yanma odasından yapılan bir diğer ölçüm de gaz analizidir. Ölçümler iki farklı doğrusal hat üzerinde yapılmıştır (Şekil 5.10). Kazan kapağında R100 ve R175 yaylarının düşey eksenini merkezin üst tarafında kestiği noktalardan gaz analiz probunun çapına uygun delikler açılmıştır. Bu prob giriş deliklerinin isimleri R100 ve R175 olarak adlandırılmıştır. Bu deliklerin yerleri Şekil 5.12'deki fotoğrafta gösterilmiştir.



a)



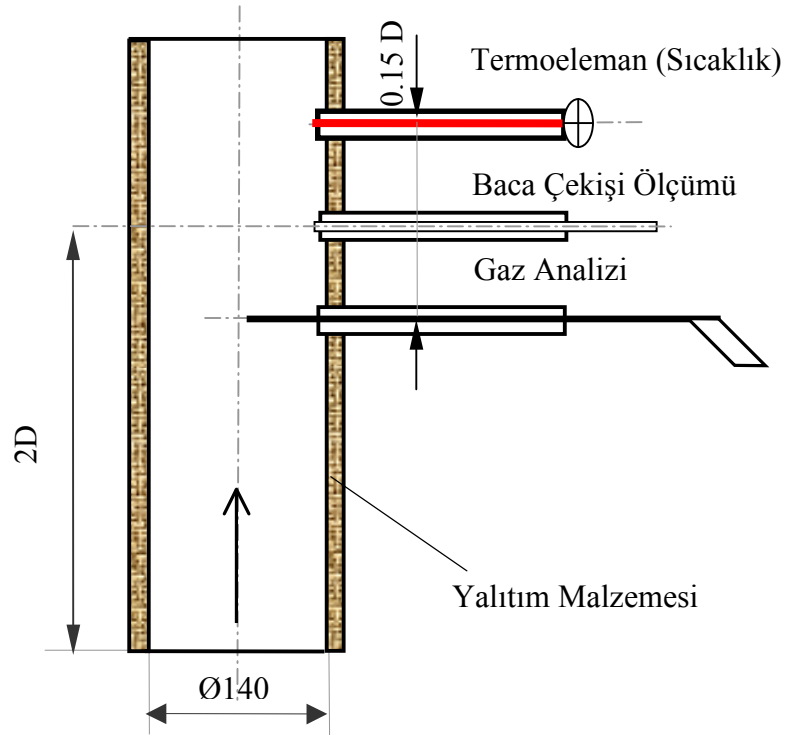
b)

**Şekil 5.12.** Kazan kapağına gaz analizi amacıyla açılan R100 ve R175 delikleri.

a) Kapağın dıştan görünüşü b) Kapağın içten görünüşü.

Ocak içinde gaz analizi seramik gaz örnekleme probu ile yapılmıştır. Bu probun içerisine gaz analizinin yapıldığı noktadaki sıcaklığı ölçmek için termoeleman yerleştirilmiştir. R100 ve R175 ölçme çizgilerinden ocak boyunca aksel olarak belirli noktalarda gaz analizi ve sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Bu noktalar ocak ağzından itibaren 10 cm aralıklarla sırasıyla 0, 10, 20, 30 ve 40 cm mesafeleri olarak isimlendirilmiştir. Burada 0 cm mesafesi ocak ağzına denk gelmektedir. R100 ve R175 ölçme deliklerinin her ikisinde de bu 5 noktadan hem gaz analizi hem de sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Yanma odası içine yerleştirilen kovanının yüzey sıcaklıkları ölçülmüştür.

**b) Baca :** Bacada sıcaklık, gaz analizi ve baca çekişi ölçümleri yapılmıştır. Bacadan yapılan gaz analizi ile ölçülen büyüklükler CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> (NO<sub>2</sub> + NO), SO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, ve hava fazlalık katsayısıdır. Şekil 5.13'de bacadan yapılan ölçümlerin yerleri gösterilmiştir. Bu ölçüm yerleri TS 11392 Pr EN 676 standardına göre düzenlenmiştir.



Şekil 5.13. Bacadan yapılan ölçümler ve yerleri.

### 5.3. Dolgu Malzemeleri

Kovan adı verilen dolgu malzemeleri; kalınlığı 1 mm olan yüksek sıcaklığa dayanıklı çelik malzeme sacdan yapılmış içi boş iki ucu açık silindirik elemanlardır. Ocakta bu dolgu malzemelerinin kullanılmasındaki amaç ocak sıcaklığının düşürülmesiyle azotoksit emisyonlarının azaltılmasıdır. Ayrıca bu dolgu malzemelerinin kullanılmasındaki diğer amaç ışınım ile ısı transferine olan katkılarıdır. Kovanın ocak içinde aynı eksende yerleştirilebilmesi için akışı engellemeyecek şekilde ayaklarla teçhiz edilmiştir. Deneylerde kullanılan kovanların çapları ve boyları, ölçüler cm cinsinden olmak üzere Ø20x20, Ø25x20, Ø25x40, Ø30x20, Ø30x40'dır. Şekil 5.14'de bu kovanların bazılarının resimleri görülmektedir.



Şekil 5.14. Deneylerde kullanılan kovan adı verilen dolgu malzemeleri.

Kovan adı verilen dolgu malzemelerinin yüzey sıcaklıklarının ölçümünde seramik kılıflı Nikel Krom Nikel termoeleman kullanılmıştır. Bu termoelemanların alev ışınımından etkilenmemeleri için kovan üzerlerindeki ölçüm noktalarına kovan malzemesiyle aynı olan küçük plakalardan cepler yapılmıştır. Termoelemanların uçları

bu cepler içine yerleştirilmiştir. Boyları 20 cm olan kovanların her iki ucundan, 40 cm olan kovanların ise ilave olarak orta kısmından da yüzey sıcaklığı ölçülmüştür.

Şekil 5.15’de bir kovanın ocak içinde 0 cm konumundaki pozisyonu görülmektedir. T1, T2 termoelemanları ile alev sıcaklıklarını ölçmek kovanlarda problemlerin geçebileceği delikler açılmıştır.



Şekil 5.15. Kovan adı verilen dolgu maddesinin ocak içine yerleştirilmesi.

#### 5.4. Deney Parametreleri ve Deneyin Yapılışı

**a) Ocak boyu :** Deneyde ele alınan parametrelerden biri ocak boyudur. Bu ocak boylarından biri deney kazanının maksimum ocak boyu olan 790 mm’dir. Diğer ocak boyları 87 ve 58 kW kazan ısıtma kapasiteleri esas alınarak bulunmuştur. Şekil 5.2’den 87 kW ve 58 kW kazan ısıtma kapasitelerine karşılık gelen ocak boyları sırasıyla 680 mm ve 550 mm’dir. 790 mm ocak boyu için kazana ait diğer ölçüler Şekil 5.2’de verilmiştir. Bu ocak boyları için kazan ölçüleri ocak boyu haricinde 790 mm ocak boyu kazanın ölçüleri ile aynıdır. EK-II’de verilen kazan ısıtma hesapları bölümünde bu kazan ısıtma kapasitelerini sağlayan yakıt debileri hesaplanmıştır.



**b) Hava fazlalık katsayısı :** Deneyleerde diğer bir parametre hava fazlalık katsayısıdır. Baca gazında karbonmonoksitin minimum olduğu duruma karşılık gelen hava fazlalık katsayısı ile stokiometrik yanmaya karşılık gelen  $HFk=1.00$  değeri deneyleerde esas olarak alınmıştır. Deneyleelerin yapıldığı hava fazlalık katsayısı değeri 1.02, 1.26 ve 1.475 değeriyledir. Bu değeri 1er deneyleelere başlamadan önce yapılan ön deneyleelerle tespit edilmiştir. Her bir ocak boyunun maksimum kazan ısıl kapasitesinde yapılan bu deneyleelerde, baca gazı içindeki karbonmonoksitin hacimsel oranı gaz analiz cihazı ile ölçülerek hava fazlalık katsayısı değeri tespit edilmiştir. Burada hava fazlalık katsayısının 1.02 değeriinde, ocak boylarının 790 mm ile 680 mm olduğu deneyleelerin maksimum kazan ısıl kapasiteleri (sırasıyla 116 kW ve 87 kW) için bacada karbonmonoksit (CO) değeri maksimum seviyede gerçekleşmiş ve brülör sönme sınırına gelmiştir. Aynı şartlar için hava fazlalık katsayısının 1.26 değeri de 550 mm'lik ocak boyunun maksimum kazan ısıl kapasitesi (58 kW) için tespit edilen değeri 1erdir. Aynı zamanda hava fazlalık katsayısının 1.26 değeri de ocak boyları 790 mm ile 680 mm olan kazanların maksimum kazan ısıl kapasiteleri (sırasıyla 116 kW ve 87 kW) için bacada karbonmonoksit (CO) değeriini minimum yapan değeri 1erdir. 550 mm'lik ocak boyunun maksimum kazan ısıl kapasitesi (58 kW) için bacada karbonmonoksit (CO) değeriini minimum yapan hava fazlalık katsayısı değeri 1.475'dir.

**c) Dolgu malzemesi (Kovan) :** Deneyleelerde ocak içerisine konulan kovanın çapı ve boyu ile kovanın ocak içindeki konumu da diğer bir parametredir. Kovanlar ocak içerisinde ocak ile eş eksenli olacak şekilde yerleştirilmişlerdir. Deneyleelerde kullanılan kovanların çapları ve boyları, ölçüler cm cinsinden olmak üzere  $\varnothing 20 \times 20$ ,  $\varnothing 25 \times 20$ ,  $\varnothing 25 \times 40$ ,  $\varnothing 30 \times 20$ ,  $\varnothing 30 \times 40$ 'dır.

İki farklı kovan konumu için deneyleeler yapılmıştır. Kovanın ocak içerisinde tam ocak ağızına denk gelecek şekilde yerleştirilmesi "0 konumu" olarak adlandırılmıştır. Diğer konum ise 9 konumu olup burada kovan ocak ağızından 9 cm daha içeride olacak şekilde yerleştirilmiştir.

**Deneyleeyin yapılışı :** Deneyleelere başlamadan önce su sıcaklığı  $90/70$  °C oluncaya kadar ısıtılmıştır. Bundan sonra gaz debisi istenilen debiye ayarlanmıştır. Su debisi de

yukarıda belirtilen su sıcaklık aralığını sağlayacak şekilde ayarlanmıştır. Bacadan yapılan gaz analizine göre brülörün hava ayar vidasından hava fazlalık katsayısı ayarı yapılmıştır. Kararlı yanma ve deney şartları oluştuktan sonra ölçümlere başlanmış ve büyüklüklerin zamana göre değişimi kaydedilmiştir.

#### a) Deneylerin ocak boylarına göre gruplandırılması

Tablo 5.2’de 790 mm ocak boyunda deneylerin yapıldığı kazan ısıtma kapasiteleri, bu ısıtma kapasiteleri sağlayan yakıt debileri ve hava fazlalık katsayıları verilmiştir. Bu ocak boyu için kazan anma ısıtma kapasitesi 116 kW’dır. 790 mm ocak boyunda kazan anma ısıtma kapasitesine ilave olarak 87 kW ve 58 kW kazan ısıtma kapasitelerinde de deneyler yapılmıştır.

**Tablo 5.2.** 790 mm ocak boyunda deneylerin yapıldığı kazan ısıtma kapasiteleri, yakıt debileri ve hava fazlalık katsayıları.

Ocak Boyu (mm)	Deney Parametreleri	Deney No : 1	Deney No : 2	Deney No : 3	Deney No : 4
790	Kazan Isıtma Kapasitesi (kW)	116	116	87	58
	Yakıt Debisi (Nm <sup>3</sup> /h)	10.72	10.72	8.04	5.35
	Hava Fazlalık Katsayısı	1.02	1.26	1.26	1.26

Tablo 5.3’de 680 mm ocak boyunda deneylerin yapıldığı kazan ısıtma kapasiteleri, bu ısıtma kapasiteleri sağlayan yakıt debileri ve hava fazlalık katsayıları verilmiştir. Bu ocak boyu için anma kazan ısıtma kapasitesi 87 kW’dır. 680 mm ocak boyunda anma kazan ısıtma kapasitesine ilave olarak 58 kW kazan ısıtma kapasitesinde de deneyler yapılmıştır.



**Tablo 5.3.** 680 mm ocak boyunda deneylerin yapıldığı kazan ısıt kapasiteleri, yakıt debileri ve hava fazlalık katsayıları.

Ocak Boyu (mm)	Deney Parametreleri	Deney No : 5	Deney No : 6	Deney No : 7
680	Kazan Isıl Kapasitesi (kW)	87	87	58
	Yakıt Debisi (Nm <sup>3</sup> /h)	8.04	8.04	5.35
	Hava Fazlalık Katsayısı	1.02	1.26	1.26

Tablo 5.4’de 550 mm ocak boyunda deneylerin yapıldığı kazan ısıt kapasiteleri, bu ısıt kapasiteleri sağlayan yakıt debileri ve hava fazlalık katsayıları verilmiştir. Bu ocak boyu için anma kazan ısıt kapasitesi 58 kW’dır. 680 mm ocak boyunda anma kazan ısıt kapasitesine ilave olarak 43.5 kW kazan ısıt kapasitesinde de deneyler yapılmıştır.

**Tablo 5.4.** 550 mm ocak boyunda deneylerin yapıldığı kazan ısıt kapasiteleri, yakıt debileri ve hava fazlalık katsayıları.

Ocak Boyu (mm)	Deney Parametreleri	Deney No : 8	Deney No : 9	Deney No : 10
550	Kazan Isıl Kapasitesi (kW)	58	58	43.5
	Yakıt Debisi (Nm <sup>3</sup> /h)	5.35	5.35	4.00
	Hava Fazlalık Katsayısı	1.26	1.475	1.475



## 6. DENEY SONUÇLARI

Deney sonuçları sıcaklık ölçümleri, emisyon ölçümleri ve kazan ısı verimi alt başlıkları altında incelenmiş ve kendi aralarında karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

### 6.1. Deneylerde Ölçülen Sıcaklıklar

Deneylerde ölçülen sıcaklıklar da kendi aralarında alev sıcaklıkları ve kovan yüzey sıcaklıkları olarak iki gruba ayrılarak verilmiştir.

#### 6.1.1. Alev sıcaklıkları

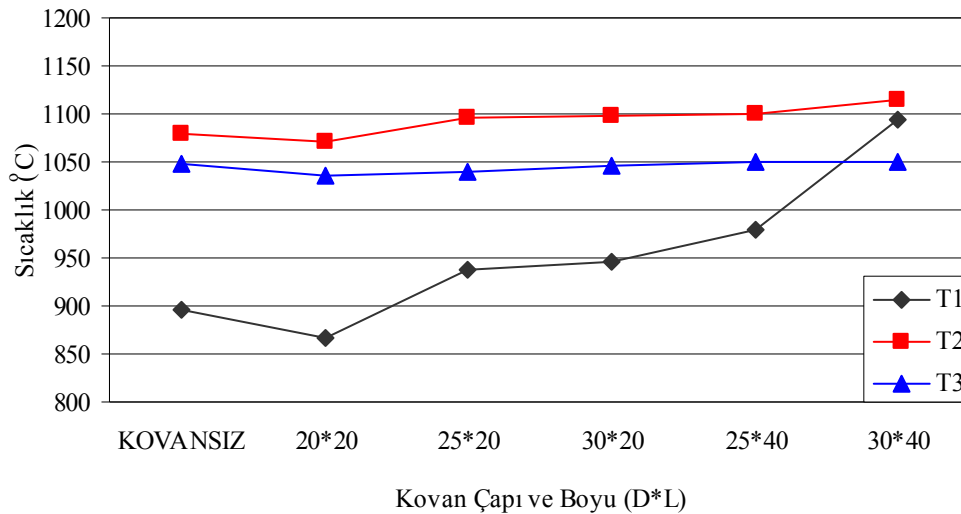
Bölüm 5, Şekil 5.8'de gösterilen T1, T2 ve T3 ölçüm noktalarından alev merkezlerindeki sıcaklıklar deney boyunca sürekli olarak ölçülerek veri kayıt cihazı tarafından kaydedilmiştir. Bu noktalardan kaydedilen sıcaklık değerlerinin zamana göre ortalamaları alınmıştır. T1, T2 ve T3 termoelemanları ocak içindeki konumları bakımından sırasıyla brülör namlusuna yakın, alev ortası ve alevin uç bölgesindeki sıcaklıkları ölçmüştür.

#### a) Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumu;

Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumunda, kazan anma ısı gücü (maksimum kazan ısı kapasitesi) 116 kW ve bu anma ısı gücünü sağlayan yakıt debisinin de 10.72 Nm<sup>3</sup>/h olduğu belirtilmişti. Bu şartlarda ve hava fazlalık katsayısının (HFK) 1.26 değerinde yapılan deneylerde T1, T2 ve T3 noktalarından alev merkezlerindeki sıcaklıklar ölçülerek kıyaslanmıştır (Şekil 6.1 ve 6.2). Alev içindeki sıcaklık dağılımı incelendiğinde alevin orta bölgesi (T2) alevin en sıcak kısmıdır. Alevin uç kısmı (T3) baş kısmına (T1) göre daha sıcaktır. Çapı ve uzunluğu 20\*20 cm olan kovan kullanılması halinde alevin baş bölgesindeki (T1) sıcaklık, en düşük değerini (867 °C) almıştır. Kovansız deneyde T1 sıcaklığı 896 °C olup, diğer çap ve uzunluktaki kovanların kullanılması halinde ölçülen T1 sıcaklıklarından 40 – 198 °C daha düşüktür. Kovanlı deneylerde T1 sıcaklığı kovan çapı ve uzunluğu arttıkça

artmaktadır. Çapı ve uzunluğu 30\*40 cm olan kovan için T1 sıcaklığı 1094 °C olup, bu ölçüm konumundaki en yüksek sıcaklık değeri olmuştur. Kovan çapı ve boyu arttıkça, diğer ölçüm noktalarına kıyasla T1 sıcaklığında artış, daha fazla gerçekleşmiştir.

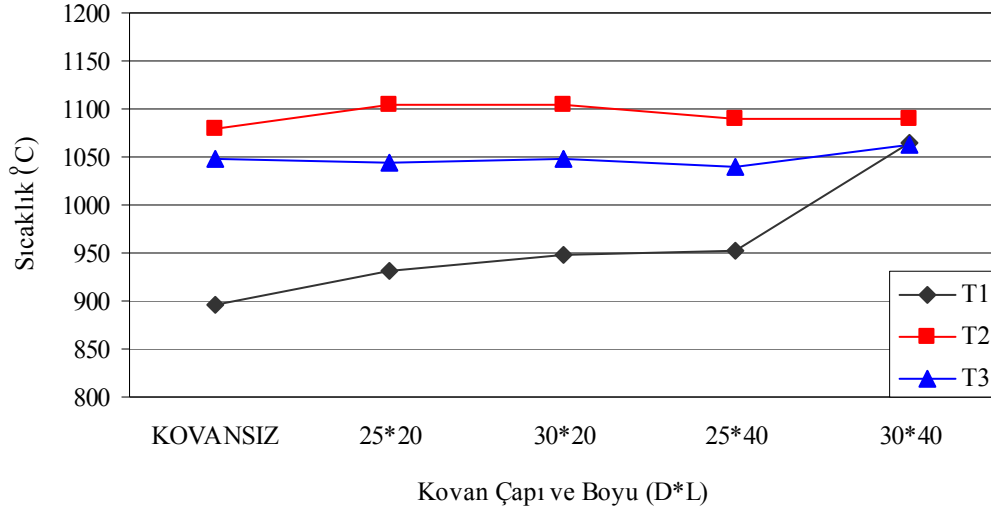
Her üç ölçüm noktasındaki sıcaklık değerleri (özellikle 30\*40 cm kovanı için) birbirine yaklaşmıştır. Kovansız ve kovanlı tüm deneylerde alev orta (T2) ve uç (T3) bölgelerinde, T1 sıcaklığındaki gibi büyük değer artışları görülmemektedir. T2 sıcaklığı, kovanlı deneylerde kovansız duruma göre 10 – 40 °C daha yüksek değer almıştır. Alevin baş kısmında sıcaklık en düşük değeri almakta, orta kısmında maksimuma ulaşmakta, uç kısmında ise düşmektedir. Alevin başından uç kısmına ilerledikçe kovansız ve tüm kovanlı deneylerde sıcaklık artışında azalma meydana gelmektedir. Bu azalma alev ucunda (T3) daha belirgin olup, sıcaklık tüm deney koşulları için hemen hemen aynı değeri (~1050 °C) almıştır.



**Şekil 6.1.** Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumunda 116 kW kazan ısıtma kapasitesi için alev sıcaklıklarının karşılaştırılması (Yakıt debisi =10.72 Nm<sup>3</sup>/h, HFK = 1.26, Kovan konumu = 0 cm).

Şekil 6.2’de ise kovanların ocak içinde ocak ağzından 9 cm içeriye yerleştirildiklerinde ölçülen alev sıcaklıklarının karşılaştırılması verilmiştir. Kovansız ve kovanlı deneylere göre sıcaklıkların karakteristiği, 0 konumunda elde edilen

sonuçlara benzerdir. Burada her üç nokta için sıcaklıklar kovanların 0 cm konumunda bulunmaları durumundan 5 – 10 °C daha düşüktür.

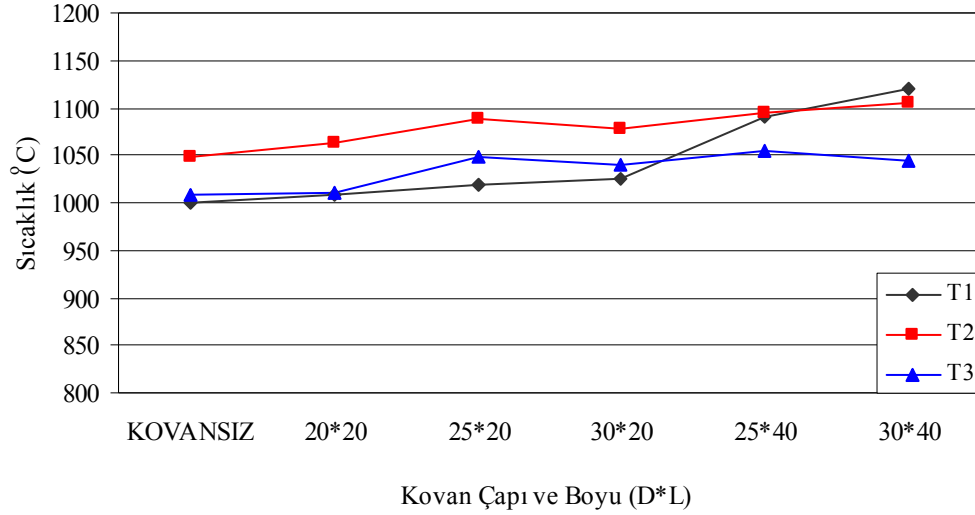


**Şekil 6.2.** Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumunda 116 kW kazan ısıtma kapasitesi için alev sıcaklıklarının karşılaştırılması (Yakıt debisi =10.72 Nm<sup>3</sup>/h, HFK = 1.26, Kovan konumu = 9cm).

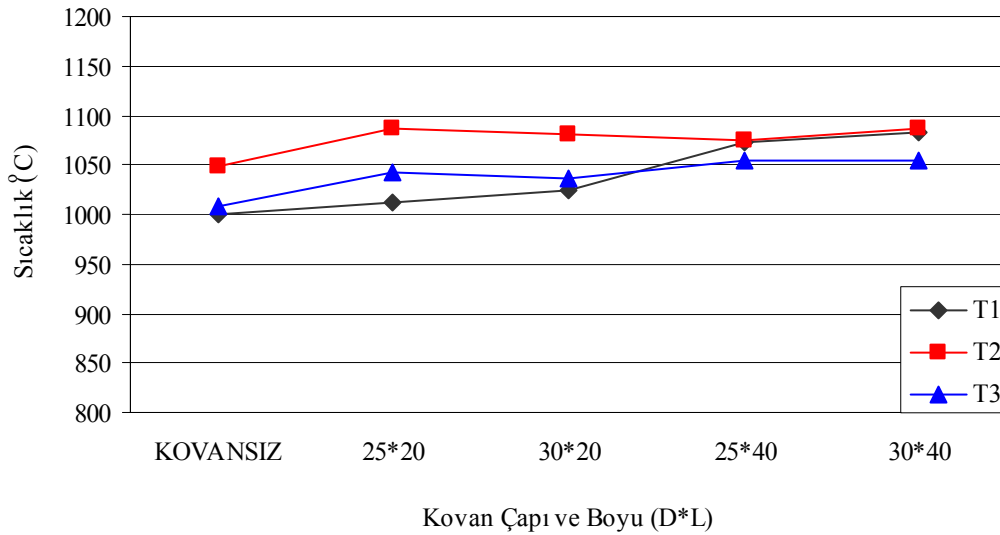
Aynı ocak boyunda ve aynı kazan ısıtma kapasitesinde (116 kW), HFK'nın 1.26 değerinden 1.02 değerine düşürülmesiyle kovansız deneylerde T1 noktasındaki alev sıcaklığı 896 °C değerinden 1001 °C değerine artmıştır (Şekil 6.3 ve 6.4). T2 ve T3 noktalarındaki alev sıcaklıkları için hava fazlalık katsayısının azalması ile belirgin bir sıcaklık artışı meydana gelmemiştir. Farklı konumlardaki sıcaklıklar HFK = 1.26 değerine kıyasla birbirlerine daha yakın değerler almıştır. Buradan hava fazlalık katsayısı değeri azaldıkça alevin homojenleştiği sonucuna varılabilir.

Hava fazlalık katsayısının 1.02 değeri için alev sıcaklıkları kovansız deneyde tüm kovanlı deneylerden daha düşüktür. Kovan çapı ve uzunluğu arttıkça alev sıcaklıklarının da arttığı görülmektedir. Hava fazlalık katsayısı 1.26 halinde alevin uç kısmına gittikçe alev sıcaklığındaki değişimin azalması durumu HFK 1.02 için görülmemektedir.

Hava fazlalık katsayısının 1.02 değerinde ocak içinde kovanların farklı konumlarda bulunması (0 ve 9 konumu) alev sıcaklığında etkili bir rol oynamamıştır.



**Şekil 6.3.** Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumunda 116 kW kazan ısı kapasitesi için alev sıcaklıklarının karşılaştırılması (Yakıt debisi =10.72 Nm<sup>3</sup>/h, HFK = 1.02, Kovan konumu = 0 cm).

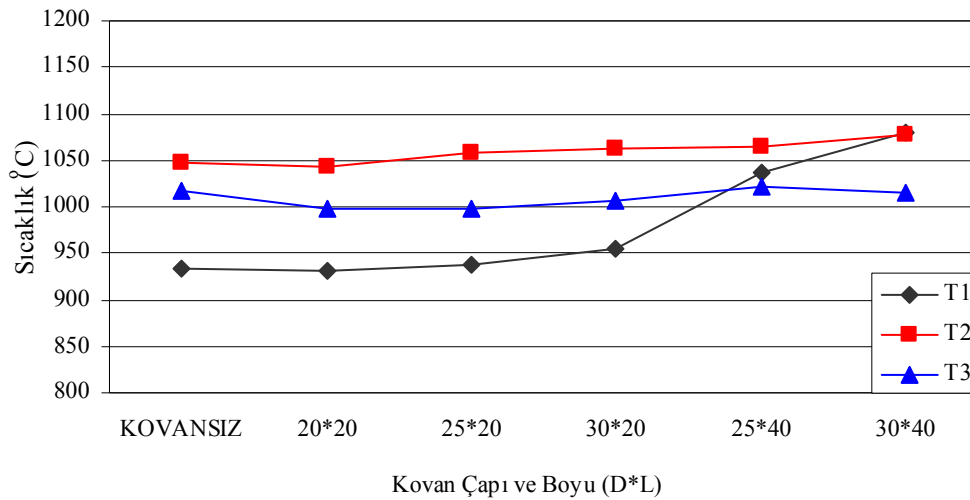


**Şekil 6.4.** Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumunda 116 kW kazan ısı kapasitesi için alev sıcaklıklarının karşılaştırılması (Yakıt debisi =10.72 Nm<sup>3</sup>/h, HFK = 1.02, Kovan konumu = 9 cm).

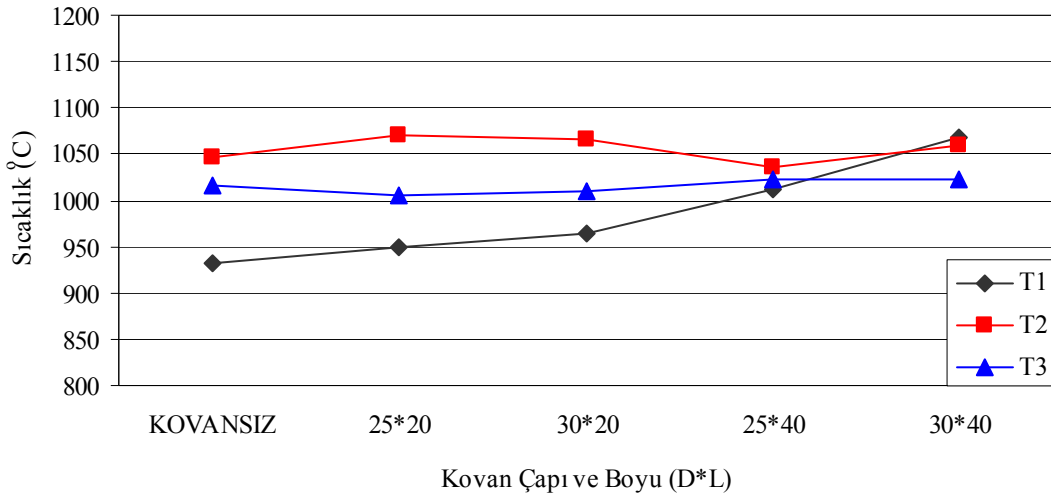
Aynı ocak boyunda (790 mm), farklı iki kazan ısıtma kapasitesinde deneyler tekrarlanmıştır. Bu kazan ısıtma kapasiteleri 87 ve 58 kW'dır. Bu kazan ısıtma kapasitelerini sağlayan yakıt debileri ise sırasıyla 8.04 Nm<sup>3</sup>/h, 5.35 Nm<sup>3</sup>/h'dir.

790 mm ocak boyunda, kazan ısıtma kapasitesinin 87 kW, yakıt debisinin 8.04 Nm<sup>3</sup>/h ve hava fazlalık katsayısının 1.26 değerinde yapılan deneyler Şekil 6.5 ve 6.6'da karşılaştırılmıştır. Alevin başlangıç kısmındaki sıcaklık orta ve uç kısımlarına göre daha düşük değer almıştır. En düşük alev sıcaklığı, alevin baş kısmında (T1) olup çapı ve uzunluğu 20\*20 cm olan kovan kullanılması halinde 930 °C olarak ölçülmüştür. Kovansız deneyde T1 sıcaklığı 932 °C'dir.

Kovanın ocak içindeki konumuna göre alev sıcaklığının değişimi incelendiğinde, her iki konumda da her bir kovan için sıcaklıklar birbirine karakteristik olarak benzerdir. Alev sıcaklıklarının bu ocak boyunun anma ısıtma gücüne göre düşük olduğu görülmüştür. Bu düşüşün nedeni ise azalan yakıt miktarı ile alev yükünün de bu ocak boyu için küçük kalmasıdır.



**Şekil 6.5.** Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumunda 87 kW kazan ısıtma kapasitesi için alev sıcaklıklarının karşılaştırılması (Yakıt debisi = 8.04 Nm<sup>3</sup>/h, HFK = 1.26, Kovan konumu = 0 cm).



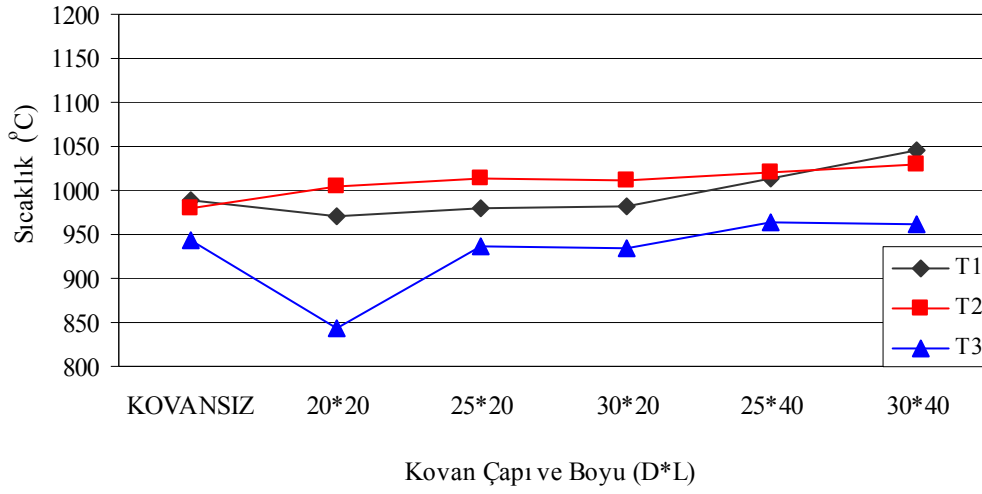
**Şekil 6.6.** Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumunda 87 kW kazan ısı kapasitesi için alev sıcaklıklarının karşılaştırılması (Yakıt debisi = 8.04 Nm<sup>3</sup>/h, HFK = 1.26, Kovan konumu = 9 cm).

790 mm ocak boyunda, kazan ısı kapasitesinin 58 kW, yakıt debisinin 5.35 Nm<sup>3</sup>/h ve hava fazlalık katsayısının 1.26 değerinde yapılan deneyler Şekil 6.7 ve 6.8'de karşılaştırılmıştır.

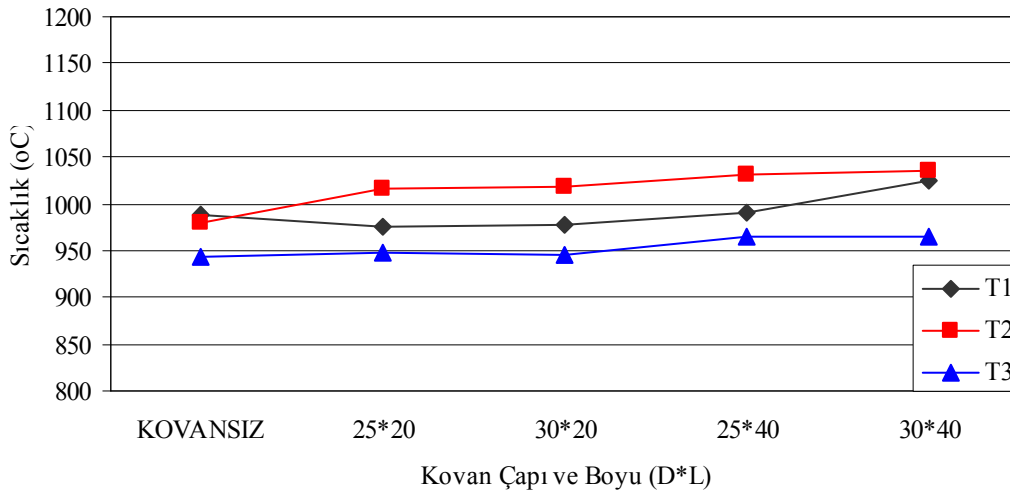
Çapı ve uzunluğu 20\*20 cm olan kovanın T1 sıcaklığı (970 °C) olup diğer kovanlardan ve kovansız durumdaki alev sıcaklığından (T1 = 989 °C) daha düşük ölçülmüştür. Bu ocak boyunda 58 kW kazan ısı kapasitesinde diğer kazan ısı kapasitelerine (116 ve 87 kW) kıyasla özellikle T3 sıcaklığı daha düşük değer almıştır. Alev sıcaklık değişiminin bu karakteristik yapısı, azalan yakıt debisi ile ocak yükündeki düşme olarak izah edilebilir.

Kovanın ocak içindeki konumuna göre alev sıcaklığının değişimi incelendiğinde, tüm kovanlarda her iki konumda sıcaklık değerlerinin birbirine yakın değerler aldığı görülmüştür.





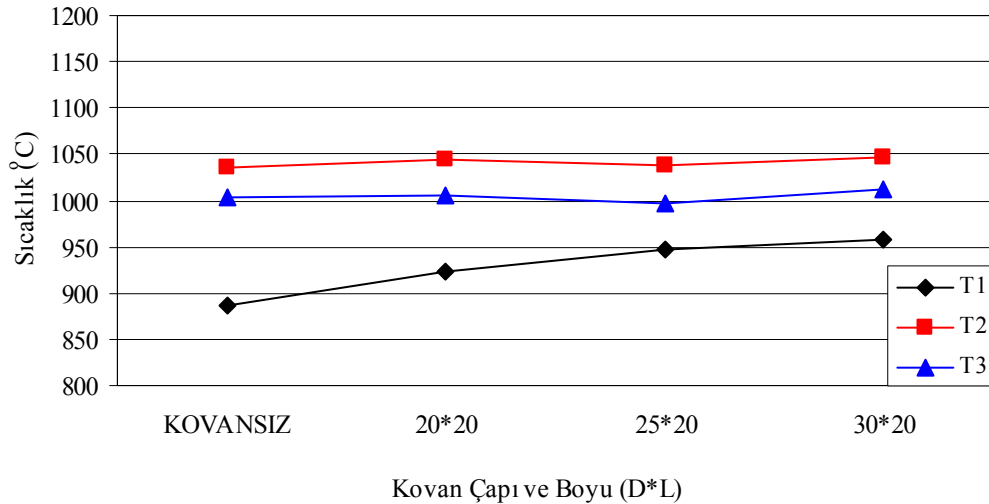
**Şekil 6.7.** Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumunda 58 kW kazan ısı kapasitesi için alev sıcaklıklarının karşılaştırılması (Yakıt debisi = 5.35 Nm<sup>3</sup>/h, HFK = 1.26, Kovan konumu = 0 cm).



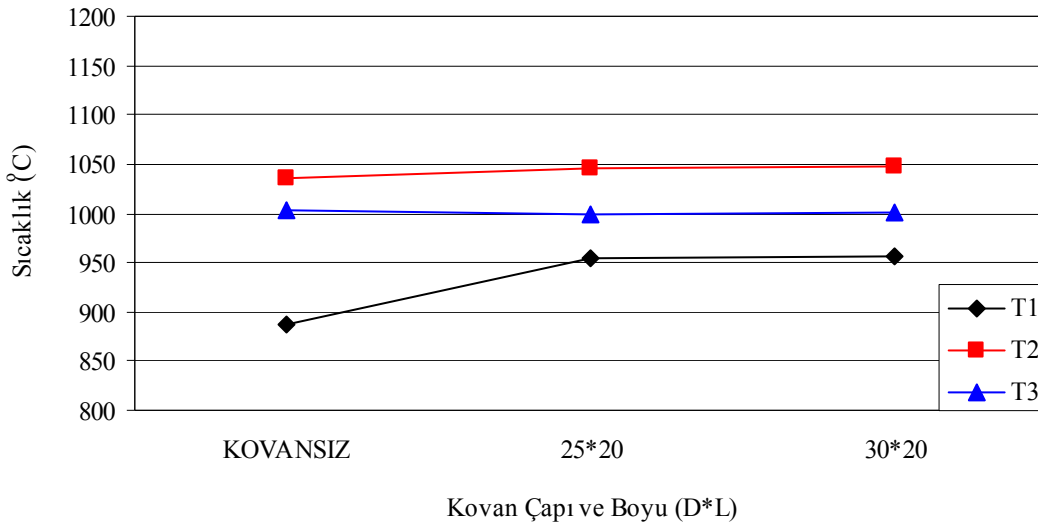
**Şekil 6.8.** Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumunda 58 kW kazan ısı kapasitesi için alev sıcaklıklarının karşılaştırılması (Yakıt debisi = 5.35 Nm<sup>3</sup>/h, HFK = 1.26, Kovan konumu = 9 cm).

### b) Kazan ocak boyunun 680 mm olması durumu;

Kazan ocak boyunun 680 mm olması durumunda, kazan anma ısı gücü (maksimum kazan ısı kapasitesi) 87 kW ve bu anma ısı gücünü sağlayan yakıt debisinin de 8.04 Nm<sup>3</sup>/h olduğu belirtilmişti. Bu şartlarda ve hava fazlalık katsayısının (HFK) 1.26 değerinde yapılan deneylerde ölçülen alev sıcaklıkları Şekil 6.9 ve 6.10'da gösterilmiştir. Tüm kovanlı ve kovansız deneyler karşılaştırıldığında T1 sıcaklığı kovansız durumda en düşük değeri (887 °C) almıştır. Alev sıcaklığındaki kovan tipine göre artış özellikle T1 ölçüm noktasında çok belirgindir. T1 sıcaklığının kovan çapı ve uzunluğu arttıkça arttığı görülmektedir. T2 ve T3 ölçüm noktalarında bu sıcaklık artışı çok azdır. T2 ve T3 sıcaklıkları kovanlı ve kovansız deneyler için birbirine yakın ölçülmüştür. 87 kW kazan ısı kapasitesinin; hava fazlalık katsayısının 1.26 değerinde, hem 790 mm hem de 680 mm ocak boylarında sağlanması durumunda kovansız deney için T1 sıcaklığı 790 mm ocak boyunda daha yüksektir (932 °C). Fakat 790 mm ocak boyunun kazan anma ısı kapasitesinde kovansız durumda ölçülen T1 sıcaklığı (896 °C), 680 mm ocak boyunun kazan anma ısı kapasitesinde ölçülen T1 sıcaklığı (887 °C) birbirine yakındır. Kovanın ocak içindeki konumu sıcaklıklar üzerinde etkili olmamıştır.



**Şekil 6.9.** Kazan ocak boyunun 680 mm olması durumunda 87 kW kazan ısı kapasitesi için alev sıcaklıklarının karşılaştırılması (Yakıt debisi = 8.04 Nm<sup>3</sup>/h, HFK = 1.26, Kovan konumu = 0 cm).

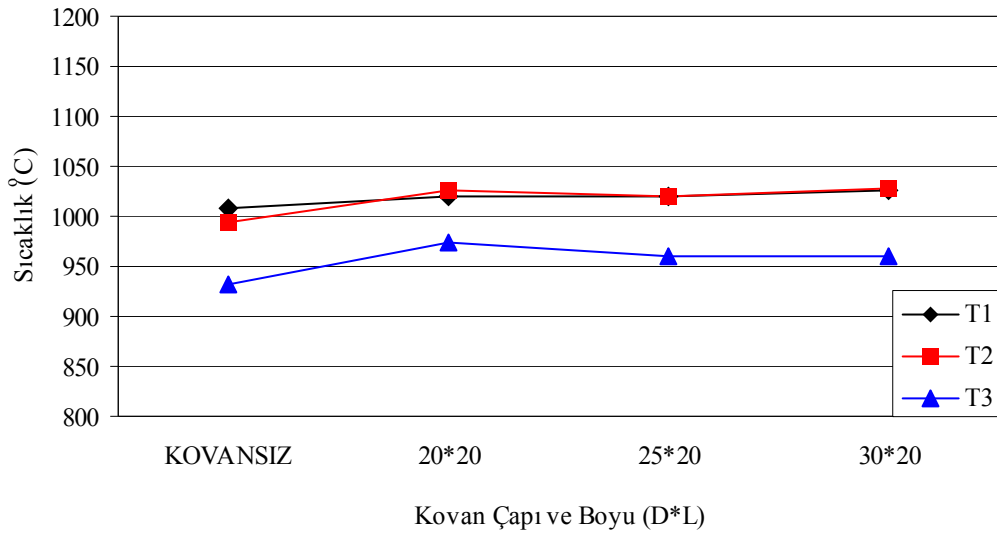


**Şekil 6.10.** Kazan ocak boyunun 680 mm olması durumunda 87 kW kazan ısı kapasitesi için alev sıcaklıklarının karşılaştırılması (Yakıt debisi = 8.04 Nm<sup>3</sup>/h, HFK = 1.26, Kovan konumu = 9 cm).

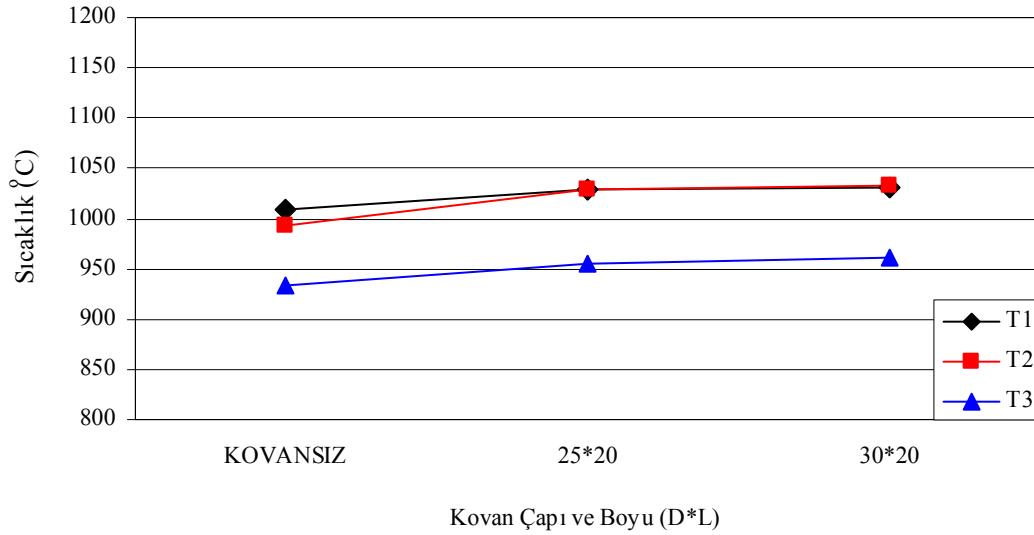
Aynı ocak boyunda ve aynı kazan ısı kapasitesinde (87 kW), HFK'nın 1.26 değerinden 1.02 değerine düşürüldüğünde kovansız deneylerde T1 noktasındaki alev sıcaklığı 887 °C değerinden 1008 °C değerine artmıştır (Şekil 6.11 ve 6.12). Hava fazlalık katsayısının azalması ile özellikle T3 sıcaklığında belirgin bir sıcaklık azalması meydana gelmiştir. Buradan hava fazlalık katsayısı değeri azaldıkça alevin boyunun kısaldığı sonucuna varılabilir.

Hava fazlalık katsayısının 1.02 değeri için alev sıcaklıkları kovansız deneyde tüm kovanlı deneylerden daha düşüktür. Ayrıca HFK= 1.26 değerinden farklı olarak T1 sıcaklığı ile T2 sıcaklığı birbirine yaklaşmış ve kovan çapı ve uzunluğu arttıkça alev sıcaklıklarında belirgin bir artış görülmemiştir. Bütün bunlar alev boyunun kısaldığını gösteren işaretlerdir.

Kovanın ocak içindeki konumuna göre alev sıcaklığının değişimi incelendiğinde, her iki konumda da her bir kovan için sıcaklıklar birbirine oldukça yakın değerler almıştır.



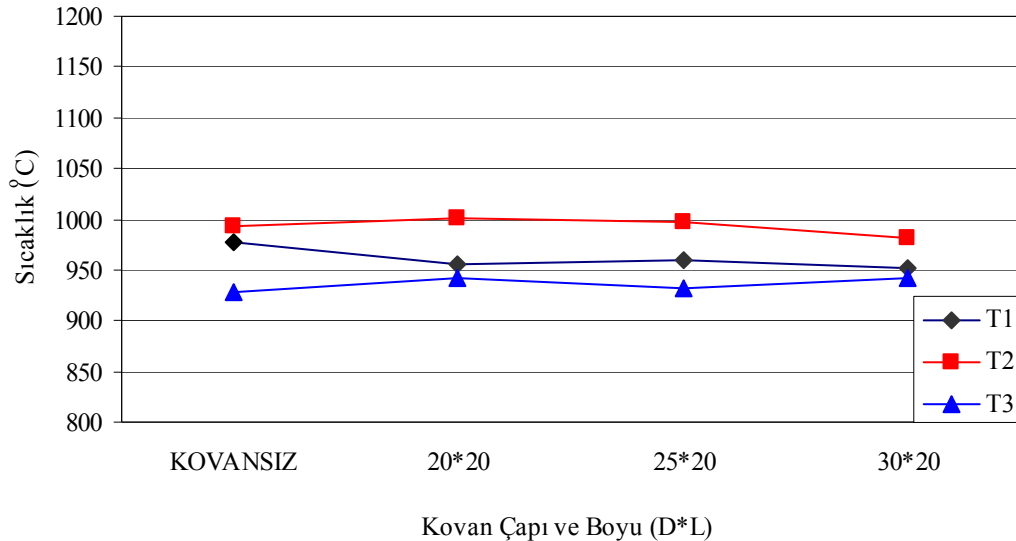
**Şekil 6.11.** Kazan ocak boyunun 680 mm olması durumunda 87 kW kazan ısıtma kapasitesi için alev sıcaklıklarının karşılaştırılması (Yakıt debisi = 8.04 Nm<sup>3</sup>/h, HFK = 1.02, Kovan konumu = 0 cm).



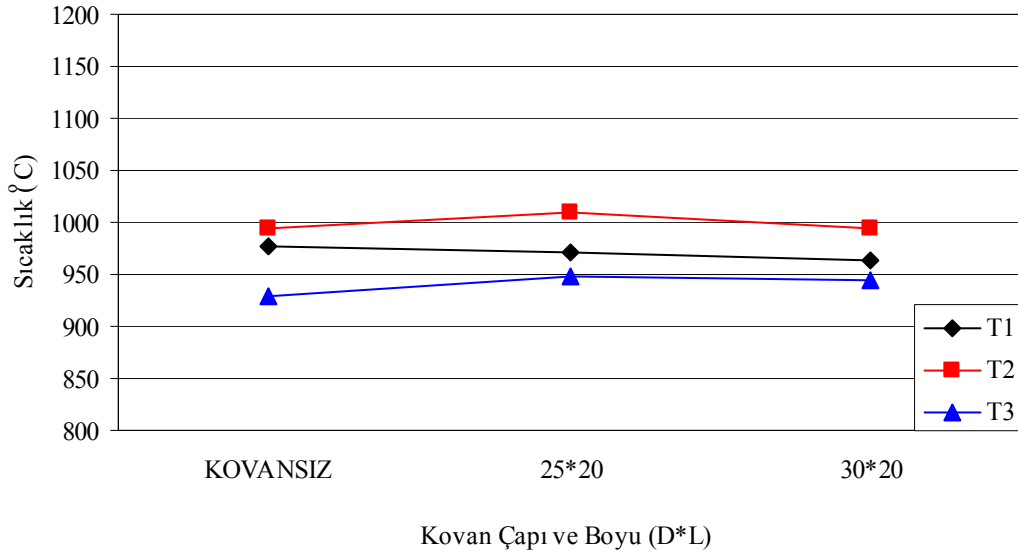
**Şekil 6.12.** Kazan ocak boyunun 680 mm olması durumunda 87 kW kazan ısıtma kapasitesi için alev sıcaklıklarının karşılaştırılması (Yakıt debisi = 8.04 Nm<sup>3</sup>/h, HFK = 1.02, Kovan konumu = 9 cm).

Aynı ocak boyunda (680 mm), 58 kW kazan ısı kapasitesinde deneyler tekrarlanmıştır. Bu kazan ısı kapasitesini sağlayan yakıt debisi ise  $5.35 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 'dir. Bu şartlarda ve hava fazlalık katsayısının 1.26 değerinde yapılan deneyler Şekil 6.13 ve 6.14'de karşılaştırılmıştır. Burada tüm ölçüm noktalarındaki sıcaklık kazan anma ısı kapasitesinde ölçülen değerlere göre azalma göstermiştir. Bu durum alev sıcaklığının yakıt debisinin azalmasıyla azaldığını gösterir. Ayrıca sadece T1 noktasındaki sıcaklık artışı olması alev boyunun kısaldığını göstermektedir. T1 sıcaklığı kovansız durumda  $977 \text{ }^\circ\text{C}$  iken kovanlı durumlarda  $19 - 25 \text{ }^\circ\text{C}$  azalma göstermiştir. Her üç ölçüm noktasında da alev sıcaklıkları bütün kovanlar için birbirine oldukça yakın değer almıştır.

58 kW kazan ısı kapasitesinin; hava fazlalık katsayısının 1.26 değerinde, hem 790 mm hem de 680 mm ocak boylarında sağlanması durumunda kovansız durum için alev sıcaklıkları her iki ocak boyu içinde birbirine oldukça yakın değer almıştır (Şekil 6.7, 6.8, 6.13 ve 6.14). Kovanın ocak içindeki konumuna göre alev sıcaklığının değişimi incelendiğinde, ocak ağzından 9 cm içeride yerleştirilmeleri halinde alev sıcaklıklarının, kovanların ocak ağzına yerleştirilmelerine (0 cm konumu) kıyasla  $10 - 12 \text{ }^\circ\text{C}$  daha fazla oldukları görülmüştür.



**Şekil 6.13.** Kazan ocak boyunun 680 mm olması durumunda 58 kW kazan ısı kapasitesini için alev sıcaklıklarının karşılaştırılması (Yakıt debisi =  $5.35 \text{ Nm}^3/\text{h}$ , HFK = 1.26, Kovan konumu = 0 cm).

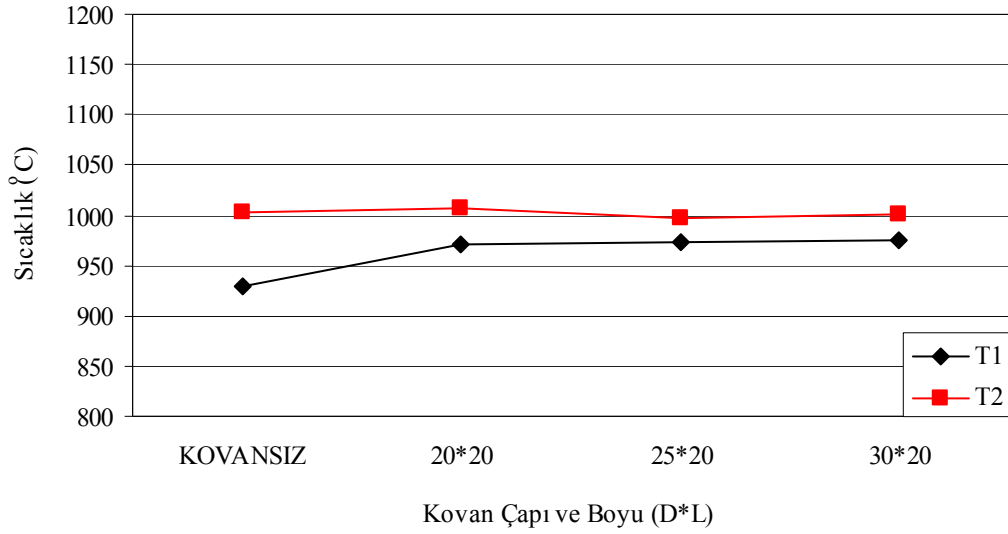


**Şekil 6.14.** Kazan ocak boyunun 680 mm olması durumunda 58 kW kazan ısı kapasitesi için alev sıcaklıklarının karşılaştırılması (Yakıt debisi = 5.35 Nm<sup>3</sup>/h, HFK = 1.26, Kovan konumu = 9 cm).

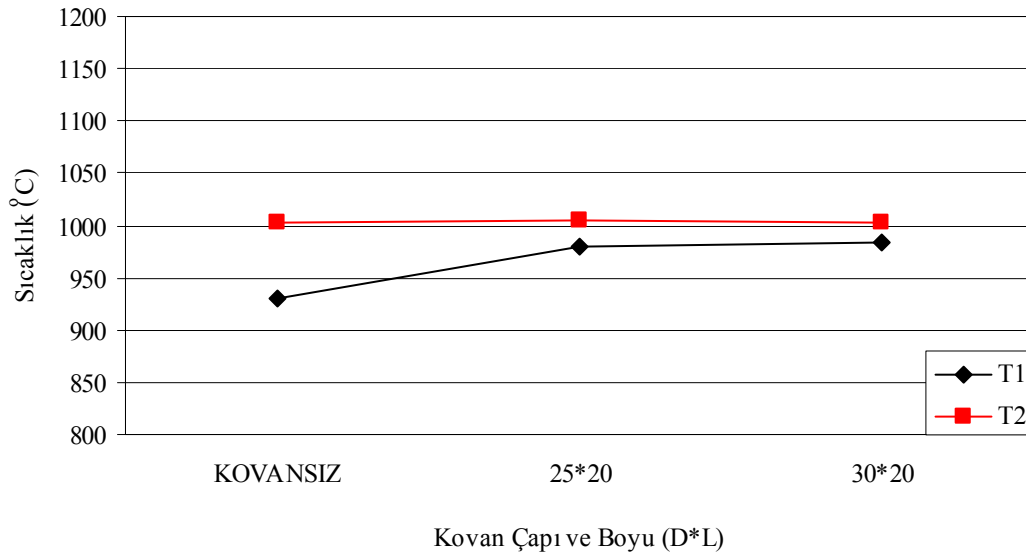
**c) Kazan ocak boyunun 550 mm olması durumu;**

Kazan ocak boyunun 550 mm olması durumunda, kazan anma ısı gücü (maksimum kazan ısı kapasitesi) 58 kW ve bu anma ısı gücünü sağlayan yakıt debisinin de 5.35 Nm<sup>3</sup>/h olduğu belirtilmişti. Bu şartlarda ve hava fazlalık katsayısının (HFK) 1.475 değerinde yapılan deneylerde ölçülen alev sıcaklıkları Şekil 6.15 ve 6.16'da verilmiştir. Bu ocak boyunda T3 noktasından ocak boyunun kılmasından dolayı ölçüm yapılamamıştır. Bu nedenle bu ocak boyunda T2 noktası alev ucu bölgesine karşılık gelmektedir. Bu deneyde kovansız durumda T1 sıcaklığı 930 °C olup kovanlı durumlarda bu sıcaklık 41 – 45 °C daha yüksektir. T2 noktasından ölçülen sıcaklıklarda ise tüm kovanlı ve kovansız durumlar için sıcaklık değerleri birbirine çok yakındır.

Kovanın ocak içindeki konumuna göre alev sıcaklığının değişimi incelendiğinde, her iki konum içinde sıcaklıklar birbirine oldukça yakındır.



**Şekil 6.15.** Kazan ocak boyunun 550 mm olması durumunda 58 kW kazan ısıtım kapasitesi için alev sıcaklıklarının karşılaştırılması (Yakıt debisi = 5.35 Nm<sup>3</sup>/h, HFK = 1.475, Kovan konumu = 0 cm).

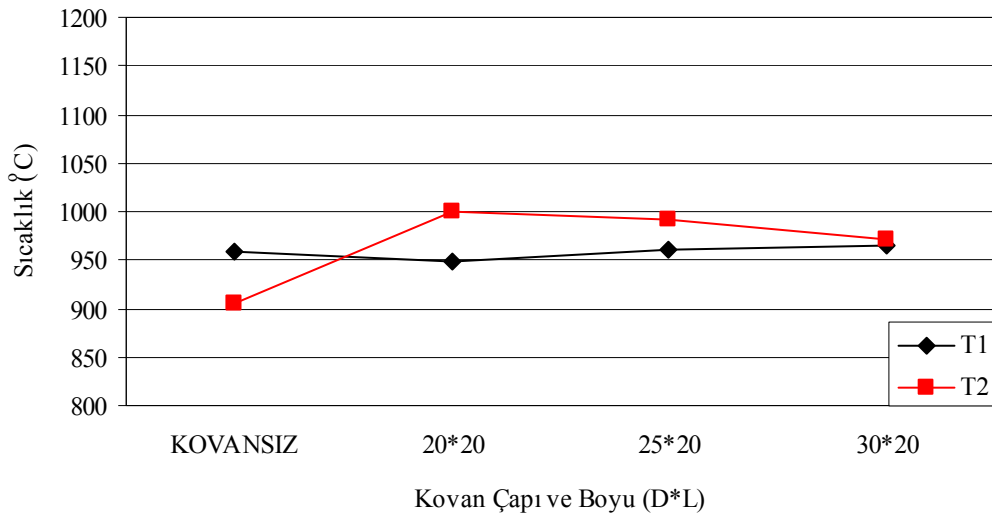


**Şekil 6.16.** Kazan ocak boyunun 550 mm olması durumunda 58 kW kazan ısıtım kapasitesi için alev sıcaklıklarının karşılaştırılması (Yakıt debisi = 5.35 Nm<sup>3</sup>/h, HFK = 1.475, Kovan konumu = 9 cm).

Bu ocak boyunda ve kazan ısıtma kapasitesinde kararlı alevin oluştuğu en zengin karışım hava fazlalık katsayısının 1.26 değerinde gerçekleşmiştir. Aynı ocak boyunda ve aynı kazan ısıtma kapasitesinde hava fazlalık katsayısının 1.475'den 1.26 değerine düşürülmesi halinde kovansız deneyler için T1 noktasının sıcaklığı 930 °C'den 958 °C'ye çıkmıştır (Şekil 6.15 ve 6.17). Bu artış T2 noktasının sıcaklığı için söz konusu değildir. T1 sıcaklığı kovan çapı ve boyu ile az bir artış göstermektedir.

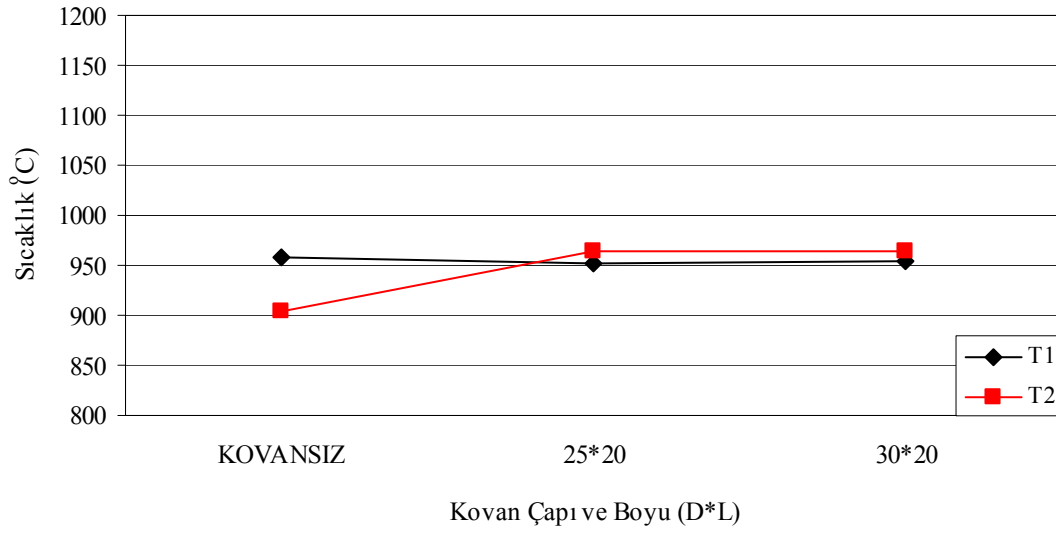
58 kW kazan ısıtma kapasitesinin; hava fazlalık katsayısının 1.26 değerinde, 790 mm, 680 mm ve 550 mm ocak boylarında aynı hava fazlalık katsayısında kovansız deneyler için alev sıcaklıkları karşılaştırıldığında en düşük ocak boyunda (550 mm) T1 sıcaklığı (958 °C) en düşüktür.

Kovanın ocak içindeki konumuna göre alev sıcaklığının değişimi incelendiğinde, ocak ağzından 9 cm içeride yerleştirilmeleri halinde alev sıcaklıklarının, kovanların tam ocak ağzına yerleştirilmelerine (0 cm konumu) kıyasla 8 – 28 °C daha az oldukları görülmüştür (Şekil 6.17 ve 6.18).



**Şekil 6.17.** Kazan ocak boyunun 550 mm olması durumunda 58 kW kazan ısıtma kapasitesi için alev sıcaklıklarının karşılaştırılması (Yakıt debisi = 5.35 Nm<sup>3</sup>/h, HFK = 1.26, Kovan konumu = 0 cm).



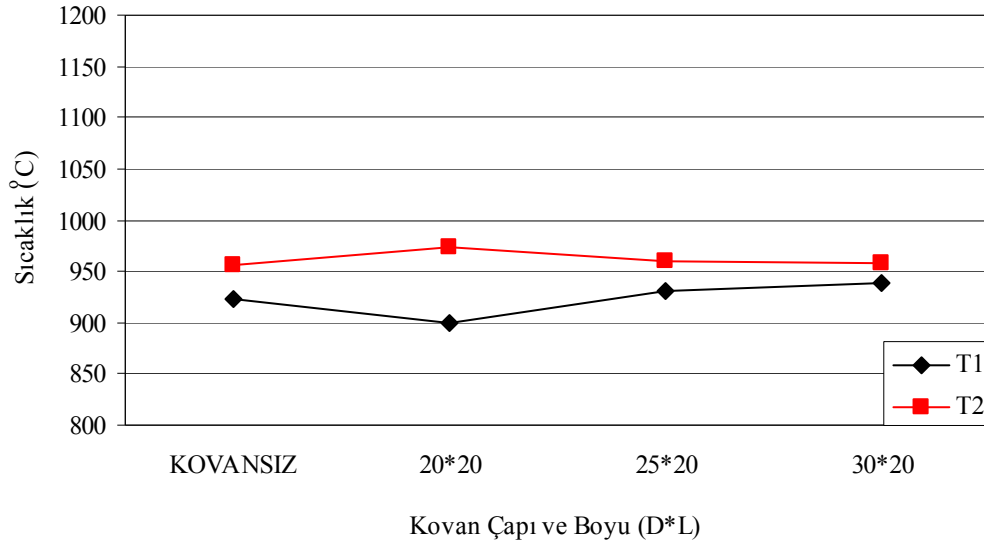


**Şekil 6.18.** Kazan ocak boyunun 550 mm olması durumunda 58 kW kazan ısı kapasitesi için alev sıcaklıklarının karşılaştırılması (Yakıt debisi = 5.35 Nm<sup>3</sup>/h, HFK = 1.26, Kovan konumu = 9 cm).

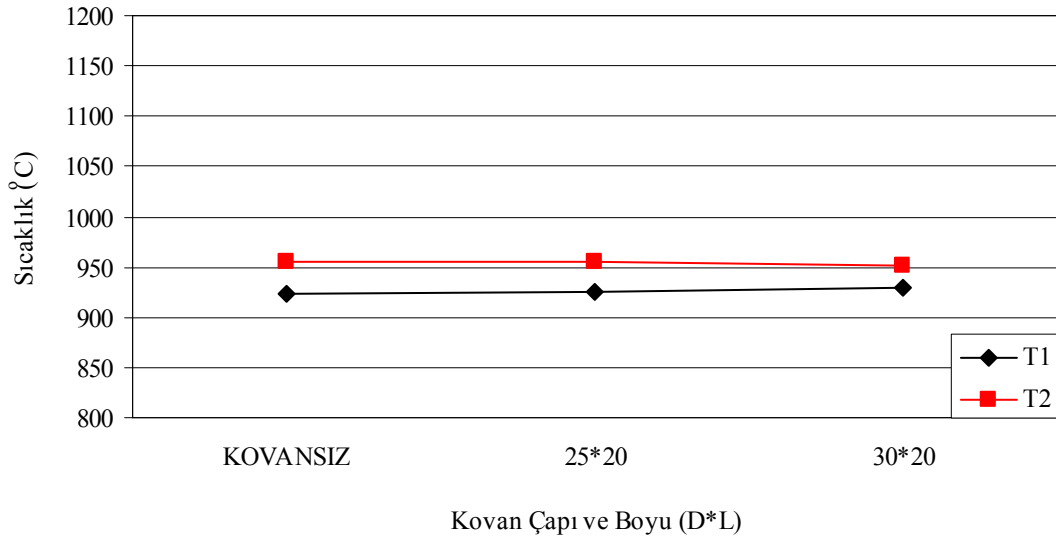
Aynı ocak boyunda, 43.5 kW kazan ısı kapasitesi için deneyler tekrarlanmıştır. Bu kazan ısı kapasitesini sağlayan yakıt debisi 4.00 Nm<sup>3</sup>/h'dir. Bu şartlarda ve hava fazlalık katsayısının 1.475 değerinde deneyde ölçülen alev sıcaklıkları Şekil 6.19 ve 6.20'de karşılaştırılmıştır. Bu deneyde tüm diğer ocak boyları ve kazan ısı kapasitelerine göre kovanlı ve kovansız durumlar için T1 ve T2 sıcaklıklarında düşme görülmüştür. Çapı ve uzunluğu 20\*20 cm olan kovan için 0 cm konumunda T1 sıcaklığı (899 °C) en düşük sıcaklık olarak ölçülmüştür.

Kovanın ocak içindeki konumuna göre alev sıcaklığının değişimi incelendiğinde, her iki konumda da her bir kovan için sıcaklıklar birbirine oldukça yakın değer almıştır (Şekil 6.19 ve 6.20).

Ocak boyu kısaldıkça azalan yakıt debisi ile birlikte alev sıcaklıkların birbirine yakın değer aldığı görülmüştür. Bunun nedeni olarak azalan yakıt debisi ile birlikte alev boyunun kısılması söylenebilir.



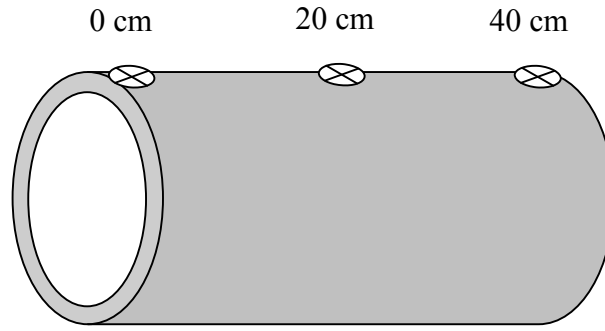
**Şekil 6.19.** Kazan ocak boyunun 550 mm olması durumunda 43.5 kW kazan ısı kapasitesi için alev sıcaklıklarının karşılaştırılması (Yakıt debisi = 4.00 Nm<sup>3</sup>/h, HFK = 1.475, Kovan konumu = 0 cm).



**Şekil 6.20.** Kazan ocak boyunun 550 mm olması durumunda 43.5 kW kazan ısı kapasitesi için alev sıcaklıklarının karşılaştırılması (Yakıt debisi = 4.00 Nm<sup>3</sup>/h, HFK = 1.475, Kovan konumu = 9 cm).

### 6.1.2. Kovan yüzey sıcaklıkları

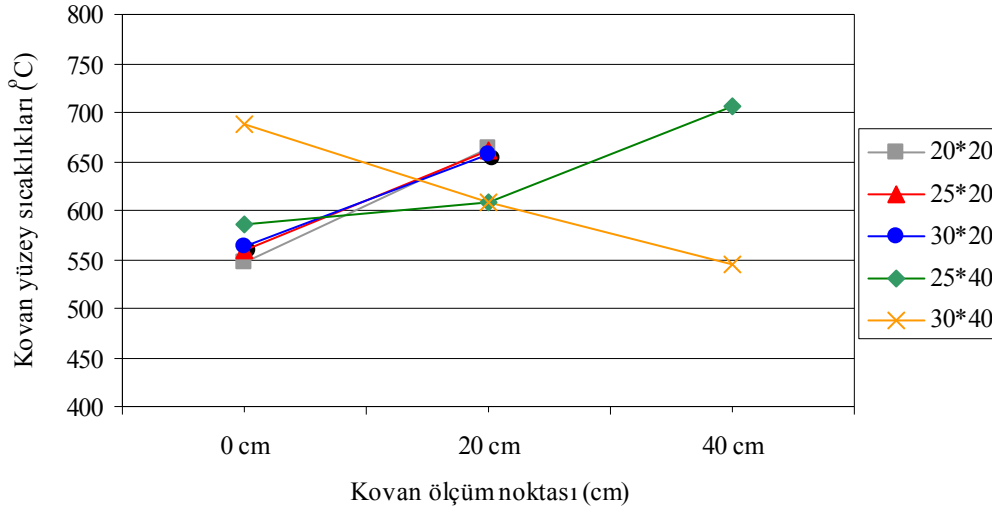
Kovanların yüzey sıcaklıkları kovanın iki ucundan ve ortasından olmak üzere üç noktadan ölçülmüştür. Orta noktadan ölçüm işlemi sadece 25\*40 ve 30\*40 gibi uzun kovanlarda yapılmıştır. Kovan yanma odasına yerleştirildiğinde brülör tarafına bakan kısmından itibaren ölçüm noktalarının yerleri uzun kovanlar için Şekil 6.21’de gösterilmiştir. Boyu 20 cm olan kısa kovanlarda sadece 0 cm ile 20 cm ölçüm noktaları mevcuttur.



Şekil 6.21. Kovanlarda yüzey sıcaklığı ölçüm noktaları.

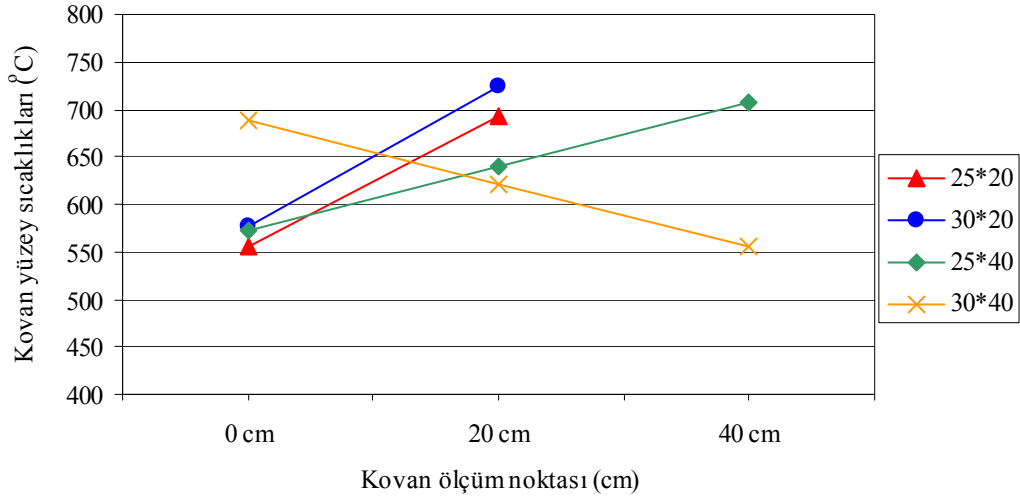
#### a) Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumu;

Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumunda maksimum kazan ısı kapasitesinin 116 kW olduğu ve bu ısı kapasitenin de 10.72 Nm<sup>3</sup>/h yakıt debisi ile sağlandığı belirtilmişti. Bu şartlarda ve hava fazlalık katsayısının (HFK) 1.26 değerinde yapılan deneylerde kovanların ön, orta ve arka kısımlarından yüzey sıcaklıkları ölçülmüş, Şekil 6.22 ve 6.23’de karşılaştırılmıştır.



**Şekil 6.22.** Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumunda 116 kW kazan ısıtım kapasitesi için kovan yüzey sıcaklıklarının değişimi (Yakıt debisi =10.72 Nm<sup>3</sup>/h, HFK = 1.26, Kovan konumu = 0 cm)

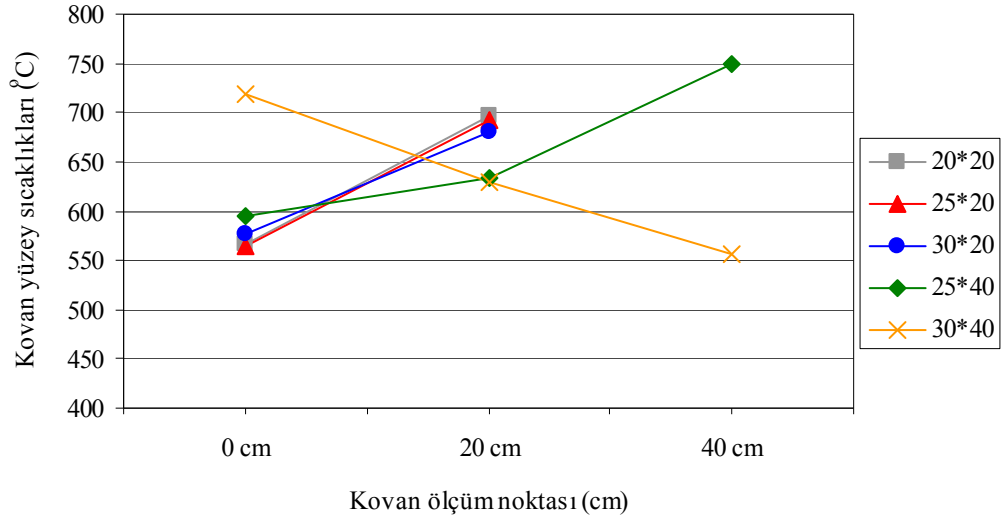
Kovanların ön kısımlarındaki sıcaklık alev sıcaklıklarında olduğu gibi kovan çapı ve uzunluğu arttıkça artmaktadır. Çapı ve uzunluğu 20\*20 cm olan kovan için ön kısmın yüzey sıcaklığı 546 °C iken, çapı ve uzunluğu 30\*40 cm olan kovan için bu sıcaklık 688 °C olarak ölçülmüştür. Bu farklılığın nedeni uzun kovanda T1 noktasındaki alev sıcaklığının daha yüksek olmasıdır. Kovanların 20 cm ölçüm noktalarındaki yüzey sıcaklıklarına bakıldığında çapları ve uzunlukları 25\*40cm ve 30\*40 cm olan kovanların bu noktalarındaki sıcaklık aynı değerde (607 °C) olup kısa kovanlara göre daha düşük değer almışlardır. Çapı ve uzunluğu 30\*40 olan kovanın 0 cm'indeki yüzey sıcaklığı 688°C iken, 40 cm'indeki yüzey sıcaklığı 545 °C'dir. Bu düşüş uzunluğa bağlı olsaydı aynı durumun çapı ve uzunluğu 25\*40 cm olan kovanı içinde gözlenmesi gerekirdi. Çapı ve uzunluğu 25\*40 cm olan kovanın 40 cm'indeki yüzey sıcaklığı daha yüksek (706 °C) değer almıştır. Bu nedenle çapı ve uzunluğu 30\*40 cm olan kovanın arka kısmının yüzey sıcaklığındaki düşüş, alev çapının bu bölgede bu kovan çapından daha az olmasından kaynaklanmıştır.



**Şekil 6.23.** Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumunda 116 kW kazan ısı kapasitesi için kovan yüzey sıcaklıklarının değişimi (Yakıt debisi =10.72 Nm<sup>3</sup>/h, HFK = 1.26, Kovan konumu = 9 cm)

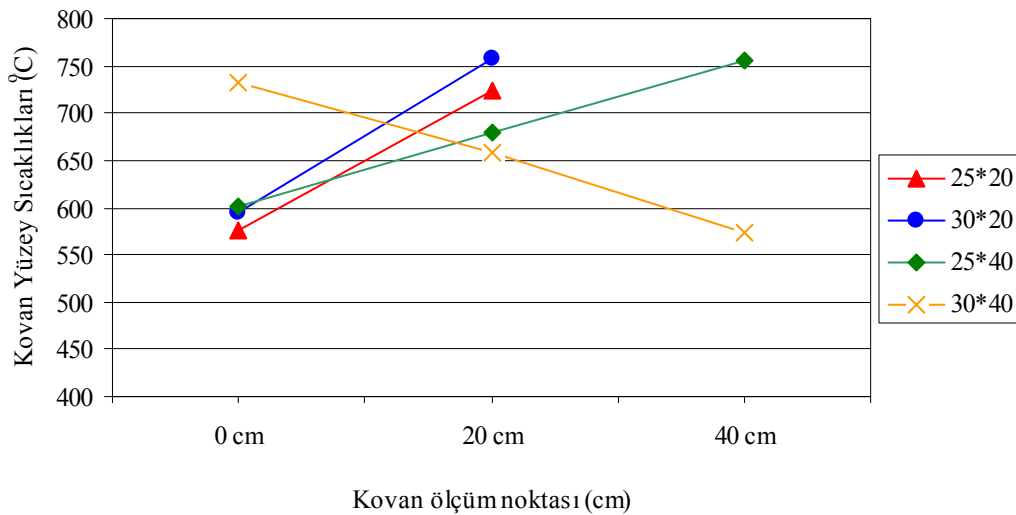
Kovanın ocak içindeki konumuna göre kovan yüzey sıcaklıklarının değişimi incelendiğinde, kovanların her iki konumda da ön kısımlarının yüzey sıcaklıkları birbirine yakın değer almıştır. 9 cm konumunda da kovanların yüzey sıcaklıkları 0 cm konumunda olduğu gibi aynı karakteristik özellikleri taşımaktadır. Çapı ve uzunluğu 25\*40 cm olan kovanda arka kısmın yüzey sıcaklığı (707°C) olup 0 cm konumunda olduğu gibi 30\*40 cm kovanının arka yüzey sıcaklığından (555 °C) daha yüksek değer almıştır.

Aynı ocak boyunda, 116 kW kazan ısı kapasitesini sağlayan yakıt debisinde, hava fazlalık katsayısının 1.26 dan 1.02 değerine düşürülmesi halinde kovan yüzey sıcaklıkları, alev sıcaklıklarında olduğu gibi artış göstermiştir. Alev sıcaklıklarının karşılaştırılmasında T1 noktasında daha fazla sıcaklık artışı olurken, bu artış diğer T2 ve T3 noktalarında görülmemiştir. Kovan yüzey sıcaklıklarında ise artış tüm ölçüm noktalarında olmuştur. Buna kısalan alev boyunun sebep olduğunu söylemek mümkündür. Çapı ve uzunluğu 20\*20 olan kovan için ön kısmın (0 cm) yüzey sıcaklığı HFK = 1.26 değerinde 546 °C iken, HFK = 1.02 değerinde 567 °C olarak ölçülmüştür (Şekil 6.24 ve 6.25).



**Şekil 6.24.** Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumunda 116 kW kazan ısı kapasitesi için kovan yüzey sıcaklıklarının değişimi (Yakıt debisi =10.72 Nm<sup>3</sup>/h, HFK = 1.02, Kovan konumu = 0 cm)

Kovanın ocak içindeki konumuna göre kovan yüzey sıcaklıklarının değişimi incelendiğinde, ocak ağzından 9 cm içeride yerleştirilmeleri halinde kovan yüzey sıcaklıklarının, kovanların tam ocak ağzına yerleştirilmelerine (0 cm konumu) kıyasla arttığı görülmüştür.

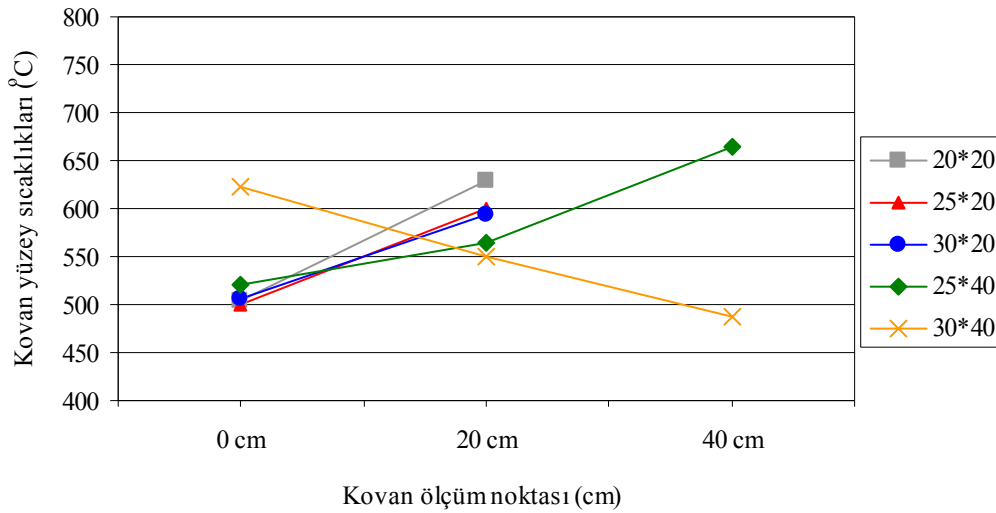


**Şekil 6.25.** Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumunda 116 kW kazan ısı kapasitesi için kovan yüzey sıcaklıklarının değişimi (Yakıt debisi =10.72 Nm<sup>3</sup>/h, HFK = 1.02, Kovan konumu = 9 cm)

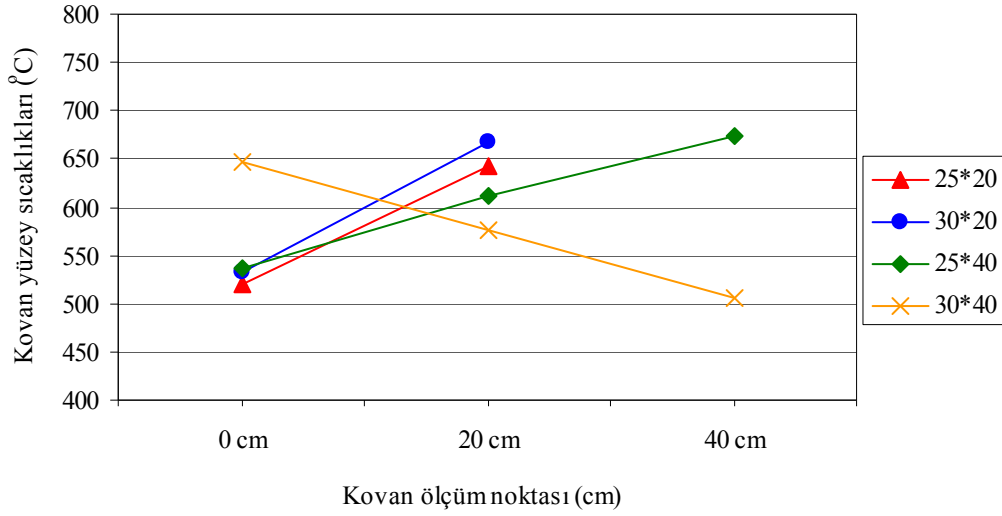
Aynı ocak boyunda (790 mm) farklı iki kazan ısıtma kapasitesinde deneyler tekrarlanmıştır. Bu kazan ısıtma kapasiteleri 87 kW ve 58 kW'dır. Bu kazan ısıtma kapasitelerini sağlayan yakıt debileri ise sırasıyla 8.04 Nm<sup>3</sup>/h, 5.35 Nm<sup>3</sup>/h'dir.

790 mm ocak boyunda, kazan ısıtma kapasitesinin 87 kW, yakıt debisinin 8.04 Nm<sup>3</sup>/h ve hava fazlalık katsayısının 1.26 değerinde yapılan deneyler Şekil 6.26 ve 6.27'de karşılaştırılmıştır. 87 kW kazan ısıtma kapasitesinde kovan yüzey sıcaklıkları 116 kW kazan ısıtma kapasitesine göre düşüş göstermiştir. Bu düşüşün nedeni azalan yakıt debisi ile azalan alev sıcaklığıdır. Kovanlı durumların hepsinde bütün yüzey sıcaklığı ölçme noktalarında anma ısıtma gücüne kıyasla 40-60 °C daha düşük değerler ölçülmüştür.

Kovanın ocak içindeki konumuna göre kovan yüzey sıcaklıklarının değişimi incelendiğinde, 9 cm konumunda kovan yüzey sıcaklıkları, 0 cm konumuna göre artış göstermiştir.

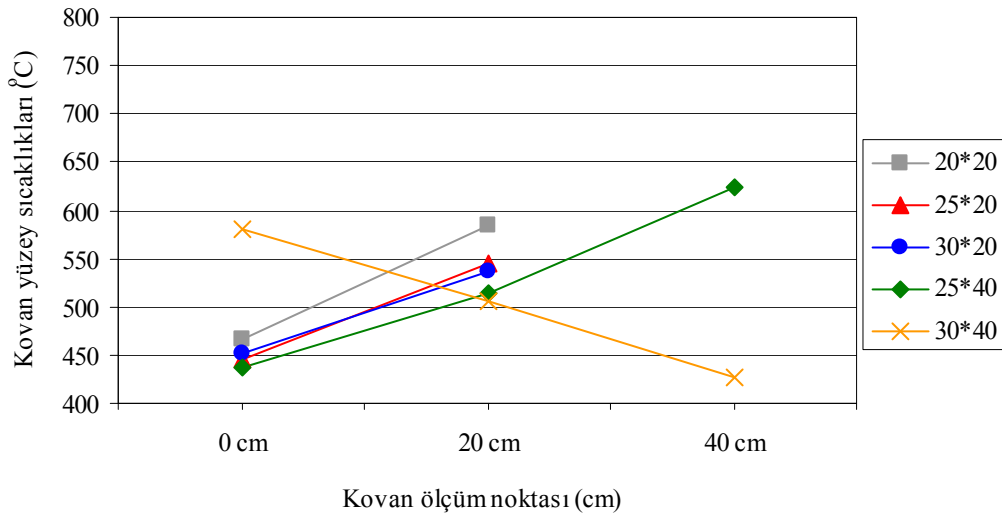


**Şekil 6.26.** Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumunda 87 kW kazan ısıtma kapasitesi için kovan yüzey sıcaklıklarının değişimi (Yakıt debisi = 8.04 Nm<sup>3</sup>/h, HFK = 1.26, Kovan konumu = 0 cm).



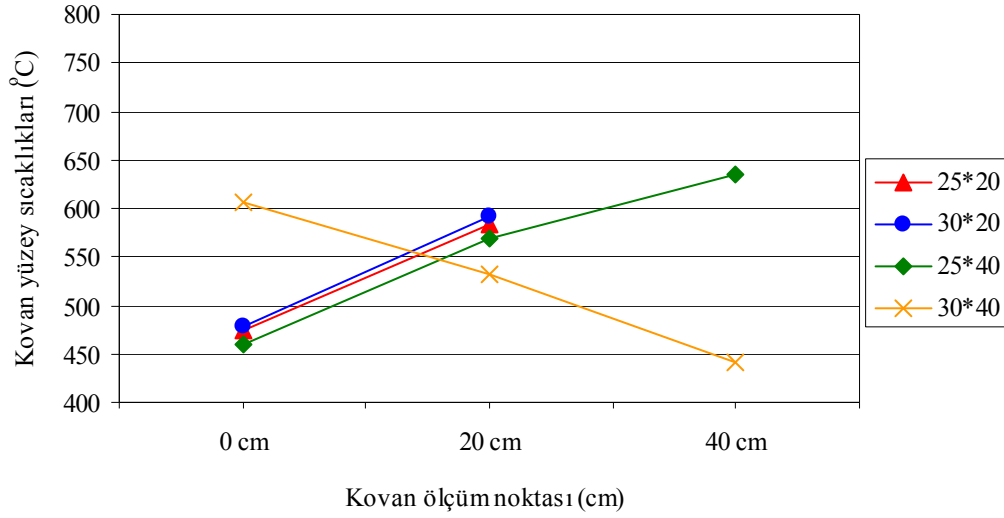
**Şekil 6.27.** Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumunda 87 kW kazan ısı kapasitesi için kovan yüzey sıcaklıklarının değişimi (Yakıt debisi = 8.04 Nm<sup>3</sup>/h, HFK = 1.26, Kovan konumu = 9 cm).

790 mm ocak boyunda, 58 kW kazan ısı kapasitesi ve 1.26 hava fazlalık katsayısı değerinde yapılan deneylerde kovan yüzey sıcaklıkları diğer kapasitelere göre daha da azalmıştır. 9 cm kovan konumunda kovan yüzey sıcaklıkları, 0 cm konumuna göre artış göstermiştir (Şekil 6.28 ve 6.29).



**Şekil 6.28.** Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumunda 58 kW kazan ısı kapasitesi için kovan yüzey sıcaklıklarının değişimi (Yakıt debisi = 5.35 Nm<sup>3</sup>/h, HFK = 1.26, Kovan konumu = 0 cm).



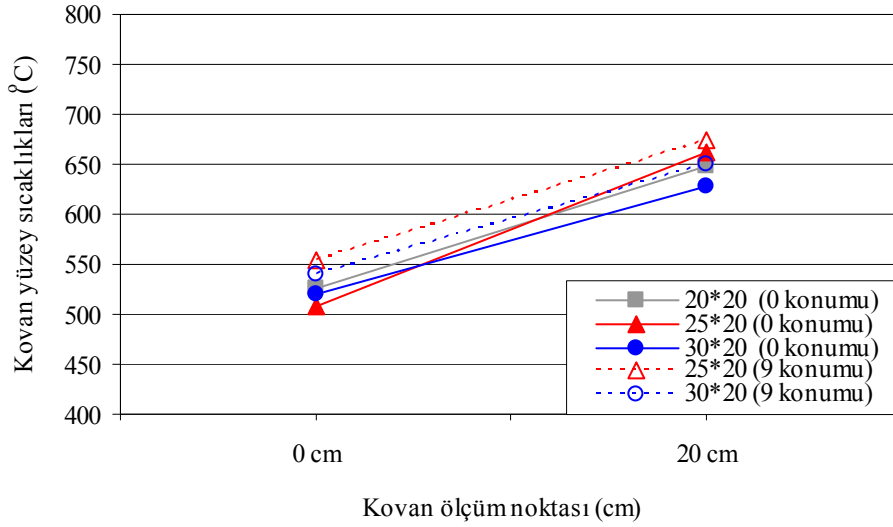


**Şekil 6.29.** Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumunda 58 kW kazan ısı kapasitesi için kovan yüzey sıcaklıklarının değişimi (Yakıt debisi = 5.35 Nm<sup>3</sup>/h, HFK = 1.26, Kovan konumu = 9 cm).

#### b) Kazan ocak boyunun 680 mm olması durumu;

Kazan ocak boyunun 680 mm olması durumunda maksimum kazan ısı kapasitesinin 87 kW olduğu ve bu ısı kapasitenin de 8.04 Nm<sup>3</sup>/h yakıt debisi ile sağlandığı belirtilmişti. Bu şartlarda ve hava fazlalık katsayısının (HFK) 1.26 değerinde yapılan deneylerde kovanların 0 cm, 20 cm ve 40 cm mesafesindeki yüzey sıcaklıkları ölçülmüş, Şekil 6.30'da karşılaştırılmıştır. Kovan ön kısımlarındaki (0 cm) yüzey sıcaklıkları birbirine oldukça yakın değer almıştır. 87 kW kazan ısı kapasitesinin; hava fazlalık katsayısının 1.26 değerinde, hem 790 mm hem de 680 mm ocak boylarında sağlanması durumunda kovan yüzey sıcaklıklarının değişimi Şekil 6.26 ve 6.30 göz önünde bulundurularak karşılaştırılabilir. Her iki ocak boyunda 87 kW kazan ısı kapasitesi için kovan yüzey sıcaklıkları karşılaştırıldığında 680 mm ocak boyunda kovan yüzey sıcaklıklarının artış gösterdiği görülür.

Kovanın ocak içindeki konumuna göre kovan yüzey sıcaklıklarının değişimi incelendiğinde, 9 cm konumunda kovan yüzey sıcaklıkları, 0 cm konumuna göre artış göstermiştir.

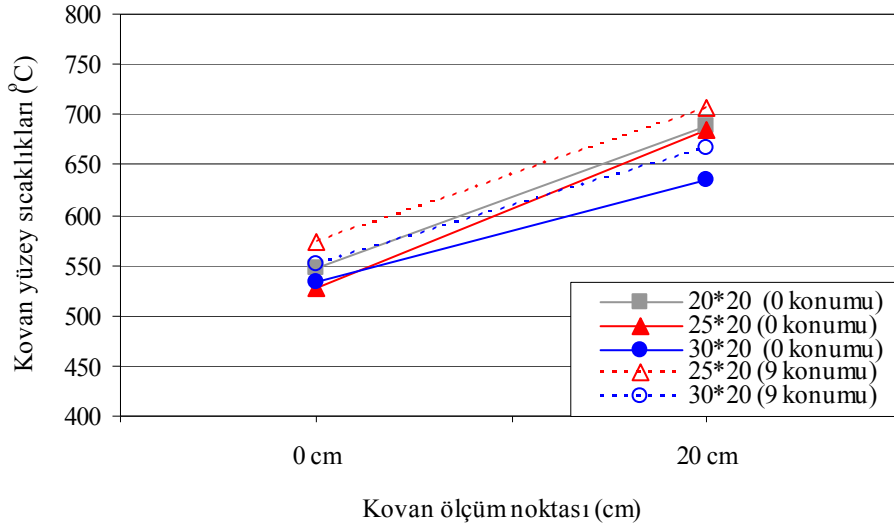


**Şekil 6.30.** Kazan ocak boyunun 680 mm olması durumunda 87 kW kazan ısı kapasitesi için kovan yüzey sıcaklıklarının değişimi (Yakıt debisi = 8.04 Nm<sup>3</sup>/h, HFK = 1.26).

Ocak hacminin küçülmesi nedeniyle alev oluşum karakteristiği bozulacağından, bu ocak boyunda, 40 cm uzunluğa sahip kovanlarla deney yapılmamıştır.

Aynı ocak boyunda, 87 kW kazan ısı kapasitesini sağlayan yakıt debisinde hava fazlalık katsayısının 1.26 dan 1.02 değerine düşürülmesi halinde kovan yüzey sıcaklıkları artış göstermiştir. Bu ocak boyunda da 790 mm ocak boyunun aynı ısı gücündeki aynı hava fazlalık katsayısı değeri için elde edilen kovan yüzey sıcaklıkları ile benzer karakteristik özellikler görülmektedir (Şekil 6.31).

Kovanın ocak içindeki konumuna göre kovan yüzey sıcaklıklarının değişimi incelendiğinde, 9 cm konumunda kovan yüzey sıcaklıkları, 0 cm konumunda bulunmalarına göre artış göstermiştir.

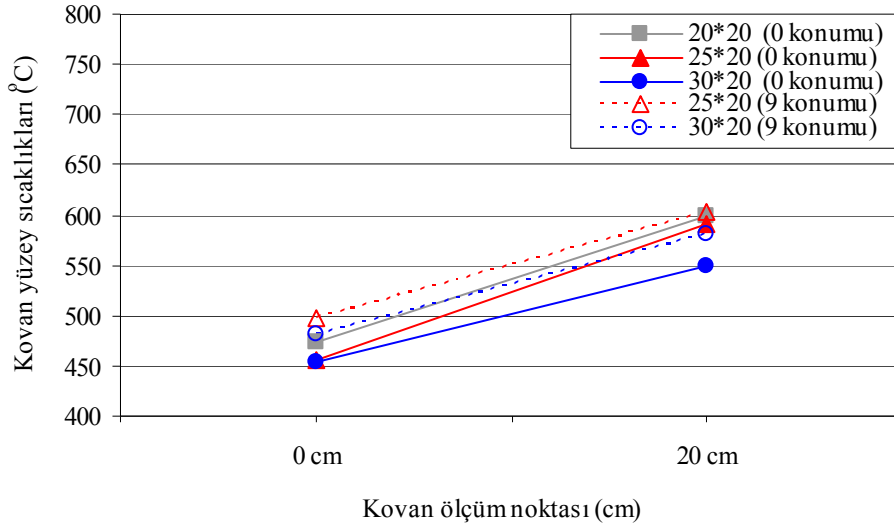


**Şekil 6.31.** Kazan ocak boyunun 680 mm olması durumunda 87 kW kazan ısıtma kapasitesi için kovan yüzey sıcaklıklarının değişimi (Yakıt debisi =  $8.04 \text{ Nm}^3/\text{h}$ , HFK = 1.02).

Aynı ocak boyunda (680 mm) 58 kW kazan ısıtma kapasitesi için deneyler tekrarlanmıştır. Bu kazan ısıtma kapasitesini sağlayan yakıt debisi  $5.35 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 'dir. Bu şartlarda ve hava fazlalık katsayısının 1.26 değerinde yapılan bu deneyde ölçülen kovan yüzey sıcaklıkları karşılaştırılmıştır (Şekil 6.32).

Bu kapasitede kovan yüzey sıcaklıklarının düştüğü görülmüştür. Bu düşüşün nedeni yakıt debisindeki bu azalma ile alev yükünün bu ocak boyu için küçük olmasındandır. Örneğin çapı ve uzunluğu 20\*20 olan kovanın ön kısmının yüzey sıcaklığı 87 kW kazan ısıtma kapasitesinde  $526^\circ\text{C}$  iken bu kapasitede  $473^\circ\text{C}$  olarak ölçülmüştür.

Kovanın ocak içindeki konumuna göre kovan yüzey sıcaklıklarının değişimi incelendiğinde, 9 cm konumunda kovan yüzey sıcaklıkları, 0 cm konumuna göre artış göstermiştir.

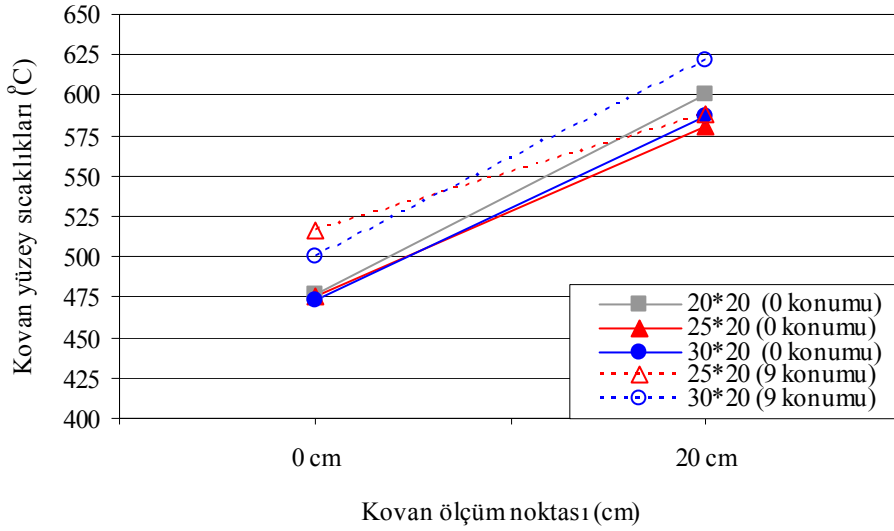


**Şekil 6.32.** Kazan ocak boyunun 680 mm olması durumunda 58 kW kazan ısıtma kapasitesi için kovan yüzey sıcaklıklarının değişimi (Yakıt debisi = 5.35 Nm<sup>3</sup>/h, HFK = 1.26).

### c) Kazan ocak boyunun 550 mm olması durumu;

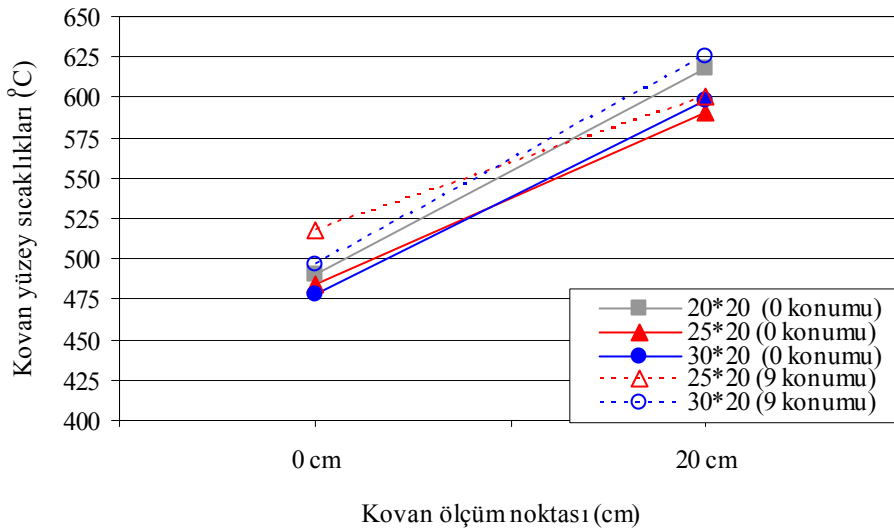
Kazan ocak boyunun 550 mm olması durumunda maksimum kazan ısıtma kapasitesinin 58 kW olduğu ve bu ısıtma kapasitenin de 5.35 Nm<sup>3</sup>/h yakıt debisi ile sağlandığı belirtilmişti. Bu şartlarda ve hava fazlalık katsayısının 1.475 değerinde yapılan deneylerde ölçülen kovan yüzey sıcaklıkları Şekil 6.33'de karşılaştırılmıştır. Kovanların ön ve arka yüzey sıcaklıkları kendi aralarında 0 cm kovan konumu için birbirine oldukça yakın değerler almıştır. Kovan yüzey sıcaklıkları ön kısımda 475°C civarlarında iken arka yüzeylerde ise 600°C'e yakın değerler almıştır.

Kovanın ocak içindeki konumuna göre kovan yüzey sıcaklıklarının değişimi incelendiğinde, 9 cm konumunda kovan yüzey sıcaklıkları, 0 cm konumuna göre artış göstermiştir.



**Şekil 6.33.** Kazan ocak boyunun 550 mm olması durumunda 58 kW kazan ısıtım kapasitesi için kovan yüzey sıcaklıklarının değişimi (Yakıt debisi = 5.35 Nm<sup>3</sup>/h, HFK = 1.475).

Bu ocak boyunda 58 kW kazan ısıtım kapasitesinde, hava fazlalık katsayısının 1.475 değerinden 1.26 değerine düşürülmesi halinde kovan yüzey sıcaklıklarında belirgin bir değişiklik görülmemiştir (Şekil 6.34).

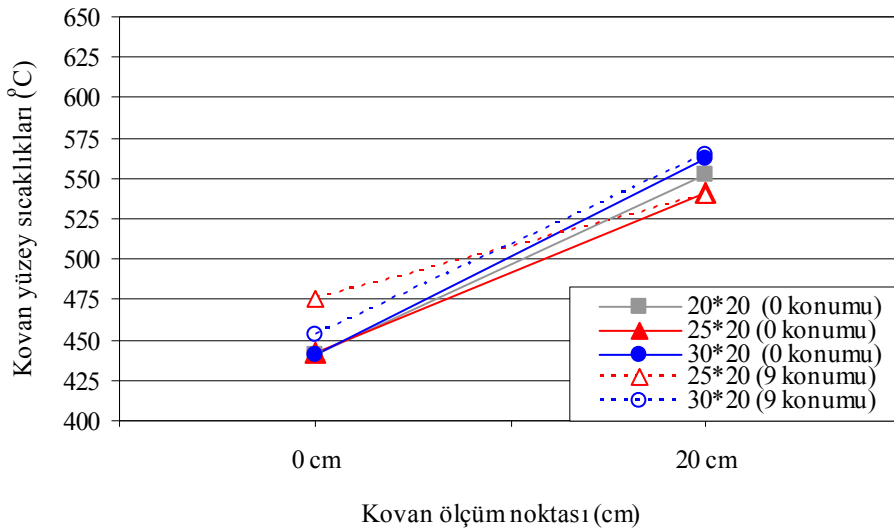


**Şekil 6.34.** Kazan ocak boyunun 550 mm olması durumunda 58 kW kazan ısıtım kapasitesi için kovan yüzey sıcaklıklarının değişimi (Yakıt debisi = 5.35 Nm<sup>3</sup>/h, HFK = 1.26).

Kovanın ocak içindeki konumuna göre kovan yüzey sıcaklıklarının değişimi incelendiğinde, 9 cm konumunda kovan yüzey sıcaklıkları, 0 cm konumuna göre artış göstermiştir.

Aynı ocak boyunda, 43.5 kW kazan ısıl kapasitesi için deneyler tekrarlanmıştır. Bu kazan ısıl kapasitesini sağlayan yakıt debisi  $4.00 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 'dir. Bu şartlarda ve hava fazlalık katsayısının 1.475 değerinde yapılan bu deneyde ölçülen kovan yüzey sıcaklıkları Şekil 6.35'de karşılaştırılmıştır. Bu kapasitede tüm kapasitelere göre en düşük kovan yüzey sıcaklıkları ölçülmüştür. Kovanların ön kısımlarının yüzey sıcaklıkları birbirine çok yakın olup  $441^\circ\text{C}$ 'e kadar düşmüştür.

Kovanın ocak içindeki konumuna göre kovan yüzey sıcaklıklarının değişimi incelendiğinde, 9 cm konumunda kovanın ön tarafındaki yüzey sıcaklıkları, 0 cm konumuna göre artış göstermiştir.



**Şekil 6.35.** Kazan ocak boyunun 550 mm olması durumunda 43.5 kW kazan ısıl kapasitesi için kovan yüzey sıcaklıklarının değişimi (Yakıt debisi =  $4.00 \text{ Nm}^3/\text{h}$ , HFK = 1.26).

## 6.2. Deneylerde Ölçülen Emisyonlar

Deneylerde ölçülen emisyonlar azotoksit ve karbonmonoksit emisyonları olarak iki gruba ayrılarak değerlendirilmiştir.

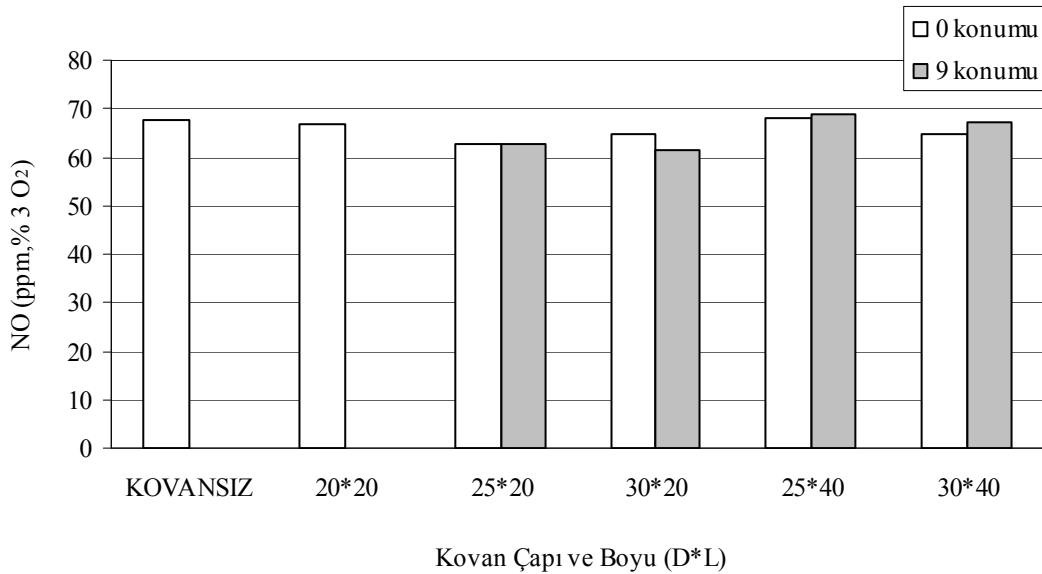
### 6.2.1. Azotoksit emisyonları

Azotoksit emisyon ölçümleri bacadan ve yanma odasından olmak üzere iki gruba ayrılmıştır.

#### 6.2.1.1. Bacadan yapılan ölçümler

##### a) Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumu

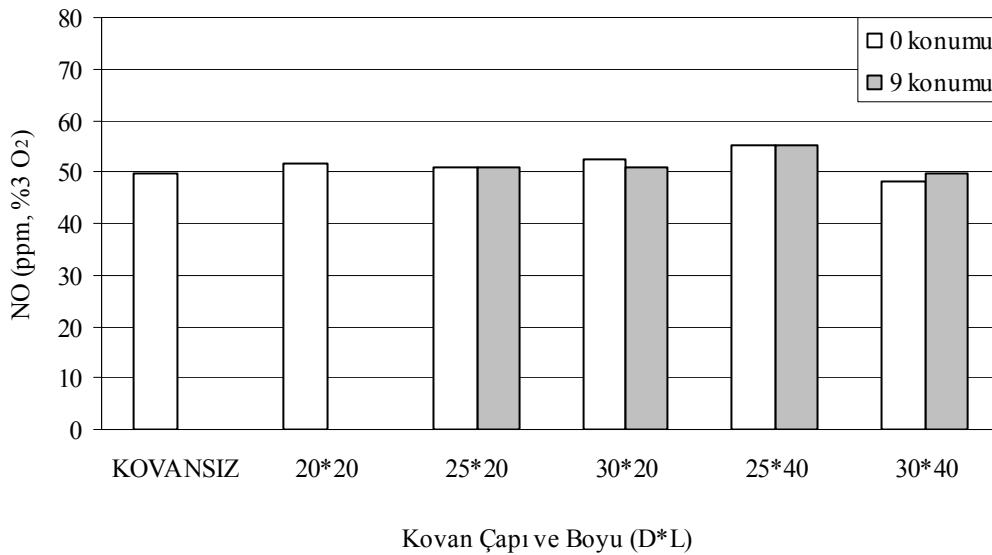
Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumunda maksimum kazan ısı kapasitesinin 116 kW olduğu ve bu ısı kapasitenin de 10.72 Nm<sup>3</sup>/h yakıt debisi ile sağlandığı belirtilmişti. Şekil 6.36 ve 6.37’de bu kazan ısı kapasitesinde, hava fazlalık katsayısının 1.26 ve 1.02 değerleri için NO<sub>x</sub> emisyonları görülmektedir.



**Şekil 6.36.** Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumunda 116 kW kazan ısı kapasitesinde bacadan ölçülen NO<sub>x</sub> emisyonları (Yakıt debisi=10.72Nm<sup>3</sup>/h, HFK=1.26).

Diyagramlarda kovanların 0 (sıfır) ve 9 konumlarında yapılan ölçümler birlikte verilmiştir. Çapı ve uzunluğu 20\*20 cm olan kovanın ocak içerisinde 9 cm konumunda deney yapılmamıştır. Hava fazlalık katsayısının 1.26 değerinde tüm durumlarda  $NO_x$  seviyeleri birbirine yakın değer almıştır.

HFK=1.02 değerinde yapılan ölçümlerde ise kovanlı ve kovansız durumlarda  $NO_x$  seviyeleri birbirine yakın değerler almıştır. Hava fazlalık katsayısının 1.26 değerine göre  $NO_x$  seviyeleri 10-20 ppm daha düşüktür. Buradaki  $NO_x$  miktarındaki azalmanın nedeni, düşük hava fazlalık katsayısı ile  $NO_x$  oluşumunda etkili olan azot ve oksijen miktarlarının azalmasıdır.



**Şekil 6.37.** Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumunda 116 kW kazan ısıtma kapasitesinde bacadan ölçülen  $NO_x$  emisyonları (Yakıt debisi=10.72 Nm<sup>3</sup>/h, HFK=1.02)

Ocak boyu değiştirilmeden 116 kW kazan ısıtma kapasitesine ilave olarak iki farklı kazan ısıtma kapasitesinde deneyler tekrarlanmıştır. Bu kazan ısıtma kapasiteleri 87 kW ve 58 kW'dır. Bu kazan ısıtma kapasitelerini sağlayan yakıt debileri ise sırasıyla 8.04 Nm<sup>3</sup>/h, 5.35 Nm<sup>3</sup>/h'dir. Bu deneylerde hava fazlalık katsayısı değerleri 1.26 alınmıştır. Ocak boyunun 790 mm olması durumunda yapılan tüm deneyler için bacadan ölçülen  $NO_x$  emisyonları, baca sıcaklıkları ve bacada fark basıncı (baca çekişi) değerleri Tablo 6.1'de verilmiştir.



87 ve 58 kW kazan ısıtıcı kapasitelerinde de  $\text{NO}_x$  emisyonları kovanlı ve kovansız durumlar için birbirine yakın değerler almıştır. 790 mm ocak boyunda yapılan üç farklı kazan ısıtıcı kapasitesinde tüm durumlar için  $\text{NO}_x$  emisyonları birbirine yakın ölçülürken çapları ile uzunlukları 25\*20 cm ve 30\*20 cm olan kovanlarda genellikle emisyonlar 5-20 ppm daha azdır.

**Tablo 6.1.** Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumunda yapılan tüm deneyler için bacadan ölçülen  $\text{NO}_x$  emisyonları, baca sıcaklığı ve baca çekişi.

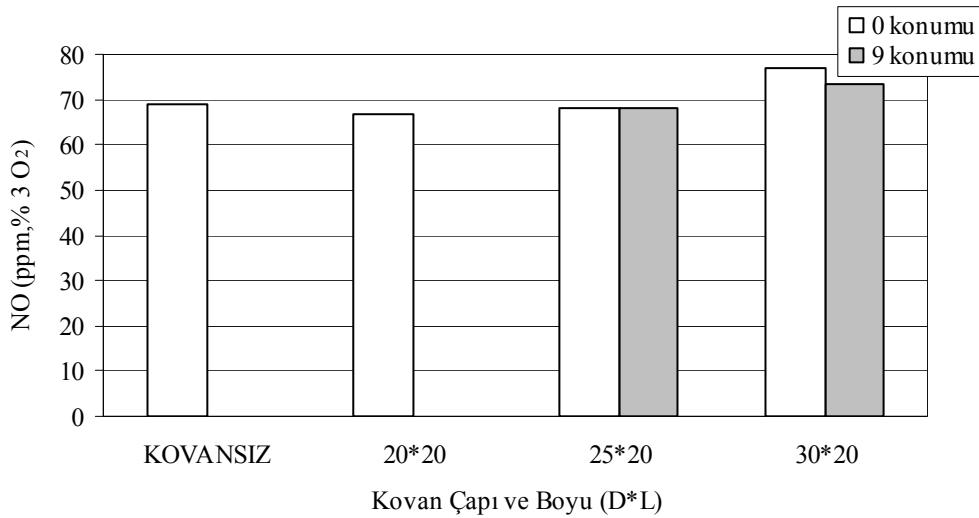
Kovan Çapı ve Boyu (cm)	Kovan Konumu (cm)	Ocak boyu 790 mm											
		116 kW						87 kW			58 kW		
		HFK = 1.26			HFK = 1.02			HFK = 1.26			HFK = 1.26		
		$\text{NO}_x$ (ppm, % 3 $\text{O}_2$ )	$T_{\text{baca}}$ (°C)	Baca Çekişi (Pa)	$\text{NO}_x$ (ppm, % 3 $\text{O}_2$ )	$T_{\text{baca}}$ (°C)	Baca Çekişi (Pa)	$\text{NO}_x$ (ppm, % 3 $\text{O}_2$ )	$T_{\text{baca}}$ (°C)	Baca Çekişi (Pa)	$\text{NO}_x$ (ppm, % 3 $\text{O}_2$ )	$T_{\text{baca}}$ (°C)	Baca Çekişi (Pa)
Ø20x20	9 cm	67	337	25	52	323	24	66	292	22	64	245	15
Ø25x20	0 cm	63	340	19	51	340	21	62	287	22	61	237	17
	9 cm	63	338	24	51	330	20	62	294	23	61	239	21
Ø30x20	0 cm	65	334	24	53	324	27	63	287	18	58	234	18
	9 cm	62	333	18	51	321	18	62	287	20	58	234	19
Ø25x40	0 cm	68	334	21	55	324	20	69	288	17	65	239	17
	9 cm	69	330	22	55	322	20	69	289	18	65	236	17
Ø30x40	0 cm	65	326	20	48	318	18	64	287	13	59	237	13
	9 cm	67	332	13	50	322	15	65	286	18	62	232	13
<b>Kovansız Deneyler</b>		68	343	18	50	325	19	66	298	13	60	239	13

Kovanların ocak içindeki konumlarına göre  $\text{NO}_x$  emisyonlarının değişimi incelendiğinde her iki konum içinde birbirine yakın değerler ölçülmüştür.

Ocak boyunun sabit kalmasıyla kazan ısı kapasitesinin 116 kW'dan, 58 kW'a düşürülmesiyle NO<sub>x</sub> emisyonlarında da azalma görülmektedir. Bunun nedeni azalan yakıt miktarı ile ocak sıcaklığındaki azalmadır.

### b) Kazan ocak boyunun 680 mm olması durumu

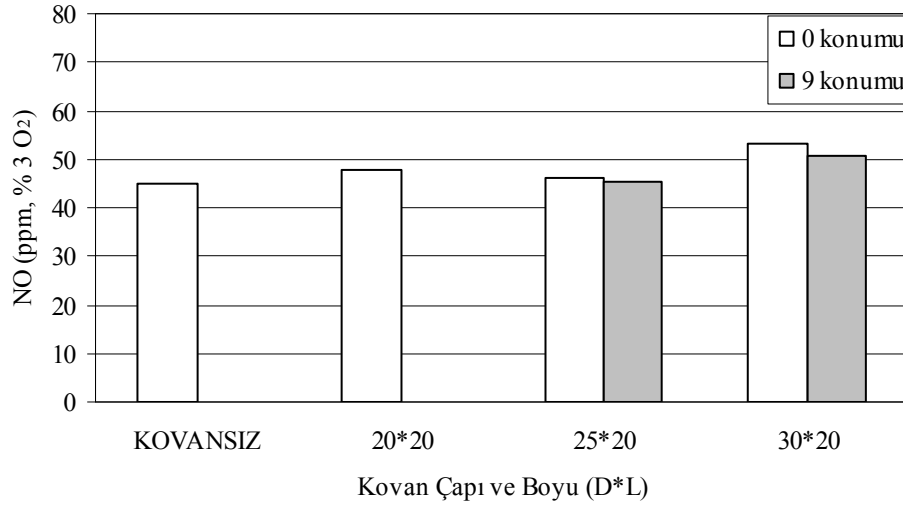
Kazan ocak boyunun 680 mm olması durumunda kazan anma ısı kapasitesinin 87 kW olduğu ve bu ısı kapasitenin de 8.04 Nm<sup>3</sup>/h yakıt debisi ile sağlandığı belirtilmişti. Bu şartlarda, hava fazlalık katsayısının 1.26 ve 1.02 değerleri için bacadan yapılan NO<sub>x</sub> ölçümleri Şekil 6.38 ve 6.39'da verilmiştir. Grafiklerde kovanların 0 (sıfır) ve 9 konumlarında yapılan ölçümler birlikte verilmiş olup çapı ve uzunluğu 20\*20 cm kovanın 9 konumunda deney yapılmamıştır. Ayrıca bu ocak boyunda çapları ve uzunlukları 25\*40 cm ve 30\*40 cm olan kovanlar için deney yapılmamıştır. Bu kazan ısı kapasitesinde bacadan ölçülen NO<sub>x</sub> emisyonları birbirine oldukça yakın değerdedir.



**Şekil 6.38.** Kazan ocak boyunun 680 mm olması durumunda 87 kW kazan ısı kapasitesinde bacadan ölçülen NO<sub>x</sub> emisyonları (Yakıt debisi=8.04 Nm<sup>3</sup>/h, HFK=1.26).

Hava fazlalık katsayısının 1.26'dan 1.02'ye düşürülmesiyle NO<sub>x</sub> emisyonlarında 10-30 ppm kadar azalma görülmüştür (Şekil 6.39). Alev sıcaklığının irdelendiği bölümde görüldüğü gibi hava fazlalık katsayısının azalmasıyla ocak sıcaklığı artmaktadır. Bu artışa paralel olarak NO<sub>x</sub> emisyonlarının da artması beklenir. Buradaki

NO<sub>x</sub> miktarındaki azalmanın nedeni, düşük hava fazlalık katsayısı ile NO<sub>x</sub> oluşumunda etkili olan azot ve oksijen miktarlarının azalmasıdır.



**Şekil 6.39.** Kazan ocak boyunun 680 mm olması durumunda 87 kW kazan ısı kapasitesinde bacadan ölçülen NO<sub>x</sub> emisyonları (Yakıt debisi=8.04 Nm<sup>3</sup>/h, HFK=1.02).

Ocak boyu değiştirilmeden 87 kW kazan ısı kapasitesine ilave olarak 58 kW kazan ısı kapasitesinde de deneyler tekrarlanmıştır. Bu kazan ısı kapasitesini sağlayan yakıt debisi 5.35 Nm<sup>3</sup>/h'dir. Bu deneyde hava fazlalık katsayısı 1.26 olarak alınmıştır. Ocak boyunun 680 mm olması durumunda yapılan tüm deneyler için bacadan ölçülen NO<sub>x</sub> emisyonları, baca sıcaklıkları ve bacada fark basıncı (baca çekişi) değerleri Tablo 6.2'de verilmiştir.

58 kW kazan ısı kapasitesinde de NO<sub>x</sub> emisyonları kovanlı ve kovansız durumlar için birbirine yakın değer almıştır. 680 mm ocak boyunda yapılan iki farklı kazan ısı kapasitesinde tüm durumlar için NO<sub>x</sub> emisyonları birbirine yakın ölçülürken çapları ile uzunlukları 20\*20 cm ve 25\*20 cm olan kovanlarda genellikle emisyonlar 2-7 ppm daha düşük çıkmıştır. Kovanların ocak içindeki konumlarına göre NO<sub>x</sub> emisyonlarının değişimi incelendiğinde her iki konum içinde birbirine yakın değerler ölçülmüştür. Ocak boyunun sabit kalmasıyla kazan ısı kapasitesinin 87 kW'dan, 58 kW'a düşürülmesiyle NO<sub>x</sub> emisyonlarında da bir miktar azalma görülmektedir. Bunun

nedeni ocak boyunun sabit kalıp yakıt miktarındaki azalma ile birlikte alev yükünün azalması dolayısıyla ocak sıcaklığının düşmesidir.

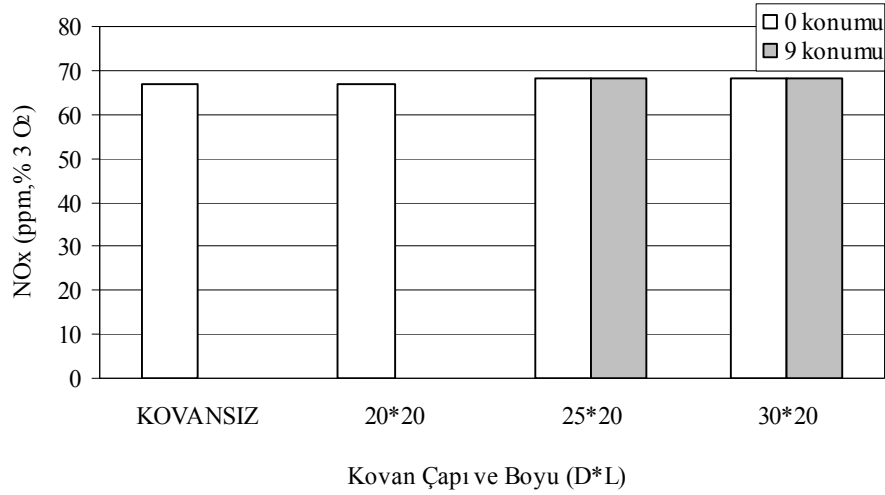
**Tablo 6.2.** Kazan ocak boyunun 680 mm olması durumunda yapılan tüm deneyler için bacadan ölçülen  $\text{NO}_x$  emisyonları, baca sıcaklığı ve baca çekişi.

Kovan Çapı ve Boyu (cm)	Kovan Konumu (cm)	Ocak boyu 680 mm								
		87 kW						58 kW		
		HFK = 1.26			HFK = 1.02			HFK = 1.26		
		$\text{NO}_x$ (ppm, % 3 $\text{O}_2$ )	$T_{\text{baca}}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Baca Çekişi (Pa)	$\text{NO}_x$ (ppm, % 3 $\text{O}_2$ )	$T_{\text{baca}}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Baca Çekişi (Pa)	$\text{NO}_x$ (ppm, % 3 $\text{O}_2$ )	$T_{\text{baca}}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Baca Çekişi (Pa)
Ø20x20	9 cm	67	281	11	48	260	18	64	221	18
Ø25x20	0 cm	68	265	19	46	241	14	64	206	10
	9 cm	68	266	18	45	242	18	65	219	13
Ø30x20	0 cm	77	273	15	53	251	21	67	217	16
	9 cm	73	274	21	51	248	17	70	221	13
<b>Kovansız Deneyler</b>		69	277	13	45	246	18	65	219	17

### c) Kazan ocak boyunun 550 mm olması durumu

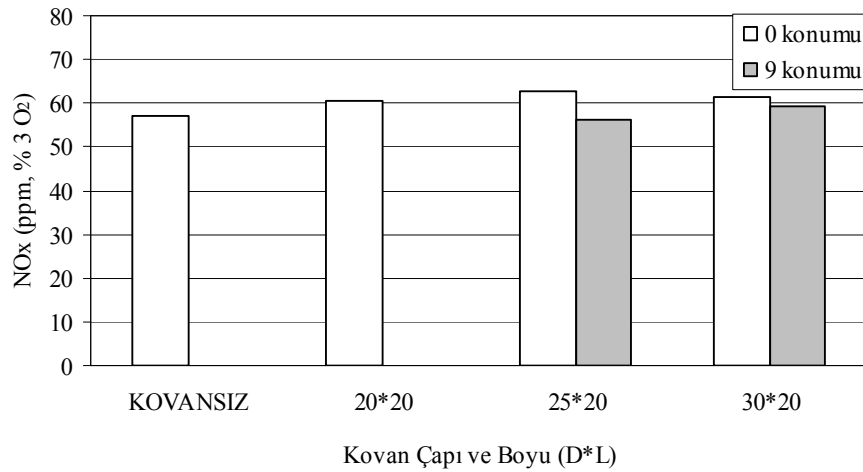
Kazan ocak boyunun 550 mm olması durumunda maksimum kazan ısı kapasitesinin 58 kW olduğu ve bu ısı kapasitesinin de  $5.35 \text{ Nm}^3/\text{h}$  yakıt debisi ile sağlandığı belirtilmişti. Bu şartlarda, hava fazlalık katsayısının 1.475 ve 1.26 değerleri için bacadan yapılan  $\text{NO}_x$  ölçümleri Şekil 6.40 ve 6.41'de verilmiştir. Diyagramlarda kovanların 0 (sıfır) ve 9 konumlarında yapılan ölçümler birlikte verilmiş olup çapı ve uzunluğu 20\*20 cm kovanın 9 konumunda deney yapılmamıştır. Ayrıca bu ocak boyunda çapları ve uzunlukları 25\*40 cm ve 30\*40 cm olan kovanlar için deney

yapılmamıştır. Bu kazan ısıtma kapasitesinde de bacadan ölçülen  $\text{NO}_x$  emisyonları birbirine oldukça yakın değerdedir.



**Şekil 6.40.** Kazan ocak boyunun 550 mm olması durumunda 58 kW kazan ısıtma kapasitesinde bacadan ölçülen  $\text{NO}_x$  emisyonları (Yakıt debisi= $5.35 \text{ Nm}^3/\text{h}$ , HFK= $1.475$ ).

Hava fazlalık katsayısının  $1.475$ 'den  $1.26$ 'ya düşürülmesiyle  $\text{NO}_x$  emisyonlarında 5-12 ppm kadar azalma görülmüştür (Şekil 6.41).



**Şekil 6.41.** Kazan ocak boyunun 550 mm olması durumunda 58 kW kazan ısıtma kapasitesinde bacadan ölçülen  $\text{NO}_x$  emisyonları (Yakıt debisi= $5.35 \text{ Nm}^3/\text{h}$ , HFK= $1.26$ ).

Ocak boyu değiştirilmeden 58 kW kazan ısıtma kapasitesine ilave olarak 43.5 kW kazan ısıtma kapasitesinde de deneyler tekrarlanmıştır. Bu kazan ısıtma kapasitesini sağlayan yakıt debisi  $4.00 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 'dir. Bu deneyde hava fazlalık katsayısı  $1.475$  olarak alınmıştır.

Ocak boyunun 550 mm olması durumunda yapılan tüm deneyler için bacadan ölçülen  $\text{NO}_x$  emisyonları, baca sıcaklıkları ve bacada fark basıncı (baca çekişi) değerleri Tablo 6.3’de verilmiştir. 43.5 kW kazan ısıtma kapasitesinde de  $\text{NO}_x$  emisyonları kovanlı ve kovansız durumlar için birbirine yakın değer almıştır. 550 mm ocak boyunda yapılan iki farklı kazan ısıtma kapasitesinde  $\text{NO}_x$  emisyonları birbirine yakın ölçülürken 43.5 kW kazan ısıtma kapasitesinde  $\text{NO}_x$  emisyonları 58 kW kazan ısıtma kapasitesine göre 3-5 ppm daha aşağı seviyededir. Kovanların ocak içindeki konumlarına göre  $\text{NO}_x$  emisyonlarının değişimi incelendiğinde her iki konum içinde birbirine yakın değerler ölçülmüştür.

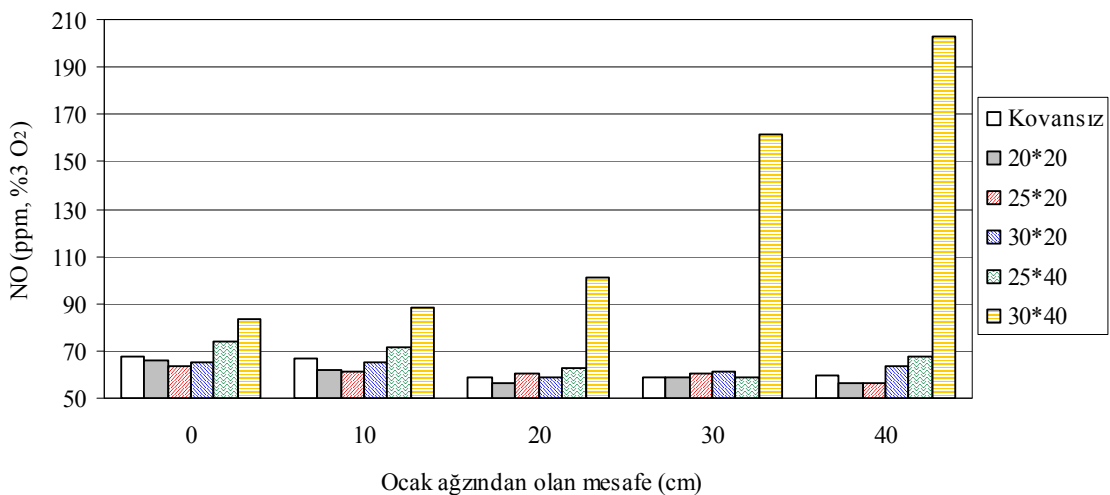
**Tablo 6.3.** Kazan ocak boyunun 550 mm olması durumunda yapılan tüm deneyler için bacadan ölçülen  $\text{NO}_x$  emisyonları, baca sıcaklığı ve baca çekişi

Kovan Çapı ve Boyu (cm)	Kovan Konumu (cm)	Ocak boyu 550 mm								
		58 kW						43.5 kW		
		HFK = 1.475			HFK = 1.26			HFK = 1.475		
		$\text{NO}_x$ (ppm, % 3 $\text{O}_2$ )	$T_{\text{baca}}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Baca Çekişi (Pa)	$\text{NO}_x$ (ppm, % 3 $\text{O}_2$ )	$T_{\text{baca}}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Baca Çekişi (Pa)	$\text{NO}_x$ (ppm, % 3 $\text{O}_2$ )	$T_{\text{baca}}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Baca Çekişi (Pa)
Ø20x20	9 cm	67	220	18	61	215	10	67	190	13
Ø25x20	0 cm	68	228	18	63	218	18	63	194	13
	9 cm	68	215	15	56	205	18	62	182	18
Ø30x20	0 cm	68	215	19	62	209	19	63	176	17
	9 cm	68	218	19	59	204	13	66	182	15
<b>Kovansız Deneyler</b>		67	227	17	57	213	17	63	191	21

### 6.2.1.2. Yanma odasından yapılan ölçümler

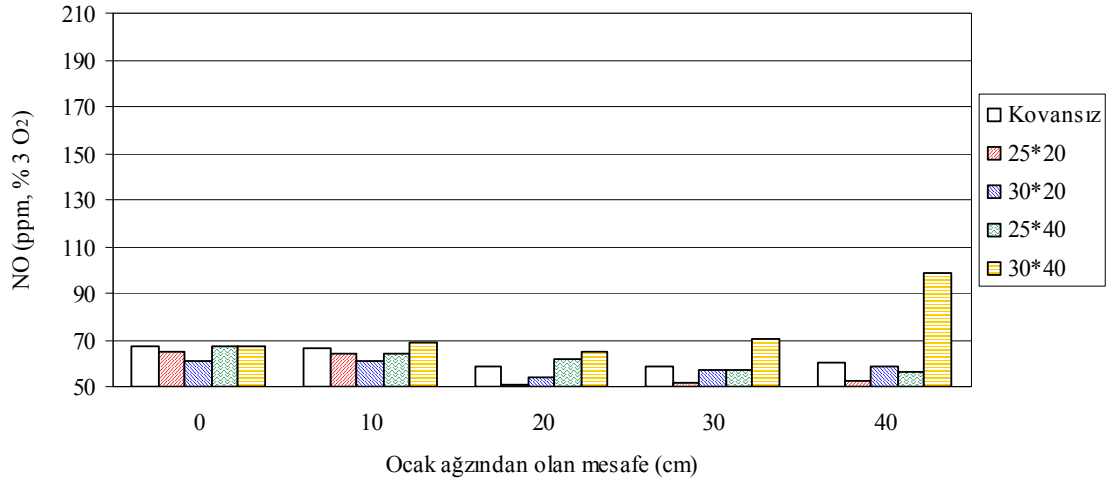
#### a) Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumu;

Yanma odasından yapılan emisyon ölçümleri, Bölüm-5’de açıklandığı gibi kazan kapağına açılan R100 ve R175 ölçme deliklerinden yanma odası eksenine paralel şekilde gaz analizi probu (seramik prob) daldırılarak yapılmıştır. Her bir ölçüm mesafesinden (R100 ve R175) yanma odası boyunca 5 farklı noktada ölçüm yapılmıştır. Bu ölçüm noktaları 0 cm, 10 cm, 20 cm, 30 cm ve 40 cm mesafeleridir. Burada 0 cm mesafesi yanma odası ağızına (ocak ağızı) karşılık gelmektedir. Tüm kovanlar göz önüne alındığında R100 mesafesi kovan içinden, R175 mesafesi de kovan dışından geçmektedir. 116 kW kazan ısı kapasitesi için HFK=1.26 değerinde kovanların her iki konumunda da R100 ölçme çizgisinden yapılan  $NO_x$  ölçümleri Şekil 6.42 ve 6.43’de verilmiştir. Çapı ve uzunluğu 30\*40 cm olan kovan hariç diğer deneylerde  $NO_x$  emisyonları tüm ocak boyunca birbirine yakın değer almıştır. Çapı ve uzunluğu 30\*40 cm olan kovan kullanılması durumunda  $NO_x$  emisyonu ocak içinde brülörden uzaklaşınca artarak 200 ppm (% 3  $O_2$ ) değerine ulaşmıştır.



**Şekil 6.42.** R100 ölçme çizgisi üzerinde  $NO_x$  emisyonunun değişimi. (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, Yakıt debisi=10.72  $Nm^3/h$ , Kovan konumu = 0 cm, HFK=1.26).

Kovanların ocak içerisindeki konumlarına göre bir karşılaştırma yapıldığında 0 cm konumunda olduğu gibi çapı ve uzunluğu 30\*40 cm olan kovan dışında NO<sub>x</sub> emisyonları birbirine yakın değer almıştır. Fakat 30\*40 cm kovanın 9 cm konumundaki ocak içi NO<sub>x</sub> emisyonları 0 cm konumuna kıyasla daha azdır.

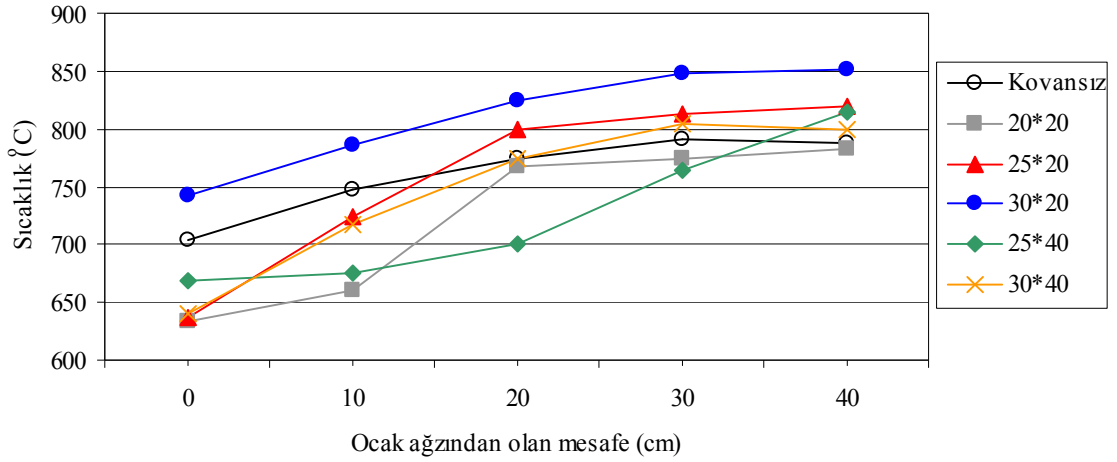


**Şekil 6.43.** R100 ölçme çizgisi üzerinde NO<sub>x</sub> emisyonunun değişimi. (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, Yakıt debisi=10.72 Nm<sup>3</sup>/h, Kovan konumu = 9 cm, HFK=1.26).

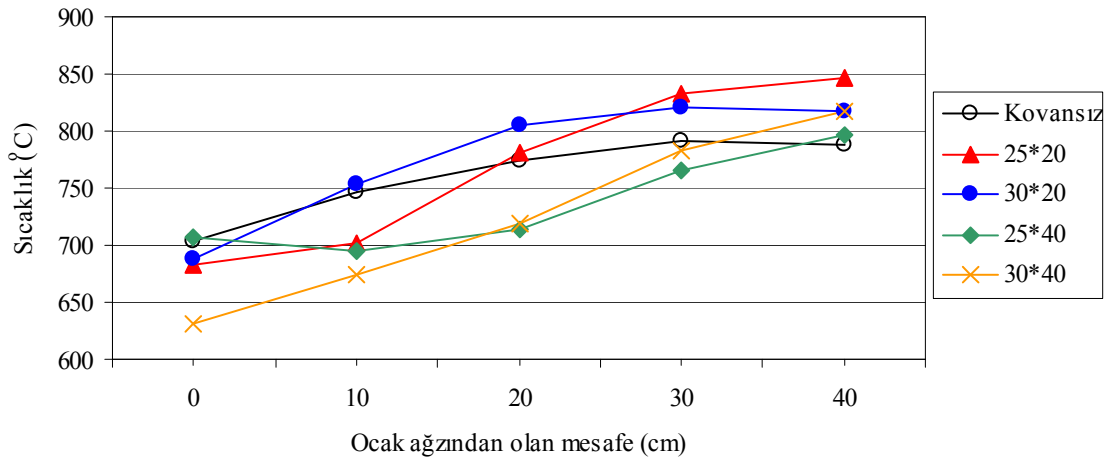
R100 ve R175 ölçme çizgilerinden ocak içerisindeki bu ölçüm noktalarında gaz analizi ile birlikte sıcaklık ölçümü de yapılmıştır. 116 kW kazan ısı kapasitesi ve HFK=1.26 değeri için R100 mesafesinde ocak içerisinden yapılan sıcaklık ölçümleri Şekil 6.44 ve 6.45’de verilmiştir.

R100 ölçüm çizgisi üzerinde tüm kovanlı ve kovansız durumlarda sıcaklığın ocak ağızından uzaklaşınca arttığı görülmektedir. Sıcaklıktaki bu artışa rağmen ocak arkasına doğru NO<sub>x</sub> emisyonlarında belirgin bir artış görülmemiştir.



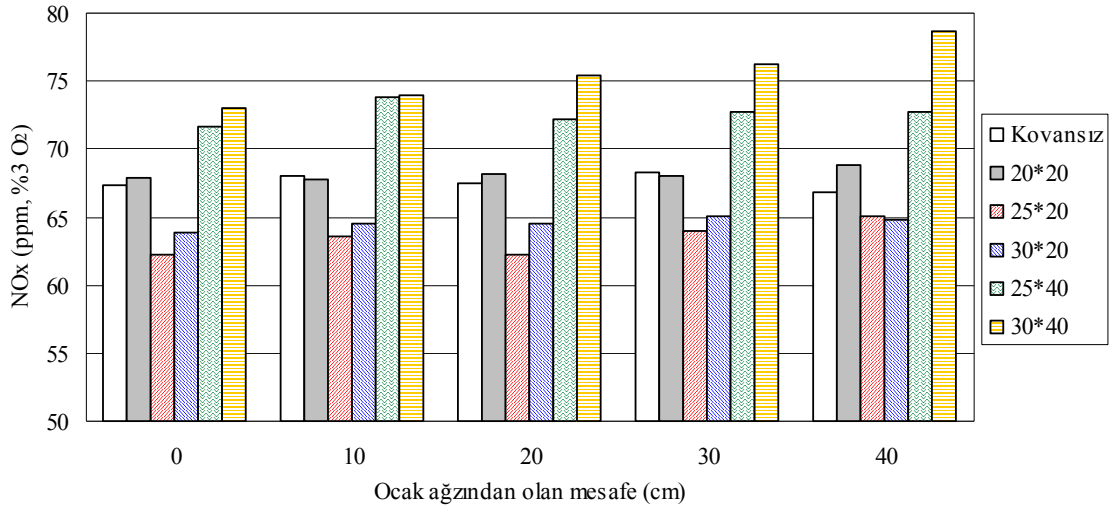


**Şekil 6.44.** R100 ölçme çizgisi üzerinde sıcaklık değişimi. (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, Yakıt debisi=10.72 Nm<sup>3</sup>/h, Kovan konumu = 0 cm, HFK=1.26).

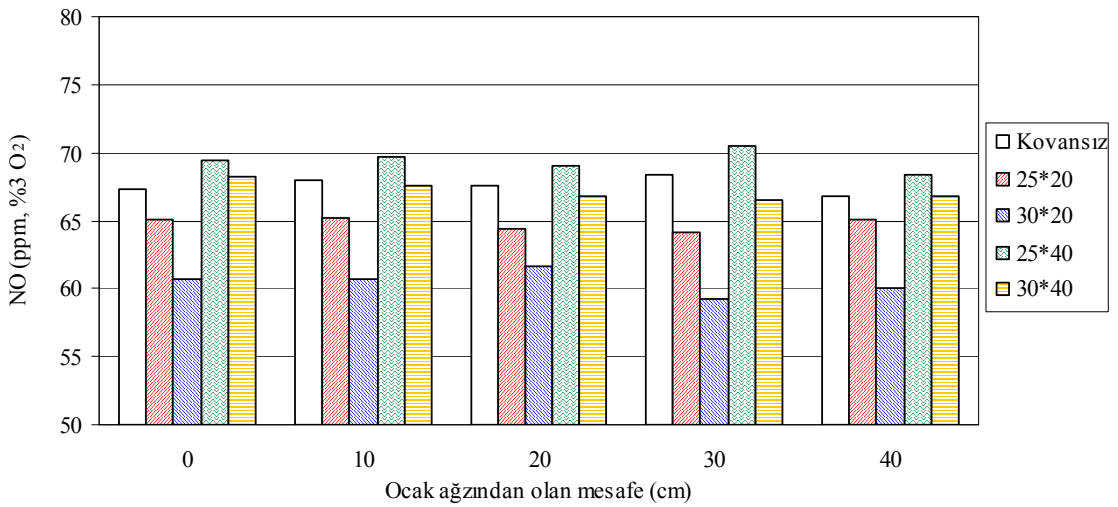


**Şekil 6.45.** R100 ölçme çizgisi üzerinde sıcaklık değişimi. (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, Yakıt debisi=10.72 Nm<sup>3</sup>/h, Kovan konumu = 9 cm, HFK=1.26).

790 mm ocak boyunda, 116 kW kazan ısı kapasitesi için HFK=1.26 değerinde kovanların her iki konumunda da R175 noktasından yapılan NO<sub>x</sub> ölçümleri Şekil 6.46 ve 6.47'de verilmiştir. Çapları ve uzunlukları 25\*40 ve 30\*40 cm olan kovanlar dışındaki diğer deneylerde NO<sub>x</sub> emisyonları tüm ocak boyunca birbirine yakın değerler almıştır.



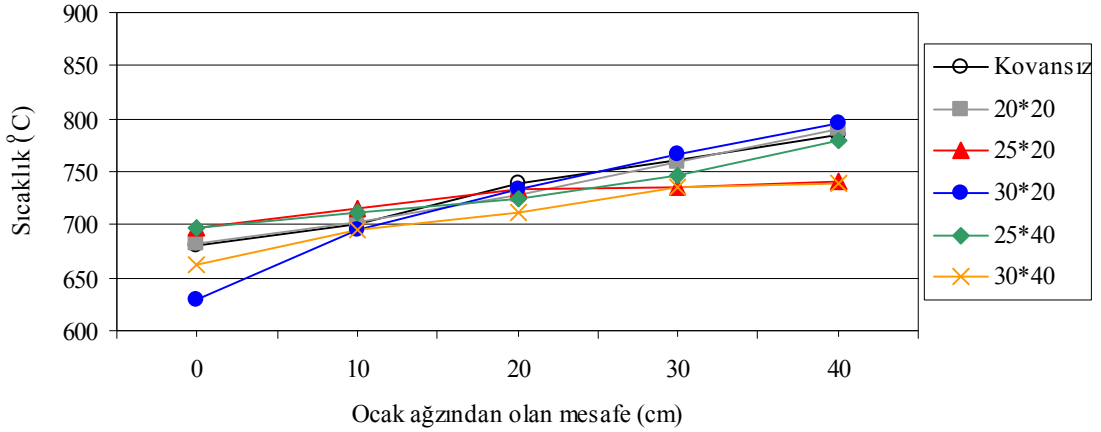
**Şekil 6.46.** R175 ölçme çizgisi üzerinde NO<sub>x</sub> emisyonunun değişimi. (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, Yakıt debisi=10.72 Nm<sup>3</sup>/h, Kovan konumu = 0 cm, HFK=1.26).



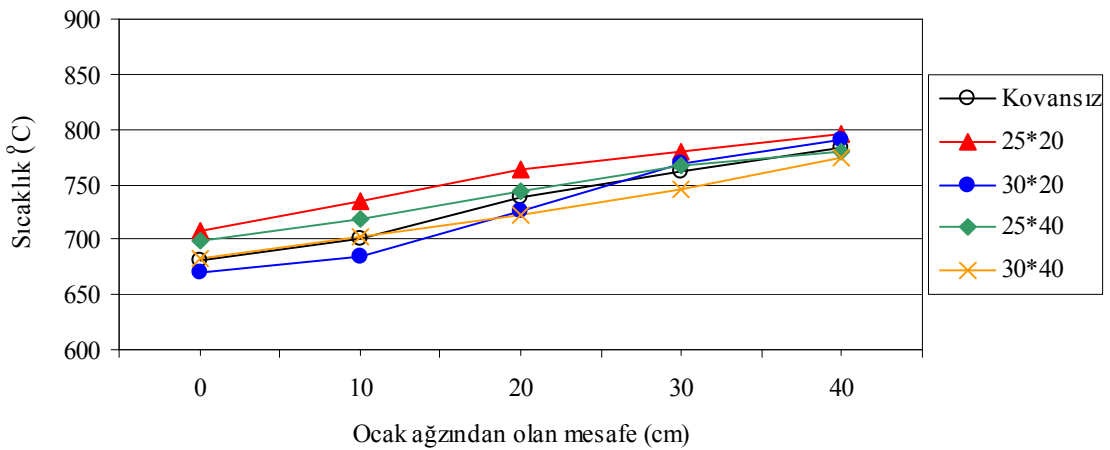
**Şekil 6.47.** R175 ölçme çizgisi üzerinde NO<sub>x</sub> emisyonunun değişimi. (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, Yakıt debisi=10.72 Nm<sup>3</sup>/h, Kovan konumu = 9 cm, HFK=1.26).

R175 ölçme çizgisi boyunca ölçülen sıcaklıklar R100 ölçme çizgisi boyunca ölçülen sıcaklıklara nazaran daha düşüktür. Bunun nedeni R175 ölçüm çizgisinin alev merkezine daha uzak olmasıdır. Özellikle kovanlı deneylerde R175 ölçüm çizgisi

üzerindeki bazı ölçüm noktaları kovan boyu ve kovan konumuna göre alevi görmemektedir (Şekil 6.48 ve 6.49). R175 ölçüm çizgisi boyunca ölçülen sıcaklıklar tüm kovanlı ve kovansız durumlar için birbirine yakın değer almıştır. Bu bölgedeki sıcaklığa kovan çapı ve boyunun etkisi olmamaktadır.



**Şekil 6.48.** R175 ölçme çizgisi üzerinde sıcaklık değişimi. (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, Yakıt debisi=10.72 Nm<sup>3</sup>/h, Kovan konumu = 0 cm, HFK=1.26).



**Şekil 6.49.** R175 ölçme çizgisi üzerinde sıcaklık değişimi. (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, Yakıt debisi=10.72 Nm<sup>3</sup>/h, Kovan konumu = 9 cm, HFK=1.26).

Ocak boyunun 790 mm olması durumunda diğer kazan ısı kapasiteleri (87 ve 58 kW) için HFK=1.26 değerinde yanma odasından ölçülen NO<sub>x</sub> emisyonları ve sıcaklıklar

Tablo 6.4’de verilmiştir. Ayrıca bu tabloda bu ocak boyu için anma ısıl gücünde (116 kW) HFK=1.26 ve 1.02 değerlerinde yapılan ölçümlerde verilmiştir.

Hava fazlalık katsayısının 1.26’dan 1.02 değerine düşürülmesiyle sıcaklıklar da artmıştır. Bu artışın nedeni hava miktarının azalmasıdır. Hava fazlalık katsayısının 1.02 değerinde yapılan deneyde R100 ölçüm çizgisi üzerindeki ölçüm noktalarında genellikle tüm kovanlı durumlarda kovansız duruma kıyasla daha düşük sıcaklık elde edilmiştir. Bu düşüş özellikle ocağın arka bölümlerinde daha belirgindir. Aynı özellikler R175 ölçüm noktaları içinde geçerlidir. Hava fazlalık katsayısının azalmasıyla sıcaklıklardaki bu artış NO<sub>x</sub> emisyonlarında olmamıştır. Sıcaklıktaki bu artışa rağmen NO<sub>x</sub> emisyonlarında 10-15 ppm kadar azalma olmuştur. Bunun nedeni NO<sub>x</sub> oluşumunda etkili olan oksijen miktarının azalmasıdır.

R100 ölçüm çizgisi üzerindeki ölçüm noktalarındaki ölçümlerde kovan konumuna göre bir kıyaslama yapılacak olursa her iki kovan konumunda da NO<sub>x</sub> emisyonları ve sıcaklıklar birbirine yakın değerler almıştır.

R175 ölçüm noktalarındaki sıcaklıklar aleve uzak olmaları dolayısıyla R100 ölçüm noktalarına nazaran daha düşük ölçülmüştür. Her iki mesafe için de ocak arkasına gidildikçe sıcaklıklarda artış gözlemlenmiştir.

790 mm ocak boyunda kazan ısıl kapasitesinin 116 kW’dan 87 kW ve 58 kW’a azaltılarak yapılan deneylerde NO<sub>x</sub> emisyonlarında ve sıcaklıklarda düşüş olmuştur. Bu azalmadaki ana sebep yakıt miktarının azalmasıdır. Bu düşüş 58 kW kazan ısıl kapasitesinde daha belirgindir.

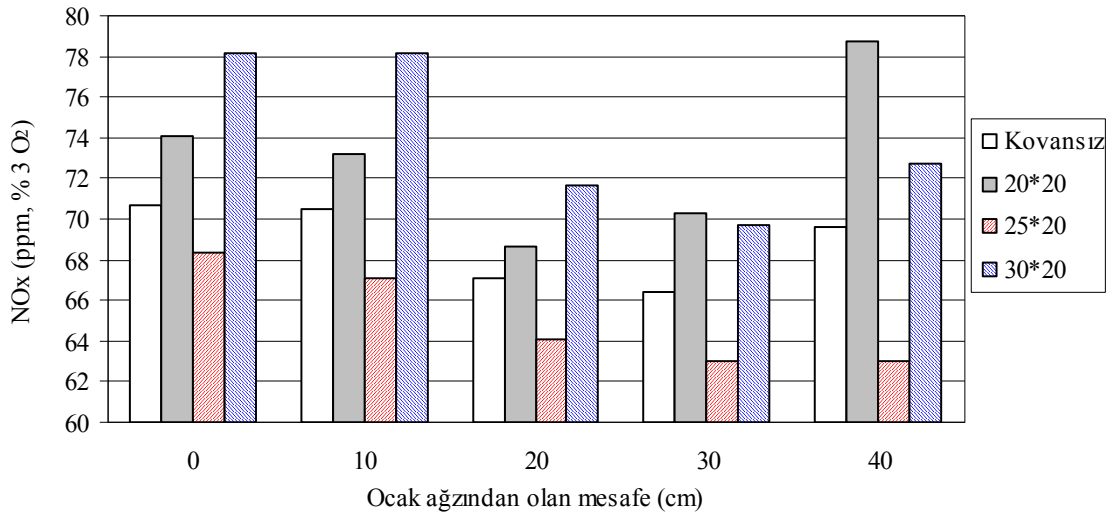
**Tablo 6.4.** Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumunda yapılan tüm deneyleriçin yanma odasından ölçülen NO<sub>x</sub> emisyonları ve sıcaklıklar.

Ocak Ağzından Olan Mesafe (cm)	Yapılan Deneyler	Kovan Konumu (cm)	Ocak boyu 790 mm																
			116 kW								87 kW				58 kW				
			HFK=1.26				HFK=1.02				HFK=1.26				HFK=1.26				
			R100		R175		R100		R175		R100		R175		R100		R175		
			NO <sub>x</sub> ppm	T (°C)	NO <sub>x</sub> ppm	T (°C)	NO <sub>x</sub> ppm	T (°C)	NO <sub>x</sub> ppm	T (°C)	NO <sub>x</sub> ppm	T (°C)	NO <sub>x</sub> ppm	T (°C)	NO <sub>x</sub> ppm	T (°C)	NO <sub>x</sub> ppm	T (°C)	
0 cm	Kovansız	-	68	704	67	681	43	690	40	686	64	624	64	620	56	555	60	520	
	20*20	0cm	66	633	68	683	53	661	50	685	67	596	67	628	58	524	65	490	
	25*20	0cm	63	637	62	697	52	652	53	738	60	578	60	637	56	545	59	515	
		9cm	65	682	65	707	49	693	50	716	64	625	62	646	57	581	59	504	
	30*20	0cm	65	742	64	629	53	733	51	656	59	655	62	587	56	585	55	502	
		9cm	61	688	61	670	48	694	48	672	56	636	57	603	55	557	54	495	
	25*40	0cm	74	668	72	697	52	665	57	703	70	598	70	630	65	535	64	465	
		9cm	67	707	69	698	53	708	52	701	70	640	69	634	67	555	62	462	
	30*40	0cm	84	641	73	663	50	655	52	679	61	581	63	609	61	549	62	476	
		9cm	67	631	68	683	48	638	51	688	61	564	64	623	57	510	54	457	
	10 cm	Kovansız	-	67	747	68	701	44	760	34	710	62	693	65	651	56	597	63	504
		20*20	0cm	62	661	68	702	53	674	53	728	65	622	68	657	53	558	63	508
25*20		0cm	61	724	64	715	56	732	53	767	58	668	62	657	56	610	57	573	
		9cm	64	701	65	735	52	737	50	754	63	655	62	672	53	620	58	548	
30*20		0cm	65	786	65	695	54	815	52	751	60	723	62	640	56	644	58	514	
		9cm	61	753	61	685	48	750	49	695	58	707	59	615	53	640	56	504	
25*40		0cm	72	675	74	711	51	697	58	718	71	621	70	650	69	564	65	497	
		9cm	64	694	70	719	51	720	53	731	68	644	69	662	66	567	63	512	
30*40		0cm	88	718	74	695	50	725	51	712	62	653	63	639	60	614	60	513	
		9cm	69	675	68	703	47	684	52	711	63	617	65	634	58	584	52	505	
20 cm		Kovansız	-	59	775	68	739	48	900	14	754	56	746	66	683	54	734	61	570
		20*20	0cm	56	768	68	728	49	830	53	761	55	734	69	683	52	709	64	608
	25*20	0cm	60	799	62	733	54	851	53	780	58	749	61	695	51	710	58	632	
		9cm	51	781	64	763	50	838	51	794	57	735	64	703	52	686	60	634	
	30*20	0cm	58	824	65	733	52	878	52	744	53	751	62	693	50	706	58	605	
		9cm	54	805	62	725	46	870	50	750	52	767	60	661	56	721	57	554	
	25*40	0cm	63	701	72	725	49	750	57	744	69	660	70	668	62	632	65	568	
		9cm	61	714	69	743	52	766	55	745	66	685	69	672	64	648	66	557	
	30*40	0cm	101	775	75	712	50	826	54	745	58	720	63	660	58	690	61	569	
		9cm	65	719	67	723	47	780	51	736	59	685	65	659	55	682	57	557	
	30 cm	Kovansız	-	59	791	68	761	53	940	13	823	58	777	67	709	55	757	61	647
		20*20	0cm	59	774	68	760	53	848	54	795	60	750	66	712	57	709	65	644
25*20		0cm	60	813	64	736	55	878	54	808	56	777	61	722	57	728	59	652	
		9cm	51	833	64	779	52	890	51	813	56	792	64	727	55	739	59	681	
30*20		0cm	61	848	65	767	53	901	54	774	58	759	63	716	57	720	58	656	
		9cm	57	820	59	768	48	892	50	804	53	791	60	715	56	722	57	537	
25*40		0cm	59	765	73	747	50	820	57	744	61	720	71	697	58	705	67	610	
		9cm	57	765	70	767	50	835	55	772	60	742	72	686	64	718	67	583	
30*40		0cm	162	804	76	735	54	885	52	745	56	756	60	686	56	716	61	596	
		9cm	70	783	67	745	47	840	52	760	56	754	62	683	51	734	57	592	
40 cm		Kovansız	-	60	788	67	784	56	930	19	835	60	788	66	698	60	739	62	670
		20*20	0cm	56	782	69	791	55	852	52	811	65	775	69	739	59	699	60	667
	25*20	0cm	57	819	65	741	52	900	55	824	52	806	62	738	56	749	59	685	
		9cm	58	846	65	795	53	922	52	731	54	821	64	750	54	756	58	694	
	30*20	0cm	64	852	65	795	54	884	54	805	56	722	64	740	56	724	60	663	
		9cm	58	818	60	791	51	895	50	810	56	791	60	730	59	705	59	664	
	25*40	0cm	68	815	73	779	55	878	56	804	64	763	70	717	60	710	66	649	
		9cm	56	796	68	780	54	850	55	807	62	770	70	698	54	725	68	612	
	30*40	0cm	203	799	79	739	53	858	53	790	57	754	63	704	58	701	59	619	
		9cm	99	817	67	775	50	866	51	793	57	785	63	714	56	758	57	628	

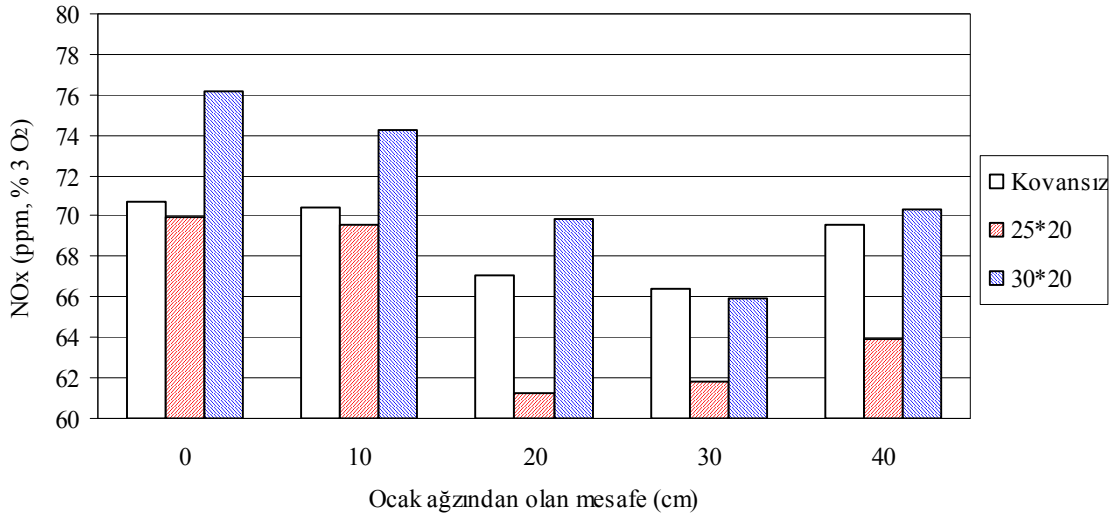
**b) Kazan ocak boyunun 680 mm olması durumu;**

680 mm ocak boyunda, anma kazan ısı kapasitesi (87 kW) için HFK=1.26 değerinde R100 ölçüm çizgisi boyunca yapılan NO<sub>x</sub> ölçümleri Şekil 6.50 ve 6.51'de verilmiştir. Kovansız ve tüm kovanlı durumlarda NO<sub>x</sub> emisyonları birbirine oldukça yakındır. Fakat çapı ve uzunluğu 25\*20 cm olan kovan kullanılması halinde NO<sub>x</sub> emisyonları kovansız ve diğer tüm kovanlı durumlara göre 10 ppm daha düşük değer almıştır.

680 mm ocak boyunda boyları uzun olan 25\*40 ve 30\*40 kovanları ile deneyler yapılmamıştır. Kovanların ocak içerisindeki konumlarına göre bir kıyaslama yapılacak olursa her iki konumda da NO<sub>x</sub> emisyonlarının birbirine yakın değer aldığı görülmektedir.

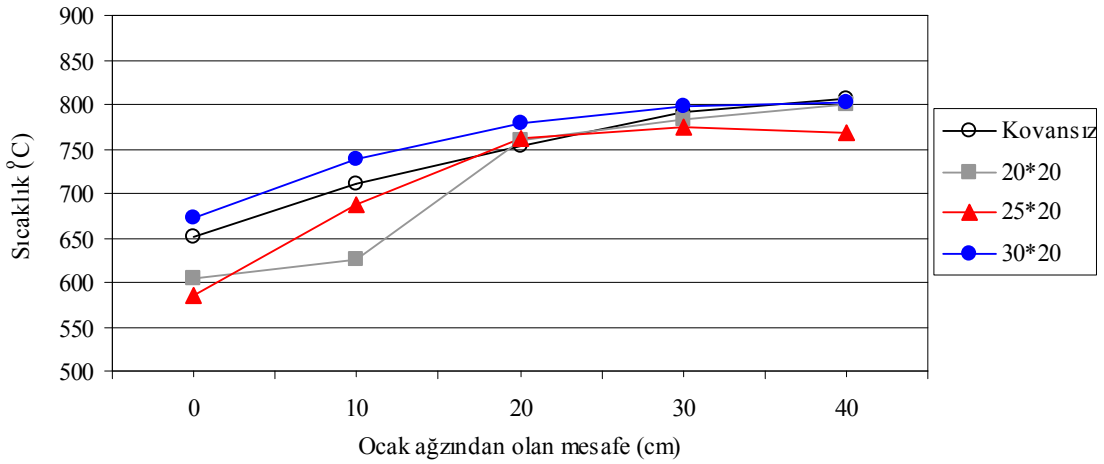


**Şekil 6.50.** R100 ölçme çizgisi üzerinde NO<sub>x</sub> emisyonunun değişimi. (Ocak boyu 680 mm, kazan kapasitesi 87 kW, Yakıt debisi=8.04 Nm<sup>3</sup>/h, Kovan konumu = 0 cm, HFK=1.26).

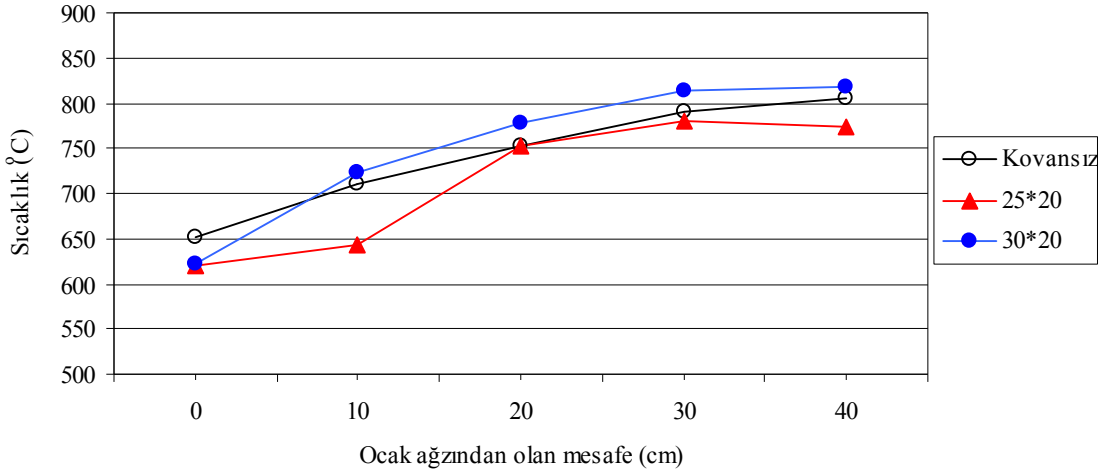


**Şekil 6.51.** R100 ölçme çizgisi üzerinde NO<sub>x</sub> emisyonunun değişimi. (Ocak boyu 680 mm, kazan kapasitesi 87 kW, Yakıt debisi=8.04 Nm<sup>3</sup>/h, Kovan konumu = 9 cm, HFK=1.26).

R100 ölçüm çizgisi boyunca ocak içerisinden yapılan sıcaklık ölçümleri 87 kW kazan ısıtma kapasitesi ve HFK=1.26 değeri için Şekil 6.52 ve 6.53’de verilmiştir.



**Şekil 6.52.** R100 ölçme çizgisi üzerinde sıcaklık değişimi. (Ocak boyu 680 mm, kazan kapasitesi 87 kW, Yakıt debisi=8.04 Nm<sup>3</sup>/h, Kovan konumu = 0 cm, HFK=1.26).



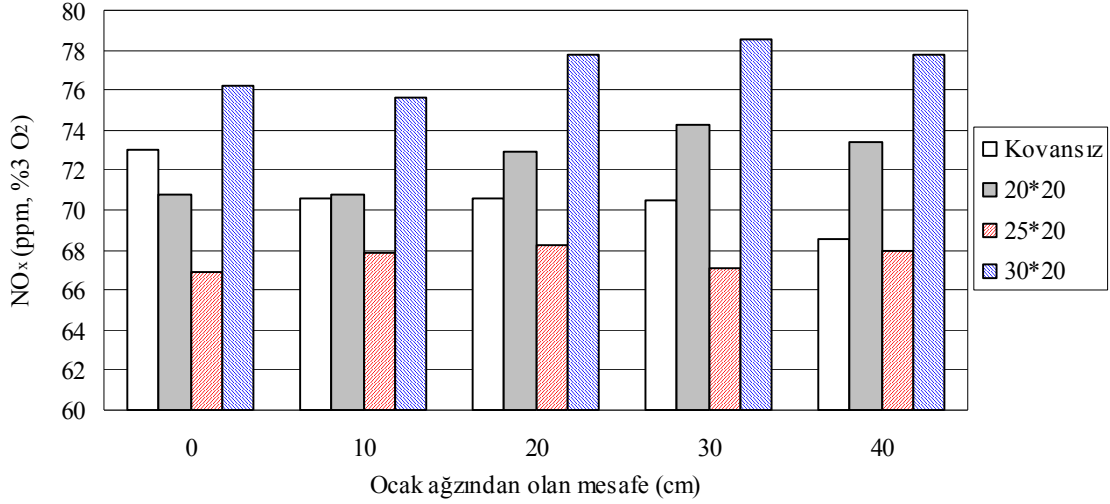
**Şekil 6.53.** R100 ölçme çizgisi üzerinde sıcaklık değişimi. (Ocak boyu 680 mm, kazan kapasitesi 87 kW, Yakıt debisi=8.04 Nm<sup>3</sup>/h, Kovan konumu = 9 cm, HFK=1.26).

680 mm ocak boyunda anma ısıl gücünde (87 kW) yanma odasından yapılan sıcaklık ölçümleri 790 mm ocak boyunun anma ısıl gücü ile benzer karakteristik özellikler taşımaktadır. Bu ocak boyunda sıcaklıklar yaklaşık 50 °C'e kadar daha düşüktür. Kovanların ocak içindeki konumlarına göre sıcaklıklarda belirgin bir farklılık görülmemektedir.

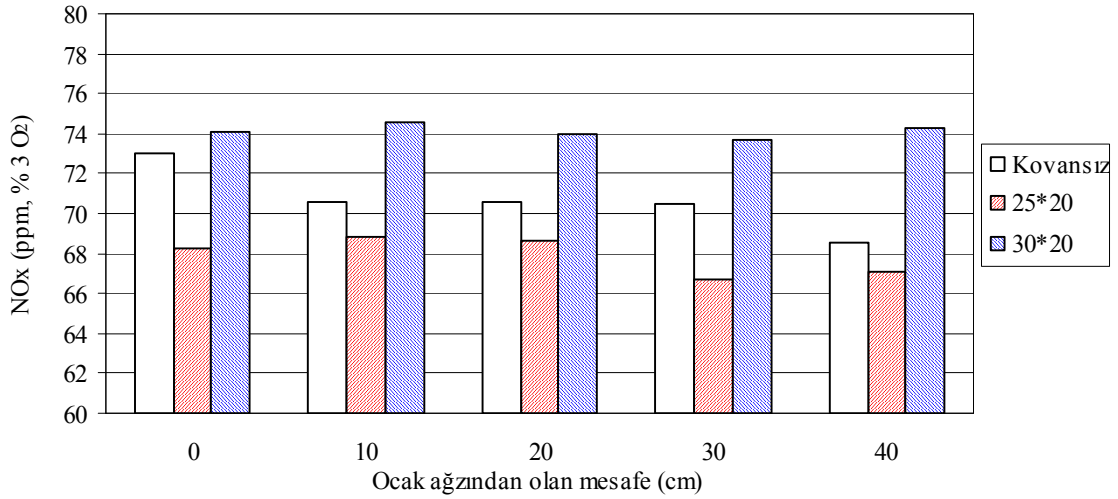
680 mm ocak boyunda, maksimum kazan ısıl kapasitesi (87 kW) için HFK=1.26 değerinde R100 ve R175 ölçüm noktalarından ölçülen NO<sub>x</sub> emisyonları 790 mm ocak boyunun anma ısıl gücünde ölçülen değerlere yakın çıkmıştır.

680 mm ocak boyunda, maksimum kazan ısıl kapasitesi (87 kW) için HFK=1.26 değerinde R175 ölçüm noktalarından yapılan NO<sub>x</sub> ölçümleri Şekil 6.54 ve 6.55'de verilmiştir. Burada R100 ölçüm noktalarında olduğu gibi 25\*20 kovanının NO<sub>x</sub> emisyonları diğerlerine nazaran 10 ppm daha düşük ölçülmüştür.



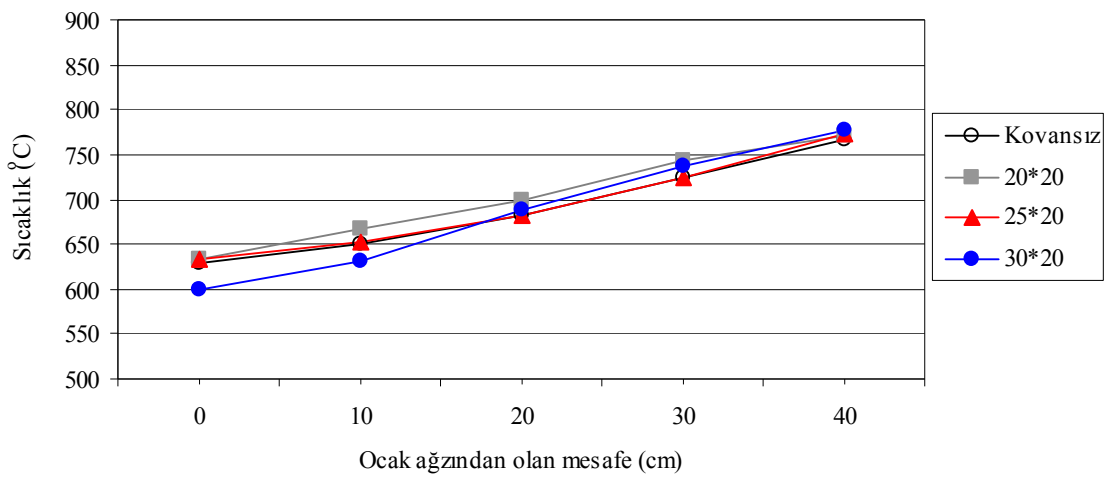


**Şekil 6.54.** R175 ölçme çizgisi üzerinde NO<sub>x</sub> emisyonunun değişimi. (Ocak boyu 680 mm, kazan kapasitesi 87 kW, Yakıt debisi=8.04 Nm<sup>3</sup>/h, Kovan konumu = 0 cm, HFK=1.26).

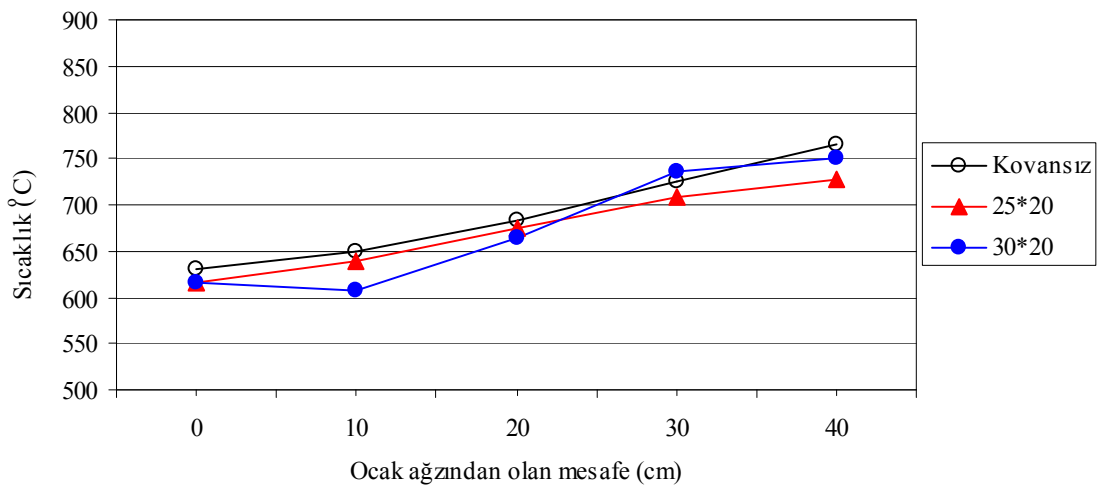


**Şekil 6.55.** R175 ölçme çizgisi üzerinde NO<sub>x</sub> emisyonunun değişimi. (Ocak boyu 680 mm, kazan kapasitesi 87 kW, Yakıt debisi=8.04 Nm<sup>3</sup>/h, Kovan konumu = 9 cm, HFK=1.26).

R175 ölçüm çizgisi boyunca ocak içerisinden yapılan sıcaklık ölçümleri 87 kW kazan ısıl kapasitesi ve  $HFK=1.26$  değeri için Şekil 6.56 ve 6.57'de verilmiştir. Buradaki ölçüm noktalarında sıcaklıklar birbirine çok yakın değer almıştır. 790 mm ocak boyu anma ısıl gücüne nazaran sıcaklıklar 50 °C kadar düşüktür. Kovanlı durumların hepsi ve kovansız durumda R175 ölçüm çizgisi boyunca ölçülen sıcaklıklar birbirine oldukça yakın değer almıştır.



**Şekil 6.56.** R175 ölçme çizgisi üzerinde sıcaklık değişimi. (Ocak boyu 680 mm, kazan kapasitesi 87 kW, Yakıt debisi=8.04 Nm<sup>3</sup>/h, Kovan konumu = 0 cm, HFK=1.26).



**Şekil 6.57.** R175 ölçme çizgisi üzerinde sıcaklık değişimi. (Ocak boyu 680 mm, kazan kapasitesi 87 kW, Yakıt debisi=8.04 Nm<sup>3</sup>/h, Kovan konumu = 9 cm, HFK=1.26).

Ocak boyunun 680 mm olması durumunda diğer kazan ısıtma kapasitesi 58 kW için HFK= 1.26 değerinde yanma odasından ölçülen NO<sub>x</sub> emisyonları ve sıcaklıklar Tablo 6.5’de verilmiştir. Ayrıca bu tabloda bu ocak boyu için anma ısıtma gücünde (87 kW) HFK=1.26 ve 1.02 değerleri içinde yapılan ölçümler verilmiştir.

680 mm ocak boyunun anma ısıtma gücünde hava fazlalık katsayısının 1.26’dan 1.02 değerine düşürülmesiyle sıcaklıklarda 30-90 °C artış olmuştur. Bu artışın nedeni hava miktarının azalmasıdır. Ocak sıcaklığının analitik hesabında da görüldüğü üzere hava fazlalık katsayısının azalması ocak sıcaklığını arttırmaktadır. Bu ocak boyunda da ocak arkasına gidildikçe sıcaklık artışı olmaktadır. Sıcaklıktaki bu artışa rağmen yaklaşık 10-30 ppm kadar NO<sub>x</sub> emisyonlarında azalma olmuştur. Bunun nedeni NO<sub>x</sub> oluşumunda etkili olan oksijen miktarının azalmasıdır. 680 mm ocak boyunda yapılan tüm deneylerde genellikle çapı ve uzunluğu 25\*20 olan kovan kullanılması halinde diğer deneylere nazaran 10-25 ppm kadar daha düşük NO<sub>x</sub> emisyonu elde edilmiştir.

R175 ölçüm noktalarındaki sıcaklıklar alev uzak olmaları dolayısıyla R100 ölçüm noktalarına göre daha düşük ölçülmüştür. her iki mesafe içinde ocak arkasına gidildikçe sıcaklıklarda artış gözlemlenmiştir.

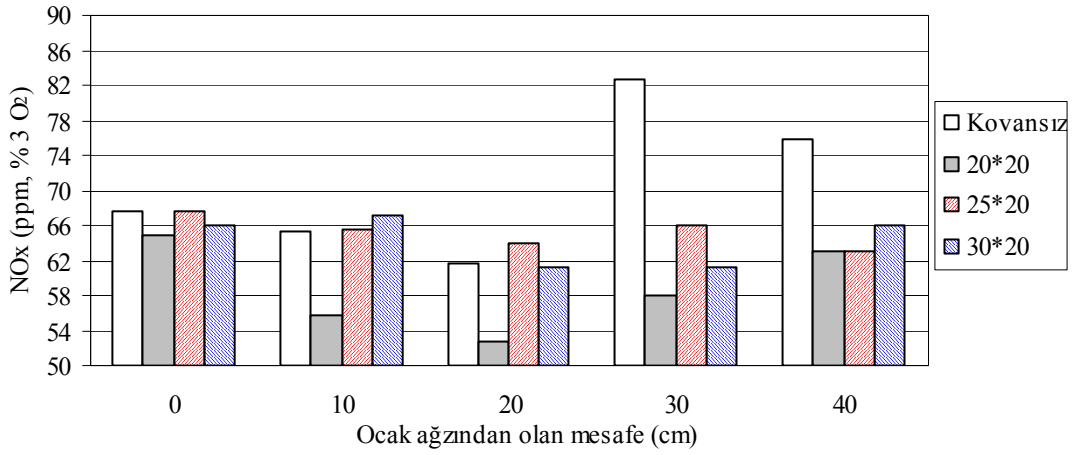
680 mm ocak boyunda kazan ısıtma kapasitesinin 87 kW’dan 58 kW’a düşürülmesiyle NO<sub>x</sub> emisyonları açısından bir fark görülmemiştir. Fakat yakıt miktarının azalmasıyla sıcaklıklarda düşüş olmuştur.

**Tablo 6.5.** Kazan ocak boyunun 680 mm olması durumunda yapılan tüm deneyler için yanma odasından ölçülen NO<sub>x</sub> emisyonları ve sıcaklıklar.

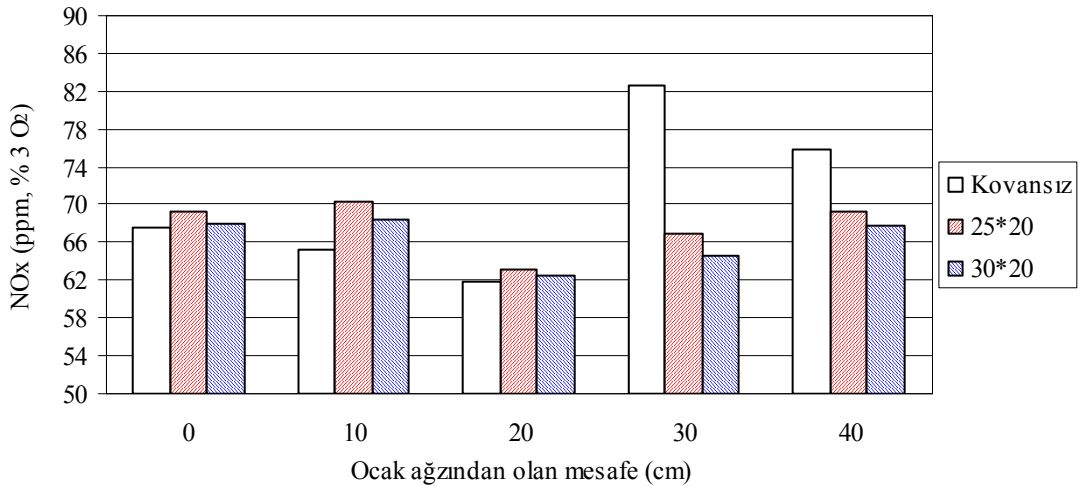
Ocak Ağzından Olan Mesafe (cm)	Yapılan Deneyler	Kovan Konumu (cm)	Ocak boyu 680 mm											
			87 kW						57 Kw					
			HFK=126				HFK=1.02				HFK=1.26			
			R100		R175		R100		R175		R100		R175	
			NO <sub>x</sub> (ppm)	T (°C)	NO <sub>x</sub> (ppm)	T (°C)	NO <sub>x</sub> (ppm)	T (°C)	NO <sub>x</sub> (ppm)	T (°C)	NO <sub>x</sub> (ppm)	T (°C)	NO <sub>x</sub> (ppm)	T (°C)
0 cm	Kovansız	-	71	652	73	630	38	682	41	639	67	584	64	540
	20*20	0 cm	74	604	71	633	48	608	46	592	66	529	65	500
	25*20	0 cm	68	585	67	633	47	617	46	602	68	537	66	530
		9 cm	70	621	68	615	33	659	41	606	68	564	66	523
	30*20	0 cm	78	673	76	600	52	672	51	579	70	591	69	523
		9 cm	76	622	74	615	45	634	46	620	70	570	72	506
10 cm	Kovansız	-	70	710	71	650	42	710	40	575	68	627	63	551
	20*20	0 cm	73	626	71	667	46	642	44	609	65	569	63	531
	25*20	0 cm	67	687	68	652	48	696	38	629	65	629	67	585
		9 cm	70	644	69	640	40	678	42	587	68	593	70	567
	30*20	0 cm	78	738	76	632	53	717	51	580	68	635	68	535
		9 cm	74	723	75	608	45	702	41	600	68	657	69	534
20 cm	Kovansız	-	67	753	71	683	41	870	40	629	62	728	94	623
	20*20	0 cm	69	760	73	698	46	829	33	696	52	694	65	620
	25*20	0 cm	64	761	68	682	50	870	29	709	61	725	65	622
		9 cm	61	753	69	674	41	809	33	636	63	698	67	619
	30*20	0 cm	72	778	78	688	52	918	51	680	64	748	69	622
		9 cm	70	777	74	664	48	844	36	676	66	755	70	600
30 cm	Kovansız	-	66	791	71	725	45	904	40	691	64	745	94	670
	20*20	0 cm	70	783	74	743	54	855	38	748	55	719	65	670
	25*20	0 cm	63	774	67	724	53	884	30	756	63	754	66	671
		9 cm	62	781	67	708	40	890	19	747	66	748	67	661
	30*20	0 cm	70	798	79	736	59	925	51	801	68	751	70	683
		9 cm	66	814	74	735	52	935	26	798	66	765	69	665
40 cm	Kovansız	-	70	806	69	766	38	902	40	779	67	748	94	690
	20*20	0 cm	79	799	73	771	55	841	38	755	56	715	66	699
	25*20	0 cm	63	769	68	774	51	875	31	747	67	757	67	717
		9 cm	64	774	67	728	36	851	17	764	65	747	67	701
	30*20	0 cm	73	803	78	778	58	802	51	836	70	767	69	715
		9 cm	70	818	74	751	53	917	32	848	68	768	70	683

### c) Kazan ocak boyunun 550 mm olması durumu

550 mm ocak boyunda, maksimum kazan ısı kapasitesi (58 kW) için HFK=1.475 değerinde R100 ölçüm çizgisi boyunca yapılan NO<sub>x</sub> ölçümleri Şekil 6.58 ve 6.59'da verilmiştir. Kovansız ve tüm kovanlı durumlarda NO<sub>x</sub> emisyonları birbirine oldukça yakın değer almıştır.

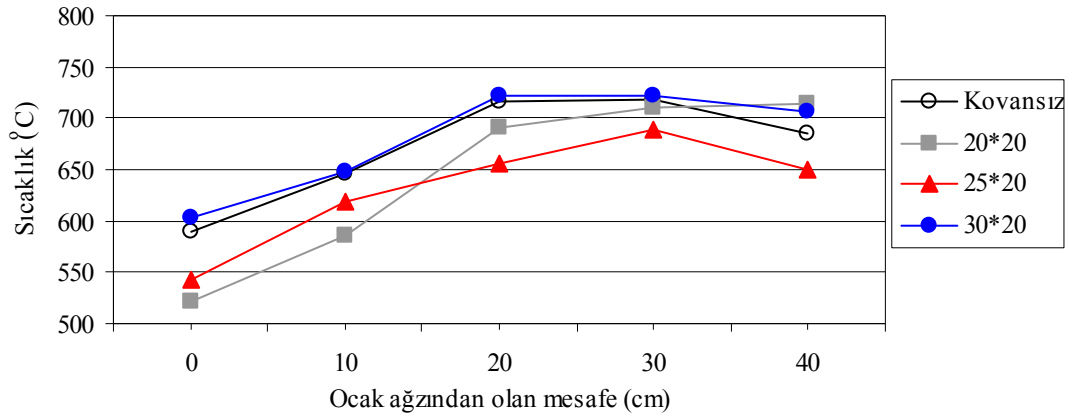


**Şekil 6.58.** R100 ölçme çizgisi üzerinde NO<sub>x</sub> emisyonunun değişimi. (Ocak boyu 550 mm, kazan kapasitesi 58 kW, Yakıt debisi=5.35 Nm<sup>3</sup>/h, Kovan konumu = 0 cm, HFK=1.475).

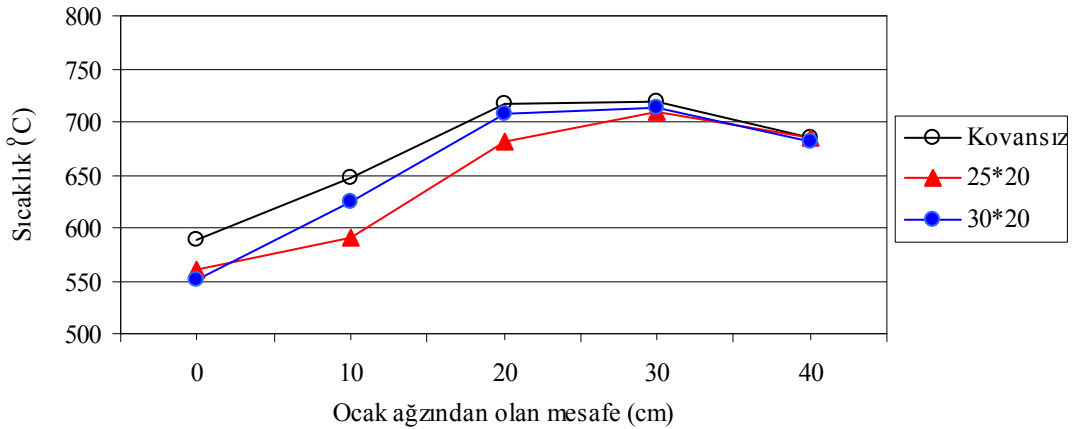


**Şekil 6.59.** R100 ölçme çizgisi üzerinde NO<sub>x</sub> emisyonunun değişimi. (Ocak boyu 550 mm, kazan kapasitesi 58 kW, Yakıt debisi=5.35 Nm<sup>3</sup>/h, Kovan konumu = 9 cm, HFK=1.475).

550 mm ocak boyunda boyları uzun olan 25\*40 ve 30\*40 kovanları ile deneyler yapılmamıştır. Kovanların ocak içerisindeki konumlarına göre bir kıyaslama yapılacak olursa her iki konumda da  $\text{NO}_x$  emisyonlarının birbirine yakın değer aldığı görülmektedir. R100 ölçüm hattında ocak içerisinde yapılan sıcaklık ölçümleri 58 kW kazan ısı kapasitesi ve  $\text{HFK}=1.475$  değeri için Şekil 6.60 ve 6.61’de verilmiştir.



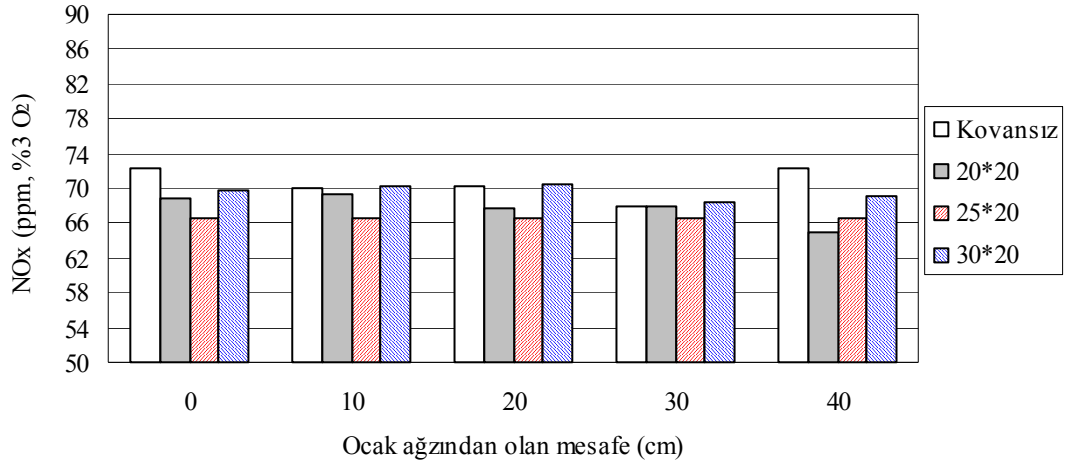
**Şekil 6.60.** R100 ölçme çizgisi üzerinde sıcaklık değişimi. (Ocak boyu 550 mm, kazan kapasitesi 58 kW, Yakıt debisi=5.35  $\text{Nm}^3/\text{h}$ , Kovan konumu = 0 cm,  $\text{HFK}=1.475$ ).



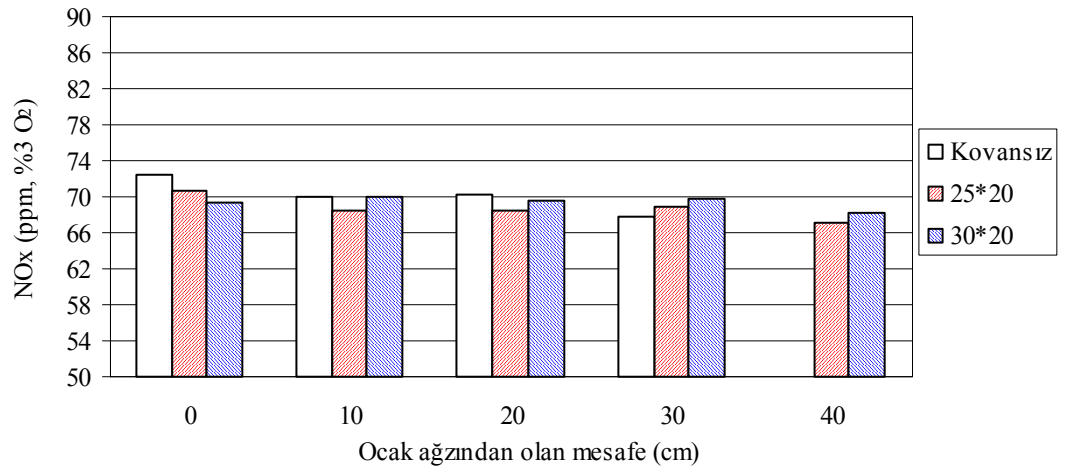
**Şekil 6.61.** R100 ölçme çizgisi üzerinde sıcaklık değişimi. (Ocak boyu 550 mm, kazan kapasitesi 58 kW, Yakıt debisi=5.35  $\text{Nm}^3/\text{h}$ , Kovan konumu = 9 cm,  $\text{HFK}=1.475$ )

R100 ölçüm noktalarından ölçülen sıcaklıklarda tüm kovanlı durumların kovansız duruma göre daha düşük olduğu görülmüştür. 550 mm ocak boyunda, anma

ısı gücü (58 kW) için HFK=1.475 değerinde R175 ölçüm noktalarından yapılan NO<sub>x</sub> ölçümleri Şekil 6.62 ve 6.63'de verilmiştir. Yanma odasının R175 ölçüm çizgisi boyunca ölçülen NO<sub>x</sub> emisyonları kovansız ve tüm kovanlı durumlarda birbirine yakın değerler almıştır.

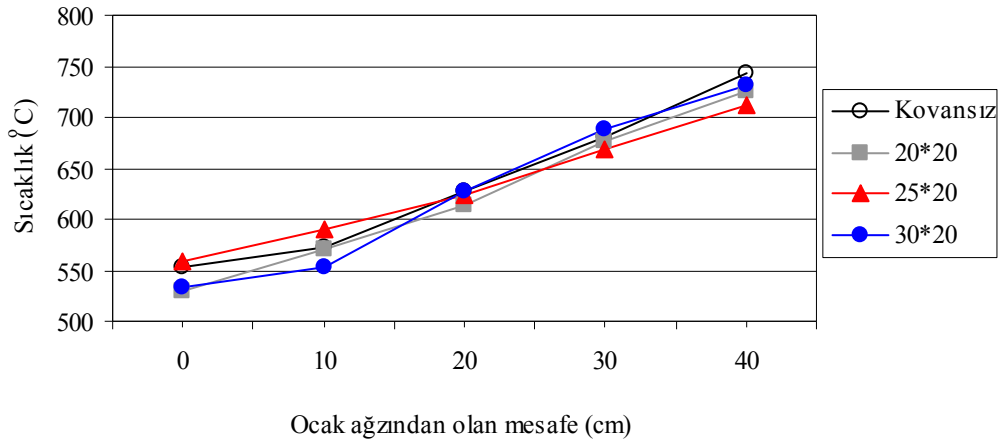


**Şekil 6.62.** R175 ölçme çizgisi üzerinde NO<sub>x</sub> emisyonunun değişimi (Ocak boyu 550 mm, kazan kapasitesi 58 kW, Yakıt debisi=5.35 Nm<sup>3</sup>/h, Kovan konumu = 0 cm, HFK=1.475).

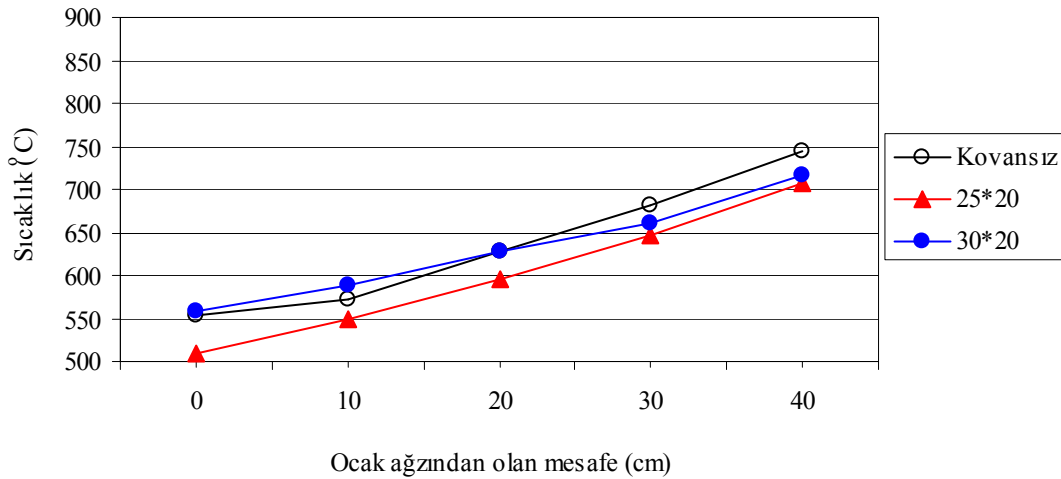


**Şekil 6.63.** R175 ölçme çizgisi üzerinde NO<sub>x</sub> emisyonunun değişimi (Ocak boyu 550 mm, kazan kapasitesi 58 kW, Yakıt debisi=5.35 Nm<sup>3</sup>/h, Kovan konumu = 9 cm, HFK=1.475).

Yanma odasının R175 ölçüm noktalarında yapılan sıcaklık ölçümleri 58 kW kazan ısıl kapasitesi ve HFK=1.475 değeri için Şekil 6.64 ve 6.65’de verilmiştir. Buradaki ölçüm noktalarında sıcaklıklar birbirine çok yakın değer almıştır. Diğer ocak boylarının bu kapasitede ve hava fazlalık katsayısının 1.26 değerlerinde R175 ölçüm noktalarından ölçülen sıcaklıkları bu ocak boyuna göre daha büyük değerler almıştır.



**Şekil 6.64.** R175 ölçme çizgisi üzerinde sıcaklık değişimi. (Ocak boyu 550 mm, kazan kapasitesi 58 kW, Yakıt debisi=5.35 Nm<sup>3</sup>/h, Kovan konumu = 0 cm, HFK=1.475).



**Şekil 6.65.** R175 ölçme çizgisi üzerinde sıcaklık değişimi. (Ocak boyu 550 mm, kazan kapasitesi 58 kW, Yakıt debisi=5.35 Nm<sup>3</sup>/h, Kovan konumu = 9 cm, HFK=1.475).

Ocak boyunun 550 mm olması durumunda diğer kazan ısıl kapasitesi 43.5 kW için HFK= 1.475 değerinde yanma odasından ölçülen NO<sub>x</sub> emisyonları ve sıcaklıklar Tablo 6.6’da verilmiştir.



**Tablo 6.6.** Kazan ocak boyunun 550 mm olması durumunda yapılan tüm deneyler için yanma odasından ölçülen NO<sub>x</sub> emisyonları ve sıcaklıklar.

Ocak Ağzından Olan Mesafe (cm)	Yapılan Deneyler	Kovan Konumu (cm)	Ocak boyu 550 mm													
			58 kW						43.5 kW							
			HFK=1.475				HFK=1.26				HFK=1.475					
			R100		R175		R100		R175		R100		R175			
			NO <sub>x</sub> (ppm)	T (°C)	NO <sub>x</sub> (ppm)	T (°C)	NO <sub>x</sub> (ppm)	T (°C)	NO <sub>x</sub> (ppm)	T (°C)	NO <sub>x</sub> (ppm)	T (°C)	NO <sub>x</sub> (ppm)	T (°C)		
0 cm	Kovansız	-	68	589	72	553	56	575	69	543	69	544	67	496		
	20*20	0 cm	65	521	69	529	63	538	63	524	63	479	66	489		
	25*20	0 cm	68	542	67	559	64	537	66	539	66	532	66	482		
		9 cm	69	560	71	509	58	563	63	516	63	522	63	475		
	30*20	0 cm	66	604	70	533	66	603	67	538	67	558	65	533		
		9 cm	68	551	69	557	62	549	64	517	64	484	62	462		
10 cm	Kovansız	-	65	647	70	572	55	636	66	579	66	591	69	531		
	20*20	0 cm	56	586	69	571	63	583	54	560	54	542	66	550		
	25*20	0 cm	66	619	67	590	63	613	66	582	66	586	66	555		
		9 cm	70	590	69	548	59	592	63	519	63	542	63	521		
	30*20	0 cm	67	648	70	552	66	658	67	559	67	617	67	580		
		9 cm	68	624	70	588	64	612	67	560	67	551	62	488		
20 cm	Kovansız	-	62	717	70	628	35	724	64	664	64	650	70	621		
	20*20	0 cm	53	690	68	614	51	718	49	649	49	636	68	625		
	25*20	0 cm	64	655	67	624	63	741	61	638	61	659	66	615		
		9 cm	63	681	69	596	56	685	62	610	62	590	64	600		
	30*20	0 cm	61	722	71	628	61	752	64	667	64	670	65	652		
		9 cm	63	708	70	627	60	719	64	641	64	635	64	538		
30 cm	Kovansız	-	83	719	68	681	57	734	65	732	65	676	62	675		
	20*20	0 cm	58	710	68	677	56	737	52	715	52	658	68	683		
	25*20	0 cm	66	688	67	669	65	750	62	691	62	674	66	674		
		9 cm	67	710	69	646	56	717	61	674	61	631	65	665		
	30*20	0 cm	61	723	68	689	65	752	63	724	63	673	68	685		
		9 cm	65	714	70	660	63	745	65	700	65	647	64	629		
40 cm	Kovansız	-	76	685	72	744	62	719	64	782	64	687	67	709		
	20*20	0 cm	63	715	65	725	59	731	54	759	54	645	66	708		
	25*20	0 cm	63	650	67	711	65	740	60	761	60	676	66	696		
		9 cm	69	685	67	708	57	680	62	622	62	623	63	685		
	30*20	0 cm	66	707	69	731	63	730	67	766	67	663	68	716		
		9 cm	68	681	68	717	63	716	68	740	68	621	62	665		

Tablo 6.6’da bu ocak boyu için anma ısıl gücünde (58 kW) HFK=1.475 ve 1.26 değerleri için yapılan ölçümler verilmiştir. Hava fazlalık katsayısının azaltılmasıyla her iki ölçüm çizgisi (R100 ve R175) üzerindeki ölçüm noktaları kendi aralarında tüm deneyler için sıcaklıklar birbirine yakın değerler almıştır. NO<sub>x</sub> emisyonları ise hava fazlalık katsayısının 1.26 değerinde daha düşük değerdedir. Ölçülen NO<sub>x</sub> emisyonlarında tüm kovanlı ve kovansız deneyler için birbirine yakın değerdedir.

550 mm ocak boyunda kazan ısıl kapasitesinin 43.5 kW’a düşürülmesi durumunda ise her iki ölçüm çizgisi boyunca da sıcaklıkların azaldığı görülmektedir. Sıcaklıkların azalmasına azalan yakıt miktarı ile ocak yükünün azalması sebep olmuştur. Kovan kullanılması durumunda sıcaklıklar kovansız duruma göre daha düşük değerler almıştır. NO<sub>x</sub> emisyonlarında ise değerler birbirine yakın çıkmakla birlikte bir azalma görülmemiştir.

## **6.2.2. Karbonmonoksit emisyonları**

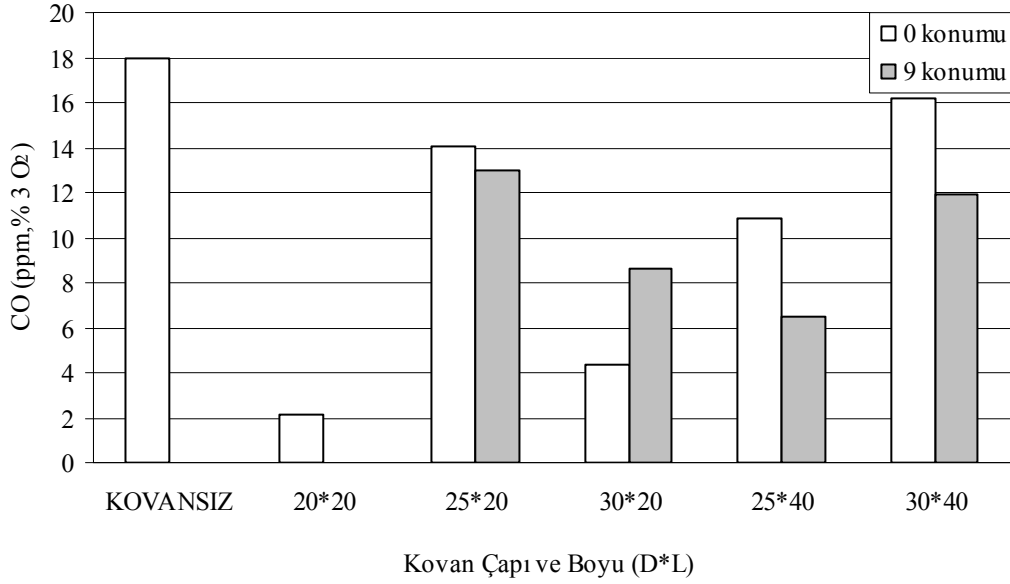
Bacadan ve yanma odasında ölçülen karbonmonoksit emisyonları aşağıda değerlendirilmiştir.

### **6.2.2.1. Bacadan yapılan ölçümler**

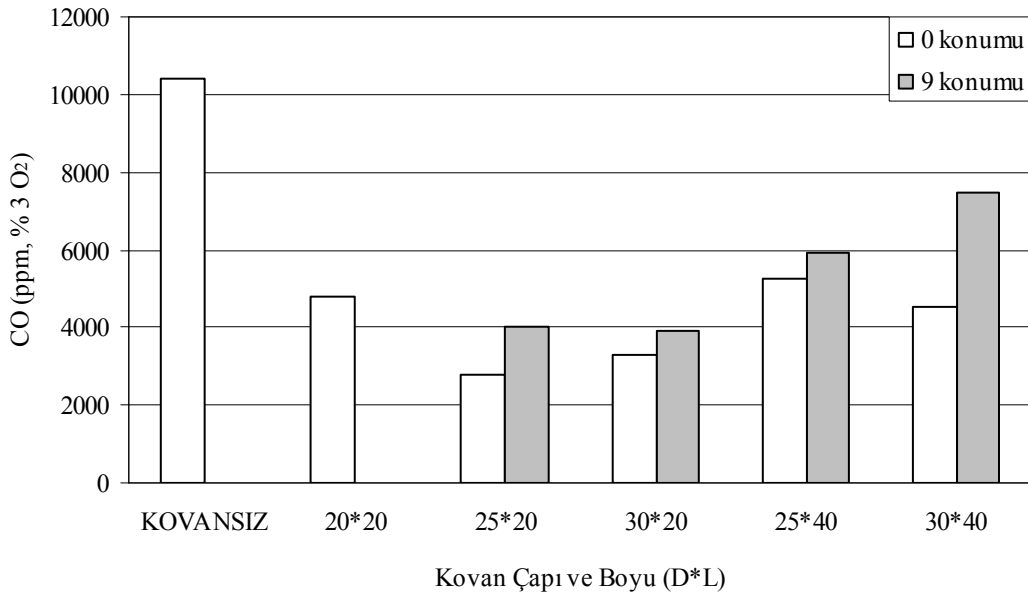
#### **a) Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumu**

Şekil 6.66 ve 6.67’de 790 mm ocak boyunun anma ısıl kapasitesinde, hava fazlalık katsayısının 1.26 ve 1.02 değerleri için yapılan ölçümler görülmektedir. Diyagramlarda kovanların 0 (sıfır) ve 9 konumlarında yapılan ölçümler birlikte verilmiştir. Çapı ve uzunluğu 20\*20 cm olan kovanın ocak içerisinde 9 cm konumunda deney yapılmamıştır. Hava fazlalık katsayısının 1.26 değerinde çapı ve uzunluğu 20\*20 olan kovan kullanılması halinde karbonmonoksit (CO) emisyonları 2 ppm ile en düşük değeri almıştır. Diğer durumlarda CO emisyonları birbirine yakın değerde olup en yüksek değer 18 ppm ile kovansız durumda ölçülmüştür. Hava fazlalık katsayısının 1.02 değerine düşürülmesiyle CO emisyonları artmıştır. HFK=1.26 değerinde kovansız

durumda CO emisyonları 18 ppm iken HFK=1.02 için 10411 ppm değerine yükselmiştir. HFK=1.02 değerinde çapı ve uzunluğu 25\*20 kovanın ocak ağzına yerleştirilmesi durumunda CO emisyonları 2766 ppm ile en düşük değerdedir.



**Şekil 6.66.** Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumunda 116 kW kazan ısı kapasitesinde bacadan ölçülen CO emisyonları (Yakıt debisi=10.72 Nm<sup>3</sup>/h, HFK=1.26).



**Şekil 6.67.** Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumunda 116 kW kazan ısı kapasitesinde bacadan ölçülen CO emisyonları (Yakıt debisi=10.72 Nm<sup>3</sup>/h, HFK=1.02).

HFK=1.02 değerinde kovanların ocak içerisinde 9 cm konumuna yerleştirilmeleri halinde CO emisyonları 0 cm konumlarına göre artış göstermiştir.

Ocak boyunun 790 mm olması durumunda yapılan tüm deneyler için bacadan ölçülen CO emisyonları Tablo 6.7’de verilmiştir. 790 mm ocak boyunda 87 ve 58 kW kazan ısıtıl kapasiteleri için hava fazlalık katsayısının 1.26 değerinde yapılan deneylerde bacadan ölçülen CO emisyonları anma ısıtıl gücündeki (116 kW) değerlere yakın çıkmıştır. Bu ısıtıl kapasitelerde de çapı ve uzunluğu 20\*20 olan kovan kullanılması halinde CO emisyonları 3 ve 5 ppm ile en düşük değer almıştır.

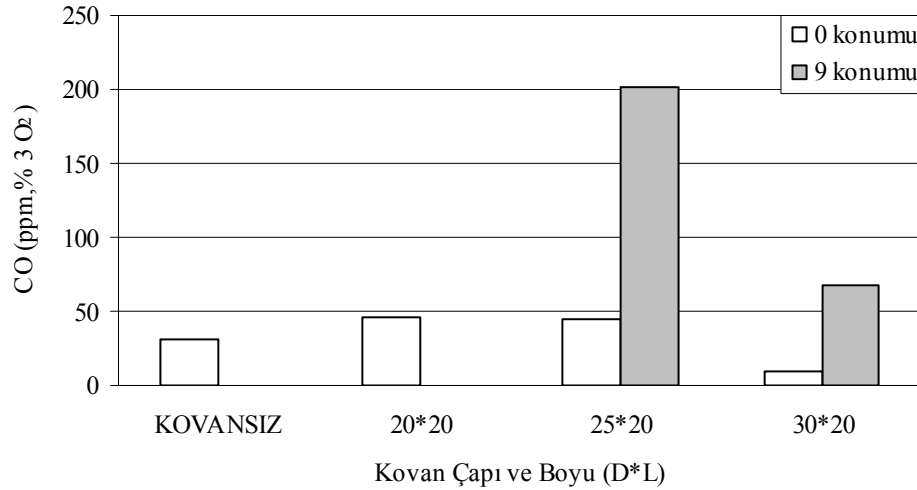
87 kW ve 58 kW kazan ısıtıl kapasitelerinde kovanların ocak içerisindeki konumlarına göre bir kıyaslama yapıldığında her iki konum içinde CO emisyonları birbirine yakın değer almıştır.

**Tablo 6.7.** Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumunda yapılan tüm deneyler için bacadan ölçülen CO emisyonları.

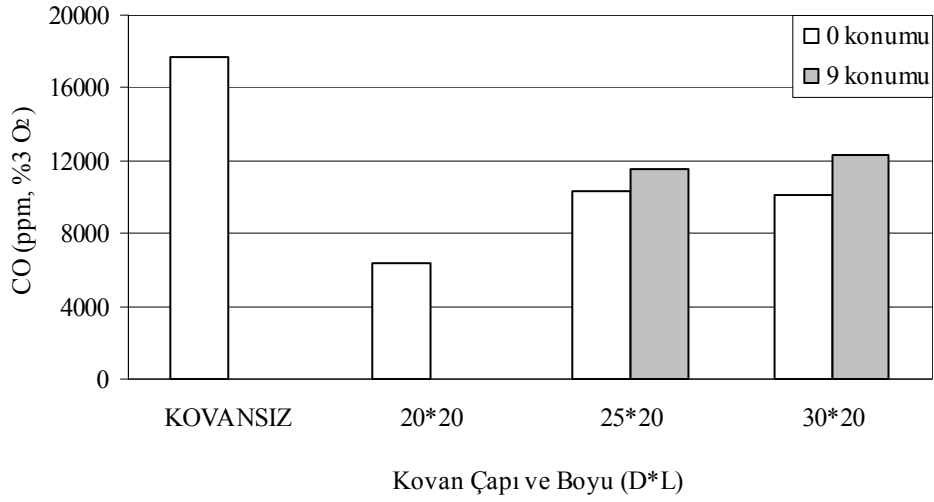
Kovan Çapı ve Boy (cm)	Kovan Konumu (cm)	Ocak boyu 790 mm			
		116 kW		87 kW	58 kW
		HFK = 1.26	HFK = 1.02	HFK = 1.26	HFK = 1.26
		CO (ppm)	CO (ppm)	CO (ppm)	CO (ppm)
Ø20x20	0 cm	2	4787	5	3
Ø25x20	0 cm	14	2766	19	11
	9 cm	13	3999	15	9
Ø30x20	0 cm	4	3312	18	13
	9 cm	9	3898	9	5
Ø25x40	0 cm	11	5278	28	4
	9 cm	6	5938	4	0
Ø30x40	0 cm	16	4530	58	11
	9 cm	12	7443	22	13
<b>Kovansız Deneyler</b>		18	10411	18	16

### b) Kazan ocak boyunun 680 mm olması durumu

680 mm ocak boyunun anma ısıl kapasitesinde, hava fazlalık katsayısının 1.26 ve 1.02 değerleri için yapılan ölçümler Şekil 6.68 ve 6.69'da verilmiştir. Hava fazlalık katsayısının 1.26 değerinde 790 mm ocak boyunun anma ısıl gücüne kıyasla kovansız durum için CO emisyonlarında 13 ppm'lik artış olmuştur. Bu artış çapı ve uzunluğu 30\*20 olan kovan haricindeki diğer kovanlı durumlar için daha da fazla olmuştur. Kovanların ocak içerisinde 9 cm konumunda bulunmaları halinde CO emisyonları 60- 150 ppm'lik bir artış göstermiştir. Hava fazlalık katsayısının 1.02 değerine düşürülmesiyle CO emisyonları kovansız durum için 31 ppm'den 17716 ppm değerine çıkmıştır. Bu artış kovanlı durumlarda da oluşmuştur. Fakat çapı ve uzunluğu 20\*20 olan kovan kullanılması halinde CO emisyonları 6363 ppm ile en düşük değerini almıştır. Burada tüm kovanlı durumlarda CO emisyonları kovansız duruma göre daha düşük değer almıştır.



**Şekil 6.68.** Kazan ocak boyunun 680 mm olması durumunda 87 kW kazan ısıl kapasitesinde bacadan ölçülen CO emisyonları (Yakıt debisi=8.04 Nm<sup>3</sup>/h, HFK=1.26).



**Şekil 6.69.** Kazan ocak boyunun 680 mm olması durumunda 87 kW kazan ısıtma kapasitesinde bacadan ölçülen CO emisyonları (Yakıt debisi=8.04 Nm<sup>3</sup>/h, HFK=1.02).

Ocak boyunun 680 mm olması durumunda yapılan tüm deneyler için bacadan ölçülen CO emisyonları Tablo 6.8’de verilmiştir.

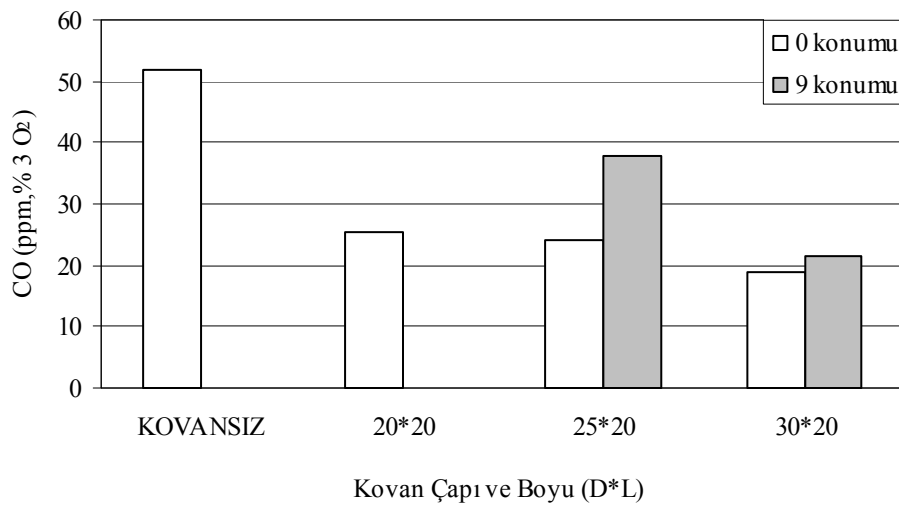
**Tablo 6.8.** Kazan ocak boyunun 680 mm olması durumunda yapılan tüm deneyler için bacadan ölçülen CO emisyonları (% 3 O<sub>2</sub>).

Kovan Çapı ve Boyu (cm)	Kovan Konumu (cm)	Ocak boyu 680 mm		
		87 kW		58 kW
		HFK = 1.26	HFK = 1.02	HFK = 1.26
		CO (ppm)	CO (ppm)	CO (ppm)
Ø20x20	9 cm	46	6363	17
Ø25x20	0 cm	44	10320	38
	9 cm	201	11574	72
Ø30x20	0 cm	10	10084	86
	9 cm	68	12355	29
<b>Kovansız Deneyler</b>		31	17716	176

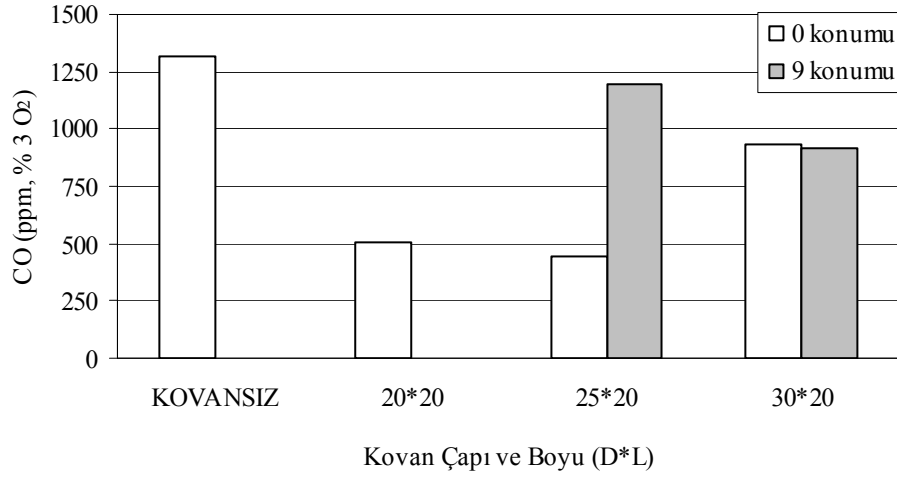
680 mm ocak boyunda kazan ısıtma kapasitesinin 87 kW'dan ve 58 kW'a düşürülerek hava fazlalık katsayısının 1.26 değerinde yapılan deneyde bacadan ölçülen CO emisyonları kovansız durum için 176 ppm değerine yükselmiştir. Bu deneyde çapı ve uzunluğu 20\*20 olan kovan kullanılması halinde CO emisyonları 17 ppm ile en düşük değeri almıştır. 87 kW kazan ısıtma kapasitesinin 790 mm ve 680 mm ocak boylarında sağlanması durumunda bacada ölçülen CO emisyonları büyük ocak boyunda daha düşük seviyelerdedir.

### c) Kazan ocak boyunun 550 mm olması durumu

550 mm ocak boyunun anma ısıtma kapasitesinde, hava fazlalık katsayısının 1.475 ve 1.26 değerleri için yapılan ölçümler Şekil 6.70 ve 6.71'de verilmiştir. Hava fazlalık katsayısının 1.475 değerinde CO emisyonları kovansız durum için 52 ppm ile en yüksek değerini almıştır. Kovanların ocak ağızına yerleştirilmeleri halinde tüm kovanlı durumlar için CO emisyonları birbirine yakın olup 9 cm konumunda emisyonlar 3-14 ppm'lik artış göstermiştir. Hava fazlalık katsayısının 1.26 değerine düşürülmesiyle CO emisyonları kovansız durum için 1314 ppm değerine yükselmiştir. Bu artış kovanlı durumlarda da mevcuttur. Çapı ve uzunluğu 25\*20 olan kovan kullanılması halinde CO emisyonları 444 ppm ile en düşük değerini almıştır.



**Şekil 6.70.** Kazan ocak boyunun 550 mm olması durumunda 58 kW kazan ısıtma kapasitesinde bacadan ölçülen CO emisyonları (Yakıt debisi=5.35 Nm<sup>3</sup>/h, HFK=1.475).



**Şekil 6.71.** Kazan ocak boyunun 550 mm olması durumunda 58 kW kazan ısıtma kapasitesinde bacadan ölçülen CO emisyonları (Yakıt debisi=5.35 Nm<sup>3</sup>/h, HFK=1.26).

Ocak boyunun 550 mm olması durumunda yapılan tüm deneyler için bacadan ölçülen CO emisyonları Tablo 6.9’da verilmiştir.

**Tablo 6.9.** Kazan ocak boyunun 550 mm olması durumunda yapılan tüm deneyler için bacadan ölçülen CO emisyonları (% 3 O<sub>2</sub>).

Kovan Çapı ve Boyu (cm)	Kovan Konumu (cm)	Ocak boyu 550 mm		
		58 kW		43.5 kW
		HFK = 1.475	HFK = 1.26	HFK = 1.475
		CO (ppm)	CO (ppm)	CO (ppm)
Ø20x20	9 cm	25	510	6
Ø25x20	0 cm	24	444	124
	9 cm	22	1196	210
Ø30x20	0 cm	19	935	73
	9 cm	38	916	171
<b>Kovansız Deneyler</b>		52	1314	109

550 mm ocak boyunda kazan ısıtma kapasitesinin 58 kW’dan ve 43.5 kW’a düşürülerek hava fazlalık katsayısının 1.475 değerinde yapılan deneyde bacadan ölçülen

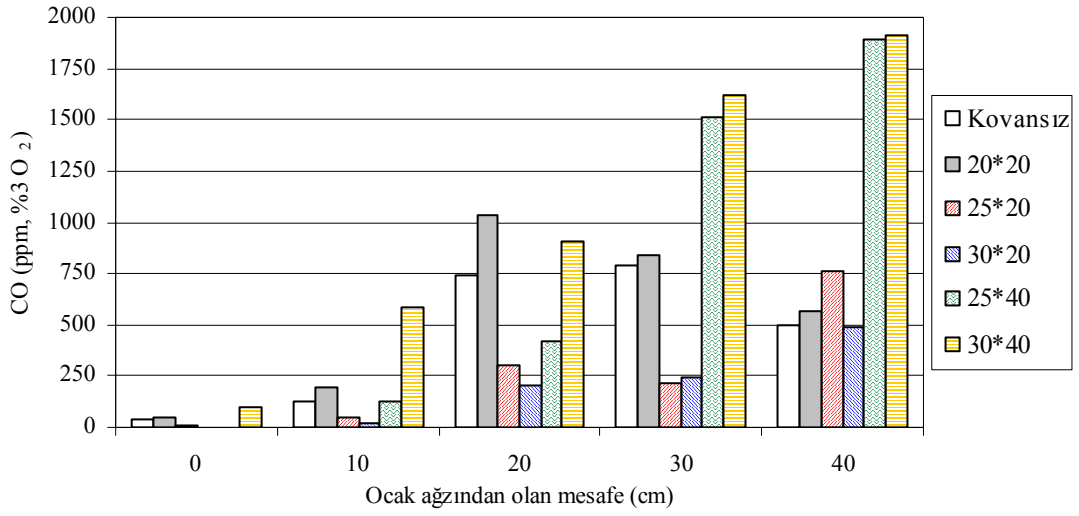


CO emisyonları kovansız durum için 109 ppm değerine yükselmiştir. Bu deneyde çapı ve uzunluğu 20\*20 olan kovan kullanılması halinde CO emisyonları 6 ppm ile en düşük değeri almıştır. 58 kW kazan ısıtma kapasitesinin 790 mm, 680 ve 550 mm ocak boylarında sağlanması durumunda hava fazlalık katsayısının 1.26 değeri için bacada ölçülen CO emisyonları 550 mm ocak boyunda daha fazladır. 550 mm ocak boyunda hava fazlalık katsayısının 1.475 değeri diğer ocak boyları için hava fazlalık katsayısının 1.26 değerine karşılık gelmektedir. Bu nedenle yukarıdaki karşılaştırma 550 mm ocak boyu için hava fazlalık katsayısı 1.475 alınarak yapılacak olursa CO emisyonlarının 790 mm ocak boyuna göre fazla, 680 mm ocak boyuna göre de daha düşük değer aldığı görülür.

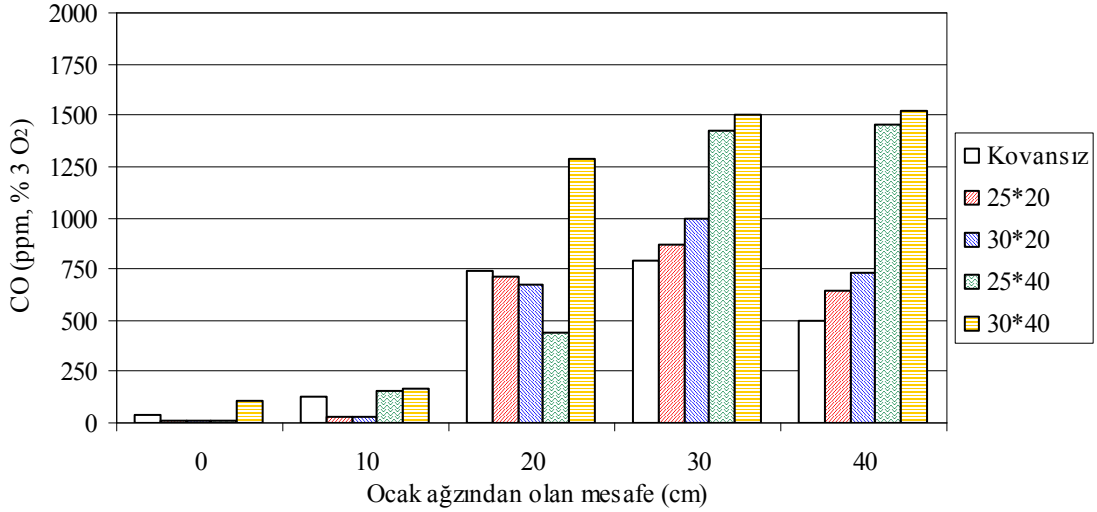
#### **6.2.2.2 Yanma odasından yapılan ölçümler**

##### **a) Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumu**

790 mm ocak boyunda, 116 kW kazan ısıtma kapasitesi için HFK=1.26 değerinde kovanların her iki konumunda da R100 ölçüm çizgisi üzerindeki ölçüm noktalarından yapılan CO emisyonu ölçümleri Şekil 6.72 ve 6.73'de verilmiştir. Kovansız ve tüm kovanlı durumlarda CO emisyonları ocak arkasına doğru gidildikçe artış göstermiştir. Çapı ve uzunluğu 25\*40 cm ile 30\*40 olan kovanlı deneylerde ocağın arka bölümünde (40 cm ölçüm noktasında) CO emisyonları 1500 ppm değeri üzerine çıkmıştır. Kovansız ve tüm kovanlı durumlarda yanmanın ocak arkasında devam ettiği görülmektedir. Çapı ve uzunluğu 25\*20 ve 30\*20 olan kovanlarda CO emisyonu kovansız duruma kıyasla düşük değer almıştır. Boyları 40 cm olan kovanlarda CO emisyonu kısa kovanlara göre daha fazladır. Kovanların ocak içerisinde 9 cm konumuna yerleştirilmeleri durumunda ise CO emisyonları artış göstermiştir. Bu artış kovanın ocak arkasına yaklaşmasıyla bu bölgede alevi çevrelemesi, alev geri dönüşünü engellemesi ve küçük çaplı bir ocak görevi yapmasından kaynaklanmaktadır.



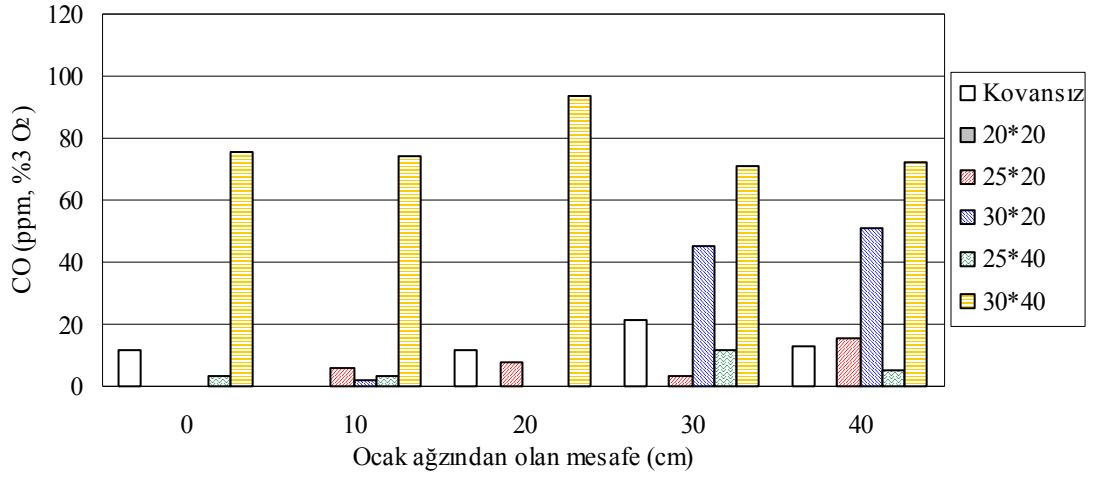
**Şekil 6.72.** R100 ölçüm çizgisi üzerinde CO emisyonlarının değişimi (Ocak boyu 790 mm, Kazan kapasitesi 116 kW, Yakıt debisi=10.72 Nm<sup>3</sup>/h, Kovan konumu = 0 cm, HFK=1.26).



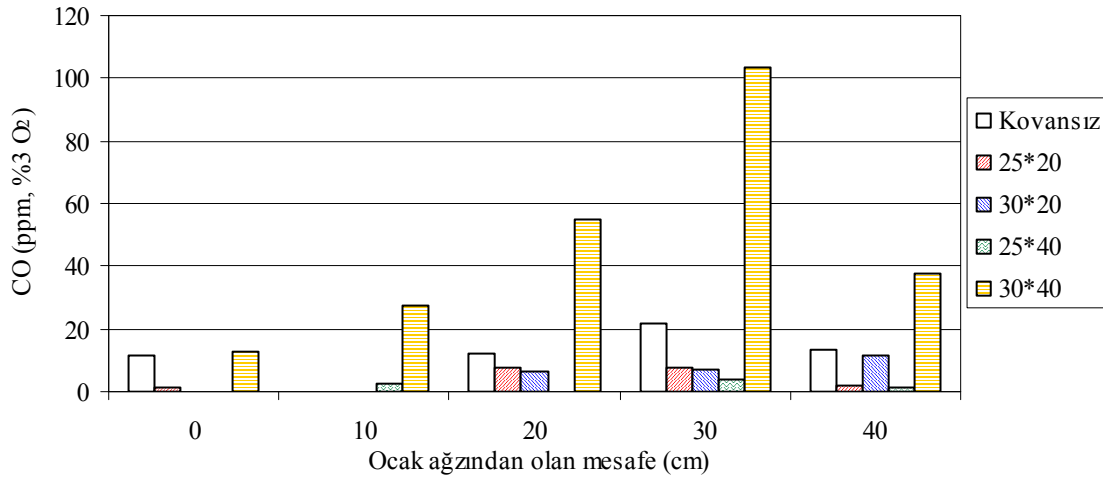
**Şekil 6.73.** R100 ölçüm çizgisi üzerinde CO emisyonlarının değişimi (Ocak boyu 790 mm, Kazan kapasitesi 116 kW, Yakıt debisi=10.72 Nm<sup>3</sup>/h, Kovan konumu = 9 cm, HFK=1.26).

790 mm ocak boyunda, 116 kW kazan ısı kapasitesi için HFK=1.26 değerinde kovanların her iki konumunda da R175 ölçüm çizgisi üzerindeki ölçüm noktalarından yapılan CO ölçümleri Şekil 6.74 ve 6.75'de verilmiştir. R175 ölçüm çizgisi boyunca

ölçülen CO emisyonları R100 ölçüm çizgisine kıyasla oldukça düşüktür. Çapı ve uzunluğu 20\*20 kovanı için ölçüm noktalarında CO emisyonu 0 ppm olarak ölçülmüştür. Alev geri dönüşünde CO emisyonlarının azaldığı görülmektedir.



**Şekil 6.74.** R175 ölçüm çizgisi üzerinde CO emisyonlarının değişimi (Ocak boyu 790 mm, Kazan kapasitesi 116 kW, Yakıt debisi=10.72 Nm<sup>3</sup>/h, Kovan konumu = 0 cm, HFK=1.26)



**Şekil 6.75.** R175 ölçüm çizgisi üzerinde CO emisyonlarının değişimi (Ocak boyu 790 mm, Kazan kapasitesi 116 kW, Yakıt debisi=10.72 Nm<sup>3</sup>/h, Kovan konumu = 9 cm, HFK=1.26)

R175 ölçüm çizgisi ölçüm noktalarında çapı ve uzunluğu 30\*40 olan kovan kullanılması halinde CO emisyonları yanma odası boyunca her noktada diğer durumlardan daha yüksek değer almıştır. Ocak boyunun 790 mm olması durumunda yapılan tüm deneyler için yanma odasından ölçülen CO emisyonları (% 3 O<sub>2</sub>) Tablo 6.10'da verilmiştir.

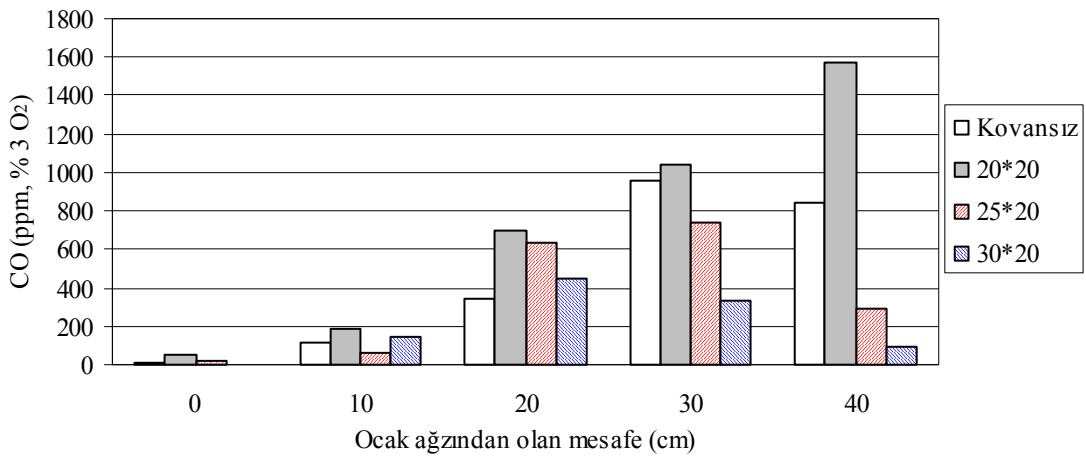
Hava fazlalık katsayısının 1.02 değerine düşürülmesiyle yanma odasının R100 ve R175 ölçüm çizgilerindeki ölçüm noktalarında özellikle kovansız durum için CO emisyonları artmıştır. Kovanlı deneylerde kovanın CO emisyonlarını azaltıcı etkisi olduğu görülmektedir. Buradan yakıt ile havanın kovanlı deneylerde daha iyi karıştığı sonucuna varılabilir. R100 ölçüm hattında CO emisyonları artışı ocak arkasında daha fazla olmuştur. R100 ölçüm hattında ölçülen CO emisyonu değerleri hava fazlalık katsayısının 1.26 değeri için 1.02 değerine göre daha fazla olmuştur. R175 ölçüm çizgisi boyunca ise tam tersi bir durum mevcuttur. CO emisyonu oluşumu alev merkezine yakın bölgede oluşurken azalan hava miktarı ile birlikte ocak cidarına doğru yayılmaktadır. Kovanların ocak içerisinde 9 cm konumunda bulunmaları halinde CO emisyonları 0 cm konumuna göre artış göstermiştir. Fakat bu artışa rağmen kovansız duruma kıyasla emisyonlar daha düşüktür.

790 mm ocak boyunda kazan ısı kapasitesinin 116 kW anma ısı gücünden 87 kW ve 58 kW'a düşürülerek yapılan deneylerde ise CO emisyonları benzer karakteristik özellikler taşımaktadır. Bu iki farklı ısı kapasitede anma ısı gücüne göre yakıt debisindeki azalmadan dolayı CO emisyonları da düşüş göstermiştir. Anma ısı gücünde olduğu gibi R100 hattında ocak arkasına doğru bir artış olmakta ve R175 hattında CO emisyonları R100 hattına nazaran büyük bir düşüş göstermektedir. Aynı ocak boyunda yakıt miktarının azalmasıyla birlikte CO emisyonlarında azalma görülmüştür. Düşük kapasitelerde 116 kW kazan ısı kapasitesinde olduğu gibi kovansız durumda CO emisyonu değeri R100 ölçüm hattında kovanlı deneylerden daha düşüktür. Ancak R175 ölçüm çizgisi boyunca ölçülen değerler anma ısı gücüne yakın değer almıştır. Ocak boyu 790 mm için ısı kapasitenin düşürülmesi ocak çıkışında (R175, 0 cm) CO emisyonunun değerinin artmasına sebep olmamıştır. Genel olarak R175 ölçüm hattı CO emisyonu değerleri R100 ölçüm hattı değerlerinden düşüktür.

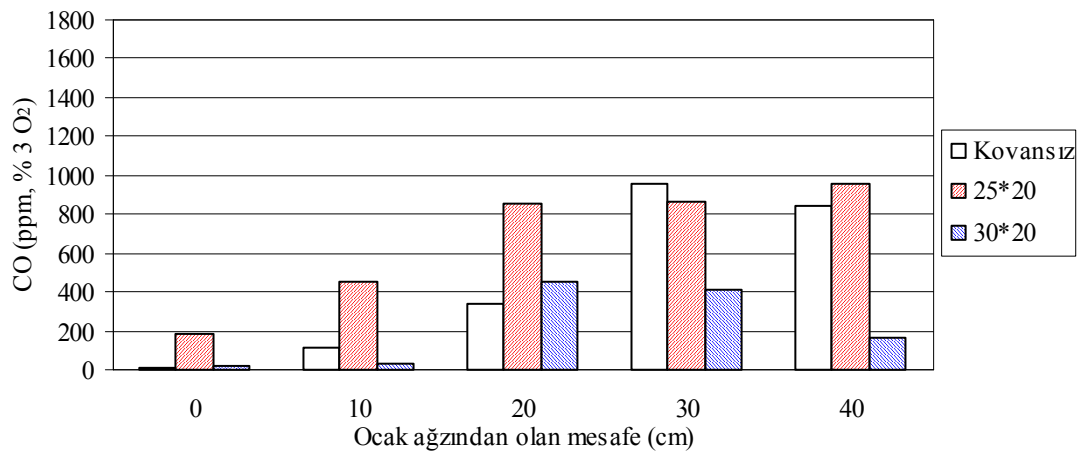


**b) Kazan ocak boyunun 680 mm olması durumu;**

680 mm ocak boyunda, 87 kW kazan ısı kapasitesi için HFK=1.26 değerinde kovanların her iki konumunda da R100 ölçüm çizgisi üzerindeki ölçüm noktalarından yapılan CO emisyonu ölçümleri Şekil 6.76 ve 6.77'de verilmiştir. Çapı ve uzunluğu 30\*20 ve 25\*20 olan kovanlar kullanılması halinde CO emisyonları kovansız duruma göre çoğu ölçüm noktasında daha düşük değer almıştır.

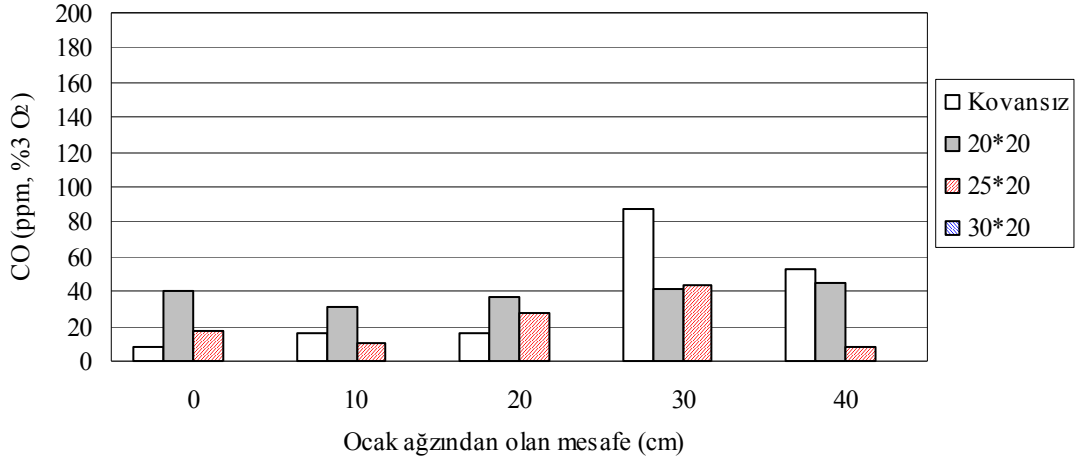


**Şekil 6.76.** R100 ölçüm çizgisi üzerinde CO emisyonlarının değişimi (Ocak boyu 680 mm, Kazan kapasitesi 87 kW, Yakıt debisi=8.04 Nm<sup>3</sup>/h, Kovan konumu = 0 cm, HFK=1.26)

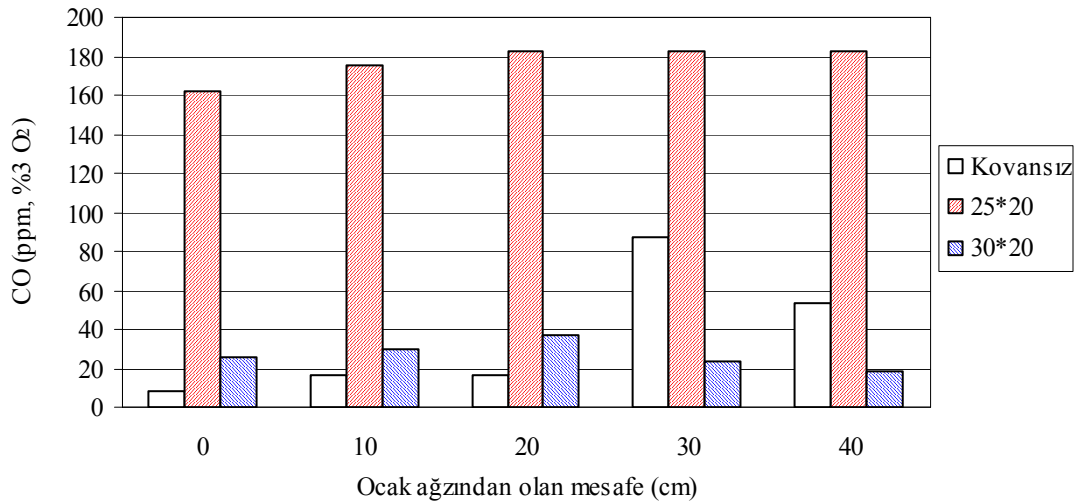


**Şekil 6.77.** R100 ölçüm çizgisi üzerinde CO emisyonlarının değişimi (Ocak boyu 680 mm, Kazan kapasitesi 87 kW, Yakıt debisi=8.04 Nm<sup>3</sup>/h, Kovan konumu = 9 cm, HFK=1.26)

R175 ölçüm çizgisi boyunca yapılan CO ölçümleri Şekil 6.78 ve 6.79'da verilmiştir. R175 ölçüm noktalarında ölçülen CO emisyonları R100 ölçüm noktalarında ölçülen değerlerden daha düşüktür. 30\*20 kovanında tüm ölçüm noktalarında CO emisyonu 0 ppm'dir. Kovanların ocak içerisinde 9 cm konumunda bulunmaları halinde CO emisyonları 0 cm konumuna kıyasla artış göstermiştir.



**Şekil 6.78.** R175 ölçüm çizgisi üzerinde CO emisyonlarının değişimi (Ocak boyu 680 mm, Kazan kapasitesi 87 kW, Yakıt debisi=8.04 Nm<sup>3</sup>/h, Kovan konumu = 0 cm, HFK=1.26)



**Şekil 6.79.** R175 ölçüm çizgisi üzerinde CO emisyonlarının değişimi (Ocak boyu 680 mm, Kazan kapasitesi 87 kW, Yakıt debisi=8.04 Nm<sup>3</sup>/h, Kovan konumu = 9 cm, HFK=1.26)

Ocak boyunun 680 mm olması durumunda yapılan tüm deneyler için yanma odasından ölçülen CO ve CO<sub>2</sub> emisyonları (% 3 O<sub>2</sub>) Tablo 6.11’de verilmiştir.

**Tablo 6.11.** Kazan ocak boyunun 680 mm olması durumunda yapılan tüm deneyler için yanma odasından ölçülen CO ve CO<sub>2</sub> emisyonları (% 3 O<sub>2</sub>).

Ocak Ağzından Olan Mesafe (cm)	Yapılan Deneyler	Kovan Konumu (cm)	Ocak boyu 680 mm					
			87 Kw				58 kW	
			HFK=1.26		HFK=1.02		HFK=1.26	
			R100	R175	R100	R175	R100	R175
			CO ppm	CO ppm	CO ppm	CO ppm	CO ppm	CO ppm
0 cm	<b>Kovansız</b>	-	<b>14</b>	<b>8</b>	<b>3923</b>	<b>4480</b>	<b>160</b>	<b>82</b>
	<b>20*20</b>	0cm	50	40	541	1294	9	0
	<b>25*20</b>	0cm	25	17	1283	1939	30	10
		9cm	190	162	4591	3978	114	60
	<b>30*20</b>	0cm	0	0	742	812	17	0
		9cm	21	26	2342	2655	18	0
10 cm	<b>Kovansız</b>	-	<b>116</b>	<b>16</b>	<b>1757</b>	-	<b>203</b>	<b>111</b>
	<b>20*20</b>	0cm	188	31	595	1523	73	4
	<b>25*20</b>	0cm	65	11	951	2177	96	10
		9cm	449	176	2513	5338	213	63
	<b>30*20</b>	0cm	142	0	1385	-	157	0
		9cm	31	30	1468	5316	292	0
20 cm	<b>Kovansız</b>	-	<b>341</b>	<b>17</b>	<b>2480</b>	-	<b>507</b>	<b>212</b>
	<b>20*20</b>	0cm	697	36	684	2244	763	9
	<b>25*20</b>	0cm	637	28	813	3134	471	17
		9cm	859	182	1820	8511	486	65
	<b>30*20</b>	0cm	447	0	635	-	354	0
		9cm	455	37	824	8155	121	0
30 cm	<b>Kovansız</b>	-	<b>954</b>	<b>87</b>	<b>2946</b>	-	<b>353</b>	<b>212</b>
	<b>20*20</b>	0cm	1038	41	265	2698	468	0
	<b>25*20</b>	0cm	743	43	665	3986	497	30
		9cm	860	183	2225	13727	607	64
	<b>30*20</b>	0cm	332	0	373	-	285	0
		9cm	417	24	401	8498	178	0
40 cm	<b>Kovansız</b>	-	<b>841</b>	<b>53</b>	<b>4524</b>	-	<b>360</b>	<b>212</b>
	<b>20*20</b>	0cm	1566	45	366	2741	245	2
	<b>25*20</b>	0cm	294	8	1134	5104	179	19
		9cm	957	183	3500	11878	407	60
	<b>30*20</b>	0cm	98	0	662	-	145	0
		9cm	166	19	770	10566	72	0



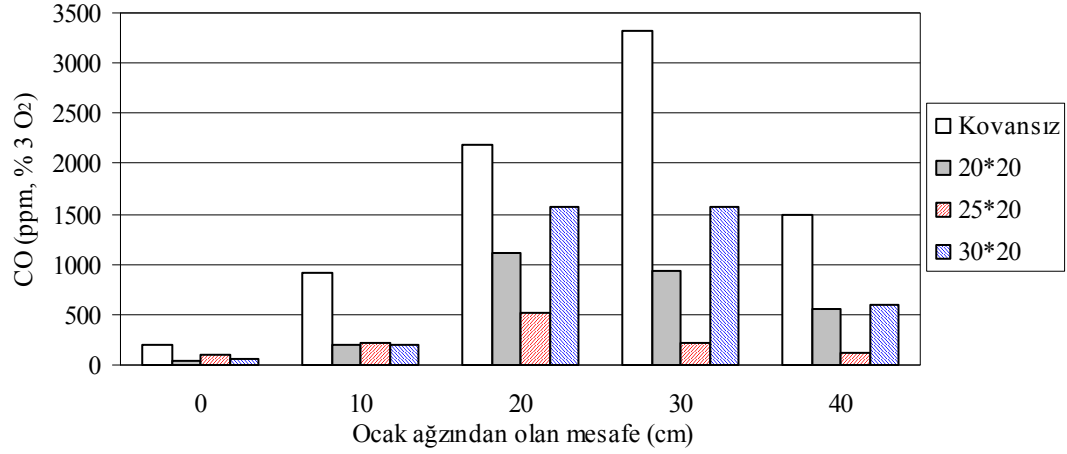
Hava fazlalık katsayısının 1.02 değerine düşürülmesiyle yanma odasının R100 ve R175 ölçüm çizgisi üzerindeki ölçüm noktalarında özellikle kovansız durum için CO emisyonları artış göstermiştir. Bu artış 790 mm ocak boyunda düşük hava fazlalık katsayısında da tespit edilmişti. Fakat anma ısıl gücünden farklı olarak R175 ölçüm hattında CO emisyonları artış göstermiştir. Yine bu ölçüm çizgisi boyunca, 790 mm ocak boyunun 1.02 hava fazlalık katsayısı değerinde R175 ölçüm hattında elde edilen değerler üzerine çıkmıştır. Bu bölgedeki artışın nedeni ocak boyundaki kısılmadan dolayı CO emisyonlarının ocak cidarına doğru yayılmasındandır. 25\*20 ile 20\*20 kovanlarının kullanılması halinde R100 ölçüm hattı boyunca CO emisyonları kovansız duruma göre daha düşük değer almıştır. Yine bu kovanların ocak çıkışındaki emisyon değerleri diğer kovanlara kıyasla daha düşüktür.

Kovanların ocak içerisinde 9 cm konumunda bulunmaları halinde CO emisyonları 0 cm konumuna göre artış göstermiştir. 680 mm ocak boyunda kazan ısıl kapasitesinin 87 kW anma ısıl gücünden 58 kW'a düşürülerek yapılan deneyde ise CO emisyonları anma ısıl gücüne göre azalma göstermiştir. Bu düşüşün nedeni yakıt miktarındaki azalmadır. R175 ölçüm hattında ölçülen CO emisyonları R100 ölçüm hattına kıyasla daha düşük değer almıştır. 20\*20 ve 25\*20 kovanlarının kullanılması halinde CO emisyonları çoğu ölçüm noktasında kovansız duruma göre daha düşük değer almıştır.

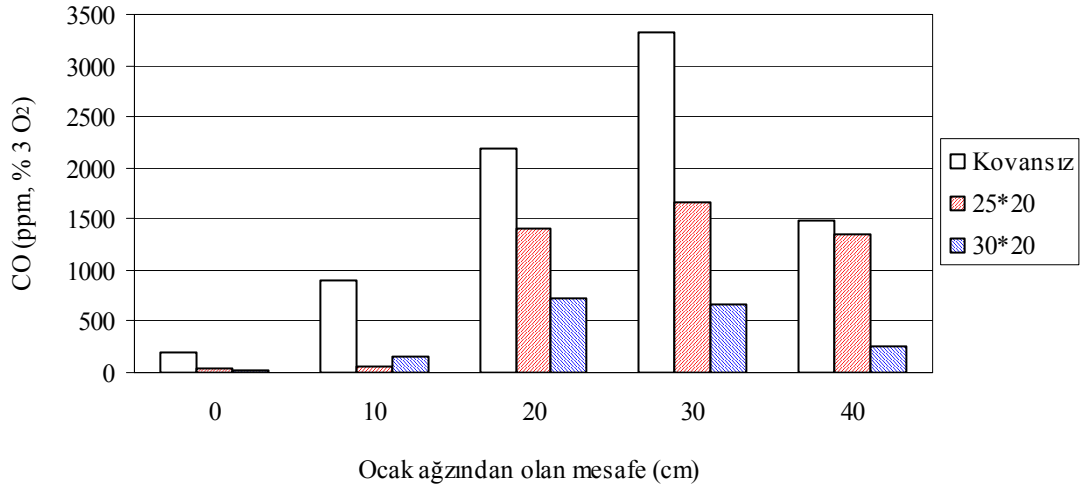
### **c) Kazan ocak boyunun 550 mm olması durumu;**

550 mm ocak boyunda, 58 kW anma ısıl gücü için HFK=1.475 değerinde kovanların her iki konumunda da R100 ölçüm çizgisi üzerindeki ölçüm noktalarından yapılan CO emisyonu ölçümleri Şekil 6.80 ve 6.81'de verilmiştir. Kovanlı durumlarda CO emisyonları kovansız duruma göre daha düşük değer almıştır. Özellikle 0 cm kovan konumunda 25\*20 kovanı ile tüm ölçüm noktalarında daha düşük CO emisyonu değerleri elde edilmiştir. Aynı kovanın ocak içerisinde 9 cm konumuna yerleştirilmeleri durumunda ise CO emisyonları artış göstermiştir. Ayrıca bu ocak boyunda anma ısıl gücünde kovansız durum için ölçülen CO emisyonları diğer ocak boylarının anma ısıl

güçlerine kıyasla artış göstermiştir Bu artışa azalan ocak boyunun alev yapısını bozması sebep olmuştur.

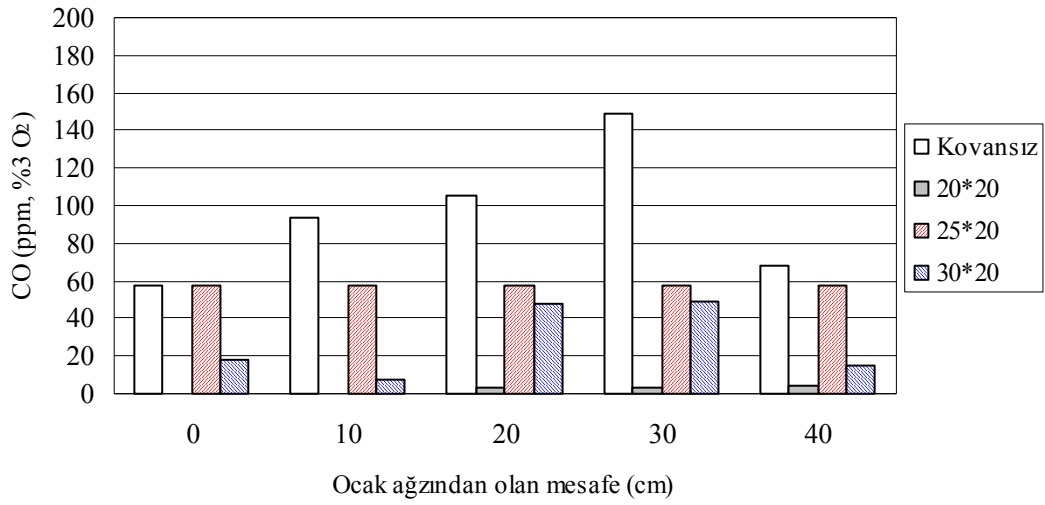


**Şekil 6.80.** R100 ölçüm çizgisi üzerinde CO emisyonlarının değişimi (Ocak boyu 550 mm, Kazan kapasitesi 58 kW, Yakıt debisi=5.35 Nm<sup>3</sup>/h, Kovan konumu = 0 cm, HFK=1.475)

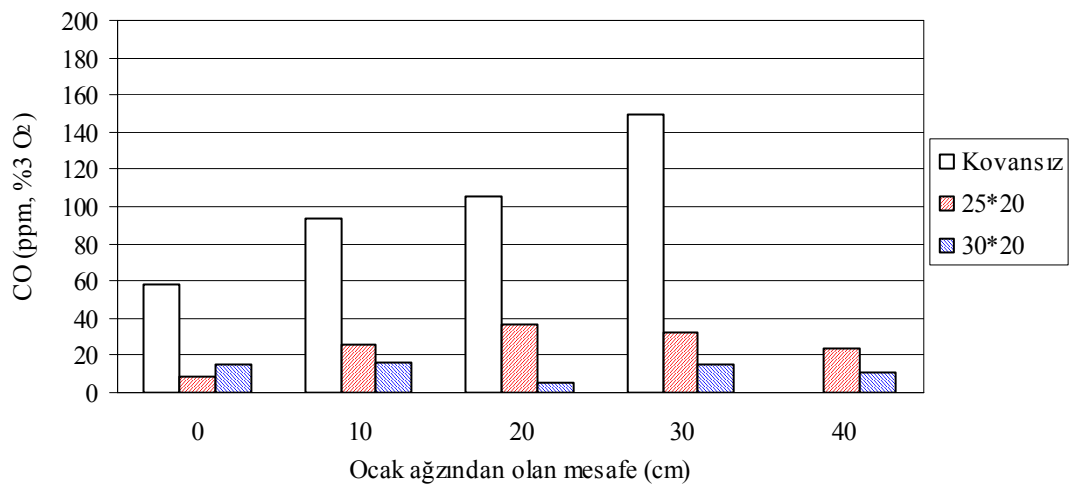


**Şekil 6.81.** R100 ölçüm çizgisi üzerinde CO emisyonlarının değişimi (Ocak boyu 550 mm, Kazan kapasitesi 58 kW, Yakıt debisi=5.35 Nm<sup>3</sup>/h, Kovan konumu = 9 cm, HFK=1.475)

R175 ölçüm çizgisi üzerindeki ölçüm noktalarından yapılan CO ölçümleri Şekil 6.82 ve 6.83’de verilmiştir. Diğer ocak boylarında olduğu gibi R175 ölçüm noktalarında CO emisyonları R100 ölçüm noktalarındakine nazaran oldukça düşüktür. R175 ölçüm hattında kovansız durumda CO emisyonları tüm kovanlı durumlara kıyasla artış göstermiştir. Kovanların ocak içerisinde her iki konumda da bulunmaları halinde CO emisyonları 9 konumunda daha düşüktür.



**Şekil 6.82.** R175 ölçüm çizgisi üzerinde CO emisyonlarının değişimi (Ocak boyu 550 mm, Kazan kapasitesi 58 kW, Yakıt debisi=5.35 Nm<sup>3</sup>/h, Kovan konumu = 0 cm, HFK=1.475)



**Şekil 6.83.** R175 ölçüm çizgisi üzerinde CO emisyonlarının değişimi (Ocak boyu 550 mm, Kazan kapasitesi 58 kW, Yakıt debisi=5.35 Nm<sup>3</sup>/h, Kovan konumu = 9 cm, HFK=1.475)

Ocak boyunun 550 mm olması durumunda yapılan tüm deneyler için yanma odasından ölçülen CO ve CO<sub>2</sub> emisyonları (% 3 O<sub>2</sub>) Tablo 6.12’de verilmiştir.

**Tablo 6.12.** Kazan ocak boyunun 550 mm olması durumunda yapılan tüm deneyler için yanma odasından ölçülen CO ve CO<sub>2</sub> emisyonları (% 3 O<sub>2</sub>).

Ocak Ağzından Olan Mesafe (cm)	Yapılan Deneyler	Kovan Konumu (cm)	Ocak boyu 550 mm					
			58 kW				43.5 kW	
			HFK=1.475		HFK=1.26		HFK=1.475	
			R100	R175	R100	R175	R100	R175
			CO ppm	CO ppm	CO Ppm	CO ppm	CO ppm	CO ppm
0 cm	Kovansız	-	196	58	41	20	63	25
	20*20	0cm	32	0	8	0	3	0
	25*20	0cm	107	58	15	3	109	97
		9cm	30	8	28	25	35	76
	30*20	0cm	52	18	39	21	55	21
		9cm	16	15	26	27	23	26
10 cm	Kovansız	-	907	93	72	25	112	23
	20*20	0cm	190	0	60	0	125	6
	25*20	0cm	212	58	163	14	206	-
		9cm	65	26	44	37	52	47
	30*20	0cm	201	8	88	27	289	37
		9cm	165	16	85	12	82	27
20 cm	Kovansız	-	2188	105	577	39	597	43
	20*20	0cm	1110	3	621	0	754	0
	25*20	0cm	507	58	1025	35	606	-
		9cm	1409	37	493	40	273	45
	30*20	0cm	1565	48	710	35	657	13
		9cm	731	5	746	21	545	24
30 cm	Kovansız	-	1487	149	356	14	1609	50
	20*20	0cm	554	3	397	0	638	0
	25*20	0cm	16	58	1108	43	892	-
		9cm	1665	32	558	73	806	23
	30*20	0cm	596	49	607	39	561	15
		9cm	660	15	600	19	662	23
40 cm	Kovansız	-	1487	68	155	20	1123	43
	20*20	0cm	554	5	150	0	647	0
	25*20	0cm	126	58	340	0	769	-
		9cm	1354	23	262	32	623	23
	30*20	0cm	596	15	175	26	382	15
		9cm	247	11	214	30	529	23

Hava fazlalık katsayısının 1.26 değerine düşürülmesiyle yanma odasının R100 ölçüm noktalarında CO emisyonları çoğu ölçüm noktasında düşüş gösterirken aynı artış R175 ölçüm noktalarında görülmemektedir. R175 ölçüm çizgisi boyunca yapılan ölçümler birbirine yakın değerler almıştır.

550 mm ocak boyunda kazan ısıtma kapasitesinin 58 kW anma ısıtma gücünden 43.5 kW'a düşürülerek yapılan deneyde ise CO emisyonları anma ısıtma gücüne göre R100 ölçüm hattında azalma, R175 ölçüm hattında ise artış göstermiştir. Fakat bu ısıtma kapasitede R175 ölçüm çizgisi boyunca ölçülen değerler R100 ölçüm hattına göre daha düşüktür. 25\*20 kovanı haricinde tüm kovanların kullanılması halinde CO emisyonları kovansız duruma kıyasla daha düşük değerler almıştır.

### 6.3. Kazan Isıl Verimi

Kazan ısıtma verimi, ölçülen değerler kullanılarak aşağıda verilen yöntemle hesaplanmıştır.

$$\text{Kazan Isıl Verimi (\%)} = 100 - \text{Baca Kaybı (\%)} + \text{Eksik Yanma Kaybı (\%)}$$

$$\text{Baca Kaybı ; } Z_b = \frac{(1-y)V_g(i_b - i_a)}{H_u}$$

Burada (1-y) değeri ifadesinde y yanmaya katılmayan yakıt oranı olup doğal gaz için ihmal edilmiştir.

$$\text{Eksik Yanma Kaybı ; } Z_e \cong 3.2 \cdot \lambda \cdot \text{CO} \quad (\text{Onat vd., 1998})$$

Sıcak cidar kaybı ihmal edilecek olursa;

$$\text{Kazan ısıtma verimi} = \eta = 1 - Z_b + Z_e$$

Burada;

$$\eta = \text{Kazan ısı verimi (\%)}$$

$$Z_b = \text{Baca Kaybı (\%)}$$

$$Z_e = \text{Eksik Yanma Kaybı (\%)}$$

$v_g = \text{Özgül kuru duman miktarı (Nm}^3/\text{Nm}^3\text{)}$ . Deneyleerin yapıldığı hava fazlalık katsayılarına göre hesaplanmıştır.

$i_b = \text{Duman gazının baca sıcaklığındaki entalpisi (kJ/ Nm}^3\text{)}$ . Deneyleerde ölçülen baca sıcaklıklarına göre diyagramdan okunur. (Onat vd., 1998)

$i_a = \text{Duman gazının çevre sıcaklığındaki entalpisi (kJ/ Nm}^3\text{)}$ . Deneyleerde ölçülen baca sıcaklıklarına göre diyagramdan okunur. (Onat vd., 1998)

$$H_u = \text{Yakıtın alt ısı değeri (kJ/Nm}^3\text{)}$$

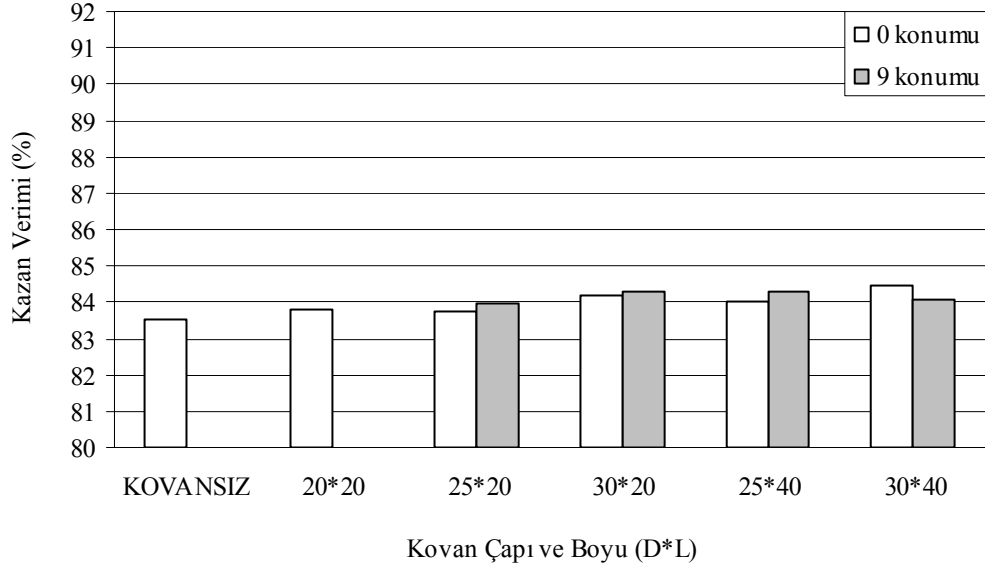
$$\lambda = \text{Hava fazlalık katsayısı}$$

CO = Duman gazının içerdiği karbonmonoksit oranıdır (ppm). Deneyleerde bacadan ölçülen değer alınmıştır.

#### **a) Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumu;**

Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumunda maksimum kazan ısı kapasitesinin 116 kW olduğu ve bu ısı kapasitenin de 10.72 Nm<sup>3</sup>/h yakıt debisi ile sağlandığı belirtilmişti. Bu şartlarda ve hava fazlalık katsayısının (HFK) 1.26 değerinde yapılan deneyleerde ölçülen büyüklükleri kullanarak kazan ısı verimi hesaplanmıştır. Bu hesaplamaların sonucunda tüm kovanlar ve kovansız durum için elde edilen kazan ısı verimleri Şekil 6.84'de gösterilmiştir. Tüm kovanlı durumlarda kovansız duruma göre ısı verim ortalama % 1 artış göstermiştir. Bu artışın nedeni kovanlı durumlarda CO emisyonlarının daha düşük değerler almasından kaynaklanmaktadır.

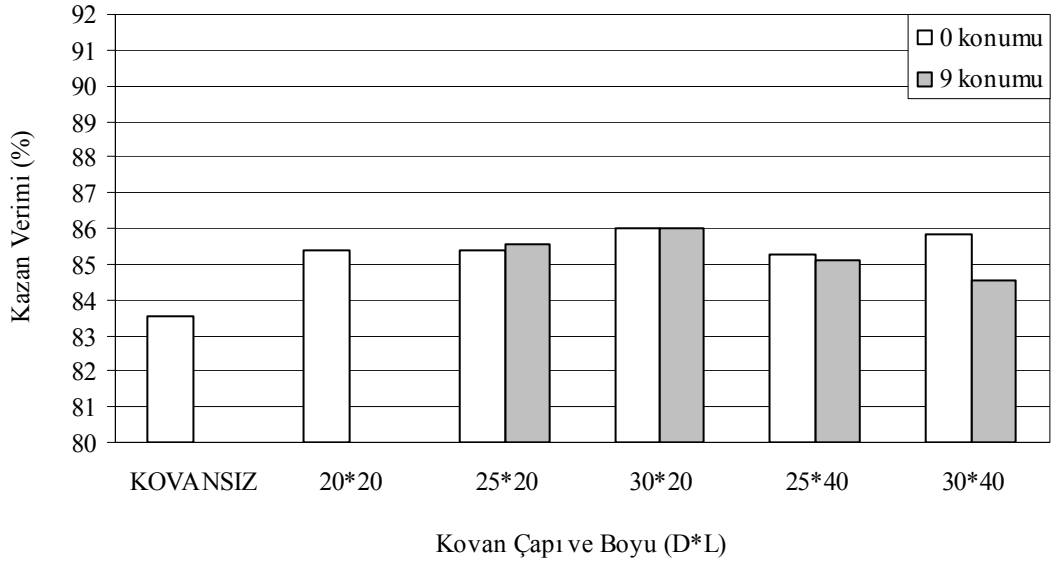
Kovanın ocak içindeki konumuna göre kazan ısı veriminin değişimi incelendiğinde, verimler birbirine yakın değerler almıştır.



**Şekil 6.84.** Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumunda 116 kW kazan ısı kapasitesi için kazan ısı veriminin değişimi (Yakıt debisi =10.72 Nm<sup>3</sup>/h, HFK = 1.26).

Aynı ocak boyunda, 116 kW kazan ısı kapasitesini sağlayan yakıt debisinde hava fazlalık katsayısının 1.26 dan 1.02 değerine düşürülmesi halinde kovansız durumda kazan ısı verimi bir değişiklik göstermemiştir. Buna karşın kovanlı durumlarda ısı veriminin arttığı görülmektedir. (Şekil 6.85). Isı verimindeki bu artış, kovanlı durumlarda CO emisyonlarının daha düşük olmasından dolayı eksik yanma kaybının az olmasındandır. Çapı ve uzunluğu 30\*20 olan kovan kullanılması halinde % 86 ile en yüksek verim elde edilmiştir.

Kovan konumlarına göre değerlendirme yapıldığında, kovanların 9 cm konumunda olması halinde uzun kovanlarda kazan ısı verimlerinin, 0 cm konumuna göre daha düşük olduğu görülmektedir.

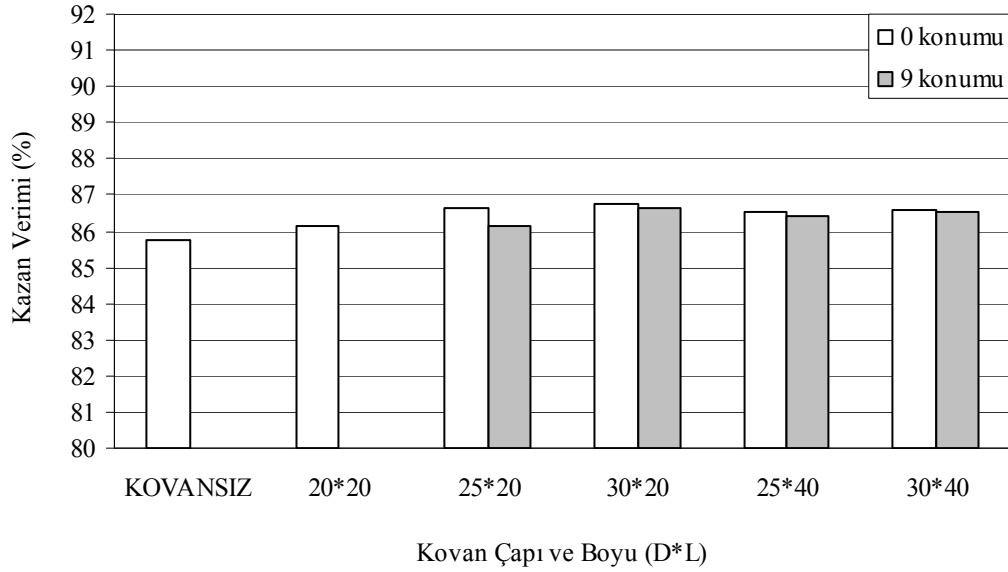


**Şekil 6.85.** Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumunda 116 kW kazan ısı kapasitesi için kazan ısı veriminin değişimi (Yakıt debisi = 10.72 Nm<sup>3</sup>/h, HFK = 1.02).

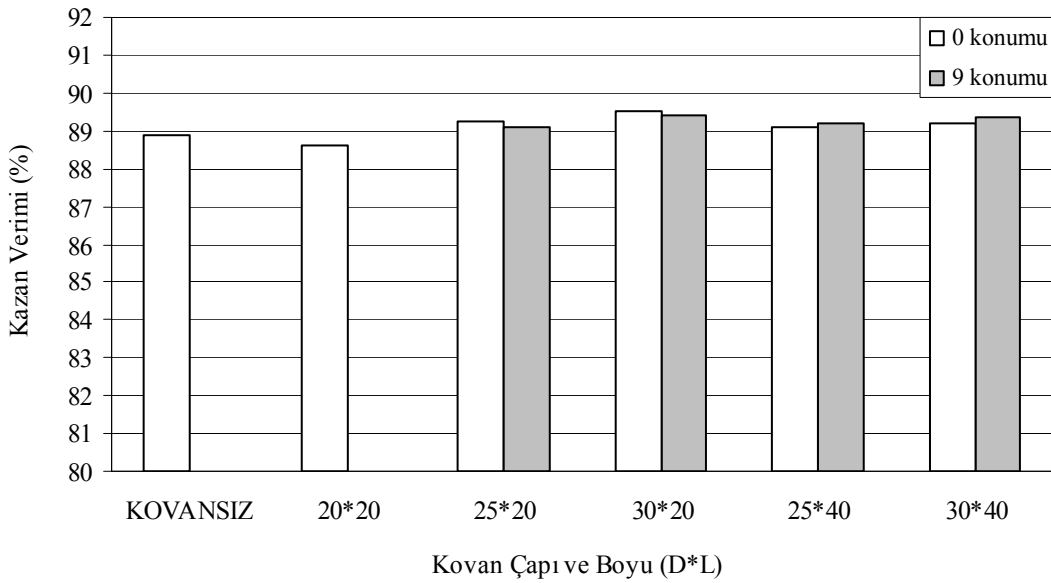
Aynı ocak boyunda (790 mm) farklı iki kazan ısı kapasitesinde deneyler tekrarlanmıştır. 790 mm ocak boyunda, kazan ısı kapasitesinin 87 kW, yakıt debisinin 8.04 Nm<sup>3</sup>/h ve hava fazlalık katsayısının 1.26 değerinde yapılan deneyler Şekil 6.86'da karşılaştırılmıştır. Çapı ve uzunluğu 20\*20 olan kovan haricindeki kovanların kullanılması halinde ısı verimleri kovansız duruma göre kıyasla % 1 daha fazladır. Kovansız durumda ısı verim yaklaşık % 86 olup anma ısı gücüne göre % 2'lik bir artış göstermiştir. Bu artışın nedeni azalan yakıt debisi ile birlikte baca sıcaklığı ve CO emisyonu değerlerindeki azalmadır.

Kovanın ocak içindeki konumuna göre kazan ısı veriminin değişimi incelendiğinde, ocak ağzından 9 cm içeride yerleştirilmeleri halinde ısı veriminin, kovanların tam ocak ağzına yerleştirilmelerine (0 cm konumu) kıyasla daha düşük olduğu görülmektedir.





**Şekil 6.86.** Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumunda 87 kW kazan ısıtma kapasitesi için kazan ısıtma veriminin değişimi (Yakıt debisi = 8.04 Nm<sup>3</sup>/h, HFK = 1.26).



**Şekil 6.87.** Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumunda 58 kW kazan ısıtma kapasitesi için kazan ısıtma veriminin değişimi (Yakıt debisi = 5.35 Nm<sup>3</sup>/h, HFK = 1.26).

790 mm ocak boyunda, kazan ısıtma kapasitesinin 58 kW, yakıt debisinin 5.35 Nm<sup>3</sup>/h ve hava fazlalık katsayısının 1.26 değerinde yapılan deneyler Şekil 6.87'de karşılaştırılmıştır. Bu şartlarda yapılan deneylerde tüm durumlarda ısıtma verimleri birbirine yakın değerler almıştır. Kovanlı ve kovansız durumlarda kazan ısıtma verimleri

anma ısıl gücüne (116 kW) ve 87 kW ısıl kapasiteye kıyasla artış göstermiştir. Kovansız durumda anma ısıl gücüne göre % 5, 87 kW ısıl kapasiteye göre de % 3 artış olmuştur. Bu artışın nedeni yakıt debisindeki azalmaya paralel olarak baca sıcaklığındaki ve CO emisyonlarındaki azalmadır. Kovanın ocak içindeki konumuna göre kazan ısıl veriminin değişimi incelendiğinde, kovanların her iki konumunda kazan ısıl verimleri birbirine yakın değer almıştır. Ocak boyunun 790 mm olması durumunda yapılan tüm deneyler için bacadan ölçülen CO emisyonları ve baca sıcaklıkları Tablo 6.13’de verilmiştir.

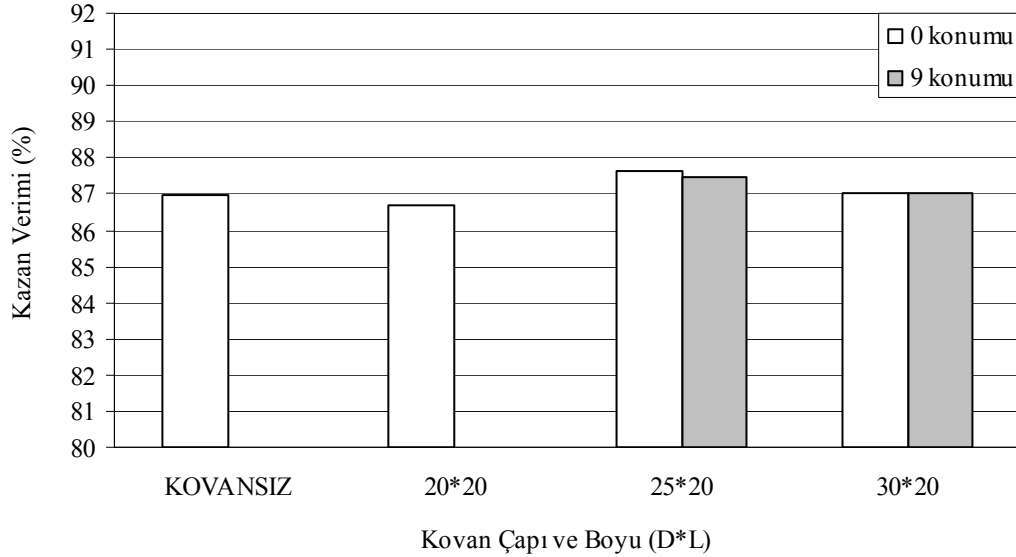
**Tablo 6.13.** Kazan ocak boyunun 790 mm olması durumunda yapılan tüm deneyler için bacadan ölçülen CO emisyonları (% 3 O<sub>2</sub>) ve baca sıcaklıkları.

Kovan Çapı ve Boyu (cm)	Kovan Konumu (cm)	Ocak boyu 790 mm							
		116 Kw				87 kW		58 kW	
		HFK = 1.26		HFK = 1.02		HFK = 1.26		HFK = 1.26	
		CO (ppm)	T <sub>baca</sub> (°C)	CO (ppm)	T <sub>baca</sub> (°C)	CO (ppm)	T <sub>baca</sub> (°C)	CO (ppm)	T <sub>baca</sub> (°C)
Ø20x20	0 cm	2	337	4787	323	5	292	3	245
Ø25x20	0 cm	14	340	2766	340	19	287	11	237
	9 cm	13	338	3999	330	15	294	9	239
Ø30x20	0 cm	4	334	3312	324	18	287	13	234
	9 cm	9	333	3898	321	9	287	5	234
Ø25x40	0 cm	11	334	5278	324	28	288	4	239
	9 cm	6	330	5938	322	4	289	0	236
Ø30x40	0 cm	16	326	4530	318	58	287	11	237
	9 cm	12	332	7443	322	22	286	13	232
<b>Kovansız Deneyler</b>		<b>18</b>	<b>343</b>	<b>10411</b>	<b>325</b>	<b>18</b>	<b>298</b>	<b>16</b>	<b>239</b>

#### b) Kazan ocak boyunun 680 mm olması durumu;

Kazan ocak boyunun 680 mm olması durumunda maksimum kazan ısıl kapasitesinin 87 kW olduğu ve bu ısıl kapasitenin de 8.04 Nm<sup>3</sup>/h yakıt debisi ile sağlandığı belirtilmişti. Bu şartlarda ve hava fazlalık katsayısının (HFK) 1.26 değerinde

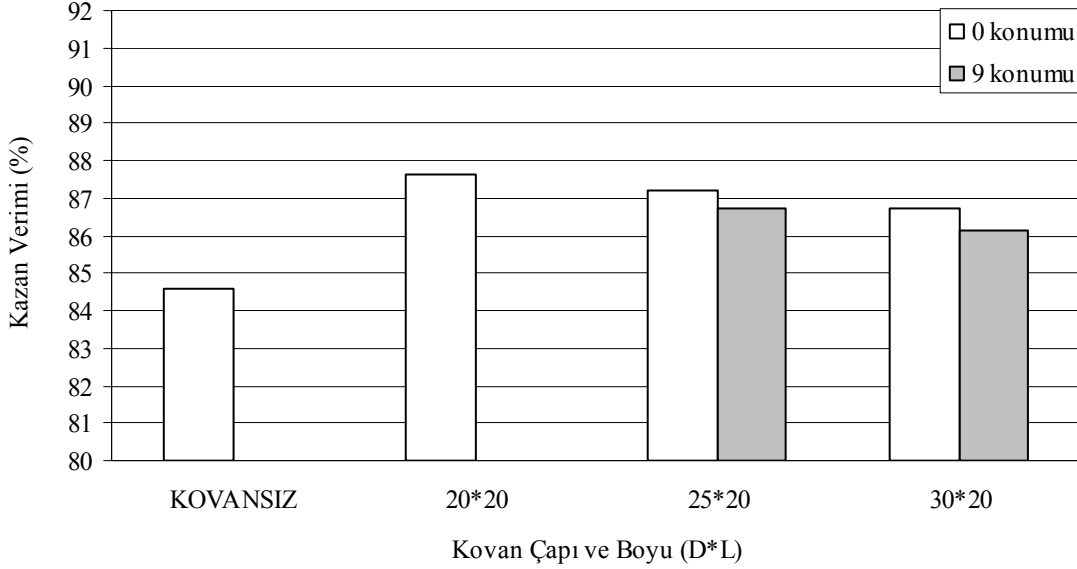
yapılan deneylerde ölçülen büyüklükler kullanarak kazan ısı verimi hesaplanmıştır. Bu hesaplamaların sonucunda tüm kovanlar ve kovansız durum için elde edilen kazan ısı verimleri Şekil 6.88’de gösterilmiştir. Kovan çapı ve uzunluğunun 25\*20 olması halinde, kazan ısı verimi % 88 ile en yüksek değerini almıştır. Kovansız durumda ısı verim 790 mm ocak boyunun anma ısı gücüne kıyasla % 3 daha fazladır. 87 kW kazan ısı kapasitesinin 790 mm ve 680 mm ocak boylarında sağlanması durumunda kovansız durum için karşılaştırma yapıldığında 680 mm ocak boyunda % 1’lik bir artış olmuştur (Şekil 6.86 ve 6.88). Ocak hacminin küçülmesi nedeniyle alev oluşum karakteristiği bozulacağından, bu ocak boyunda, 40 cm uzunluğa sahip kovanlarla deney yapılmamıştır.



**Şekil 6.88** Kazan ocak boyunun 680 mm olması durumunda 87 kW kazan ısı kapasitesi için kazan ısı veriminin değişimi (Yakıt debisi = 8.04 Nm<sup>3</sup>/h, HFK = 1.26).

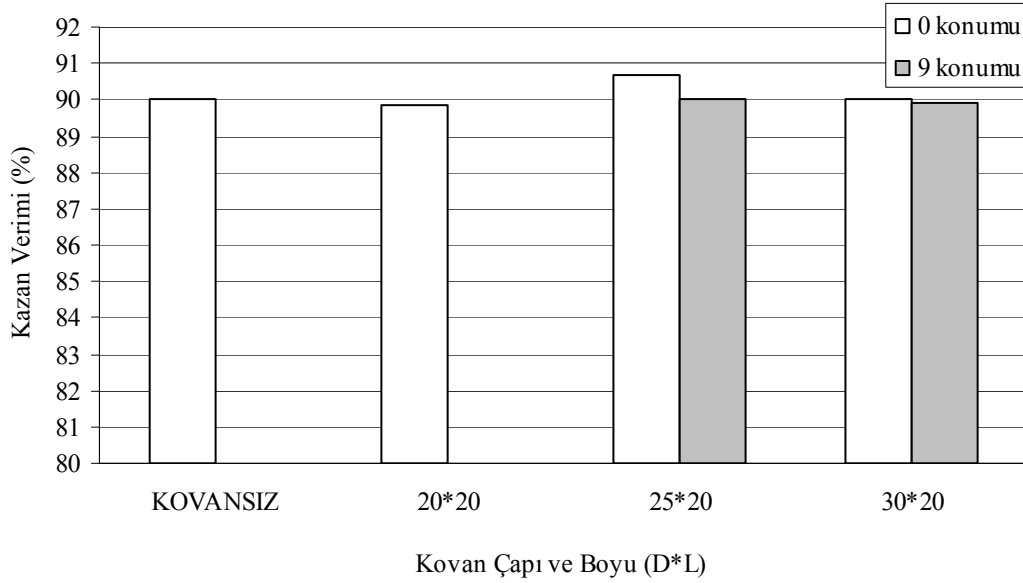
Aynı ocak boyunda, 87 kW kazan ısı kapasitesini sağlayan yakıt debisinde hava fazlalık katsayısının 1.26’dan 1.02 değerine düşürülmesi halinde kazan ısı verimi kovansız durum için % 87’den % 85’e düşmüştür (Şekil 6.89). Kovanlı ve kovansız deneylerde kazan veriminin değişimi incelendiğinde, çapı ve uzunluğu 20\*20 cm olan kovan kullanılması halinde kazan veriminin % 88 olduğu ve en büyük değeri aldığı görülmektedir. Kovansız durumda kazan ısı verimi % 85 olup diğer çap ve uzunluktaki kovanların kullanılması halinde elde edilen verimlerden % 2 - 3 daha düşüktür. Kovanın

ocak içindeki konumuna göre kazan ısı veriminin değişimi incelendiğinde, ocak ağzından 9 cm içeride yerleştirilmeleri halinde ısı veriminin, kovanların tam ocak ağzına yerleştirilmelerine (0 cm konumu) kıyasla % 1 daha düşük olduğu görülmüştür.



**Şekil 6.89.** Kazan ocak boyunun 680 mm olması durumunda 87 kW kazan ısı kapasitesi için kazan ısı veriminin değişimi (Yakıt debisi = 8.04 Nm<sup>3</sup>/h, HFK = 1.02).

Aynı ocak boyunda (680 mm) 58 kW kazan ısı kapasitesi için deneyler tekrarlanmıştır. Bu kazan ısı kapasitesini sağlayan yakıt debisi 5.35 Nm<sup>3</sup>/h'dir. Bu şartlarda ve hava fazlalık katsayısının 1.26 değerinde yapılan bu deneyde ölçülen büyüklükleri kullanarak elde edilen kazan verimleri karşılaştırılmıştır (Şekil 6.90). Kovanlı ve kovansız deneylerde kazan ısı veriminin değişimi incelendiğinde, kovansız durumda kazan ısı veriminin % 90 olduğu ve kovanlı durumlarda da aynı verimin elde edildiği görülmektedir. Kovanın ocak içindeki konumuna göre kazan ısı veriminin değişimi incelendiğinde, 30\*20 kovanında her iki konumda da verimler aynı (% 90) olurken 25\*20 kovanının 0 cm konumunda 9 cm konumuna göre % 1'lik bir artış olmuştur. Hava fazlalık katsayısının 1.26 değeri için 58 kW kazan ısı kapasitesinin, hem 790 mm hem de 680 mm ocak boylarında sağlanması halinde kovansız durum için kazan ısı verimleri karşılaştırılacak olursa 790 mm ocak boyunda kazan ısı verimi % 89 iken, 680 mm ocak boyunda ise kazan ısı verimi % 90'ye çıkmıştır.



**Şekil 6.90.** Kazan ocak boyunun 680 mm olması durumunda 58 kW kazan ısıtma kapasitesi için kazan ısıtma veriminin değişimi (Yakıt debisi = 5.35 Nm<sup>3</sup>/h, HFK = 1.26).

Ocak boyunun 680 mm olması durumunda yapılan tüm deneyler için bacadan ölçülen CO emisyonları ve baca sıcaklıkları Tablo 6.14’de verilmiştir.

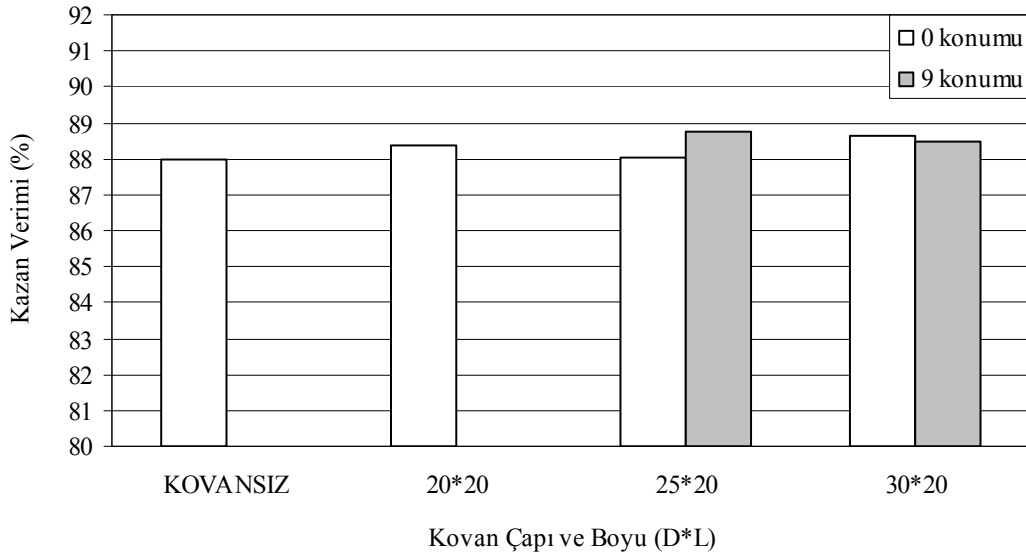
**Tablo 6.14.** Kazan ocak boyunun 680 mm olması durumunda yapılan tüm deneyler için bacadan ölçülen CO emisyonları (% 3 O<sub>2</sub>) ve baca sıcaklıkları.

Kovan Çapı ve Boyu (cm)	Kovan Konumu (cm)	Ocak boyu 680 mm					
		87 kW				58 kW	
		HFK = 1.26		HFK = 1.02		HFK = 1.26	
		CO (ppm)	T <sub>baca</sub> (°C)	CO (ppm)	T <sub>baca</sub> (°C)	CO (ppm)	T <sub>baca</sub> (°C)
Ø20x20	9 cm	46	281	6363	260	17	221
Ø25x20	0 cm	44	265	10320	241	38	206
	9 cm	201	266	11574	242	72	219
Ø30x20	0 cm	10	273	10084	251	86	217
	9 cm	68	274	12355	248	29	221
<b>Kovansız Deneyler</b>		<b>31</b>	<b>277</b>	<b>17716</b>	<b>246</b>	<b>176</b>	<b>219</b>

**c) Kazan ocak boyunun 550 mm olması durumu;**

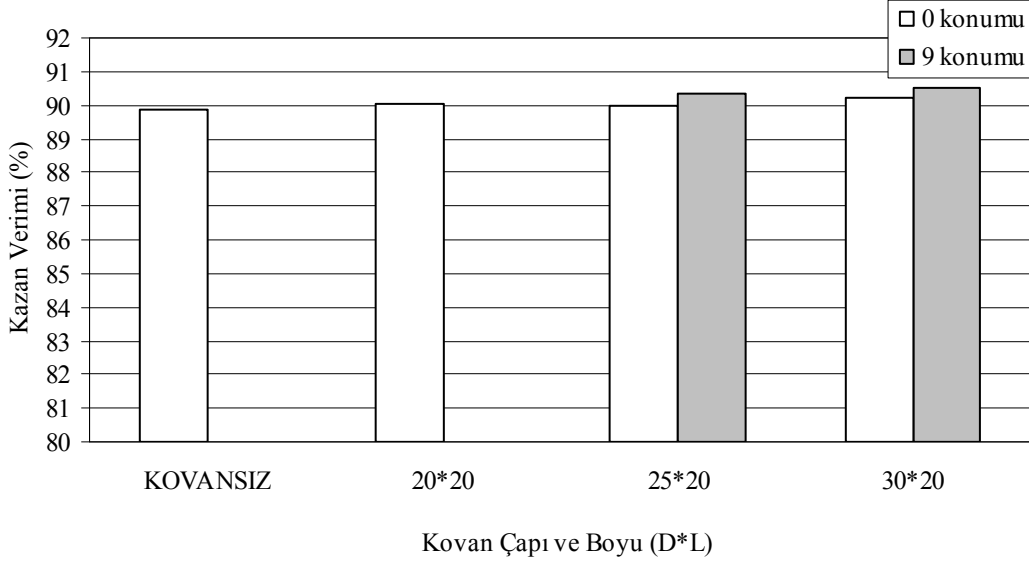
Kazan ocak boyunun 550 mm olması durumunda maksimum kazan ısıtma kapasitesinin 58 kW olduğu ve bu ısıtma kapasitenin de 5.35 Nm<sup>3</sup>/h yakıt debisi ile sağlandığı belirtilmişti. Bu şartlarda ve hava fazlalık katsayısının 1.475 değerinde yapılan deneylerde ölçülen büyüklükleri kullanarak kazan ısıtma verimi hesaplanmıştır. Bu hesaplamaların sonucunda tüm kovanlar ve kovansız durum için elde edilen kazan ısıtma verimleri Şekil 6.91'de gösterilmiştir. Bu karşılaştırmada tüm durumlarda kazan ısıtma verimlerinin birbirine yakın değer aldıkları görülmektedir.

Kovanın ocak içindeki konumuna göre kazan ısıtma veriminin değişimi incelendiğinde, çapı ve uzunluğu 25\*20 olan kovanın 9 cm konumunda yerleştirilmesi durumunda ısıtma verimi (% 89) olup, 0 cm konumundaki ısıtma veriminden % 1 daha fazladır. Çapı ve uzunluğu 30\*20 olan kovanın her iki konumu içinde ısıtma verimi % 88.5'dir.



**Şekil 6.91.** Kazan ocak boyunun 550 mm olması durumunda 58 kW kazan ısıtma kapasitesi için kazan ısıtma veriminin değişimi (Yakıt debisi = 5.35 Nm<sup>3</sup>/h, HFK = 1.475).

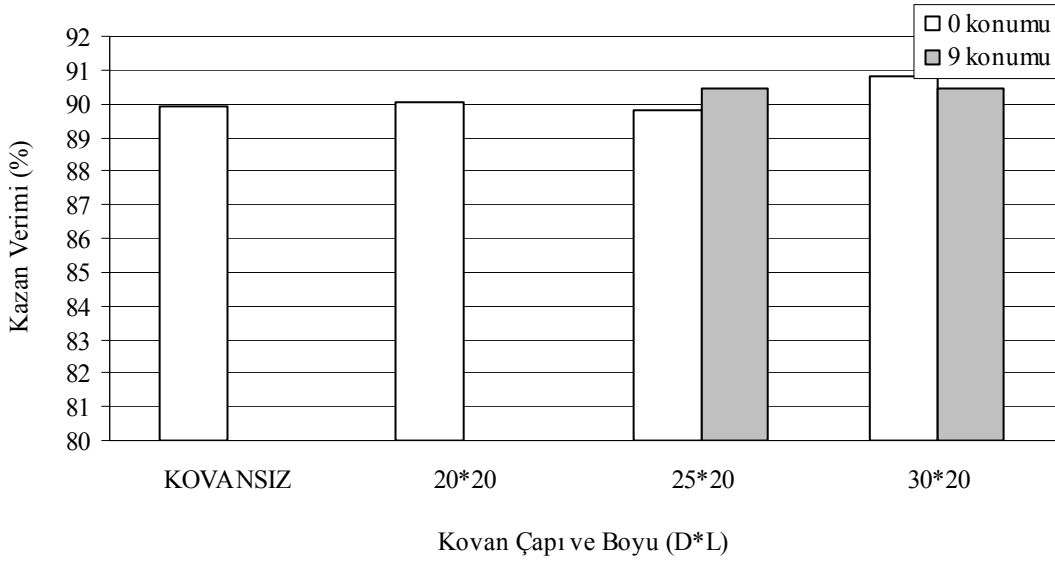
Aynı ocak boyunda, 58 kW kazan ısı kapasitesini sağlayan yakıt debisinde, hava fazlalık katsayısının 1.475'den 1.26 değerine düşürülmesi halinde kazan ısı verimi kovansız deneyde % 88'den % 90 değerine çıkmıştır (Şekil 6.92).



**Şekil 6.92.** Kazan ocak boyunun 550 mm olması durumunda 58 kW kazan ısı kapasitesi için kazan ısı veriminin değişimi (Yakıt debisi = 5.35 Nm<sup>3</sup>/h, HFK = 1.26).

Ayrıca bu deneylerde tüm kovanlı ve kovansız durumlarda kazan ısı verimleri birbirine yakın değer almıştır. 58 kW kazan ısı kapasitesinin; hava fazlalık katsayısının 1.26 değerinde, 790 mm, 680 mm ve 550 mm ocak boylarında sağlanması durumunda kazan ısı verimleri, 790 mm ocak boyunda % 89, 680 mm ocak boyunda % 90, 550 mm ocak boyunda ise % 90'dır. Bu deneyde kovanın ocak içinde farklı konumda olması kazan ısı verimlerini etkilememiştir.

Aynı ocak boyunda, 43.5 kW kazan ısı kapasitesi için deneyler tekrarlanmıştır. Bu şartlarda ve hava fazlalık katsayısının 1.475 değerinde yapılan bu deneyde ölçülen büyüklükleri kullanarak elde edilen kazan verimleri karşılaştırılmıştır (Şekil 6.93). Bu karşılaştırmada tüm durumlarda kazan ısı verimlerin birbirine yakın değer aldıkları görülmektedir. Bu ocak boyunun anma ısı gücüne kıyasla verimde % 2'lik bir artış olmuştur. Kovanın ocak içinde farklı konumda olması kazan ısı verimlerini etkilememiştir.



**Şekil 6.93.** Kazan ocak boyunun 550 mm olması durumunda 43.5 kW kazan ısıtma kapasitesi için kazan ısıtma veriminin değişimi (Yakıt debisi = 4.00 Nm<sup>3</sup>/h, HFK = 1.475).

Ocak boyunun 550 mm olması durumunda yapılan tüm deneyler için bacadan ölçülen CO emisyonları (% 3 O<sub>2</sub>) ve baca sıcaklıkları Tablo 6.15’de verilmiştir.

**Tablo 6.15.** Kazan ocak boyunun 550 mm olması durumunda yapılan tüm deneyler için bacadan ölçülen CO emisyonları (% 3 O<sub>2</sub>) ve baca sıcaklıkları.

Kovan Çapı ve Boyu (cm)	Kovan Konumu (cm)	Ocak boyu 550 mm					
		58 kW				43.5 kW	
		HFK = 1.475		HFK = 1.26		HFK = 1.475	
		CO (ppm)	T <sub>baca</sub> (°C)	CO (ppm)	T <sub>baca</sub> (°C)	CO (ppm)	T <sub>baca</sub> (°C)
Ø20x20	9 cm	25	220	510	215	6	190
	0 cm	24	228	444	218	124	194
Ø25x20	9 cm	38	215	1196	205	210	182
	0 cm	19	215	935	209	73	176
Ø30x20	9 cm	22	218	916	204	171	182
	<b>Kovansız Deneyler</b>	<b>52</b>	<b>227</b>	<b>1314</b>	<b>213</b>	<b>109</b>	<b>191</b>



## 7. CFD MODELLEME VE DENEY SONUÇLARI İLE KARŞILAŞTIRMA

Modelleme çalışmaları (CFD – Computational Fluid Dynamics) hesaplamalı akışkanlar dinamiği programı olan FLUENT programı ile yapılmış olup, bu programın 6.1.22 sürümü kullanılmıştır (Fluent Version 6.1.22, 2003). Sayısal akışkanlar dinamiği ve ısı analiz yapabilmek için öncelikle ısı sistem ve/veya bileşenlerinin geometrik modelinin oluşturulması gerekir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizi yapmak için model ve mesh oluşturma, sınır ve bölge tiplerini belirleme işlemleri için GAMBIT programı kullanılmıştır.

### 7.1. CFD Programının Tanıtılması

Fluent programı akış alanının, karışım özelliklerinin, sıcaklık dağılımının, kimyasal türlerin, partikül ve kirletici emisyonların tahmininde kullanılan bir sayısal akışkanlar dinamiği programıdır. Bu programın NO<sub>x</sub> emisyonlarının hesabı için ayrıca bir alt programı mevcuttur.

Fluent programında bir yanma modellenmesi için kullanılan belli başlı modeller yanma modeli (reaksiyon modeli), akış modeli ve radyasyon modelidir. Yanma modeli olarak finite-rate modelleri (eddy dissipation, eddy dissipation concept ve laminar finite-rate model), ön karışimsız yanma (non-premixed combustion), ön karışimli yanma (premixed combustion), kısmi ön karışimli yanma (partially premixed combustion) ve composition PDF transport combustion modelleri mevcuttur. Türbilanslı modeller için kullanılan belli başlı akış modelleri ise Spalart-Allmaras, standart k-epsilon, RNG k-epsilon, realizable k-epsilon, standart k-omega ve reynold stress modelleridir. Radyasyon modellerinden bazıları ise P1 yaklaşımı, discrete transfer ve discrete ordinates modelleridir.

Fluent programında tahmin edilen diğer bir parametre ise yanma sonu oluşan emisyonların tahminidir. Bu emisyonların içinde azotoksit emisyonlarının tahmini için ayrı olarak bir opsiyon mevcuttur. Fluent NO<sub>x</sub> modülü NO<sub>x</sub> kontrol önlemlerine yardımcı olmak için yanma esnasında oluşan NO<sub>x</sub> üretim kaynaklarını benzeşimini

sağlar.  $\text{NO}_x$  emisyonlarını tahmin etmek için Fluent bir transport denklemi çözer. Yakıtsal  $\text{NO}_x$  çözümünde ise HCN veya  $\text{NH}_3$  ara bileşenleri için ilave transport denklemleri çözer.  $\text{NO}_x$  transport denklemleri yanma çözümü ile verilen akış alanından yararlanılarak çözülür. Bir başka deyişle  $\text{NO}_x$  çözümü, yanmanın çözülmesinden sonra yapılan ileri bir işlemdir. Bu nedenle  $\text{NO}_x$  tahmini için doğru bir yanma çözümünün olması gerekir. Yanma çözümünün iyi olması için ise sınır şartlarının ve termofiziksel özellik verilerinin doğru girilmesi gerekmektedir. Örneğin alev sıcaklığı yaklaşık 2200 K olduğunda bu sıcaklıktan sonra her bir 90 K sıcaklık artışında termal  $\text{NO}_x$  üretimi ikiye katlar (Fluent User's Guide, 2003).

Isıl  $\text{NO}_x$  yanma havasında mevcut atmosferik azotun oksidasyonu ile oluşur. Ani  $\text{NO}_x$  ise alev önünde yüksek hızlı reaksiyonlarla üretilir. Yakıtsal  $\text{NO}_x$  yakıttaki mevcut azotun oksidasyonu ile üretilir. Tekrar yanma mekanizması ise NO ile hidrokarbonları tekrar reaksiyona sokarak  $\text{NO}_x$  üretimini azaltır. Fluent  $\text{NO}_x$  modülü bu dört işlemi de yapabilmektedir. Bu çalışmada ısıl, ani ve yakıtsal  $\text{NO}_x$  üretimi hesaplanmıştır.

Fluent programı, NO üretimi ve tüketimi ile ilişkili bileşenlerin iletimini ve yayılımını hesaba katarak bu NO bileşenleri için kütle transport denklemi çözer. Bu yaklaşım kütle korunumu prensibinden türetilmektedir. Isıl ve ani  $\text{NO}_x$  mekanizmaları sadece NO bileşenleri transport denkleminde ihtiyaç duyar :

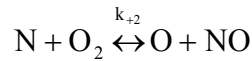
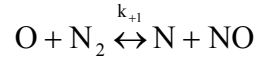
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot Y_{\text{NO}}) + \nabla \cdot (\rho \cdot \vec{v} \cdot Y_{\text{NO}}) = \nabla \cdot (\rho \cdot D \cdot \nabla \cdot Y_{\text{NO}}) + S_{\text{NO}}$$

Fluent programı HCN veya  $\text{NH}_3$  bileşenleri için NO bileşenlerine ilave olarak aşağıdaki denklemleri çözer.

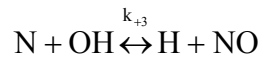
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot Y_{\text{HCN}}) + \nabla \cdot (\rho \cdot \vec{v} \cdot Y_{\text{HCN}}) = \nabla \cdot (\rho \cdot D \cdot \nabla \cdot Y_{\text{HCN}}) + S_{\text{HCN}}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot Y_{\text{NH}_3}) + \nabla \cdot (\rho \cdot \vec{v} \cdot Y_{\text{NH}_3}) = \nabla \cdot (\rho \cdot D \cdot \nabla \cdot Y_{\text{NH}_3}) + S_{\text{NH}_3}$$

Burada Y bileşenlerin gaz fazındaki kütle kesirlerini ifade etmektedir. S kaynak terimleri ise farklı NO<sub>x</sub> mekanizmaları için belirlenir. Termal NO<sub>x</sub> oluşumu Zeldovich mekanizması olarak bilinen yüksek sıcaklığa bağlı kimyasal reaksiyonlarla belirlenir. Moleküler azottan termal NO<sub>x</sub> oluşumunu oluşturan temel reaksiyonlar;



Yakıtça zengin karışımlarda ve stokiometrik şartlara yakın durumlarda ise aşağıdaki reaksiyon oluşur.



Bu reaksiyonlar için k oran sabitleri bazı deneysel çalışmalardan elde edilmiştir. NO<sub>x</sub> modelinde kullanılan bu reaksiyonlar için oran katsayıları aşağıda verilmiştir (Fluent User's Guide, 2003).

$$k_1 = 1.8 \cdot 10^8 \cdot e^{-38370/T}$$

$$k_{-1} = 3.8 \cdot 10^7 \cdot e^{-425/T}$$

$$k_2 = 1.8 \cdot 10^4 \cdot e^{-4680/T}$$

$$k_{-2} = 3.8 \cdot 10^3 \cdot e^{-20820/T}$$

$$k_3 = 7.1 \cdot 10^7 \cdot e^{-450/T}$$

$$k_{-3} = 1.7 \cdot 10^8 \cdot e^{-24560/T}$$

Verilen bu reaksiyonlarla NO net oluşum oranı ise aşağıda verildiği gibi yazılır.

$$\frac{d[NO]}{dt} = k_1[O][N_2] + k_2[N][O_2] + k_3[N][OH] - k_{-1}[NO][N] - k_{-2}[NO][O] - k_{-3}[NO][H]$$

Burada tüm konsantrasyonların birimleri gmol/m<sup>3</sup>,dür.

$\text{NO}_x$  oluşum oranı sadece yüksek sıcaklıklarda (1800 K üzeri) önemlidir. Oksijen ile moleküler azotun girdiği reaksiyonda azotun N atomlarına ayrışması için yüksek sıcaklıklar gereklidir. Bu durum reaksiyonun yüksek aktivasyon enerjisiyle simgelenir. Bununla birlikte N atomlarının oksidasyonunun aktivasyon enerjisi küçüktür. Yakıtça zengin bir alevde yeterli oksijen olmadığı zaman serbest azot atomlarının tüketim oranı oluşum oranına eşit olur ve böylece sanki dengeli hal kurulmuş olur. Bu kabul son derece yakıtça zengin yanma şartları dışındaki çoğu yanma durumlarında geçerlidir. Bundan dolayı NO oluşum oranı şu şekilde olur;

$$\frac{d[\text{NO}]}{dt} = 2k_1[\text{O}][\text{N}_2] \frac{\left(1 - \frac{k_{-1} \cdot k_{-2} \cdot [\text{NO}]^2}{k_1 \cdot [\text{N}_2][k_2][\text{O}_2]}\right)}{\left(1 + \frac{k_{-1} \cdot [\text{NO}]}{k_2 \cdot [\text{O}_2] + k_3 \cdot [\text{OH}]}\right)}$$

Bu denklemden oksijen derişikliğindeki artışın NO oluşumunu arttırdığı görülmektedir. Isıl NO oluşumunun yakıt tipinden bağımsız olarak sadece yüksek sıcaklığa bağılı olduğu görülmektedir. Bu denklemi çözmek için oksijen ve azot gibi kararlı bileşenlerin derişikliklerine ilave olarak oksijen atomlarının ve serbest OH radikallerinin derişikliğine ihtiyaç vardır. Oksijen atom derişikliklerini hesaplamak için;

$$[\text{O}] = 3.97 \cdot 10^5 \cdot T^{-1/2} \cdot [\text{O}_2]^{1/2} \cdot e^{-31090/T} \quad (\text{gmol/m}^3) \text{ ile verilen denge yaklaşımı,}$$

$$[\text{O}] = 36.6 \cdot T^{1/2} \cdot [\text{O}_2]^{1/2} \cdot e^{-27123/T} \quad (\text{gmol/m}^3) \text{ ile verilen kısmi denge yaklaşımı,}$$

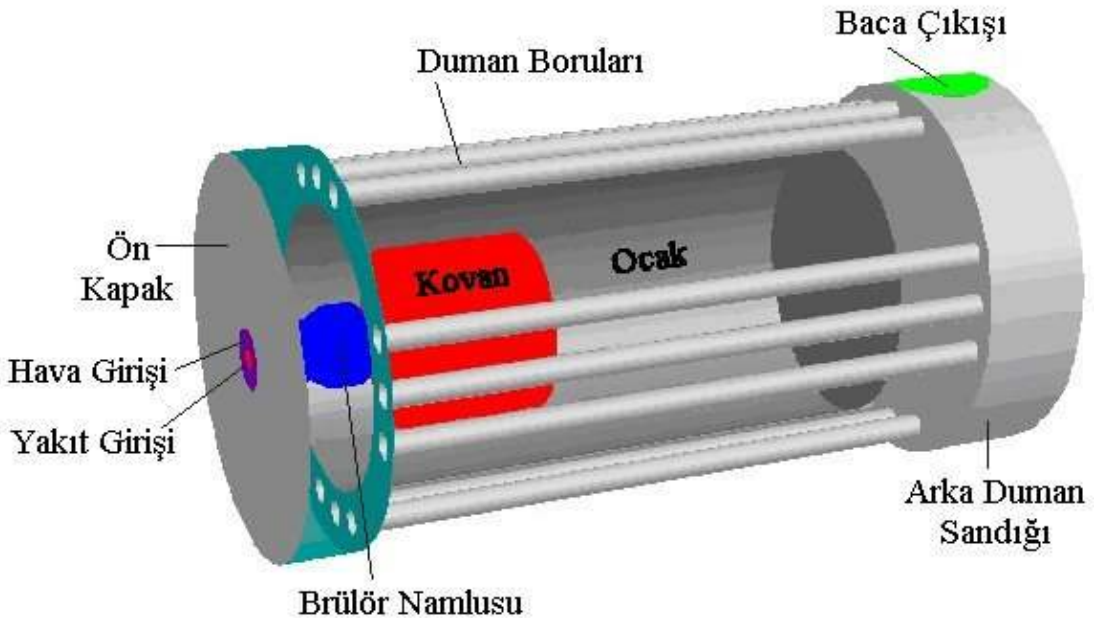
veya lokal O bileşenleri kütle kesri kullanılarak hesaplanır.

Ani NO oluşumu ise genellikle düşük sıcaklıklarda, yakıtça zengin yanma şartlarında ve oyalanma sürelerinin kısa olması durumunda oluşur. Alevin ilk bölümlerinde oluşur. Yüzey yakıcılar, kademeli yanma sistemleri ve gaz türbinleri böyle şartlar oluşturur. Ani NO oluşumunun toplam  $\text{NO}_x$  oluşumuna katkısı azdır (Fluent User's Guide, 2003).

## 7.2. Model Hacminin Oluşturulması

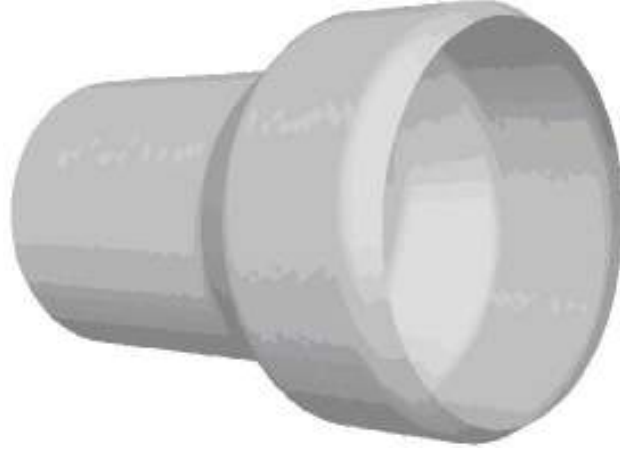
Bu çalışmada optimum sayısal çözümü ve çözüm zamanını elde edebilmek için tüm geometri önce ayrı hacimlere bölünerek ağ yapısının oluşturulması kolaylaştırılmıştır. Bu hacimlerde mümkün olan yerlerde hexahedral eleman, diğer yerlerde ise tetrahedral eleman kullanılmıştır. Ayrıca yakıt çıkış deliklerinin çapları küçük olduğundan bu bölgede ve yanma odası cidarlarında sık ağ yapısı kullanılmasına dikkat edilmiştir.

Ağ oluşturma işlemini kolaylaştırmak amacıyla model hacmi parçalara bölünmüştür. Böylece değişimlerin hızlı ve keskin olduğu bölgelerde daha sık ağ oluşturma, diğer bölgelerde ise daha seyrek ağ oluşturma işlemi yapılarak optimum hücre sayısı ile mümkün olan en hassas çözüm elde edilmesi sağlanmıştır. Model hacminin parçalara bölünmesi ağ oluşumunu kolaylaştırmasının yanında bilgisayar zamanının azaltılmasını da sağlamıştır. Şekil 7.1'de bu programda çizilen deney kazanının üç boyutlu bir şekli görülmektedir.

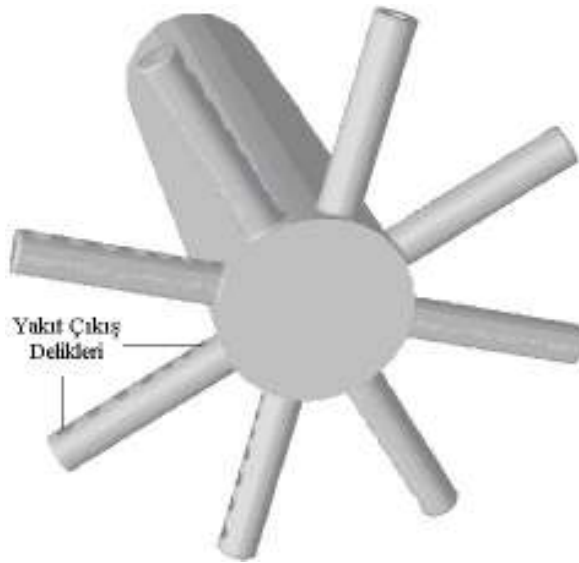


Şekil 7.1. GAMBİT programında çizilen deney kazanının görünüşü.

Şekil 7.2’de brülördeki yakıt borusu, yakıt çıkış delikleri ve havanın içinden geçtiği namlu görülmektedir.



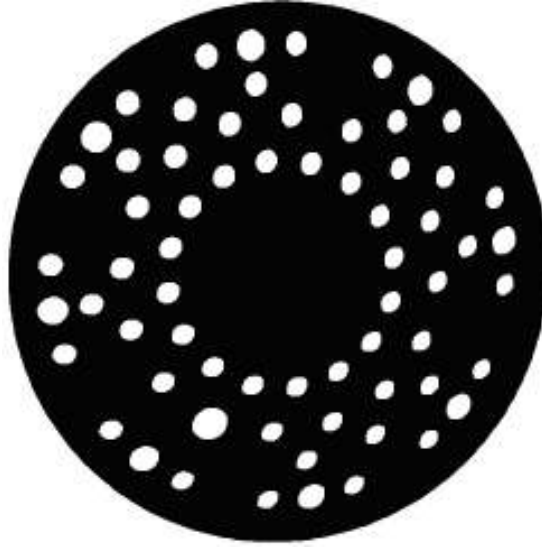
a)



b)

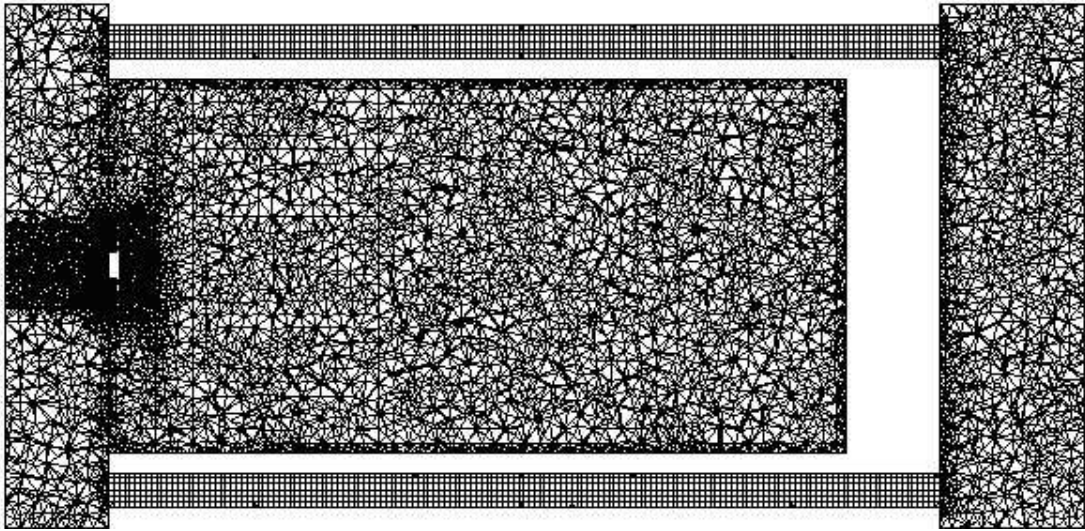
**Şekil 7.2.** Brülörde hava ve yakıt kanalları. a) Namlu. b) Yakıt kanalı ve yakıt çıkış delikleri.

Şekil 7.3’de yakıt parmakları önünde bulunan türbilatörün resmi verilmiştir. Bu türbilatör yakıt ile havanın parçalanarak daha iyi karışmasını sağlamaktadır. Türbilatörde deliklerin yoğun olduğu bölgeler tam yakıt parmakları hizasındadır. Böylelikle yakıt ile havanın önüne engel olarak daha iyi karışmaları sağlanmaktadır.



Şekil 7.3. Türbilatör.

Deney kazanının enine kesiti Şekil 7.4’de verilmiştir. Bu düzlemde görüldüğü gibi ocak cidarları ve yakıt çıkış delikleri gibi kritik bölgeler sık ağ yapısına sahiptir.



Şekil 7.4. Ağ örgüsü yapılmış deney kazanının enine kesiti.

Modellenen deney kazanının toplam mesh sayısı 790 mm ocak boyu ve kovansız durum için 1 407 927'dir. Çözüm aşamasına mesh sayısının çözüme olan etkisini araştırılarak başlanmıştır. Bu nedenle 4 farklı ağ yapısında çözümler alınarak ocak eksenindeki alev sıcaklıkları karşılaştırılmıştır. Diğer mesh sayıları sırasıyla 725 622, 922 208 ve 1 221 260'dır. Tablo 7.1'de farklı mesh sayıları ile elde edilen T1, T2, T3 alev sıcaklıkları verilmiştir. Mesh sayısı arttıkça T2 ve T3 sıcaklıkları artmış ve en büyük mesh sayısında bu artışın olmadığı tespit edilmiştir. T1 sıcaklığının deneysel verilere yakınlığı ise 1 407 927 mesh sayısı ile yapılan çözümde elde edilmiştir.

**Tablo 7.1.** Farklı mesh sayılarında elde edilen alev sıcaklıkları.

Mesh Sayısı	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)
725 622	1282	1126	992
922 208	1283	1167	1030
1 221 260	1288	1195	1054
1 407 927	1195	1172	1047

### 7.3. Programda Seçilen Modeller

Bu programda çözüm aşamaları; GAMBIT programında oluşturulan mesh dosyasının yüklenmesi, fiziksel modellerin seçilmesi, malzeme özelliklerinin tanımlanması, sınır koşullarının tanıtılması, başlangıç koşulunun tanıtılması, çözücü kontrol parametrelerinin ayarlanması, yakınsama monitörlerinin hazırlanması ile çözdürme ve çözümün izlenmesidir.

GAMBIT programında geometrik model düzenlenmiş, ağ oluşturulmuş ve sınır şartları tanımlanmıştır. Oluşturulan model CFD programı FLUENT'e okutulmuştur. Çözüme esas "case" dosyasının yapılması için modeller, çözüm yöntemi, malzeme ve sınır şartları tanımlanmıştır.



Problemi çözmek için seçilen modeller aşağıda verilmiştir:

**Denklem çözücü (solver):** FLUENT programında iki çözücü mevcuttur; segregated ve coupled solver. Bu çalışmada segregated çözücü, implicit formülasyon ve zamandan bağımsız model kullanılmıştır.

**Enerji Denklemi:** Yanma çözümlenmesinde enerji denklemini çözebilmek için aktif hale getirilmiştir.

**Viskoz model:** Modelde türbülanslı akışı tanımlayabilmek için standart k-epsilon modeli kullanılmıştır. Bu model için kullanılan diğer sabit katsayılar FLUENT'in içinde yer alan katsayılar alınmıştır.

**Kimyasal bileşenlerin tanımlanması:** Kimyasal bileşenleri ve kimyasal reaksiyonları çözebilmek için "non premixed combustion" modeli seçilmiştir. Bu modelde çözüm yapabilmek için prePDF programında reaksiyona girecek bileşenlerin oluşturulması gerekmektedir.

Ön karışimsız yanmada yakıt ve hava reaksiyon bölgesine farklı kanallardan girer. Reaktantlar yanmadan önce moleküler seviyede karışır. Ön karışimsız yanmaya örnek olarak metan yanması, pülverize kömürlü ocaklar ve dizel içten yanmalı motorlar verilebilir. Belirli kabuller altında termo kimyası karışım kesri olarak ifade edilen tek bir parametreye indirgenebilir. Karışım kesri  $f$  ile gösterilir. Karışım kesri bütün bileşenler içinde yanmış ve yanmamış akış elementlerinin kütle kesridir. Bu yaklaşım atomik elementlerin kimyasal reaksiyonla da karışmasından dolayı üstündür. Karışım kesri korunan skalar bir büyüklüktür ve bu nedenle yönetici transport denklemi kaynak terim içermez. Yanma basitleştirilmiş bir karışım problemi haline gelir. Ön karışimsız yanma modeli yaklaşımı bir veya iki korunumlu skalar için transport denklemlerin çözümünü içerir. Bireysel bileşenler için denklemler çözülmez. Bunun yerine tahmin edilen karışım kesri alanlarından bileşen konsantrasyonları türetilir. Kimya ve türbilansın etkileşimi olası yoğunluk fonksiyonu (PDF-Probability Density Function) ile hesaba katılır (Fluent User's Guide, 2003).

Ön karışimsız yanma modeli yaklaşımı özellikle hızlı kimya ile türbilanslı difüzyon alevlerinin simülasyonu için geliştirilmiştir. Ön karışimsız model ara (radikal) bileşenlerin tahmini, ayrılma etkisi, şiddetli türbilans kimyasal çifti hesapları yapar. Bu metot çok sayıda bileşenle transport denkleminin çözümünü gerektirmediği için hesaplama zamanı olarak verimlidir. Belirtilen kabuller geçerli olduğunda bu metot fine-rate metoduna göre tercih edilir (Fluent User's Guide, 2003).

Ön karışimsız yanma modeli için akış türbilanslı olmalıdır. Reaksiyon sistemi bir yakıt akışı ve oksitleyici akışı veya opsiyonel olarak ikinci bir akış (diğer bir yakıt ve oksitleyici veya reaksiyona girmeyen bir akış) içerir. Son olarak akışın kimyasal dengeye yakın olması için kimyasal kinetikler hızlı olmalıdır. Ön karışimsız yanma modeli sadece segregated solver için uygundur (Fluent User's Guide, 2003).

Ön karışimsız yanma için prePDF hazırlanmasında bazı reaksiyon modelleri mevcuttur. Flame sheet yaklaşımı en basit reaksiyon şemasıdır. Bu yaklaşımda yakıt ve oksitleyici bileşenlerinin aynı yerde hiç bulunmadıklarını ve son ürüne tamamen bir adımda dönüştüklerini, kimyanın sonsuz hızlı ve geri dönüşümsüz olduğu kabul edilir. Bu açıklama reaksiyon oranı veya kimyasal denge verisi gerekmeden, verilen stokiometri reaksiyonundan karışım kütle kesrini doğrudan belirlenmesine izin verir.

Denge modeli moleküler seviyede sürekli mevcut kimyasal denge için kimyanın yeterince hızlı olduğunu kabul eder. Gibbs serbest enerjisini minimum yapan bir algoritma kütle kesrinden bileşenlerin mol kesirlerini hesaplamak için kullanılır. Bu model ara bileşenlerin oluşumunu tahmin edebildiği için ve detaylı kimyasal kinetik oran verileri gerektirmediği için güçlü bir modeldir. Bir spesifik çok adımlı reaksiyon mekanizması tanımlı yerine önemli kimyasal bileşenler tanımlanır ve böylece Fluent kimyasal dengeye dayanarak her bir bileşenin mol kesrini tahmin eder. Fluent anlık karışım kesrinin belirli bir zengin karışım kesri altında olduğu durumlarda tam denge hesaplamalarını sınırlamamıza imkan sağlar. Yakıtça zengin bölgelerde (ekivalans oranı 1.5'dan büyük) anlık karışım kesri belirli bir zengin karışımı altında olduğu durumları aştığında Fluent yanma reaksiyonunu bitmiş kabul eder. Bunun gibi yakıtça zengin bölgelerde verilen bir karışım kesri değerindeki kompozisyon limit karışım

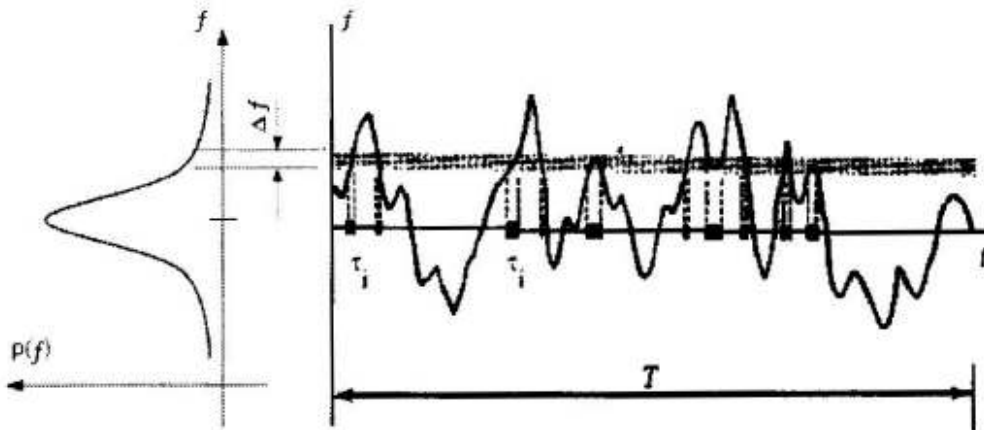
kompozisyonundan hesaplanır ve yakıt giriş akımı bilinen bir stokiometri esas alınır. Stokiometri kullanıcı tarafından verilebilir veya zengin limit durumundaki kimyasal dengeden otomatik olarak belirlenir. Bu yaklaşım kısmi denge yaklaşımı olarak bilinir ve zengin alev bölgesinde kompleks denge hesaplamalarını by-pass etmeyi sağlar. Tam denge yaklaşımı gerekli olduğunda zengin limit 1 olarak tanımlanır.

Flamelet modeli ise yanma modellerinde dengenin önemli olmadığı durumlarda kullanılır. Denge olmayan etkilerin önemli olduğu yanma modellerinde lokal denge kabulü gerçekçi olmayan sonuçlara götürür. Denge kabuğunun kırıldığı tipik konular hidrokarbon alevlerinin zengin kısmının modellenmesi, NO<sub>x</sub> oluşumunu yöneten ara bileşenlerin tahmin edilmesi ve jet alevlerde alev yükselmesi ve sönmesi olaylarıdır.

Türbilanslı reaksiyona giren akışın FLUENT tarafından tahmini bu değişken büyüklüklerin zaman ortalamalı değerleri ile ilgilidir (Şekil 7.5). PDF,  $P(f)$  olarak gösterilir.  $f$  durumunda harcanan akışkanın miktarının zamana oranıdır.  $\Delta f$  değeri harcanan  $f$ 'in zamana oranı olarak verilirse

$$p(f)\Delta f = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum \tau_i$$

Pratikte  $P(f)$  deneysel olarak gözlenen PDF şekillerine yaklaşan matematiksel fonksiyon olarak açıklanır (Fluent User's Guide, 2003).



Şekil 7.5. PDF'in grafiksel tanımı.

Bu çalışmada denge yaklaşımı kullanılarak bir PDF hazırlanmıştır. Smooke mekanizmasının içerdiği toplam 17 bileşen kullanılmıştır. Bu bileşenler  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CH}_3$ ,  $\text{H}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{HO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}$ ,  $\text{OH}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_2\text{O}$ ,  $\text{HCO}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_3\text{O}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{N}^{\circ}$ dur. Hava ve yakıt sıcaklığı 300 K olarak alınmıştır.

**Radyasyon modeli:** Mevcut olan ışıınım modellerinden yanma gibi kimyasal reaksiyonlarda en uygun sonuç veren “discrete ordinates” modeli seçilmiştir.

Modeller ve denklem çözücü seçildikten sonra modelde kullanılan karışımın, bileşenlerin ve katı yüzeyin özellikleri programa girilmiştir.

Karışımın özellikleri : Akışın sıkıştırılabilir olduğu kabul edilmiş ve yoğunluk ideal gaz kanunundan yararlanarak hesaplanmıştır. Modelde birden fazla bileşen olduğu için özgül ısının hesaplanabilmesi için “mixing-law” karışım kanunu seçilmiştir. Burada belli bir noktadaki akışkanın özgül ısısı o noktadaki bileşenlerin kütle oranlarına bağlı olarak FLUENT tarafından çözülmektedir. Isı iletim katsayısı ve viskozite için programdaki mevcut sabit değerler alınmıştır. Bileşenlerin birbirleri arasındaki yayılımın eşit olduğu kabul edilerek kütle yayılım katsayısı için “constant dilute approximation” modeli ve varsayılan değer  $2.88\text{e-}05 \text{ m}^2/\text{s}$  alınmıştır. Oluşturulan PDF karışımının absorpsiyon katsayısı wsggm-cell-based” olarak hesaplanmıştır.

Bileşenlerin özellikleri: Yanma gibi kimyasal reaksiyonlardaki sıcaklık değerleri bileşenlerin özgül ısılarına bağlıdır. Burada oluşturulan PDF ile her bir bileşen için özgül ısılar polinom olarak tanımlıdır. Diğer özelliklerde değişiklik yapılmamıştır.

Katı yüzeylerin özellikleri: Bütün ocak cidarları alüminyum kabul edilmiş ve bu yüzeyler için olan ışıınım yutma katsayısı 0.3 alınmıştır. Diğer özelliklerde değişiklik yapılmamıştır.

Malzemelerin özellikleri girildikten sonra çalışma ve sınır şartlarının tanımlanması gerekmektedir. Bu çalışmada çalışma şartları için 1 atmosfer basınç, 288 K sıcaklık,  $1.225 \text{ kg}/\text{m}^3$  hava yoğunluğu ve  $9.81 \text{ m}/\text{s}^2$  yerçekimi ivmesi alınmıştır.

Sınır şartlarının tanımlanması: Su ile çevrili tüm yüzeylerde (duman boruları, ocak cidarı, ön aynanın yanal yüzeyi) sıcaklık sabit kabul edilmiş ve 353 K olarak tanımlanmıştır. İçinden duman gazı geçip atmosfer ile çevrili yüzeylerde ise sıcaklık 500 K olarak alınmıştır. Kazan kapağı için 600 K, brülör namlusu için ise 700 K sıcaklık sınır şartı girilmiştir. Ocak içerisine yerleştirilen kovan için 873 K sıcaklık sınır şartı tanımlanmıştır. Bu sıcaklık sınır şartı değerlerinin tespitinde deneyler esas alınmış olup değişik ocak boylarında bu değerler farklı alınmıştır. Yukarıda verilen değerler 790 mm ocak boyunun anma ısıl gücü için girilen değerlerdir. Hava ve yakıt için istenen debileri sağlamak üzere hız sınır şartı “velocity inlet” verilmiştir. Deneylerde doğalgaz kullanıldığı için doğalgaz ile metanın alt ısıl değerlerinin farklı olmasından dolayı hava ve yakıt debileri bu durum göz önünde bulundurularak programa girilmiştir. Yakıt ve hava sıcaklıkları 300 K olarak alınmıştır. Baca çıkışı “out flow” olarak tanımlanmış ve herhangi bir değer girilmemiştir.

FLUENT programında NO<sub>x</sub> hesabı yanma çözümlemesi bittikten sonra aynı akış alanı üzerinde ayrı olarak çözdürülebilmektedir. NO<sub>x</sub> hesabında ise ısıl, ani ve yakıtsal NO oluşumu hesaba katılmıştır. Isıl NO oluşumunda oksijen modeli olarak “partial-equilibrium” modeli seçilmiştir. Yakıt içindeki azot miktarı Bölüm 3’de hesaplandığı üzere 0.059 değeri girilmiştir.

## 7.4. Model Sonuçları

### 7.4.1. Enerji dengesi

Model geometrisine enerji girişi, yakıt deliklerinden giren metan ile olmaktadır. Metanın ısıl değeri 8550 kcal/Nm<sup>3</sup> (35790 kJ/Nm<sup>3</sup>)’dür. 116 kW kazan ısıl kapasitesinde EK-II’de verilen hesaplar metan ısıl değerine göre yapılırsa kazan ısıl verimi % 86.5, net kazan kapasitesi ise 100.6 kW elde edilir. Buna göre elde edilecek

$$\text{yakıt (metan) sarfıyatı} = \frac{100.6 \cdot 3600}{0.865 \cdot 35790} \left( \frac{300}{273} \right) = 12.85 \text{ m}^3/\text{h'dır.}$$

Kazan geometrisine metanla verilen enerji miktarı 116 kW'dır. Kazana verilen enerjinin büyük bölümü ocak cidarlarından kazanda dolaşan suya geçmektedir. 790 mm ocak boyu 116 kW kazan ısıl kapasitesinde hava fazlalık katsayısının 1.26 değeri için kovansız durumda suya aktarılan enerji 91.656 kW'dır. Bu durumda kazan ısıl verimi  $91.656/116 = \% 79$ 'dur. Aynı ocak boyu ve kapasitede hava fazlalık katsayısının 1.02 için suya aktarılan enerji 94.543 kW, ısıl verim ise  $\% 81.5$ 'dir.

Model çözümlerinde ocak cidarına verilen enerji ile kazan ısıl verimi için elde edilen değerler deneysel verilerle karşılaştırmalı olarak Tablo 7.2'de verilmiştir. Bu durum kovan yüzey alanı arttıkça kazan ısıl verimin arttığını göstermektedir. Kovan yüzey alanı arttıkça ocak cidarlarına radyasyonla olan ısı transferi artmaktadır. 790 mm ocak boyunda kovansız durumda ocak cidarlarına radyasyonla olan ısı transferi 28.255 kW iken, 25\*20, 30\*20 ve 25\*40 kovanları kullanılması halinde sırasıyla 30.279 kW, 30.748 kW, 35.610 kW'dır.

**Tablo 7.2.** Enerji dengesi için model ile deney verilerinin kıyaslanması.

Ocak Boyu / Kazan Isıl Kapasitesi / Parametre	Ocak Cidarına Verilen Enerji (kW)	Kazan Isıl Verimi (%) MODEL	Kazan Isıl Verimi (%) DENEY
790 mm / 116 kW / Kovansız (HFK 1.26)	91.656	79.0	83.5
790 mm / 116 kW / Kovansız (HFK 1.02)	94.543	81.5	83.7
790 mm / 116 kW / 25*20 (HFK 1.26)	94.997	81.9	83.7
790 mm / 116 kW / 30*20 (HFK 1.26)	95.942	82.7	84.1
790 mm / 116 kW / 25*40 (HFK 1.26)	97.906	84.4	84.0
680 mm / 87 kW / Kovansız (HFK 1.26)	70.079	80.5	87.0
550 mm / 58 kW / Kovansız (HFK 1.475)	46.461	80.1	88.0

#### 7.4.2. Kütle dengesi

Yanma odasına yakıt girişi yakıt deliklerinden, hava girişi ise yakıt borusunu çevreleyen namlu içinden olmaktadır. Duman gazlarının çıkışı ise baca çıkışından olmaktadır. Metanın yoğunluğu  $0.667 \text{ kg/m}^3$  olduğuna göre farklı ocak boyları için kütle dengesi Tablo 7.3’de verilmiştir. Yanma odasına giren ve çıkan akışkan debileri arasındaki fark  $1.10^{-8}$  mertebelerindedir.

**Tablo 7.3.** Farklı ocak boylarında kazan kontrol hacmi için kütle dengesi.

Ocak boyu / Kazan Isıl Kapasitesi	HFK	Yanma Odasına Giren (kg/s)		Bacadan Çıkan (kg/s)
		Yakıt	Hava	
790 mm / 116 kW	1.26	Yakıt	0.00238	0.05954
		Hava	0.05716	
		<b>Toplam</b>	0.05954	
790 mm / 116 kW	1.02	Yakıt	0.00238	0.04877
		Hava	0.04639	
		<b>Toplam</b>	0.04877	
680 mm / 87 kW	1.26	Yakıt	0.00178	0.04464
		Hava	0.04286	
		<b>Toplam</b>	0.04464	
550 mm / 58 kW	1.475	Yakıt	0.00117	0.03462
		Hava	0.03344	
		<b>Toplam</b>	0.03462	

#### 7.5. Model Sonuçları İle Deneysel Sonuçlarının Karşılaştırılması

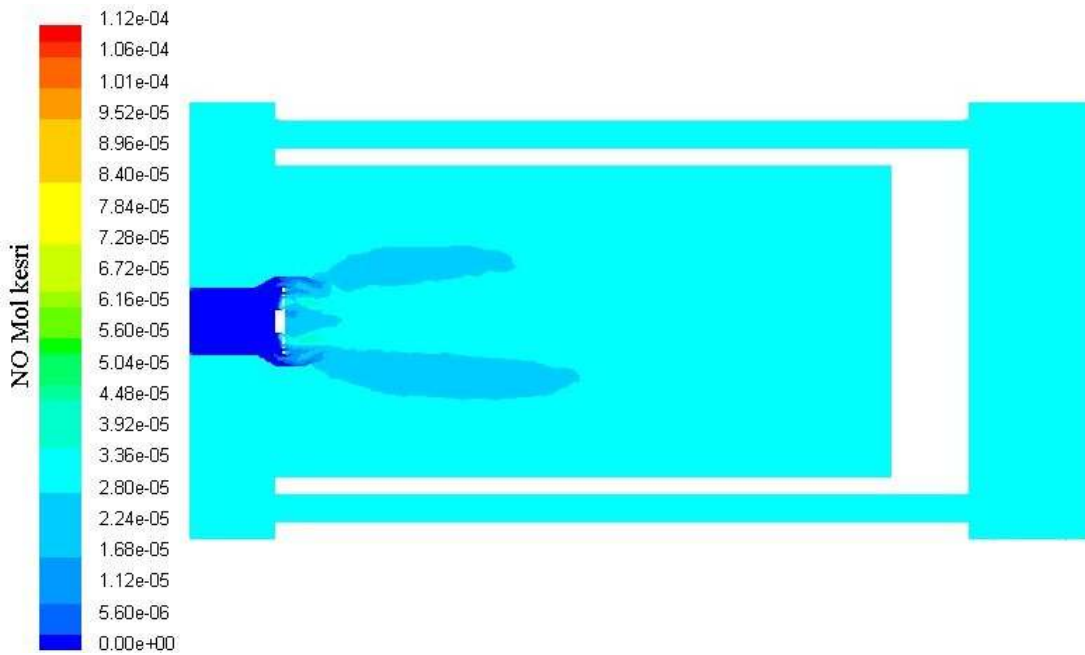
Model sonuçlarında elde edilen emisyonlar ve sıcaklıkların deneysel değerlere olan yakınlığı karşılaştırılmıştır.

##### 7.5.1. Emisyonların karşılaştırılması

###### 7.5.1.1. Azotoksit emisyonları

Şekil 7.6’da 790 mm ocak boyu, 116 kW kazan ısı kapasitesi ve hava fazlalık katsayısının 1.26 değerinde kovansız durum için elde edilen NO mol kesri konturları

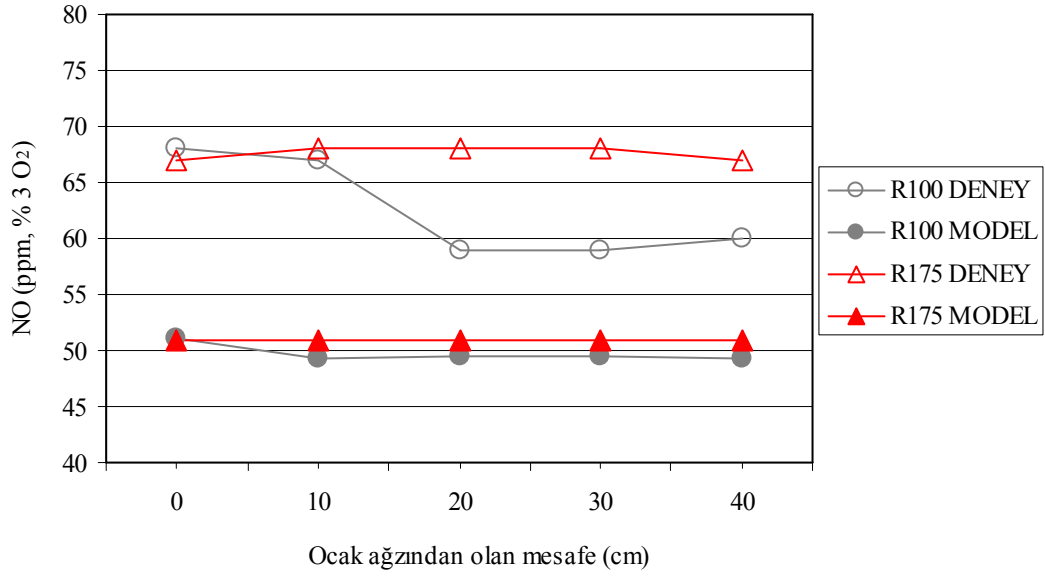
verilmiştir. NO oluşumunun alev bölgesine yakın bölgelerde daha fazla olduğu görülürken ocağın diğer bölgelerinde ve bacada biraz daha düşük olmak (yaklaşık olarak 50 ppm- % 3 O<sub>2</sub>) üzere hemen hemen aynı değeri almıştır. Bu kontur değerleri % 3 O<sub>2</sub> seviyesi için değildir. Ayrıca azotdioksit emisyonları hesaplanmadığından bu değerlere dahil edilmemiştir. Deneylerde azotdioksit emisyonlarının miktarı yaklaşık olarak 3-5 ppm arası olduğundan model sonuçlarında bu emisyonların azotoksit emisyonlarına katkısı gözardı edilmiştir.



**Şekil 7.6.** 790 mm ocak boyu 116 kW kazan ısı kapasitesinde kovansız durum için elde edilen NO mol kesri konturları (HFK=1.26).

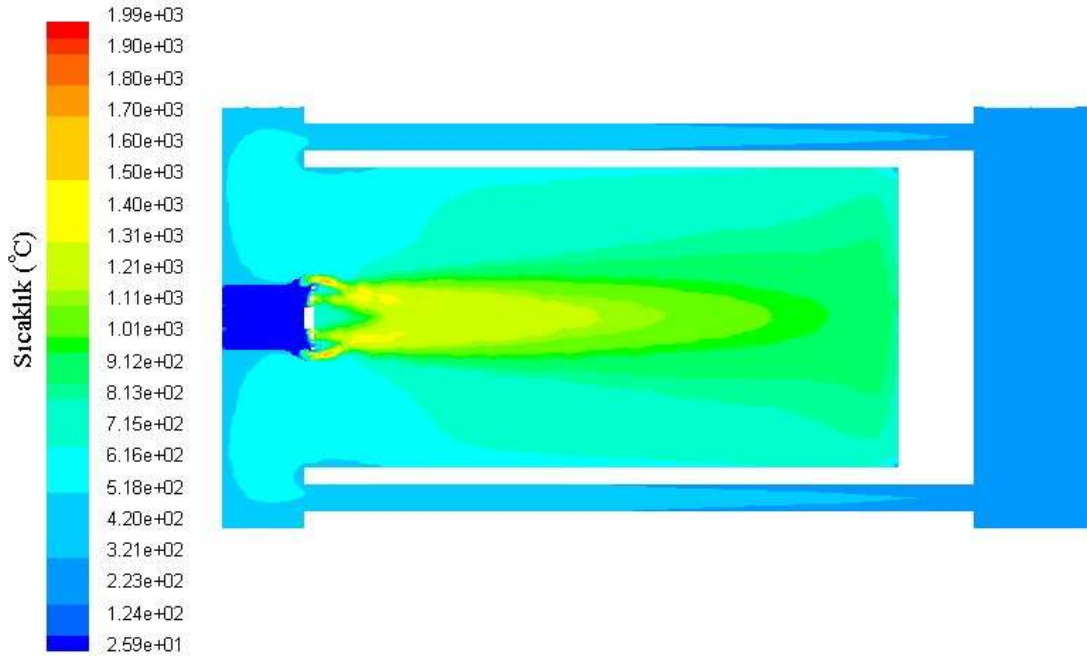
R100 ve R175 ölçüm çizgilerindeki ölçüm noktalarında modelde elde edilen NO emisyon değerleri Şekil 7.7’de deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Modelde R100 ve R175 ölçüm noktalarındaki NO emisyon değerleri birbirine çok yakın olup 49-51 ppm arasındadır. Deneyde ölçülen azotoksit emisyonları ise 59-68 ppm aralığında olup R 100 ölçüm çizgisi boyunca ölçülen değerler R175 ölçüm hattına göre 7-8 ppm daha fazladır. Deneyde bacada ölçülen azotoksit emisyonu değeri 68 ppm iken modelde ise bu değer 51 ppm olarak elde edilmiştir.





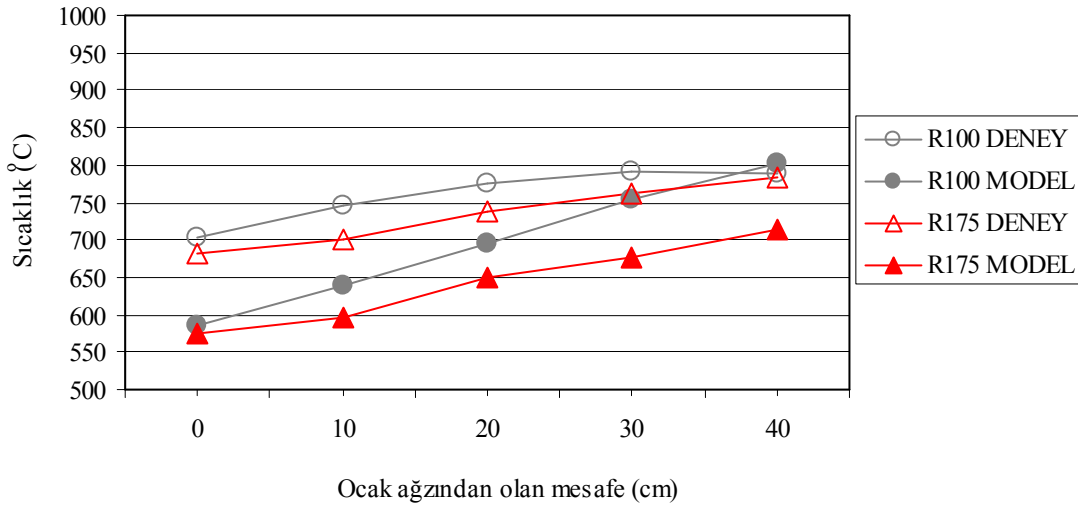
**Şekil 7.7.** R100 ve R175 ölçüm çizgileri üzerinde NO emisyonu için deney ve model sonuçlarının karşılaştırılması (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, Kovansız durum, HFK=1.26).

Aynı ocak boyu ve aynı kazan ısı kapasitesinde hava fazlalık katsayısının 1.26 değerinde modelde elde edilen ocak sıcaklığı değişimleri Şekil 7.8’de verilmiştir.



**Şekil 7.8.** Modelde elde edilen ocak içindeki sıcaklık konturları (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, Kovansız durum, HFK=1.26).

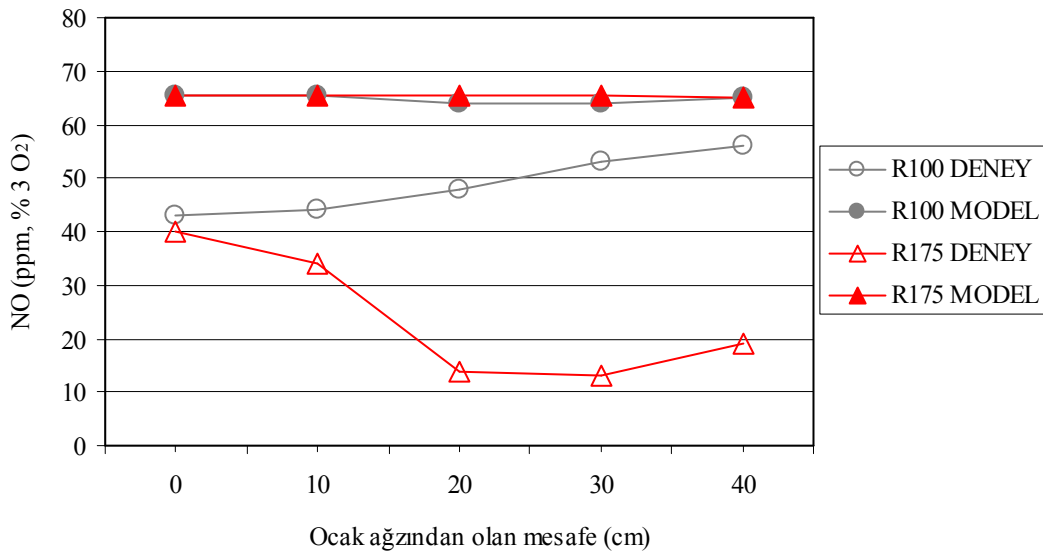
Modelde ocak içinde maksimum sıcaklık 1990°C olup bu değer yakıt çıkışına yakın bölgelerdeki çok küçük hücrelerde oluşmaktadır. Alev bölgesinde yine çok küçük alanlarda 1320°C'ye yakın sıcaklıklar mevcuttur. Ocak arkasına doğru alev sıcaklığında azalma olmaktadır. Şekil 7.9'da R100 ve R175 ölçüm çizgilerindeki ölçüm noktalarında modelde elde edilen sıcaklıklar deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Her iki ölçüm noktasında da deneyde ölçülen sıcaklıklar modelde bulunan sıcaklık değerlerinden daha yüksek değerler almıştır. R100 ve R175 ölçüm hattındaki deney sıcaklıkları, aynı ölçüm çizgilerindeki model değerlerine göre 80-100°C daha fazladır. Modelde bu ölçüm çizgilerinde elde edilen hem NO hem de sıcaklık değerleri deneysel verilere % 10'luk bir hata ile yaklaşmaktadır. Bu hata oranı ise kabul edilebilir bir değerdir.



**Şekil 7.9.** R100 ve R175 ölçüm çizgileri üzerinde sıcaklıklar için deney ve model sonuçlarının karşılaştırılması. (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, Kovansız durum, HFK=1.26)

Aynı ocak boyu ve aynı kazan ısı kapasitesinde hava fazlalık katsayısının 1.02 değerine düşürülmesi halinde R100 ve R175 ölçüm noktalarında modelde elde edilen NO emisyon değerleri Şekil 7.10'da deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Modelde R100 ve R175 ölçüm noktalarındaki NO emisyon değerleri birbirine çok yakın olup 64-65 ppm arasındadır. Deneyde ölçülen azotoksit emisyonları ise 13-59 ppm aralığında olup R 100 ölçüm çizgisi boyunca ölçülen değerler R175 ölçüm hattına göre 15-40 ppm daha fazladır. Hava fazlalık katsayısının 1.02 değerine düşürülmesi ile modelde ocak içi

sıcaklıkları artış göstermiştir. Aynı sıcaklık artışı deneyde de görülmüştür. Modeldeki bu sıcaklık artışı NO emisyonlarını hava fazlalık katsayısının 1.26 değerine göre arttırmıştır. Deneyde ise sıcaklıkların artmasına rağmen azotoksit emisyonlarındaki azalmanın nedeni azotoksit oluşumunda etkili olan oksijen derişikliğinin azlığıdır. Deneyde bacada ölçülen azotoksit emisyonu değeri 50 ppm iken modelde ise bu değeri 65 ppm olarak elde edilmiştir.

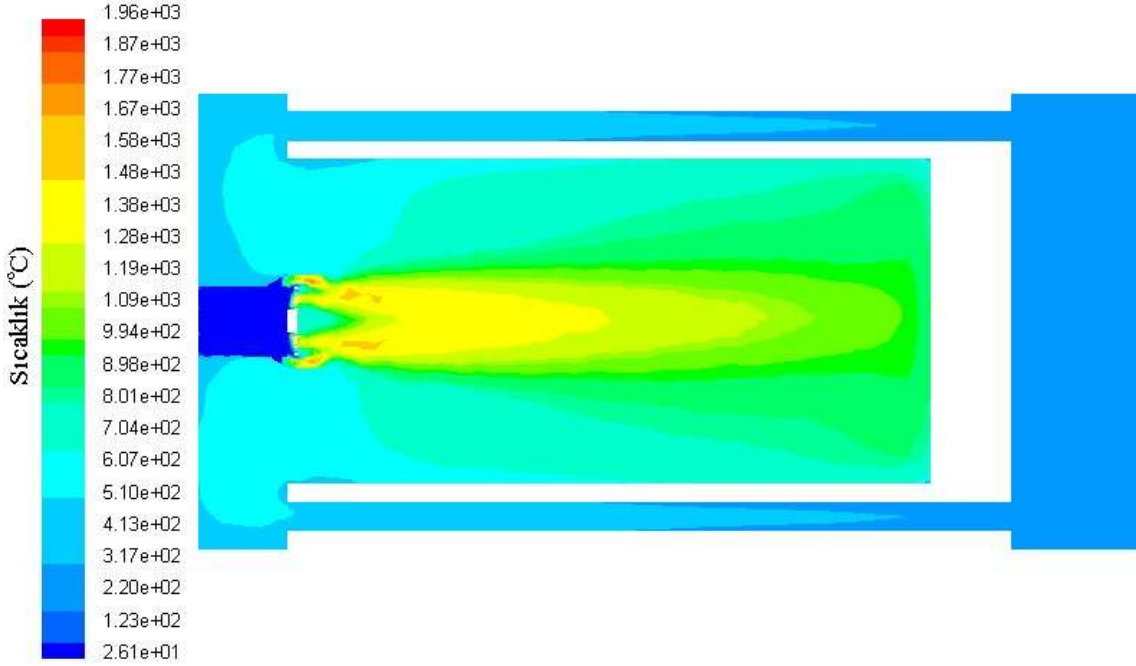


**Şekil 7.10.** R100 ve R175 ölçüm çizgileri üzerinde NO emisyonu için deney ve model sonuçlarının karşılaştırılması. (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, Kovansız durum, HFK=1.02).

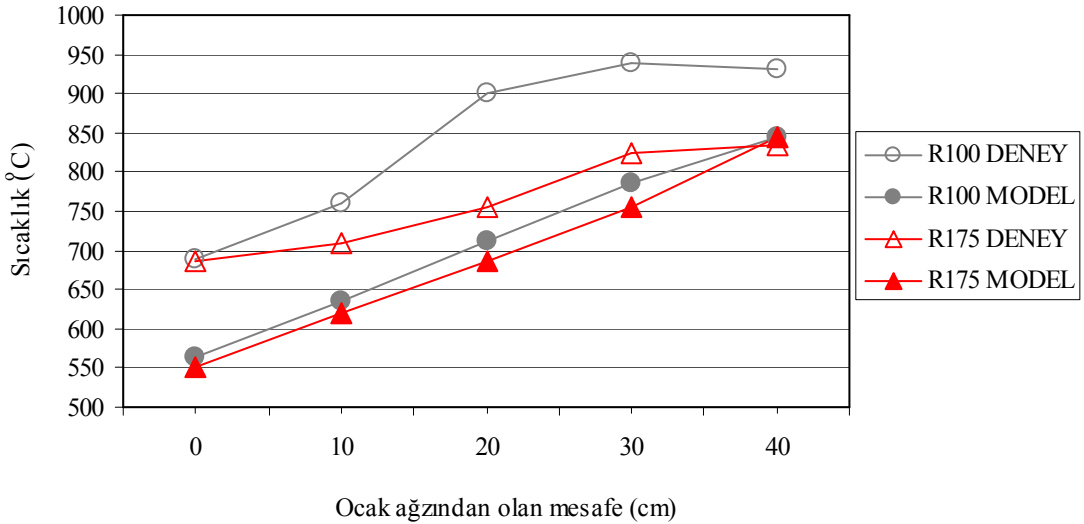
Hava fazlalık katsayısının 1.02 değerinde modelde elde edilen ocak sıcaklığı değışimleri Şekil 7.11’de verilmiştir. Hava fazlalık katsayısının 1.26 değerinde elde edilen sıcaklık konturları ile kıyaslama yapılacak olursa; brülöre yakın alev bölgesinde hava fazlalık katsayısının 1.26 değerinde çok küçük alanlarda görülen 1380 °C üzeri sıcaklıklarda artış olmuştur. Ayrıca bu sıcaklıklar daha fazla alanda elde edilmiştir.

Şekil 7.12’de R100 ve R175 ölçüm çizgilerindeki ölçüm noktalarında modelde elde edilen sıcaklıklar deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Her iki ölçüm noktasında da deneyde ölçülen sıcaklıklar modelde bulunan sıcaklık değerlerinden daha yüksek

değerler almıştır. R100 ve R175 ölçüm hattındaki deney sıcaklıkları, aynı ölçüm çizgilerinde model değerlerine göre 80-120°C daha fazladır.

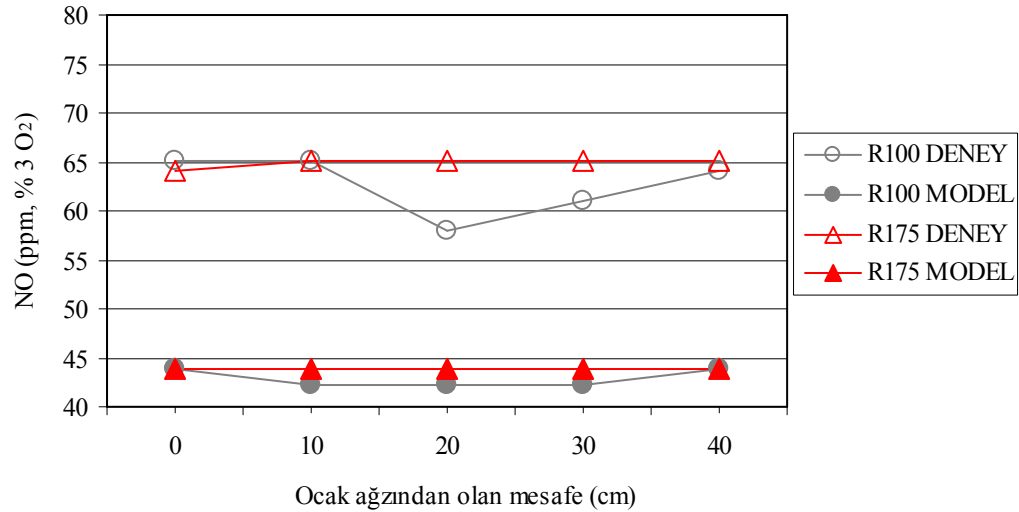


**Şekil 7.11.** Modelde elde edilen ocak içindeki sıcaklık konturları (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, Kovansız durum, HFK=1.02).



**Şekil 7.12.** R100 ve R175 ölçüm çizgileri üzerinde sıcaklıklar için deney ve model sonuçlarının karşılaştırılması. (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, Kovansız durum, HFK=1.02)

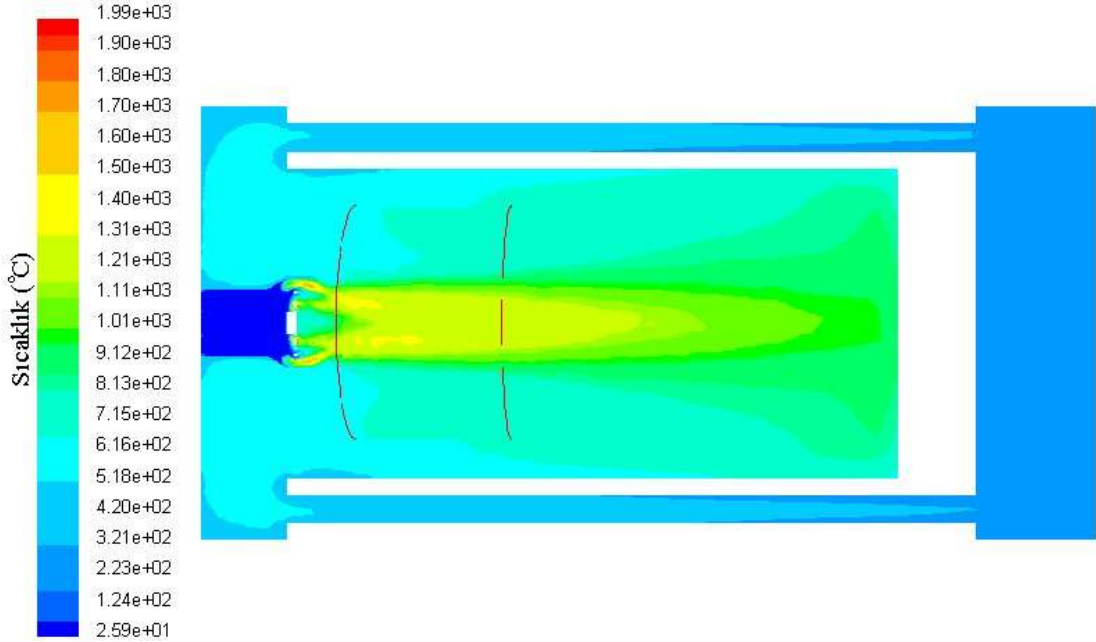
Aynı ocak boyu ve aynı kazan ısıtma kapasitesinde hava fazlalık katsayısının 1.26 değerinde çapı ve uzunluğu 30\*20 olan kovan için R100 ve R175 ölçüm noktalarında modelde elde edilen NO emisyon değerleri Şekil 7.13’de deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Modelde R100 ve R175 ölçüm noktalarındaki NO emisyon değerleri birbirine çok yakın olup 42-44 ppm arasındadır. Deneyde ölçülen azotoksit emisyonları ise 58-65 ppm aralığında olup R 100 ölçüm çizgisi boyunca ölçülen değerler R175 ölçüm hattına göre 1-7 ppm daha fazladır. 30\*20 kovanı model sonuçları kovansız model sonuçlarına göre 3-9 ppm daha düşüktür. Deneyde bacada ölçülen azotoksit emisyonu değeri 65 ppm iken modelde ise bu değer 44 ppm olarak elde edilmiştir.



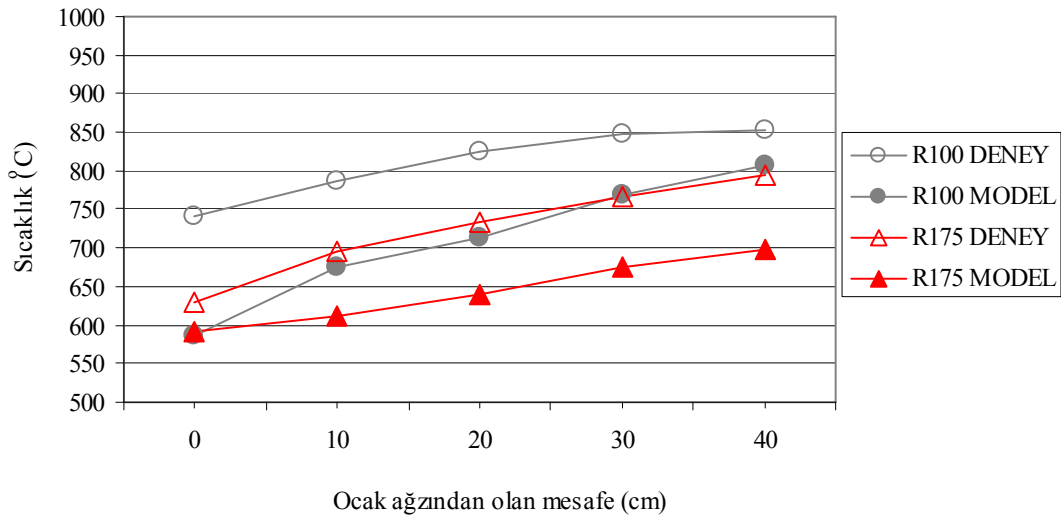
**Şekil 7.13.** R100 ve R175 ölçüm çizgileri üzerinde NO emisyonu için deney ve model sonuçlarının karşılaştırılması (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, 30\*20 kovanı, Kovan konumu = 0, HFK=1.02).

Aynı ocak boyu ve aynı kazan ısıtma kapasitesinde hava fazlalık katsayısının 1.26 değerinde çapı ve uzunluğu 30\*20 kovan kullanılması halinde modelde elde edilen ocak sıcaklığı değişimleri Şekil 7.14’de verilmiştir. Modelde ocakta kovan kullanılması halinde kovansız duruma göre ocak içi sıcaklıklarında düşme olmuştur. Bu azalmada katı yüzey ışıınımı etkili olmuştur. Kovansız modelde elde edilen 1380 °C’ye sahip sıcaklık bölgeleri kovan kullanılması halinde çok küçük bölgelerde oluşmuştur. Şekil 7.15’de R100 ve R175 ölçüm çizgilerindeki ölçüm noktalarında modelde elde edilen sıcaklıklar deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Her iki ölçüm noktasında da

deneyde ölçülen sıcaklıklar modelde bulunan sıcaklık değerlerinden daha yüksek değerler almıştır. R100 ve R175 ölçüm hattındaki deney sıcaklıkları, aynı ölçüm çizgilerinde model değerlerine göre 60-120°C daha fazladır.



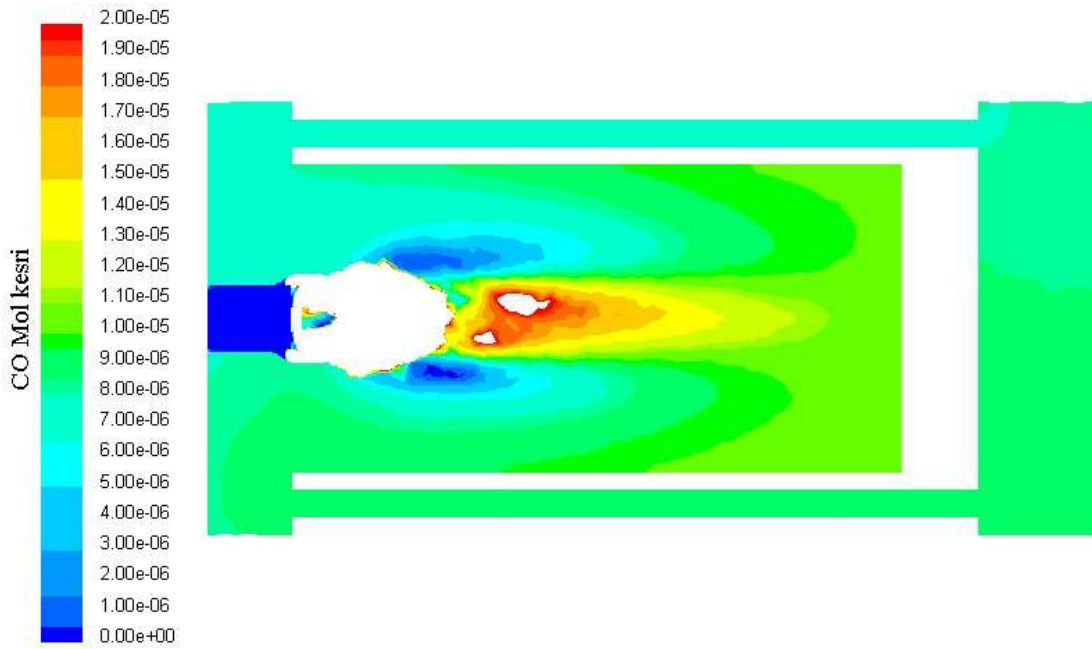
**Şekil 7.14.** Modelde elde edilen ocak içindeki sıcaklık konturları.(Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, 30\*20 kovanı, Kovan konumu = 9, HFK=1.26).



**Şekil 7.15.** R100 ve R175 ölçüm çizgileri üzerinde sıcaklıklar için deney ve model sonuçlarının karşılaştırılması. (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, 30\*20 kovanı, Kovan konumu = 0, HFK=1.26)

### 7.5.1.2. Karbonmonoksit emisyonları

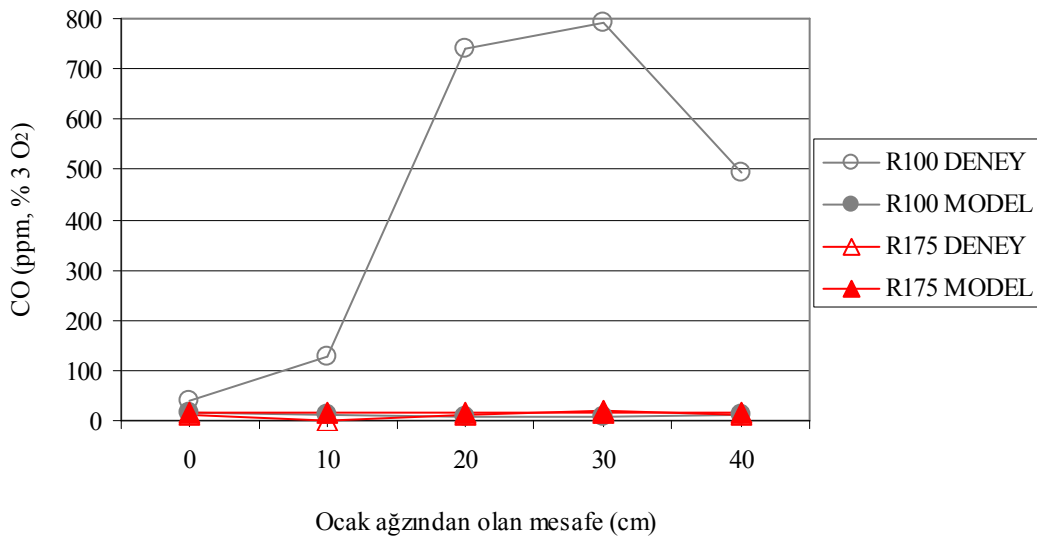
Şekil 7.16'da 790 mm ocak boyu, 116 kW kazan ısı kapasitesi ve hava fazlalık katsayısının 1.26 değerinde kovansız durum için elde edilen CO mol kesri konturları verilmiştir. CO oluşumu özellikle yakıt çıkış bölgesinden başlamak üzere alevin brülöre yakın bölgelerinde daha fazla olduğu görülürken ocağın diğer bölgelerinde ve bacada çok düşük değer almıştır. Bu kontur değerleri % 3 O<sub>2</sub> seviyesi için değildir. Şekil 7.16'da ocaktaki az da olsa CO dağılımını göstermek için CO konturları maksimum 20 ppm ile sınırlandırılmıştır. Bu nedenle CO emisyonlarını yüksek olduğu bölge şekilde beyaz renkte gözükmektedir.



**Şekil 7.16.** 790 mm ocak boyu 116 kW kazan ısı kapasitesinde kovansız durum için elde edilen CO mol kesri konturları (HFK=1.26).

R100 ve R175 ölçüm çizgilerindeki ölçüm noktalarında modelde elde edilen CO emisyon değerleri Şekil 7.17'de deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Modelde R100 ve R175 ölçüm noktalarındaki CO emisyon değerleri birbirine çok yakın olup 9-14 ppm arasındadır. Deneyde ölçülen karbonmonoksit emisyonları ise 10-793 ppm aralığında olup R100 ölçüm çizgisi boyunca ölçülen değerler R175 ölçüm hattına göre daha

fazladır. R100 ölçüm hattı alev merkezine yakın olduğu için deneyde yüksek CO emisyonları elde edilmiştir. Fakat modelde hava-yakıt karışımı yanma daha iyi sağlandığından emisyonlarda daha düşüktür. Modelde sadece brülörü çıkışındaki alev bölgesinde CO emisyonları yüksektir. R175 ölçüm hattında ise deney ve model CO emisyonları birbirine oldukça yakın değerdedir. Deneyde bacada ölçülen CO emisyonu değeri 18 ppm iken modelde ise bu değer 14 ppm olarak elde edilmiştir.

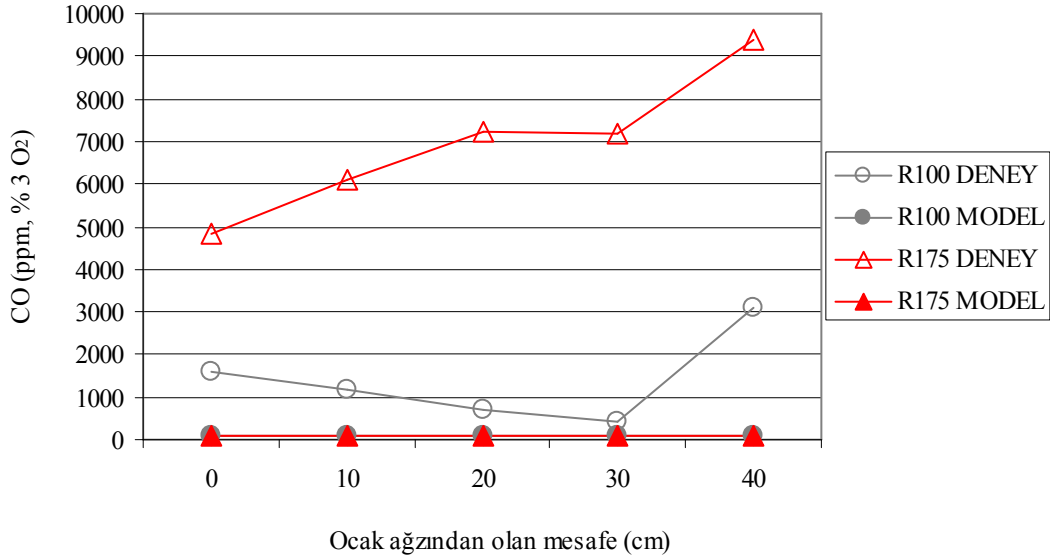


**Şekil 7.17.** R100 ve R175 ölçüm çizgileri üzerinde CO emisyonu için deney ve model sonuçlarının karşılaştırılması (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, Kovansız durum, HFK=1.26).

Aynı ocak boyu ve aynı kazan ısı kapasitesinde hava fazlalık katsayısının 1.03 değerine düşürülmesi halinde R100 ve R175 ölçüm noktalarında modelde elde edilen CO emisyon değerleri Şekil 7.18’de deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Modelde R100 ve R175 ölçüm noktalarındaki CO emisyon değerleri birbirine çok yakın olup 90-110 ppm arasındadır. Deneyde ölçülen CO emisyonları ise 500-9000 ppm aralığında değişmektedir. Model çözümlerinde hava-yakıt karışımı mükemmel sağlandığı için CO emisyonu oluşumu modelde daha az olmuştur. Hava fazlalık katsayısının 1.03 değerinde modelde elde CO emisyonları hava fazlalık katsayısının 1.26 değerinde yine



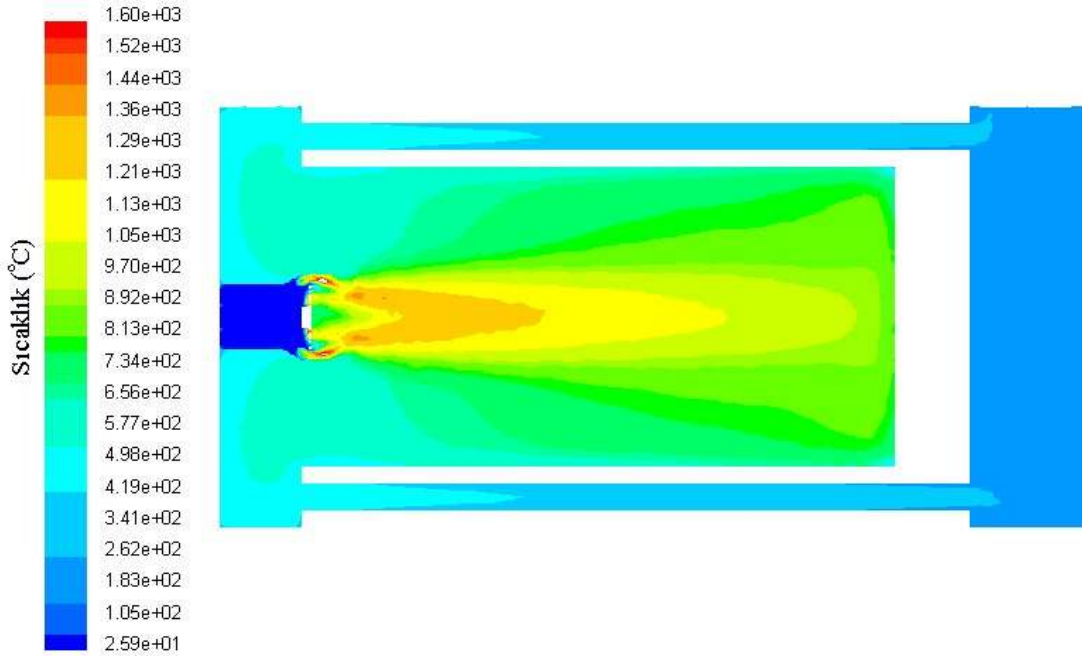
modelde elde CO emisyonlarından daha fazladır. Bacada ise CO emisyonları açısından deneyde yüksek değer ölçülürken (10411 ppm) modelde bu değer 88 ppm'dir.



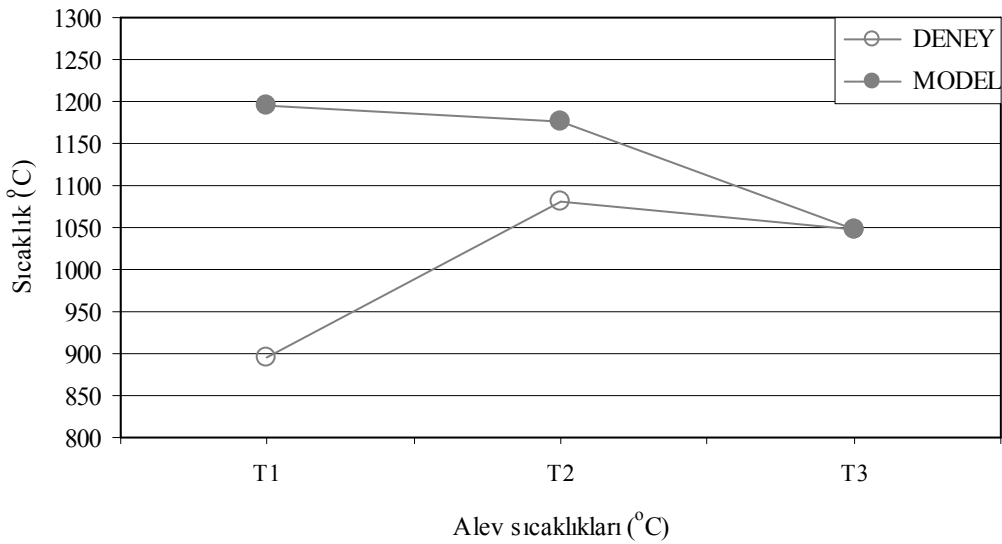
**Şekil 7.18.** R100 ve R175 ölçüm çizgileri üzerinde CO emisyonu için deney ve model sonuçlarının karşılaştırılması (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, Kovansız durum, HFK=1.02).

### 7.5.2. Alev sıcaklıklarının karşılaştırılması

Deneyde ölçülen ve modelde elde edilen alev sıcaklıklarının karşılaştırılması alev merkezinde farklı noktalar içindir. Bu noktalar Bölüm 5’de belirtildiği gibi T1, T2 ve T3 olarak isimlendirilmiştir. 790 mm ocak boyu, 116 kW kazan ısı kapasitesi ve hava fazlalık katsayısının 1.26 değerinde kovansız durum için modelde elde edilen ocak içi sıcaklık konturları Şekil 7.19’da verilmiştir. Burada alevin daha net görünmesi için maksimum sıcaklık 1600 °C ile sınırlandırılmıştır. Modelde deneyden farklı olarak alevin baş bölgeleri (T1) daha sıcak olmuştur. Diğer T2 ve T3 noktalarındaki alev sıcaklıklarında bu fark azalmıştır. Şekil 7.20’de T1, T2 ve T3 noktalarındaki alev sıcaklıklarının deney ve model için karşılaştırılması verilmektedir. T1 noktasında modelde elde edilen sıcaklık değeri deneyde ölçülenden 300 °C daha fazladır. Deneyde T1 noktasındaki sıcaklığın düşük olmasındaki etken brülör fanının yaptığı soğutma etkisidir. T2 noktasında sıcaklık farkı 100 °C olup, T3 noktasında ise sıcaklık değeri (1047 °C) hem model hem de deney için aynıdır.



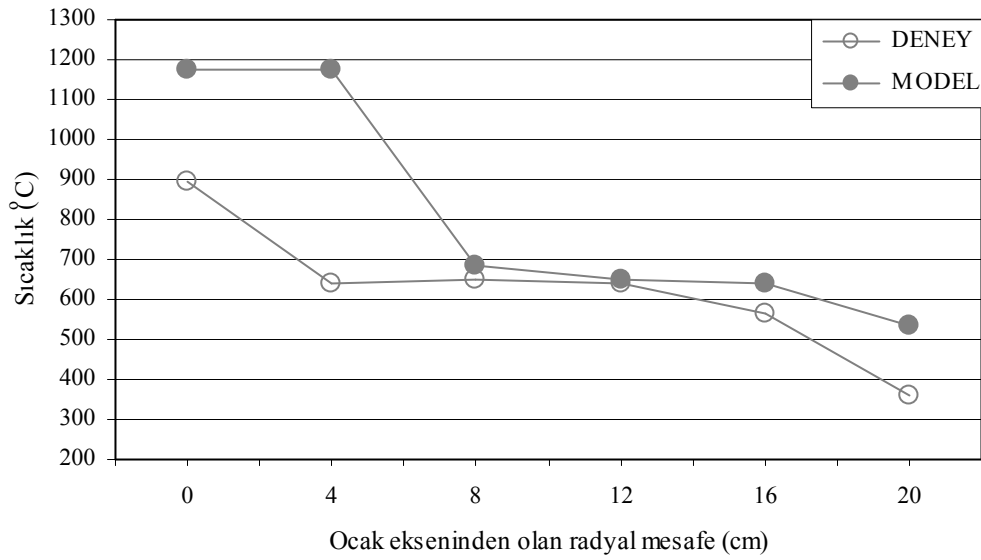
**Şekil 7.19.** Modelde elde edilen ocak içindeki sıcaklık konturları (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, Kovansız durum, HFK=1.26, Skala maks. değeri 1600 °C)



**Şekil 7.20.** Alev sıcaklığı için deney ve model sonuçlarının karşılaştırılması (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, Kovansız durum, HFK=1.26).

T1 noktasından ocak cidarına doğru radyal bir mesafede ocak sıcaklıklarındaki değişim Şekil 7.21'de deney ve model için verilmiştir. T1 noktasından ocak cidarına doğru gidildikçe deney ve model değerleri birbirine yakın değer almıştır. Alev

merkezinden 8 cm'lik mesafeye kadar sıcaklıklar arasındaki fark büyük iken bu noktadan 16 cm mesafesine kadar değerler birbirine çok yakındır. Ocak cidarında ise modelde elde edilen değer deneyde ölçülen değerden 176 °C daha fazladır. Bu farkın artmasındaki neden deneyde o noktada sıcaklık ölçülmesine imkan veren termoeleman için açılmış priz nedeniyle o bölgenin soğuk olmasıdır.

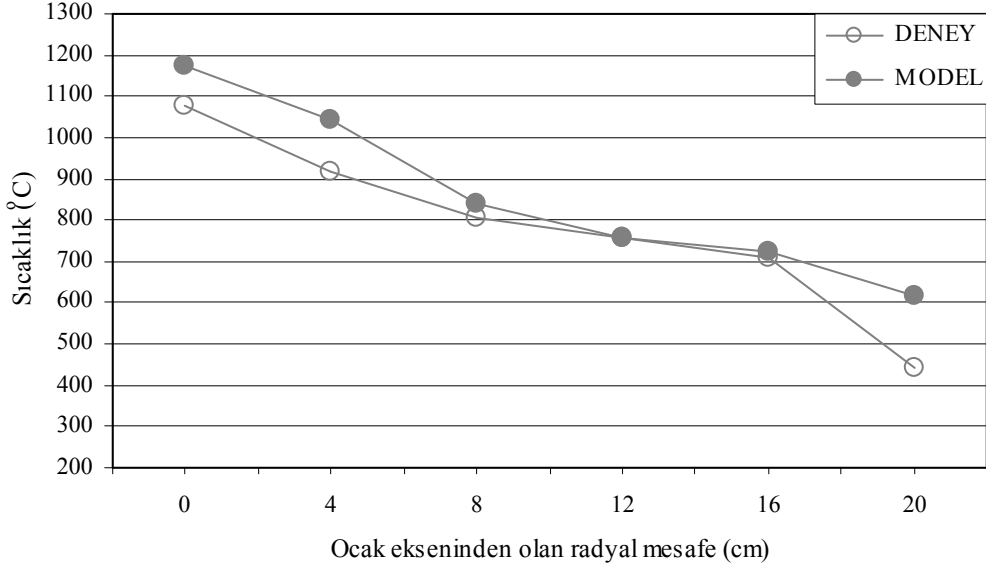


**Şekil 7.21.** T1 noktasından ocak cidarına olan radyal mesafede deney ve model sıcaklık değişimlerinin karşılaştırılması. (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, Kovansız durum, HFK=1.26)

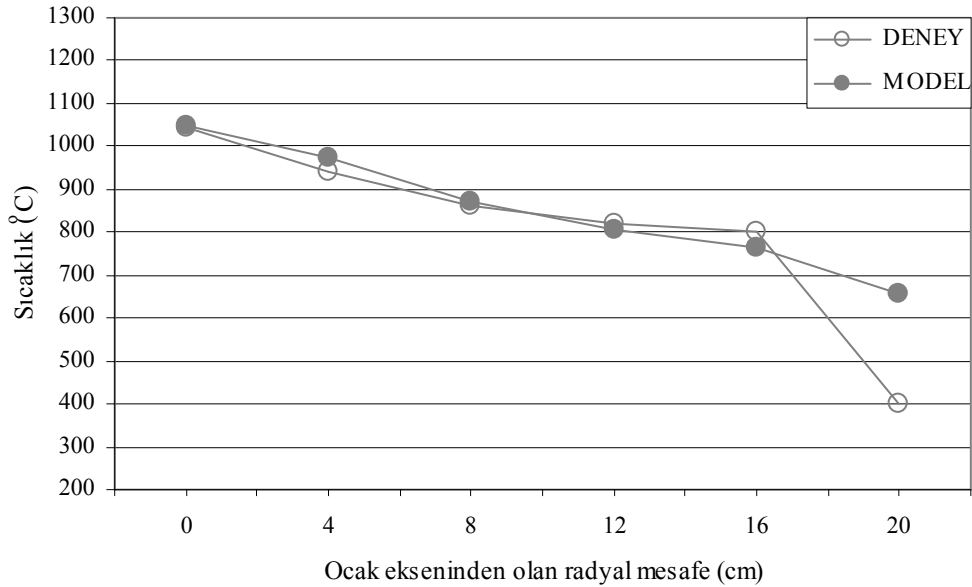
T2 noktasından ocak cidarına doğru radyal bir mesafede ocak sıcaklıklarındaki değişim Şekil 7.22'de deney ve model için verilmiştir. T2 noktasından ocak cidarına doğru gidildikçe deney ve model değerleri birbirine yakın değer almıştır. Bu noktada alev çekirdeğinde sıcaklıklar T1 noktasına göre deneysel değere daha yakındır. 8 cm ile 16 cm mesafeleri arasındaki bölgelerde sıcaklık deneysel verilere çok yakındır. Ocak cidarında ise modelde elde edilen değer deneyde ölçülen değerden 179 °C daha fazladır.

T3 noktasından ocak cidarına doğru radyal bir mesafede ocak sıcaklıklarındaki değişim Şekil 7.23'de deney ve model için verilmiştir. T3 noktasından ocak cidarına doğru gidildikçe deney ve model değerleri birbiriyle hemen hemen aynı değerleri almıştır. Bu noktada alev çekirdeğinden 16 cm mesafesine kadar olan tüm noktalarda

sıcaklık deneysel değerlerle örtüşmektedir. Ocak cidarında ise modelde elde edilen değer deneyde ölçülen değerden 255 °C daha fazladır.

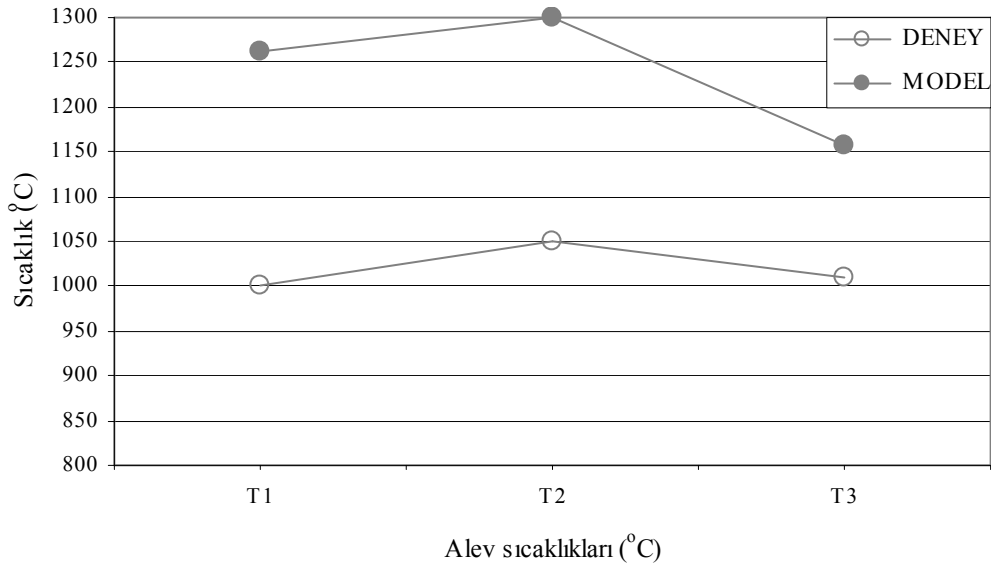


**Şekil 7.22.** T2 noktasından ocak cidarına olan radyal mesafede deney ve model sıcaklık değişimlerinin karşılaştırılması. (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, Kovansız durum, HFK=1.26)



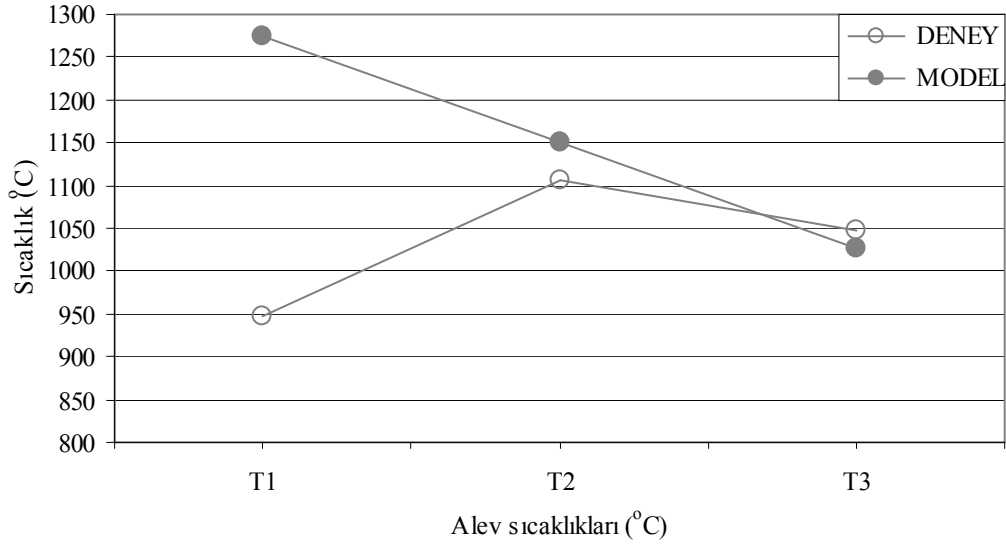
**Şekil 7.23.** T3 noktasından ocak cidarına olan radyal mesafede deney ve model sıcaklık değişimlerinin karşılaştırılması. (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, Kovansız durum, HFK=1.26)

Aynı ocak boyu ve aynı kazan ısıtma kapasitesinde hava fazlalık katsayısının 1.02 değerine düşürülmesi halinde kovansız durum için deney ve modelde elde edilen alev sıcaklıkları Şekil 7.24’de verilmiştir. Model değerlerinde hava fazlalık katsayısının 1.26 değerine göre 50°C’lik bir artış olmuştur. Aynı artış deneylerde de görülmüştür. Hava fazlalık katsayısının 1.02 değerinde T1 ile T2 alev sıcaklıklarında model değerleri deneyde ölçülenlerden 250°C daha yüksek elde edilmiştir. T3 noktasında bu fark 150 °C’ye düşmüştür.



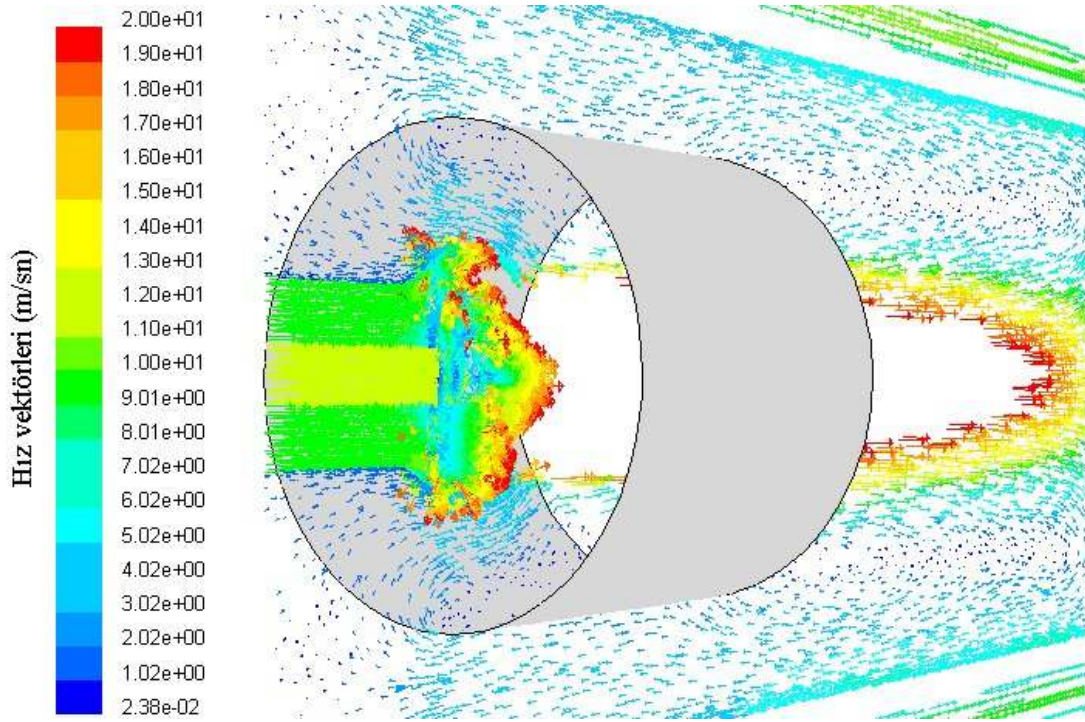
**Şekil 7.24.** Alev sıcaklığı için deney ve model sonuçlarının karşılaştırılması (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, Kovansız durum, HFK=1.02).

Aynı ocak boyu ve aynı kazan ısıtma kapasitesinde hava fazlalık katsayısının 1.26 değerinde çapı ve uzunluğu 30\*20 olan kovan kullanılması halinde deney ve modelde elde edilen alev sıcaklıkları Şekil 7.25’de verilmiştir. Model değerlerinde kovansız duruma göre 20°C’lik bir azalma olmuştur. Aynı kovan için Şekil 7.12’de verilen sıcaklık konturlarında brülöre yakın bölgelerdeki sıcaklık alanlarında da azalmalar olmuştur. Deney değerleri ile karşılaştırma yapıldığında T1 noktası dışında T2 ve T3 sıcaklık değerleri birbirine yakın değerdedir.



**Şekil 7.25.** Alev sıcaklığı için deney ve model sonuçlarının karşılaştırılması (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, 30\*20 kovanı Kovan konumu = 0, HFK=1.26).

Ocakta kovan kullanılması durumunda sıcaklığın azalmasındaki diğer neden ise ocağı terk etmek üzere olan gazların kovan içine yönlendirilerek yeniden resirkülasyon yapmalarıdır. Ocağın arka duvarına çarparak ocağı terk etmek üzere olan duman gazları kovan sayesinde nispeten daha soğuk duman gazlarının alev merkezine yönlendirilmesi sağlanmıştır. Şekil 7.26’da bu durum hız vektörleri ile gösterilmiştir. Çapı ve uzunluğu 30\*20 olan bir kovanda kovandan çıkan akışkan debisi 0.081449 kg/sn olduğuna göre bu debiden hava yakıt debilerinin toplamı çıkarılırsa kovana geri dönen akışkan debisi bulunur. Bu kovan için kovana geri dönen akışkan debisi 0.02174 kg/sn’dir. Bu miktar 25\*20 kovanı için ise 0.03758 kg/sn’dir. Kovan çapı küçüldükçe alev merkezine yönlendirilen gaz debisi artmaktadır. Bu nedenle küçük çaplı kovanlarda alev bölgesi sıcaklıklar düşüktür ve emisyonlar daha azdır. Büyük çaplı kovanlarda ise bu geri dönüş genelde alev bölgesinden daha çok alev etrafına doğru olmaktadır. Bu nedenle R100 bölgesi sıcaklıkları büyük çaplı kovanlarda kovansız duruma göre daha düşüktür.



**Şekil 7.26.** Ocak içinde duman gazlarının alev merkezine yönelmesi (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, 30\*20 kovanı Kovan konumu = 0, HFK=1.26).

## 8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yakıtların yanması sonucu oluşan ürünlerin insan ve çevre sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri, bu yakıtların tüketimi ile orantılı olarak artmaktadır. Bu nedenle yanma sonucu üretilen kirletici bileşenlerin standartlarda öngörülen sınır değerleri sağlayacak şekilde yanma sistemlerinin düzenlenmesi gerekmektedir. Ayrıca yanma sisteminin veriminde azalmaya neden olmadan, bu kirletici bileşenlerin kontrol edilebilmesi için yanma sistemlerinin optimizasyonu gerekmektedir.

Bu çalışmada, yanma odasına dolgu malzemesi yerleştirilmiş sıcak sulu bir kazanda doğal gaz yanması sonucu oluşan emisyonlar ve alev sıcaklıklarındaki değişimler incelenmiştir. Deney kazanı, ocak boyu ayarlanabilir bir kazan olup, maksimum ocak boyunda (790 mm) elde edilen maksimum kazan ısı kapasitesi 116 kW'dır. Deneysel çalışmalar 3 farklı ocak boyunda yapılmıştır. Bu ocak boyları 790, 680 ve 550 mm'dir. Bu ocak boylarında elde edilen maksimum kazan ısı kapasiteleri sırasıyla 116, 87 ve 58 kW'dır. 790 mm ocak boyunda maksimum kazan ısı kapasitesine ilave olarak 87 kW ve 58 kW kazan ısı kapasitelerinde de deneyler yapılmıştır. 680 mm ocak boyunda 87 ve 58 kW, 550 mm ocak boyunda ise 58 ve 43.5 kW kazan ısı kapasitelerinde deneyler yapılmıştır.

Deneylerde diğer bir parametre hava fazlalık katsayısıdır. Baca gazında karbonmonoksitin minimum olduğu duruma karşılık gelen hava fazlalık katsayısı ile stokiyometrik yanmaya karşılık gelen  $HFK=1.00$  değeri deneylerde esas olarak alınmıştır. Deneylerin yapıldığı hava fazlalık katsayısı değerleri 1.02, 1.26 ve 1.475'dir.

Yanma sonucu ocak eksenine boyunca oluşan alev sıcaklıkları incelendiğinde brülöre yakın bölgede alev sıcaklığı orta ve son bölgelerine göre daha düşük değer almıştır. Tüm deneylerde alev maksimum sıcaklığı 1200 °C değerini aşmamıştır. 790 mm ocak boyunda hava fazlalık katsayısının 1.26 değerinde maksimum kazan ısı kapasitesinde (116 kW) brülöre yakın bölgede alev sıcaklığı 850-950 °C, orta bölgede 1050-1200 °C ve uç bölgede ise 1000-1050 °C aralıklarında ölçülmüştür. Aynı ocak boyunda hava fazlalık katsayısının 1.02 değerine düşürülmesiyle brülöre yakın



bölgedeki alev sıcaklığında 50 °C kadar artış olmuştur. Alevin orta ve son bölgelerinde ise sıcaklıkların yukarıda verilen değerler içinde kaldığı tespit edilmiştir. Aynı ocak boyunda 87 ve 58 kW kazan ısıl kapasitelerinde ise alev sıcaklıkları düşmüştür. Bu düşüşe, sabit kalan ocak hacmi içinde yakılan yakıt miktarındaki azalma diğer bir deyişle ocak yükünün azalması neden olmuştur. Aynı ocak boyunda en düşük ısıl kapasitede sıcaklıklar en düşük değeri almıştır. 680 ve 550 mm ocak boylarında ise ocak yükü ve yakıt sarfiyatı 790 mm ocak boyuna göre daha az olduğu için alev sıcaklıkları düşmüştür. Fakat alev sıcaklıkları 790 mm ocak boyundaki deneylerle benzer karakteristik göstermiştir.

790 mm ocak boyunda hava fazlalık katsayısının 1.26 değerinde maksimum kazan ısıl kapasitesinde (116 kW) artan kovan çapı ve boyu ile brülöre yakın bölgenin sıcaklığının arttığı tespit edilmiştir. Küçük çaplı kovanlarda (özellikle 20\*20) bu bölgedeki sıcaklık kovansız duruma göre daha düşüktür. Bu sıcaklık azalmasına sebep kovanın duman gazlarını tekrar alev bölgesine yönlendirmesidir. Özellikle küçük kovanlarda duman gazlarının geri dönüşü küçük çap nedeniyle tam alev merkezine doğru olmaktadır. Ayrıca modelleme çalışmaları küçük çaplı kovanlarda geri dönen duman gazlarının miktarının daha fazla olduğunu göstermiştir. Bu nedenle küçük çaplı kovanlarda alev bölgesinde sıcaklık düşmektedir. Büyük çaplı kovanlarda ise duman gazlarının geri dönüşü alev merkezinden daha çok alev çevresinden olmaktadır. Alevin orta ve uç bölgelerinde ise kovanlı ve kovansız durumda sıcaklıklar birbirine yakın değer almasına rağmen kovanın soğutma etkisi az olmuştur. Kovan konumu alev sıcaklıklarında etkili rol oynamamıştır. 790 mm ocak boyu, 1.26 hava fazlalık katsayısı ve 116 kW kazan ısıl kapasitesi için tespit edilen bu sonuçlar bu ocak boyundaki diğer kazan ısıl kapasiteleri ve hava fazlalık katsayısının 1.02 değeri içinde geçerlidir. 680 mm ve 550 mm ocak boylarında da benzer özellikler görülmüştür. 790 mm ocak boyunda en düşük kazan ısıl kapasitesinde (58 kW) alevin uç bölgesindeki sıcaklık brülöre yakın bölgedeki alev sıcaklığının altındadır. Bu durum azalan yakıt debisi ile alev boyunun ve çapının kısaldığını göstermektedir.

Kovan yüzey sıcaklıklarının ölçümü ise kısa kovanlarda her iki uçtan olmak üzere 2 noktadan yapılırken uzun kovanlarda ilave olarak orta noktalarından da

yapılmıştır. Kovan yüzey sıcaklıklarındaki değişim alev sıcaklıklarından etkilendiği için benzer özellikler göstermiştir. Çapı ve boyu büyük olan kovanlarda kovanın brülöre yakın bölgedeki yüzey sıcaklıkları yüksektir. Kovan yüzey sıcaklıkları 790 mm ocak boyu 116 kW kazan ısıtma kapasitesi ve hava fazlalık katsayısının 1.26 değeri için 600-700 °C arası değerler almıştır. Azalan yakıt miktarı ile alev sıcaklıklarında olduğu gibi kovan yüzey sıcaklıkları da azalma göstermiştir.

Yanma sonucu oluşan emisyonlar bacadan ve yanma odasından yapılan ölçümlerle değerlendirilmiştir. Bacada ölçülen NO<sub>x</sub> emisyonları 790 mm ocak boyunun maksimum kazan ısıtma kapasitesi ve hava fazlalık katsayısının 1.26 değerinde 60-70 ppm arası değerler almıştır. Küçük çaplı kovanlarda bu emisyonlar bu aralıktaki en düşük değerleri almaktadır. Özellikle küçük kovanlarda duman gazlarının alev bölgesine olan geri dönüşü daha fazla olduğundan alev bölgesini soğutucu etki daha fazladır. Ayrıca bu gaz geri dönüşü alev bölgesindeki oksijen kısmi basıncını düşürdüğünden azotoksit emisyonlarını azaltılmasına neden olmaktadır. Hava fazlalık katsayısının azalan değeri ile birlikte bacadan ölçülen azotoksit emisyonlarında 1.26 değerine göre 10-20 ppm azalma olmuştur. Hava fazlalık katsayısının azalan değerlerinde sıcaklık artışı olduğuna göre azotoksit emisyonlarının da artması beklenirdi. Buradaki azalmanın sebebi düşük hava fazlalık katsayısı sonucu azotoksit oluşumunda etkili olan azot ve oksijen miktarlarındaki azalmadır. Aynı ocak boyunda farklı kazan ısıtma kapasitelerinde (87 kW ve 58 kW) ise benzer özellikler mevcuttur. Küçük çaplı kovanlarda düşük emisyon elde edilirken en düşük kazan ısıtma kapasitesinde azotoksit emisyonları azalan yakıt debisi nedeniyle daha düşüktür. 680 mm ve 550 mm ocak boylarında ise aynı özellikler görülmüştür. Fakat azotoksit emisyonları bu ocak boylarında azalan yakıt debisi nedeniyle daha düşüktür.

Yanma sonucu oluşan azotoksit (NO<sub>x</sub>) emisyonları alev sıcaklığındaki artışa paralel olarak artmaktadır. Özellikle 1300°C üzeri sıcaklıklarda bu artış daha fazla olmaktadır. Yanma odasındaki emisyon değişimleri ise R100 ve R175 yarıçaplarında ocak boyunca bazı ölçüm noktalarından elde edilen ölçümlere göre incelenmiştir. Bu ölçümler her iki yarıçap mesafesi içinde ocak ağzından başlamak üzere ocak arkasına doğru her 10 cm'de bir olmak üzere 5 farklı noktada yapılmıştır. Ayrıca bu noktalarda

sıcaklık ölçümleri de yapılmıştır. R100 ölçüm hattı tüm kovanların iç kısmından geçerken R175 ölçüm hattında dış kısımlarından geçmektedir. 790 mm ocak boyunun maksimum kazan ısı kapasitesi ve hava fazlalık katsayısının 1.26 değerinde yanma odası azotoksit emisyon değerleri baca da ölçülen değerlere oldukça yakındır. R100 ölçüm çizgisi boyunca ocak arkasına doğru sıcaklıklarda artış olmaktadır. Tüm bu ölçüm noktalarında kovanlı durumlarda sıcaklıklar kovansız duruma göre daha düşük değerler almıştır. Bu düşüğe kovan nedeniyle duman gazlarının geri dönüşü sebep olmuştur. R100 ölçüm hattı özellikle büyük kovanlarda duman gazlarının geri dönüşünün en yoğun olduğu bölgedir. Bu ölçüm noktalarındaki sıcaklıklarının zaten düşük değerlerde olması azotoksit emisyonlarını çok etkilememiştir. Yine de bu ölçüm noktalarında emisyon değerleri kovansız duruma göre daha düşüktür. R175 ölçüm hattında ise sıcaklıklar bu mesafenin alev merkezine uzak olması nedeniyle R100 ölçüm hattına göre daha düşüktür. Özellikle kovanlı durumlarda kovanın alevi perdelemesi bazı ölçüm noktalarında sıcaklığı düşürmektedir. Bu ölçüm noktalarında azotoksit emisyonları küçük çaplı kovanlarda daha düşük değerdedir. Hava fazlalık katsayısının azalan değeri ile birlikte sıcaklıklardaki artışa rağmen azotoksit emisyonlarında bacada ölçülen değerlere benzer azalma olmuştur. Aynı ocak boyunda farklı kazan ısı kapasitelerinde ve diğer ocak boylarında benzer karakteristik özellikler mevcuttur. Bu deneylerde azalan yakıt miktarı ile azotoksit emisyonlarında düşüş görülmüştür. Kovan konumunun farklı olması azotoksit emisyonlarında etkili rol oynamamıştır.

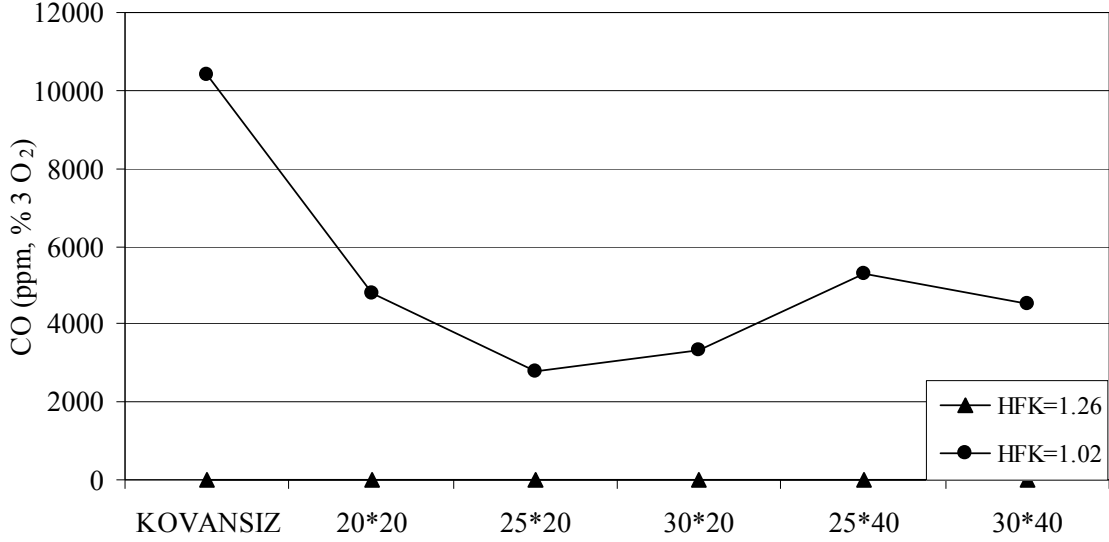
Karbonmonoksit (CO) emisyonları da benzer şekilde bacadan ve yanma odasından olmak üzere ayrı ayrı incelenmiştir. 790 mm ocak boyunun maksimum kazan ısı kapasitesi ve hava fazlalık katsayısının 1.26 değerinde bacadan yapılan ölçümlerde küçük kovanlarda (özellikle 20\*20) CO emisyonları 2 ppm gibi çok düşük değer almıştır. Hava fazlalık katsayısının azalan değeri ile birlikte tüm durumlarda CO emisyonları 2500-10000 ppm aralığında değişim göstermiştir. Burada tüm kovanlı durumlarda kovansız duruma nazaran CO emisyonları daha düşük değerdedir. Aynı ocak boyunda farklı kapasitelerde ise yine 20\*20 kovanı ile düşük CO emisyonu elde edilmiştir. Bu durum diğer ocak boylarında yapılan deneylerde de görülmüştür. Ocak boyundaki azalma bacadaki CO emisyonunu olumsuz etkilemiştir. Küçük ocak boylarında bacada daha fazla CO emisyonu görülmesinin nedeni yakıtın yanmasını

tamamlayacak yeterli hacmi bulamamasından dolayı olmaktadır. Kovanların ocak içerisinde 9 cm konumunda bulunmaları halinde CO emisyonu 0 cm konumuna kıyasla artış göstermiştir. Kovanın 0 cm konumunda bulunması halinde brülöre yakın bölgedeki alev bölgesindeki yanmamış yakıt partiküllerinin ocak çıkışına doğru yönelmesi kovan tarafından önlenmektedir. 9 cm konumunda ise bu açıklıktan duman borularına doğru olan kaçış emisyonları arttırmaktadır.

Yanma odası içindeki CO emisyonu değişimleri ise azotoksit emisyonlarının ölçüldüğü ölçüm noktalarından elde edilen değerlere göre incelenmiştir. 790 mm ocak boyunun maksimum kazan ısı kapasitesi ve hava fazlalık katsayısının 1.26 değerinde ocak arkasına doğru gidildikçe CO emisyonlarında artış olmaktadır. Bu durum yanmanın bu bölgelere kadar devam ettiğinin bir göstergesidir. Ocak cidarına yakın bölgelerde (R175) CO emisyonu aleve yakın bölgelere (R100) nazaran daha düşüktür. Uzun kovanlarda emisyonlar artış göstermektedir. Küçük çaplı kovanlarda CO emisyonları daha düşük değerdedir. Kovanların alevi çevrelemesi böylece yakıt ile havanın daha iyi karışarak yanmasını sağlamaları emisyonların azalmasında etkili rol oynamaktadır. Kovanların 9 cm konumlarında bulunmaları emisyonları arttırmaktadır. Hava fazlalık katsayısının azalan değeri ile birlikte R100 ölçüm hattında CO emisyonları hava fazlalık katsayısının 1.26 değerine göre azalma göstermektedir. Bu durum R175 ölçüm hattı için tam tersidir. Bunun nedeni CO emisyonu oluşumunun azalan hava miktarı ile birlikte ocak cidarına doğru radyal yönde yayılmasıdır. Bu nedenle özellikle düşük hava fazlalık katsayısı değerlerinde kovanın bu çevreleme etkisi CO emisyonlarında düşüşe neden olmaktadır. Aynı ocak boyunda farklı kapasitelerde ise durum benzer özellikler taşımakla birlikte azalan yakıt debisi CO emisyonlarında azalmaya neden olmuştur. Bu karakteristik özellikler diğer ocak boylarında yapılan deneyler içinde geçerlidir.

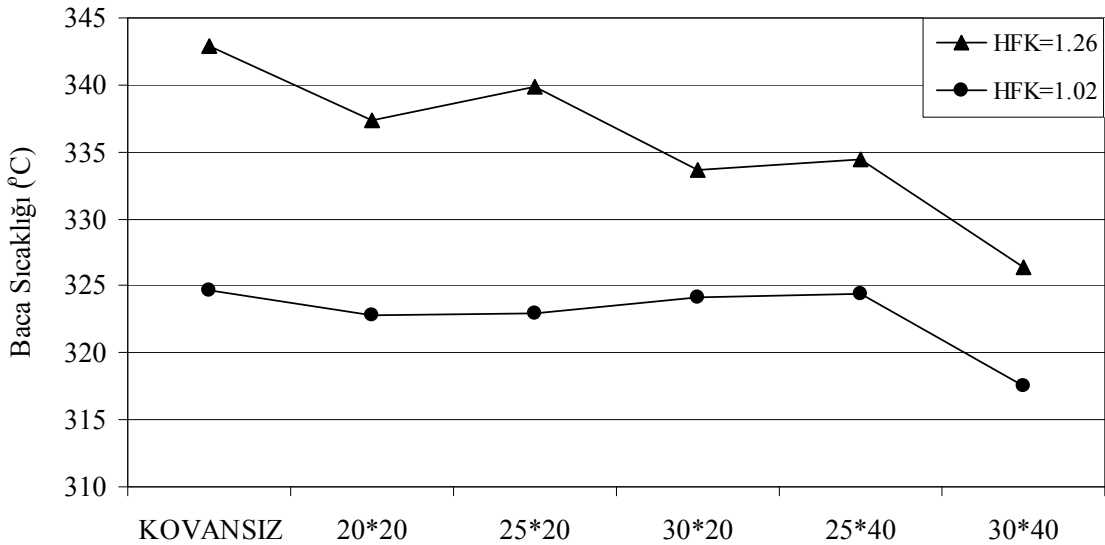
CO emisyonlarının HFK ile değişimleri Şekil 8.1'de verilmiştir. Hava fazlalık katsayısının 1.26 değerinde tüm durumlarda CO emisyonları 0-40 ppm gibi düşük bir aralıktadır. Fakat hava fazlalık katsayısının 1.02 değerinde tüm kovanlı durumlarda CO emisyonları kovansız duruma göre çok daha düşük değerdedir. Kovan kullanılması durumunda CO emisyonlarında % 50'ye yakın bir azalma olmaktadır. Bu nedenle

ocakta kovan kullanılması kazanın daha düşük bir hava fazlalık katsayısı ile çalışılmasına olanak sağlayacaktır. Daha düşük hava fazlalık katsayısı ile çalışılması azotoksit emisyonlarının azalmasına neden olacaktır.



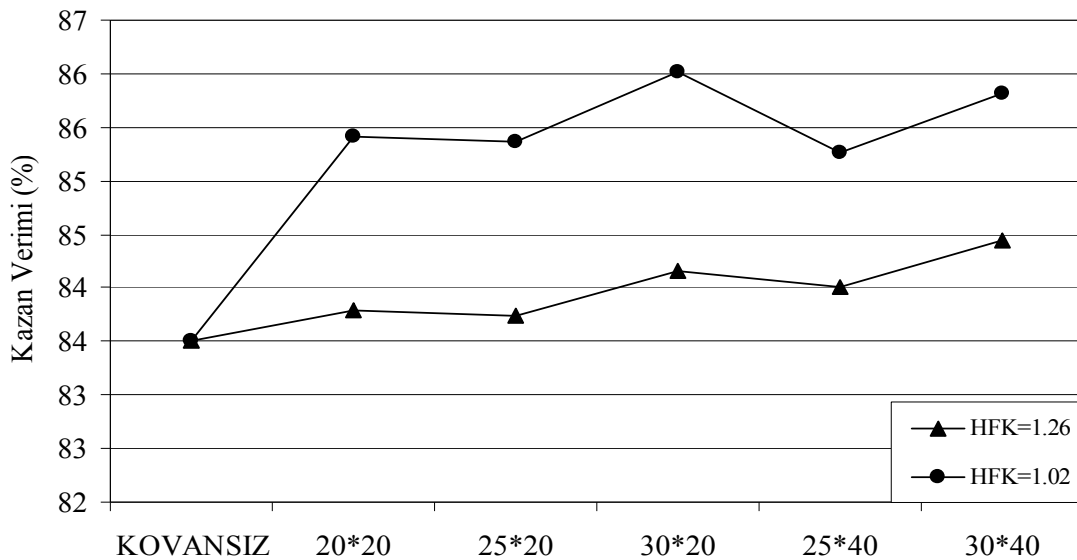
Şekil 8.1. CO emisyonlarının HFK ile değişimi (790 mm ocak boyu, anma ısı gücü)

Ayrıca ocakta kovan kullanılması ile sağlanan düşük hava fazlalık katsayısı ile yanmanın bir yararı da baca sıcaklığının daha az olmasıdır. Şekil 8.2’de görüldüğü gibi hava fazlalık katsayısının 1.02 değerinde baca sıcaklıkları daha düşük olduğu için baca kaybı daha az olacak ve dolayısıyla kazan verimi artacaktır.



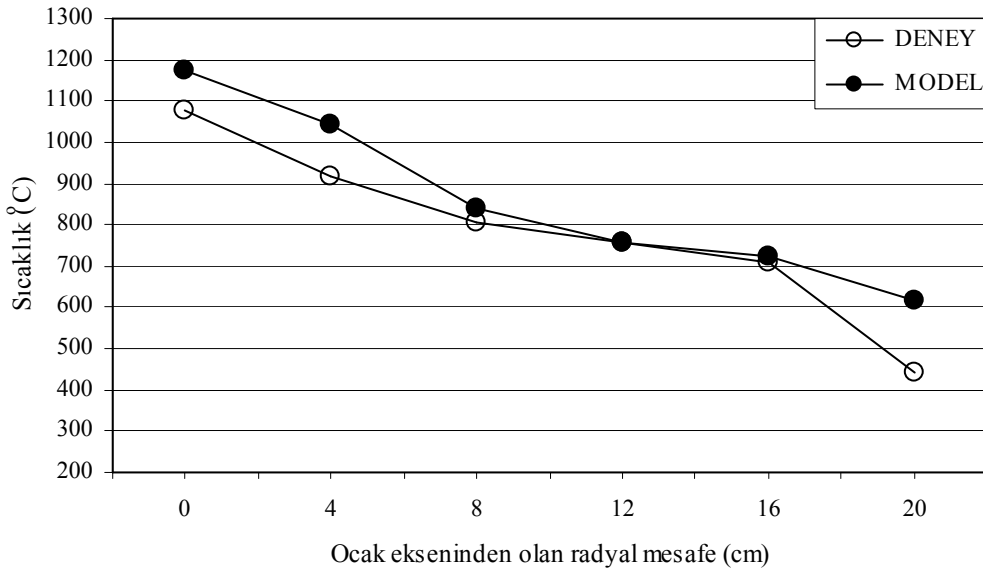
Şekil 8.2. Baca sıcaklığının HFK ile değişimi (790 mm ocak boyu, anma ısı gücü)

Ocak içerisine konulan dolgu malzemeleri (kovan) ocak sıcaklığını düşürerek azotoksit emisyonlarını azaltması yanı sıra ocakta katı yüzey ışınlı ile ocak cidarına olan ısı transferini arttırlar. Analitik ve modelleme çözümleri kovan kullanılması ile ocak cidarına verilen enerjinin kovansız durumdan daha yüksek olduğunu göstermektedir. Böylelikle kazan ısı verimi artmaktadır. Kazan ısı verimi baca kaybı ve eksik yanma kaybı dikkate alınarak ölçülen değerlerden hesaplanmıştır. Bu hesaplarda sıcak cidar kaybı ihmal edilmiştir. 790 mm ocak boyunun maksimum kazan ısı kapasitesi ve hava fazlalık katsayısının 1.26 değerinde tüm kovanlı durumlarda kazan ısı verimi kovansız duruma göre % 1-2 oranında artış göstermiştir. Şekil 8.3'de görüleceği üzere bu artış hava fazlalık katsayısının 1.02 değerinde biraz daha fazladır. Verimdeki bu artışın nedeni kovan kullanımının CO emisyonlarındaki ve baca sıcaklığındaki azalmaya neden olmalarıdır. Özellikle uzun kovanlarda baca sıcaklığı daha düşük olmaktadır. Kovan yüzey alanındaki artış ocak cidarına olan ısı transferini arttırmakta ve böylelikle baca sıcaklığı düşmektedir. Kovanların 0 cm konumunda bulunmaları halinde verim 9 cm konumuna göre daha yüksektir. Aynı ocak boyunda farklı kazan ısı kapasitelerinde ise verim artışı % 90'lara çıkmıştır. 680 mm ve 550 mm ocak boylarında da elde edilen verimler daha yüksektir. Verimdeki bu artışa bu ocak boylarında yakıt miktarının az olmasından dolayı CO emisyonlarının az olması neden olmuştur.



Şekil 8.3. Kazan veriminin HFK ile değişimi (790 mm ocak boyu, anma ısı gücü)

Bu çalışmada deney kazanı FLUENT 6.1.22 programı ile modellenmiştir. Model çözümlerinde elde edilen sonuçların deney sonuçlarına olan yakınlığı tespit edilmiştir. Modelde elde edilen alev sıcaklıkları deney sonuçlarına göre özellikle brülöre yakın alev bölgesinde 250°C daha sıcaktır. Fakat alevin orta ve uç bölgelerinde deneysel değerlere % 5'lik bir hata altında yaklaşılmıştır. Kovanlı modelleme çözümlerinde brülöre yakın alev bölgesinde bazı küçük alanlarda oluşan 1320°C civarı sıcaklıkların azaldığı görülmüştür. Bu sıcaklık azalmasına kovandan cidara olan ışınlama ile ısı transferi neden olmaktadır. Alev bölgesinden ocak cidarlarına doğru gidildikçe sıcaklıkta azalma olmuştur. Bu noktalarda elde edilen sıcaklıklar deney sonuçları ile örtüşmektedir (Şekil 8.4).

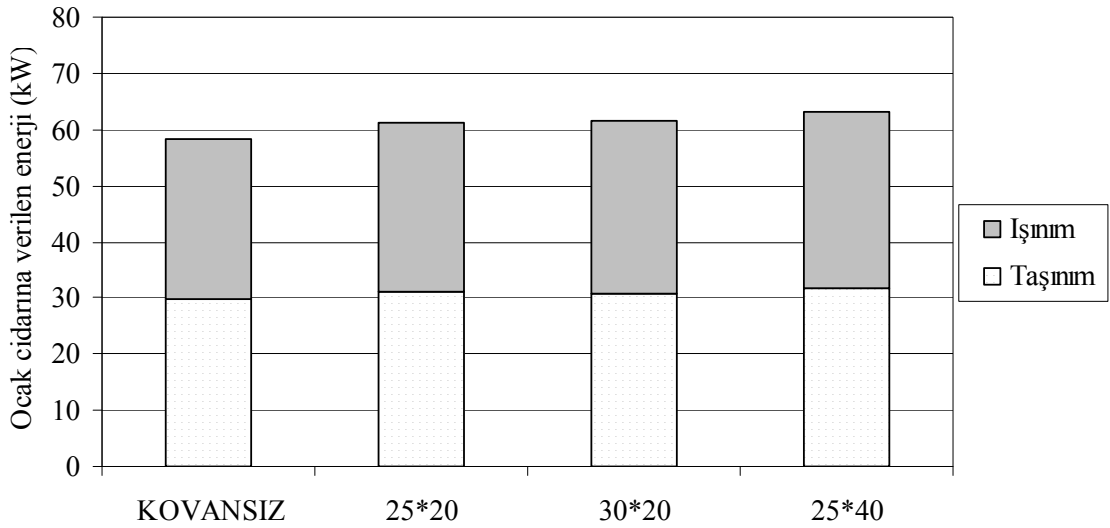


**Şekil 8.4.** Alev merkezinden ocak cidarına doğru deney ve model sıcaklıklarının karşılaştırılması (790 mm ocak boyu, anma ısıl gücü)

$NO_x$  emisyon dağılımında alev bölgesinde artış gözlenirken ocağın diğer bölümlerinde ve bacada aynı değerleri almıştır. Deney sonuçlarına göre ise azotoksit emisyonları 10 ppm kadar düşük elde edilmiştir. Kovanlı durumda ise deneylerde olduğu gibi bir miktar emisyonlarda azalma olmuştur. Model çözümlerinde kovanların duman gazlarının tekrar alev bölgesine yönlendirmesi hız vektörleri ile tespit edilebilmektedir. Küçük çaplı kovanlarda geri dönen duman gazı miktarının daha fazla olduğu hesaplanmıştır.

Karbonmonoksit emisyonlarının özellikle yakıt çıkış bölgesinden başlamak üzere alevin brülöre yakın bölgelerinde daha fazla olduğu görülürken ocağın diğer bölgelerinde ve bacada çok düşük değer almıştır. Model sonuçlarında karbonmonoksit emisyonunun düşük değerde kalması modelde hava ile yakıt karışımının daha iyi sağlanmasından kaynaklanmaktadır.

Modelleme çözümlerinde bazı kovanlar ve kovansız durumda ocak cidarına verilen enerji Şekil 8.5’de gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere ocak cidarına olan toplam ısı transferi kovanlı durumlarda artmaktadır. Ayrıca kovan yüzey alanı arttıkça ocak cidarına olan ışımla olan ısı transferi artmaktadır.



**Şekil 8.5.** Modelde ocak cidarına verilen enerji (790 mm ocak boyu, anma ısı gücü)

Sonuç olarak gaz yakıtlı bir ocakta kovan kullanılması halinde deney ve modelde elde edilen bulguları şöyle sıralayabiliriz.

1- Ocakta kullanılan kovan adı verilen dolgu malzemeleri CO emisyonlarını hava fazlalık katsayısının 1.0 değerine yakın olması halinde yaklaşık % 50 oranında azaltmaktadır. Böylelikle bu kovanlar kazanın daha düşük bir hava fazlalık katsayısı ile çalışmasına olanak sağlayacaktır.



2- Düşük hava fazlalık katsayısı ile çalışma baca sıcaklığının azalmasına dolayısıyla baca kaybının az olmasına neden olacaktır.

3- Düşük hava fazlalık katsayısı ile çalışma azotoksit oluşumunda önemli rol oynayan azot miktarının da azalmasına yol açacaktır.

4- Ocakta kovan kullanılması alev sıcaklığını düşürerek azotoksit emisyonlarının azalmasına neden olmuştur.

5- Kovanlar ocakta ışınlama ile ısı transferini artırarak kazan veriminin artmasını sağlamaktadırlar. Kovan yüzey alanı arttıkça ocak cidarına olan ışınlama ile ısı transferi artmaktadır. Ocakta kovan kullanılması halinde kazan verimi % 1 -5 mertebelerinde artış göstermektedir.

6- Alev geri dönüşlü bir kazanda kovan kullanılması halinde kovanlar ocağı terk etmek üzere olan duman gazlarını tekrar alev bölgesine doğru yönlendirmektedir. Alev bölgesine yönelen bu gazlar bu bölgenin soğumasına neden olmaktadır. Alev bölgesinin soğuması ısıl azotoksit oluşumunu azaltmaktadır.

7- Duman gazlarının geri dönüşü alev bölgesindeki oksijen kısmi basıncını düşürdüğünden azotoksit emisyonlarının azalmasına yol açmaktadır.

8- Modelde elde edilen azotoksit emisyonları deneyde ölçülen değerlere oldukça yakındır. CO emisyonları ise alev bölgesinde yoğun olup deneyle örtüşmektedir. Kazanın diğer bölgelerinde ise modelde elde edilen CO emisyonları düşük değerlidir. Modelde elde edilen alev sıcaklıkları ise alevin ön bölgesi hariç diğer bölgelerde deney değerlerine oldukça yakındır.

9- Model çözümlerinde kovanın neden olduğu duman gazı geri dönüşünün miktarı hesaplanabilmektedir.

10- Model çözümlerinde ocak cidarına olan ışınlama ile ısı transferi hesaplanabilmektedir.

Yakma sistemlerinin yanma odalarında kullanılan dolgu malzemeleri gibi bu tür ekonomik çözümler kazan ısıl verimini artırırken çevreye bırakılan emisyonları azaltmaktadır. İnsan sağlığı için bu tür uygulamaların kullanılması kaçınılmazdır. Ayrıca dışarıya bağımlı olarak kullandığımız doğal gaz yakıtının daha verimli yakılması ülke ekonomimize çok katkı sağlayacaktır. Bu tür modüler tasarımların yüksek kapasiteli kazanların yanma odalarında kullanılmaları emisyonları ve kazan verimini

daha da olumlu yönde etkileyecektir. Sadece gaz yakıtlı kazanlarda değil sıvı yakıtlı kazanlarda da kullanmak mümkündür. Ayrıca bu dolgu malzemelerinin alev geri dönüşlü olmayan kazanlarda da kullanılması ile katı yüzey ışınlımlı sağlanarak kazan verimi artacaktır. Bu tür dolgu malzemelerinin geometrik şekli bu çalışmada olduğu gibi silindirik değil farklı geometrik şekillerde yapılarak emisyonlardaki ve kazan verimindeki değişim incelenebilir. Bunun için sayısal akışkanlar dinamiği alanındaki programlar kullanılması mümkündür. Yine bu programlar kullanılarak yanma odalarında kazan verimini arttıran, yanma sonucu oluşan emisyonları azaltan optimum tasarımlara karar verilebilir. Sadece kazanın yanma odasında değil yakıcıda da tasarımlara gidilebilir. Optimum yakıt hava karışımını sağlayacak yakıcıların tasarımı verimde artışa sebep olacak ve oluşan emisyonları en aza indirgeyecektir.

**KAYNAKLAR**

Akgüngör, A. A., 2000, Doğal gaz yanması ve emisyon oluşumu, İTÜ Yüksek Lisans Tezi.

Alemli, S.,1998, Doğal gazın yanma mekanizmasının incelenmesi, İTÜ Yüksek Lisans Tezi

Anonim a, (<http://www.dtm.gov.tr/ead/ekonomi/sayi%20/teut.htm>)

Anonim b, ([www.botas.gov.tr](http://www.botas.gov.tr))

Arısoy, A., Çelik, C., 1995, Doğal gaz yanmasında azotoksit oluşumu, Doğal Gaz Dergisi, Sayı : 40,

Aydın, Ö., Böke, Y.E., Alanyalı, S., 2005, Emission control of a natural gas combustion system, Second International On Applied Thermodynamics, Yıldız Technical University, İstanbul, 323-331.

Ballester, J. M., Dopata, C., Fueyo, N., 1997, Investigation of low-NOx strategies for natural gas combustion, Fuel, 76, 435-446.

Bilger, R.W., Stamer, S.H., Kee, R.J., 1990. On reduced mechanism for methane air combustion in nonpremixed flames, Combustion and Flame, 80,135-149.

Borat, O., 1982, Termokimyasal Denge ve Yanma, İTÜ Makina Fakültesi, İstanbul.

Borat, O., 1983, Yanma Stokiometrisi , İTÜ Makina Fakültesi, İstanbul.

Büyüktür, A. R., 1991, Termodinamik uygulama esasları Cilt : 2, Uludağ Üniversitesi, 695 s.

Çelik, Ü., 1992, Genel ve metan yanma proseslerinde azotoksit bileşenlerinin emisyonu, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi.

Çengel, Y. A., Boles, M. A., 1996, Mühendislik yaklaşımıyla Termodinamik, (Çev. T. Derbentli), McGraw –Hill, 867 s.

Dağsöz, A. K., 1999, Doğal gaz tanımı cihazları devreleri hesabı, Demirdöküm Teknik Yayınları : 3, 199 s.

Doğal Gaz Tesisatı, Isısan Çalışmaları No.75, 104 s.

Doğal gaz ve LPG tesisatı, Isısan Çalışmaları No : 172, 165 s.

Dupont, V., Pourkashanian, M., Williams, A., Woolley, R., 1993, The reduction of NOx formation in natural gas burner flame, Fuel, 72, 497-503.

Fenimore, C. P., 1964, Chemistry in Premixed Flames, Pergamon, London.

Fluent Version 6.1.22, 2003, Fluent Inc., 10 Cavendish Court, Centerra Resource Park, Lebanon, NH 03766, USA.

Fluent Incorporated, 2003, Fluent 6.1.22, User's Guide.

Fluent Incorporated, 2003, Gambit 2.1, User's Guide.

Genceli, O. F., 2004, Çözümlü ısı ışıınımı problemleri, Birsen yayınevi, İstanbul, 300 s.,

Hepbaşlı, A., 1991, Doğal gaz yakıtlı örnek bir tesiste duman gazı geri beslemesiyle azot oksitleri emisyonlarının azaltılması, Isı Bilimi ve Tekniği 8. Ulusal Kongresi, Anadolu Üniversitesi.

İlbaş, M., Yılmaz, İ., Yıldırım, A., 2003, Ocak sıcaklığının NO<sub>x</sub> emisyonu üzerindeki etkisinin nümerik olarak incelenmesi” Mühendis ve Makina, Sayı : 524.

İlbas, M., 2005, The effect of thermal radiation and radiation models on hydrogen-hydrocarbon combustion modeling, International Hydrogen Energy , Vol.30, 1113-1126.

İlbas, M., Yılmaz, İ., Kaplan, Y., 2005, Investigations of hydrogen and hydrocarbon composite fuel combustion and NO<sub>x</sub> emission characteristics in a model combustor, Int. J. Hydrogen Energy, Vol.30, 1139-1147.

Karakoç, H., 2000, Brülörler, Demirdöküm Teknik Yayın No : 7, 106 s.

Keramida, E. P., Liakos, M. A., Founti, M. A., Boudouvis, N. C., 2000, Radiative heat transfer in natural gas-fired furnaces, International Journal Of Heat and Mass Transfer, 43, 1801-1809.

Li., S. C., Williams, F. A., 1999, NO<sub>x</sub> Formation in two-stage methane-air flames, Combustion and Flame, 118, 399-414.

Mathematica 5.0.

Miller, J. A., Bowman, C. T., Mechanism and modeling of nitrogen chemistry in combustion, Prog. Energy Combustion, 15, 287-338.

Mishra, D. P., 2003, Effects of initial temperature on the structure of laminar CH<sub>4</sub> –air premixed flames, Fuel, 82, 1471-1475.

Muzio, L. J., Quartucy, G. C., 1997, Implementing NO<sub>x</sub> control: Research to application, Prog. Energ. Combustion Science, vol.23, 233-266.

Nishimura, M., Suzuki, T., Nakanishi, R., Kitamura, R., 1997, Low NO<sub>x</sub> Combustion under high temperature condition in an industrial furnace, Energy Convers. Mgmt. Vol 38 No: 10-13, 1353-1363.

Oğan, S., 2003, Bir enerji stratejisizliği örneği, Doğal Gaz Dergisi, Sayı : 89, 34-36.

Onat, K., 1969, Buhar kazanlarının ısıl hesapları, İTÜ Kütüphanesi, İstanbul.

Onat, K., Genceli, O. F., Arısoy, A., 1998, Buhar kazanlarının ısıl hesapları, Teknik Yayıncılık Tanıtım A.Ş., 378 s.

Özdoğan, A., 1998, NO<sub>x</sub> emisyonları, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi.

Öztürk, A., Yavuz, H., 1995, Uygulamalarla ısı geçişı : Tanıtım ve ışınım, Çağlayan Kitabevi, İstanbul, 253 s.

Shigeta, E., Kanazawa, H., Koizumi, T., Nagata, T., 1991, AFRC/JFRC, International Conference on Environmental Control of Combustion Process” vol 28.

Suzukawa, Y., Sugiyama, S., Hino, Y., Ishioka, M., Isao, M., 1997, Improvement and NO<sub>x</sub> reduction by hghly peheated air combustion, Energy Conver. Mgmt. Vol 38, 1061-1071.

Taglia, C. D., Gass, J., Dreher, H., 2001, Optimization of a low- NO<sub>x</sub> combustor chamber using CFD simulations, Progress in Computational Fluid Dynamics, vol.1, 117-130.

Testo, 2003, Industry for instrumentation, Germany, 322 s.

Topaloğlu, B., Resuloğlu, G., 1997, Alev borulu kazanlarda azotoksitlerin oluşumu ve hesaplanması, 11.Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, 53-62.

TS 11392 EN 676, 1999, Brülörler-Vantilatörlü-Gaz Yakıtlar İçin, TSE, 51 s.

Tucer, S., 2005, Katı yüzey ışınlamı ile gaz yakıtlı ocaklarda ısı geçişinin artırılması, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.

Turns., S. R., 1995, Understanding NO<sub>x</sub> formation in nonpremixed flames : Experiments And Modeling, Prog. Energy Combustion, 21, 361-385.

Turns, S. R., 1996, An introduction to combustion, McGraw-Hill, Inc., New York, 564 p.

Turns, S. R., 2000, An introduction to combustion, McGraw-Hill, Inc., New York, 675 p.

Waly, M.M.Y., Ibrahim, S.M.A., Li, S.C., Williams, F.A., 2001, Brief Communication : Structure of two-stage flames of natural gas with air, Combustion and Flame, 125, 1217-1221.

Warnatz, J., 1989. Combustion and Science Technology 26, 203

Yetsan A.Ş., 1995, NO<sub>x</sub> azaltma teknikleri, Doğal Gaz Dergisi, Sayı : 40.

Yılmaz, Ş., 2001 Yanma odasının modellenmesi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi.

Zeynalaov, M. A., Yüksel, B., Bulgan, A. T., 1993, Doğal gaz yakıcı dizaynının yanmanın iyileştirilmesine etkisi, Yanma ve Hava Kirliliği Kontrolü II. Ulusal Sempozyumu, Hava kalitesinin kontrolünde ulusal hedef ve stratejiler ve sektörel uygulamalar paneli, Eskişehir.

## **EKLER**

EK-I. Metan Yanma Mekanizmaları

EK-II. Kazan Isıl Hesapları



EK-I

METAN YANMA MEKANİZMALARI (GRI Mech 2.11 Turns, 2000)

No.	Reaksiyon	A	b	E
<i>C-H-O Reaksiyonları</i>				
1	$O + O + M \rightarrow O_2 + M$	1.20E+17	-1.0	0.0
2	$O + H + M \rightarrow OH + M$	5.00E+17	-1.0	0.0
3	$O + H_2 \rightarrow H + OH$	5.00E+04	2.67	6,290
4	$O + HO_2 \rightarrow OH + O_2$	2.00E+13	0.0	0.0
5	$O + H_2O_2 \rightarrow OH + HO_2$	9.63E+06	2.0	4,000
6	$O + CH \rightarrow H + CO$	5.70E+13	0.0	0.0
7	$O + CH_2 \rightarrow H + HCO$	8.00E+13	0.0	0.0
8 <sup>b</sup>	$O + CH_2(S) \rightarrow H_2 + CO$	1.50E+13	0.0	0.0
9 <sup>b</sup>	$O + CH_2(S) \rightarrow H + HCO$	1.50E+13	0.0	0.0
10	$O + CH_3 \rightarrow H + CH_2O$	8.43E+13	0.0	0.0
11	$O + CH_4 \rightarrow OH + CH_3$	1.02E+09	1.5	8,600
12	$O + CO + M \rightarrow CO_2 + M$	6.02E+14	0.0	3,000
13	$O + HCO \rightarrow OH + CO$	3.00E+13	0.0	0.0
14	$O + HCO \rightarrow H + CO_2$	3.00E+13	0.0	0.0
15	$O + CH_2O \rightarrow OH + HCO$	3.90E+13	0.0	3,540
16	$O + CH_2OH \rightarrow OH + CH_2O$	1.00E+13	0.0	0.0
17	$O + CH_3O \rightarrow OH + CH_2O$	1.00E+13	0.0	0.0
18	$O + CH_3OH \rightarrow OH + CH_2OH$	3.88E+05	2.5	3,100
19	$O + CH_3OH \rightarrow OH + CH_3O$	1.30E+05	2.5	5,000
20	$O + C_2H \rightarrow CH + CO$	5.00E+13	0.0	0.0
21	$O + C_2H_2 \rightarrow H + HCCO$	1.02E+07	2.0	1,900
22	$O + C_2H_2 \rightarrow OH + C_2H$	4.60E+19	-1.41	28,950
23	$O + C_2H_2 \rightarrow CO + CH_2$	1.02E+07	2.0	1,900
24	$O + C_2H_3 \rightarrow H + CH_2CO$	3.00E+13	0.0	0.0
25	$O + C_2H_4 \rightarrow CH_3 + HCO$	1.92E+07	1.83	220
26	$O + C_2H_5 \rightarrow CH_3 + CH_2O$	1.32E+14	0.0	0.0
27	$O + C_2H_5 \rightarrow OH + C_2H_3$	8.98E+07	1.92	5,690
28	$O + HCCO \rightarrow H + CO + CO$	1.00E+14	0.0	0.0
29	$O + CH_2CO \rightarrow OH + HCCO$	1.00E+13	0.0	8,000
30	$O + CH_2CO \rightarrow CH_2 + CO_2$	1.75E+12	0.0	1,350
31	$O_2 + CO \rightarrow O + CO_2$	2.50E+12	0.0	47,800
32	$O_2 + CH_2O \rightarrow HO_2 + HCO$	1.00E+14	0.0	40,000
33	$H + O_2 + M \rightarrow HO_2 + M$	2.80E+18	-0.86	0.0
34	$H + O_2 + O_2 \rightarrow HO_2 + O_2$	3.00E+20	-1.72	0.0
35	$H + O_2 + H_2O \rightarrow HO_2 + H_2O$	9.38E+18	-0.76	0.0
36	$H + O_2 + N_2 \rightarrow HO_2 + N_2$	3.75E+20	-1.72	0.0
37	$H + O_2 + Ar \rightarrow HO_2 + Ar$	7.00E+17	-0.8	0.0
38	$H + O_2 \rightarrow O + OH$	8.30E+13	0.0	14,413
39	$H + H + M \rightarrow H_2 + M$	1.00E+18	-1.0	0.0
40	$H + H + H_2 \rightarrow H_2 + H_2$	9.00E+16	-0.6	0.0
41	$H + H + H_2O \rightarrow H_2 + H_2O$	6.00E+19	-1.25	0.0
42	$H + H + CO_2 \rightarrow H_2 + CO_2$	5.50E+20	-2.0	0.0
43	$H + OH + M \rightarrow H_2O + M$	2.20E+22	-2.0	0.0
44	$H + HO_2 \rightarrow O + H_2O$	3.97E+12	0.0	671
45	$H + HO_2 \rightarrow O_2 + H_2$	2.80E+13	0.0	1,068
46	$H + HO_2 \rightarrow OH + OH$	1.34E+14	0.0	635

No.	Reaksiyon	A	b	E
<i>C-H-O Reaksiyonları (devamı)</i>				
47	$H + H_2O_2 \rightarrow HO_2 + H_2$	1.21E + 07	2.0	5,200
48	$H + H_2O_2 \rightarrow OH + H_2O$	1.00E + 13	0.0	3,600
49	$H + CH \rightarrow C + H_2$	1.10E + 14	0.0	0.0
50	$H + CH_2 (+M) \rightarrow CH_3 (+M)$		basınca bağı	
51 <sup>b</sup>	$H + CH_2(S) \rightarrow CH + H_2$	3.00E + 13	0.0	0.0
52	$H + CH_3 (+M) \rightarrow CH_4 (+M)$		basınca bağı	
53	$H + CH_4 \rightarrow CH_3 + H_2$	6.60E + 08	1.62	10,840
54	$H + HCO (+M) \rightarrow CH_2O (+M)$		basınca bağı	
55	$H + HCO \rightarrow H_2 + CO$	7.34E + 13	0.0	0.0
56	$H + CH_2O (+M) \rightarrow CH_2OH (+M)$		basınca bağı	
57	$H + CH_2O (+M) \rightarrow CH_3O (+M)$		basınca bağı	
58	$H + CH_2O \rightarrow HCO + H_2$	2.30E + 10	1.05	3,275
59	$H + CH_2OH (+M) \rightarrow CH_3OH (+M)$		basınca bağı	
60	$H + CH_2OH \rightarrow H_2 + CH_2O$	2.00E + 13	0.0	0.0
61	$H + CH_2OH \rightarrow OH + CH_3$	1.20E + 13	0.0	0.0
62 <sup>b</sup>	$H + CH_2OH \rightarrow CH_2(S) + H_2O$	6.00E + 12	0.0	0.0
63	$H + CH_3O (+M) \rightarrow CH_3OH (+M)$		basınca bağı	
64 <sup>b</sup>	$H + CH_2OH \rightarrow CH_2(S) + H_2O$	3.40E + 06	1.6	0.0
65	$H + CH_3O \rightarrow H_2 + CH_2O$	2.00E + 13	0.0	0.0
66	$H + CH_3O \rightarrow OH + CH_3$	3.20E + 13	0.0	0.0
67 <sup>b</sup>	$H + CH_3O \rightarrow CH_2(S) + H_2O$	1.60E + 13	0.0	0.0
68	$H + CH_3OH \rightarrow CH_2OH + H_2$	1.70E + 07	2.1	4,870
69	$H + CH_3OH \rightarrow CH_3O + H_2$	4.20E + 06	2.1	4,870
70	$H + C_2H (+M) \rightarrow C_2H_2 (+M)$		basınca bağı	
71	$H + C_2H_2 (+M) \rightarrow C_2H_3 (+M)$		basınca bağı	
72	$H + C_2H_3 (+M) \rightarrow C_2H_4 (+M)$		basınca bağı	
73	$H + C_2H_3 \rightarrow H_2 + C_2H_2$	3.00E + 13	0.0	0.0
74	$H + C_2H_4 (+M) \rightarrow C_2H_5 (+M)$		basınca bağı	
75	$H + C_2H_4 \rightarrow C_2H_3 + H_2$	1.325E + 06	2.53	12,240
76	$H + C_2H_3 (+M) \rightarrow C_2H_6 (+M)$		basınca bağı	
77	$H + C_2H_3 \rightarrow C_2H_4 + H_2$	2.00E + 12	0.0	0.0
78	$H + C_2H_6 \rightarrow C_2H_5 + H_2$	1.15E + 08	1.9	7,530
79 <sup>b</sup>	$H + HCCO \rightarrow CH_2(S) + CO$	1.00E + 14	0.0	0.0
80	$H + CH_3CO \rightarrow HCCO + H_2$	5.00E + 13	0.0	8,000
81	$H + CH_3CO \rightarrow CH_3 + CO$	1.13E + 13	0.0	3,428
82	$H + HCCOH \rightarrow H + CH_2CO$	1.00E + 13	0.0	0.0
83	$H_2 + CO (+M) \rightarrow CH_2O (+M)$		basınca bağı	
84	$OH + H_2 \rightarrow H + H_2O$	2.16E + 08	1.51	3,430
85	$OH + OH (+M) \rightarrow H_2O_2 (+M)$		basınca bağı	
86	$OH + OH \rightarrow O + H_2O$	3.57E + 04	2.4	-2110
87	$OH + HO_2 \rightarrow O_2 + H_2O$	2.90E + 13	0.0	-500
88	$OH + H_2O_2 \rightarrow HO_2 + H_2O$	1.75E + 12	0.0	320
89	$OH + H_2O_2 \rightarrow HO_2 + H_2O$	5.80E + 14	0.0	9,560
90	$OH + C \rightarrow H + CO$	5.00E + 13	0.0	0.0
91	$OH + CH \rightarrow H + HCO$	3.00E + 13	0.0	0.0
92	$OH + CH_2 \rightarrow H + CH_2O$	2.00E + 13	0.0	0.0

No.	Reaksiyon	A	b	E
<i>C-H-O Reaksiyonları (devamı)</i>				
93	$\text{OH} + \text{CH}_2 \rightarrow \text{CH} + \text{H}_2\text{O}$	1.13E+07	2.0	3,000
94 <sup>b</sup>	$\text{OH} + \text{CH}_2(\text{S}) \rightarrow \text{H} + \text{CH}_2\text{O}$	3.00E+13	0.0	0.0
95	$\text{OH} + \text{CH}_3 (+\text{M}) \rightarrow \text{CH}_3\text{OH} (+\text{M})$		basınca bağlı	
96	$\text{OH} + \text{CH}_3 \rightarrow \text{CH}_2 + \text{H}_2\text{O}$	5.60E+07	1.6	5,420
97 <sup>b</sup>	$\text{OH} + \text{CH}_3 \rightarrow \text{CH}_2(\text{S}) + \text{H}_2\text{O}$	2.50E+13	0.0	0.0
98	$\text{OH} + \text{CH}_4 \rightarrow \text{CH}_3 + \text{H}_2\text{O}$	1.00E+08	1.6	3,120
99	$\text{OH} + \text{CO} \rightarrow \text{H} + \text{CO}_2$	4.76E+07	1.23	70
100	$\text{OH} + \text{HCO} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}$	5.00E+13	0.0	0.0
101	$\text{OH} + \text{CH}_2\text{O} \rightarrow \text{HCO} + \text{H}_2\text{O}$	3.43E+09	1.18	-447
102	$\text{OH} + \text{CH}_2\text{OH} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CH}_2\text{O}$	5.00E+12	0.0	0.0
103	$\text{OH} + \text{CH}_3\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CH}_2\text{O}$	5.00E+12	0.0	0.0
104	$\text{OH} + \text{CH}_3\text{OH} \rightarrow \text{CH}_2\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$	1.44E+06	2.0	-840
105	$\text{OH} + \text{CH}_3\text{OH} \rightarrow \text{CH}_3\text{O} + \text{H}_2\text{O}$	6.30E+06	2.0	1,500
106	$\text{OH} + \text{C}_2\text{H} \rightarrow \text{H} + \text{HCCO}$	2.00E+13	0.0	0.0
107	$\text{OH} + \text{C}_2\text{H}_2 \rightarrow \text{H} + \text{CH}_2\text{CO}$	2.18E-04	4.5	-1,000
108	$\text{OH} + \text{C}_2\text{H}_2 \rightarrow \text{H} + \text{HCCOH}$	5.04E+05	2.3	13,500
109	$\text{OH} + \text{C}_2\text{H}_2 \rightarrow \text{C}_2\text{H} + \text{H}_2\text{O}$	3.37E+07	2.0	14,000
110	$\text{OH} + \text{C}_2\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3 + \text{CO}$	4.83E-04	4.0	-2,000
111	$\text{OH} + \text{C}_2\text{H}_3 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{C}_2\text{H}_2$	5.00E+12	0.0	0.0
112	$\text{OH} + \text{C}_2\text{H}_4 \rightarrow \text{C}_2\text{H}_3 + \text{H}_2\text{O}$	3.60E+06	2.0	2,500
113	$\text{OH} + \text{C}_2\text{H}_6 \rightarrow \text{C}_2\text{H}_5 + \text{H}_2\text{O}$	3.54E+06	2.12	870
114	$\text{OH} + \text{CH}_2\text{CO} \rightarrow \text{HCCO} + \text{H}_2\text{O}$	7.50E+12	0.0	2,000
115	$\text{HO}_2 + \text{HO}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}_2$	1.30E+11	0.0	-1,630
116	$\text{HO}_2 + \text{HO}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}_2$	4.20E+14	0.0	12,000
117	$\text{HO}_2 + \text{CH}_2 \rightarrow \text{OH} + \text{CH}_2\text{O}$	2.00E+13	0.0	0.0
118	$\text{HO}_2 + \text{CH}_3 \rightarrow \text{O}_2 + \text{CH}_4$	1.00E+12	0.0	0.0
119	$\text{HO}_2 + \text{CH}_3 \rightarrow \text{OH} + \text{CH}_3\text{O}$	2.00E+13	0.0	0.0
120	$\text{HO}_2 + \text{CO} \rightarrow \text{OH} + \text{CO}_2$	1.50E+14	0.0	23,600
121	$\text{HO}_2 + \text{CH}_3\text{O} \rightarrow \text{HCO} + \text{H}_2\text{O}_2$	1.00E+12	0.0	8,000
122	$\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{O} + \text{CO}$	5.80E+13	0.0	576
123	$\text{C} + \text{CH}_2 \rightarrow \text{H} + \text{C}_2\text{H}$	5.00E+13	0.0	0.0
124	$\text{C} + \text{CH}_3 \rightarrow \text{H} + \text{C}_2\text{H}_2$	5.00E+13	0.0	0.0
125	$\text{CH} + \text{O}_2 \rightarrow \text{O} + \text{HCO}$	3.30E+13	0.0	0.0
126	$\text{CH} + \text{H}_2 \rightarrow \text{H} + \text{CH}_2$	1.11E+08	1.79	1,670
127	$\text{CH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H} + \text{CH}_2\text{O}$	1.71E+13	0.0	-755
128	$\text{CH} + \text{CH}_2 \rightarrow \text{H} + \text{C}_2\text{H}_2$	4.00E+13	0.0	0.0
129	$\text{CH} + \text{CH}_3 \rightarrow \text{H} + \text{C}_2\text{H}_3$	3.00E+13	0.0	0.0
130	$\text{CH} + \text{CH}_4 \rightarrow \text{H} + \text{C}_2\text{H}_4$	6.00E+13	0.0	0.0
131	$\text{CH} + \text{CO} (+\text{M}) \rightarrow \text{HCCO} (+\text{M})$		basınca bağlı	
132	$\text{CH} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{HCO} + \text{CO}$	3.40E+12	0.0	690
133	$\text{CH} + \text{CH}_2\text{O} \rightarrow \text{H} + \text{CH}_2\text{CO}$	9.46E+13	0.0	-515
134	$\text{CH} + \text{HCCO} \rightarrow \text{CO} + \text{C}_2\text{H}_2$	5.00E+13	0.0	0.0
135	$\text{CH}_3 + \text{O}_2 \rightarrow \text{OH} + \text{HCO}$	1.32E+13	0.0	1,500
136	$\text{CH}_3 + \text{H}_2 \rightarrow \text{H} + \text{CH}_3$	5.00E+05	2.0	7,230
137	$\text{CH}_2 + \text{CH}_2 \rightarrow \text{H}_2 + \text{C}_2\text{H}_2$	3.20E+13	0.0	0.0



No.	Reaksiyon	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>E</i>
<i>C-H-O Reaksiyonları (devamı)</i>				
138	$\text{CH}_2 + \text{CH}_3 \rightarrow \text{H} + \text{C}_2\text{H}_4$	4.00E+13	0.0	0.0
139	$\text{CH}_2 + \text{CH}_4 \rightarrow \text{CH}_3 + \text{CH}_3$	2.46E+06	2.0	8,270
140	$\text{CH}_2 + \text{CO} (+\text{M}) \rightarrow \text{CH}_2\text{CO} (+\text{M})$		basınca bağı	
141	$\text{CH}_2 + \text{HCCO} \rightarrow \text{C}_2\text{H}_2 + \text{CO}$	3.00E+13	0.0	0.0
142 <sup>b</sup>	$\text{CH}_2(\text{S}) + \text{N}_2 \rightarrow \text{CH}_2 + \text{N}_2$	1.50E+13	0.0	0.0
143 <sup>b</sup>	$\text{CH}_2(\text{S}) + \text{Ar} \rightarrow \text{CH}_2 + \text{Ar}$	9.00E+12	0.0	0.0
144 <sup>b</sup>	$\text{CH}_2(\text{S}) + \text{O}_2 \rightarrow \text{H} + \text{OH} + \text{CO}$	2.00E+13	0.0	0.0
145 <sup>b</sup>	$\text{CH}_2(\text{S}) + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$	1.20E+13	0.0	0.0
146 <sup>b</sup>	$\text{CH}_2(\text{S}) + \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_2 + \text{H}$	7.00E+13	0.0	0.0
147 <sup>b</sup>	$\text{CH}_2(\text{S}) + \text{H}_2\text{O} (+\text{M}) \rightarrow \text{CH}_2\text{OH} (+\text{M})$		basınca bağı	
148 <sup>b</sup>	$\text{CH}_2(\text{S}) + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_2 + \text{H}_2\text{O}$	3.00E+13	0.0	0.0
149 <sup>b</sup>	$\text{CH}_2(\text{S}) + \text{CH}_4 \rightarrow \text{H} + \text{C}_2\text{H}_4$	1.20E+13	0.0	-570
150 <sup>b</sup>	$\text{CH}_2(\text{S}) + \text{CH}_4 \rightarrow \text{CH}_2 + \text{CH}_2$	1.00E+13	0.0	-570
151 <sup>b</sup>	$\text{CH}_2(\text{S}) + \text{CO} \rightarrow \text{CH}_2 + \text{CO}$	9.00E+12	0.0	0.0
152 <sup>b</sup>	$\text{CH}_2(\text{S}) + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_2 + \text{CO}_2$	7.00E+12	0.0	0.0
153 <sup>b</sup>	$\text{CH}_2(\text{S}) + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CO} + \text{CH}_2\text{O}$	1.40E+13	0.0	0.0
154 <sup>b</sup>	$\text{CH}_2(\text{S}) + \text{C}_2\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_2 + \text{C}_2\text{H}_2$	4.00E+13	0.0	-550
155	$\text{CH}_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{O} + \text{CH}_2\text{O}$	2.60E+13	0.0	28,800
156	$\text{CH}_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{OH} + \text{CH}_2\text{O}$	1.00E+12	0.0	2,940
157	$\text{CH}_2 + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{HO}_2 + \text{CH}_2$	2.45E+04	2.47	3,180
158	$\text{CH}_2 + \text{CH}_3 (+\text{M}) \rightarrow \text{C}_2\text{H}_5 (+\text{M})$		basınca bağı	
159	$\text{CH}_2 + \text{CH}_3 \rightarrow \text{H} + \text{C}_2\text{H}_4$	4.80E+12	0.1	10,600
160	$\text{CH}_2 + \text{HCO} \rightarrow \text{CH}_2 + \text{CO}$	2.65E+13	0.0	0.0
161	$\text{CH}_2 + \text{CH}_2\text{O} \rightarrow \text{HCO} + \text{CH}_2$	3.32E+05	2.01	5,880
162	$\text{CH}_2 + \text{CH}_2\text{OH} \rightarrow \text{CH}_2\text{OH} + \text{CH}_2$	3.00E+07	1.5	9,240
163	$\text{CH}_2 + \text{CH}_2\text{OH} \rightarrow \text{CH}_2\text{O} + \text{CH}_2$	1.00E+07	1.5	9,240
164	$\text{CH}_2 + \text{C}_2\text{H}_4 \rightarrow \text{C}_2\text{H}_2 + \text{CH}_2$	3.77E+05	2.0	9,200
165	$\text{CH}_2 + \text{C}_2\text{H}_4 \rightarrow \text{C}_2\text{H}_4 + \text{CH}_2$	6.14E+06	1.74	10,450
166	$\text{HCO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H} + \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$	2.34E+18	-1.0	17,000
167	$\text{HCO} + \text{M} \rightarrow \text{H} + \text{CO} + \text{M}$	1.87E+17	-1.0	17,000
168	$\text{HCO} + \text{O}_2 \rightarrow \text{HO}_2 + \text{CO}$	7.60E+12	0.0	0.0
169	$\text{CH}_2\text{OH} + \text{O}_2 \rightarrow \text{HO}_2 + \text{CH}_2\text{O}$	1.80E+13	0.0	0.0
170	$\text{CH}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{HO}_2 + \text{CH}_2\text{O}$	4.20E-19	7.6	-3,330
171	$\text{C}_2\text{H} + \text{O}_2 \rightarrow \text{HCO} + \text{CO}$	3.00E+13	0.0	1,500
172	$\text{C}_2\text{H} + \text{H}_2 \rightarrow \text{H} + \text{C}_2\text{H}_2$	4.07E+03	2.4	200
173	$\text{C}_2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{HCO} + \text{CH}_2\text{O}$	3.90E+13	0.0	-340
174	$\text{C}_2\text{H}_2 (+\text{M}) \rightarrow \text{H}_2 + \text{C}_2\text{H}_2 (+\text{M})$		basınca bağı	
175	$\text{C}_2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{HO}_2 + \text{C}_2\text{H}_2$	8.40E+11	0.0	3,875
176	$\text{HCCO} + \text{O}_2 \rightarrow \text{OH} + \text{CO} + \text{CO}$	1.60E+12	0.0	834
177	$\text{HCCO} + \text{HCCO} \rightarrow \text{CO} + \text{CO} + \text{C}_2\text{H}_2$	1.00E+13	0.0	0.0

No.	Reaksiyon	A	b	E
<i>N- içeren Reaksiyonlar</i>				
178	$N + NO \rightarrow N_2 + O$	3.50E + 13	0.0	330
179	$N + O_2 \rightarrow NO + O$	2.65E + 12	0.0	6,400
180	$N + OH \rightarrow NO + H$	7.33E + 13	0.0	1,120
181	$N_2O + O \rightarrow N_2 + O_2$	1.40E + 12	0.0	10,810
182	$N_2O + O \rightarrow NO + NO$	2.90E + 13	0.0	23,150
183	$N_2O + H \rightarrow N_2 + OH$	4.40E + 14	0.0	18,880
184	$N_2O + OH \rightarrow N_2 + HO_2$	2.00E + 12	0.0	21,060
185	$N_2O (+M) \rightarrow N_2 + O (+M)$		basınca bağlı	
186	$HO_2 + NO \rightarrow NO_2 + OH$	2.11E + 12	0.0	-480
187	$NO + O + M \rightarrow NO_2 + M$	1.06E + 20	-1.41	0.0
188	$NO_2 + O \rightarrow NO + O_2$	3.90E + 12	0.0	-240
189	$NO_2 + H \rightarrow NO + OH$	1.32E + 14	0.0	360
190	$NH + O \rightarrow NO + H$	5.00E + 13	0.0	0.0
191	$NH + H \rightarrow N + H_2$	3.20E + 13	0.0	330
192	$NH + OH \rightarrow HNO + H$	2.00E + 13	0.0	0.0
193	$NH + OH \rightarrow N + H_2O$	2.00E + 09	1.2	0.0
194	$NH + O_2 \rightarrow HNO + O$	4.61E + 05	2.0	6,500
195	$NH + O_2 \rightarrow NO + OH$	1.28E + 06	1.5	100
196	$NH + N \rightarrow N_2 + H$	1.50E + 13	0.0	0.0
197	$NH + H_2O \rightarrow HNO + H_2$	2.00E + 13	0.0	13,850
198	$NH + NO \rightarrow N_2 + OH$	2.16E + 13	-0.23	0.0
199	$NH + NO \rightarrow N_2O + H$	4.16E + 14	-0.45	0.0
200	$NH_2 + O \rightarrow OH + NH$	7.00E + 12	0.0	0.0
201	$NH_2 + O \rightarrow H + HNO$	4.60E + 13	0.0	0.0
202	$NH_2 + H \rightarrow NH + H_2$	4.00E + 13	0.0	3,650
203	$NH_2 + OH \rightarrow NH + H_2O$	9.00E + 07	1.5	-460
204	$NNH \rightarrow N_2 + H$	3.30E + 08	0.0	0.0
205	$NNH + M \rightarrow N_2 + H + M$	1.30E + 14	-0.11	4,980
206	$NNH + O_2 \rightarrow HO_2 + N_2$	5.00E + 12	0.0	0.0
207	$NNH + O \rightarrow OH + N_2$	2.50E + 13	0.0	0.0
208	$NNH + O \rightarrow NH + NO$	7.00E + 13	0.0	0.0
209	$NNH + H \rightarrow H_2 + N_2$	5.00E + 13	0.0	0.0
210	$NNH + OH \rightarrow H_2O + N_2$	2.00E + 13	0.0	0.0
211	$NNH + CH_3 \rightarrow CH_4 + N_2$	2.50E + 13	0.0	0.0
212	$H + NO + M \rightarrow HNO + M$	8.95E + 19	-1.32	740
213	$HNO + O \rightarrow NO + OH$	2.50E + 13	0.0	0.0
214	$HNO + H \rightarrow H_2 + NO$	4.50E + 11	0.72	660
215	$HNO + OH \rightarrow NO + H_2O$	1.30E + 07	1.9	-950
216	$HNO + O_2 \rightarrow HO_2 + NO$	1.00E + 13	0.0	13,000
217	$CN + O \rightarrow CO + N$	7.70E + 13	0.0	0.0
218	$CN + OH \rightarrow NCO + H$	4.00E + 13	0.0	0.0
219	$CN + H_2O \rightarrow HCN + OH$	8.00E + 12	0.0	7,460

No.	Reaksiyon	A	b	E
<i>N- içeren Reaksiyonlar (devam)</i>				
220	CN + O <sub>2</sub> → NCO + O	6.14E + 12	0.0	-440
221	CN + H <sub>2</sub> → HCN + H	2.10E + 13	0.0	4,710
222	NCO + O → NO + CO	2.35E + 13	0.0	0.0
223	NCO + H → NH + CO	5.40E + 13	0.0	0.0
224	NCO + OH → NO + H + CO	2.50E + 12	0.0	0.0
225	NCO + N → N <sub>2</sub> + CO	2.00E + 13	0.0	0.0
226	NCO + O <sub>2</sub> → NO + CO <sub>2</sub>	2.00E + 12	0.0	20,000
227	NCO + M → N + CO + M	8.80E + 16	-0.5	48,000
228	NCO + NO → N <sub>2</sub> O + CO	2.85E + 17	-1.52	740
229	NCO + NO → N <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub>	5.70E + 18	-2.0	800
230	HCN + M → H + CN + M	1.04E + 29	-3.3	126,600
231	HCN + O → NCO + H	1.11E + 04	2.64	4,980
232	HCN + O → NH + CO	2.77E + 03	2.64	4,980
233	HCN + O → CN + OH	2.13E + 09	1.58	26,600
234	HCN + OH → HOCN + H	1.10E + 06	2.03	13,370
235	HCN + OH → HNCO + H	4.40E + 03	2.26	6,400
236	HCN + OH → NH <sub>2</sub> + CO	1.60E + 02	2.56	9,000
237	H + HCN + M → H <sub>2</sub> CN + M	1.40E + 26	-3.4	1,900
238	H <sub>2</sub> CN + N → N <sub>2</sub> + CH <sub>2</sub>	6.00E + 13	0.0	400
239	C + N <sub>2</sub> → CN + N	6.30E + 13	0.0	46,020
240	CH + N <sub>2</sub> → HCN + N	2.86E + 08	1.1	20,400
241	CH + N <sub>2</sub> (+M) → HCNN (+M)		basınca bağlı	
242	CH <sub>2</sub> + N <sub>2</sub> → HCN + NH	1.00E + 13	0.0	74,000
243 <sup>b</sup>	CH <sub>2</sub> (S) + N <sub>2</sub> → NH + HCN	1.00E + 11	0.0	65,000
244	C + NO → CN + O	1.90E + 13	0.0	0.0
245	C + NO → CO + N	2.90E + 13	0.0	0.0
246	CH + NO → HCN + O	5.00E + 13	0.0	0.0
247	CH + NO → H + NCO	2.00E + 13	0.0	0.0
248	CH + NO → N + HCO	3.00E + 13	0.0	0.0
249	CH <sub>2</sub> + NO → H + HNCO	3.10E + 17	-1.38	1,270
250	CH <sub>2</sub> + NO → OH + HCN	2.90E + 14	-0.69	760
251	CH <sub>2</sub> + NO → H + HCNO	3.80E + 13	-0.36	580
252 <sup>b</sup>	CH <sub>2</sub> (S) + NO → H + HNCO	3.10E + 17	-1.38	1,270
253 <sup>b</sup>	CH <sub>2</sub> (S) + NO → OH + HCN	2.90E + 14	-0.69	760
254 <sup>b</sup>	CH <sub>2</sub> (S) + NO → H + HCNO	3.80E + 13	-0.36	580
255	CH <sub>3</sub> + NO → HCN + H <sub>2</sub> O	9.60E + 13	0.0	28,800
256	CH <sub>3</sub> + NO → H <sub>2</sub> CN + OH	1.00E + 12	0.0	21,750
257	HCNN + O → CO + H + N <sub>2</sub>	2.20E + 13	0.0	0.0
258	HCNN + O → HCN + NO	2.00E + 12	0.0	0.0
259	HCNN + O <sub>2</sub> → O + HCO + N <sub>2</sub>	1.20E + 13	0.0	0.0
260	HCNN + OH → H + HCO + N <sub>2</sub>	1.20E + 13	0.0	0.0
261	HCNN + H → CH <sub>2</sub> + N <sub>2</sub>	1.00E + 14	0.0	0.0
262	HNCO + O → NH + CO <sub>2</sub>	9.80E + 07	1.41	8,500

NOT : Bileşenlerin üzerindeki b indisi o bileşenin tek bir fazda olduğunu göstermektedir.

## EK-II

### KAZAN ISIL HESAPLARI

Ocak boyu 790 mm ve bu ocak boyunda maksimum ısı kapasitesi 116 kW olan kazan için hava fazlalık katsayısı 1.00 durumunda kazan ısı hesapları aşağıda detaylı olarak verilmiştir.

Kazan ısı kapasitesi 116 kW (100 000 kcal/h) olan, 90/70 °C su çıkış ve dönüş sıcaklığında çalışacak olan alev geri dönüşlü kazanın temel ölçüleri; alev borusu çapı (ocak çapı)  $D = 400$  mm, alev borusu boyu (ocak boyu)  $L = 790$  mm, 12 adet duman borusunun çapı ve boyları 41.5/36.5 mm ve  $L_b = 890$  mm değerindedir (Şekil 4.2). Ortam sıcaklığı 20°C olarak kabul edilmiştir.

Eksik yanma kaybı ( $Z_e$ ) yakacağın karbonunun bir kısmının karbonmonoksit şeklinde yanması sonucunda oluşan kayıptır. Sıvı ve gaz yakacak ocaklarında bu kayıp pratik olarak ihmal edilebilir. Burada bu kayıp % 0.25 olarak kabul edilmiştir.

Sıcak cidar kaybı ( $Z_b$ ) buhar kazanının sıcak dış yüzeylerinden çevreye ışınlım ve taşınım yolu ile ısı kaybını tanımlar. Genellikle % 0.5–12 gibi geniş bir aralıkta değişir.

Baca sıcaklığı deneylerde ölçülen baca sıcaklığı değerlerinin ortalaması olarak 325°C alınmıştır. Hava fazlalık katsayısı  $\lambda = 1.00$ ; eksik yanma kaybı ve sıcak cidar kayıpları toplamı = % 0.5 kabul edilmiştir.

Baca kaybı  $Z_b$  ile ifade edilirse;

$$Z_b = \frac{(1-y)v_g(i_b - i_a)}{H_u}$$

Burada (1-y) ifadesi efektif olarak yanan yakacak yüzdesini göstermektedir. Burada y değeri % 0.25 alınmıştır. Baca sıcaklığı  $T_{\text{baca}} = 325 \text{ }^\circ\text{C}$  için baca gazı entalpisi  $i_b = 488 \text{ kJ/Nm}^3$ , ortam sıcaklığı  $T_a = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  için entalpi  $i_a = 28 \text{ kJ/Nm}^3$  olarak okunmuştur.(Onat vd., 1998).

HFK = 1.00 için özgül hava miktarı ( $v_h$ ) = 10.38 (Nm<sup>3</sup>/kg), özgül duman gazı miktarı ( $v_g$ ) = 11.46 (Nm<sup>3</sup>/kg) değerleri alt ısı değer  $H_u = 9331 \text{ kcal/Nm}^3$ 'e (39060 kJ/ Nm<sup>3</sup>) göre okunmuştur. (Onat vd., 1998) Burada alt ısı değer Bölüm 3'de doğalgazın stokiyometrik şartlarda yapılan yanma hesabından alınmıştır.

Bütün bu değerler yerlerine konulursa  $Z_b = \% 13$  elde edilir.

Anma ısı gücünde çalışmaya ait ısı verim için;

$$\eta = 1 - \Sigma Z = [1 - (0.025 + 0.025 + 0.13)] \cdot 100 = \% 86.5$$

Net kazan ısı kapasitesi  $Q_{\text{net}} = \eta Q_{\text{brüt}} = 116 \times 0.865 = 100.6 \text{ kW}$

Yakacak miktarı ise;

$$B = \frac{Q_{\text{net}}}{\eta \cdot H_u} = \frac{(100.6 \cdot 3600)}{0.865 \cdot 39060} = 10.72 \text{ m}^3/\text{h}$$

Buna göre toplam hava ve duman gazı debileri;

$$V_h = v_h B = 111.19 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

$$V_g = v_g B = 122.8 \text{ Nm}^3/\text{h} \text{ olur.}$$



## a- Ocakta Isı Geçişi

Çok karmaşık olan alev geri dönüşlü ocakların, ocak sıcaklığının ve ocakta geçen ısının hesabı için aşağıdaki kabuller yapılmıştır.

- Ocak içindeki alevin silindirik bir geometride olduğu, yanmanın iyi olabilmesi için alev hacminde gaz hızının yaklaşık 4–5 m/s arasında,  $l_a$  alev boyunun ocak boyundan 150 mm küçük olduğu,
- Yanmanın alev hacmi içinde son bulduğu, alev sıcaklığının ve gazın fiziksel özelliklerinin bu hacim içinde her yerde aynı olduğu,
- Alevden ocak cidarlarına sadece ışınlama ısı geçtiği, bu esnada alev ile ocak cidarları arasında bulunan duman gazlarının bu ışınlama yutmadığı,
- Alev hacmi sonuna kadar giden duman gazlarının alev hacminin dışından dönerken, hem taşınım hem de ışınlama ile ısı geçişi yaptığı kabul edilmektedir.

Bu kabullere göre;

$$\text{Alev boyu } l_a = 790 - 150 = 640 \text{ mm}$$

Duman gazı debisi ocak sıcaklığı 1300°C kabulü ile hesaplanırsa;

$$\text{Duman gazı debisi} = V_g \frac{1300 + 273}{273} \frac{1}{3600} = 0.197 \text{ m}^3/\text{s}$$

Debi = Kesit x Hız ifadesinde gaz hızı 4.5 m/s alınıp, kesitte  $\frac{\pi d_a^2}{4}$  olarak ifade

edilirse buradan alev çapı hesaplanabilir:

$$\text{Alev çapı } d_a = \sqrt{\frac{0.197 \cdot 4}{\pi \cdot 4.5}} = 0.236 \text{ mm}$$

$$\text{Alev hacmi } V_a = \frac{\pi d_a^2}{4} l_a = 0.02796 \text{ m}^3$$

$$\text{Ortalama alev yükü } H_m = \frac{BH_u}{V_a} = 4159 \text{ kW / m}^3$$

Alevin eşdeğer tabaka kalınlığı;

$$L_e = 4V_a / A_a = 4 \cdot 0.02796 / [\pi \cdot 0.236 \cdot 0.64 + 2\pi(0.236)^2 / 4] = 0.20 \text{ m}$$

Alevin yayma katsayısı için;

$$\epsilon_{al} \approx CH_m L_e = 2.3 \cdot 10^{-4} \cdot 4159 \cdot 0.20 = 0.191$$

Gazın  $\epsilon_g$  ışınım yayma katsayısının hesabı için ocak gazındaki su buharı ve karbondioksit gazlarının kısmi basınçları; Bölüm 3'de doğalgazın stokiometrik şartlarda yapılan yanma hesabından alınmıştır.

$$p_{CO_2} = 0.10 \text{ bar}$$

$$p_{H_2O} = 0.18 \text{ bar}$$

$$p_{CO_2} \cdot L_e \approx 0.020 \text{ bar} \cdot \text{m}$$

$$p_{H_2O} \cdot L_e \approx 0.036 \text{ bar} \cdot \text{m}$$

Ocak sıcaklığı geçici olarak  $T_{go} = 1300^\circ\text{C}$  alındığında,

$$\epsilon_{CO_2} = 0.045$$

$$\epsilon_{H_2O} = 0.039$$

$$\Delta\epsilon = \epsilon_{CO_2} \cdot \epsilon_{H_2O} = 0.001755$$

$$\epsilon_g = \epsilon_{CO_2} + \epsilon_{H_2O} - \Delta\epsilon = 0.082$$

$$\epsilon_a = \epsilon_g + (1 - \epsilon_g) \epsilon_{al} = 0.257$$

Alev etrafında taşınım ile ısı geçişi olmadığından,  $C_k = 1.0$  ile  $T_w = 100$  °C, ocak cidarlarındaki yayma katsayısı  $\varepsilon_w = 0.9$ , ocak verimi yaklaşık olarak  $\eta_o \approx 1.0$  ve

$$\frac{A_a}{A_w} = \frac{\pi d_a l_a + \pi d_a^2 / 4}{\pi D L + \pi D^2 / 4} = 0.501$$

$$i_{th} = \frac{\eta_o H_u + v_h i_a}{v_g} = 3435 \text{ kJ/Nm}^3 \quad \text{değerleri alınarak;}$$

$$\phi = \left[ \frac{1}{\varepsilon_a} + \frac{A_a}{A_w} \left( \frac{1}{\varepsilon_w} - 1 \right) \right]^{-1} = 0.254$$

$$x' = 20.41 \frac{C_k \phi A_a}{i_{th} B v_g} \left( \frac{T_w}{100} \right)^4 = 0.00123$$

$$1 - \frac{i_{go}}{i_{th}} = 1.35 \cdot 10^{-3} \left[ \left( \frac{T_{go}}{T_w} \right)^4 - 1 \right] \quad \text{eşitliğinin, başlangıçta seçilen } T_{go} = 1300 \text{ °C}$$

için  $i_{go} = 2079 \text{ kJ/Nm}^3$  değeri ile iyi bir yaklaşıklıkla sağlandığı görülebilir.

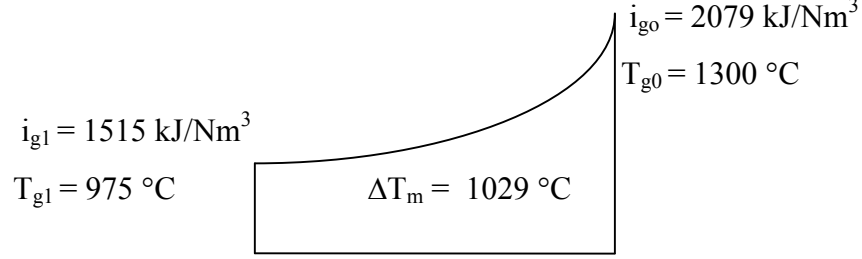
$$\text{Bu durumda alev hacmi içindeki gaz hızı} = \frac{v_g}{\pi d_a^2 / 4} \frac{T_{go} + 273}{273} = 4.5 \text{ m/sn}$$

elde edilir. Bu değer iyi bir yanma için uygun bir değerdir.

## b- Ocakta Geri Dönüş Kısmı

Alev ile ocak cidarları arasında kalan, silindirik halka şeklindeki geri dönüş bölgesindeki ısı geçişi, hem ışınlım hem de taşınım ile olmaktadır. Ocak çıkışındaki

duman gazlarının sıcaklığı 975 °C kabul edilsin. Bu sıcaklığa karşılık gelen entalpi  $i_{g1} = 1515 \text{ kJ/Nm}^3$ 'dir.



$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} = 1029 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$d_h = \frac{4A}{\zeta} = D - d = 400 - 254 = 164 \text{ mm}$$

$$A_{\text{kesit}} = \frac{\pi D^2}{4} - \frac{\pi d^2}{4} = 0.08 \text{ m}^2$$

$$V_0 = \frac{V_g}{A_{\text{kesit}}} = \frac{151.7}{0.08 \cdot 3600} = 0.416 \text{ m/s}$$

$$V = V_0 \frac{T_g + 273}{273} = 2.15 \text{ m/s}$$

$$L_e = d_h = 0.164 \text{ m alınarak;}$$

$$h_k = 4.87 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$p_{\text{CO}_2} \cdot L_e \approx 0.0165 \text{ bar} \cdot \text{m}$$

$$p_{\text{H}_2\text{O}} \cdot L_e \approx 0.0284 \text{ bar} \cdot \text{m}$$

$$q_{\text{CO}_2} = 7830 \text{ W/m}^2$$

$$q_{\text{H}_2\text{O}} = 5025 \text{ W/m}^2$$

$$h_r = 0,93 \frac{q_{\text{CO}_2} + q_{\text{H}_2\text{O}}}{\Delta T} = 11.52 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$h = h_r + h_k = 11.52 + 4.87 = 16.39 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$$

Duman gazı ile cidar arasındaki ortalama logaritmik sıcaklık farkı  $\Delta T_m = 1029 \text{ }^\circ\text{C}$  değerindedir. Ocak çıkışında duman gazının entalpisi;

$$i_{g1} = i_{g0} - \frac{h \cdot A_w \cdot \Delta T_m}{V_g} = 1526 \text{ kJ/Nm}^3 \text{ bulunur. Bulunan bu değeri tahmin}$$

edilen değer ile karşılaştırıp yüzde hata hesabı yapacak olursak;

$$\% \text{Hata} = \frac{1515 - 1526}{1515} 100 = \% 0.73$$

Bu nedenle tahmin edilen sıcaklık iyi bir yaklaşıklıkla sağlanmıştır.

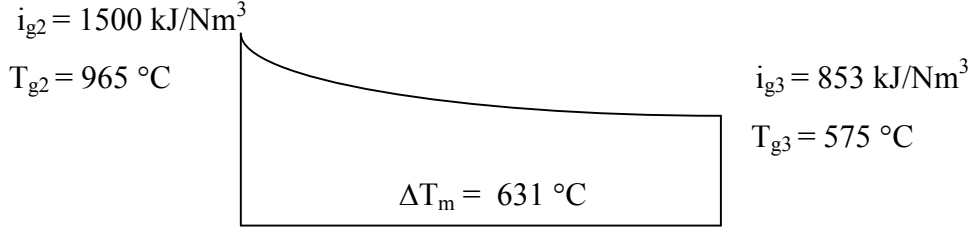
### c- Ön Ayna Kısmı

Bu kısımda hesap yapılmayıp duman gazının  $10^\circ\text{C}$  soğuduğu kabul edilecektir. Bu durumda duman borularına giren gazın sıcaklığı ve entalpisi;

$$T_{g1} = 965 \text{ }^\circ\text{C}, \quad i_{g0} = 1500 \text{ kJ/Nm}^3$$

#### d- Duman Borularındaki Isı Geçişi

Duman borularının çıkışında gaz sıcaklığını 575°C alalım. n =12 adet boru sayısı olmak üzere boru çapı  $d_b = 36.5 \text{ mm}$  dir



$$V_0 = \frac{V_g}{A_{\text{kesit}}} = \frac{122.8}{n(\pi d_b^2 / 4)3600} = 2.72 \text{ m/s}$$

$$V = V_0 \frac{T_g + 273}{273} = 10.38 \text{ m/s}$$

$$L_e = d_b = 0.0365 \text{ m alınarak};$$

$$h_k = 25.52 \text{ W/m}^2 \text{ °C}$$

$$p_{\text{CO}_2} \cdot L_e \approx 0.0037 \text{ bar} \cdot \text{m}$$

$$p_{\text{H}_2\text{O}} \cdot L_e \approx 0.0063 \text{ bar} \cdot \text{m}$$

$$q_{\text{CO}_2} = 1180 \text{ W/m}^2$$

$$q_{\text{H}_2\text{O}} = 487 \text{ W/m}^2$$

$$h_r = 0.93 \frac{q_{\text{CO}_2} + q_{\text{H}_2\text{O}}}{\Delta T} = 2.31 \text{ W/m}^2 \text{ °C}$$

$$h = h_r + h_k = 25.52 + 2.31 = 27.83 \text{ W/m}^2 \text{ °C}$$

Duman boruları çıkışındaki entalpi;

$$i_{g3} = i_{g2} - \frac{h \cdot n \cdot \pi \cdot d_b \cdot L_b \cdot \Delta T_m}{V_g} = 850 \text{ kJ/Nm}^3.$$

Bulunan bu değer tahmin edilen değer ile karşılaştırıp yüzde hata hesabı yapılırsa;

$$\%Hata = \frac{853 - 850}{853} 100 = \% 0.35$$

Bu nedenle tahmin edilen sıcaklık iyi bir yaklaşıklıkla sağlanmıştır.

#### e- Arka Ayna

Bu kısımda hesap yapılmayıp sıcaklık aynı alınacaktır.

#### f- Isı Bilançosu

Tüm bölgeler için ısı bilançosu;

BÖLGE	$V_g \cdot \Delta i$ (kW)
Ocak	65.1
Ön Ayna	0.89
Duman Boruları	22.06
Arka Ayna	12.96
TOPLAM	101.01

Farklı ocak boyları ve hava fazlalık katsayısı değerleri için yukarıdaki hesaplar tekrarlanmış ve aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Farklı ocak boyları ve hava fazlalık katsayısı değerleri için kazan ısı hesaplarının sonuçları.

Hesaplanan Büyüklikler	Ocak boyu (mm) / Max. Kazan Isıl Kapasitesi (kW)						
	790 (116 kW)		680 (87 kW)		550 (58 kW)		
	$\lambda=1.00$	$\lambda=1.26$	$\lambda=1.00$	$\lambda=1.26$	$\lambda=1.00$	$\lambda=1.26$	$\lambda=1.475$
Kazan Isıl Verimi (%)	86.5	82.9	89.8	86	89.4	89.2	91.4
Yakıt Sarfıyatı (B), (Nm <sup>3</sup> /h)	10.72	10.72	8.04	8.04	5.35	5.35	5.35
Toplam Hava Miktarı (V <sub>h</sub> ), (Nm <sup>3</sup> /h)	111.19	140.10	83.36	105.04	81.98	70.03	55.58
Toplam Duman Miktarı (V <sub>g</sub> ), (Nm <sup>3</sup> /h)	122.8	151.7	92.0	113.7	87.8	75.8	61.4
Ocak Sıcaklığı (°C)	1300	1200	1310	1210	1320	1220	1160
Ön Aynada Gaz Sıcaklığı (°C)	975	950	940	940	880	880	900
Ocak Çıkışında Gaz Sıcaklığı (°C)	965	940	930	930	870	870	890
Duman Borularında Gaz Sıcaklığı (°C)	575	560	560	560	540	545	555
Arka Aynada Gaz Sıcaklığı (°C)	575	560	560	560	540	545	555
<b>Isı Bilançosu (kW)</b>							
Ocak (kW)	65.1	55.7	50.65	42.83	26.65	30.19	34.69
Ön Ayna (kW)	0.89	1.04	0.41	0.09	0.43	0.59	0.45
Duman Boruları (kW)	22.06	26.16	15.57	19.27	12.19	11.06	9.39
Arka Ayna (kW)	12.96	13.9	12.02	13.11	12.92	10.28	8.83
<b>TOPLAM (kW)</b>	<b>101.01</b>	<b>96.81</b>	<b>78.65</b>	<b>75.3</b>	<b>52.19</b>	<b>52.11</b>	<b>53.36</b>



## ÖZGEÇMİŞ

**Özer AYDIN**

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Ünvanı** : Makina Yüksek Mühendisi  
**Doğum Yeri / Tarihi** : Yenice Köyü Nallıhan/ANKARA - 25.01.1972  
**Medeni Hali** : Evli, 2 Çocuk  
**Askerlik Durumu** : Kasım 1999 – Haziran 2000 kısa dönem olarak  
İZMİR Foça'da yaptı  
**Cep Tel** : 0 536 327 46 30

### EĞİTİM

**1997 – 1999 Yüksek Lisans**, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,  
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Enerji Bilim Dalı ESKİŞEHİR  
**1994 – 1997 Lisans**, Dumlupınar Üni. Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği  
Bölümü KÜTAHYA  
**1992– 1994 Ön Lisans**, Abant İ. Baysal Üniversitesi Bolu MYO Motor Bölümü  
BOLU  
**1986– 1990 Lise**, Eskişehir Motor Teknik Lisesi ESKİŞEHİR  
**1983 – 1986 Orta Öğretim**, Sakarı Karacaören Ortaokulu Alpu - ESKİŞEHİR  
**1983 - 1986 İlkokul**, Yenice Köyü İlkokulu Nallıhan- ANKARA

## **TEZLER**

### **Lisans Tezi :**

“Motorlu Araçlarda Egzoz Emisyonu ve Kontrolü”, Dumlupınar Üni. Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü, Haziran 1997, Danışman Yrd.Doç.Dr. Ramazan KÖSE

**Yüksek Lisans Tezi** :“Benzinli Otomobil Motorlarında Yakıt Sistemlerinin Optimizasyonu Çalışmaları” Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Haziran 1999, Danışman Prof.Dr. Battal KUŞHAN

## **DENEYİM**

- Temmuz 1997 – Eylül 1997 Yenice Barajı H.E.S. Tesisleri , Sarıcakaya Eskişehir, Makina Mühendisi.
- 1997 - 2003 Dumlupınar Üni. Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü Araştırma Görevlisi.
- Eylül 2003 - Osmangazi Üni. Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü Araştırma Görevlisi.

## **ÜYE OLDUĞU KURULUŞLAR**

TMMOB Makina Mühendisleri Odası