

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DOĞAL GAZ YAKILAN BİR OCAKTA KATI
YÜZEYİN EMİSYON VE VERİM ÜZERİNE ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mak. Müh. Emre UĞURLUOĞLU**

Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

Programı : ISI AKIŞKAN

HAZİRAN 2007

**DOĞAL GAZ YAKILAN BİR OCAKTA KATI YÜZEYİN
EMİSYON VE VERİM ÜZERİNE ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mak. Müh. Emre UĞURLUOĞLU
503051106**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 5 Mayıs 2007
Tezin Savunulduğu Tarih : 13 Haziran 2007**

**Tez Danışmanı : Y.Doç.Dr. Erhan BÖKE (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri Y.Doç.Dr. Yalçın URALCAN (İTÜ)
Y.Doç.Dr. Özer AYDIN (DPÜ)**

HAZİRAN 2007

ÖNSÖZ

Gelişen teknolojiyle beraber, son dönemlerde enerjinin verimli kullanılması ve yakıtların çevresel etkilerinin bertaraf edilmesi çözüm aranan önemli konular haline gelmiştir. Enerji kaynaklarının verimli şekilde kullanılması ülke ekonomisini yakından ilgilendirmekle beraber gelişmişlik seviyesine ulaştırmada da katkısı kaçınılmazdır. Aynı zamanda yanma sonu çıkan gazlar sera gazlarına yol açarak, küresel ısınmayı tetiklemektedir.

Günümüzde doğal gazın sanayide ve konutlarda yaygın bir kullanım alanı vardır. Bundan dolayı bu yakıtla ilgili çalışmaların fazlaşması faydalı olacaktır. Enerji politikası bakımından bu yakıttan en iyi şekilde yararlanılması sağlanarak, gelecek nesiller için alternatif enerji kaynaklarına yönelmek için çalışılmalıdır.

Katı yüzey ısıtımının arttırılarak, kazan ısı veriminin yükselmesinin sağlandığı ve emisyon değerlerinin düşürüldüğü bu çalışmayı yaparken yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Y. Doç. Dr. Erhan BÖKE'ye; modelleme kısmında desteklerinden dolayı Y. Doç. Dr. Özer AYDIN'a; deney düzeneğinin oluşturulmasında yardımlarından dolayı Isı Tekniği laboratuvarı çalışanlarına; desteklerini her zaman hissettiğim ESOGÜ Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine; beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan birbirinden değerli dostlarıma, öğrenim hayatımda her zaman yanımda olan aileme ve bilhassa anneanneme teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Mayıs,2007

Mak. Müh. Emre UĞURLUOĞLU

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	xiii
ÖZET	xiv
SUMMARY	xv
1. GİRİŞ	1
2. AKIŞ VE ISI TRANSFERİ OLAYLARININ FİZİKSEL MODELLENMESİ	6
2.1. Navier Stokes Denklemleri	6
2.1.1. Kütleinin Korunumu(Süreklilik) Denklemi	6
2.1.2. Momentum Korunumu Denklemi	7
2.1.3. Enerji Korunumu Denklemi	7
2.2. İki Denklemlili Türbülans Modeli (k-epsilon)	8
2.3. Radyasyon Modeli(Discrete Ordinates)	10
2.4. PDF	11
3. DOĞAL GAZ	14
3.1. Türkiye’de Doğalgaz Kullanımı	15
3.2. Doğal Gaz Yanması	16
3.2.1. Yanma Hesabı	17
3.3. Doğal Gaz Yanması Sonucu Çıkan Emisyonlar	21
3.3.1. NOx Emisyonları	21
3.3.2. Karbonmonoksit oluşumu	29
4. DENEYSEL ÇALIŞMA	32
4.1. Deney Tesisatı Ekipmanları	33
4.1.1. Deney Kazanı	33
4.1.2. Su Besleme Deposu	35
4.1.3. Brülör	35
4.1.4. Hava-Su Isı Değiştiricisi	35
4.1.5. Baca	36
4.2. Ölçme Sistemi	36
4.2.1. Veri Toplama ve Kayıt Cihazı	36
4.2.2. Gaz Analiz Cihazı	36
4.2.3. Termoelemanlar	37
4.2.4. Gaz Sayacı	37
4.2.5. Su Sayacı	37
4.3. Ölçüm Noktalarının Seçilmesi ve Alınan Ölçümler	37

4.4. Deney Parametreleri	42
4.4.1. Yanma Odası Tasarımı	42
4.4.2. Dolgu Malzemesi (Kovan ve Kanat)	42
4.4.3. Hava Yakıt Karışım Oranı	43
4.5. Deney Programı	43
4.6. Deney Sonuçları	45
4.6.1. Alev Sıcaklıkları	45
4.6.2. Ocak İçi Sıcaklıklarıyla Emisyon Değerlerinin Karşılaştırılması	50
4.6.3. Kazan Isıl Verimi	60
5. NÜMERİK MODELLEME VE DENEY SONUÇLARI İLE KARŞILAŞTIRMA	64
5.1. Modelleme	64
5.1.1. Enerji ve Kütle Dengesi	71
5.2. Model Sonuçları	73
5.2.1. Sıcaklık Değerlerinin Karşılaştırılması	73
5.2.2. Hız Değerlerinin Karşılaştırılması	80
5.2.3. Azotoksit Emisyon Değerlerinin Karşılaştırılması	82
5.2.4. Karbonmonoksit Emisyonu Değerlerinin Karşılaştırılması	88
5.2.5. Alev Sıcaklığı Değerlerinin Karşılaştırılması	91
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	94
EKLER	97
KAYNAKLAR	131
ÖZGEÇMİŞ	137

KISALTMALAR

CFD	: Computational Fluid Dynamics
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
PDF	: Probability Density Function
ppm	: Milyonda bir(hacimsel oran)

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 3.1 Gaz yakacakların bileşenleri (Hacimce % olarak).....	15
Tablo 3.2 Deneylerin yapıldığı tarih itibari ile doğal gaz özellikleri.....	17
Tablo 3.3 NOx kontrol yöntemleri.....	26
Tablo 4.1 Hava fazlalık katsayısının seçilmesi.....	43
Tablo 4.2 680 ve 790 mm ocak boyunda deneylerin yapıldığı kazan ısıtılma kapasiteleri, yakıt debileri ve hava fazlalık katsayıları.....	44
Tablo 4.3 Yapılan deneylerin parametrelere göre dağılımı.....	44
Tablo 4.4 Literatürdeki çalışmada karşılaştırma yapılacak deney parametrelerinin dağılımı.....	45
Tablo 5.1 790 mm ocak boyu ve kovansız durumda kazan ısıtılma verimi hesabı.....	71
Tablo 5.2 3 durum için hava ve yakıt giriş hızları.....	81
Tablo B.1 Kazanın bazı boyutları.....	103
Tablo B.2 Farklı ocak boyu ve hava fazlalık katsayısı değerleri için kazan ısıtılma hesaplarının sonuçları.....	112

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1	: Dolgu malzemeleri.....	3
Şekil 2.1	: PDF'in grafiksel tanımı.....	13
Şekil 3.1	: Alev Sıcaklığına Bağlı Olarak Isıl NO oluşumu.....	23
Şekil 3.2	: Yüksek sıcaklıkta oyalanma süresinin NO _x emisyonlarına etkisi.	28
Şekil 3.3	: Endüstriyel proseslerden kaynaklanan CO emisyonları.....	31
Şekil 4.1	: Deney tesisatının şematik gösterimi.....	32
Şekil 4.2	: Isıl kapasitenin fonksiyonu olarak ocak çapı ve uzunluğu. a) Kazan ısıl kapasitesi (kW), b) Ocak uzunluğu (m), c) Ocağın yakma gücü (MW/m ³), d) Ocak çapı.....	33
Şekil 4.3	: Deney kazanına ait ölçüler	34
Şekil 4.4	: Deneylerde kullanılan üflemlerli brülör.....	35
Şekil 4.5	: Gaz analizinde kullanılan prob.....	37
Şekil 4.6	: Kazana bağlanan termoelemanların görünüşü.....	38
Şekil 4.7	: Deney tesisatındaki ölçüm cihazları ve ölçüm noktaları.....	39
Şekil 4.8	: Kazan yanma odasından yapılan ölçümler.....	40
Şekil 4.9	: Bacadan yapılan ölçümler ve konumları.....	41
Şekil 4.10	: Ocak içerisine yerleştirilmiş 2 kanatlı kovan.....	42
Şekil 4.11	: Kovansız durumda farklı hava fazlalık katsayıları(1.02 ve 1.26) için yapılan deneylerin alev sıcaklıklarının karşılaştırılması (790 mm ocak boyu, 116kW).....	46
Şekil 4.12	: 2 kanatlı değişik kovan çap ve boyları için yapılan deneylerin alev sıcaklıklarının karşılaştırılması (790 mm ocak boyu, 116kW, HFK=1.02).....	46
Şekil 4.13	: 4 kanatlı değişik kovan çap ve boyları için yapılan deneylerin alev sıcaklıklarının karşılaştırılması(790 mm ocak boyu, 116kW, HFK=1.02).....	47
Şekil 4.14	: 6 kanatlı değişik kovan çap ve boyları için yapılan deneylerin alev sıcaklıklarının karşılaştırılması(790 mm ocak boyu, 116kW, HFK=1.02).....	47
Şekil 4.15	: 25 x 20 kovanlı farklı sayılarda kanatlarla yapılan deneylerde alev sıcaklığının hava fazlalık katsayısına göre değişimi(790 mm ocak boyu, 116kW).....	48
Şekil 4.16	: 25 x 20 kovanlı farklı sayılarda kanatlarla yapılan deneylerde alev sıcaklıklarının kazan ısıl kapasitesine göre değişimi (790 mm ocak boyu).....	48

Şekil 4.17 : Farklı sayılarda kanatlarla yapılan deneylerde alev sıcaklıklarının ocak boyuna göre değişimi (87 kW, 25x40, HFK=1.26).....	49
Şekil 4.18 : Farklı sayılarda kanatlarla yapılan deneylerde R100 ölçüm hattındaki sıcaklık değerleri (87 kW, 25x20 kovanı, HFK=1.26). ..	50
Şekil 4.19 : Farklı sayılarda kanatlarla yapılan deneylerde R175 ölçüm hattındaki sıcaklık değerleri (87 kW, 25x20 kovanı, HFK=1.26). ..	50
Şekil 4.20 : Farklı sayılarda kanatlarla yapılan deneylerde R100 ölçüm hattındaki NO mol kesri değerleri (87 kW, 25x20 kovanı, HFK=1.26).....	
Şekil 4.21 : Farklı sayılarda kanatlarla yapılan deneylerde R175 ölçüm hattındaki NO mol kesri değerleri (87 kW, 25x20 kovanı, HFK=1.26).....	51
Şekil 4.22 : Farklı sayılarda kanatlarla yapılan deneylerde R100 ölçüm hattındaki yanmamış gazların mol kesri değerleri (87 kW, 25x20 kovanı, HFK=1.26).....	51
Şekil 4.23 : Farklı sayılarda kanatlarla yapılan deneylerde R175 ölçüm hattındaki yanmamış gazların mol kesri değerleri (87 kW, 25x20 kovanı, HFK=1.26).....	52
Şekil 4.24 : Farklı sayılarda kanatlarla yapılan deneylerde baca gazı sıcaklığı değerleri(87 kW, 25x20 kovanı, HFK=1.26).....	53
Şekil 4.25 : Farklı sayılarda kanatlarla yapılan deneylerde bacadaki yanmamış gaz değerleri (87 kW, 25x20 kovanı, HFK=1.26).....	53
Şekil 4.26 : Farklı sayılarda kanatlarla yapılan deneylerde bacadaki azotoksit emisyonu değerleri (87 kW, 25x20 kovanı, HFK=1.26). ..	54
Şekil 4.27 : 25x40 kovanlı ve farklı koşullarda yapılan deneylerde baca sıcaklığı değerleri.....	54
Şekil 4.28 : 25x20 kovanlı ve farklı koşullarda yapılan deneylerde baca sıcaklığı değerleri.....	55
Şekil 4.29 : 30x20 kovanlı ve farklı koşullarda yapılan deneylerde baca sıcaklığı değerleri.....	55
Şekil 4.30 : 25x40 kovanlı ve farklı koşullarda yapılan deneylerde bacadaki azotoksit emisyonu değerleri.....	56
Şekil 4.31 : 25x20 kovanlı ve farklı koşullarda yapılan deneylerde bacadaki azotoksit emisyonu değerleri.....	57
Şekil 4.32 : 30x20 kovanlı ve farklı koşullarda yapılan deneylerde bacadaki azotoksit emisyonu değerleri.....	57
Şekil 4.33 : 25x40 kovanlı ve farklı koşullarda yapılan deneylerde bacadaki yanmamış gazlar emisyon değerleri.....	58
Şekil 4.34 : 25x20 kovanlı ve farklı koşullarda yapılan deneylerde bacadaki yanmamış gazlar emisyon değerleri.....	58
Şekil 4.35 : 30x20 kovanlı ve farklı koşullarda yapılan deneylerde bacadaki yanmamış gaz emisyon değerleri.....	59
Şekil 4.36 : Hava fazlalık katsayısının 1.02 olduğu farklı koşullarda yapılan deneylerde bacadaki yanmamış gazlar emisyon değerleri.....	59
Şekil 4.37 : Değişik kovan ebatları ve kanat sayılarında yüzde olarak kayıplar(116 kW, hava fazlalık katsayısı=1.26, 790 mm ocak boyu).....	61

Şekil 4.38	Değişik kovan ebatları ve kanat sayılarında yüzde olarak kayıplar (116 kW, hava fazlalık katsayısı=1.02, 790 mm ocak boyu).....	61
Şekil 4.39	Değişik kovan ebatları ve kanat sayılarında yüzde olarak kayıplar (87 kW, hava fazlalık katsayısı=1.26, 790 ve 680 mm ocak boyu).....	62
Şekil 4.40	Değişik kovan ebatları ve kanat sayılarında yüzde olarak kayıplar (58 kW, hava fazlalık katsayısı=1.26, 790 mm ocak boyu).....	63
Şekil 5.1	: Brülördeki yakıt kanalları ve türbülator.....	64
Şekil 5.2	: 25 x 40 kovanlı ve 6 kanatlı modele ait ağ yapısı.....	65
Şekil 5.3	: Kovansız durum için farklı ağ sayılarında elde edilen alev sıcaklıkları.....	66
Şekil 5.4	: Denklem çözücüsünün seçilmesi.....	67
Şekil 5.5	: Enerji denkleminin aktive edilmesi.....	67
Şekil 5.6	: FLUENT programında viskoz modelinin tanıtılması.....	68
Şekil 5.7	: Bileşenler için modelin seçilmesi.....	68
Şekil 5.8	: FLUENT programında radyasyon modelinin seçimi.....	69
Şekil 5.9	: FLUENT programına girilen sıcaklık sınır şartları.....	69
Şekil 5.10	: FLUENT programında çözüm kontrolleri.....	70
Şekil 5.11	: Fluent programında çözümün yakınsama grafiği.....	71
Şekil 5.12	: Nümerik olarak saptanan farklı hava fazlalık katsayılarında kazan kontrol hacmi için kütle dengesi.....	72
Şekil 5.13	: Modelde elde edilen ocak içindeki sıcaklık konturları (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, Kovansız durum, HFK=1.26).....	73
Şekil 5.14	: Modelde elde edilen ocak içindeki sıcaklık konturları (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, Kovansız durum, HFK=1.02).....	73
Şekil 5.15	: Modelde elde edilen ocak içindeki sıcaklık konturları.(Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, 25*40 kovanı, HFK=1.26).....	74
Şekil 5.16	: 6 kanatlı kovan için model sıcaklık konturları.(Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 58 kW, 25*40 kovanı, HFK=1.26).....	75
Şekil 5.17	: 2 kanatlı kovan için model sıcaklık konturları.(Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 58 kW, 25*40 kovanı, HFK=1.26).....	76
Şekil 5.18	: R100 ölçüm çizgisi üzerinde sıcaklıklar için kovansız, 25x40 kovanlı, 2 ve 6 kanatlı 25x40 kovanlı durumların model sonuçlarının karşılaştırılması (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, HFK=1.26).....	77
Şekil 5.19	: R100 ölçüm çizgisi üzerinde sıcaklıklar için kovansız, 25x40 kovanlı, 2 ve 6 kanatlı 25x40 kovanlı durumların deney sonuçlarının karşılaştırılması (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, HFK=1.26).....	77
Şekil 5.20	: R175 ölçüm çizgisi üzerinde sıcaklıklar için kovansız, 25x40 kovanlı, 2 ve 6 kanatlı 25x40 kovanlı durumların model sonuçlarının karşılaştırılması (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, HFK=1.26).....	78

Şekil 5.21	: R175 ölçüm çizgisi üzerinde sıcaklıklar için kovansız, 25x40 kovanlı, 2 ve 6 kanatlı 25x40 kovanlı durumların deney sonuçlarının karşılaştırılması (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, HFK=1.26).....	78
Şekil 5.22	: R100 ve R175 ölçüm çizgileri üzerinde sıcaklıklar için farklı hava fazlalık katsayısı değerlerinde model sonuçlarının karşılaştırılması. (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, 25x40 kovanı, 4 kanatlı model).....	79
Şekil 5.23	: R100 ve R175 ölçüm çizgileri üzerinde sıcaklıklar için farklı hava fazlalık katsayısı değerlerinde deney sonuçlarının karşılaştırılması. (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, 25x40 kovanı, 4 kanatlı model).....	79
Şekil 5.24	: 6 kanatlı modelde elde edilen ocak içindeki x yönü hız konturları.(Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, 25*40 kovanı, HFK=1.26, A durumu).....	80
Şekil 5.25	: 6 kanatlı modelde elde edilen ocak içindeki x yönü hız konturları.(Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 87 kW, 25*40 kovanı, HFK=1.26, B durumu).....	80
Şekil 5.26	: 6 kanatlı modelde elde edilen ocak içindeki x yönü hız konturları.(Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 58 kW, 25*40 kovanı, HFK=1.26, C durumu).....	81
Şekil 5.27	: 790 mm ocak boyu 116 kW kazan ısıtma kapasitesinde kovansız durum için elde edilen NO mol kesri konturları (HFK=1.26)	82
Şekil 5.28	: 790 mm ocak boyu 116 kW kazan ısıtma kapasitesinde 25x40 kovanlı ve 4 kanatlı durum için elde edilen NO mol kesri konturları (HFK=1.26).....	82
Şekil 5.29	: R100 ölçüm hattı üzerinde NO emisyonu için 2, 4, 6 kanatlı model sonuçlarının karşılaştırılması (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, 25x40 kovanlı durum, HFK=1.26).....	83
Şekil 5.30	: R100 ölçüm hattı üzerinde NO emisyonu için 2, 4, 6 kanatlı deney sonuçlarının karşılaştırılması (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, 25x40 kovanlı durum, HFK=1.26).....	84
Şekil 5.31	: R175 ölçüm hattı üzerinde NO emisyonu için 2, 4, 6 kanatlı model sonuçlarının karşılaştırılması (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, 25x40 kovanlı durum, HFK=1.26).....	84
Şekil 5.32	: R175 ölçüm hattı üzerinde NO emisyonu için 2, 4, 6 kanatlı deney sonuçlarının karşılaştırılması (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, 25x40 kovanlı durum, HFK=1.26).....	85
Şekil 5.33	: R100 ve R175 ölçüm çizgileri üzerinde NO emisyonu deney model sonuçlarının karşılaştırılması (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, 25x40 kovanlı ve 4 kanatlı durum,HFK=1.26).....	86
Şekil 5.34	: R100 ve R175 ölçüm çizgileri üzerinde NO emisyonu için hava fazlalık katsayısının 1.02 olduğu durumdaki deney sonuçları (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, 25x40 kovanlı ve 4 kanatlı durum).....	86
Şekil 5.35	: R100 ve R175 ölçüm çizgileri üzerinde NO emisyonu için model ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 87 kW, 25x40 kovanlı ve 6 kanatlı durum, HFK=1.26).....	87

Şekil 5.36	: R100 ve R175 ölçüm çizgileri üzerinde NO emisyonu için model ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 58 kW, 25x40 kovanlı ve 6 kanatlı durum, HFK=1,26).....	87
Şekil 5.37	: 790 mm ocak boyu 116 kW kazan ısıl kapasitesinde kovansız durum için elde edilen CO mol kesri konturları (HFK=1.26).....	88
Şekil 5.38	: R100 ve R175 ölçüm çizgileri üzerinde CO emisyonu için hava fazlalık katsayısının 1.26 olduğu durumdaki model sonuçları (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, 4 kanatlı 25x40 kovanlı).....	89
Şekil 5.39	: R100 ve R175 ölçüm çizgileri üzerinde CO emisyonu için hava fazlalık katsayısının 1.02 ve 1.26 durumlarındaki deney sonuçlarının karşılaştırılması (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, 4 kanatlı 25x40 kovanlı).....	89
Şekil 5.40	: R100 ölçüm hattı üzerindeki çeşitli konstrüktif durumlardaki CO mol kesri değerleri (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, HFK=1,26).....	90
Şekil 5.41	: R175 ölçüm hattı üzerindeki çeşitli konstrüktif durumlardaki CO mol kesri değerleri (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, HFK=1,26).....	91
Şekil 5.42	: R100 ölçüm hattı üzerindeki çeşitli konstrüktif durumlardaki yanmamış gazlara ait mol kesri değerleri (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, HFK=1,26).....	91
Şekil 5.43	: R175 ölçüm hattı üzerindeki çeşitli konstrüktif durumlardaki yanmamış gazlara ait mol kesri değerleri (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, HFK=1,26).....	92
Şekil 5.44	: Deneylerde ölçülen alev sıcaklığı değerleri (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, HFK=1,26, 25x40 kovanlı).....	92
Şekil 5.45	: Modelde bulunan alev sıcaklığı değerleri (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, HFK=1,26, 25x40 kovanlı).....	93
Şekil 5.46	: T1, T2 ve T3 noktasından ocak cidarına olan radyal mesafede model sıcaklık değişiminin karşılaştırılması (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, 25x40 kovanlı 2 kanatlı durum, HFK=1.26).....	93
Şekil 5.47	: T1, T2 ve T3 noktasından ocak cidarına olan radyal mesafede model sıcaklık değişiminin karşılaştırılması (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, 25x40 kovanlı 6 kanatlı durum, HFK=1.26).....	93
Şekil A.1	Metan Yanma Mekanizmaları.....	97
Şekil A.2	Metan Yanma Mekanizmaları(devam).....	98
Şekil A.3	Metan Yanma Mekanizmaları(devam).....	99
Şekil A.4	Metan Yanma Mekanizmaları(devam).....	100
Şekil A.5	Metan Yanma Mekanizmaları(devam).....	101
Şekil A.6	Metan Yanma Mekanizmaları(devam).....	102
Şekil B.1	Bölgelere göre ısı bilanço.....	111
Şekil C.1	116 kW kazan ısıl kapasitesinde belirtilen durumlarda alev sıcaklıkları (deney).....	113
Şekil C.2	116 kW kazan ısıl kapasitesinde belirtilen durumlarda alev sıcaklıkları deney (devam).....	114

Şekil C.3	87 kW kazan ısıtıl kapasitesinde belirtilen durumlarda alev sıcaklıkları(deney).....	115
Şekil C.4	58 kW kazan ısıtıl kapasitesinde belirtilen durumlarda alev sıcaklıkları (deney).....	116
Şekil C.5	87 kW kazan ısıtıl kapasitesinde 680 mm ocak boyunda belirtilen durumlarda alev sıcaklıkları (deney).....	116
Şekil D.1	116 kW kazan ısıtıl kapasitesinde hava fazlalık katsayısının 1.26 olduğu ve 30x20 kovan kullanıldığı durumda ocak içi sıcaklık ve emisyon değerleri.....	117
Şekil D.2	116 kW kazan ısıtıl kapasitesinde hava fazlalık katsayısının 1.26 olduğu ve 30x20 kovan kullanıldığı durumda ocak içi sıcaklık ve emisyon değerleri(devam).....	118
Şekil D.3	116 kW kazan ısıtıl kapasitesinde hava fazlalık katsayısının 1.02 olduğu ve 30x20 kovan kullanıldığı durumda ocak içi sıcaklık ve emisyon değerleri.....	119
Şekil D.4	116 kW kazan ısıtıl kapasitesinde hava fazlalık katsayısının 1.02 olduğu ve 30x20 kovan kullanıldığı durumda ocak içi sıcaklık ve emisyon değerleri(devam).....	120
Şekil D.5	87 kW kazan ısıtıl kapasitesinde hava fazlalık katsayısının 1.26 olduğu ve 30x20 kovan kullanıldığı durumda ocak içi sıcaklık ve emisyon değerleri.....	121
Şekil D.6	87 kW kazan ısıtıl kapasitesinde hava fazlalık katsayısının 1.26 olduğu ve 30x20 kovan kullanıldığı durumda ocak içi sıcaklık ve emisyon değerleri(devam).....	122
Şekil D.7	116 kW kazan ısıtıl kapasitesinde hava fazlalık katsayısının 1.26 olduğu ve 25x20 kovan kullanıldığı durumda ocak içi sıcaklık ve emisyon değerleri.....	123
Şekil D.8	116 kW kazan ısıtıl kapasitesinde hava fazlalık katsayısının 1.26 olduğu ve 25x20 kovan kullanıldığı durumda ocak içi sıcaklık ve emisyon değerleri(devam).....	124
Şekil D.9	116 kW kazan ısıtıl kapasitesinde hava fazlalık katsayısının 1.02 olduğu ve 25x20 kovan kullanıldığı durumda ocak içi sıcaklık ve emisyon değerleri.....	125
Şekil D.10	116 kW kazan ısıtıl kapasitesinde hava fazlalık katsayısının 1.02 olduğu ve 25x20 kovan kullanıldığı durumda ocak içi sıcaklık ve emisyon değerleri(devam).....	126
Şekil D.11	58 kW kazan ısıtıl kapasitesinde hava fazlalık katsayısının 1.26 olduğu ve 25x20 kovan kullanıldığı durumda ocak içi sıcaklık ve emisyon değerleri.....	127
Şekil D.12	58 kW kazan ısıtıl kapasitesinde hava fazlalık katsayısının 1.26 olduğu ve 25x20 kovan kullanıldığı durumda ocak içi sıcaklık ve emisyon değerleri(devam).....	128
Şekil D.13	116 kW kazan ısıtıl kapasitesinde hava fazlalık katsayısının 1.02 olduğu ve 25x40 kovan kullanıldığı durumda ocak içi sıcaklık ve emisyon değerleri.....	129
Şekil D.14	116 kW kazan ısıtıl kapasitesinde hava fazlalık katsayısının 1.02 olduğu ve 25x40 kovan kullanıldığı durumda ocak içi sıcaklık ve emisyon değerleri(devam).....	130

SEMBOL LİSTESİ

a	: Emilim katsayısı
B	: Dış kuvvet
f	: Normalize edilmiş kütleli karışım oranı
H_u	: Yakıtın alt ısı değeri (kJ/Nm ³)
I	: Toplam radyasyon yoğunluğu
i, j, k	: x,y,z yönünde vektörler
i_a	: Duman gazının çevre sıcaklığındaki entalpisi (kJ/ Nm ³)
i_b	: Duman gazının baca sıcaklığındaki entalpisi (kJ/ Nm ³)
n	: Yansıma indeksi
p	: Tekil yük
R	: Faz fonksiyonu
r	: Yer vektörü
s	: Yön vektörü
s'	: Saçılma yönü vektörü
T	: Yerel sıcaklık
u,v,w	: x, y, z koordinatlarında hız bileşenleri
$\widetilde{u''_i u''_j}$	: Einstein toplama notasyonu
V	: Hız
v_g	: Özgül kuru duman miktarı (Nm ³ /Nm ³)
z	: Kütle
Z_b	: Baca kaybı(%)
Z_c	: Sıcak Cidar Kaybı (%)
Z_e	: Eksik Yanma Kaybı (%)
P	: Basınç
ρ	: Yoğunluk
μ	: Viskozite
η	: Kazan ısı verimi (%)
λ	: Hava fazlalık katsayısı
ϕ	: Viskoz disipasyon fonksiyonu
ν_t	: Türbülans viskozite
$\widetilde{\varepsilon_{ff}}$	: Sabit zaman ölçekli oran
τ, C, σ	: Sabitler
σ_s	: Saçılma katsayısı
σ	: Stefan Boltzman sabiti

DOĞAL GAZ YAKILAN BİR OCAKTA KATI YÜZEYİN EMİSYON VE VERİM ÜZERİNE ETKİSİ

ÖZET

Enerji kaynaklarının verimli bir şekilde kullanılması ve bunların zararlı etkilerinin bertaraf edilmesinin gerekliliği son yıllarda önem kazanan bir konudur. Doğal gaz yaygın kullanım alanına sahip bir fosil yakıttır. Bu yakıtın verimli kullanılması sonucunda ekonomik yük azaltılabilmekte ve doğal gaz kaynaklarının daha uzun süre kullanılması mümkün olabilmektedir. Yanma sonu gazlarının içeriğindeki NO_x ve CO değerlerini düşürerek çevresel etkileri azaltmak mümkündür.

Bu çalışmada, kazan yanma odasına yerleştirilen dolgu malzemelerinin ısı verim, azotoksit ve karbonmonoksit emisyonlarına etkisi deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Farklı çap ve boylarda kovanlar ve ayrıca bu kovanların dış yüzeyine sabitlenmiş farklı sayılarda kanatlar katı yüzey ışınlamını arttıran ek yüzeylerdir.

Deneysel çalışmada, 116 kW kapasiteli TS EN 676 standardına uygun tasarlanmış ocak boyu ayarlanabilen kazan kullanılmıştır. Kurulan deney tesisatının ana ekipmanları kazan, pompa, su besleme deposu, hava-su ısı değiştiricisi ve bacadır. Ocak boyu, kazan ısı kapasitesi, hava yakıt oranı, kovan boyutu ve kanat sayısı deney parametresi olarak seçilmiştir.

Nümerik çözümlerde bir hesaplama akışkanlar dinamiği programı olan FLUENT programı kullanılmıştır. Deney kazanının gerçek boyutlarına uygun modellenmesi ve ağ yapısının sağlanması ise GAMBIT programında yapılmıştır.

Sonuç olarak nümerik ve deneysel verilerin karşılaştırması yapılarak sonuçların kabul edilebilir yakınlıkta olduğu görülmüştür. Ayrıca, kovanlarla beraber kanat kullanımının ısı geçişini ve kazan ısı verimini arttırdığı; emisyonları düşürdüğü saptanmıştır.

THE EFFECT OF SOLID SURFACE RADIATION OVER EMISSION AND EFFICIENCY IN NATURAL GAS FURNACES

SUMMARY

In the last years, necessity of using energy resources effectively and avoiding harmful effects of them has become an important subject. Natural gas is a widely used fossil fuel. As a result of using this fuel effectively, economical expenses can decrease and natural gas resources can be used much longer. It can be possible to avoid harmful environment effects by decreasing NO_x and CO values in emissions.

In this study, the effect of additional filling materials that placed in the combustion chamber over the boiler efficiency, nitrogen oxide and carbon monoxide emissions was investigated experimentally and numerically. Cylindrical filling materials of various diameters and lengths, and also fins that is placed on outer surface of filling materials are additional surfaces that increases solid surface radiation.

In the experimental part of this study, a 116 kW heat capacity natural gas boiler that described in the Turkish Standards TS EN 676 was used. The main parts of experiment system are boiler, pump, water support depot, air-water heat exchanger and flue. Parameters of this study are combustion chamber size, heat input capacity, the geometry of filling material and number of fins.

Numerical solutions were obtained by a CFD program FLUENT. Modelling the boiler by original lengths that measured from the experiment system and meshing is done by using GAMBIT program.

As a conclusion, the numerical solutions were acceptably close to experimental results. In addition, it has been observed that, using fins with cylindrical filling materials increased heat transfer, the boiler efficiency and also decreased the emissions.

1. GİRİŞ

Doğal gaz; büyük oranda Metan (CH_4), daha az oranlarda Etan (C_2H_6), Propan (C_3H_8), Bütan (C_4H_{10}), Azot (N_2), Karbondioksit (CO_2), Hidrojensülfür (H_2S), Helyum (He) içeren, renksiz, kokusuz, yüksek kalorili bir gaz yakıttır. Türkiye’de 1987 yılından itibaren kullanılmaktadır. Öncelikle elektrik üretimi için kullanılan bu yakıtın son yıllarda ısıtma amaçlı kullanımı yaygınlaşmıştır. Türkiye 1990’lardaki anlaşma ve yatırımların da etkisiyle hızla doğalgaz enerjisine yönelmiştir. Bu gazın çevre kirleticiliğinin azaltılarak verimli kullanılması yaygınlaşan kullanımı göz önüne alındığında önem arz etmektedir.

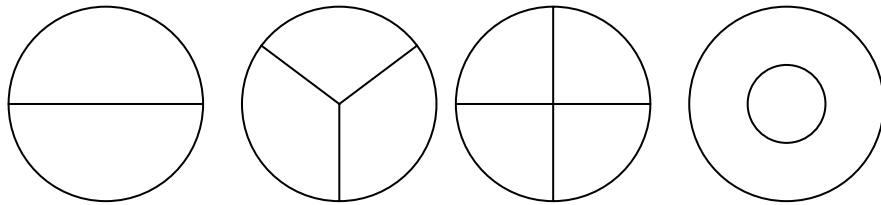
2005 yılında dünyada toplam 2 trilyon 871 milyar 773 milyon metreküp doğalgaz üretilmiştir. Türkiye ise 26 milyar 572 milyon metreküplük doğalgaz ithalatıyla doğalgaza kullanan ülkeler arasında dokuzuncu sırada yer almıştır. Üretimde Rusya'dan sonra ikinci sırada olan ABD, 121 milyar 348 milyon metreküplük doğalgaz ithalatıyla birinci sırada görülmüştür.

Yanmadan kaynaklanan hava kirliliği, yakılan yakıtın miktarına, yakıt kirlilme ve yanma özelliğine, yanma sistemleri ve işletme koşullarına, kirlitici emisyonların atmosfere verilme biçimine, topografik ve meteorolojik koşullara bağlı olarak değişmektedir (Tucer,2005).Yanma sonucu çıkan kirlitici emisyonları yönünden diğer yakıtlara göre daha temiz bir yakıt olan doğal gazın yanması sonucunda; karbondioksit, karbonmonoksit ve azot oksit oluşmaktadır. Bünyesinde kükürt bulundurmadiğından kükürt oksitler 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 karbon monoksit oluşumunun azlığı ise diğer yakıtlara göre bir diğer avantajıdır. Yanma ürünleri içinde bulunan ve çevreye zarar veren bir başka bileşende azot oksitlerdir. Azot oksit oluşumunun ana nedenlerinden biri yanma sıcaklığının yüksek olmasıdır. Doğal gaz yanması sonucu oluşan ocak sıcaklıkları yüksek olup azot oksit emisyonları eğer önlem alınmazsa diğer yakıtlara göre daha az olmakla birlikte yine de önemli mertebededir.

Literatürde doğal gaz yanması sonucu emisyonların azaltılması ve kazan ısı veriminin artırılmasını içeren çalışmalar yapılmıştır. A. Hepbaşlı, azot oksit emisyonu azaltma yöntemlerinden duman gazı geri beslemesi üzerine çalışmıştır. Duman gazı geri dönüşünün kullanıldığı deneylerde azot oksit emisyonu yönünden daha düşük değerler bulunmuştur (Hepbaşlı,1991). V. Dupont et al., tarafından, FLUENT'te modelleme ve deneysel çalışmaları kapsayan termik ve ani azotoksit oluşumunun azaltılmasına yönelik bir çalışma yapılmıştır(Dupont ve diğ., 1993). Nishimura et al., endüstriyel bir fırında yanma başlamadan önce yanma odasını sıcaklığı 1100°C'ye arttırmıştır. Bu ön ısıtma NO_x rejeneratif yakıcı ile yapılmıştır. Klasik tip yakıcının kullanıldığı duruma göre daha düşük azot oksit emisyon değerleri tespit edilmiştir(Nishimura ve diğ.,1997). Bu çalışmaya benzer bir başka çalışma ise Y. Suzukawa et al. tarafından yapılmıştır. Y. Suzukawa et al. seramik bir petek yardımıyla ön ısıtma işlemini gerçekleştirmiştir. FLUENT programının kullanıldığı çalışmada, termik NO_x emisyonlarında azalma tesbit edilmiştir. Geliştirilen düşük azot oksit yakıcısıyla kullanılarak ise düşük emisyon değerlerine ulaşılmıştır(Suzukawa ve diğ.,1997). L. J. Muzio ve G. C. Quartucy tarafından NO_x kontrolünde farklı yönlerden araştırmalar yapılmıştır. İleri alev bölgesine metan püskürterek ve düşük NO_x yakıcılarla(bu yakıcılar üzerinde havanın ve yakıtın kademelenmesini sağlayan konstrüktif değişiklikler yapılarak) farklı karışımlar oluşturarak NO_x emisyonlarını azaltmak üzerine çalışılmıştır. Bu çalışma sonucunda termik NO oluşumunun reaksiyon sıcaklığına, bölgesel stokiometriye ve oyalanma zamanına bağlı olduğu tespit edilmiştir. Yakıtsal NO oluşumunda ise yerel oksijen derişiklikleri önemli rol oynamakla beraber, alev sıcaklığı da etkilemektedir(Muzio ve Quartucy, 1997). Urashima et al. tarafından yapılan deneylerde doğal gaz yanmasında çok delikli amonyak/metan radikal püskürtülmesi ile amonyak/metan sitokiyometrisine bağlı olarak NO_x emisyonunda azalma tespit edilmiştir(Urashima, 1998). Radyasyon modellerinin radyasyonsuz duruma göre karşılaştırmasını nümerik olarak E. P. Keramida yapmıştır. 2 boyutlu bir model yardımıyla yapılan bu çalışmada, eş zamanlı olarak akış, yanma, ısı iletimi ve yanmanın matematiksel modeli yapılmıştır. Yakıt olarak doğal gaz kullanılan bu modellemeye tezde kullanılan standart k-epsilon türbülans modeli kullanılmıştır. Çalışma sonucunda deneysel verilerle modelleme sonuçları tutarlı olduğu görülmüştür(Keramida,2000). S. C. Li and F. A. Williams tarafından yapılan metan kullanılan farklı bir çalışmada ise farklı ekivalans oranlarında yanma havasına belirli bir miktarda su(CO₂, N₂ ve

Argon ile birlikte)ilave edilerek NOx emisyonlarının azaldığı tespit edilmiştir(Li ve Williams, 1999).C. D. Taglia et al. tarafından Cfc- Tasc programıyla yapılan nümerik çalışmada yakıcıya yakın bölgeye ısı değıştiricisi konularak veya yanmanın gerekleştđđđ bölgede konstrüktif değışiklik yapılarak, düşük sıcaklık ve NOx emisyonları elde edilmiştir (Taglia,2001). Javed et al. tarafından seçici katalitik olmayan NOx azaltma tekniđđ referans alınarak yapılan çalışmada üre, siyanürik asit gibi sıvılarla çalışılmıştır. Yanma öncesi ve sırasındaki NOx azaltma yöntemleri üzerinde durulmuştur (Javed ve diğ., 2006).

Bu tezin temelini oluşturan çalışma, K. Onat tarafından 1997 yılında yapılmıştır. Çalışmada doğal gaz ışınlamını artırarak ocak sıcaklığını düşürmek için alevin içersine yerleştirilen çeşitli şekildeki katı dolgu maddelerinin uygulamadaki diğerr yöntemlere göre etkenliğini araştırmıştır. Doğal gaz ocaklarında tanecik ve is ışınlamı bulunmadığından ocak ısıtma yüzeyine geçen ısının katı ve sıvı yakıt ocaklarına göre daha az olacağı ve daha yüksek sıcaklıklar tespit edileceđđ düşünölmüştür. Ocak sıcaklıklarındaki artışın da NOx oluşumunu tetiklediđđ üzerinde durulmuştur. Baca gazı ve su buharı enjekte ederek ocağın soğutulmasının bazı sakıncalar getirdiđđ belirtilerek şekilde gösterilen katı dolgular ocağı yerleştirilmiştir. Bu çalışmanın sonucunda çapraz ve boru şeklindeki dolgular suya daha fazla ısı geişı sađđladıkları için tercih edilmiştir. Boru tipi kovanlarda dolgu maddesinin sıcaklığının yükselmesi göz ardı edilirse, suya ısı geişı ve yanma tekniđđ bakımından en uygun tiptir. Ayrıca boru tipi dışındakiler alevle çakıştığından brölöre uygun bulunmamışlardır (Onat,1997).



Şekil 1.1. Dolgu malzemeleri(Onat,1997)

A. Akgüngör, yaklaşık 35 kW kapasiteli TS 11392 Pr EN 676 standardında brölör testi için tasarlanmış doğal gaz yakıtlı bir deney kazanına cebri brölör monte ederek laboratuvar şartlarında, kazan içersinde alev özelliklerini ve ortaya çıkan emisyonları

incelemiştir. Deney kazanı, ocak boyu değiştirilebilen alev geri dönüşlü bir kazandır. Ocak boyu, gaz hattı ayarlamaları ve ilave ısıtım yüzeyleri olarak kovanlar deney parametreleridir. Yapılan deneylerde farklı noktalara yerleştirilmiş termoelemanlar ile sıcaklık değişimleri; atık gaz çıkış borusuna yerleştirilen gaz analizörü, termoeleman ve basınç ölçer gibi ölçü aletleri ile hava fazlalık katsayısı, verim, O_2 , CO, CO_2 , NO_x , baca sıcaklığı ve basıncı ölçülmüştür. Dört farklı ocak boyunda(46, 55, 65 ve 75 cm), iki farklı yakıt debisinde ($5,5$ ve $6,5$ m^3/h) kovansız deneyler; üç farklı ocak boyunda(46, 55, 65), iki farklı yakıt debisinde ($5,5$ ve $6,5$ m^3/h) ve 25x20, 25x40, 30x20, 30x40 kovan çap ve boylarında ise kovanlı deneyler yapılmıştır(Akgüngör, 2000).

Ş.Yılmaz, A. Abdülkadir Akgüngör tarafından yapılan çalışmadaki deney kazanının hesaplamalı akışkanlar dinamiği programlarıyla(GAMBIT ve FLUENT) modelini oluşturmuş, nümerik ve deneysel verileri karşılaştırmıştır (Yılmaz,2001).

M. İlbaş, vd., yaptıkları nümerik çalışmada yanma odasına yerleştirilen levhanın sıcaklık ve azotoksit emisyonuna etkisini incelemiştir. FLUENT programının kullanıldığı bu çalışmada ilave ısıtım yüzeyinin NO_x ve yanma odası sıcaklığını azalttığı saptanmıştır(İlbaş ve diğ.,2006)

S. Tucer doğal gaz yakıtlı bir ocak için yaptığı çalışmada, ocak sıcaklığının yüksek olduğu durumda yakma gazından gelen azotun kimyasal reaksiyona girerek NO_x oluşumuna sebebiyet verdiğini belirtmiştir. Nümerik modellemede katı yüzey ısıtımını arttırmak amacıyla dolgu maddeleri kullanılmıştır. Dolgu geometrileri için ısı geçiş oranları farklı tespit edilmiştir. Bunun nedeninin farklı geometrilerde dolgunun alanı, dolgu ile ocak duvarları arasındaki şekil faktörleri, eşdeğer tabaka kalınlıkları ve gaz emisivitelerindeki farklılık olduğunu vurgulamıştır. Tezin sonucunda boru kısmı olan dolgularda belirli bir dolgu çapı için kanat sayısı arttıkça ısı geçişinin arttığı görülmüş ve belirli bir kanat sayısı için optimum kovan çap ve boyu değeri bulunmuştur(Tucer,2005).

Ö. Aydın tarafından yapılan deneysel ve nümerik çalışmada 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 yakılmaktadır. Kovansız ve çap x uzunluk değerleri 20x20, 25x20, 25x40, 30x20,

30x40 olan kovanlarda, farklı hava fazlalık katsayıları ve ısıl güçlerde bu çalışma yapılmıştır. Deneysel çalışma, FLUENT programı yardımıyla gerçek şartları uygun modellenmiş; deney ve model sonuçları sıcaklık değişimleri(ocak ve bacada), emisyonlar(ocak ve bacada) ve ısı verim yönünden irdelenmiştir(Aydın,2005).

İlave ısıtım yüzeylerinin ocak sıcaklığına, dolayısıyla emisyonlara etkisini inceleyen araştırmaların devamı olan bu çalışmada, cebri(üflelemeli) brülör ile TS EN 676 standardında alev geri dönüşlü kazan kullanılmıştır. Katı yüzey ısıtımını arttırmak amacıyla değişik çap ve boylardaki kovanlara değişik sayılarda(2,4 ve 6) kanatlar monte edilmiştir. Kovanlar ve kanatlar 1 mm kalınlıkta çelik sacdan üretilmiştir. Hava fazlalık katsayısı, ocak boyu, kazan ısıl kapasitesi, kovan çapı ile boyu ve kanat sayıları bu çalışmanın parametrelerini oluşturmaktadır.

Bu çalışma deneysel ve nümerik olarak yapılmıştır. Nümerik çözümlere, GAMBIT ile modelleme ve ağ yapısı işlemleri ile başlanmıştır. Bir sayısal akışkanlar dinamiği programı olan FLUENT ile gerçek şartlara uygun olarak çözüm alınmıştır. Yanma tepkimeleri PrePDF alt programı yardımıyla FLUENT programına aktarılmıştır. Deney kazanı, hava su ısı değiştiricileri, besleme deposu ve pompadan oluşan bir deney sistemi kurulmuştur. Sistem ve kazan içerisindeki kritik noktalardan sıcaklık, basınç, debi ve emisyon ölçümleri yapılmış; sonuçlar karşılaştırılarak yorumlanmıştır. Ayrıca deney verileri ile FLUENT çıktılarının karşılaştırılması tezde mevcuttur.

2. AKIŞ VE ISI TRANSFERİ OLAYLARININ FİZİKSEL MODELLENMESİ

Akış problemlerinin çözümünde en sık kullanılan ifadeler, genel korunum denklemleridir. Kütle, momentum ve enerjinin korunumu denklemleri öncelikli olacak şekilde, problemin yapısına (yanma, ısıtım, ...vb.) bağlı olarak ilave denklemler tanımlanır. Bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği programı olan FLUENT'te de ele alınan modele ve sistem şartlarına göre doğru modelleri seçerek, doğru denklemleri çözdürmek önem kazanmaktadır. Üzerinde çalışılan modelin çözümü için kullanılan denklem ve modellere ait anlatımlar aşağıda verilmektedir.

2.1 Navier Stokes Denklemleri

Navier Stokes denklemleri akış durumuna uygulanabilen üç temel korunum kanununu içerir. Bu kanunlar kütle, momentum ve enerjinin korunumudur.

2.1.1 Kütle Korunumu(Süreklilik) Denklemi

Kontrol hacmi içerisindeki akışkan kütlelerinin zamanla değişimi ile, kontrol sisteminden net kütle akış hızının toplamının sıfıra eşit olması esasına dayanır.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} \partial V + \left[\text{div}(\rho \vec{V}) \right] \partial V = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{V}) = 0 \quad (2.2)$$

2.1.2 Momentum Korunumu Denklemi

Aşağıdaki denklemler x, y ve z yönlü momentum korunum denklemleridir. Belirtilen koordinatlara karşılık gelen hızlar sırasıyla u, v, w olarak gösterilmiştir. Ayrıca aşağıdaki denklemlerde μ viskoziteyi, P basıncı, B ise dış kuvveti göstermektedir.

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \nabla \vec{V} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + B_x \quad (2.3)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(2 \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \nabla \vec{V} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + B_y \quad (2.4)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(2 \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2}{3} \nabla \vec{V} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + B_z \quad (2.5)$$

2.1.3 Enerji Korunumu Denklemi

$$\rho \frac{Dh}{Dt} = \frac{Dp}{Dt} + \text{div}(k \nabla T) + \phi \quad (2.6)$$

Enerji korunum denkleminin genel hali yukarıda görülmektedir. Burada ϕ viskoz disipasyon fonksiyonu olup Newtonian akışlar için aşağıdaki gibidir.

$$\phi = \mu \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \right. \\ \left. + \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] \\ + \lambda \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \quad (2.7)$$

Ayrıca enerji korunumu denkleminde D gerçek türev operatörüdür ve aşağıdaki gibi ifade edilebilir. Bir alanın boşluktaki sabit bir pozisyona göre türevi uzaysal (spatial) veya Euleryen türev (Eulerian derivative) olarak adlandırılır. Hareketli bir parçacığın izlenmesine bağlı olan türev gerçek (substantive), Lagrangyan (Lagrangian) veya maddi (material) türev olarak adlandırılır.

$$\frac{D}{Dt} (*) = \frac{\partial (*)}{\partial t} + \nabla \vec{V} \quad (2.8)$$

2.2 İki Denklemlili Türbülans Modeli (k-epsilon)

Standart k-epsilon modeli Reynolds sayısının yüksek olduğu türbülanslı akışlarda kullanılan bir modeldir. Modelin çözümünde viskoz model olarak kullanılarak sonuca ulaşılmıştır.

$$\widetilde{u_i'' u_j''} = -\nu_t \left(\frac{\partial \widetilde{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \widetilde{u_j}}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \widetilde{k} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \nu_t \frac{\partial \widetilde{u_k}}{\partial x_k} \quad (2.9)$$

Yukarıdaki denklem, türbülans viskozite şu şekilde tanımlandığında kullanılabilir:

$$\nu_t = C_\mu \frac{\widetilde{k}^2}{\varepsilon} \quad (2.10)$$

Modellenmiş türbülans kinetik enerji denklemi ve mekanik disipasyon denklemi aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\bar{\rho} \frac{\partial \tilde{k}}{\partial t} + \bar{\rho} \tilde{u}_k \frac{\partial \tilde{k}}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\bar{\rho} \frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial \tilde{k}}{\partial x_k} \right) - \bar{\rho} \tilde{u}_i'' \tilde{u}_j'' \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} - \bar{\rho} \tilde{\varepsilon} \quad (2.11)$$

ve

$$\bar{\rho} \frac{\partial \tilde{\varepsilon}}{\partial t} + \bar{\rho} \tilde{u}_k \frac{\partial \tilde{\varepsilon}}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\bar{\rho} \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \tilde{\varepsilon}}{\partial x_k} \right) - C_{\varepsilon 1} \bar{\rho} \frac{\tilde{\varepsilon}}{\tilde{k}} \tilde{u}_i'' \tilde{u}_j'' \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \bar{\rho} \frac{\tilde{\varepsilon}^2}{\tilde{k}} \quad (2.12)$$

Mekanik disipasyon hızı yüksek Reynolds sayılarında(türbülanslı akış) yerel izotropi kabulü altında modellenir. Kaldırma ve hacimsel genleşme etkilerinden dolayı disipasyon hızına ilave kaynak terimleri eklenmektedir.

$$C_{\varepsilon 3} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} \frac{\overline{\rho' u_i''}}{\bar{\rho}} \frac{1}{\tilde{\varepsilon}} \text{ ve } C_{\varepsilon 4} \bar{\rho} \tilde{\varepsilon} \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k}$$

Bununla birlikte değişik yoğunluklardaki akışkanlar için son tanımlanan sabitleri değiştirmeye gerek yoktur. Eğer reaksiyonsuz değişik yoğunluktaki akışlar için bu sabitler değiştirilirse, alev içerisindeki performans yeterli olmaz. Ayrıca adı geçen sabitler bağlı oldukları formüllerden dolayı alev bölgelerinde çok hassas seçilmelidir. Yanma haricinde bu terimlerin ihmal edildiği durumlara rastlamak mümkündür.

Ortalama skalar için modellenmiş kısmi diferansiyel denklem aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$$\bar{\rho} \frac{\partial \bar{f}}{\partial t} + \bar{\rho} \tilde{u}_k \frac{\partial \bar{f}}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\bar{\rho} \frac{\nu_t}{\sigma_f} \frac{\partial \bar{f}}{\partial x_k} \right) \quad (2.13)$$

Skalar varyans ise

$$\bar{\rho} \frac{\partial \widetilde{f'^2}}{\partial t} + \bar{\rho} \tilde{u}_k \frac{\partial \widetilde{f'^2}}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\bar{\rho} \frac{\nu_t}{\sigma_{ff}} \frac{\partial \widetilde{f'^2}}{\partial x_k} \right) - 2 \bar{\rho} \tilde{u}_k'' \tilde{f}'' \frac{\partial \tilde{f}}{\partial x_k} - 2 \bar{\rho} \varepsilon_{ff} \quad (2.14)$$

Burada skalar akı, gradyen akı modeli tarafından verilmektedir.

$$\widetilde{u''f''} = -\frac{\nu_t}{\sigma_f} \frac{\partial \widetilde{f}}{\partial x_k} \quad (2.15)$$

Skalar disipasyon ise sabit zaman ölçekli oran tanımıyla verilmektedir.

$$\widetilde{\varepsilon_{ff}} = \tau \widetilde{f''^2} \frac{\widetilde{\varepsilon}}{2k} \quad (2.16)$$

Sabitlerin standart değerleri $C_\mu=0.09$, $C_{\varepsilon 1}=1.44$, $C_{\varepsilon 2}=1.92$, $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\varepsilon=1.3$, $\sigma_f=0.7$, $\sigma_{ff}=0.7$, $\tau=2.0$ olarak tanımlanmıştır. Ayrıca f normalize edilmiş karışım oranıdır. 1 ve 2 alt indisleri başlangıç akışlarını ifade etmektedir

$$f = \frac{z_a - z_{a,1}}{z_{a,2} - z_{a,1}} \quad (2.17)$$

Tüm bileşenlerin moleküler diffüsitivitesi ve sıcaklıkların eşit olduğu Shvab Zeldovich formülasyonu, element seçimine bağlı olmayan tek bir karışım oranı formülasyonunu oluşturur. Hızlı kimya kabulüyle, karışım oranı tüm termokimyasal özellikleri tanımlar(Teknische Universtat Darmstadt, 2007).

$$\phi = \phi(f) \quad (2.18)$$

2.3 Radyasyon Modeli(Discrete Ordinates)

Discrete ordinates (DO) radyasyon modeli, ışınlama olan transfer denklemini her biri kartezyen sistem takımına sabitlenmiş s vektör yönüyle ilişkili değişik sayıda farklı düzlem açılar için çözer. FLUENT programında çözüm yapan kişi istenilen sayıda ışın kullanarak, açısal diskritizasyonu kontrol edebilmektedir. Bu metotta ışın izleme gerçekleşmez. Işın izlemeyle çözüm DTRM radyasyon modelinde mevcuttur. DO modeli momentum denklemini, ışınlama yoğunluğu için uzaysal koordinatlarda geçiş denklemine dönüştürür. DO modelinin çoğu geçiş denklemi için çözümü yapılabilmektedir. Çözüm metodu akış ve enerji denkleminin çözümü için elverişlidir. Aşağıda ışınlama olan transfer denklemi görülebilmektedir.

$$\frac{dI(r,s)}{ds} + (a + \sigma_s) I(r,s) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(r,s') R(s,s') d\Omega' \quad (2.19)$$

Bu denklemde r , yer vektörünü; s , yön vektörünü; s' , saçılma yönü vektörünü; a , emilim katsayısını; n , yansıma indeksini; σ_s , saçılma katsayısını; σ , Stefan Boltzmann sabitini ($5.672 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$); I , bulunduğu yere ve yöne bağlı bir büyüklük olan toplam radyasyon yoğunluğunu; T , yerel sıcaklığı; R , faz fonksiyonunu; Ω' , katı açığı ifade etmektedir.

DO modeli ışınlama olan geçiş denklemini s yönünde ve uzaysal koordinatlarda aşağıdaki gibi oluşturmaktadır. Burada s_i s 'nin bir bileşenidir.

$$\frac{dI(Is_i)}{dx_i} + (a + \sigma_s) I(r,s) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(r,s') R(s,s') d\Omega' \quad (2.20)$$

2.4 PDF

PDF bir olayın belirli sayıdaki bağımsız değişkenlerde meydana gelme olasılığının tanımıdır ve kimyasal tepkimelerin tanımlanmasında kullanılır. Ön karışimsız yanma modelinin seçildiği bu çalışmada Smooke mekanizmasının içerdiği toplam 17 bileşen PDF olarak tanımlanmıştır. Bu bileşenler CH_4 , CH_3 , H , O_2 , HO_2 , H_2 , O , OH , H_2O , CH_2O , HCO , CO , CO_2 , CH_3O , N_2 , H_2O_2 , N' 'dir. Aralarında oluşturdukları zincir tepkimeler sayesinde yanma gerçekleşir.

Probability Density Function(PDF) FLUENT programının bir alt programı olan prePDF kullanılarak oluşturulmuştur. Oluşturulan bu ek program, yanma çözümleri yapılırken non-premixed combustion menüsünden okutularak; varsayılan yanma tepkimelerinden bağımsız tanımlanan Smooke mekanizması tepkimeleriyle çözüme ulaşılmıştır.

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 termokimyası 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 türbülansın etkileşimi olası yoğunluk fonksiyonu (PDF-Probability Density Function) ile hesaba katılır.

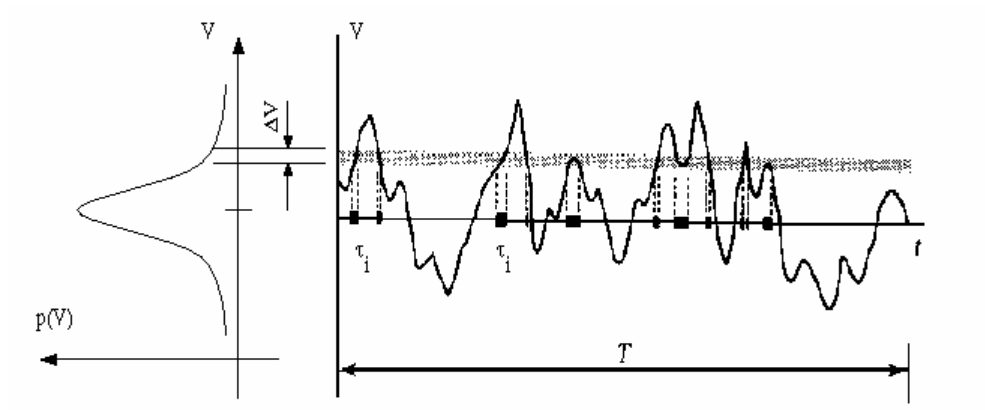
Ön karışimsız yanma modeli yaklaşımı özellikle hızlı kimya ile türbülanslı difüzyon alevlerinin simülasyonu için geliştirilmiştir. Ön karışimsız model ara (radikal) bileşenlerin tahmini, ayrılma etkisi, şiddetli türbülans kimyasal çifti hesapları yapar. Bu metot çok sayıda bileşenle transport denkleminin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

Ön karışimsız yanma modeli için akış türbülanslı 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.

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

$$p(f)\Delta f = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum \tau_i \quad (2.21)$$

Pratikte $P(f)$ deneysel olarak gözlenen PDF şekillerine yaklaşan matematiksel fonksiyon olarak açıklanır. Burada $P(V)$ ise, V ve $V + \Delta V$ arasındaki zaman değişim aralığını ifade eder(Aydın,2005).



Şekil 2.1: PDF'in grafiksel tanımı.

3. DOĞAL GAZ

Fosil yakıtlar grubundan hidrokarbon esaslı doğal gaz, yeraltında gözenekli kayaların boşluklarına sıkışmış olarak ya da petrol yataklarının üzerinde gaz halinde büyük hacimler şeklinde bulunur. Doğal gaz esas olarak gaz halindeki parafin, karbon, hidrojen karışımından meydana gelir ve yüzdeleri de doğal gazın kaynağına göre değişir.

Doğal gaz kokusuz, renksiz ve tatsız bir gazdır. Eğer sülfür bileşeni var ise, gaz sarımsak, kokmuş yumurta gibi kokar. Bu özellik kullanımda sızıntı oluşumu esnasında fark edilebilirliğini arttırmak amaçlıdır. Doğal gaz çok düşük sıcaklıklarda sıvı hale dönüştürülebilir(-162 °C).

Doğal gazın özelliklerinden bir diğeri de 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 kaçaqları hava ile karışmadan önce yükseklerde toplanır ve havalandırma bacalarından kolaylıkla dışarı atılabilirler. Doğal gazın ısı değeri 35 916 kJ/m³, yoğunluğu 0.76 kg/m³'dür. Yanması sonucu çevreyi kirletici emisyonlar yönünden diğer yakıtlara göre temiz bir yakıttır.

Bilindiği gibi yüksek fırın, jeneratör, kokhane ve hava gazları da benzer bileşimdedir. Tablo 3.1'de yakacak olarak kullanılan muhtelif gazların bileşimleri verilmiştir. Tablodan da görüleceği üzere, doğal gazın ana bileşeni metan olup, etan, propan, bütan, CO₂ ve N₂ da bulunmaktadır. Tabloda doğal gaz, L (Low-Düşük) ve H (High-Yüksek) olarak üzere iki tip olarak verilmiştir.

Tablo 3.1: Gaz yakacakların bileşenleri (Hacimce % olarak)

	H₂	CO	CH₄	C₂H₆	C₃H₈	C₄H₁₀	C_nH_m	CO₂	N₂	O₂
Yüksek fırın	4.1	21.4	-	-	-	-	-	22.0	52.5	-
Jeneratör	12.0	28.0	0.5	-	-	-	-	5.0	54.5	-
Hava gazı	51.0	18.0	19.0	-	-	-	2.0	4.0	6.0	-
Kokhane gazı	54.5	5.5	25.3	-	-	-	2.3	2.3	9.6	0.5
Doğal gaz L	-	-	81.8	2.8	0.4	0.2	-	0.8	14.0	-
Doğal gaz H	-	-	93.0	3.0	1.3	0.6	-	1.0	1.1	-

Doğal gaz H tipi “petrol gazı” olarak da adlandırılır ve petrolün açığa çıkan CH₄ yüzdesi doğal gaz L'ye nazaran daha fazladır. Doğal gaz H, petrol yatağı üzerinde gaz halinde veya petrol içinde yutulmuş halde bulunur.

Bazı doğal gaz yataklarında, doğal gaz bünyesinde hacimsel olarak % 20 oranına kadar H₂S de bulunur. % l'den az olanlar “fakir gaz”, % l'den fazla olanlar “asitli gaz” olarak adlandırılır. Fakir gaz tipi olanların kükürdünün alınması basit ve ucuz yöntemlerle sağlanır. Bazı doğal gaz yataklarında ise su buharı bulunur. Su buharı

- Genleşme soğutması veya soğutma devresi yoluyla soğutma yapılarak,
- Katı absorpsiyon maddeleri kullanılarak,
- Organik sıvı absorpsiyon maddeleri

kullanılarak, doğal gazdan ayrıştır(Dağsöz, 1997).

3.1 Türkiye’de Doğalgaz Kullanımı

Türkiye’ de doğalgaz ilk kez 23 Haziran 1987’ de Hamitabat’taki Trakya Kombine Çevrim Santrali’ nda elektrik üretmek amacıyla kullanılmaya başlanmıştır İlk doğalgaz ithalatı 14 Şubat 1986’ da Sovyetler Birliği ile yılda 6 milyar m³ gaz almak üzere imzalanan anlaşma ile 1987’ de başlamıştır.

Türkiye 1990'lardaki anlaşma ve yatırımların da etkisiyle hızla doğalgaz enerjisine yönelmiştir. Sadece ısıtmada değil elektrik üretiminde de gaz kömür santralleri ve hidroelektriğin yerini almaya başlamıştır. Doğalgazla çalışan termik santrallerin Türkiye elektrik üretimindeki payı % 50'ye yaklaşmıştır ve eğilim artış yönündedir. Türkiye yıllık toplam 180 milyar kilovat saat elektrik üretmektedir.

Doğalgaza alternatif enerjilerin payı arttırılarak, tasarruf ve enerjide yeniden yapılandırmalarla dışa bağımlılığı azaltmak mümkündür. Ayrıca Türkiye yeraltı kaynaklarındaki doğal gazı kullanılabilir hale getirerek de bu bağımlılık azaltılabilecektir.

2005 yılında dünyada toplam 2 trilyon 871 milyar 773 milyon metreküp doğalgaz üretilmiştir. Türkiye ise 26 milyar 572 milyon metreküplük doğalgaz ithalatıyla doğalgaza bağımlı ülkeler arasında dokuzuncu sırada yer almıştır. Üretimde Rusya'dan sonra ikinci sırada olan ABD, 121 milyar 348 milyon metreküplük doğalgaz ithalatıyla birinci sırada görülmüştür.

3.2 Doğal Gaz Yanması

Yanma, yakıcı ve oksitleyicinin bir arada bulunması sonucunda ışık ve ısıya açığa çıktığı ardışık karmaşık kimyasal reaksiyondur. Çok yalın bir ifadeyle yakıtın yanabilen kısmının, oksijen ile birleşmesiyle ısıya açığa çıkaran kimyasal reaksiyona "yanma" denilmektedir. Yanma ancak yakıt-hava karışımının gazlaştırılması ve tutuşma sıcaklığına ısıtılması durumunda gerçekleşmektedir. Alev, gerekli reaksiyon sıcaklığının altına inilmesi durumunda ortadan kaybolmaktadır. Tam yanma sonucunda baca gazında yanabilen gazlar ve yakıt parçacıkları bulunmamaktadır.

Yanma sonucu oluşan bileşenler, havanın azotu, su buharı, oksijen, karbondioksit ve zararlı maddelerdir. Bu bileşenler yakıtın türüne göre değişkenlik göstermektedir. Yanma sonucu çıkan emisyonlar kükürt dioksit (SO₂), karbon monoksit (CO), azot oksitler (NO_x) ve yanmamış hidrokarbonları (C_xH_y) içerir.

Doğal gazın yanması sonucunda oluşan emisyonlar ise karbon monoksit ve azot oksit emisyonlarıdır. Ayrıca karbon monoksit oluşumunun düşük seviyede olduğu da gözden kaçırılmamalıdır. Azot oksit ise yüksek ocak sıcaklıklarından kaynaklanmaktadır. Bu çalışmada esas mantık ocak sıcaklığının düşürülerek NO_x

emisyollarının azaltılmasıdır. Işınım yapan yüzeyler arttırıldığında ısı transferi artarak ocak sıcaklığının düşürölmesi hedeflenmiştir.

Katı, sıvı ve gaz yakıtların yakılması ile açığa çıkan yanma sonu gazları toz, karbonmonoksit, azotoksitler ve kükürtdioksit emisyonlarını içerir. Yanmanın çevre kirliliğı üzerindeki olumsuz etkilerinin azaltılması için çeşitli yönetmeliklerle emisyonlara sınır değerler getirilmiştir. Türkiye’de geçerli olan yönetmelik ‘Isınmadan Kaynaklanan Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliğı’ dir.

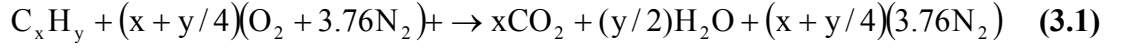
3.2.1 Yanma Hesabı

Deneyin yapıldığı tarihlere karşılık gelen BOTAŞ tarafından açıklanan doğal gaz bileşenleri aşağıda verilmiştir. Bu özelliklere uygun dağıtılan doğal gaz kullanılarak deneyler ve nümerik çözümlemeler yapılmıştır.

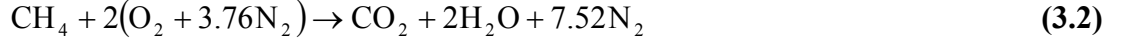
Tablo 3.2: Deneylerin yapıldığı tarih itibari ile doğal gaz özellikleri.

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

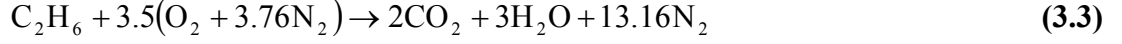
Hidrokarbonların tam yanması halinde yanma reaksiyonu aşağıdaki gibi yazılır.



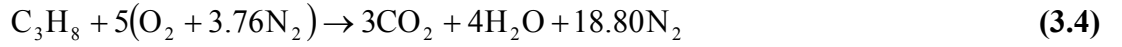
Metan için;



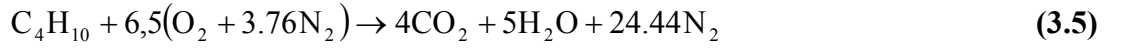
Etan için;



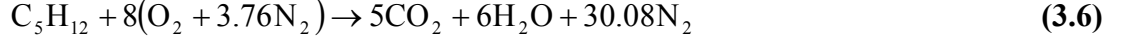
Propan için;



Bütan için;

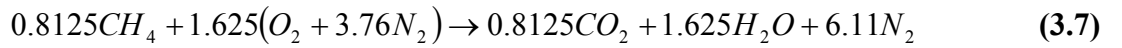


Pentan için;

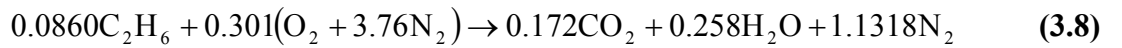


Doğal gaz bileşenlerinin yüzde dağılımlarına göre tepkimeleri yeniden düzenlersek:

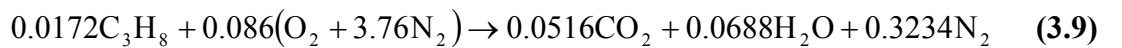
% 81.25 Metan için;



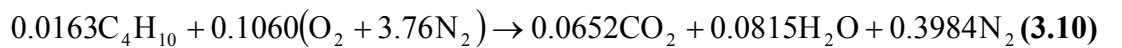
% 8.60 Etan için;



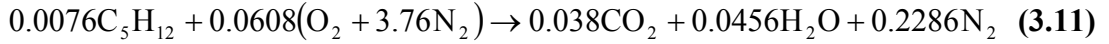
% 1.72 Propan için;



% 1.63 Bütan için;



% 0.76 Pentan için;



Gerekli O₂ miktarı aşağıdaki gibi düşünülerek bulunabilir:

$$\left[\begin{array}{c} \text{Bileşenlerin yanması} \\ \text{için gerekli O}_2 \text{ miktarı} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{Yakıt içindeki} \\ \text{O}_2 \text{ miktarı} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{Gerekli} \\ \text{O}_2 \text{ miktarı} \end{array} \right] \quad (3.12)$$

$$1.625 + 0.301 + 0.086 + 0.1060 + 0.0608 - 0.004 = 2.175 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3 \quad (3.13)$$

O₂ miktarından hareketle ve birim havadaki O₂ miktarı hesaba katılarak aşağıdaki teorik yakma havası değerine ulaşılmıştır:

$$\text{Teorik yakma havası} = v_{h_0} = \frac{100}{21} [2.175] = 10.372 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3 \quad (3.14)$$

Teorik yakma havası hava fazlalık katsayısı λ ile çarpılarak gerçek hava miktarı bulunabilmektedir. Teorik duman miktarı bulunurken ise yanma denklemlerinin çıkanlar tarafındaki CO₂, H₂O, N₂, SO₂ gazlarının toplamaları hesaplanır (Azot miktarına yakıt bileşimindeki azot miktarını eklemek gerekmektedir.)

Teorik özgül duman:

$$v_{g_0} = (CO_2 + H_2O + N_2 + SO_2)_{miktar} \quad (3.15)$$

$$v_{g_0} = 1.1395 + 2.0789 + 8.2341 + 0.065 = 11.455 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3 \quad (3.16)$$

Gerçek duman miktarı ise

$$v_g = v_{g_0} + (\lambda - 1)v_{h_0} \quad (3.17)$$

denklemini kullanarak bulunabilir.

Doğal gaza ait alt ısı değer, bileşenlerin ısı değerleri yardımıyla bulunur:

$$H_u = 0.8125 \times 8560 + 0.0860 \times 15370 + 0.0172 \times 21800 + 0.0163 \times 28354 + 0.0076 \times 34899 = 9331 \text{ kcal/Nm}^3 \quad (3.18)$$

Doğal gaza ait kapalı formül, yakıttaki bütün karbon (C) ve hidrojen (H) atomlarının hesaplanması ile bulunur.

Karbon için:

$$0.8125 \times 1 (\text{CH}_4) + 0.0860 \times 2 (\text{C}_2\text{H}_6) + 0.0172 \times 3 (\text{C}_3\text{H}_8) + 0.0163 \times 4 (\text{C}_4\text{H}_{10}) + 0.0076 \times 5 (\text{C}_5\text{H}_{12}) = 1.139 \quad (3.19)$$

Hidrojen için:

$$0.8125 \times 4 (\text{CH}_4) + 0.0860 \times 6 (\text{C}_2\text{H}_6) + 0.0172 \times 8 (\text{C}_3\text{H}_8) + 0.0163 \times 10 (\text{C}_4\text{H}_{10}) + 0.0076 \times 12 (\text{C}_5\text{H}_{12}) = 4.158 \quad (3.20)$$

$\text{C}_{1.1257}\text{H}_{3.969}$ elde edilir. Bu durumda bu doğal gaz bileşiminin metan (CH_4) yakıtına çok yakın olduğu görülmektedir.

Bileşenlerin molekül ağırlıkları kullanılarak yakıtın mol ağırlığı hesaplanmıştır:

$$MA_{\text{YAKIT}} = \sum n_i MA_i \quad (3.21)$$

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

Ürünlerin molar toplamı

$$n_T = 1.1395 + 2.0789 + 8.2341 = 11.455 \text{ kmol} \quad (3.22)$$

Ürünlerin mol oranları (Bir bileşenin mol sayısının toplam mol sayısına bölünmesiyle bulunur.)

$$n_{\text{CO}_2} = \frac{1.1395}{11.455} = 0.10 \quad (3.23)$$

$$n_{H_2O} = \frac{2.0789}{11.455} = 0.18 \quad (3.24)$$

$$n_{N_2} = \frac{8.2341}{11.455} = 0.72 \quad (3.25)$$

Ürünlerin molekül ağırlığı(Bileşenlerin moleküler ağırlık ve mol oranlarının çarpımlarının toplamıyla ifade edilir.)

$$MA_{ÜRÜNLER} = (0.100 \times 44) + (0.18 \times 18) + (0.72 \times 28) = 27.8 \text{ kg/kmol} \quad (3.26)$$

Yakıttaki azot miktarı (kütle kesri) ise N_2 'nin mol sayısının moleküler kütlesiyle çarpılarak yakıtın toplam moleküler kütlesine bölünmesiyle hesaplanmıştır:

$$m_{N_2} = \frac{n_{N_2} \cdot MA_{N_2}}{MA_{YAKIT}} = \frac{0.0419 \times 28}{19.76} = 0.059 \quad (3.27)$$

3.3 Doğal Gaz Yanması Sonucu Çıkan Emisyonlar

Bu bölümde doğal gaz yanması sonucu açığa çıkan emisyonlardan azot oksit ve karbonmonoksit emisyonları işlenecektir. Yanma sonucu çıkan bir diğer emisyon olan kükürtoksit emisyonu kayda değer seviyede olmadığı için üzerinde durulmayacaktır.

3.3.1 NO_x Emisyonları

Bilimsel araştırmalar NO_x emisyonlarının fotokimyasal dumanlı sis ve ozonun ana etkeni olduğunu söylemektedir. Bu bileşikler atmosferde bulunan su ile (yağmur, sis, vb.) birleşerek asit oluşumuna neden olmaktadır. Bununla birlikte azotoksitler, yeryüzüne ulaşan ultraviyole ışınlarını arttırdığı için stratosferdeki ozonu yok eden bir zincir tepkimeye neden olur. Sağlık ve çevreye bu etkilerinden dolayı NO_x oluşumunun minimize edilmesi gerekmektedir(İmren, 2005).

Azot oksit bileşikleri içerisinde NO renksiz, kokusuz bir gazdır. NO₂ ise kırmızı ile kahverengi arası renkte, kötü kokulu, tahriş edici bir gazdır. Yanma ürünleri arasında genellikle NO bulunmasına rağmen, atmosfere atıldıktan sonra bir kısmı NO₂'ye dönüşmektedir.

Azotun NO, N₂O₄, NO₂, N₂O₅, N₂O, N₂O₃, NO₃ olmak üzere toplam yedi tane oksidi bulunmaktadır. Fakat diğerlerine nazaran havada yüksek oranda bulunan emisyonlar NO ve NO₂'dir. NO_x terimi her bir bileşen için kullanılsa da havanın kullanıldığı işlemlerde sadece bu iki bileşeni temsil etmektedir(Javed ve diğ.,2006)

Aşağıda bazı azot oksit bileşikleri ve özellikleri verilmiştir.

NO: Renksiz, kararlıdır. Yüksek sıcaklıkta yanma ürünüdür. Motor egzozundan çıkan azot oksit, oksijen ile reaksiyona girerek azot dioksit oluşturabilir.

N₂O₄: (N₂O₄ $\longleftrightarrow$ 2NO₂) şeklinde bir tepkimeyle oluşur ve renksizdir.

NO₂: Koyu kahverengi renktedir.160 °C'de kararlıdır. 20 °C ile 160 °C arasında ise NO₂ ve N₂O₄ karışımları görülebilir.

N₂O: Renksiz, göreceli olarak kararl, atmosferdeki sürekli konsantrasyonu yaklaşık olarak 0.5 ppm'dir.

N₂O₃: Renksiz, su ile birleşerek nitrik asit oluşturur.

N₂O₅: Renksiz, kararsız, su ile birleşerek nitrik asit oluşturur.

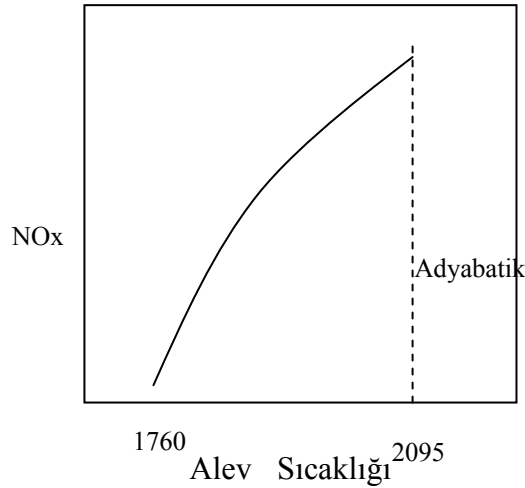
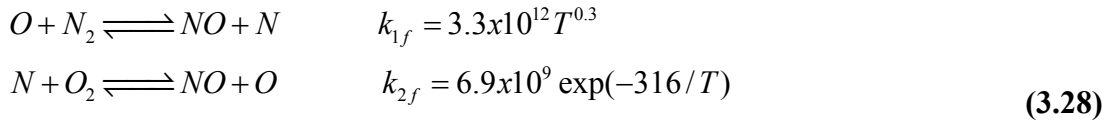
NO_x: İeriği bilinmeyen bir azot oksit bileşiği için kullanılan terimdir. Azot oksit emisyonlarının azaltılması için öncelikle oluşum prensipleri üzerinde durulması faydalıdır. Bunun için NO_x oluşum kimyasını irdelemek önemlidir. NO_x oluşumu farklı mekanizmada gerçekleşmektedir(Çoğalan,2003):

- Isıl NO
- Yakıtsal NO
- Ani NO

3.3.1.1 Isıl NO oluşumu

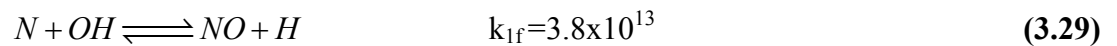
Isıl NO oluşumu yanma için kullanılan havadaki azot ve oksijenin reaksiyona girmesiyle gerçekleşir. Isıl NO oluşum hızının sıcaklıkla duyarlılığı yüksektir ve 1650-1950 °C düzeyindeki alev sıcaklıklarında hızlı oluşur. Bunun nedeni ise N₂ molekülleri arasındaki güçlü üçlü bağın aktivasyon enerjilerinin yüksek oluşudur. Yüksek sıcaklıklarda bağın kopması gerçekleşebilir.

NO_x oluşumunu anlamak açısından hem termodinamik (eşitlik), hem de kinetik (hız) bilgileri önem arz etmektedir. Termik (ısıl) NO oluşumu azot bileşikleri içermeyen temiz yakıtların yanmasında atmosferin azotunun oksidasyonu sonucunda oluşmaktadır. Ana kimyasal reaksiyonlar Zeldovich(1946) tarafından açıklanmıştır. Isıl NO oluşumu, hem gaz yakıt hem de sıvı yakıt yakılmasında, uygun olmayan yanma şartlarında çok yüksek NO konsantrasyonlarına sebebiyet verebilen en önemli oluşum mekanizmasıdır. Zeldovich modeline ait reaksiyonlar aşağıda belirtilmiştir:



Şekil 3.1: Alev Sıcaklığına Bağlı Olarak Isıl NO oluşumu(Campbell ve diğ., 1991)

Oksijenin az miktarda bulunduğu alev bölgelerinde ise bu reaksiyonlara aşağıdaki reaksiyon ilave edilmektedir:



3.3.1.2 Yakıt Kaynaklı NO

Fosil yakacakların yakılması sonucu ortaya çıkan azotoksitlerin bir başka temel kaynağı da yakıttaki azot miktarıdır. Fosil yakıtlardaki azot bileşiklerinin NO_x'e dönüşmesi Zeldovich modelinden daha karmaşıktır. Yakıtsal azot bileşiklerinin NO_x oluşturması için iki yöntem vardır:

Katı yakıtın kömürleşmesiyle NO_x oluşumu: Alev sıcaklığı, sitokiyometrik oran ve kömürleşme karakteristiğine bağlıdır. %15-35 oranında bu dönüşüm gözlenmiştir.

Uçucu bağların kırılması ve değişimi sonucu homojen gaz fazlı reaksiyon sonucu NO_x oluşumu: Ani reaksiyon hızlarıyla üretilen HCN, HOCN, NH₂ gibi bileşenleri içerdiği var sayılır. Bundan sonraki adımlarda ise ani mekanizmayla aynıdır. N₂ ve NO_x'e dönüşme hızları büyüklüklerine bağlı olarak yavaştır. Bu reaksiyonlar sitokiyometrik oran ve gaz fazı yakıtsal azot konsantrasyonuyla şiddetli bir ilişki içermektedir. Alev sıcaklığı ve organik azot bileşeniyle az da olsa ilişkilidir. NO_x azaltma yöntemlerinin etkinliğini azaltan gaz fazlı NO_x dönüşümünün sıcaklığının bu olaya etkisi azdır(Campbell ve diğ., 1991).

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_x = NO + NO₂) çevreye salıvermektedir. Atmosfere salınan yanma ürünlerinin NO₂ oluşturmaktan sorumlu temel reaksiyonlar;



Burada HO₂ radikali bir üçüncü cisim reaksiyonuyla oluşur.



HO₂ radikalleri düşük sıcaklık bölgelerinde oluşur. Bundan dolayı NO₂ oluşumu NO molekülleri yüksek sıcaklık bölgelerinden yayındıkları ya da HO₂ zengin bölgelerine akışkan karışımı ile iletildiklerinde oluşur(Aydın, 2005).

3.3.1.3 Prompt (Ani) NO oluşumu

NO oluşumu için kullanılan genişletilmiş Zeldovich mekanizması, başlıca NO emisyonunun alev arkasında veya yanmış gazlarda oluştuğunu ortaya koymakta ve hidrokarbon reaksiyonlarının bağıl olarak çok daha hızlı olması temeline dayanmaktadır. Deneysel ölçümler alev cephesinin önünde NO konsantrasyonunun sıfır olmadığını ve alev bölgesinde bir miktar NO oluştuğunu göstermektedir. Burada oluşan NO, prompt (hemen oluşan, hazır) NO olarak adlandırılmaktadır. Azot radikalleri ile hidrokarbonların öncelikle ara ürün olarak HCN oluşturması ile ani NO oluşumu gözlenir.



Ani NO oluşumu Fenimore mekanizması ile tanımlanmaktadır. Ani NO, alev bölgesinde Zeldovich mekanizmasıyla NO oluşumundan önce hızlı bir şekilde oluşur. 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(Aydın,2005).



3.3.1.4 Azotoksit Azaltma Teknikleri

Emisyon kontrol metodları ve bu metodların kullanıldığı teknolojiler Tablo 3.3'te verilmiştir.

Tablo 3.3: NO_x kontrol yöntemleri

Emisyon Kontrol Metodu	Başarılı Teknolojiler
a. Alev sıcaklığının düşürülmesi	Baca Gazı Resirkülasyonu Doğal gazın tekrar yakılması Düşük NO _x yakıcılar Yanma optimizasyonu Yakıcıların devre dışı bırakılması Düşük hava fazlalığı Su veya su buharı püskürtme Alev üstü havası Kademeli hava Düşük ön ısıtma hava sıcaklığı Katalitik yanma
b. Yüksek sıcaklıklarda kalma süresinin azaltılması	Hava püskürtme Yakıt püskürtme Su buharı püskürtme
c. NO _x 'in kimyasal indirgenmesi	Yakıtın tekrar yakılması Düşük NO _x yakıcılar Seçici katalitik azaltma Seçici katalitik olmayan azaltma
d. NO _x 'in oksidasyonu	Isıl olmayan plazma reaktörü Oksitleyici püskürtme
e. Azotu azaltma	Hava yerine oksijen kullanma Az azotlu yakıt
f. Madde emme özelliğine sahip sülfür(sorbent) kullanımı	Yanma odasında kullanma Borularda kullanma
g. Bu özelliklerin Kombinasyonları	Tüm ticari ürünler

a. Sıcaklığın Azaltılması: Yanma sıcaklığının azaltılmasında reaksiyona giren kimyasalların oranı olarak açıklanan sitokiyometrik orandan kaçınmak demektir. Bu oran, yüksek konsantrasyonda ısıl NO_x oluşumunu tetikleyen yüksek sıcaklıkların oluşumunu sağlar. Yanma kontrolü için bu yöntem değişik şekillerde uygulanır ve

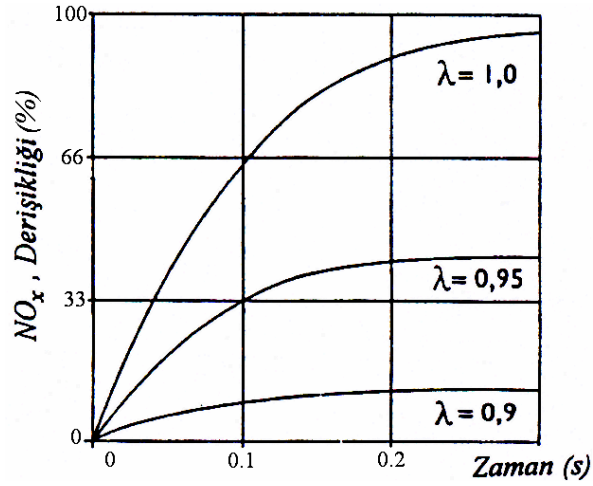
azot içeriğine bağılı olarak değişkenlik gösterir. Yüksek azot içeren yakıtların(kömür) yanmasının azotoksit kontrolü net sitokiyometrik oran ile açıklanabilir. Az azot içeren yakıtların yanmasının NOx kontrolünün de yakıt hava oranına dayandığı görülebilmektedir.

Yanma sıcaklığı aşağıdaki yöntemlerle azaltılabilmektedir:

1. Oksijen oranını belirli bir seviyede tutmak için yakıtça zengin karışımlar kullanma
2. Enerji girişini azaltarak sıcaklığı belirli bir oranda tutmak için yakıtça zengin karışım kullanma
3. Enerjiyi azaltmak için soğutularak oksijenden arındırılmış baca gazını yanma havasına püskürtme
4. Yakıt eklenmiş soğutulmuş baca gazı püskürtme
5. Su veya su buharı püskürtme
6. Işınımlı brülörler yardımıyla alev ışımasını arttırılmalı
7. Yanma odasının ısı geçiş yüzeyleri arttırılmalı(yanma odası dizaynı veya mevcut yanma odasında düzenlemeler

Düşük NOx yakıcılar bu prensiple çalışırlar. Yakıt, hava, baca gazı veya su buharı fazlalığı ile yanma ürünlerinin sıcaklığını düşürmek için temel tekniktir.

b. Kalma Süresinin Düşürülmesi: Bu işlem yüksek yanma sıcaklıklarında içten yanmalı motorlar için tutuşma ve püskürtme zamanlaması yapılarak gerçekleştirilebilir. Kazanlar için alevi yanma havasının baca gazına dönüştüğü bölgeye sınırlandırarak kalma süresinin düşürülmesi gerçekleştirilebilir. Bunu yakıt, su buharı, fazla yanma havası püskürtme ve baca gazı resirkülasyonu izler



Şekil 3.2: Yüksek sıcaklıkta oyalanma süresinin NO_x emisyonlarına etkisi

Bu sürenin fazla olması termik NO oluşumunu olumsuz etkiler. Kademeli hava beslenmesi, yanma odasının dizaynı gibi önlemler alınmaktadır. Şekil 3.2’de yanma ürünlerinin oyalanma süresinin NO_x emisyonuna etkisi görülmektedir.

c. NO_x’in Kimyasal İndirgenmesi: Bu yöntem azotoksitlerden oksijen çekmek için kullanılan kimyasal indirgemedir. Amonyak kullanılan seçici katalitik indirgeme, amonyak ve üre kullanılan seçici katalitik olmayan indirgeme ve yakıtın tekrar yakılması örnek olarak verilebilir. Tüm bu teknolojiler kimyasal olarak azot seviyesini sıfırlamaya çalışırlar. Bazı NO_x yakıcıları kısmen bu prensibe dayanır.

Seçici katalitik indirgemedede NO_x indirgemek için baca gazı içerisine amonyak(NH₃), üre(CO(NH₂)₂), hidrojen gazı(H₂) ve hidrojen sülfür(H₂S) gibi bir kısım reaksiyona girecek maddeler eklenir. Duman gazı katalizörden geçerken kimyasal reaksiyon sonucu azot gazı, su buharı ve elemanter kükürt(S) oluşmaktadır. Seçici katalitik olmayan indirgeme tekniğinde öncelikle aşırı O₂ tüketilir. Bunun kullanıldığı sistemde ocak gazlarının içerisine amonyak enjekte ederek NO_x emisyonu düşürülmektedir.

d. NO_x’in Oksidasyonu: Bu teknik suyun azotu absorbe etmesi için azot iyonu miktarını arttırır. Bu katalizör kullanımı, hidrojenperoksit püskürtmesi veya hava akışı içerisine ozon püskürtmesi ile başarıya ulaşır. Atmosferden N₂O₅ emisyonlarının emilimi için işleme hava yıkama eklenir. Her reaksiyon sonucu oluşan nitrik asit hava yıkama sıvısı tarafından nötrale edilir.

e. Yanmadan azotu çıkarma: Bu işlem azotun reaktan olarak aşağıdaki yöntemlerle çıkarılmasıyla sağlanabilir:

1. Hava yerine yanma prosesinde oksijen kullanma
2. Daha az yakıtsal NOx oluşumu için çok az azot içeren yakıt kullanma

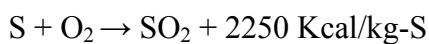
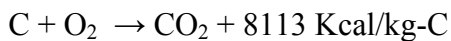
Fazla NOx oluşumunu önlemek açısından kullanılan yukarıdaki ikinci yöntem sıcaklığı daha hızlı düşürür. Eğer hava durgun ortamda ise azot oksitler yok edilemez. Sıcak baca gazı havayı ısıtır ve bu ısı değişimi ısıl NOx oluşumunu tetikler. Bu yöntem aynı zamanda yanma sürecindeki net fazla havanın azaltılmasına da yarar. Çünkü havanın %80'i azottur. Oksijenle birlikte çok az azot içeren yakıtlar kullanarak yakıtsal ve ani NOx'i azaltmak mümkündür.

f. Sorbsiyon, adsorpsiyon ve absorpsiyon: Baca gazına amonyak, tozlaştırılmış kireç taşı, alüminyumoksit veya karbon gibi maddelerin eklenmesiyle, NOx ve diğer emisyonları önlemek mümkündür. Bu tür işlemler yanma odası, baca ve filtreye uygulanabilir.

g. Bütün yöntemlerin kombinasyonları: Yukarıdaki yöntemler beraber kullanıldığında tek başlarına kullanılmalarından daha faydalı olurlar. Mesela yakıt zengini siklon yakıcıda(1. yöntem) yakıtı tekrar yakma(3. yöntem) ve alev üstü havası(1. yöntem) uygulanmaktadır. Bu tip bir uygulamada %70 daha fazla NOx azaltımı gerçekleştirilir. Sülfür miktarını azaltmayı hedefleyen kontrol tekniklerinin azot oksit üzerinde önemli etkinliği vardır. Mesela SOx-NOx-ROx-Box (SNRB) teknolojileri kazandan çıkan baca gazı içerisindeki kireçtaşı sorbentini sülfürün emilimi için kullanır. Bunu, amonyak püskürtmesi ve filtrelerdeki katalizör fiberleri kullanarak seçici katalitik azaltma izler. Bu tip örnekleri çoğaltmak mümkündür(Eastern Research Group, 1999)

3.3.2 Karbonmonoksit oluşumu

Tam Yanma



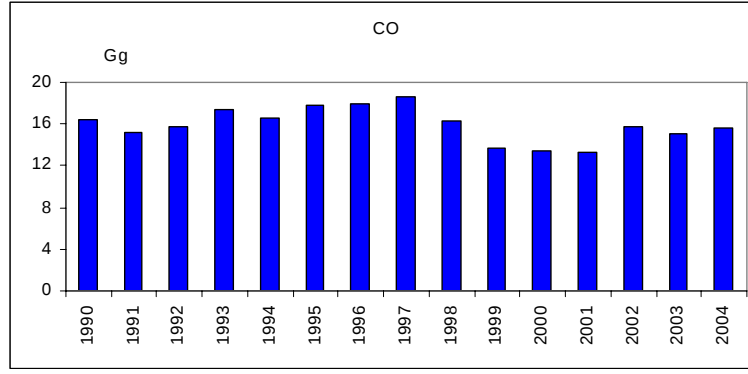
Eksik Yanma



Buradan da görülebileceği gibi, yetersiz oksijen sonucu karbonun karbondioksit dönüşmeden, karbonmonoksit halinde kalmasıyla kaybedilen enerji miktarı %70 mertebesinde olmaktadır. Bu kaygıyla, mükemmel yanmanın sağlanması için, genel bir kural olarak yakıtta verilen hava belirli oranda artırılmaktadır. Buna hava fazlalık katsayısı denilmektedir.

Yakıt cinsine bağlı olarak değişen bu katsayının gereğinden az olması halinde, karbonmonoksit oluşmakta, üretilen enerji azalmakta, ısılık başlamakta, yanma verimi düşmekte, söz konusu hava fazlalık katsayısının gereğinden fazla olması halinde ise, karbonmonoksit azalırken, yanmaya iştirak etmeyen hava ocakta ısıtılarak bacadan atılmakta, yanma bozulmakta, yanma verimi düşmektedir. Bu nedenle, işletme sırasında yanmanın optimizasyonu için baca gazı analizörleri yardımıyla, baca gazı analizleri kolayca elde edilip değerlendirilebilmekte, brülör ve kazanlara anında müdahale edilebilmektedir. Baca gazı analizlerinde karbonmonoksit miktarı 100 ppm değerine kadar normal kabul edilebilmektedir.

CO oluşumu stokiyometrik altı yanmada görülür. Yüksek sıcaklıkta oluşan CO, artan oksijen konsantrasyonu ile azalır CO alevin yanma haznesindeki soğuk yüzeylere çarpması ve bunun sonucunda ateşleme için alevin gereğinden çok daha fazla geniş hacime ulaşması yani yakıt zengin karışım ana neden olmakla birlikte yanlış alev konumu ve hatalı yanma haznesi dizaynı karşılaşılan diğer nedenlerdir. Yetersiz yanma ve yüksek CO oluşumunun bir diğer nedeni de çok düşük baca çekişidir. Ayrıca brülörün yanlış ayarlanmasından da böyle sorunlar oluşabilmektedir.



Şekil 3.3: Endüstriyel proseslerden kaynaklanan CO emisyonları

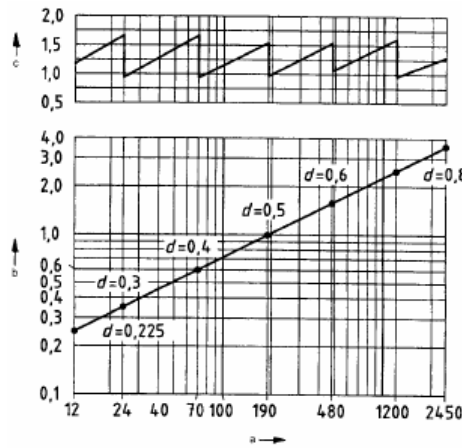
Belirli aralıklarla yakıcı bakımının yapılması, başka bir yakıt türü için imal edilen yakıcıların tercih edilmemesi, uygun baca kullanımı, yakıcıların sürekli devreye girip çıkmaları yerine modülasyonlu ve oransal olarak çalışması, birbirine uyumlu çalışacak ve gerekli test ve analizlerden geçirilmiş kazan ve brülör sistemlerinin seçimi CO emisyonlarını azaltmada takip edilen yöntemlerden bazılarıdır.

Deney sistemini oluşturan bileşenler, deney tesisatını oluşturan elemanların detayları ve ölçme sistemi aşağıda açıklanmıştır.

4.1 Deney Tesisatı Ekipmanları

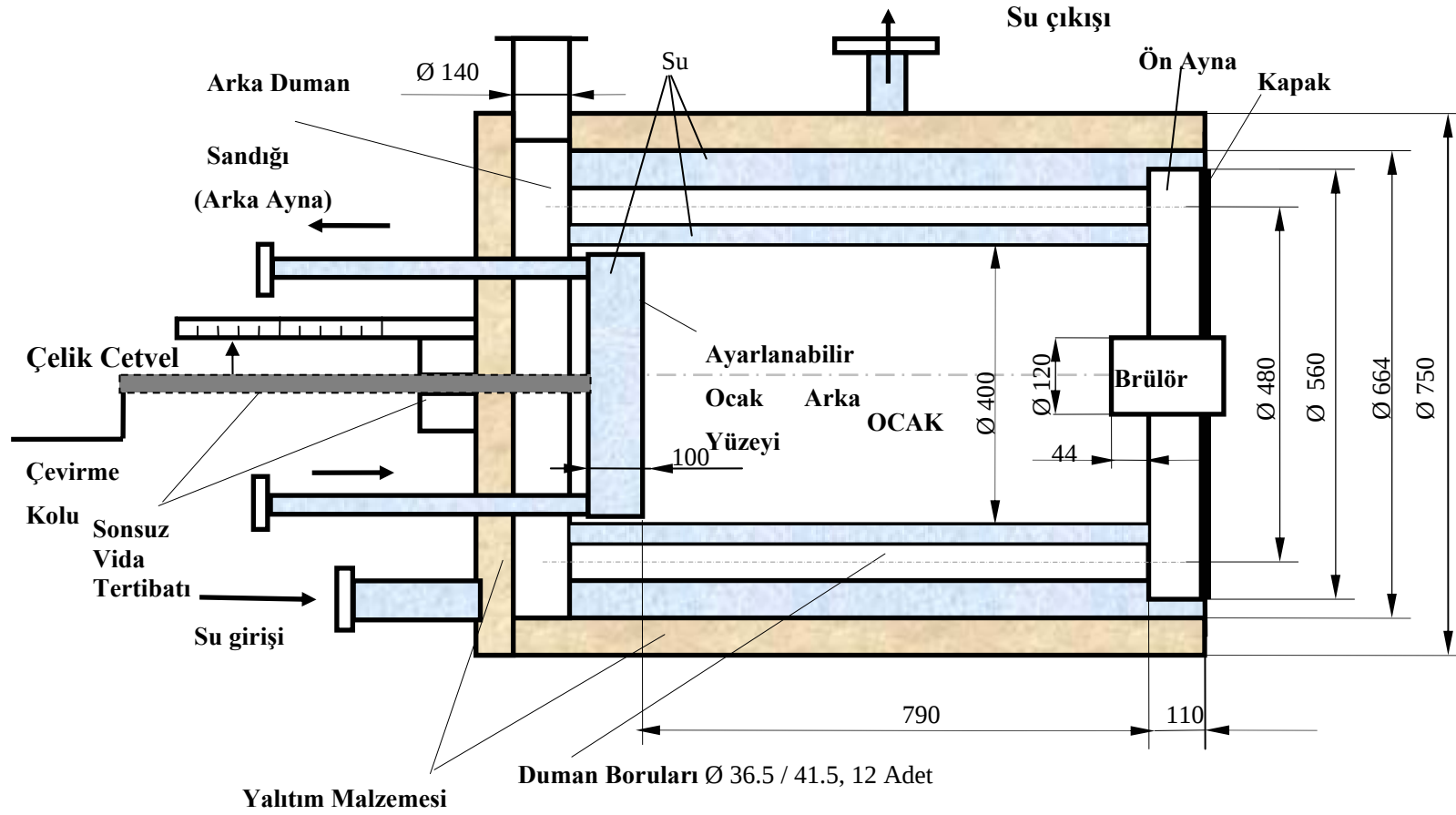
4.1.1 Deney Kazanı

Deney kazanı, TS EN 676 “Brülörler-Otomatik üflemeli-Gaz yakıtlar” standardına uygun seçilmiştir. Bu standard, otomatik üflemeli gaz brülörleri için, terimleri, yapım ve çalışma için genel kuralları ve kumanda ve güvenlik cihazları ile ilgili maddeleri ve tip deney işlemlerini kapsar. Ocak boyu ayarlanabilen bu kazanın, en büyük ocak boyundaki (790 mm) kazan ısıtma kapasitesi 116 kW’tır. Şekil 4.2’de bu standarda uygun kazanlar için farklı ocak boyu ve çapı değerlerinde kazan ısıtma kapasitesinin seçimini grafiksel olarak görmektedir.



Şekil 4.2. Isıl kapasitenin fonksiyonu olarak ocak çapı ve uzunluğu. a) Kazan ısıtma kapasitesi (kW), b) Ocak uzunluğu (m), c) Ocağın yakma gücü (MW/m³), d) Ocak çapı(TS EN 676, 2006)

Deney kazanının önemli bir özelliği alev geri dönüşlü olmasıdır. Brülörün ateşlenmesiyle, yanma olayı gerçekleşerek duman gazları oluşmaktadır. Yanma sonrası gazlar ocak arka duvarına çarparak geri dönüş yapmaktadır. Bu geri dönüş hareketinden sonra diğer bir dönüş ön aynada gerçekleşerek, duman borularından bacaya yönelme gerçekleşir.



Şekil 4.3: Deney kazanına ait ölçüler (Aydın,2005)

4.1.2 Su Besleme Deposu

Su besleme deposu sistemin atmosfere açık olmasını sağlamaktadır. Hava-su ısı değiştiricisinde soğutulan su pompa tarafından kazana basılmadan önce burada depolanır.

4.1.3 Brölör

Deneylerde BAYMAK marka cebri(üflemeli) brölör kullanılmıştır. Kullanılan brölörün doğal gaz tüketim aralığı 4.7-21.36 m³/h, kapasite aralığı 46-205 kW'tır. Brölör üzerindeki ayar mekanizması yardımıyla gerekli hava yakıt oranı sağlanmaktadır. Yanma için gerekli hava bir fan vasıtasıyla cebri olarak sağlanmaktadır. Üflemeli brölörlerde yakma havasını sağlayan fan aynı zamanda yanma hücresinde oluşan karşı basıncı yenmeyi sağlar. şekil 4.4'te deneylerde kullanılan üflemeli brölör görölmektedir.



şekil 4.4: Deneylerde kullanılan üflemeli brölör.

4.1.4 Hava-Su Isı Değiştiricisi

Deney düzeneğinde ikisi yüksek güçte kapasitede olmak üzere toplam üç tane ısı değiştiricisi kullanılmıştır. Isı değiştiriciler, iki akışkan arasındaki sıcaklık farkından doğan ısı transferi yardımıyla soğutma işleminin gerçekleşmesi esasına dayanarak çalışan sistemlerdir. Sistemdeki su, ısı değiştiricisi içerisindeki borulardan geçerken belirli bir debideki havayla temas ederek taşınım yoluyla ısı verir. Böylece hava-su ısı değiştiricisine suyun giriş/çıkış sıcaklığı 90/70 °C olmaktadır.

4.1.5 Baca

13 cm iç çapa sahip olan ısı yalıtımlı baca, doğal gazın yanması sonucu açığa çıkan yanma sonu gazların kazandan uzaklaştırılmasını sağlamıştır.

4.2 Ölçme Sistemi

Deneylerde ölçüm yerlerinin tespitinin yanı sıra kullanılacak ölçüm cihazlarının seçilmesi de önem taşımaktadır. Ölçüm cihazları deney sonuçlarını hassas bir şekilde gösterebilecek nitelikte olmalıdır. Ayrıca kullanılan problemlerin çalışma şartlarına uygun nitelikte olması önemlidir. Yüksek sıcaklıklara dayanımlı prob malzemesinin seçilmesi, yapılacak deney için en önemli kriterlerden birini oluşturmaktadır. Problemlerin değişimlere verdiği tepkinin hızlı olması (duyarlılık), hassasiyet ve doğruluk yönünden iyi olması da istenilen bir özelliktir. Ek olarak çözünürlük (bir cihazın ölçme aralığında cevap verebildiği en küçük değişim) ve en küçük taksimat ölçme sistemi seçiminde dikkat edilecek hususlar arasındadır.

4.2.1 Veri Toplama ve Kayıt Cihazı

Deney süresince belirli zaman aralıklarında sıcaklık ölçümleri alınmıştır. Bu ölçümlerde kullanılan 11 termoeleman veri toplama cihazına bağlanarak veriler bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Microsoft Excel programında grafik ve tablolara dönüştürülüp; analiz için uygun hale getirilmiştir.

4.2.2 Gaz Analiz Cihazı

Yüksek sıcaklıklardaki çalışma koşullarına dayanması açısından ocak içerisinde ve bacadan yapılan ölçümlerde paslanmaz çelik prob kullanılmıştır. Sıcaklık ölçümü için, bu probun içerisine termoeleman yerleştirilmiştir. Bacada ve yanma odasında O_2 , CO , NO_x ($NO+NO_2$), SO_2 , HC , H_2S ve hava fazlalık katsayısı değerleri gaz analiz cihazı yardımıyla ölçülmüştür.



Şekil 4.5: Gaz analizinde kullanılan prob

4.2.3 Termoelemanlar

Termoeleman seçiminde ölçüm yapılacak bölge ve ölçüm hattının uzunluğu dikkate alınmıştır. Ocak içerisinde sıcaklık ölçümlerinde, sıcaklığa dayanımı yüksek seramik ve çelik kaplı K tipi termoelemanlar kullanılmıştır. Bu tip termoelemanların çalışma sıcaklığı 0 ile 1200 °C arasındadır.

4.2.4 Gaz Sayacı

Doğal gazın debisinin ölçülmesinde kullanılmıştır. Sayacın hassasiyeti 0.01 m³/h ve ölçme aralığı 1-16 m³/h dir.

4.2.5 Su Sayacı

Deney tesisatında dolaşan su hacminin ölçümünde kullanılan, 0-20 m³/h ölçüm aralığına, 0.001 m³/h hassasiyete sahip bir cihazdır.

4.3 Ölçüm Noktalarının Seçilmesi ve Alınan Ölçümler

Ölçüm noktalarının seçiminde ölçülecek büyüklüklerin zaman ve konuma bağlı değişimlerini en iyi şekilde izleyebilme ve kazan standardına uygunluk üzerinde durulmuştur. Seçilen noktalar akışın, ısı geçişinin ve yanma olaylarının karakterinin ortaya konması açısından önem teşkil etmektedir.

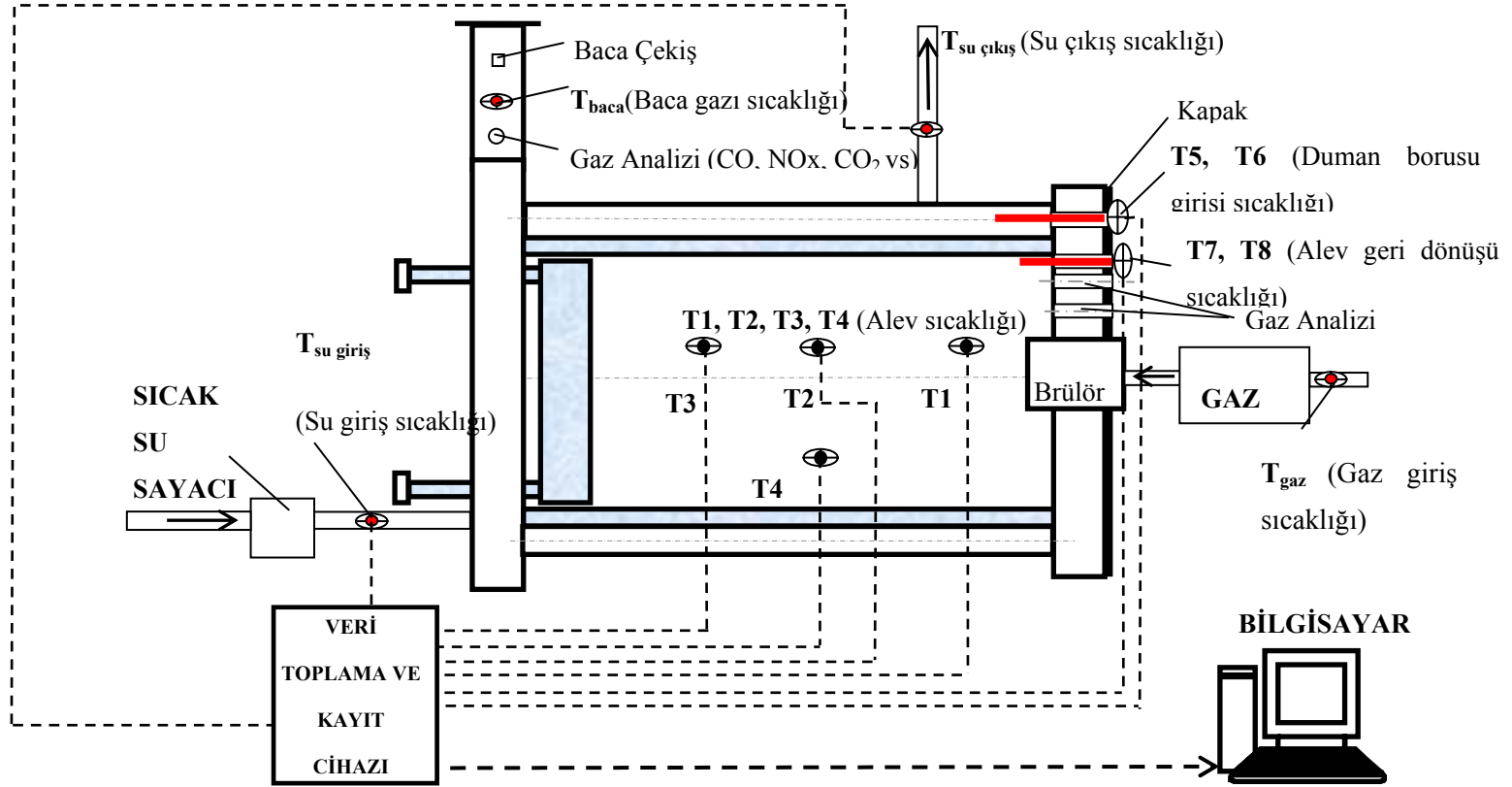
Alınan ölçümleri kazandan ve bacadan olmak üzere iki gruba ayırmak mümkündür. Kazanda alev sıcaklığı, ön aynada alev geri dönüş sıcaklığı, duman boruları girişindeki gaz sıcaklığı, su ve doğal gaz debisi, su giriş ve çıkış sıcaklıkları ölçümleri yapılmıştır. Bacada ise gaz analizi, sıcaklık ve baca çekişi ölçülmüştür. Sıcaklık ölçümleri veri toplama ve kayıt cihazına aktarılmıştır. Veri toplama ve ölçüm noktalarının ayrıntıları Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de görülmektedir.

T1, T2, T3 ölçüm noktalarında seramik kılıflı K tipi termoeleman kullanılarak, alev sıcaklıkları ölçülmüştür. T4 ölçüm noktasında ise termoeleman metal kaplıdır. T1, T2, T3 ve T4 noktalarının kazan ön aynasından olan mesafeleri sırasıyla, 130, 365, 570 ve 365 mm’dir. T1, T2, T3 termoelemanı ocak ekseninde konumlandırılmış olup, alev sıcaklığını ölçmektedir. T4 termoelemanı ise ek ısıtım yüzeyi(kovan) ile ocak cidarı arasında sıcaklık ölçümü yapmaktadır.

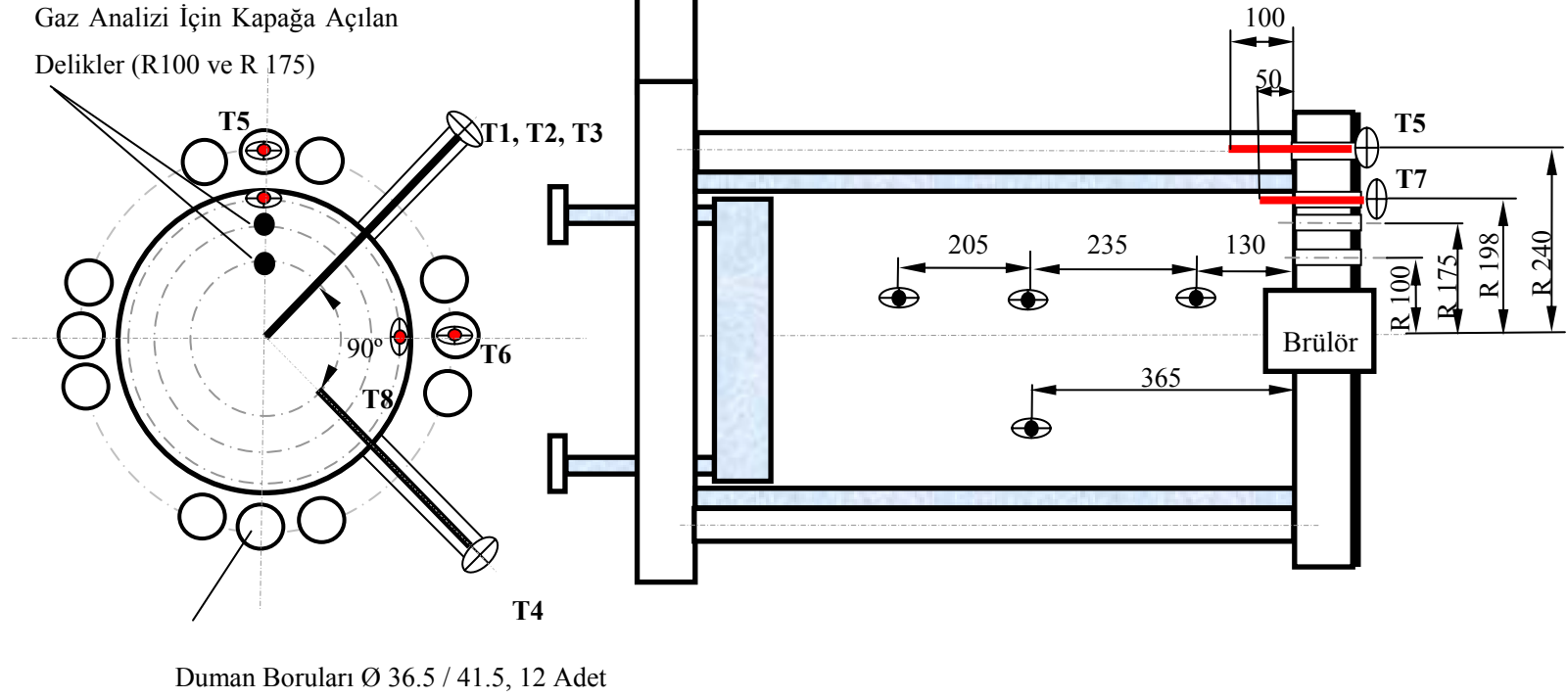
T5, T6, T7 ve T8 ölçüm noktalarında 700°C’ye kadar dayanıklılığı olan K tipi termoeleman kullanılmıştır. T5 ve T6 ölçüm noktalarında duman boruları girişindeki gaz sıcaklığı, T7 ve T8’de ise ön aynada alev geri dönüş sıcaklığı ölçülmüştür. T5 ve T6 ile duman boruları girişinden 100 mm içeride, T7 ve T8 ile ocak ağzından 50 mm içeride gaz sıcaklığının ölçülmesi sağlanmıştır. Kazan su giriş ve çıkış sıcaklıkları kazan giriş ve çıkış boru hatlarına daldırılan K tipi termoelemanlarla ölçülmüş ve deney süresince sürekli olarak kaydedilmiştir.



Şekil 4.6: Kazana bağlanan termoelemanların görünüşü



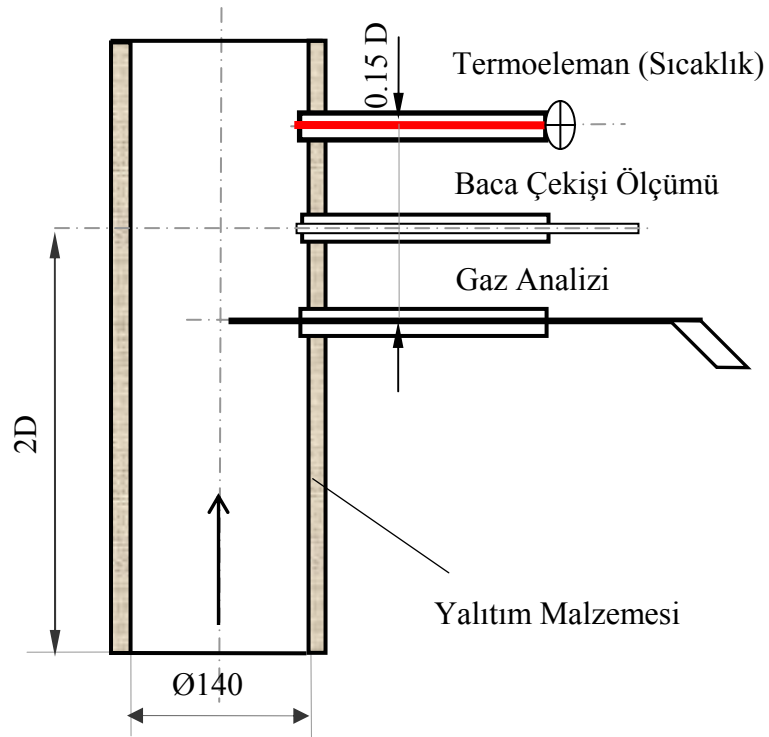
Şekil 4.7: Deney tesisatındaki ölçüm cihazları ve ölçüm noktaları.



Şekil 4.8: Kazan yanma odasından yapılan ölçümler(Aydın,2005)

Deneylerde kovan ve kanat adı verilen ek ısıtım yüzeyleri kullanılmıştır. Kovanlar içi boş, silindirik geometride olup çelik sacdan imal edilmiştir. Kanatlar, kovanların silindirik dış yüzeyine kaynak yapılmıştır. Kovan, ocak alev ve alev geri dönüşünü birbirinden ayırmaktadır. Bu nedenden ötürü, kovan içi ve dışını temsil eden iki ölçüm hattı tanımlanmıştır. R100 ölçüm hattı simetri ekseninden 10 cm, R175 ölçüm hattı 17.5 cm uzaktadır. Kazanın ön kısmına açılan prob delikleri yardımıyla ocak ağzından 0, 10, 20, 30 ve 40 cm mesafelerde sıcaklık ölçümü ve gaz analizi yapmak mümkün olmuştur. Şekil 4.6’da kazanda kullanılan termoelemanları görmek mümkündür.

Bacada sıcaklık, gaz analizi ve baca çekişi ölçümleri yapılmıştır. Bacadan yapılan gaz analizi ile ölçülen büyüklükler CO, CO₂, NO_x (NO₂ + NO), SO₂, O₂, H₂, ve hava fazlalık katsayısıdır. Şekil 4.9’da bacadan yapılan ölçümlerin yerleri gösterilmiştir.



Şekil 4.9: Bacadan yapılan ölçümler ve konumları(Aydın,2005)

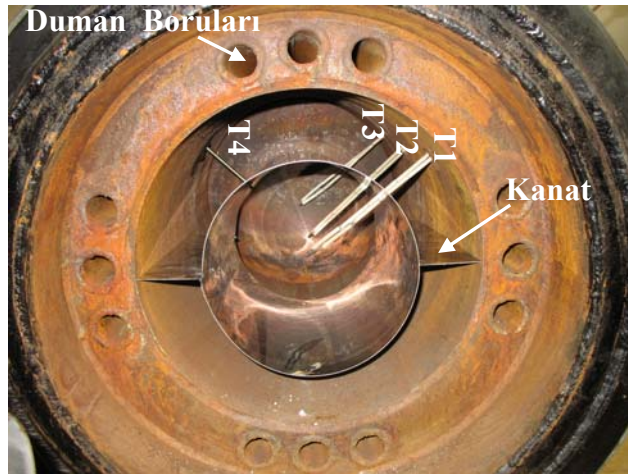
4.4 Deney Parametreleri

4.4.1 Yanma Odası Tasarımı

400 mm ocak $\mathcal{C}$ apında, ocak boyu değiştirilmiştir. Standartta ocak boyunun ve $\mathcal{C}$ apının fonksiyonu olarak kazan ısıt kapasitesi değerleri mevcuttur. Belirtilen ocak $\mathcal{C}$ apında, maksimum ocak boyu olan 790 mm için ısıt kapasite 116 kW'tır. Ocak boyu 680 mm yapıldığında ise ısıt kapasite 87 kW'a olmaktadır.

4.4.2 Dolgu Malzemesi (Kovan ve Kanat)

Yüksek sıcaklığa dayanıklı, 1mm kalınlıktaki elik sacdan imal edilmiş kovan ve kanatlar ilave ısıtım yüzeyi olarak kullanılmaktadır. Dolgu malzemesinin kullanılmasıyla amaç ocak içerisindeki katı yüzey ısıtımını arttırarak, sıcaklığı düşürmektir. Sıcaklığın düşmesiyle de emisyonlarda azalma hedeflenmektedir. Kullanılan kovanların $\mathcal{C}$ apları ve boyları, $\varnothing 25 \times 40$, $\varnothing 30 \times 20$, $\varnothing 20 \times 20$ (cm x cm)'dir. Kovan dış yüzeyine eşit açılarla 2, 4 ve 6 kanat yerleştirilmiştir. Kanat sayılarının sıcaklık ve emisyonlara etkisi incelenmiştir. 2 kanatlı kovanın kazana yerleştirilmesi durumu şekil 4.10'da görülmektedir. şekilde T1, T2, T3, T4 sıcaklıklarının ölçülmesi amacıyla kullanılan termoelemanlar da görülmektedir.



şekil 4.10: Ocak içerisine yerleştirilmiş 2 kanatlı kovan.

4.4.3 Hava Yakıt Karışım Oranı

Baca gazında karbonmonoksitin minimum olduğu duruma karşılık gelen hava fazlalık katsayısı ile stokiometrik yanmaya karşılık gelen HFK=1.00 değeri deneylerde esas olarak alınmıştır. Her bir ocak boyunun maksimum kazan ısıl kapasitesine göre yapılan ön deneylerde, baca gazı içerisindeki karbonmonoksitin hacimsel oranı gaz analiz cihazı ile ölçülerek hava fazlalık katsayısı değerleri tespit edilmiştir. Tablo 4.1’de belirli şartlarda CO değerlerinin maksimum ve minimum olduğu durumlarda ön deneylerle saptanan hava fazlalık katsayıları verilmiştir.

Tablo 4.1: Hava fazlalık katsayısının seçilmesi

Kazan Isıl Kapasitesi (kW)	Ocak Boyu (mm)	Hava Fazlalık Katsayısı
116-87	790-680(sırasıyla)	1.02
116-87	790-680(sırasıyla)	1.26

4.5 Deney Programı

Deney parametrelerinin etkisini en iyi şekilde anlayabilmek amacıyla farklı durumlarda deneyler yapılmıştır. Ocak boyu, kazan ısıl kapasitesi, hava fazlalık katsayısı parametrelerinin değişimiyle yapılan deneyler Tablo 4.2’de beş grubunda toplanmıştır. Kazan ısıl kapasitesi 116, 87 ve 58 kW olacak şekilde değiştirilmiştir. Hava fazlalık katsayısının 1.02 ve 1.26 değerleri üzerinde durulmuştur. Ayrıca ocak boyunun 790 ve 680 olduğu durumlar incelenmiştir.

Tablo 4.2: 680 ve 790 mm ocak boyunda deneylerin yapıldığı kazan ısıtıl kapasiteleri, yakıt debileri ve hava fazlalık katsayıları.

Deney Parametreleri	Deney (1)	Deney (2)	Deney (3)	Deney (4)	Deney (5)
	790 mm	790 mm	790 mm	790 mm	680 mm
Kazan Isıl Kapasitesi (kW)	116	116	87	58	87
Yakıt Debisi (Nm ³ /h)	10.72	10.72	8.04	5.35	8.04
Hava Fazlalık Katsayısı	1.02	1.26	1.26	1.26	1.26

Tablo 4.3: Yapılan deneylerin parametrelere göre dağılımı

Kovan çap x boy	Kanat Sayısı	Deney No(bkz. Tablo 4.2)				
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Kovansız	x	✓	✓	✓	✓	✓
25x40	2	✓	✓	✓	✓	✓
	4	✓	✓	✓	✓	✓
	6	✓	✓	✓	✓	✓
25x20	2	✓	✓	✓	✓	x
	4	✓	✓	✓	✓	x
	6	✓	✓	✓	✓	x
30x20	2	✓	✓	✓	x	x
	4	✓	✓	✓	x	x
	6	✓	✓	✓	x	x

Deney parametreleri, hava fazlalık katsayısı, yanma odası tasarımı ve dolgu malzemesinin kullanılmasıdır. Deney parametrelerinin etkisinin en iyi şekilde anlaşılması açısından optimum deney durumları saptanmıştır. Tablo 4.3'te farklı kovan çap ve boylarında farklı sayıda kanatlar kullanılarak yapılmış deneyleri görmek mümkündür.

Tez çalışmasında farklı sayılardaki kanatlı durumların etkilerini görmek açısından Ö. Aydın'ın 2005 yılında yaptığı çalışmanın sonuçları ile karşılaştırmalar yapılacaktır. Bu çalışmada aynı standartta deney kazanı kullanılarak farklı kovan boyutlarında ve kovansız deneyler yapılmıştır. Karşılaştırma yapılacak deneylerin parametrelere göre dağılımlarını aşağıdaki tabloda gösterilmiştir(Aydın, 2005).

Tablo 4.4: Literatürdeki çalışmada karşılaştırma yapılacak deney parametrelerinin dağılımı(Aydın, 2005)

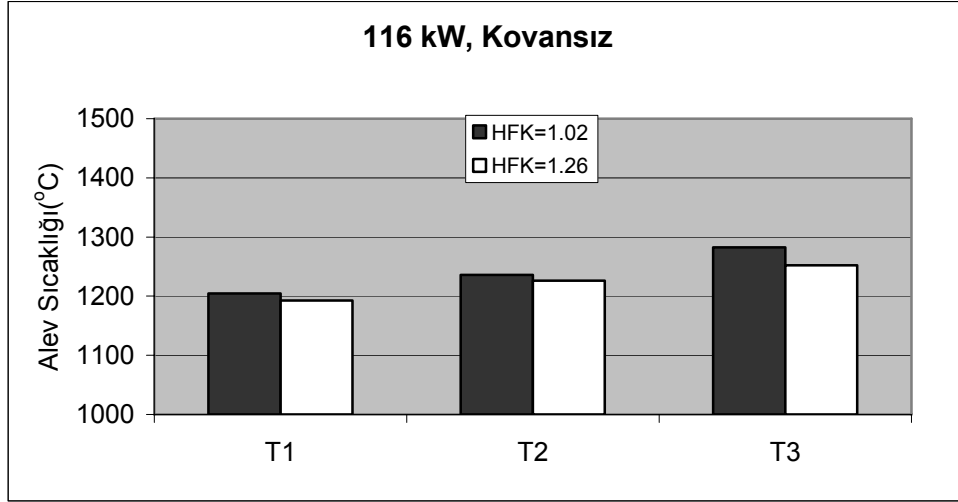
Kovan Çapı ve Boyu (cm)	Deney No(bkz. Tablo 4.2)				
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Ø25x20	✓	✓	✓	✓	✓
Ø25x40	✓	✓	✓	✓	×
Ø30x20	✓	✓	✓	✓	✓

4.6 Deney Sonuçları

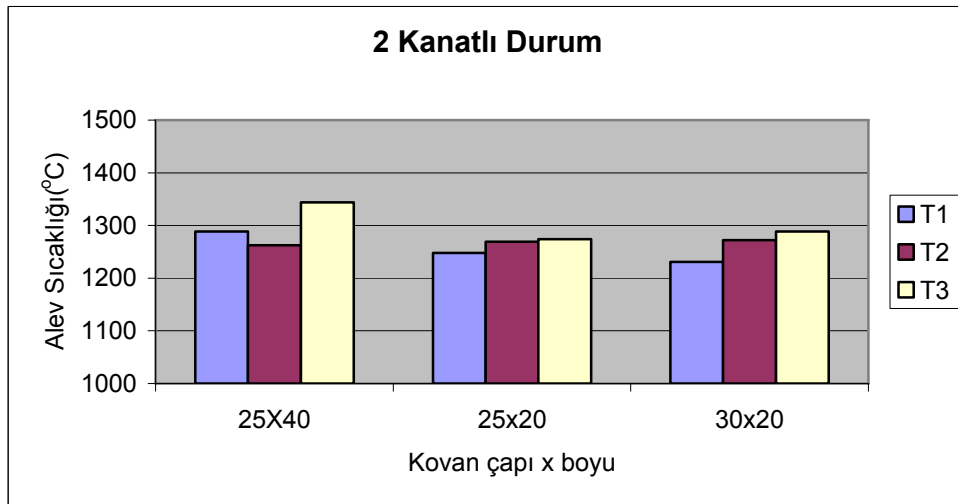
4.6.1 Alev Sıcaklıkları

Alev boyunca sıcaklık değişimlerinin izlenebilmesi için T1, T2 ve T3 olmak üzere alev üzerinde üç nokta tanımlanmıştır. Şekil 4.11'de kovansız durumda hava fazlalık katsayısının etkisi görülmekteyken, Şekil 4.12, 4.13 ve 4.14'te 2, 4, 6 kanatlı durumlarda kovan çapı ve boyunun etkisi görülmektedir. Hava fazlalık katsayısının 1.02 olduğu durumda 25x40 kovani kullanıldığında, kanat sayısının artışıyla alev baş kısmı sıcaklığı T1 1288°C değerinden 1400°C mertebesinde değerlere yükselir. Bu artışı

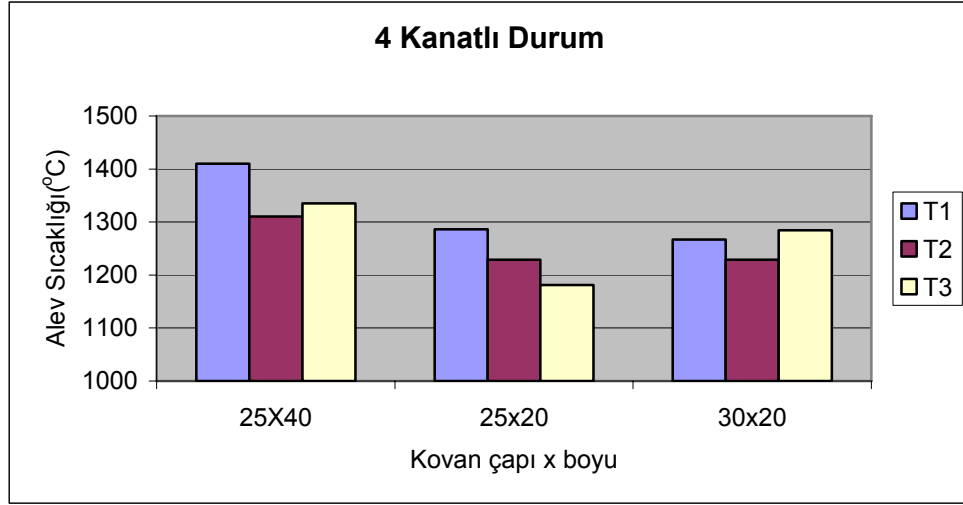
25x20 ve 30x20 kovanlarında da görmek mümkündür. Kovan çapı, boyu ve kanat sayısının (ilave ısıtım yüzeyleri) artışıyla T1 değerinin yükseldiğini söylemek mümkündür.



Şekil 4.11: Kovansız durumda farklı hava fazlalık katsayıları(1.02 ve 1.26) için yapılan deneylerin alev sıcaklıklarının karşılaştırılması (790 mm ocak boyu, 116kW).

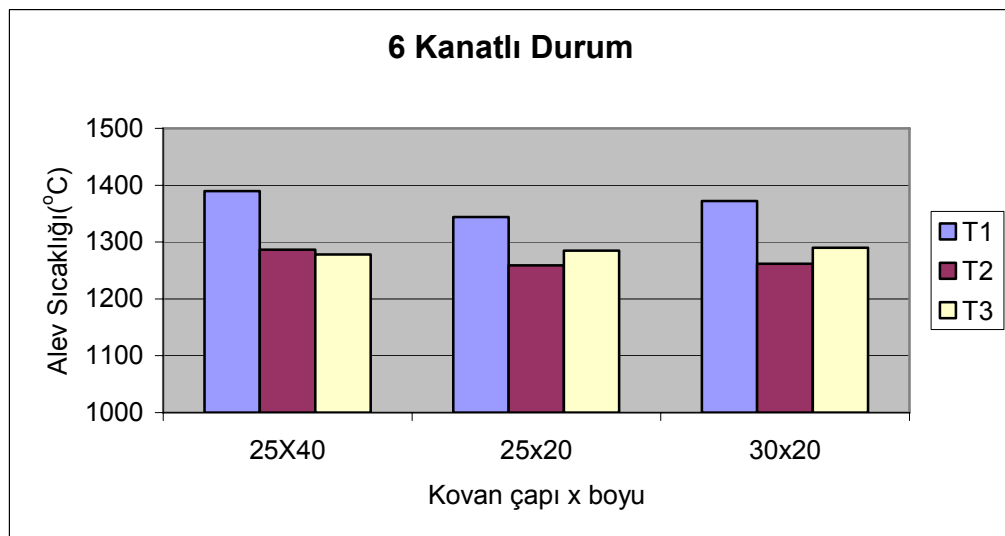


Şekil 4.12: 2 kanatlı değişik kovan çap ve boyları için yapılan deneylerin alev sıcaklıklarının karşılaştırılması (790 mm ocak boyu, 116kW, HFK=1.02).

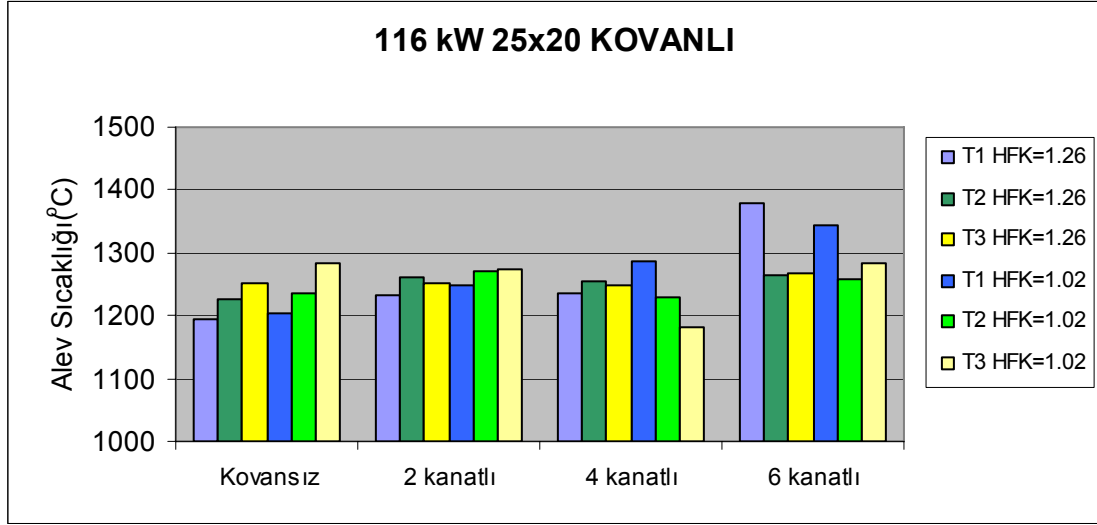


Şekil 4.13: 4 kanatlı değişik kovan çap ve boyları için yapılan deneylerin alev sıcaklıklarının karşılaştırılması(790 mm ocak boyu, 116kW, HFK=1.02).

Kanat sayısı arttırıldığında, T1 değerine nazaran T2 ve T3 değerleri daha az etkilenmiştir. Bunun nedeni alevin maksimum sıcaklık noktasının kanat sayısı arttıkça ocak ilk bölümüne, brülör önüne kaymasıdır. T2 sıcaklığı farklı kanat sayılarındaki değerlerinin ortalaması 25x40 kovanda 1273°C, 25x20 kovanda 1248°C, 30x20 kovanda ise 1249°C olarak ölçülmüştür. T3 sıcaklık noktasında yapılan ölçümlerde ise 25x40 kovanda 1309°C, 25x20 kovanda 1255°C, 30x20 kovanda ise 1286°C'dir. Burada kovan boyu ve çapındaki artışla T2 ve T3 değerinin de arttığı görülmektedir.

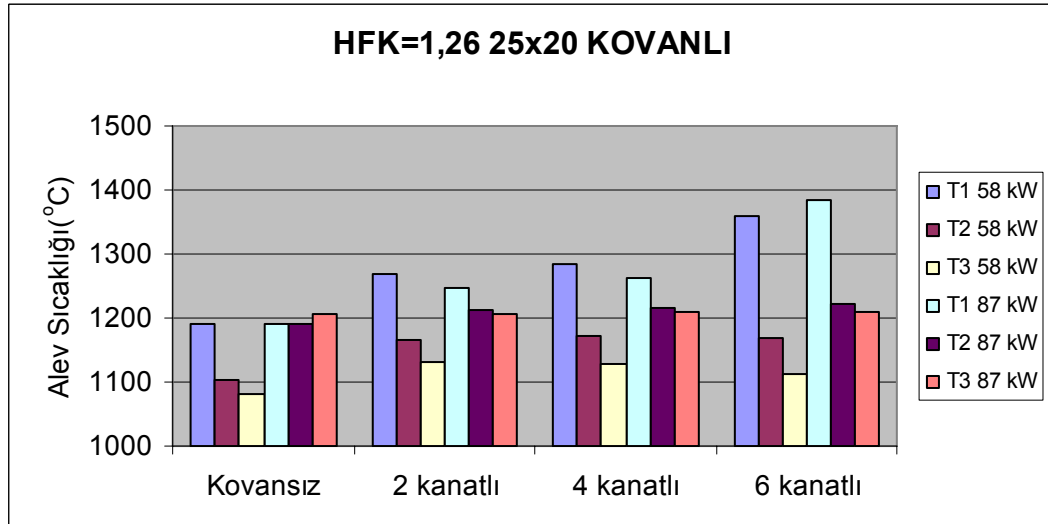


Şekil 4.14: 6 kanatlı değişik kovan çap ve boyları için yapılan deneylerin alev sıcaklıklarının karşılaştırılması(790 mm ocak boyu, 116kW, HFK=1.02).



Şekil 4.15: 25 x 20 kovanlı farklı sayılarda kanatlarla yapılan deneylerde alev sıcaklığının hava fazlalık katsayısına göre değişimi (790 mm ocak boyu, 116kW).

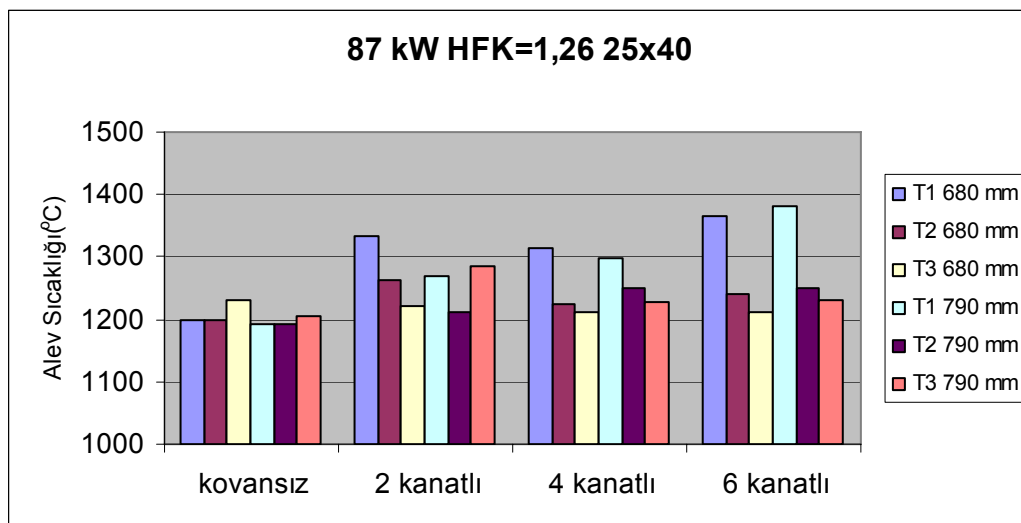
Şekil 4.15'te 790 mm ocak boyunda, 116 kW ısı gücü, kovansız, 2, 4, 6 kanatlı 25x20 kovanı ait hava fazlalık katsayısı değişiminin alev sıcaklığına etkisi görülmektedir. Buna göre hava fazlalık katsayısının 1.02 olduğu durumda alev sıcaklıkları kovansız duruma nazaran daha yüksek gerçekleşmektedir. Sadece 4 kanatlı durumda T2 ve T3 değerlerinde düşüş görülmektedir. Aynı zamanda 1.02 hava fazlalık katsayısında alev içerisinde sıcaklık değişimi daha fazla gözlenmektedir.



Şekil 4.16: 25 x 20 kovanlı farklı sayılarda kanatlarla yapılan deneylerde alev sıcaklıklarının kazan ısı kapasitesine göre değişimi (790 mm ocak boyu).

Kazan ısıtıl kapasitelerinin 87 ve 58 kW, hava fazlalık katsayısının 1.26 olduğu durumdaki 25x20 kovanlı deneylere ait alev sıcaklığı değerleri Şekil 4.16’da verilmektedir. Bahsi geçen kazan ısıtıl kapasitelerinde kanat sayısı artırıldığında alev sıcaklıklarının yükseldiği görülmektedir. Ayrıca kazan ısıtıl kapasitesiyle alev sıcaklıkları arasında da benzer değişim bulunmaktadır. 58 ve 87 kw ısıtıl güçlerde de T1 sıcaklığında artış meydana gelmektedir. Bunun nedeni alevin kısılması ve kanat eklenmesiyle alevin maksimum sıcaklıktaki noktasının brülör önüne kaymasıdır. Ayrıca ocak hacmi bu ısıtıl güçler için büyük olduğundan özellikle 58 kw ısıtıl güçte alev sıcaklığı T2 ve T3 de önemli ölçüde düşmüştür.

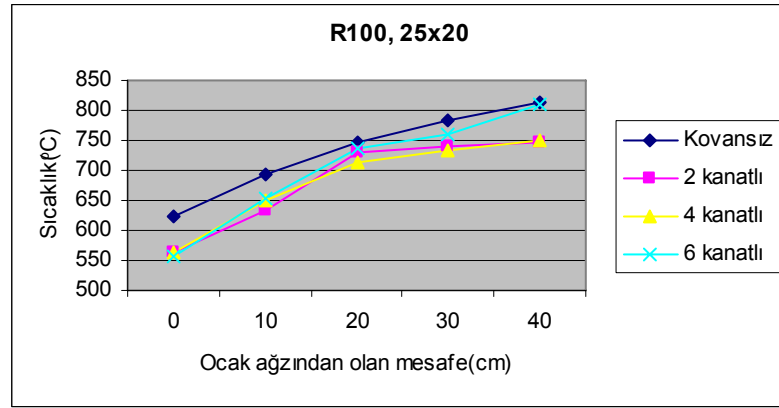
Şekil 4.17’de ise 25x40 kovan kullanılan durumda farklı ocak boylarında alev sıcaklığının değişimi verilmiştir. Ocak boyu 680 mm olarak ayarlanmıştır. Bu ocak boyunda kazan anma ısıtıl gücü 87 kW’tır. Belirtilen ısıtıl kapasiteyi sağlamak için 8.04 Nm³/h’lik yakıt debisi gerekmektedir. Ocak boyu azaltıldığında da T1 sıcaklığının en düşük değeri kovansız durumda oluşmaktadır. T1 değerinin kanat sayısı ile arttığı burada tekrar görülmektedir. T1 sıcaklığının artmasına rağmen T2 ve T3 düşük değerler almaktadır. Burada ısıtıl yüzeylerinin etkisi görülmektedir. T2 ve T3 sıcaklıkları ise kanatlı durumlarda kovansız duruma göre belirli bir miktar artsa da mertebe bakımından yakın değerler ölçülmüştür.



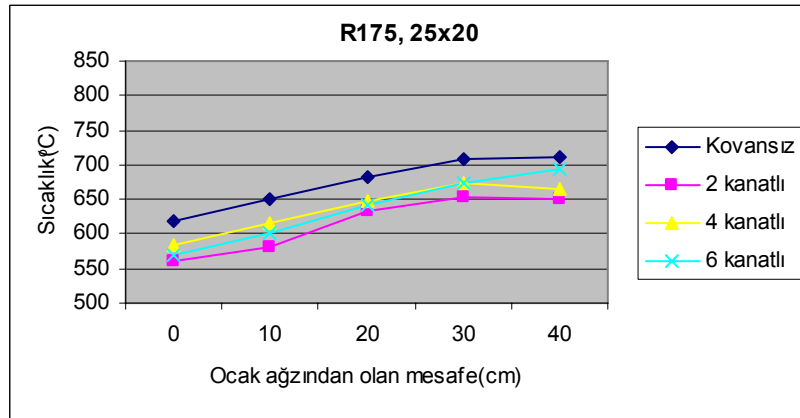
Şekil 4.17: Farklı sayılarda kanatlarla yapılan deneylerde alev sıcaklıklarının ocak boyuna göre değişimi (87 kW, 25x40, HFK=1.26).

4.6.2 Ocak İçi Sıcaklıklarıyla Emisyon Değerlerinin Karşılaştırılması

Şekil 4.18 ve Şekil 4.19’da 87 kW ısıl kapasitede, hava fazlalık katsayısının 1.26 olduğu kovansız ile 25x20 kovanlı durumdaki R100 ve R175’teki sıcaklık dağılımları verilmiştir. İlave ısıtım yüzeyi olarak kanat kullanıldığında sıcaklık değerlerinde bir düşüş meydana gelmiştir. R100 hattında alev oluşumuyla beraber sıcaklık ocak ağzından uzaklaştıkça artmaktadır. Alev geri dönüşü olarak adlandırılan R175 ölçüm hattında ise 40 cm mesafesinden 0 mesafesine doğru yanmış gazların hareketi olmakta, bu hareket sonucunda sıcaklık ocak boyunca düşmektedir. Bacaya gitmekte olan gazların ocakta son geçtiği yer olan 0 cm mesafesinde sıcaklığın düşmesi emisyonlarında azalmasına neden olmaktadır.

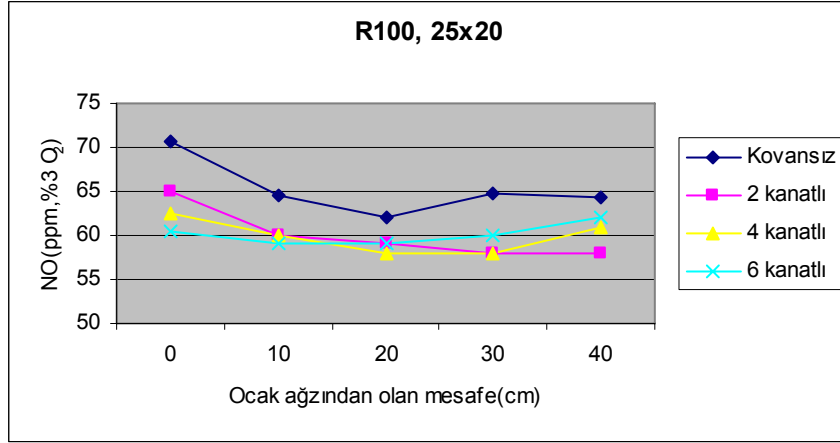


Şekil 4.18: Farklı sayılarda kanatlarla yapılan deneylerde R100 ölçüm hattındaki sıcaklık değerleri (87 kW, 25x20 kovanı, HFK=1.26).

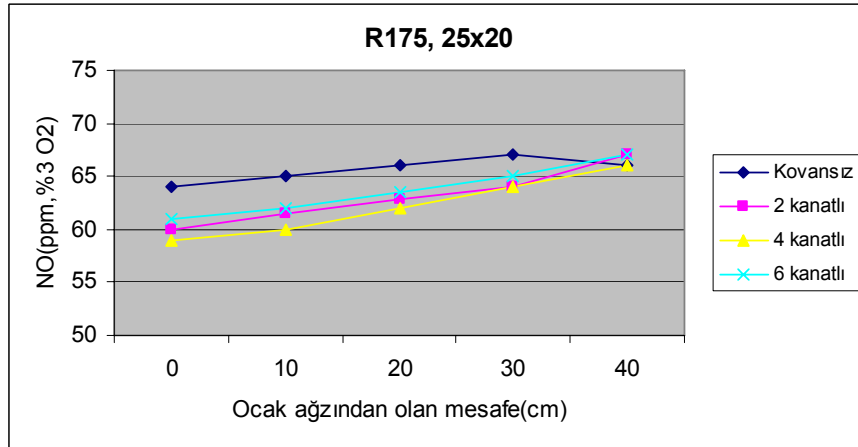


Şekil 4.19: Farklı sayılarda kanatlarla yapılan deneylerde R175 ölçüm hattındaki sıcaklık değerleri (87 kW, 25x20 kovanı, HFK=1.26).

Şekil 4.20 ve Şekil 4.21’de ise azot oksit emisyonlarının R100 ve R175 ölçüm hatlarında ocak boyunca dağılımları görülmektedir. R175 ölçüm hattında sıcaklık değişimi daha az gerçekleştiği için, azot oksit emisyonları da az değişim göstermektedir. Kanat ve kovan kullanımıyla azot oksit emisyonları R100 ve R175 ölçüm hattında ortalama 5 ppm azalmaktadır. Bu azalma sıcaklık düşüşünden meydana gelmektedir.

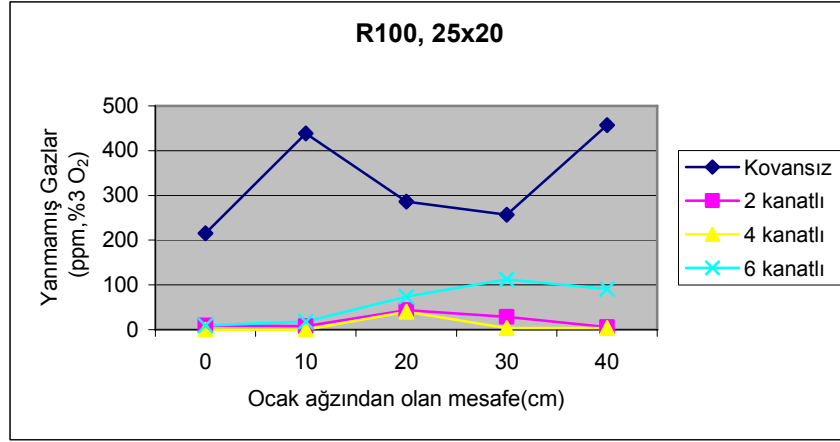


Şekil 4.20: Farklı sayılarda kanatlarla yapılan deneylerde R100 ölçüm hattındaki NO mol kesri değerleri (87 kW, 25x20 kovanı, HFK=1.26).

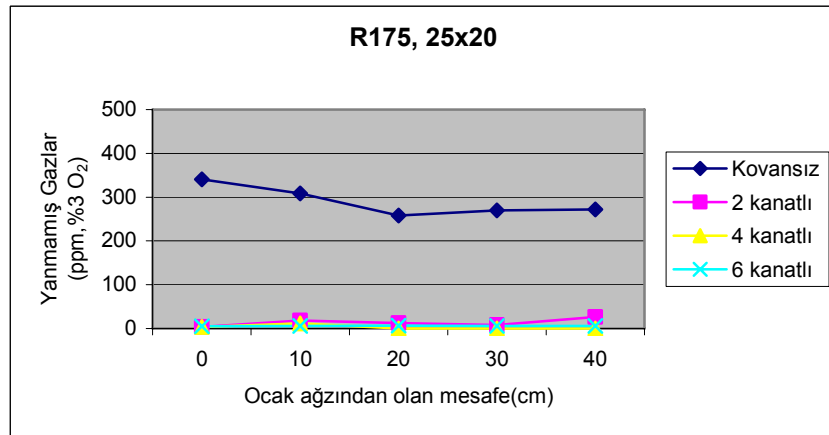


Şekil 4.21: Farklı sayılarda kanatlarla yapılan deneylerde R175 ölçüm hattındaki NO mol kesri değerleri (87 kW, 25x20 kovanı, HFK=1.26).

Şekil 4.22 ve 4.23’te yanmamış gazlara ait R100 ve R175 ölçüm hatlarında ocak boyunca değişim görülmektedir. Kovan ve kanat kullanılmasıyla R100 ölçüm hattında yanmamış gazlar çok düşük değerlere gerilemiştir. R175 ölçüm hattının sıcaklıkların azalmasına bağlı olarak yanmamış gaz emisyonları da azalarak baca gazı emisyonlarını azaltmıştır. Kovansız durumda R175 ölçüm hattının 0 noktasında 340 ppm değeri okunmuştur. Bacada da bu değere yakın yanmamış gaz değeri görülmektedir.

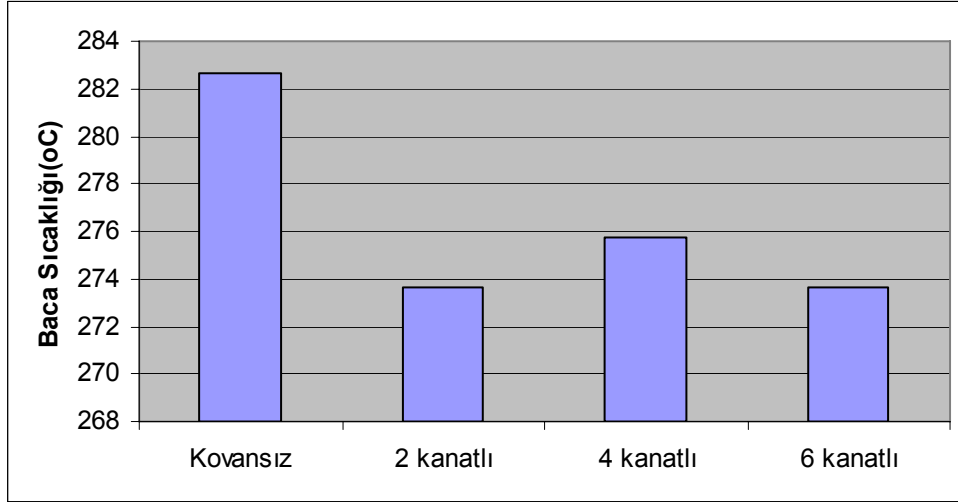


Şekil 4.22: Farklı sayılarda kanatlarla yapılan deneylerde R100 ölçüm hattındaki yanmamış gazların mol kesri değerleri (87 kW, 25x20 kovanı, HFK=1.26).

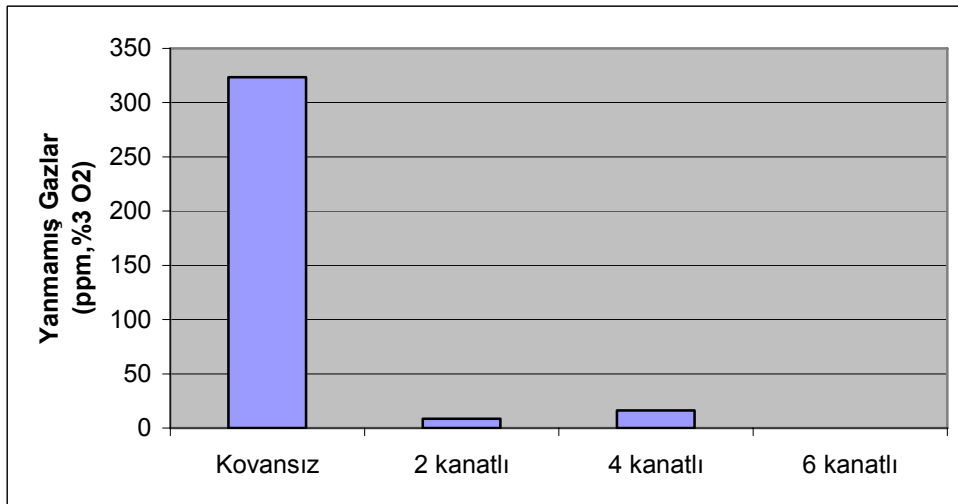


Şekil 4.23: Farklı sayılarda kanatlarla yapılan deneylerde R175 ölçüm hattındaki yanmamış gazların mol kesri değerleri (87 kW, 25x20 kovanı, HFK=1.26).

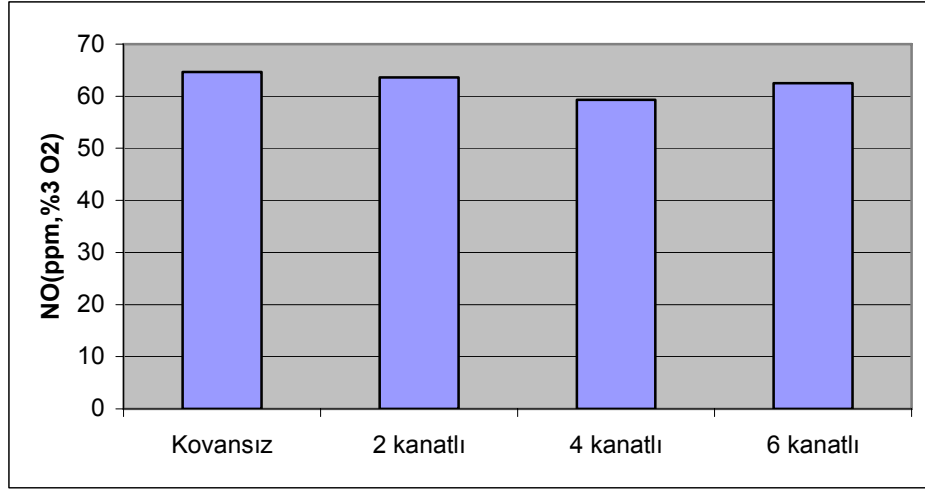
Şekil 4.24, Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'da aynı şartlardaki baca sıcaklığının kovansız ve farklı sayılarda kanatlı deneyler için değişimi gösterilmektedir. Buna göre 2 kanatlı 25x20 kovanlı deneyde en düşük baca gazı sıcaklığı bulunmaktadır. Azot oksit emisyonu değerleri baca gazı sıcaklığının düşmesinden etkilenerek belirli bir miktar azalmaktadır. Ayrıca baca sıcaklığı baca kaybının oluşmasına neden olmaktadır. Hava fazlalık katsayısının 1.02 değerinde baca kaybı ve eksik yanma kaybı önemliyken, 1.26 değerinde CO emisyonları az olduğundan sadece baca kaybı önem kazanmaktadır.



Şekil 4.24: Farklı sayılarda kanatlarla yapılan deneylerde baca gazı sıcaklığı değerleri (87 kW, 25x20 kovanı, HFK=1.26)

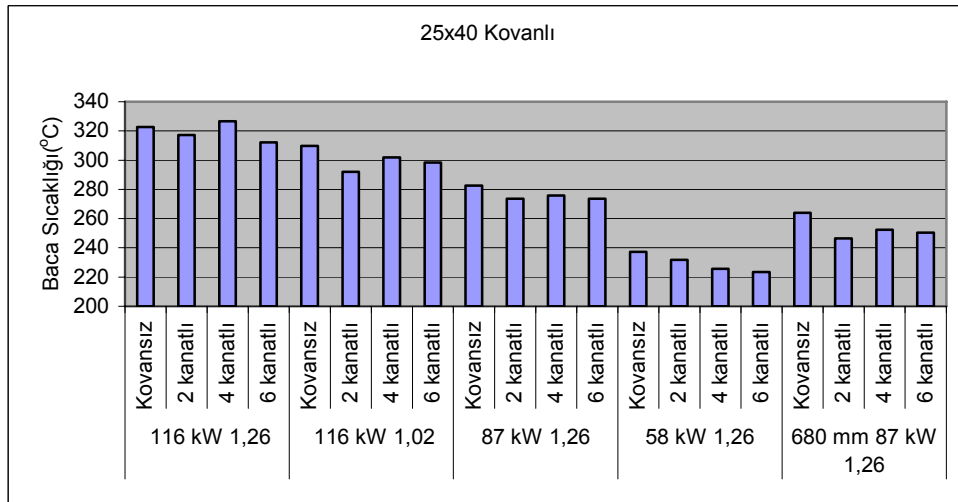


Şekil 4.25: Farklı sayılarda kanatlarla yapılan deneylerde bacadaki yanmamış gaz değerleri (87 kW, 25x20 kovanı, HFK=1.26)



Şekil 4.26: Farklı sayılarda kanatlarla yapılan deneylerde bacadaki azotoksit emisyonu değerleri (87 kW, 25x20 kovanı, HFK=1.26)

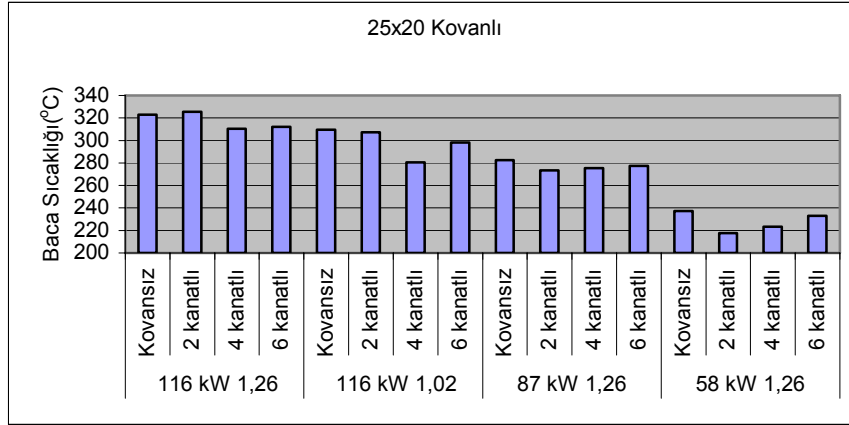
Şekil 4.27’de belirtilen şartlardaki 25x40 kovanlı durumdaki baca sıcaklığı değişimi görülmektedir. Bu şartlarda kanat kullanılmasıyla beraber baca sıcaklığında düşüş meydana gelmektedir. Düşük ısıl kapasitelerde ilave ısıtım yüzeylerinin etkisi daha fazla olmaktadır. Ayrıca 680 mm ocak boyunda ve 87 kW ısıl kapasitede yapılan hava fazlalık katsayısının 1.26 olduğu deneylerde de ilave ısıtım yüzeylerinin etkisini görmek mümkündür.



Şekil 4.27: 25x40 kovanlı ve farklı koşullarda yapılan deneylerde baca sıcaklığı değerleri

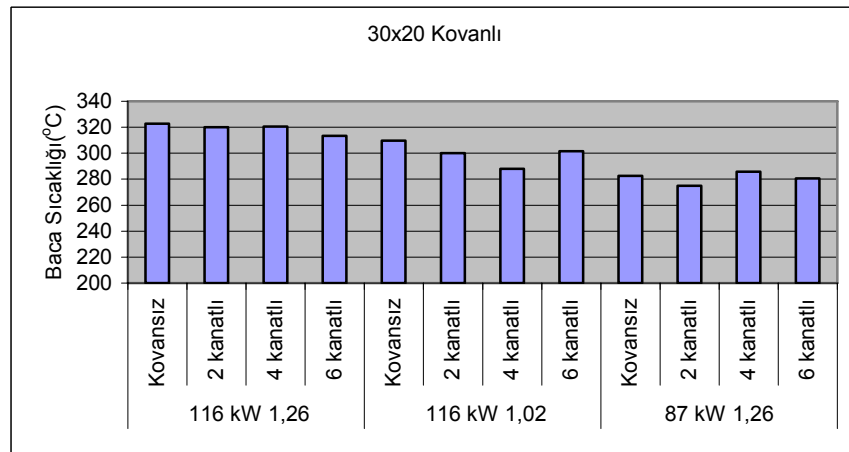
25x20 kovan ve kanat kullanılmasıyla değişik şartlarda meydana gelen baca sıcaklıkları Şekil 4.28’de verilmektedir. İlave ısıtım yüzeylerinin etkisi, 116 kW ısıl kapasitede ve

1.26 hava fazlalık katsayısındaki durumda 4 ve 6 kanatta hissedilirken, diğer durumlarda her kanat sayısı daha düşük baca sıcaklıkları tespit edilmiştir.



Şekil 4.28: 25x20 kovanlı ve farklı koşullarda yapılan deneylerde baca sıcaklığı değerleri

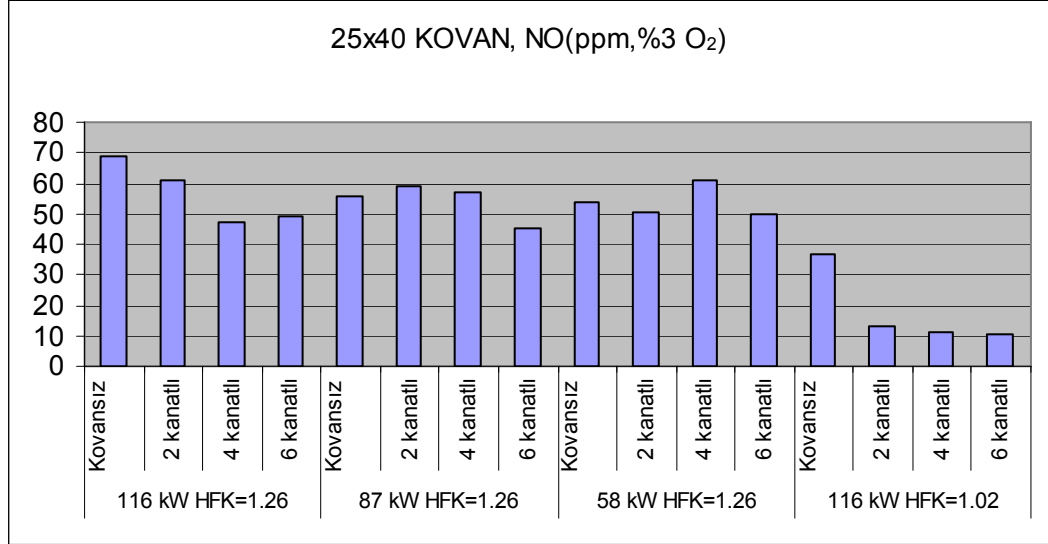
Şekil 4.29'da 30x20 kovanlı üç farklı durumda kanat kullanımının baca sıcaklığına etkisi gösterilmiştir. Her üç durumda da kanat kullanımı etkili olmakla beraber; kovan ebatlarının 25x40 ve 30x20 olduğu durumlarda, 25x20 kovanına göre ısıtım yapan yüzey alanı artmaktadır. Bu da baca sıcaklığını düşürmede ilave etki yapmaktadır.



Şekil 4.29: 30x20 kovanlı ve farklı koşullarda yapılan deneylerde baca sıcaklığı değerleri

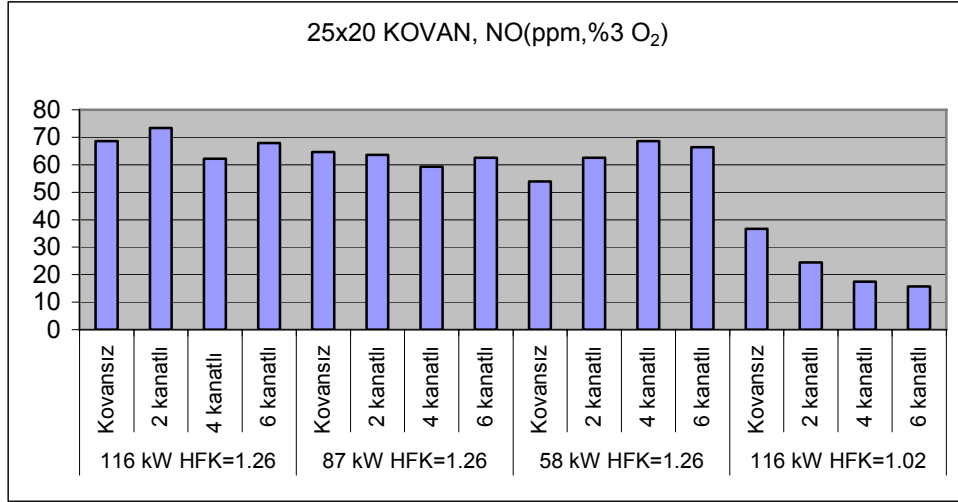
Azot oksit emisyonlarının değişik durumlardaki bacadaki değerleri Şekil 4.30, Şekil 4.31 ve Şekil 4.32'de verilmiştir. 790 mm ocak boyunda 25x40 kovanlı durumda 116 kW ısıtım gücünde yapılan deneylerde ısıtım yüzeyinin artmasıyla azot oksit

emisyonlarının azaldığı gözlenirken, 87 kW'ta 2 kanatlı ve 58 kW ta 4 kanatlı halde azot oksit emisyonları ortalama 5 ppm yüksek ölçülmüştür. Genel olarak 25x40 kovanlı deneylerde, ek ısıtım yüzeyi olarak kullanılan kanatların azot oksit emisyonu yönünden iyileştirme yaptığı söylenebilmektedir.



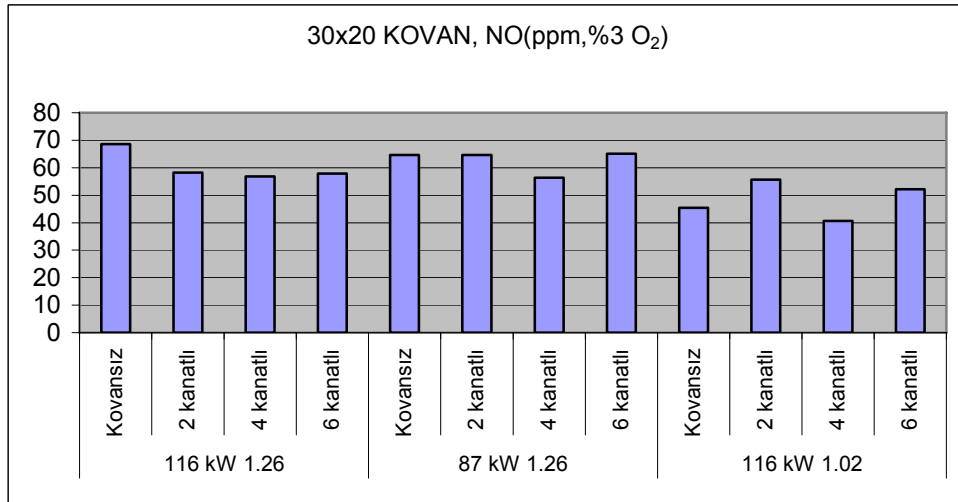
Şekil 4.30: 25x40 kovanlı ve farklı koşullarda yapılan deneylerde bacadaki azotoksit emisyonu değerleri

25x20 kovanlı ve değişik şartlarda yapılan deneylere ait azot oksit emisyonunun bacada değişimi Şekil 4.31'de verilmiştir. Buna göre 116 kW ısıtım gücü ve hava fazlalık katsayısının 1.02 olduğu deney ile 87 kW ve hava fazlalık katsayısının 1.26 olduğu deneylerde iyileştirme görüldüğü; diğer deneylerde ise kanat sayısına bağlı olarak farklı durumlar oluştuğu söylenebilmektedir.



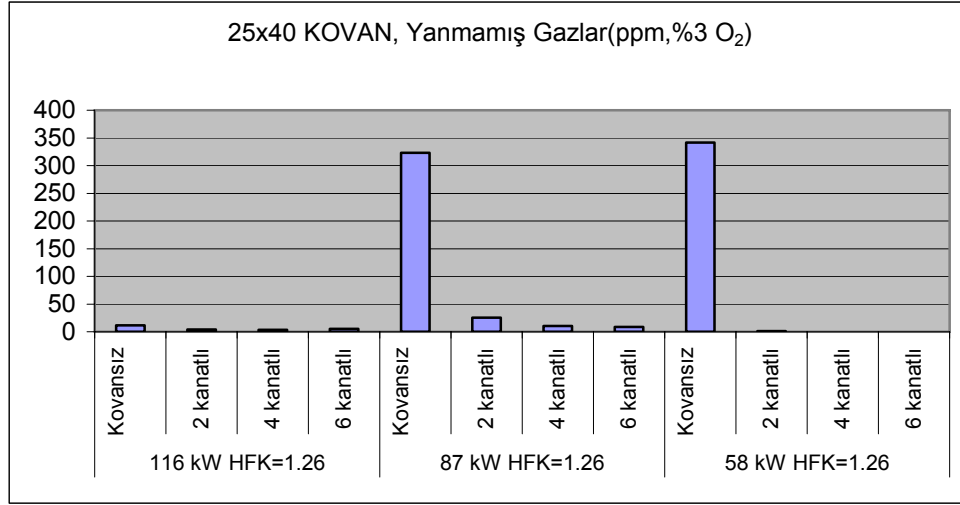
Şekil 4.31: 25x20 kovanlı ve farklı koşullarda yapılan deneylerde bacadaki azotoksit emisyonu değerleri

Şekil 4.32, 30x20 kovanlı ve değişik durumlarda yapılan deneylere ait bacadaki azot oksit emisyonlarını göstermektedir. 116 kW ısı gücü ve hava fazlalık katsayısının 1.26 olduğu durumda azot oksit bakımından azalma görülmekle beraber; diğer durumlarda kanat sayısına bağlı olarak azot oksit emisyonu farklı değerler almaktadır.



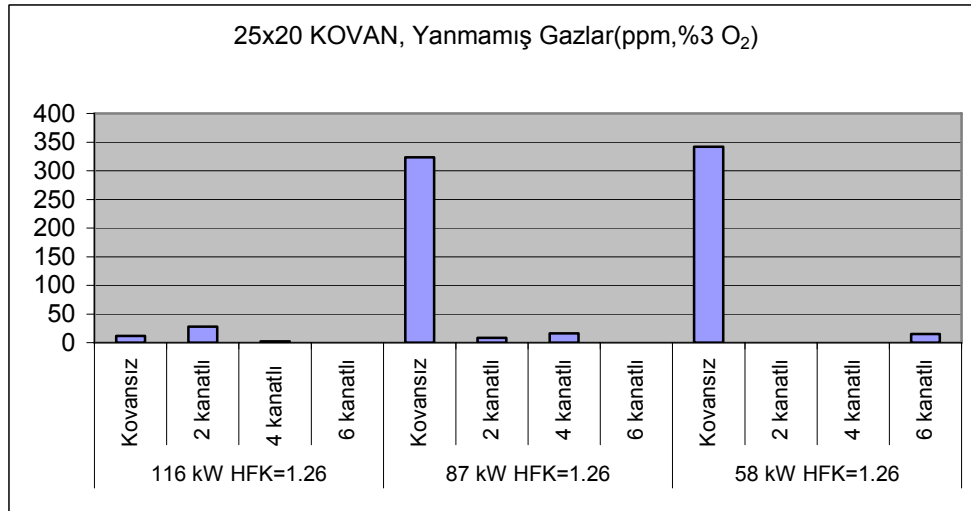
Şekil 4.32: 30x20 kovanlı ve farklı koşullarda yapılan deneylerde bacadaki azotoksit emisyonu değerleri

25x40 kovanlı ve farklı şartlardaki bacadaki yanmamış gaz değerlerini Şekil 4.33'de bulmak mümkündür. Kazan ısı kapasitesindeki azalmayla kovansız durumda daha yüksek yanmamış gaz değeri görülmektedir. Bu değer her üç kazan ısı kapasitesi için kanat kullanılmasıyla aşağıya çekilebilmektedir.



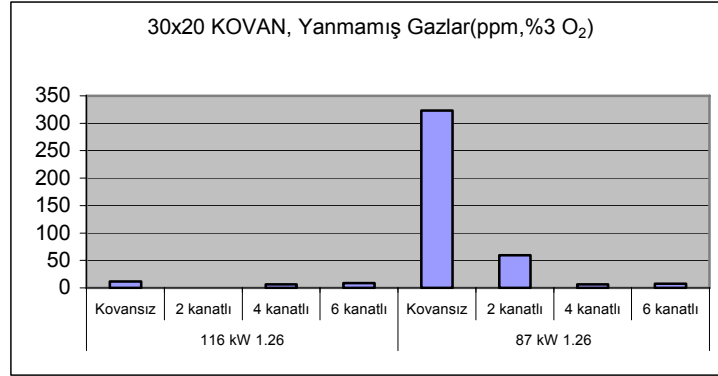
Şekil 4.33: 25x40 kovanlı ve farklı koşullarda yapılan deneylerde bacadaki yanmamış gazlar emisyon değerleri

Şekil 4.34’de 25x20 kovanlı ve farklı kazan ısıt kapasitelerinin kullanıldığı durumlarda yanmamış gazlar emisyonu görülmektedir. 116 kW ısıt kapasitede yapılan deneylerde 4 ve 6 kanatlı durumlar yanmamış gazlar emisyonunu düşürürken, düşük ısıt kapasitelerde her üç kanat sayısı emisyon azaltılmasına katkıda bulunmaktadır.



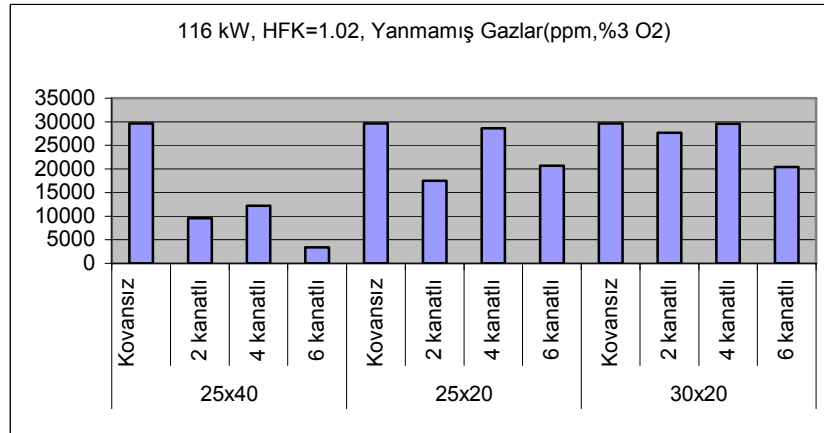
Şekil 4.34: 25x20 kovanlı ve farklı koşullarda yapılan deneylerde bacadaki yanmamış gazlar emisyon değerleri

30x20 kovanının kullanıldığı 116 kW ve 87 kW ısıt kapasitelerde hava fazlalık katsayısının 1.26 olduğu deneyler Şekil 4.35’de verilmiştir. Buna göre her iki kazan ısıt kapasitesinde kanat kullanımı bacadaki yanmamış gazlar emisyonunu azaltmaktadır.



Şekil 4.35: 30x20 kovanlı ve farklı koşullarda yapılan deneylerde bacadaki yanmamış gaz emisyon değerleri

Şekil 4.36’da görüldüğü gibi, hava fazlalık katsayısının 1.02 olduğu durumda yanmamış gazlar emisyonu değerleri yüksek hava fazlalık katsayısıyla yapılan deneylere göre daha yüksektir. Bunun nedeni hava fazlalık katsayısı azaltıldığında O₂ miktarının azalmasıdır. Böylece CO₂ oluşumu gerçekleşmeyerek, CO ve yanmamış gaz oluşumunu tetiklenmektedir. En büyük değişim 25x40 kovanı için olmak üzere, her kovanlı durumda ve her kanat sayısında yanmamış gaz emisyonunun kovansız duruma göre azaldığı görülmektedir.



Şekil 4.36: Hava fazlalık katsayısının 1.02 olduğu farklı koşullarda yapılan deneylerde bacadaki yanmamış gazlar emisyon değerleri

4.6.3 Kazan Isıl Verimi

Kazan ısı verimi $\mu = 1 - \sum Z$ olarak ifade edilebilmektedir. Burada Z ısı kaybı(%) anlamında olup, çeşitli kayıp değerlerinin toplamının bulunmasıyla ısı verim ifadesi hesaplanır. Isıl verim hesabında kayıplar olarak; baca kaybı, eksik yanma kaybı ve sıcak cidar kaybı dikkate alınmaktadır. Bu ifadelerden baca kaybı aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir. Bu ifadede y yanmaya katılmayan yakıt oranıdır. Doğal gaz için ihmal edilmektedir.

$$Z_b = \frac{(1-y)V_g(i_b - i_a)}{H_u} \quad (4.1)$$

Eksik yanma kaybı CO ve hava fazlalık katsayısına bağlı olarak aşağıdaki eşitlikle hesaplanmaktadır.

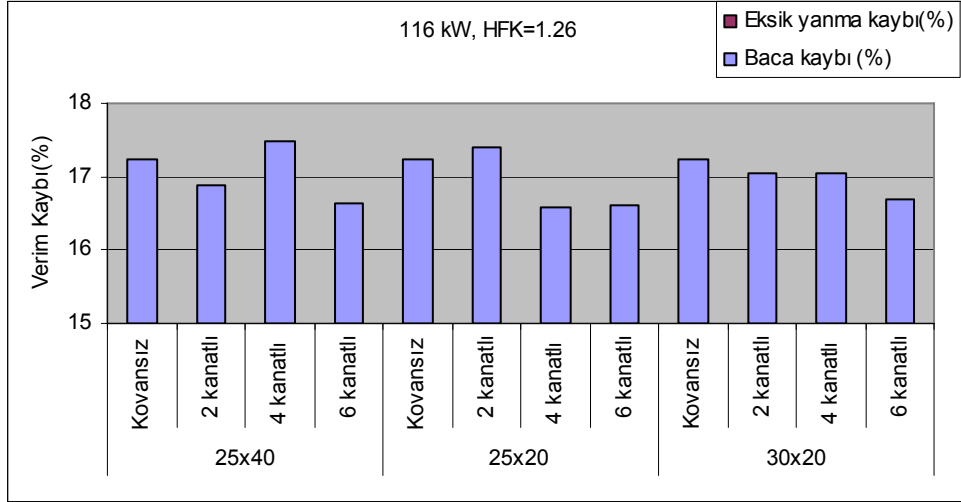
$$Z_e \cong 3.2 \cdot \lambda \cdot CO \quad (4.2)$$

Hesaplamaların sonucunda kazan ısı verimine ait ifade aşağıdaki gibi düzenlenebilmektedir:

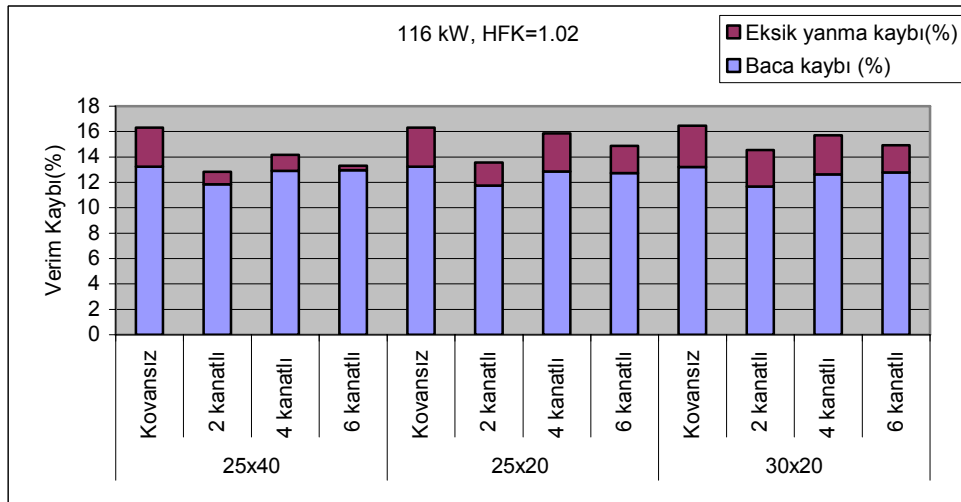
$$\eta = 1 - (Z_b + Z_e + Z_c) \quad (4.3)$$

Sıcak cidar kaybı ihmal edilmiştir.

Şekil 4.37’de 790 mm ocak boyunda kazan ısı kapasitesinin 116 kW, hava fazlalık katsayısının 1.26 olduğu deneylerde farklı ebatlarda kovanlar ve kanat sayılarındaki kayıpların değişimi görülmektedir. Hava fazlalık katsayısının 1.26 değerlerinde, CO emisyonu değeri düşük olduğundan eksik yanma kaybının etkisi az olmaktadır. 25x40 4 kanatlı ve 25x20 2 kanatlı dışındaki durumlarda, kovansız durumdaki deneye göre kovan kullanılan deneylerde baca sıcaklığı düşerek, verimin artmasına neden olmaktadır.



Şekil 4.37: Değişik kovan ebatları ve kanat sayılarında yüzde olarak kayıplar (116 kW, hava fazlalık katsayısı=1.26, 790 mm ocak boyu)

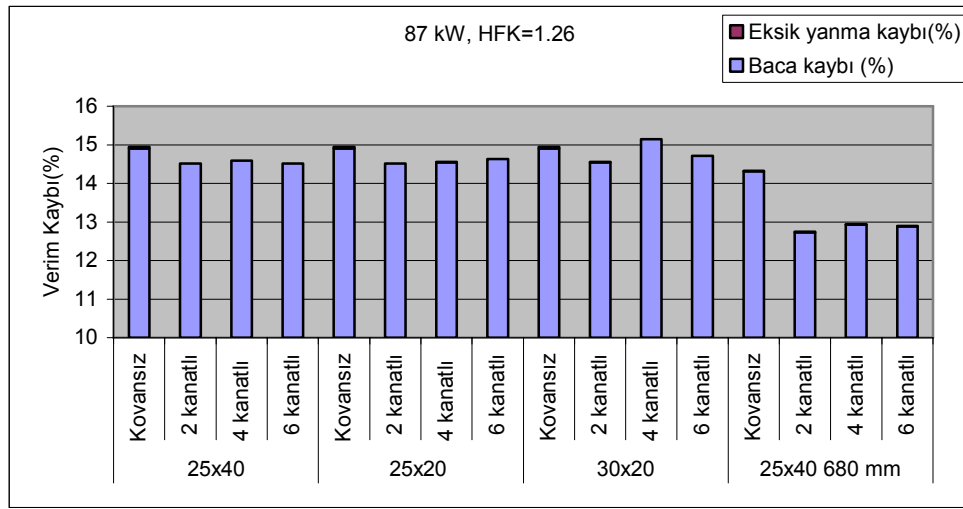


Şekil 4.38: Değişik kovan ebatları ve kanat sayılarında yüzde olarak kayıplar (116 kW, hava fazlalık katsayısı=1.02, 790 mm ocak boyu)

Kazan ısı kapasitenin 116 kW ve hava fazlalık katsayısının 1.02 olduğu deneylerde, her kanat ve kovan durumunda kovansız duruma göre kazan veriminde artış görülmektedir. Şekil 4.38’de, belirtilen ısı güç ve hava fazlalık katsayısında farklı kanat sayıları ve kovan ebatları için kayıp değerlerini görmek mümkündür. Hava fazlalık katsayısının azalmasıyla kovansız durumlarda daha düşük oranda olmak üzere, kanatlı kovanlı durumlarda kazan verimi artmaktadır. Bu verim artışında eksik yanma kaybı ve baca kaybı değerlerinin düşmesinin etkisi olduğu söylenebilmektedir. CO emisyonu değerleri yüksek olduğundan eksik yanma kaybının verim üzerindeki etkisi daha fazla

olmaktadır. Baca kaybı değerlerindeki azalma ise baca sıcaklığının düşmesinden kaynaklanmaktadır.

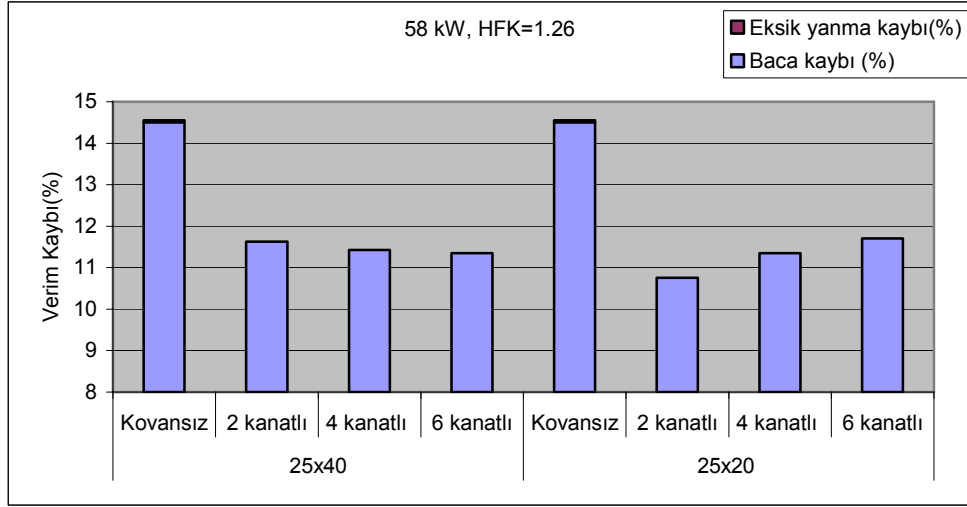
Şekil 4.39 ve Şekil 4.40'ta düşük kazan ısı güçlerinde(sırasıyla 87 ve 58 kW) farklı kovan ebadı ve kanat sayılarında verim kaybının değişimi görülmektedir. Kovansız durumda ısı kapasitenin azaltılmasıyla, kazan veriminde %0.5 civarında bir değişim görülmekteyken, kanatlı kovanlı durumlarda %3 mertebesinde bir artış mevcuttur.



Şekil 4.39: Değişik kovan ebatları ve kanat sayılarında yüzde olarak kayıplar (87 kW, hava fazlalık katsayısı=1.26, 790 ve 680 mm ocak boyu)

87 kW ısı kapasitede, hava fazlalık katsayısının 1.26 olduğu durumda ocak boyu 790 mm'den 680 mm'ye düşürüldüğünde kazan veriminin kovansız ve kanatlı kovanlı durumlarda arttığı görülmektedir. Bu artış kovansız durumda daha düşük değerler alırken kovanlı kanatlı durumlarda %2 mertebesinde gerçekleşmektedir.

Kazan ısı kapasitesinin 58 kW, hava fazlalık katsayısının 1.26 olduğu 25x40 ve 25x20 kovan çap ve boylarındaki kazan verimleri, kovansız duruma göre %3 mertebesinde bir artış göstermiştir. Düşük kazan ısı kapasitesinde verim kayıplarının azalmasının nedeni, 116 kW anma ısı gücüne sahip kazanda düşük güçte yanma sağlanmasından dolayı baca sıcaklığında düşük değerlerin gerçekleşmesidir.



Şekil 4.40: Değişik kovan ebatları ve kanat sayılarında yüzde olarak kayıplar (58 kW, hava fazlalık katsayısı=1.26, 790 mm ocak boyu)

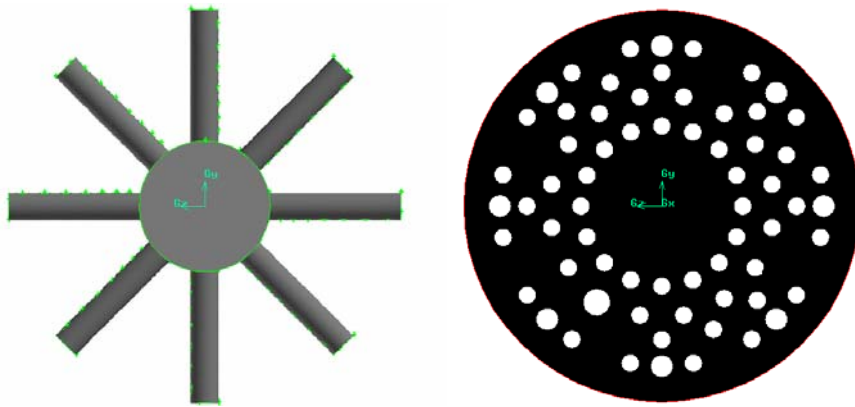
5. NÜMERİK MODELLEME VE DENEY SONUÇLARI İLE KARŞILAŞTIRMA

5.1 Modelleme

GAMBIT hesaplamalı akışkanlar dinamiği ve sonlu elemanlar analizlerinde kullanılabilen genel amaçlı bir ön işlemcidir. GAMBIT iki boyutta dörtgen ve üçgen elemanların, üç boyutta ise altı yüzlü, dört yüzlü ve geçiş elamanları olarak kama tipi ve piramit tipi elemanların kullanımına izin vererek istenilen tipteki sayısal ağıın basit ve hızlı şekilde oluşturulmasına imkan verir.

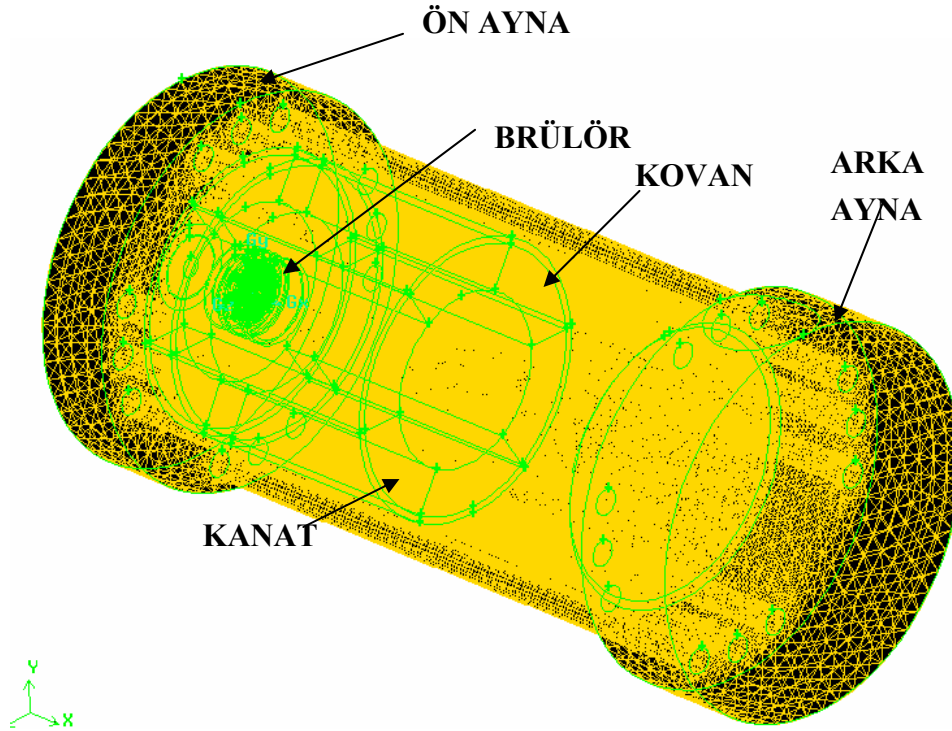
Bu çalışmada GAMBIT programı yardımıyla kazanın birebir modellemesi yapılmıştır. Bu modelleme yapılırken kazandaki her bir bileşenin ölçüleri alınmış, bu ölçüler yardımıyla uygun model oluşturulmuştur. Burada esas, gerçeğe en uygun modeli oluşturmaktır. Ana model oluşturduktan sonra farklı kanat sayıları, kovan çap ve boylarına göre modelleme yapılmıştır.

Şekil 5.1’de birebir modellemesi yapılmış brülördeki yakıt kanalları ve türbülötör görölmektedir.



Şekil 5.1: Brülördeki yakıt kanalları ve türbülötör

Kazana ait değişik durumlarda modeller GAMBIT programında oluşturulduktan sonra, aynı program yardımıyla ağ yapısı oluşturma işlemine geçilmiştir. Bu işlem, değişimlerin daha keskin gerçekleştiği bölgelerde daha sık, diğer bölgelerde ise daha seyrek olacak şekilde uygulanmıştır. Ayrıca geometriye göre farklı ağ yapıları kullanılmıştır. şekil 5.2’de 6 kanatlı 25x40 kovanlı modele ait ağ yapısı görülmektedir.

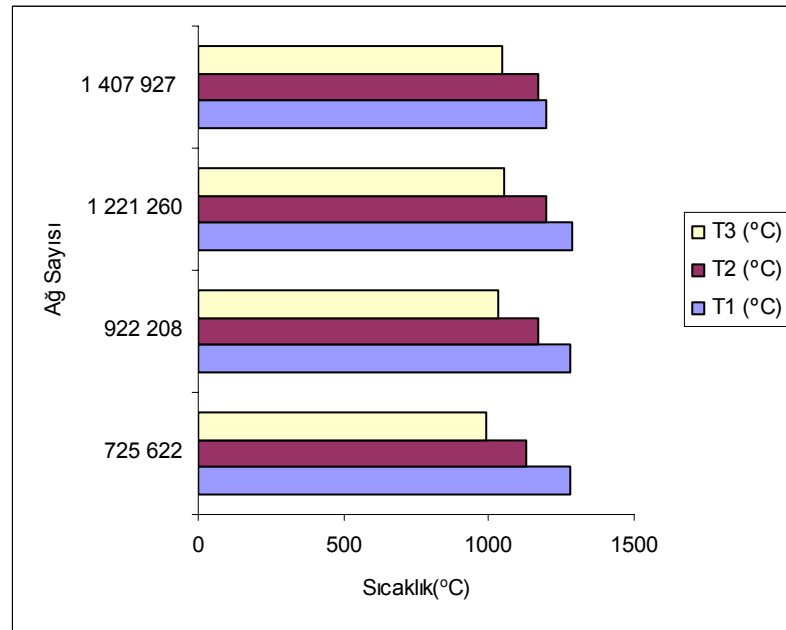


şekil 5.2: 25 x 40 kovanlı ve 6 kanatlı modele ait ağ yapısı

Uygun ağ yapısının bulunabilmesi açısından farklı ağ sayılarında çözümler yapılmıştır. Bu çözümlerde temel kıstas, çözüm süresinin, bilgisayar işlemci kullanımının ve çözüm sonuçlarının makul değerlerde olmasıdır. zm aşamasında farklı ağ yapısı ve sayısı yardımıyla farklı çözümler elde edilmiştir. Bu deneme çözümlerinde FLUENT programının 1.6×10^6 ağın üzerindeki modeller için NOx çözümünde başarılı olamadığı görülmüştür. Bilgisayar işlemci ve bellek kullanım oranı ve FLUENT lisansı bu sorunun çıkmasındaki nedenlerdir.

şekil 5.3’te farklı ağ sayılarında yapılan alev sıcaklıklarını gösteren çözümler verilmiştir. Ağ sayısı arttırıldığında daha yüksek çözüm doğruluğu elde edilmiştir. Ağ yapısındaki değişimle beraber hız ve sıcaklık konturlarının da olayın fiziksel

karakteristiğine uygun dağılımlar gösterdiği saptanmıştır. Aynı zamanda aleve yakın bölgede ağ yapısı değiştirildiğinde çözümler daha fazla etkilenirken, uzak bölgede yapılan değişikliklerde daha küçük değer değişimleri gerçekleşmiştir. Bu prensip uygun ağ yapısının saptanmasında da faydalıdır. Çünkü alevden uzak bölgelere fazla ağ yığmanın doğruluğu fazla etkilemediği halde çözüm süresini uzatacağı aşikârdır. Kısıtlar ve doğruluk bir arada düşünülerek optimum ağ sayısı değeri Şekil 5.2’de görülen 6 kanatlı ve 25x40 kovanlı model için 1 537 038 olarak tespit edilmiştir

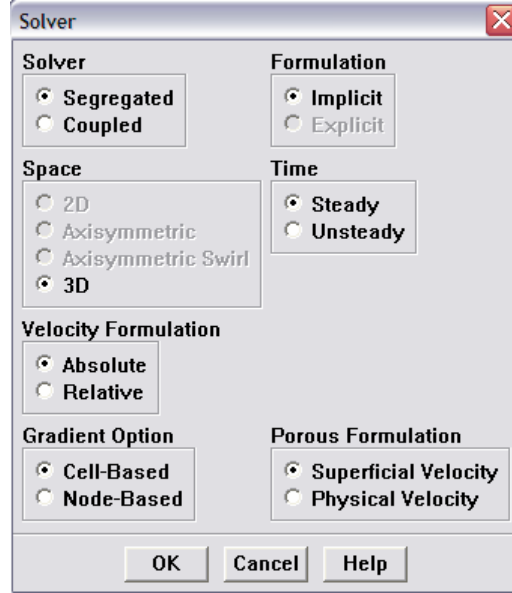


Şekil 5.3: Kovansız durum için farklı ağ sayılarında elde edilen alev sıcaklıkları

FLUENT sonlu hacimler yöntemini kullanan bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımıdır. Bu program sistem performansını deneyden bağımsız olarak ölçme, eğer yapılacak çalışmada bir sorun varsa bilgisayar aşamasında bu sorunu çözebilme imkânı sağlar. Modelleme ve ağ yapısının sağlanması aşamasından sonra FLUENT programında çözüme aşamasına geçilmiştir. FLUENT çözümlerini yaparken teoride bulunan bazı modelleri kullanır. FLUENT 6.1.22 programının 2003 yılındaki sürümü kullanılarak yapılan çözümlerde kullanılan modeller aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

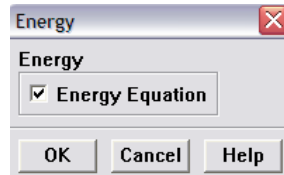
a) Denklem Çözümleri: Segregated çözücü seçilmiştir. Bu çözücü, denklemleri birbirinden ayırmakta, ayrıklaştırılmış hallerini iter aktif olarak çözmektedir. Ayrıca bu

çalışmada açık (implicit) çözüm ve zamandan bağımsız formül kullanılmıştır. Şekil 5.4'te FLUENT'te denklem çözücünün seçilmesi gösterilmiştir.



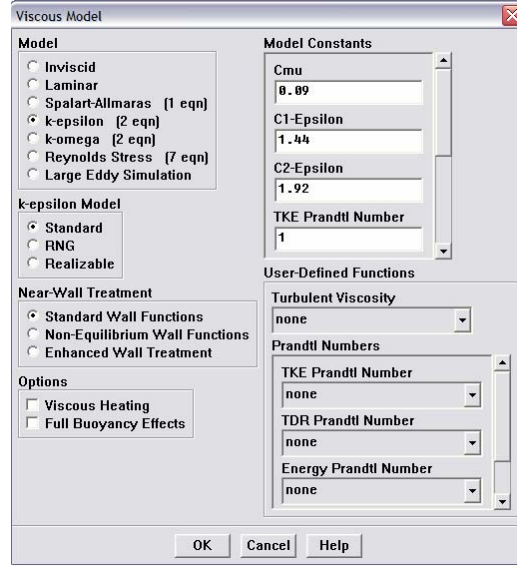
Şekil 5.4: Denklem çözücüsünün seçilmesi

b) Enerji Denklemi: Sıcaklıkla ilgili çözümlerin alınabilmesi için enerji denkleminin çözülmesi gerekmektedir. Şekil 5.5'te FLUENT programında enerji denkleminin aktif hale getirilmesi görülmektedir.



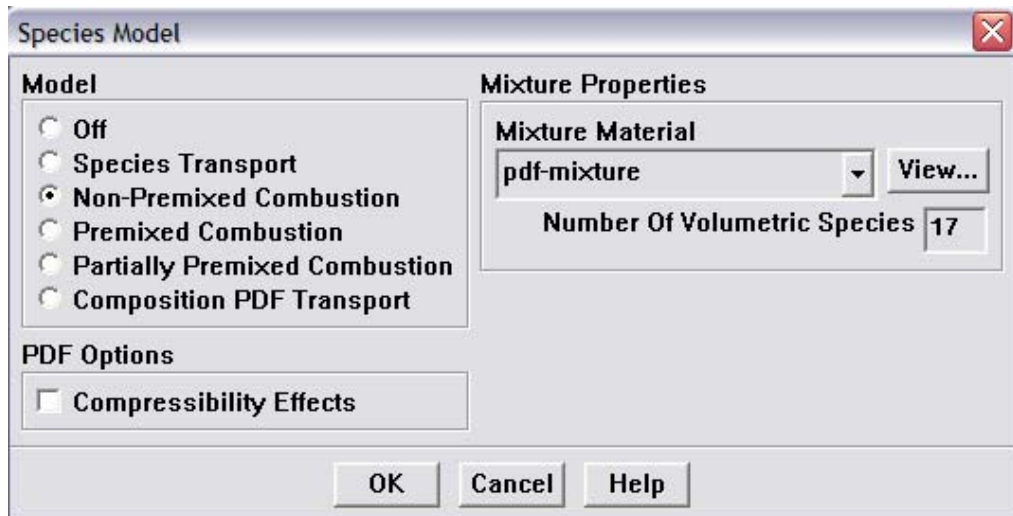
Şekil 5.5: Enerji denkleminin aktive edilmesi

c) Viskoz Model: Türbülanslı akışa ait çözümlerin alınmasında standart k-epsilon modeli kullanılmıştır. Bu model yüksek Re sayıları için doğru sonuçlar vermektedir. Şekil 5.6'da FLUENT programında viskoz model için yapılan ayarlamalar görülmektedir.



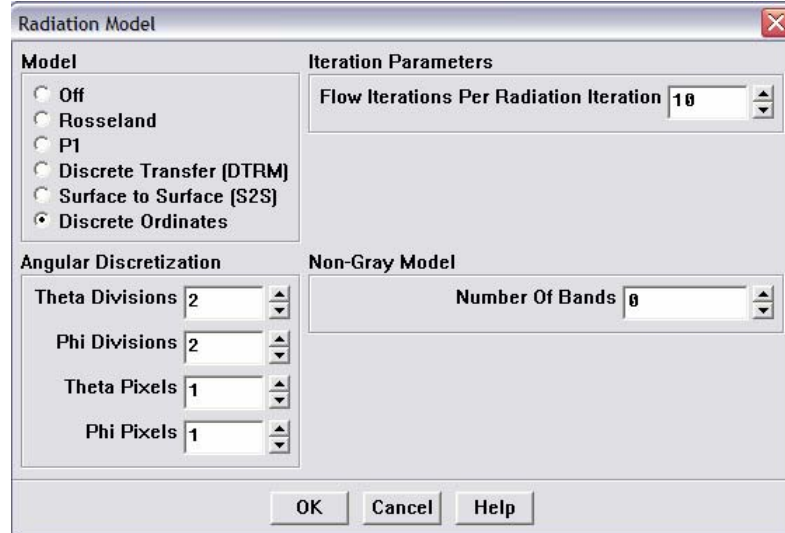
Şekil 5.6: FLUENT programında viskoz modelinin tanıtılması

d) Kimyasal Bileşenlerin Geçişi: PrePDF programında doğal gaz yanmasına ait mekanizmayı tanıttıktan sonra ön karışimsız yanma(non premixed combustion) modeli seçilerek çözüm yapılmıştır. Bu programda Smooke mekanizması kullanılmıştır. Bu mekanizma EK 2’de verilmiştir. CH_4 , CH_3 , H , O_2 , HO_2 , H_2 , O , OH , H_2O , CH_2O , HCO , CO , CO_2 , CH_3O , N_2 , H_2O_2 , N olmak üzere 17 bileşenden oluşmaktadır. Ön karışimsız yanma modeli yaklaşımı bir veya iki korunumlu skalar için transport denklemlerin çözümünü içerir. Şekil 5.7’de FLUENT programında karışım modeli için yapılan ayarlamalar görülmektedir.



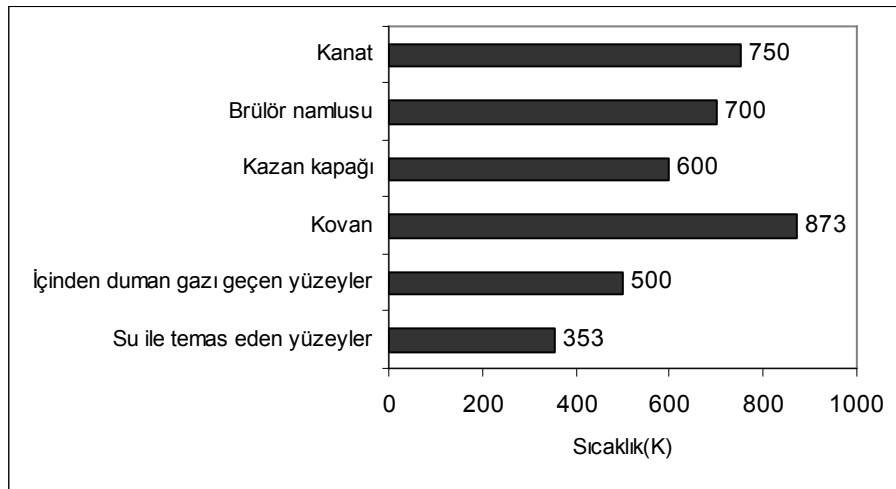
Şekil 5.7: Bileşenler için modelin seçilmesi

e) Radyasyon Modeli: Radyasyon çözümlerinde Discrete Ordinates (DO) modeli seçilmiştir. Bu menünün kullanımında radyasyon modeline ait FLUENT'in varsaydığı sabitler kullanılmıştır. Şekil 5.8'de FLUENT programında Discrete Ordinates radyasyon modelinin seçimi görülmektedir.



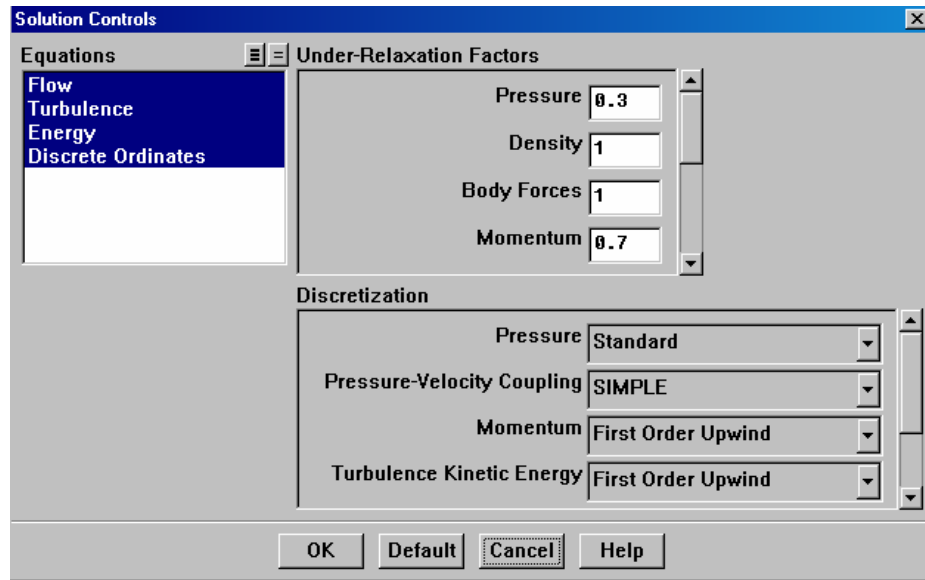
Şekil 5.8: FLUENT programında radyasyon modelinin seçimi

Ayrıca yerçekimi ivmesi 9.81 m/s^2 olarak programa girilmiştir. Sınır şartları olarak deneylerden alınan değerler kullanılmıştır. Şekil 5.9'da girilen sıcaklık sınır şartları verilmiştir.



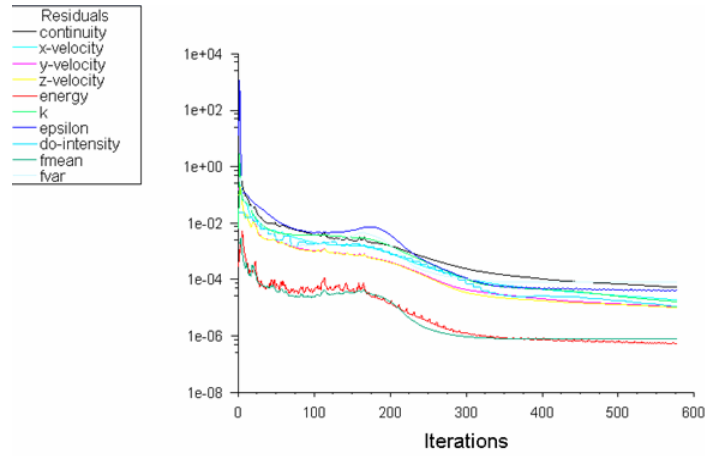
Şekil 5.9: FLUENT programına girilen sıcaklık sınır şartları

Şekil 5.10’da görüldüğü gibi FLUENT programında “pressure”(basınç) standart algoritma ile çözülmektedir. “Pressure-velocity coupling”(basınç hız çifti) ise, kütle korunumunu sağlamak ve basınç alanını elde etmek için basınç hız arasındaki düzeltmeler arasındaki ilişkilere dayalı olan SIMPLE algoritması ile çözülmektedir. Diğer özelliklerin sonuçlarının bulunmasında ise First Order Upwind kullanılmıştır. Burada kısıt yine bilgisayar işlemcisinden kaynaklıdır. Second Order Upwind ile yapılan işlemler daha doğru sonuçlar vermekte olmasına rağmen kullanılamamasının nedeni de işlemci süresini azaltma ihtiyacıdır.



Şekil 5.10: FLUENT programında çözüm kontrolleri

Şekil 5.11’de altı kanatlı model için iterasyonların yakınsamaya bağlı eğrileri verilmiştir. Belirli bir iterasyon sayısından sonra yakınsama değerlerindeki değişim minimize olarak eğri yataylaşmaktadır. Süreklilik denklemi 1×10^{-3} mertebesine yakınsadığında çözümde istenilen doğruluğa ulaşıldığı saptanmıştır. Süreklilik denklemi bu mertebedeysen diğer “residual” değerleri daha düşüktür.



Şekil 5.11: Fluent programında çözümün yakınsama grafiği

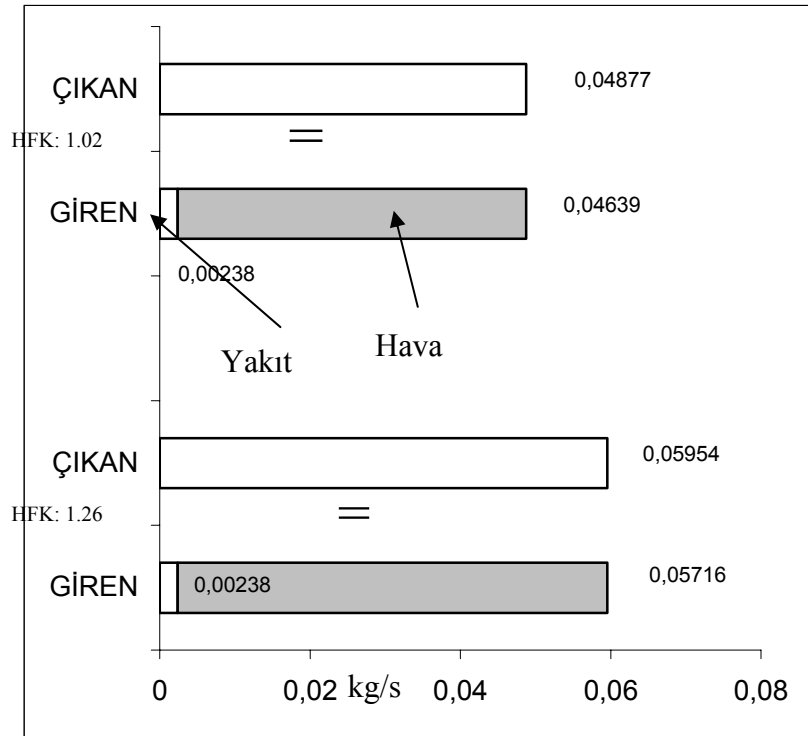
5.1.1 Enerji ve Kütle Dengesi

Kazan geometrisine enerji girişi metanla olmaktadır. Metanla verilen enerji miktarı 116 kW'tır. 790 mm ocak boyu 116 kW kazan ısıl kapasitesinde ve hava fazlalık katsayısının 1,26 olduğunda suya aktarılan enerji 91.656 kW'tır. Bu durumda ısı verim ise %79 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 5.1: 790 mm ocak boyu ve kovansız durumda kazan ısı verimi hesabı

Kazan Isıl Kapasitesi (kW)/Parametre	Hava Fazlalık Katsayısı	Kazanda Suyu Aktarılan Enerji (kW)	Kazan Isıl Verimi (%)
116/Kovansız	1.02	91.656	79.0
116/Kovansız	1.26	94.543	81.5
116/25x40	1.26	97.906	84.0
116/25x40-2 kanat	1.26	97.967	84.4
116/25x40-4 kanat	1.26	98.456	84.8
116/25x40-6 kanat	1.26	99.012	85.3

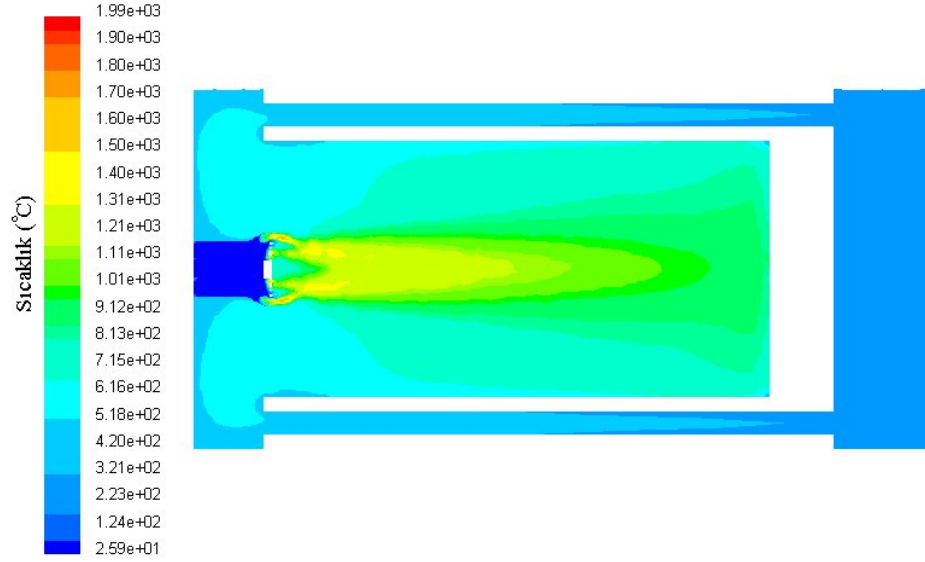
FLUENT programında çözümün yakınsama kriterlerinden biri de kütle dengesinin kurulmasıdır. Giren çıkan dengesinin hassas bir şekilde kurulduğu durumlarda çözümlerin de hassas olması beklenmektedir. Yakıt girişi brülördeki yakıt giriş deliklerinden, hava girişi namludan sağlanmaktadır. Yanma sonu açığa çıkan gazlar ise bacadan çıkmaktadır. Nümerik çözümlerde kütle dengesinin hassasiyetinin 1.10^{-8} civarında olduğu görülmüştür. Şekil 5.12’de 790 mm ocak boyunda 116 kW kazan ısıtım kapasitesindeki yakıt, hava ve bacadan çıkan yanmış gazların debileri verilmiştir.



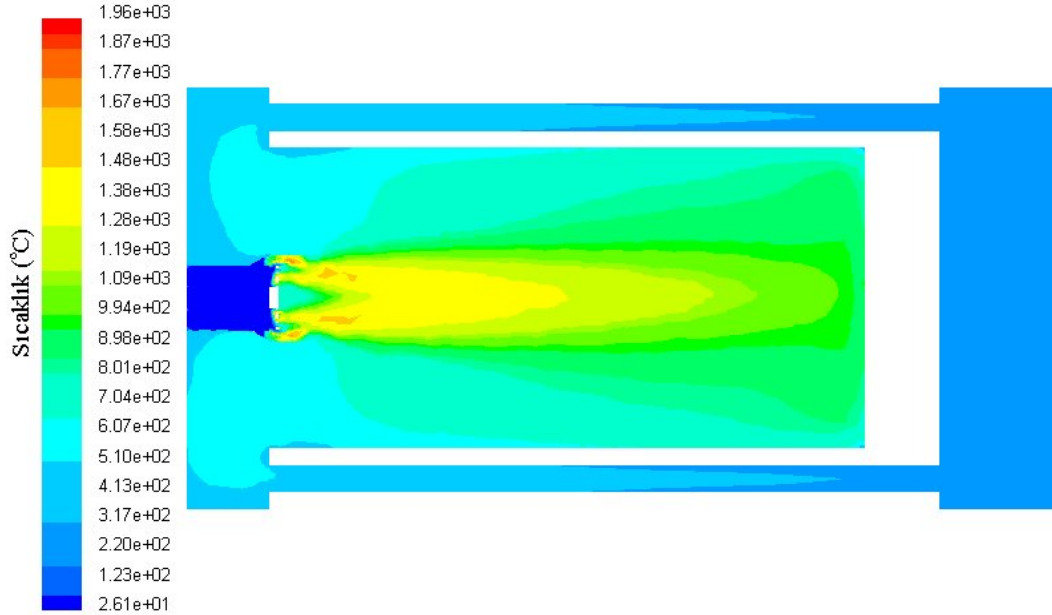
Şekil 5.12: Nümerik olarak saptanan farklı hava fazlalık katsayılarında kazan kontrol hacmi için kütle dengesi.

5.2 Model Sonuçları

5.2.1 Sıcaklık Değerlerinin Karşılaştırılması



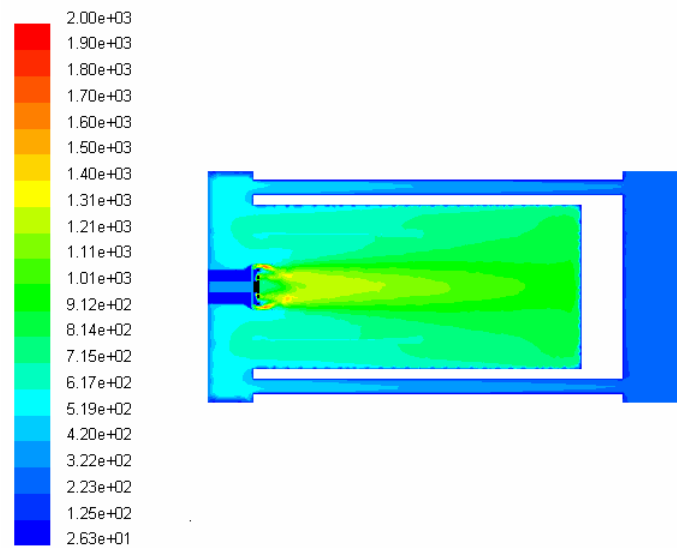
Şekil 5.13: Modelde elde edilen ocak içindeki sıcaklık konturları (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, Kovansız durum, HFK=1.26)(Aydın, 2005).



Şekil 5.14: Modelde elde edilen ocak içindeki sıcaklık konturları (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, Kovansız durum, HFK=1.02) (Aydın, 2005)

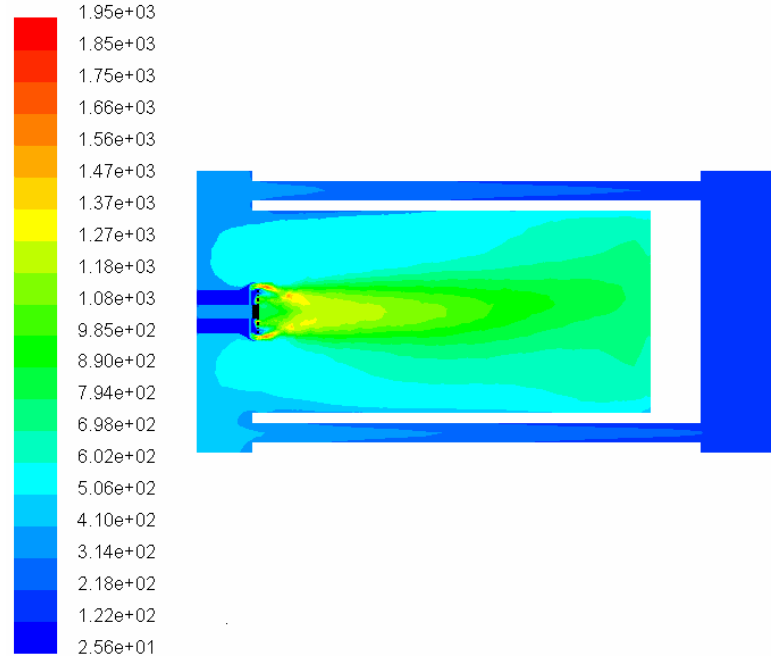
Şekil 5.13 ve Şekil 5.14'te kovansız durumda hava fazlalık katsayısının değişiminin kazandaki sıcaklık dağılımına etkisi verilmektedir. Hava fazlalık katsayısının artmasıyla kazandaki en yüksek sıcaklık da artmaktadır. Fakat en yüksek sıcaklık değerlerinin olduğu bölge küçülmektedir. Modelde maksimum sıcaklık yakıt çıkışında yanmanın gerçekleştiği çok küçük bir bölgede oluşmaktadır. Bu konturlar Özer Aydın tarafından 2005 yılında yapılan çalışmadan alınmıştır. Adı geçen çalışmada yanma odası kovan kullanımı ile ikiye ayrılarak ısıtım yapan yüzeyler arttırılmıştır. Bu teze, aynı tip deney düzeneğiyle yapılan kovansız ve kovanlı deneylere ait sonuçlar referans oluşturmaktadır. İlave dolgu malzemelerinin etkisini görmek açısından kanatsız ve kovansız durumlara ihtiyaç duyulmaktadır.

Isıtım yüzeylerinin kazan sıcaklığına etkisini incelemek amacıyla oluşturulmuş kovanlı modele ait sıcaklık konturları Şekil 5.14'te gösterildiği gibidir. Yapılan çalışmada kovanlar ocak ağzından 0 cm uzaklığa yerleştirilmiştir. Kovanın bu konumda kullanılmasını gösteren sıcaklık konturlarını Şekil 5.14'te görmek mümkündür. Modelde ilave ısıtım yüzeyleri kullanımıyla ocak sıcaklıklarının düştüğü görülmektedir. Kovan kullanılmasıyla alev daha kontrollü oluşmuş ve ortalama ocak sıcaklığı düşürülmüştür. Aynı zamanda maksimum sıcaklığın olduğu bölgelerde de azalma olmuştur.

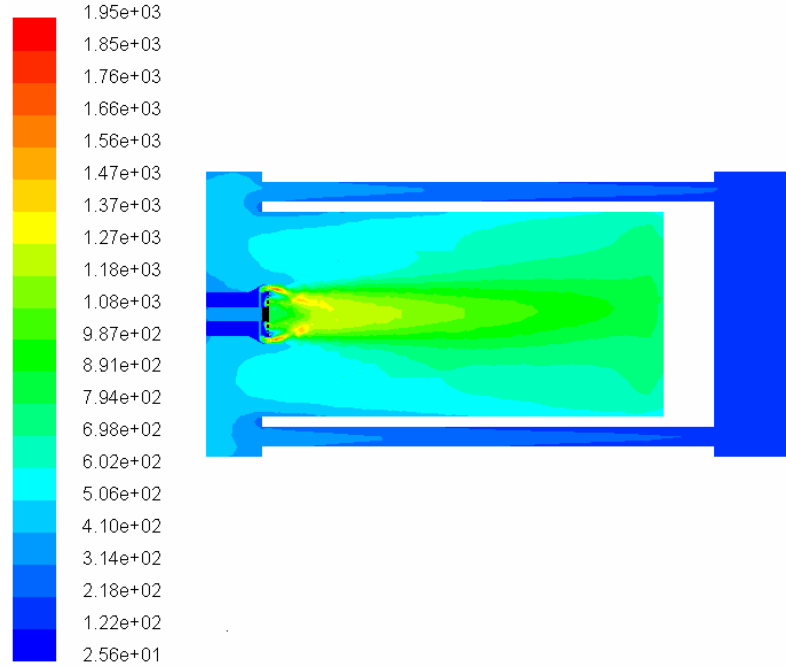


Şekil 5.15: Modelde elde edilen ocak içindeki sıcaklık konturları.(Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, 25*40 kovanı, HFK=1.26) (Aydın, 2005)

Literatürde yapılan çalışmalarda, ocak içerisine ısınımı arttıran dolgu malzemesi konulmuş; bunların kazan verimine, emisyonlara ve ocak sıcaklığına olan etkileri saptanmıştır. Bu çalışmada kovan adı verilen dolgu maddelerinin yanı sıra kanatlar kullanılmıştır. Böylece kovanın ikiye ayırdığı yanma odasının ocak cidarına yakın bölgesi de parçalara bölünerek katı yüzey ısınımı yönünden bir artış beklenmiştir. Şekil 5.16 ve Şekil 5.17’de 790 mm boyundaki ocak için 58 kW kapasitede 0 cm konumunda 25*40 kovanı ile 2 ve 6 kanat kullanılması durumundaki sıcaklık konturlarını görmek mümkündür. Kanat sayısının artmasıyla sıcaklık değerlerinde kovansız ve kanatsız durumlara göre sıcaklık ve emisyon yönünden azalma olmaktadır. Bu sıcaklık düşüşleri 9×10^2 mertebesindeki sıcaklıklarda daha hissedilir seviyede gerçekleşmektedir. Aynı zamanda 2 kanatlı model için kesit iki kanattan da geçtiğinden simetrik bir dağılım görmek mümkündür. 6 kanatlı modelde alınan kesit sadece bir kanattan geçtiği için simetri bakımından uyumsuzluk yanıltıcı olmamalıdır. Kazan ısıl gücü, 550 mm boyundaki kazan için standartta belirlenen değer olan 58 kW olarak sağlanmıştır. 790 mm boyundaki ocakta bu ısıl gücün kullanılması, sıcaklık değerlerini düşürmektedir.

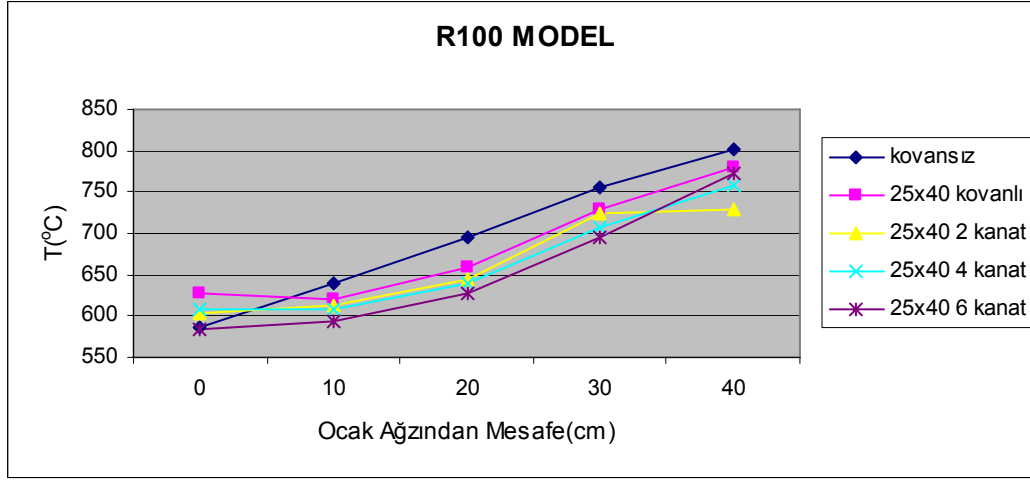


Şekil 5.16: 6 kanatlı kovan için model sıcaklık konturları.(Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 58 kW, 25*40 kovanı, HFK=1.26).

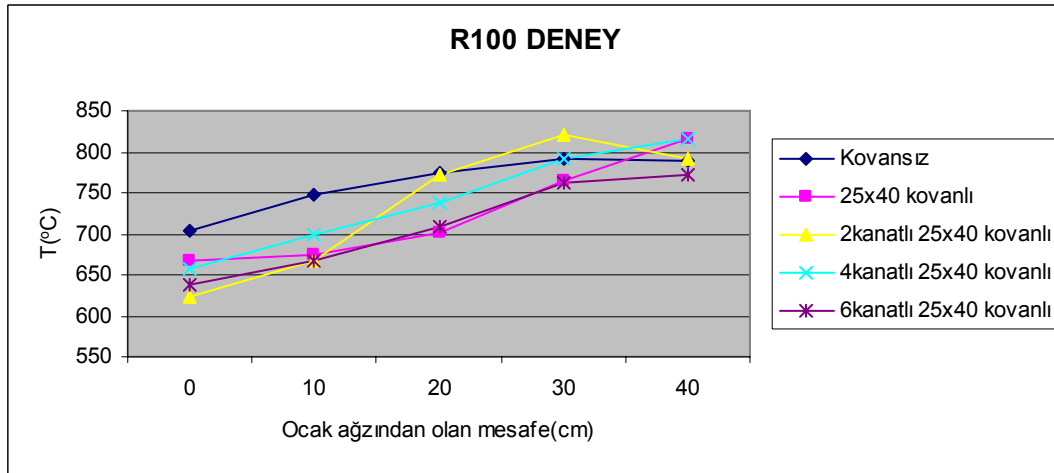


Şekil 5.17. 2 kanatlı kovan için model sıcaklık konturları.(Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 58 kW, 25*40 kovanı, HFK=1.26).

Modelin yorumlamasına faydalı olması açısından R100 ve R175 adında iki ölçüm hattı tanımlanmıştır. R100, simetri ekseninden 10 cm uzaklıkta (alevin ilerlediği konumda), R175 ise 17.5 cm uzaklıktaki (duman geri dönüşünün olduğu konumda) ölçüm çizgisini ifade etmektedir. Farklı bir ifadeyle, bu ölçüm hatları, kovan içi ve dışında ölçme yapalabilecek şekilde konumlanmıştır. Şekil 5.18 ve Şekil 5.19’da kovansız, kovanlı ile 2, 4 ve 6 kanatlı 25x40 kovanlı durum R100 ölçüm hattı için verilmiştir. Bu ölçüm hattı için kovan çapı ve boyunun (25x40) bu değerinde brülörden uzaklaştıkça kovan etkisini göstermekte ve sıcaklığın yükselme eğiliminin azalmasına yardımcı olmaktadır. Deneylerde modellere nazaran daha yüksek sıcaklık değerleri görülmüştür.

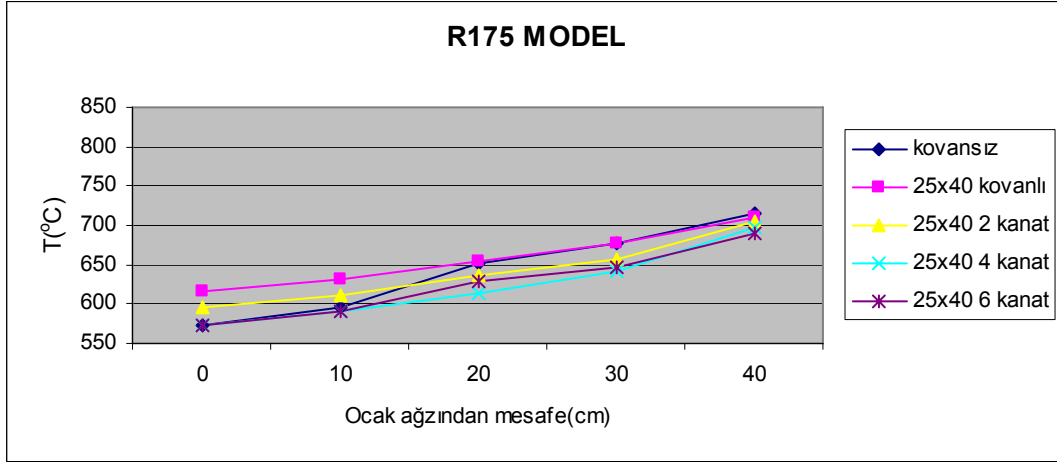


Şekil 5.18: R100 ölçüm çizgisi üzerinde sıcaklıklar için kovansız, 25x40 kovanlı, 2 ve 6 kanatlı 25x40 kovanlı durumların model sonuçlarının karşılaştırılması (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, HFK=1.26)

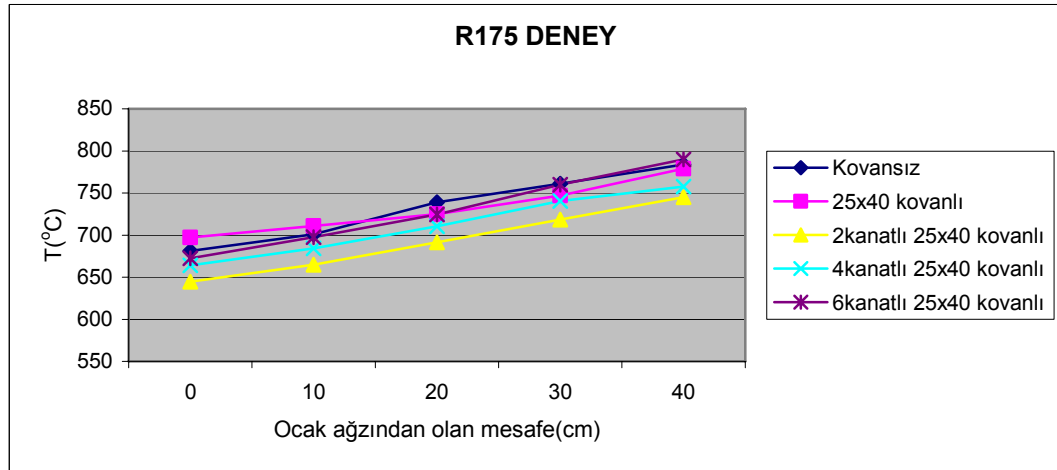


Şekil 5.19: R100 ölçüm çizgisi üzerinde sıcaklıklar için kovansız, 25x40 kovanlı, 2 ve 6 kanatlı 25x40 kovanlı durumların deney sonuçlarının karşılaştırılması (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, HFK=1.26)

R175 ölçüm hattı için deney ve model sonuçları Şekil 5.20 ve 5.21’de görülmektedir. Kanatsız 25x40 kovan kullanılması ile yapılan ve daha önce literatürde(Aydın, 2005) verilen sayısal modelleme ve deneysel çalışmadaki sıcaklık değerleri kovansız duruma göre daha yüksek olarak saptanmıştır. Bu tez çalışmasında yapılan deneysel ve nümerik çalışmada, 25x40 kovanda ilave ısıtım yüzeyi olarak kanat kullanılması katı yüzey ısıtımını arttırmış, alev geri dönüşünde sıcaklığın düşmesini sağlamıştır.



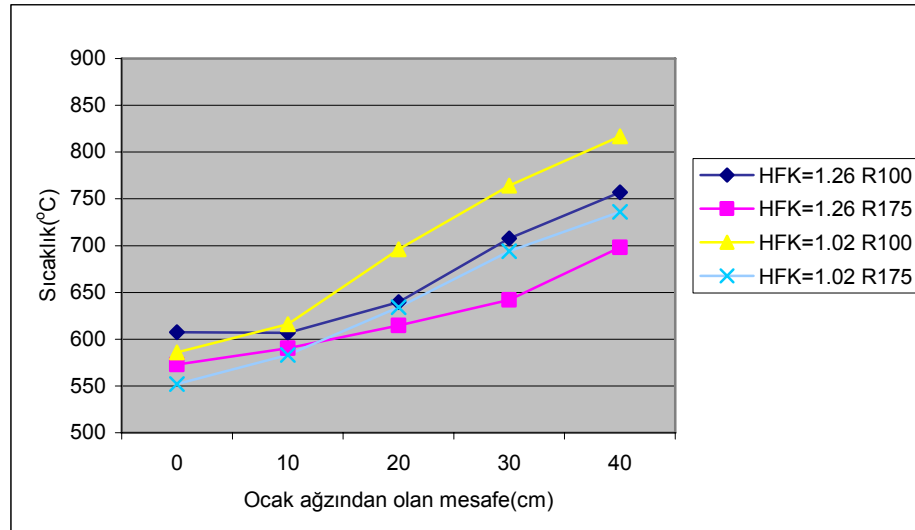
Şekil 5.20: R175 ölçüm çizgisi üzerinde sıcaklıklar için kovansız, 25x40 kovanlı, 2 ve 6 kanatlı 25x40 kovanlı durumların model sonuçlarının karşılaştırılması (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, HFK=1.26)



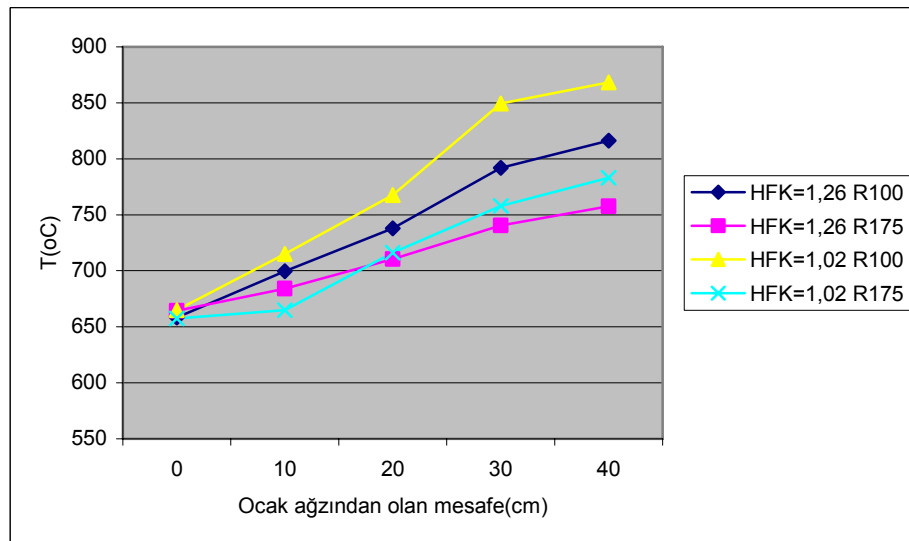
Şekil 5.21: R175 ölçüm çizgisi üzerinde sıcaklıklar için kovansız, 25x40 kovanlı, 2 ve 6 kanatlı 25x40 kovanlı durumların deney sonuçlarının karşılaştırılması (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, HFK=1.26)

Şekil 5.22 ve 5.23'te ise 4 kanatlı ve 25x40 kovanlı durumda ve belirtilen şartlarda R100 ve R175 ölçüm hatları boyunca hava fazlalık katsayısının etkisini deneysel ve sayısal modelleme verileri ile görmek mümkündür. Hava fazlalık katsayısı azaldığında R100 ve R175 ölçüm hattında sıcaklıklarda yükselme gerçekleştiği görülmektedir. Sıcaklık değerleri ocak ağızında düşük değerde iken, ocak boyunca 40 cm'lik hat boyunca artmaktadır. Aynı zamanda R175 ölçüm hattı üzerinde 0 konumu ile 40 cm konumu arasındaki sıcaklık değişimi R100 ölçüm hattına göre daha düşüktür. Bunun nedeni R100 ölçüm hattının alev görmesidir. R175 ölçüm hattı ile alev arasında ise

kovan olduğundan ocak boyunca sıcaklık değişiminin daha az gerçekleştiği görülebilmektedir. Aynı zamanda model ve deney sonuçlarının birbiriyle merteye ve eğrilerin karakteri bakımından birbiriyle uyumlu olduğu Şekil 5.22 ve 5.23 yardımıyla görülmektedir. .

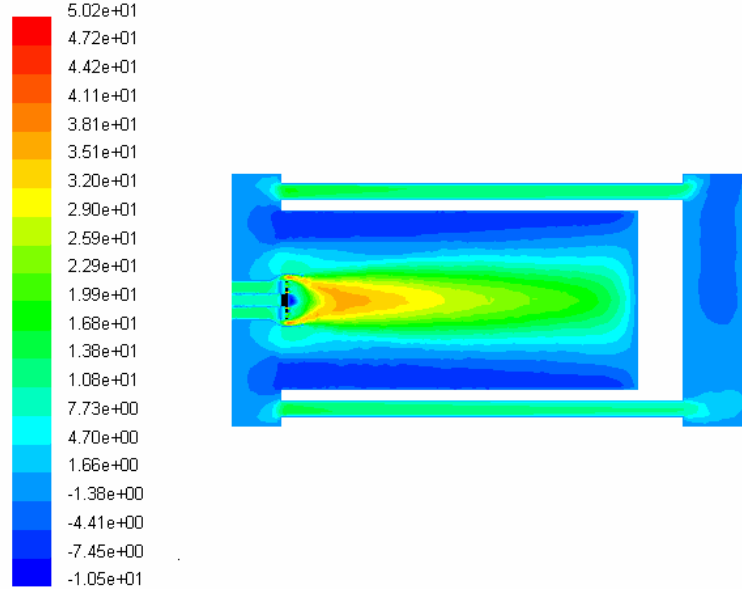


Şekil 5.22: R100 ve R175 ölçüm çizgileri üzerinde sıcaklıklar için farklı hava fazlalık katsayısı değerlerinde model sonuçlarının karşılaştırılması. (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, 25x40 kovanı, 4 kanatlı model)

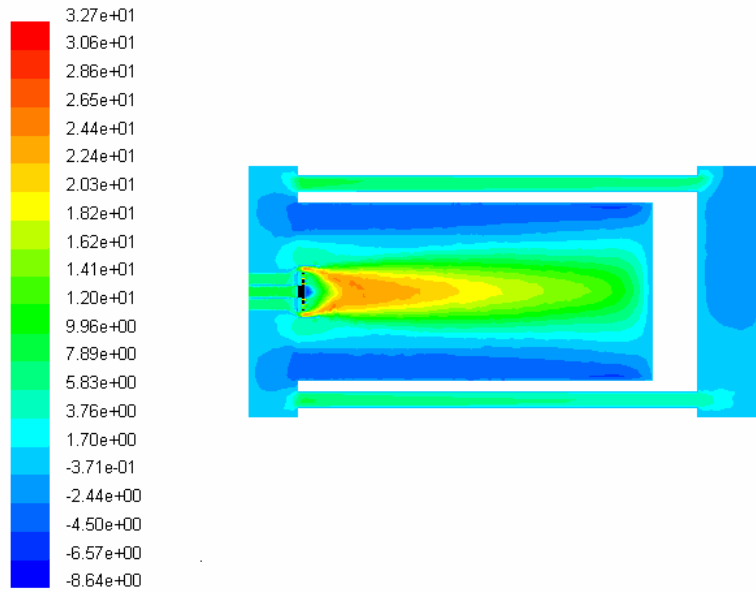


Şekil 5.23: R100 ve R175 ölçüm çizgileri üzerinde sıcaklıklar için farklı hava fazlalık katsayısı değerlerinde deney sonuçlarının karşılaştırılması. (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, 25x40 kovanı, 4 kanatlı model)

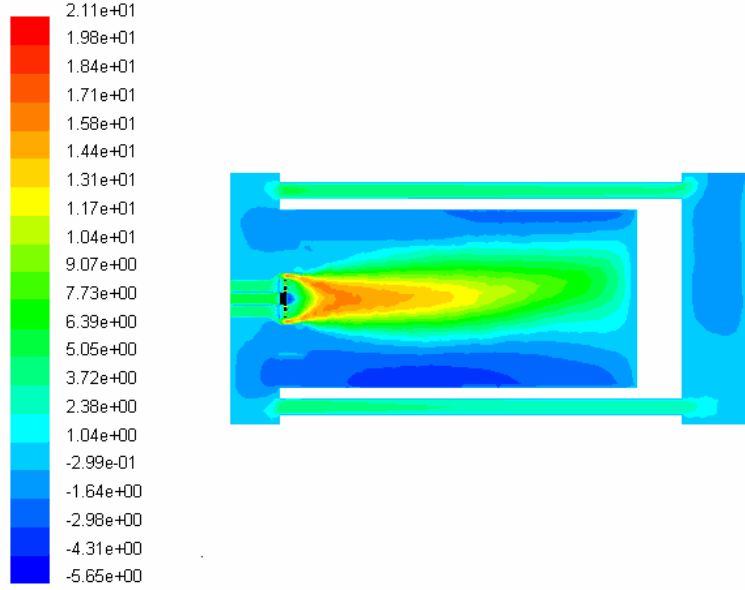
5.2.2 Hız Değerlerinin Karşılaştırılması



Şekil 5.24: 6 kanatlı modelde elde edilen ocak içindeki x yönü hız konturları.(Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, 25*40 kovanı, HFK=1.26, A durumu)



Şekil 5.25: 6 kanatlı modelde elde edilen ocak içindeki x yönü hız konturları.(Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 87 kW, 25*40 kovanı, HFK=1.26, B durumu)



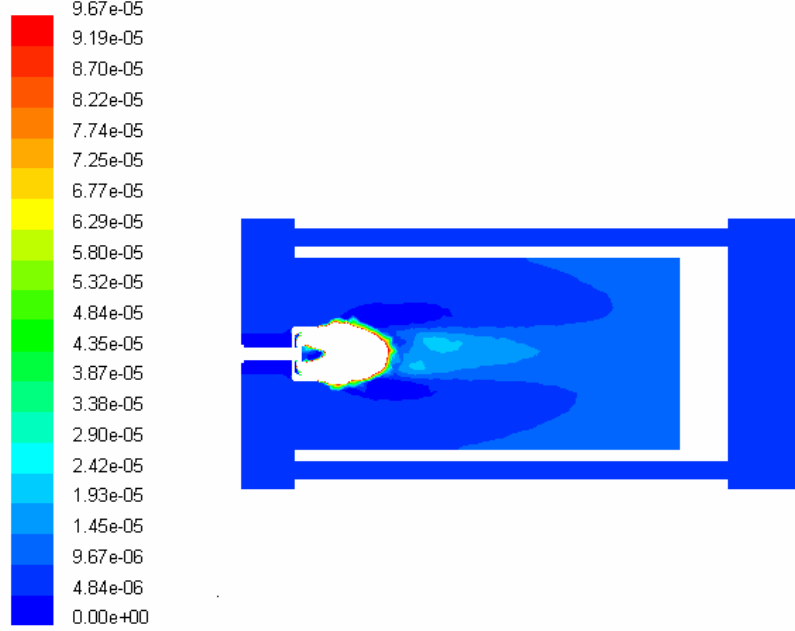
Şekil 5.26: 6 kanatlı modelde elde edilen ocak içindeki x yönü hız konturları.(Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 58 kW, 25*40 kovanı, HFK=1.26, C durumu).

Şekil 5.24 , Şekil 5.25 ve Şekil 5.26’te sırasıyla A, B, C olarak adlandırılan durumlar görülmektedir. A, B, C hava fazlalık katsayısının 1.26 olduğu; 6 kanatlı ve 25x40 kovanlı dolgu malzemesinin kullanıldığı; 116, 87 ve 58 kW kazan ısıt kapasitelerindeki durumdaki ocak eksenine paralel hız bileşenlerini göstermektedir. Yakıt ve hava giriş hızları için A, B, C durumlarında girilen değerler Tablo 5.2’de verilmiştir. Kazan ısıt kapasitesine göre belirlenen debide doğal gaz ayarlanır. Daha sonra bu ısıt kapasite hava fazlalık katsayısı hava debisini ayarlamakla mümkün olur. Girilen yakıt ve hava debisi değerleri alevin ilerleme hızını, dolayısıyla sıcaklık dağılımının meydana gelmesini etkiler. En yüksek hız değeri hava ve yakıtın karıştığı bölgededir. Hız konturları yardımıyla duman gazlarının dönüşü görmek mümkündür.

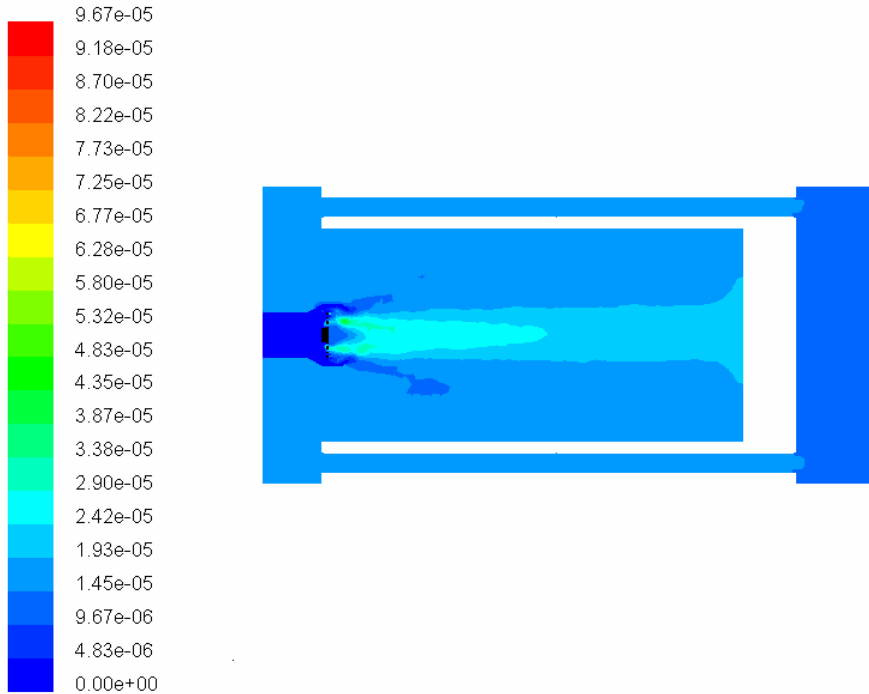
Tablo 5.2: 3 durum için hava ve yakıt giriş hızları

Durum	A	B	C
<i>Yakıt giriş hızı (m/s)</i>	9.42	8.05	5.406
<i>Hava giriş hızı (m/s)</i>	11.89	6.465	4.306

5.2.3 Azotoksit Emisyon Değerlerinin Karşılaştırılması

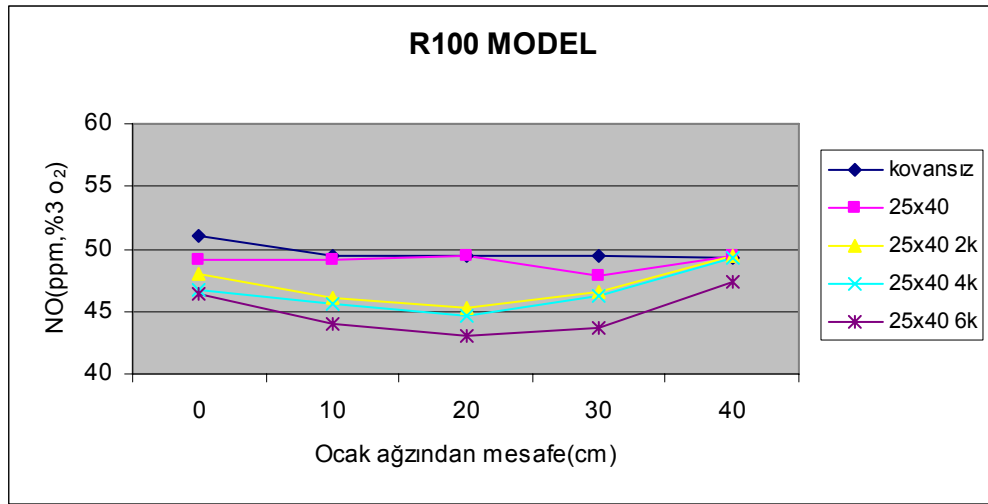


Şekil 5.27: 790 mm ocak boyu 116 kW kazan ısıl kapasitesinde kovansız durum için elde edilen NO mol kesri konturları (HFK=1.26)(Aydın, 2005)

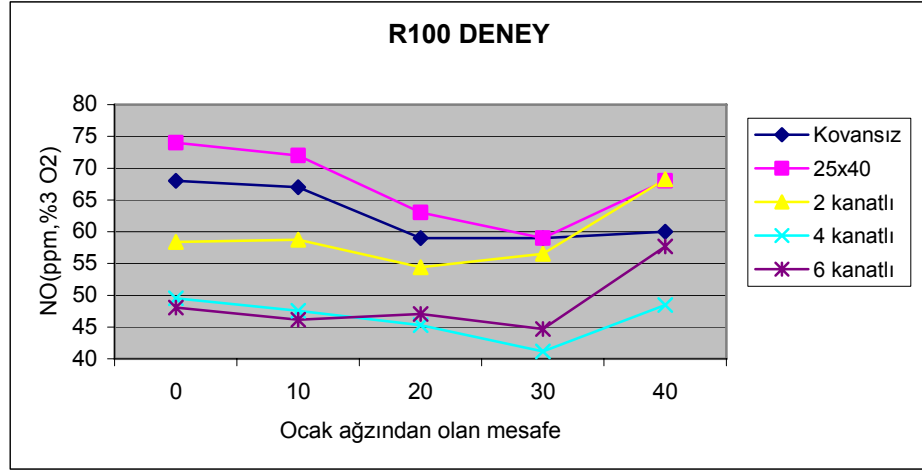


Şekil 5.28: 790 mm ocak boyu 116 kW kazan ısıl kapasitesinde 25x40 kovanlı ve 4 kanatlı durum için elde edilen NO mol kesri konturları (HFK=1.26).

Şekil 5.27 ile Şekil 5.28’de sırasıyla kovansız ile 4 kanatlı, 25x40 kovanlı duruma ait NO mol kesri konturları verilmiştir. Kovansız durumda NO mol kesrinin büyük bir bölgede ortalama bir sabit değerde olduğu, brülörün yakınındaki bölgede ise daha yüksek değerler aldığı görülmektedir. Kovanlı ve 4 kanatlı modelde ise, NO miktarıyla alevin ilişkisi açıkça görülmektedir. Alev boyunca NO mol miktarında bir artış söz konusudur. Ayrıca ocak içerisinde sıcaklıkların daha yüksek olmasından dolayı, daha yüksek NO değerlerine rastlanmaktadır. Kovan ve kanatların yanma odasını parçalara ayırmasıyla katı yüzey ışıınımı artmıştır. Bu artış, yanma sonu gazlarının ortalama sıcaklığının düşmesine sebebiyet verir. ocak sıcaklığının yüksek olduğu durumlarda yakıttaki azot kimyasal reaksiyona girerek NOx oluşumuna neden olmaktadır. Sıcaklık düşüşüyle beraber bu reaksiyonun gerçekleşmesinin önüne geçilerek NOx miktarında azalma kaydedilmiştir.

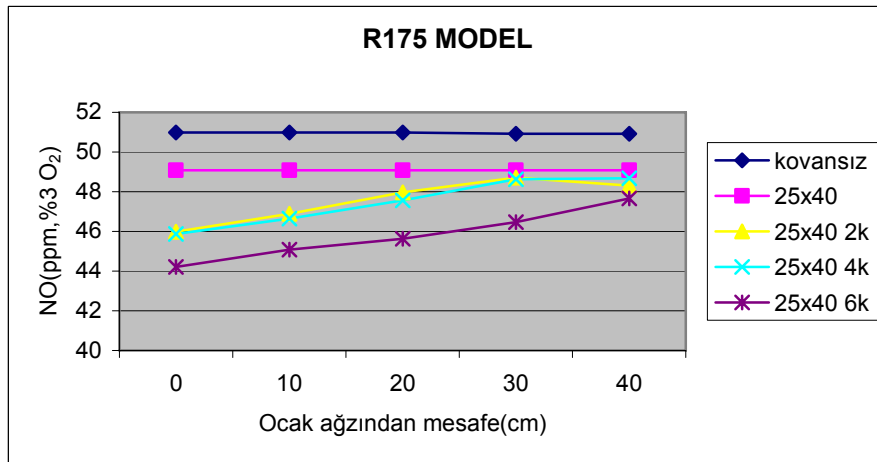


Şekil 5.29: R100 ölçüm hattı üzerinde NO emisyonu için 2, 4, 6 kanatlı model sonuçlarının karşılaştırılması (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, 25x40 kovanlı durum, HFK=1.26).

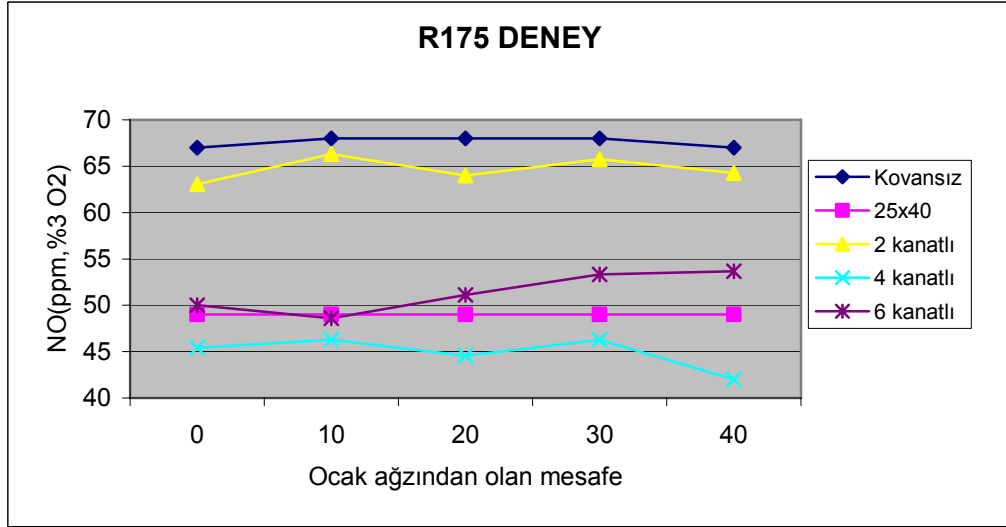


Şekil 5.30: R100 ölçüm hattı üzerinde NO emisyonu için 2, 4, 6 kanatlı deney sonuçlarının karşılaştırılması (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, 25x40 kovanlı durum, HFK=1.26).

Şekil 5.29 ve Şekil 5.30’da model ve deneysel çalışmadaki kovansız, 25x40 kovanlı ve farklı sayılarda kanatlı durumlar için R100 ölçüm hattı boyunca azot oksit emisyonunun değişimleri verilmektedir. Aleve yakın olan R100 ölçüm çizgisinde, NO değerleri kovansız durumda ocak ağzına yakın bölgelerde yüksek iken; ocak boyunca ilerledikçe NO değerinde bir azalma ve bir değerde sabitlenme gerçekleşmektedir. Modelleme ve deneysel çalışmada ulaşılan azotoksit miktarlarını gösteren eğriler karakteristik olarak benzerlik göstermektedir. Modelde daha mükemmel bir yanma gerçekleştiğinden dolayı model sonuçlarındaki azot oksit emisyonları daha düşük mertebededir.



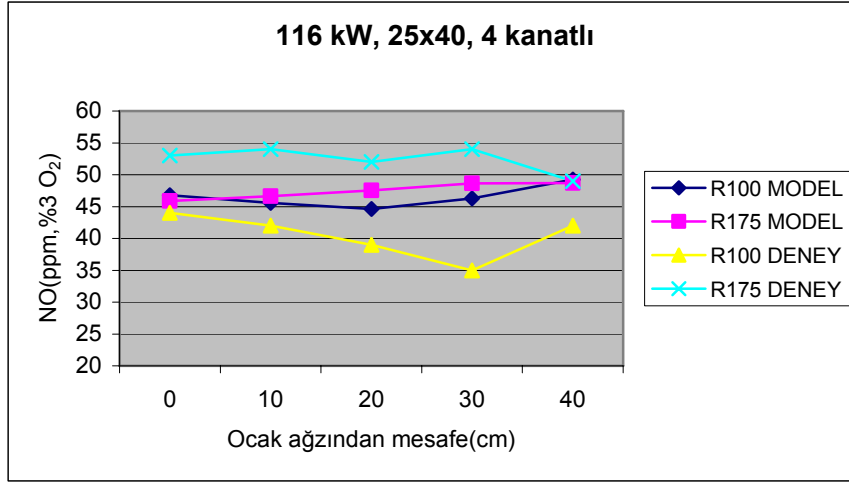
Şekil 5.31: R175 ölçüm hattı üzerinde NO emisyonu için 2, 4, 6 kanatlı model sonuçlarının karşılaştırılması (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, 25x40 kovanlı durum, HFK=1.26).



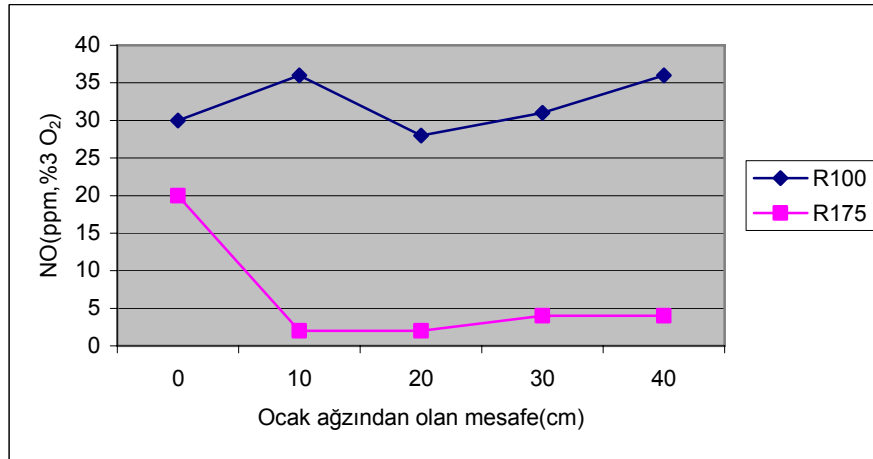
Şekil 5.32: R175 ölçüm hattı üzerinde NO emisyonu için 2, 4, 6 kanatlı deney sonuçlarının karşılaştırılması (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, 25x40 kovanlı durum, HFK=1.26).

Şekil 5.31 ve Şekil 5.32’de model ve deneysel çalışmadaki kovansız, 25x40 kovanlı ve farklı sayılarda kanatlı durumlar için R175 ölçüm hattı boyunca azot oksit emisyonunun değişimleri verilmektedir. Kanat sayısı arttıkça ocaktaki alev geri dönüşü daha fazla bölgeye ayrılmaktadır. Katı yüzey ısınımının artmasından dolayı kovan içi ve dışındaki ölçüm hatlarındaki azotoksit değerleri azalma görülmektedir.

Yanma sonucu oluşan azotoksit emisyonları, alev sıcaklığındaki artışa paralel olarak gerçekleşmektedir. Özellikle yüksek sıcaklıklarda (1300°C ve üzerinde) bu artış daha fazla olmaktadır. R100 hattı kazanda yanmış gazların geri dönüşünün gerçekleştiği yerdir. Bundan dolayı bu noktalardaki sıcaklıklar düşmektedir. Bu noktalardaki sıcaklığın düşük olması azotoksit emisyonlarının azalmasına sebebiyet vermektedir.



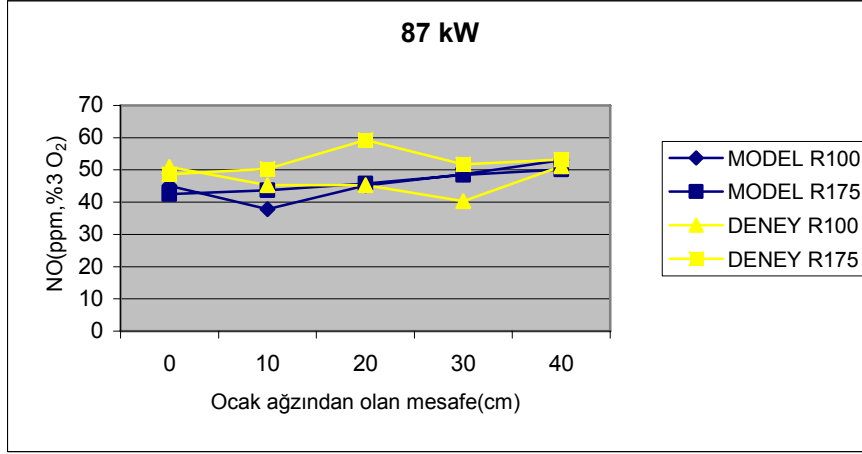
Şekil 5.33: R100 ve R175 ölçüm çizgileri üzerinde NO emisyonu deney model sonuçlarının karşılaştırılması (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, 25x40 kovanlı ve 4 kanatlı durum, HFK=1.26).



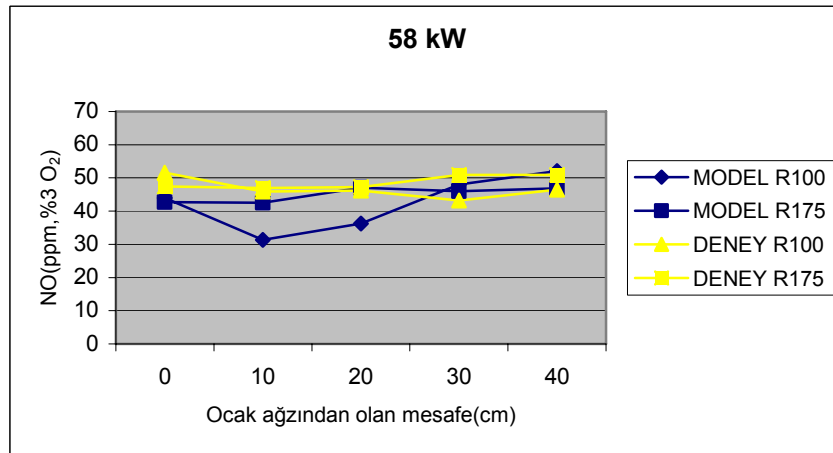
Şekil 5.34: R100 ve R175 ölçüm çizgileri üzerinde NO emisyonu için hava fazlalık katsayısının 1.02 olduğu durumdaki deney sonuçları (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, 25x40 kovanlı ve 4 kanatlı durum).

Şekil 5.33'te farklı hava fazlalık katsayısının 1.26 olduğu durumdaki NO emisyonu dağılımı R100 ve R175 ölçüm hattı boyunca verilmiştir. Model sonuçlarında hava fazlalık katsayısı arttığında sıcaklık düşmekte, bu değişim de NO değerinde azalmaya neden olmaktadır. Şekil 5.22 ve 5.23'teki sıcaklık konturlarıyla NO mol kesri konturları karşılaştırıldığında sıcaklık-azotoksit emisyonu ilişkisi görülmektedir. Sıcaklıkla NO emisyonundaki azalmanın sebebi düşük hava fazlalık katsayısı sonucu azot oksit oluşumunda etkili olan azot ve oksijen miktarlarının azalmasıdır. Farklı kazan ısıt kapasitelerinde yapılan modellemelerde de benzer sonuçlar elde edilmiştir. Hava

fazlalık katsayısının 1.26 olduğunda, hava fazlalık katsayısının 1.02 değerine kıyasla ocak boyunca R100 ölçüm hattında 150°C azalma görülürken, R175 ölçüm hattında bu azalış 125°C mertebesinde. Ayrıca R100 ölçüm hattında duman gazlarının geri dönüşünden dolayı belirli bir bölgede sıcaklık düşüşü gerçekleşmektedir. Hava fazlalık katsayısının 1.26 olduğu durumdaki bu sıcaklık düşüşünün etkisiyle NO emisyonları kovan ortalarında 44 ppm seviyelerine gerilemiştir. Şekil 5.34'te ise 116 kW kazan ısıtım kapasitesinde hava fazlalık katsayısının 1.02 olduğu durumda 25x40 kovanlı ve 4 kanatlı duruma ait NO emisyonu değerleri görülmektedir.



Şekil 5.35: R100 ve R175 ölçüm çizgileri üzerinde NO emisyonu için model ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 87 kW, 25x40 kovanlı ve 6 kanatlı durum, HFK=1.26).

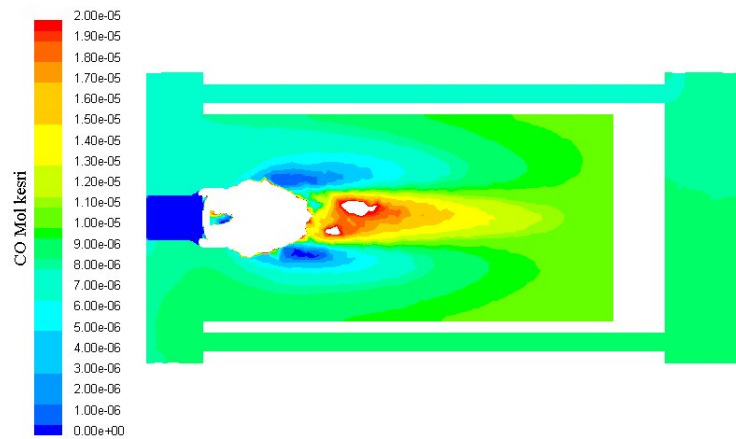


Şekil 5.36: R100 ve R175 ölçüm çizgileri üzerinde NO emisyonu için model ve deney sonuçlarının karşılaştırılması (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 58 kW, 25x40 kovanlı ve 6 kanatlı durum, HFK=1,26).

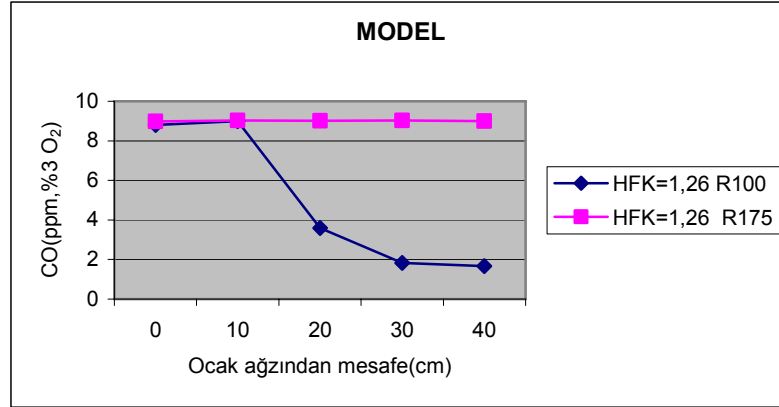
Şekil 5.35 ve 5.36’da 790 mm ocak boyunda, 1.26 hava fazlalık katsayısı değerinde, 25x40 kovanlı ve 6 kanatlı durumda kazan ısıl kapasitesinin değiştirilmesinin NO emisyonu üzerine etkisi görülmektedir. Aynı ocak boyunda (790 mm) kazan ısıl kapasitesinin 87 kW’tan 58 kW’a düşmesiyle ocak içerisindeki sıcaklık ve dolayısıyla azot oksit değerleri düşmektedir. Aleve yakın R100 ölçüm hattında değişim daha belirgin gerçekleşirken; R175 ölçüm hattında ocak boyunca 2-3 ppm civarında bir değişim saptanmıştır.

5.2.4 Karbonmonoksit Emisyonu Değerlerinin Karşılaştırması

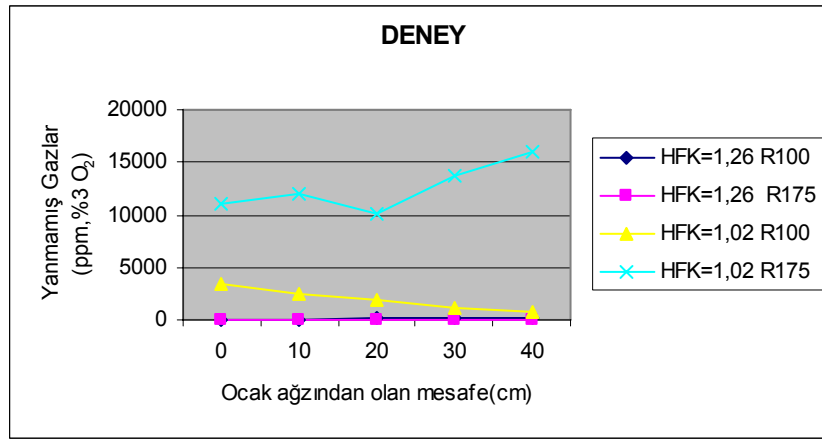
790 mm ocak boyuna sahip, hava fazlalık katsayısının 1.26 ve kazan ısıl kapasitesinin 116 kW olduğu durumdaki CO mol kesirleri Şekil 5.37’de görülmektedir. Bu şekilde CO mol kesri değeri 20 ppm’de sınırlı tutularak buradaki dağılımın daha iyi gözlemlenebilmesi sağlanmıştır. Hava ve yakıtın birleşerek alevi oluşturduğu brülör ağzında yüksek CO mol kesri değerleri görülmektedir. Alevin uç kısmına doğru bu değerler düşmekte ve büyük bir alanda ortalama olarak 8-10 ppm’lik bir aralıkta değerler saptanmaktadır.



Şekil 5.37: 790 mm ocak boyu 116 kW kazan ısıl kapasitesinde kovansız durum için elde edilen CO mol kesri konturları (HFK=1.26) (Aydın, 2005)

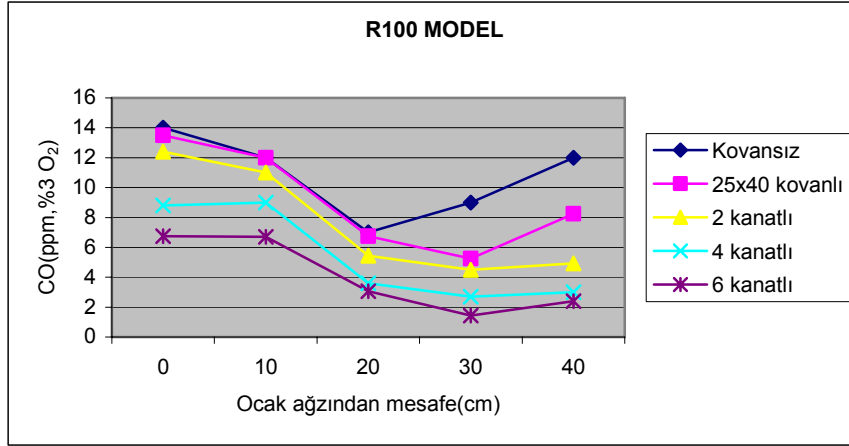


Şekil 5.38: R100 ve R175 ölçüm çizgileri üzerinde CO emisyonu için hava fazlalık katsayısının 1.26 olduğu durumdaki model sonuçları (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, 4 kanatlı 25x40 kovanlı).

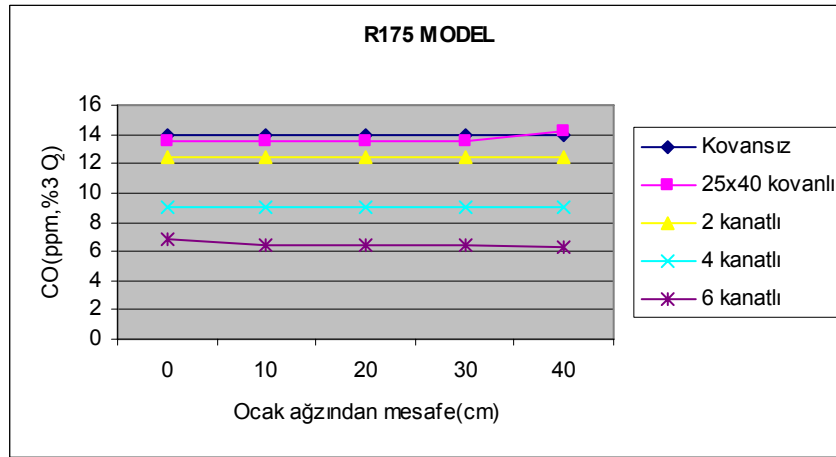


Şekil 5.39: R100 ve R175 ölçüm çizgileri üzerinde CO emisyonu için hava fazlalık katsayısının 1.02 ve 1.26 durumlarındaki deney sonuçlarının karşılaştırılması (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, 4 kanatlı 25x40 kovanlı).

Şekil 5.39’da 790 mm ocak boyunda, 116 kW kazan ısıtma kapasitede, 4 kanatlı ve 25x40 kovanlı durum için deneylerde hava fazlalık katsayısının yanmamış gaz emisyonlarına etkisi incelenmektedir. Şekil 5.38’de ise aynı şartlarda hava fazlalık katsayısının 1.26 olduğu durumdaki modellemelerde bulunan CO emisyonu değerlerini görmek mümkündür. R100 ölçüm çizgisindeki yanmamış gaz emisyonları R175’deki yanmamış gaz emisyonlarından daha düşüktür. Bu durumu deneyde hava fazlalık katsayısının 1.02 olduğu durumda görmek mümkündür.



Şekil 5.40: R100 ölçüm hattı üzerindeki çeşitli konstrüktif durumlardaki CO mol kesri değerleri (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, HFK=1,26).

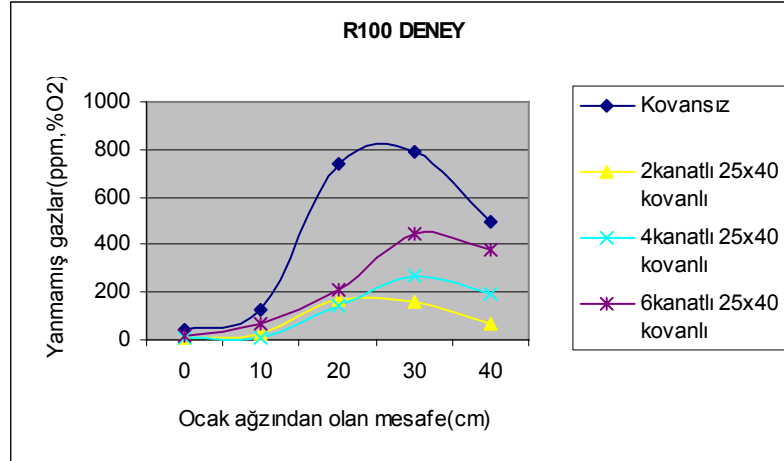


Şekil 5.41: R175 ölçüm hattı üzerindeki çeşitli konstrüktif durumlardaki CO mol kesri değerleri (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, HFK=1,26).

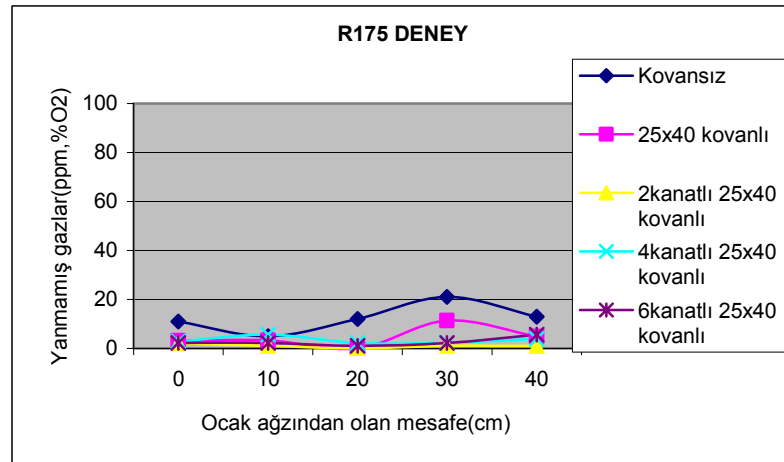
Şekil 5.40 ve Şekil 5.41’de R100 ve R175 ölçüm hatlarındaki CO mol kesrinin ppm cinsinden değişimi verilmektedir. R100 kovan içi ölçüm hattında alev başlangıcında yüksek değerde olan CO, ocak boyunca düşmektedir. Kanat sayısı arttıkça CO emisyonu değerlerinde 1-2 ppm’lik düşüşler meydana gelmektedir.

Deneylerde emisyon ölçümleri için kullanılan gaz analiz cihazı CO emisyonu ölçümünde diğer yanmamış gazları da dahil etmektedir. Bundan dolayı deney sonuçlarında “yanmamış gazlar” içerisinde CO emisyonu değerleri de mevcuttur. Şekil 5.42 ve 5.43’te 116 kW ısı gücü, hava fazlalık katsayısının 1.26 olduğu durumda R100 ve R175 ölçüm hatlarındaki yanmamış gazların ppm cinsinden değeri görülmektedir.

İlave ısıtım yüzeylerinin kullanılmasıyla yanmamış gazların mol kesri değerlerinde bir azalma saptanmaktadır.



Şekil 5.42: R100 ölçüm hattı üzerindeki çeşitli konstrüktif durumlardaki yanmamış gazlara ait mol kesri değerleri (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, HFK=1,26).

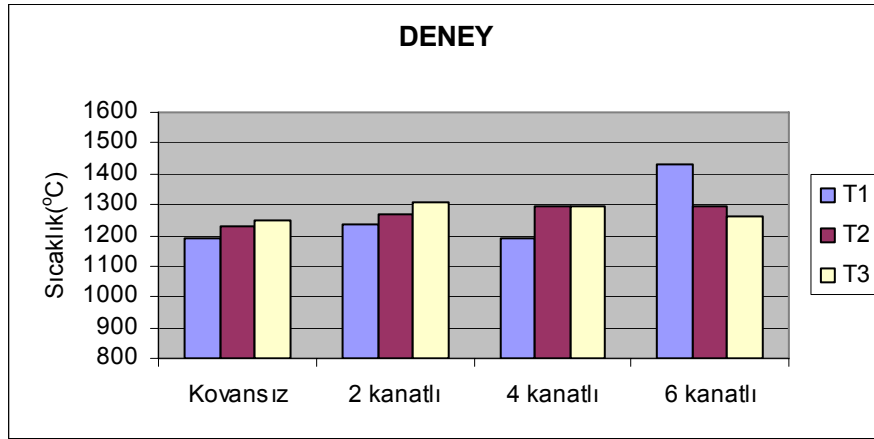


Şekil 5.43: R175 ölçüm hattı üzerindeki çeşitli konstrüktif durumlardaki yanmamış gazlara ait mol kesri değerleri (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, HFK=1,26).

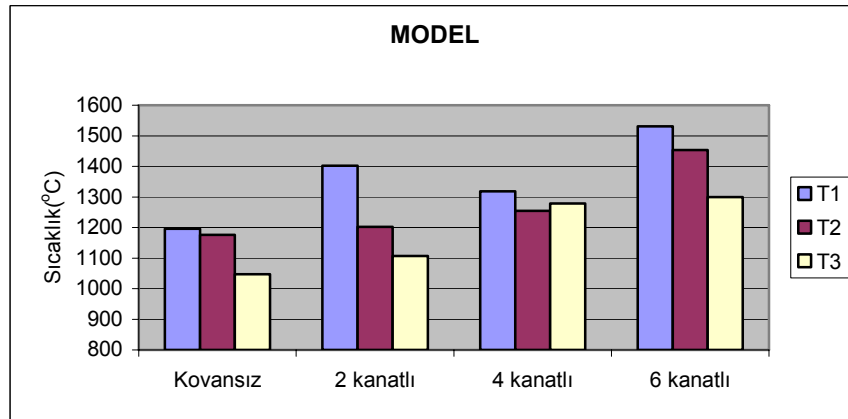
5.2.5 Alev Sıcaklığı Değerlerinin Karşılaştırılması

Alev sıcaklıklarının karşılaştırılması amacıyla alevin olduğu ocak simetri ekseninde T1, T2 ve T3 olarak adlandırılan üç nokta tanımlanmıştır. Bu noktaların ocak ağzından uzaklıkları sırasıyla 130, 365 ve 570 mm'dir. Şekil 5.44 ve 5.45'de deney ve modele ait alev sıcaklıkları dağılımlarını görmek mümkündür. Model ve deney sonuçları

karşılaştırıldığında kovansız durum hariç modelde T1 sıcaklıklarının daha yüksek mertebelerde olduğu görülmektedir. Deneysel çalışmada 6 kanatlı durum hariç alevin ucuna doğru sıcaklıklar yükselmektedir. Nümerik sonuçlarda ise alev ucuna doğru sıcaklık düşüşünün olduğu söylenebilmektedir. Alev sıcaklıklarının dağılımlarındaki modelleme ve deneylerdeki bazı farklılıklar, alev oluşumunun modellemede ideale yakın olmasına karşın deneylerde bunun sağlanamamasından kaynaklanmaktadır.



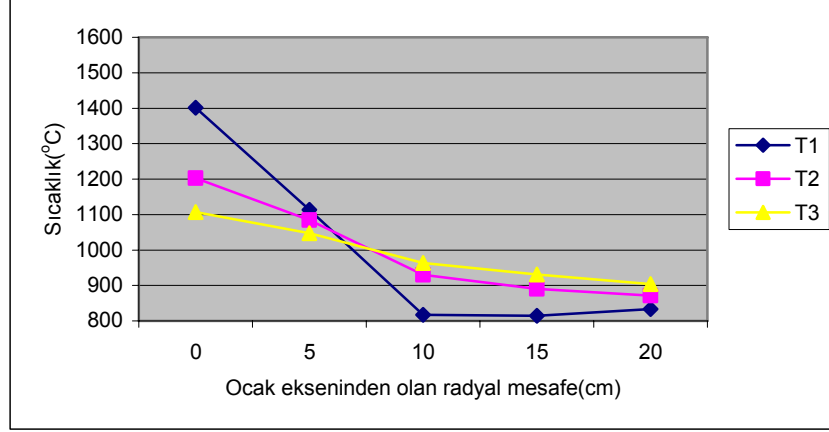
Şekil 5.44: Deneylerde ölçülen alev sıcaklığı değerleri (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, HFK=1,26, 25x40 kovanlı).



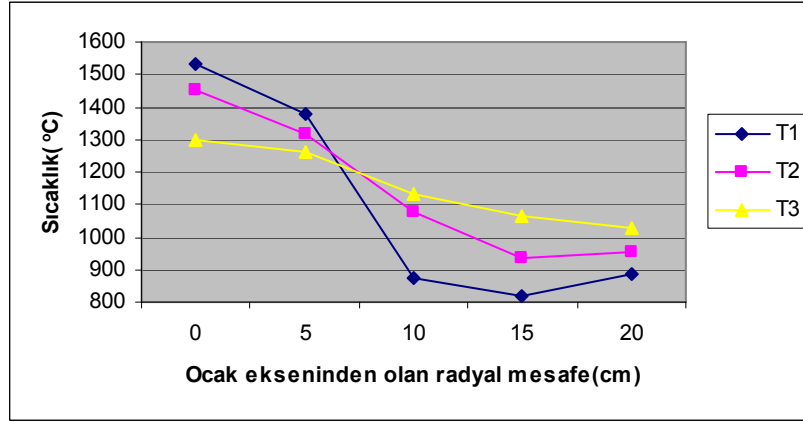
Şekil 5.45: Modelde bulunan alev sıcaklığı değerleri (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, HFK=1,26, 25x40 kovanlı).

Şekil 5.46 ve 5.47’te 116 kW ısı kapasitede hava fazlalık katsayısının 1.26 olduğu durumda 2 ve 6 kanatlı 25x40 kovanlı durumlar için T1, T2, T3 ölçüm noktalarında alınan radyal mesafede model taramalarını görmek mümkündür. Bu taramalarda ocak eksenini T1, T2, T3 noktalarına karşılık gelmektedir. Alevden uzaklaştıkça, sıcaklık değerlerinin düştüğü görülmektedir. Aynı zamanda 6 kanatlı durumda daha fazla sıcaklık düşüşü gerçekleşmektedir. Bunu da katı yüzey ısıtımının artmasına bağlamak

mümkündür. 6 kanatlı durumda maksimum sıcaklık 2 kanatlı duruma göre daha fazladır. Buna rağmen sıcaklık 2 kanatlı durum gibi 20 cm konumunda 800 °C değerine gerilemiştir.



Şekil 5.46: T1, T2 ve T3 noktasından ocak cidarına olan radyal mesafede model sıcaklık değişiminin karşılaştırılması (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, 25x40 kovanlı 2 kanatlı durum, HFK=1.26)



Şekil 5.47: T1, T2 ve T3 noktasından ocak cidarına olan radyal mesafede model sıcaklık değişiminin karşılaştırılması (Ocak boyu 790 mm, kazan kapasitesi 116 kW, 25x40 kovanlı 6 kanatlı durum, HFK=1.26)

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Doğal gaz ülkemizde ve dünyada yaygın kullanıma sahip bir yakıttır. Bu nedenle doğal gazın kullanım veriminin artırılması ve yanması sonucu çıkan emisyonların azaltılması önem teşkil etmektedir. Verimli kullanılan doğal gaz ülke ekonomisine katkıda bulunmaktadır. Aynı zamanda emisyon kontrolü yapılarak zararlı çevresel etkiler azaltmak mümkündür. Kirletici emisyonların azaltılmasıyla yaşam kalitesi yükselecektir.

Bu çalışmada ilave ısıtım yüzeylerinin (farklı ebatlarda kovanlar ve farklı sayılarda kanatlar) kazan verimine ve emisyonlara etkisi incelenmiştir. 116 kW kapasiteli TS EN 676 standardına uygun tasarlanmış kazanda; ocak boyu, kazan ısıtım kapasitesi, hava yakıt oranı, kovan boyutu ve kanat sayısı parametreler olacak şekilde, nümerik ve deneysel çalışma yapılarak karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Sayısal çalışma bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği programı olan FLUENT yardımıyla yapılmıştır.

Yapılan sayısal ve deneysel çalışmalar sonucunda, kovan ve kanat olarak adlandırılan ilave ısıtım yüzeylerinin alev ve alev geri dönüşünde ısı geçişini arttırdığı görülmektedir. Isı geçişinin artmasıyla beraber ocak içi ve baca sıcaklıkları düşmektedir. Kovansız durumlarda ısı geçişi büyük oranda gaz ısıtım ile olduğundan ocak sıcaklıkları yüksek olmaktadır. Bunun sonucunda yakma havasındaki azotun kimyasal reaksiyon sonucu NO_x oluşmaktadır. Kovan kullanılmasıyla duman gazları tekrar alev bölgesine yönlendirilerek, bu bölgenin soğutulması sağlanmaktadır. Bu bölgenin soğutulmasıyla ısıtım NO oluşumu azalmaktadır. Kovanlı ve kanatlı durumlarda ise ocak içi sıcaklıkların düşmesiyle, CO ve NO emisyonlarında azalma görülmektedir. Baca sıcaklığının ve bacadaki CO emisyonlarının azalmasından dolayı baca kaybı ve eksik yanma kaybı değerleri düşmekte, kazan verimi artmaktadır. Bu ilişki; ısıtım

yüzeylerinin artması nedeniyle kovan çap ve boyunun 25x40 ve 30x20 değerlerinde, 25x20 ebadına göre daha hissedilir meydana gelmektedir.

Kovansız ve kanatsız kovanlı deneylere göre, 6 kanatlı deneylerde ocak içi sıcaklık (R100 ve R175) ve emisyon değerlerinin azalmasına karşın, 2 ve 4 kanatlı kovanlı deneylerde bu değerlerdeki düşüşler daha fazla olmaktadır. Bu durum alev geri dönüşünü parçalara ayıran kanat sayılarının artmasıyla, sıcak yüzey alanının artması ve bu değişikliğin emisyon üzerine etkisinden kaynaklanmaktadır.

Hava fazlalık katsayısının azaltılmasıyla; alev sıcaklığı ve CO emisyonları artmaktadır. CO emisyonunun artmasının nedeni, yakıtla birleşecek oksijen, CO₂ oluşumu için yetersiz olduğundan CO oluşmasıdır. Düşük hava fazlalık katsayılarında ise NO_x emisyonları azalma göstermiştir. Bu azalma 790 mm ocak boyunda 116 kW ısıt kapasitede 25-30 ppm aralığındadır.

Ocak içerisindeki R100 ölçüm hattında ocak ağzından olan mesafeyle deneylerde sıcaklık 150-250 °C artmakta; alev geri dönüşünün gerçekleştiği R175 ölçüm hattında ise bacaya doğru sıcaklıklar 100-150 °C düşmektedir. NO değerleri de sıcaklıklardaki artış ve azalma ile paralel olarak değişmektedir. Kanat ve kovan adı verilen ısıtım yüzeyleri kullanıldığında alevin maksimum sıcaklığı brülör ağzına yakın noktada(T1) oluşmaktadır. Bu sıcaklık yükselmesine rağmen duman gazı geri dönüşünden dolayı T2 ve T3 sıcaklıklarında T1'e göre düşüş meydana gelmektedir. Alev merkezi sıcaklığının düşmesiyle de ocak sıcaklıkları ve NO_x emisyonlarında azalma görölmektedir.

Aynı ısıt kapasitede ocak yükü arttırıldığı durumda kanat sayısının artmasıyla ocak içi sıcaklıklar ve azotoksit emisyonları daha etkili bir şekilde azalmaktadır. Yanmamış gaz emisyonlarında ise daha düşük değerler ölçölmektedir. Aynı zamanda ocak yükü arttırıldığında verimde %2'lik bir artış görölmektedir.

116 kW kazan ısıt kapasitesinde, 1.26 hava fazlalık katsayısında yapılan deneylerde baca sıcaklığının 10 °C düşmesiyle kazan verimi % 0.6 mertebesinde artmaktadır. Aynı ısıt kapasitede ve ocak boyunda hava fazlalık katsayısının 1.02 değerinde baca sıcaklığındaki 10 °C'lik düşüş %3'lük verim artışı sağlamaktadır. Bunun nedeni baca sıcaklığı değerlerinin azalmasıyla baca kayıplarının düşmesinin haricinde, CO emisyon

değerlerinin azalmasıyla eksik yanma kayıplarının düşük değerler almasıdır. Kısaca, hava fazlalık katsayısının yüksek olduğu durumda baca sıcaklığı kazan verimi üzerinde etkiliyken, hava fazlalık katsayısının azaltılmasıyla baca sıcaklıklarının yanı sıra CO emisyonları da etkisini gösterdiği söylenebilmektedir.

Yapılan bu çalışmada katı yüzey ısıtımının arttırılmasının kazan verimini arttırarak, emisyonlar azaltılmıştır. Tezin literatürünü oluşturan önceki çalışmalarda, yakıcı ayarlamaları, kimyasal işlemler ve farklı geometrilerdeki ilave ısıtım yüzeylerinin ocak içinde kullanılmasıyla kazan veriminin arttırıldığı görülmektedir. Literatürdeki yöntemlerin bir arada kullanılarak, kazan verimi ve emisyonlara etkisinin inceleneceği çalışmalar, bu tezin geleceğini oluşturacaktır.

EK A

No.	Reaksiyon	<i>A</i>	<i>b</i>	<i>E</i>
<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 ^b	$O + CH_2(S) \rightarrow H_2 + CO$	1.50E + 13	0.0	0.0
9 ^b	$O + CH_2(S) \rightarrow H + HCO$	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	$O + C_2H_6 \rightarrow OH + C_2H_5$	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

Şekil A.1. Metan Yanma Mekanizmaları(Turns, 2000)

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 bağlı	
51 ^b	$H + CH_2(S) \rightarrow CH + H_2$	3.00E + 13	0.0	0.0
52	$H + CH_3 (+M) \rightarrow CH_4 (+M)$		basınca bağlı	
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 bağlı	
55	$H + HCO \rightarrow H_2 + CO$	7.34E + 13	0.0	0.0
56	$H + CH_2O (+M) \rightarrow CH_2OH (+M)$		basınca bağlı	
57	$H + CH_2O (+M) \rightarrow CH_3O (+M)$		basınca bağlı	
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 bağlı	
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 ^b	$H + CH_2OH \rightarrow CH_2(S) + H_2O$	6.00E + 12	0.0	0.0
63	$H + CH_3O (+M) \rightarrow CH_3OH (+M)$		basınca bağlı	
64 ^b	$H + CH_2OH \rightarrow CH_2(S) + H_2O$	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 ^b	$H + CH_3O \rightarrow CH_2(S) + H_2O$	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 bağlı	
71	$H + C_2H_2 (+M) \rightarrow C_2H_3 (+M)$		basınca bağlı	
72	$H + C_2H_3 (+M) \rightarrow C_2H_4 (+M)$		basınca bağlı	
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 bağlı	
75	$H + C_2H_4 \rightarrow C_2H_3 + H_2$	1.325E + 06	2.53	12,240
76	$H + C_2H_5 (+M) \rightarrow C_2H_6 (+M)$		basınca bağlı	
77	$H + C_2H_5 \rightarrow C_2H_4 + H_2$	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 ^b	$H + HCCO \rightarrow CH_2(S) + CO$	1.00E + 14	0.0	0.0
80	$H + CH_2CO \rightarrow HCCO + H_2$	5.00E + 13	0.0	8,000
81	$H + CH_2CO \rightarrow CH_3 + CO$	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 bağlı	
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 bağlı	
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

Şekil A.2. Metan Yanma Mekanizmaları(Turns, 2000)(devam)

No.	Reaksiyon	A	b	E
C-H-O Reaksiyonları (devamı)				
93	$\text{OH} + \text{CH}_2 \rightarrow \text{CH} + \text{H}_2\text{O}$	1.13E + 07	2.0	3,000
94 ^b	$\text{OH} + \text{CH}_2(\text{S}) \rightarrow \text{H} + \text{CH}_2\text{O}$	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 ^b	$\text{OH} + \text{CH}_3 \rightarrow \text{CH}_2(\text{S}) + \text{H}_2\text{O}$	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	$\text{HO}_2 + \text{CH}_2\text{O} \rightarrow \text{HCO} + \text{H}_2\text{O}_2$	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	$\text{CH}_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{OH} + \text{HCO}$	1.32E + 13	0.0	1,500
136	$\text{CH}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{H} + \text{CH}_3$	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

Şekil A.3. Metan Yanma Mekanizmaları(Turns, 2000)(devam)

No.	Reaksiyon	<i>A</i>	<i>b</i>	<i>E</i>
<i>C-H-O Reaksiyonları (devamı)</i>				
138	$\text{CH}_2 + \text{CH}_3 \rightarrow \text{H} + \text{C}_2\text{H}_4$	$4.00\text{E} + 13$	0.0	0.0
139	$\text{CH}_2 + \text{CH}_4 \rightarrow \text{CH}_3 + \text{CH}_3$	$2.46\text{E} + 06$	2.0	8,270
140	$\text{CH}_2 + \text{CO} (+\text{M}) \rightarrow \text{CH}_2\text{CO} (+\text{M})$		basınca bağlı	
141	$\text{CH}_2 + \text{HCCO} \rightarrow \text{C}_2\text{H}_3 + \text{CO}$	$3.00\text{E} + 13$	0.0	0.0
142 ^b	$\text{CH}_2(\text{S}) + \text{N}_2 \rightarrow \text{CH}_2 + \text{N}_2$	$1.50\text{E} + 13$	0.0	600
143 ^b	$\text{CH}_2(\text{S}) + \text{Ar} \rightarrow \text{CH}_2 + \text{Ar}$	$9.00\text{E} + 12$	0.0	600
144 ^b	$\text{CH}_2(\text{S}) + \text{O}_2 \rightarrow \text{H} + \text{OH} + \text{CO}$	$2.80\text{E} + 13$	0.0	0.0
145 ^b	$\text{CH}_2(\text{S}) + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$	$1.20\text{E} + 13$	0.0	0.0
146 ^b	$\text{CH}_2(\text{S}) + \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3 + \text{H}$	$7.00\text{E} + 13$	0.0	0.0
147 ^b	$\text{CH}_2(\text{S}) + \text{H}_2\text{O} (+\text{M}) \rightarrow \text{CH}_3\text{OH} (+\text{M})$		basınca bağlı	
148 ^b	$\text{CH}_2(\text{S}) + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$3.00\text{E} + 13$	0.0	0.0
149 ^b	$\text{CH}_2(\text{S}) + \text{CH}_3 \rightarrow \text{H} + \text{C}_2\text{H}_4$	$1.20\text{E} + 13$	0.0	-570
150 ^b	$\text{CH}_2(\text{S}) + \text{CH}_4 \rightarrow \text{CH}_3 + \text{CH}_3$	$1.60\text{E} + 13$	0.0	-570
151 ^b	$\text{CH}_2(\text{S}) + \text{CO} \rightarrow \text{CH}_2 + \text{CO}$	$9.00\text{E} + 12$	0.0	0.0
152 ^b	$\text{CH}_2(\text{S}) + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_2 + \text{CO}_2$	$7.00\text{E} + 12$	0.0	0.0
153 ^b	$\text{CH}_2(\text{S}) + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CO} + \text{CH}_2\text{O}$	$1.40\text{E} + 13$	0.0	0.0
154 ^b	$\text{CH}_2(\text{S}) + \text{C}_2\text{H}_6 \rightarrow \text{CH}_3 + \text{C}_2\text{H}_5$	$4.00\text{E} + 13$	0.0	-550
155	$\text{CH}_3 + \text{O}_2 \rightarrow \text{O} + \text{CH}_3\text{O}$	$2.68\text{E} + 13$	0.0	28,800
156	$\text{CH}_3 + \text{O}_2 \rightarrow \text{OH} + \text{CH}_2\text{O}$	$3.60\text{E} + 10$	0.0	8,940
157	$\text{CH}_3 + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{HO}_2 + \text{CH}_4$	$2.45\text{E} + 04$	2.47	5,180
158	$\text{CH}_3 + \text{CH}_3 (+\text{M}) \rightarrow \text{C}_2\text{H}_6 (+\text{M})$		basınca bağlı	
159	$\text{CH}_3 + \text{CH}_3 \rightarrow \text{H} + \text{C}_2\text{H}_5$	$4.99\text{E} + 12$	0.1	10,600
160	$\text{CH}_3 + \text{HCO} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}$	$2.65\text{E} + 13$	0.0	0.0
161	$\text{CH}_3 + \text{CH}_2\text{O} \rightarrow \text{HCO} + \text{CH}_4$	$3.32\text{E} + 03$	2.81	5,860
162	$\text{CH}_3 + \text{CH}_3\text{OH} \rightarrow \text{CH}_2\text{OH} + \text{CH}_4$	$3.00\text{E} + 07$	1.5	9,940
163	$\text{CH}_3 + \text{CH}_3\text{OH} \rightarrow \text{CH}_3\text{O} + \text{CH}_4$	$1.00\text{E} + 07$	1.5	9,940
164	$\text{CH}_3 + \text{C}_2\text{H}_4 \rightarrow \text{C}_2\text{H}_3 + \text{CH}_4$	$2.27\text{E} + 05$	2.0	9,200
165	$\text{CH}_3 + \text{C}_2\text{H}_6 \rightarrow \text{C}_2\text{H}_5 + \text{CH}_4$	$6.14\text{E} + 06$	1.74	10,450
166	$\text{HCO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H} + \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$	$2.24\text{E} + 18$	-1.0	17,000
167	$\text{HCO} + \text{M} \rightarrow \text{H} + \text{CO} + \text{M}$	$1.87\text{E} + 17$	-1.0	17,000
168	$\text{HCO} + \text{O}_2 \rightarrow \text{HO}_2 + \text{CO}$	$7.60\text{E} + 12$	0.0	400
169	$\text{CH}_2\text{OH} + \text{O}_2 \rightarrow \text{HO}_2 + \text{CH}_2\text{O}$	$1.80\text{E} + 13$	0.0	900
170	$\text{CH}_3\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{HO}_2 + \text{CH}_2\text{O}$	$4.28\text{E} - 13$	7.6	-3,530
171	$\text{C}_2\text{H} + \text{O}_2 \rightarrow \text{HCO} + \text{CO}$	$5.00\text{E} + 13$	0.0	1,500
172	$\text{C}_2\text{H} + \text{H}_2 \rightarrow \text{H} + \text{C}_2\text{H}_2$	$4.07\text{E} + 05$	2.4	200
173	$\text{C}_2\text{H}_3 + \text{O}_2 \rightarrow \text{HCO} + \text{CH}_2\text{O}$	$3.98\text{E} + 12$	0.0	-240
174	$\text{C}_2\text{H}_4 (+\text{M}) \rightarrow \text{H}_2 + \text{C}_2\text{H}_2 (+\text{M})$		basınca bağlı	
175	$\text{C}_2\text{H}_5 + \text{O}_2 \rightarrow \text{HO}_2 + \text{C}_2\text{H}_4$	$8.40\text{E} + 11$	0.0	3,875
176	$\text{HCCO} + \text{O}_2 \rightarrow \text{OH} + \text{CO} + \text{CO}$	$1.60\text{E} + 12$	0.0	854
177	$\text{HCCO} + \text{HCCO} \rightarrow \text{CO} + \text{CO} + \text{C}_2\text{H}_2$	$1.00\text{E} + 13$	0.0	0.0

Şekil A.4. Metan Yanma Mekanizmaları(Turns, 2000)(devam)

No.	Reaksiyon	<i>A</i>	<i>b</i>	<i>E</i>
<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

Şekil A.5. Metan Yanma Mekanizmaları(Turns, 2000)(devam)

No.	Reaksiyon	A	b	E
<i>N- içeren Reaksiyonlar (devam)</i>				
220	$\text{CN} + \text{O}_2 \rightarrow \text{NCO} + \text{O}$	$6.14\text{E} + 12$	0.0	-440
221	$\text{CN} + \text{H}_2 \rightarrow \text{HCN} + \text{H}$	$2.10\text{E} + 13$	0.0	4,710
222	$\text{NCO} + \text{O} \rightarrow \text{NO} + \text{CO}$	$2.35\text{E} + 13$	0.0	0.0
223	$\text{NCO} + \text{H} \rightarrow \text{NH} + \text{CO}$	$5.40\text{E} + 13$	0.0	0.0
224	$\text{NCO} + \text{OH} \rightarrow \text{NO} + \text{H} + \text{CO}$	$2.50\text{E} + 12$	0.0	0.0
225	$\text{NCO} + \text{N} \rightarrow \text{N}_2 + \text{CO}$	$2.00\text{E} + 13$	0.0	0.0
226	$\text{NCO} + \text{O}_2 \rightarrow \text{NO} + \text{CO}_2$	$2.00\text{E} + 12$	0.0	20,000
227	$\text{NCO} + \text{M} \rightarrow \text{N} + \text{CO} + \text{M}$	$8.80\text{E} + 16$	-0.5	48,000
228	$\text{NCO} + \text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O} + \text{CO}$	$2.85\text{E} + 17$	-1.52	740
229	$\text{NCO} + \text{NO} \rightarrow \text{N}_2 + \text{CO}_2$	$5.70\text{E} + 18$	-2.0	800
230	$\text{HCN} + \text{M} \rightarrow \text{H} + \text{CN} + \text{M}$	$1.04\text{E} + 29$	-3.3	126,600
231	$\text{HCN} + \text{O} \rightarrow \text{NCO} + \text{H}$	$1.11\text{E} + 04$	2.64	4,980
232	$\text{HCN} + \text{O} \rightarrow \text{NH} + \text{CO}$	$2.77\text{E} + 03$	2.64	4,980
233	$\text{HCN} + \text{O} \rightarrow \text{CN} + \text{OH}$	$2.13\text{E} + 09$	1.58	26,600
234	$\text{HCN} + \text{OH} \rightarrow \text{HOCN} + \text{H}$	$1.10\text{E} + 06$	2.03	13,370
235	$\text{HCN} + \text{OH} \rightarrow \text{HNCO} + \text{H}$	$4.40\text{E} + 03$	2.26	6,400
236	$\text{HCN} + \text{OH} \rightarrow \text{NH}_2 + \text{CO}$	$1.60\text{E} + 02$	2.56	9,000
237	$\text{H} + \text{HCN} + \text{M} \rightarrow \text{H}_2\text{CN} + \text{M}$	$1.40\text{E} + 26$	-3.4	1,900
238	$\text{H}_2\text{CN} + \text{N} \rightarrow \text{N}_2 + \text{CH}_2$	$6.00\text{E} + 13$	0.0	400
239	$\text{C} + \text{N}_2 \rightarrow \text{CN} + \text{N}$	$6.30\text{E} + 13$	0.0	46,020
240	$\text{CH} + \text{N}_2 \rightarrow \text{HCN} + \text{N}$	$2.86\text{E} + 08$	1.1	20,400
241	$\text{CH} + \text{N}_2 (+\text{M}) \rightarrow \text{HCNN} (+\text{M})$		basınca bağlı	
242	$\text{CH}_2 + \text{N}_2 \rightarrow \text{HCN} + \text{NH}$	$1.00\text{E} + 13$	0.0	74,000
243 ^b	$\text{CH}_2(\text{S}) + \text{N}_2 \rightarrow \text{NH} + \text{HCN}$	$1.00\text{E} + 11$	0.0	65,000
244	$\text{C} + \text{NO} \rightarrow \text{CN} + \text{O}$	$1.90\text{E} + 13$	0.0	0.0
245	$\text{C} + \text{NO} \rightarrow \text{CO} + \text{N}$	$2.90\text{E} + 13$	0.0	0.0
246	$\text{CH} + \text{NO} \rightarrow \text{HCN} + \text{O}$	$5.00\text{E} + 13$	0.0	0.0
247	$\text{CH} + \text{NO} \rightarrow \text{H} + \text{NCO}$	$2.00\text{E} + 13$	0.0	0.0
248	$\text{CH} + \text{NO} \rightarrow \text{N} + \text{HCO}$	$3.00\text{E} + 13$	0.0	0.0
249	$\text{CH}_2 + \text{NO} \rightarrow \text{H} + \text{HNCO}$	$3.10\text{E} + 17$	-1.38	1,270
250	$\text{CH}_2 + \text{NO} \rightarrow \text{OH} + \text{HCN}$	$2.90\text{E} + 14$	-0.69	760
251	$\text{CH}_2 + \text{NO} \rightarrow \text{H} + \text{HCNO}$	$3.80\text{E} + 13$	-0.36	580
252 ^b	$\text{CH}_2(\text{S}) + \text{NO} \rightarrow \text{H} + \text{HNCO}$	$3.10\text{E} + 17$	-1.38	1,270
253 ^b	$\text{CH}_2(\text{S}) + \text{NO} \rightarrow \text{OH} + \text{HCN}$	$2.90\text{E} + 14$	-0.69	760
254 ^b	$\text{CH}_2(\text{S}) + \text{NO} \rightarrow \text{H} + \text{HCNO}$	$3.80\text{E} + 13$	-0.36	580
255	$\text{CH}_3 + \text{NO} \rightarrow \text{HCN} + \text{H}_2\text{O}$	$9.60\text{E} + 13$	0.0	28,800
256	$\text{CH}_3 + \text{NO} \rightarrow \text{H}_2\text{CN} + \text{OH}$	$1.00\text{E} + 12$	0.0	21,750
257	$\text{HCNN} + \text{O} \rightarrow \text{CO} + \text{H} + \text{N}_2$	$2.20\text{E} + 13$	0.0	0.0
258	$\text{HCNN} + \text{O} \rightarrow \text{HCN} + \text{NO}$	$2.00\text{E} + 12$	0.0	0.0
259	$\text{HCNN} + \text{O}_2 \rightarrow \text{O} + \text{HCO} + \text{N}_2$	$1.20\text{E} + 13$	0.0	0.0
260	$\text{HCNN} + \text{OH} \rightarrow \text{H} + \text{HCO} + \text{N}_2$	$1.20\text{E} + 13$	0.0	0.0
261	$\text{HCNN} + \text{H} \rightarrow \text{CH}_2 + \text{N}_2$	$1.00\text{E} + 14$	0.0	0.0
262	$\text{HNCO} + \text{O} \rightarrow \text{NH} + \text{CO}_2$	$9.80\text{E} + 07$	1.41	8,500

Şekil A.6. Metan Yanma Mekanizmaları(Turns, 2000)(devam)

NOT : Bileşenlerin tek fazda olduğu b indisi ile gösterilmektedir.

EK B. MODELLENEN KAZANA AİT ORNEK HESAPLAMA

Modellenen kazanın ısı hesaplamaları yapılarak kazana ait ısı verim, yakıt sarfıyatı, toplam hava ve duman miktarları, değişik noktalardaki gaz sıcaklıkları ile ısı bilanço verilerine ulaşılır. Değişik parametrelere göre kazanlar için farklı hesaplamalar Excel’de programlama yardımıyla yapılmıştır. Aşağıdaki örnekte 790 mm boyunda 116 kW ısı kapasiteye sahip deney kazanının 1.00 hava fazlalık katsayısı değeri için ısı hesabı yapılmıştır.

20 °C ortam sıcaklığında çalıştığı kabul edilen kazan, alev geri dönüşlü olup; 90/70 °C su çıkış ve dönüş sıcaklığında çalışmaktadır. Baca sıcaklığı 325 °C olarak kabul edilmiştir. Kazana ait boyutsal değerleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo B.1. Kazanın bazı boyutları

Kazan parçası	Değer(mm)
Alev borusu çapı (D)	400
Alev borusu boyu (L)	790
Duman borusu çapı (D _b)	41.5 ve 36.5
Duman borusu boyu (L _b)	890

Yakacağın karbonunun bir kısmının karbonmonoksit şeklinde yanması sonucunda oluşan eksik yanma kaybı (Z_e) bu durumda % 0.25 olarak kabul edilmiştir. Sıcak cidar kaybı (Z_b) Buhar kazanının sıcak dış yüzeylerinden çevreye ışıınım ve taşınım yolu ile ısı kaybını tanımlayan sıcak cidar kaybı eksik yanma kaybıyla beraber hesaplanarak % 0.5 olarak kabul edilmiştir.

Baca kaybı Z_b ile ifade edilir

$$Z_b = \frac{(1-y)v_g(i_b - i_a)}{H_u} \quad (\text{B.1})$$

Efektif olarak yanan yakacak yüzdesini ifade eden (1-y) terimindeki y değeri %.25 olarak alınmıştır. Baca gazı ($T_{\text{baca}} = 325 \text{ }^{\circ}\text{C}$) ve ortam sıcaklıklarına göre tablodan (Onat vd., 1998) entalpi değerleri okunmuştur. Okunan değerler baca gazı için $i_b = 488 \text{ kJ/Nm}^3$, ortam sıcaklığı için ise $i_a = 28 \text{ kJ/Nm}^3$ 'dir. Alt ısı değere ($H_u = 9331 \text{ kcal/Nm}^3$) göre HFK = 1.00 için özgül hava miktarı (v_h) = 10.38 (Nm^3/kg), özgül duman gazı miktarı (v_g) = 11.46 (Nm^3/kg) değerleri okunmuştur.

Değerler yerlerine konulursa $Z_b = \% 13$ elde edilir.

Anma ısı gücünde çalışmaya ait ısı verim için;

$$\eta = 1 - \Sigma Z = [1 - (0.025 + 0.025 + 0.13)] \cdot 100 = \% 86.5 \quad (\text{B.2})$$

Net kazan ısı kapasitesi aşağıdaki gibi bulunmaktadır:

$$Q_{\text{net}} = \eta Q_{\text{brüt}} = 116 \times 0.865 = 100.6 \text{ kW} \quad (\text{B.3})$$

Yakacak miktarı ise;

$$B = \frac{Q_{\text{net}}}{\eta \cdot H_u} = \frac{(100.6 \cdot 3600)}{0.865 \cdot 39060} = 10.72 \text{ m}^3/\text{h} \quad (\text{B.4})$$

Buna göre toplam hava ve duman gazı debileri;

$$V_h = v_h B = 111.19 \text{ Nm}^3/\text{h} \quad (\text{B.5})$$

$$V_g = v_g B = 122.8 \text{ Nm}^3/\text{h} \quad (\text{B.6})$$

şeklindedir.

Kazanın ısı bilançosunu yapabilmek için; ocak içerisinde, ocakta duman gazlarının geri dönüşünün olduğu yerde, duman boruları, ön ve arka aynalarda ayrı ayrı ısı

hesaplamalar yapılmalıdır. Bu hesaplamalar yapılırken çeşitli kabuller yapılır ve çeşitli tablolardan değerler okunur.

Ocak İçerisi

Alev geri dönüşlü kazanlarda ısı hesaplamalar yaparken bazı kabuller yapılmaktadır:

- Ocak içindeki alev silindirik bir geometridir.
- l_a alev boyunun ocak boyundan 150 mm küçüktür.
- Yanmanın alev hacmi içinde son bulmaktadır.
- Alev ile ocak cidarları arasında bulunan duman gazları ışıınımı yutmamaktadır.
- Alev hacminin dışından geri dönen duman gazları hem taşınım hem de ışıınım ile ısı geçişi yapmaktadır
- Alevden ocak cidarlarına sadece ışıınımla ısı geçmektedir.
- Alev sıcaklığı ve gazın fiziksel özellikleri hacim içinde her yerde aynıdır.
- Yanmanın iyi olabilmesi için alev hacminde gaz hızının yaklaşık 4–5 m/s arasındadır.

Yapılacak hesaplamalar bu kabullere dayanacaktır.

$$\text{Alev boyu } l_a = 790 - 150 = 640 \text{ mm} \quad (\text{B.7})$$

Duman gazı debisi hesaplanırken ocak sıcaklığı 1300°C kabul edilmiştir:

$$\text{Duman gazı debisi} = V_g \frac{1300 + 273}{273} \frac{1}{3600} = 0.197 \text{ m}^3/\text{s} \quad (\text{B.8})$$

Gaz hızını 4.5 m/s alırsak debi hesabından alev çapı hesaplanabilir: 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:

$$\text{Debi} = \text{Kesit} \times \text{Hız} \quad (\text{B.9})$$

$$0.197 \text{ m}^3/\text{s} = \frac{\pi d_a^2}{4} \times (4.5 \text{ m/s}) \quad (\text{B.10})$$

$$\text{Alev çapı } d_a = \sqrt{\frac{0.197 \cdot 4}{\pi \cdot 4.5}} = 0.236 \text{ mm} \quad (\text{B.11})$$

$$\text{Alev hacmi } V_a = \frac{\pi d_a^2}{4} l_a = 0.02796 \text{ m}^3 \quad (\text{B.12})$$

$$\text{Ortalama alev yükü } H_m = \frac{BH_u}{V_a} = 4159 \text{ kW / m}^3 \quad (\text{B.13})$$

Alevin eşdeğer tabaka kalınlığı;

$$L_e = 4V_a / A_a = 4 \cdot 0.02796 / [\pi 0.236 \cdot 0.64 + 2\pi(0.236)^2 / 4] = 0.20 \text{ m} \quad (\text{B.14})$$

Alevin yayma katsayısı için;

$$\varepsilon_{al} \approx CH_m L_e = 2.3 \cdot 10^{-4} \cdot 4159 \cdot 0.20 = 0.191 \quad (\text{B.15})$$

Gazın ε_g ışınlım yayma katsayısının hesabı için ocak gazındaki su buharı ve karbondioksit gazlarının kısmi basınçları gerekmektedir. Bu değerler doğalgazın stokiyometrik şartlarda yapılan yanma hesabından alınmıştır.

$$p_{CO_2} = 0.10 \text{ bar}$$

$$p_{H_2O} = 0.18 \text{ bar}$$

$$p_{CO_2} \cdot L_e \approx 0.020 \text{ bar} \cdot \text{m} \quad (\text{B.16})$$

$$p_{H_2O} \cdot L_e \approx 0.036 \text{ bar} \cdot \text{m} \quad (\text{B.17})$$

Ocak sıcaklığının geçici değeri $T_{go} = 1300^\circ\text{C}$

$$\varepsilon_{CO_2} = 0.045$$

$$\varepsilon_{H_2O} = 0.039$$

$$\Delta \varepsilon = \varepsilon_{\text{CO}_2} \cdot \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} = 0.001755 \quad (\text{B.18})$$

$$\varepsilon_g = \varepsilon_{\text{CO}_2} + \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} - \Delta \varepsilon = 0.082 \quad (\text{B.19})$$

$$\varepsilon_a = \varepsilon_g + (1 - \varepsilon_g) \varepsilon_{\text{al}} = 0.257 \quad (\text{B.20})$$

Taşınmı yardımcıyla ısı transferinin alev etrafında olmadığı kabulü yapılmıştır. Bu kabullerden dolayı $C_k = 1.0$ ile $T_w = 100^\circ\text{C}$, $\varepsilon_w = 0.9$, $\eta_o \approx 1.0$ seçilmiştir.

$$\frac{A_a}{A_w} = \frac{\pi d_a l_a + \pi d_a^2 / 4}{\pi D L + \pi D^2 / 4} = 0.501 \quad (\text{B.21})$$

$$i_{\text{th}} = \frac{\eta_o H_u + v_h i_a}{v_g} = 3435 \text{ kJ/Nm}^3 \quad (\text{B.22})$$

$$\phi = \left[\frac{1}{\varepsilon_a} + \frac{A_a}{A_w} \left(\frac{1}{\varepsilon_w} - 1 \right) \right]^{-1} = 0.254 \quad (\text{B.23})$$

$$x' = 20.41 \frac{C_k \phi A_a}{i_{\text{th}} B v_g} \left(\frac{T_w}{100} \right)^4 = 0.00123 \quad (\text{B.24})$$

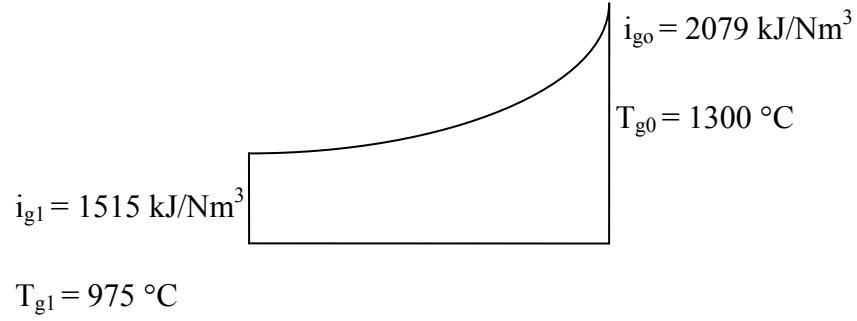
$$1 - \frac{i_{\text{go}}}{i_{\text{th}}} = 1.35 \cdot 10^{-3} \left[\left(\frac{T_{\text{go}}}{T_w} \right)^4 - 1 \right] \quad (\text{B.25})$$

Yukarıdaki denklem ocak sıcaklığı geçici değeri (1300°C) için $i_{\text{go}} = 2079 \text{ kJ/Nm}^3$ değeriyle doğruluğu yüksek sonuçlar vermiştir. Seçilen durumda alev hacmi içindeki gaz hızı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

$$\frac{V_g}{\pi d_a^2 / 4} \frac{T_{\text{go}} + 273}{273} = 4.5 \text{ m/sn} \quad (\text{B.26})$$

Ocakta Geri Dönüş

Geri dönüş bölgesinde ısıtım ve taşınımın bir arada olduğu bir ısı geçişi mekanizması mevcuttur. Ocak çıkışında ve geri dönüşündeki sıcaklık ve entalpi değerleri aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} = 1029^\circ\text{C} \quad (\text{B.27})$$

$$d_h = \frac{4A}{C} = D - d = 400 - 254 = 164 \text{ mm} \quad (\text{B.28})$$

$$A_{\text{kesit}} = \frac{\pi D^2}{4} - \frac{\pi d^2}{4} = 0.08 \text{ m}^2 \quad (\text{B.29})$$

$$V_0 = \frac{V_g}{A_{\text{kesit}}} = \frac{151.7}{0.08 \cdot 3600} = 0.416 \text{ m/s} \quad (\text{B.30})$$

$$V = V_0 \frac{T_g + 273}{273} = 2.15 \text{ m/s} \quad (\text{B.31})$$

$$L_e = d_h = 0.164 \text{ m alınarak;}$$

$$h_k = 4.87 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$p_{\text{CO}_2} \cdot L_e \approx 0.0165 \text{ bar} \cdot \text{m} \quad (\text{B.32})$$

$$p_{\text{H}_2\text{O}} \cdot L_e \approx 0.0284 \text{ bar} \cdot \text{m} \quad (\text{B.33})$$

$$q_{\text{CO}_2} = 7830 \text{ W/m}^2$$

$$q_{\text{H}_2\text{O}} = 5025 \text{ W/m}^2$$

$$h_r = 0,93 \frac{q_{\text{CO}_2} + q_{\text{H}_2\text{O}}}{\Delta T} = 11.52 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C} \quad (\text{B.34})$$

$$h = h_r + h_k = 11.52 + 4.87 = 16.39 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C} \quad (\text{B.35})$$

Ocak çıkışında duman gazının entalpisi;

$$i_{g1} = i_{g0} - \frac{h \cdot A_w \cdot \Delta T_m}{V_g} = 1526 \text{ kJ/Nm}^3 \quad (\text{B.36})$$

Yüzde hata hesabı yapacak olursak;

$$\% \text{Hata} = \frac{1515 - 1526}{1515} 100 = \% 0.73 \quad (\text{B.37})$$

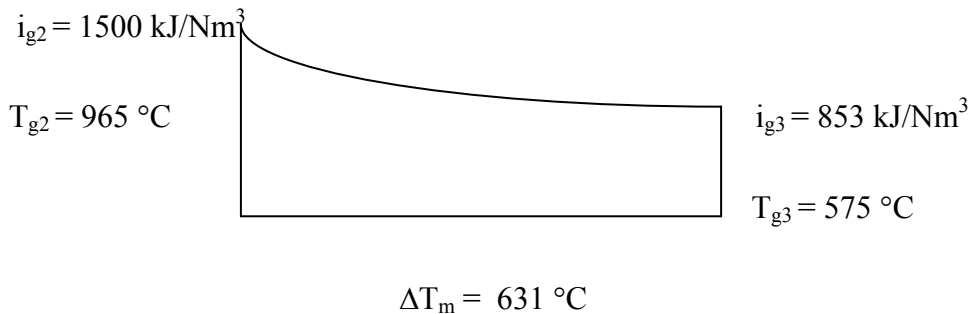
Buradaki hata payı doğruluğun istenilen düzeyde olduğunu göstermektedir.

Ön Ayna:

Bu kısımda hesap yapılmamıştır. Duman gazının 10°C soğuduğu kabul edilecektir. Böylece duman borularına giren gazın sıcaklığı ve entalpisi sırasıyla $T_{g1} = 965 \text{ }^\circ\text{C}$, $i_{g0} = 1500 \text{ kJ/Nm}^3$ olacaktır.

Duman Boruları:

Duman borularının çıkışında gaz sıcaklığının 575°C olduğu kabul edilmiştir.



$$V_0 = \frac{V_g}{A_{\text{kesit}}} = \frac{122.8}{n(\pi d_b^2 / 4)3600} = 2.72 \text{ m/s} \quad (\text{B.38})$$

$$V = V_0 \frac{T_g + 273}{273} = 10.38 \text{ m/s} \quad (\text{B.39})$$

$L_e = d_b = 0.0365 \text{ m}$ olduğuna göre

$$h_k = 25.52 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$p_{\text{CO}_2} \cdot L_e \approx 0.0037 \text{ bar} \cdot \text{m} \quad (\text{B.40})$$

$$p_{\text{H}_2\text{O}} \cdot L_e \approx 0.0063 \text{ bar} \cdot \text{m} \quad (\text{B.41})$$

$$q_{\text{CO}_2} = 1180 \text{ W/m}^2$$

$$q_{\text{H}_2\text{O}} = 487 \text{ W/m}^2$$

$$h_r = 0.93 \frac{q_{\text{CO}_2} + q_{\text{H}_2\text{O}}}{\Delta T} = 2.31 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{B.42})$$

$$h = h_r + h_k = 25.52 + 2.31 = 27.83 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{B.43})$$

Duman boruları çıkışında entalpi aşağıdaki gibi hesaplanabilmektedir:

$$i_{g3} = i_{g2} - \frac{h \cdot n \cdot \pi \cdot d_b \cdot L_b \cdot \Delta T_m}{V_g} = 850 \text{ kJ/Nm}^3 \quad (\text{B.44})$$

Önceki bölgelerde olduğu gibi % hata hesabı yapılırsa;

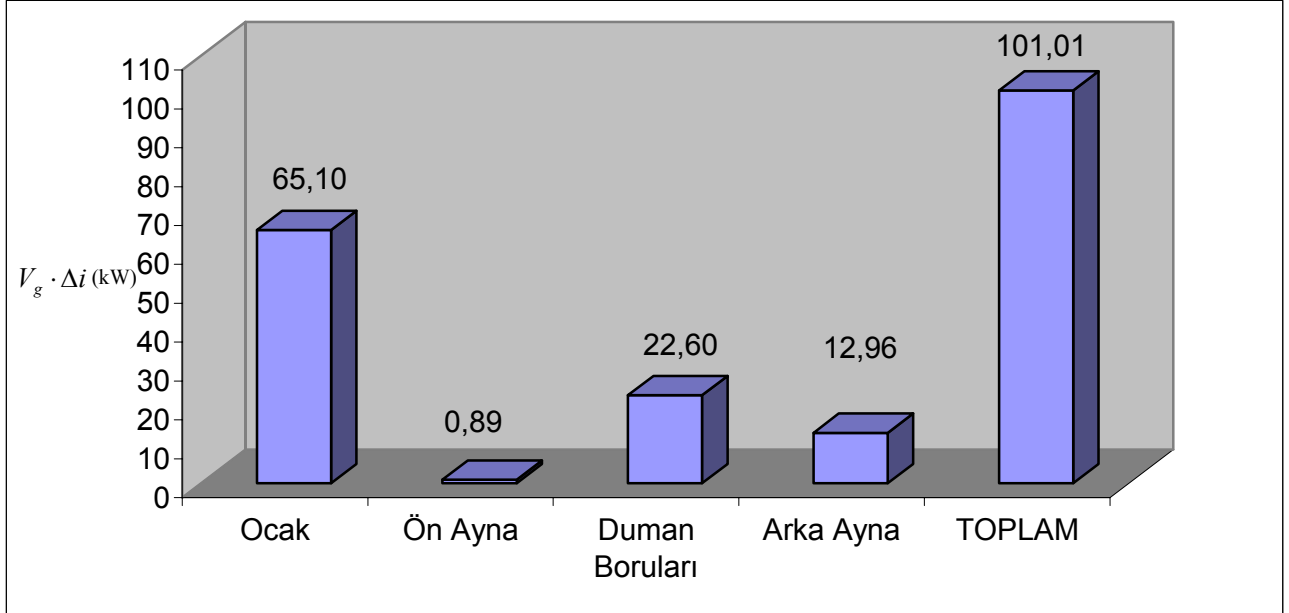
$$\% \text{Hata} = \frac{853 - 850}{853} 100 = \% 0.35 \quad (\text{B.45})$$

Arka Ayna

Sıcaklık değeri aynı alınarak herhangi bir hesap yapılmayacaktır.

Isı Bilançosu

Hesapları yapılan tüm bölgeler için ısı bilançosu aşağıdaki gibidir:

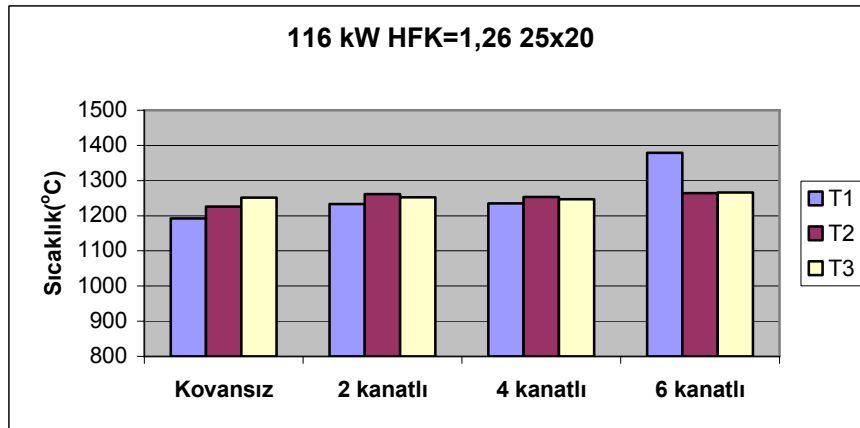
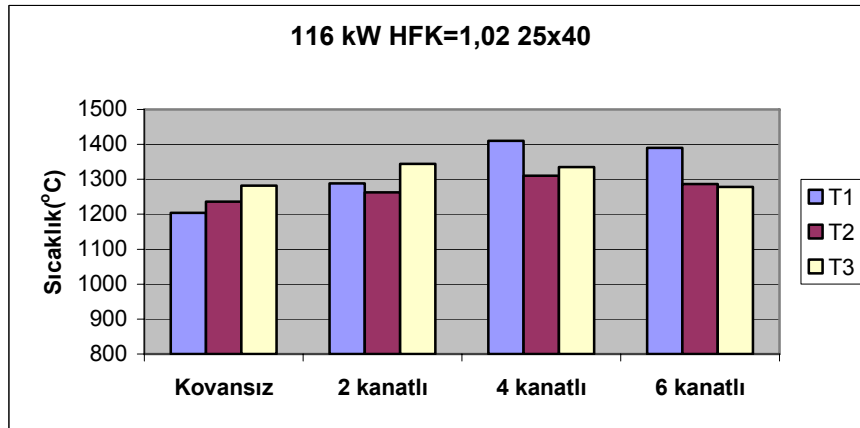
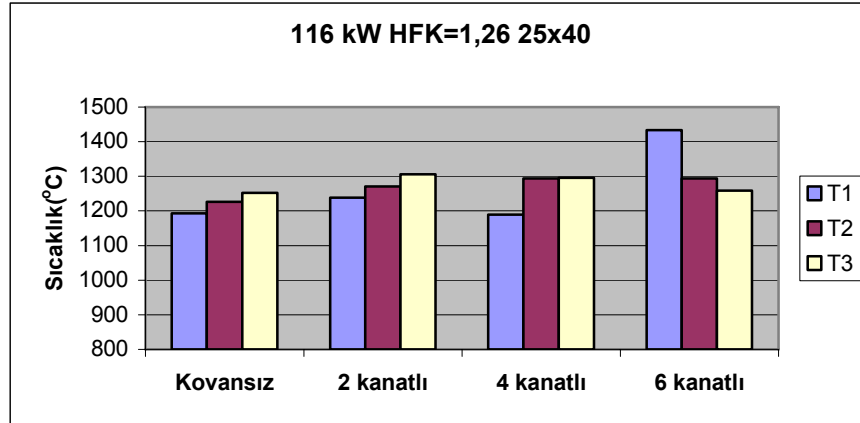


Şekil B.1: Bölgelere göre ısı bilanço

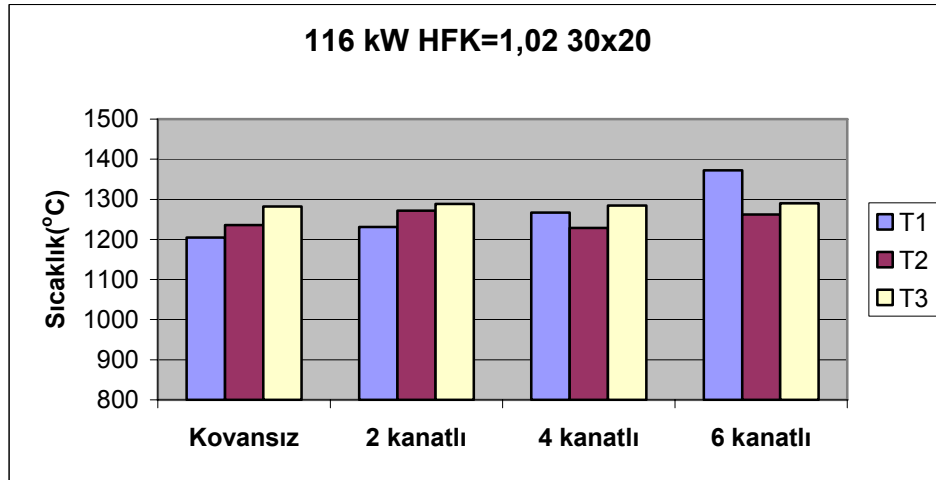
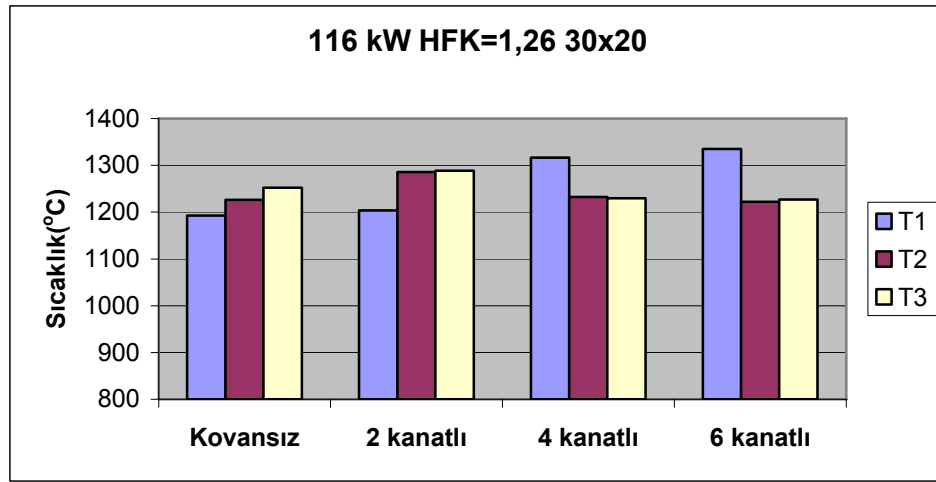
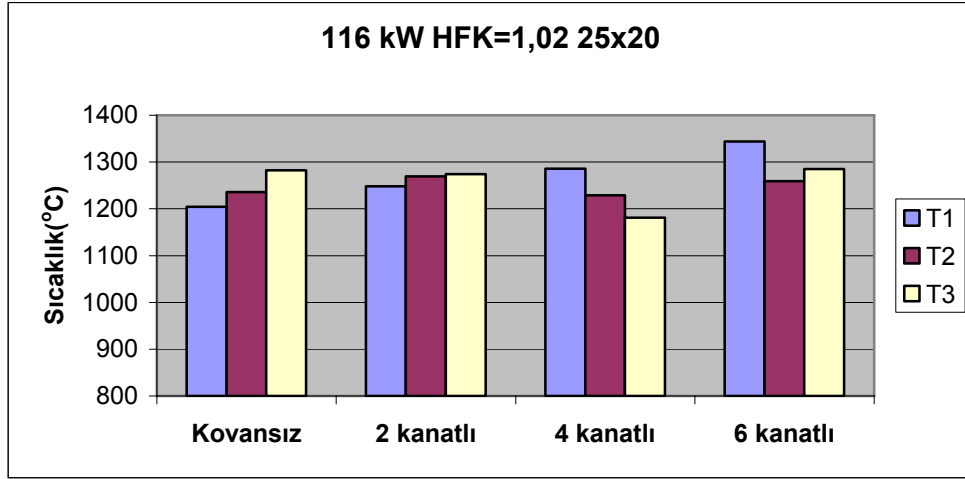
Tablo B.2. Farklı ocak boyu ve hava fazlalık katsayısı değerleri için kazan ısı hesaplarının sonuçları.

Hesaplanan Büyüklikler	Ocak boyu (mm) / Max. Kazan Isıl Kapasitesi (kW)						
	790		680		550		
	HFK=1.00	HFK=1.26	HFK =1.00	HFK =1.26	HFK =1.00	HFK =1.26	HFK =1.475
Kazan Isıl Verimi (%)	86.5	82.9	89.8	86	89.4	89.2	91.4
Yakıt Sarfıyatı (B), (Nm ³ /h)	10.72	10.72	8.04	8.04	5.35	5.35	5.35
Toplam Hava Miktarı (V _h), (Nm ³ /h)	111.19	140.10	83.36	105.04	81.98	70.03	55.58
Toplam Duman Miktarı (V _g), (Nm ³ /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
Isı Bilançosu (kW)							
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
TOPLAM (kW)	101.01	96.81	78.65	75.3	52.19	52.11	53.36

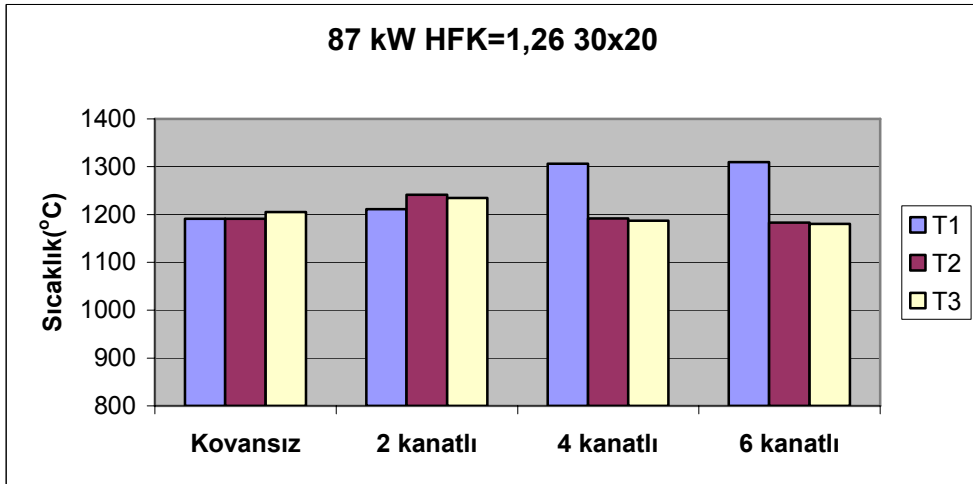
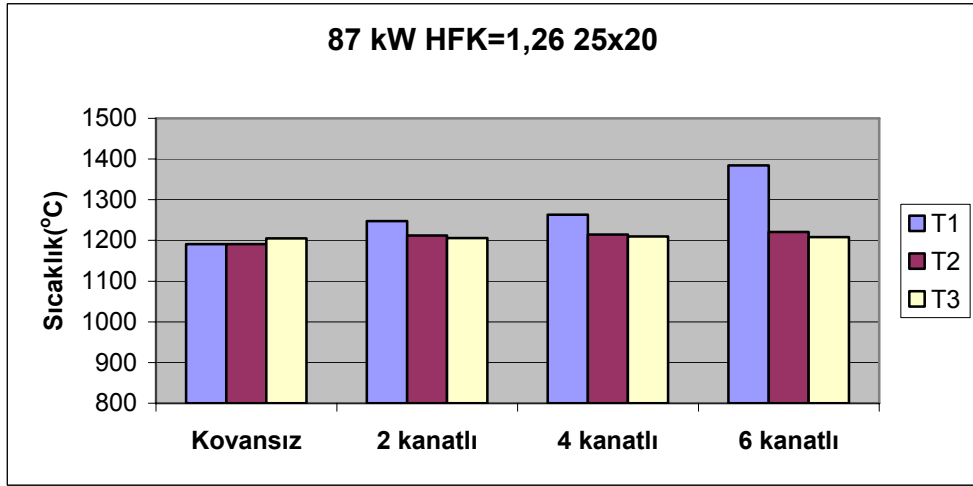
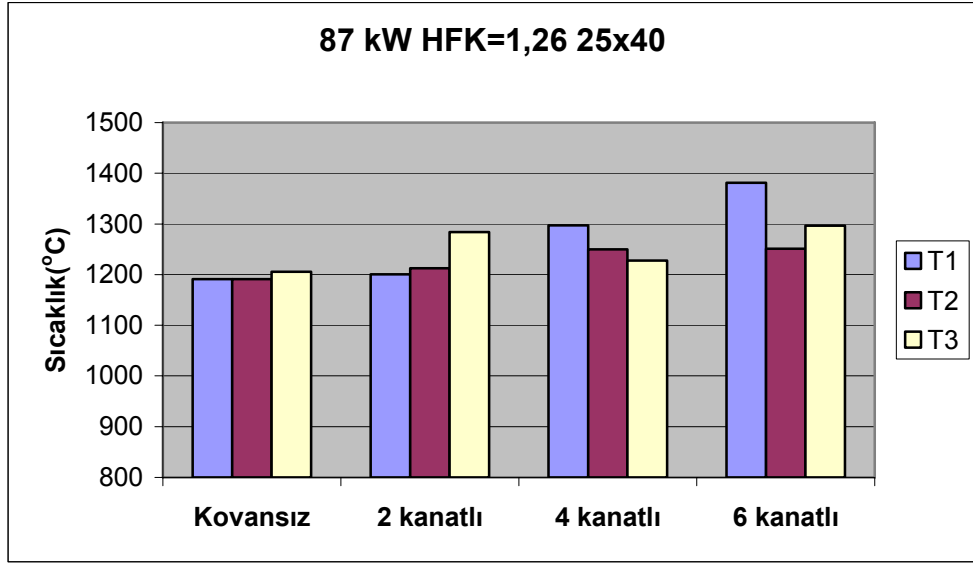
EK C.



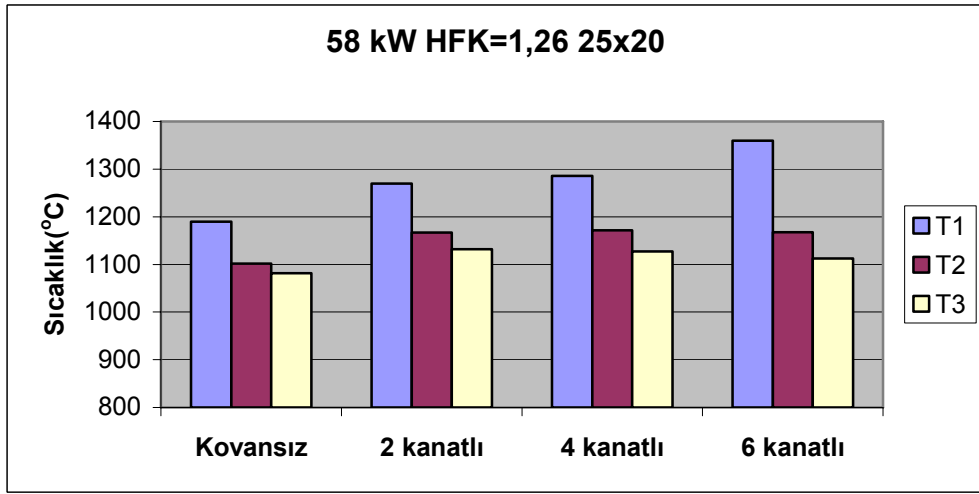
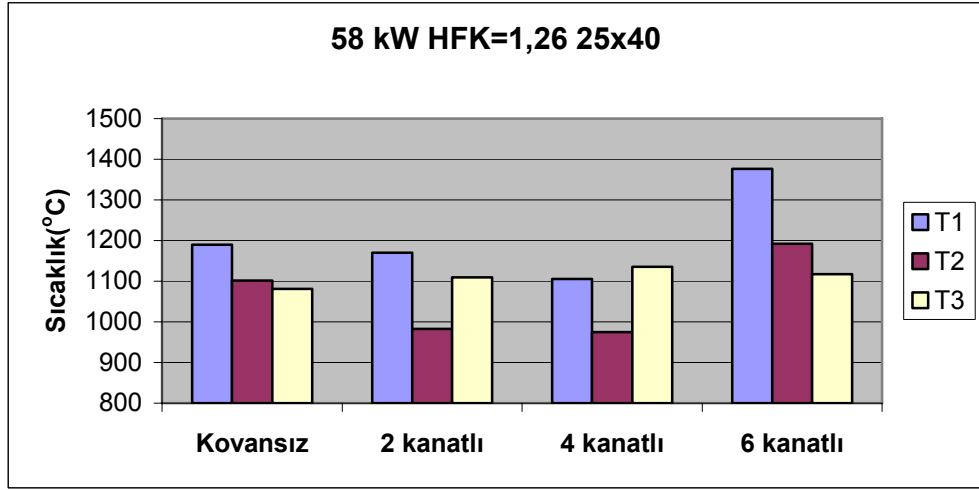
Şekil C.1: 116 kW kazan ısıtım kapasitesinde belirtilen durumlarda alev sıcaklıkları (deney)



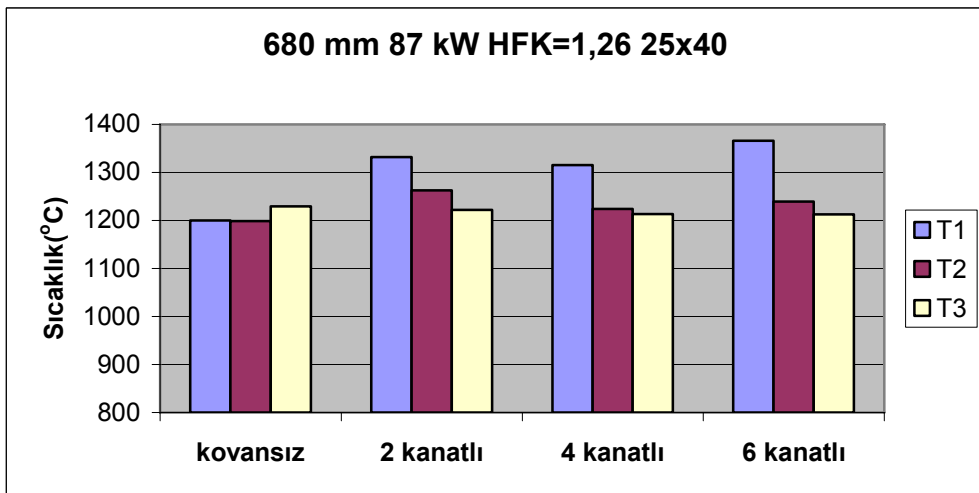
Şekil C.2: 116 kW kazan ısıt kapasitesinde belirtilen durumlarda alev sıcaklıkları deney (devam)



Şekil C.3: 87 kW kazan ısıt kapasitesinde belirtilen durumlarda alev sıcaklıkları(deney)

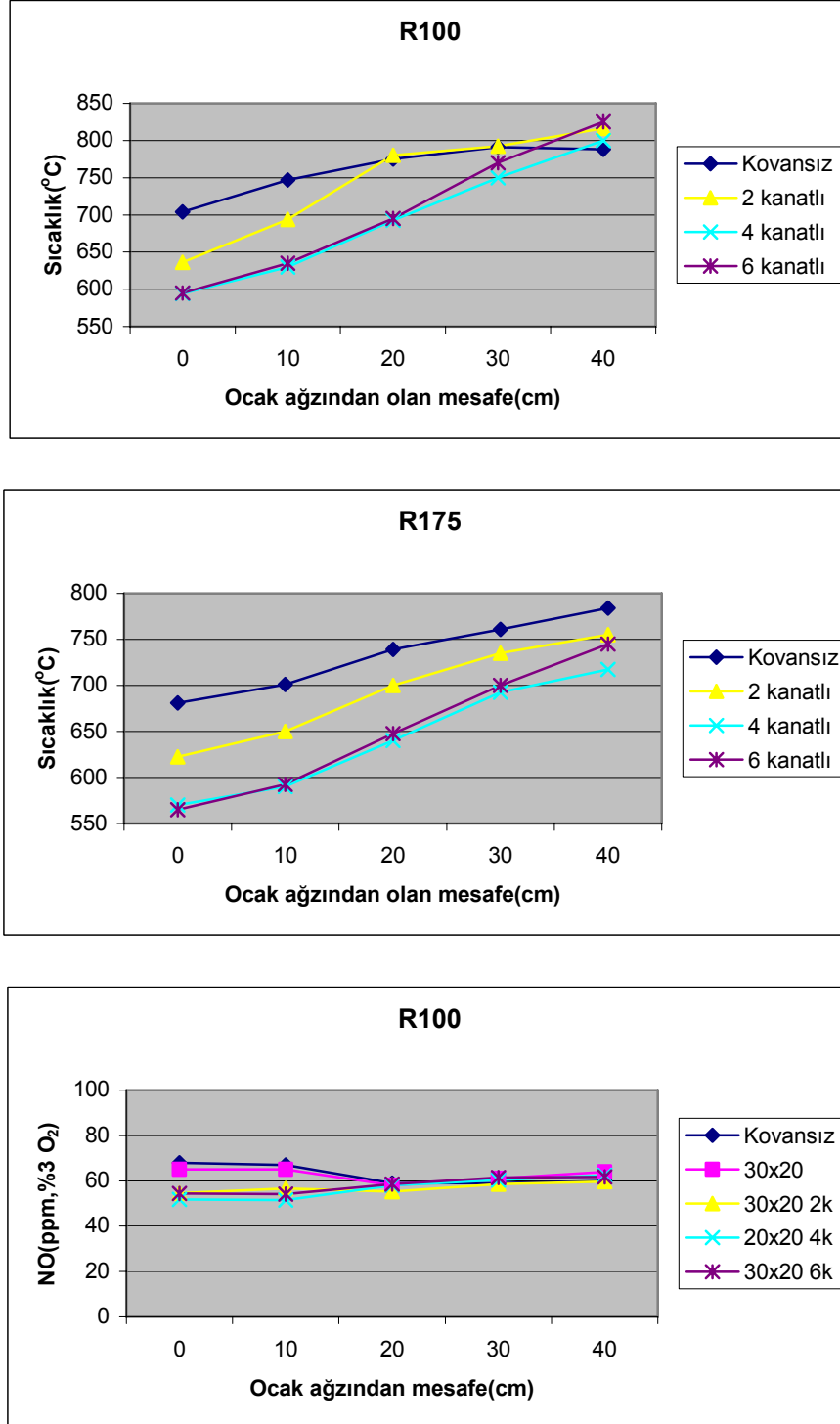


Şekil C.4: 58 kW kazan ısıtım kapasitesinde belirtilen durumlarda alev sıcaklıkları (deney)

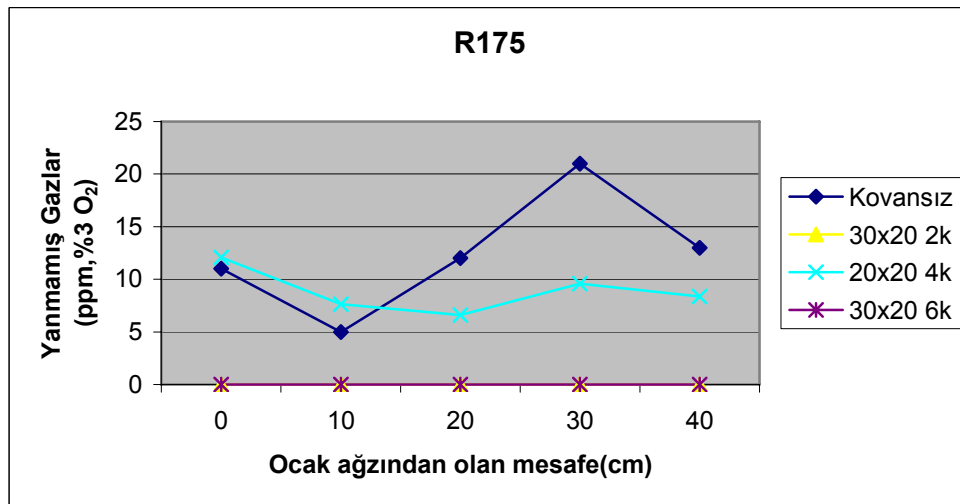
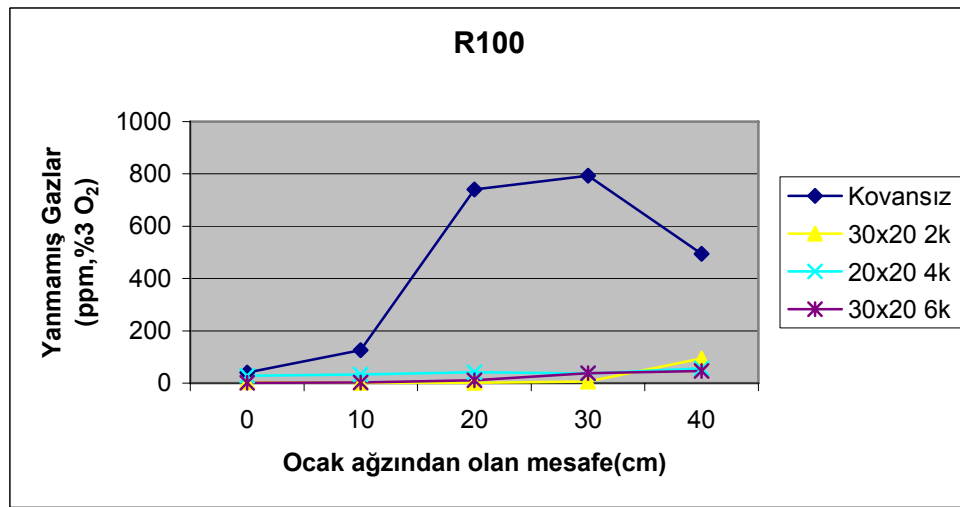
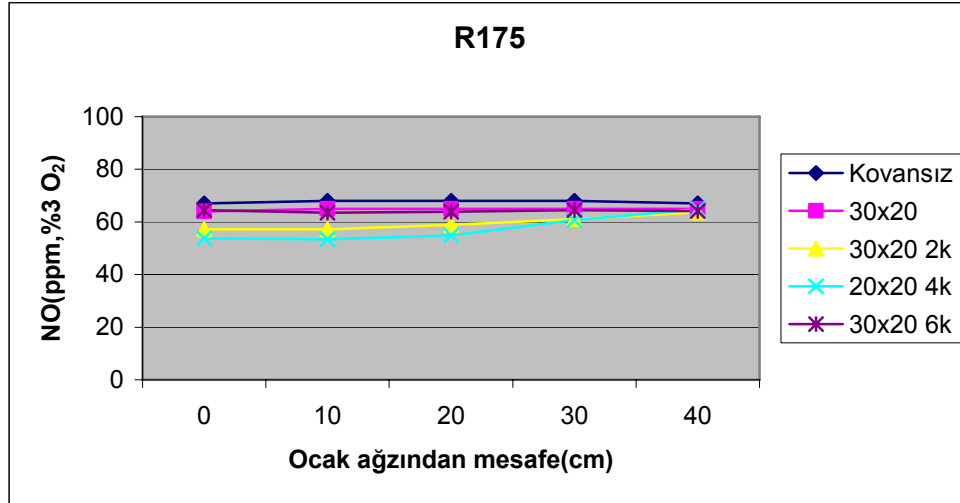


Şekil C.5: 87 kW kazan ısıtım kapasitesinde 680 mm ocak boyunda belirtilen durumlarda alev sıcaklıkları (deney)

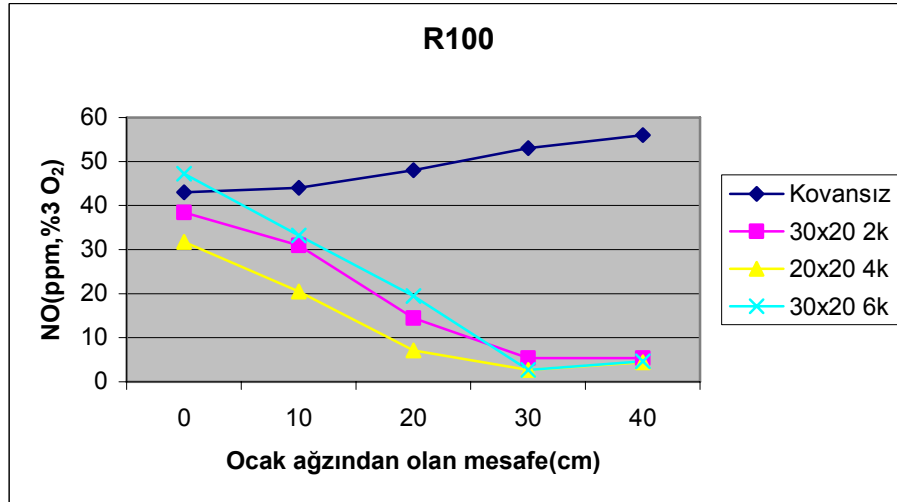
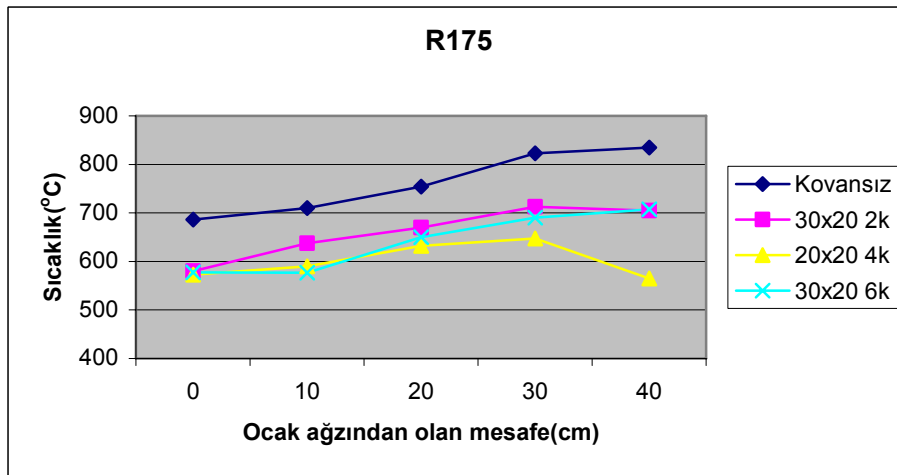
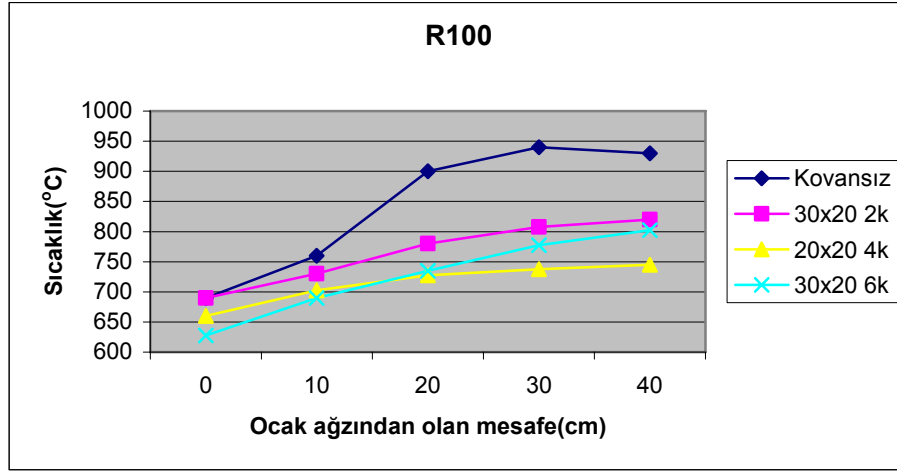
EK D.



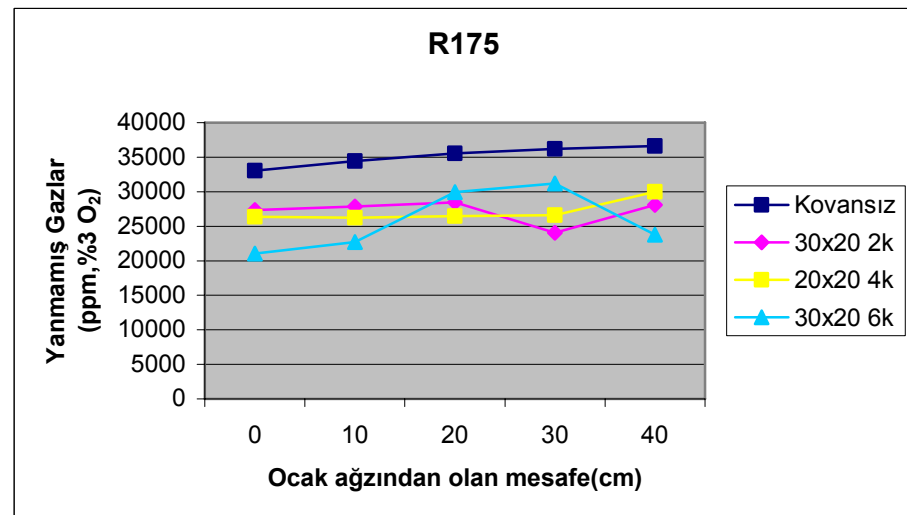
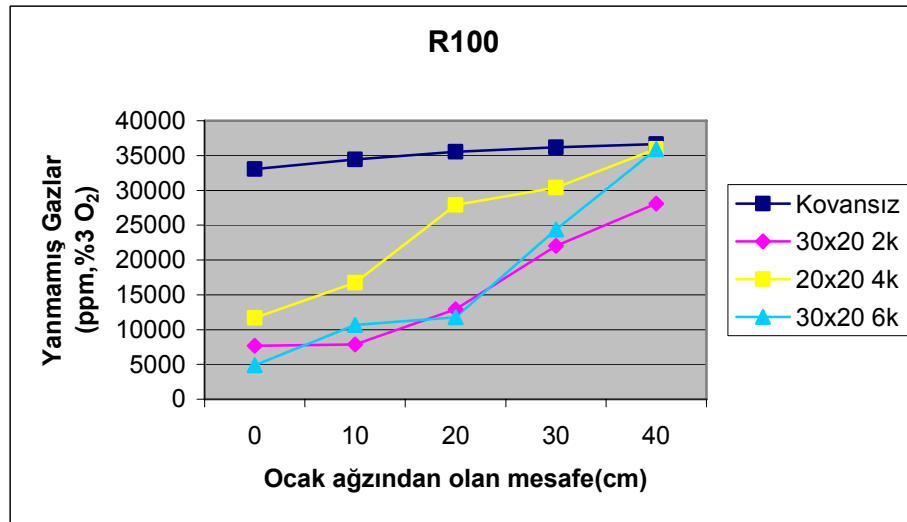
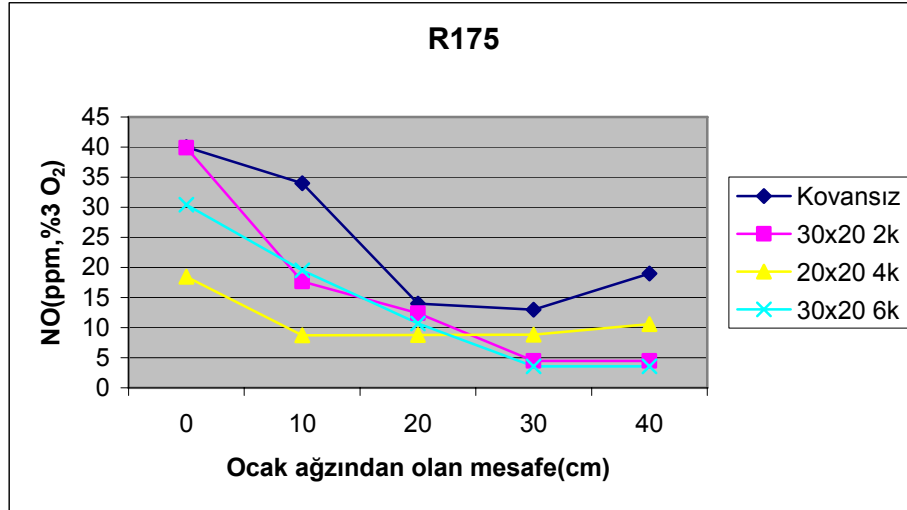
Şekil D.1: 116 kW kazan ısıl kapasitesinde hava fazlalık katsayısının 1.26 olduğu ve 30x20 kovan kullanıldığı durumda ocak içi sıcaklık ve emisyon değerleri



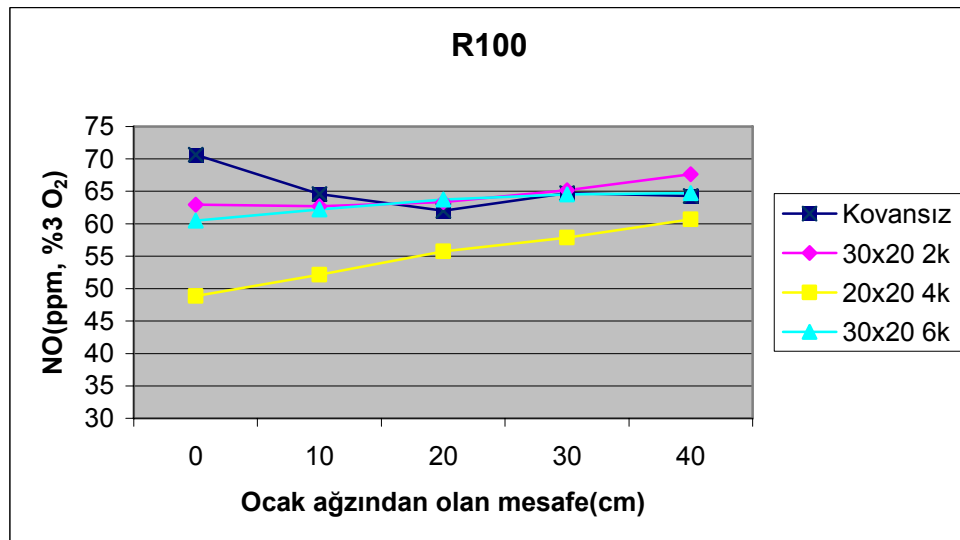
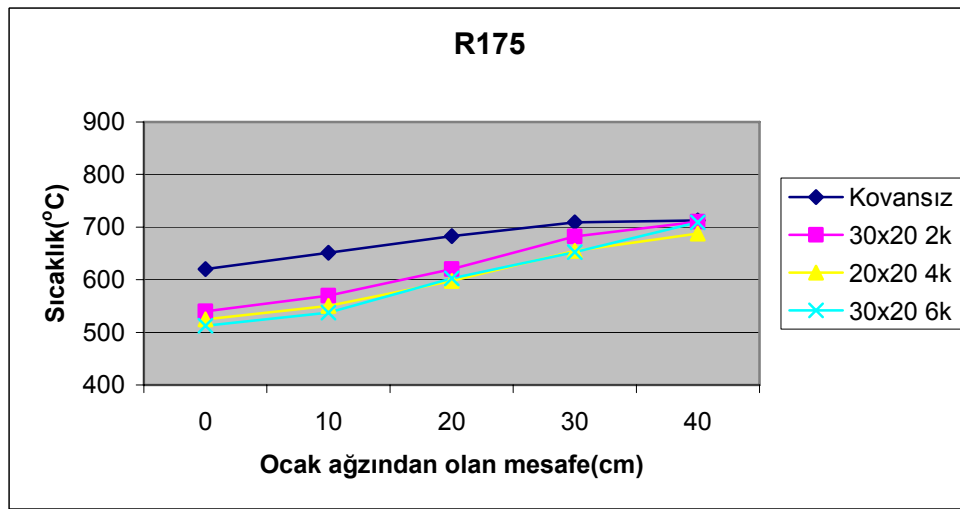
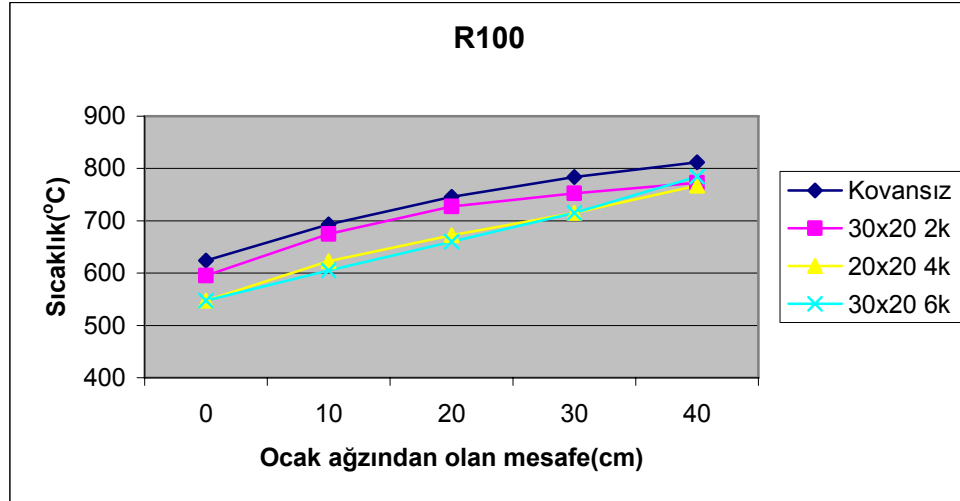
Şekil D.2: 116 kW kazan ısıt kapasitesinde hava fazlalık katsayısının 1.26 olduğu ve 30x20 kovan kullanıldığı durumda ocak içi sıcaklık ve emisyon değerleri(devam)



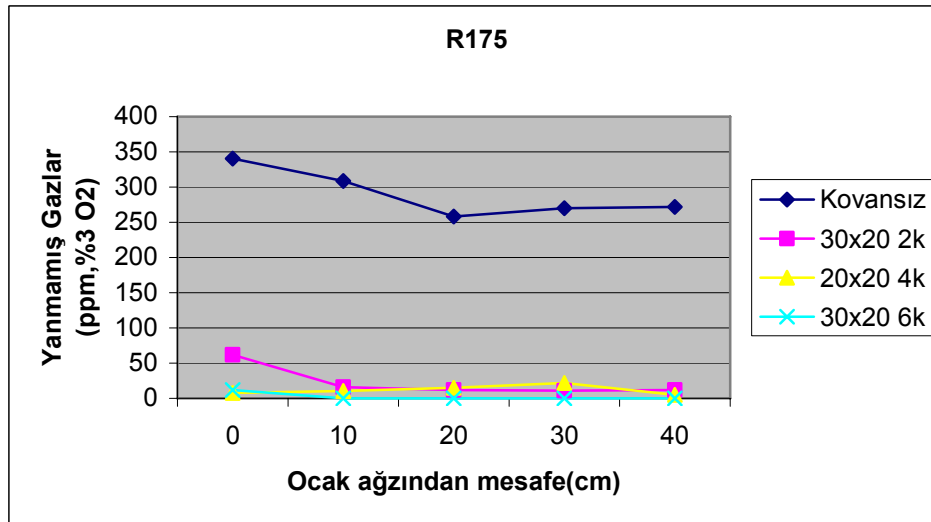
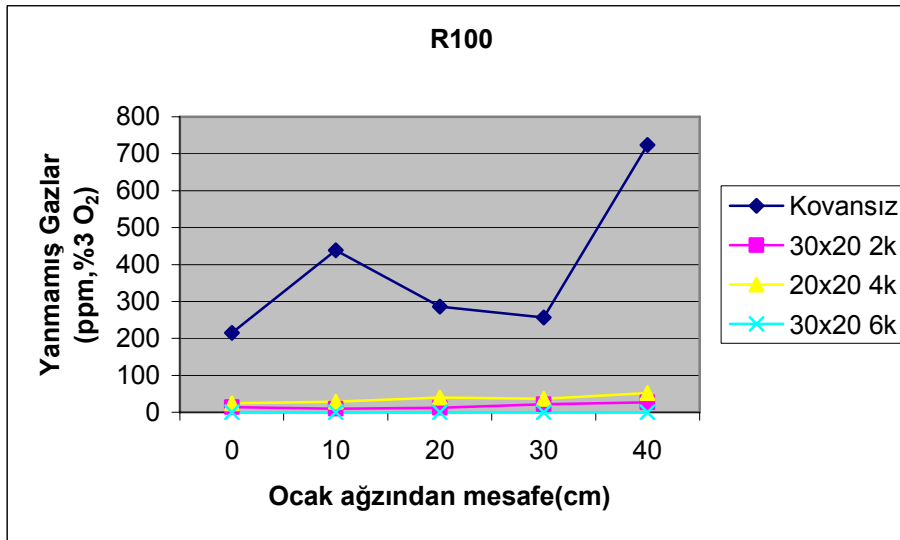
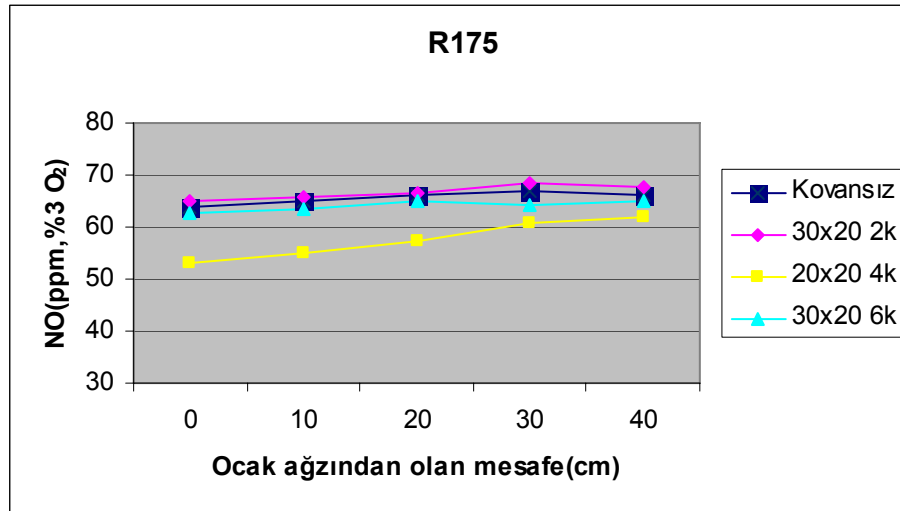
Şekil D.3: 116 kW kazan ısıt kapasitesinde hava fazlalık katsayısının 1.02 olduğu ve 30x20 kovan kullanıldığı durumda ocak içi sıcaklık ve emisyon değerleri



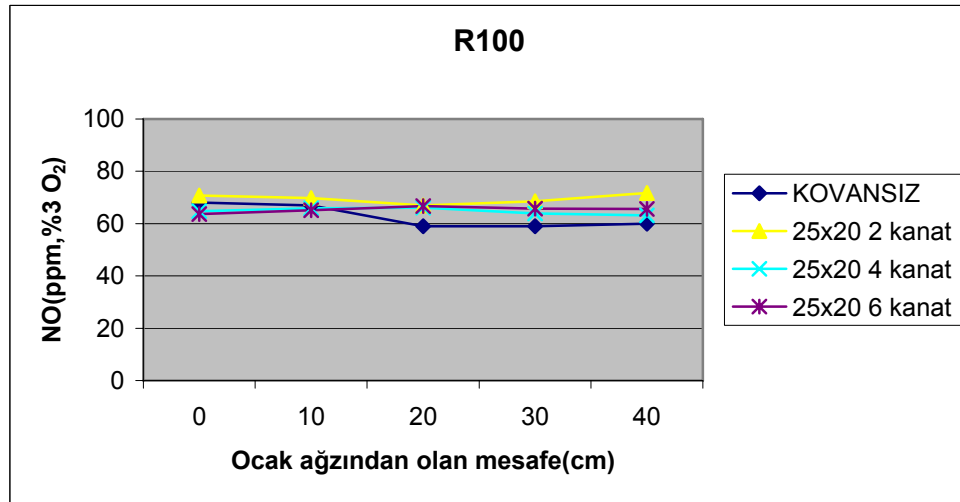
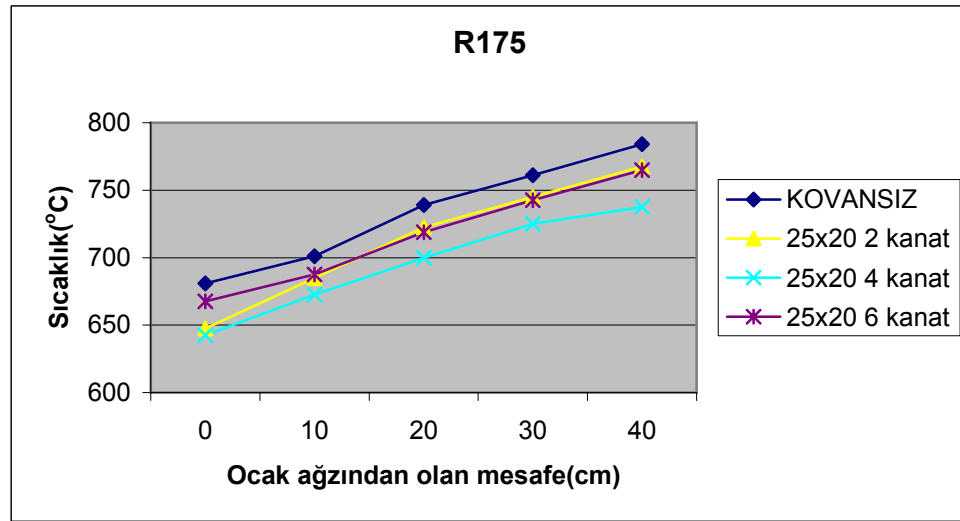
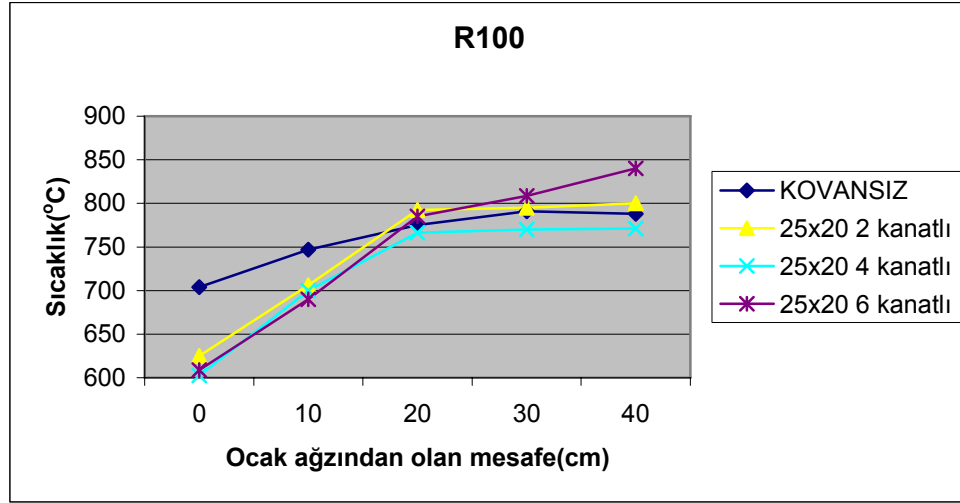
Şekil D.4: 116 kW kazan ısıtma kapasitesinde hava fazlalık katsayısının 1.02 olduğu ve 30x20 kovan kullanıldığı durumda ocak içi sıcaklık ve emisyon değerleri(devam)



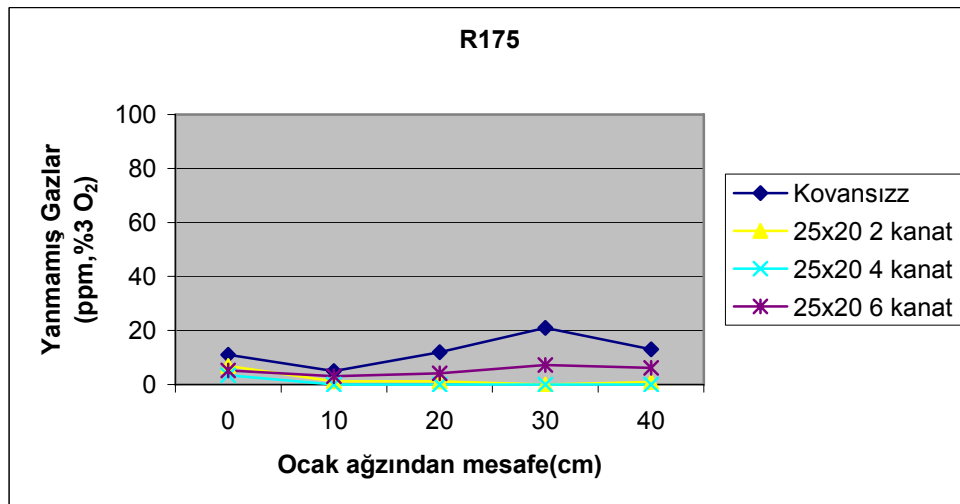
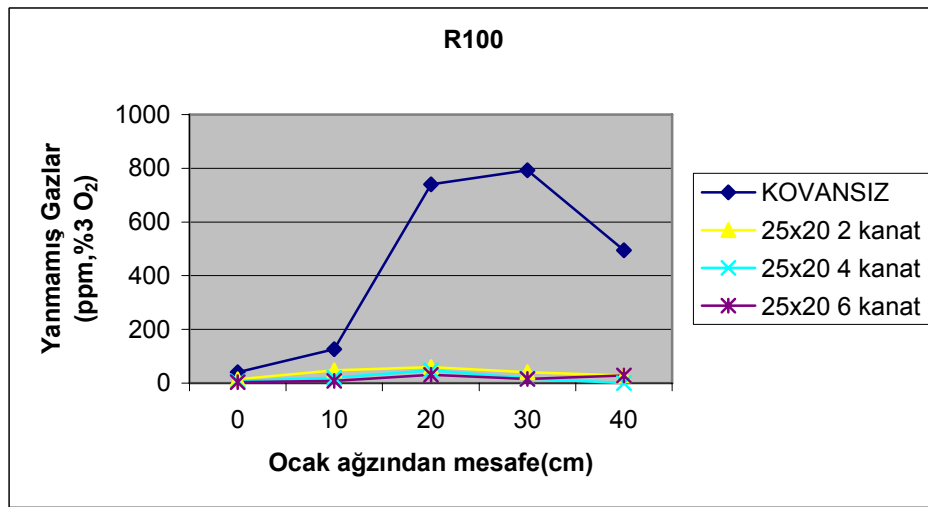
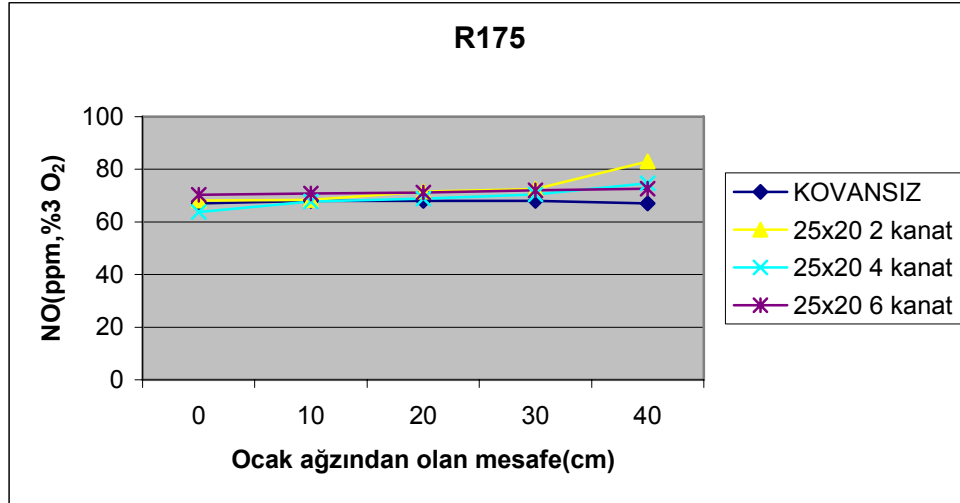
Şekil D.5: 87 kW kazan ısıtma kapasitesinde hava fazlalık katsayısının 1.26 olduğu ve 30x20 kovan kullanıldığı durumda ocak içi sıcaklık ve emisyon değerleri



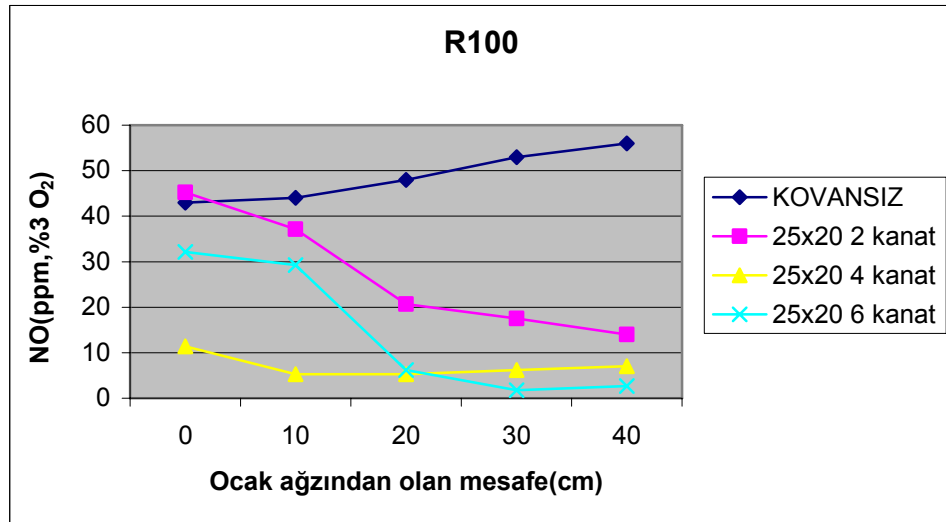
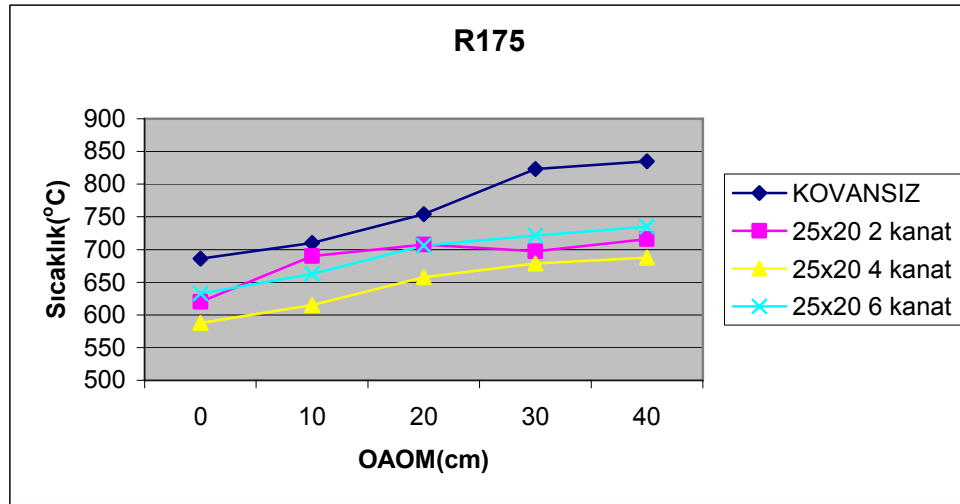
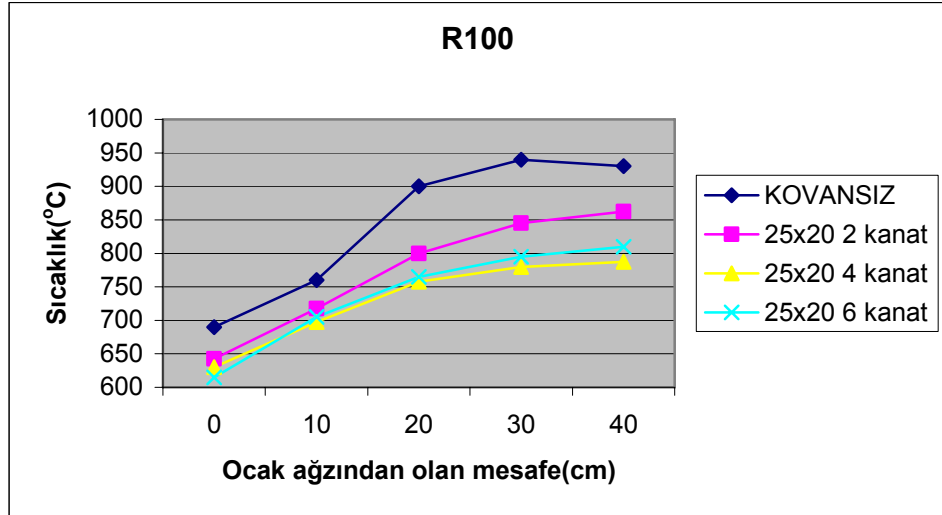
Şekil D.6: 87 kW kazan ısıl kapasitesinde hava fazlalık katsayısının 1.26 olduğu ve 30x20 kovan kullanıldığı durumda ocak içi sıcaklık ve emisyon değerleri(devam)



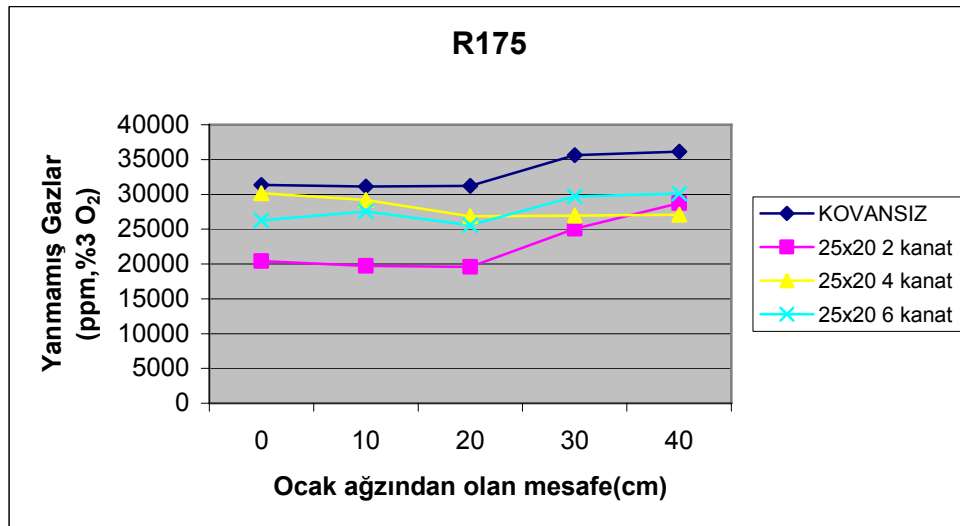
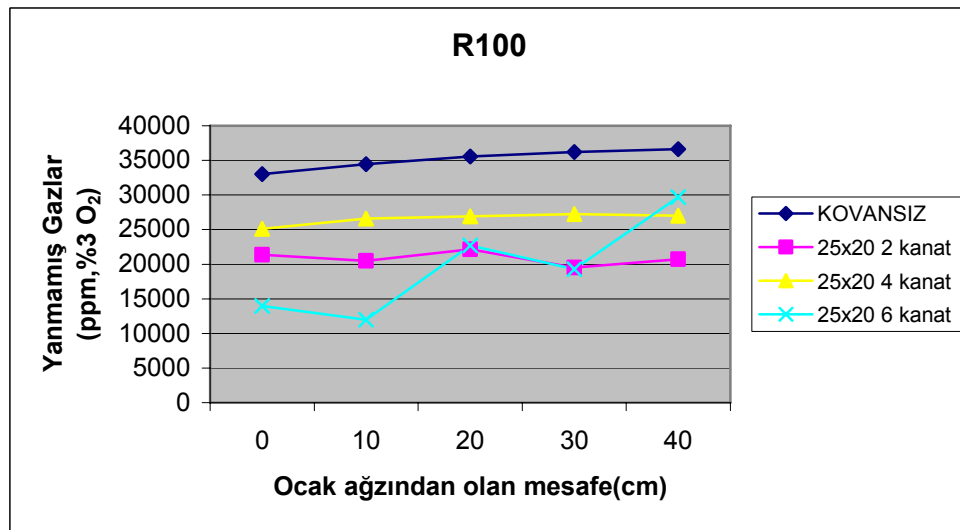
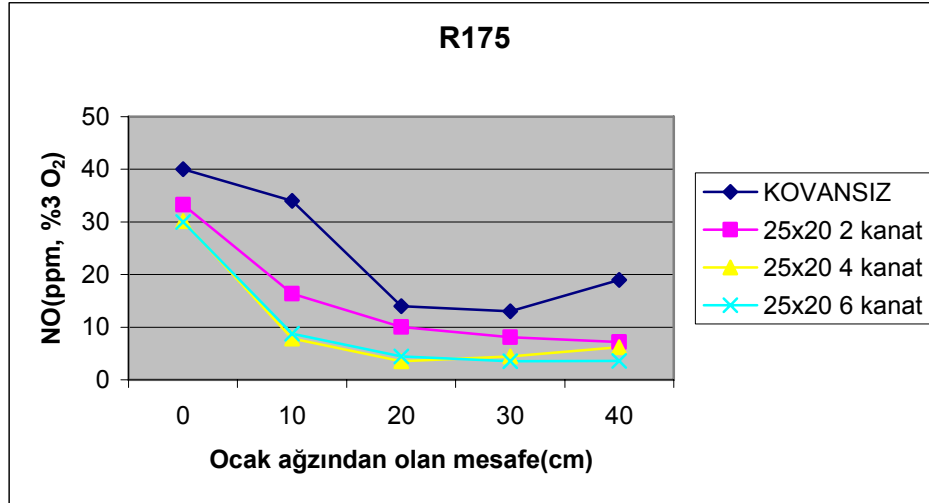
Şekil D.7: 116 kW kazan ısıtma kapasitesinde hava fazlalık katsayısının 1.26 olduğu ve 25x20 kovan kullanıldığı durumda ocak içi sıcaklık ve emisyon değerleri



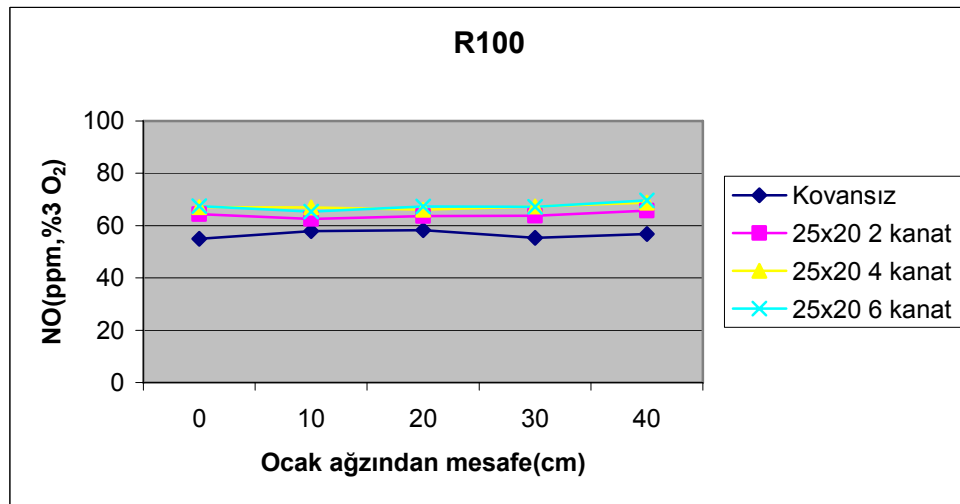
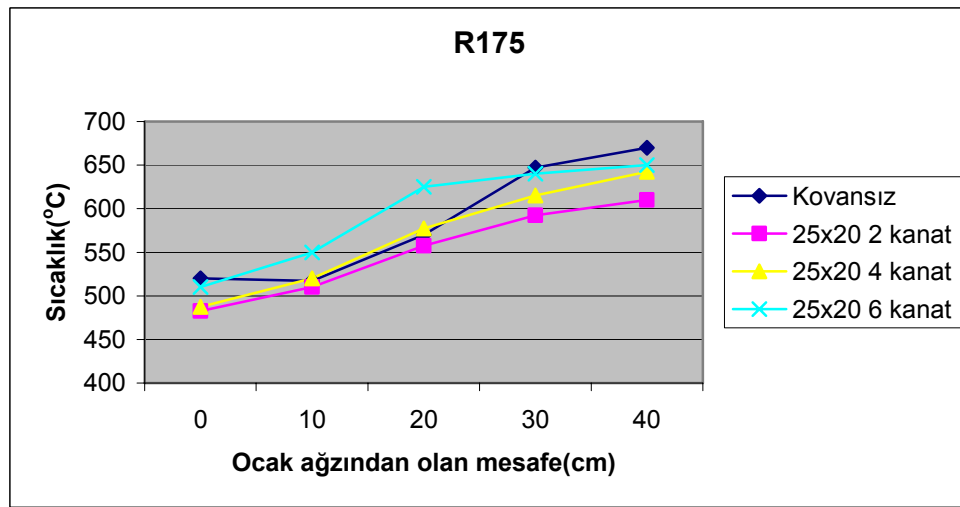
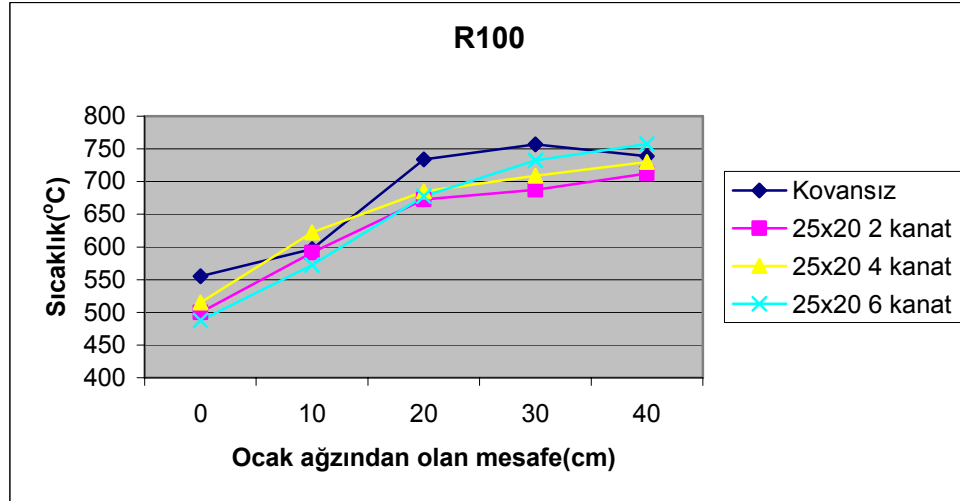
Şekil D.8: 116 kW kazan ısıt kapasitesinde hava fazlalık katsayısının 1.26 olduğu ve 25x20 kovan kullanıldığı durumda ocak içi sıcaklık ve emisyon değerleri(devam)



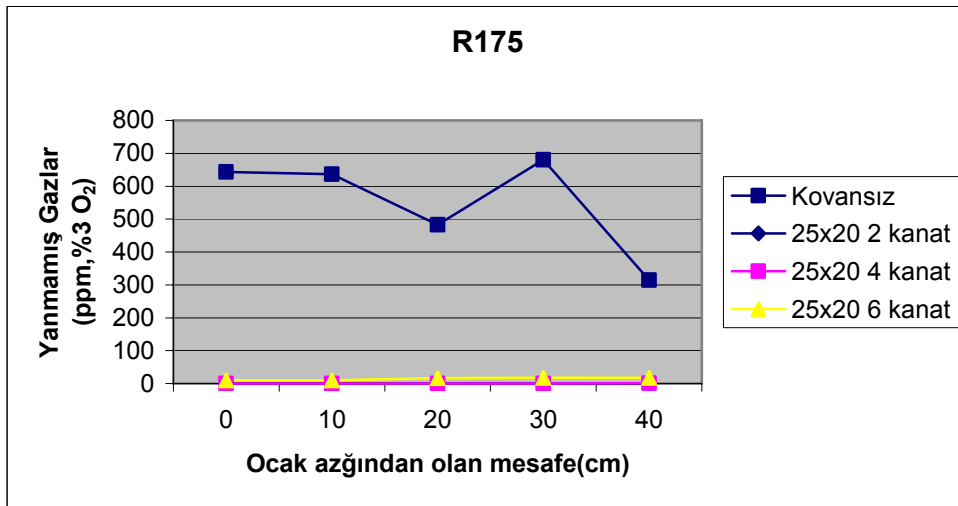
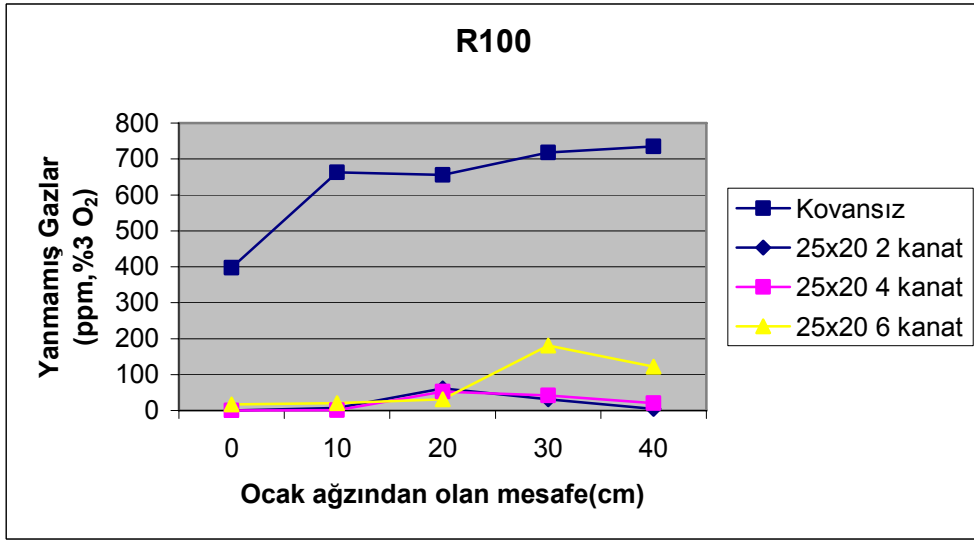
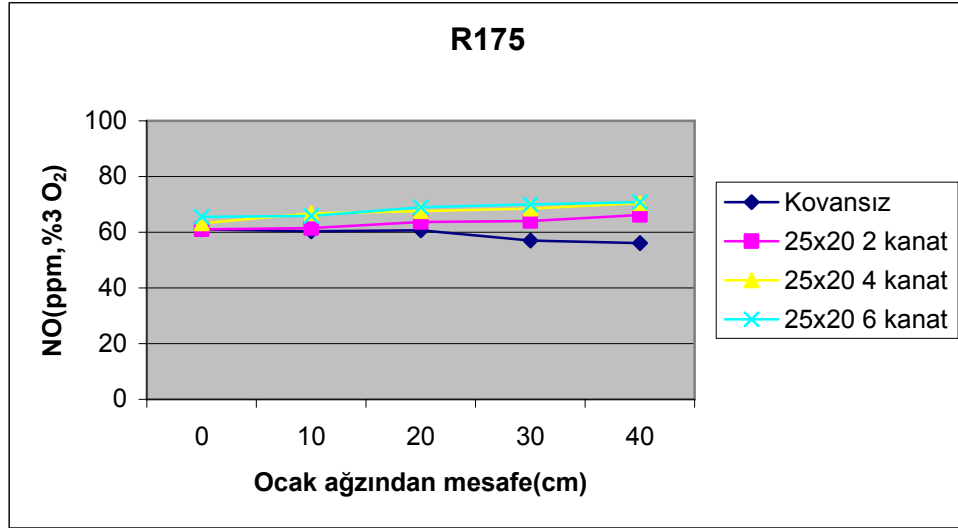
Şekil D.9:116 kW kazan ısıt kapasitesinde hava fazlalık katsayısının 1.02 olduğu ve 25x20 kovan kullanıldığı durumda ocak içi sıcaklık ve emisyon değerleri



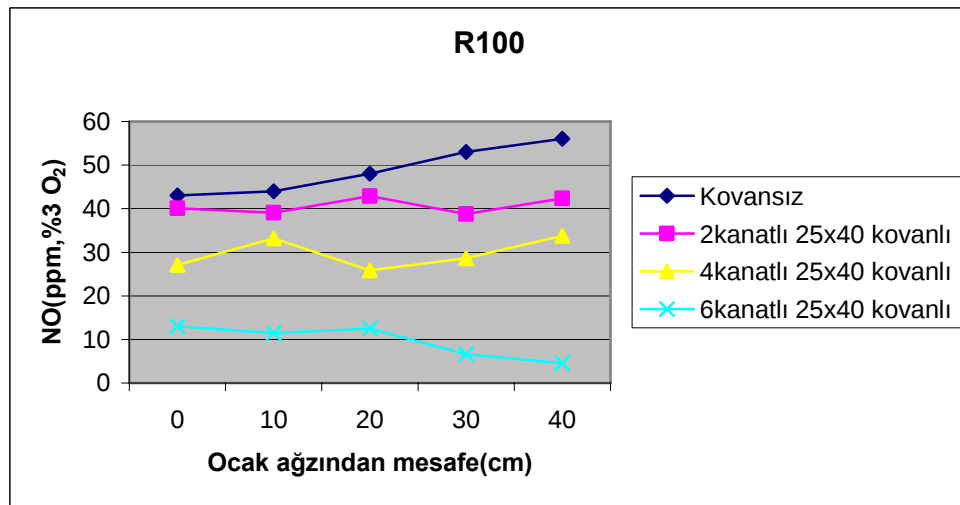
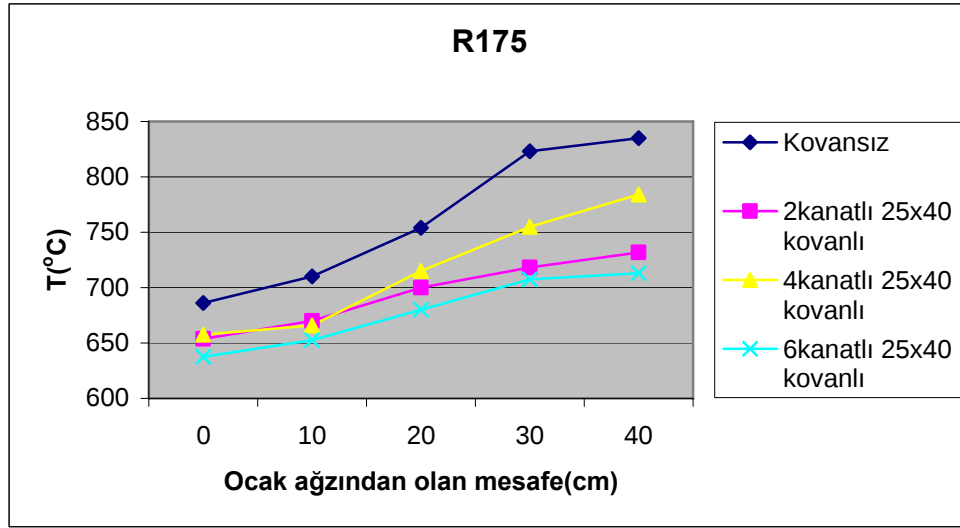
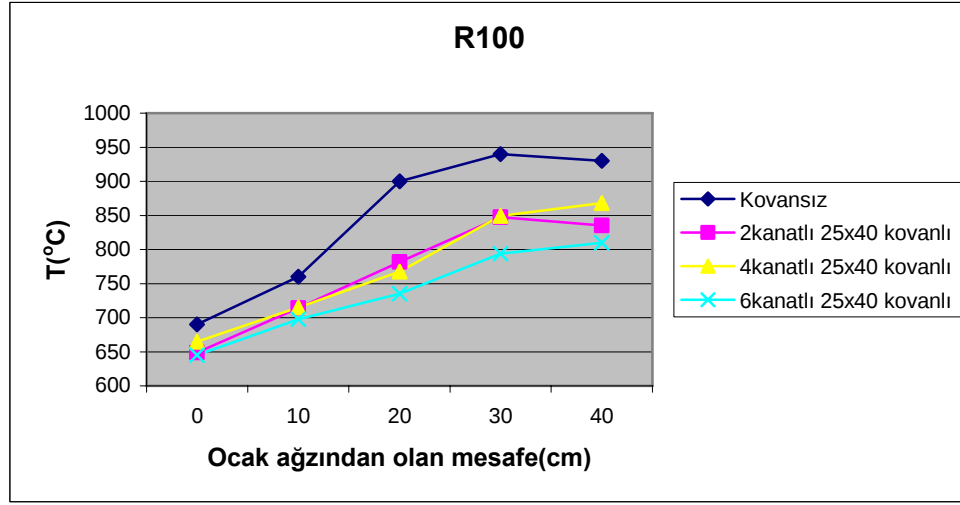
Şekil D.10:116 kW kazan ısıl kapasitesinde hava fazlalık katsayısının 1.02 olduğu ve 25x20 kovan kullanıldığı durumda ocak içi sıcaklık ve emisyon değerleri(devam)



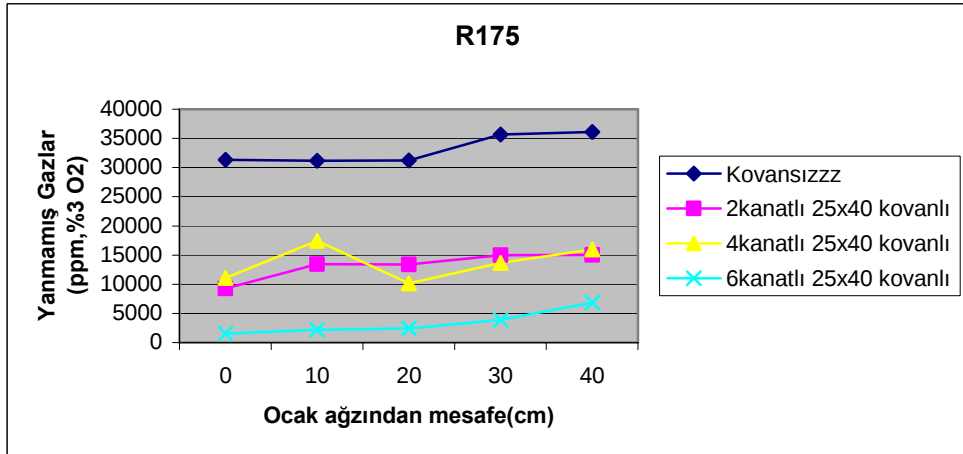
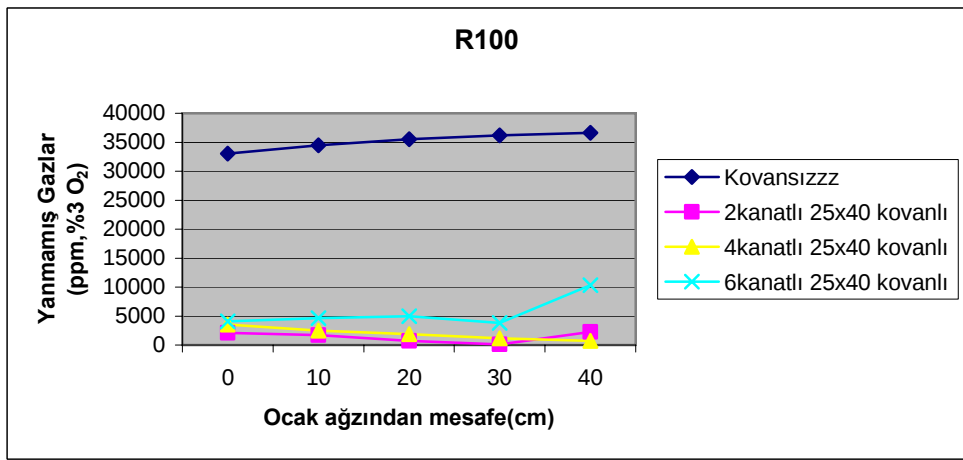
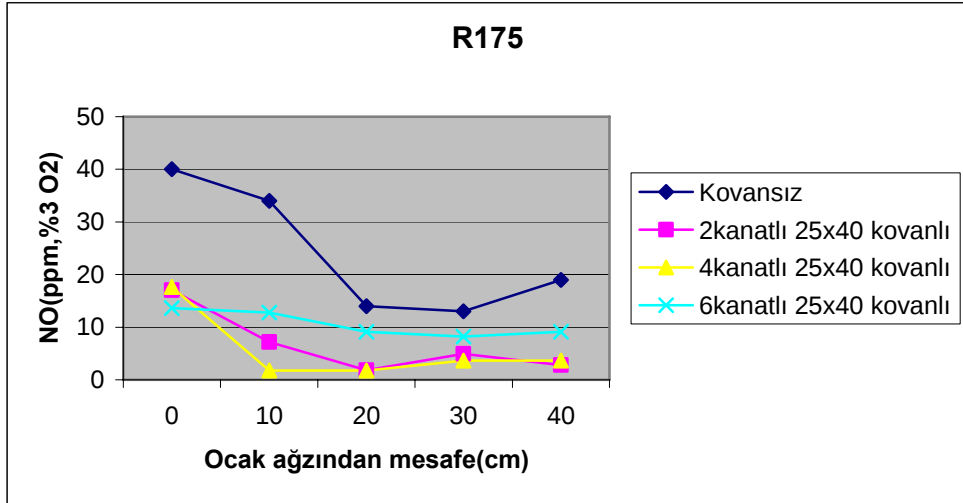
Şekil D.11: 58 kW kazan ısıl kapasitesinde hava fazlalık katsayısının 1.26 olduğu ve 25x20 kovan kullanıldığı durumda ocak içi sıcaklık ve emisyon değerleri



Şekil D.12: 58 kW kazan ısıl kapasitesinde hava fazlalık katsayısının 1.26 olduğu ve 25x20 kovan kullanıldığı durumda ocak içi sıcaklık ve emisyon değerleri(devam)



Şekil D.13: 116 kW kazan ısııl kapasitesinde hava fazlalık katsayısının 1.02 olduğu ve 25x40 kovan kullanıldığı durumda ocak içi sıcaklık ve emisyon değerleri



Şekil D.14: 116 kW kazan ısıl kapasitesinde hava fazlalık katsayısının 1.02 olduğu ve 25x40 kovan kullanıldığı durumda ocak içi sıcaklık ve emisyon değerleri(devam)

KAYNAKLAR

- Akgüngör, A. A.**, 2000. Doğal gaz yanması ve emisyon oluşumu, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Alemli, S.**,1998. Doğal gazın yanma mekanizmasının incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Altaç, Z.**, 1993, Nümerik Analiz, ESOGÜ Yayınları, Eskişehir.
- Ay, Z.**, 2002, Yapı Mühendisliğinde Sonlu Elemanlar Yöntemi, Isparta.
- Aydın, Ö.**, 2005. Gaz yakıtlı ocaklarda katı yüzeyin emisyonu ve verime etkisi, *Doktora Tezi*, ESOGÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Aydın, Ö.**, 2006. Kişisel görüşme.
- Ballester, J. M., Dopata, C., Fueyo, N.**, 1997, Investigation of low-NO_x strategies for natural gas combustion, *Fuel*, 76, 435-446.
- Ballester, M. J., Dopazo, C., Fueyo, N., Hernandez, M., Vidal, P. J.**, 1997, Investigation of low-NO_x 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.
- Bilgin, A.**, 2001. Kazanlarda baca gazı analizlerinin değerlendirilmesi, iç soğuma kayıplarının irdelenmesi, *V. Ulusal Tesisat Mühendisleri Kongresi ve Sergisi*, İzmir, Türkiye, Ekim 3-6.
- Bilgin, A.**, 2006, Kazanlarda enerji verimliliği, *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 95, 13-18.

- Bozkurt, G.**, 1994, Nükleer Santrallerin Elektrik Enerjisi Üretiminde Dünyü, Bugünü ve Yarını, *21 YY. Bütün Yönleri ile Enerji Sempozyumu*, İstanbul, Türkiye.
- Campbell, L. M., Stone, D. K., Shareef, G. S.**, 1991, Sourcebook, NO_x control technology data, Environment Protection Agency Research Triangle Park, NC.
- Cooper, C. D., Alley, F. C.**, 2002, Air pollution control: a design approach, Waveland Press, Illinois.
- Çavuş, M.**, 2006. Hava kaynaklı fan gürültüsünün sayısal modellemesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Çelik, Ü.**, 1992. Genel ve metan yanma proseslerinde azotoksit bileşenlerinin emisyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Çengel, Y. A., Boles, M. A.**, 1996, Mühendislik yaklaşımıyla Termodinamik, (Çev. T. Derbentli), McGraw –Hill, İstanbul.
- Çoğalan, F.**, 2003. Buji ateşlemeli motorlarda türbülanslı yanma mekanizması kullanılarak azot oksit emisyonlarının modellenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Dağsöz, A. K.**, 1997, Doğal gaz tanımı cihazları devreleri hesabı, Demirdöküm Teknik Yayınları : 3, İstanbul.
- Dolay, F. H.**, 2000. Bilgisayar destekli vantilatör tasarımı ve analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Dupont, V., Pourkashanian, M., Williams, A., Woolley, R.**, 1993, The reduction of NO_x formation in natural gas burner flame, *Fuel*, 72, 497-503.
- Eastern Research Group**, 1998, Emission factor documentation, Office of Planning and Standards, U.S. Environment Protection Agency Research Triangle Park, NC.

- Eastern Research Group**, 1999, Technical Bulletin-NO_x Why and How, U.S. Environment Protection Agency Research Triangle Park, NC.
- Ergün, A., Kumbasar, N.**, 2003, İnce plaklar için geliştirilmiş sonlu farklar yöntemi, *itüdergisi/d*, Cilt:2, Sayı:1, 35-44.
- Fluent Incorporated**, 2005, Fluent 6.1.22 User's Guide, USA.
- Fluent Incorporated**, 2005, Gambit 2.1 User's Guide, USA.
- Genceli, O. F.**, 2004, Çözümlü ısı ışıınımı problemleri, Birsen yayınevi, İstanbul.
- Hepbaşlı, A.**, 1991, Doğal gaz yakıtlı örnek bir tesiste duman gazı geri beslemesiyle azot oksit emisyonlarının azaltılması, *Isı Bilimi ve Tekniği 8. Ulusal Kongresi*, Eskişehir, Türkiye.
- <http://www.tu-darmstadt.de/fb/mb/ekt/flamebase/modeling/k-eps/>, Technische Universtat Darmstadt, 2007
- İlbas, M.**, 2005, The effect of thermal radiation and radiation models on hydrogen-hydrocarbon combustion modeling, *International Hydrogen Energy*, Vol.30, 1113-1126.
- İlbaş, M., Yılmaz, İ., Özkan, F.**, 2006, Gaz türbini yanma odasında hidrojen ve hidrokarbon yanmasının modellenmesi ve NO_x oluşumunun incelenmesi, *Mühendis ve Makina*, Cilt:47, Sayı:559.
- İlbaş, M., Yılmaz, İ., Yıldırım, A.**, 2003, Ocak sıcaklığının NO_x emisyonu üzerindeki etkisinin nümerik olarak incelenmesi, *Mühendis ve Makina*, Sayı : 524.
- İmren, A.**, 2005. Multidimensional modelling of combustion and pollution emissions in diesel engines, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- İncecik, S.**, 1994, Hava Kirliliği, İTÜ Kütüphanesi, İstanbul.
- Javed, M. T., Irfan, N., Gibbs, B. M.**, 2006, Control of combustion-generated nitrogen oxides by selective non-catalytic reduction, *Journal of Environment Management*, Review,1-39.

- Kadiroğlu, K.O., Sökmen, N.**, 1994, Nükleer Santrallar ile Elektrik Üretimi, *TÜBİTAK Bilim ve Teknoloji Dergisi*, Sayı:319.
- Kanury, A. M.**, 1994, Introduction to Combustion Phenomena, Gordon and Breach Science Publishers, Corvallis.
- 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.
- Kremer, H.**, 1982, Chemical and physical aspects of NO_x formation, *US- Dutch International Symposium on Air Pollution by Nitrogen Oxides*, Maastricht.
- Kurtılı, O.**, 2003. Simulation of radiant heating system using CFD(Fluent), *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Li, S. C., Williams, F. A.**, 1999, NO_x Formation in two-stage methane-air flames, *Combustion and Flame*, 118, 399-414.
- 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 CH₄ – air premixed flames, *Fuel*, 82, 1471-1475.
- Muzio, L. J., Quartucy, G. C.**, 1997, Implementing NO_x control: Research to application, *Prog. Energ. Combustion Science*, vol.23, 233-266.
- Nishimura, M., Suzuki, T., Nakanishi, R., Kitamura, R.**, 1997, Low NO_x Combustion under high temperature condition in an industrial furnace, *Energy Convers. Mgmt.*, Vol 38 No: 10-13, 1353-1363.
- Onat, K.**, 1969, Buhar kazanlarının ısı hesapları, İTÜ Kütüphanesi, İstanbul.
- Onat, K.**, 1997, Doğal gaz ısıtımının artırılması için bir öneri, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 18, 39-42.
- Onat, K., Genceli, O. F., Arısoy, A.**, 1998, Buhar kazanlarının ısı hesapları, Teknik Yayıncılık Tanıtım A.Ş., İstanbul.

- Özdoğan, A.**, 1998. NO_x emisyonları, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Öztürk, A., Yavuz, H.**, 1995, Uygulamalarla ısı geçişi : Tanıtım ve ısıtım, Çağlayan Kitabevi, İstanbul.
- Schneider, T., Grant, L.**, 1982, Air pollution by nitrogen oxides, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam-Oxford-NewYork.
- Suzukawa, Y., Sugiyama, S., Hino, Y., Ishioka, M., Isao, M.**, 1997, Improvement and NO_x reduction by highly preheated air combustion, *Energy Conver. Mgmt.*, Vol 38, 1061-1071.
- Taglia, C. D., Gass, J., Dreher, H.**, 2001, Optimization of a low- NO_x combustor chamber using CFD simulations, *Progress in Computational Fluid Dynamics*, vol.1, 117-130.
- Timur, L.**, 2003. Optimisation of heavy duty diesel engine cooling system using computer aided fluid dynamics(Fluent), *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- TS EN 676**, 2006, Brülörler–Otomatik üflemler–Gaz yakıtlar standardı, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Tucer, S.**, 2005. Katı yüzey ısıtım ile gaz yakıtlı ocaklarda ısı geçişinin artırılması, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Turns, S. R.**, 2000, An introduction to combustion, McGraw-Hill, Inc., New York.
- Turns, S. R.**, 1995, Understanding NO_x formation in nonpremixed flames : Experiments And Modeling, *Prog. Energy Combustion*, 21, 361-385.
- Türksoy, M.**, 2002. Taşıt iç geometrik parametre değişimlerine bağlı havalandırma optimizasyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Urashima, K.**, 1998, Reduction of NO_x from natural gas combustion flue gases by corona discharge radical injection techniques, *IEEE Transactions on Industry Appl.*, Vol.34 No.5.

- 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.
- Yetsan A.Ş.,**1995, NOx azaltma teknikleri, *Doğal Gaz Dergisi*, 40, 147-159.
- Yılmaz, İ., İlbaş, M.,** 2005, Experimental and Numerical Investigations of Methane Addition on Hydrogen Combustion in a Developed Combustor, Proceedings, *International Hydrogen Energy Congress and Exhibition IHEC 2005*, İstanbul, Türkiye, July 13-15.
- Yılmaz, Ş.,** 2001. Yanma odasının modellenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

ÖZGEÇMİŞ

Emre UĞURLUOĞLU 1983 yılında Eskişehir’de doğdu. 2001 yılında Eskişehir Anadolu Lisesi’ni bitirdikten sonra aynı yıl Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesinde Makina Mühendisliği eğitime başladı. 4 yıllık üniversite eğitiminin ardından 2005 yılında makine mühendisi ünvanı alarak mezun oldu. Aynı sene, eğitime İTÜ Fen Bilimleri Fakültesi, Makina Mühendisliği anabilim dalı, Isı Akışkan programında yüksek lisans ile devam etti. Mayıs 2007’de tez çalışmasını tamamladı.