

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SABİT YATAKLI YAKMA SİSTEMLERİNDE YANMADA
KÖMÜR NEMİNİN EMİSYONLARA ETKİSİNİN DENEYSEL
İNCELENMESİ**

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMENTASYON MERKEZİ**

**DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Nalan ERDÖL AYDIN
506932015**

112339

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 2 Nisan 2000

Tezin Savunulduğu Tarih : 29 Kasım 2000

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Hasancan OKUTAN

Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Ekrem EKİNCİ (İ.T.Ü.)

Prof.Dr. Ahmet ARISOY (İ.T.Ü.)

Prof.Dr. Dursun PEHLİVAN (F.Ü.)

Prof.Dr. Ali DURMAZ (G.Ü.)

KASIM 2000

ÖNSÖZ

Kömür, günümüzde güncelliğini koruyan temel enerji kaynaklarından biridir. Kömürün temel karakteristik özelliklerinden nem, tüm kömür operasyonlarını etkileyen önemli bir bileşendir. Kömürleşme derecesi azaldıkça kömürün nem içeriği artmaktadır. Taşkömürü %1-3, kömürleşme sürecini henüz tamamlamamış kömürler ise %30-70 aralığında nem içeriğine sahiptirler.

Sabit yataklı yakma sistemlerinde kömür neminin emisyonlara etkisinin incelendiği bu çalışmada, deneyler üç farklı yakma sisteminde gerçekleştirilmiştir. Yakma sistemleri otomatik, hava kontrollü, sekonder hava beslemeli ve hava kontrolsüz, elle yüklemeli iki sıcak su kazanı ve sobadır. Yanma deneyleri, Orijinal Y.Ağaçlı, G.Afrika, bu iki kömürün karıştırılması ile oluşturulan Harman kömür, Soma ve Y.Ağaçlı kömürünün farklı nem içeriklerine kurutulması ile oluşturulan kömürlerle yapılmıştır. Yanma sırasında kömürdeki nemin gaz ve toz emisyonlara etkisinin yanında yakma sistemlerinde kazan verimi ve ısı gücü hesaplanmıştır. Ayrıca yanma koşulları incelenerek, hava kontrollü ve kontrolsüz kazanlarda yanma davranımları karşılaştırılmıştır. Her üç yakma sistemi mukayese edilerek, hava ve çevre kalitesi açısından uygun yakıt ve yakma sistemlerinin seçilmesinin kaçınılmaz olduğu tespit edilmiştir.

Tez çalışmam boyunca değerli bilgileriyle katkıda bulunan, her türlü yardım ve desteğini esirgmeden yoğun çalışma temposu içerisinde güncel bir konuda çalışma olanağı veren, tez danışmanım, değerli hocam Sn. Prof.Dr. Hasancan OKUTAN' a ve değerli bilgileri, yapıcı eleştirileriyle beni yönlendiren ve her zaman yol gösterici olan değerli hocam Sn. Prof.Dr. Ekrem EKİNCİ' ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam sırasında yapmış oldukları destek ve katkılarından dolayı MİLTEN Müteahhitlik, Hafriyat ve Ticaret Ltd.Şti.' ne ve İTÜ, Kimya-Metalurji Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Temel İşlemler Anabilim Dalı' ndaki çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olan, bugünlere gelmemde katkıları ve emekleri ifade edilemeyecek kadar çok sevgili aileme sonsuz sevgilerimi ve teşekkürlerimi sunarım. Tezime verdiği emek, sarfettiği zaman, gösterdiği sabır ve ilgi için sevgili eşim Kemal AYDIN' a çok teşekkür ederim.

Sevgili kardeşim Neşe' ye ithafla,

Kasım, 2000

Nalan ERDÖL AYDIN

İÇİNDEKİLER

TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	xiv
ÖZET	xv
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. KÖMÜRÜN YANMASI VE YANMA MEKANİZMASI	7
2.1. Giriş	7
2.2. Fosil Yakıtlar, Yanma ve Yanmayı Etkileyen Faktörler	10
2.2.1. Fosil Yakıtların Oluşumu ve Yanma	10
2.3. Yanmayı Etkileyen Faktörler	12
2.3.1. Yanmayı Etkileyen Yakıt Boyutlu Faktörler	13
2.3.2. Yanmayı Etkileyen Yakma Sistemi Boyutlu Faktörler	15
2.3.3. Yanmayı Etkileyen İşletme Boyutlu Faktörler	16
2.4. Kömürün Yanması ve Yanma Mekanizması	17
2.4.1. Kömürün Homejenleştirilmiş Yanma Mekanizması	17
2.4.1.1. Homojen Yanmanın Hazırlık Aşaması ve Karışım Koşulu	19
2.4.1.2. Homojen Yanmanın Başlama (Tutuşma) Aşaması ve Sıcaklık Koşulu	19
2.4.1.3. Homojen Yanma Aşaması ve Zaman Koşulu	22
2.4.2. Kömürün Heterojen Yanma Mekanizması	23
2.4.2.1. Kömür-Hava Karışımı ve Yanıcı Gaz Karışımı Oluşturulması	23
2.4.2.2. Kömürün Heterojen Tutuşması	28
2.4.2.3. Heterojen Kömür Yanması ve Yanmanın Tamamlanması	30
2.5. Yanma Sonucu Oluşan Emisyonların Etkileri	31
2.6. Yakma Sistemleri	34
2.6.1. Izgara Üzerinde Yakma	35
2.6.1.1. Sabit Izgaralı Yakma Sistemleri	38
2.6.1.2. Sonsuz Zincirli Döner Izgaralı Yakma Sistemleri	39
2.6.1.3. Yatak Gevşetme Etkili, Eğik Izgaralı Yakma Sistemleri	40
2.6.2. Hacimde Yakma	40
2.6.3. Akışkan Yatakta Yakma	41
2.7. Kömürün Yanma Özellikleri	41
2.7.1. Kömürün Yapısı	41
2.7.2. Uçucu Madde Çıkışı	42
2.7.3. Kömürün Şişmesi	42
2.7.4. Yüzey Tepkimeleri	43

2.7.5. Difüzyon Etkileri	43
2.7.6. Uçucu Madde Yanması	44
2.8. Ağaçlı Kömürü	45
3. KÖMÜRDEKİ NEM TÜRLERİ VE DAVRANIMLARI	49
3.1. Kömürde Nem	49
3.2. Kömürde Porozite	50
3.2.1. Gözenek Nemi ve Toplam Porozite	51
3.2.2. Kömürdeki Poroziteye İlişkin Değişken Tanımlamalar ve Yapılan Çalışmalar	54
3.3. Kömür Bünyesinde Bulunan Nem ve Türlerine İlişkin Değişken Tanımlamalar	59
3.4. Kömürdeki Nemin Uçucu Madde Çıkış Mekanizmasına Etkileri	64
3.5. Kömür Neminin İnce Partiküllerin Yanmasına Etkisi	65
3.6. Kömürdeki Nemin Kok Fırınlarında Karbon Birikimi Oluşumuna Etkisi	66
3.7. Nemin Yanma Sırasında Verim ve Emisyona Etkisi	67
3.8. Nemin Kömürün Kendiliğinden Yanması Olayı Üzerine Etkisi	68
3.9. Nemin Briketleme İşlemi Üzerine Etkisi	70
3.10. Nemin Kömürün Gazlaştırılması İşlemi Üzerine Etkisi	71
3.11. Nemin Kömürün Akışkan Yatakta Sürüklenmesine Etkisi	73
3.12. Kömürün Nemini Belirleme Metodları	73
3.12.1. Fırında Kurutma Metodu	74
3.12.2. Distilasyon Metodu	74
3.12.3. Hızlı Nem Belirleme Tekniği	74
4. DENEYSEL ÇALIŞMA	76
4.1. Deneylerde Kullanılan Kömürler	76
4.2. Kömür Kurutma Düzeneği	77
4.3. Kullanılan Analiz Yöntemleri ve Cihazlar	77
4.3.1. Kısa Analiz	77
4.3.2. Isıl Değer	79
4.3.3. Kükürt Tayinleri	79
4.4. Kömür Analizlerine Ait Sonuçlar	79
4.5. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Yakma Sistemleri	79
4.5.1. Kazan Deney Tesisatı	79
4.5.2. Elle Yükleme, Sabit Izgaralı Sıcak Su Kazanı	82
4.5.3. Otomatik, Hava Kontrollü Sıcak Su Kazanı	82
4.5.4. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Soba	84
4.6. Yanma Deneylerinin Yürütülmesi	86
4.6.1. Elle Yükleme, Sabit Izgaralı Sıcak Su Kazanında Yanma Deneylerinin Yürütülmesi	87
4.6.2. Otomatik, Hava Kontrollü Sıcak Su Kazanında Yanma Deneylerinin Yürütülmesi	88
4.6.3. Sobada Yanma Deneylerinin Yürütülmesi	88
4.7. Emisyon Ölçümleri	89
4.7.1. Kullanılan Cihazlar ve Ölçüm Yöntemleri	89

4.8. Isıl Verim ve Isıl Gücün Hesaplanması	92
5. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME	95
5.1. Elle Yükleme, Sabit Izgaralı Sıcak Su Kazanında Yapılan Yanma Deneyleri	96
5.1.1. Birinci Grup Yanma Deneylerinin Sonuçları	97
5.1.2. Birinci Grup Yanma Deneylerinin Değerlendirilmesi	102
5.1.3. İkinci Grup Yanma Deneylerinin Sonuçları	110
5.1.4. İkinci Grup Yanma Deneylerinin Değerlendirilmesi	113
5.2. Otomatik, Hava Kontrollü Sıcak Su Kazanı ve Elle Yükleme, Sabit Izgaralı Sıcak Su Kazanında Yapılan Yanma Deneyleri	118
5.2.1. Otomatik, Hava Kontrollü Sıcak Su Kazanı ve Elle Yükleme, Sabit Izgaralı Sıcak Su Kazanı Deneylerinde Elde Edilen Karakteristik Büyüklükler	124
5.2.2. Otomatik, Hava Kontrollü Sıcak Su Kazanı ve Elle Yükleme, Sabit Izgaralı Sıcak Su Kazanında Yanma Deneyleri Sonuçlarının Değerlendirilmesi	130
5.3. Soba Deneylerine Ait Sonuçlar	137
5.3.1. Soba Deneylerinde Elde Edilen Karakteristik Büyüklükler	139
5.3.2. Soba Deneylerine Ait Sonuçların Değerlendirilmesi	142
5.4. Literatür Bilgileri Işığında Tüm Yanma Deneylerinin ve Emisyonların Değerlendirilmesi	145
6. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER	156
KAYNAKLAR	160
EKLER	170
Ek A. 1. Grup Yanma Deneylerine Ait Şekiller	170
Ek B. 2. Grup Yanma Deneylerine Ait Şekiller	186
Ek C. 3. Grup Yanma Deneylerine Ait Şekiller	199
Ek D. 4. Grup Yanma Deneylerine Ait Şekiller	224
ÖZGEÇMİŞ	243

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Türt Linyitlerinin Ortalama Özellikleri	2
Tablo 1.2. Linyitlerimizin Nem Miktarlarına Göre Gruplanışları	3
Tablo 1.3. Yanmadan Kaynaklanan Kirleticiler	4
Tablo 1.4. Kömür Nemindeki Değişimin Tanecik Yayınımı Üzerine Etkisi.....	6
Tablo 2.1. Bazı Yanıcı Gazların ve Sıvı Yakıtların Tutuşma Sıcaklıkları.....	20
Tablo 2.2. Bazı Gazların ve Teknik Yakıtların Tutuşma Sınırları ve Tutuşma Hızları.....	21
Tablo 2.3. Bazı Katı Yakıtların Tutuşma Sıcaklıkları.....	29
Tablo 2.4. Kükürtdioksitin Hava Kalitesi Kriterleri ve İnsan Sağlığı Üzerinde Yaptığı Olumsuz Etkiler.....	32
Tablo 2.5. Kabonmonoksidin Etkileri.....	33
Tablo 2.6. Yakma Sistemleri ve Özellikleri.....	35
Tablo 2.7. Kömür Yakma, Uygulama ve Yöntemleri.....	38
Tablo 2.8. Kilyos-Karaburun Bölgesi Madencilik Çalışmaları Kimliği..	47
Tablo 2.9. Tahmini Rezerv Miktarlarının Dinamik Ömrü.....	47
Tablo 3.1. Patlamaya Eğilimli Olan ve Olmayan Kömürlerde Kapalı Porozite Hacmi.....	57
Tablo 3.2. Türkiye’ deki Bazı Kömürlerin Nem ve Alt Isıl Değerleri....	60
Tablo 3.3. Kömürde Yüksek Nem Oranının Uçucu Madde Çıkışına Olan Olası Bazı Etkileri.....	65
Tablo 4.1. Yanma Deneylerinde Kullanılan Kömürlerin Analizleri	80
Tablo 4.2. Azim Kazana Ait Bilgiler.....	82
Tablo 4.3. Fischer Marka Kazanın Teknik Verileri ve Boyutları.....	84
Tablo 5.1. Fischer ve Azim Kazana Ait Karakteristik Sonuçlar.....	125
Tablo 5.2. Soba Deneylerine Ait Karakteristik Sonuçlar.....	139

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1. : Bir Buhar Kazanın Genel Sistem Yapısı ve Bağlantı Şeması.....	8
Şekil 2.2. : Birim Isı Maliyeti ve Maliyet Optimizasyonu.....	9
Şekil 2.3. : Fosil Yakıtların Oluşumu, Biyolojik Yanma, Teknik Yanma ve Emisyonlar.....	11
Şekil 2.4. : Bazı Yanıcı Gazların ve Teknik Yakıtların Laminer Alev Hızları ve Tutuşma Bölgeleri.....	21
Şekil 2.5. : Bir Kömür Taneciğinin Gazlaşması, Yanması ve Yanma Ürünleri.....	25
Şekil 2.6. : Bir Kok Taneciğinin 950°C' nin Üzerindeki Sıcaklıklarda Gazlaşması ve Yanması.....	26
Şekil 2.7. : Bir Kömür Taneciğinin Gazlaşması ve Tutuşması İçin Gerekli İç Tüketim Enerjisi.....	27
Şekil 2.8. : Yanıcı Uçucu (V) Oranına Göre, Öğütülmüş Kömürün Tutuşma Sıcaklığının Değişimi.....	29
Şekil 2.9. : Toz Kömür Tutuşma Sıcaklığının (T_T) Ortalama Kömür Tane Büyüklüğüne Bağlı Olarak Değişimi.....	30
Şekil 2.10. : Yakma Üçgeni	34
Şekil 2.11. : Izgaralı Yakma Sistemleri	37
Şekil 2.12. : Sabit Izgarada Yakma Biçimleri	39
Şekil 3.1. : Kömür Yapısının Şematik Görünümü	52
Şekil 3.2. : V_T (toplam por hacmi) ve IM (gözenek nemli) Arasındaki Bağntı	53
Şekil 3.3. : Farklı Ranklı Kömürler İçin Por Boyut Dağılımı.....	54
Şekil 3.4. : Kömürün Poröz Yapısında Çatlaklar, Açık ve Kapalı Porların Görünüşü	55
Şekil 3.5. : Kömürün Nem İçeriği	61
Şekil 3.6. : Isıl İşlem Öncesi ve Sonrası Kömür Bünyesinde Suyun Davranımı.....	62
Şekil 3.7. : Değişik Ranklı Kömürlere Ait Nem Giderme Sonrası Hacimsel Büzülme	64
Şekil 3.8. : Beulah Linyitinde Nem Giderme Sonrası İki Farklı Sıcaklıktaki Hacimsel Büzülme	64
Şekil 3.9. : Beş Farklı Kömür İçin Nem Tayininde Mikrodalga ve Fırında Kurutma Yöntemleri Arasındaki Korelasyon	75
Şekil 4.1. : Kömür Kurutma Cihazı Üstten Görünüşü	78
Şekil 4.2. : Kömür Kurutma Cihazı Önden Görünüşü	78
Şekil 4.3. : Yanma Deneylerinde Kullanılan Kazan Düzeneği	81
Şekil 4.4. : Azim Kazanın Şematik Görünüşü.	83
Şekil 4.5. : Fischer Kazanın Şematik Resmi ve Kısımları	85

Şekil 4.6.	: Deneylerde Kullanılan Sobanın Şekli	86
Şekil 4.7.	: Kazana Ait Baca ve Numune Alma Yerinin Konumu	90
Şekil 4.8.	: Andersen Universal Numune Alma Sistemi	91
Şekil 5.1.	: Azim Kazan Deneylerinde CO Emisyonları Değişimi (1.Grup, 1. ve 2. Yükleme)	103
Şekil 5.2.	: Azim Kazan Deneylerinde SO₂ Emisyonları Değişimi (1.Grup, 1. ve 2. Yükleme)	106
Şekil 5.3.	: Azim Kazan Deneylerinde NO_x Emisyonları Değişimi (1.Grup, 1. ve 2. Yükleme)	107
Şekil 5.4.	: Azim Kazan Deneylerinde Ortalama Baca Gazı Sıcaklıkları (1.Grup, 1. ve 2. Yükleme)	109
Şekil 5.5.	: Azim Kazan Deneylerinde Toz Emisyonlarının Kümülatif Yayınım Değerleri (1.Grup, 1. ve 2. Yükleme)	109
Şekil 5.6.	: Azim Kazan Deneylerinde CO Emisyonları Değişimi (2.Grup, 1. ve 2. Yükleme)	114
Şekil 5.7.	: Azim Kazan Deneylerinde SO₂ Emisyonları Değişimi (2.Grup, 1. ve 2. Yükleme)	116
Şekil 5.8.	: Azim Kazan Deneylerinde NO_x Emisyonları Değişimi (2.Grup, 1. ve 2. Yükleme)	117
Şekil 5.9.	: Azim Kazan Deneylerinde Ortalama Baca Gazı Sıcaklıkları (2.Grup, 1. ve 2. Yükleme)	119
Şekil 5.10.	: Azim Kazan Deneylerinde Toz Emisyonlarının Kümülatif Yayınım Değerleri (2.Grup, 1. ve 2. Yükleme)	119
Şekil 5.11.	: Yakıt Alt Isıl Değerinin Kömür Cinsine Göre Değişimi (3.Grup)	126
Şekil 5.12.	: Kazan Kapasitesini Kömür Cinsine Göre Değişimi (3.Grup)	126
Şekil 5.13.	: Yakıt Sarfiyatının Kömür Cinsine Göre Değişimi (3.Grup)	126
Şekil 5.14.	: Hava Fazlalık Katsayısının Kömür Cinsine Göre Değişimi (3.Grup)	127
Şekil 5.15.	: Baca Gazı Ortalama Sıcaklığının Kömür Cinsine Göre Değişimi (3.Grup)	127
Şekil 5.16.	: Kazan Veriminin Kömür Cinsine Göre Değişimi (3.Grup)	127
Şekil 5.17.	: Boyutsuz Yakıt Sarfiyatının Kömür Cinsine Göre Değişimi (3.Grup)	129
Şekil 5.18.	: Boyutsuz Kazan Kapasitesinin Kömür Cinsine Göre Değişimi (3.Grup)	129
Şekil 5.19.	: Fischer ve Azim Kazanda Yapılan Deneylerde CO Emisyonlarının Değişim (3.Grup).....	131
Şekil 5.20.	: Fischer ve Azim Kazanda Yapılan Deneylerde SO₂ Emisyonlarının Değişim (3.Grup).....	132
Şekil 5.21.	: Fischer ve Azim Kazanda Yapılan Deneylerde NO_x Emisyonlarının Değişim (3.Grup).....	134
Şekil 5.22.	: Fischer ve Azim Kazan Deneylerinde Toz Emisyonların Kümülatif Yayınım Değerleri (3.Grup).....	135
Şekil 5.23.	: Alttan (a) ve Üstten (b) Besleme Yöntemleri.....	137
Şekil 5.24.	: Kazan Kapasitesinin Kömür Cinsine Göre Değişimi (4.Grup, Soba)	140

Şekil 5.25.	: Yakıt Sarfiyatının Kömür Cinsine Göre Değişimi (4.Grup, Soba)	140
Şekil 5.26.	: Hava Fazlalık Katsayısının Kömür Cinsine Göre Değişimi (4.Grup, Soba)	140
Şekil 5.27.	: Ortalama Baca Gazı Sıcaklığının Kömür Cinsine Göre Değişimi (4.Grup, Soba)	141
Şekil 5.28.	: Soba Verimini Kömür Cinsine Göre Değişimi (4.Grup, Soba)	141
Şekil 5.29.	: Soba Deneylerinde CO Emisyonlarının Değişimi (4.Grup).....	143
Şekil 5.30.	: Soba Deneylerinde SO₂ Emisyonlarının Değişimi (4.Grup)	144
Şekil 5.31.	: Soba Deneylerinde NO_x Emisyonlarının Değişimi (4.Grup)	146
Şekil 5.32.	: Soba Deneylerinde Toz Emisyonların Kümülatif Yayınım Değerleri (4.Grup)	147
Şekil A.1	: %5.90 Nemli Güney Afrika Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (1.Grup, 1.Yükleme)	171
Şekil A.2.	: %5.90 Nemli Güney Afrika Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (1.Grup, 2.Yükleme)	172
Şekil A.3.	: %5.9 Nemli Güney Afrika Kömürüne Ait Toz Emisyonları (1.Grup, 1.Yükleme).....	173
Şekil A.4.	: %5.9 Nemli Güney Afrika Kömürüne Ait Toz Emisyonları (1.Grup, 2.Yükleme)	173
Şekil A.5.	: %19.90 Nemli Y.Ağaçlı-G.Afrika Harman Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (1.Grup, 1.Yükleme)	174
Şekil A.6.	: %19.90 Nemli Y.Ağaçlı-G.Afrika Harman Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (1.Grup, 2.Yükleme)	175
Şekil A.7.	: %19.90 Nemli G.Afrika-Y.Ağaçlı Harman Kömürüne Ait Toz Emisyonları (1.Grup, 1.Yükleme).....	176
Şekil A.8.	: %19.90 Nemli G.Afrika-Y.Ağaçlı Harman Kömürüne Ait Toz Emisyonları (1.Grup, 2.Yükleme).....	176
Şekil A.9.	: %15.33 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (1.Grup, 1.Yükleme)	177
Şekil A.10.	: %15.33 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (1.Grup, 2.Yükleme)	178
Şekil A.11.	: %15.33 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Toz Emisyonları (1.Grup, 1.Yükleme).....	179
Şekil A.12.	: %15.33 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Toz Emisyonları (1.Grup, 2.Yükleme).....	179
Şekil A.13.	: %21.40 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (1.Grup, 1.Yükleme)	180
Şekil A.14.	: %21.40 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (1.Grup, 2.Yükleme)	181

Şekil A.15.	: %21.40 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Toz Emisyonları (1.Grup, 1.Yükleme).....	182
Şekil A.16.	: %21.40 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Toz Emisyonları (1.Grup, 2.Yükleme).....	182
Şekil A.17.	: %38.70 Nemli Orijinal Y.Ağaçlı Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (1.Grup, 1.Yükleme)	183
Şekil A.18.	: %38.70 Nemli Orijinal Y.Ağaçlı Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (1.Grup, 2.Yükleme)	184
Şekil A.19.	: %38.70 Nemli Orijinal Y.Ağaçlı Kömürüne Ait Toz Emisyonları Değerleri (1.Grup, 1.Yükleme)	185
Şekil A.20.	: %38.70 Nemli Orijinal Y.Ağaçlı Kömürüne Ait Toz Emisyonları Değerleri (1.Grup, 2.Yükleme)	185
Şekil B.1.	: %19.90 Nemli Y.Ağaçlı-G.Afrika Harman Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (2.Grup, 1.Yükleme)	187
Şekil B.2.	: %19.90 Nemli Y.Ağaçlı-G.Afrika Harman Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (2.Grup, 2.Yükleme)	188
Şekil B.3.	: %19.90 Nemli G.Afrika-Y.Ağaçlı Harman Kömürüne Ait Toz Emisyonları (2.Grup, 1.Yükleme).....	189
Şekil B.4.	: %19.90 Nemli G.Afrika-Y.Ağaçlı Harman Kömürüne Ait Toz Emisyonları (2.Grup, 2.Yükleme).....	189
Şekil B.5.	: %15.30 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (2.Grup, 1.Yükleme)	190
Şekil B.6.	: %15.30 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (2.Grup, 2.Yükleme)	191
Şekil B.7.	: %15.30 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Toz Emisyonları (2.Grup, 1.Yükleme).....	192
Şekil B.8.	: %15.30 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Toz Emisyonları (2.Grup, 2.Yükleme).....	192
Şekil B.9.	: %21.40 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (2.Grup, 1.Yükleme)	193
Şekil B.10.	: %21.40 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (2.Grup, 2.Yükleme)	194
Şekil B.11.	: %21.40 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Toz Emisyonları (2.Grup, 1.Yükleme).....	195
Şekil B.12.	: %21.40 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Toz Emisyonları (2.Grup, 2.Yükleme).....	195
Şekil B.13.	: %37.10 Nemli Orijinal Y.Ağaçlı Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (2.Grup, 1.Yükleme)	196
Şekil B.14.	: %37.10 Nemli Orijinal Y.Ağaçlı Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (2.Grup, 2.Yükleme)	197

Şekil B.15.	: %37.10 Nemli Orijinal Y.Ağaçlı Kömürüne Ait Toz Emisyonları Değerleri (2.Grup, 1.Yükleme)	198
Şekil B.16.	: %37.10 Nemli Orijinal Y.Ağaçlı Kömürüne Ait Toz Emisyonları Değerleri (2.Grup, 2.Yükleme)	198
Şekil C.1.	: %13.20 Nemli Soma Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (3.Grup).....	200
Şekil C.2.	: %13.20 Nemli Soma Kömürüne Ait Baca Çekişi Değerleri (3.Grup)	201
Şekil C.3.	: %13.20 Nemli Soma Kömürüne Ait Toz Emisyonları (3.Grup)	201
Şekil C.4.	: %22.20 Nemli Y.Ağaçlı-G.Afrika Harman Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (3.Grup)	202
Şekil C.5.	: %22.20 Nemli Y.Ağaçlı-G.Afrika Harman Kömürüne Ait Baca Çekişi Değerleri (3.Grup)	203
Şekil C.6.	: %22.20 Nemli Y.Ağaçlı-G.Afrika Harman Kömürüne Ait Toz Emisyonları (3.Grup)	203
Şekil C.7.	: %6.20 Nemli Güney Afrika Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (3.Grup).....	204
Şekil C.8.	: %6.20 Nemli Güney Afrika Kömürüne Ait Baca Çekişi Değerleri (3.Grup)	205
Şekil C.9.	: %6.20 Nemli Güney Afrika Kömürüne Ait Toz Emisyonları (3.Grup)	205
Şekil C.10.	: %10.80 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (3.Grup)	206
Şekil C.11.	: %10.80 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Baca Çekişi Değerleri (3.Grup)	207
Şekil C.12.	: %10.80 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Toz Emisyonları (3.Grup)	207
Şekil C.13.	: %15.60 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (3.Grup)	208
Şekil C.14.	: %15.60 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Baca Çekişi Değerleri (3.Grup)	209
Şekil C.15.	: %15.60 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Toz Emisyonları (3.Grup)	209
Şekil C.16.	: %17.40 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (3.Grup)	210
Şekil C.17.	: %17.40 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Baca Çekişi Değerleri (3.Grup)	211
Şekil C.18.	: %17.40 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Toz Emisyonları (3.Grup)	211
Şekil C.19.	: %21.80 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (3.Grup)	212
Şekil C.20.	: %21.80 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Baca Çekişi Değerleri (3.Grup)	213
Şekil C.21.	: %21.80 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Toz Emisyonları (3.Grup)	213
Şekil C.22.	: %24.60 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (3.Grup)	214
Şekil C.23.	: %24.60 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Baca Çekişi Değerleri (3.Grup)	215

Şekil C.24.	: %24.60 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Toz Emisyonları (3.Grup)	215
Şekil C.25.	: %37.00 Nemli Orijinal Y. Ağaçlı Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (3.Grup)	216
Şekil C.26.	: %37.00 Nemli Orijinal Y.Ağaçlı Kömürüne Ait Baca Çekişi Değerleri (3.Grup)	217
Şekil C.27.	: %37.00 Nemli Orijinal Y.Ağaçlı Kömürüne Ait Toz Emisyonları (3.Grup)	217
Şekil C.28.	: %18.10 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (3.Grup-Azim Kazan, 1.Yükleme)	218
Şekil C.29.	: %18.10 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (3.Grup-Azim Kazan, 2.Yükleme)	219
Şekil C.30.	: %18.10 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Baca Çekişi Değerleri (3.Grup, Azim Kazan)	220
Şekil C.31.	: %18.10 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Toz Emisyonları (3.Grup, Azim Kazan)	220
Şekil C.32.	: %36.00 Nemli Orijinal Y. Ağaçlı Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (3.Grup,Azim Kazan, 1.Yükleme)	221
Şekil C.33.	: %36.00 Nemli Orijinal Y. Ağaçlı Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (3.Grup,Azim Kazan, 2.Yükleme)	222
Şekil C.34.	: %36.00 Nemli Orijinal Y. Ağaçlı Kömürüne Ait Baca Çekişi Değerleri (3.Grup, Azim Kazan)	223
Şekil C.35.	: %36.00 Nemli Orijinal Y. Ağaçlı Kömürüne Ait Toz Emisyonları (3.Grup, Azim Kazan)	223
Şekil D.1.	: %13.20 Nemli Soma Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (4.Grup, Soba)	225
Şekil D.2.	: %13.20 Nemli Soma Kömürüne Ait Hava Fazlalık Katsayıları (4.Grup, Soba).....	226
Şekil D.3.	: %13.20 Nemli Soma Kömürü Ait Toz Emisyonları (4.Grup, Soba)	226
Şekil D.4.	: %22.20 Nemli Y.Ağaçlı-G.Afrika Harman Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (4.Grup, Soba)	227
Şekil D.5.	: %22.20 Nemli Y.Ağaçlı-G.Afrika Harman Kömürüne Ait Hava Fazlalık Katsayıları (4.Grup, Soba)	228
Şekil D.6.	: %22.20 Nemli Y.Ağaçlı-G.Afrika Harman Kömürüne Ait Toz Emisyonları (4.Grup, Soba)	228
Şekil D.7.	: %6.20 Nemli Güney Afrika Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (4.Grup, Soba)	229
Şekil D.8.	: %6.20 Nemli Güney Afrika Kömürüne Ait Hava Fazlalık Katsayıları (4.Grup, Soba)	230
Şekil D.9.	: %6.20 Nemli Güney Afrika Kömürüne Ait Toz Emisyonları (4.Grup, Soba)	230
Şekil D.10.	: %10.80 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (4.Grup, Soba)	231

Şekil D.11.	: %10.80 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Hava Fazlalık Katsayıları (4.Grup, Soba)	232
Şekil D.12.	: %10.80 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Toz Emisyonları (4.Grup, Soba)	232
Şekil D.13.	: %15.60 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (4.Grup, Soba)	233
Şekil D.14.	: %15.60 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Hava Fazlalık Katsayıları (4.Grup, Soba)	234
Şekil D.15.	: %15.60 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Toz Emisyonları (4.Grup, Soba).....	234
Şekil D.16.	: %17.40 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (4.Grup, Soba)	235
Şekil D.17.	: %17.40 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Hava Fazlalık Katsayıları (4.Grup, Soba)	236
Şekil D.18.	: %17.40 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Toz Emisyonları (4.Grup, Soba)	236
Şekil D.19.	: %21.80 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (4.Grup, Soba)	237
Şekil D.20.	: %21.80 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Hava Fazlalık Katsayıları (4.Grup, Soba)	238
Şekil D.21.	: %21.80 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Toz Emisyonları (4.Grup, Soba).....	238
Şekil D.22.	: %24.60 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (4.Grup, Soba)	239
Şekil D.23.	: %24.60 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Hava Fazlalık Katsayıları (4.Grup, Soba)	240
Şekil D.24.	: %24.60 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Toz Emisyonları (4.Grup, Soba)	240
Şekil D.25.	: %37.00 Nemli Orijinal Y. Ağaçlı Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (4.Grup, Soba)	241
Şekil D.26.	: %37.00 Nemli Orijinal Y.Ağaçlı Kömürüne Ait Hava Fazlalık Katsayıları (4.Grup, Soba)	242
Şekil D.27.	: %37.00 Nemli Orijinal Y.Ağaçlı Kömürüne Ait Toz Emisyonları (4.Grup, Soba)	242

SEMBOL LİSTESİ

C_T	:Birim ısı enerji toplam üretim maliyeti
X_{IT}	:Tasarım işletme vektörü
T_{YO}	:Yanma odası sıcaklığı
T_B	:Baca gazı sıcaklığı
$T_{YO\check{C}}$	:Yanma odası çıkış sıcaklığı
$T_{k\ddot{u}l,erg.}$	:Kül ergime sıcaklığı
$K_{alt,\ddot{u}st}$	:Teknik yakıtların alt ve üst tutuşma sıcaklıkları
K_{kr}	:Kritik karışım oranı
$W_{st.}$	:Alev hızı
W_{max}	:Alev hızı
Q_{IT}	:Kömür taneciğinin toplam iç tüketim ısısı
M_Y	:Yakıt tüketimi
v_A	:Yakılan yakıtın 1 kilogramı için açığa çıkan baca gazı miktarı
t_A	:Baca gazı sıcaklığı
t_L	:Yakma havası sıcaklığı
c_{pA}	:Baca gazları ortalama özgül ısısı
H_u	:Kömürün alt ısı değeri
V_{Akr}	:Kuru baca gazları miktarı
CO	:Baca gazı içindeki CO' in hacimsel oranı
F	:Deney süresinde çıkan toplam yanma artıkları
Z	:Deney süresi
B	:Saatte ocağa gönderilen yakıt miktarı
F_x	:Kazanın her bir bölümünün yüzey alanı
α_x	: F_x yüzeyine ait ısı geçiş katsayısı
t_{mx}	: F_x yüzeyi ortalama sıcaklığı
t_L	:Kazan dairesi ortalama sıcaklığı
η_k	:Kazan verimi
Q_N	:Kazan ısı gücü
h_{st}	:Sıcak cidar kaybı
h_A	:Baca kaybı
h_{∞}	:Eksik yanma kaybı
h_f	:Yanmamış kömür kaybı
D	:Difüzyon katsayısı

SABİT YATAKLI YAKMA SİSTEMLERİNDE YANMADA KÖMÜR NEMİNİN EMİSYONLARA ETKİSİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

ÖZET

Maden yatağında kömür, higroskopik ve genel olarak su ile doymuş poröz bir maddedir. Düşük ranklı bitümlü kömürler %20' den fazla neme sahiptirler ve bazı mineral maddelerin (kül v.b.) yüksek oranda bulunmaları nedeniyle ısı değeri düşüktür. Kömürün kalite kontrolü ve bileşiminin tespiti için düzenli ölçümlerin yapılması zorunludur. Kömürün taşınması sırasında enerji gereksinimi, yataktan çıktığı neme veya bulunduğu ortamın nemine bağlı olarak değişkenlik gösterebilir.

Yeni madencilik projelerinde, mevcut olan veya olabilecek kömür rezervlerinde, ürünün toplam nem içeriğinin belirlenmesi ekonomik olarak büyük önem taşımaktadır. Kömürdeki su bulunduğu yatağın durumuna göre, kömürün işlenmesi, depolanması ve taşınması kademeleri süresince kaybedilir ve tekrar kazanılabilir. Ürünün kalitesini, kömür yatağındaki sondaj çalışmaları ile yapılan araştırmalar ve yatağın oluşumu ile tespit etmek mümkündür.

Kömürün öğütülmesi sırasında, aşırı nem öğütücü üzerinde basınç oluşturmaktadır. Güç istasyonlarında; kömürün depolardan boşaltılması, akışı ve pompalanması kömürün nem içeriğinden önemli oranda etkilenmektedir. Yüzey neminde az miktarda meydana gelen artış, kömür partiküllerinin duruşunu etkileyerek, akış hızını azaltmaktadır.

Nem kömürü tanımlamadaki temel parametrelerden biridir. Kısa analiz; nem, kül, uçucu madde ve sabit karbondan oluşur ve toplamı 100 (%)' dür. Nem, reaktivite, gazlaştırma, piroliz, kurutma ve uçucu madde çıkışı, boyut dağılım karakterizasyonu, tutuşma noktası ve kömürün yanabilirlik sınırını direkt olarak etkilemektedir. Ayrıca kömürdeki nem, kömürün depolanmasını, ince partiküllerin yanmasını, yeraltı gazlaştırma işlemini, kok fırınlarında karbon birikimini, düşük ranklı kömürlerde kömürün kendiliğinden yanmasını, briketleme tekniğini ve akışkan yatak teknolojisini etkilemektedir.

Kömür oluşumunda ilk adım bataklık içerisinde bitkisel maddelerin birikmesidir. Bu adımı pekişme ve yatak içerisinde %80-90 nem içeriğine sahip bitkilerin çürümesi ile oluşan yakacakta, organik maddelerin kısmi azalması takip eder. Kahverengi kömür ve linyit gibi kömürleşmenin bir sonraki kademesindeki düşük kaliteli kömürler, %30-70 aralığında nem içeriğine sahiptir. Kömürleşmenin son kademesindeki sert veya bitümlü kömürler nispeten (%10 veya daha az) daha düşük nem oranda nem içermektedirler. Bu özelliklerden dolayı, suyun giderilmesi kömürleşme prosesinin tümünü kapsar ve bundan da anlaşılacağı gibi kömürün nem içeriği, onun son derece karakteristik ve önemli özelliklerinden birisidir. Birçok uygulamalar için, düşük kaliteli kömürlerin yüksek nem içeriği kömürün kullanımında önemli sınırlamalara neden olur.

Kömürdeki su birkaç kritere göre değişmektedir : Bağlanma şekli, fiziksel konumu, dinamik özellikleri ve kristallenme derecesidir. Nem, 100-110°C sıcaklıkta, hızlı bir şekilde ısıtma ile mineral maddelerle beraber bulunan ve termal olarak daha stabil olan kristalizasyon suyundan ayrılır. Daha sonra kil minerallerinin alüminasilikat yapısına bağlanır. Bu durumda kömürün tam olarak kurutulması (susuz) $\approx 350^{\circ}\text{C}$ sıcaklık üzerinde gerçekleşir.

Kömürde tutulan nem; kömürün por iç yapısında (gözenek nemi veya kapiler yoğunlaşma suyu), yüzey nemi (yüzeysel serbest) ve organik ve inorganik maddeler ile veya polar gruplar ile birleşmiş sudur. Kömür-su sistemlerinde, kömürün nemlendirilmesi ve neminin giderilmesi durumunda şişme ve büzülme davranımı gösteren kolloidal jel yapısı incelenmektedir. Kurutma işleminden sonra, kömürün yapısında oldukça büyük boyutlarda gözenek oluşabilmektedir.

Gözenek nemi; Porlarda tutulan nem miktarı, kömür tipi kadar kömürün rutubetine ve sıcaklıkla ilişkisine bağlıdır. Porların tuttuğu nemin maksimum miktarı gözenek nemi olarak bilinir ve şu şekilde tanımlanır : Kömür damarlarının özelliği olduğu kadar, yatağın doğal yapısında bulunan bir nemdir. Kömür yatağının bir bölümü olarak yapıda bulunur, yüzeyden ilave olan bir nem değildir. Gözenek nemi, kömür ortamda kuruduktan sonra kalan neme eşit değildir. Gözenek nemi, kömür numunesinin 30°C ve %96 relatif rutubetteki denge durumundan sonra ölçülen nem içeriğine eşittir. Relatif rutubet denge nemi, nem tutma kapasitesi ve kapasite nemi olarak bilinir.

Ortam nemi, kısa analizlerin doğru olarak yapılabilmesi için ilk olarak belirlenir. Kömür numuneleri, sıcaklık ve rutubet gibi temel olan ortam koşullarında dengeye ulaştıktan sonra ölçülür. Bu nedenden dolayı kömürün karakteristik özelliğine değil, deneysel ortam koşullarına bağlı olarak elde edilen nemdir. Yüzey nemi; kömürün partikül yüzeylerinde tutulan nemdir ve büyük oranda kömürün tipine bağlıdır. İç yüzey alanının artması ile yüzey nem içeriği artacağından, partikül boyutu da yüzey nem miktarında etkin parametredir.

Kömür neminin akışkan yatakta yanma üzerine etkisi ile ilgili bazı çalışmalar yapılmaktadır. Ancak, sabit yataklı yanma sistemlerinde nemin yanma verimi ve emisyonlar üzerine etkisi ile ilgili çalışmalar hemen hemen hiç yapılmamıştır.

Türkiye’de düşük kaliteli yakıtlar ve kötü yanma koşulları ciddi hava kirliliği problemlerine sebep olmaktadır. Bu problemlerin kaynaklarından biri yanmadaki rolü sebebiyle nemin etkisidir. Türk kömürleri genelde yüksek nem içeriğine sahiptirler. Nem içeriği, kömürün yanma verimi ve emisyonlar üzerinde etkili temel faktörlerden biridir.

Bu çalışmada, üç farklı kömür ve bunların karışımı harman kömürün üç farklı yanma sisteminde yakılmasıyla oluşan toz ve gaz emisyonlar ile birçok yanma parametreleri incelenmiştir. Bu yakma sistemleri elle yüklemeli sıcak su kazanı, otomatik yüklemeli sıcak su kazanı ve sobadır. Dünyadaki az gelişmiş yerleşim ve geçeköndü bölgelerinde, soba evsel ısıtmada çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Gelişmiş ülkelerde ise benzer amaçla, elle yüklemeli sıcak su kazanları apartmanlarda ve endüstride kullanılmaktadır. Soba ve elle yüklemeli sıcak su kazanları yüksek oranda kirliliğe sebep olan sistemlerdir ve düşük yanma verimine sahiptirler. Otomatik yüklemeli sıcak su kazanı ise düşük kömürleşme derecesine sahip kömürlerin yanması için tasarlanması nedeniyle, bu sistemde yanma daha verimli ve kararlıdır. Bu çalışmada tüm parametreler elle ve otomatik yüklemeli sıcak su kazanlarında karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmada İstanbul'un Yeniköy bölgesinde çıkarılan genç Ağaçlı kömürü, Güney Afrika kömürü, bunların karışımı ve Soma kömürü kullanılmıştır. Orijinal kömürlerinin analizi Tablo 1' de verilmiştir.

Tablo 1. Orijinal Y.Ağaçlı ve G.Afrika Kömürlerine Ait Analiz Değerleri (%ağ.)

Analiz	Yeniköy Ağaçlı Kömürü	Güney Afrika Kömürü
Nem (%)	37.00	6.20
Kül (%)	4.54	25.80
Uçucu Madde (%)	27.86	20.04
Sabit Karbon (%)	30.30	47.96
Yanabilir Kükürt (%)	0.74	0.30
Alt Isıl Değer (kkal/kg)	3465	4960

Orijinal Yeniköy Ağaçlı kömürü %37-38 nem, orijinal kömürün kurutulması ile oluşturan farklı nem içerikli kömürler ise %24, %21, %17, %15 ve %10 oranında nem içermektedir. Ayrıca Y.Ağaçlı ve G.Afrika kömürünün karıştırılması ile hazırlanan harman kömürün nemi ise %20-22' dir.

Yanma deneyleri, herbiri ISO standartlarına denk olan, kazanlarda TS 4040 ve 4041 ve sobada TS 4900 standartlarına göre gerçekleştirilmiştir. Her iki kazanın ısı kapasitesi 93 kW' ır.

Toz numuneleri, baca gazı nemi, yanma gazının hızı, baca sıcaklığı ile ilgili tüm ölçümlerde Amerikan USEPA onaylı Andersen Universal Toz Örnekleme Sistemi kullanılmıştır. Yanma gazı konsantrasyonlarının ölçümlerinde Alman yapımı MRU 95/3CD marka cihaz kullanılmıştır. Baca çekişi ise, çalışma aralığı +0.1-0.5 mbar olan Brigon marka cihaz ile ölçülmüştür.

Toz emisyon sonuçları tüm yanma sistemlerinde paralellik göstermektedir. Kütlesel debi ve ölçüm süresinde toplam ağırlık olarak emisyonlar hesaplanmıştır. Toz emisyonu, nem içeriğı %21.40 olan kömürde maksimum değer almaktadır. Bu davranım, Beypazarı linyitlerinin sadece iki nem içeriğı için literatürde bulunan değerlerle benzerlik göstermektedir. Beypazarı linyitinin yanması sonucu toz yayılımı kömürün nem içeriğı %18 den %27' ye yükseldiğinde artmakta, fakat nem içeriğindeki düşme mukayese edilememektedir.

Nem, kömürün şişme ve büzülmesinde önemli bir rol oynamaktadır ve sonuç olarak por oluşumu difüzyon kontrolünde oldukça önemlidir. Günümüzdeki deneysel sonuçlar, kömürün yapısal şekli, por oluşum mekanizması, ısı ve kütle transfer mekanizmaları bir arada değerlendirilebilse, nemin değışimi ile beraber toz emisyonlarının davranımlarını anlamak mümkün olacaktır. %21 nemli kömür için yanmanın başlangıcında yüzey nemi azdır ve kapiler yoğunlaşma suyu evaporasyonda temel noktadır.

Kömür yapısının porozitesi, %38-37 nemli kömüre oranla çok daha fazla gelişmektedir. Bu kömürdeki ısı transferi, fazla miktardaki serbest nem kaybı sebebiyle %38 nemli orijinal kömüre göre çok daha yüksektir. Bu durumda yüksek nem şartlarına kıyasla daha hızlı ısınma durumundaki kömür içerisindeki fiziksel su hızla buharlaşacak, gözenekler içerisinde basınç oluşturarak kırılmalara ve bunun sonucunda toz emisyon yayılımında artışa neden olacaktır. Bu olay, nemin türü, ısı ve kütle transfer mekanizmaları ve porozite oluşumu ile açıklanmaktadır.

Elle yüklemeli sıcak su kazanına ait sonuçlarda, hava fazlalığı ve karbonmonoksit konsantrasyonu otomatik yüklemeli sıcak su kazanı ile karşılaştırıldığında oldukça yüksek değerlerdir. Otomatik yüklemeli sıcak su kazanı, hava kontrollü bir sistemdir, birincil ve ikincil hava girişleri nedeniyle yanma oldukça kararlıdır. Elle yüklemeli sıcak su kazanında yanma havası girişi kontrol edilememektedir. Bu nedenden dolayı karbonmonoksit konsantrasyonu ve hava fazlalığı oldukça yüksektir. Kükürtdioksit konsantrasyonu ise kömürün kükürt içeriğine bağlıdır, yakma sistemine göre değişim göstermez.



EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF EFFECT OF COAL MOISTURE ON THE EMISSIONS IN FIXED BED COMBUSTION APPLIANCES

SUMMARY

Coal in seam is hygroscopic, porous material usually found saturated with water. For low-rank bituminous coals, the as-received moisture content may be as high as 20% and the resultant loss in calorific value can be of the same magnitude or greater than that due to the presence of mineral matter (i.e. ash). Its routine measurement must therefore form a part of all routine coal quality control and assessment. The specific energy requirements of a coal consignment may be specified either as air-dried or as-received.

Prediction of the total moisture content of products forms an essential part of the economic assessment of new mining projects, whether new prospects or extension to existing mines. During the stages of mining, preparation, storage and transportation, water can be both lost and gained with respect to the in-situ state. It is current practice to base predictions of final product quality on a knowledge of exploration borecore analysis, historical data and local experience.

In grinding, excess moisture can exert a limiting effect on mill throughput and increase the wear rate of mill components due to abrasion. The flow of coal during normal handling at a power-plant, e.g. discharge from storage bins, chutes and pipes, is critically affected by moisture content. Small amounts of surface moisture increase the angle of repose of coal particles significantly, thus reducing flow rates.

Moisture is one of the primary parameters that describe coal. Indeed, the proximate analysis involves moisture, ash and volatile matter determination, with fixed carbon found as the difference between 100% and total percentage of the other three parameters. It is well known that coal moisture has a direct effect on reactivity, gasification, pyrolysis, drying and volatile matter evolution, size degradation characteristics, ignition point and combustion limit of coals. Furthermore, coal moisture has effects on storage of coal, combustion of fine particles, underground gasification, carbon deposition in coke ovens, self-heating of low-rank coals, briquetting techniques and fluidized-bed technology.

The first stage of coal formation is the accumulation of vegetable matter in swamps. This is followed by consolidation and partial decay of the organic matter to form peat, which can have moisture contents of 80-90% in situ. Low-rank coals such as brown coals and lignites, which are formed in the next stage of coalification, have moisture content in the range 30-70%. Hard or bituminous coals, which are formed in the final stages of coalification, have relatively low moisture contents of 10% or less. Thus the elimination of water is an integral part of the coalification process and it follows that the moisture content of a coal is one of its most characteristic and

important properties. The water in a coal also has a significant effect on its utilization.

Water in coal can be differentiated according to several criteria : type of bonding, physical location, dynamic properties and degree crystallinity. Moisture that is removed by heating at 100-110°C can be readily distinguished from the more thermally stable water of crystallisation present in associated minerals. The latter is chemically bound within the aluminosilicate matrix of kaolinite, illite and other clay minerals, with the result that complete dehydration does not occur below $\approx 350^{\circ}\text{C}$.

Moisture is held by particulate coal ; within the extensive internal pore structure (inherent moisture or capillary condensed water), surface moisture (superficial free) and sorbed water associated with polar groups or organic and inorganic matter. A coal-H₂O system has been proposed to be viewed as a colloidal gel that shrink and swell in response to moisture loss or gain. After drying, considerable porosity may be formed in the coal structure.

Inherent moisture ; The quantity of moisture held in the pores depends on its humidity and thermal history, as well as on coal type. The maximum content of pore-held moisture is known as the inherent moisture, which is defined as : that moisture existing as a quality of the coal seam as it exists in its natural state of deposition and includes only that water considered to be part of the deposit and not that moisture which exists as a surface addition. Inherent moisture is not to be equated with the moisture remaining after air-drying. Inherent moisture is usually equivalent to the moisture content measured after equilibration of a representative sample at 30°C and 96% relative humidity, which is also known as equilibrium moisture, moisture holding capacity and sometimes as capacity moisture.

Air-dried moisture is determined primarily for the accurate determination of proximate analysis. It is measured after equilibration of a coal sample under the prevailing conditions of temperature and humidity. Hence, it is obtained largely for the convenience of laboratory operation and is not an intrinsic property of the coal. Surface moisture ; the amount of moisture held on the surface of coal particles is largely independent of coal type, it is influenced by particle size, since surface moisture content increases with increased external surface area.

There have been some systematic studies on the effects of coal moisture on combustion in fluidized beds. However, studies on the effect of moisture on combustion efficiency and emissions in fixed-bed combustion system are rather scarce.

In Turkey low grade fuels and poor combustion appliances together cause serious air pollution problems. One of the reasons of this problem is the effect of moisture due to its role in combustion. Turkish coals have generally high moisture contents. Moisture content is one of the major factors effecting coal combustion efficiency and emissions.

In this study, effects of moisture on particulate and gas emission and many combustion parameters of two different coals and their mixtures are investigated in three combustion systems. These systems are hand-loaded boiler, automatic-loaded boiler and stove. In certain parts of the world where there are shanty town or squatter-type developments, stoves are mostly utilised for domestic heating. Similarly, in developing countries, manually loaded boilers are used in apartments and industries. Both stoves and hand-loaded boilers are low efficiency, high pollution

systems. Because of automatic-loaded boiler is designed for combustion of lower-rank coals, combustion is more efficient and steady. This boiler has primary and secondary air entrance. Therefore, air control is excellent in automatic-loaded boiler. All of parameters in both hand-loaded boiler and automatic-loaded boiler are compared in this study.

In this study a young peaty (Ağaçlı) coal from Istanbul Yeniköy, a South African coal and mixtures of these two coals and Soma coals were used. The analysis of original coals is presented in Table 1.

Table 1. Analysis of the Original Y. Ağaçlı and S. African Coals (wt.%)

Analysis	Yeniköy Ağaçlı Coal	South African Coal
Moisture (%)	37.00	6.20
Ash (%)	4.54	25.80
Volatile Matter (%)	27.86	20.04
Fixed Carbon (%)	30.30	47.96
Combustible S (%)	0.74	0.30
Lower Calorific Value (kkal/kg)	3465	4960

The original Y.Ağaçlı coal, which contained 38-37% moisture, was dried to obtain 24%, 21%, 17%, 15% and 10% moisture coals. Also a mixture of Y.Ağaçlı and S.African coals was prepared which had a moisture content 20-22%.

Combustion tests were performed according to Turkish Standarts (TS) 4040 and 4041 in boilers and TS 4900 in stove which are equivalent to respective ISO standarts. Two boilers had a thermal capacity of 93 kW.

Sampling of the particulates, moisture in the flue gas, flue gas velocity, chimney temperature were all measured using the Andersen Universal Sampling System approved by USEPA. To check measurements of the concentration of combustion gases, a German-made MRU 95/3CD model instrument and was used. Chimney draft was measured Brigon mark instrument measurement range of which is +0.1-0.5 mbar.

Particulate emission results in all combustion systems are parallel. From the mass flow rates and emission period, mass emissions are calculated. Particulate emissions exhibit a maximum point with increasing moisture content at 21.40% Yeniköy Ağaçlı coal. This behaviour agrees with the literature data for Beypazarı coal which showed an increase in particulate emissions when coal moisture was increased from 18% to 27% but the dropping end particulate emissions could not be compared since the reported data gave only two moisture values.

It is known that moisture plays an important role in shrinkage and swelling of coals and consequently pore formation plays an important role in diffusion control. If present experimental results are viewed together with the schematic coal structure, pore formation mechanism and heat and mass transfer then it is possible to understand the emission behaviour of particulates with changing moisture content. For the case of 21% moisture coal, at the start there is much less superficial free moisture and capillary condensed moisture is the main target for evaporation.

The porosity of coal structure is much more developed compared to the 38-37% case. The heat transfer to the coal body is much higher than the previously higher moisture coal due to the loss of abundant free moisture. The relatively high amounts of

evaporated water could not be transferred by the available pores resulting in pressure and subsequently cracking of particles which causes an increase in particulate emission. This is explained in terms of moisture type, heat and mass transfer and porosity formation.

In hand-loaded boiler results excess air and carbon monoxide concentration were highest which was compared with automatic-loaded boiler. In automatic-loaded boiler which has air controlling system, combustion is rather steady because of primary and secondary air entrance. Whereas, combustion air entrance was not controlled in hand-loaded boiler. Therefore, carbon monoxide concentration and excess air was highest. Sulphur dioxide concentration is related sulphur content of coals and do not change with combustion systems.



1. GİRİŞ VE AMAÇ

Dünya ölçeğinde bakıldığında, ekonomik olarak üretilebilecek petrol, doğal gaz rezervlerinin miktarları hızla tükenmektedir. Ayrıca, bu kaynakların coğrafi dağılımları da uzun vadeli siyasi stabilitenin oluşmadığı bölgelerdir. Anılan bu noktalar enerji kaynaklarının “temini” ve “ekonomisi” açısından olağanüstü kritiktirler. Yenilenebilir kaynakların (rüzgar, jeotermal v.b.) yaygın olarak endüstriyel kullanımları, teknolojik birikim düzeyi ve buna bağlı olarak ekonomiklik açısından daha zaman alacaktır (Heek, 2000).

Bu sıralanan gerçeklere karşın dünya kömür rezervleri, boyutu ve coğrafi bölge dağılımlarının genişliği itibariyle diğer enerji kaynaklarına kıyasla çok daha şanslı durumdadır. Kömür rezervlerinin toplam petrol, doğal gaz ve kömür kaynaklarının %70 gibi oldukça büyük bir kısmını oluşturması 2000’ li yıllarda kömürün enerji üretimi ve diğer kullanım alanlarında güçlü bir konuma geleceğinin en büyük göstergesidir. Özellikle sanayileşmiş ülkelerde kömür hazırlama, zenginleştirme ve yakma sistemlerinde gerçekleştirilen teknolojik yeniliklerin yaşama geçirilmesiyle kömür, çevresel isteklere de önemli ölçüde cevap verebilecektir (Arnoğlu, 1995a). Ayrıca, son yıllarda Asya Pasifik ülkelerindeki ekonomik büyüme, enerji talebini hızla arttırmaktadır. Talep edilen bu enerjinin temin edilememesi 21. yüzyılda ciddi sorunlar meydana getirecektir. Birçok endüstri kolu gerekli olan bu enerjinin daha çevreci olması amacıyla, kömürden yeni enerji kaynakları yaratma yoluna gitmektedirler (Adachi ve diğ., 2000).

Dünyada olduğu gibi ülkemizde de 1973 ve 1979 yıllarında yaşanan iki enerji krizinin ardında petrol temininde sıkıntılar, fiyatlarda ise hızlı bir artış görülmüştür. Bu nedenle dünya enerji gereksiniminin karşılanmasında kömüre bir dönüş yaşanmıştır. Bu gelişmeler ülkemize de yansımış ve bunun sonucunda da linyit tüketiminde önemli artışlar olmuştur. Linyit kullanımına olan yoğun talep artışının en

büyük nedeni Türkiye' nin sahip olduğu enerji kaynaklarında ve bu kaynakların niteliğinde yatmaktadır. Türkiye' nin sahip olduğu enerji kaynakları incelendiğinde; bunlar içinde kömür, hidrolik potansiyel ve az miktarda da olsa petrol öne çıkmaktadır. Bu kaynaklar, yaklaşık olarak, 1.126 milyar ton taşkömürü, 8.375 milyar ton linyit, 1.641 milyar ton bitümlü şist ve 82 milyon ton civarındaki asfaltitten oluşmaktadır (Tür.Ener.Kong.,1997). Linyitlerimiz rezerv ve üretim bazında sıralamada dünyada 7. ve 6. sıradadır. Toplam linyitimizin “dinamik ömrü” 70 yıl olarak hesaplanmıştır. Yeni kaynakların tespit edilmesiyle bu süre daha da uzayabilecektir (Köktürk ve Narin, 1994; Altaş,1994; Arıoğlu, 1995a).

MTA tarafından yapılan son incelemelerde linyitlerin saha sayısı 117 olarak tespit edilmiştir. Ağırlık bazında hesaplanan Türk linyitlerinin ortalama özellikleri Tablo 1.1' de verilmiştir. Nem içeriği %50 dolayında olan Elbistan linyitlerini hariç tutulduğunda dahi linyitlerimizin ortalama nem miktarı %39' dan yine yüksek bir rakam olan %30' a düşmektedir (Vural, 1991; Tür.Ener.Kong.,1997).

Tablo 1.1. Türt Linyitlerinin Ortalama Özellikleri (Vural, 1991).

	Elbistan Dahil	Elbistan Hariç
Saha Sayısı	117	116
Nem (%)	39	30
Kül (%)	23	25
Toplam Kükürt (%)	1.9	2.4
Alt Isıl Değer (kkal/kg)	1800	2425

Tablo 1.2' de linyitlerimizin nem miktarı %10' luk artışlarla gruplanmıştır. Saha sayısı açısından linyitlerimizin çoğunluğu %20-30 nem miktarı olan grupta yer almaktadır. Elbistan linyitleri hariç tutulduğunda, toplam enerjinin en büyük bölümü %10-20 nem içeren grupta bulunmaktadır (Vural, 1991).

Türkiye' de katı yakıtların büyük bölümünü oluşturan linyitlerin oldukça genç olması, yüksek oranda kükürt, nem, kül içermeleri ve düşük ısıl değere sahip olmaları, son derece düşük bir kömür kalitesini işaret etmektedir. Bu kömürlerin uygun olmayan yakma sistemlerinde yanlış bir biçimde kullanılmaları sonucunda, özellikle kış aylarında, oldukça ciddi boyutlarda hava kirliliği meydana gelmektedir (Vural, 1991).

Tablo 1.2. Linyitlerimizin Nem Miktarlarına Göre Gruplanışları (Vural, 1991).

Nem (%)	Saha Sayısı	Nem (%)	Kül (%)	Toplam Kükürt (%)	Alt Isıl Değer (kkal/kg)	Enerji (%)	Rezerv (%)
0-10	8	6	27	5.0	4746	2.5	0.9
10-20	23	14	20	2.5	3779	24.2	11.5
20-30	43	24	32	2.9	2440	19.0	14.1
30-40	25	34	26	2.1	2058	17.1	14.9
40-50	18	46	23	1.5	1448	9.7	12.1
> 50	6	50	20	1.5	1062	27.4	46.5

Yanma; yakıt ailesinin (katı, sıvı, gaz yakıtlar) yanıcı elemanları (C, H, S) ile hava ailesinin yakıcı elemanı (O_2) arasında yakma sisteminde meydana gelen, ısı ve emisyon oluşumlu çok karmaşık kimyasal bir süreçtir. Bu süreçte yakıt ailesinin yanıcı olmayan elemanlarından nem aşırı boyutlarda yanmayı bozarak CO , C_nH_m emisyonlarına, kül, partikül emisyonuna azot ise da oksitlenerek çevre kirletici NO_x emisyonlarına neden olmaktadır. Kül ise ısı performans ve ömür azaltıcı etkisi ile başlı başına kazan tasarımı ve işletmesinde özenle dikkate alınması gereken olumsuz yakıt içeriklerinden birini oluşturmaktadır. Yanma sürecinde ekonomik değeri olan ısı „ana ürün“, yanma sağlıksızlığının göstergeleri olan emisyonlar ise istenmeyen „yan ürün“ olarak açığa çıkar. Yanmadan kaynaklanan emisyonlar çevre, kazan enerji ve işletme ekonomileri üzerinde olumsuz etkiler yapar. Bu olumsuzluların teşhis ve tedavisinde, başka bir anlamda yerlerinin, boyutlarının, çözüm seçeneklerinin ve uygulamalarının belirlenmesinde emisyon ölçümleri ve analiz sonuçları kullanılır. Bu nedenle ısı, yanmanın ekonomik boyutunu, emisyonlar ise çevresel etki boyutunu oluşturur (Durmaz, 1993).

Yakma sistemleri bacasından atmosfere verilen hava kirletici emisyonlar; yakıtın içerdiği külden kaynaklanan toz, eksik yanma sonucu oluşan is, duman, biçimindeki toplam hidrokarbonlar (C_mH_n) ve CO , yakıtın içerdiği kükürdün yanması ile oluşan SO_x ile yakıtın içerdiği azot ve yakma havası azotunun yüksek sıcaklıklarda oksitlenmesi ile oluşan azotoksitlerden (NO_x) meydana gelmektedir. İs, duman, CO , NO_x emisyonları genelde yanma kontrolüne bağlı emisyonlar, toz ve SO_2 emisyonları ise yakıtla bağlı emisyonlar olarak tanımlanmaktadır (Başkaya ve Durmaz,1991). Yanma sonucu ortaya çıkan hava kirleticiler ve etkileri Tablo 1.3 ‘ de verilmiştir (Ekinci, 1993).

Yanma sonucu ortaya çıkan en önemli hava kirleticilerin başında kükürt oksitler (SO_x) gelmektedir. Yanma sırasında en fazla oluşan kükürt bileşiği (> %90) kükürt dioksittir (SO_2) (Vural, 1991).

İstanbul ili açısından bölgenin dinamik ömrüne bakıldığında, İstanbul' un çevresindeki linyit yataklarının bugünkü tüketim hızı ile 10 yıl gibi bir süre içinde tükenme noktasına geleceği ifade edilebilir. Unutulmamalıdır ki rezerv tablosuna "yeni yataklar" eklenmesi durumunda anılan süre uzayabilecektir. İstanbul, bu durumda linyit kömür gereksinimini Trakya' nın çeşitli bölgelerine yayılmış linyit rezervlerinden (rezerv+kaynak toplamı :432 milyon ton) karşılayacaktır (Arioğlu, 95a).

Tablo 1.3. Yanmadan Kaynaklanan Kirleticiler (Ekinci, 1993).

Kirletici	Yayınma Derecesi	Etkileri
Azot oksitleri (NO , NO_2)	Orta	Solunum yolu rahatsızlıkları, bitkilerde hasar, korozyon, fotokimyasal duman oluşumu.
Hidrojen sülfür (H_2S)	Az	Göz tahrişi, solunum yolu tahrişi, baş ağrısı, çarpıntı, sindirim sistemi bozuklukları.
Karbon monoksit (CO)	Orta	Kanda oksijen azalması.
Kükürtdioksit (SO_2)	Yoğun	Asit yağmuru, kalp hastalıkları, solunum enfeksiyonları.
Halojen bileşikleri	Az	Korozyon
Hidrokarbonlar (HC)	Yoğun	Bitkilerde hasar, bazıları kanserojen.
Polisiklik organik maddeler (özellikle PAH)	Orta	Kanserojen.
Tanecikler (PM)	Yoğun	Metallerin, binaların korozyonu, bitkilerde hasar, akciğerlerde ve bronşlarda tahriş, bronşit, anfiyemi.

Nem, kömürü kimyasal, fiziksel ve uygulama ekonomisi açısından önemli ölçülerde etkilemektedir. Suyun varlığı kömür reaktivitesini (Sondreal ve Ellman, 1974), gazlaşma mekanizmalarını, kuruma ve uçucu madde çıkışını (Agarwal ve diğ., 1986), tutuşma sıcaklığını (Prins, 1987), ufalama eğilimini, taşıma ekonomisini, briketlenebilme özelliklerini, yakılabilme sınırlarını ve diğer bazı özelliklerini etkileyebilmektedir. İstanbul' da 1995/1996 kışında hava kirliliğini kontrol altına

alabilmek için kente giren kömürlerin ısı değeri, kül oranı, parçacık boyutu, kükürt ve nem değerleri için bazı sınırlamalar getirilmiştir. Son 10-15 yılda İstanbul’ da ağırlıklı olarak kullanılan Ağaçlı kömürünün nem içeriğinin yüksek olması nedeniyle, kömür neminin hava kirliliğine etkisi konusunda bu kömürün üreticileri ile yerel ve merkezi yöneticiler arasında bazı anlaşmazlıklar söz konusu olmuştur. Bu anlaşmazlıkların çözümlenebilmesi için kömürün içerdiği nemin yanmaya ve emisyonlara olan etkisi konusunda bilimsel veri ve yorumlara gereksinim duyulmuştur.

Kömürün nem içeriğinin yanmaya olan etkisi, kullanılan yakma sistemine doğrudan bağlıdır. Akışkan yataklı yakma sistemleri ile ilgili olarak yapılan deneysel ve modelleme çalışmalarında nemin yanmaya etkisi, nemin uçucu maddeler öncesi ve uçucu maddelerle birlikte çıkış süreçleri göz önüne alınarak irdelenmiştir (Agarwal ve diğ., 1986; Wildegger-Gaissmaier ve Agarwal, 1990; Agarwal ve Pedler, 1986).

Stoker ızgaralı sistemlerde, iri ve ince taneciklerin birlikte yakılmaları durumunda su ile ıslatılmış kütlelerin yanma verimi, yanmamış ince taneli kömürlerin ızgara altına düşmesinin önlenmesi nedeniyle daha yüksek saptanmıştır. Tane büyüklüğü 0-0.32 mm, kül oranı %10 dolayında olan bitümlü bir kömürün yakıldığı kazanda, serbest nem oranının artması ile kazan veriminin önemli bir ölçüde artış gösterdiği görülmüştür (Ministry of Power, 1958).

Nemin, emisyon tanecik yayılımı, CO, yanmamış HC, NO_x ve SO₂ etkileri konusunda bazı beklentilerden bahsedilmesine karşın elle yüklemeli kazanlar ve sobalardaki gerçek veriler son derece sınırlıdır. Örnek olarak kömür neminin tanecik yayılımı üzerine etkisinin, nemdeki düşme ile artacağı yönünde görüşler, sadece bir kömürün, bir düzenekte iki nem değerinde yapılan çok kısıtlı deney sonucuna dayandırılarak ileri sürülmüştür. Bu deney sonuçları Tablo 1.4’ de görülmektedir (Anonim,1994).

Bu çalışmada, orijinal (%38-37 nemli) ve çeşitli rutubetlere kurutulmuş Yeniköy Ağaçlı kömür örnekleriyle, Soma ve G.Afrika menşeyli orijinal ve harmanlanmış (G.Afrika-Y.Ağaçlı kömürü) kömür örneklerinin sıcak su kazanlarında; otomatik,

hava ayarları kontrollü (Fischer) kazan, TSE elle yüklemeli, sabit ızgaralı (Azim) hava kontrolsüz kazan ve sobada yanma deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1.4. Kömür Nemindeki Değişimin Tanecik Yayınımı Üzerine Etkisi (Anonim,1994).

Nemdeki Değişim (%)	Tanecik Yayınımını Değişimi	
	Soba	Kazan
18-27	%150	%33.5

Elle yüklemeli sıcak su kazanları, konutlarda ve endüstride çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu sistemlerde yakma havasının kontrol edilemeyeşi, yanmada birtakım olumsuzluklara neden olmaktadır. Bu yakma sistemleri ile ilgili çalışmaların az ve yetersiz olması, elle yüklemeli sıcak su kazanı ile ilgili verilerin gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu amaçla, bu sistemlerde yanma ve emisyonların ayrıntılı ve dikkatli biçimde gözlemlenmesi hedeflenmiştir.

Fischer kazan olarak tanımlanan kazan ise otomatik yüklemeli ve hava ayar kontrollü olması sebebiyle, yanmada düzensiz yakıt ve hava beslenmesinden kaynaklanan olumsuzlukları ortadan kaldırmaktadır. Bu kazanın tercih edilme nedeni, özellikle ısı değeri düşük kömürler için tasarlanmış olmasıdır. Böylelikle, kontrollü yakıt ve hava beslemeli bir yakma sisteminde yanmanın nasıl gerçekleşeceği gözlenmiş ve diğer yakma sistemleri ile karşılaştırmalar yapılmıştır.

Sobalar günümüzde, azgelişmiş ülkelerde veya bölgelerde düşük gelirli kesimler tarafından öncelikli ısınma amaçlı kullanılmaktadır. Bu nedenle, kömür neminin emisyonlar üzerine etkisi ile beraber yakma sistemlerinin de değerlendirildiği bu çalışmada, ülkemizde büyük kitlelerce ısıtma aracı olarak kullanılan sobalarda ele alınmış, bunların yanma ve emisyon davranımları da incelenmiştir.

Sonuç olarak kömür rutubetinin yanma verimine ve emisyonlara (toz, gaz) etkisinin farklı yakma sistemlerinde incelenmesi ve deneysel verilerin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca, farklı kömürlerin yanma sırasındaki davranımları her üç yakma sisteminde gözlenmeye çalışılmıştır.

2. KÖMÜRÜN YANMASI VE YANMA MEKANİZMASI

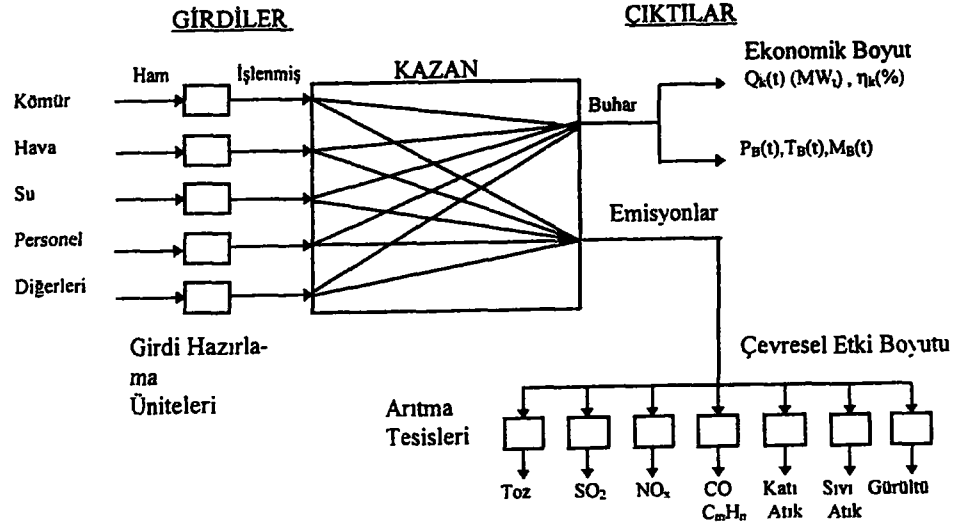
2.1 Giriş

Ticari yakıtlar arasında kömür, 300 yıldan fazla bir süre için yeterli olan rezervi ile, 30-40 yıl içinde tükenmesi beklenen petrol ve doğal gaza kıyasla, dünya enerji dengesinin kilit yakıtı olma özelliğini taşımaktadır. Bu nedenle, kömürlerin verimli ve temiz yakılması, günümüz enerji ve çevre teknolojisinin en zor ve en önemli sorunlarından birini oluşturmaktadır (Durmaz, 1998).

Isı, sektör yapısına uygun yakma sistemlerinde, yanma süreci ile oluşur; ilgili sektörde doğrudan kullanılabilecek biçime veya iş yapabilecek özelliğe kavuşturulur. Bu sistemler, konut sektörü için; kalorifer kazanları ve sobalar; sanayi sektörü için; sanayi kazanları, fırınlar; ulaşım sektörü için ise, içten yanmalı motorlar, gaz türbinli jet itti sistemleri; çevrim sektörü için ise termik santral buhar kazanları, gaz türbinleri veya kombine çevrim santralleri olarak isimlendirilir. İçten yanmalı motorlar ve gaz türbinlerinde, iş akışkanını doğrudan yanma gazları oluşturur, buhar kazanlarında ise iş akışkanı buhardır.

Günümüzde, içten yanmalı motorlarda, genelde petrol ürünü sıvı yakıtlar, gaz türbinlerinde ise özel sıvı yakıtlar ve doğal gaz yakılır. Kazanlarda ise, her türlü ticari ve ticari olmayan yakıtlar yakılabilmektedir. Petrol ve doğal gaz rezervlerinin bitmesi durumunda kömürün, gazlaştırma ve sıvılaştırma prosesleri ile oluşturulacak teknik gaz ve sıvı yakıtlar biçiminde, içten yanmalı motorlarda ve gaz türbinlerinde kullanımı söz konusudur. Bu nedenle, tüm yakma sistemleri ile ilgili yanma sürecinin incelenmesinde, bu durum göz önünde tutulmalıdır. Bu bölümde, enerji dönüşüm sistemleri arasında, yanma ve ısı aktarımı yönünden en karmaşık yapıya sahip, kömürlü buhar kazanlarında, verimli ve temiz yanma koşulları kısaca

incelenmektedir. Kömürle çalışan bir buhar kazanının genel sistem yapısı ve bağlantı şeması Şekil 2.1' de verilmiştir.

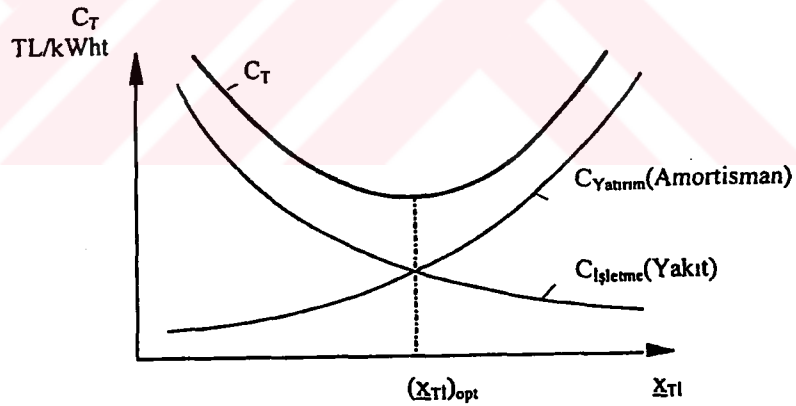


Şekil 2.1. Bir Buhar Kazanının Genel Sistem Yapısı ve Bağlantı Şeması (Durmaz, 1998).

Kazanın ham temel girdileri (kömür, hava, su), girdi hazırlama sistemleri ile yakma sistemi (ızgaralı, akışkan yataklı, kömür brülörlü) ve kazan (büyük su hacimli, dolaşımli, doğrudan geçişli) tasarımı için esas alınan girdi özellik bandına getirilerek, işlenmiş girdi (kazan kömürü, yakma havası, kazan besleme suyu) biçiminde kazana verilir. Genel anlamda, girdi özellik bandı, kazan çıktıların (buhar, emisyonlar) tasarımda öngörülen özellikte oluşturulabilmesi için, girdilerin fiziksel ve kimyasal özelliklerinde meydana gelebilecek sapmaların kabul edilebilir değişim bölgesini tanımlar. Bu girdiler, kazan yapısına, kazan otomatik kontrol sistemine (Durmaz, 1973; Durmaz, 1982) ve personel etkinliğine bağlı olarak ekonomik boyutlu iş akışkanına (buhar) dönüştürülür ve ilgili sektörlerde çeşitli türlerde enerji girdisi olarak kullanılır. Kazanlarda, buharla birlikte çevre kirletici atıklar oluşur. Bunlar, kazan bacasından; partikül ve gaz (SO_2 , NO_x , CO , C_mH_n gibi) emisyonları biçiminde, kazan altından; katı, sıvı atıklar olarak ve kazan yüzeyinden ise ısı ve gürültü biçiminde çevreye yayılır.

Kazanlarda temel amaç, sürekli, kaliteli ve ucuz ısı enerjisi (buhar) üretimidir. Sürekli üretim, teknik yönden açık bir sistem olan kazanda, her an uygun enerji ve

kütle dengesi sağlanarak, kazan işletme ömrü boyunca, en az sayıda hasar, kaza ve durmalarla, emniyet, güvenilirlik ve işlerlik yönünden uygun bir buhar üretiminin gerçekleştirilmesi; emisyonlar yönünden ise, ilgili yönetmeliklerde öngörülen uygun enerji ekonomisi ve güncel teknoloji düzeydeki uygulamayı simgeleyen sınır değerlerin altında kalınmasıdır. Kaliteli üretim ise, değişen girdi ve yük koşullarında, kazanın ısı gücünün, ısı veriminin ve buhar özelliklerinin, sürekli biçimde, tasarımda öngörülen değerlerde tutulmasıdır. Ucuz üretim ise, işletme ve yatırım maliyetlerinden oluşan, birim ısı enerjisi toplam üretim maliyetinin, minimum düzeyde tutulması ile sağlanır. Şekil 2.2’ de görüldüğü gibi, birim ısı enerjisi toplam üretim maliyeti (C_T), uygun yatırım, tasarım ve işletme faaliyetlerine bağlı olarak oluşturulan, optimum tasarım–işletme vektörü $(X_{TI})_{opt}$ koşulunda oluşur. Tasarım–işletme vektörü X_{TI} , birim ısı enerjisi üretim maliyetini etkileyen tüm sistem girdi ve çıktı verileri (özellikleri) ile sistemin tasarım ve işletme verilerini kapsar. $(X_{TI})_{opt}$ ‘ un konumu, en başta, dünya petrol fiyatlarına bağlıdır ve petrol fiyatlarındaki artışla birlikte sağa kayar (Durmaz, 1998).



Şekil 2.2. Birim Isı Enerjisi Maliyeti ve Maliyet Optimizasyonu (Durmaz, 1998).

Enerji mühendisliği açısından uygun enerji üretimi; enerji dönüşüm sistemlerinin, beş temel tasarım kriteri uyarınca oluşturulması ve değişen enerji fiyatları ve koşullarına uygun biçimde, sistemlerin yapısal yönden devamlı revize edilmesi ve işletilmesidir. Bu kriterler; Emniyet, Güvenilirlik, İşlerlik, Verimlilik ve Çevresel Uyum’ dur (Durmaz, 1998).

Bu kriterlerin oluşturulmasında, teknoloji ve işletme yönünden en önemli sorun, yanma sorunudur. Planlı ve plansız durmaların en aza indirilerek sistemin işlerlik faktörünün, buna bağlı olarak sistem işletme ekonomisinin iyileştirilebilmesi, en başta kömür yanma ve yakma sistemi sorunlarının üstesinden gelinebilmesine bağlıdır. İyi kaliteli kömürlerin giderek azalması ve sektörel enerji taleplerinin giderek daha düşük kaliteli kömürlerle karşılanması olgusu, yanma sorununu daha da önemli bir hale getirmektedir.

Ülkemizin temel enerji kaynağını oluşturan ve yaklaşık 8 milyar ton rezerve sahip bulunan düşük kaliteli linyitlerin, enerji-işletme ekonomisi ve çevresel etki yönünden uygun biçimde yakılarak, aşırı emisyonlar nedeni ile kullanım dışı kalmasının önlenmesi için, kömür yanması ve yakması teknolojilerinin, yukarıda özetlenen çerçeve içinde kapsamlı biçimde ele alınması ve gerekli araştırma, geliştirme ve uygulama çalışmalarının yapılması zorunlu olmaktadır (Durmaz, 1987).

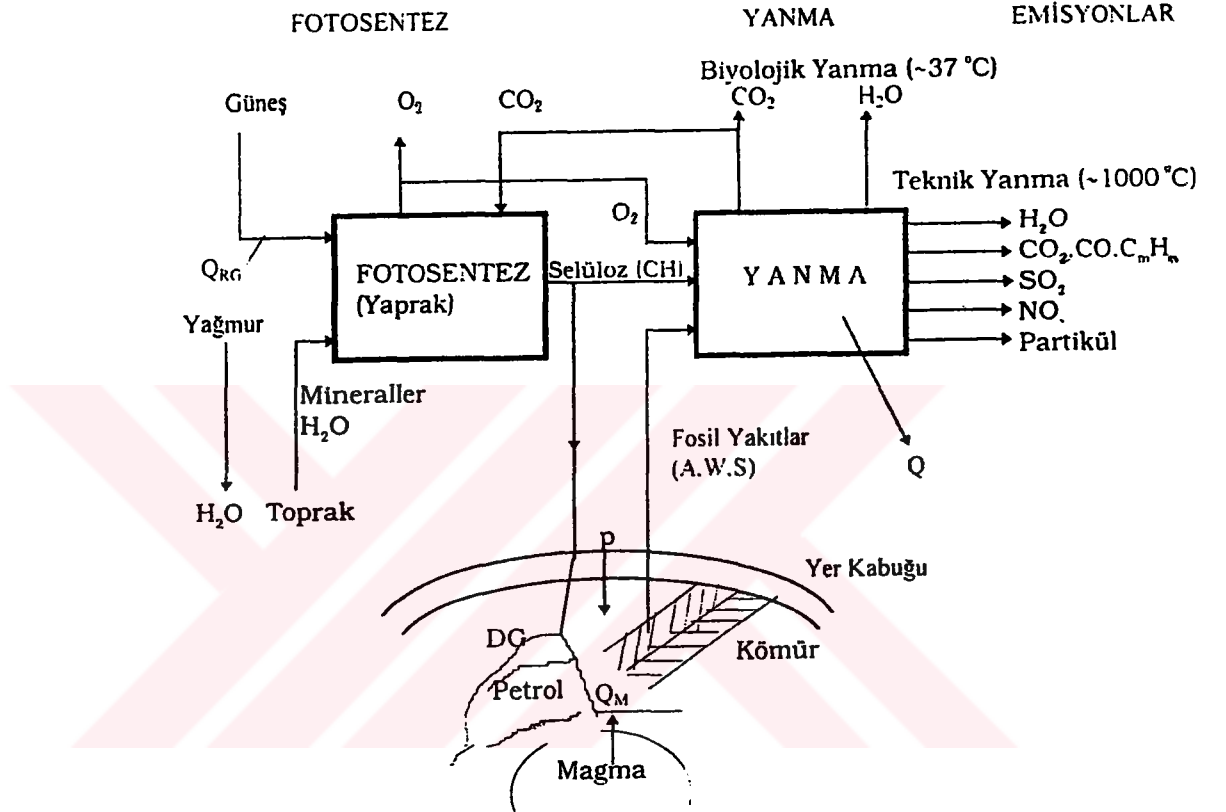
2.2 Fosil Yakıtlar, Yanma ve Yanmayı Etkileyen Faktörler

2.2.1 Fosil Yakıtların Oluşumu ve Yanma

Dünyamızda, son çeyrek yüzyılda yaşanan enerji kökenli sorunlar ile 30-40 yıldır genel bölgesel boyutta yaşanan yoğun çevresel sorunların tam olarak kavranabilmesi için; dünya atmosferinin, fosil yakıtların oluşum ve gelişim süreçlerinin kısaca ele alınması, konunun gerçekçi boyutta kavranması bakımından yararlı olacaktır.

Güneş sisteminden kopan bir parça olan dünyanın ilk oluşum sürecinde, çeşitli reaksiyonlar sonucu açığa çıkan tozlar ve gazlar (CO_2 , H_2 , O_2 , N_2 vb.) ilk ham atmosferi oluşturmuştur. Atmosferdeki tozların yere inmesi ile yer kabuğu, H_2 ve O_2 ' in reaksiyonu ile oluşan suyun yere inmesi ile de denizler oluşmuştur. Yarı işlenmiş atmosferde depolu bulunan CO_2 ' nin, yeryüzüne çekilerek orman ve canlılar biçimine dönüşümü (karbon çağı) Şekil 2.3' de görüldüğü üzere fotosentez süreci ile olmuştur (Durmaz, 1998).

Atmosferden emilen CO_2 ' in selüloza dönüşümü, topraktan sağlanan su ve mineraller ile yaprakta, güneşin ısıma enerjisi altında, fotosentez olayı ile olmuştur. Fotosentez ile oluşan canlı ve bitkiler, yüzeysel aşınma olayları ile çukurlara taşınmış, üzerleri toprak ile örtülerek, yüksek basınç ve ısı altında milyonlarca yıl süren karbonizasyon süreci ile fosil yakıtlara dönüşmüştür.



Şekil 2.3. Fosil Yakıtların Oluşumu, Biyolojik Yanma, Teknik Yanma ve Emisyonlar (Durmaz, 1998).

Fotosentez, yanma ürünü CO_2 ' i selüloza dönüştüren, ayrıca O_2 açığa çıkaran bir süreçtir ve doğal dengenin sürekliliğini sağlar. Yanma ise, fotosentez ürünleri ile beslenir; biyolojik, sosyal ve ekonomik yaşamın sürekliliği için gerekli olan ısı enerjisini üretir ve yanma atıkları olarak tanımlanan emisyonları yayar.

Biyolojik yanma, karbonhidrat (besin) girdili, biyolojik yaşamın sürekliliği için gerekli ısıyı sağlayan düşük sıcaklık yanmasıdır. Biyolojik yanmanın emisyonları, fotosentez tarafından işlenebilen türden geri dönüşümlü, (CO_2 , H_2O) emisyonlardır.

Teknik yanma, fosil yakıt girdili, sosyoekonomik yaşamın çok hızlı artan enerji gereksiniminin karşılanmasını sağlayan ve 1000°C' ın üzerinde gerçekleşen yüksek sıcaklık yanmasıdır. Teknik yanmada yakıt ve yanma özellikleri nedeniyle fotosentez süreci tarafından özümlemeyen, çevreye zarar veren genelde gaz (CO , C_nH_m , SO_2 , NO_x gibi) ve partikül (toz, is, kurum vb.) biçiminde olan, geri dönüşümsüz emisyonlar yayılır (Şekil 2.3).

Bu geri dönüşümsüz emisyonlar, günümüz çevre sorunlarının temel nedenidir. Sanayi devriminin ardından günümüze kadar geçen sürede, fosil yakıt kullanımındaki hızlı artış ile atmosfere verilen CO_2 konsantrasyonu giderek artmaktadır. Bu artış sera etkisi ile atmosfer sıcaklığının artması ve bunun sonucunda, kutuplardaki buzulların erimesi ve denizlerin yükselmesi ile doğal bir felaketin oluşabileceği endişesini ciddi biçimde gündeme getirmektedir.

Uyumlu ve dengeli fotosentez/yanma süreçleri ile O_2 , CO_2 ve H_2O geri kazanımları ve döngüleri sağlanarak dünyanın doğal dengesi korunur. Bu dengenin korunmasında tekniğine uygun yakma ve bilinçli enerji kullanımı önemli rol oynamaktadır.

2.3 Yanmayı Etkileyen Faktörler

Yanmayı etkileyen faktörlerin belirlenebilmesi için öncelikle amaçlanan teknik yanmanın özelliklerinin, bu özelliklerinin sağlanması için gerekli koşulların ve bu koşullarının oluşturulmasına yönelik temel kriterlerin tanımlanması gerekir. Ayrıca, yakıt özellikleri, yakma sistemi yapısı ve işletme koşulları, yakıcının ısı yük değişimi karşılayabilecek niteliklerde olmalıdır. Ucuz ısı üretimi, yanma veriminin yüksek işletme ve yatırım maliyetlerinin düşük olduğu bir yakma sisteminin oluşturulmasını gerektirir (Şekil 2.2). Temiz yanma, yanmadan kaynaklanan çevre kirleticisi emisyonların, ilgili yönetmeliklerde öngörülen enerji ve işletme ekonomisine uygun boyuttaki emisyonları simgeleyen emisyon sınır değerlerinin (Çevre Bakanlığı, 1986) altında tutulduğu yanmadır. Sürekli ısı üretimi ise, yakma sisteminin işletme ömrü boyunca planlı durmalar dışında; emniyetli, güvenilir ve işlerlikli bir biçimde sürekli çalışmasının sağlanmasıdır (Durmaz, 1998).

Burada temel sorun, enerji, çevre ve işletme yönünden uygun yanma koşullarının oluşturulmasıdır. Bu nedenle, yakma mühendisliği, alev mühendisliği ile eş anlamda kullanılmaktadır. Alev bağlamında bu sorun; istenilen ısı güç ve yük değişim özelliğine sahip, yüksek yanma verimli, düşük emisyonlu kararlı bir alevin oluşturabilmesidir. Uygulamada bu sorun uygun yakma üçgeni oluşturulması olarak tanımlanır (Durmaz,1991). Bu ise, söz konusu yakıtı uygun, yakma sistemi tasarımı ve uygun operatör seçimidir. Konut ısıtılmasında bu kavram, uyumlu 3K (kömür-kazan-kaloriferi) koşulunun oluşturulması olarak tanımlanır. Yanmayı etkileyen faktörler; yakıt boyutlu, yakma sistemi boyutlu ve işletme boyutlu olarak üç grup altında toplanabilir (Ledinegg, 1966).

2.3.1 Yanmayı Etkileyen Yakıt Boyutlu Faktörler

Alt Isıl Değer : Kazan işletmesi sırasında yakıt özelliklerinde, yakma havası neminde, ısı yük ve alev soğuma koşullarındaki değişmelerin alev kararlılığı üzerinde yaratabileceği bozucu etkilerin dengelenebilmesi için, yakma sistemine bağlı olarak, yakıt ısıtma değerinin belli sınırlar içerisinde tutulması gerekir. Yararlanılabilen net yakıt ısı değerini tanımlayan alt ısı değere (H_u) karşın, yakıt üst ısı değeri (H_o), brüt yakıt ısı değerini tanımlar ve yakma teknolojisinde, yanma ısısı olarak da isimlendirilir.

Yanıcı Uçucu Oranı : Yanıcı uçucu oranı, kömürün tutuşması işlevini gören, hacimde doğal gaz benzeri homojen yanma özelliği taşıyan kömür içeriğidir. Uçucu oranı arttıkça alev boyu, dolayısıyla yanma odası boyutları artar. Uygun yanma yönünden, yanıcı uçucuların, kömürü tutuşturabilecek ve kömür yatağında veya alev içinde yanmasını tamamlayabilecek boyutta olması istenir (Durmaz, 1998).

Sabit Karbon Oranı : Sabit karbon, yanma ısısına en büyük katkı yapan, CO gazlaşması üzerinden gaz fazına geçen, zor ve yavaş yanan kömür bileşimidir. Kömür yanma davranışını kok yanma davranışı belirler, CO_2 , uçuculuk, CO, C_nH_m emisyonlarının kaynağını oluşturur. Kömür yanmasında oluşan; üç atomlu gazlar (CO_2 , H_2O), uçucu kok, is ve partiküller, yüksek ısıma özellikleri nedeniyle alev soğumasını kolaylaştırır. Böylelikle, sabit karbon oranı yüksek kömürlerin (taş

kömürü, antrasit) yakıldığı hacimlerde ısıma ile büyük ısı aktarımı sağlanabildiğinden, yanma odası boyutu küçülür (radyasyon kazanları).

Kazan tasarımında belirleyici olan üç temel sıcaklık; yanma odası sıcaklığı T_{YO} (°C), yanma odası çıkış sıcaklığı $T_{YOÇ}$ (°C) ve baca gazı sıcaklığıdır T_B (°C). Yanma odası sıcaklığı kok gazlaşması ve CO yanması için uygun sıcaklıkta ($T_{YO} > 1000^\circ\text{C}$), yanma odası çıkış sıcaklığı kül ergime sıcaklığından küçük ($T_{YO} < T_{kül.erg.}$), kazan çıkış sıcaklığı ise baca gazı sıcaklığı noktasının üzerinde olması gerekir ($T_B < T_{CN}$). Bu sıcaklıklar kazan işletmesinde 3 sıcaklık koşulu olarak tanımlanır.

Nem Oranı : Yakıtın ısıtma değerini düşürür, kömürün ısıl parçalanmasına, kok gazlaşmasına, CO' in tutuşma hızının artmasına ve alev soğumasına (radyasyon kazanları), olumlu katkı sağlar. Bu nedenle, belli sınırlar altında kalması koşuluyla, kömürün belli oranda nem içermesi istenir. Yüksek nem oranı kazan ısıl veriminin belli bir sınırının üzerine çıkartılmasını önler.

Kül Oranı ve Kül Özellikleri : Kül, kömür öğütme enerji gereksinimini miktarını artırır; değirmende, kazan ısıtma yüzeylerinde, kömür-gaz kanallarında, bacada ısıtma yüzeylerindeki kül birikimi ısı transferini engelleyerek kazan ısıl performansını azaltır. Yanma sırasında, oksijen difüzyonu ve tutuşmayı zorlaştırır, yanma hızını düşürür. Kül ergimesi sonucu, ısıtma yüzeyleri ergimiş kül ile kaplanarak ısı transferi engellenir ve ısıl verim düşer. Korozyon oluşumu kazan işletme ekonomisi ve kazan ömrünü olumsuz etkiler ve kazanın ısıl verimi düşer. Kazan tasarımının, kömür külünün mekanik, ısıl ve korozif özelliklerinin ayrıntılı biçimde dikkate alınarak yapılması, enerji ekonomisi ve işletme güvenilirliği yönünden büyük önem taşır. İşlerlik analizlerinde, külün, yakma sistemi ve işletme ekonomisi üzerindeki etkileri ayrıntılı biçimde ele alınmalıdır. Yanma odası ısıtma yüzeyi boyutlandırılması $T_{YOÇ} < T_{kül.erg.}$ koşulunun oluşturulacağı biçimde yapılmalıdır.

Dokusal, Fiziksel ve Isıl Özellikler : Kömürün, dokusal, fiziksel ve ısıl özellikleri; yakıt-hava karışımını, O_2 difüzyonunu, yanma biçimini, ısı ve kütle transferi ile alev kararlılığını etkiler.

Tane Boyutu ve Biçimi : Bu özellikle yanma koşullarını, alev davranışını, yanma hızını, yakma sisteminin ısı kapasitesini, yanma kökenli emisyonları, yakma sistemi yapısını ve yanma odası özelliklerini belirler.

Kükürt Oranı : Yanan kükürt, yanma gazındaki SO_2 oranını ve SO_2 ' in kısmi basıncını belirler. SO_2 emisyonlarını artırır, çığ noktasının altına düşürülmesi durumunda düşük sıcaklık (H_2SO_4) korozyonu oluşur. Bu oluşum, sistemin işlevliliğini düşürür ve sistem ömrünü kısaltır.

Azot Oranı : Azot oksit emisyonlarını artırır.

2.3.2 Yanmayı Etkileyen Yakma Sistemi Boyutlu Faktörler

Yakma sistemi (yakıt hazırlama, brülör, yanma odası) ile kazan ısıtma yüzeylerinin ve donanımlarının tasarımı (boyutlandırma ve biçimlendirme) belli bir yakıt özellik bandı esas alınarak yapılır. Bu bant, yakma sistemine göre değişir. Toz kömür yakma sistemlerinde daha dar, akışkan yatak yanma sistemlerinde ise daha geniştir. Kazan girişindeki ham kömür özellikleri, yakıt hazırlama sistemleri ile kazan tasarımına esas olan kömür bandı sınırı içerisine getirilir (Durmaz, 1998).

Yakıt Hazırlama : Kırma, yıkama, harmanlama, öğütme, kurutma, gazlaştırma, briketleme vb. işlemleri ile ham kömürün özellikleri, ilgili yakma sisteminin yapısı ve girdi özelliklerine uygun hale getirilir.

Yakıt-Hava Karışımı : Uygun brülör, ızgara, akışkan yatak tasarımı; uygun yakıt ve hava besleme uygulamaları ile öngörülen yakma biçimi için gerekli yakıt-hava karışımı sağlanır. Kademeli yakma, özellikle CO ve NO_x emisyonlarının yanma odasında tutulması yönünden etkin bir birincil emisyon kontrol uygulamasıdır (hava ve yakıt kademelendirilmeli yakma uygulamaları).

Yanma Odası Tasarımı : Kömürün, yanma odasında uygun ve sürekli biçimde gaz fazına geçirilmesi, hava ile karışması, tutuşması, kararlı alev koşullarında tam yanmanın sağlanması; yanma odasının ve alevi çevreleyen ısıtma yüzeylerinin, uygun alev soğumasını sağlayacak biçimde tasarımını ve konumlanmasını gerektirir. Bu ise, alevin, yanma odasını olabildiğince doldurmasını, ısıtma yüzeylerini

yalamamasını, yanma odası çıkış sıcaklığının kül ergime sıcaklığının altında tutulmasını ve ızgara yüzeyinde kül ergimesinin önlenmesini (ızgara soğutma) gerektirir. Bu koşulların sağlanması ile yanma verimi ve alev kararlılığı iyileştirilir. Kazan işletme ömrü artırılır ve yanmadan kaynaklanan emisyonlar azaltılmış olur (Durmaz, 1998).

Kademeli Yakma : Yakıt ve havanın çeşitli biçimlerde kademeli olarak beslenmesi, alev içi alev dışı resirkülasyonları, baca gazı geri beslemesi vb. uygulamalar yardımı ile yakma sisteminin yanma verimi ve emisyon çıkışı azaltılır.

Baca Gazı Arıtma : Yanmadan kaynaklanan; CO, C_nH_m ve yanıcı uçucu partiküller gibi emisyonlar, yanma koşullarının iyileştirilebilmesi ile azaltılabilir (Durmaz, 1993). Izgaralı yakma sistemlerinde emisyon kontrolü, standart kömür kullanımı ve uygun işletme koşullarının oluşturulması ile sağlanır. Akışkan yataklı yakma sistemleri, yapısal olarak, SO_x ve NO_x emisyonlarının filtrelenmesi veya bastırılması yönünden uygun olduğundan, genelde ek arıtma tesisleri gerektirmez. Toz kömür yakma sistemlerinde NO_x oluşumu, kademeli yakma uygulaması ile azaltılmaya çalışılır (Epple ve diğ., 1996).

Kükürt oranı yüksek kömürlerde, SO₂ emisyonlarının düşürülebilmesi için, küçük sistemlerde S oranı düşük yakıt seçilmesi, büyük sistemlerde ise ek desülfürizasyon tesislerinin kurulması gerekir (Durmaz, 1987).

2.3.3 Yanmayı Etkileyen İşletme Boyutlu Faktörler

Tekniğine uygun işletme, bakım-onarım ve yanma kontrolü uygulamaları ile yakma sisteminde, tasarıma öngörülen, verimli, temiz yakmaya yönelik, uygun alev koşullarının oluşumunun sürekliliği sağlanır (Yanmanın 3T koşulu, işletmenin 3 sıcaklık koşulunun sağlanması). Tasarıma esas alınan özellikte yakıt sağlanamaması, girdi hazırlama ve çıktı koşullandırma sistemlerinde (Şekil 2.1) yapılacak iyileştirme ve değişikliklerle, ilgili standart ve yönetmeliklerde istenilen yanma ve emisyon değerlerine ulaşılmaya çalışılır (Kather, 1995).

2.4 Kömürün Yanması ve Yanma Mekanizması

2.4.1 Kömürün Homojenleştirilmiş Yanma Mekanizması

Teknik yanma, fosil yakıtların temel yanıcı elemanları (C, H, S) ile havanın yakıcı elemanı (O_2) arasında yüksek sıcaklıkta yakma sistemlerinde meydana gelen ısı ve emisyon oluşumlu karmaşık bir kimyasal süreçtir. Kükürtün oksitlenmesi ile oluşan kükürt oksitleri emisyonları (SO_2 , SO_3) yanı sıra, eksik yanma sonucu, gaz (CO , C_nH_m) ve partikül biçiminde (is, kurum, uçucu kok) emisyonlar; bir kısım yakma havası azotu ve yakıt azotunun oksitlenmesi ile azot oksitler; yakıt külünün toz biçiminde çevreye verilmesi ile de toz emisyonları oluşur. Yanmanın esas ürünü olan ısı, sosyoekonomik yaşamın gereksinim duyduğu tüm faaliyetler için temel enerji girdisini oluşturur. Yanmanın istenmeyen yan ürünü olan emisyonlar ise, kirleticiler olarak çevreye yayılır (Şekil 2.3).

Fosil yakıtlar, faz durumlarına göre; gaz, sıvı ve katı yakıtlar olmak üzere üç ana grup altında toplanır. Katı yakıtlar da odun, turba, linyit, taşkömürü, antrasit vb. biçimde sınıflandırılmakta, bunların da her biri ayrıca alt sınıfa ayrılabilir. Yakıtların yanma özelliği yakıt türüne (katı, sıvı, gaz) yakıt ısı değerine, yakıt bileşimine (sabit karbon, nem, uçucular, kül vb.), ön hazırlama ile yakıt fiziksel özelliklerinin yanma için uygun hale getirilmesine (yıkama, kırma, öğütme, ön ısıtma, parçalama vb.), yakıt besleme biçimine, kül ve yakıt dokusunun yanma odasında davranışına ve diğer birçok faktöre bağlıdır.

Yakıt ve havanın gaz fazında bulunduğu yanma biçimi homojen yanma olarak adlandırılır. Sıvı yakıtların ve kömürün yanması ise, heterojen özellikli bir yanmadır. Yanma biliminde, homojen yanma en kapsamlı araştırılan ve kavranması en kolay olan yanma biçimidir. Buna karşın, homojen yanma durumunda bile, yanma evreleri, yanma reaksiyonları ve emisyon oluşum mekanizmaları, henüz tam olarak aydınlatılabilmiş değildir. Katı ve sıvı yakıtların heterojen yanma mekanizmalarının, yakma sistemi analiz ve sentezine yönelik olarak kavranması ve irdelenmesinde, homojen yanma modelinden sağlanan teknik bilgilerden yararlanılmaktadır (Durmaz, 1998).

Katı faz durumu ile ilgili karmaşık heterojen (gerçek) kömür yanmasına geçmeden önce, kömürü gaz fazına geçmiş kabul ederek, homojen yanmanın kısaca incelenmesi yararlı olacaktır. Homojen yanmanın tam olarak anlaşılabilmesi için, bu süreci oluşturan ve kontrolünde etkin olan evrelerin ayrıntılı biçimde incelenmesinde yarar vardır.

Gaz yakıtların veya gaz fazına geçirilmiş kömürün homojen yanması ile ilgili yanma aşamaları ve yanma koşulları aşağıda verilmiştir.

- Yanmanın hazırlık aşaması ve karışım koşulu
- Yanmanın başlama (tutuşma) aşaması ve sıcaklık koşulu
- Homojen yanma aşaması ve zaman koşulu

Hazırlık evresinde; gaz fazına geçen, yakıt, türbülans etkisi altında hava ile iç içe karışıp, olabildiğince moleküler düzeyde, yanıcı bir gaz karışımı oluşturulur. Bu evrenin koşulu (T1-Koşulu), gerekli türbülansın oluşturulmasıdır. Yanmanın başlama evresinde; yanıcı karışım, bir ısı deposundan (alev) ısı verilip, sıcaklığı, yanma reaksiyonlarının başlayabileceği bir düzeye çıkartılarak tutuşması sağlanır. Bu evrenin koşulu (T2-Koşulu), yanıcı karışım sıcaklığının tutuşma sıcaklığı üzerine çıkartılmasıdır.

Tutuşmanın başlamasının ardından, yanıcı karışım belli bir yanma hızı ile belli bir yanma süresinde yanmasını tamamlar. Bu evrenin koşulu (T3-Koşulu), yanmanın tamamlanabilmesi için, yanıcı karışımın yeterli bir zaman süresince, yanma koşullarının bulunduğu yanma odası gibi bir ortamda kalmasının sağlanmasıdır. Yanma genel anlamda, gaz fazında ve 3T koşulunda oluşur.

Yanmanın, hazırlık, başlama ve tamamlama evreleri; uygun türbülans, sıcaklık ve zaman koşullarının oluşturulması ile gerçekleştirilir. İngilizce’ de Turbulance-Temperature-Time sözcükleri ile tanımlanan bu koşullar, yanmanın temel 3T-koşulu olarak isimlendirilir. Bu süreçler yakıt türüne, yakıt yanma özelliklerine, ve yakma sisteminin yapısına vb. faktörlere bağlı olarak farklılık göstermekte, iç içe oluşarak birinden etkilenmekte ve karmaşık bir davranış sergilemektedir (Dolezal, 1967).

2.4.1.1 Homojen Yanmanın Hazırlık Aşaması ve Karışım Koşulu

Yakıt-hava karışımında, ideal yani moleküler bir karışım amaçlanır. Moleküler bir karışım ile oluşan yanma ise, homojen yanma olarak isimlendirilir. Böyle bir karışım ve yanma, ancak gaz yakıtlar için düşünülebilir. Sıvı ve katı yakıtlarda, yanma hacminin her bölümünde olabildiğince aynı yakıt/hava karışım oranların ulaşılmaya çalışılır. Yakıt ve hava akımlarının tamamen karışabilmesi için, karışımı sağlayan; kesme, merkezkaç ve kaldırma gibi kuvvetlerin etkisi altında birlikte belli bir yol almaları veya belli bir süre birlikte kalmaları gerekir. Bu ise, yakma sisteminde oluşturulan karışım işleminin yatırım ve işletme boyutunu belirler. Yakma sistemlerinde, ideal bir karışım söz konusu olamayacağından, yanma verimi her zaman birden küçüktür (Durmaz, 1998).

İki ayrı yakıt ve hava akımından, moleküler karışım oluşuncaya kadar devam eden gaz-gaz karışım süreci; kaba karışım, ince karışım ve moleküler karışım aşamalarından oluşur. Hızın etkin olduğu kaba karışım, farklı hızlardaki iki akımın belli konum ve eğimde karşılaştırılması sonucu meydana gelen kesme kuvvetleri ile sağlanır. Bu kesme kuvvetlerinin oluşturduğu kaba türbülans gaz topakları, yanma odası içerisinde ufalanarak ince türbülans topaklara dönüşür ve ince yakıt-hava karışımını oluşturur (Dolezel, 1967).

Yanma teorisinde, stokiometrik yanıcı karışım kavramı, önemli bir yere sahiptir. Böyle bir yanmada ancak yanma reaksiyonlarının gereksinim duyduğu bir miktarda oksijen (hava) sağlanır. Stokiometrik veya teorik yanma olarak tanımlanan bu yanma, en uygun reaksiyon ve en verimli enerji kullanma koşullarını tanımlar (Durmaz, 1998).

2.4.1.2 Homojen Yanmanın Başlama (Tutuşma) Aşaması ve Sıcaklık Koşulu

Yanıcı karışım, ortam sıcaklığında çok yavaş reaksiyona girer. Yanma reaksiyonunun başlaması için yeterli bir aktivasyon enerjisinin sağlandığı ve yakıt-hava karışımının getirilmesinin gerektiği sıcaklık, tutuşma sıcaklığı olarak tanımlanır. Yakma sistemlerinde, yanma reaksiyonları genelde yanma koşullarının bulunduğu yanıcı karışım akımında oluşur. Açık sistemlerde, yanıcı karışım başlangıçta bir kez dış

enerji kaynağı ile tutuşturulur. Sürekli tutuşma ise yeni gelen yanıcı karışımın alevden, türbülans geri döngüleriyle aldığı ısı ile sağlanır.

Tutuşmanın kolaylaştırılabilmesi ve kararlı alev koşullarının oluşturulabilmesi için, hava ve yakıtın yanma odasına girmeden önce ısıtılarak, tutuşma ısısının bir bölümünün ön ısıtma ısısından sağlanması yoluna gidilir. Hava ön ısıtma sıcaklıkları, yakıt tutuşma sıcaklıklarının altında olduğundan, tutuşmanın başlatılabilmesi için bir bölüm ısısının yanma odasından alınması zorunludur.

Yanıcı karışımın tutuşma davranışı, en başta yakıtı oluşturan yanıcı gazların yapısal ve ortamsal tutuşma özelliklerine (tutuşma sıcaklığı, tutuşma bölgesi, tutuşma hızı, alev ısınma/soğuma özelliği, yakıt nemi, hava hızı, ortam basıncı vb.) bağlıdır. Bu durum tutuşma sıcaklığının tanımını ve ölçülmesini zorlaştırır. Tablo 2.1' de çeşitli yakıtlar için verilen, 600°C' in çok az aşıldığı tutuşma sıcaklıkları, genel bilgi edinmeye yönelik veriler olarak algılanmalıdır (Dolezel, 1982).

Katı yakıtlarda tutuşma sıcaklığının belirlenmesi çok daha zordur. Laminar alev ve ortam koşullarında (1 atm., 25°C) çeşitli yanıcı gazların ve teknik yakıtların alt ve üst tutuşma sınırları (K_{alt} , $K_{üst}$), kritik (patlayıcı) karışım ve stokiometrik karışım oranları (K_{kr} , K_{st}) ile bu karışım koşullarındaki alev (tutuşma) hızları (w_{st} , w_{max}), Tablo 2.2' de verilmiştir. Kritik karışım oranı K_{kr} , yanıcı karışımın maksimum tutuşma hızına ulaştığı karışım oranını tanımlar.

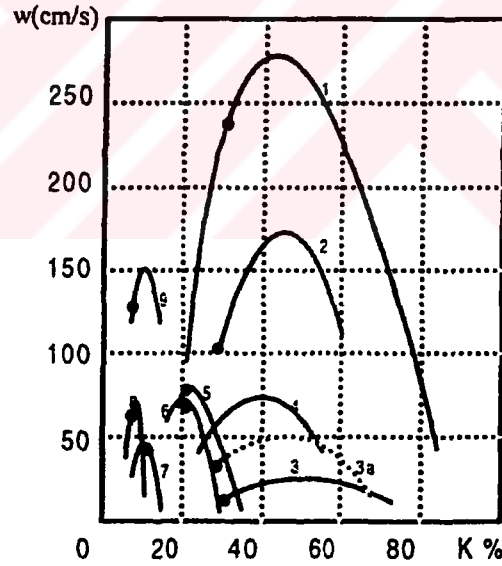
Tablo 2.1. Bazı Yanıcı Gazların ve Sıvı Yakıtların Tutuşma Sıcaklıkları (Durmaz, 1998).

Yanıcı Gaz	Tutuşma Sıcaklığı (°C)	Sıvı Yakıt	Tutuşma Sıcaklığı (°C)
Karbonmonoksit	590	Benzin	330-520
Hidrojen	450	Benzol	520-600
Metan	645	Gaz Yağı	230-242
Etan	500	Fuel-oil	212
Etilen	485	Linyit	260
Propan	490	Katranı Yağı	
Bütan	460	Taş Kömürü	315
Asetilen	-	Katranı Yağı	

Tablo 2.2. Bazı Gazların ve Teknik Yakıtların Tutuşma Sınırları ve Tutuşma Hızları (Durmaz, 1998).

Gaz	K_{Alt} (%)	$K_{Üst}$ (%)	K_{St} (%)	W_{St} (cm/s)	K_{Kr} (%)	W_{max} (cm/s)
Metan	5.00	15.00	9.50	42.00	10.17	43.00
Etan	3.22	12.45	5.64	47.60	5.99	48.70
Propan	2.37	9.50	4.07	46.00	4.27	47.20
Bütan	1.86	8.41	3.13	43.40	3.38	45.20
Asetilen	2.50	80.00	7.75	155.00	9.30	168.00
Hidrojen	4.00	74.20	29.58	237.00	42.50	264.00
Karbonmonoksit	12.50	74.20	29.58	17.40	41.50	19.50
Şehir Gazı	-	-	21.40	86.00	25.20	103.50

Laminer alev ve ortam koşullarında, çeşitli yakıtların tutuşma hızlarının, yanıcı gaz karışım oranlarına göre değişimi Şekil 2.4.' de verilmiştir. Alev hızları, yanma odası basıncı ile artar. Yanıcı karışım sıcaklığının artırılması da alev hızını arttırmaktadır (Dolezal, 1961). Alt tutuşma sınırındaki tutuşma hızları, genelde üst tutuşma sınırındaki tutuşma hızlarına kıyasla çok daha yüksektir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Bazı Yanıcı Gazların ve Teknik Yakıtların Laminer Alev Hızları ve Tutuşma Bölgeleri (Durmaz, 1998).

- | | |
|-------------------------------------|----------------------|
| 1 : Hidrojen (H_2) | 5 : Şehir Gazı |
| 2 : Su Gazı (%50 H_2 , %40 CO) | 6 : Taş Kömürü Gazı |
| 3 : Karbonmonoksit (CO) | 7 : Metan (CH_4) |
| 3a : %2.3 H_2O , CO Karışımı | 8 : Etilen |
| 4 : Yüksek Fırın Gazı | 9 : Asetilen |
| (.) Stokiyometrik Karışım ($n=1$) | |

Laminer ön karışım alevinde; alev cephesi profili sabittir. Teknik yakma sistemlerinde, alev cephesi sürekli değişir ve türbülanslıdır. Bu türbülanslılık durumu, alev cephesinin ısı aktarımı ve oksijen difüzyonu etkinliğini artırır. Bu nedenle, türbülanslı alev hızı, laminar alev hızından birkaç kat daha fazladır.

2.4.1.3 Homojen Yanma Aşaması ve Zaman Koşulu

Küçük yanma odalarında yüksek kazan ısı kapasitelerine ulaşılabilmesi için, tutuşma ile başlatılan, yanıcı gaz karışımının yanma ve oksitlenme reaksiyonlarının en hızlı biçimde tamamlanması istenir. Yanma odası boyutu ve yakma sisteminin ısı kapasitesi, doğrudan yanma hızına bağlıdır. Yanma hızı, yanma reaksiyonu hızı veya oksijen sağlama (difüzyon) hızı tarafından belirlenir. Kimyasal reaksiyon hızı, sıcaklığa bağlı olarak üstel fonksiyon şeklinde artar. Fiziksel koşulların etkin olduğu yakıt-hava karışım hızı ise sıcaklık artışından çok az etkilenir. Bu nedenle, teknik yakma sistemlerinde yanma hızı genelde yakıt-hava karışım hızı tarafından sınırlandırılmaktadır (Durmaz, 1998).

Yanma odası içinde bulunan alev, yanıcı karışım akımında, yanma koşullarının ve yanmanın olduğu, ısının doğduğu yanma odası bölümüdür. Bu nedenle alevin olabildiğince yanma odasını doldurması ve tüm yanma odasının yanma için uygun koşullara sahip olması istenir. Alev ceketini oluşturan yanma odası duvarları, iş akışkanı ısıtma yüzeylerince kaplanır ve alevden ısı çeker. Böylece yanma hızı ile alev sıcaklığı artar, alev soğuma hızı ile alev sıcaklığı düşer. Alev ısınma ve soğuma ısı akılarının eşitlendiği işletme koşullarında, alev kararlılığı sağlanır (stabil alev oluşumu). Burada önemli olan, bu kararlılığın, verimli ve temiz yanma için gerekli alev koşullarını oluşturabilmesidir. Kararlı alev koşullarında; alev sıcaklığı, alev boyutları, alev geri döngüsü, türbülans gibi özelliklerin, çeşitli bozucu etkenler altında oluşabilecek alev sönmesini, yanma verimi düşmesini, hava kirletici emisyon artışını önleyecek veya belli sınırlar içerisinde tutabilecek boyutta ve yapıda olması gerekir. Bu koşulları sağlayan alev, optimum alev; böyle bir alev ile gerçekleştirilen yanma ise optimum yanma olarak tanımlanır.

Kömürün hava ile karıştırılması, gaz fazına geçirilmesi, gaz-gaz karışımı ile yanıcı gaz karışımı oluşturulması; karmaşık, heterojen yüzey reaksiyonları ile meydana

gelir. Kimya bilimindeki reaktif yüzey kavramı, kömürün yanması ile yakından ilgilidir ve kömürün gazlaşma hızını belirler. Bu nedenle, reaktif yüzey arttırılarak, hızlı bir gazlaşma ve yanma ile yüksek ısı kapasiteli yakma sistemlerinin oluşturulabilmesi, kömürün öğütülmesini gerektirir. Bu tür yakma sistemlerinde, bir kömür taneciğinin, yanma odasında, yanma koşullarında, hacimde askıda kalma süresi 1 saniye civarındadır. Taneciğin, bu süre içinde gazlaşma ve yanmasının tamamlanması gerekir. Bu nedenle, toz kömür yakma sistemlerinde kömür tane boyutu 10-200 µm civarında tutulur (Dolezal, 1967).

2.4.2 Kömürün Heterojen Yanma Mekanizması

Artan yakıt fiyatları, gittikçe daha temiz bir yanma öngören çevre yasaları ve yönetmelikleri karşısında, ekonomik ve çevre yönünden uygun ısı üretimi; büyük kapasiteli, yüksek yanma ve ısı verimli, düşük hava kirletici emisyonlu kömür yakma sistemlerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu sorun, özellikle düşük kaliteli kömürlerin uygun biçimde yakılması yönünden daha da önem kazanmaktadır.

Kömürlerin yüksek ısı kapasite, yüksek yanma verimi ve düşük emisyonla yakılması ile ilgili yanma koşullarının ve yanma davranışının belirlenmesi, bu davranışın amaç doğrultusunda biçimlendirilmesine yönelik kömür yanma mekanizmasının bilinmesi, enerji ekonomisi ve çevresel etki yönünden uygun kömür yama sistemleri tasarımı ve işletmesi için büyük önem taşır (Durmaz, 1998).

Kömürün yanma ısı kapasitesinin artırılması, kömür-hava karışımının, kömür gazlaştırılmasının, gazlaşmış kömürün hava ile olabildiğince homojen biçimde karışımının hızlandırılmasını gerektirir. Kömürün yanma veriminin artırılması; kömürün uygun şekilde hazırlanmasına ve gazlaştırılmasına, olabildiğince homojen yakıt-hava karışımı sağlanmasına, uygun tutuşma ve yanmayı sağlayacak kararlı alev koşullarının oluşturulabilmesine bağlıdır. Yanmadan kaynaklanan partikül emisyonları ve gaz emisyonları, yanma veriminin artırılmasına veya uygun alev oluşturulmasına bağlı olarak azalır. Yakıttan kaynaklanan, SO₂ ve toz (kül) emisyonları, uygun yakıt seçimi veya yanma odasının yapısal olarak filtreleme özelliğine kavuşturulması ile belli ölçülerde azaltılabilir.

Heterojen, kömür yanma mekanizması, kömürün gaz fazına geçirilerek, heterojen yanma koşullarının, homojen karışım ve yanma koşullarına dönüştürülmesi yaklaşımı ile üç aşamada incelenebilir (Durmaz, 1998).

2.4.2.1 Kömür-Hava Karışımı ve Yanıcı Gaz Karışımı Oluşturulması

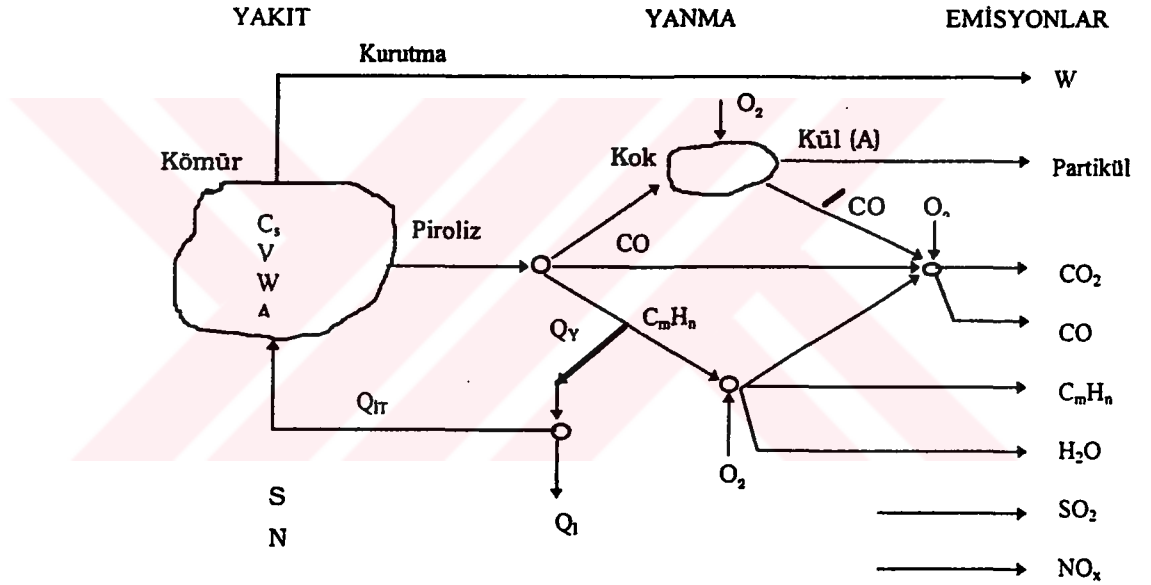
Heterojen kömür-hava karışımı ve yanıcı gaz oluşturulması; çeşitli kömür hazırlama işlemlerine (kıрма, öğütme, eleme vb.), makro karışım (brülör), piroliz, kok gazlaşması, mikro karışım, kömür gazlaşma ısısı boyutu, ısı kaynağı ve bu enerjinin aktarım biçimi gibi birçok faktöre bağlıdır. Tüm bu faktörlerin etkisi; yakılan kömürün analizi, yanan kömür taneciğinin boyutu, biçimi ve yanma odasındaki türbülans özelliği göz önünde tutularak irdelenebilir. Kömür yakma sistemleri, kömür analizine, tanecik boyutuna ve tanecik dinamiğine bağlı olarak; ızgaralı yakma sistemleri, akışkan yataklı yakma sistemleri ve toz kömür (brülörlü) yakma sistemleri olmak üzere üç gruba ayrılır (Durmaz, 1998).

Izgaralı yakma sistemlerinde büyük taneli standart parça kömür yakılır. Standart kömür belli boyutta, biçimde ve belli ısı değerinde kül, nem, yanıcı uçucu ve S oranına sahip olmalıdır. Izgara üzerine verilen parça kömür (10-150 mm), ızgara üzerinde hareketsiz olarak yanar. Yanma, ızgara üzerindeki kömür yatağında gerçekleşir. Kömür yatağı, hava geçirgen ve oksijen emme özelliğine sahip olmalı; yanıcı uçucuların yanması, olabildiğince yatak içinde tamamlanmalıdır. Bu nedenle ızgaralı yakma sistemlerinde; tutuşma için yeterli yanıcı uçuculu, uygun biçimli ve tane boyutlu, uygun özellikte kömürlerin (standart kömür) yakılması zorunluluğu vardır.

Akışkan yataklı yakma sistemleri daha küçük boyutlu parça kömürle (0.5-10 mm) çalışır. Kömür akışkan yatağa beslenir. Akışkan yatak, 850-950°C sıcaklıkta, kül, kireç, kum gibi inert maddelerden oluşan ve bir hav yastığı üzerinde akışkanlaştırılan bir sistemdir. Yatak sıcaklığının 850-950°C sıcaklıkta tutulmasının başlıca nedeni, bu sıcaklıklarda ısıl NO_x oluşumunun düşük, SO_2 tutma veriminin ise yüksek olmasıdır. Bu yapısal özellikleri nedeni ile akışkan yatak, düşük kaliteli kömürlerin (düşük ısı değer, yüksek kül, nem, kükürt oranı) verimli ve temiz biçimde yakılması için

uygundur. Akışkan yatak, geniş bir yakıt bandında ve yük bölgesinde, ilave SO_2 ve NO_x arıtma sistemlerine gerek duyulmaksızın, verimli ve temiz yanma için gerekli yama koşullarının yapısal olarak bünyesinde taşıyan bir yakma sistemidir.

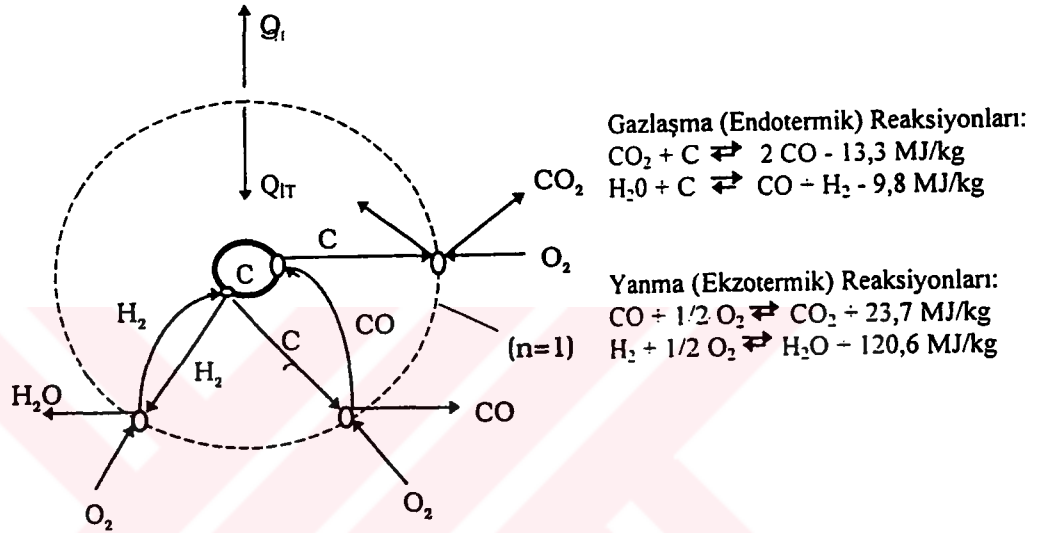
Toz kömür yakma sistemlerinde ise kömür, uygun tane boyutunda ($10\text{-}200\mu\text{m}$) öğütülerek, yanma odasına brülör ile püskürtülür. Toz kömürlü yakma sistemlerinde, yüksek ısı kapasite ve yanma verimleri sağlanabilir. Bir kömür taneciğinin yanma odasında kurutma, piroliz ve kok gazlaşması ile gaz fazına geçişi, gaz fazındaki yanıcı gazların oksitlenmesi ve oluşan yanma ürünleri ile emisyonlar, Şekil 2.5 'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Bir Kömür Taneciğinin Gazlaşması, Yanması ve Yanma Ürünleri (Durmaz, 1998).

Kömür taneciği, 100°C civarında bünyesindeki nemi (W) bırakır. $400\text{-}800^\circ\text{C}$ civarında, bünyesindeki yanıcı uçucu maddeleri (V) hidrokarbon gazları ve katran buharı biçiminde C_mH_n türü ürünler ve kok açığa çıkar. Açığa çıkan, metan ağırlıklı hidrokarbon gazları ve katran buharı, homojen karışma ve tutuşma özelliği gösterir ve kokun tutuşmasını sağlar. Kömürün gazlaşmasının başlangıç aşamasını oluşturan piroliz sonucu açığa çıkan kok; O_2 , H_2O ve CO_2 ' in indirgeme etkisi ve karmaşık mikro karışım mekanizması ile CO' e dönüştür (Şekil 2.6). Başlangıçta, sabit karbon (C_s), nem (W), yanıcı uçucular (V) ve külden (A) oluşan katı fazdaki kömür;

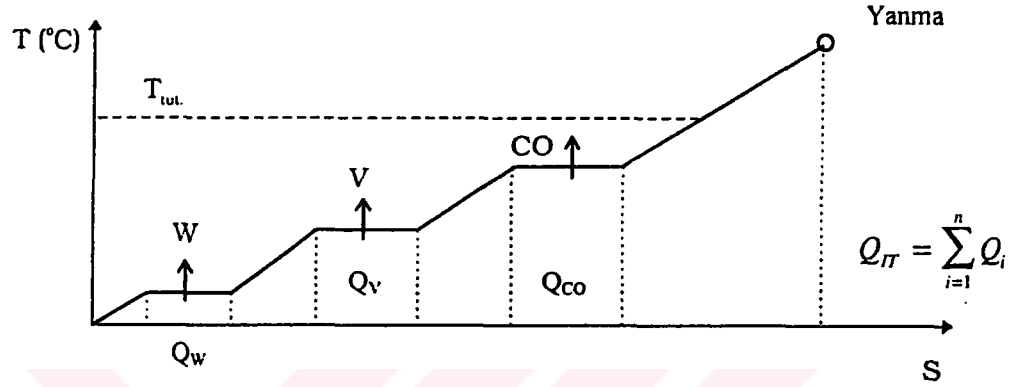
gazlaşma sonucu CO, C_nH_m, H₂O ve külden oluşan, iki fazlı yanıcı gaz karışımına dönüşür. Kömürün gazlaşmasında açığa çıkan külün, uzaklaştırılamaması durumunda, kömür taneciğini örterek oksijen difüzyonunu önler. Türbülanslı yanma koşullarının bulunduğu, akışkan yataklı ve toz kömür brülörlü yakma sistemlerinde, toz ayrışma işlemi kendiliğinden oluşur. Izgaralı yakma sistemlerinde, kömür yatağına belli aralıklarla hareket verilip, toz ayrışmasının sağlanması gerekir.



Şekil 2.6. Bir Kok Taneciğinin 950°C' nin Üzerindeki Sıcaklıklarda Gazlaşması ve Yanması (Durmaz, 1998).

Kömür taneciğinin gazlaşması (kütle transferi) aşamalarında; ısıtma, kurutma (Q_w), piroliz (Q_v), kok gazlaşması (Q_{co}) ve oluşan yanıcı karışımın tutuşma sıcaklığına yükseltilmesine kadar gerekli toplam iç tüketim ısı enerjisi (Q_{IT}), Şekil 2.7' de gösterilmiştir. Yakma sisteminin yüksek ısı kapasitelerine kavuşturulabilmesi kömür taneciğinin toplam iç tüketim ısısının (Q_{IT}) olabildiğince azalmasına ve bu ısının bir ısı deposundan (alev, kor tabakası vb.) çok hızlı bir biçimde sağlanmasına, yani ısı transferine bağlıdır. Bunun için, yakıtın tanecik kütlelerinin küçültülmesi (ısı ve kütle sığası) ve dış yüzey ısı transfer alanının (ısı, kütle kapısı) olabildiğince büyütülmesi gerekir. Bu koşullar; bir taraftan, yakıt taneciğinin dış yüzey alanının kütlelerine olan oranı, uygun biçim faktörü ile maksimize edilerek; diğer taraftan, yakıt taneciğine, kesme, merkezkaç, kaldırma kuvvetleri, basınç ve konsantrasyon gradyanları gibi etkilerle, türbülans verilir (ısı ve kütle transfer katsayıları) sağlanabilir. Bu

koşullar, yanma veriminin artırılması için de geçerlidir. Alan/hacim oranı, yakıt taneciği biçimi faktörünü verir. Biçim faktörü, kürede en küçük, prizmada daha büyük, içi delik ince duvarlı silindirde ise en büyüktür. Bu nedenle, ezilerek öğütülmüş gözenekli kömür taneciği, yanma için en uygun fiziksel yapıyı oluşturur (Dolezal, 1967).



Şekil 2.7. Bir Kömür Taneciğinin Gazlaşması ve Tutuşması İçin Gerekli İç Tüketim Enerjisi (Durmaz, 1998).

Kömür taneciğinin gaz fazına geçme aşamaları, ortam (yanma odası) sıcaklığına bağlı olarak farklı özellikler gösteren, kütle ve ısı transferi mekanizmaları üzerinde oluşur. Bir kok taneciğinin, yüksek sıcaklıklarda ($>950^{\circ}\text{C}$), su buharı (H_2O) ve CO_2 yükseltgeme etkisinde, endotermik mikro gazlaşma mekanizması ile gazlaşması ve oluşan CO' in, stokiometrik karışım koşulundaki sınır tabakasında (alev cephesi) yanması Şekil 2.6' da görülmektedir. (Knorre, 1957; Dolezal, 1967). 950°C ' in üzerindeki sıcaklıklarda O_2 , kömür yüzeyine ulaşamamakta, kok gazlaşması, genelde kok etrafında bulunan kömürün yanma ürünlerinin (H_2O ve CO_2) yükseltgeme etkisi ile oluşmaktadır. Yanma ürünleri olan H_2O ve CO_2 , kok yüzeyinde veya gözeneklerinde, endotermik gazlaşma reaksiyonları ile koku gaz fazına geçirir (Şekil 2.6.). Oksijensiz sınır tabakasını difüzyon yolu ile geçen yanıcı gazlar (H_2 ve CO), stokiometrik yanma koşullarının olduğu ($n=1$) sınır tabakasında (Şekil 2.6., kesikli çizgi) yanar; oluşan ısıнын bir bölümü, yanma iç tüketim ısı gereksinimi (Q_{IT}) karşılamak üzere yakıtı aktarılır. Yararlanılabilir net yanma ısısı veya ısıtma ısısı (Q_1), yanma gazlarına yüklenir. Yanma ürünlerinin (CO_2 ve H_2O) bir bölümü, kok

gazlaştırma aracı olarak yine koka geri döner ve gazlaşmanın sürekliliğini sağlar (Durmaz, 1998).

Kok yüzeyindeki endotermik reaksiyonlarda, 1 mol yükseltgeyici gaz girdisi H_2O ile 2 mol yanıcı gaz çıktısı (H_2 ve CO) sağlanır. Buna bağlı olarak, kok yüzeyinde yerel hacimsel büyüme ve basınç artışı olur. Oluşan yanıcı gazlar (H_2 ve CO), sınır tabakasında yanarak; 2 mol girdi, 1 mol çıktı sonucu hacimsel küçülmeye ve yerel basınç düşmesine neden olur. Böylelikle kok yüzeyi bir nevi basınç kaynağına ve ısı kuyusuna (yüksek basınç, düşük sıcaklık), sınır tabaka ise ısı kaynağına ve basınç kuyusuna (yüksek sıcaklık, düşük basınç) dönüşür. Bu mikromekanizma ile kömür taneciğinin sınır tabakasına, yanma için yanıcı gazlar (H_2 ve CO); ısı kaynağı olan sınır tabakasından ise kömür taneciğine, gazlaşma için gerekli ısı taşınır (Durmaz, 1998).

2.4.2.2 Kömürün Heterojen Tutuşması

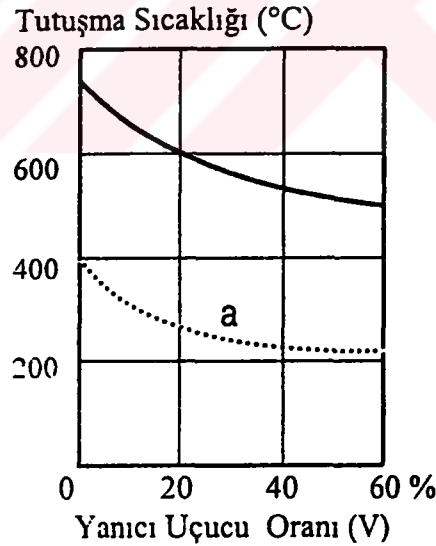
Kömürün heterojen tutuşması, homojen yanıcı gaz tutuşma sürecine benzer davranış gösterir ve bu süreç, kömür yanmasının T2-koşulu olarak tanımlanır. Kömür, 400-800°C civarında oluşan piroliz süreci ile bünyesindeki yanıcı uçucu maddeleri, hidrokarbon gazları (metan gibi) ve katran buharı biçiminde salgılar. Bu yanıcı gazlar, ilk önce homojen tutuşma biçiminde tutuşur ve ardından kok gazlaşması üzerinden kömürün yanmasını sağlar. Kömür; gazlaşmasının ardından, CO ve metan ağırlıklı hidrokarbon gaz karışımından oluşan ve kül de içeren iki fazlı bir yanıcı karışıma dönüşür (Durmaz, 1998).

Bu karışım, homojen, metan ve CO tutuşmasına oranla daha farklı bir tutuşma özelliği gösterir. Bunun nedeni, moleküler kömür-hava karışımının sağlanamaması, yanıcı karışımda, yakma havası hacminin kömür hacmine oranının 1000' in üzerinde bulunması, zengin-fakir özellikli heterojen bir yanıcı karışım dokusunun meydana gelmesi ve külün O_2 difüzyonunu zorlaştırmasıdır. Ayrıca, endotermik kömür gazlaşma reaksiyonları da kömürün tutuşma davranışını etkiler. Tablo 2.3' de, bazı katı yakıtların tutuşma sıcaklıkları verilmiştir. Bu değerler, öğütülmüş (toz) kömür için geçerli olan tutuşma sıcaklıklarının oldukça altındadır.

Tablo 2.3. Bazı Katı Yakıtların Tutuşma Sıcaklıkları (Dolezal, 1961).

Yakıtlar	Tutuşma Sıcaklığı (°C)
Odun	220-300
Turba (Havada kurutulmuş)	225-280
Ham Linyit	135-240
Taş Kömürü-Antrasit	214-485
Odun Koku	144-208
Taş Kömürü Koku	395-560
Petrol Koku	411

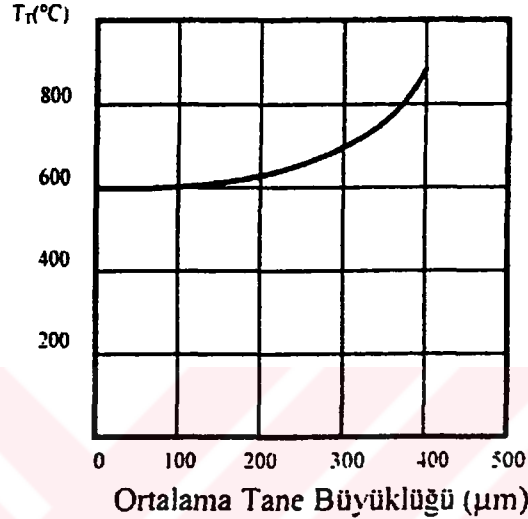
Öğütülmüş kömürün tutuşma sıcaklığının, yanıcı uçucu oranına (V) bağlı olarak değişimi, Şekil 2.8’ de verilmiştir (Fehling, 1957). Depolanmış toz kömürün kendiliğinden tutuşma sıcaklığının uçucu madde oranına bağlı olarak değişimi de, aynı şekil üzerinde (Şekil 2.8.), kesikli çizgi biçiminde (a) gösterilmiştir. Toz kömür tutuşma sıcaklığının, öğütme inceliğine bağlı olarak değişimi ise Şekil 2.9’da verilmiştir. Yanıcı uçucu oranı yüksek kömürler (liniyit), daha düşük sıcaklıklarda tutuşmakta (Şekil 2.8), kömürün tane boyutu arttıkça tutuşma sıcaklıkları da artmaktadır (Şekil 2.9).



Şekil 2.8. Yanıcı Uçucu Oranına (V) Göre, Öğütülmüş Kömürün Tutuşma Sıcaklığının Değişimi (Fehling, 1957).

Tutuşma ısısı, ızgaralı yakma sistemlerinde genelde kor tabakasından, toz kömürlü yakma sistemlerinde alevden, akışkan yataklı yakma sistemlerinde ise akışkan yataktan sağlanır. Kor tabaksız veya alevin yetersiz kaldığı durumlarda; döş tuğlası,

ışılmalı özel tutuşturma kuşağı, gaz veya sıvı yakıtlı destek brülörü gibi uygulamalar ile tutuşma desteklenir. Yanıcı uçucu oranı düşük kömürlerde (taş kömürü), sürekli tutuşma ve kararlı bir yanma oluşturulabilmesi için, alev sıcaklığının, tutuşma sıcaklığının oldukça üzerinde olması gerekir. Bu tür kömürlerde alev sıcaklığı 1000°C' in üzerinde tutulur (Durmaz, 1998).



Şekil 2.9. Toz Kömür Tutuşma Sıcaklığının (T_T) Ortalama Kömür Tane Büyüklüğüne Bağlı Olarak Değişimi (Fehling, 1957).

2.4.2.3 Heterojen Kömür Yanması ve Yanmanın Tamamlanması

Heterojen kömür-hava karışımının oluşmasının ve heterojen tutuşmanın ardından, sürdürülebilir heterojen kömür yanmasının sağlanması ve yanmanın uygun biçimde tamamlanması, kömürün heterojen yanma mekanizmasının üçüncü ve son aşamasını oluşturur. Uygun kömür yanması, yanmanın öngörüldüğü gibi hızlı, verimli ve temiz bir biçimde gerçekleşmesidir. Bu ise, birim ısı üretim maliyetinin en aza indirilmesi koşulunda; öngörülen ısı kapasite, ısı verim ve emisyon özelliğine sahip kömür yakma sistemlerinin (kömür hazırlama sistemi, brülör vb.) kullanımını gerektirir. Sürekli ve kararlı yanma koşullarında, istenilen ısı gücü sağlayacak alev hızına, öngörülen yanma verimi ve emisyon davranışını sağlayacak alev yapısına, işletme emniyet güvenilirliği ve işletme maliyeti yönünden uygun biçim ve boyuta sahip alev, optimum alev olarak tanımlanır. Optimum bir alev için gerekli; türbülans, sıcaklık, biçim, boyut, yanma hızı vb. faktörlerin oluşturulması, uygun brülör ve

yanma odası tasarımını ve bunların uygun biçimde entegrasyonunu gerekli kılar (Durmaz, 1998).

Kararlı bir alevin oluşturulabilmesi için, özellikle yanıcı uçucu oranı düşük kömürlerin alev sıcaklıkları, 1000°C' in oldukça üzerinde tutulmalıdır. Böylece, emniyetli bir tutuşma, uygun kok yanması ve yanma odasında yüksek radyasyonla ısı transferi sağlanır. Buna karşın, yüksek alev sıcaklıklarında, ısıl azot oksitlerin (NO_x) oluşumu artar.

Kömürün yanma davranışı ve yanmanın tamamlanma süresi, kömürü oluşturan kömür kümesinin tane büyüklüğüne ve dağılımına bağlıdır. Yanma ısıl kapasitesinin artırılması; kömürün yanma süresinin kısaltılması, kömürün tane büyüklüğünün azaltılması ve yanma hızının artırılması ile sağlanır. Kömürün yanıcı uçucuları, piroliz sonrası hızlı yanarak koku tutuşturur ve kömürün yanma süresi, kokun yanma süresi ile belirlenir (Durmaz, 1998).

2.5 Yanma Sonucu Oluşan Emisyonların Etkileri

Yakıt içerisinde bulunan karbon, hidrojen ve hidrokarbonlar yanabilir elemanlardır. Fosil kökenli yakıtlarda bulunan kükürt genelde yakıtın ısıl değerini az miktarda arttırmasına karşın, yanma sonucu oluşan zararlı emisyonlarından dolayı istenmeyen bir elementtir.

Gaz fazında olması nedeni ile en kolay yanma gaz yakıtlarda en zor yanma ise kazanda sağlanmaktadır. Uygun bir yanmanın gerçekleştirilebilmesi için, sıvı yakıtların yakıt parçalama (atomizasyon) ve buharlaştırma süreçleri ile, katı yakıtların ise yakıt parçalama (kıрма, öğütme), kurutma, uçuculaştırma (piroliz), kok gazlaştırma süreçleri ile gaz fazına geçirilmesi gerekir.

Kömür yanması sonucu ; Bölüm 2.2' de tanımlanan SO_x , NO_x , CO, toz emisyonu gibi insan sağlığını bozan zararlı emisyonlar çıkmaktadır. Bu kirleticilerin baca gazındaki konsantrasyonları ; yakma sistemi özelliklerine, yakma biçimine (yüzeyde, akışkanlaştırılmış ortamda hacimde yakma), yakıt türüne, yakıtın bileşimine ve

meteorolojik koşullara (nem, sıcaklık, rüzgar, yağış, sis vb.) bağlı olarak değişmektedir.

Bu kirletici parametrelerin en önemlisi ve bir nevi kirlilik kıstası olan kükürt oksitler, azot oksitler asit yağmuru oluşuran temel bileşenlerdir. Yanma sırasında en fazla oluşan kükürt bileşiği SO₂' in hava kalitesi kriterleri ve insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri Tablo 2.4' de verilmiştir. Yanma sonucu açığa çıkan bir diğer önemli kirletici olan CO' in çeşitli konsantrasyon ve sürelerdeki etkileri Tablo 2.5' de verilmiştir (Ertürk, 1993).

Tablo 2.4. Kükürtdioksitin Hava Kalitesi Kriterleri ve İnsan Sağlığı Üzerinde Yaptığı Olumsuz Etkiler (Ertürk, 1993).

SO ₂ (ppm)	Süre	Etkileri
0.03	Yıllık Ortalama	Hava Kalitesi Standardı
0.037-0.092	Yıllık Ortalama	185 µg/m ³ duman konsantrasyonu ile birlikte, solunum yolları ve akciğer hastalıklarında artışlar
0.07	Yıllık Ortalama	Yüksek partikül konsantrasyonu ile birlikte, çocuklarda solunum yolları hastalıklarında ilerleme
0.11-0.19	24 saat	Düşük partikül konsantrasyonunda, yaşlı kimselerde solunum yolu hastalıklarında artış
0.14	24 saat	ABD 1971 Hava Kalitesi Standardı
0.19	24 saat	Büyüklerde kronik solunum yolları hastalıklarında ilerleme
0.19	24 saat	Düşük partikül konsantrasyonunda, ölüm oranlarında artış görülebilir
0.25	24 saat	750 µg/m ³ duman konsantrasyonu ile birlikte, günlük ölüm oranlarında artış görülebilir (İngiltere), hastalanmalarda ani artış
0.5	10 dakika	Astım hastalarında egzersiz (hareket) halinde solunum direncinin artması
5	24 saat	Sağlıklı kimselerde solunum direncinin artması
10	10 dakika	Solunum direncinin yüksek oranda artması, öksürme

Yakma tesislerinin yanma verimlerinin düşük olması sonucu daha fazla yakıt yakılması, tesisin havayı daha fazla kirlletmesine neden olmaktadır. Çünkü yanma verimi azaldığında aynı miktarda enerjiyi elde edebilmek için daha fazla yakıt gerekmektedir (Bayram, 1993).

Tablo 2.5. Kabonmonoksidin Etkileri (Ertürk, 1993).

CO (ppm)	Süre (saat)	(COHb)*	% Etkileri
40	2	2	
100	2	5	10-15
10-15	≥ 8	≈ 2.5	Sinir sisteminde aksaklıklar
30	≥ 8	5	Psikomotor sisteminde aksamalar
100	8	≈ 10	Baş ağrısı, baş dönmesi, kardiyak ve pulmoner fonksiyonlarında aksaklıklar
Sigara içenler (400-450 ppm CO) 1 paket/gün 2 paket/gün		6.3 7.7	
EPA Standardı : 9 ppm		8	
		18	Kardiyovasküler sistemde arızalar, elektrokardiografik anormallikler
		40	Hareket halindeyken düşmeler
		60	Baygınlık, geri dönüşümün meydana gelmemesi halinde ölüm
		80	Ölüm

*Havada CO bulunduğu takdirde, $CO + O_2Hb \leftrightarrow COHb + O_2$ reaksiyonu uyarınca kandaki O_2 yerini COHb alır.

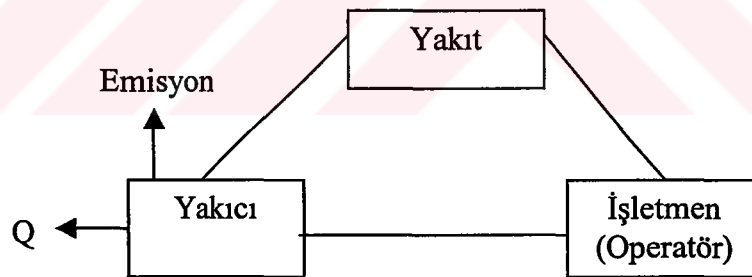
Kömürün yanma mekanizması ile ilgili olarak değişik çalışmalar yapılmıştır. Davini ve diğ. (1996) kömürün yanmasını incelemişler ve kömürün tümünün yanmasını; uçucu madde çıkışı, ham kömürün yanması, uçucu maddelerin yanması, yarı kok oluşumu adımlarının bileşiminden oluşmuş gerçekte çok adımlı bir proses olduğunu ifade etmişlerdir. Yedi farklı pulverize edilmiş kömür örneklerini termogravimetrik metod ile incelemişler, ayrıca kömürlerin yanmasının termogravimetrik reaktivitesinin, aynı kömürlerin 50 MW pilot tesisteki yanma verimleri ile karşılaştırmışlardır.

Yapılan bir başka çalışmada kömürün üç farklı yol ile tutuştuğu söylenmektedir. Homojen tutuşma; öncelikle piroliz ve daha sonra uçucu maddelerin ortaya çıkması, heterojen tutuşma; tüm kömür partiküllerine oksijenin direkt olarak temas etmesi ya da her ikisinin bir arada oluşması şeklinde tanımlanmaktadır. Tutuşma ölçümleri aynı yakıt için beş farklı deneysel teknik kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kömür

örneğin kütlesi, ısıtma hızı, bulunduğu ortamdaki gaz koşulları ve tutuşmasının belirlenmesi gibi sistem değişkenleri incelenmiştir. Deneysel ve teorik sonuçlardan, uçucu maddelerin sebep olduğu etkiden ayrı olarak, oksijen konsantrasyonu, kömür boyutu ve deneysel koşullara bağlı olan sistem değişkenlerinin tutuşma sıcaklığını ve tutuşma mekanizmasını çok güçlü bir şekilde etkilediği görülmüştür (Zhang ve Wall, 1994).

2.6 Yakma Sistemleri

Yakma sistemleri, yakıtlarda depolu bulunan kimyasal enerjinin yanma süreci ile ısıya dönüştürüldüğü sistemlerdir. Yakma sistemlerinde yanmanın enerji ekonomisi ve çevresel etki yönünden uygun bir biçimde (verimli ve temiz) oluşturulabilmesi ; Bölüm 2.3’ de ifade edildiği gibi yakıt/yakma sistemi/işletmen (operatör) üçlüsü arasındaki gerekli uyumun (Şekil 2.10) sağlanabilmesine bağlıdır (Durmaz, 1989).



Şekil 2.10. Yakma Üçgeni (Durmaz, 1989).

Yakma üçgeni olarak tanımlanan bu sistemin elemanları arasındaki her bir uyumsuzluk ısı üretimini (Q) azaltmakta, çevreye olan kirletici emisyonları (E) arttırmaktadır. Yakma sistemi tasarımı, yakıt yanma özellikleri esas alınarak yapılmaktadır. Uygun tasarım ve işletme; yakıt ve yanma özelliklerinin bilinmesi ve bu özelliklerin yanma mekanizmasına olan etkisinin analizini gerekli kılmaktadır.

Yakma sistemlerinin tasarımında bazı özelliklere ve kısıtlamalara dikkat edilmelidir. Örneğin; alev, yanma odasının şekline uygun olmalı ve odaya sığmalıdır. Ocak

sıcaklığı, ne yüzeylerde tahribat ve aşınma yaratacak kadar yüksek, ne de tıkanmalara ve korozyona neden olacak kadar düşük olmalıdır. Sistem ekonomik ve aynı zamanda çevre kirliliği yaratmayacak özellikte olmalıdır. Kükürtoksitleri, azotoksitleri ve tanecik yayılımı belirli sınırlar altında kalmalıdır. Bütün bunların yanısıra sistem, değişik özellikteki kömürleri aynı iyilikte yakabilmelidir (Arısoy, 1990).

Genel olarak yakma sistemleri yakıt tane büyüklüğüne ve yanma sırasında yakıt davranışına bağlı olarak Bölüm 2.4.2.1' de kömür için de tanımlandığı şekilde; yüzeyde (ızgarada) yakma, akışkanlaştırılmış ortamda (akışkan yatakta) yakma ve hacimde yakma olmak üzere üç gruba ayrılabilir (Ledingg, 1966). Yakma sistemleri ve bunların başlıca özellikleri Tablo 2.6' de özet olarak verilmiştir (Durmaz, 1998).

Tablo 2.6. Yakma Sistemleri ve Özellikleri (Durmaz, 1989).

Yakma Sistemleri			
Yakma biçimi	Yüzeyde yakma (Izgara)	Akışkanlaştırılmış ortamda yakma (Akışkan yatak)	Hacimde yakma (Brülör)
Yakıt tane büyüklüğü			
Tane hareketi (Dinamiği)	Yüzeyde hareketsiz	Yoğun türbülanslı	Hacimde askıda
Uygulama	En eski (1)	En yeni (3)	Yeni (2)
Yakıt	Kok, taş kömürü	Her türlü yakıt	Gaz, sıvı, toz kömür
Yakıt kapasitesi	Düşük	Orta	Yüksek
Yatırım maliyeti	Düşük	Daha yüksek	Yüksek
Emisyon kontrolü	Çok sınırlı	Etken kontrol	Sınırlı
Isı depolama özelliği	Sınırlı	Çok yüksek (~%95dolgu ~%5yakıt)	Sınırlı
Isı+kütle aktarma özelliği	Çok sınırlı	Çok yüksek	Sınırlı

2.6.1 Izgara Üzerinde Yakma

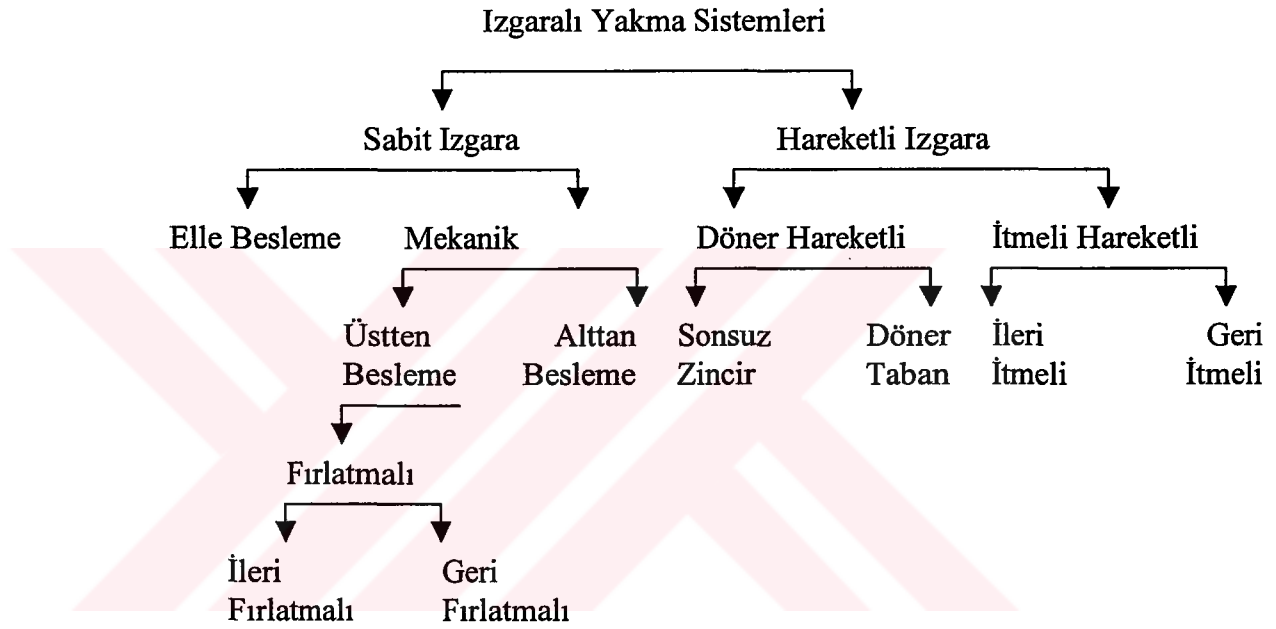
Temel yanma koşullarının (gaz faz geçme+3T) en zor olduğu ve yanmanın en zor ve ısı kapasitenin düşük olduğu yakma sistemleridir. Ucuz, işletmesi kolay ve besleme suyu kalitesine daha az duyarlı (korozyon, kireçlenme) olması nedeniyle, konut sektörü ve küçük sanayi için uygun yakma sistemleridir. Konut sektörü ve

küçük sanayii kuruluşlarında yeterince sermaye, teknoloji, bilgi ve işletme birikimi olmadığında, ekonomik koşulların sağlanmasında da en uygun sistemlerdir. Çevre koşullarını (SO_2 , NO_x , CO, toz) oluşturmak ise standart yakıt uygulaması ile mümkün olabilmektedir (Durmaz, 1998).

Izgara üzerinde yakma yapısal olarak; sabit karbon oranı yüksek, uçucu yanıcı madde oranları düşük yakıtlar için (kok, taşkömürü) uygundur. Bu tür yakma sistemlerinde verimli ve temiz bir yanmanın sağlanabilmesi için uygun biçim ve tane büyüklüğüne sahip, taşınabilirlik ve depolanabilme özelliklerine, yanma yönünden uygun ısı değer ve içeriğe sahip, standart özellikte yakıtlara (kok, briket vb.) gereksinim vardır. Bu özellikteki yakıtlar “standart yakıt” olarak isimlendirilir. Bu tür yakıtlar yerine, uçucu madde, nem, kül ve kükürt oranı yüksek, ucuz yakıtların (linyit) kullanılması, yakıt ile yakma sistemi arasında uyumsuzluğa, yanmada yanma veriminin düşmesine, hava kirletici emisyonların aşırı biçimde artmasına neden olmaktadır. Bunun başlıca nedeni sabit karbon ve yanıcı uçucuların tamamen farklı yanma özelliklerine sahip olmasıdır. Sabit karbonun ızgara üzerinde yanmasına karşın, piroliz sonucu kömür yatağından açığa çıkan gaz ve buhar biçimindeki yanıcı uçucular, kor tabakası üzerindeki hacimde yanarlar. Bu bölgede, gerekli yanma koşulları oluşturulamadığı için, yanıcı uçucular, yanmadan, bacadan çevreye atılırlar. Bu nedenle yanıcı uçucu oranı, ızgara üzerinde kömürü tutuşturabilecek ve kor tabakasında yanmasını tamamlayabilecek boyutta olmalıdır. Izgaralı yakma sistemlerinin, standart dışı kömürlerin yakılmasında yetersiz kalması, yeni yakma teknolojilerinin (toz kömür, akışkan yatak vb.) geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. Izgaralı yakma sistemleri Şekil 2.11. de sınıflandırılmıştır (Durmaz, 1991).

Büyük parça kömürün yakıldığı ızgaralı yakma sistemlerinde, yakıt-hava karışımı için, brülör kaynaklı kesme ve merkezkaç kuvvetleri uygulanamaz. Bu amaçla uygulanabilecek en pratik çözüm, kömür parçası ve yakma havası arasındaki O_2 gradyeni artırılarak kömüre doğru doğal O_2 difüzyonunun desteklenmesidir. Bu ise, ızgaralı yakma sistemlerinin, kömürün tane büyüklüğüne bağlı olarak, daha fazla hava vermek suretiyle çalıştırılması zorunluluğunu doğurur. Fazla hava ise ısı kaybını artırır. Bu nedenle, ızgaralı kazanların ısı verimi, akışkan yataklı ve kömür brülörlü kazanlara oranla daha düşüktür.

Izgaralı yakma sistemlerinin, yakıt, ısı yük ve işletme koşullarına bağlı başlıca teknik sorunları; uygun kömür besleme, uygun yakıt/hava oranı ayarı, uygun şişleme (kül ayrıştırma), uygun bakım-onarım şeklinde sıralanabilir. Elle beslemeli, sabit izgaralı yakma sistemlerinde, kömür ve yük özelliklerine bağlı ısı verim ve emisyonlar yönünden uygun; kömür besleme biçimi (periyot kömür miktarı, yastıklama biçimi vb.), yakıt/hava oranı, şişleme periyodu deneylerle saptanmalı ve sürekli biçimde uygulanmalıdır (Durmaz, 1993).



Şekil 2.11. Izgaralı Yakma Sistemleri (Durmaz, 1998).

Izgara üzerinde yakmada toz parçacıkların elenmesine özen gösterilmelidir. Bu durum için en uygun tanecik büyüklüğü 1-1.5 cm olarak kabul edilir. Üst tanecik büyüklüğü ise 5 cm değerindedir. Ancak, genelde elenmemiş kömür kullanıldığından, 7.5 cm' den toz haline kadar bütün büyüklükler karışımında bulunur. Atmosferik, basınçlı ve sirkülasyonlu-hızlı akışkan yataklı sistemlerde tercih edilen tanecik büyüklükleri yaklaşık 1-8 mm arasında değişir. Yaş ve kuru pulverize toz kömür sistemlerinde ise 200 μ ' dan küçük boyutlarla çalışılmaktadır. Kömür yakma ve uygulama yöntemleri Tablo 2.7.' de verilmiştir. Yakma sistemlerinde; kazanın ısı kapasitesi (Q_K), kazanın ısı verimi (η_K), yakıt tüketimi (M_Y) ve yakıtın alt ısı değerine (H_U) bağlı olarak hesaplanır (Durmaz,1991; Arısoy,1990).

Tablo 2.7. Kömür Yakma, Uygulama ve Yöntemleri (Arısoy, 1990).

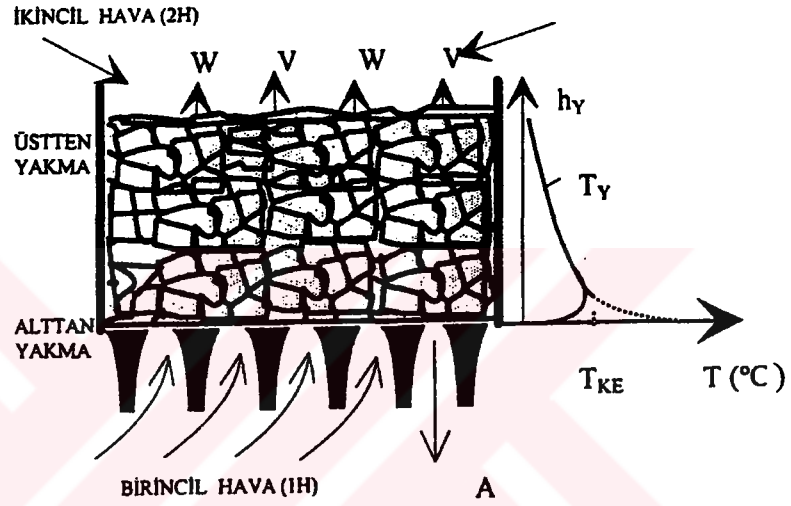
Uygulama	Yakma Yöntemi
Buhar kazanları	Sabit yatak, toz kömür, akışkan yatak, siklon, kombine
İşlem fırınları Metal ergitme, ısıtma işlemi, dövme, cam eritme, seramik pişirme, kireç fırınları v.b.	Toz kömür, bazı uygulamalarda sabit yatak, gazlaştırıcı, kombine yakıt
Doğrudan güç üretimi Pistonlu makineler, gaz türbinleri	Toz kömür, kömür gazlaştırıcıda üretilen gaz yakıt, kombine yakıt
Özel tepkime sistemleri Mükemmel karışımli reaktör, karışimsız akışlı alev, patlama alevleri	Toz kömür

2.6.1.1 Sabit Izgaralı Yakma Sistemleri

Sabit ızgarada yakma biçimleri ve yatak sıcaklık dağılımı Şekil 2.12' de gösterilmiştir. Sabit ızgarada yakıt hareketsiz olarak ızgara üzerinde durmaktadır. Alttan yakma durumunda, yanma ızgara üzerinde başlamakta, oluşan ısı, iletim ile yanma odasına taşınmaktadır. Yatak sıcaklık dağılımı en başta yatak kalınlığına (ısıtma direnci) bağlıdır. Belli yatak kalınlığı üzerinde, ızgara üst yüzeyinin sıcaklığı, külün ergime sıcaklığı (T_{KE}) üzerine çıkarak, külün ergimesine, birincil havanın azalmasına ve yanmanın bozulmasına neden olmaktadır. Uygun ızgara tasarımı ve boyutlandırılması, uygun yatak kalınlığı (yakıt besleme) ile kül ergimesi önlenir. Kül ayrıştırma, yatak şişleme işlemi ile sağlanabilir (Durmaz, 1998).

Kül ergimesinin önlenmesi için, yakma havasının ön ısıtma sıcaklığı, 100-120°C civarında tutulur. Üstten yakma durumunda, ızgaradan başlayarak, yakıt kurumakta, uçucular gazlaşmakta oluşan yanıcı gazlar, yatak üzerinde uygun ikincil hava verilmesi ile oluşturulan bir O_2 ve alev perdesinden geçirilerek tam yanma sağlanmaya çalışılmaktadır. Uçucuların ayrışması sonucunda oluşan kok ızgara üzerinde, alttan yakma mekanizması ile yanmaya devam etmektedir. Yanmanın bozulmasının, emisyonların ve bacadan duyulur ısı kayıplarının büyük boyutlarda artmasının önlenmesi için, elle kömür besleme yerine mekanik besleme yapılır. Kömür besleme ve kül ayrıştırma işlemlerinin birlikte yapıldığı ızgaralar, mekanik ızgara olarak tanımlanır (Durmaz, 1991).

Sabit katı yakıt yatağı üzerinde yapılan araştırmalardan biri modelleme çalışmalarıdır. Sabit katı yatağın beslemesi üstten ve alttan yapılabilir. Altan besleme sistemi gerek emisyon kontrolüne gerekse otomatik kontrole imkan veren bir yöntemdir. Böke ve Arısoy (1993) yapmış oldukları bir çalışmada, çeşitli parametrelerin alttan beslemeli yanma halinde tutuşma ve yanmaya etkilerini saptamak, yanma sistemlerinin verimli dizayn ve kullanımını sağlamak amacıyla bazı kabuller ışığında bir matematiksel modelin geliştirilmesini hedeflemişlerdir.



Şekil 2.12. Sabit Izgarada Yakma Biçimleri (Durmaz, 1998).

2.6.1.2 Sonsuz Zincirli Döner Izgaralı Yakma Sistemleri

Uçucu madde içeriği düşük kömürlerin (taşkömürü, kok) yakılması için sonsuz zincirli döner ızgaralı yakma sisteminin kullanılması daha uygundur. Burada yakıt ızgara üzerinde bir karışıma uğramadığından, etken bir kül yıkama işlemi sağlanamamaktadır. Kurutma bölgesinde kömür nemi, uçuculaştırma bölgesinde yanıcı uçucu maddeler ayrışmakta, kor tabakası ve alevin ısıma etkisi ile de kok, kok yakma bölgesinde CO biçiminde gazlaşmakta ve yanmaktadır. Bu bölgeler için, klapa kontrollü hava bölmeleri üzerinden, yanma verimi ve emisyonlar yönünden uygun birincil yakma havası dağılım profili oluşturulmalıdır. Yanıcı uçucular, düş tuğlalarından ve kor yatağından özellikle ısıma yoluyla sağlanan ısı ile, yanma odasında yakılmaya ve yanma odası bir gaz alevi ile doldurulmaya çalışılmaktadır. Tam yanmanın oluşumu için gerekli oksijen ise ikincil hava ile sağlanmaktadır. Toz

kömür ve kekleşen kömür, ızgara üzerinde yakma için uygun değildir. Başlangıç bölgesinde kömür yatak kalınlığı, ince kömürlerde daha ince olmak üzere, 40-250 mm civarında tutulur.

Sonsuz zincirli döner ızgaralı yakma sistemine, geri fırlatmalı kömür besleme uygulaması ile, kömür taneleri, boyutlarına göre farklı yörüngeler çizerek, daha uzun süre yanma odasında kalabilmekte, bu ise nem ve yanıcı uçucu oranı daha yüksek kömürlerin daha uygun biçimde yakılmasına olanak sağlamaktadır. Bu yakma sisteminin, kömürü, yapısal olarak tane büyüklüğüne uygun biçimde ızgara üzerine sermesi, yanma odasında tutması; ön kurutma ve gazlaşma ile kömüre ön koklaşma olanağı sağlaması, linyitlerin de böyle bir yakma sisteminde daha uygun biçimde yakılmasını mümkün kılar (Durmaz, 1998).

2.6.1.3 Yatak Gevşetme Etkili, Eğik Iızgaralı Yakma Sistemleri

Bu sistemlerde, ızgara eğik biçimde konumlandırılır, ızgara dilimlerinin bazılarını ileri itme hareketi veya geri itme hareketi verilerek yatak gevşetilir, oluşturulan yatakta, şişleme ile kül ayrıştırılarak, O_2 'nin difüzyonu kolaylaştırılır. İtmeli eğik ızgaralı yakma sistemlerinde de tane büyüklüğü yönünden standart yakıt gereklidir. Hareketli ızgara bölümleri ile yakıtın karıştırılarak nem, uçucu madde, kül ayrışmalarının etkinleştirildiği kurutma, uçucu gazlaştırma, kok yakma bölümlerinin kısmen de olsa birbirinden işlevsel olarak ayırma olanağının doğduğu, yanma iç tüketim ısısının kısmen daha kolay aktarıldığı linyit ve çöp yakmaya uygun yakma sistemleridir (Durmaz, 1998).

2.6.2 Hacimde Yakma

Gaz, sıvı yakıtlar ve toz kömür uygun brülörler yardımı ile yanma odasına püskürtülerek yakılmaktadır. Yakıt taneciği havada askıda yanmakta, yanma odasında oluşturulan türbülansla kurutma, uçucu gazlaştırma ve kok gazlaştırma ve yanma işlemleri kolayca sağlanabilmektedir. Kömür taneciğinin dış reaksiyon alanının hacmine oranının (özellik ısı/kütle transfer alanı) büyük olması, yanma süresini kısaltır, sıvı ve gaz yakıt yakma sistemlerinin yanma süresine yaklaştırır. Bu

nedenle, toz kömür yakma sistemleri ile çok büyük yanma ısı kapasitelerine ulaşılabilir (Durmaz, 1998). Uygun brülör düzeni ve işletme koşulları ile alevin duvarlarla teması olmadan olabildiğince yanma odasını doldurması sağlanmakta, kararlı yanma koşullarının oluşturulmasına çalışılmaktadır (Ledinegg, 1966).

2.6.3 Akışkan Yatakta Yakma

Akışkanlaşma, sıvı veya gaz bir akışkan vasıtasıyla bir yatak içerisindeki katı taneciklere akışkan özelliğinin kazandırılmasıdır. Bu amaçla kullanılan sistemler akışkan yatak olarak adlandırılır (Howard, 1989). Akışkan yataklı yakma sistemleri, düşük kaliteli yakıtlar için de verimli ve temiz yakma koşullarını (yanmanın temel 3T koşulu) sağlayabilmektedir (Durmaz, 1998).

Akışkan yataklı yakma sistemleri enerji kullanım verimi ve çevre kirlenmesi problemine bir alternatif çözüm olmaktadır. Katı, sıvı ve gaz yakıtların enerji girdisi olarak kullanılabildiği sistem, yakıt taneciklerinin hava ile akışkanlaştırılmış ve kömürün tutuşma sıcaklığına kadar ısıtılmış kum, kireçtaşı, kül veya bunların karışımından oluşmuş bir ortamda yanması şeklinde gerçekleşmektedir. Yüksek oranlardaki inert maddenin karışması ile oluşan türbülanslı ortam, yanma sonucu açığa çıkan enerjiyi hızlı bir şekilde tüm yatak hacmine yayarak, tekdüze bir sıcaklık dağılımı sağlamaktadır (Davidson ve diğ., 1985).

2.7 Kömürün Yanma Özellikleri

2.7.1 Kömürün Yapısı

Kömür aromatik ve hidroaromatik birimlerden meydana gelmiştir. Bu birimlerin sınırlarındaki fonksiyonel gruplar birimlerin birbirleri ile bağlantısını sağlar. X-ışını analizleri birimlerin düzenli ve amorf maddelerin oluşturduğu tabakalar veya lamellerden ibaret olduğunu göstermektedir. Bu tabakalar düşük kaliteli kömürlerde son derece rastgele düzenlenmiştir ve her tabaka yaklaşık 15-20 karbon atomu kalınlığındadır. Bu rastgele düzenlenmiş kömür bünyesinde büyük boşluklarla sonuçlanmaktadır. Kömür kalitesi arttıkça bu açık yapı bir dereceye kadar

büzülmekte ve tabakaların kalınlığı artmaktadır. Kömürün yapısı, %90 karbon mertebesinde bir geçiş bölgesinden sonra antrasit yapı denilen çok daha düzenli bir yapıya ulaşmaktadır.

Geçiş bölgesindeki yapının boyutları ilginçtir. Yaklaşık 8 A° kalınlığında ve birbirinden 20 A° uzaklıkta lamel grupları bu yapıyı oluşturmaktadır. Bu boyutlar boşlukların büyüklükleri ile ilişkilidir. %30 uçucu maddeye karşı gelen bu yapı minimum iç yüzey miktarını oluşturmaktadır. Ancak bu noktada yoğunluk da en az değerdedir ve uçucu maddenin ayrılmasından sonra ortaya çıkacak çok büyük miktarda kör boşluk hacimlerine işaret etmektedir (Arısoy,1991).

2.7.2 Uçucu Madde Çıkışı

Bölüm 2.7.1’ de sözü edilen birimler ve gruplar arasındaki çapraz bağlar uçucu maddelerin akışkanlığını ve hareketliliğini etkilediği gibi, çıkış hızlarını da etkiler. Boşluklardaki absorbe edilmiş nem ve CO₂’ nin ayrılmasından sonra, uçucu madde çıkışının ilk kademesini, gruplar arası bu bağların parçalanması ve bazı fonksiyonel uç grupların uçucu madde olarak taşınması oluşturur. Daha yüksek sıcaklıklara da hidroaromatik gruplar hidrojen kaybederek, yeni aromatik gruplar meydana getirir.

Uçucu maddelerin çıkışı sırasında, aynı zamanda kömür taneciğinin boşlukları içerisinde ve diğer kömür tanecikleri yüzeylerinde bu uçucu maddelerin parçalanması ve bir kısmının yüzeyde tutulması olayı meydana gelir. Uçucu madde çıkışındaki bu ikinci kademe, özellikle 1mm’ den küçük tanecikli kömürler için önem kazanır. Bu sebeple standart uçucu madde çıkış testleri her ne kadar tekrarlanabilir sonuçlar verse de bu, standartlaştırılmış parçalanma ve yüzeyde tutulma anlamına gelir. Parçalanma ve yüzeyde tutulma olmadan uçucu maddelerin yeterli derecede hızla kömürden uzaklaştırılabildiği durumda, gerçek uçucu madde oranını belirlemek mümkündür (Kural, 1991; Arısoy,1991).

2.7.3 Kömürün Şişmesi

Uçucu madde çıkışı sırasında kömür taneciklerinin çoğu şişer. Bu olay yine ısıtma hızının, ulaşılan sıcaklığın ve çevredeki gazın bileşiminin fonksiyonudur. Şişme

indirgeyici ve nötr ortamlara da 700°C civarında en yüksek değerine ulaşır. Ortaya çıkan yapının şekli de uniform poröz taneciklerden, yuvarlak ince kabuklu içi boş bir küreye kadar değişebilir. Tek kömür taneciğinin standart şişme sayısı ile ocak atmosferindeki kömürlerin şişme dereceleri arasında bir ilişki bulunmamaktadır (Berkowitz, 1979).

2.7.4 Yüzey Tepkimeleri

Karbon yanmasında gözönüne aldığımız ana gaz bileşenleri O_2 , CO_2 , H_2O ve H_2 hepsi de karbon yüzeyler üzerinde, adsorpsiyon ile ayrışarak kimyasal bağlar oluşturmak üzere yüzeye bağlanırlar. Yüzeyde adsorpsiyon düzgün olmayıp, tercihen aktif noktalarda olmaktadır.

Kimyasal bağlarla yüzeyde tutulan gaz molekülleri ile yüzey atomları arasında bir tepkime meydana gelir. İlk üç bileşenin tepkimelerinin ana sonucu oksijen transferidir. Tepkime sonucunda ortaya çıkan gaz ürünler desorpsiyon ile tekrar gaz fazına geçerler. Kömür yüzeyinde meydana gelen yanma, gaz fazındaki bileşenlerin yüzeye adsorpsiyonu, kimyasal tepkime ve ürünlerin desorpsiyonu adımlarından oluşan karmaşık bir olaydır. Kömür içinde bulunan karbon dışındaki birtakım yabancı maddelerin katalitik etkileri göz önüne alınmalıdır. Özellikle kalsiyum ve demir gibi maddeler yüzeyde aktif merkezler olarak rol oynamakta ve gazları adsorpsiyonuna geniş ölçüde yardımcı olmaktadır (Arısoy, 1991).

2.7.5 Difüzyon Etkileri

Kömür taneciğinin yüzeyi üzerinde kimyasal tepkimenin olabilmesi için gaz bileşenlerin bu yüzeye difüzyonla ulaşması ve gaz ürünlerin yine difüzyonla yüzeyden uzaklaşması gerekir. Bu nedenle kömür taneciği yüzeylerindeki yanma olayında gaz difüzyonunun da önemli bir rolü vardır. Tanecik yanması ile ilgili iki türlü difüzyon söz konusudur. Birincisi tanecik dış yüzeyindeki sınır tabaka difüzyonu; yani gaz bileşenlerin tanecik dış yüzeyine geçişidir. İkincisi ise tanecik içi boşluklardaki poröz ortam difüzyonu, yani gaz bileşenlerin tanecik içine nüfuz etmesidir.

Çok küçük ve yoğun parçacıklarda, örneğin, 100 A° mertebesindeki is taneciklerinde iç ve dış difüzyonun etkisi tamamen ihmal edilebilir. Böyle taneciklerin yanmasında, olayı sadece tanecik dış yüzeyindeki tepkimelerin hızı kontrol eder. Ancak 100 µ ‘ dan büyük tanecikler söz konusu olduğunda, difüzyon etkili olmaya başlamakta ve bazı durumlarda yanmayı tamamen iç ve dış difüzyon hızı kontrol etmektedir (A Special Report, 1974).

Bir kömür taneciğinin yanmasında, olay tanecik çapına ve kömürün reaktivitesine bağlı olarak üç farklı durum gösterebilir. Düşük sıcaklıklarda ve küçük taneciklerde yüzey tepkimelerinin hızı, iç ve dış difüzyon hızına göre çok düşükse, yanma olayını sadece yüzey tepkime hızları kontrol eder. Bu durumda oksijen kömürün en iç noktasına kadar yayılabilir ve dengeye ulaşıldığında bütün kömür taneciği hacminde gaz derişimlerinin sabit olduğu ve yanma olayı meydana geldiği görülür. Sıcaklık yükseldikçe tepkime ile tüketilen oksijen miktarı difüzyonla gelenden daha fazla olacağından, oksijen tanecik merkezine kadar ulaşamaz. Yanma tepkimesi, belirli kalınlıkta bir kabuk içinde meydana gelir ve ortada tepkime olmayan bir çekirdek oluşur. Bu durumda yanma hızını oksijenin poröz ortamındaki iç difüzyon hızı kontrol eder. Daha yüksek sıcaklıklarda ve daha büyük taneciklerde yanma tepkimesi taneciğın dış yüzeyine kadar geriler ve yanma olayı sınır tabaka difüzyon hızı ile kontrol edilir. Bu durumda kömür sadece dış yüzeyde yanar ve zamanla, yanma nedeniyle, tanecik çapı giderek küçülür (Arısoy, 1991; Durmaz, 1998).

2.7.6 Uçucu Madde Yanması

Çeşitli hidrokarbonlar olarak olarak tanımlanabilen uçucu maddelerin yanması teorik olarak en az bilinen konulardan biridir. Genel olarak oksijen ile birleşen hidrokarbon moleküllerinin kararlı olmayan hidroksil bileşenlerine dönüştüğü, bunların da parçalanarak aldehitleri ortaya çıkardığı, aldehitlerin ise oksitlenerek CO ve H₂’ ye kadar parçalandığı düşünülebilir. Bugün için en iyi bilinen tepkimeler CO ve H₂ bileşenlerinin yanma tepkimeleridir. Görüldüğü gibi, gaz yakıtın yanma başlangıcı ile sonu arasında çok sayıda ara ürünler oluşup, yok olmaktadır.

Hızlı ısıtma, oksijen-yakıt karışımının iyi sağlanmaması veya ortamda yeterince oksijen bulunmaması gibi hallerde hidrokarbonlar hidroksil bileşenlerine dönüşme

yerine, parçalanma olayı ile karbon ve hidrojene parçalanır. Bu olay is oluşması açısından çok önemlidir. Daha sonra karbon ve hidrojen, yeteri kadar oksijen varsa, sıcaklık elverişli ise ve yeteri kadar zaman tanınırsa CO' ve H₂O ' ya dönüştürler. Aksi halde yakılamayan karbon tanecikleri birleşerek is meydana getirir (Berkowitz, 1979).

2.8 Ağaçlı Kömürü

İstanbul ilinin kuzey batısındaki Kilyos-Karaburun arasındaki ocaklardan üretilen kömürler “Ağaçlı” kömürleri (oluşum özelliklerinden dolayı) olarak bilinmekte ve bölge olarak Çiftalan, İhsaniye, Bolluca, Akpınar, Yeniköy ile sınırlandırılmaktadır (Arioğlu, 1995b).

Ağaçlı bölgesinde yer alan kömür sahaları (Çiftalan, İhsaniye, Bolluca, Akpınar, Yeniköy) genel hatları ile benzer koşulların etkili olduğu bir havza niteliğindedir. Genellikle “tek” yer yer “çift damarlar” halinde gözlenen kömür üst ve alt seviyeleri ortalama olarak sırasıyla; Yeniköy’ de 3m ve 1m mertebesinde. Akpınar sahasına doğru gidildikçe alt seviyede bir artış olduğu, üst seviyenin ise değişmediği gözlemlenmiştir. Ağaçlı da ise 3m’ ye dek kalınlıklar ve alt seviyede çatallanmalar tespit edilmiştir. Killer değişik özelliklerle sergileyerek yer yer kömürlerle ardalanmalar oluşturmaktadır.

Kalınlık, yanal süreklilik, tavan-taban kaya türleri ile kükürt ve iz element düzeyleri gibi kriterlere göre kömürleşme ortamlarının genel olarak “Alüvyonal”, “Delta”, “Göl” ortamları şeklinde sınıflandırılmaları baz alınır, Ağaçlı kömürlerinin “delta ortamı” geçiş bölgelerinde, alt ve üst düzlükleri bindirme alanlarında çökeldiği, kükürt içeriğinin düşük-orta düzeylerde, pritik kükürt oranının yüksek olmadığı, iz element içeriklerinin ise değişken olduğu belirlenmiştir. Sözkonusu bölgede açık işletme yöntemleri ile çalışmalara devam edilen sahalarda, ruhsat sahipleri tarafından yaptırılan jeofizik, jeolojik etüdler ve sondajlar ile kömür arama, rezerv geliştirme çalışmaları sürdürülmektedir. Bugüne kadar yapılan çalışma ve değerlendirmelere göre, 1995 yılı başı itibariyle, bölgenin kömür rezervi, 40.8 milyon ton civarındadır.

Bu rezervin 36 milyon tonu “kara rezervi”, 4.8 milyon tonu “deniz altı” rezervidir (Bürküt ve diğ., 1990).

1973 yılı öncesi bölgede çalışmalar “yer altı işletme yöntemi” ile yapılmış olup 1973 yılından sonra “açık işletme” yöntemlerine geçilmiştir. Faaliyet sürdürülen bütün sahalarda üretim halen “açık işletme yöntemleri” ile yapılmaktadır. Bu yöntemin uygulanması çevre ve hava kirliliği sorunlarını da beraberinde getirmektedir. Kömür damarları üzerinde kalınlığı 20-100 m’ ler arasında değişen kil, kumlu kil ve kumdan oluşan örtü malzemesi vardır. Bu örtü malzemesinin mekanik ve teknik özelliklere göre seçilen iş makineleri ile malzeme kazılmakta ve kamyonlara yüklenerek döküm sahalarına boşaltılmaktadır. Jeolojik yapı nedeniyle bazı bölgelerde kömür damarları Karadeniz içinde devam etmektedir. Bunun tespit edildiği bölgelerde de deniz altındaki kömürü kazanmak amacıyla buralara döküm yapılmakta ve daha sonra ilerletimli bir şekilde dolgu kaldırılarak kömür damarlarına kadar inilip bu damarları ekonomik olarak işletilmesi sağlanmaktadır. Bölgede bugüne kadar süregelen madencilik çalışmaları bir “kimlik” çerçevesinde Tablo 2.8’ de, tahmini rezerv miktarlarının dinamik ömrü Tablo 2.9’ de verilmiştir. Ağaçlı kömürleri yukarıda da bahsedildiği gibi jeolojik oluşum açısından, turba ile linyit arasında yer alan bir fosil yakıttır. Türkiye’ nin diğ er katı hidrokarbon yakıtları gibi Ağaçlı kömürleri de kaynaktan kaynağa ve aynı kaynak içinde kesitten kesite büyük değışiklikler göstermektedir (Arioğlu, 1995b).

Ağaçlı kömürü, yüksek oranlarda nem (%34) ve uçucu madde (%54) içermekte ve bu niteliğinden dolayı ikincil hava beslemeli yakma sistemlerinde yakılması gerekmektedir. Reaktivitesi çok yüksek olduğundan pratikte çok hızlı bir yanma eğilimi içinde olması beklenmektedir. Yanmanın daha hızlı bir periyoda yayılması istendiği zaman, Ağaçlı kömürünün reaktivitesi daha düşük olan yaşlı kömürlerle harmanlanarak yakılması gerekmektedir (Ekinci ve diğ., 1993).

Uçucu madde içeriğinin yüksek olmasından dolayı, Yeniköy Ağaçlı kömüründe uçucu maddeler ve sabit karbonun yanması süreçleri arasında görülen ayırım diğ er kömürlere kıyasla daha belirgin olmaktadır (Arioğlu, 1995b).

Tablo 2.8. Kilyos-Karaburun Bölgesi Madencilik Çalışmaları Kimliği (Arıoğlu, 1995b).

◆ İstanbul linyit kömürünün bulunuş tarihi	1908 yılında, Almanlar tarafından
◆ Bölgede gerçekleştirilen ilk üretim	1914 Almanlar (ikinci dünya savaşı sırasında Fransızlar ve Etibank da az miktarda üretim gerçekleştirmişlerdir)
◆ Üretildiği bölgeler	Kilyos – Karaburun arası (Çiftalan, Ağaçalı, İhsaniye Bolluca, Akpınar ve Yeniköy)
◆ Bölgede kömür arama çalışmaları	-1941-1943 yılları arasında 70 adet sondaj MTA tarafından gerçekleştirilmiştir. -1950-1970 yılları arası arama çalışmalarına devam edilmiştir.
◆ Bölgenin jeolojik yaşı	Oligosen (genç kömürleşme)
◆ Toplam rezerv	40.8 milyon ton. (36 milyon ton “kara rezervi”, 4.8 milyon ton “deniz altı” rezervidir.
◆ Üretim yöntemi	Açık işletme (1973 yılına kadar bölgede, Ağaçalı ve Yeniköy civarlarında yer altı işletme yöntemiyle üretim yapılmıştır.)
◆ Üretim miktarı	Kesin bilgi yok – 4.5 milyon (ton/yıl)
◆ Bölgedeki ekipman sayısı	700 adet iş makinası, 200 adet kamyon
◆ İstihdam edilen eleman sayısı	7500 kişi
◆ Zenginleştirme tesisi	Kırma, eleme, boyutlandırma tesisleri yanında küçük ölçekli bir adet yıkama tesisi mevcuttur.
◆ Tahmini kömür kaybı	%20-30 dolayında (Özellikle toz kömür şeklinde)
◆ Bölgenin dinamik ömrü (yıllık üretim artış oranı %5’ dir)	Değişik kabuller için dinamik ömür aşağıdaki tabloda belirtilmiştir.

Tablo 2.9. Tahmini Rezerv Miktarlarının Dinamik Ömrü (Arıoğlu, 1995b).

Rezerv, (milyon ton)	40	50	60	70	80	90	100
Üretim, (Milyon ton/yıl)	7.5 (t_0 ’ da kabul edilen üretim)						
Dinamik ömür, (Yıl)	~ 5	~ 6	~ 7	~ 8	~ 9	~ 10	~ 10

Ekinci ve diğ. (1993) tarafından yapılan bir çalışmada dört ayrı kottan alınan Yeniköy Ağaçalı kömürü numunelerinin kısa analiz ve kükürt dağılımı açısından önemli bir farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Yapılan çalışmalardan Ağaçalı kömürünün çok aktif bir kömür olduğu ve yüksek olan yanma hızının normal yakma uygulamalarında düşürülmesi gerektiğini göstermektedir. Kükürt dağılımı, söz konusu kömürde flotasyon ve diğer zenginleştirme yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilebilecek zenginleştirmenin, oranın (kükürt miktarının düşürülmesi

oranının) %30 un üstüne çıkamayacağını göstermektedir. Bunun yanısıra piroliz işlemi ile de kömürün kükürt içeriğini emisyon standartlarını sağlayacak sınırlara çekmek mümkün olmamıştır. Yanabilir kükürt ve alt ısı değer temel alınarak, üretilen birim enerji başına gerçekleşen SO₂ yayılımı açısından değerlendirildiğinde, Yeniköy Ağaçlı kömürünün EPA tarafından belirlenen 2.2 g SO₂/10⁶ sınır değerini aştığı, ancak bazı Türk kömürlerine kıyasla daha düşük bir kirletme potansiyeline sahip olduğu anlaşılmaktadır.

Kömürlerin çevre kirletme özellikleri belirlenirken, kükürt içeriğinin tek başına bir parametre olarak kullanılması kıyaslama yapmada yeterli olmamaktadır. Kükürt içeriği yüksek olan bir kömür, ısı değeri yeterince yüksek ise diğer bir kömüre kıyasla net enerji üretimi bazında daha az kirletici olabilmektedir (Ekinci ve diğ., 1993).

Kömürün kükürt içeriğinin çok kısa sürede detaylı olarak tespiti, yüksek kükürt içerikli kömürlerin kükürt içeriğinin yanma öncesi giderilmesi, yanma sırasında SO₂'nin uzaklaştırılması (Laban ve Atkin, 2000) ve baca gazından SO₂ giderilmesi için yeni adsorbantların kullanılması ile ilgili son yıllarda değişik çalışmalar yapılmaktadır (Mochida ve Sakanishi, 2000).

3. KÖMÜRDEKİ NEM TÜRLERİ VE DAVRANIMLARI

3.1 Kömürde Nem

Kömür bünyesinde bulunan su, kömür yataklarının oluşumunu ve tüm kömür operasyonlarını etkileyen bir bileşendir. Kömür oluşumunda ilk adım bataklık içerisinde bitkisel maddelerin birikmesidir. Bu adımı pekişme (oluşum) ve yatak içerisinde (bulunduğu ortamda) %80-90 nem içeriğine sahip turba diye isimlendirilen organik maddenin kısmi olarak çürümesi takip eder. Kahverengi kömür ve linyit gibi kömürleşmenin bir sonraki kademesinde oluşmuş olan düşük ranklı kömürler (kömürleşme sürecini henüz tamamlamamış kömürler) %30-70 aralığında nem içeriğine sahiptirler (Allardice ve Evans, 1978). Ülkemizde üretilen kömürlerin çoğu düşük ranklı kömürlerdir (Akgün ve Arısoy, 1993). Kömürleşmenin son kademesinde oluşmuş olan sert bitümlü kömürler %10 veya daha az nem içeriğine sahiptirler. Su miktarının değişmesi kömürleşme prosesinin önemli bir bölümüdür ve bundan da anlaşıldığı gibi kömürün nem içeriği karakteristik ve önemli özelliklerinden biridir.

Kömürdeki su aynı zamanda kullanımını da önemli ölçüde etkilemektedir. Birçok uygulamalar için, düşük ranklı kömürlerin yüksek nem içeriği kömürün kullanımında önemli sınırlamalara neden olmaktadır. Elektrik üretimi için, yüksek nem içerikli düşük ranklı kömürler yakıldığında yeterli ısı transferi ve kararlı yanmayı sağlamak için özel fırın ve kazanlar tasarlanmıştır. Bu tip kömürlerle beraber bulunan fazla miktardaki su kütleleri sebebiyle bu kömürlerin yataktan çıktığı şekilde taşınması ekonomik değildir. Bu kömürler ya üretildikleri maden bölgesinde (elektrik üretimi için) kullanılır veya kurutma işlemi veya katı, sıvı, gaz yakıtlara dönüştürme şeklinde taşınma öncesi iyileştirme yapılarak değerlendirilir.

Bununla beraber, kömürden sıvı veya gaz yakıtlar yerine geçebilecek maddeler üretiminde, düşük ranklı yüksek nem içerikli, kömürler bir avantaj oluşturmaktadır. Bu su hidrojenasyon işlemleri için hidrojen kaynağı sağlar (Allardice ve Evans, 1978).

3.2 Kömürde Porozite

Kömür, güçlükle sınıflandırılan poröz yapının daha da karmaşık hale getirdiği kompleks polimerik bir maddedir. Kömürde, karbonda ve kokta poröz yapıyı ölçmek, porozite karakterini, miktarını ve iç yüzey alanını incelemek amacıyla 1930' lu yılların başından itibaren farklı metodlar geliştirilmektedir. Karbonlu malzemeler ve tutma prosesleri arasındaki bu yeni çalışmalar, kömür biliminde çok önemli gelişmelere yol açmıştır. Mikroporozite karakteristiği için gaz tutma uygulamaları kullanılmaya başlayınca kadar, birçok bilimadamı tarafından çok farklı metodlar kullanılmıştır. Tüm bu metodlar, kömür biliminde, çok başarılı araştırma ve gelişmelere yol açmıştır. Çalışmalardaki sonuçların açıklayıcı ve anlaşılır olmasında da önemli rol oynamıştır. Kömür yapısında su ve gazın depolanabilirliğinin anlaşılması, kömürün adsorbant olarak kullanılmasında temel oluşturmuştur (Heek, 2000).

Kömür içerisindeki porozite doğal nemin tutulmasını sağlar. Bu porozitenin yapısı, toplam içerisindeki miktarı (bölümü), boyut dağılımı ve şekli kömürün gözenek nemi ile belirlenir. Ancak, tam olarak ölçümü mümkün değildir. Por boyut dağılımını ve yapısını detaylı olarak incelemek amacıyla yukarıda da ifade edildiği gibi çok sayıda metod kullanılmaktadır. Bununla beraber, kömürün porozitesini tam olarak açıklayan, tanımlayabilen bir metod yoktur. Porozite, <1 nm den >10.000 nm çap değerleri arasında birkaç grupta tanımlanabilir (Unsworth ve diğ., 1991). Pore boyutları çok genel olarak üç farklı boyut aralığında tanımlanabilir (TUPAC, 1994; Kantorovich ve Bar-Ziv, 1999).

a) Makroporozite (>50nm) : 1 μm ' den büyük boyutlardaki porlar optik mikroskoplar ile görülebilir. Bu porlar fusunite ve semi-fusunite gibi bazı kömür komponentlerinin

karakteristik yapısal özellikleridir. Daha küçük porlar ise elektron mikroskobu ile görülebilir. Bunlar vitrinite ve inertinite deki kömür bütünündeki porlar ve büyük (mikro) çatlaklardır.

b) Mezoporozite (2-50nm)

c) Mikroporozite (<2nm)

Kömürün mikroyapısı (mezo- ve mikropor) için geliştirilen model çalışmasında lamellerin çapraz bağlar ile birarada tutulduğunu gözlemlemiştir. Farklı kömürleşme derecelerine (rank) sahip kömürler için üç farklı yapı tanımlamıştır. Bu yapılar Şekil 3.1' de görülmektedir (Unsworth ve diğ., 1991).

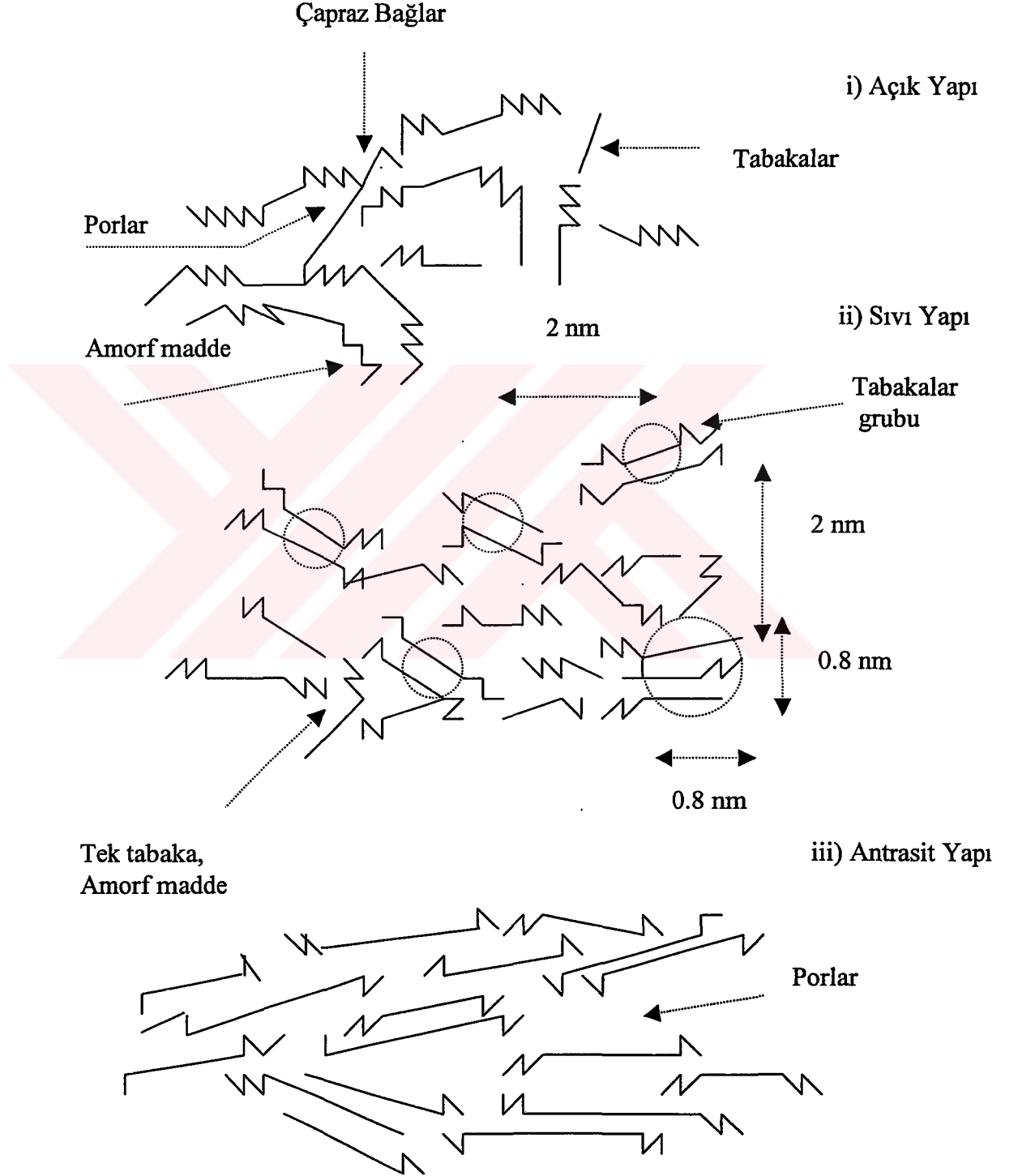
- i) Açık yapı, düşük ranklı bitümlü kömürlerin ve yüksek poroziteye sahip kömürlerin özellikleridir. Lameller, herbir yönde gelişigüzel yönlendirilmiş çok sayıda çapraz bağlarla bağlanmıştır.
- ii) Sıvı yapı, orta ranklı ve yüksek ranklı bitümlü kömürlerde tanımlanmaktadır. Bu yapıda çapraz bağ sayısı büyük oranda azalmaktadır.
- iii) Antrasit yapı, yarı-antrasit ve antrasitlerde bulunmaktadır. Bu yapıdaki lamellerin yönlendirme derecesi artmakta ve çapraz bağlar bulunmamaktadır. Bu da yüksek porozite oluşumuna neden olmaktadır.

3.2.1 Gözenek Nemi ve Toplam Porozite

Kurutulmuş kömürlerin toplam porozitesi, helyum ve civa içerisine daldırılmış kömürlerin yoğunluk farklarından (ρ_{He} ve ρ_{Hg}) hesaplanabilir (Mahajan ve Walker,1978). Civa içerisindeki yoğunluk, porların (~3-30 μm) özel bir ortamda basınç altında civa ile doldurulması sonucu ölçülür. Toplam por hacmi (V_T) 3.1 no' lu (Unsworth ve diğ., 1991) eşitlikten hesaplanır.

$$V_T \text{ (ml/g (kuru kömür))} = \frac{1}{\rho_{He}} - \frac{1}{\rho_{Hg}} \quad (3.1)$$

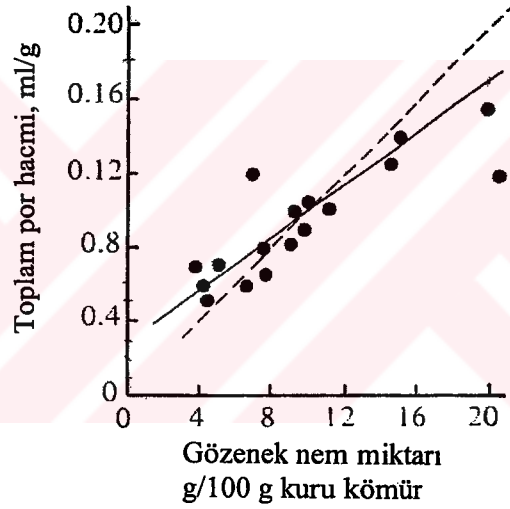
Doygunluğa erişildiğinde, kömürdeki ulaşılabilir tüm porozitenin su ile dolmuş olduğu kabul edilir. Bundan dolayı, doymuş nem içeriği, toplam poroziteyi hesaplamak için kullanılır (Unsworth ve diğ.,1991). Gözenek neminin (ml/100 gr kuru kömür olarak hesaplanmış) V_T 'a eşit olabilmesi için üç koşul gereklidir.



Şekil 3.1. Kömür Yapısının Şematik Görünümü (Unsworth ve diğ., 1991).

- i) Absorbe olan suyun yoğunluğunun, bulk suyun yoğunluğuna eşit olduğu,
- ii) Kuruma süresince hacimsel daralmanın olmadığı,
- iii) %96 relatif nemde, 10 μm den büyük porlarda su tutulmadığı ve tüm porların 10 μm den küçük ve su ile dolu olduğu kabul edilir.

Şekil 3.2, 17 farklı kömür için yapılan ölçümlerde V_T ve IM (gözenek nemi) arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Düz çizgi lineer regresyon çizgisi ve ($V_T = 0.72 \text{ IM} + 2.6$) ve kesikli çizgi ise 1:1 şeklinde mükemmel uyumu ifade etmektedir (Unsworth ve diğ., 1991).

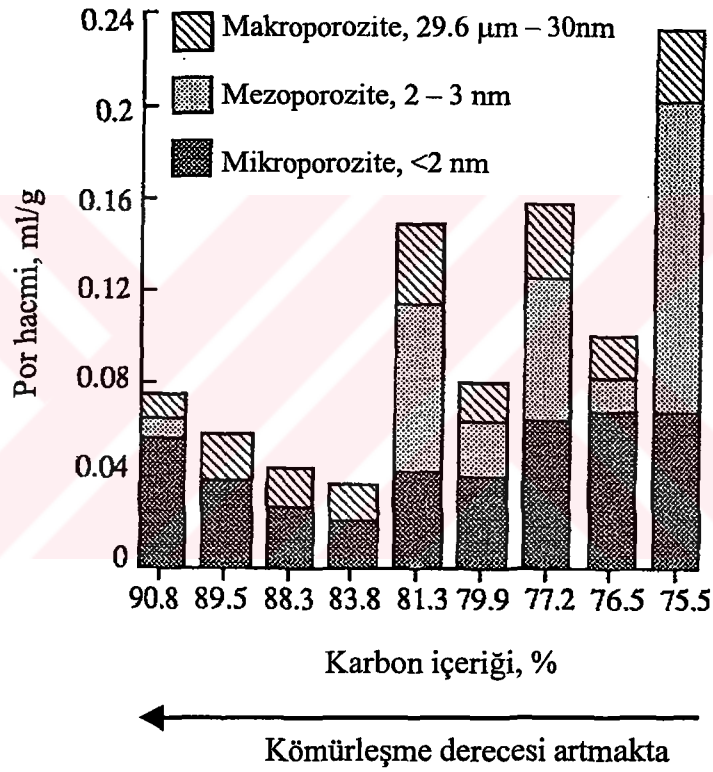


Şekil 3.2. V_T (toplam por hacmi) ve IM (gözenek nemi) Arasındaki Bağntı (Unsworth ve diğ., 1991).

Kuruma işlemi süresince, porlarda bir miktar hacimsel büzülmenin olması nedeniyle yüksek nem içeriklerinde, 1:1 doğrusunda negatif yönde sapma olduğu görülmektedir. Düşük IM değerlerinde (%) ise pozitif sapma meydana gelmiştir. Bu da tam olarak dolmayan bazı porların varlığını göstermektedir.

Toplam por hacimleri ile yapılan bir diğer çalışmada, (Walker ve diğ., 1988; Unsworth ve diğ., 1991) kömürleşme derecesinin (rank) artmasıyla beraber, toplam por hacminde azalma olduğu görülmüştür.

Yapılan bir başka çalışmada, Şekil 3.3' de görüldüğü gibi benzer bir eğilim görülmektedir. Burada toplam porozite hacmi, makro- , mezo- ve mikroporozite şeklinde hacim dağılımını içermektedir. Partiküller arası porozite varlığı bazı araştırmacılar tarafından kabul edilmektedir. Bir grup araştırmacı ise (Unsworth ve diğ., 1991) kömürlerin sıkıştırılabilirliği nedeniyle bu görüşü reddetmektedir. Bu görüşlerin yanında, 3.5 μm ve 50 nm gibi oldukça yüksek ve düşük por çaplarında, sıkıştırılabilirlik etkisinin ihmal edilmesiyle, makroporların hacmi, düşük ranklı kömürler için (düşük karbon içeriği) 0.01 – 0.05 ml/g arasında değişmektedir.



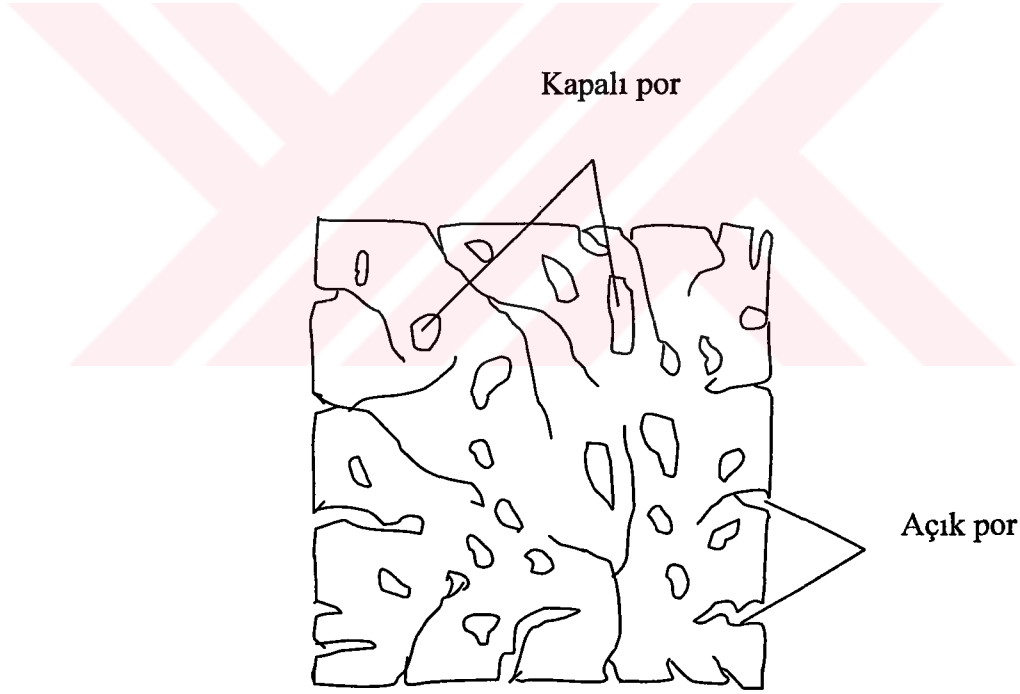
Şekil 3.3. Farklı Ranklı Kömürler İçin Por Boyut Dağılımı (Unsworth ve diğ., 1991).

3.2.2 Kömürdeki Poroziteye İlişkin Değişken Tanımlamalar ve Yapılan Çalışmalar

Kömürün porozitesi ile ilgili araştırmalar ve elde edilen şaşırtıcı sonuçlar, özellikle kömürün absorpsiyon özelliği ile ilgilidir. Absorpsiyon, kömür yatağındaki gaz içeriği ve kömürün gaz tutma kapasitesi ile ilgili problemlerde bilimsel ve pratik öneme sahiptir. Bu problemlerin çözümü, maden ocaklarındaki gaz emisyonunun kontrolünü ve önceden bilinmesini sağlayacaktır. (National Paper, 1988).

Veselovsky (1966), kömürün oluşumu süresince kimyasal ve fiziksel yapıda iki farklı başkalaşım olduğunu ifade etmiştir. Oluşumda ana faktör, kömürün kompleks moleküler yapısının oluşumuna neden olan sıcaklıktır. Fiziksel yapıdaki başkalaşımında temel faktör ise, gaz ürünlerinin emisyonu ve yüksek kayaların oluşturduğu basınçtır. Bu başkalaşım, dağılmış gözenek yapısı ve kömürle bağlanmış kaya yapıları ile ifade edilebilmektedir.

Kömür yapısındaki porlar, diğer katılarda olduğu gibi iki grupta incelenmiştir. Şekil 3.4' de görüldüğü üzere açık boşluklar veya katı yüzeyi ile bağlantılı kanallar ve kapalı boşluklar veya katı yüzeyi ile bağlantısı olmayan kanallardır. Gözenekler ve kömür partikülleri ile kayaların bağlandığı yapılar; çatlaklar, açık ve kapalı porlar ve aynı zamanda düzensiz yönelmiş kısmi aromatik tabakalar arasındaki boşlukları içermektedir (Harpalani ve Schraufnagel, 1990; Gregg ve Sing, 1982).



Şekil 3.4. Kömürün Poröz Yapısında Çatlaklar, Açık ve Kapalı Porların Görünüşü (Alexeev ve diğ., 1999).

Bir başka çalışmada, porlar genel olarak açık ve kapalı olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Porların birçoğunda gaz moleküllerinin difüzyon katsayısı (D_g) 10^{-4} cm^2/s civarında değişirken, katılardaki difüzyon katsayısı $D \sim 10^{-9} \dots 10^{-8}$ cm^2/s mertebelerindedir. Porların genel olarak iki gruba ayrılması bu farktan dolayı hata

oluşturmamaktadır. Kapalı porların gaz ile dolması prosesini tanımlayabilecek doğru ve kesin görüşler yoktur ve kömürdeki kapalı porlarda metan gazı ve nemin bulunuşu kontrol edilememektedir. Bu sebeplerden dolayı kömürdeki kapalı poroziteyi kesin olarak belirleyen metod bulunmamaktadır (Alexeev ve diğ., 1999).

Elektron mikroskobu ile lineer por boyutları ($\sim 10^{-7} - 10^{-4}$ cm) ve birim hacimdeki por sayısı ($\sim 10^{11} - 10^{20}$ cm⁻³) hesaplanmıştır. Kömürün birim ağırlığındaki toplam por hacmi (V_p), kömürün spesifik hacminin farkı ($V_p = V_1 - V_2$) olarak hesaplanmıştır. $V_1 = 1/d_a$, $V_2 = 1/d_r$, d_a ve d_r kömürün görünen ve gerçek yoğunluklarıdır. V_1 hacmi kömürün porlarla birlikte, V_2 ise kömürün porlar olmaksızın hacmini ifade etmektedir. Elektron mikroskobu ile yapılan çalışmada, kömürün 0.2 mm boyutundaki her bir parçasının 10^8 den 10^{17} değerine kadar kapalı por içerdiğini görülmüştür (Pooley, 1968; Gamson, ve diğ., 1993).

Alexeev ve diğ. (1999) yapmış oldukları çalışmada kömürde kapalı porozite varlığını gözlemlemişlerdir. Bu çalışmada oluşum dereceleri farklı 24 kömür örneği kullanılarak, kapalı por hacimleri deneysel olarak belirlenmiştir. Çalışmada temel metod, poröz katı üzerinde (Alexeev ve diğ., 1994) gaz absorpsiyonu ve desorpsiyonu modeli oluşturulmasıdır. Katıya gaz absorpsiyonu, gaz moleküllerinin poröz yapı içerisinde hızlı difüzyonu ile meydana gelmektedir. Kömürdeki por hacminin hesaplanmasında kapalı porların ihmal edilmesiyle oluşacak hata oranının %60' ın üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Bu sebeple, toplam poroziteye esas katkı kapalı por hacimlerinden gelmektedir.

Bu çalışmada ayrıca patlamaya eğilimli olan ve patlamaya eğilimli olmayan kömürlerin kapalı poroziteleri mukayese edilmiştir. Sonuçlar Tablo 3.1' de verilmiştir. Patlamaya eğilimli kömürlerde kapalı porozite miktarında artış olduğu görülmektedir. Bu nedenle kapalı porozite gaz depolanmasında önemli rol oynamaktadır. 24 kömür için yapılan porozite ölçüm sonuçları, toplam porozite içerisinde kapalı por miktarının %60 oranının üzerinde olduğunu göstermiştir.

Düşük ranklı kömürler (karbon içeriği <%75) çoğunlukla makropor, sabit karbon içeriği %76-84 aralığında olan kömürler mikro ve mezopor, yüksek ranklı kömürlerin ise (karbon içeriği >%84) büyük miktarlarda makropor içerdikleri tespit edilmiştir.

Bu çalışmada kömürdeki mikropor ve makroporlar dağılımı karbondioksit gaz adsorpsiyonu ile tespit edilmiştir. Kömürdeki mikroporozite oranının, metan adsorbsiyonunda önemli bir kontrol faktörü olduğu görülmüştür (Amarasekera ve diğ., 1995; Clarkson ve Bustin, 1996).

Tablo 3.1. Patlamaya Eğilimli Olan ve Olmayan Kömürlerde Kapalı Porozite Hacmi (Alexeev ve diğ., 1999).

Numune No	Uçucu Madde (wt.%)	Karakteristik Özellik	Por Hacmi (cm ³ /g)
1	32	Patlamaya eğilimli	0.2
2	25.8	Boşalmış, tehlikeli çukur içermekte	0.08
3	32	Patlamaya eğilimli	0.17
4	18	Patlamaya eğilimli değil	0.11
5	33	Patlamaya eğilimli değil	0.075

Kömürün bileşiminin por yapısı ve adsorpsiyon karakteristikleri üzerine etkisi dört farklı bitümlü kömür için incelenmiştir. Kömürlerin tümü, düşük basınçta (<127kPa) 77 K' de azot gazı adsorpsiyonu, 273 K' de karbondioksit gazı adsorpsiyonu ve yüksek basınçta (200 MPa üzerinde) civa porozimetresi ile tespit edilen farklı model por hacim dağılımlarına sahip oldukları tespit edilmiştir (Clarkson ve Bustin, 1999).

Yapılan bir başka çalışmada, por hacim dağılımı ve gaz adsorpsiyon kapasitesinin kömürün gaz taşıma özelliğinde oldukça önemli etkiye sahip olduğu görülmüştür. Bright ve banded-bright (yüksek vitrinite, düşük kül) kömür aynı kömürleşme derecesine sahip dull (düşük vitrinite, yüksek kül) kömürden daha büyük mikropor hacmine sahiptir. Azot adsorpsiyonu ve desorpsiyon analizi ile yapılan hesaplamada Dull kömürün bright kömürden daha büyük miktarda mezoporoziteye sahip olduğu görülmüştür. Civa porozimetresi ile yapılan çalışmada kömürlerin çoklu model por hacim dağılımı gösterdiği, yüksek basınçta metan ve karbondioksit izotermelerinden bright ve bonded-bright kömürlerin, dull kömürden daha fazla miktarda gaz adsorbe ettiği tespit edilmiştir (Clarkson ve Bustin, 1999).

Weishauptova ve Medek (1998) kömür yatağında bulunan toplam metan miktarının dört farklı şekilde bulunduğunu tespit etmişlerdir. Metanın kömürde mikropor yapıda, mezo- ve makropor yüzeyinde adsorbe olmuş, su ile dolu olan por

yüzeylerinde serbest hareket halinde, porlar içerisindeki suda çözünmüş olarak değişik oranlarda bulunduğunu gözlemlemişlerdir. Aynı ayrı tespit edilmiş olan her bir kısmi hacim toplamı, kömür içerisindeki metanın toplam hacmine eşit olduğu, daha sonra yüksek basınç adsorpsiyonunda ölçülen hacme de pratik olarak eşit bulunmuştur. Toplam gaz hacminin farklı bölgelerde incelenmesi, aşırı yükten dolayı oluşan basınç ve su içermesi sebebiyle poröz sistemdeki boyut değişimi için düzeltme parametrelerinin oluşumunu sağladığı görülmüştür.

Bitümlü kömürler ile yapılan bir çalışmada, yarı koklaşma gerçekleştirilmiş ve bu sistemin özellikleri incelenmiştir. Poröz kömürün oksidasyonu süresince yarı kok iç yüzey alanının, iç bölgelerdeki kapalı porların veya boşlukların açılmasına bağlı olarak artış gösterebildiği gözlemlenmiştir. Kömürün gelişimi ile beraber, yüzey alanı ve porozitenin, zaman ve sıcaklık değişimine bağlı olduğu tespit edilmiştir (Chan ve diğ., 1999).

Jones ve diğ. (1999) ise kömür yapısının yarı kok porozitesi ile olan ilgisi üzerine bir modelleme çalışması gerçekleştirmişlerdir. Yapılan bir diğer çalışmada porozite gelişimine, katalitik özelliğe sahip Lewis asidinin (MoCl_5) etkisi farklı kömürleşme derecesine sahip üç adet koklaşmış kömür kullanılarak incelenmiştir. Kömürleşme derecesine bağlı olarak Lewis asidinin ultramikro-, mikro-, mezopor gelişiminde değişken davranım gösterdiği tespit edilmiştir (Bégin ve diğ., 1999).

Kantorovich ve Bar-Ziv (1999) yaptıkları bir çalışmada, yüksek poroziteye sahip karbon partiküllerindeki ısı transferinde, poröz yapıdaki değişimin rolünü incelemişlerdir. $100\mu\text{m}$ boyutundaki partiküllere iki farklı termal iletkenlik metodu uygulanmıştır. Yüksek poroziteye sahip karbonlarda termal iletkenliğin makro- ve mikroyapılara, mikrokristallerin yönüne, mikrokristallerin boyutuna ve aralarındaki bağlanmaya bağlı olduğu görüşüne varılmıştır.

Kömürün özelliklerinin, kok gerilme direncine etkisi, matrix yapıdaki gerilme ve poröz yapının etkisi şeklinde iki ayrı grupta incelenmiş ve poröz yapının, koklaşmanın özelliklerine son derece bağlı olduğu görülmüştür. Kullanılan farklı kömürlerde maksimum akıcılık ve kömürdeki şişme miktarı gibi poröz yapı özellikleri geliştirilmiştir. Bu çalışmada ayrıca poröz yapı özellikleri, por boyut

dağılımı ve tespit edilen porların pürüzlülüğü üzerine değerlendirilmiştir. Her iki parametrede de kömür partikülleri arasındaki mesafe ve yapışma durumunun önemli olduğu, kok direncinin kömürdeki porların yönüne ve şekline bağlı olduğu tespit edilmiştir (Sato ve diğ., 1998).

3.3 Kömür Bünyesinde Bulunan Nem ve Türlerine İlişkin Değişken Tanımlamalar

Yukarıda kömür oluşumunda ifade edildiği gibi kömürler, kömürleşme derecelerine göre farklı oranlarda rutubet içerirler. Ocak çıkışında taş kömürü %1-3, sert linyitler %20-30, yumuşak linyitler %40-60, turbalar ise %60' ın üzerinde nem içerirler. Görüldüğü üzere kömürleşme derecesi arttıkça kömürlerin rutubeti azalmaktadır.

Kömürün yapısında bulunan nem kömürün kullanımı, kimyası ve fiziksel özellikleri açısından kömürü karakterize eden parametreler (uçucu madde, kül, sabit karbon ve nem) arasında yer almaktadır. Özellikle kömürün nem oranı, bünye neminin altına düşürüldüğü durumlarda artan parçalanma ve tozlaşma eğilimi kömürün kalitesini belirleyen önemli bir parametre haline gelmektedir (Atakül ve diğ., 1996).

Kömür bünyesinde bulunan nemin çok değişik şekillerde bulunması ve bunları birbirinden kesin olarak ayırmakta karşılaşılan zorluklar nedeniyle net bir değerlendirme yapmak oldukça güçtür (ASTM D-3302-74, 1976).

Kömürde bulunan nemi kimyasal olarak bağlı nem, adsorbe edilen nem ve mekanik kuvvetler sonucu tutulan nem olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır (Evseev ve Voroshilov, 1986; Banerjee, 1985). Kimyasal olarak bağlı nem kömürün ana bileşenlerinden olup kimyasal reaksiyonlar sonucu oluşmaktadır ve göreceli olarak güçlü bağlara sahiptir. Adsorbe edilen nem su molekülleri ile gözenek yüzeyleri arasındaki etkileşim sonucu yüzeyleri ince bir film halinde kaplamaktadır. Bu film kalınlığı yüzeyin özelliğine bağlı olarak değişmekte ve bu halde tutulan nem, maksimum nemin yarısına ulaşabilmektedir. Mekanik kuvvetler sonucu kömürde tutulan nem nisbeten daha serbesttir. Bu haldeki nem büyük boyutlu çatlaklar, yüzey gerilim kuvvetleri ve kılcallık etkisiyle kömür bünyesinde tutulan sıvıdan

oluşmaktadır. Tablo 3.2’ de Türkiye’ deki bazı kömürlerin nem ve alt ısı değerleri verilmiştir (Akçura ve Gerger, 1982; Türkiye Linyit Env., 1986).

Kömürdeki nemin kaynakları Gauger (1932) tarafından organik moleküllerin bozulması sonucunda ortaya çıkan su (combined water), yüzeyde absorblanmış su, kapiler yoğuşma suyu, çözünmüş su ve inorganik bileşenlerin hidrasyon suyu olarak belirtilmektedir.

Tablo 3.2. Türkiye’ deki Bazı Kömürlerin Nem ve Alt Isıl Değerleri (Akçura ve Gerger, 1982; Türkiye Linyit Env., 1986).

Kömür	Toplam Nem (%)	Alt Isıl Değer (kkal/kg)
Zonguldak*	9.6	6660
Elbistan	49.5	1120
Yatağan	37.3	2540
Soma	15.1	3730
Türkiye ortalaması	26.1	2718

*Taş kömürü

Brown’ a (1953) göre su üç kaynaktan gelmektedir. Bunlardan ilki yüzeye absorblanmış serbest su olup normal suyun fiziksel özelliklerine sahiptir. Bu, kuruma işlemi sırasında kömürü en önce terk eden sudur. İkinci türdeki su, kömürün kılcal yapısı içerisinde absorblanan bünye nemi ‘dir. Kimyasal olarak bağlanmış olan hidrasyon suyu üçüncü grubu oluşturmaktadır. Yüzey nemi kömürde serbest halde bulunan sudan, kömürün su ile temasından oluşur. Bünye nemi kömürün yapısında yer alır ve inorganik maddelere bağlı bulunan sudan oluşur. Bünye nemi bitümlü kömürlerde %1-3 arasındayken, linyitlerde %60’a kadar çıkabilmektedir. Kömüre kimyasal olarak bağlı olan hidrasyon suyunun, kömürün toplam rutubet içeriği içindeki payı düşüktür. Kömürün içerdiği rutubet çeşitleri Şekil 3.5 de şematik olarak verilmiştir (Sondreal ve diğ., 1995).

Yüzey Nemi:

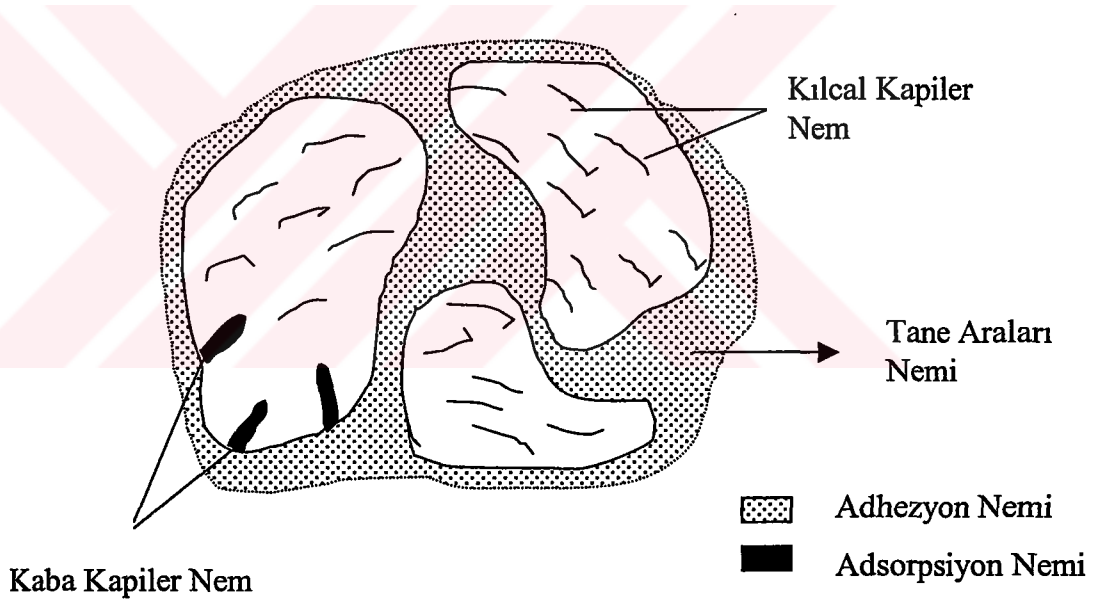
- Adhezyon (bağıl) nemi
- Taneler arası nem

- Adsorpsiyon nemi

Bünye Nemi:

- Kaba kapiler nem
- Kılcal kapiler nem

Yukarıda ifade edilen nem türleri ve kömürleşme derecesi birlikte düşünüldüğünde, nemin bünye içindeki dağılımının ve yanma sürecindeki davranımının değişiklikler gösterebileceği anlaşılmaktadır. Linyit ve genç kömürlerde su yüzeyde çok gevşek bir şekilde bağlanırken, büyük ve mikro gözeneklerde hidrojen bağları vasıtasıyla kuvvetli bir şekilde bağlandığına işaret edilmektedir (Sondreal ve diğ., 1995).

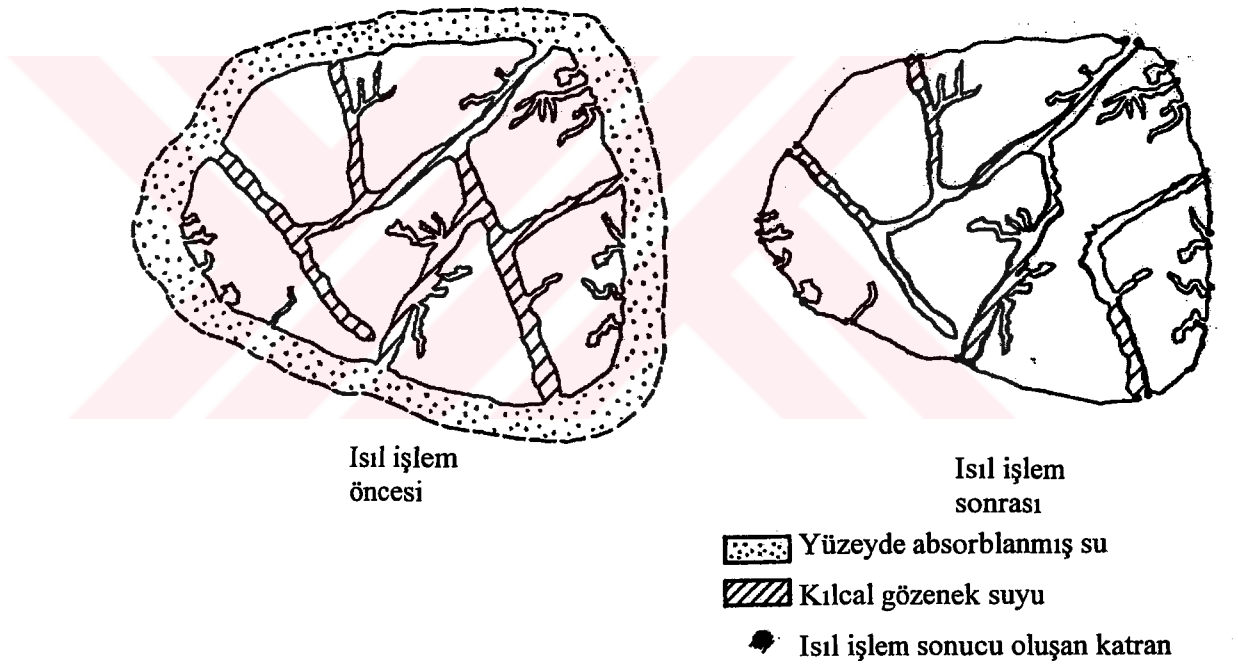


Şekil 3.5. Kömürün Nem İçeriği (Sondreal ve diğ., 1995).

Bazı prosesler, linyitlerin 230°C üzerindeki sıcaklıklarda sıcak akışkan ile uygulanan işlemlerinden oluşur. Bu koşullarda kömür yapısına bağlı bulunan karboksil grupları parçalanarak CO₂ oluşumu gerçekleşir. Bu oluşum gözenekler dışında bulunan suyun sıkışmasına neden olur. Gözeneklerin çoğu ya çöker yada tıkanır, bu da malzemenin özelliğini ve yapısını değiştirir. Bu esnada katran oluşur ve sonradan gözenek girişlerini tıkayarak kapanmasına neden olur. Açıklandığı şekliyle

genç kömürlerde normal şartlarda ve ısıtma işlem sonunda nem veya nemin uzaklaşma durumunun şematik ifadesi Şekil 3.6' da gösterilmiştir (J.E. Sinor Consultants, Inc., 1992).

Böylesine karmaşık etkileşimler nedeniyle, ısıtma işlem sırasında kömürden nem buharlaşması olayında farklı mekanizmaların ve dolayısıyla farklı buharlaşma süreçlerinin meydana geleceği açıktır. Vorres ve diğ. (1992), buharlaşmanın iki aşamalı olarak gerçekleştiğini gözlemlemişlerdir. Birinci aşamada kömür neminin yaklaşık %80-85' i belli bir hızla buharlaştıktan sonra, daha yavaş buharlaşmanın olduğu ikinci buharlaşma sürecinin oluştuğunu ifade etmektedirler.



Şekil 3.6. Isıl İşlem Öncesi ve Sonrası Kömür Bünyesinde Suyun Davranımı (J.E. Sinor Consultants, Inc., 1992).

Akgün ve diğ. (1993) yaptıkları çalışmada kömürdeki nem buharlaşmasının kinetiğini incelemişlerdir. Kömürde nem buharlaşma hızı, genel olarak, kömürün bulunduğu ortamın sıcaklığına, bağıl nemine ve ortamdaki gaz hızı ile birlikte kömürün parçacık çapına, nemine ve ortamda bulunan kömür kütlesine bağlıdır. Bu çalışmada, sözü edilen bu değişkenlerden sıcaklık ve bağıl nemin kömürdeki nem kaybı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Su düşük ranklı linyitlerden yüksek uçuculu bitümlülere kadar tüm aralıktaki kömürler için iyi bir şişirme ajanı olarak gösterilmiştir. Linyitlerde ve genç kömürlerde kapiler yapıda suyun önemli oranlarında bulundurulması linyitin nemlenme veya nemin giderilmesi hallerinde şişme, büzülme davranımı ile sonuçlanmaktadır. Gerçekte suyun kömür yapısı içerisindeki polar gruplar tarafından tutulduğu tespit edilmiştir (Deevi ve Suuberg, 1987).

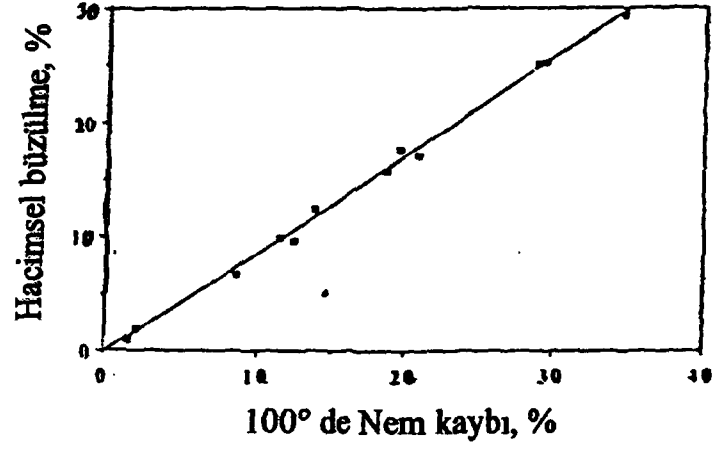
Bazı araştırmacılar büzülme miktarını nem oranına bağlayan bir korelasyon türetmişlerdir. Suuberg ve diğ. (1993) düşük ranklı linyitlerden bitümlülere kadar değişik ranklı ondört ayrı kömür numunesi (nem içerikler %29.4 ve 1.1 arasında değişmekte) ile yapmış oldukları çalışmada kömür numunelerinin hacimsel büzülme miktarını, kömür numunelerindeki nem kaybı ile korele etmişlerdir. Şekil 3.7 ' deki grafikten 100°C ' de vakum fırınında gerçekleştirilen bu kurutma işlemi sonucunda nem kaybı ile hacimsel büzülme miktarları arasında lineer bir bağıntı olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar için oluşturulan korelasyon aşağıdaki bağıntı ile ifade edilmektedir.

$$\text{Hacimsel Büzülme } \% si = 0.863 (\text{nem, ağırlık } \% si) - 0.162 \quad (3.2)$$

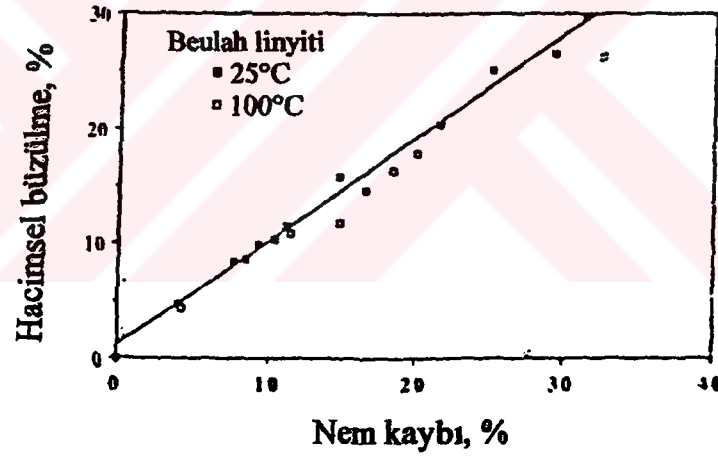
Yine bu çalışmada ikinci grup ölçümler Beulah linyiti (%29.4 nem içerikli) için yapılmıştır. Linyit öncelikle oda sıcaklığında kısmi olarak kurutulmuştur. Kısmen kurutulmuş kömür örnekleri daha sonra yukarıdaki gibi 100°C 'de vakum fırınında kurutulmuştur. Her iki sıcaklığa ait bu kurutma sonuçları ise Şekil 3.8' de verilmiştir. Şekil 3.7' deki aynı tip lineerlik durumu burada da görülmektedir. Sadece 100°C' deki değerler oda sıcaklığındaki değerlerin çok az altında bir eğilim göstermektedir (Suuberg ve diğ., 1993).

Yanma süresinde büzülmenin tanecik yayınımına etkisi olabileceği kadar, sebep olacağı parçalanma ve porozite artışının sağlayacağı yanma verimi artışı da söz konusu olabilir. Hidrojen bağlarıyla kuvvetli bir şekilde bağlanmış bulunan suyun, düşük kaliteli kömürlerde kütleli direnci sağlayan en önemli parametre olduğu bilinmektedir. Nitekim kurutmadan sonra Türk linyitlerinin ufalanma eğilimi önemli ölçülerde artmaktadır.

AMAX Kömür Şirketi 1988 yılında ABD alt bitümlü kömürlerinin kurutulması için bir akışkan yataklı kurutucu tasarımı gerçekleştirmiştir. Ancak bu tesis, ince tanecik oranlarının çok yüksek olması ve kül nedeniyle çalıştırılamamıştır (Wessner, 1993).



Şekil 3.7. Değişik Ranklı Kömürlere Ait Nem Giderme Sonrası Hacimsel Büzülme (Suuberg ve diğ., 1993).



Şekil 3.8. Beulah Linyitinde Nem Giderme Sonrası İki Farklı Sıcaklıktaki Hacimsel Büzülme (Suuberg ve diğ., 1993).

3.4 Kömürdeki Nemin Uçucu Madde Çıkış Mekanizmasına Etkileri

Yüzeyde absorblanmış serbest nemin kömür bünyesinden ayrılması 100°C civarında hızlı bir şekilde gerçekleşmektedir. Kapiler gözeneklerde kimyasal olarak bağlı bulunan nemin bir kısmı uçucu madde çıkışı başlamadan önce bünyeyi terk etse de uçucu madde ile birlikte nemin çıkışı devam etmektedir (Agarwal ve Pedler, 1986). Bu nedenle uçucu madde çıkış hızı, suyun buharlaşması için absorblanan ısı

nedeniyle düşmektedir. Buna bağlı olarak uçucu maddenin yanmaya başladığı sıcaklıkta ve yanma süresinde bir artış meydana gelmektedir. Yüksek oranlardaki nemin uçucu madde çıkış sürecinin mekanizmasına olan olası etkileri Stubington (1980) tarafından Tablo 3.3 de özetlenmiştir.

Tablo 3.3. Kömürde Yüksek Nem Oranının Uçucu Madde Çıkışına Olan Olası Bazı Etkileri (Stubington, 1980).

Etki	Nedenleri
Düşük pik sıcaklığı	Su kömür karışımı. Sistemlerde %30' luk su, pik sıcaklığını yaklaşık 100°K düşürmektedir. Bu da toplam uçucu çıkış hızını düşürmektedir.
Yarı kok iç bünyesindeki değişiklikler	Bünyede hızlı su kaybı nedeniyle iç gözenek yapısı değişebilmektedir.
Gaz faz dekompozisyonu	Yüksek su buharı derişimi, oksijen derişimini düşüreceği için uçucuların gaz faz reaksiyon hızlarını düşürebilir.
Taneciklerin sıcaklık profilleri	Kömürdeki kalıntı nem kömür taneciklerinin ısınma hızını düşürebilir.

3.5 Kömür Neminin İnce Partiküllerin Yanmasına Etkisi

Pulverize edilmiş kömürlerle yanan endüstriyel proseslerde ısıtma hızı çok fazla yüksek değildir. Kömür tutuşma prosesi ve bu prosesde kömürün davranışı kömürün yapısı ve boyutuyla yakından ilişkilidir (Davini ve diğ., 1996).

Prins' in (1987) çalışmalarına göre akışkan yatakta 4-10 mm mertebelerindeki tanecik büyüklüğüne sahip yaş linyit için “uçucu maddelerin yanmaya başlamasında görülen gecikme” kuru linyitler için yaklaşık iki kat büyüklükteki boyutlarda sağlanabilmektedir. İri kömür parçacıklarının yakıldığı soba gibi sabit yatak türü yakma sistemlerinde, ısı transfer sürecinin özelliklerinden dolayı, bu etki kuşkusuz daha belirgin bir hale gelmektedir.

Yanma profili deneyleri ve akışkan yataklı sistemlerin modelleme çalışmaları sabit karbonun yanmaya başladığı sıcaklık seviyelerinde bünyede nemin kalmadığını ortaya koymaktadır (Agarwal ve diğ., 1986).

Stoker ızgaralı yakma sistemlerinde ince tanecik oranının yüksek olduğu durumlarda, iri ve ince taneciklerin ayrışmasını önlemek açısından kömür yatağının ıslak tutulması önerilmektedir.

Yapılan bir çalışmaya göre 1/8 inç' lik elekten geçen kömürün, her %10' luk bölümü için %1.5 oranına kadar ıslatılması önerilmektedir (Ministry of Power, 1958).

Yapılan bu literatür araştırmaları, nemsiz kömürlerin yanması için geliştirilen modellerin (Kansa, 1982; Gururajan ve diğ., 1988), özellikle linyit gibi yüksek oranlarda nem içeren kömürlerin yanma problemlerini tanımlamak için kullanılmalarının doğru bir yaklaşım olmadığını göstermektedir (Gururajan ve diğ., 1988).

Kurutma, uçucu madde çıkışı ve yanma olaylarının örtüştüğü ve etkileştiği şeklindeki değerlendirmenin daha doğru bir yaklaşım olduğu anlaşılmaktadır (Agarwal ve Pedler, 1986; Wildegger-Gaissmaier ve Agarwal, 1990).

3.6 Kömürdeki Nemin Kok Fırınlarında Karbon Birikimi Oluşumuna Etkisi

Kok fırınlarının üst kısımlarında yüksek veya düşük hızla karbon birikiminin oluşması fırınların bakım ve kullanımlarında sayısız zorlukların oluşmasına neden olmaktadır. Mekanik ve termal dekarbonizasyon metodları genel olarak yeterli düzeyde etkili olmalarına karşın bazı sınırlamaları da içerirler (Xu ve Tomita, 1989).

Kömürde bulunan suyun, kok fırınlarında karbon oluşumu üzerine etkisinin incelendiği çalışmalar kömür yapısında bulunan suyun (nem veya buhar olarak) piroliz prosesleri süresince karbon birikiminin oluşumunda engelleyici bir rol oynadığını göstermiştir (Krebs ve diğ., 1994; Minkova ve diğ., 1991).

Krebs ve diğ. (1996), bu konuda yaptığı çalışmada kömür nem içeriğinin piroliz süresince karbon oluşum hızına etkisini incelemiş ve bu çalışma sonuçlarında kok fırınlarında karbon birikim hızının, kömürdeki nem içeriğinin artmasıyla birlikte lineer olarak azaldığını gözlemlemiştir.

3.7 Nemin Yanma Sırasında Verim ve Emisyona Etkisi

Kömürün nem içeriğinin yanmaya olan etkisi, kullanılan yanma sistemine doğrudan bağlıdır. Akışkan yataklarla ilgili olarak yapılan deneysel ve modelleme çalışmalarında nemin yanmaya etkisi, nemin uçucu maddeler öncesi ve uçucu maddelerle birlikte çıkış süreçleri göz önüne alınarak irdelenmiştir (Agarwal ve Pedler, 1986; Wildegger-Gaissmaier ve Agarwal, 1990; Jung ve Stanmore, 1980; Agarwal ve diğ., 1986). Bunun yanısıra Water (1970), Atımtay (1979), Stubington (1980), Ekinci ve diğ. (1981), Pillai (1985) ve Kobayashi ve diğ. (1977), akıştan yatakta uçucu madde yanmasına yönelik çalışmalarında nemin etkisini göz önüne almamışlardır.

Stoker ızgaralı sistemde iri ve ince taneciklerin birlikte yakılmaları durumunda su ile ıslatılmış kütlelerin yanma veriminin, ayrışmanın önlenmesi nedeniyle, daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu sistemlerle yapılan bir çalışmadan elde edilen sonuçlar göre, serbest nem oranının artması ile boyler verimi önce önemli ölçüde bir artış göstermiş, ancak %20' lik serbest nem seviyelerine ulaşıldıktan sonra düşmüştür (Ministry of Power, 1958). Çalışmada kullanılan bitümlü kömürün yaklaşık %1 oranında bünye nemi içerdiği belirtilmektedir.

Nemin ızgaralı yakma sistemlerde yanma açısından gösterdiği olumlu etki, daha önce anlatılan fiziksel etkilerin yanısıra gazlaştırma reaksiyonları gibi kimyasal olaylardan da kaynaklanmaktadır. Ancak nemin yanmaya olan etkisi pek çok araştırmacı tarafından ısrarla uçucu madde çıkışı ve yanması olaylarıyla sınırlandırılmıştır. Pulverize ateşleme ve stoker ızgaralı sistemlerde, ısı transferinin etkisinin önemli olmadığı kararlı yanma süreçlerinde bu varsayım nem oranı düşük bitümlü kömürler için geçerli olabilir. Ancak özellikle nem içeriği yüksek olan düşük kaliteli kömürlerin yakıldığı düşük verimli soba ve kazanlarda, yanmanın kararlı duruma ulaşmadığı aşamalarda nem hava kirliliğini önemli ölçülerde arttırabilen bir parametre olmaktadır. Tanecik yayınımları nem ilişkisi ile ilgili olarak yapılan deneysel bir çalışmada nem oranının %18' den %27' ye çıkması sonucunda tanecik yayınımlarının sobalarda %150 kazanlarda ise %33.5 oranında arttığı görülmüştür (Anonim, 1994).

Nemin yanma sürecine olan etkisi konusundaki en ayrıntılı irdelemeler akışkan yataklı sistemler için yapılmıştır (Agarwal ve Pedler, 1986; Wildegger-Gaissmaier ve Agarwal, 1990). Nemin etkisinin en fazla görüldüğü aşamanın yanmanın başlamasındaki önceki süreç olduğu, nemin yapıyı terk etmesi sonucu geride kalan kuru kütlenin ısınmasıyla uçucu madde çıkışı ve yanmasının başladığı belirtilmektedir. Uçucu madde yanmasını sabit karbon yanması izlemektedir.

Nem, uçucu madde yanma sıcaklığına ulaşmayı geciktirmesi ve yapıyı etkilemesi açısından akışkan yatak yanma sürecinde de önem taşımaktadır. Ancak iyi karışan ve kararlı yanmanın sürdüğü bir akışkan yatakta, uç durumlar dışında, verimin düşmesi ve yayınımların azalması açısından önemli bir etkisi yoktur. Akışkan yataklarda tanecik boyutunun sabit yataklı sistemlere kıyasla çok daha küçük olması bu davranımda etkili olmaktadır. Bu özellik nedeniyle akışkan yataklar, linyit ve su-kömür karışımlarının yakıldığı sistemler olarak geniş bir uygulama alanı bulabilmektedir. Isıl değeri 34890 kJ/kg olan bir kömürün akışkan yatakta sağlayacağı adyabatik fırın sıcaklığı değerlendirmelerinden %90 mertebelerinde nem içeren bir kömürün teorik olarak akışkan yatakta yakılabileceği anlaşılmaktadır (Waters, 1970).

3.8 Nemin Kömürün Kendiliğinden Yanması Olayı Üzerine Etkisi

Kömür bünyesindeki nemin ve bu nem oranında meydana gelebilecek değişim miktarının, kömürlerin kendiliğinden yanması olayı üzerinde son derece önemli ve kompleks bir etkisi olmaktadır (Kim, 1977; Davidson, 1990). Genel olarak, çok düşük veya çok yüksek nem oranına sahip kömürlerde kendiliğinden ısınma hızı nispeten düşüktür. Bu sonuç, nemin olay üzerinde hem fiziksel hem de kimyasal yönden etkin olduğunu ve kömür bünyesindeki nem miktarının belli bir değeri için oksidasyon hızının maksimum olduğunu göstermektedir. Birçok araştırmacı tarafından belirtildiğine göre bu kritik nem oranı kömür cinsine bağlı olarak %0.5-8 arasında değişmektedir (Panaseiko, 1974). Bu oran, linyit kömürlerinde %5-8 arasında değişiyor iken yüksek ranklı kömürlerde düşük değerler almaktadır. Yeni Zelanda bitümlü kömürlerinde %7 - %17 nem içeriği aralığında oksidasyonun çok

hızlı bir şekilde gerçekleştiği görülmüştür (Chen ve Stott, 1993). Kahverengi kömürde ise nem içeriği %5 ve %10 aralığına indirildiğinde oksidasyonun oldukça hızlı arttığı tespit edilmiştir (Bhattacharyya, 1972).

Kömürdeki nem oranının belli bir değerden yüksek olması halinde kömürün kendiliğinden tutuşma eğilimi azalmaktadır. Bu olay, kömür bünyesinde nemin buharlaşması esnasında kömürden çekilen ısı, oksidasyon sonucu üretilen ısıya yakın bir değere ulaşmasından kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla buharlaşma olayı oksidasyon nedeniyle kömürde oluşabilecek sıcaklık artışını yavaşlatmakta veya tamamen önlemektedir. Kömür nemi fazla ise buharlaşma etkisi de artmaktadır.

Eğer nisbeten az nem içeren bir kömür nemli bir ortamda bulunuyor ise, ortam nemi bir kısım faktörlere bağlı olarak kömür tarafından adsorbe edilecektir. Eğer adsorbe edilen nem yalnızca sıvı fazda ise kömür yüzeyleri ile ortamdan kazanılan sıvı arasında bir etkileşim olmakta ve bu olaya ıslatma reaksiyonu (wetting reaction) adı verilmektedir. Adsorpsiyon işlemi ısı veren bir reaksiyon olup ıslatma reaksiyonu ve fiziksel anlamda yoğunlaşma olaylarını içermektedir. Bu olaylar sonucu açığa çıkan ısı, kömür sıcaklığının ve dolayısıyla kendiliğinden yanma hızının artmasına neden olmaktadır (Akgün, 1994).

Ayrıca, birçok araştırmacının belirttiği gibi (Ghosh, 1986; Tognotti ve diğ., 1988; Carr ve diğ., 1995) adsorbe edilen nemin bazı peroksit bileşiklerinin oluşumunda katalitik etkisi olmaktadır. Özellikle hidroperoksitlerin oluşumu için neme gereksinim vardır. Açığa çıkan hidroperoksitlerin son derece kararsız oluşu ve sıcaklık artışı ile ayrışması zincirleme reaksiyonların oluşmasına neden olmaktadır. Bu reaksiyonlar sonucu açığa çıkan ısı kömürde sıcaklık artışlarına neden olabilmektedir. Bu olay ıslatma reaksiyonu ile birleştiğinde, kömür yığınlarının özellikle yağmurlu günlerde kendiliğinden tutuşmasının bir nedeni olarak gösterilmektedir (Hodges ve Hinsley, 1964).

Reaksiyon yüzeylerini tek veya çok katlı tabakalar halinde kaplayan nem, oksijenin aktif yüzeylere ulaşmasına bir engel oluşturabilmektedir (Nordon ve diğ., 1979). Dolayısıyla kömür bünyesindeki nemin buharlaşması halinde, oksijenin aktif reaksiyon yüzeyleri ile teması daha kolay hale gelmekte ve oksidasyon hızı

artmaktadır. Diğer taraftan, kömürde yüksek oranda nem var ise oksijenin reaksiyon yüzeylerine ulaşması zorlaşacak ve oksidasyon hızı yavaşlayacaktır (Evseev ve Voroshilov, 1986).

Nemin, kömürün kendiliğinden yanması olayı üzerindeki böylesine farklı türdeki etkilerini ayrı ayrı incelemek ve olayı formüle edebilmek oldukça zor ve karmaşık bir işlemdir. Konu üzerinde birçok çalışmalar yapılmıştır (Berkowitz ve Schein, 1951; Hodges ve Acherjee, 1966; Güney ve Hodges, 1969; Bhattacharyya, 1971; Bhattacharyya, 1972; Guin ve diğ., 1986). Fakat, kömürün kendiliğinden yanması olayına kömürün nem içeriğinin etkisini dikkate alan model çalışmalarının sayısı oldukça azdır. Modelde, nem etkisini dikkate alabilmek için, nemin katalitik etkisi ile birlikte buharlaşma ve yoğunlaşma hızlarının doğru bir şekilde ifade edilmesi gerekmektedir. Bu etkiyi yaklaşık olarak dikkate alan bir model çalışması Schamal (1989) tarafından yapılmış ve buharlaşma veya yoğunlaşma hızları yalnızca sıcaklığın fonksiyonu olan bir ifade ile verilmiştir.

Nem etkisini dikkate alan bir başka model çalışması Arısoy ve Akgün (1994) tarafından yapılmıştır. Akgün ve Arısoy' un (1993) yaptıkları bir başka çalışmada ise, %25-30 mertebelerinde nem içeren kömürler için kendiliğinden tutuşma riskinin oldukça az olduğu görülmüştür.

Clemens ve diğ. (1991) yapmış oldukları çalışmada olarak üç farklı kömür (New Vale, Kai Point, Kopako) örneği için değişken nem içeriklerinde çok sayıda oksidasyon çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonuçlarında, orijinal kömür nem içeriğinin %50 üzerinde olduğu durumda düşük ranklı kömürlerin kendi kendine yanma riskinin ortadan kalktığını belirtmişlerdir (Clemens ve Matheson, 1996).

3.9 Nemin Briketleme İşlemi Üzerine Etkisi

Briket üretiminde kömür nemi katkılı ve katkısız briketlemede çok önemlidir. Bu durumda kömüre bağlayıcı özelliği nem sağlamaktadır. Kömürün prese konduğu andaki nemi briketleme olayını önemli ölçüde etkiler. Kömürün nem içeriği düştükçe, kömürleşme oranı artmaktadır. Kömürleşme oranı arttıkça sertlik de

artmaktadır; bu ise briketlemeyi olumsuz yönde etkilemektedir. Briketlemede en uygun nem miktarı %8-9 arasındadır. Uygun miktardaki nemin, kömür tanecikleri arasında sıvı köprüsü ve hidrojen bağı kurarak bir katkı maddesi gibi davrandığı ve taneciklerin birbirlerine bağlanmasını sağladığı briketleme konusunda ileri sürülen teorilerden biridir. Ayrıca su, kömürü yumuşak tutmakta ve taneler arasındaki kayganlığı arttırmakta ve daha iyi sertleşmeyi sağlamaktadır.

Kömürün içerdiği nem, yanma sırasında buharlaşarak gizli ısını ortamdan çektiğinden ısı kaybına ve sıcaklık düşüşüne neden olmaktadır. Ayrıca nem, sıcaklığı çevre sıcaklığından yanma ortamının sıcaklığına kadar yükseldikten sonra yakma sistemini terk ettiğinden, gerekli duyulur ısıyı da çekmekte ve bacadan çıkarken çevreye taşımaktadır. Bu nedenle briketlemede kullanılan kömür numunelerinin nem içeriklerinin yüksek olması istenmez.

Nem oranı çok düşük olan kömürlerin pratik olarak briketlenmesi mümkün değildir. Briketler hazırlandıktan sonra ortamdan nem almamalı ve ortama nem kaybetmemelidir. Eğer sıvı katkı maddesi ilave ediliyorsa, katkı maddesinden gelecek olan su miktarını da göz önüne almak gerekir. Katkı maddeli briketlemede nem oranının etkisi, katkı maddesiz briketlemede olduğu kadar önemli değilse de yine de briket kalitesine etki eden faktörler arasındadır. (Kural, 1984). Her iki durumda da kömüre bağlayıcı özelliği nem sağlamaktadır. Katkılı briketlemede Ermenek kömürünün optimum nem miktarı %9 olarak tespit edilmiştir (Akgün ve diğ., 1989). Yapılan bir çalışmada, Elbistan linyitinin değişik nem oranları altında üretilen briketlerin kırılma sağlamlığı (kg/cm^2) incelenmiştir. Elde edilen sonuçlardan çok genç bir kömür olan Elbistan' da, kömür neminin %15 mertebelerinde tutma eğilimi gösterdiği gözlenmiştir (Özer, 1997).

3.10 Nemin Kömürün Gazlaştırılması İşlemi Üzerine Etkisi

Petrol ve doğal gazın gün geçtikçe azalması ve pahalı olması, birçok ülkeyi kömürden daha çok yararlanma yollarını aramaya yöneltmiştir. Linyit ve taşkömürünün gazlaştırılmasından elde edilecek yakıtlar, gelecek yıllarda petrol ve doğal gazın yerini alacak en güçlü adaylar olarak gözükmemektedir.

Kömürün gazlaştırılması birbirinden çok farklı iki ayrı teknoloji ile ticari ölçekte uygulanır. Birinci teknolojik uygulamada kömür öncelikle klasik madencilik yöntemleriyle bulunduğu yerden çıkarılır, ön işlemlerden geçirilir ve daha sonra gazlaştırma ünitelerinde gazlaştırılır. İkinci yol ise, kömürün bulunduğu yerde, yeryüzüne çıkarmadan yer altı gazlaştırma tekniğidir. Her iki teknikle gazlaştırma işleminde kömürün nem içeriği önemli rol oynamaktadır (Ökten ve Okutan, 1991).

Yerüstü gazlaştırma tekniğinde, sabit yataklı gazlaştırıcılarda rutubet %35' i geçmemek koşuluyla gazlaştırma işlemi uygulanmaktadır. Kömürün rutubet içeriği bu değeri aştığında bir ön kurutma gerekmektedir. Sürüklenmeli yatak sistemlerinde yüksek oranda rutubet içeriği, gazlaştırma için verilen su buharına yardımcı olmaktadır. Fakat, bu durumda sisteme ısı verilmesi gerekmektedir. Akışkan yatak sistemlerinde ise yüksek nem içeren ısı değerleri 1200 kkal/kg' a kadar düşen düşük kaliteli kömürler gazlaştırılabilir (Pişkin, 1991).

Yeraltı gazlaştırma (in-situ) tekniği, düşük ısı değerli, ince damarlardan oluşan veya derinde bulunması sebebiyle klasik madencilik yöntemleriyle ekonomik olarak işletilemeyen kömür rezervlerinden yararlanmada büyük önem kazanmaktadır. Ayrıca, çevreye verilen zararlar azalmakta, madencilik faaliyetleri sırasında karşılaşılan sağlık ve emniyet ile ilgili sorunlar ortadan kalkmaktadır (Ökten ve Okutan, 1991).

Sovyetler Birliği' nde nem içeriği %2 ile %35 arasında değişen farklı kömürlerde yeraltı gazlaştırma yöntemi ile bazı başarılı sonuçlar elde edilmesine karşın, bazı tekniklerde hedeflenen gaz miktarına ulaşılamamıştır. Nem, yeraltında gazlaştırma sonucu elde edilen gaz ürünün bileşimini ve niteliklerini birçok parametre ile beraber etkilemektedir (Dossey, 1976; Ökten ve Er, 1988).

Yeraltı gazlaştırma yönteminde, kömürün içerdiği nemin etkisi bir model çalışmasında incelenmiştir. Bu çalışmada kömürün kuruma pirolizi ve gazlaştırma süreçlerinin bir arada geliştiği kabul edilmiştir. Yer altı gazlaştırma olayının modelleme çalışmasında nem oranının artmasına paralel olarak buharlaşma ile yanma ön sınırı arasındaki farkın azaldığı görülmüştür. Ayrıca bu çalışmada, kömür partiküllerinin termal iletkenliği yüksek olduğunda, buharlaşma ve yanma ön sınırı

arasındaki mesafenin arttığı gözlemlenmiştir. Buharlaşma ön sınırında su buharlaşmakta ve buhar gözeneklerden kömür yüzeyine doğru hareket etmektedir. Buhar kömür yüzeyine yaklaştığında sıcaklığı yükselmekte ve yarı kok ile reaksiyon sonucu CO ve H₂ oluşmaktadır (Massaquoi ve Riggs, 1983).

3.11 Nemin Kömürün Akışkan Yatakta Sürüklenmesine Etkisi

Engeloğlu (1999) tarafından yapılan bir çalışmada akışkan yatakta nemin sürüklenmeye etkisi incelenmiştir. İncelenen kömürler için nem artışı akışkan yatakta sürüklenmenin artmasına yol açmıştır. Yüksek akışkanlaşma hızında ve havada kuru numunelerle yapılan deneylerde, Beypazarı linyitinin Çan linyitine oranla daha fazla sürüklendiği tespit edilmiştir.

3.12 Kömürün Nemini Belirleme Metodları

Kömürün nem içeriği yanma prosesleri verimi ve fiyatlandırma, ayrıca taşıma, depolama ve kullanma maliyetlerine etkisi açısından önemli bir parametredir. Örneğin; 1000 MW'lık bir güç istasyonunda kullanılan kömürün nem içeriği miktarında %1 oranındaki artışı bir milyon dolarlık maliyet artışı getirmektedir (Elec.Pow.Res.Inst., 1992). Ayrıca kömür nem içeriği miktarı istenen çalışma aralıkları dışında veya belirlenmemişse yanma prosesinde beklenmeyen değişikliklere ve kayıplara sebep olabilecektir (Ponte ve diğ., 1996). Kömürdeki nem içeriğinin doğru olarak belirlenmesi, yakıt teknolojisi uzmanlarını bazı ciddi problemlerle karşılaştırmaktadır. Yatak nem içeriği, ASTM D 388 ve ISO 2950 gibi standartlarla kömürün sınıflandırılmasında ve değerlendirilmesinde gereklidir. Kömürün verimli kullanımı için gerekli olan nem içeriğinin belirlenmesi özellikle yüksek nem içerikli düşük ranklı kömürler için gereklidir. Bitümlü kömürlerin kullanımında nem içeriğinin ciddi problemlere sebep olması çok az rastlanan bir durumdur (Allardice ve Evans, 1978).

3.12.1 Fırında Kurutma Metodu

Fırınlarda, ASTM D 3302 ve D 3173 , DIN 51718, UNE 3200181, BS 1016 v.b. standart yöntemlerle kömür kurutulması çok yaygın nem belirleme teknikleridir. Bu analiz metodunda kömür numuneleri suyun kaynama sıcaklığı üzerinde yaklaşık 105-110°C sıcaklıkta bir fırında kurutulmaktadır. Kurutma işlemi vakum altında yada hava veya inert bir gaz (O_2 , N_2) akımı ortamında gerçekleşmektedir. Standartların çoğu özellikle fırın metodunda hava kullanımını, reaktif ve düşük ranklı kömürler kurutma süresince oksidasyona uğradıkları için hariç tutmuşlardır. Bu termal kurutma tekniğinde, nem içeriği kömür örneğindeki ağırlık kaybından veya çıkış akımındaki su miktarının tespit edilmesi ile hesaplanabilir (Allardice ve Evans, 1978).

3.12.2 Distilasyon Metodu

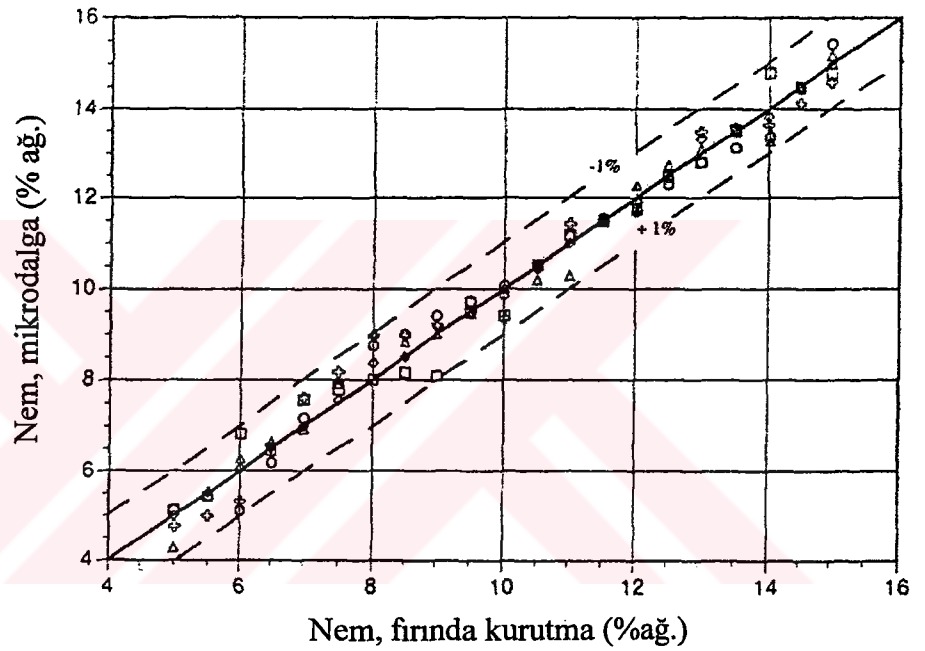
Kömürdeki nem içeriğinin belirlenmesinde kullanılan diğer bir yöntem azeotropik distilasyondur. Kömürdeki su, organik bir çözücü ile riflaks şartlarında distile edilerek ayrılır. Nem miktarı distilasyon sonucu toplanan su miktarından direkt olarak hesaplanır. Bu yöntem nem içeriğine ve reaktifivitesine bağlı olmaksızın tüm kömürler için uygundur. Çünkü, kömür atmosfer ile temas halinde olmadığından oksidasyona uğramamaktır. Nem içeriği, yavaş ilerleyen standart test metodlarını içeren analiz teknikleri kullanılarak, genelde kömür yandıktan sonra belirlenmiştir. Ayrıca, bu yöntem briket, sıvılaştırılmış kömür gibi kömür türevi maddelerin nem içeriğinin belirlenmesi için de kullanılabilir (Allardice ve Evans, 1978).

3.12.3 Hızlı Nem Belirleme Tekniği

1970' lerin başında mikrodalgalarda absorpsiyonu temel alan yeni teknikler geliştirilmeye başlanmıştır. Önce yapı malzemelerinin nem içeriğinin belirlenmesinde kullanılan bu yöntem daha sonra kömüre uygulanmıştır. Bunlar çok hızlı tekniklerdir ve nem oranı sadece birkaç dakikada belirlenebilmektedir. Mikrodalga yöntemi ile yapılan birçok çalışmalar bu yöntemin uygunluğunu onaylar niteliktedir. Bir başka

çalışmada mikrodalganın endüstriyel kullanımı için nem seviyesini sürekli olarak ölçebilen bir on-line sistemi geliştirilmiştir.

Ponte ve diğ. (1996) tarafından yapılan bir çalışmada beş farklı kömür örneği için mikrodalga yöntemiyle nem tayini yapılmıştır. Standart yöntemlerle karşılaştırıldığında bu yöntemin en önemli avantajı hızlı hareket eden bir ortamda dahi nem içeriğinin belirlenmesidir. Beş değişik kömür için kurutma fırınlarında ve mikrodalga yöntemiyle tespit edilen nem değerleri Şekil 3.9’ da verilmiştir. Burada maksimum hata oranının %1 oranından küçük olduğu görülmektedir.



Şekil 3.9. Beş Farklı Kömür İçin Nem Tayininde Mikrodalga ve Fırında Kurutma Yöntemleri Arasındaki Korelasyon (Ponte ve diğ., 1996).

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

4.1 Deneylerde Kullanılan Kömürler

Yanma deneylerinde dokuz ayrı kömür kullanılmıştır. Bu kömürler sıcak su kazanları ve sobadan oluşan farklı yakma sistemlerinde yakılarak incelenmişlerdir. Deneylerde kullanılan kömürler :

1. %37.00 Nemli Orijinal Yeniköy Ağaçlı Linyiti : Bu kömür Milten Müteahhitlik Hafriyat ve Ticaret Ltd.Şti.' nin İstanbul ili Gaziosmanpaşa ilçesindeki Milten kömür ocaklarına aittir.
2. %24.60 Nemli Kurutulmuş Yeniköy Ağaçlı Linyiti : Bu kömür Yeniköy Milten ocaklarından çıkarılan ve nemi %37.00 olan orijinal Y.Ağaçlı linyitinin Bölüm 4.2' detaylı tanıtılacak olan kurutma düzeneğinde kurutularak elde edilmiştir.
3. %21.80 Nemli Kurutulmuş Yeniköy Ağaçlı Linyiti : Bu kömür Yeniköy Milten ocaklarından çıkarılan ve nemi %37.00 olan orijinal Y.Ağaçlı linyitinden kurutularak elde edilmiştir.
4. %17.40 Nemli Kurutulmuş Yeniköy Ağaçlı Linyiti : Bu kömür Yeniköy Milten ocaklarından çıkarılan ve nemi %37.00 olan orijinal Y.Ağaçlı linyitinden kurutularak elde edilmiştir.
5. %15.60 Nemli Kurutulmuş Yeniköy Ağaçlı Linyiti : Bu kömür Yeniköy Milten ocaklarından çıkarılan ve nemi %37.00 olan orijinal Yeniköy linyitinden kurutularak elde edilmiştir.
6. %10.80 Nemli Kurutulmuş Yeniköy Ağaçlı Linyiti : Bu kömür Yeniköy Milten ocaklarından çıkarılan ve nemi %37.00 olan orijinal Yeniköy linyitinden kurutularak elde edilmiştir.
7. %6 Nemli Orijinal G.Afrika Kömürü : İthal edilmiştir.

8. %20-22 Nemli Yeniköy Ağaçlı Linyiti – G.Afrika Harman Kömürü : Bu kömür Milten Yeniköy Tesislerinde orijinal %37 nemli Yeniköy Ağaçlı linyiti ile %5 nemli orijinal G.Afrika kömürünün harmanlanması ile üretilerek İstanbul ve civarına satış için sunulmaktadır.
9. %13 Nemli Soma Kömürü : Piyasadan sağlanmıştır.

4.2 Kömür Kurutma Düzenegi

Kömürlerin kurutulması işleminde 10 KW' lık elektrik ısıtıcıları olan fanlı bir kurutma cihazı kullanılmıştır. Kurutma cihazının kömür yükleme odası ızgaralı bir sistem olup 0.39 x 0.39 x 1.14 m boyutlarındadır. Kurutma düzeneginin üstten ve önden görünüşü Şekil 4.1' ve Şekil 4.2' de verilmiştir. Kurutma havasının sıcaklığı ortam sıcaklığına göre değişmekte olup ortalama 35°C 'dir.

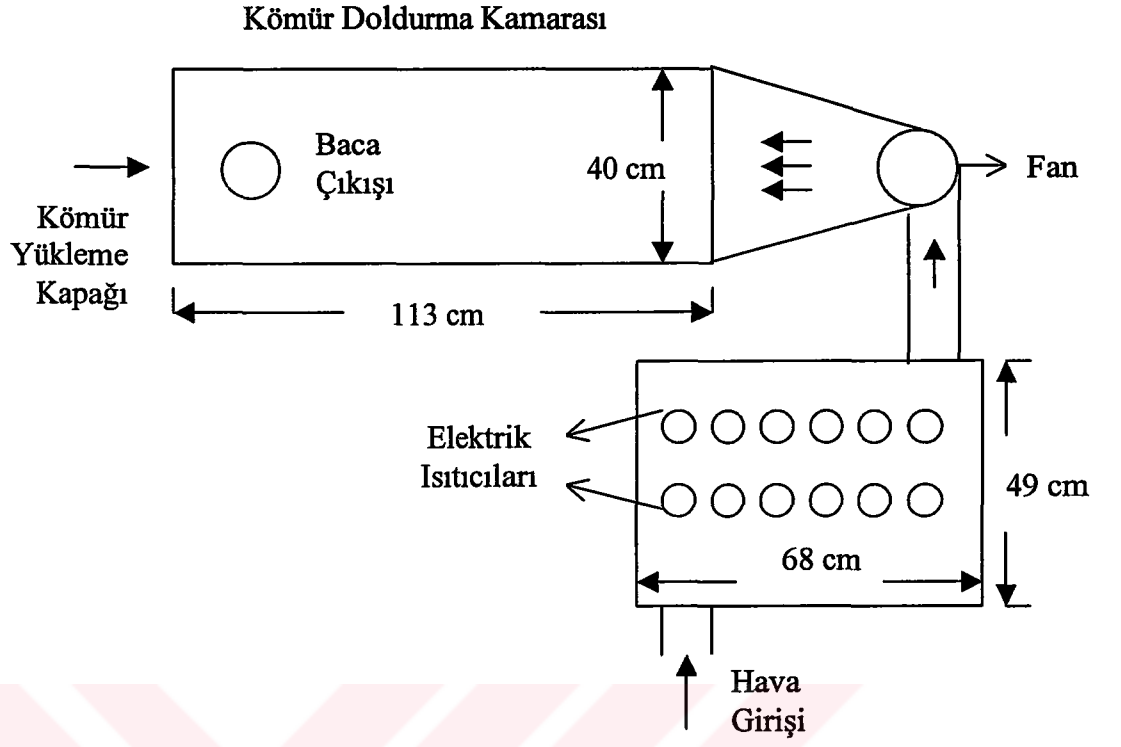
Kurutma düzenegine bir yüklemede 40 ± 5 kg nemli, kömür konulabilmektedir. Yüklenen kömür miktarı, kömür boyutuna göre değişmektedir. Küçük boyutlu kömürler kurutma sonucunda ufalandığı ve bu ufak boyutlu kömürler homojen nem dağılımını etkilediği için, kurutma işlemi için kömür boyutu 15-20 cm olarak alınmıştır. Kurutma süresi, kurutulacak kömürün nemine ve miktarına göre 10-18 saat sürmüştür. Kurutulan kömürler çuvallara konularak nem değerlerini koruması açısından uygun şartlarda saklanmışlardır.

4.3 Kullanılan Analiz Yöntemleri ve Cihazlar

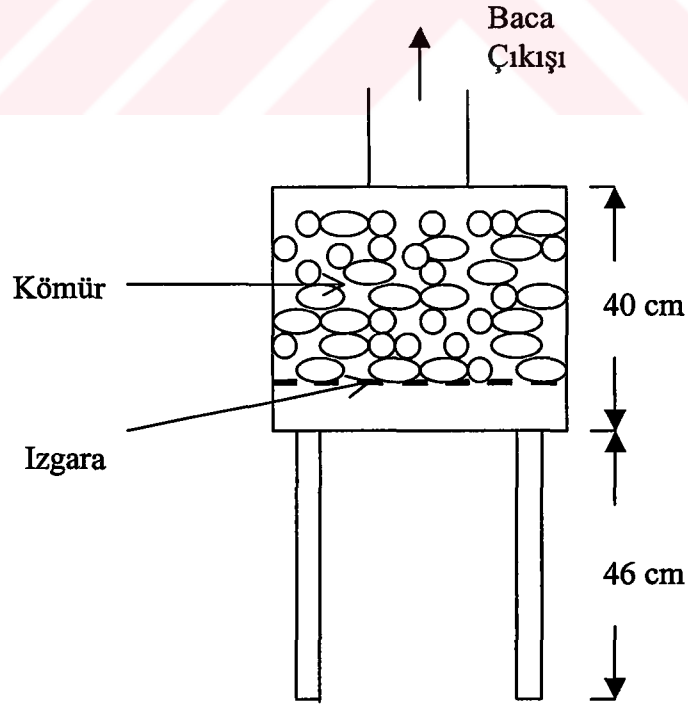
Bölüm 4.1' de tanıtılan dokuz ayrı kömürün kısa analizleri (nem, kül, uçucu madde, sabit karbon), kükürt tayinleri, ısıl değerleri için kullanılan analiz yöntemleri ve cihazları aşağıda belirtilmiştir.

4.3.1 Kısa Analiz

Kömürlerin kaba, bünye ve toplam rutubetleri ASTM D 1412, ASTM D 3173' e göre yapılmış ve NÜVE FN-500 etüvü kullanılmıştır. Kül analizleri NÜVE-1200 model cihazda ASTM D 3174' e göre yapılmıştır. Uçucu madde içerikleri ise kuvars krozelerde NÜVE-1200 model cihazda ASTM D 3175' e göre tespit edilmiştir.



Şekil 4.1. Kömür Kurutma Cihazı Üstten Görünüşü.



Şekil 4.2. Kömür Kurutma Cihazı Önden Görünüşü (Kömür Doldurma Kamarası).

4.3.2 Isıl Değer

Isıl değerler ASTM D 2015, ASTM D 3286 ve ISO 1928 standartlarına uygun şekilde IKA-C-4000 kalorimetre bombasında ölçülmüştür.

4.3.3 Kükürt Tayinleri

Kükürt tayinleri ASTM D 3177 ve ISO 334 standartlarına göre NET model kükürt analiz cihazında gerçekleştirilmiştir. Kükürt tayinleri ESHCA yöntemi kullanılarak tekrarlanmıştır.

4.4 Kömür Analizlerine Ait Sonuçlar

Yanma deneylerinde kullanılan kömür örneklerine ait kısa analiz, kükürt miktarları ve alt ısı değerleri Tablo 4.1' de verilmiştir.

4.5 Deneyel Çalışmalarda Kullanılan Yakma Sistemleri

Deneyler, Azim (elle yüklemeli, sabit ızgaralı) ve Fischer (Otomatik, hava kontrollü) marka iki sıcak su kazanı ve bir tuğlalı katı yakıt sobasında (TS 90/41-42) gerçekleştirilmiştir. Bu yakma sistemlerine ait detaylı bilgi daha sonraki bölümlerde verilecektir. Her iki kazanda, aynı deney tesisatı içerisinde ortak su besleme tankı ile çalışmaktadır. İki kazana da bağlı bulunan su besleme tankındaki kazan için gerekli olan suyun akışı hangi kazan ile çalışılıyorsa o kazana yönlendirilmektedir.

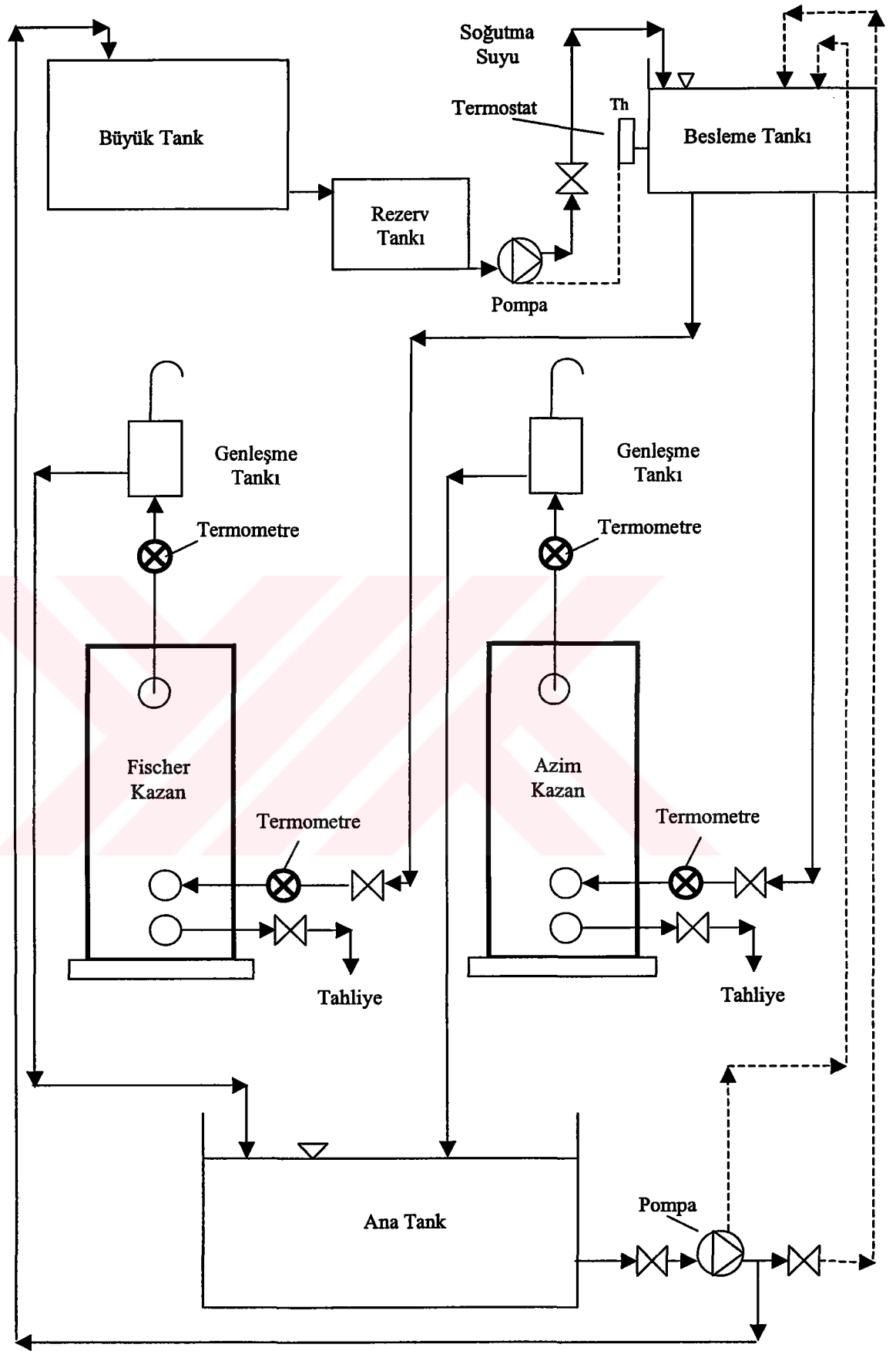
Deneylerde kullanılan bir diğer ızgaralı yakma sistemi olan sobanın yanma hacmi ateş tuğlasından yapılmıştır. Sobalar günümüzde hala ısınma amaçlı olarak oldukça yaygın kullanılmaktadırlar. Bu nedenle yanma deney çalışmaları sobada da gerçekleştirilmiştir.

4.5.1 Kazan Deney Tesisatı

Sıcak su kazanı yanma deneyleri, Milten firmasının Yeniköy işletmesinde kurulu olan deney tesisatında yapılmıştır. Deney tesisatının şematik görünümü Şekil 4.3 ' de verilmiştir. Üzerinde deneyler yapılan kazanları bacaya bağlayan yatay kanal üzerinde baca gazı analizi ve baca çekişini ölçmek üzere sondalar yerleştirilmiştir. Toz numune alınması işlemi baca üzerinde standartlara uygun olarak açılmış olan

Tablo 4.1. Yanma Deneylerinde Kullanılan Kömürlerin Analizleri.

Kömür	Nem (%)	Kül (%)	Uçucu Madde (%)	Sabit Karbon (%)	Yanar Kükürt	Külde Kükürt	Toplam Kükürt	Alt Isıl Değer (kkal/kg)
Soma	13.20	12.23	34.69	39.88	0.49	0.57	1.06	5106
Harman	22.20	11.30	22.50	44.00	0.59	0.23	0.82	4213
G.Afrika	6.20	25.80	20.04	47.96	0.30	0.16	0.46	4970
F10.80	10.80	6.51	39.87	42.82	1.25	0.48	1.73	4929
F15.60	15.60	6.11	37.72	40.57	1.18	0.45	1.63	4662
F17.40	17.40	5.98	36.92	39.70	1.16	0.44	1.60	4565
F21.80	21.80	5.66	34.95	37.59	1.09	0.42	1.51	4321
F24.60	24.60	5.46	33.70	36.24	1.05	0.41	1.46	4167
F37.00	37.00	4.54	28.16	30.30	0.88	0.34	1.22	3481
A18.10	18.10	5.90	36.26	39.70	0.50	0.21	0.71	4509
A36.00	36.10	4.70	28.84	30.46	0.40	0.16	0.56	3586



Şekil 4.3. Yanma Deneylerinde Kullanılan Kazan Düzeneği.

numune alma yerinden gerçekleştirilmiştir. Kazan yanma deneyleri TS 4040 (1983) ve 4041 (1983)' e göre gerçekleştirilmiştir.

4.5.2 Elle Yüklemeli, Sabit Izgaralı Sıcak Su Kazanı

Azim marka yerli imalat kazan, oldukça yaygın olarak kullanılan yarım silindirik sıcak su kalorifer kazanı olup alev duman borulu konstrüksiyona sahiptir. Bundan sonra bu kazan tüm bölümlerde “Azim Kazan” olarak anılacaktır. Azim kazana ait bazı bilgiler Tablo 4.2’ de, kazanın şematik görünümü ise Şekil 4.4’ de, verilmiştir. Yakma havası (birincil hava) kül kapağından ızgara altına gönderilmektedir. İkincil hava kömür besleme kapağındaki ayarlanabilir klapeden kömür tabakasının üzerine sevk edilmektedir. Baca kanalı üzerinde baca çekiş aspiratörü yoktur. Bu kazanlarda hava kontrol sistemi ve kömür besleme sistemi kullanıcının insiyatifine bağlıdır. Bu nedenle, yanma ile beraber birtakım olumsuzluklar da meydana gelebilmektedir.

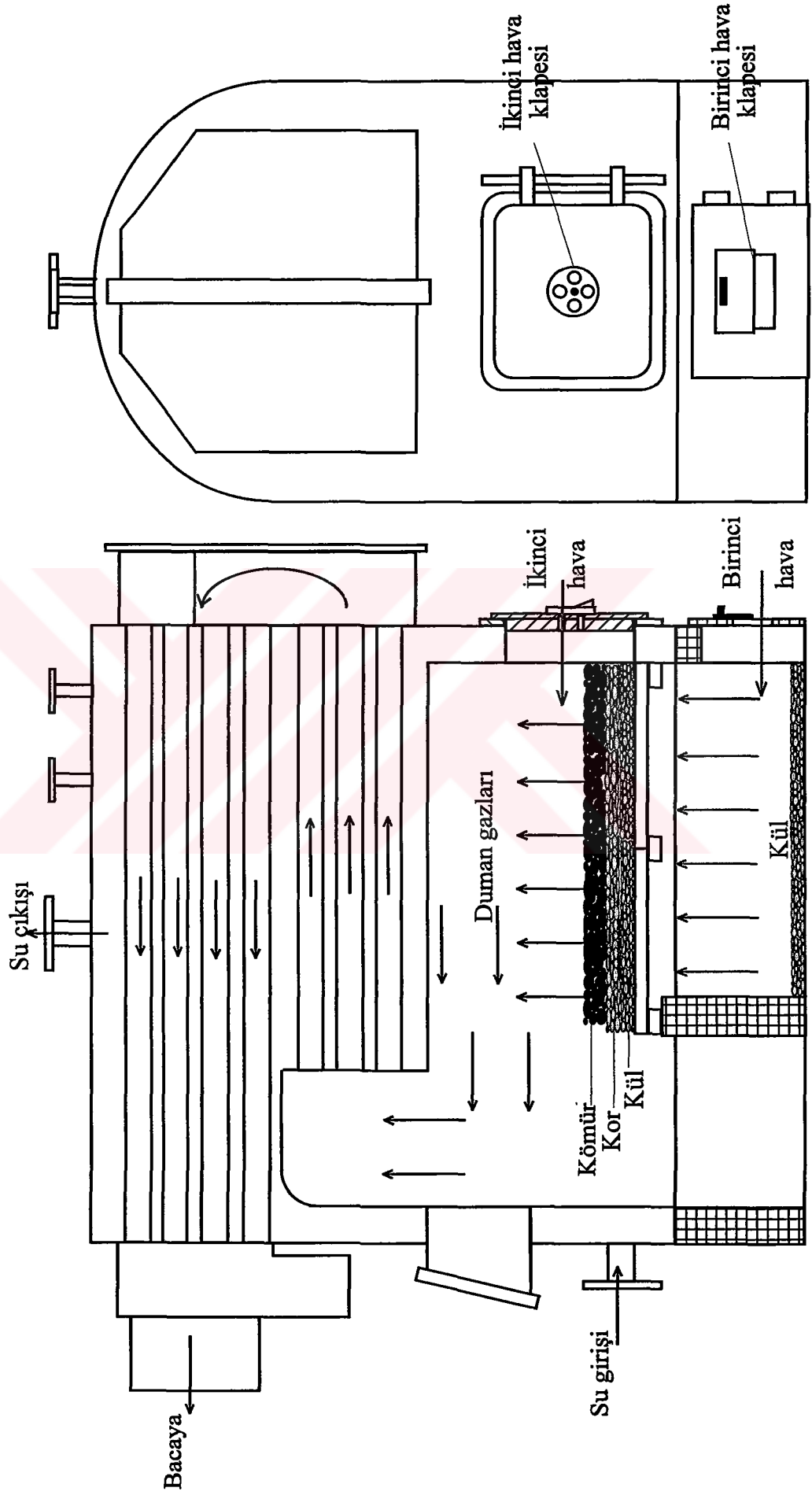
Tablo 4.2. Azim Kazana Ait Bilgiler.

Kazan imalatçısı	Azim Kazan
Yapım yılı	1995
Kazan tipi	Yarım Silindirik Kalorifer Kazanı
Kazan kapasitesi	80.000 kkal/saat – 93 kW
Test basıncı	4 atü

4.5.3 Otomatik, Hava Kontrollü Sıcak Su Kazanı

Alman yapımı kazan, Fischer marka GUNTAMATİC GA – R 93 serisi sıcak su eldesi için imal edilmiş, odun, yonga, odun kömürü, kok kömürü, kömür briketleri yakabilen özel tip katı yakıt kazanıdır. Bu kazan bundan sonra “Fischer Kazan” olarak anılacaktır. Fischer marka kazanın teknik verileri ve boyutları Tablo 4.3’ de, şematik resmi ve kısımları ise Şekil 4.5’ de verilmiştir.

Kazan kül kapağında üç hava giriş klapesi bulunmaktadır (3). Üst klapeden giren hava kazan ön yüzeyindeki hava kanalından geçerek yakıt haznesindeki kömür tabakasının üst yüzeyine sevk edilmektedir. Bu hava yanma sırasında açığa çıkan ve yakıt haznesinde kömür tabakasının üstünde biriken gazların süpürülmesini sağlamaktadır. Orta klapeden giren hava ızgara üzerine sevk edilmektedir. Alt klapeden giren hava ise ızgara altından yanma bölgesine gönderilmektedir. Kazanın imalatçısı tarafından kullanma kılavuzunda belirtildiği gibi deneyler sırasında üst ve alt klapelerden kazana hava girişine izin verilmiş ve orta kapak kapalı tutulmuştur.



Şekil 4.4. Azim Kızanın Şematik Görünüşü.

İkinci yanma havası ızgara önündeki yanma açıklığının iki yanında yanma bölgesine gönderilmektedir (37). Baca çekişi, birinci ve ikinci hava ayar klapelerinin açıklıkları değiştirilerek yakma havasının miktarı baca gazındaki O₂ miktarının %7 civarında gerçekleşmesinin teminini hedeflemiştir.

Tablo 4.3. Fischer Marka Kazanın Teknik Verileri ve Boyutları.

	Birimi	GA – R 93
Isı kapasitesi	KW	93
İşletme üst basıncı	Bar	3
Maksimum su çıkış sıcaklığı	°C	95
Minimum su çıkış sıcaklığı	°C	65
Kazan su hacmi	lt	250
Kazan ağırlığı	kg	920
Yakıt deposu hacmi	lt	270
Yakıt haznesi genişliği	mm	550
Yakıt haznesi derinliği	mm	450-500
Yakıt haznesi yüksekliği	mm	1040
Baca çekişi	mbar	0.25
Kazan derinliği	mm	1370
Kazan genişliği	mm	790
Kazan yüksekliği	mm	1310

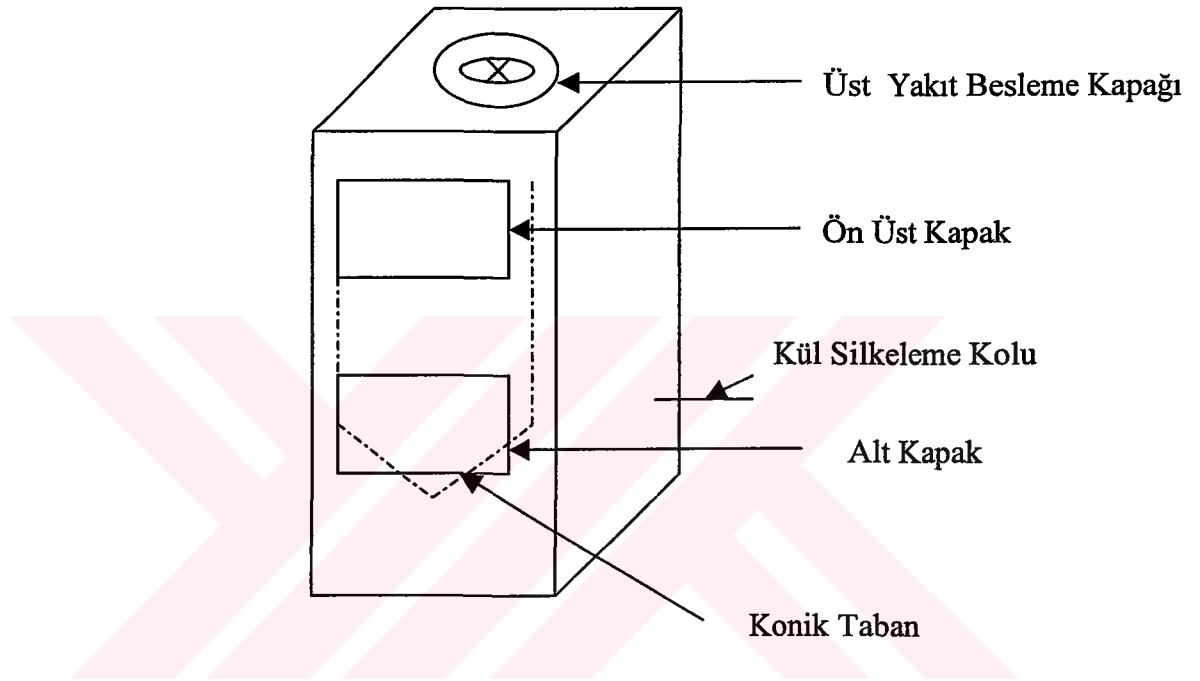
Yakıt haznesinin tabanında yer alan döküm ızgaranın eğimi önündeki yanma açıklığını değiştirecek şekilde regülatör (18) ile ayarlanmaktadır. En üst kademede (kademe karakteristik no: 140) ayarlandığında ızgara eğimi yanma açıklığı en büyük olacak kademede iken yapılmıştır.

Kazan çıkışındaki baca bağlantı kanalına bağlı baca çekiş aspiratörü (8) kazan termostatına (4) bağlı olarak çalışmaktadır. Kazandan çıkan suyun sıcaklığı ayarlanan sıcaklığa ulaştığında, yanmayı yavaşlatmak amacı ile aspiratör otomatik kumanda ile devre dışı kalmaktadır. Deneyler sırasında baca çekişinin değişmesini önlemek ve aynı kazan ısı kapasitesinde sürekli çalışmak amacıyla termostat ayarı kazan su çıkış sıcaklığından büyük olacak şekilde ayarlanmıştır. Kazanı bacaya bağlayan yatay kanal üzerinde aspiratörden sonra yerleştirilmiş baca çekiş ayar klapesi vardır. Deneylerde baca çekişi, baca bağlantı kanalı üzerindeki bu klape yardımı ile ayarlanmıştır.

4.5.4 Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Soba

TSE 90/41-42 standardına sahip olan Silver marka tuğlalı soba piyasadan temin edilmiştir. Sobanın yanma hacmi ateş tuğlasından yapılmış dairesel kesitlidir. Şekil

4.6' da görüleceği üzere ızgara bölümü konik yapıya sahiptir ve tabanı yanma sırasında külün silkenmesini sağlayacak şekilde hareketlidir. Sobanın ön yüzeyinde alta ve üstte olmak üzere iki kapak üst yüzeyinde bir kapak vardır. 4.5-5 kg kapasiteli sobaya kömür yüklemesi sobanın üst kapağından veya ön üst kapağından yapılabilmektedir. Sobaya birinci hava ön alt kapaktan ikinci hava üst yüzeydeki klapeden girmektedir. Yanma odası 26 cm çapında ve 30 cm yüksekliğindedir. Sobanın ısıtma yüzeylerinin toplam alanı 1.32 m^2 ' dir.



Şekil 4.6. Deneylerde Kullanılan Sobanın Şekli.

4.6 Yanma Deneylerinin Yürütülmesi

Azim kazanda yapılan yanma deneylerini bu çalışmanın ön hazırlık safhası olarak değerlendirilebilir. Birkaç kez tekrarlanan yanma deneylerinden yanma koşulları belirlenmiştir. Bu tip kazanlarda yanma şartlarına ait yeterli datanın bulunmayışı bu çalışmanın gerekliliğini ortaya koymuştur. Bu kazanda yapılan deneylerde baca gazı sıcaklığı, gaz ve toz emisyon ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Fisher kazanda ve soba da yapılan yanma deneylerinde gaz ve toz emisyon ölçümlerine ilave olarak, kazan ısı verimi ve ısı gücü hesaplanmıştır.

Fischer kazanda elde edilen sonuçlara göre, en iyi sonucu veren kurutulmuş kömür ve orijinal kömür kullanılarak Azim kazanda iki deney daha yapılmış ve benzer hesaplamalar bu deneyler için de tekrarlanmıştır.

4.6.1 Elle Yüklemeli, Sabit Izgaralı Sıcak Su Kazanında Yanma Deneylerinin Yürütülmesi

Kazan yanma deneyleri TS 4040 (1983) ve 4041 (1983)' e göre gerçekleştirilmiştir. Üç farklı nem içerikli Y.Ağaçlı kömürü, harman kömür (%70 Yeniköy Ağaçlı-%30 Güney Afrika) ve Güney Afrika kömürü ile çalışılmıştır. %15 ve %21 nem içerikli kömürler orijinal Y.Ağaçlı kömürünün Bölüm 4.2' de tanıtılan kömür kurutma düzeneğinde kurutulması ile elde edilmiştir. Önceden yakılmış kömür kuru (bu işlemin deneyde kullanılacak kömür ile yapılmasına dikkat edilmiştir) kazanın arka tarafına itilmiş, ızgara üzerine kömür yastıklama yöntemiyle ızgarayı örtecek şekilde yüklenmiştir. Baca sıcaklığı 60-70°C' ye ulaştığı an (alev gözlenerek) toz emisyonları için numune alınmaya başlanmıştır (başlangıç yanması). Baca gazı sıcaklığı 170-200°C arasında sabit tutulmaya çalışılarak kararlı yanma (yarı kok yanması) aşamasında toz ve gaz numune alınmaya devam edilmiştir. Daha sonra sıcaklığın düşmesiyle beraber sönme aşaması olarak adlandırılan yanma devresinde de toz ve gaz numune alınmıştır. 1. yüklemeden sonra benzer şekilde ikinci kömür yüklemesi yapılarak başlangıç ve kararlı yanma aşamaları için toz ve gaz emisyon ölçümleri yapılmıştır.

Yanma deneylerinde kullanılan tüm kömür örnekleri boyutlarının dağılımı homojen dağılımı sağlayacak şekilde (20-80 mm) olmasına dikkat edilmiştir. Kazan üst kapağı yanma testleri süresince kapalı tutulmuş, yanma önünün (alevin) ilerlemesi, baca gazı sıcaklığı (170-200°C arasında) ve baca gazındaki hava fazlalığı alt kapak ile kontrol altında tutulmuştur.

Aynı çalışmanın benzer bir şekli üç farklı nem içerikli Ağaçlı kömürü ve harman kömür (%70 Yeniköy Ağaçlı-%30 Güney Afrika) ile 2. grup bir çalışma olarak adlandırılan deneyler Azim kazanda tekrarlanmıştır. Burada toz numunenin alınması ve gaz emisyon ölçümü yukarıda tanımlanan başlangıç ve kararlı yanma aşamalarında gerçekleştirilmiştir.

Kararlı yanma durumu, belirli bir ısı gücü için kazanın ölçüm değerlerinin önemli değişiklik göstermediği işletme durumudur. Ancak, elle yüklemeli kömür kazanlarında besleme anında gücün düşmesi kaçınılmaz olduğundan, bu kazanlarda yukarıda açıklandığı şekilde kararlı çalışma durumunu sağlamak olanağı bulunmayabilir. Yükleme aralıklarında ısı gücünde meydana gelen düşmeler, kazan

bir süre anma ısı gücünün üzerinde bir güçle çalıştırılarak karşılanmalıdır (TSE 4041, 1983).

4.6.2 Otomatik, Hava Kontrollü Sıcak Su Kazanında Yanma Deneylerinin Yürütülmesi

Deney işlemi TS 4041 (1983) ' de anlatılan yöntem uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılacak kömürler en büyük tane çapı 80 mm olacak şekilde boyutlandırılmıştır. Önce kazan içerisindeki ızgara üzerine bir miktar kömür yüklenerek tutuşturulmuştur. Kazan içinde dolaşan suyun giriş ve çıkış sıcaklığının kararlı hale ulaşması ilk tutuşturma işlemi ile sağlanmıştır. Izgara üzerinde deney başlangıcında yüklenecek kömürü tutuşturma için gerekli kor tabakası elde edilmiştir. Kazana yüklenecek kömür 20 g taksimatlı bir terazi ile tartılarak, bir defada yüklenmesi istenen miktarda kazana yüklenmiştir. Baca sıcaklığı ve çekiş kontrol edilerek yanmanın kararlı hale ulaştığı tespit edildikten sonra ölçme işlemi başlatılmıştır. Sürekli yanma koşullarında, baca gazı sıcaklığı, baca gazındaki emisyonlar, baca çekişi, toz emisyonu, kazan dış yüzey sıcaklıkları, su giriş ve çıkış sıcaklıkları belli zaman aralıklarında ölçülmüştür. Ölçülen bu değerler ile kazan ısı verimi, ısı gücü, gaz ve toz emisyon miktarları hesaplanmıştır.

Deneylerin büyük bir kısmı Fisher kazanda gerçekleştirilmiştir. Fisher kazan, gerek hava kontrol sistemi gerekse kömür besleme sistemi bakımından kullanıcı insiyatifinin en düşük seviyede olduğu ve elle besleme yapılan kazanların getirdiği olumsuzlukları en aza indirdiğinden tercih edilmiştir. Kurutulmuş kömürler orijinal Y.Ağaçlı kömürünün Bölüm 4.2' de tanıtılan kömür kurutma düzeneğinde kurutulması ile elde edilmiştir.

4.6.3 Sobada Yanma Deneylerinin Yürütülmesi

Sobada yanma deneyleri TS 4900 (1996)' e göre gerçekleştirilmiştir. Deneylerde yanma odasına 4.5 kg kömür yüklenmiştir. Kömür tabakasının üstünü tutuşmayı kolaylaştırmak için tahta parçaları konmuştur. Soba üstten tutuşturulmuştur. Tutuşma sırasında gerekli hava üst yüzeydeki ikinci hava klapesinden ve ızgara altından yanma odasına gönderilmiştir. Tutuşma işlemi tamamlandıktan sonra üst klapenin ayarı değiştirilmemiş, ızgara altından gönderilen birinci hava miktarı azaltılmıştır. Birinci hava miktarının azaltılması ile birim zamanda yanan yakıt miktarının

azaltılması sağlanmıştır. Tutuşma işlemi bittikten sonra sürekli yanma koşullarında, baca gazı sıcaklığı, baca çekişi, baca gazındaki emisyonlar ve toz derişimi belirli zaman aralıklarında ölçülmüştür.

4.7 Emisyon Ölçümleri

Emisyon ölçümleri kazan bacasında hidrodinamik açıdan ve numune alma prensiplerine uygun olarak açılan numune alma deliğinden yapılmıştır. Bacanın kazan ile bağlantısı ve emisyon ölçümü için kullanılan numune alma yerinin konumu Şekil 4.7 'de gösterilmiştir.

4.7.1 Kullanılan Cihazlar ve Ölçüm Yöntemleri

a. Andersen Universal Numune Alma Sistemi

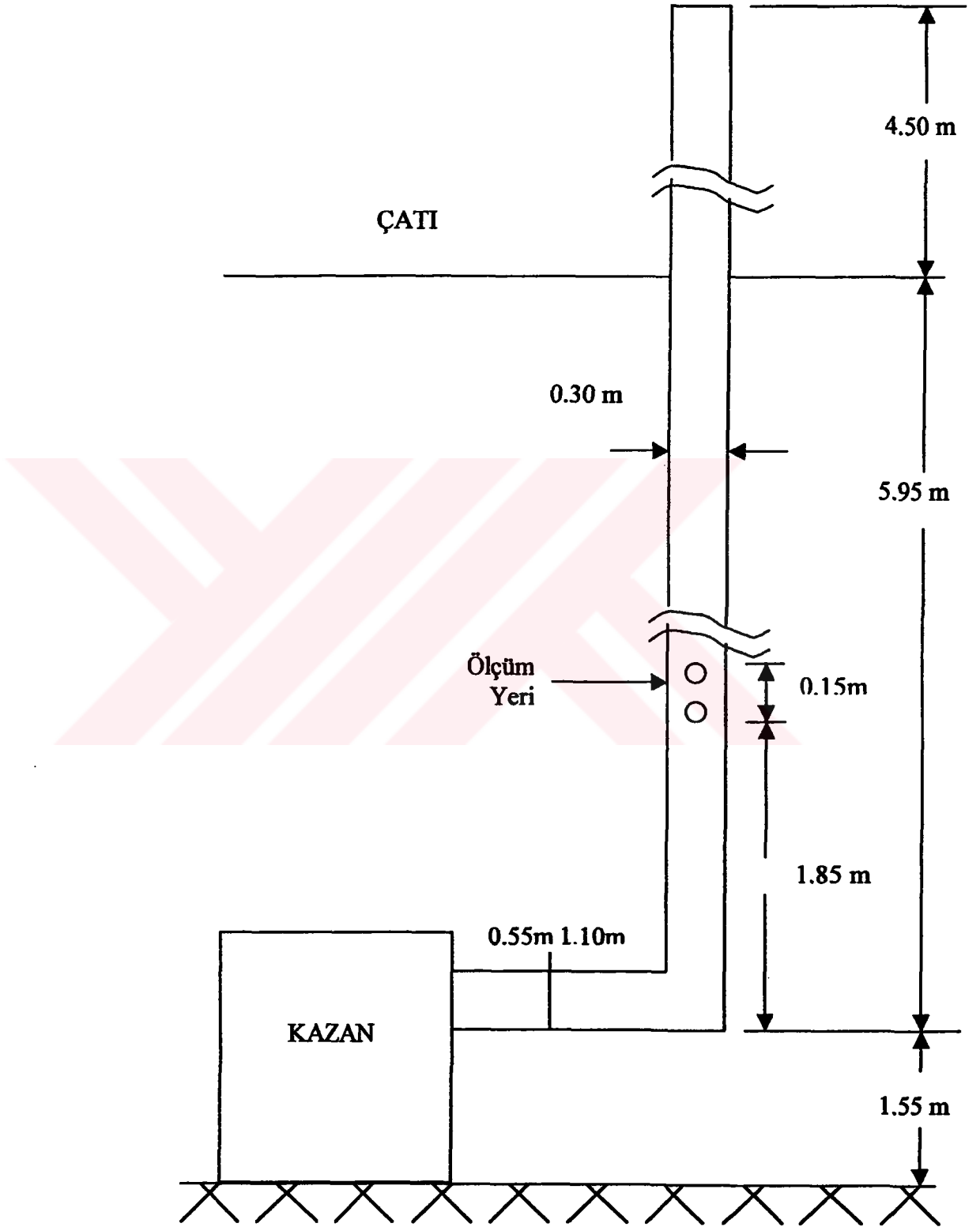
Universal numune alıcılar toz madde ve gaz numune alıcı elemanları bir arada içerir. Geniş kullanım alanına sahiptirler. Genellikle çok komponentli oldukları için kompakt bir biçimde tasarım zorunluluğu bulunmaktadır. En yaygın kullanılanı EPA (ABD) onaylı Andersen universal numune alıcısıdır.

Yanma gazlarındaki partiküllerin tespiti, su buharı miktarı, baca gazı hızı, baca sıcaklığı ile ilgili ölçümlerin tümü bu cihaz ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.8' de EPA Metod 5' e göre çalışan Andersen Universal Numune Alıcısı gösterilmektedir (Andersen Stack Samp., 1989). Toz ölçümü izokinetik şartlarda gravimetrik esasa göre yapılmıştır.

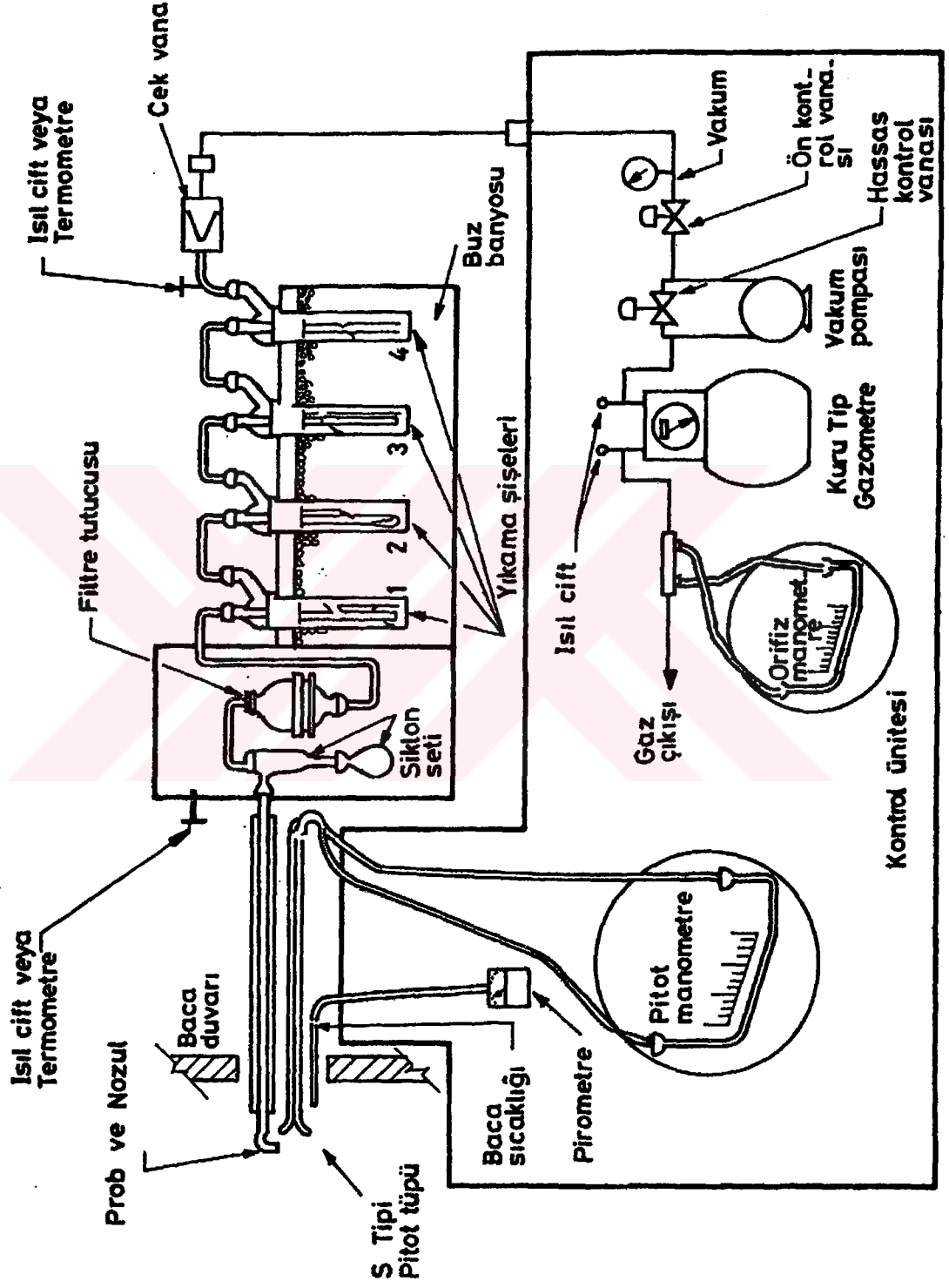
b. Taşınabilir Baca Gazı Analizörü

Bu tip numune alıcılar fuel oil, doğal gaz, LPC veya kömür yakan tesislerde geniş bir kullanım alanına sahiptirler. Kendi aldığı numuneyi kullanarak çok sayıda gaz halindeki parametrelerin (O_2 , CO , CO_2 , SO_2 , NO_2 , H_2S) analizini ve hava fazlalık katsayısı, yanma verimi gibi yakma sistemine ait değerlerin ölçümünü yapmaktadır. Esas olarak elektrokimyasal prensiplere dayalı olarak çalışan hücreler kullanılarak her bir parametre ayrı ayrı ölçülmektedir.

Yanma gazlarının analizinde Alman yapımı MRU 95/3CD ve TESTO 350 model elektrokimyasal hücre yöntemine göre çalışan gaz analizörleri kullanılmıştır.



Şekil 4.7. Kazana Ait Baca ve Numune Alma Yerinin Konumu.



Şekil 4.8. Andersen Universal Numune Alma Sistemi.

c. Baca Çekiş Ölçme Cihazı

Brigon marka olan baca çekiş ölçme cihazının ölçme aralığı 40.1 – 0.5 mbar olup, ölçüm hassasiyeti 0.01 mbar' dır.

4.8 Isıl Verim ve Isıl Gücün Hesaplanması

1. Kazanda katı yakıtın yanmasıyla meydana gelen ısı kayıpları;
2. Sıcak baca gazları ile bacadan dışarı atılan duyulur ısı kaybı,
3. Yakıtın içindeki karbonun eksik yanması sonucu bacadan atılan CO' in sahip olduğu ısı enerjisi,
4. Yanmaya hiç katılmadan kazandan çıkan kül ve cürüftaki yanmamış karbonun ısı değeri,

Kazan sıcak cidarlarından olan ısı kayıplardır.

Bu kayıplar, 1 kg yakıt için sırasıyla aşağıdaki gibi hesaplanır (TS 4041,1983):

A. Baca Kaybı

$$h_A = \frac{V_A \cdot c_{pA}}{H_u} (t_A - t_L).100 \quad (\%) \quad (4.1)$$

Burada;

V_A = Yakılan yakıtın 1 kilogramı için açığa çıkan baca gazı miktarı (Nm^3/kg),

t_A = Baca gazı sıcaklığı, ($^{\circ}C$)

t_L = Yakma havası sıcaklığı, ($^{\circ}C$)

$c_{pA} = t_L - t_A$ sıcaklıkları arasında baca gazları ortalama özgül ısısı ($kkal/Nm^3 \text{ }^{\circ}C$)

H_u = Kömürün alt ısı değeri ($kkal/kg$)

B. Eksik Yanma Kaybı

$$h_{\infty} = CO \cdot V_{Akr} \frac{3020}{H_u} .100 \quad (\%) \quad (4.2)$$

Burada;

V_{Akr} = Kuru baca gazları miktarı, (Nm³/kg),

CO = Baca gazı içindeki CO' in hacimsel oranı

3020 = CO' in alt ısı değeri (kkal/Nm³)

C. Yanmamış Kömür Kaybı

$$h_f = \frac{F}{z} \cdot \frac{b}{B} \cdot \frac{8100}{H_u} \cdot 100 \quad (\%) \quad (4.3)$$

Burada;

F = Deney süresinde çıkan toplam yanma artıkları (kg),

z = Deney süresi (saat),

8100 = Karbonun alt ısı değeri (kkal/kg),

b = Yanma atıklarındaki yanmamış karbon oranı (kg/saat),

B = Saatte ocağa gönderilen yakıt miktarı (kg/saat)

D. Sıcak Cidar Kaybı

$$Q_x = F_x \cdot \alpha_x \cdot (t_{mx} - t_L) \quad (\text{kkal/saat}) \quad (4.4)$$

Burada;

F_x = Kazanın her bir bölümünün yüzey alanı (m²)

α_x = F_x yüzeyine ait ısı geçiş katsayısı (kkal/m² saat °C)

t_{mx} = F_x yüzeyi ortalama sıcaklığı (°C)

t_L = Kazan dairesi ortalama sıcaklığı (°C)

Kazanın bölümlere ayrılmış yüzeylerindeki ısı geçiş katsayılarının değerleri sıcaklığa bağlı olarak, TS 4041 (1983)' de verilen diyagramdan bulunur.

Burada sıcak cidar kaybı,

$$h_{st} = \frac{\sum Q_x}{B \cdot H_u} \cdot 100 \quad (\%) \quad (4.5)$$

Dolaylı metoda göre kazan verimi,

$$\eta_k = 100.[1- (h_A + h_{\infty} + h_f + h_{st})] \quad (\%) \quad (4.6)$$

bağıntıları ile hesaplanır.

Dolaylı metoda göre kazan ısı gücü ise,

$$Q_N = B . H_u . \eta_k \quad (\text{kcal/saat}) \quad (4.7)$$

bağıntısından bulunur.

5. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

Yanma deneyleri dört ayrı grupta değerlendirilmiştir. Birinci ve ikinci grup yanma deneyleri elle yüklemeli sabit ızgaralı sıcak su kazanında (Azim kazan) gerçekleştirilmiştir. Bölüm 2.3' de ifade edildiği gibi yakma sistemlerinde yanmanın enerji ekonomisi ve çevresel etki yönünden uygun bir biçimde oluşturulabilmesi yakıt-yakma sistemi-operatör üçlüsü arasındaki gerekli uyumun sağlanabilmesine bağlıdır (Durmaz, 1989). Bölüm 4.5.2' de detaylı olarak tanıtılan elle yüklemeli, ızgaralı Azim kazan, insan insiyatifinin önemli ölçüde etkin olduğu kontrolü zor bir yakma sistemidir. Üçlü uyumdaki operatör etkisinin bu sistemlerde önemli oranda bulunması sebebiyle, birtakım olumsuzluklar meydana gelebilmektedir.

Yanma havasının kontrol edilemeyişi, yanma koşullarını olumsuz yönde etkilemekte, özellikle CO ve O₂ çok yüksek değerler almaktadır. Çok yaygın olarak kullanılan bu tip kazanlara ait elde yeterli datanın bulunmayışı nedeniyle ve yanma mekanizmasının yürüyüşünü görmek amacıyla yanma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Azim kazan yanma deneylerinde, birinci grup çalışma tüm yanma sürecini kapsarken, ikinci grup çalışmadaki yanma deneylerine sönme kademesinden önce son verilmiştir. Bu iki grup çalışma, deneysel şartları oluşturmak amacıyla tüm çalışma içerisinde ön hazırlık safhası olarak da tanımlanabilir.

Diğer yakma sistemi otomatik, hava kontrollü sıcak su kazanı (Fischer kazan) ise tasarım açısından Azim kazandan tamamen farklıdır. Fischer kazan insan insiyatifinin olmadığı, otomatik yüklemeli ve sekonder hava beslemeli, O₂ kontrollü bir sistemdir (Bölüm 4.5.3). Bu özelliklerinden dolayı Azim kazan (insan faktörü önde) ile kıyaslama yapabilmek için bu sistemde yanma deneyleri gerçekleştirilmiştir (3. Grup yanma deneyleri) . Fischer kazanda en iyi sonuç alınan kömür (kurutulmuş Y.Ağaçlı) ile orijinal Y.Ağaçlı kömürü Azim kazanda tekrar yakılarak mukayese edilmiştir. Fischer kazana kapasiteye uygun miktarda kömür yüklendikten sonra, kazandaki yanma kademeli olarak gerçekleşmektedir. Yani alev ızgara üzerindeki kömürü yalayarak bir tabakayı yakmakta, daha sonra kademeli olarak yukarıya doğru ilerlemektedir. Otomatik, hava kontrollü Fischer kazanın en olumlu özelliklerden

biri, elle yüklemeli, sabit ızgaralı Azim kazanda olduğu gibi yanmanın tüm kömür yüzeyinde başlamamasıdır.

4. grup yanma deneyleri ise soba da gerçekleştirilmiştir. Soba günümüzde evsel ısıtma amaçlı kullanımda güncelliğini korumaktadır. Özellikle kış aylarında hava kirliliğinin artmasına sebep olan parametrelerden birisidir. Bu sebeple yaygın kullanıma sahip bu yakma sisteminde deneyler üçüncü grup yanma deneylerindeki kömürler kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Yanma deneylerinde kullanılan farklı nem içerikli Yeniköy Ağaçlı kömürleri, Bölüm 4.2’ de tanıtılan kurutma sisteminde Orijinal Yeniköy Ağaçlı kömürünün kurutulması ile elde edilmiştir.

5.1 Elle Yüklemeli, Sabit Izgaralı Sıcak Su Kazanında Yapılan Yanma Deneyleri

Elle yüklemeli, sabit ızgaralı sıcak su kazanında (Azim) yapılan yanma deneyleri yukarıda ifade edildiği gibi iki grup şeklinde gerçekleştirilmiştir. Birinci grup yanma deneylerinin başlangıç kademesinde (gazlı yanma), kararlı yanma kademesinde (yarı kok yanması) ve sonlanma aşamalarında gaz ve toz emisyon ölçümleri gerçekleştirilmiştir. İkinci grup yanma deneylerinde ise başlangıç ve kararlı yanma kademesinde emisyon ölçümleri yapılmıştır. Bu kazanda yapılan deneylerde kazan anma ısı gücünü elde etmek için gerekli miktardaki kömür ard arda iki defa yüklenmiştir. Her iki grup çalışmada ölçülen toz konsantrasyonları, emisyon değerlerini mukayese etmek açısından aynı O₂ temeline indirgenmiştir.

Birinci grup yanma deneylerinde Güney Afrika ve Harman (G.Afrika + Y.Ağaçlı), %21.40, %15.30 nemli kurutulmuş, %38.70 nemli orijinal Yeniköy Ağaçlı kömürlerine ait gaz emisyonları (CO, SO₂, NO_x), O₂ ve CO₂ değerleri, baca gazı sıcaklığı, toz emisyonlarının zamana göre değişim grafikleri Şekil A.1 – Şekil A.20’ de verilmiştir. Birinci grup yanma deneylerinin değerlendirildiği gaz, toz emisyonu, ortalama baca gazı sıcaklık grafikleri ise Şekil 5.1 – 5.5’ de yer almaktadır.

İkinci grup çalışmada, birinci gruptaki çalışmaya benzer olarak gerçekleştirilen yanma deneylerinde dört ayrı kömür kullanılmıştır. İkinci grup yanma deneylerinde kullanılan Harman (G.Afrika + Y.Ağaçlı), %21.40, %15.30 nemli kurutulmuş, %37.10 nemli orijinal Yeniköy Ağaçlı kömürlerine ait gaz emisyonları (CO, SO₂,

NO_x), O₂ ve CO₂ değerleri, baca gazı sıcaklığı ve toz emisyonlarının zamana göre değişim grafikleri Şekil B.1–Şekil B.16’da verilmiştir. İkinci grup yanma deneylerinin değerlendirildiği gaz, toz emisyonu, ortalama baca gazı sıcaklık grafikleri ise Şekil 5.6 – 5.10’ da görülmektedir.

5.1.1 Birinci Grup Yanma Deneylerinin Sonuçları

Güney Afrika kömürüne ait gaz emisyonu grafiğinden (Şekil A.1) görüldüğü gibi; 1.yüklemede CO konsantrasyonu başlangıçta yüksek değerde iken zamanla düşmekte ve bir süre kararlı olarak düşük değerlerde seyrettikten sonra (kararlı yanma, kok yanması) tekrar yükselişe geçmektedir. Baca gazı sıcaklığının zamana bağlı olarak artması ile birlikte yanma daha kararlı hale gelmektedir. Sıcaklığın yükselmesi ile birlikte SO₂ ve NO_x değerlerinde artış olmaktadır. Bu değerlerin zamanla sıcaklıkla paralel olarak, yanmanın yavaşlaması sebebiyle (sönme) düştüğü Şekil A.1’ de görülmektedir. Baca gazı sıcaklığının 140°C dolayında seyrettiği yanma olayında O₂ (%) miktarı yanmanın başlangıcında %18 değerinde iken zamanla %12.3 değerine düşmekte ve daha sonra bu seviyelerde seyrettikten sonra tekrar yükselişe geçmektedir. O₂’ ye bağlı olarak CO₂ (%) değerleri %2.8 değerinden %8.5 değerine yükselmekte ve zamanla %2.5 ‘ e düşmektedir.

İkinci yüklemede de, Şekil A.2’ de görüldüğü gibi CO konsantrasyonu baca gazı sıcaklığının artmasıyla birlikte azalırken, SO₂ ve NO_x artmaktadır. Kararlı yanma diye tanımladığımız yarı kok yanmasında CO 300 mg/m³ civarında değişirken baca gazı sıcaklığının düşmeye başlamasıyla burada da tekrar yükselişe geçmektedir. SO₂ ve NO_x ise bu sırada daha düşük değerler almaktadır. %O₂ değeri burada da başlangıçta %18 değerinde iken yanmanın ilerlemesiyle beraber %15 değerine kadar düşmekte ve sönme aşamasında tekrar %18 değerine çıkmaktadır. CO₂ değerleri de O₂ miktarına bağlı olarak zamanla değişmektedir.

Toz emisyon değerleri iki yükleme için Şekil A.3 ve Şekil A.4’ de verilmiştir. Birinci yüklemede toz emisyon değerlerinin 25-125 mg/m³ arasında değiştiği görülmektedir. Yanma başlangıcında düşük mertebelerdeki toz değeri, yanmanın hızlanmasıyla yükselerek daha sonra tekrar başlangıçtaki mertebelere dönmüştür. İkinci yüklemede (Şekil A.4) birinci yüklemeye kıyasla daha yüksek toz konsantrasyonu elde edilmiştir. İkinci yüklemede yanmanın başlangıç ve sönme aşamalarında toz konsantrasyonunun kararlı yanma aşamasından daha yüksek değerler aldığı

görülmektedir. Tutuşma ve sönme safhalarında %7 O₂ bazına indirgenmiş toz değerlerinin çok yüksek olmasının nedeni ise yanma süresince elde edilen %O₂ değerlerinin yüksekliğinden kaynaklanmaktadır.

%70 Y.Ağaçlı-%30 G.Afrika kömürlerinin karışımıyla hazırlanan harman kömüre ait 1. ve 2. yüklemelere ait gaz emisyonu ve baca gazı sıcaklıklarına ait grafikler Şekil A.5 ve Şekil A.6' da görülmektedir. Y.Ağaçlı kömürü reaktif bir kömür olması sebebiyle oldukça hızlı yanmaktadır (Ekinci ve diğ., 1993). Du ve diğ. (1995) kömürün yanması üzerine yaptıkları bir çalışmada kömürdeki karbon tutuşmasının seyreltik bir akımda oluşurken, uçucuların tutuşmasının çok yoğun ve hızlı bir akım içerisinde meydana geldiğini ifade etmişlerdir. Yanma süresini uzatmak amacıyla daha az reaktif kömür olan G.Afrika kömürü ile karıştırılarak harman kömür hazırlanmıştır. 1. yüklemde başlangıçta 1800 mg/m³ olan CO konsantrasyonu, yanmanın daha düzenli bir hal almasıyla oldukça düşük konsantrasyonlarda seyretmektedir. SO₂ ve NO_x değerleri ise baca gazı sıcaklığının 160°C civarına yükselmesiyle artmaktadır. Baca gazı sıcaklığının yüksek değerlerinde O₂' nin en düşük, CO₂' nin de en yüksek değerlerini aldığı görülmektedir. Yanmanın yavaşlaması sebebiyle baca gazı sıcaklığında meydana gelen düşme ile beraber CO hızlı bir şekilde yükselmekte ve SO₂ ve NO_x azalmaktadır.

Harman kömüre ait ikinci yüklemde (Şekil A.6) de CO emisyonu değerleri birinci yüklemdekine yakın değerler arasında değişmektedir. SO₂ konsantrasyonu baca gazı sıcaklığının 150°C' ye yakın değerler almasıyla beraber 600 mg/m³ civarında değişmekte, daha sonra sıcaklık 90°C' ye düştüğünde 300 mg/m³' e inmektedir. NO_x konsantrasyonu da yine baca gazı sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir. Burada O₂ değerlerinin (%) birinci yüklemde daha yüksek, CO₂ nin doğal olarak daha düşük değerler aldığı görülmektedir.

Toz konsantrasyonu değerleri birinci yükleme için Şekil A.7' de verilmiştir. Burada toz konsantrasyonu 45-125 mg/m³ arasında değişim göstermektedir. Başlangıç şartlarında indirgenmiş toz değeri, bu şartlarda O₂' nin %18 olması nedeniyle oldukça yüksek çıkmıştır. Şekil A.8' de verilen ikinci yüklemde ise, başlangıç aşamasındaki toz konsantrasyonu birinci yüklemdeki başlangıç değerinden oldukça yüksektir. Diğer toz konsantrasyonları ise birinci yüklemdeki aynı yanma sürecindeki değerlere oldukça yakındır.

% 15 civarına kurutulmuş Yeniköy Ağaçlı kömürünün 1.yüklemesinde (Şekil A.9) yanmanın başlangıcında 2500 mg/m^3 olan CO konsantrasyonu yanmanın 20' nci dakikasında 100 mg/m^3 'e düşmektedir. Bu zamandan itibaren düşük konsantrasyonlardaki CO değerlerinden yanma mekanizmasının iyileşmiş olduğu görülebilmektedir. Baca gazı sıcaklığının 150°C ' ye yükselmesiyle SO_2 konsantrasyonu 2000 mg/m^3 değerine kadar çıkmakta ve ilerleyen zamanla beraber 700 mg/m^3 değerine kadar düşmektedir. NO_x baca gazı sıcaklığı ile beraber değişim göstermektedir. Kararlı yanma aşamasında O_2 değeri %13.3 ve CO_2 değeri %7.7 mertebelerinde değişmektedir. Baca gazı sıcaklığının düşmesiyle O_2 , %17 ve CO_2 ise % 4 değerlerini almaktadır. Buradaki yanma koşulları O_2 'nin değerlerinden de anlaşılacağı gibi G.Afrika ve harman kömüre ait yanma koşullarından biraz daha olumludur. Bu yanma deneyine hava girişi biraz daha iyi kontrol edilebilmiştir. Bölüm 4.5.2' de ifade edildiği gibi Azim kazanda yakma havası (birincil hava) kül kapağından ızgara altına gönderilmekte, ikincil hava ise kömür besleme kapağındaki ayarlanabilir klapeden kömür tabakasının üzerine sevk edilmektedir. Bu kapak ve klape ayarlarının yanma sırasında el ile yapılması sonuçları etkilemektedir. Burada hava girişinin biraz daha kontrollü yapılmış olması nedeniyle yanma koşulları G.Afrika ve harman kömüre ait yanma koşullarından daha olumludur. Daha öncede ifade edildiği gibi, insan insiyatifinin yüksek oranda bu yakma sisteminde bulunması, yakma koşullarında açıkça görülebilir farklılığa sebep olmaktadır.

Şekil A.10' da görüldüğü üzere, %15 civarına kurutulmuş Y.Ağaçlı kömürünün ikinci yüklemdeki yanma koşulları, emisyon ve baca gazı sıcaklığı mertebeleri açısından birinci yüklemdeki değerlere yakın mertebelerdedir. Yanmanın başlangıcından itibaren CO konsantrasyonu ilk 40 dakikada 1200 mg/m^3 değeri üzerinde değişmektedir. CO, tüm yanmanın gerçekleştiği yanma süresinin ortalarında 300 mg/m^3 değerine kadar düşmektedir. SO_2 konsantrasyonu baca gazı sıcaklığının artmasıyla beraber hızla 1200 mg/m^3 üzerine çıkmıştır. Kararlı yanma aşaması süresince $1800\text{-}900 \text{ mg/m}^3$ arasında değişim göstermekte daha sonra 600 mg/m^3 ' e kadar düşmektedir. O_2 ve CO_2 değerlerinin yanmanın ilk 60 dakikası süresince birinci yüklemdeki değerlere yakın olarak değiştiği görülmektedir. O_2 daha sonra birinci yüklemde daha yüksek değerler almaktadır. Bu tür yakma sistemlerinde O_2 kontrolünün zorluğu burada da görülmektedir.

%15 nemli Y.Ağaçlı kömürüne ait toz emisyon değerleri birinci yükleme için Şekil A.11' de görülmektedir. Birinci yüklemede toz emisyonu $110-50 \text{ mg/m}^3$ arasında değişim göstermektedir. Burada da indirgenmiş değerler başlangıç ve sönme aşamalarında oldukça yüksektir. İkinci yüklemede toz konsantrasyonu (Şekil A.12) $110-30 \text{ mg/m}^3$ arasında değişim göstermektedir. İki yüklemedeki toz emisyon konsantrasyonlarının mertebe olarak yakın olduğu görülmektedir.

%21 civarına kurutulmuş Y.Ağaçlı kömürünün birinci yüklemedeki (Şekil A.13) yanma rejimi oldukça kararsız olarak başlamıştır. O_2 ' nin %13 mertebelerinde olmasıyla beraber, CO 3300 mg/m^3 değerindedir. Baca sıcaklığının 165°C ' ye yükselmesiyle yanma kararlı hale gelmeye başlamış, %10 mertebelerine inen O_2 ile CO , 2000 mg/m^3 de yaptığı salınımlardan sonra düşmeye başlamıştır. Baca sıcaklığının yükselmesiyle beraber SO_2 ve NO_x yanma süresince maksimum değerlerini almışlardır. Yanmanın 60. dakikasından sonra baca gazı sıcaklığının düşmeye başlamasıyla, O_2 değerlerindeki yükselme Şekil A.13'de görülmektedir. CO konsantrasyonundaki yükselme ve SO_2 ve NO_x konsantrasyonlarındaki düşme yanmanın tamamlanmaya başlamış olduğunu göstermektedir.

İkinci yüklemede baca gazı sıcaklığı, %21 civarına kurutulmuş Y.Ağaçlı kömürü için birinci yüklemeden daha düşük değerlerde değişmektedir. Oysa birinci yükleme sonrası ortam ve yatak sıcaklığının yüksek olması nedeniyle bunu tersi beklenmektedir. Hava şartları da yanma koşulları üzerinde etkin parametredir. Yanma deneyinin yapıldığı gün havanın aşırı soğuk olması nedeniyle, ikinci yükleme ile aniden düşen baca sıcaklığı fazla yükselme gösterememiştir. Bu da baca sıcaklığını ve yanmayı olumsuz etkilemiştir. O_2 ' nin birinci yüklemeden daha yüksek değerler aldığı Şekil A.14' de görülmektedir. Bu yanma şartlarının kötüleştiğinin bir diğer göstergesidir. Yanmanın ilk 60 dakikası süresince O_2 , %15 civarı değerler almış, daha sonra ise yükselişe geçerek, %18 değerinde yanmanın sonuna kadar devam etmiştir. Burada sistemdeki O_2 kontrolünün çok zayıf olmasına hava şartlarının olumsuzluğunun da eklenmesi yanma mekanizmasını daha da olumsuz hale getirmektedir.

Yanmanın başlangıcında 1250 mg/m^3 değerinde olan CO konsantrasyonunun yanma sürecince salınımlar göstererek düşme göstermemesi yanma rejimindeki düzensizlikleri göstermektedir. %21 nemli kömürün yanması sırasında birkaç kez yüksek sesli patlamalar gözlenmiştir. Bu da yanma rejiminin bozulmasına ve CO ' in

yükselmesine neden olmuştur. SO_2 ise baca gazı sıcaklığı ile beraber değişim göstererek, yanmanın 50. dakikasında 1500 mg/m^3 değerine kadar yükselmiştir. NO_x konsantrasyonu değerleri de buna bağlı olarak birinci yüklemekten düşük değerlerde baca gazı sıcaklığı ile beraber değişmektedir.

Toz emisyon değerleri %21 nemli kömür için Şekil A.15 ve A.16' da verilmiştir. Birinci yüklemeye dönme aşamasında toz emisyonu düşme eğilimi göstermesine rağmen, O_2 nin yüksek olması bu aşamadaki indirgenmiş değerin yüksek olmasına neden olmaktadır. İkinci yüklemeye ise toz emisyonu 520 mg/m^3 den 35 mg/m^3 e kadar düşmektedir. İkinci yüklemedeki toz konsantrasyonları birinci yüklemedeki değerlerden oldukça yüksektir. Yanma sırasında meydana gelen patlamalar sonucu toz konsantrasyonundaki artış ve CO konsantrasyonlarından da görüleceği üzere, ikinci yükleme sonrası özellikle yanmanın başlangıcında yanmanın tam olarak gerçekleşmemesidir.

Orijinal Y.Ağaçlı kömürü ile yapılan yanma deneylerinde birinci yüklemeye ait değerler Şekil A.17'de görülmektedir. Burada baca gazı sıcaklığının 100°C ' den 160°C ' ye yükselmesiyle O_2 , %17.5' den %15.5' e düşmüştür. Bu anda CO konsantrasyonu da hızla 1550 mg/m^3 den 60 mg/m^3 değerine kadar inmiştir. Bir süre O_2 %15 iken, CO' de yavaşça yükselerek 900 mg/m^3 değerinde bir süre sabitlenmiştir. Yanmanın 60. dakikasıdan itibaren O_2 ile beraber CO' de hızla 1200 mg/m^3 e yükselerek yanmanın başlangıcındaki değerine yaklaşmıştır. Burada orijinal kömürün yanmasındaki düzensizlik CO değerlerinden görülmektedir. SO_2 konsantrasyonları baca gazı sıcaklığı ile beraber kademeli olarak artmış, yanmanın 20-50. dakikaları arasında 900 mg/m^3 civarı, daha sonra yükselerek 1450 mg/m^3 civarı değişmiş, baca gazı sıcaklığının 96°C olmasıyla beraber 600 mg/m^3 e düşmüştür. NO_x ise baca gazı sıcaklığı ile beraber değişim göstermektedir.

İkinci yüklemeye ise orijinal Y.Ağaçlı kömürünün yanmasında CO baca gazı sıcaklığına bağlı olarak daha kararlı bir değişim göstermektedir. Şekil A.18' de görüldüğü gibi baca gazı sıcaklığının 160°C ' ye çıkmasıyla beraber O_2 ve CO değişimleri paralellik göstermektedir. 900 mg/m^3 mertebelerinde değişen CO, sıcaklığın düşmesiyle beraber 1400 mg/m^3 değerine kadar yükselmektedir. Bu sırada %15 civarı değişen O_2 , %18 değerine doğru yükselişe geçmiş, CO_2 ise %3 değerine inmiştir. NO_x ise birinci yüklemeye yakın değerlerde yanma süresince değişim göstermektedir. Yanmanın başında 300 mg/m^3 olan SO_2 , baca gazının maksimum

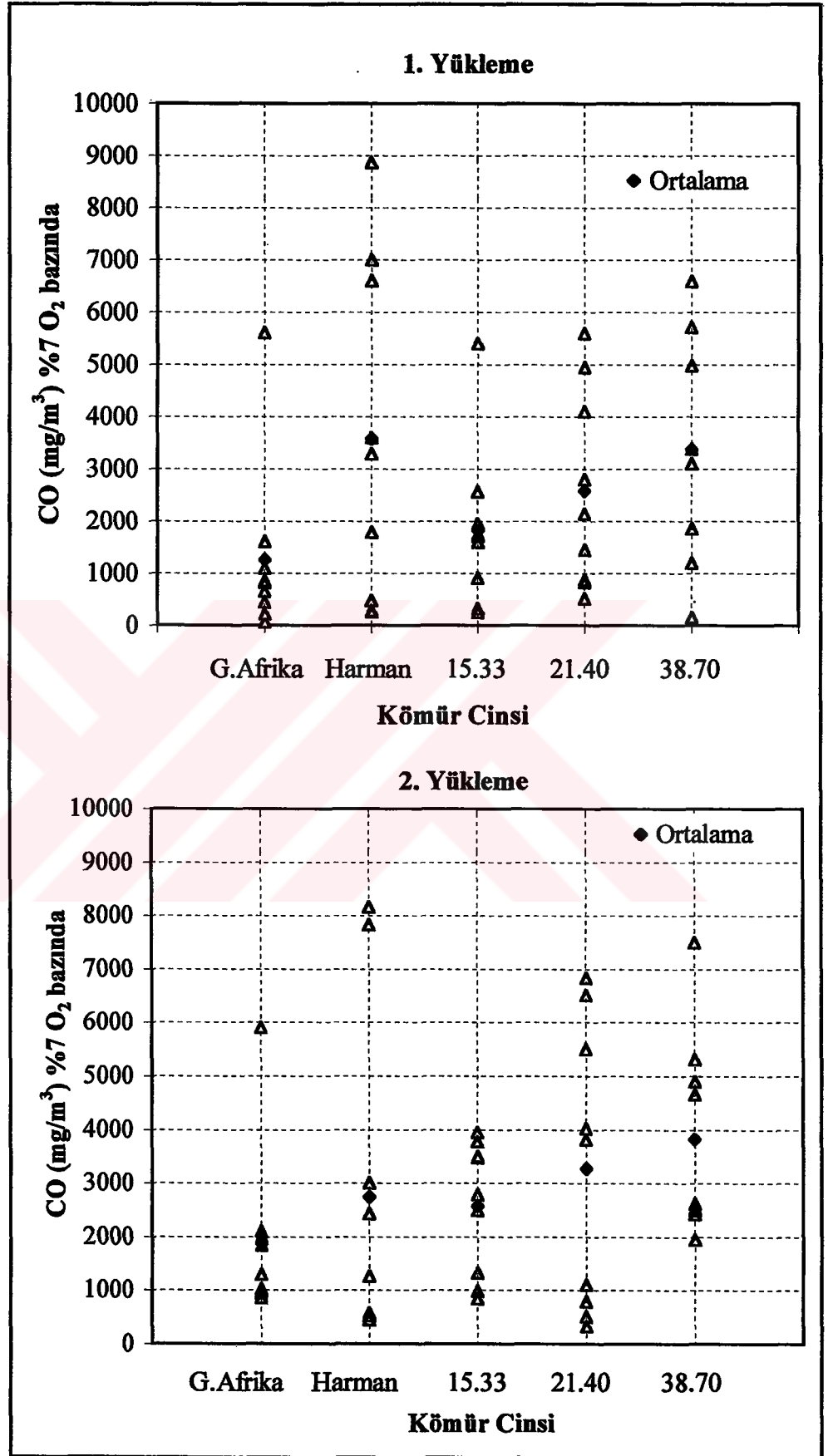
değer almasıyla 1350 mg/m^3 e kadar yükselmiştir. Yanmanın son kademesinde ise 700 mg/m^3 değerine düşmektedir. Yakma sisteminde yanma şartlarına bağlı olarak baca gazı sıcaklığının düşmesiyle, O_2 değerlerinde yükselme gözlenmektedir. Orijinal kömürde CO konsantrasyon değerleri, farklı nem içerikli diğer Y.Ağaçlı kömürlerinden daha yüksek değerlerde değişim göstermektedir. Nem içeriğinin yüksek olması yanmanın başlamasını geciktirici bir faktördür.

Şekil A.19' da görüldüğü gibi, toz konsantrasyon değerleri yanma süresince çok fazla değişim göstermemektedir. Burada da O_2 fazlalığı olumsuz etkisini göstererek, %7 O_2 bazındaki toz değerlerini görece yükseltmektedir. İkinci yüklemedeki toz emisyonları ise Şekil A.20' de görüldüğü gibi birinci yüklemedeki toz emisyonlarına yakın değerlerdedir.

5.1.2 Birinci Grup Yanma Deneylerinin Değerlendirilmesi

Elle yüklemeli, sabit ızgaralı sıcak su kazanında gerçekleştirilen ve 1. Grup olarak tanımlanan yanma deneylerinde gaz konsantrasyon değerleri, CO için %7, SO_2 ve NO_x için %5 O_2 bazına indirgenmiştir. Bu yanma deneylerinde iki yükleme için de CO değişim değerleri Şekil 5.1' de, SO_2 ve NO_x değişimleri ise Şekil 5.2 ve Şekil 5.3' de verilmiştir. Ortalama baca sıcaklığı değerleri Şekil 5.4' de ve kümülatif toz yayılımı ise tüm kömürler için Şekil 5.5' de verilmiştir.

Şekil 5.1'de CO emisyonlarının değişim aralıkları ve ortalamaları verilmiştir. Bu değerlendirmede tutuşmanın ilk aşamasında değerler kullanılmamıştır. Genel olarak bakıldığında tüm CO değerleri oldukça yüksek değerlerdedir. Birinci yüklemede tüm kömürler için 3000 mg/m^3 (%7 O_2) altında yığılma gözlenirken, ikinci yüklemede CO emisyonlarındaki yığılma 4000 mg/m^3 ün altında olduğu görülmektedir. Güney Afrika kömürüne ait CO değerleri ise 2000 mg/m^3 ün (%7 O_2) altındadır. Grafikte en iyi yanmanın G.Afrika kömürü ile gerçekleştirilen çalışmada olduğu görülmektedir. Kurutulmuş ve orijinal her üç Y.Ağaçlı kömürüne ait CO emisyon değerleri kendi aralarında değerlendirildiğinde, her iki yüklemede de en yüksek CO emisyonu orijinal kömürde görülmektedir. %15 civarına kurutulmuş kömürde ise en düşük, %21 nemli kömürde ise ara değer olarak görülmektedir. Burada nem içeriğinin yanma mekanizmasına olan etkisi görülmektedir. Nem içeriğinin düşmesiyle birlikte CO konsantrasyonlarında bir azalma olduğu görülmektedir. Yapılan bir çalışmada kömürün yanma hızında nemin önemli bir parametre olduğu tespit edilmiştir. Nem



Şekil 5.1. Azim Kazan Deneylerinde CO Emisyonları Değişimi
(1.Grup, 1. ve 2. Yükleme)

içeriğinin artmasının yanmayı önemli ölçüde güçleştirdiği gözlenmiştir. (Bhat ve Agarwal, 1996).

Çalışmanın ana amacı daha öncede belirtildiği gibi kömür neminin emisyonlar üzerine etkisinin araştırılmasıdır. Bunun yanında yaptığımız bu çalışmada yanma şartları da incelenmektedir. Kompleks bir yapıya sahip olan kömürün yanma sırasındaki davranımını, kömürün kimyasal bileşimi ve porozite yapısına bağlı olarak açıklamaya çalışmak daha doğru olacaktır. Özellikle kömürün poröz ortamında tutulan nem, yanma şartlarında ortamı terk ederken, yapıyı ve dolayısı ile yanma mekanizmasını etkilemektedir.

Bölüm 2.6' da açıklandığı gibi kömürün yanması kimyasal bir reaksiyondur ve iki aşamada incelenebilir. Birinci aşama kömür tanesinin ısınması sonucu uçucu madde çıkışı ve çıkan uçucunun yanması; ikinci aşama ise karbon ve mineral maddeden oluşan kısmın yanarak külün oluşmasıdır. Kömürün yanma kinetiğinin incelenmesi; yanma tepkimelerinin çalışma koşullarına bağlı olarak değişmesi, tepkimelerin ilerlemesiyle gözenek yapısının değişmesi ve yarıkok ile bunu çevreleyen gaz arasında bir sıcaklık gradyeninin olması nedeniyle karmaşıktır. Kömürün yakılması konusunda çok sayıda araştırma yapılmasına karşın, henüz tam olarak aydınlatılmamış olaylar vardır. Kömürün içerdiği mineral madde katalizör ve inhibitör etkisi nedeniyle yanmayı etkileyen önemli bir faktördür. Türk linyitlerinde mineral madde içeriği yüksektir ve mineral bileşikleri zengindir. Açma (1999) yaptığı çalışmada farklı kimyasal ve fiziksel özelliğe sahip, değişik bölgelere ait Türk linyitlerinin yanma özelliklerini incelemiştir. Çalışmada orijinal ve mineral maddesi giderilmiş linyit numuneleri ve onlardan elde edilen yarıkokların oksitleyici atmosferde ve dinamik koşullar altında termogravimetrik analizini gerçekleştirmiştir. Orijinal ve mineral madde giderme işlemi uygulanmış linyit numunelerinin yanma profilleri kıyaslandığında, mineral içeriğinde sağlanan azalmanın numunelerin yanma profillerinin daha yüksek sıcaklıklara kaymasına neden olduğu görülmüştür.

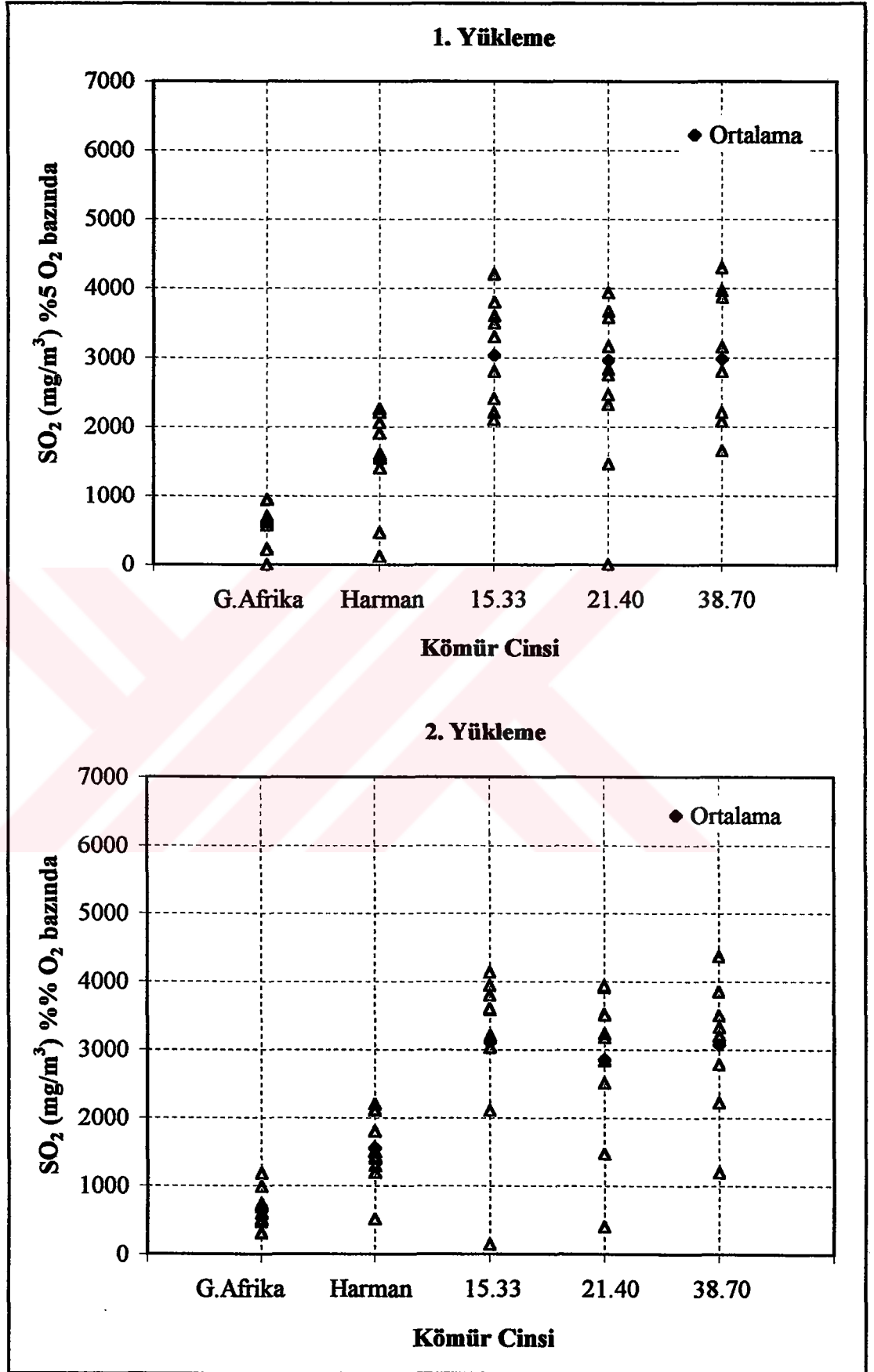
Oksijen ile kömür çevresindeki nem arasındaki difüzyon hızı %15 ve %21 kurutulmuş kömürlerde daha hızlı, %38 nemli kömürde ise daha yavaştır. Bu nedenle %38 nemli kömürde yanma daha yavaş gerçekleşmektedir. Tutuşma süresinin daha uzun olması nedeniyle orijinal kömürün yanmasında CO oranı da daha yüksek olmaktadır. Zhang ve Wall (1994) farklı deneysel teknikler kullanarak değişik kömür numunelerinin tutuşma mekanizmalarını incelemişlerdir. Kömür çevresindeki gazın

kömürü ısıtma hızı ve kömür boyutu gibi sistem parametrelerinin tutuşma sıcaklığı ve tutuşma mekanizması üzerinde etkisinin çok fazla olduğunu tespit etmişlerdir. Yüksek nem içerikli kömürlerde ısıtma hızının daha yavaş gerçekleştiği görülmüştür.

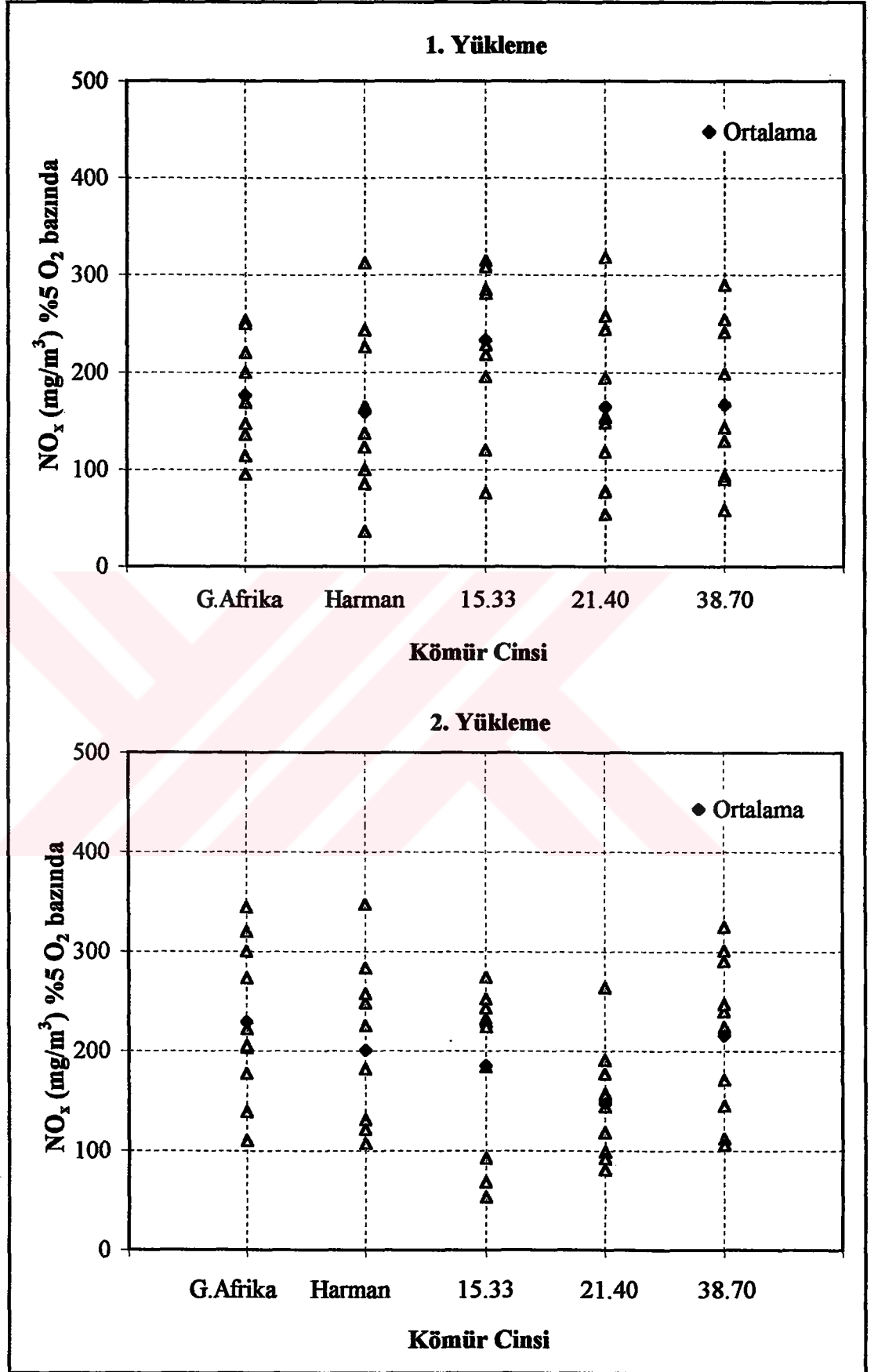
Harman kömür için CO değerleri de her iki yüklemde de oldukça yüksek değerlerdedir. Harman kömürün neminin %20 civarı olması da buna etkindir. Ancak bu tür yakma sistemlerinde, yükleme ve hava ayarı kontrollerinin el ile yapılması yanma havası kontrolünü engellemektedir. Kömürün yüklemesi el ile yastıklama yöntemiyle yapıldıktan sonra tüm kömürün tamamı yanmaya başlamakta, bu durum da aşırı CO çıkışına sebep olmaktadır.

Şekil 5.2' de her iki yükleme için SO₂ emisyon değişimleri verilmiştir. Burada tüm SO₂ değerleri %5 O₂' ye indirgenmiştir. İki yüklemde de orijinal ve kurutulmuş Y.Ağaçlı kömürlerinin SO₂ emisyon değerleri birbirlerine yakın mertebelerdedir. Birinci yüklemde 0-4100 mg/m³, ikinci yüklemde ise 50-4300 mg/m³ arasında değişim göstermektedir. Her iki yüklemde harman kömürün ortalama SO₂' i (%5 O₂) 1500 mg/m³ civarındadır. G.Afrika kömürünün SO₂ değerleri her iki yüklemde de 1000 mg/m³ (%5 O₂) altında yığılma göstermektedir. SO₂ emisyonu konsantrasyonu yakıtın kükürt içeriğine bağlı olarak değişim göstermektedir. Tablo 4.1' de verilen kömür analiz değerlerinden de görüleceği gibi kömürlerin kükürt içeriğine bağlı olarak SO₂ konsantrasyonları değişim göstermektedir. En düşük kükürt içeriğine sahip olan G.Afrika kömürünün yanması ile en düşük SO₂ konsantrasyonları elde edilmiştir.

NO_x değişimleri iki yükleme içinde Şekil 5.3' de verilmiştir. Tüm kömürler için NO_x değişimi 100-300 mg/m³ (%5 O₂) arasındadır. Şekil 5.4' de ortalama baca gazı sıcaklığı değerleri grafik üzerinde gösterilmektedir. Burada G.Afrika ve orijinal Y.Ağaçlı kömüre ait ortalama baca gazı sıcaklığı değerleri birinci ve ikinci yüklemde birbirine yakın değerlerdir. Kurutulmuş Y.Ağaçlı kömürlerinde ise birinci yüklemdeki ortalama baca gazı sıcaklığı değerleri, ikinci yüklemdeki ortalama baca gazı sıcaklığı değerlerinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Harman kömürde birinci yükleme için ortalama baca gazı sıcaklığının, ikinci yüklemde daha düşük olduğu görülmektedir. Ortalama baca gazı sıcaklıklarındaki bu değişim ile NO_x değişim grafiği arasında bir paralellik görülmektedir. %15 nemli kömür için ortalama NO_x değeri birinci yüklemde 240 mg/m³ iken ikinci yüklemde ortalama değer 190 mg/m³ tür.



Şekil 5.2. Azim Kazan Deneylerinde SO₂ Emisyonları Değişimi
(1. Grup, 1. ve 2. Yükleme)



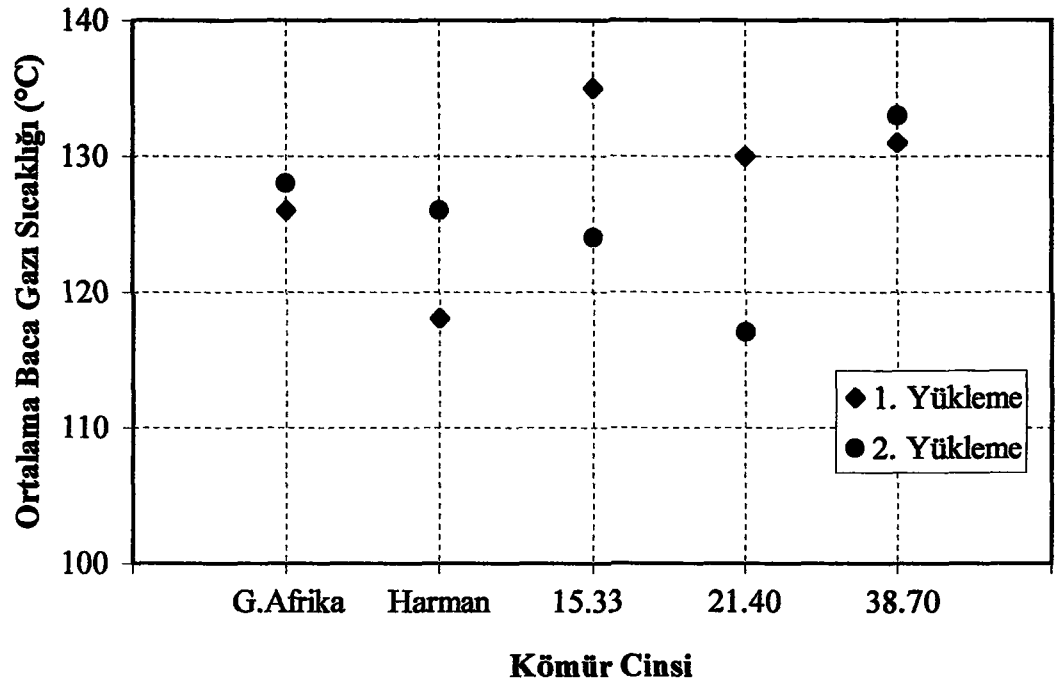
Şekil 5.3. Azim Kazan Deneylerinde NO_x Emisyonları Değişimi
(1. Grup, 1. ve 2. Yükleme)

G.Afrika kömürünün ısı değeri yüksek olması nedeniyle daha yüksek baca gazı sıcaklığı değerleri beklenirken, Şekil 5.4' de görüldüğü gibi G.Afrika kömürüne ait ortalama baca gazı sıcaklıklarının, Y.Ağaçlı kömürüne ait ortalama baca gazı sıcaklığı değerlerine çok yakın olduğu görülmektedir. G.Afrika kömürünün kül içeriğinin yüksek olması yanmayı yavaşlatmakta, ısı değeri düşürmekte dolayısıyla baca gazı sıcaklığı da düşmektedir.

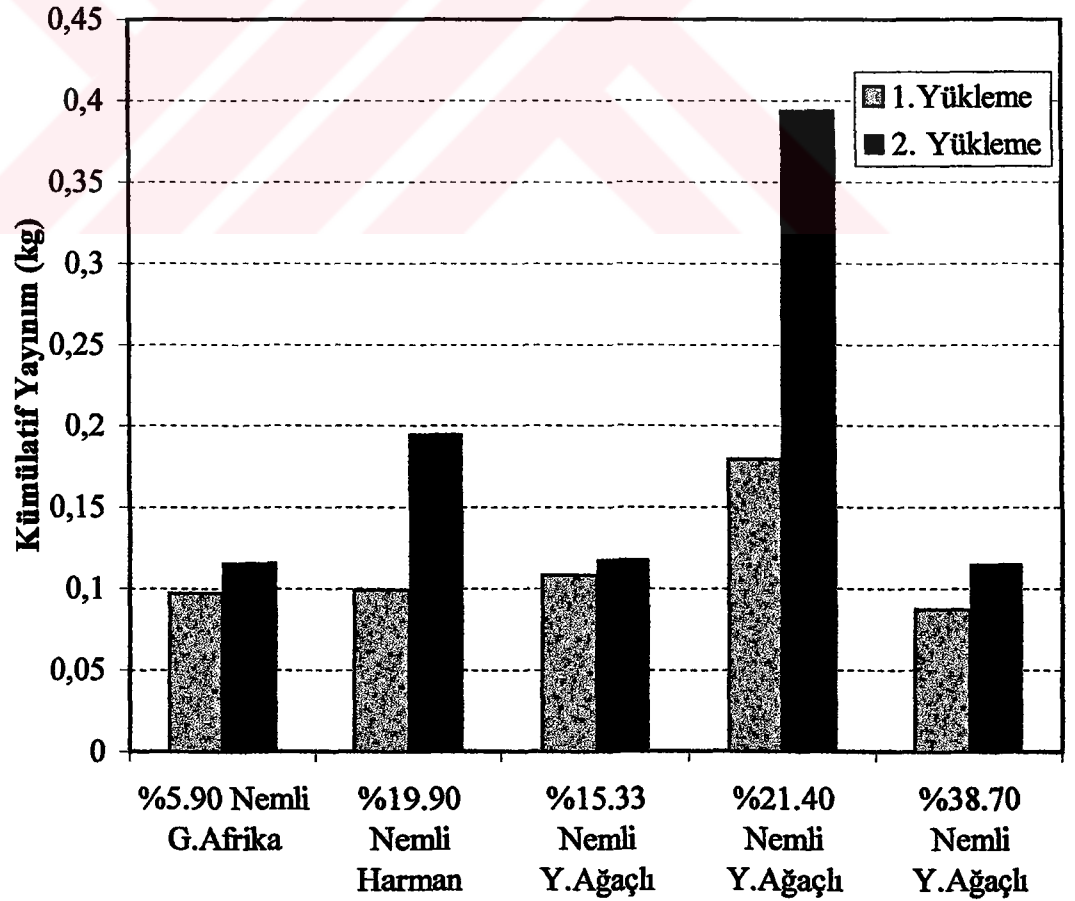
Kazan suyunun ve yanma odasının sıcak oluşu nedeniyle, ikinci yüklemedeki baca gazı sıcaklığı birinci yükleme göre daha yüksek değerler alır. Bu çalışmada hava şartlarının özellikle hava sıcaklığının etkisi fazladır. Deneysel çalışmalar, yılın tüm mevsimlerini kapsayacak uzun bir zaman periyodunda gerçekleşmiştir. Bu yanma koşullarında değişikliklere sebep olmakta ve deneysel sonuçlarda bazı durumlarda tutarsızlıklar oluşturabilmektedir. Ortalama baca gazı sıcaklıkları %15 ve %21 nemli kömürler için ikinci yüklemede düşük değerler almıştır. Bu değerlerin normalden farklı olması o günkü hava koşullarının değişiminden kaynaklanmaktadır.

Şekil 5.5' de kümülatif toz yayılımı değerlendirilmiştir. Toz emisyonlarının değerlendirilmesinde, her bir yanma deneyinde ölçülen ve %7 O₂ bazına indirgenen beş adet toz değişim değerlerinden ortalama toz değişim değerleri bulunabilir, sonuçlar birbiriyle mukayese edilebilir. Ancak yanma, başlangıç (uçucu madde çıkışı), kararlı yanma (yarı kok yanması) ve sönme olmak üzere yanmanın üç rejinde olduğu gözönüne alındığında, ortalama toz konsantrasyonları yerine her bir yanma için kümülatif toz yayılım miktarlarının hesaplanarak, değerlendirmenin buna göre yapılması daha doğru olacaktır. Grafikten görüleceği üzere birinci yüklemede en düşük toz yayılımı en yüksek rutubete sahip Y.Ağaçlı kömüründe gözlenmiştir. En yüksek toz yayılımı ise %21 nemli kurutulmuş Y.Ağaçlı kömüründe tespit edilmiştir. Birinci yüklemede orijinal Y.Ağaçlı (%38'lik) ve %15 rutubetli kurutulmuş Y.Ağaçlı kömürlerine ait kümülatif toz yayılım miktarları arasındaki fark mertebe olarak yaklaşırken, %21 rutubetli kömüre ait kümülatif toz yayılım değerleri mertebe olarak diğer iki kömüre göre daha fazla fark göstermiştir.

İkinci yükleme durumunda da en yüksek toz yayılımının ara nem içerikli %21 rutubetli kurutulmuş Y.Ağaçlı' ya ait olduğu şekilde gözlenmektedir. Bu yüklemede en az toz yayılımı %15 nemli kurutulmuş Y.Ağaçlı kömürü ile gerçekleşmektedir. Ancak birinci yüklemedeki sonuçlara paralel olarak bu yüklemede de orijinal yüksek rutubetli Y.Ağaçlı ile %15 nemli (en düşük rutubetli) kurutulmuş Y.Ağaçlı



Şekil 5.4. Azim Kazan Deneylerinde Ortalama Baca Gazı Sıcaklıkları (1. Grup, 1. ve 2. Yükleme)



Şekil 5.5. Azim Kazan Deneylerinde Toz Emisyonlarının Kümülatif Yayınım Değerleri (1. Grup, 1. ve 2. Yükleme)

kömürlerinin toz yayınımlarındaki mertebe farkı, %21 nemli kömür ile aralarındaki fark kadar yüksek değildir.

Orijinal Yeniköy Ağaı ve Güney Afrika kömürünün karışımı ile hazırlanan harman kömüre ait toz emisyonları birinci ve ikinci yüklemelerde de en düşük seviyelerdedir. Başka bir ifade ile, tek olarak yakıldığı zaman orijinal Y.Ağaı (%38 nemli) ve G.Afrika (%6 nemli) kömürlerinin toz yayınımları seviyesinde kalmaktadır. Bu kazanda gerçekleştirilen yanma deneyleri sonuçlarından CO emisyonunun nem içeriğı ile belirgin bir şekilde arttığı, SO₂ ve NO_x emisyonlarının fazla değışmediğı görölmüştür. %21 civarında nem içeren kurutulmuş Y.Ağaı kömüründe en yüksek toz emisyonu elde edilmiştir.

5.1.3 İkinci Grup Yanma Deneylerinin Sonuçları

Bu grup çalışmada, elle yüklemeli, sabit ızgaralı sıcak su kazanında (Azim kazan) yapılan deneylerde gaz ve toz emisyon ölçümleri yanmanın başlangıç ve kararlı hal durumlarında gerçekleştirilmiştir. Kömür sönmeye başladığı anda ölçüme son verilmiştir.

Bu grupta yakılan harman kömürün birinci yüklemesine ait sonuçlar Şekil B.1' de görölmektedir. Baca gazı sıcaklığının yükselmesi ile birlikte CO konsantrasyonu 1900 mg/m³' den 600 mg/m³' e düşmekte ve bu değerlerde değışmektedir. Baca gazı sıcaklığının artışı ile beraber SO₂ ve NO_x konsantrasyonları zamanla artmakta, yanmanın 50. dakikasıdan itibaren değışmemektedir. Yanma şartlarındaki olumsuzluklar, O₂' nin %18 dolayında değerler almasından da net olarak görölebilmektedir.

Harman kömürün ikinci yüklemesinde (Şekil B.2) CO birinci yüklemeye benzer şekilde davranım göstermektedir. Baca gazı sıcaklığının 40. dakikadan sonra 120°C dolayında seyretmesiyle beraber SO₂ 300 mg/m³ ve NO_x de 60 mg/m³ civarında değışmektedir. %O₂ değerleri kararlı yanmanın sonlarına doğru %15 değerine inerken, CO₂' de %6 değerine yaklaşmaktadır.

Şekil B.3 ve B.4' de verilen, harman kömüre ait toz emisyon değerleri birinci yüklemelerde 40 ve 115 mg/m³ arasında değışmektedir. Yanmanın başlangıcında artan toz emisyonu 40. dakikadan sonra düşme göstermiştir. Bu çalışmada da O₂' nin yüksek değerlerde olması %7 O₂ bazındaki toz konsantrasyonlarının aşırı yükselmesine sebep olmaktadır. İkinci yüklemeye ait toz konsantrasyonu değerleri

ise şekilden de görüleceği gibi mertebe olarak birinci yüklemeye çok yüksek değerlerdir.

%15 dolayında kurutulmuş Yeniköy Ağaçlı kömüründe CO, Şekil B.5' de görüleceği üzere 4500 mg/m³ konsantrasyon değerine doğru hızlı bir şekilde yükselişe geçmiştir. Baca gazı sıcaklığının yükselerek, 150°C dolayındaki değerlerde değişmesiyle beraber daha düşük emisyon değerleri görülmektedir. Bu sırada %O₂ de, %13.5 değerine kadar inerek bir süre burada sabitlenmiştir. SO₂, başlangıçtaki 500 mg/m³ değerinden 1500 mg/m³ değerine kadar yükselmekte, daha sonra zamanla azalan emisyon değerleri göstermektedir.

İkinci yüklemde Şekil B.6' da görüldüğü gibi, %15 civarında kurutulmuş Y.Ağaçlı kömüründe CO, yanmanın ilk 50 dakikası süresince 2000-3500 mg/m³ arasında yüksek değerler göstermektedir. %O₂ miktarının azalması ve baca gazı sıcaklığının 210°C' de maksimum değer göstermesiyle beraber CO konsantrasyonu düşmüştür. SO₂ konsantrasyonu birinci yüklemde SO₂ değerlerine yakın değişim göstermektedir. Baca gazı sıcaklığının artmasıyla beraber NO_x de görülen düşük değerlerdeki artış yanma süresince devam etmektedir. Yanmanın başlangıcında %16.5 olan O₂ konsantrasyonu 40. dakikada %12' ye düşerken, CO₂ de %9' a yakın değerler almaktadır.

%15 nemli kömüre ait toz konsantrasyonları Şekil B.7 ve Şekil B.8'de görüldüğü gibi; birinci yüklemde 50-100 mg/m³ arasında, ikinci yüklemde ise 90-125 mg/m³ arasında değişmektedir. İkinci yüklemde toz konsantrasyonun daha yüksek olduğu görülmektedir. İndirgenmiş toz emisyon değerleri birinci yüklemde; (%7 O₂) 150-250 mg/m³ arasında, ikinci yüklemde ise 200-350 mg/m³ arasında değişmektedir.

Kurutulmuş %21 nemli Y.Ağaçlı kömürünün yanmasında, birinci yüklemeye ait gaz emisyonu ve baca gazı sıcaklığı değerleri Şekil B.9' da verilmiştir. Burada 1500 mg/m³' den 500 mg/m³ değerine düşen CO konsantrasyonu, kararlı yanmanın ortalarında ani bir çıkışla 3000 mg/m³ değerini almaktadır. 1. grup, %21 nemli kömür ile yapılan deneyde gözlenen patlama bu deneyde de tekrar meydana gelmiştir. Bu patlama esnasında yanmanın kararlılığı bozulmuş ve CO hızla yükselmiştir. SO₂ ve NO_x baca gazı sıcaklığı ile beraber artarak belli değerler arasında salınım göstermektedir. Bu çalışmada %O₂ değerleri yanmanın ortalarında

%13.5' e düşerken doğal olarak CO₂ %7.5 değerini almaktadır. Yanma, kararlı rejim olarak ne kadar tanımlansa da %O₂ tekrar %18 mertebelerine kadar yükselmektedir.

%21 neme kurutulmuş Y.Ağaçlı kömürünün ikinci yüklemesinde de, birinci yüklemeye yakın değerlerde değişen CO konsantrasyonunun, 50. dakikada 3700 mg/m³ değerine kadar yükseldiği Şekil B.10' da görülmektedir. NO_x ve SO₂ baca gazı sıcaklığı ile beraber artarak yanmanın sonuna kadar aynı değerlerde kalmaktadır. NO_x birinci yüklemeye yakın değerlerde değişim gösterirken, SO₂ ikinci yüklemeye biraz daha yükselerek 1600 mg/m³ değerine kadar çıkmaktadır. Bu, ikinci yüklemedeki baca gazı sıcaklığının 210°C' ye yükselerek birinci yüklemeden daha yüksek değerler almasından kaynaklanmaktadır. O₂ ise kararlı yanmanın ortalarında %11.5 değerine kadar inmiş daha sonra yükselişe geçmiştir.

%21 neme kurutulmuş Y.Ağaçlı kömürüne ait toz konsantrasyonları ise Şekil B.11 ve Şekil B.12' de görülmektedir. Tüm yanma deneyleri içerisinde %21 neme kurutulmuş Y.Ağaçlı kömürü görece yüksek toz konsantrasyonu değerleri göstermektedir. Birinci yüklemeye toz konsantrasyonları 140-300 mg/m³ arasında değişim göstermektedir. İkinci yüklemeye yanmanın başlangıcındaki toz konsantrasyonunun indirgenmiş değerinin (%7 O₂) 960 mg/m³ gibi yüksek bir değer olduğu görülmektedir. Bu da Azim kazanda yanma havasının kontrol edilememesinden dolayı, yakma için gerekli olan yanma havasının fazla miktarda sisteme girmesinden kaynaklanmaktadır. Hava fazlalık katsayısının yüksek olması ile O₂ yüksek değerler almakta, bundan dolayı da indirgenmiş toz değeri yüksek çıkmaktadır.

Şekil B.13' de orijinal Y.Ağaçlı (%37.10 nemli) kömürünün birinci yüklemesinde baca gazı sıcaklığının çok yavaş bir eğim ile arttığı görülmektedir. Burada yanmanın başlangıcındaki gecikme doğal olarak yanma gazlarını da etkilemektedir. Yanmanın başlangıcından itibaren 60 dakika sonra baca gazı sıcaklığı maksimum değerine ulaşabilmektedir. Bu anda CO konsantrasyonu 2000 mg/m³' den 800 mg/m³' e düşmekte ve bu mertebelerde bir süre değişim göstermektedir. Baca gazı sıcaklığı ile artış gösteren SO₂ ve NO_x bir süre ulaştıkları emisyon değerlerinde sabit kalmakta, daha sonra SO₂ 550 mg/m³' e inmektedir. O₂, baca gazı sıcaklığı maksimum olduğu anda en düşük değerini göstermektedir. Bu zaman dilimini yanmanın en kararlı rejimi olarak tanımlamak mümkündür.

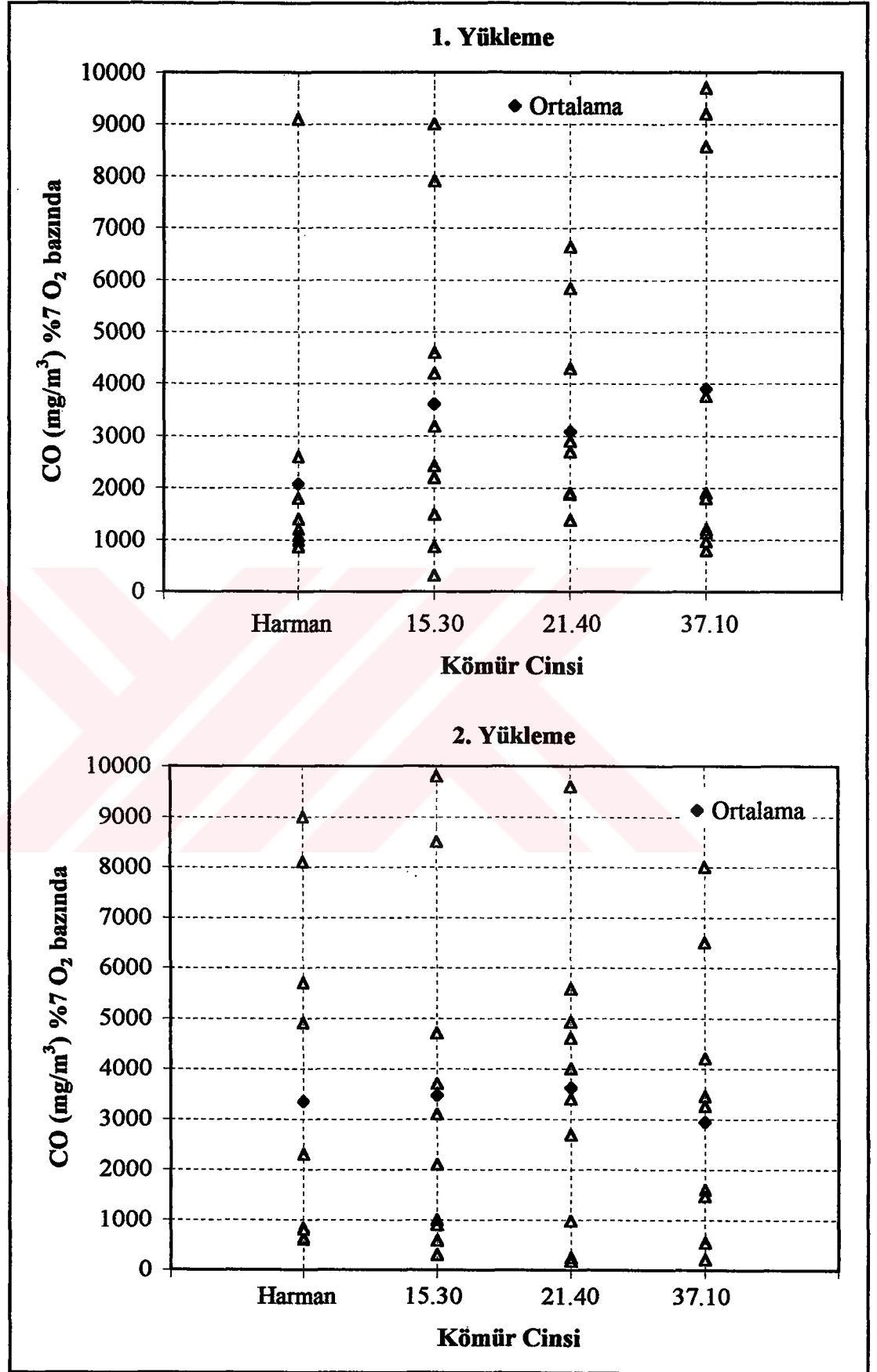
Orijinal kömürde, ikinci yüklemede Şekil B.14' de görüldüğü gibi baca gazı sıcaklığı bu yüklemedeki yanma rejiminde de yavaş olarak yükselmektedir. Fakat eğimi birinci yüklemeye oranla daha diktir. İkinci yüklemede kömür sıcak bir yatak içerisine yüklendiğinden baca gazı sıcaklığı birinci yüklemeye oranla daha hızlı yükselmekte, yanma daha çabuk başlamaktadır. Birinci yüklemede 1000 mg/m^3 değişim gösteren SO_2 değerleri, ikinci yüklemede 2000 mg/m^3 değerine kadar çıkmıştır. Yanmanın başlangıcında 2900 mg/m^3 olan CO konsantrasyonu değeri, 40. dakikada 400 mg/m^3 e kadar düşmüştür. NO_x konsantrasyonu diğer yanma deneylerinde olduğu gibi baca gazı sıcaklığı ile paralel olarak değişim göstermektedir. İkinci grup yanma deneyleri içerisinde en düşük O_2 miktarı bu deneyde gözlenmiştir. Bu sonuç, bu çalışmada biraz daha kontrollü bir yanmanın meydana geldiğinin bir göstergesidir.

Orijinal kömüre ait Şekil B.15 ve Şekil B.16'da toz emisyonları grafiklerinden, birinci ve ikinci yüklemede toz emisyonlarının birbirine yakın mertebelerde olduğu, ikinci yüklemede biraz daha yüksek değerlerde değiştiği görülmektedir. Buradaki toz emisyon değerlerinin %15 neme kurutulmuş kömürün toz emisyon değerlerine yakın olduğu görülmektedir.

5.1.4 İkinci Grup Yanma Deneylerinin Değerlendirilmesi

Bölüm 5.1.3'de detaylı olarak verilen yanma deneyleri sonuçlarını genel olarak mukayese edebilmek için, birinci gruptaki yanma deneylerinde olduğu gibi aynı O_2 temelinde değerlendirmek daha doğru olacaktır. Bu grupta kullanılan tüm kömürlerin birinci ve ikinci yüklemelerine ait CO değişimi (%7 O_2 temelinde) Şekil 5.6' da, SO_2 değişimi (%5 O_2 temelinde) Şekil 5.7' de, NO_x değişimi (%5 O_2 temelinde) Şekil 5.8' de, ortalama baca gazı sıcaklıkları değişimi Şekil 5.9' da ve kümülatif toz yayılım değerleri Şekil 5.10' da verilmiştir.

Şekil 5.6' da, CO değerlerinin birinci yüklemede 4000 mg/m^3 altında yığılma gösterirken, ikinci yüklemede 5000 mg/m^3 altında yoğunlaştığı görülmektedir. Bu değerler, birinci grup CO değişim grafiği ile mukayese edildiğinde daha yüksek olduğu görülmektedir. Y.Ağaçlı kömürleri arasında, birinci yüklemede CO konsantrasyonunda en yüksek ortalama değer orijinal kömürdedir. Bölüm 5.1.2' de ifade edildiği kömürün nem içeriğinin yüksek olması yanmayı geciktirici önemli bir etkidir. İkinci yüklemedeki kurutulmuş kömürlere ait CO değerleri, orijinal kömüre



Şekil 5.6. Azim Kazan Deneylerinde CO Emisyonları Değişimi
(2. Grup, 1. ve 2. Yükleme)

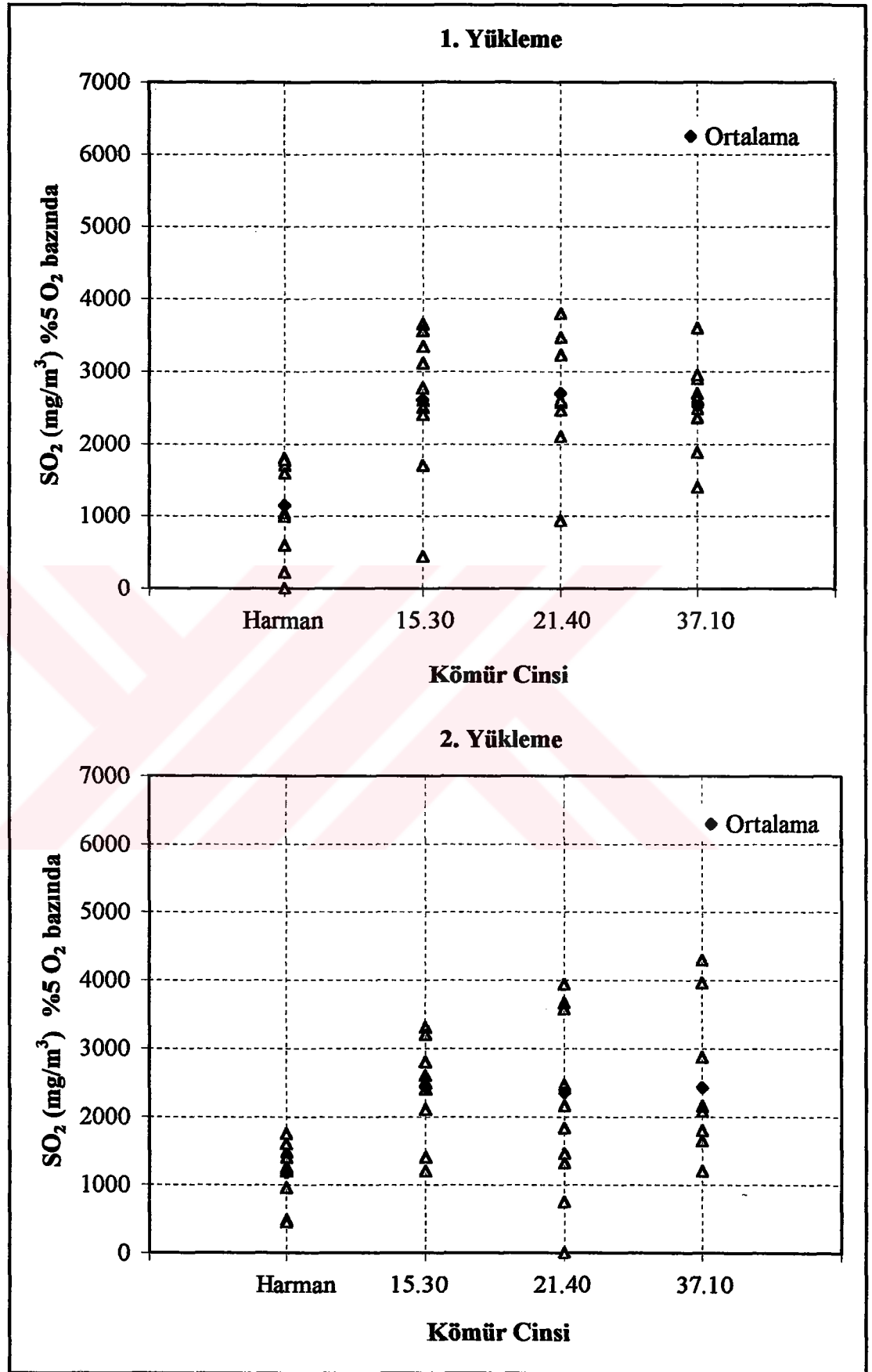
yakın değerlerdedir. Harman kömür ise birinci yüklemede daha kontrollü olarak yanmıştır. Birinci yüklemede CO 3000 mg/m³ altında yığılım gösterirken, ikinci yüklemede 500-9000 mg/m³ gibi geniş bir aralıkta değişim göstermektedir.

SO₂ emisyon değişim grafiğinden (Şekil 5.7) her iki yüklemede de kurutulmuş ve orijinal kömüre ait SO₂ değerlerinin aynı aralıkta değişim gösterdiği görülmektedir. Harman kömürün SO₂ değerleri, kükürtü düşük olan G.Afrika kömürü ile karışım yaparak oluşturulduğu için doğal olarak düşme göstermiştir. Bu gruptaki kömürlere ait SO₂ emisyonu ortalama değerleri, birinci grupta tespit edilen ortalama SO₂ değerlerinden daha düşüktür. Yakılan kömürlerin kükürt içeriğindeki değişim bu farklılığa sebep olmaktadır.

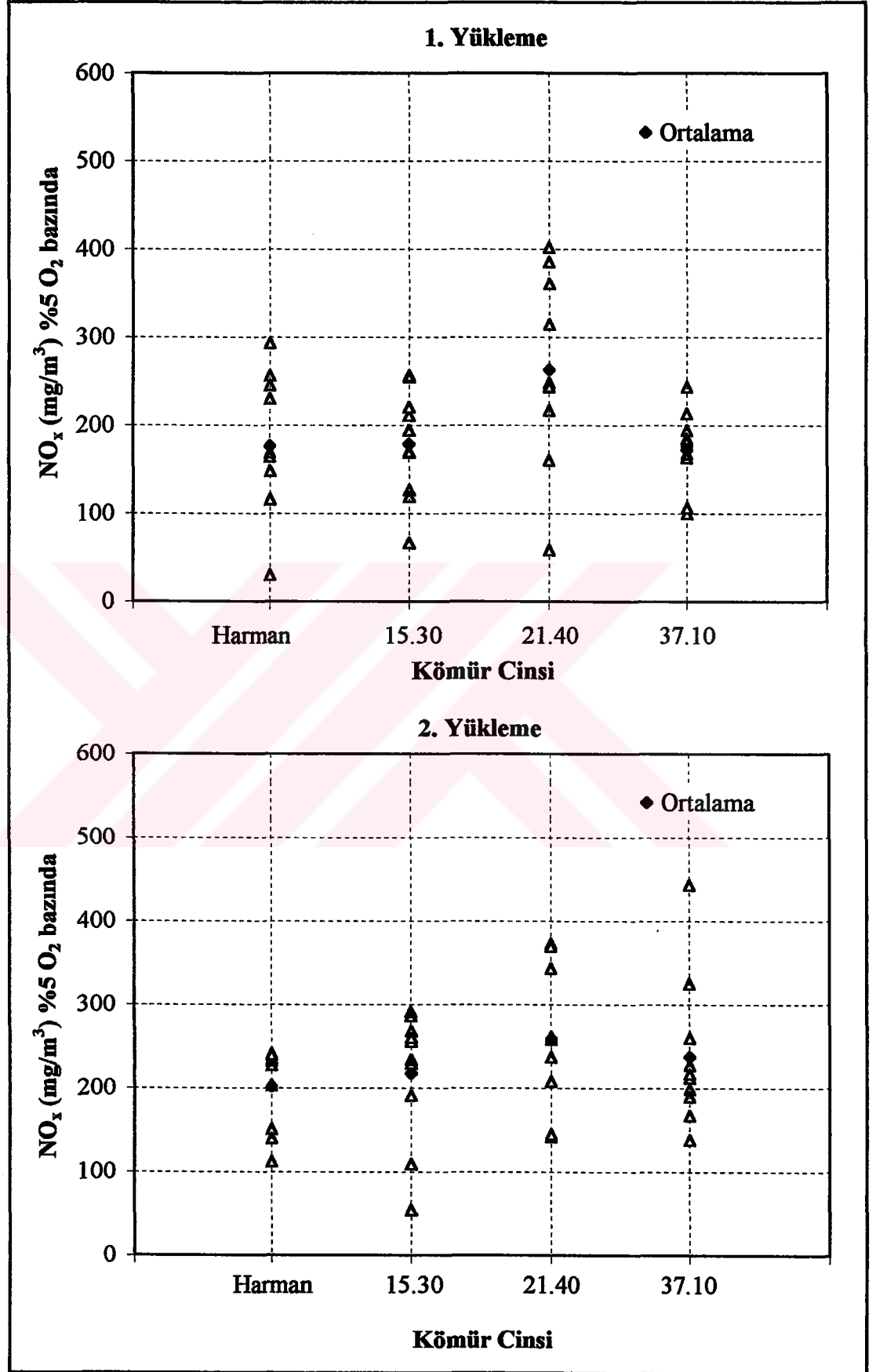
Şekil 5.8' de görüleceği üzere, NO_x değerleri 300 mg/m³ altında yığılım göstermektedir. İkinci yüklemede şekilden de görüleceği gibi benzer değişim meydana gelmektedir. NO_x değerleri baca gazı sıcaklığındaki değişimlere bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir.

Ortalama baca gazı sıcaklığı değişim grafiği Şekil 5.9' da verilmektedir. Şekilden görüldüğü gibi, dört kömür için ikinci yükleme için ortalama baca gazı sıcaklık değerleri birinci yükleme için oranla daha yüksektir. İkinci yüklemede kömürün sıcak yatak ortamına beslenmesi sebebiyle, yanma doğal olarak daha yüksek sıcaklıklarda gerçekleşmektedir. %21 nemli kurutulmuş Y.Ağaçlı kömürü en yüksek ortalama baca gazı sıcaklığı değerini, Harman kömür ise her iki yüklemede de en düşük ortalama baca gazı sıcaklığı değerlerini göstermektedir. Y.Ağaçlı kömürünün G.Afrika kömürü ile harmanlanmasıyla, yanmanın yavaşladığı harman kömüre ait baca gazı ortalama sıcaklıklarından görülmektedir.

Toz emisyonlarının kümülatif yayılım değerleri grafiğinde (Şekil 5.10) en düşük toz yayılımının en yüksek neme sahip orijinal (%37 nemli) Y.Ağaçlı kömüründe olduğu görülmektedir. Birinci yükleme için harman ve %15 nemli Y.Ağaçlı kömürüne ait toz emisyonları ise mertebe olarak birbirine çok yakındır. %21 nemli kurutulmuş Y.Ağaçlı kömürü ise en yüksek toz yayılımını göstermektedir. Bu grafik Azim kazanda birinci grup yanma deneylerine ait olan (Şekil 5.5) toz yayılım değerleriyle oldukça benzerlik göstermektedir. %21 nemli kömür ikinci grup çalışmada da en yüksek toz yayılımını göstermiştir. Birinci grup çalışmada ikinci yükleme değerleri, birinci yükleme için oranla biraz da yüksektir. İkinci grup çalışmada ise, harman



Şekil 5.7. Azim Kazan Deneylerinde SO₂ Emisyonları Değişimi
(2. Grup, 1. ve 2. Yükleme)



Şekil 5.8. Azim Kazan Deneylerinde NO_x Emisyonları Değişimi
(2. Grup, 1. ve 2. Yükleme)

kömür iki yüklemede birbirine çok yakın değerler alırken diğer üç kömürde ikinci yüklemedeki toz değerleri 1. grup çalışmada olduğu gibi daha yüksek çıkmıştır.

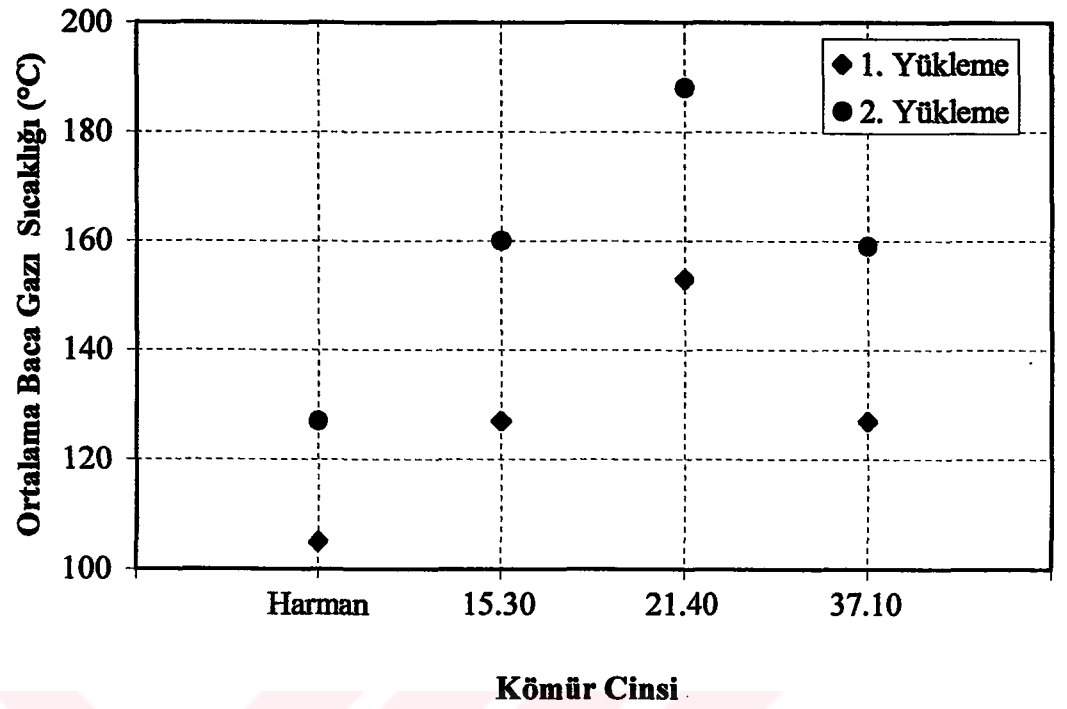
Azim kazanda yapılan iki grup çalışmada Şekil 5.5 ve 5.10' dan da görüleceği üzere ikinci yüklemedeki kümülatif toz yayınımlarının birinci yüklemeden daha yüksek olduğu görülmektedir. Birinci yüklemede kömür, tutuşma için oluşturulmuş kor üzerine yüklenmekte ve kömürün ısınması ve daha sonraki kademedeki tutuşma ve yanması ikinci yükleme göre daha yavaş gerçekleşmektedir. Çünkü ikinci yüklemede kömür, birinci yüklemeden daha yüksek sıcaklıktaki yatak ortamına beslenmektedir. Dolayısıyla ikinci yüklemede nem ve uçucu madde çıkışı birinci yükleme göre daha hızlıdır. Hızlı yanmanın tüm kömür yüzeyinde aynı anda başlaması yanmayı olumsuz hale getirdiğinden CO ve toz konsantrasyonu da artmaktadır.

Şekil 5.1 ve 5.6' da birinci ve ikinci grup yanma deneylerine ait CO emisyonu grafiklerinden her iki grup için ikinci yüklemedeki ortalama CO konsantrasyon değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Orijinal kömürdeki CO emisyonlarının, kurutulmuş kömürlere kıyasla yüksek değerler aldığı görülmektedir.

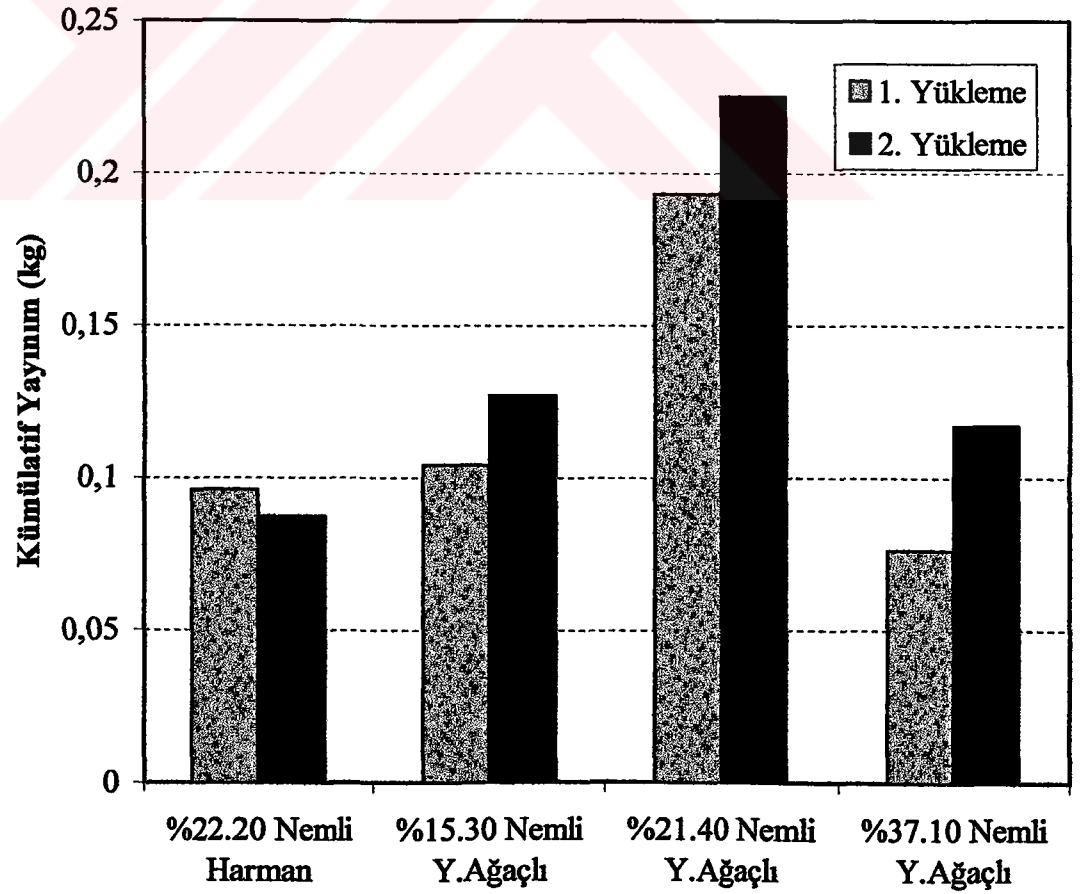
5.2 Otomatik, Hava Kontrollü Sıcak Su Kazanı ve Elle Yüklemeli, Sabit Izgaralı Sıcak Su Kazanında Yapılan Yanma Deneyleri

Bu bölümde deneylerin büyük bir kısmı daha öncede ifade edildiği gibi otomatik, hava kontrollü sıcak su kazanı (Fischer kazan) üzerinde yapılmıştır. Bölüm 4.5.3' de detaylı olarak tanıtılan Fischer kazan, gerek hava kontrol sistemi gerekse kömür besleme sistemi bakımından kullanıcı inisiyatifinin en düşük seviyede olduğu ve elle besleme yapılan kazanların getirdiği olumsuzlukları azalttığından tercih edilmiştir. Bu kazanda en iyi sonucu veren kurutulmuş kömür ile orijinal kömür kullanılarak elle yüklemeli, sabit ızgaralı sıcak su kazanında (Azim kazan) iki deney yapılmıştır.

Yanma deneylerinin daha detaylı bir çalışması olan bu bölüm 3. Grup yanma deneyleri olarak adlandırılmıştır. Bölüm 4.1' de tanıtılan, Tablo 4.1' de analiz değerleri verilen kömürlerle Fischer kazanda yanma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Buradaki iki farklı nem içerikli Yeniköy Ağaçlı kömürü Azim kazanda yakılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Fischer kazan deneylerinde ölçülen gaz emisyonu, baca gazı sıcaklığı, baca çekişi, toz emisyonlarının zamana göre değişimleri Şekil C.1 –



Şekil 5.9. Azim Kazan Deneylerinde Ortalama Baca Gazı Sıcaklıkları (2. Grup, 1. ve 2. Yükleme)



Şekil 5.10. Azim Kazan Deneylerinde Toz Emisyonlarının Kümülatif Yayınım Değerleri (2. Grup, 1. ve 2. Yükleme)

Şekil C.27' de verilmiştir. Şekil C.28 ve Şekil C.35' de ise Azim kazanda yapılan deneylerin sonuçları yer almaktadır.

Bu bölümde, baca çekişi, birinci ve ikinci hava ayar klapelerinin açıklıkları değiştirilerek yakma havasının miktarı baca gazındaki O_2 miktarının %7 civarında gerçekleşmesine göre ayarlanmıştır. Tüm kömürlerin yanma deneylerine ait baca çekişi-zaman grafiklerinden görüleceği gibi, yanma süresince baca çekişi sürekli kontrol edilerek sabit tutulmaya çalışılmıştır.

Fischer kazanda yapılan deneylerde kömür yüklemesi bir defa yapılmıştır. Baca gazı içindeki CO emisyonu ile O_2 ve CO_2 (%) değerlerinin zamana göre değişimleri incelendiğinde, ocaktaki yanmanın Azim kazandaki birinci grup yanma deneylerinde olduğu gibi üç rejimde olduğu görülmektedir. Bunlar sırasıyla tutuşma, kararlı yanma ve sönme rejimleridir. Deney başlangıcında görülen CO artışı ve maksimum değere ulaştıktan sonra minimuma kadar düştüğü ilk bölge tutuşma rejimini oluşturmaktadır. Bu rejimi takiben CO, deney süresince o deneyin özelliklerine bağlı olarak indiği düşük seviyelerde değerler almakta ve buna paralel olarak, CO_2 artarken O_2 düşmektedir. Son rejimde ise ocak içindeki kömür miktarı azaldığından ve tamamına yakın kısmı yanma reaksiyonuna katıldığından dolayı baca gazı içindeki O_2 miktarı artarken CO_2 miktarı azalmaktadır. Ocaktaki soğuma, gazların karışma şartlarının bozulması ve ızgara üzerinde yer yer cüruf tabakası oluşmasına sebep olmakta ve bu nedenle sönme rejiminde CO emisyonunda artma görülmektedir.

Şekil C.1-Şekil C.3' de Soma kömürüne ait sonuçlar yer almaktadır. Şekil C.1' de görüleceği üzere CO yanma süresince 30-2100 mg/m³ arasında salınımlar göstermektedir. SO_2 ve NO_x baca sıcaklığı ile bir süre artmakta deney sonuna doğru düşük değerler almaktadır. Baca gazı sıcaklığı 350-160°C arasında değişmektedir. Deneyin başında ve sonundaki toz değerleri kararlı durumdaki rejime oranla daha düşüktür.

Harman kömüre ait gaz emisyonları, baca çekişi ve toz emisyonları Şekil C.4-Şekil C.6' da görülmektedir. Yanmanın ilerlemesiyle beraber SO_2 ve NO_x artmakta, bir süre yakın değerlerde seyrettikten sonra tekrar azalmaktadır. CO ise yanmanın başlangıcında 1200 mg/m³ değerinde iken, hızlı bir şekilde 4000 mg/m³'e kadar yükselmektedir. Deney süresine O_2 , %12 dolayında değişirken, 150. dakikadan

itibaren %9 da bir süre sabit kalmakta, baca gazı sıcaklığının düşmesiyle beraber de artmaktadır. Baca çekişi 35-54 Pa arasında salınım yapmaktadır. Buradaki toz konsantrasyonu kararlı rejimin ilk aşamasında yüksek değerde iken, daha sonra zamanla düşmektedir.

Güney Afrika kömürü, Soma ve Harman kömürlerine oranla daha iyi yanmıştır. CO konsantrasyonu değerlerinde (Şekil C.7) de bu görülmektedir. Yanmanın başlangıcında 1100 mg/m^3 olan CO, 120. dakikada 20 mg/m^3 değerine kadar düşmüş, daha sonra tekrar 1000 mg/m^3 mertebelerinde seyretmiştir. Baca gazı sıcaklığı ile paralel olarak SO_2 ve NO_x değişim göstermektedir. Baca çekişi (Şekil C.8) deneyin ilk 180 dakikası 40 Pa civarında değişmekte daha sonra 50 Pa' a çıkmaktadır. Şekil C.9' dan görüleceği gibi toz konsantrasyonu ilk değerde yüksek gözlenirken daha sonrakilerde düşük değerler almıştır.

% 10.80 neme kurutulmuş Y.Ağaçlı kömürüne ait deney sonuçları Şekil C.10-Şekil C.12' de verilmiştir. CO, 2700 mg/m^3 değerinde kademeli olarak deney sonuna kadar 500 mg/m^3 e düşmektedir. Baca gazı sıcaklığı uzun süre 450°C de değişim gösterdikten sonra düşmeye başlarken, %3 den %10 çıkan O_2 , daha sonra %16 değerine doğru tırmanışa geçmiştir. Baca çekişi 40-50 Pa arasında değişim göstermektedir. %7 O_2 ye indirgenmiş toz değerleri O_2 nin yanma sonunda yükselmesi nedeniyle yüksek değerler almıştır.

Şekil C.13-Şekil C.15' de ise %15 nemli Y.Ağaçlı kömürüne ait deney sonuçları görülmektedir. Baca gazı sıcaklığı $400-500^\circ\text{C}$ gibi yüksek sıcaklıkta değişim göstermesine rağmen, CO miktarı 2700 mg/m^3 e yükselmekte daha sonraları azalmaktadır. Yanmanın başında O_2 %3 gibi oldukça düşük değerde iken, 60. dakikadan sonra lineer bir şekilde artmaktadır. Toz konsantrasyonu yanma süresine farklı değerler almamaktadır, buradaki toz konsantrasyonu %10 nemli Y.Ağaçlı kömürüne oranla daha düşük değerler almıştır.

%17 civarına kurutulmuş Y.Ağaçlı kömürü ile yapılan deneye ait sonuçları Şekil C.16-Şekil C.18' de görülmektedir. Baca gazı sıcaklığının 400°C de olduğu durumda %4 olan O_2 bu değerde bir süre sabit kaldıktan sonra artmaya başlamış, bu sırada CO_2 düşüşe geçmiştir. Yanmanın sonunda O_2 %13.5, CO_2 ise %7.2 değerlerini almıştır. SO_2 ise yanmanın 60. dakikasında 2600 mg/m^3 değerine yükseldikten sonra

iniş geçmiştir. Baca çekişi ise çok fazla değişim göstermeden 43 Pa dolayında seyretmiştir. Toz konsantrasyonları ise %15 nemli kömüre yakın değerlerdedir.

%21.80 neme kurutulmuş kömürde CO, O₂, CO₂ ve baca gazı sıcaklığı mertebeleri Şekil C.19' da görüldüğü üzere %15 ve %17 nemli kömürlere yakın mertebelerdedir. CO kararlı yanma aşamasında ani bir yükselme göstererek yanmanın başlangıcındaki 1500 mg/m³ konsantrasyona yükselmiş, tekrar düşmüştür. Yanma esnasında, yanma ortamında patlamalar duyulmuştur. Baca çekişi ise 30 Pa civarında olup biraz daha düşüktür (Şekil C.20). Toz konsantrasyonları diğer kömürlerin toz konsantrasyonlarından oldukça yüksek değerler almıştır (Şekil C.21). Özellikle sönme aşamasındaki O₂ nin yüksek olması nedeniyle baca şartlarında 95 mg/m³ olan toz konsantrasyonu, %7 O₂ bazına indirgendiğinde 240 mg/m³ olarak hesaplanmıştır.

Şekil C.22-Şekil C.24' de %24 nemli Y.Ağaçlı kömürüne ait sonuçlar yer almaktadır. Deneyde kararlı yanma süresince O₂ %10 dolayında salınım yapmaktadır. Baca gazı sıcaklığı fazla değişim göstermemektedir. Yanmanın başlangıcında 290°C de olup, kararlı yanma süresince 340°C dolayında sabitlenmiştir. Kararlı yanma aşamasında SO₂ konsantrasyonu 2000 mg/m³ ve NO_x 400 mg/m³ de değişmektedir. Baca çekişi diğer yanma çalışmalarından daha düşük bir değer olup 20 Pa' da değişmeden yanma süresince sabit kalmıştır. Toz konsantrasyonu yanmanın başlangıcında 170 mg/m³ iken yanmanın diğer kademelerinde 50 mg/m³ dolayındadır.

Otomatik, hava kontrollü sıcak su kazanında yapılan bu gruba ait son deney olan %37 nemli orijinal Y.Ağaçlı kömürüne ait sonuçlar ise Şekil C.25-Şekil C.27' de görülmektedir. Baca gazı sıcaklığının 300°C de seyrettiği bu yanmanın 45. dakikasında O₂ %3 e kadar inmiş, yanma süresince %6 dolayında değişmiştir. CO oldukça düşük seviyelerde seyrederken, SO₂ ve NO_x yanma süresince sıcaklığa bağlı olarak artmış, daha sonra düşüşe geçmiştir. Baca çekişi bu gruptaki diğer deneylere kıyasla en düşük değerde 10 Pa' da değişmektedir. Toz konsantrasyonu ise %15, %17 nemli kömürlere yakın mertebelerdedir.

Yakma havasının büyük bir kısmı ocağa ızgaranın altından gönderilirken, bir miktar hava ise kömür tabakasının içinden geçirilerek ocağa sevk edilmektedir. Yanma tabakasının üstündeki kömür tabakasının büyük bir kısmından açığa çıkan uçucu madde hava ile birlikte sürüklenerek ocakta yanmaktadır. Yanıcı maddenin fazla

olması tutuşma rejiminde CO miktarının artmasının sebeplerinde biri olarak gösterilebilir.

Elle yüklemeli, sabit ızgaralı sıcak su kazanında yapılan deneylerde; Bölüm 5.1' de detaylı olarak verilen, daha önceki yanma deneylerinde olduğu gibi kazan anma ısı gücünü elde etmek için gerekli miktardaki kömür ard arda iki defa yüklenmiştir. İlk yüklenen kömürün yanması sonucunda, bu yükleme yapılmadan önce ızgara üzerindeki bulunan miktarda kor tabakası kaldığında ikinci yükleme yapılmıştır.

Hava ayarları, baca gazı içindeki O₂ miktarını %7 civarında tutmaya çalışılırken, aynı zamanda CO miktarını da düşürecek şekilde ayarlanmaya çalışılmıştır. Bu deneylerdeki hava ayarları, Azim kazanda gerçekleştirilen 1. ve 2. Grup yanma deneylerinden daha olumlu sonuçlanmıştır.

%18 neme kurutulmuş kömüre ait deney sonuçları Şekil C.28-Şekil C.31' de görülmektedir. %18 neme sahip Yeniköy Ağaçlı kömürü ile yapılan deneyde birinci yükleme periyodu sırasında yapılan şişleme işleminin sonucu CO miktarının artarak ölçüm aralığındaki maksimum değerini aldığı tespit edilmiştir. Bu kazanda hava kontrolü tam yapılamadığından; 1. yüklemede %O₂ , %13-%10, 2.yüklemede %10-%12 arasında salınım göstermiş, daha fazla düşürülememiştir. Baca gazı sıcaklığı Fisher kazana kıyasla 1.ve 2. yüklemede de oldukça düşük değerlerdedir. Baca çekişi ilk 60 dakikalık 1.yükleme süresinde 21 Pa iken ikinci yüklemede biraz daha yükselerek 25 Pa dolayında değişmiştir. Şekil C.31' deki toz değerlerinin ilk ikisi birinci yükleme, diğer ikisi ise ikinci yükleme aittir. İkinci yüklemedeki toz konsantrasyonları daha yüksektir.

Orijinal Yeniköy Ağaçlı kömürü (%36 nemli) ile yapılan deneyin sonucunda görülen CO' in ulaştığı maksimum değer ikinci yüklemenin hemen sonrasında görülmüştür. Bu yanma deneyine ait 1. ve 2. yükleme sonuçları Şekil C.32- Şekil C.35' de yer almaktadır. Buradaki baca gazı sıcaklığı ve O₂, %18 neme sahip kömüre ait sonuçlardan biraz daha yüksek değerlerdedir. Baca çekişi deneyin ilk 90 dakikasında 20 Pa da sabit kalırken daha sonra 25 Pa' a çıkmıştır. Toz emisyonları düşük konsantrasyonlardadır, fakat O₂ nin yüksek olması indirgenmiş (%7 O₂) toz değerlerinin yüksek çıkmasına neden olmuştur.

5.2.1 Otomatik, Hava Kontrollü Sıcak Su Kazanı ve Elle Yükleme, Sabit Izgaralı Sıcak Su Kazanı Deneylerinde Elde Edilen Karakteristik Büyüklükler

Deneylerin değerlendirilmesi yakıt alt ısı değeri, kazan kapasitesi, yakıt sarfiyatı, hava fazlalık katsayısı, ortalama baca gazı sıcaklığı ve kazan verimi büyüklükleri yardımı ile yapılmıştır. Bu büyüklüklere ilave olarak boyutsuz yakıt sarfiyatı ve boyutsuz kazan kapasitesi tanımlanmıştır.

Boyutsuz yakıt sarfiyatı, TS 4040 (1983) da kazan anma ısı gücüne ve kömür besleme sistemine bağlı olarak verilen asgari kazan verimi ve kazan anma ısı gücü kullanılarak tarif edilmiştir. TS 4040' (1983) a göre yakıt sarfiyatı;

$$\frac{\text{Kazan anma ısı gücü (80000 kkal/h)}}{\text{Kömürün alt ısı değeri x TS 4040' a göre istenen asgari kazan verimi}} \quad (5.1)$$

oranı ile hesaplanmıştır.

Fischer kazan otomatik yükleme olarak kabul edilerek 80000 kkal/h kazan kapasitesi için TS 4040 (1983) standardında istenen asgari kazan verimi %74 olarak belirlenmiştir. Aynı standartta elle yükleme Azim kazan için asgari kazan verimi %71 olarak saptanmıştır.

Boyutsuz yakıt sarfiyatı;

$$\frac{\text{Deneyde tespit edilen yakıt sarfiyatı}}{\text{TS 4040' a göre yakıt sarfiyatı}} \quad (5.2)$$

Boyutsuz kazan kapasitesi;

$$\frac{\text{Deneyde bulunan kazan kapasitesi}}{\text{Kazan anma ısı gücü (80 000 kkal/h)}} \quad (5.3)$$

oranı ile hesaplanmıştır.

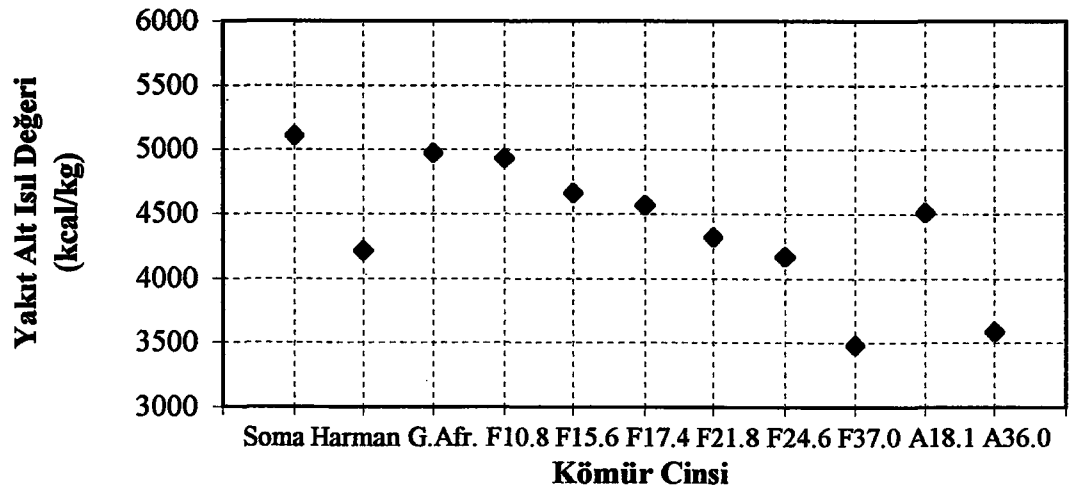
Tablo 5.1' de ve Şekil 5.11-Şekil 5.18' de bu bölümdeki tüm deneyler için karakteristik büyüklüklerin kömür cinsine göre değişimi verilmiştir. Soma, Harman ve Güney Afrika kömürleri ile deneyler sadece Fischer kazanda yapılmıştır. Kodların önündeki F harfi Fischer kazanını, A harfi ise Azim kazanı göstermektedir. Harflerin yanındaki rakamlar ise Y.Ağaçlı kömürünün içerdiği nem miktarını belirtmektedir.

Tablo 5.1. Fischer ve Azim Kazana Ait Karakteristik Sonuçlar.

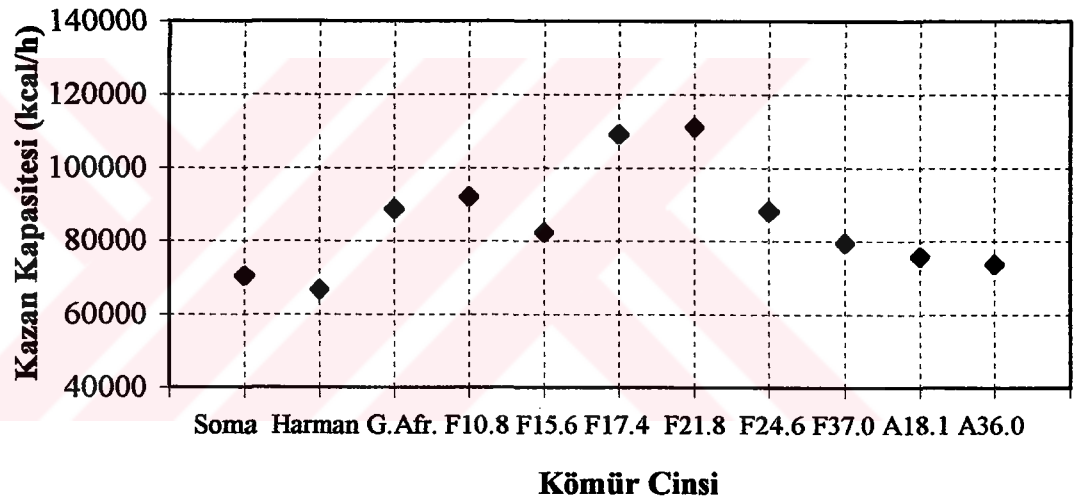
Deney Kodu	Kömür Alt Isıl Değeri (kkal/kg)	Kazan Kapasitesi (kkal/h)	Yakıt Sarfıyatı (kg/h)	Hava Fazlalık Katsayısı	Ortalama Baca Sıcaklığı (°C)	Kazan Verimi (%)
Soma	5106	70321	18.79	2.64	275	73.31
Harman	4213	66529	21.05	2.17	270	75.07
G.Afr.	4970	88747	24.98	2.05	280	77.01
F10.80	4929	91997	25.45	1.52	400	73.54
F15.60	4662	82272	24.87	1.44	435	71.49
F17.40	4565	109222	31.52	1.45	410	75.19
F21.80	4321	111020	32.28	1.50	420	73.72
F24.60	4167	88209	30.31	1.87	330	73.68
F37.00	3481	79421	29.29	1.43	270	78.27
A18.10	4509	75856	20.00	2.49	132	78.53
A36.00	3586	73635	28.71	2.89	137	74.02

Nem miktarı düştükçe kömürün alt ısı değeri artmaktadır. Ortalama baca sıcaklığının birçok deneyde artan kömür alt ısı değeri ile birlikte arttığı görülmektedir. Diğer bir deyişle kurutulmuş kömürde ortalama baca gazı sıcaklığı orijinal kömürlere kıyasla daha yüksektir. Baca gazı sıcaklığının büyüklüğünü hava fazlalık katsayısının değeri de etkilemektedir. Fischer marka kazanda %10.80 ve %21.80 nemli Y.Ağaçlı kömürleri ile yapılan deneylerde, hava fazlalık katsayısı 1.5 mertebesinde gerçekleşmiştir. %24.60 nem değerinde hava fazlalık katsayısı bir miktar artmıştır. %37.00 nem içeren orijinal Y.Ağaçlı kömürü ile yapılan deneyde de kurutulmuş kömürlerde olduğu gibi hava fazlalık katsayısı 1.43' dür.

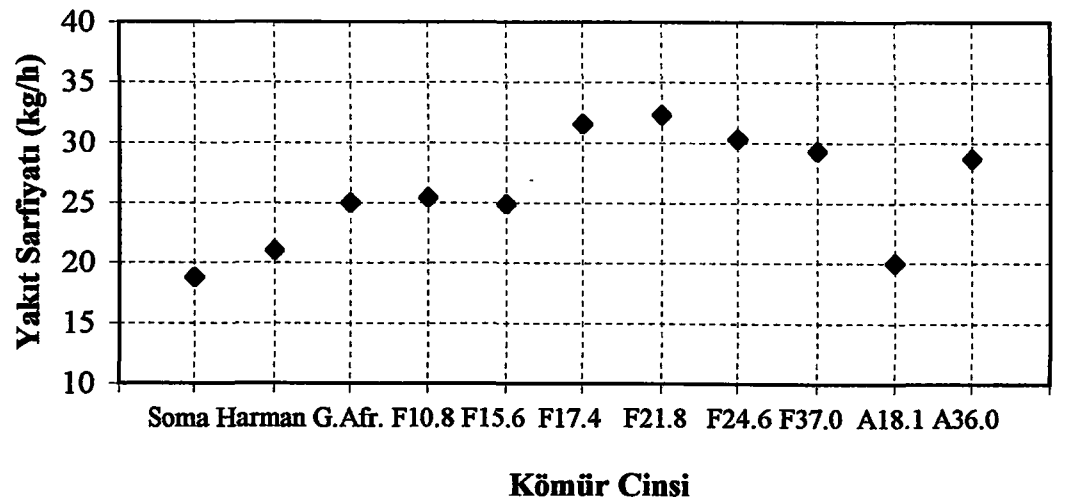
Şekil 5.15' de görüldüğü gibi Y.Ağaçlı kömüründe baca gazı ortalama sıcaklığı kurutulmuş kömürlerde daha yüksek değerler almaktadır. Soma, harman ve G.Afrika kömürlerinde ise ortalama baca gazı sıcaklıkları düşük mertebelerdedir. Yukarıda ifade edildiği gibi bu hava fazlalık katsayısını olumsuz yönde etkilemektedir. G.Afrika kömüründe, Azim kazanda yapılan 1. Grup yanma deneylerindeki benzer baca gazı ortalama sıcaklığı sonucu gözlenmiştir. G.Afrika kömürünün ısı değeri yüksek, nem içeriği düşüktür. Dolayısıyla porozite hacmi de düşüktür (Unsworth ve diğ., 1991). Ancak G.Afrika kömürün kül içeriğinin $\approx$ %30 dolayında olması ısı değerini düşürmektedir. Kül miktarının yüksek olması nedeniyle yapı zor parçalanmakta, ufalanma da daha geç gerçekleşmektedir. Ayrıca G.Afrika kömürünün uçucu madde miktarının, Y.Ağaçlı kömürüne oranla daha düşük olması



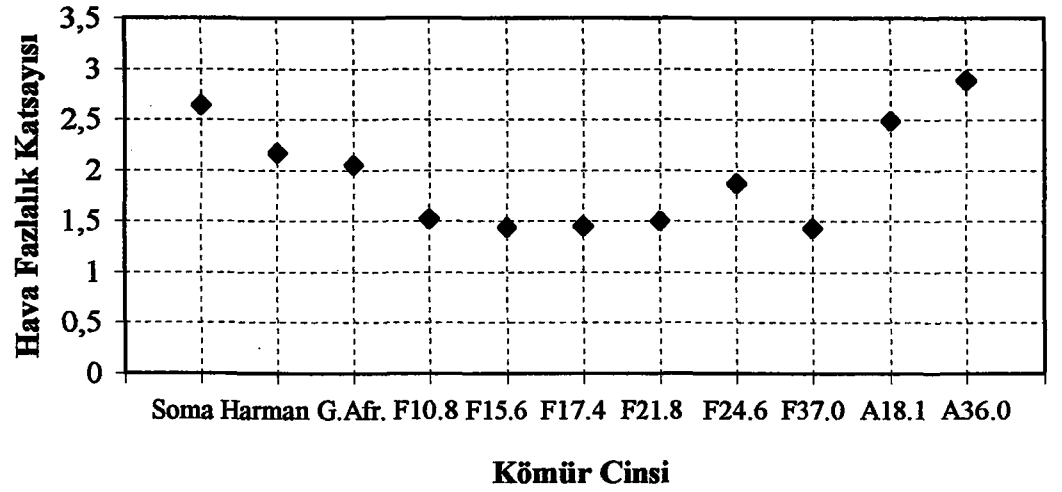
Şekil 5.11. Yakıt Alt Isıl Değerinin Kömür Cinsine Göre Değişimi (3.Grup)



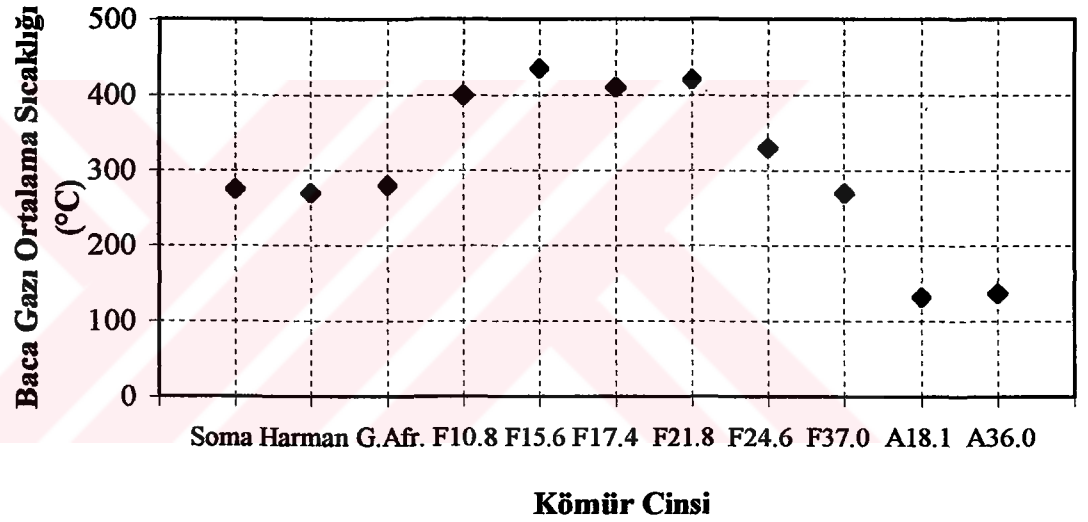
Şekil 5.12. Kazan Kapasitesinin Kömür Cinsine Göre Değişimi (3.Grup)



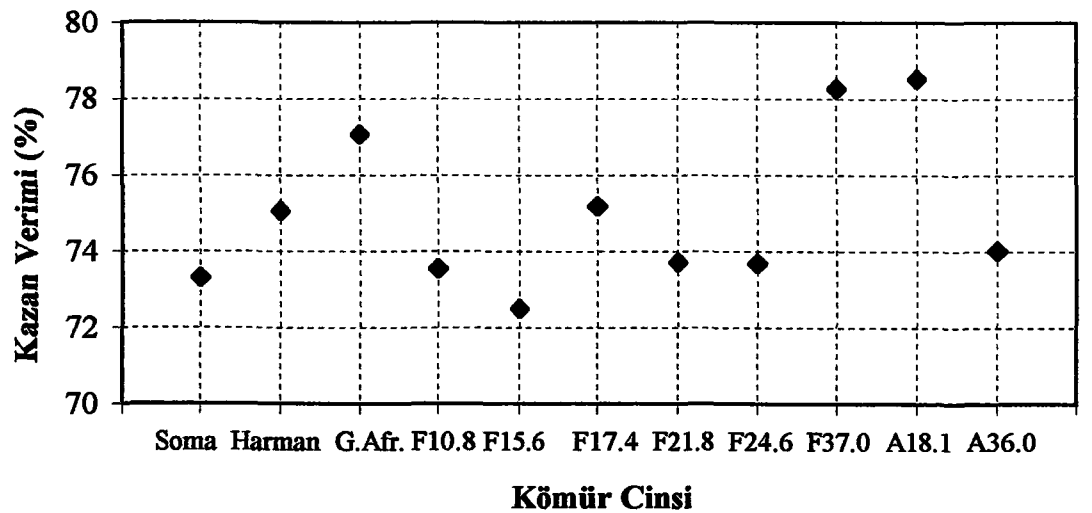
Şekil 5.13. Yakıt Sarfiyatının Kömür Cinsine Göre Değişimi (3.Grup)



Şekil 5.14. Hava Fazlalık Katsayısının Kömür Cinsine Göre Değişimi (3.Grup)



Şekil 5.15. Baca Gazı Ortalama Sıcaklığının Kömür Cinsine Göre Değişimi (3.Grup)



Şekil 5.16. Kazan Veriminin Kömür Cinsine Göre Değişimi (3.Grup)

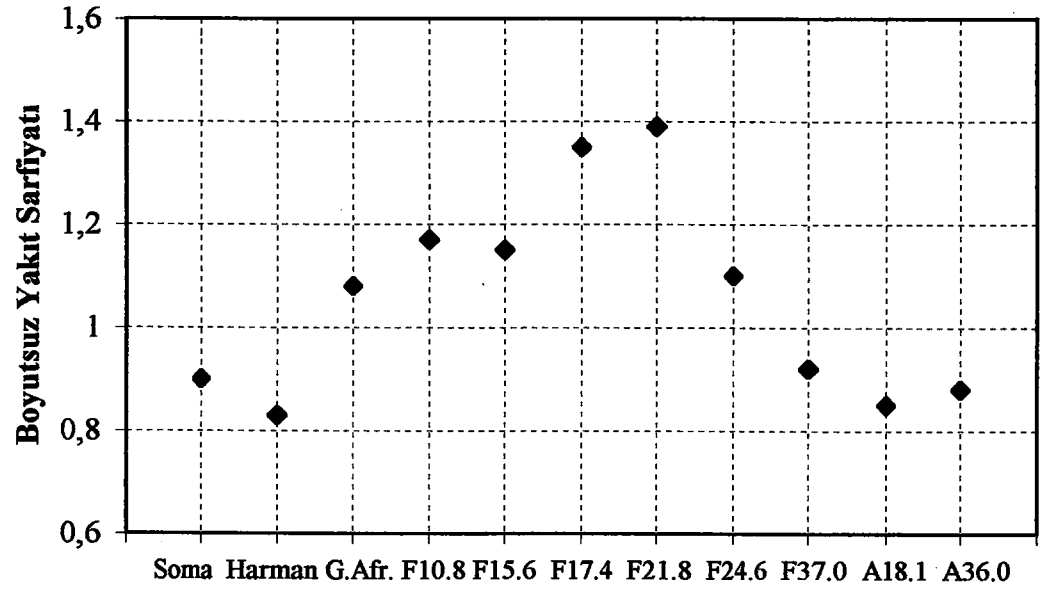
yanma hızını azaltıcı bir diğer etkidir. Bu sebeplerden dolayı G.Afrika kömürünün ortalama baca gazı sıcaklığı düşük değerler almaktadır.

Kazan kapasitesi %17.40 ve %21.80 nemli kömürlerde kazanın anma ısı gücünün (80000 kkal) 1.4 katına kadar çıkmıştır. Kazan kapasitesi orijinal kömürlerle yapılan deneylerde, 80000 kkal/h olan kazan anma ısı gücüne yakın değerlerde gerçekleşmiştir. Boyutsuz kazan kapasitesi değerleri bu tespiti açıkça göstermektedir. Bu iki deneydeki yakıt sarfiyatı orijinal kömürle (%37.00 nem) yapılan deneyle aynı değerde olmasına rağmen kazan kapasitesinin farklı olmasının sebebi, kurutulmuş kömürlerin alt ısı değerlerinin daha yüksek olmasıdır. Kurutulmuş kömürde yakıt sarfiyatının (özellikle %17.40 ve %21.80 nemde) anma ısı gücünün gerekli yakıt sarfiyatının üzerinde gerçekleşmesi, nem miktarının düşmesi ile yanma hızının kontrolünün güçleştiğini göstermektedir.

Kurutulmuş kömürlerle yapılan deneylerde maksimum kazan verimi %75 değeri ile %17.40 neme sahip kömürde elde edilmiştir. Nemin bu değer altına düşmesi ve üstüne çıkması halinde verimin düştüğü saptanmıştır. %37.00 nemli orijinal Y.Ağaçlı kömürü ile yapılan deneyde kazan verimi %78 değerinde gerçekleşmiştir. Buradan otomatik beslemeli kazanda orijinal Y.Ağaçlı kömürü ile daha yüksek verime ulaşıldığı görülmektedir.

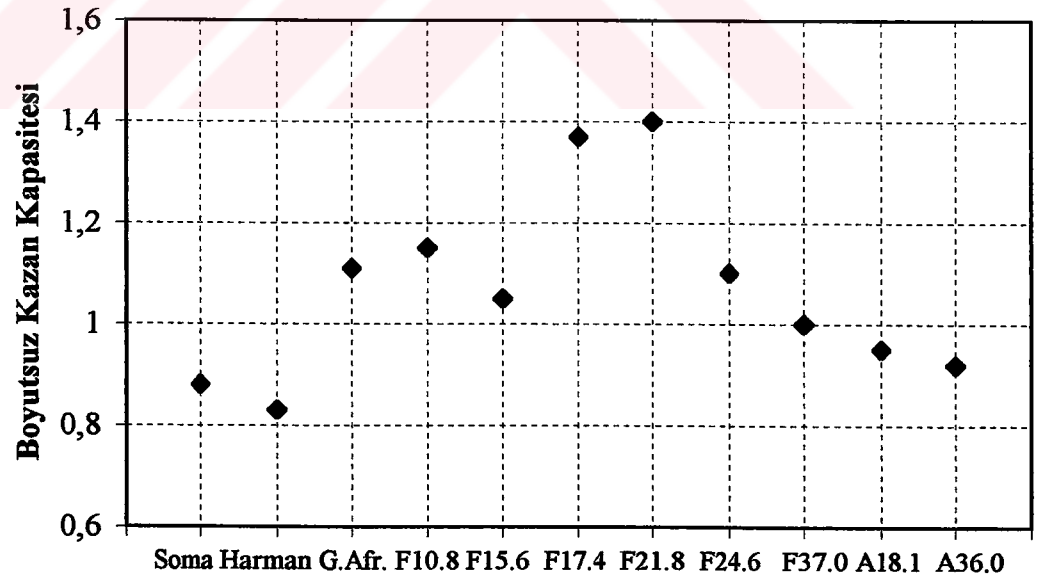
Şekil 5.17 ve Şekil 5.18' de boyutsuz yakıt sarfiyatının ve boyutsuz kazan kapasitesinin değişimi verilmektedir. Bu büyüklüğün 1.0' a eşit veya 1.0 değerine yakın olması kazan anma ısı gücüne yakın değerlerde deneysel kazan kapasitesinin gerçekleştiğini göstermektedir. Bu boyutsuz ifadenin 1.0' ın üstünde olması ise anma ısı gücünün aşıldığı anlamına gelmektedir. Fischer kazanda bazı kurutulmuş kömürlerle yapılan deneylerde kazan verimi, TS 4040 (1983)' da öngörülen asgari verim %74' ün altında gerçekleşmesine rağmen, boyutsuz yakıt sarfiyatının 1.0 değerinden büyük olması, anma ısı gücü olan 80000 kkal/kg değerine karşı gelen yakıt sarfiyatının üzerinde kömür yakıldığını göstermektedir.

Fischer kazanda yapılan deneylerde kurutulmuş kömürler arasında %17.40 nemli kömürle en yüksek verim elde edilmiştir. Bu sebeple aynı veya yakın neme sahip kurutulmuş ve orijinal neme sahip Y.Ağaçlı kömürleri ile Azim kazanda deney yapılmasına karar verilmiştir.



Kömür Cinsi

Şekil 5.17. Boyutsuz Yakıt Sarfiyatının Kömür Cinsine Göre Değişimi (3.Grup)



Kömür Cinsi

Şekil 5.18. Boyutsuz Kazan Kapasitesinin Kömür Cinsine Göre Değişimi (3.Grup)

Azim kazanda yapılan deneyde, 1. ve 2. Grup yanma deneylerinde de olduğu gibi Fischer kazana kıyasla hava fazlalık katsayısı daha yüksek değerler almıştır. Azim kazanda kurutulmuş kömürde bu değer 2.5 iken orijinal kömürde 2.9 değerine ulaşmıştır. Bu durum elle beslemeli kazanda havanın kontrolünün ne kadar zor olduğunu ve büyük bir kısmının yanmaya katılmadığını göstermektedir. Hava fazlalık katsayısının çok yüksek olması ortalama baca sıcaklıklarının 130°C değerine kadar düşmesine sebep olmaktadır. Bu değer Fischer kazanda elde edilen ortalama baca sıcaklığı değerlerinin 1/3' ü kadardır. Azim kazanda yapılan her iki deneyde de kazan kapasitesi, anma ısı gücüne yakın değerlere ulaşmıştır. Bu sonuç Fischer kazanda orijinal kömür ile yapılan deneylerin sonuçları ile benzerdir.

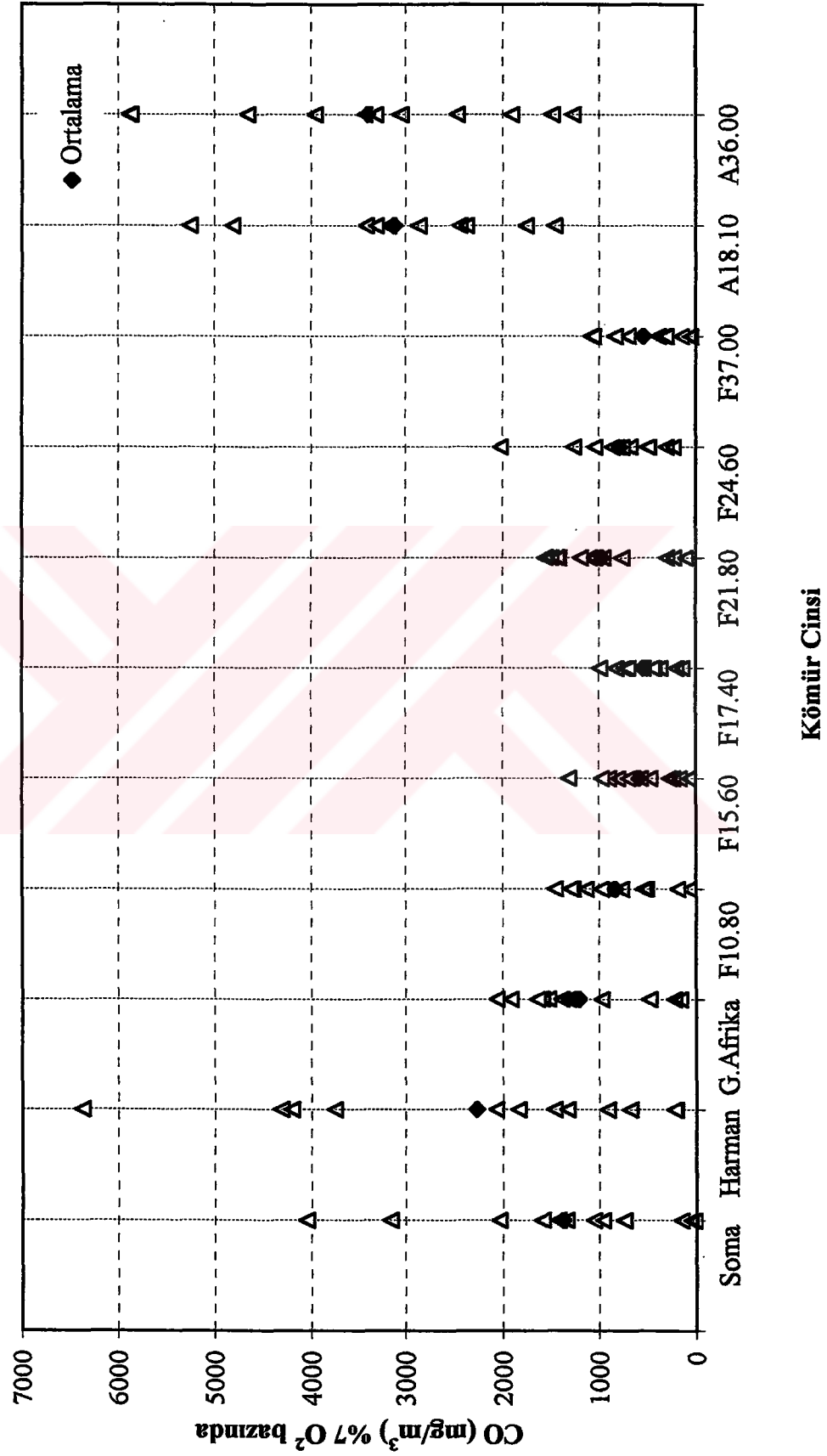
Azim kazanda hava fazlalık katsayısı çok yüksek olmasına rağmen baca gazı sıcaklığı düşük olduğu için kazan veriminde fazla düşme olmamıştır. Orijinal kömür ile yapılan deneyde %74 olarak gerçekleşen verim kurutulmuş kömürle yapılan deneyin veriminden düşüktür. %18 neme sahip kömürle Azim kazanda elde edilen verim %78.5 olup, Fischer kazanın orijinal kömür ile verdiği verime eşittir.

5.2.2 Otomatik, Hava Kontrollü Sıcak Su Kazanı ve Elle Yüklemlı, Sabit Izgaralı Sıcak Su Kazanında Yanma Deneyleri Sonuçlarının Değerlendirilmesi

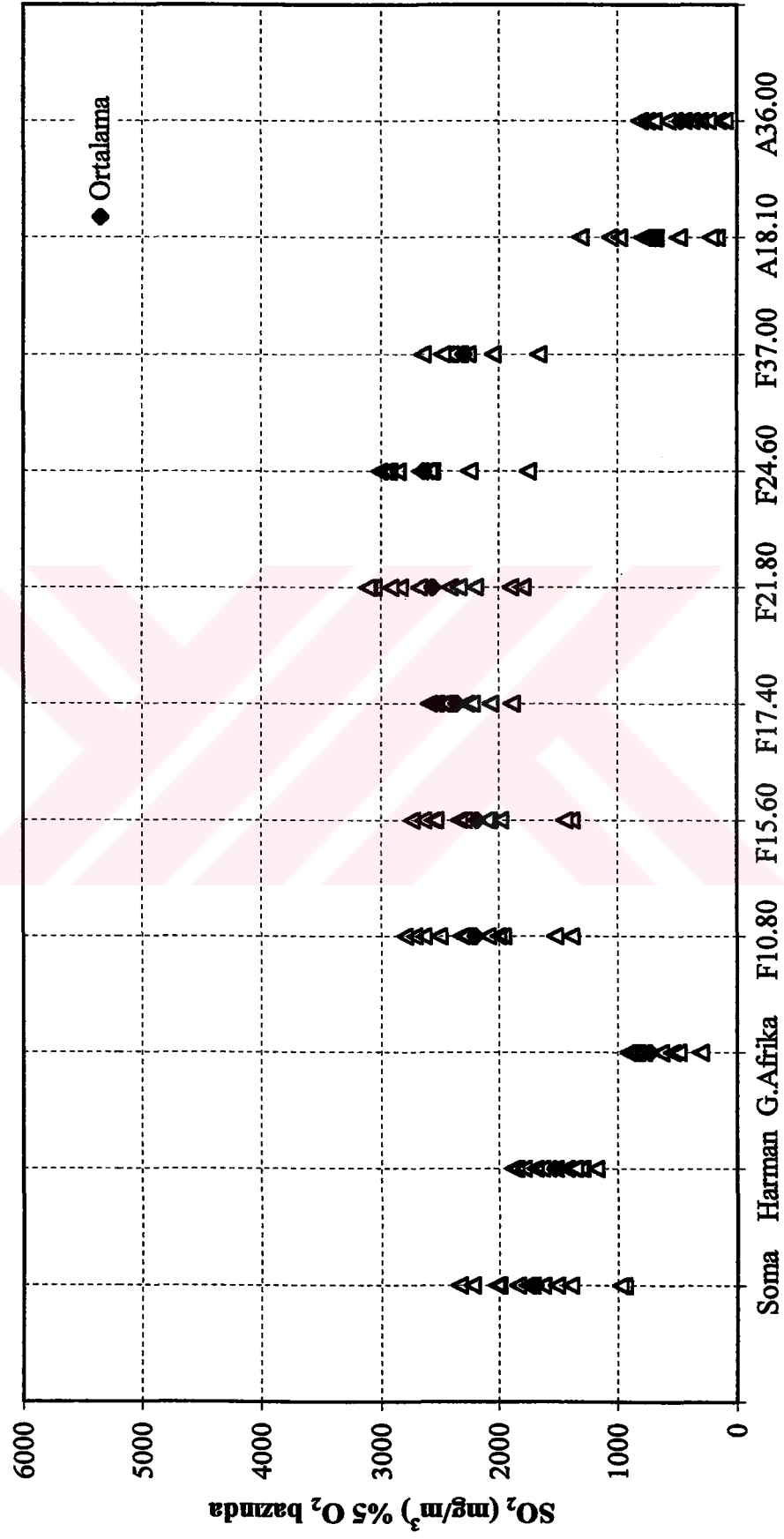
Otomatik, hava kontrollü sıcak su kazanı ve elle yüklemlı, sabit ızgaralı sıcak su kazanındaki deneylerde değerlendirme açısından CO (%7 O₂), SO₂ (%5 O₂) , NO_x (%5 O₂) indirgenmiş değerleri hesaplanmıştır. Şekil 5.19-Şekil 5.21' de CO, SO₂ NO_x emisyonlarının kömür cinsine göre değişimi ve ortalama değerleri verilmiştir. Kümülatif toz yayılım değerleri ise Şekil 5.22' de görülmektedir.

%10.80 – %24.60 nem aralığında kurutulmuş kömürlerle ve orijinal kömürlerle otomatik, hava kontrollü sıcak su kazanında elde edilen CO (%7 O₂ bazında) emisyonu 250 – 1000 mg/m³ değerleri arasında yoğunluk göstermektedir (Şekil 5.19). En düşük CO emisyonu %37.00 neme sahip orijinal kömürde ve %17.40 neme kurutulmuş kömürde elde edilmiştir. Soma, Harman, G.Afrika kömürleri ile yapılan deneylerde ise ortalama CO emisyonu 1000 mg/m³ değerinin üstündedir. Sabit ızgaralı sıcak su kazanında yapılan her iki deneyde de CO emisyonu 3000 mg/m³ değerinin üstündedir.

Şekil 5.20' de görüldüğü gibi Fisher kazanda yakılan kurutulmuş ve orijinal Yeniköy Ağaçlı kömürlerine it SO₂ emisyonları (%5 O₂ bazında) en çok 2000-3000 mg/m³



Şekil 5.19. Fischer ve Azim Kazanda Yapılan Deneylerde CO Emisyonlarının Değişimi (3. Grup)



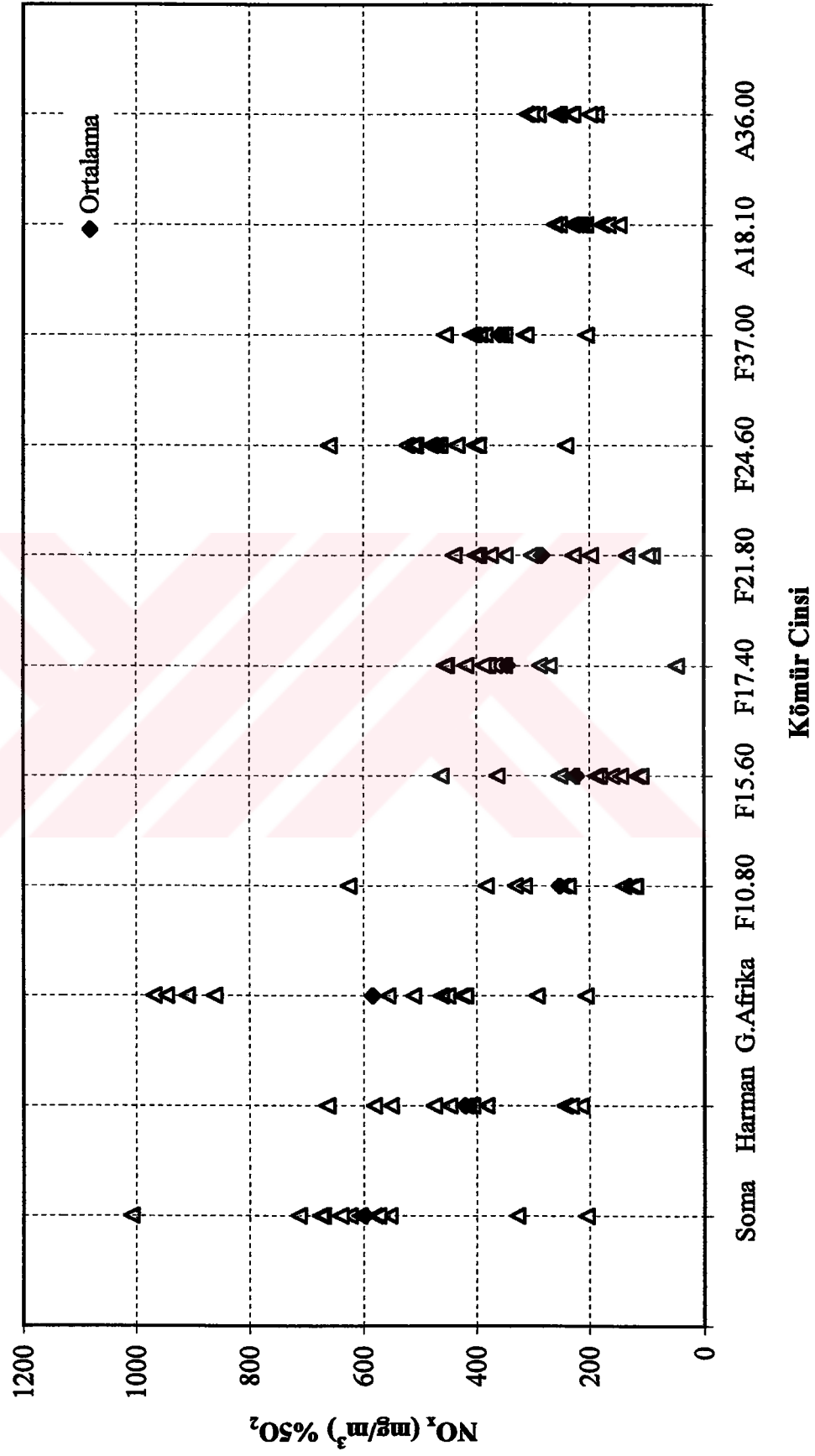
Şekil 5.20. Fischer ve Azim Kazanda Yapılan Deneylerde SO₂ Emisyonlarının Değişimi (3. Grup)

arasında değişim göstermektedir. Tüm Y.Ağaçlı kömürlerine ait ortalama SO₂ konsantrasyonu ortalama değerleri 2100-2500 mg/m³ arasında değişmektedir. Azim kazanda orijinal ve kurutulmuş kömüre ait SO₂ emisyonları (%5 O₂ bazında) 50-1000 mg/m³ arasında değişmektedir. Fischer kazanda yakılan Soma ve Harman kömür 1000-2000 mg/m³, G.Afrika kömürü ise 200-1000 mg/m³ arasında değişmektedir.

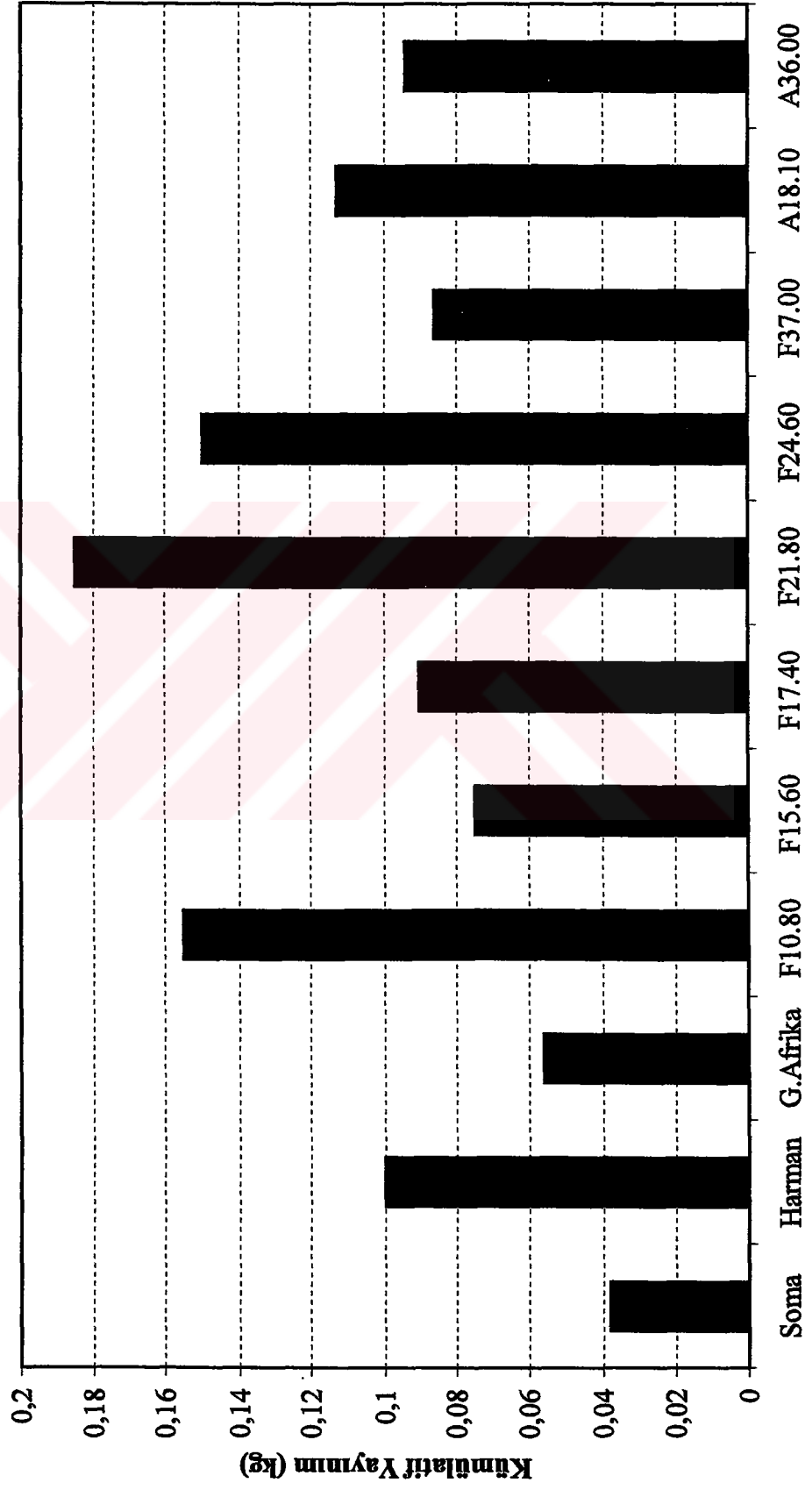
NO_x değişimleri (%5 O₂ bazında) Şekil 5.21' de verilmiştir. Azim kazanda gerçekleştirilen deneylerde ortalama NO_x değerleri 200 mg/m³ tür. Fischer kazanda yakılan orijinal ve %17 neme kurutulmuş Y.Ağaçlı kömürü için ortalama NO_x değeri 350 mg/m³, %21 nemli kömür için 300 mg/m³, %15 nemli kömür için 220 mg/m³, %24 nemli kömür için 450 mg/m³ olduğu görölmektedir. Soma, Harman ve G.Afrika kömürlerine ait değerler 400 mg/m³ ün üzerindedir. NO_x değerlerinin baca gazı sıcaklıklarına bağlı olarak değişim göstermektedir.

Daha önceki bölümlerde ifade edildiği gibi her iki tip kazanda, başlangıç (uçucu madde çıkışı), kararlı yanma (yarı kok yanması) ve sönme olmak üzere yanmanın üç rejimden oluştuu gözönüne alındığında, ortalama toz konsantrasyonları yerine her bir yanma için kümülatif miktarlar hesaplanarak değerlendirmenin yapılması daha doğru olacaktır. Her iki kazanda yanma deneyleri süresince ölçülen toz emisyonlarına ait değişimlerden (mg/m³) ve kütleli debilerden (kg/saat) yararlanılarak her bir yanma için kümülatif toz yayılım miktarları hesaplanmıştır. Bu değerler iki kazan için Şekil 5.22 ' de gösterilmektedir. Şekilden görüleceği üzere en düşük toz yayılımı Soma ve G.Afrika kömürlerinin Fischer kazanda yakılması esnasında gözlenmiştir. Bu kazanda orijinal ve kurutulmuş Y.Ağaçlı kömür örnekleriyle yapılan yanma deneylerinde %37.00 nemli orijinal Yeniköy Ağaçlı linyiti ve %15.60 nemli kurutulmuş Y.Ağaçlı linyitine ait kümülatif toz yayılım miktarları en düşük seviyede iken, en yüksek toz yayılımı %21.40 nemli kurutulmuş Y.Ağaçlı linyit örneğinde tespit edilmiştir. Fischer kazanla %10.80 ve %24.60 neme kurutulmuş Y.Ağaçlı linyitleriyle gerçekleştirilen yanma deneylerindeki kümülatif toz yayılım değerleri birbirine yakın olup, %21.80 neme kurutulmuş Y.Ağaçlı linyitine ait toz yayılım miktarından sonra olumsuzluk açısından ikinci sırada yer almaktadır.

Fischer kazanda birinci hava iki ayrı yoldan yanma aralığına sevk edilmektedir. İlkinci hava ise gaz yanmasının gerçekleştiği hacme gönderilmektedir. Azim kazanda ise birinci havanın tamamı ızgara altından kömür tabakasına gönderilirken, ikinci



Şekil 5.21. Fischer ve Azim Kazanda Yapılan Deneylerde NO_x Emisyonlarının Değişimi (3. Grup)



Şekil 5.22. Fischer ve Azim Kazan Deneylerinde Toz Emisyonların Kümülatif Yayınım Değerleri (3. Grup)

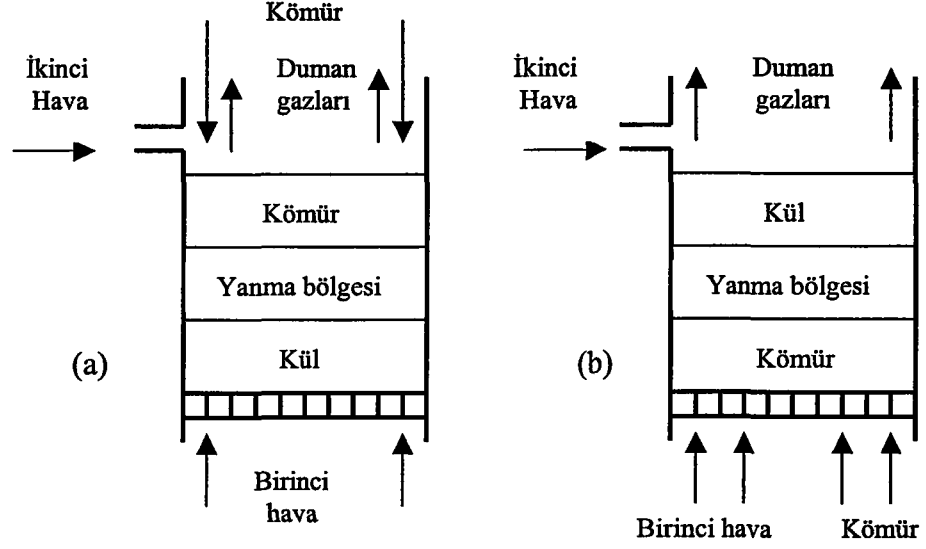
hava kömür tabakasının üzerindeki ocak hacmine ön kapaktan girmektedir. Fischer kazanda ızgara alanı daha küçük olup, yanma Azim kazana kıyasla daha küçük bir bölgede gerçekleşmektedir.

Bu geometrik büyüklükler ve ikinci havanın ocağa giriş şekilleri incelendiğinde, Fischer kazanda gaz faz yanmasında hava ile gaz karışımının daha iyi gerçekleştiği saptanmaktadır. Fischer kazanda, gerek katı fazda gerekse gaz fazda hava ile yakıtın buluşma imkanı artmaktadır. Bu sebeple Azim kazanda hem orijinal hem de kurutulmuş kömürle yapılan deneyde CO miktarının yüksek olduğu görülmektedir. Fischer kazanda kömür yakıt haznesine doldurulmaktadır. Kömür yandıkça kömür tabakası yanma aralığında ilerlemektedir. Kazana, yakıt haznesinin hacmi kadar kömür yüklenebilmektedir. Bu özelliği ile Fischer kazan otomatik beslemeli olarak nitelendirilebilir. Elle yüklemeli, sabit ızgaralı sıcak su kazanında (Azim kazan) kömür kor tabakası üzerine Bölüm 4.6.1’ de ifade edildiği gibi yastıklama usulü ile doldurulmaktadır. Her seferinde kazan kapasitesine karşılık gelen miktarda kömür yüklenmektedir. Kömürün yüklenmesinden hemen sonra yüksek miktarda CO emisyonu görülmektedir. Bu durum her kömür yüklemesinde tekrarlanmaktadır. Yükleme periyotlarının kısa olması değerlendirmeye alınan zaman aralığında ortalama CO emisyonunun artmasına sebep olmaktadır.

Otomatik, hava kontrollü sıcak su kazanı Fischer kazanda kömür besleme sistemi incelendiğinde, yanmanın ızgara üzerinde alttan besleme yöntemine göre gerçekleştiği görülmektedir. Şekil 5.23 ‘ de alttan ve üstten besleme yöntemlerinin prensip şeması görülmektedir. Yanma aralığında yanma bölgesi yer almaktadır. Bu bölgenin üzerinde gazlaşmakta olan tabaka ve üstte ise kömür tabakası yer almaktadır. Izgara altından gelen yakma havası yanma bölgesinin içinden geçmektedir. Yakıt haznesi içinden gelen hava ise sırasıyla kömür tabakası, gazlaşma bölgesi ve yanma bölgesinden geçmektedir. Her iki yakma havasının yakıt yatağındaki hareketi alttan besleme yöntemine uyum göstermektedir.

Azim kazanda ise ızgara üzerinde sırasıyla kül, yanma bölgesi, gazlaşma bölgesi ve kömür tabakası yer almaktadır. Izgara altından gelen birinci hava önce yanma bölgesinden geçtikten sonra gazlaşma ve kömür bölgelerinden geçmektedir. Kömür tabakasında oksijenin büyük bir kısmı tüketildiği için açığa çıkan uçucu madde yeteri kadar yanmamaktadır. Ayrıca sıcak gazlar gazlaşma işleminin hızlanmasına sebep olmaktadır. Kömür tabakasındaki ocak hacminde yanmamış gazlar ile ikinci havanın

iyi karışımı sağlandığı için CO emisyonları artmaktadır. Sonuç olarak elle beslemeli kazanda yanmanın kötüleştiği görülmektedir.



Şekil 5.23. Altan (a) ve Üstten (b) Besleme Yöntemleri.

Kurutulmuş kömürlerin, alt ısı değeri daha yüksek olduğundan birim yakıtın yanması için orijinal (yüksek verimli) kömüre kıyasla daha fazla yakma havasına ihtiyaç vardır. Fischer kazanda gerek kurutulmuş kömür gerekse orijinal kömür aynı hava fazlalık katsayılarında yanmasına rağmen ortalama CO emisyonları aynı mertebededir. Bu durum kurutulmuş kömürde yakıtın hava ile karışımının daha iyi gerçekleştiğini göstermektedir.

Fischer kazandaki bu sonuçlar Azim kazanda daha öne yapılan deneylerle de paralellik göstermektedir. Bölüm 5.1' de detaylı olarak verilen, elle yüklemeli ızgaralı sıcak su kazanı Azim kazanda, 1. ve 2. Grup yanma deneylerinde de en düşük toz yayılımı orijinal (%38 ve %37 nemli) Y.Ağaçlı ve %15 neme kurutulmuş Y.Ağaçlı linyitlerinde gözlenmiş, en yüksek toz yayılımı ise yine %21 nemli Y.Ağaçlı kömüründe tespit edilmiştir.

5.3 Soba Deneylerine Ait Sonuçlar

Soba deneylerinde, Fischer kazan deneylerinde kullanılan kömürler yakılmıştır. Deney kömürleri kazan deneyleri için kurutulan kömürlerden sağlanmış olup aynı nem ve analize sahiptirler.

Soba deneylerinde, ısı verim ve gücün hesaplanması, kazan deneylerinin değerlendirilmesi için önceki bölümde kullanılan yöntem kullanılmıştır. Soba da sıcak cidalardan ortama kaybolan ısı faydalı ısıdır. Diğer bir deyişle kayıp değil kazançtır. Buna göre sobada katı yakıtın yanmasıyla meydana gelen ısı kayıpları;

1. Sıcak baca gazları ile bacadan dışarı atılan duyulur ısı kaybı,
2. Yakıtın içindeki karbonun eksik yanması sonucunda bacadan atılan CO' in sahip olduğu ısı enerjisi,
3. Yanmaya hiç katılmadan kazandan çıkan kül ve cüruftaki yanmamış karbonun ısı değeri, olarak sıralanabilir.

Soba verim ve kapasitesinin hesaplanması ile ilgili bağıntılar Bölüm 4.8' de verilmiştir.

Sobada yakılan tüm kömürlere ait gaz emisyonları (CO, SO₂, NO_x), CO₂, O₂ (%) değerleri , baca gazı sıcaklığı, hava fazlalık katsayıları ve toz emisyonlarının zamana göre değişimleri Şekil D.1-Şekil D.27' de verilmiştir.

Gaz emisyonlarının değişimi deney boyunca değişimi incelendiğinde, deney süresinin ilk 1/3 veya 1/2 kısmında CO emisyonunun artarak maksimuma ulaştığı daha sonra düşerek deney sonunda 100-200 mg/m³ değerinin altına indiği görülmektedir.

Soba deneylerinde tüm kömürlere ait hava fazlalık katsayısı-zaman grafiklerinden de görüleceği üzere, deney sonuçlarının bir başka ortak özelliği ise deney başlangıcında 1 civarında olan hava fazlalık katsayısı deney boyunca artarak deney sonunda kömür cinsine bağlı olarak farklı maksimum değerlere ulaşmasıdır. Hava fazlalık katsayısının bu değişimine paralel olarak beklenen şekilde, baca gazı sıcaklığı ise deney boyunca düşmektedir.

Hava fazlalık katsayısının ortalama değerinin her deneyde farklı olması her bir kömürün birim miktarının yakılması için gereken hava miktarının farklı olmasına karşın soba hava ayarlarının her deneyde sabit tutulmasından kaynaklanmaktadır. Fakat her deneydeki ortak özellik hava fazlalık katsayısının deney boyunca artmasıdır. İlk tutuşturma sırasında ve kararlı yanma sırasında kömür içindeki uçucu maddenin tümünün deneyin ilk yarısında ortaya çıkması yakma havasının büyük kısmının yanmaya katılmasına sebep olmuştur. Bu sebeple deneyin başlangıcındaki

hava fazlalık katsayısı düşüktür. Uçucuların büyük bir kısmının tükenmesi sonucu hava ayarında değişiklik yapılmadığı için hava fazlalık katsayısı artmıştır. Deneylerde yanma cephesinin hemen altındaki bölgedeki uçucu maddenin çıkması istenirken, yanmanın tüm yakıt yatağına kısa sürede yayıldığı görülmüştür. Böylece CO önce hızla yükselerek bir maksimuma ulaştıktan sonra deney sonlarında düşmüştür.

Toz emisyonlara ait grafiklerden görüleceği üzere, sobada kömür örneklerinin tutuşmasından sonra, yanma başlangıcında ilk 10-15 dakikada toz emisyonların konsantrasyonları yüksek değerlerde iken, kararlı yanma aşamasında daha düşük değerlere ulaşmaktadır.

5.3.1 Soba Deneylerinde Elde Edilen Karakteristik Büyüklükler

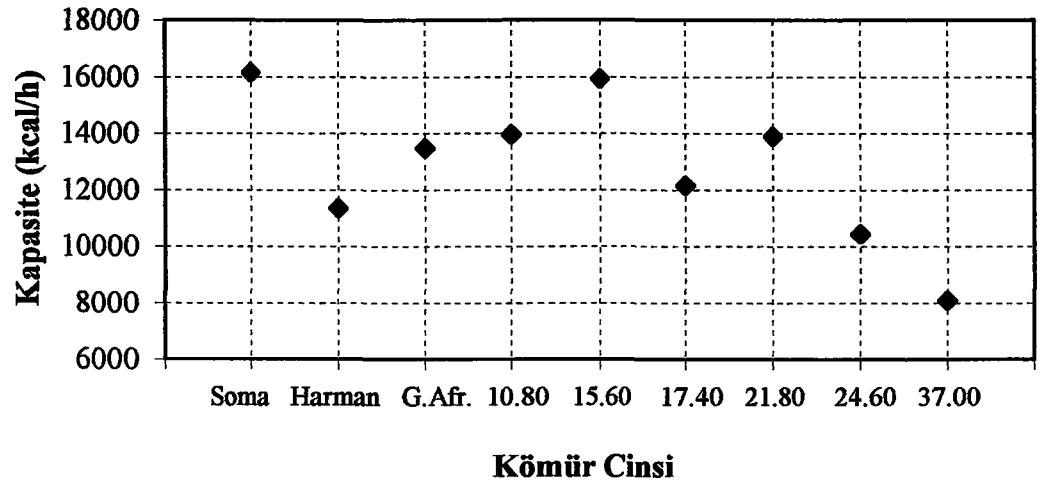
Tüm deneyler için karakteristik büyüklükler Tablo 5.2' de verilmiştir. Bu karakteristik büyüklükler; kapasite, yakıt sarfiyatı, hava fazlalık katsayısı, ortalama baca gazı sıcaklığı ve verim olup, bunların kömür cinsine göre değişimi Şekil 5.24-Şekil 5.28' de görülmektedir.

Yakıt sarfiyatı 3.5-4.5 kg/h değerleri arasında değişmektedir. Hava fazlalık katsayısı kurutulmuş kömürlerde %15.40 nem değerinde minimum olmakta, azalan ve artan nem ile artmaktadır. G.Afrika-Y.Ağaçlı harman kömürü ile yapılan deneyde en yüksek değerini almıştır.

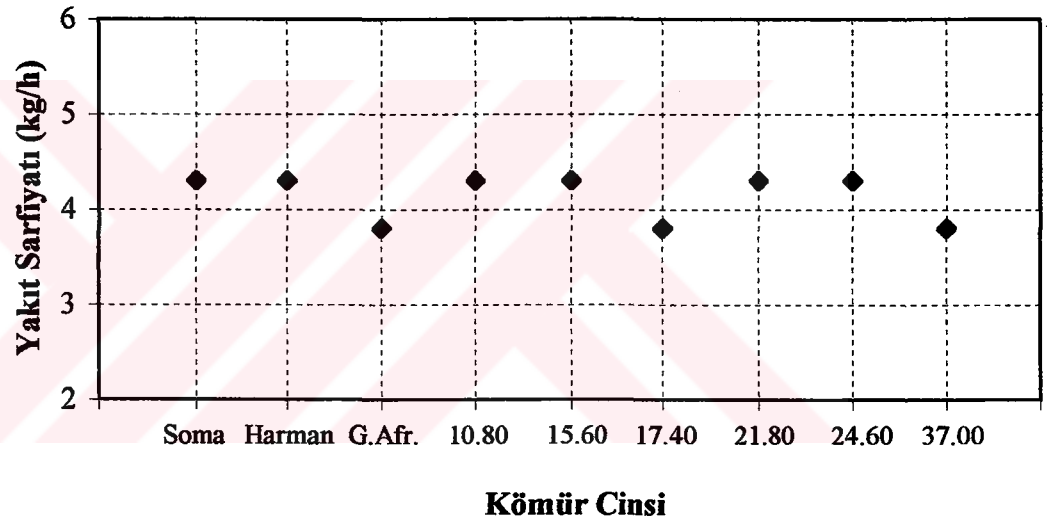
Tablo 5.2. Soba Deneylerine Ait Karakteristik Sonuçlar.

Deney Kodu	Soba Kapasitesi (kkal/h)	Yakıt Sarfiyatı (kg/h)	Hava Fazlalık Katsayısı	Ortalama Baca Gazı Sıcaklığı (°C)	Soba Verimi (%)
Soma	16157	4.3	1.2	552	73.84
Harman	11338	4.3	3.2	340	62.80
Güney Afrika	13469	3.8	1.9	340	77.90
Y.Ağaçlı 10.80	13954	4.3	1.9	415	66.24
Y.Ağaçlı 15.60	15929	4.3	1.4	448	75.73
Y.Ağaçlı 17.40	12140	3.8	1.8	450	70.25
Y.Ağaçlı 21.80	13874	4.3	1.8	477	69.38
Y.Ağaçlı 24.60	10445	4.3	2.3	450	61.70
Y.Ağaçlı 37.00	8088	3.8	2.4	415	62.25

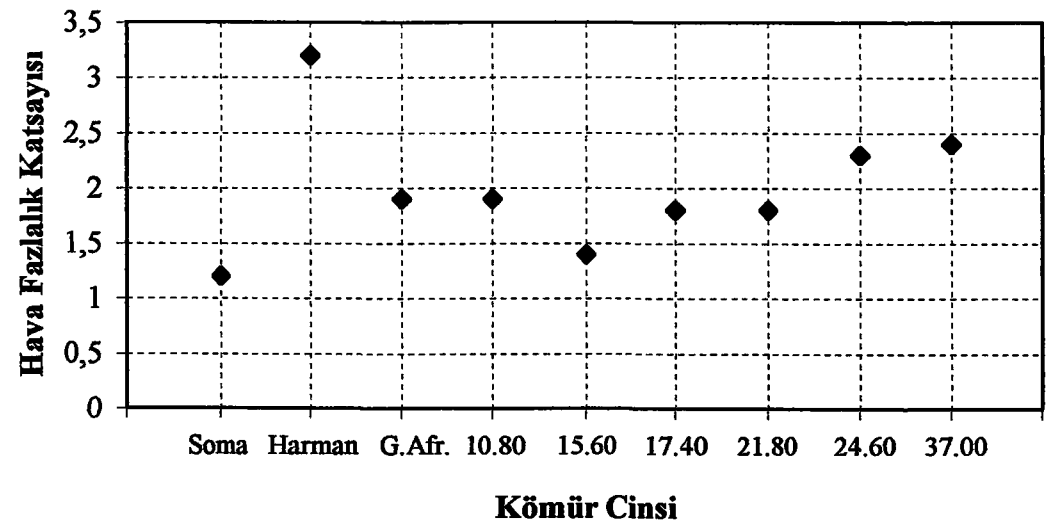
Kurutulmuş ve orijinal Y.Ağaçlı kömürleri ile yapılan deneylerde ortalama baca sıcaklıkları 400-500°C değerleri arasındadır. Soma kömüründe ise en büyük değere



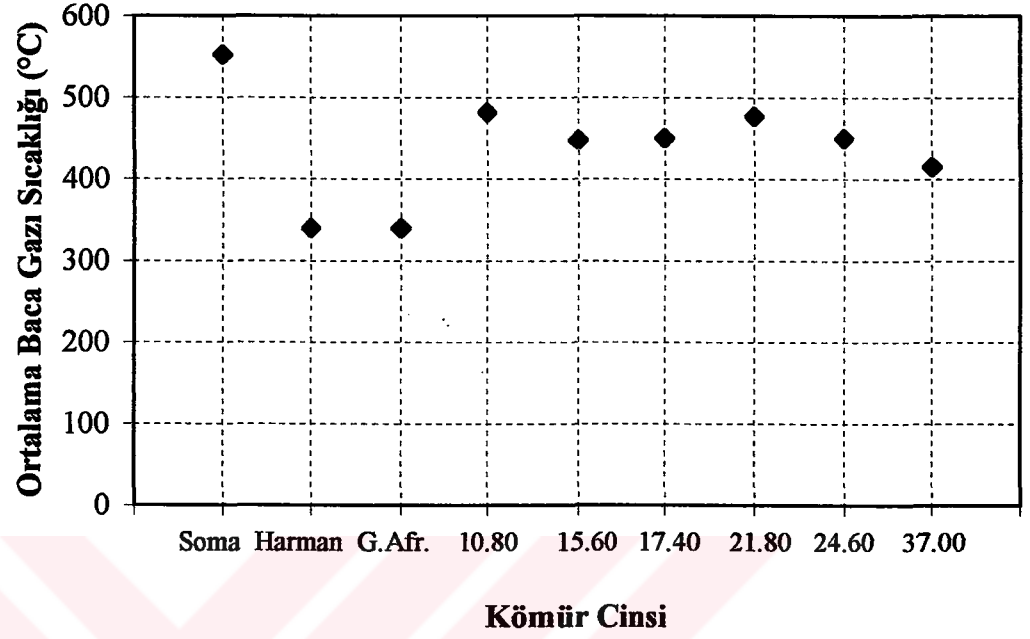
Şekil 5.24. Kazan Kapasitesinin Kömür Cinsine Göre Değişimi (4.Grup, Soba)



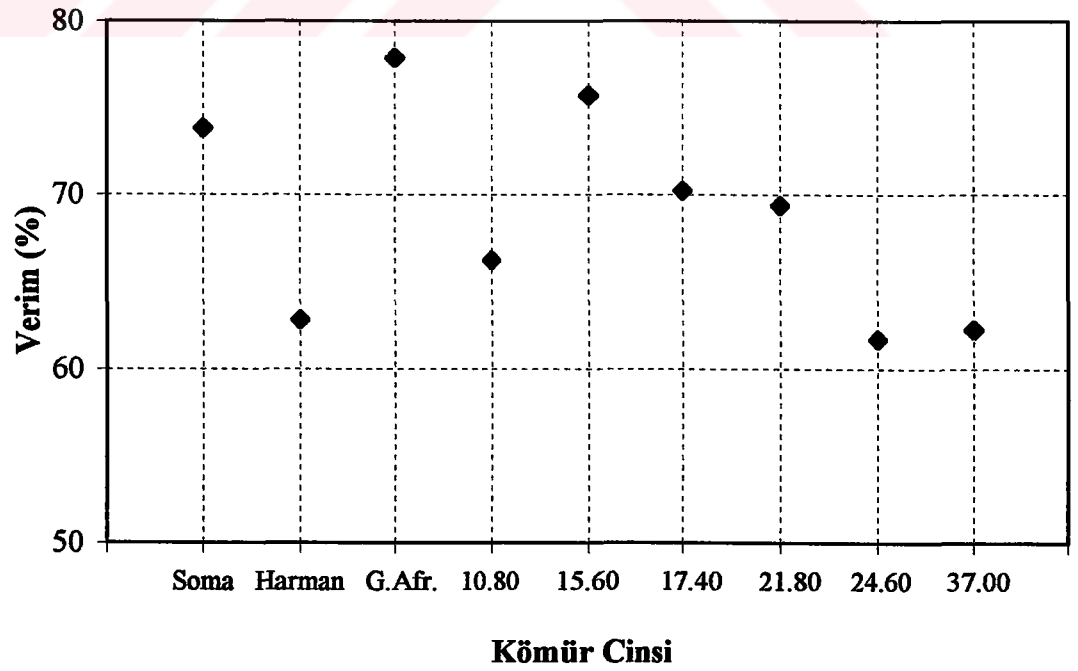
Şekil 5.25. Yakıt Sarfiyatının Kömür Cinsine Göre Değişimi (4.Grup, Soba)



Şekil 5.26. Hava Fazlalık Katsayısının Kömür Cinsine Göre Değişimi (4.Grup, Soba)



Şekil 5.27. Ortalama Baca Gazı Sıcaklığının Kömür Cinsine Göre Değişimi (4. Grup, Soba)



Şekil 5.28. Soba Veriminin Kömür Cinsine Göre Değişimi (4. Grup, Soba)

ulaşmaktadır. Bu deneylerde baca sıcaklığı TS 4900 (1996) standardında verilen maksimum 400°C değerini aşmaktadır. Harman ve G.Afrika kömürlerinde ise her iki kazan deneyinde olduğu gibi daha düşük değerler almış olup, 400°C değerinin altında yer almaktadır.

CO ortalama konsantrasyonu bakımından en yüksek değere sahip olmasına rağmen ortalama baca gazı sıcaklığının düşük olması G.Afrika kömürü ile yapılan deneyde verimin en büyük olmasını sağlamıştır. Harman ve orijinal nemli Y.Ağaçlı kömürlerinde verim en düşük değerleri alırken, kurutulmuş kömürler arasında %15.40 neme sahip Y.Ağaçlı kömürü en yüksek verime sahiptir. Baca gazı sıcaklığının G.Afrika kömürüne kıyasla yüksek olması nedeniyle verim açısından tüm deneyler arasında ikinci en iyi değere sahiptir.

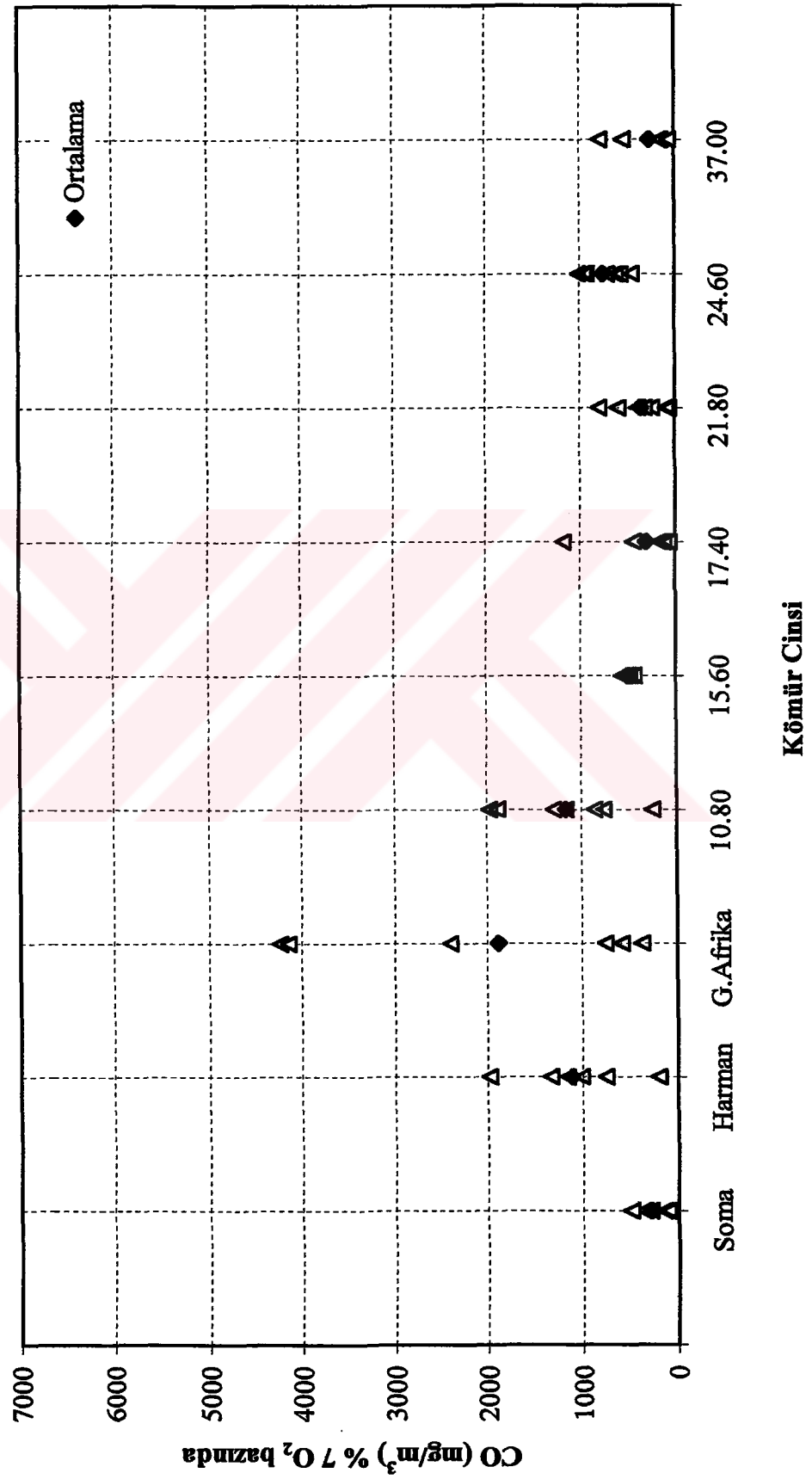
Yakıt sarfiyatının birbirine yakın değerler almasına rağmen, gerek verimdeki değişimler gerekse kömürlerin alt ısı değerlerindeki farklılıklar soba kapasitesinin minimum ve maksimum değerleri arasında iki katı değişimlere sebep olmuştur.

5.3.2 Soba Deneylerine Ait Sonuçların Değerlendirilmesi

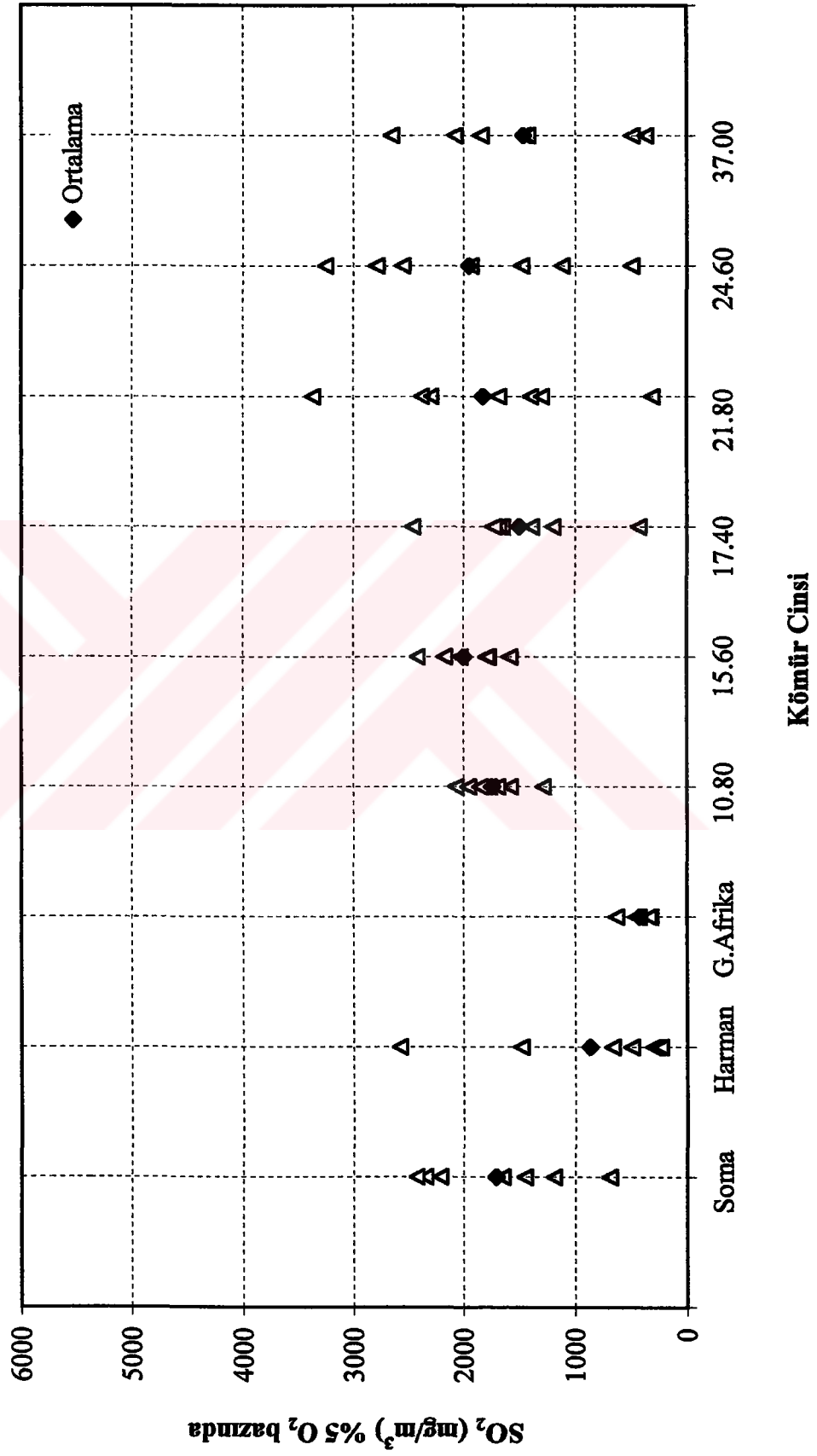
Soba deneylerine ait O₂ bazın indirgenmiş CO (%7 O₂), SO₂ (%5 O₂), NO_x (%5 O₂) emisyonlarının ve toz emisyonlarının kümülatif değerlerinin (%7 O₂) kömür cinsine göre değişimi Şekil 5.29-Şekil 5.32' de verilmiştir.

Şekil 5.29'da görüldüğü gibi %10.80 neme kurutulmuş kömür dışındaki tüm kurutulmuş ve orijinal Y.Ağaçlı kömürlerine ait CO konsantrasyonları (%7 O₂ bazındaki) 1000 mg/m³' ün altındadır. Verilen değerler deney süresine ölçülen tüm değerleri kapsamaktadır. Kurutulmuş kömürlerde ise en iyi CO emisyon değeri 303 mg/m³ değeri ile %17.40 neme sahip kömürde görülmektedir. Uçucu madde miktarı en az değere sahip olmasına rağmen en yüksek ortalama CO emisyonu G.Afrika kömüründe açığa çıkmaktadır.

Şekil 5.30' da SO₂ emisyonları değişimi grafiğinden görüleceği üzere orijinal ve %24, %21, %17 neme kurutulmuş kömürlere ait SO₂ emisyonları 1000-3000 mg/m³ arasında yoğun olarak değerler almaktadır. 430 mg/m³ SO₂ konsantrasyonu ile G.Afrika en düşük ortalama değere sahiptir. Harman kömür ise ikinci olarak en düşük ortalama SO₂ (%5 O₂ bazında) değerini almıştır.



Şekil 5.29. Soba Deneylerinde CO Emisyonlarının Değişimi (4. Grup)



Şekil 5.30. Soba Deneylerinde SO₂ Emisyonlarının Değişimi (4. Grup)

NO_x değişiminde (Şekil 5.31) en düşük ortalama değere (%5 O₂ bazında) orijinal Y.Ağaçlı kömürü sahiptir. En yüksek baca gazı sıcaklığına sahip olan Soma kömürü 200-800 mg/m³ gibi geniş bir aralıkta değişim göstermektedir.

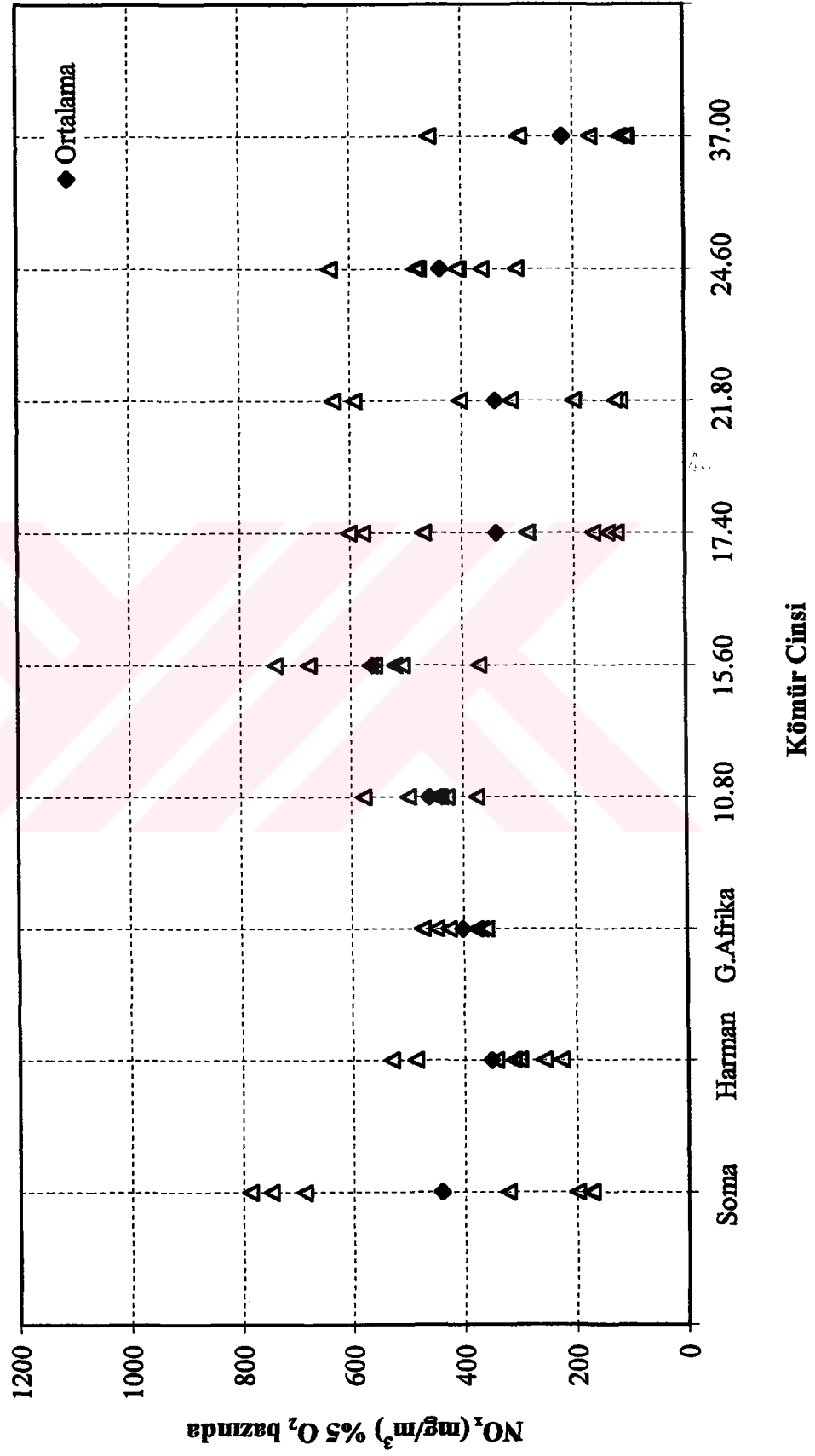
Yanma deneyleri süresince onar dakikalık sürelerle ölçülen toz emisyonlarına ait konsantrasyonlardan ve kütleli debilerden yararlanarak, kazan deneylerine benzer şekilde her bir yanma için kümülatif toz yayılım miktarları hesaplanmıştır. Hesaplanan kümülatif toz yayılım değerleri Şekil 5.32' de verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere en düşük toz yayınımları Soma, Harman, G.Afrika ve %37.00 nemli orijinal Y.Ağaçlı kömürlerinde tespit edilmiştir.

%21.80 ve %10.80 neme kurutulmuş Y.Ağaçlı kömürleri en yüksek kümülatif toz yayılım değerlerine sahip iken, olumsuzluk açısından ikinci sırada %24.60 neme kurutulmuş Y.Ağaçlı kömürünün olduğu gözlenmiştir. Sobada gerçekleştirilen yanma deneylerinde çeşitli kömürler için tespit edilen kümülatif toz yayılım değerleri, sıcak sulu kazanlara ait deney sonuçları ile paralellik göstermektedir.

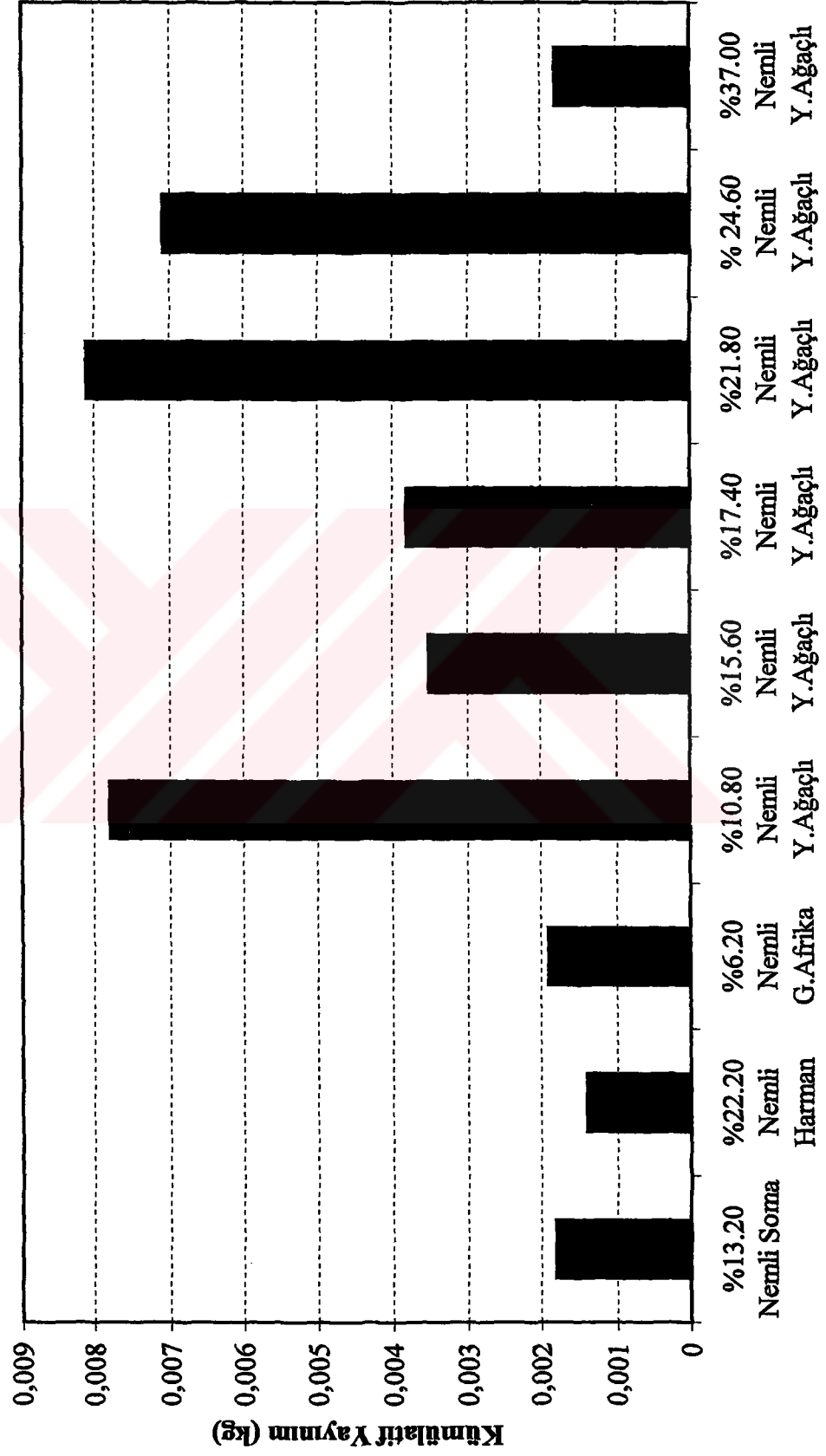
5.4 Literatür Bilgileri Işığında Tüm Yanma Deneylerinin ve Emisyonların Değerlendirilmesi

Kömür bünyesinde bulunan nem Bölüm 3.3' de detaylı olarak ifade edildiği gibi birçok araştırmacı tarafından çok genel olarak üç grupta tanımlanmıştır (Evseev ve Vorashilov, 1986; Banerjee, 1985; Gauger, 1932; Brown, 1953; Sondreal ve diğ., 1995). Bünye nemi olarak tanımlanan kapiler yoğuşma suyu, poröz yapı içerisindeki nemin, kömürdeki maksimum nemin yarısını oluşturduğu ifade edilmektedir. Bünye nemi linyitlerde %60 oranına kadar çıkabilmektedir (Sondreal ve diğ., 1995). Linyitlerde nemin büyük bir oranının poröz ortamında tutulması, porozite yapısının kömürün yanma mekanizmasında oldukça büyük öneme sahip olduğunu göstermektedir.

Nemin türü açısından yüzeye absorblanmış serbest su (yüzey nemi), fiziksel olarak kömür yapısını en kolay terk eden nem türüdür. Kapiler yoğuşma suyu fiziksel olarak yüzey neminden daha şiddetli şartlarda bünyeyi terk etmektedir. Bölüm 3.3' de tanımlanmaya çalışılan kapiler su, özellikle kömür bünyesinde porozite oluşumunu etkileyen esas kaynaktır. Bu iki tür suyun dışında kalan çözünmüş su, hidratasyon suyu ve kimyasal olarak yapıya bağlı diğer suların uzaklaştırılması kömürün



Şekil 5.31. Soba Deneylerinde NO_x Emisyonlarının Değişimi (4. Grup)



Şekil 5.32. Soba Deneylerinde Toz Emisyonların Kümülatif Yayınım Değerleri (4. Grup)

kimyasal yapısı nedeniyle daha zor olmaktadır. Kömür bünyesinde bulunan suyun miktarının artması kömürde tutuşmayı ve yanmayı geciktirici bir etken durumundadır. Dolayısıyla kömürün yanma ortamındaki davranımına kömür yapısındaki nemin türünün, kömür porozite yapısındaki ısı ve kütle transfer mekanizmalarının önemli etkisi olmaktadır.

Genel olarak tüm sonuçlara bakıldığında hava kontrolsüz yerli imalat kazan, hava kontrollü ithal kazan ve sobada gerçekleştirilen dört grup yanma deneylerindeki toz emisyonlarında paralellik olduğu görülmektedir.

Toz yayılımında en yüksek değerin %21 civarında kurutulmuş Yeniköy Ağaçlı kömüründe gözlenmesinin kavramsal olarak irdelenmesi literatür bilgilerini de kullanılarak bir yaklaşımla açıklanabilir.

Agarwal ve Bhat (1996) yaptıkları çalışmada kömürün yanma hızında nemin etkisi incelemişler ve yüksek nem değerlerinde yanma hızını yavaşlatıcı yönde değerler gözlemişlerdir.

Yukarıda belirtilenler çerçevesinde %37 nemli orijinal ve kurutulmuş Y.Ağaçlı linyitleri irdelendiğinde, orijinal %37-38 nemli Y.Ağaçlı kömürü yanmaya başladığında yüzeydeki serbest nem miktarı, değişken nem içerikli Y.Ağaçlı kömürleri içerisinde en yüksek miktardadır. Kömür çevresindeki ve kılcal yapıdaki nem ısı iletim hızını düşürerek, görece yumuşak bir yanmaya neden olmaktadır. Orijinal kömürdeki porozite miktarı kurutulmuş kömürlere kıyasla görece düşük miktarda olduğundan, toz emisyonu da göreceli düşük değerler almaktadır (Erdöl ve diğ., 1999). %21-25 civarında nemli Y.Ağaçlı kömürü kısmen kurutulduğu için bünyesinde orijinal Y.Ağaçlı kömürüne oranla önemli miktarda porozite oluşturmuş durumdadır (Sueberg ve diğ.,1993). Ancak fiziksek karakterde bir miktar nemi de hala bünyesinde tutmaktadır. %21-25 nemli Y.Ağaçlı kömürü yanmaya başladığında daha az miktarda yüzeyde serbest su ve bünye nemi (kapiler yoğunlaşma suyu) içermektedir. Yanma esnasında kömür bünyesindeki ısı transferinin, kurutma işlemi sırasında yüzeydeki serbest nemin uzaklaşmasından dolayı orijinal kömüre kıyasla daha yüksek mertebelerde olduğunu söylemek mümkündür. Yanma sırasında poröz ortamdaki buharlaşan suyun tamamı bu poröz ortamdan transfer edilemeyebilir. Bu durumda yüksek nem şartlarına kıyasla daha hızlı ısınma durumunda kömür

içerisindeki fiziksel su hızla buharlaşacak, gözenekler içerisinde basınç oluşturarak kırılmalara ve bunun sonucunda tanecik yayılımında görece artışa neden olacaktır.

%21 Nemli kömürün her iki kazanda yakılması deneylerinde yanma esnasında yüksek sesli patlamaların gözlenmesi bu durumu desteklemektedir. Yanma deneylerinde %21 neme kurutulmuş Y.Ağaçlı kömürünün en reaktif olduğunun gözlenmesi yukarıda açıklanan bu düşünceleri güçlendirmektedir.

%15 nemli kurutulmuş Y.Ağaçlı kömürü ise, bu kurutma işlemi nedeniyle daha yüksek miktarda poroziteye sahiptir. Yapıda kalan suyun esas olarak kimyasal olarak bağlı hidrasyon suyu ve %37-37 ve %21 nemli kömürlere oranla çok daha az miktarda bünye nemi (kapiler yoğunlaşma suyu) olduğunu söylemek mümkündür. Kimyasal olarak bağlı hidrasyon suyunun yapıdan uzaklaşması zor ve oldukça yavaştır (Sondreal ve diğ., 1995; Vorres ve diğ., 1992). %15 nemli kömürde porozite miktarı ve yanma sırasındaki ısı transferi, orijinal ve %21 nemli Y.Ağaçlı kömürlerine kıyasla daha yüksektir. Fakat %15 nemli kömürdeki nem çıkışının yavaş olması kömür yapısında çok daha az hasara neden olmaktadır. Bundan dolayı, toz emisyon konsantrasyonu %21 nemli kurutulmuş kömürdeki sonuçlar ile karşılaştırıldığında daha az değerler göstermektedir (Erdöl ve diğ., 1999).

Kantorovich ve Bar-Ziv (1999) yaptıkları çalışmada poröz ortamdaki ısı transferinin, poröz yapının özelliklerine bağlı olduğunu, por içerisinde gazın hareketi ile konveksiyonla ısı transferinin oluştuğunu ifade etmişlerdir.

Tanecik yayılımı nem ilişkisi ile ilgili olarak yapılan deneysel bir çalışmada nem oranının %18' den %27' ye çıkması sonucunda tanecik yayılımının sobalarda %150, kazanlarda ise %33.5 oranında arttığı görülmüştür (Anonim, 1994).

Kurutma işlemi sonucu kömürdeki porozitede hacimsel küçülme meydana gelmektedir. Kurutmanın devam etmesiyle birlikte nem miktarı azaldıkça por çapı da küçülmektedir. %21 nemli kömürdeki porozite çapı %17 ve %15 nemli kömüre göre daha büyüktür. Kurutma işlemi sonrası porozitede kalan suyun, yanma sırasındaki ani sıcaklık yükselmesi ile birlikte buhar faza geçmektedir. Buharın por duvarlarına yaptığı ani basınç, büyük çaplı porozitelerde daha fazla kırılma ve dağılmalara sebep olmaktadır. Ayrıca orijinal Y.Ağaçlı kömürünün, %17-15 nemli kömürlere düşük sıcaklıkta kurutulmaları sırasında kömürdeki nem bünyeyi yavaşça terketmiştir. Kurutma sonucu porozitede kalan su miktarı %21 nemli kömüre göre

daha düşüktür. Dolayısıyla bu kömürlerin yanması sırasında, porozitede kalan nemin buhar faza geçtiğinde por yüzeylerine yaptığı basınç %21 nemli kömürdeki kadar güçlü değildir şeklinde bir yaklaşım ile açıklamak mümkündür.

Linyitlerde ve genç kömürlerde kapiler yapıda suyun önemli oranlarda bulunması, linyitin nemlenme ve neminin giderilmesi durumunda şişme, küçülme (büzülme) davranımı ile sonuçlanmaktadır. Suuberg ve diğ. (1993) değişik ranklı linyitlerden bitümlülere kadar farklı kömürlerle yaptıkları çalışmada 30 ve 100°C’ de kurutma işlemi sonucunda nem kaybı ile hacimsel küçülme meydana geldiğini ve nem kaybı ile küçülmenin lineer olduğunu tespit etmişlerdir. Yanma sırasında küçülmenin tanecik yayınımına etkisi olabileceği kadar, sebep olacağı parçalanma ve porozite artışının sağlayacağı yanma verimi artışı da söz konusu olabilir (Sondreal ve diğ., 1995). Hidrojen bağlarıyla kuvvetli bir şekilde bağlanmış bulunan suyun, düşük kaliteli kömürlerde kütleli direnci sağlayan en önemli parametre olduğu bilinmektedir. Nitekim kurutmadan sonra Türk linyitlerinin ufalanma eğilimi önemli ölçülerde artmaktadır. MTA (1993)’ nın yapmış olduğu bir çalışmada orijinal halde yüksek oranda su içeren kömürlerin taşıma ve depolama sırasında kuruyarak tozlaştığı, ayrıca bu kömürlerin verimli yakılmadığı tespit edilmiştir.

Özellikle kömürün nem oranı, bünye neminin altına düşürüldüğü durumlarda artan parçalanma ve tozlaşma eğilimi kömürün kalitesini belirleyen önemli bir parametre haline gelmektedir (Atakül ve diğ., 1996).

%10.80 neme kurutulmuş Y.Ağaçlı kömürü çok kırılgan bir yapıda olup, gerek kurutma gerekse kazana yükleme sırasında çok dikkat gösterilmesine rağmen aşırı tozlaşma göstermiştir. Yapıdaki kırılganlık ve tozlaşma neticesinde de yanma deneylerinde baca gazında toz emisyonları artmıştır. Başka bir ifade ile suyun kritik bir değer altına düşürülmesi, yapıyı bir arada tutan bağlayıcı etkisinin ortadan kalkmasına işaret etmektedir.

Deevi ve Suuberg (1987) yapmış oldukları deneysel çalışmada dört adet kuzey Dakota linyitlerinin farklı derecelerde kurutulmasının linyitlerin fiziksel özellikleri üzerine etkilerini incelemişlerdir. Kurutma sonucu hacimsel küçülme miktarı, hesaplanan nem kayıplarından daha büyük hacim kayıpları göstermiştir. Çekme miktarının her zaman irreversibl olduğunu ve ayrıca kurutmanın tam olarak tamamlanmamış olduğu durumda, su içerisinde tekrar şişme sonucu orijinal hacmin

%80' nin geri kazanıldığını tespit etmişlerdir. Sonuçlar kömür porozitesindeki irreversibl küçülmenin özellikle makroporozite ve mezoporozite boyutlarındaki (Unsworth ve diğ.,1991) porlarda çökme, bozunma meydana getirdiğini göstermiştir.

Bazı proseslerde linyitlerle yapılan işlemlerde belli sıcaklıklar üzerinde karboksil gruplar parçalanarak CO₂ oluşumu gerçekleşir. Bu oluşum gözenekler dışında bulunan suyun sıkışmasına neden olur. Gözeneklerin çoğu ya çöker, yada tıkanır, bu da malzemenin özelliğini ve yapısını değiştirir. Bu esnada oluşan katran sonradan gözeneklerin tıkanmasına neden olur. Genç kömürlerde bu şekilde ısıtılma işlemi sonrası poröz yapı değişir (J.E.Sinor Consultants Inc., 1992). Böylesine karmaşık etkileşimler nedeniyle ısıtılma işlemi sırasında kömürün nem buharlaşması olayında farklı mekanizmalar ve dolayısıyla farklı buharlaşma süreçleri oluşmaktadır. Değişken nem içerikli kömürlerde toz konsantrasyonunun değişik değerler alması poröz yapıdaki bu değişim ile de açıklanabilir.

Vorres ve diğ. (1992) yaptıkları çalışmada buharlaşmanın iki aşamalı gerçekleştiğini gözlemlemişlerdir. Isıtılma işlemi süresince birinci aşamada kömür neminin yaklaşık %80-85' i belli bir hızla buharlaştıktan sonra, daha yavaş buharlaşmanın olduğu ikinci süreci tanımlamaktadırlar. Yani yanma mekanizması süresince ilk olarak nem çıkışının büyük bir kısmı gerçekleşmektedir. Fakat daha sonra bünyedeki nemin çıkışı devam etmektedir. Daha önce de ifade edildiği gibi, mekanik kuvvetler sonucu kömürde tutulan yüzey nemi diğer nem türlerine oranla serbest olduğundan ortamı ilk olarak terk etmektedir. Daha sonra ortamı bünye nemi terk etmektedir. Burada poröz yapının şekli ve yapısı büyük önem taşımaktadır. Poröz yapının henüz çok net olarak tanımlanamaması ve yapının karmaşık olması nedeniyle, yanma mekanizması sırasında nemin bu ortam içindeki davranışını da tanımlamak oldukça zor hale gelmektedir.

Yapılan çalışmalarda (Harpalani ve Schraufnagel, 1990; Gregg ve Sing, 1982; Pooley, 1968; Gamsan ve diğ., 1993) açık ve kapalı porlar üzerinde incelemeler gerçekleştirilmiştir. Son olarak Alexeev ve diğ. (1999) kömürdeki porları genel olarak açık ve kapalı olmak üzere iki gruba ayırmıştır. Kömürdeki kapalı poroziteyi kesin olarak tam belirleyen metod bulunmamasına rağmen, Alexeev ve diğ. (1999) kapalı porların ihmal edilemeyecek oranda fazla olduğunu ve toplam poroziteye esas katkının kapalı por hacimlerinden geldiğini ifade etmişlerdir. Ancak kapalı porların katı yüzeyi ile bağlantısının olmaması bu porlarda bulunan nemin çıkışını doğal

olarak etkileyecektir. Bu kapalı porlarda, por yapısına ve bu porlardan nem çıkışına net açıklık henüz getirilememektedir.

Yakma sistemlerinde ideal bir karışım söz konusu olamayacağından Bölüm 2’de de ifade edildiği gibi yanma verimi her zaman birden küçüktür (Durmaz, 1998). Yakma sistemi üzerine etkin olan birçok faktörün davranımı bu verimi azaltmakta veya arttırmaktadır. Bu faktörlerden birisi yakıt-hava karışım hızıdır. Fiziksel koşulların etkin olduğu yakıt-hava karışım hızı sıcaklık artışından çok az etkilenir. Bu nedenle, teknik yanma sistemlerinde yanma hızı genelde yakıt hava karışım hızı tarafından sınırlandırılır (Durmaz, 1998).

Şekil 2.4’ den görüldüğü gibi, çeşitli yakıtların tutuşma hızlarının, yanıcı gaz karışım oranlarına göre değişim göstermektedir. Dolezal (1961), alev hızının yanma odası basıncı ile arttığını, ayrıca yanıcı karışım sıcaklığının arttırılmasının alev hızını arttırdığını tespit etmiştir. Durmaz’ ın (1998) ifade ettiği gibi teknik yanma sistemlerinde, alev cephesi sürekli değişir ve türbülanslıdır. Bu türbülanslılık durumu, alev cephesinin ısı aktarımı ve oksijen difüzyonu etkinliğini arttırmaktadır.

Yakıt ve havanın gaz fazında bulunduğu yanma biçimi homojen yanma olarak adlandırılır. Sıvı yakıtların ve kömürün yanması ise daha öncede ifade edildiği gibi heterojen özellikli bir yanmadır. Homojen yanma en kapsamlı araştırılan ve kavranması en kolay olan yanma biçimidir. Homojen yanma durumunda da, yanma evreleri, yanma reaksiyonları ve emisyon oluşum mekanizmaları henüz tam olarak aydınlatılmış değildir. Bu bilgiler çerçevesinde heterojen yanmanın anlaşılma zorluğu görülebilir. Katı ve sıvı yakıtların heterojen yanma mekanizmalarının yakma sistemi analiz ve sentezine yönelik olarak kavranması ve irdelenmesi homojen yanma modelinden sağlanan teknik bilgilerle anlaşılır hale gelebilmektedir (Durmaz, 1998).

Kömürün hava ile karıştırılması, gaz fazın geçirilmesi, gaz-gaz karışımı ile yanıcı gaz karışımı oluşturması; karmaşık, heterojen yüzey reaksiyonları ile meydana geldiği tespit edilmiştir (Dolezal, 1967). Kömürün yanması çok karmaşık ve heterojen yanma mekanizması olması, kömürün gaz fazına geçirilerek, heterojen yanma koşullarının, homojen karışım ve yanma koşullarına dönüştürülmesi ile üç aşamada Bölüm 2.4.2’ de verildiği gibi incelenmektedir. Kömürün heterojen tutuşması, homojen yanıcı gaz tutuşma sürecine benzer davranış gösterir. Bu yanıcı

gazlar, Şekil 2.6' da detaylı olarak açıklandığı gibi, ilk önce homojen tutuşma biçiminde tutuşur ve ardından kok gazlaşması üzerinden kömürün yanmasını sağlar. Tutuşma ısısı, ızgaralı yakma sistemlerinde genelde kor tabakasından sağlanır (Durmaz, 1998).

Izgaralı yakma sistemlerinde büyük taneli standart parça kömürün hareketsiz olarak yanmasının, bu tür sistemlerde yanma mekanizmasındaki zorlukların temelini oluşturduğunu söylemek mümkündür. Bölüm 2.4.2.1' de detaylı olarak anlatıldığı gibi düzgün ve verimli bir yanma için yatağın belli özelliklere, kömürün ise standart özelliklere sahip olması zorunluluğu vardır.

Yanma sırasında ısı ve kütle transferinde, yakıtın (kömürün) biçim faktörü yanma mekanizmasında büyük önem taşıyan bir diğer faktördür. Biçim faktörü Bölüm 2.4.2.2' de ifade edildiği gibi içi delik ince duvarlı silindirde en büyüktür. Bu nedenle ezilerek öğütülmüş gözenekli kömür taneciği yanma için en uygun fiziksel yapıyı oluşturur (Dolezal, 1967). Ancak sabit ızgaralı yakma sistemlerinde kömür boyutunun ve şeklinin bu biçimde kullanılamaması yanma mekanizmasını etkilemektedir (Durmaz, 1998).

Izgara üzerine yakma, temel yanma koşullarının (gaz faza geçme+3T) en zor olduğu, yanmanın en zor ve ısı kapasitenin düşük olduğu yakma sistemleridir. Daha öncede ifade edildiği gibi çevre koşullarının oluşturulması standart yakıt uygulaması ile mümkün olabilmektedir. Uygun yakıt kullanılmaması, yakıt ile yakma sistemi arasında uyumsuzluğa, yanmada verimin düşmesine, hava kirletici emisyonların aşırı biçimde artmasına neden olmaktadır. Bunun başlıca nedeni Bölüm 2.6.1' de açıklandığı gibi sabit karbon ve yanıcı uçucuların tamamen farklı yanma özelliklerine sahip olmasıdır. Büyük parça kömürün yakıldığı ızgaralı yakma sistemlerinde, yakıt-hava karışımı için, kömür parçası ve yakma havası arasında O₂ difüzyonunu arttırmak gerekir. Bu ise, ızgaralı yakma sistemlerinin, kömürün tane büyüklüğüne bağlı olarak daha fazla hava vermek suretiyle çalıştırılması zorunluluğunu doğurur. Fakat havanın ısı kaybını arttırması, ızgaralı kazanların ısı veriminin düşük olmasına neden olur. Şekil 2.12' de görüldüğü gibi, belli yatak kalınlığı üzerinde, ızgara üst yüzeyinin sıcaklığı, külün ergime sıcaklığı (T_{KE}) üzerine çıkarak külün ergimesine, birincil havanın azalmasına ve yanmanın bozulmasına neden olmaktadır (Durmaz, 1998). Bu da özellikle ızgaralı yakma

sistemlerinde ikincil hava beslemesinin bu tür yakma sisteminde önemini göstermektedir.

Yukarıdaki literatür bilgileri çerçevesinde bir değerlendirme yapıldığında yakma sistemi-yakıt-yakıcı (kullanıcı) arasındaki uyumun büyük önem taşıdığı görülebilmektedir. Çok yaygın olarak kullanılan hava kontrolsüz ve elle beslemeli sıcak su kazanlarında, düşük kaliteli linyitler yanma rejimi ve emisyonlar açısından Azim kazan deneylerinde görüldüğü gibi görece olumsuz sonuçlar vermiştir. Düşük kaliteli linyitlerin bu tür kömürler için özel olarak tasarlanmış otomatik, hava kontrollü, sekonder hava beslemeli yakma sistemlerinde emisyon ve verim açısından çok daha iyi şartlarda yakılabileceği Fischer kazanda yapılan deneylerde görülmektedir.

Yüksek oranda uçucu madde içeren kömürlerin uygun yanma koşullarının olmadığı yakma sistemlerinde yakılması durumunda tam yanmanın sağlanamadığı, duman emisyonu olarak bacadan atıldığı tespit edilmiştir. Yüksek oranda uçucu madde içeren kömürlerin tam yanmasının sağlanması ve duman emisyonunun azaltılması için özellikle sekonder hava beslemeli veya ön yakıcıli sistemler kullanılmasının önem taşıdığı belirtilmektedir (MTA, 1993).

Linyitler yüksek uçucu içermeleri sebebiyle Tablo 2.3' de verildiği gibi yakıtlar içerisinde en düşük tutuşma sıcaklığına sahiptirler (Durmaz, 1998). Düşük kaliteli linyitlerde uçucu oranının yüksek olması nedeniyle yanma sırasında uçucuların yakılabilmesi için yeterli derecede sekonder havaya ihtiyaç vardır. Azim kazanda yanma havası girişi alt kısımdaki kül kapağından sağlanmakta, bu da yanma sırasında sürekli el ile kontrol yapıldığı için yetersiz veya aşırı hava girişine neden olmaktadır. Sonuç olarak da oldukça kararsız ve kontrolsüz yanma şartları oluşmakta, yanma gazlarındaki oksijen %10-18 arasında değerler almaktadır. Üst klapeden kömürün üst kısmına, yanma bölgesine gönderilen ikincil havanın yetersiz kaldığı deney sonuçlarında görülmektedir.

Yanma havasının kontrollü olarak gönderilmesi, yakıtın otomatik olarak yanma odasına kademeli olarak beslenmesi, ikincil havanın direkt olarak hava kanalından gazların bulunduğu ortama gönderilmesi yanma şeklini tamamen değiştirmektedir. Yanma mekanizması, kontrolsüz yakma sistemleriyle mukayese edildiğinde görece daha olumlu yanma koşullarının düşük kaliteli linyitler için sağlanabileceği

görülmektedir. Uygun kazan tasarımlarının yapılması düşük kaliteli yakıtların daha verimli ve düzgün yanma şartlarında yakılmasını sağlayacaktır. Böylece bu tür yakıtların hava kirliliğine katkı payları önemli oranda azalma gösterecektir. Bu tür tasarımlar, bu açıdan da büyük oranda önem taşımaktadır.

Düşük kül, yüksek uçucu içerikli linyitlerin reaktivitesi yüksektir. Bu tür kömürlerin yanma süresini uzatmak amacıyla, yüksek kül içerikli kömürlerle karıştırılarak yakılmasının yanma mekanizmasını yavaşlattığı harman kömüre ait yanma deneyleri sonuçlarında görülmüştür. Y.Ağaçlı kömürü tek olarak yandığında yüksek baca gazı sıcaklığı değerleri gösterirken, G.Afrika kömürü ile karıştırılarak yakılması ile baca gazı sıcaklığı düşme göstermektedir. Ancak bu hava fazlalık katsayısını yükseltmektedir. Soma kömürünün kül içeriği Y.Ağaçlı kömürüne göre daha yüksek, uçucu madde içeriği ise aynı mertebelerdedir. Bu kömürün yanması, Fischer kazandaki baca gazı ortalama sıcaklığından görüldüğü üzere Y.Ağaçlı kömürüne oranla daha yavaş gerçekleşmektedir. Soma kömürünü ait soba deneylerinde ise, üstten yanma durumunda uçucuların çıkışı sonrası yanma hızlanmış ve baca gazı sıcaklığı yüksek değerler almıştır. Kazan deneylerinde olduğu gibi, soba deneylerinde de G.Afrika, dolayısıyla harman kömüre ait baca gazı sıcaklıklarından yanmanın diğer kömürlere oranla daha yavaş gerçekleştiği tespit edilmiştir.

Kömürün nem içeriğindeki değişimin yanma sırasında özellikle toz ve CO emisyonlarını üzerinde etkin olduğu tüm yakma sistemlerindeki sonuçlarda görülmüştür. Kömürdeki toplam porozite hacmi kömürleşme derecesi azaldıkça artmaktadır. Özellikle kurutma sırasında kömür yapısında porozite oluşumu toz konsantrasyonunu etkilemektedir. Tüm yanma deneylerinde %21 nemli kömürdeki toz konsantrasyonu diğer kömürlere oranla en yüksek değeri almıştır. Bu daha önce detaylı olarak ifade edilen por yapısındaki ısı ve kütle transfer mekanizmasının nem içeriğine bağlı olarak farklılık göstermesinden kaynaklanmaktadır.

6. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Otomatik, hava kontrollü sıcak su kazanı, elle yüklemeli sabit ızgaralı, hava kontrolsüz sıcak su kazanı ve TS belgeli üstten yanmalı sobada Soma, G.Afrika, Y.Ağaçlı-G.Afrika Harman, Orijinal Y.Ağaçlı ve çeşitli nemlere kurutulmuş Y. Ağaçlı kömür örnekleriyle yapılan yanma deneyleri ve emisyon ölçümlerinden elde edilen genel sonuçlar şunlardır :

✓ Üç yakma sisteminde yakılan tüm kömür örneklerinde emisyon konsantrasyonları başlangıçta uçucu madde yanması aşamasında ve sabit karbonun yanmasının gerçekleştiği kararlı yanma (yarı kok yanması) evresinde farklılıklar göstermektedir. Genelde uçucuların çıktığı başlangıç kademesinde, özellikle karbonmonoksit ve toz derişimleri, kararlı yanma (yarı kok yanması) aşamasındaki toz derişimlerinden daha yüksek olmaktadır.

✓ Yaygın kullanım alanına sahip, elle yüklemeli sabit ızgaralı sıcak su kazanında yakma havasının tam olarak kontrol edilemediği, bu nedenle yüksek hava fazlalık katsayısı ile yanmanın gerçekleştiği görülmüştür. Azim kazanda yanma süresince yanma gazlarındaki oksijen %10-18 arasında değişim göstermektedir. Yakıt, yakma sistemi ve yakıcı (operatör) arasındaki üçlü uyumun çok zor oluşturulması, bu sıcak su kazanını kontrolsüz yakma sistemi durumuna getiren temel nedenlerden biridir. İnsan insiyatifinin olmadığı, otomatik hava kontrollü Fischer kazanda ise optimum hava fazlalık katsayısı ile yanma deneyleri gerçekleştiği gözlenmiştir.

✓ Yakma havasının daha iyi kontrol edilebildiği otomatik yüklemeli, hava kontrollü, sekonder hava beslemeli Fisher kazanda karbonmonoksit ve toz emisyonları, elle yüklemeli, sabit ızgaralı kazana kıyasla görece daha düşük gerçekleşmiştir. Sekonder hava beslenmesinin Fischer kazandaki yanma mekanizmasını olumlu yönde değiştirdiği açıkça görülmektedir. Hava kontrolsüz ve hava kontrollü iki

yakma sistemindeki sonuçlar yanma mekanizmasında ve yanma sonucu oluşan emisyonlarda, kazan tasarımı ile iyileştirme yapılabileceğini göstermektedir. Sekonder hava beslemeli ve kontrollü yakma sitemlerinde düşük kaliteli linyitler görece daha olumlu şartlarda yakılmıştır.

✓ Hava kontrollü yakma sisteminde yanma bölgesine yakıt kademeli olarak gönderilmekte, kontrolsüz sistemde ise diğer kazana göre çok daha geniş bir yanma ortamına kömürün tümü yüklenmektedir. Bu işlem kontrolsüz kazanda yanmayı olumsuzlaştıran temel nedenlerden biri olarak tanımlanabilir. Yakıtın kademeli olarak beslenmesi yanmanın düzenli olması açısından oldukça önem taşımaktadır.

✓ Otomatik, hava kontrollü sıcak su kazanında (Fischer kazan) çeşitli nemlere kurutulmuş Y.Ağaçlı kömür örnekleri yakıldığında kazan kapasitesi anma ısı gücünü geçmektedir. Bu kazanda en yüksek verim (%37 nemli) orijinal Y.Ağaçlı kömürü ile elde edilmiş, CO ve toz emisyonları orijinal Y.Ağaçlı kömüründe, kurutulmuş Y.Ağaçlı kömür örneklerine kıyasla daha düşük tespit edilmiştir.

✓ Soba deneylerinde yakıt sarfiyatlarının birbirine yakın değerler almasına rağmen, gerek verimdeki değişimler gerekse kömürlerin alt ısı değerlerindeki farklılıklar, soba kapasitelerinin minimum ve maksimum değerler arasında iki kat değişimine sebep olmuştur. En düşük hava fazlalık katsayısı Soma kömürü ile yapılan deneyde elde edilirken, Harman kömür ile yapılan deneyde ise en yüksek değerini almıştır. Hava fazlalık katsayısı kurutulmuş Y.Ağaçlı kömürlerinde %15 nem değerinde minimum olmakta, azalan ve artan nem ile artmaktadır. Kurutulmuş ve orijinal Y.Ağaçlı kömürleri ile yapılan deneylerde ortalama baca gazı sıcaklığı 400-500°C değerleri arasındadır. Baca gazı sıcaklığı Soma kömüründe en yüksek değere ulaşmıştır. Harman ve G.Afrika kömürlerinde ise 400°C' nin altında yer almaktadır. Bu sebeple soba deneylerinde en yüksek verim G.Afrika kömürünün yakılmasıyla elde edilmiştir.

✓ Kömürdeki toplam porozite hacmi kömürleşme derecesi azaldıkça artmaktadır. Özellikle kurutma sonucu kömür yapısında porozite oluşumu artmaktadır ve bu porozite oluşumu toz konsantrasyonunu etkilemektedir. En yüksek toz yayılımı üç

yakma sisteminde de %21 neme kurutulmuş Y.Ağaçlı kömüründe gözlenmiştir. Yanma sırasında porozite ortamında bulunan su ani sıcaklık yükselmesiyle beraber por ortamından çıkarken yüzeye basınç uygulamaktadır. Bunun sonucunda kömür yapısında kırılmalar, parçalanmalar meydana gelmekte, toz konsantrasyonu yükselmektedir.

✓ %15-17 nem içerikli kömürlerde, kurutma sonrası por ortamında kalan su miktarı %21 nemli kömüre göre azdır. Yanma sırasında porozitedeki suyun, ısınma ile ortamı terk ederken por yüzeylerine uyguladığı basınç ise daha düşüktür. Orijinal kömürde nem oranının yüksek olması yanma mekanizmasını yavaşlatmaktadır. %10 neme kurutulmuş Y.Ağaçlı kömüründe, kurutma sonucu kırılmanın ve tozlaşmanın artması toz konsantrasyonunu arttırmaktadır. Soma, G.Afrika ve Harman kömürlerindeki toz konsantrasyonları ise düşük seviyelerdedir.

✓ Sobada gerçekleştirilen yanma deneylerinde çeşitli kömürler için tespit edilen kümülatif toz yayılım ve karbonmonoksit değerleri, Fischer kazandaki deney sonuçları ile paralellik göstermektedir.

✓ Y.Ağaçlı kömürünün reaktivitesinin düşürülmesi amacıyla G.Afrika kömürü ile karıştırılarak oluşturulan Harman kömür, Y.Ağaçlı kömürüne göre daha düşük baca gazı sıcaklıklarında yanmıştır. Reaktif kömürlerin kül içeriği yüksek kömürler ile karıştırılarak yakılmasının yanma mekanizmasını yavaşlattığı görülmektedir.

✓ G.Afrika kömürü kül içeriğinin yüksek, dolayısıyla reaktivitesinin düşük olması sebebiyle üç yakma sisteminde de yüksek ısı değerine rağmen, düşük baca gazı sıcaklığı değerleri göstermiştir. Kül yanmayı yavaşlatarak kömürün ısı değerini düşürmektedir.

✓ Baca gazı sıcaklığı kömür nemine bağlı olarak değişim gösterirken, burada yakıttaki azotun yanması ile oluşan NO_x yanma süresince baca gazı sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir.

✓ Üç yakma sistemindeki sonuçlara göre, kükürtdioksit emisyonlarının yakma sistemlerine göre farklılık göstermediği, yakıtın kükürt içeriğine bağlı olduğu net olarak gözlenmektedir.

✓ Sıcak su kazanlarında ve sobada gerçekleştirilen yanma deneylerinde, kurutulmuş Y.Ağaçlı kömürlerinin orijinal Y.Ağaçlı kömürüne göre yanma verimi, toz ve CO açısından bir üstünlük sağlamadığı görülmüştür.

Öneriler :

✓ Linyit kömürlerinin nem içeriğinin sabit yataklı yakıcılarda yanmaya ve emisyonlara etkisi ilk kez incelenmekte ve yorumlanmaktadır. Bu çalışma devamı getirilmesi gereken bir tez ortaya atmaktadır.

✓ Yakıtların özelliklerine uygun yakma sistemlerinin tasarlanması ve bu sistemlerin kullanılması yanmanın davranımında önemli oranda iyileştirmeye sebep olacak, daha verimli ve düzgün yanma şartlarında yakılmasını sağlayacaktır. Böylece düşük kaliteli yakıtlar özel olarak tasarlanmış yakma sistemleri ile daha az zararlı hale gelecektir. Uygun kazan tasarımının yapılması düşük kaliteli yakıtların (liniyitlerin) özellikle Fischer kazan gibi hava kontrollü, otomatik yüklemeli, sekonder hava beslemeli yakma sistemlerinde yakılması, emisyon konsantrasyonunu önemli ölçüde düşürecektir. Böylece bu tür yakıtların hava kirliliğine katkı payları büyük oranda azalma gösterecektir. Bu tür tasarımlar, bu bakımdan da büyük oranda önem taşımaktadır.

✓ Kömür numunelerinde porozite değişimi ve miktarı, yapı içerisindeki kapalı ve açık por yapısının daha anlaşılır hale getirilmesi ile nemin emisyonlar üzerindeki etkileri daha net açıklanabilecektir. Ayrıca yanma emisyonlarının davranımı ve değişimi hakkında daha anlaşılır ve açıklayıcı bilgiler elde edilmesini de sağlayacaktır. Yanma sırasında, özellikle kapalı porlardaki gelişen olayların aydınlatılması bu duruma önemli ölçüde ışık tutacaktır.

KAYNAKLAR

A Special Report, 1974. Coal Combustion, *Power*, pp.48-53, March.

Açma, H., 1999. Kömürün Mineral İçeriğinin Yanma Özelliklerine Etkisi, *Doktora Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Adachi, Y., Komoto, M., Watanabe, I., Ohno, Y., Fujimoto, K., 2000. Effective Utilization of Remote Coal Through Dimethyl Ether Synthesis, *Fuel*, 79, 229-234.

Agarwal, P.K., Genetti, W.E., Lee, Y.Y., 1986. Coupled Drying and Devolatilization of Wet Coal in Fluidized Beds, *Chem. Eng. Sci.*, 41, 9, 2373-2383.

Agarwal, P.K. and Pedler, I., 1986. Drying, Devolatilization and Volatile Combustion for Single Coal Particles : A Pseudo - Steady Approach, *Fuel*, 65, 5, 640-645.

Akçura, F. ve Gerger, M., 1982. Başlıca Türk Kömürlerinin Özellikleri, *MTA*, Ankara.

Akgün, H., Kural, O., Ekinci, E., 1989. Briquetting of Konya Germenek Lignite of Turkey, *Fuel Processing Technology*, 22, 87-95.

Akgün, F., ve Arısoy, A., 1993. Kömürlerin Kendiliğinden Yanmaya Karşı Yatkınlıklarının İncelenmesi, 3. *Yanma Sempozyumu*, Bildiri Kitabı, Kirazlıyayla Tesisleri, Bursa, 19-21 Temmuz, s.143-152.

Akgün, F., Erkmen, Ö., Arısoy, A., 1993. Kömürdeki Nem Buharlaştırmasının Kinetiği, 3. *Yanma Sempozyumu*, Bildiri Kitabı, Kirazlıyayla Tesisleri, Bursa, 19-21 Temmuz, s.85-92.

Akgün, F., 1994. Kömürlerin Kendiliğinden Yanmasının Teorik ve Deneysel İncelenmesi, *Doktora Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Alexeev, A.D., Vsilenko, T.A., Ulyonova, E.V., 1999. Closed Porosity in Fossil Coals, *Fuel*, 78, 635-638.

Alexeev, A.D., Sinolitsky, V.V., Vasilenko, T.A., 1994. About Diffusion Penetrability of Porous Solid, In: *International Conference on Membrane Electrochemistry, Ion-Exchange Membranes From Synthesis to Applications*, Anapa, 207-210.

- Allardice, D.J. and Evans, D.G., 1978.** *Analytical Methods for Coal and Coal Product*, pp.247-265, Ed. C.Karr, Academic Press, 1, C.7, New York.
- Altaş, M., 1994.** Genel Enerji Planlaması Sonuçları ve Linyitin Yeri, *2000'li Yıllara Doğru Linyit Sektörümüz Sempozyumu*, Maden Mühendisleri Odası, Ankara, 14-15 Kasım, s.45-51.
- Amerasekera, G., Scarlett, M.J., Maimwaring, D.E., 1995.** Micropor Size Distribution and Specific Interactions in Coals, *Fuel*, 74, 115-118.
- Andersen Stack Sampling Seminar, 1989.** *Andersen Instruments, Inc.*, Atlanta, Georgia, 16-20.
- Anonim, 1994.** *Dumansız Kazan Emisyon Ölçüm Raporu*, Gazi Üniversitesi, Ankara, s.21-35.
- Arioğlu, E., 1995a.** Hava Kirliliği - Kömür Gerçeği, *II. Hava Kirlenmesi, Modellenmesi ve Kontrolü Sempozyumu*, İTÜ, Meteoroloji ve Çevre Mühendisliği Bölümü, İstanbul, 22-24 Mart.
- Arioğlu, E., (Ed.), 1995b.** *Hava Kirliliği ve Kömür Gerçeği*, TMMOB, Maden Mühendisleri Odası Yayını, İstanbul Şubesi, Mayıs, İstanbul.
- Arisoy, A., 1987.** Bottom Feed Fixed Bed Combustion of Coal, *International Specialists Meeting on Solid Fuel Utilization*, Lizbon, Portugal.
- Arisoy, A., 1990.** Sabit Katı Yakıt Yatağındaki Yanmanın Deneysel İncelenmesi, İTÜ Enerji Uygar Merkezi; *Araştırma Projesi*, No.73-009.
- Arisoy, A., 1991.** Kömürlerin Yakılması, *Kömür*, Bölüm 14, Kurtiş Matbaası, s.357-401.
- Arisoy, A., and Akgün, F., 1994.** Modelling of Spontaneous Combustion of Coal with Moisture Content Included, *Fuel*, 73, 281-286.
- ASTM D - 3302 - 74, 1976.** Standart Test Method for Total Moisture in Coal.
- Atakül, H., Okutan, H., Arisoy, A. ve Ekinci, E., 1996.** Kömür Neminin Yanma ve Emisyona Etkisi, *2. Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi*, Bildiri Kitabı, İTÜ, İstanbul, 9-13 Eylül.
- Atımtay, A., 1979.** Akışkanlaştırılmış Yataklarda Linyit Kömürlerinin Yakılması, *Doçentlik Tezi*, ODTÜ, Ankara.
- Banerjee, S. C., 1985.** *Spontaneous Combustion of Coal and Mine Fires*, 21-37, A.A.Balkema Press, Rotterdam.
- Bar-Ziv, E., Kantorovich, I.I., 1999.** Heat Transfer Within Highly Porous Chars : A Review, *Fuel*, 78, 279-299.

- Başkaya, Ş., ve Durmaz, A., 1991.** Katı Yakıtlı Kalorifer Kazanlarının Yanma ve Emisyon Özelliklerinin İyileştirilmesi, *Yanma ve Hava Kirliliği I. Ulusal Sempozyumu*, Gazi Üniversitesi, Ankara, 10-12 Haziran.
- Bayram, A., 1993.** Hava Kalitesinin Korunması Yönetmeliği, 1. *Hava Kirlenmesi Kontrolü Sempozyumu*, Tebliğ Kitabı, İTÜ İnşaat Fakültesi, İstanbul, s.49-53.
- Bégin, D., Gérard, I., Albiniak, A., Broniek, E., Siemieniowska, T., Furdin, G., Marêché, J.F., 1999.** Pore Structure and Reactivity of Chars Obtained by Pyrolysis of Coking Coals Containing MoCl₅, *Fuel*, **78**, 1195-1202.
- Berkowitz, N. and Schein, H.G., 1951.** Heat of Wetting and the Spontaneous Ignition of Coal, *Fuel*, **30**, 94-96.
- Berkowitz, N., 1979.** *An Introduction to Coal Technology*, pp.57-89, Academic Press London.
- Bhat, S. and Agarwal, P.D., 1996.** The Effect of Moisture Condensation on the Spontaneous Combustibility of Coal, *Fuel*, **75**, 13, 1523-1532.
- Bhattacharyya, K.K., 1971.** The Role of Sorption of Water Vapour in the Spontaneous Heating of Coal, *Fuel*, **50**, 367-380.
- Bhattacharyya, K.K., 1972.** The Role of Desorption of Moisture from Coal in Its Spontaneous Heating, *Fuel*, **51**, 214-220.
- Böke, E., Arısoy, A., 1993.** Sabit Katı Yakıt Yatağındaki Yanmanın Matematiksel Modellenmesi, 3. *Yanma Sempozyumu*, Kirazlıyayla Tesisleri, Bursa, 19-21 Temmuz, s.199-210.
- Brown, G.M., 1953.** The Determination of Moisture in Coals, *Natural Gas.Bul.* NAGBA Australia, **17**, 14-21.
- Bürküt, Y, Süner, F., Çoban, F., 1990.** İstanbul Bölgesi Linyitlerinin Jeolojik ve Teknolojik Büyüklükleri” , *İTÜ*, C.48, S.2, İstanbul.
- Carr, M.R., Kumagai, H., Peake, B.M., Robinson, B.H., Clemens, A.H., Matheson, T.W., 1995.** Formation of Free Radicals During Drying and Oxidation of a Lignite and a Bituminous Coal, *Fuel*, **74**, 3, 389-394.
- Chan, M.L., Jones, J.M., Pourkashanian, M., Williams, A., 1999.** The Oxidative of Coal Chars in Relation to Their Structure, *Fuel*, **78**, 1539-1552.
- Chen, X.D., and Stott, J.B., 1993.** The Effect of Moisture Content on the Oxidation Rate of Coal During Near-Equilibrium Drying and Wetting at 50°C, *Fuel*, **72**, 6, 787-792.

- Clarkson, C.R., Bustin, R.M., 1996.** Variation in Micropore Capacity and Size Distribution with Composition in Bituminous Coal of the Western Canadian Sedimentary Basin, *Fuel*, **75**, 1483-1498.
- Clarkson, C.R., Bustin, R.M., 1999.** The Effect Pore Structure and Gas Pressure Upon the Transport Properties of Coal : A Laboratory and Modeling Study, 1. Isotherms and Pore Volume Distributions, *Fuel*, **78**, 1333-1344.
- Clemens, A.H., Matheson, T.W., Rogers, D.E., 1991.** Low Temperature Oxidation Studies of Dried New Zeland Coals, *Fuel*, **70**, 215-221.
- Clemens, A.H. and Matheson, T.W., 1996.** The Role of Moisture in the Self-Heating of Low-Rank Coals, *Fuel*, **75**, 7, 891-895.
- Çevre Bakanlığı, 1986.** *Hava Kalitesinin Korunması Yönetmeliği*, (2 Kasım 1986 gün ve 19269 sayılı Resmi Gazete' de yayınlanarak yürürlüğe girmiştir), Ankara.
- Davidson, J.F., Clift, R. and Harrison, D., 1985.** Fluidization, 2nd Edition, Academic Press, London.
- Davidson, R.M. 1990.** Natural Oxidation of Coal, IEACR/29, IEA *Coal Research*, London.
- Davini, P., Ghetti, P., Bonfanti, L., Michele, G., 1996.** Investigation of the Combustion of Particles of Coal, *Fuel*, **75**, 1083-1088.
- Deevi, S.C., and Suuberg, E. M., 1987.** Physical Changes Accompanying Drying of Western US Lignites, *Fuel*, **66**, 454-460.
- Dolezal, R., 1961.** Grosskesselfeuerungen, Springer -Verlag, Berlin - Göttingen-Heidelberg.
- Dolezal, R., 1967.** Large Boiler Furnaces, pp.75-68, Elviesier Publishing Company, Amsterdam- London-New York.
- Dolezal, R., 1982.** Verbrennung und Feuerungen, Kraftwerkstechnik II, Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkeselwesen (IVD), Universität Stuttgart.
- Dossey, J.L., 1976.** Undergraund Coal Gasification Technology in the USSR, pp.760-380, Sandia Laboratories, Elbuquerque, Sand.
- Du, X., Gopalakrishnan, C., Annamalai, K., 1995.** Ignition and Combustion of Coal Particle Streams, *Fuel*, **74**, 4, 487-494.
- Durmaz, A., 1973.** Regelkreisoptimierung eines Gleitdruckbetriebenen Bensonkessels, Vergleich der theoretischen und experimentellen Ergebnisse, *Energie* 25, Nr.718, 213-217.

- Durmaz, A.,** 1982. Modelling, Simulation and Optimization of the Combustion Control System of a Steam Generator, *Proceeding of ASME Conference on Modelling and Simulation*, Vol.8, Paris, 80-82.
- Durmaz, A.,** 1987. Türkiye' nin Enerji Altyapısı ve Hava Kirliliği, *Uluslararası Yanmadan Kaynaklanan Hava Kirliliği Sempozyumu*, Bildiri Kitabı, Ankara, s. 1-72.
- Durmaz, A.,** 1989. Sobalarda Yanmadan Kaynaklanan Hava Kirliliğinin Azaltılması, Soba Sanayi Kongresi Bildirisi, *TMMOB*, Makine Mühendisleri Odası, Yayın No.136, Ankara.
- Durmaz, A.,** 1991. Alışılmış Yakma Sistemleri ve Uygulamaları, *1. Ulusal Yanma ve Hava Kirliliği Sempozyumu*, Bildiri Kitabı, Gazi Üniversitesi, Ankara, Haziran 10-12, s.79-99.
- Durmaz, A.,** 1993. Improvement of Efficiencies and Emission Behaviour of Stoves, Subproject 2, Investigation of the Causes of Air Pollution in Ankara and Measures for Its Reduction, *NATO-TU Airpollut.* NATO Science for Stability Program, Gazi University, Ankara.
- Durmaz, A.,** 1998. Kömürün Yanması, *Kömür - Özellikleri, Teknolojisi ve Çevre İlişkisi*, s.353-394, Bölüm 22, Özgün Matbaacılık, İstanbul.
- Ekinci, E., Türkay, S., Fells, I., Kadioğlu, E.,** 1981. Ash Content Limit of Solid Fuels Combustion in a Fluidized Bed, *German-Turkish Energy Symp.*, İzmir.
- Ekinci, E.,** 1993. Hava Kirliliği , Kaynakları ve Kontrolü, Bölüm 3, Tübitak, Marmara Araştırma Merkezi, Kocaeli.
- Ekinci, E., Okutan, H., Erçikan, D., Atakül, H., Yardım, M.F.,** 1993. Bir Ağaçlı Kömürünün Yanma Açısından Karakterizasyonu, *Üçüncü Yanma Sempozyumu*, Kirazlıyayla, Bursa, 19-21 Temmuz.
- Electric Power Research Institute,** 1992. *Report CS-5869*, 4, Alto, P., CA, p.400-456.
- Engeloğlu, E.,** 1999. Beypazarı ve Çan Linyitlerinin Soğuk Akışkan Yatakta Sürüklenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Epple, B., Brüggemann, H., Kather, H.A.,** 1996. NO_x – arme Steinkohletangentialfeuerung, *EVT-Energie, und Verfahrenstechnik*, 118/96 Band.
- Erdöl, N., Çallı, L., Okutan, H., Ekinci, E.,** 1999. Effect of Coal Moisture on Particulate Emission in a Fixed Bed Combustion Appliance, *Fuel Processing Technology*, 58, 109-117.

- Ertürk, F.,** 1993. Hava Kirliliği , Kaynakları ve Kontrolü, Bölüm 2, Tübitak, Marmara Araştırma Merkezi, Kocaeli.
- Evseev, V.S. and Voroshilov, S.P.,** 1986. Modeling the Process of Self-Ignition Taking Into Account the Influence of Moisture on Oxidative Processes in Coal, *Soviet Mining Sci.*, **22**, 2, 140-146.
- Fehling, K.,** 1957. Kohlenstaubbrenner, *Mitt. VGM* 1957, Nr.50, 337-349.
- Gamson, P.D., Beamish, B.B., Johson, D.P.,** 1993. Coal Microstructure and Micropermeability and Their Affects on Natural Gas Recovery, *Fuel*, **72**, 87-104.
- Gauger, A.W.,** 1932. Condition of Water in Coals of Various Ranks, *Trans. Of TAIMA*, **101**, 148-164.
- Ghosh, R.,** 1986. Spontaneous Combustion of Certain Indian Coals-Some Physio-Chemical Consideration, *Fuel*, **65**, 1042-1046.
- Greg, S.J., Sing, K.S.W.,** 1982. Adsorption, Surface Area and Porosity, pp, 57-69, Academic Press, London, New York.
- Guin, J.A., Curtis, C.W., Sahawnah, B.M.,** 1986. Laboratory Study of the Self-Heating Tendency of Coals and the Pyrolysis Chars, *Ind.Eng.Chem.Process.Des.Dev.*, **25**, 543-546.
- Gururajan, V.S., Wall, T.F., Truelove, J.S.,** 1988. The Combustion of Evolved Volatile Matter in the Vicinity of a Coal Particle - An Evaluation of The Diffusion Limited Model, Combustion and Flame, *Fuel*, **72**, 1-12.
- Güney, M. and Hodges, D.J.,** 1969. Adiabatic Studies of the Spontaneous Heating of Coal, pp.173-177, Part 2, Colliery Guardian, , March.
- Harpalani, P.D., Schraufnagel, R.A.,** 1990. Shrinkage of Coal Matrix with Release of Gas and Its Impact on Permeability of Coal, *Fuel*, **69**, 551-556.
- Heek, K.H.Van,** 2000, Progress of Coal Science in the 20th Century, *Fuel*, **79**, 1-26.
- Hodges, D.J. and Hinsley, F.B.,** 1964. The Influence of Moisture on the Spontaneous Heating of Coal, *Min.Eng.*, **24**, 211-221.
- Hodges, D.L. and Acherjee, B.,** 1966. A Microcalorimetric Study of the Influence of Moisture on the Spontaneous Heating of Coal, *Min.Eng.*, **26**, 121-131.
- Howard, J., R.,** 1989. Fluidized Bed Technology, Principles and Applications, pp.36-48, Adam Hilger, Bristol and New York.

- IUPAC, 1994. International Union of Pure and Applied Chemistry, *Pure Appl. Chem.*, **66**, 1739-1755.
- J.E. Sinor Consultants, Inc., 1992. Market Assessment for North Dakota Lignite, *Final Report*, pp.289-296, April 9.
- Jones, J.M., Pourkashanian, M., Rena, C.D., Williams, A., 1999. Modelling the Relationship of Coal Structure to Char Porosity, *Fuel*, **78**, 1737-1744.
- Jung, K. and Stanmore, B.R., 1980. Fluidized Bed Combustion of Wet Brown Coal, *Fuel*, **59**, 74-80.
- Kansa, E.J., 1982. A Model of Drying and Pyrolysis of Solid Fuels at Fire Intensity Conditions, *Drying '82*, pp. 68-79, A.S.Majundar (Ed.), Hemisphere.
- Kantorovich, I.I., Bar-Ziv, E., 1999. Heat Transfer Within Highly Porous Chars :A Review, *Fuel*, **78**, 279-299.
- Kather, A., 1995. Verfahrenstechnische und Konstruktive Auslegung Moderner Braunkohle Dampferzeuger, *VGB Kraftwerkstechnik*, Band.75, Heft.9.
- Knorre, R., 1957. The Character of Microprocesses in Solid Fuel Combustion, *Teploenergetika*, No.11, 52-59.
- Kim, A.G., 1977. Laboratory Studies on Spontaneous Heating of Coal. A Summary of Information in the Literature, Information Circular 8756, *US Bureau of Mines*, US.
- Kobayashi, H., Howard, J.B., Sarofim, A.F., 1977. Coal Devolatilization at High Temperatures, *16. Int. Symp. On Combustion*, 411-425.
- Köktürk, A. ve Narin, N., 1994. Linyit Rezervleri, Kullanma İmkanları ve Arama Politikaları, *2000'li Yıllara Doğru Linyit Sektörümüz Sempozyumu*, Maden Mühendisleri Odası, Ankara, 14-15 Kasım, s.78-89.
- Krebs, V., Marêché, J.F., Furdin, G., Dumay, D., 1994. Contribution to the Study of Carbon Deposition in Coke Ovens, *Fuel*, **73**, 1904-1908.
- Krebs, V., Furdin, G., Marêché, J.F., 1996. Effect of Coal Moisture Content on Carbon Deposition in Coke Ovens, *Fuel*, **75**, 8, 979-986.
- Kural, O., 1984. Briketlemenin Yararları ve Standartları, *4. Balkan Ülkeleri Cevher Hazırlama Kongresi*, İTÜ Maden Fakültesi, Eylül 12-14, s.67-78.
- Kural, O., 1991. Kömür, *Kömürlerin Briketlenebilmesi*, s.464-511, Bölüm 17, Kurtiş Matbaası, İstanbul.

- Laban, K.L., Atkin, B.P., 2000.** The Direct Determination of the Forms of Sulphur in Coal Using Microwave Digestion and i.c.p-a.e.s Analysis, *Fuel*, **79**, 173-180.
- Ledinegg, M., 1966.** Dampf Erzeugung, Dampfkessel, Feuerungen, *2.Auflage*, Springer Verlag Wien, pp.89-97, New York.
- Mahajan, O.P. and Walker, P.L.Jr., 1978.** In Analytical Methods for Coal and Coal Products, 1, C.4, Academic Press, London.
- Massaquoi, J.G.M. and Riggs, J.B., 1983.** One-Dimensional Model of the Physico-Chemical Processes Occuring Inside a Burning Coal Surface, *AIChE J.*, **29**, 6, 975-981.
- Minkova, V., Razvigorova, M., Goranova, M., Ljutzkanov, L., Angelova, G., 1991.** Effect of Water Vapour on the Pyrolysis of Solid Fuels, *Fuel*, **70**, 713-719.
- Ministry of Power, 1958.** The Efficient Use of Fuel, pp.79-86, *HMO Stationary Office*, London.
- Mochida, I., Sakanishi, K., 2000.** Catalysts for Coal Conversions of the Next Generation, *Fuel*, **79**, 221-228.
- MTA, 1993.** T.K.İ Tarafından Üretilen Kömürlerin Detay Analizleri ile Parça Kömürlerin Soba ve Kalorifer Kazanında Yanma Özelliklerinin İncelenmesi, Maden Tetkik Arama Genel Müd., Maden Analizleri ve Teknolojisi Dairesi, Yakıtlar Birimi, Kasım, Ankara.
- National Energy Paper, 1988.** Department of Primary Industries and Energy, *Energy 2000*, pp.149-155, Australian Government Printing Service, Canberra.
- Nordon, P., Young, B.C., Bainbridge, N.W., 1979.** The Rate of Oxidation of Char and Coal in Relation to Their Tendency to Self-Heat, *Fuel*, **58**, 443-449.
- Ökten, G., ve Er, M., 1988.** Kömürün Yeraltında Gazlaştırılması, *Kömür Teknolojisi ve Kimyası*, s.90-105, Bölüm 18, Güney Grafik, İstanbul.
- Ökten, G. ve Okutan, H., 1991.** Kömür, *Kömürün Yeraltında Gazlaştırılması*, Bölüm 22, s. 722-737, Kurtiş Matbaası, İstanbul.
- Özer, A., 1997.** Linyit Kömürünün Briketlenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Panaseiko, N.P., 1974.** Influence of Moisture on the Low-Temperature Oxidation of Coals, *Solid Fuel. Chem.*, **8**, 21-24.

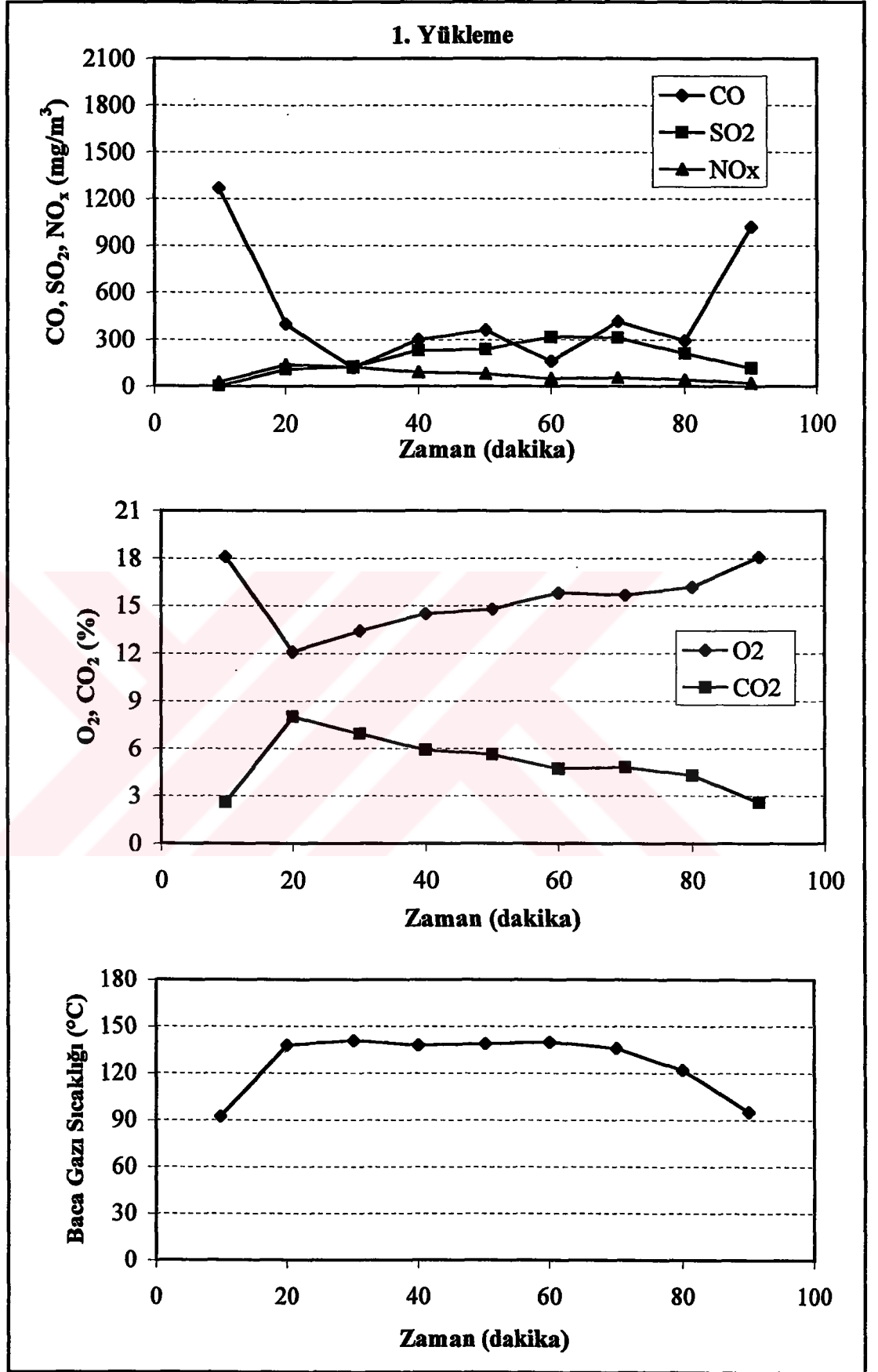
- Pillai, K.K.**, 1985. Devolatilization and Combustion of Large Coal Particles in a Fluidized Bed, *J.Inst.Energy*, **21**, March.
- Pişkin, S.**, 1991. Kömür, *Kömür Gazlaştırma*, s. 654-721, Bölüm 21, Kurtiş Matbaası, İstanbul.
- Ponte, D.G., Prieto, I.F., Viar, P.F. Luengo, J.C.G.**, 1996. Determination of Moisture Content in Power Station Coal Using Microwaves, *Fuel*, **75**, 133-138.
- Prins, W.**, 1987. Fluidized Bed Combustion of a Single Carbon Particle, *Ph.D. Thesis*, University of Twente.
- Pooley, F.**, 1968. The Use of Electron Microscope As a Tool in Mining Research, *The Mining Engineering (Sr.Brit.) N*, **90**, 321-333.
- Sato, H., Patrick, J.W., Walker, A.**, 1998. Effect of Coal Properties and Porous Structure on Tensile Strength of Metallurgical Coke, *Fuel*, **77**, 1203-1208.
- Schmal, D.**, 1989. Spontaneous Heating of Stored Coal, *Coal Science and Technology*, pp.133-215, 14(Ed.C.R. Nelson) C..6, Elsevier, Amsterdam.
- Sondreal, E.A., Mann, M.D., Weber, G.W., Young, B.C.**, 1995. Matching Lignites with Clean Coal Technologies, *Coal Technology and Utilization Workshop*, pp.45-53, Beypazarı, Turkey.
- Sondreal, E. A. and Ellman, R. C.**, 1974. Laboratory Determination of Factors Affecting Storage of North Dakota Lignite, *Report of Investigation*, No. 7887, Bureau of Mines, US.
- Stubington, J.F.**, 1980. The Role of Coal Volatiles in Fluidized Bed Combustion, *Journal of the Institute of Energy*, pp.191-195, December.
- Suueberg, E.M., Otake, Y., Yun, Y., Deevi, S.C.**, 1993. Role of Moisture in Coal Structure and the Effect of Drying Upon Accessibility of Coal Structure, *Energy and Fuel*, **7**, 384-392.
- Türkiye 7. Enerji Kongresi**, 1997. 2000' li Yıllara Doğru Enerji, Beklentiler ve Düşünceler, *Enerji İstatistikleri*, s. 70-80, ODTÜ, Ankara, 3-8 Kasım.
- Tognotti, L., Bertozzi, G., Peterca, L., D'alessio, A., Benedetti, E.**, 1988. Low Temperature Oxidation of a Bituminous Coal : Its Structural Implication, *La Chimica El'Industria*, **70**, 9, 76-80.
- TSE 4040**, 1983. Kazanlar, Isı Tekniği ve Ekonomisi Açısından Aranacak Özellikler, 621.792, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.

- TSE 4041**, 1983. Kazanlar, Anma Isı Gücü ve Verim Deneyleri Esasları, 621.793, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TSE 4900**, 1996. Sobalar – Kömür Yakan, 91.140.20, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- Türkiye Linyit Envanteri**, 1986. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, s.25-32, Ankara.
- Unsworth, J.F., Barratt, D.J., Roberts, P.T.**, 1991. Coal Quality and Combustion Performance, Coal Science and Technology 19, *An International Perspective*, pp.13-93, Ch.3, Elsevier, Netherlands.
- Veselovsky, V.S.**, 1966. Coal and Graphite Constructional Materials, pp.56-78, Russia, Moskva .
- Vorres, K. S., Wertz, D. L., Malhotra, V., Dang, Y., Joseph, J. T., Fisher R.**, 1992. Drying of Beulah-Zap Lignite, *Fuel*, 71, 1047-1053.
- Vural, H.**, 1991. Türk Linyitlerinin Ortalama Özellikleri, *Mühendislik ve Makine*, C.32, S.373, Şubat.
- Walker, P.L.Jr., Verma, S.K., Rivera-Utrilla, J., Davis, A.**, 1988. Density, Porosities and Surface Areas of Coal Macerals as Measured by Their Interaction With Gases, Vapours and Liquids, *Fuel*, 67, 1615-1623.
- Water, J.P.**, 1970. Factors Influencing the Fluidized Bed Combustion of Low – Grade Solid and Liquefied Fuels, *Prof. 1.st. FBC Symp., Inst. of Energ. Paper*, C6-1.
- Weishauptova, Z., Medek, J.**, 1998. Bound Forms of Methane in the Porous System of Coal, *Fuel*, 77, 71-76.
- Wessner, P.W.**, 1993. AMAX - Hical Briquetting Project, *Proceeding of 17. Bien. Low Rank Fuel Symposium*, St Louis MU, 595-602.
- Wildegger - Gaissmaier, A.E. and Agarwal, P.K.**, 1990. Drying and Devolatilization of Large Coal Particles Under Combustion Conditions, *Fuel*, 69, 44-52.
- Xu, W.C. and Tomita, A.**, 1989. Effect of Metal Oxides on the Secondary Reactions of Volatiles from Coal, *Fuel*, 68, 673-676.
- Zhang, D., and Wall, T.F.**, 1994, Ignition of Coal Particles : The Influences of Experimental Technique, *Fuel*, 73, 1114-1119.

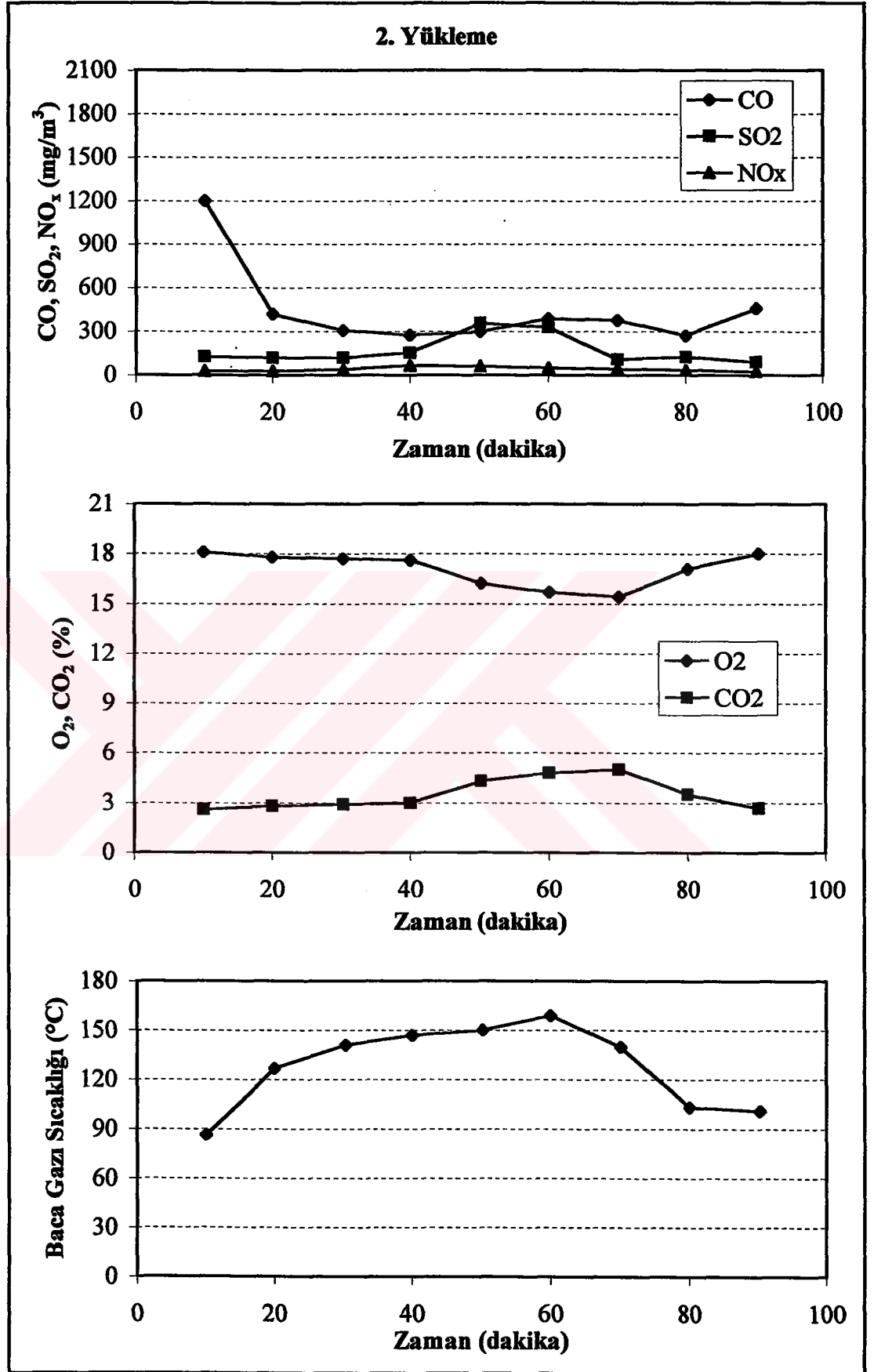
EKLER

Ek A. 1. Grup Yanma Deneylerine Ait Şekiller

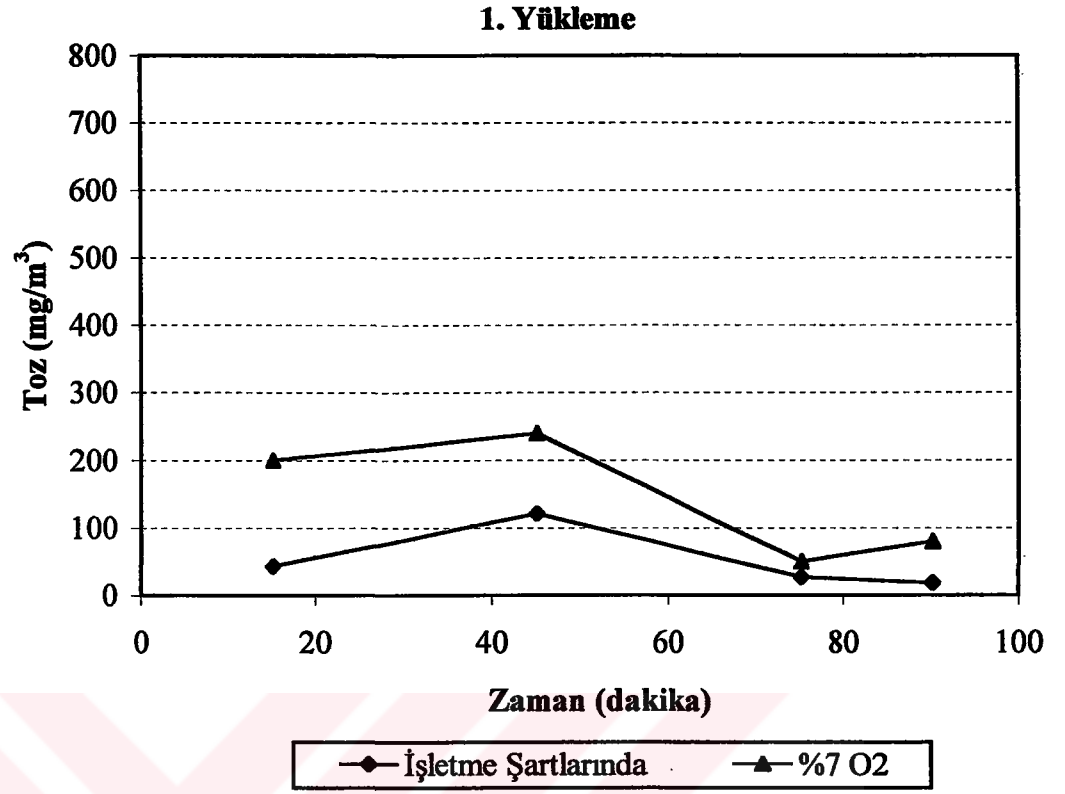




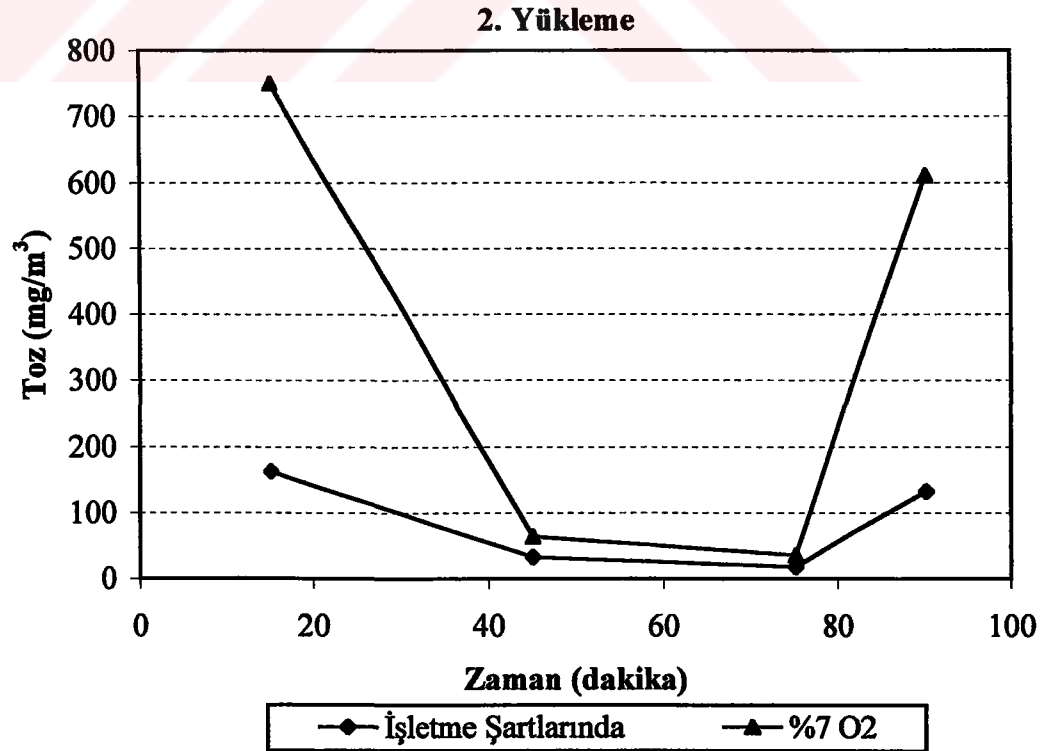
Şekil A.1. %5.90 Nemli Güney Afrika Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (1.Grup, 1.Yükleme)



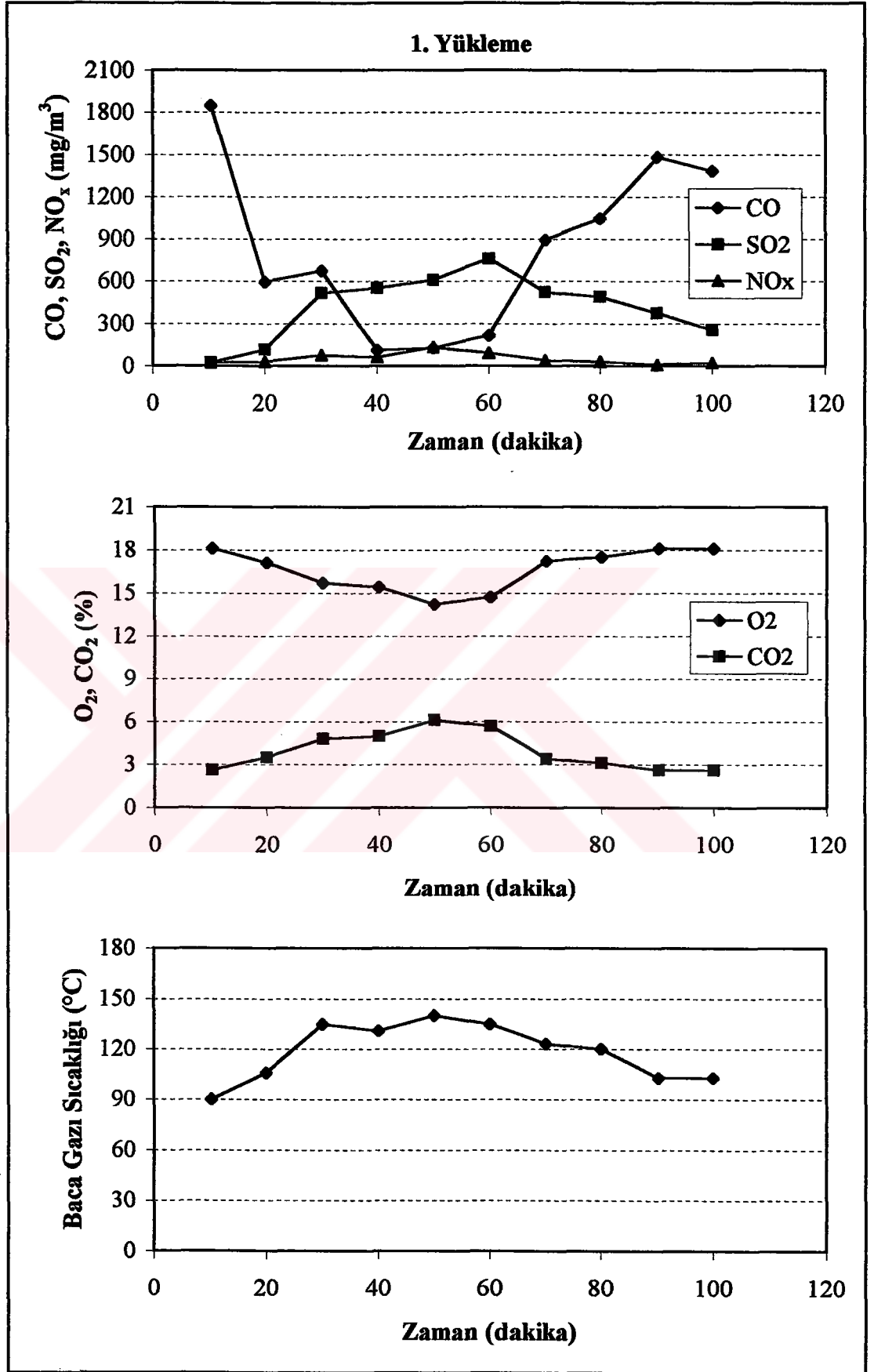
Şekil A.2. %5.90 Nemli Güney Afrika Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (1.Grup, 2.Yükleme)



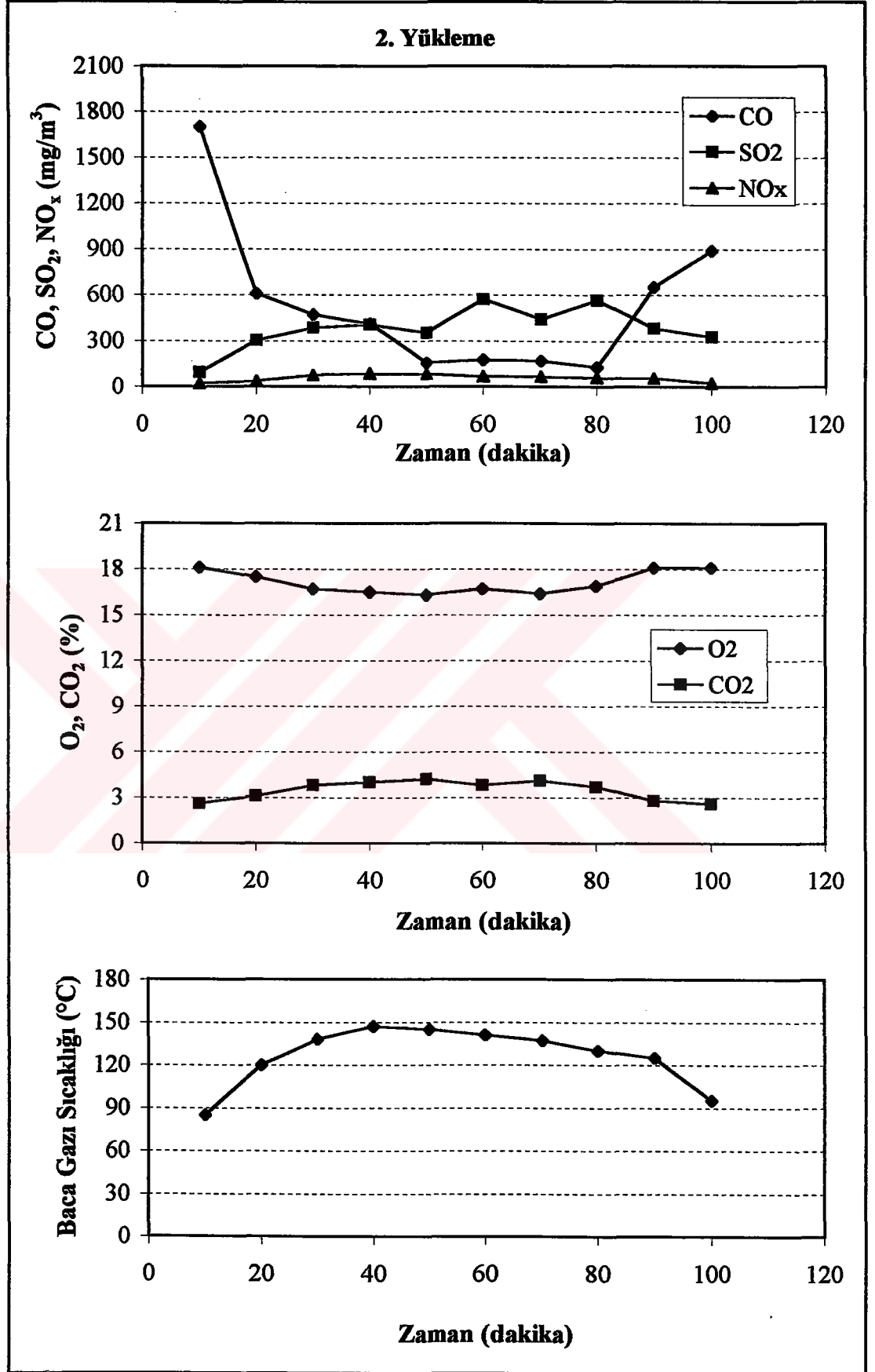
Şekil A.3. %5.90 Nemli Güney Afrika Kömürüne Ait Toz Emisyonları
(1. Grup, 1. Yükleme)



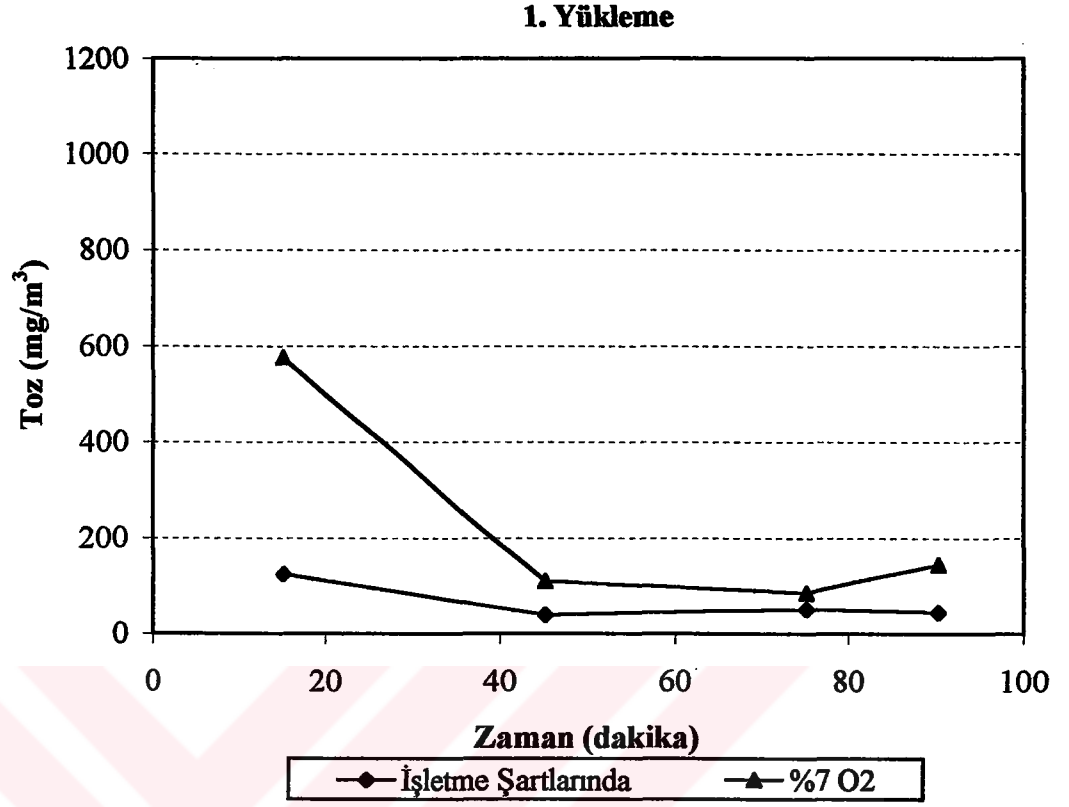
Şekil A.4. %5.90 Nemli Güney Afrika Kömürüne Ait Toz Emisyonları
(1. Grup, 2. Yükleme)



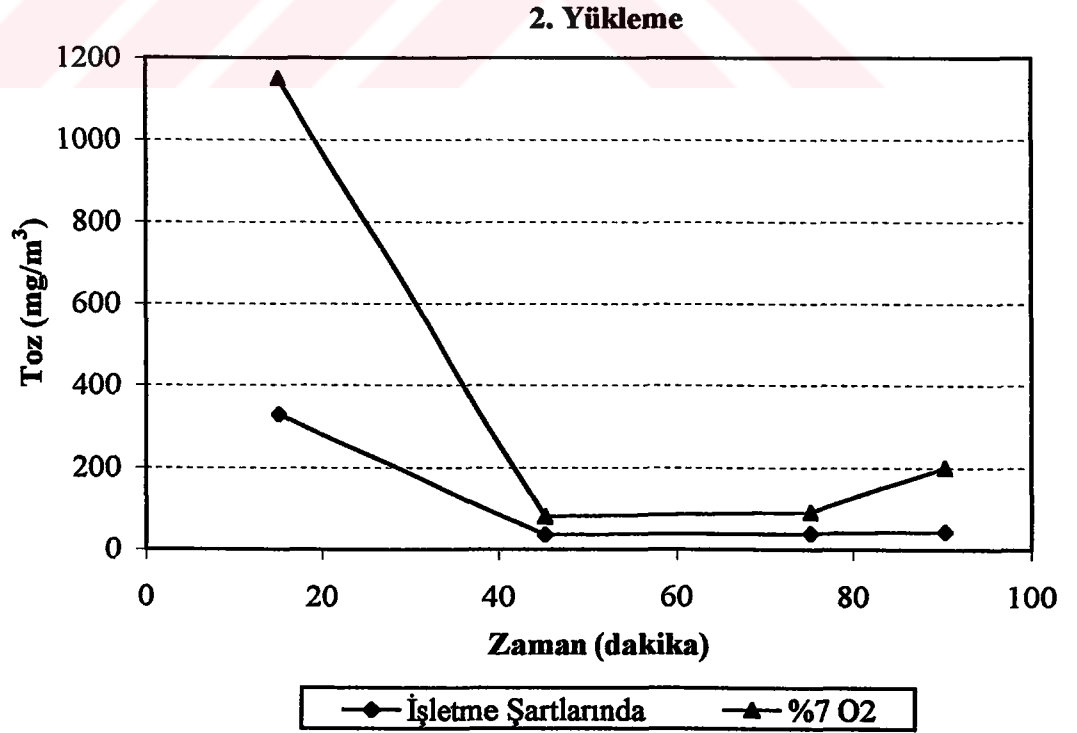
Şekil A.5. % 19.90 Nemli Y. Ağaçlı-G.Afrika Harman Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (1.Grup, 1.Yükleme)



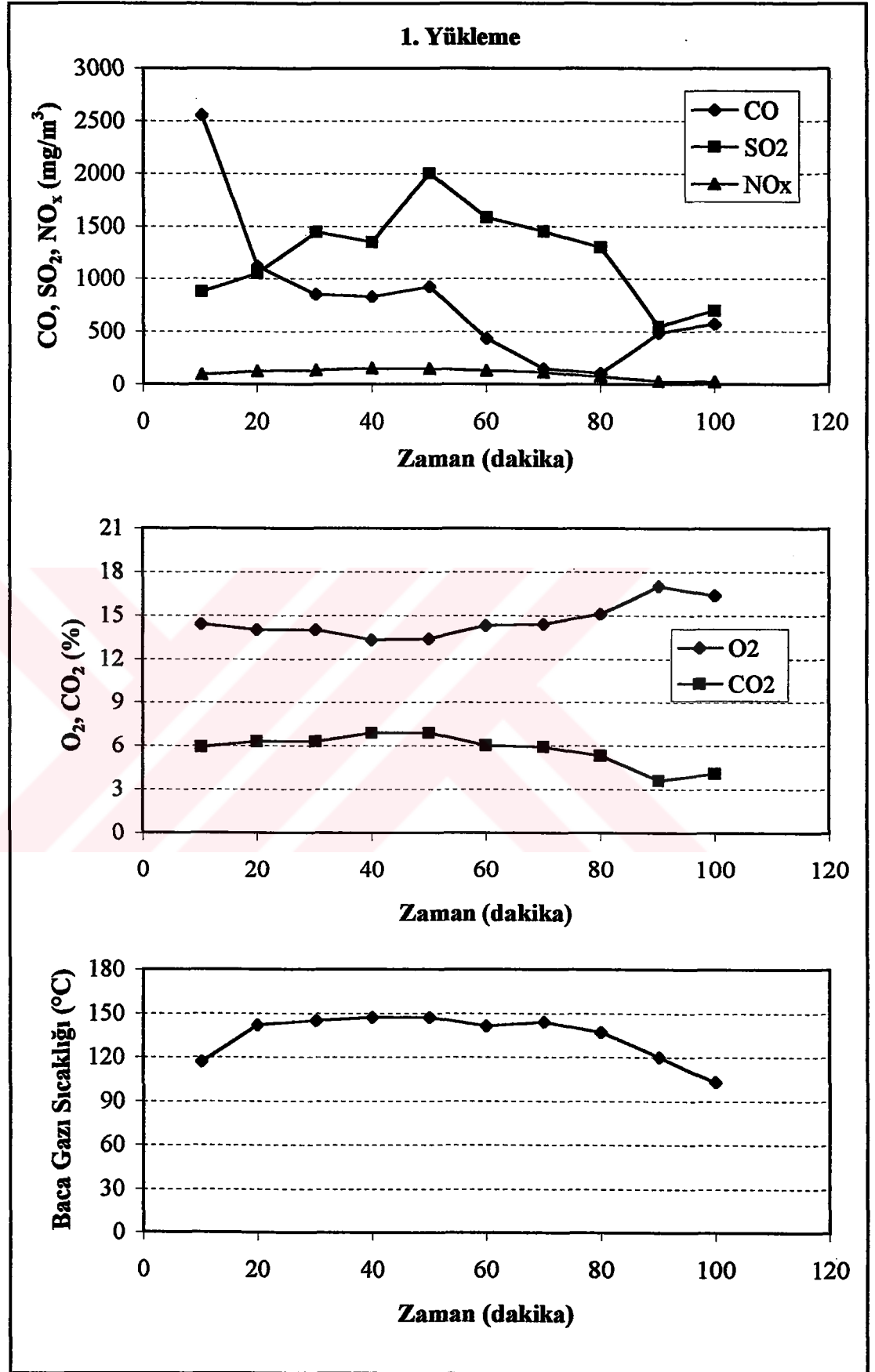
Şekil A.6. % 19.90 Nemli Y. Ağaçlı-G.Afrika Harman Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (1.Grup, 2. Yükleme)



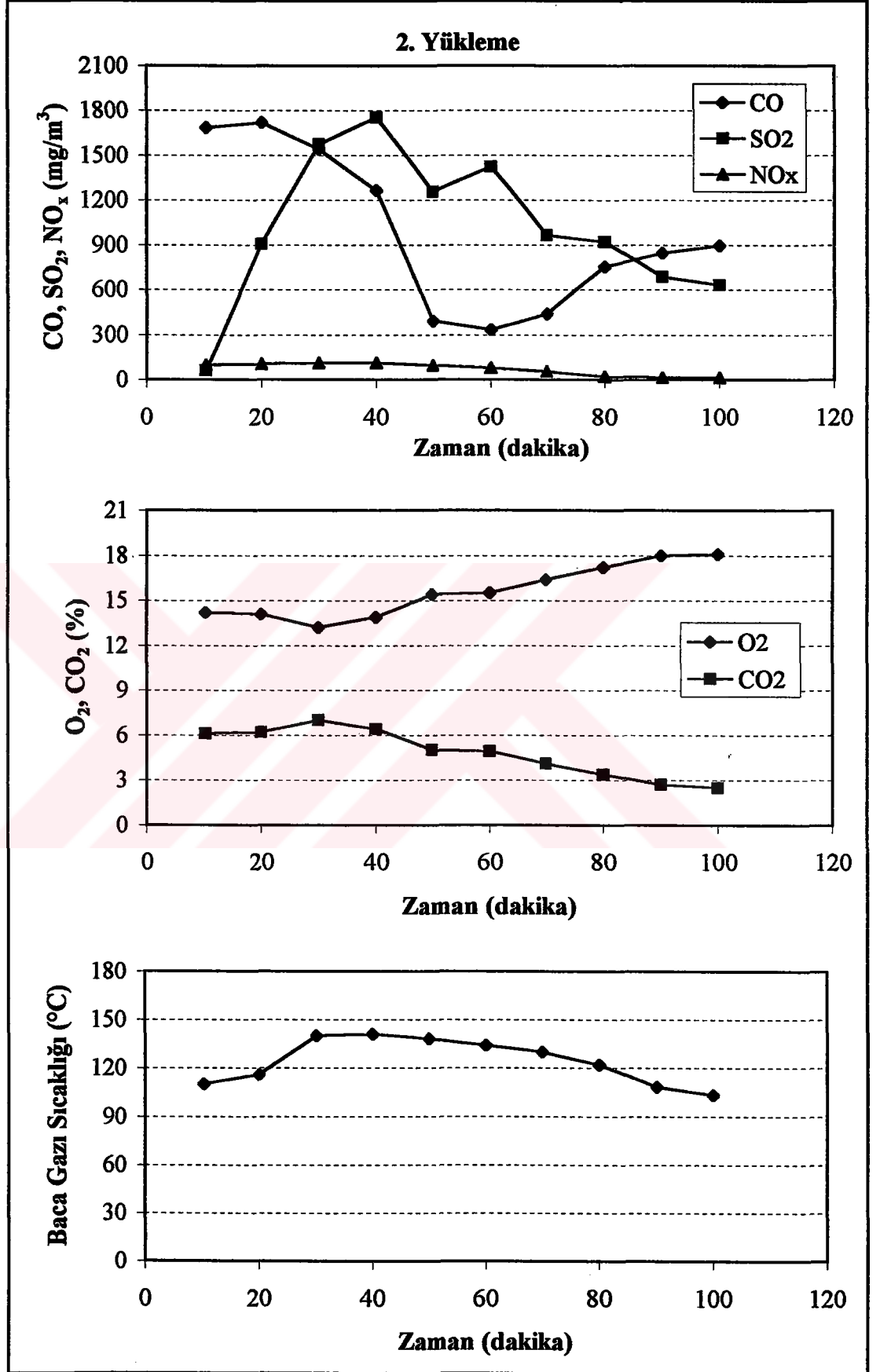
Şekil A.7. %19.90 Nemli Harman (%70 Y.Ağaçlı+%30 G.Afrika) Kömüre Ait Toz Emisyonları (1. Grup, 1. Yükleme)



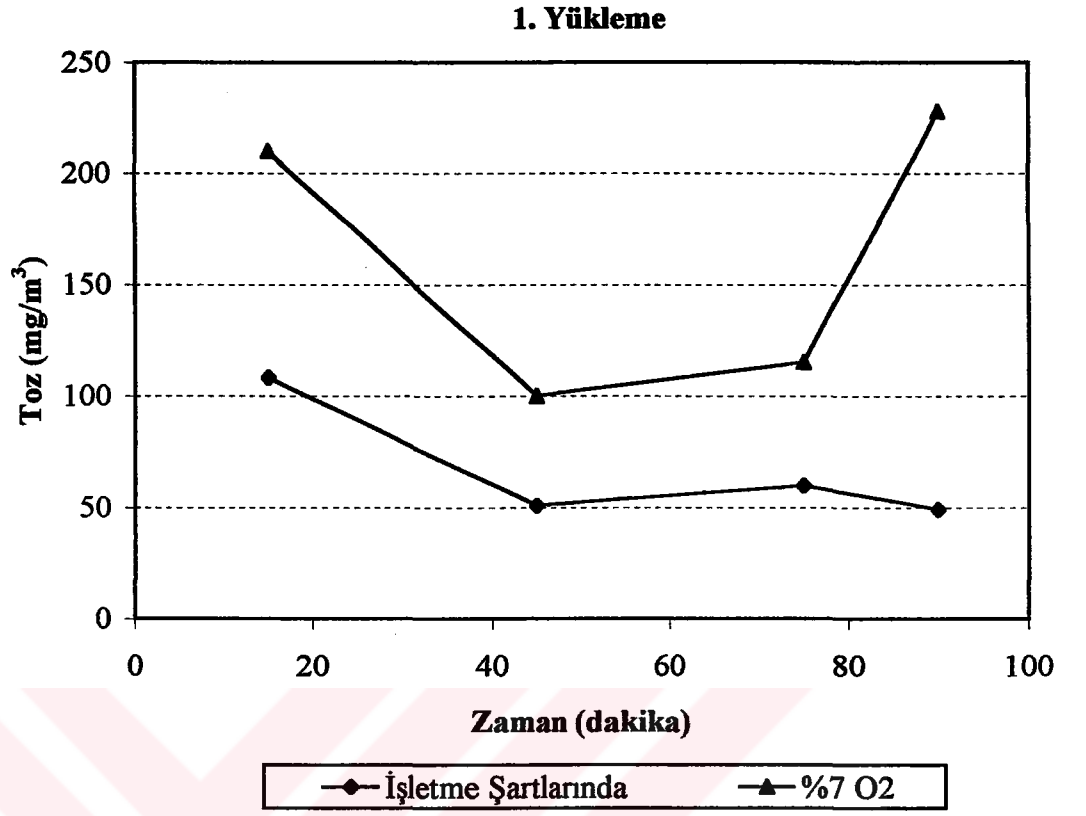
Şekil A.8. %19.90 Nemli Harman (%70 Y.Ağaçlı+%30 G.Afrika) Kömüre Ait Toz Emisyonları (1. Grup, 2. Yükleme)



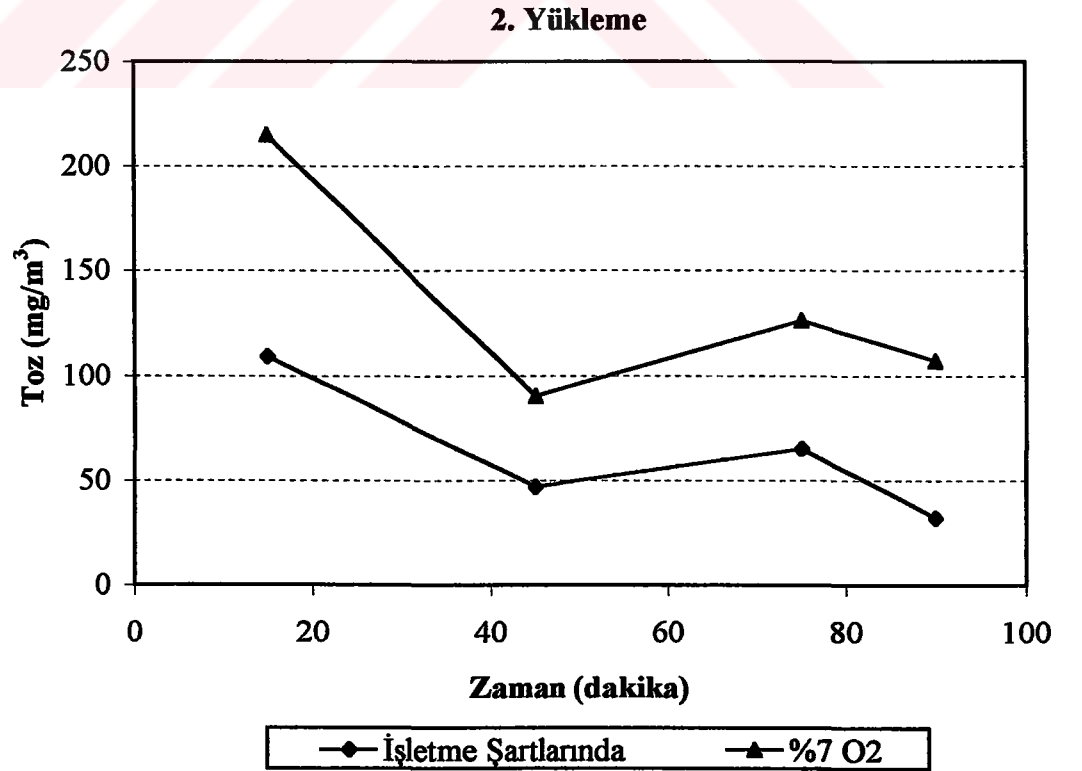
Şekil A.9. %15.33 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (1.Grup, 1.Yükleme)



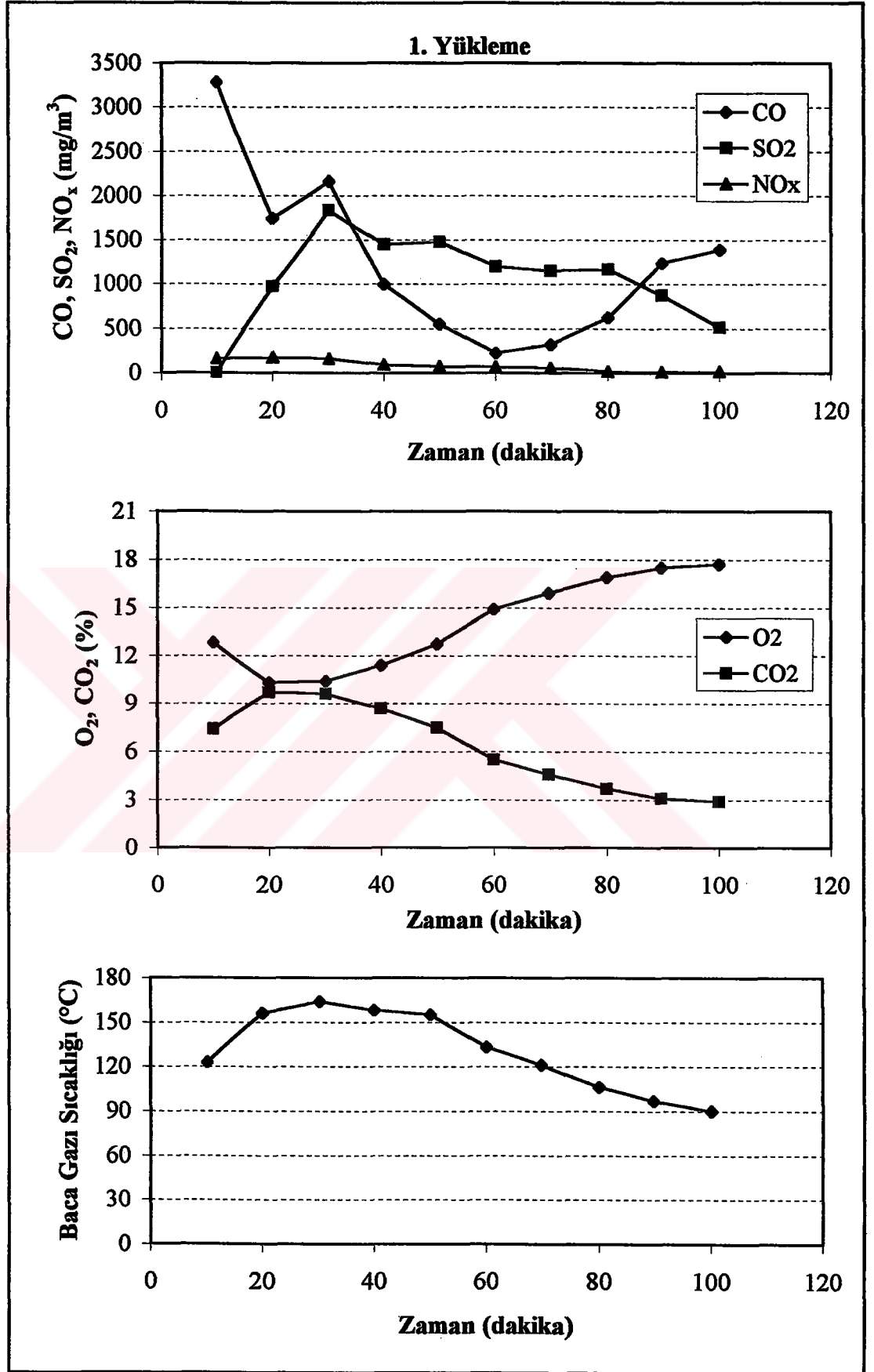
Şekil A.10. %15.33 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (1.Grup, 2.Yükleme)



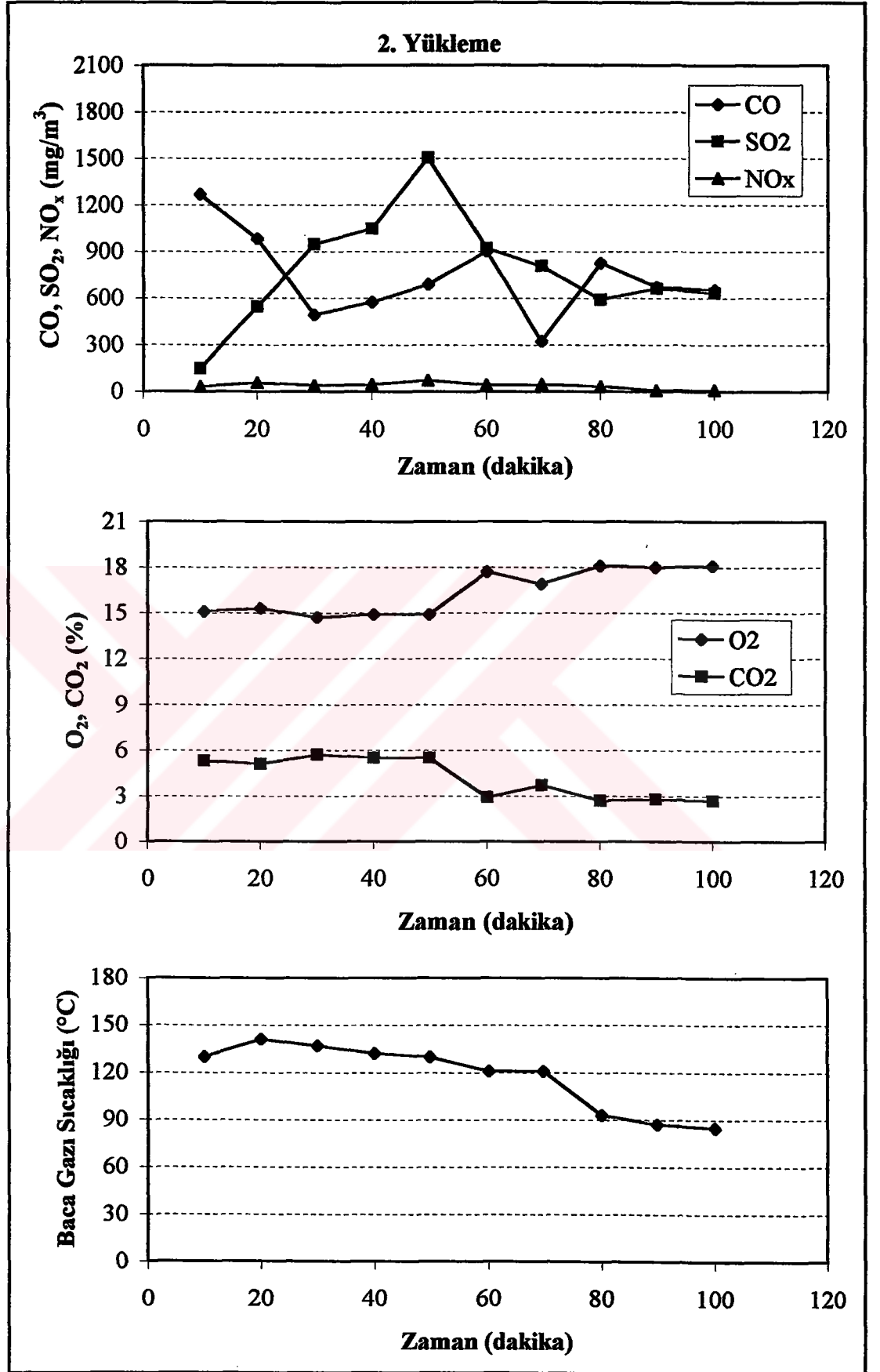
Şekil A.11. %15.33 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Toz Emisyonları
(1. Grup, 1. Yükleme)



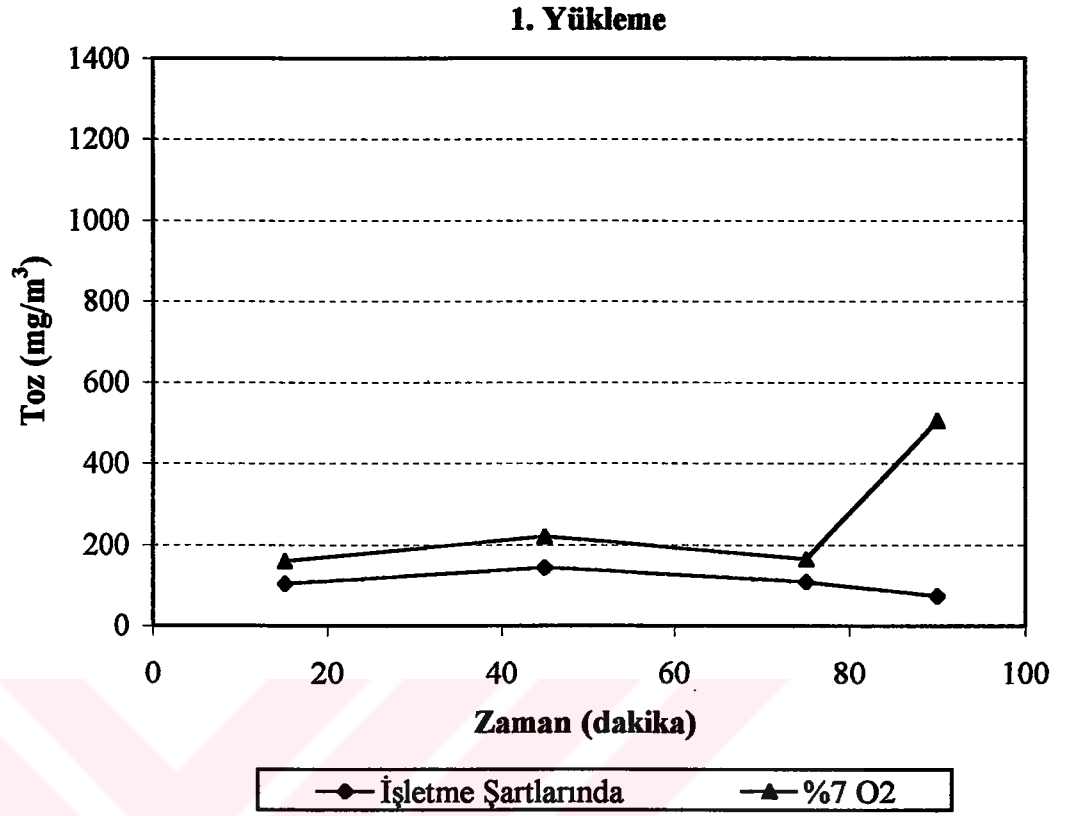
Şekil A.12. %15.33 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Toz Emisyonları
(1. Grup, 2. Yükleme)



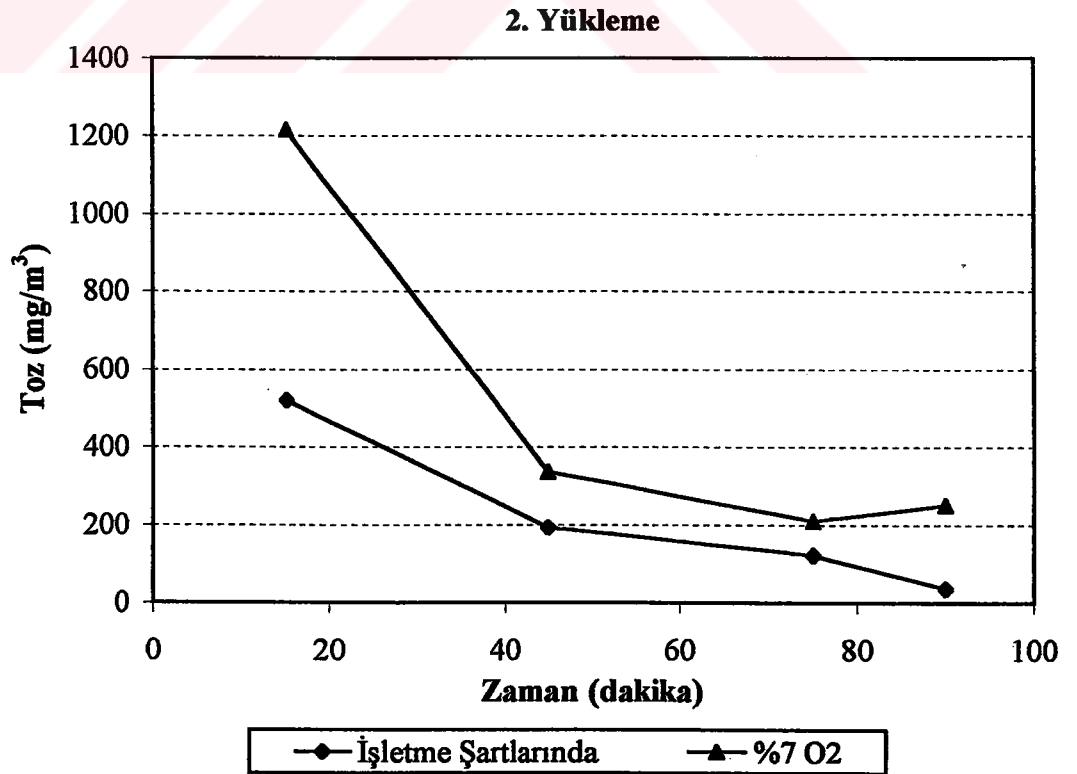
Şekil A.13. %21.40 Nemli Yeniköy Ağaç Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (1.Grup, 1.Yükleme)



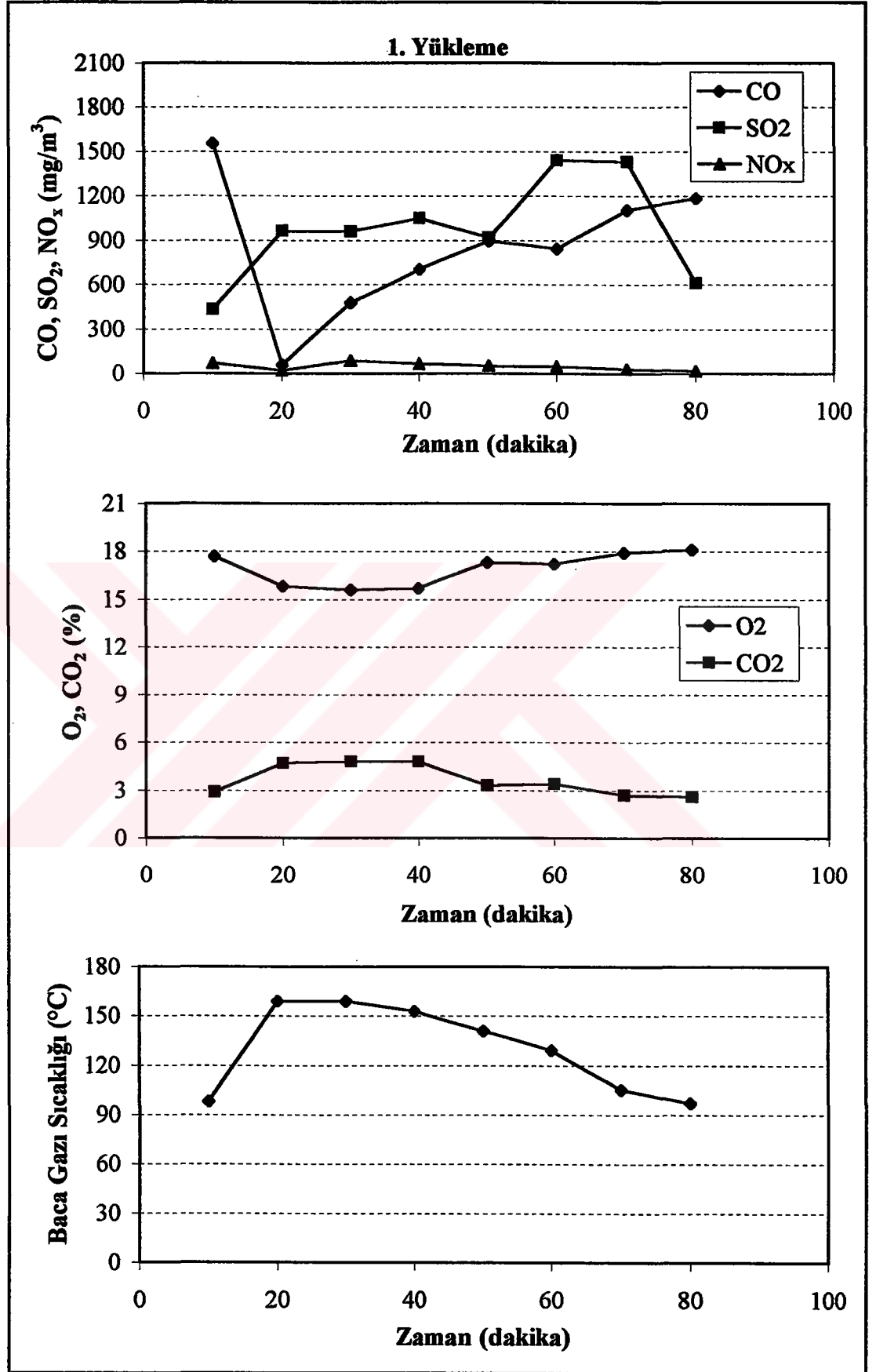
Şekil A.14. %21.40 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (1.Grup, 2.Yükleme)



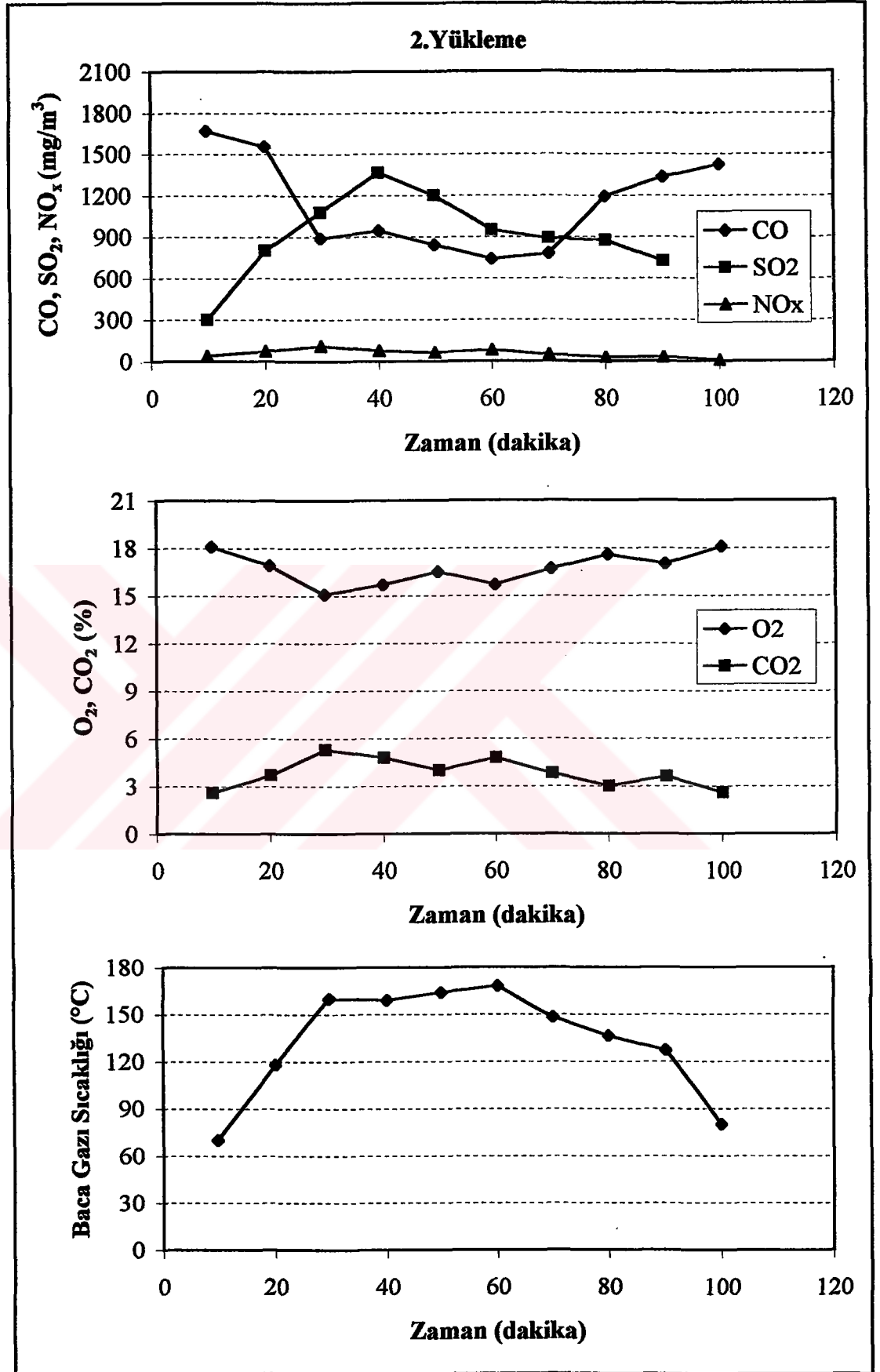
Şekil A.15. %21.40 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Toz Emisyonları
(1.Grup, 1.Yükleme)



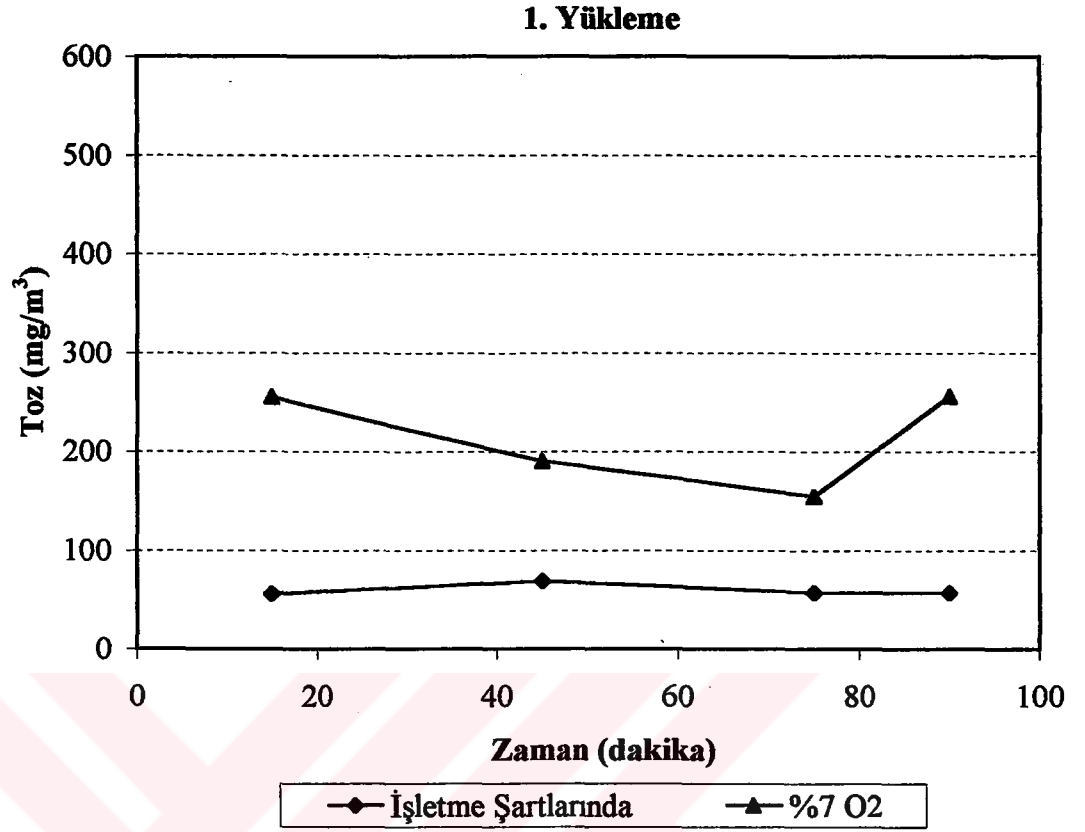
Şekil A.16. %21.40 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Toz Emisyonları
(1.Grup, 2. Yükleme)



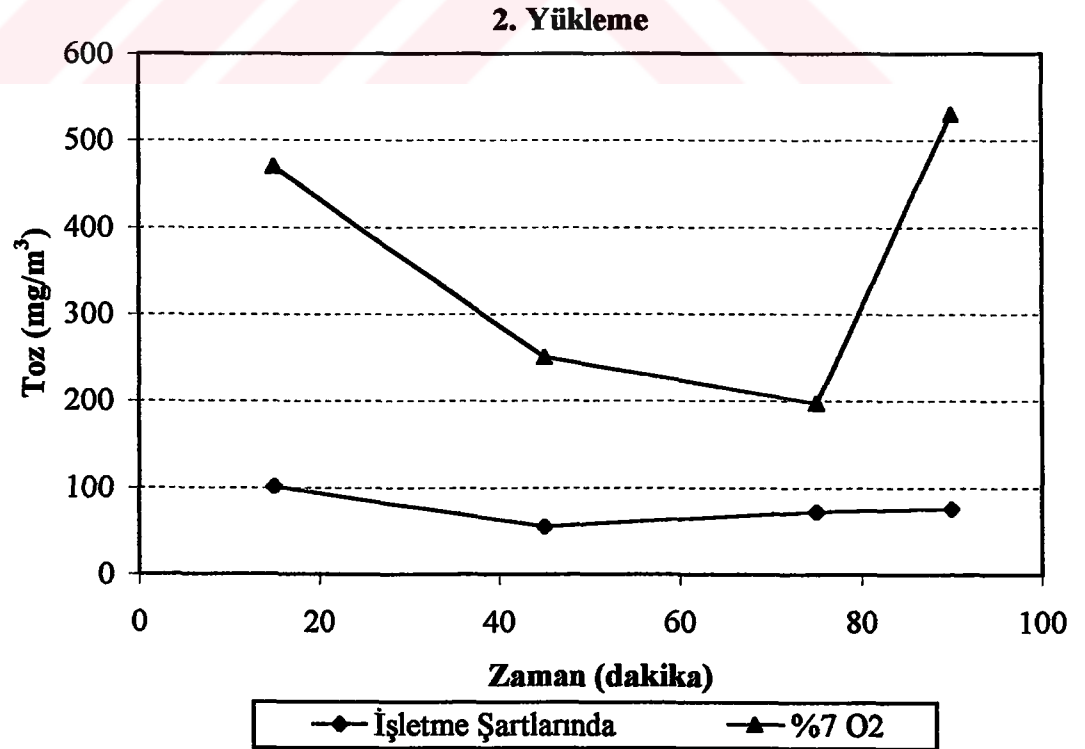
Şekil A.17. % 38.70 Nemli Orijinal Y. Ağaçlı Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (1.Grup, 1.Yükleme)



Şekil A.18. % 38.70 Nemli Orijinal Y.Ağaçlı Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (1.Grup, 2.Yükleme)



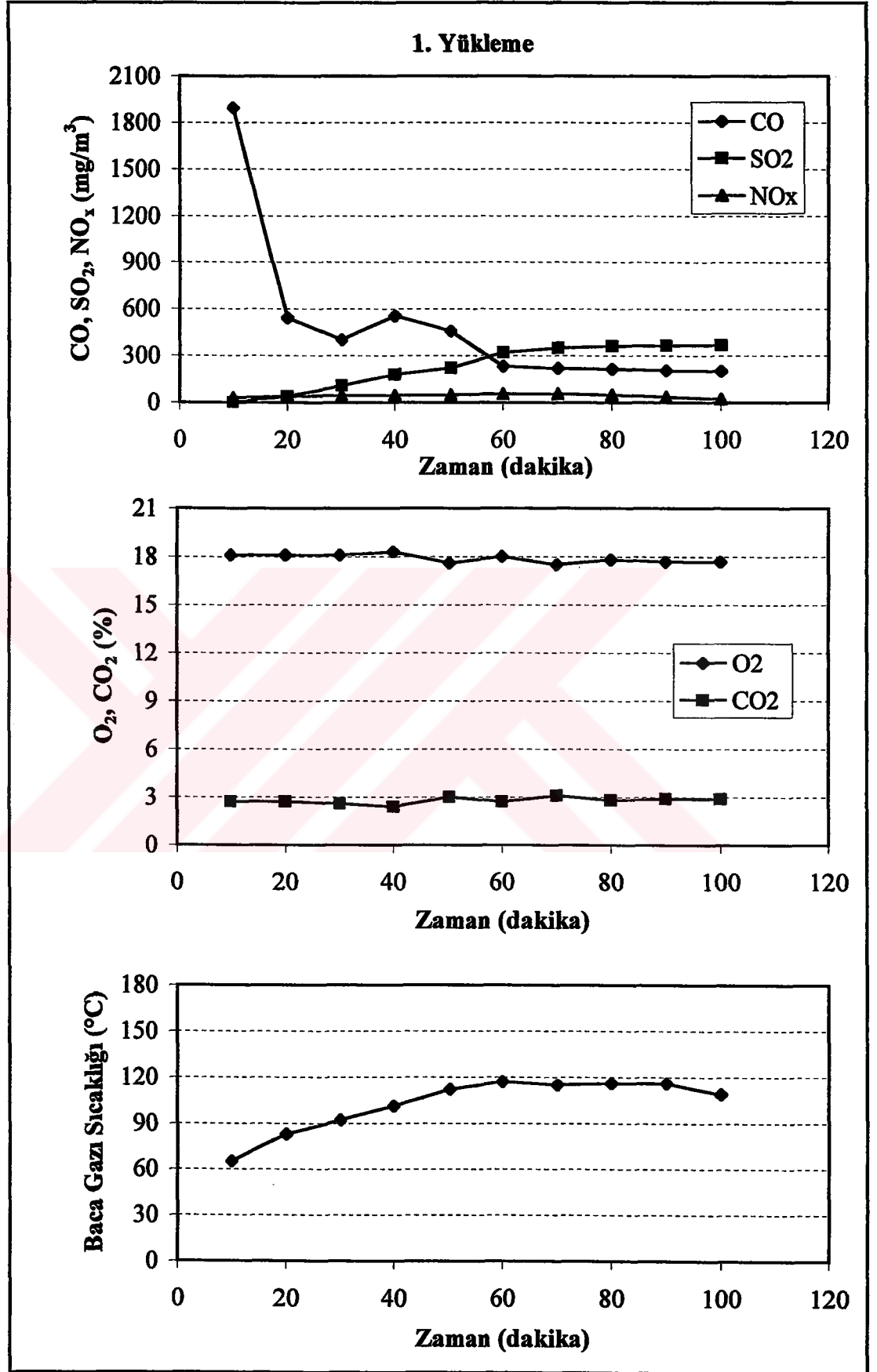
Şekil A.19. %38.70 Nemli Orijinal Y. Ağaçlı Kömürüne Ait Toz Emisyonları (1.Grup, 1.Yükleme)



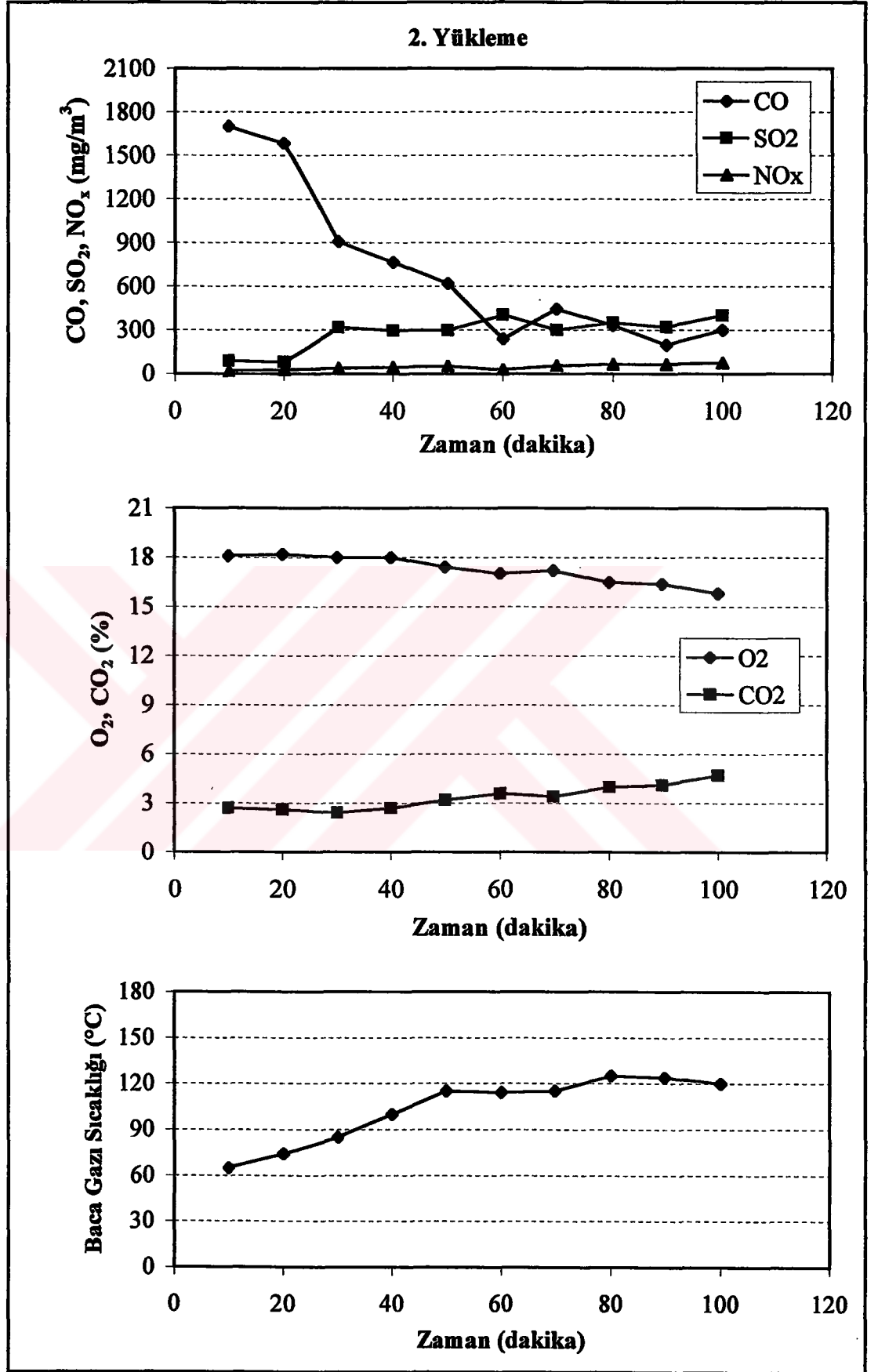
Şekil A.20. %38.70 Nemli Orijinal Y. Ağaçlı Kömürüne Ait Toz Emisyonları (1.Grup, 2. Yükleme)

Ek B. 2. Grup Yanma Deneylerine Ait Şekiller

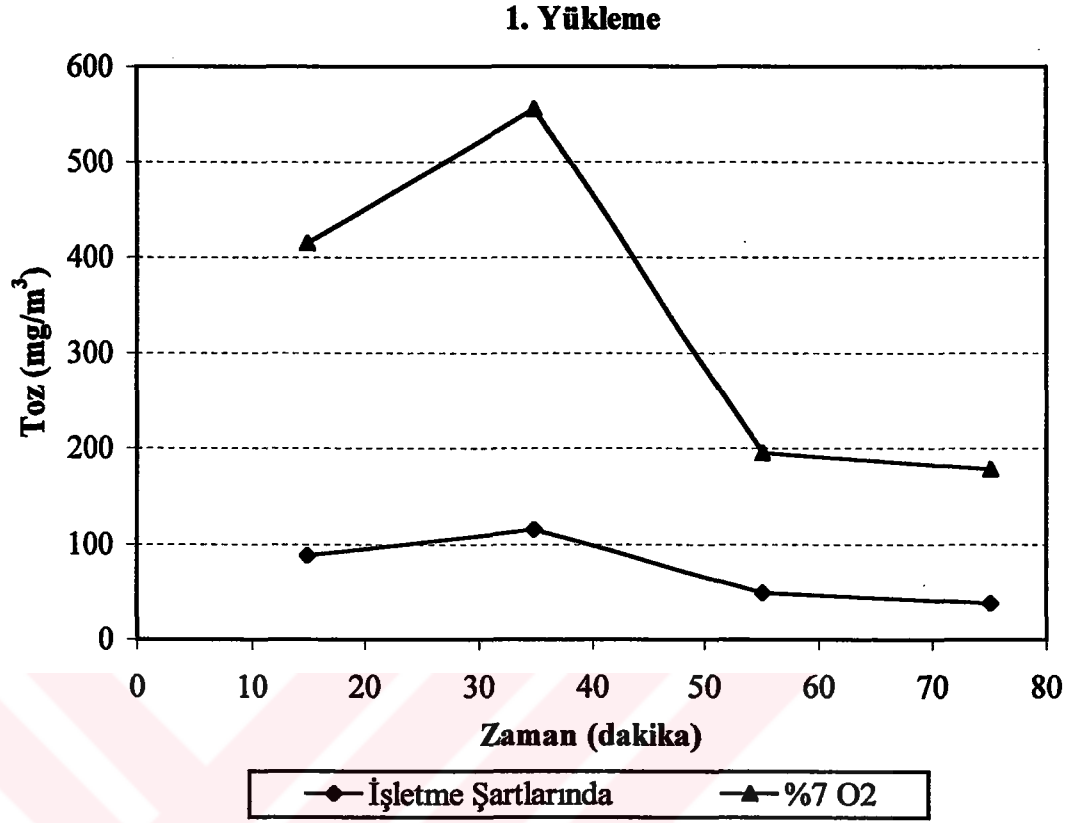




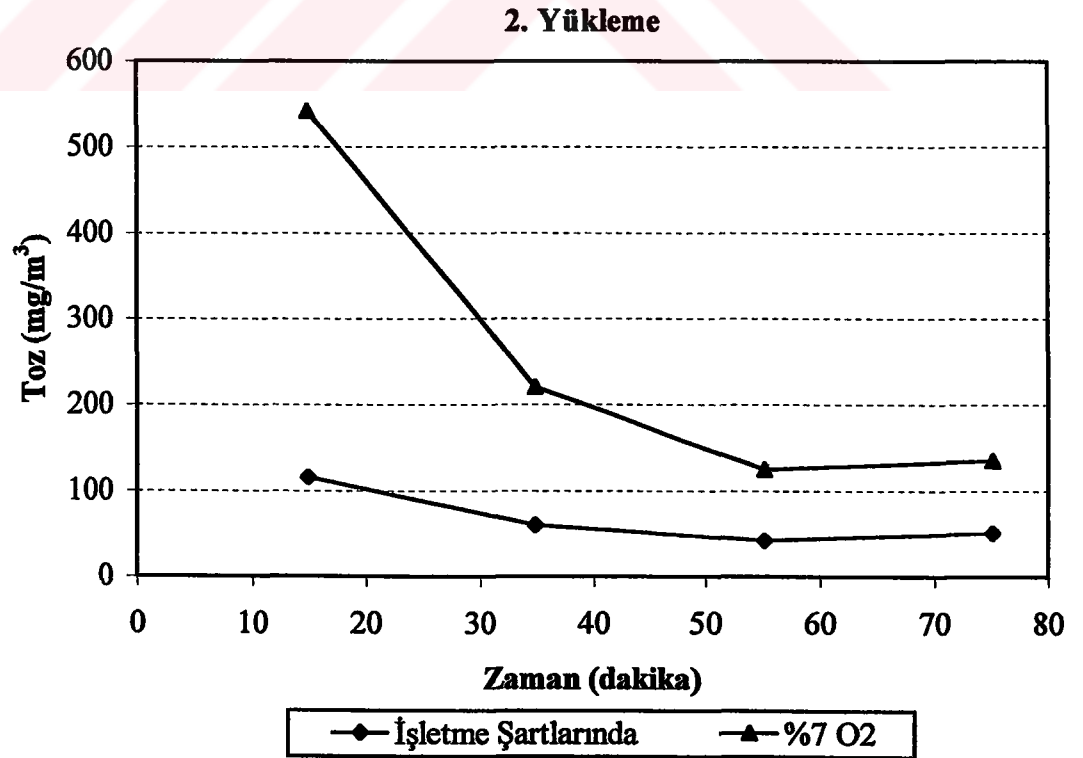
Şekil B.1. % 19.90 Nemli Y. Ağaçlı-G.Afrika Harman Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (2.Grup, 1. Yükleme)



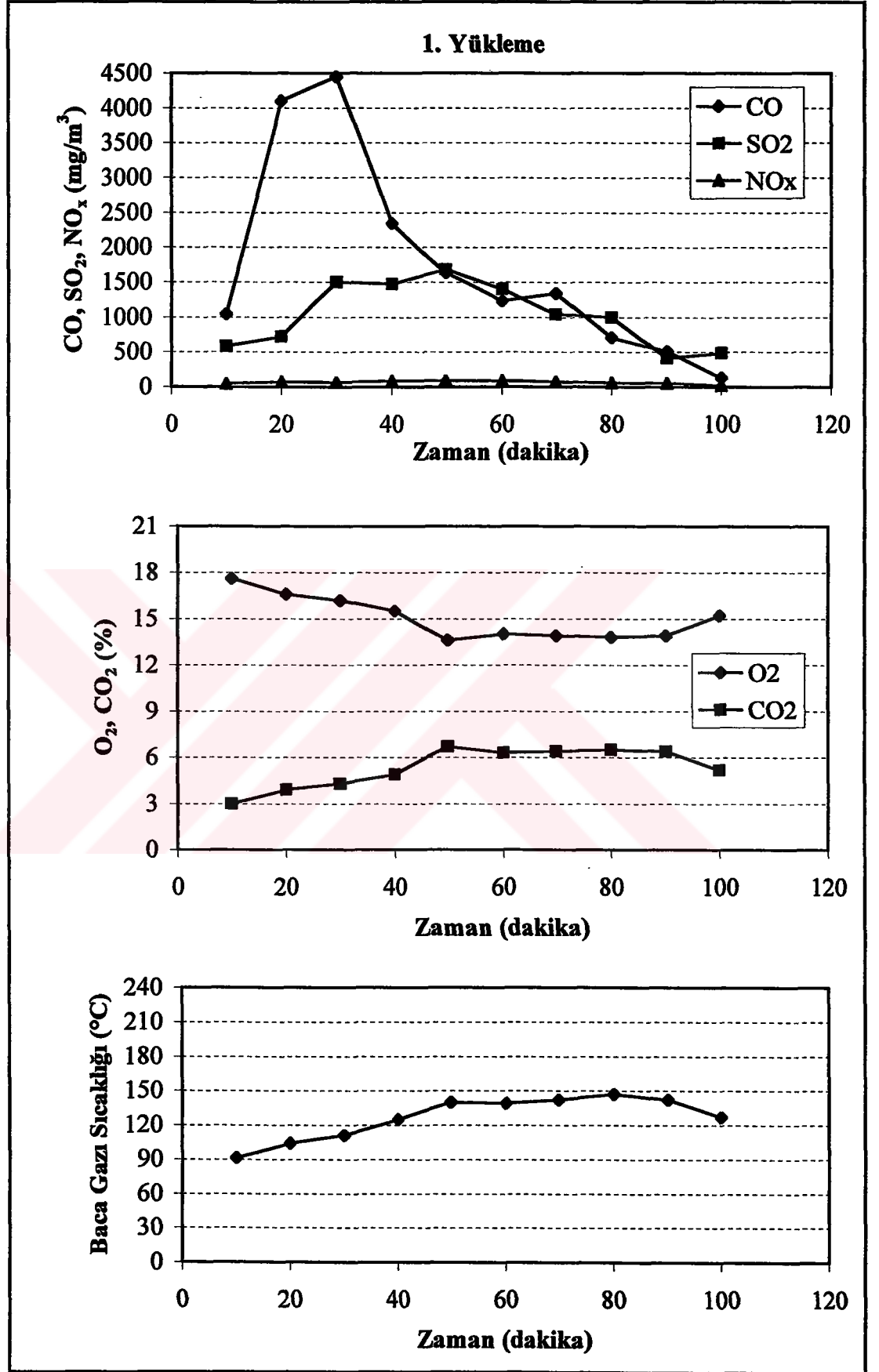
Şekil B.2. % 19.90 Nemli Y. Ağa-Çi-G.Afrika Harman Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (2.Grup, 2. Yükleme)



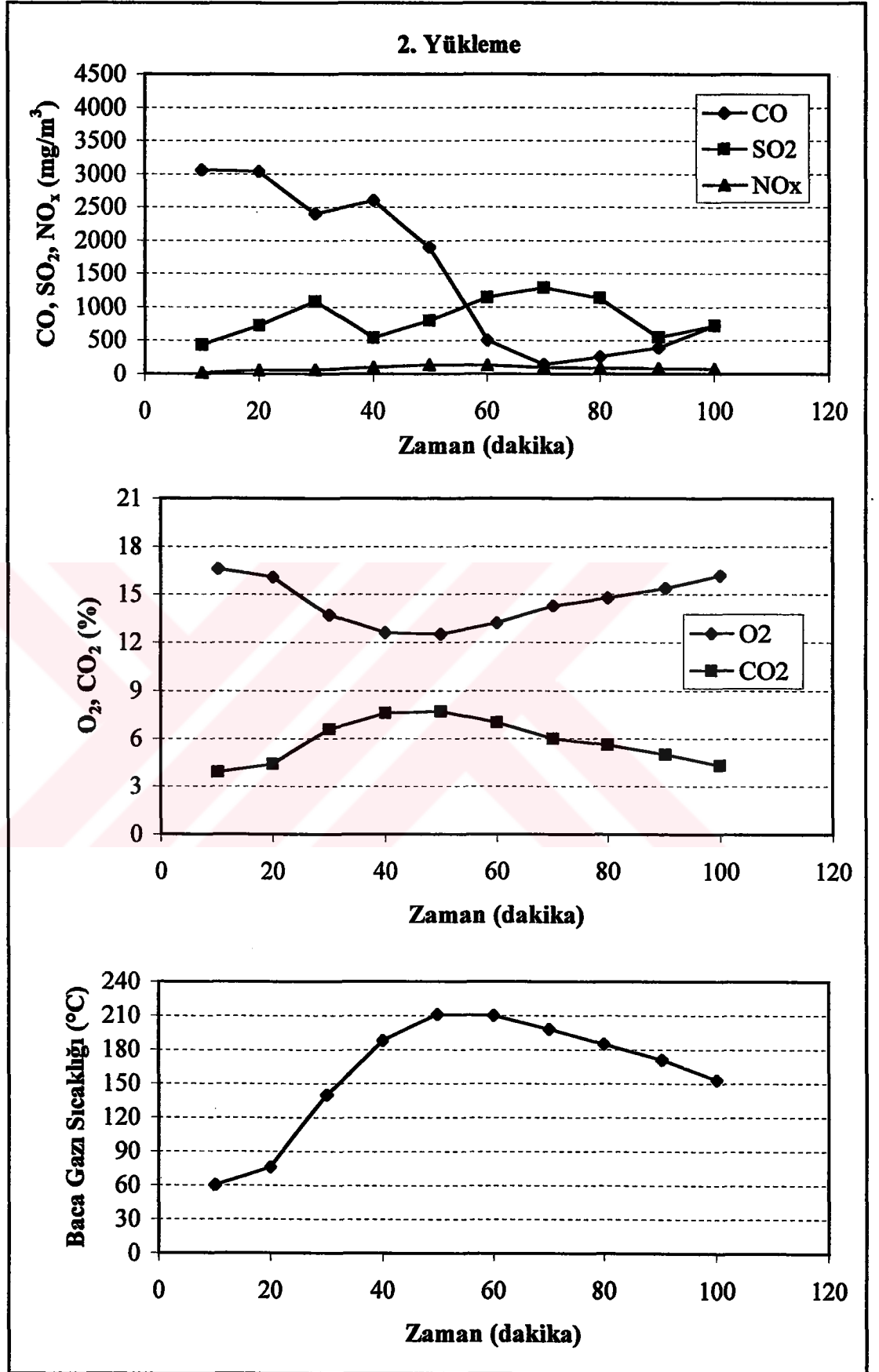
Şekil B.3. %19.90 Nemli Y.Ağaçlı-G.Afrika Harman Kömürüne Ait Toz Emisyonları (2. Grup, 1. Yükleme)



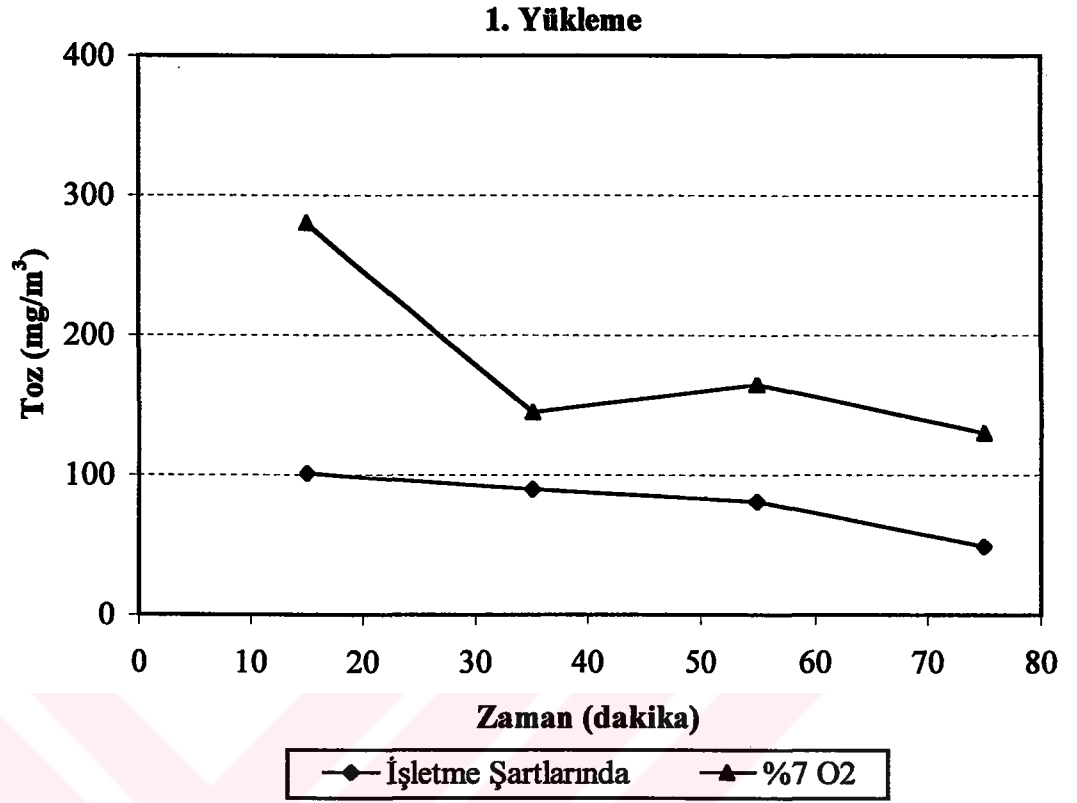
Şekil B.4. %19.90 Nemli Y.Ağaçlı-G.Afrika Harman Kömürüne Ait Toz Emisyonları (2. Grup, 2. Yükleme)



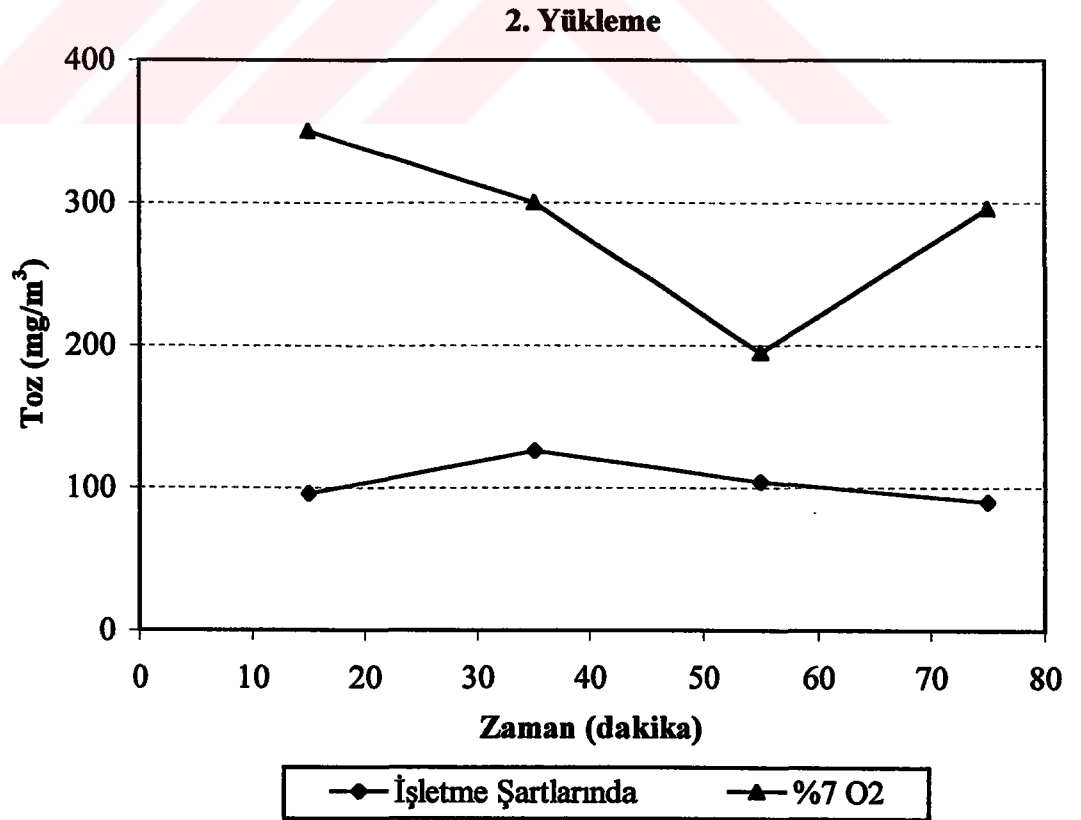
Şekil B.5. % 15.30 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (2.Grup, 1. Yükleme)



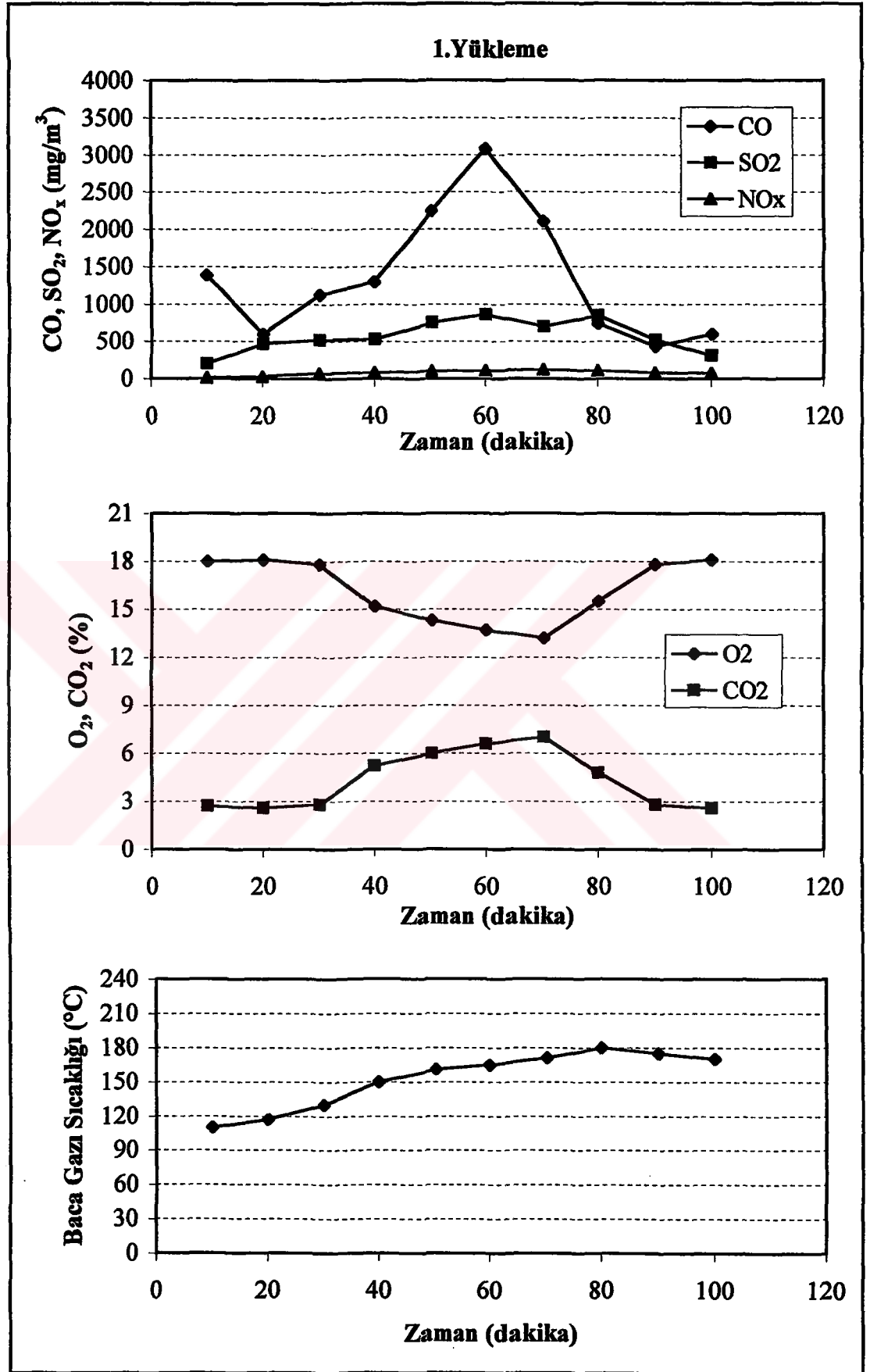
Şekil B.6. % 15.30 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (2.Grup, 2. Yükleme)



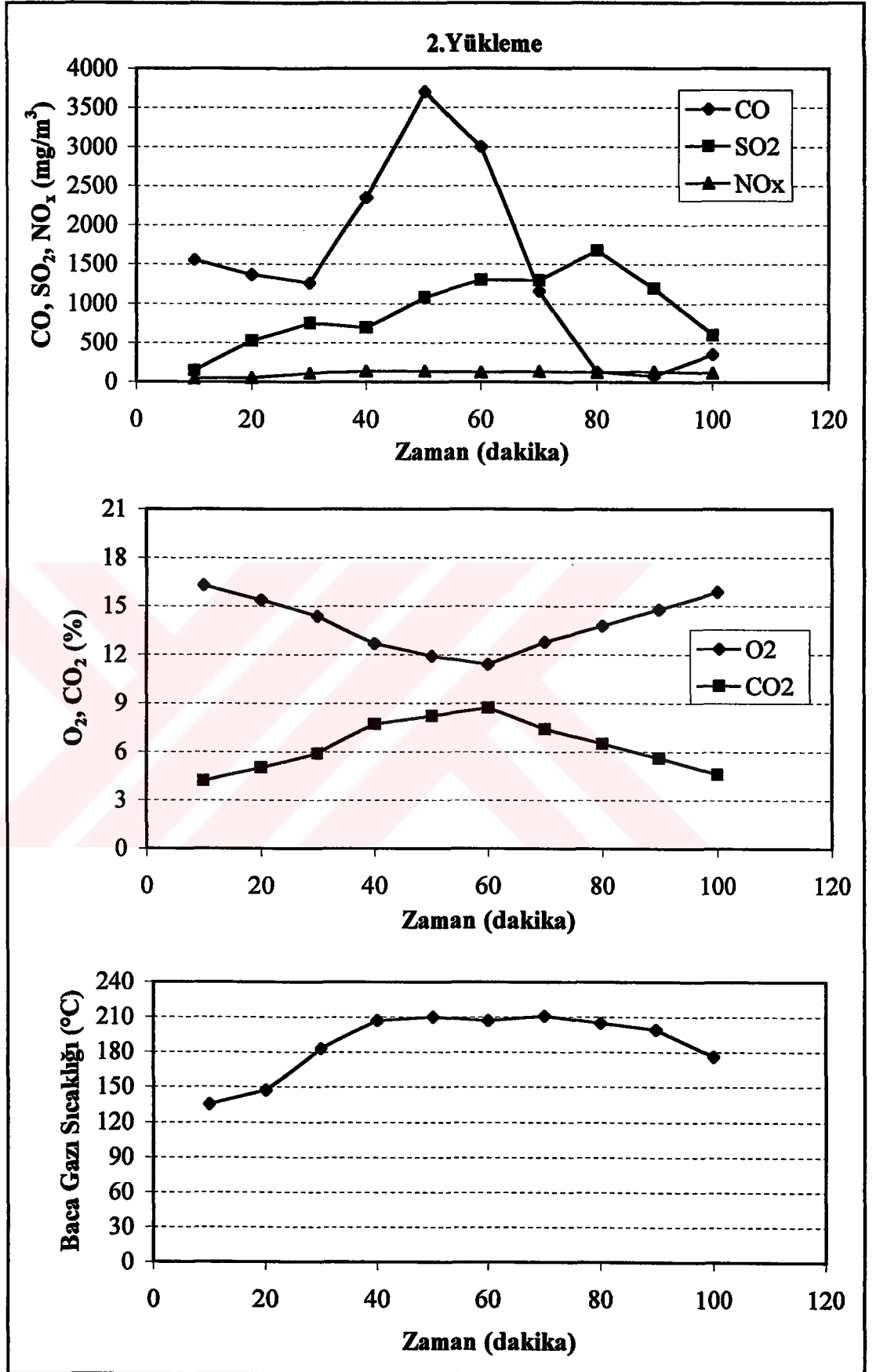
Şekil B.7. %15.30 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Toz Emisyonları (2.Grup, 1. Yükleme)



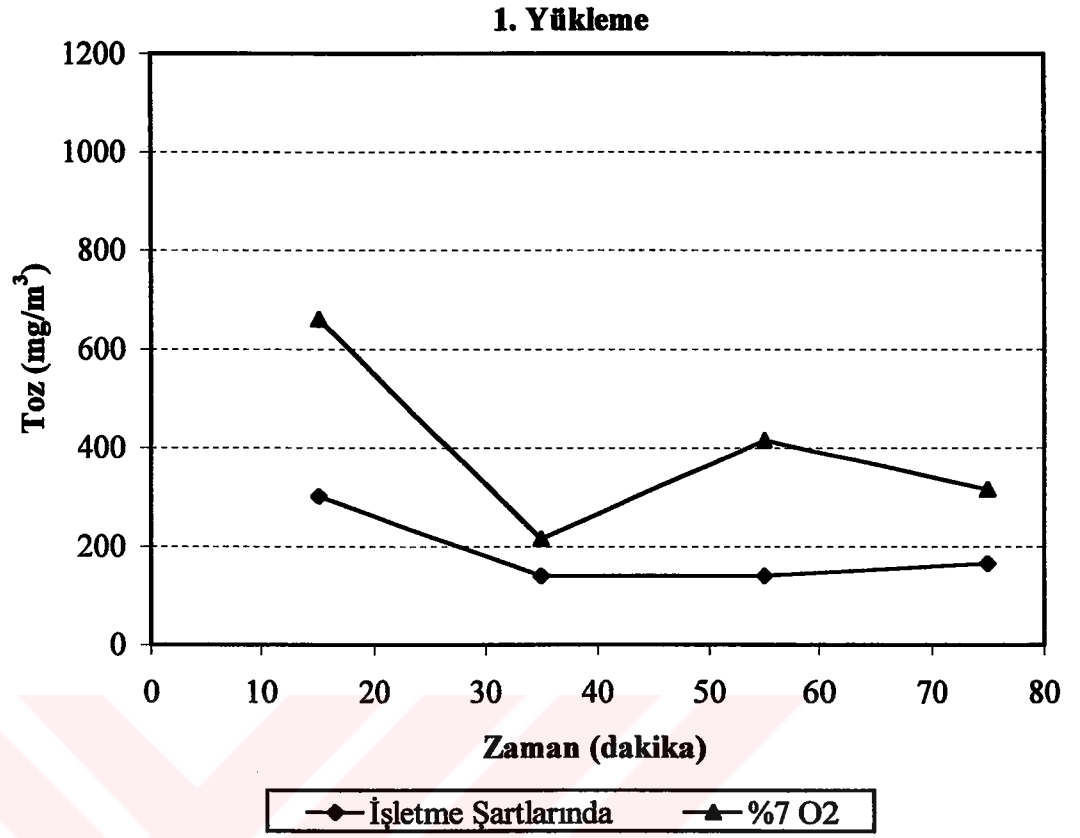
Şekil B.8. %15.30 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Toz Emisyonları (2.Grup, 2. Yükleme)



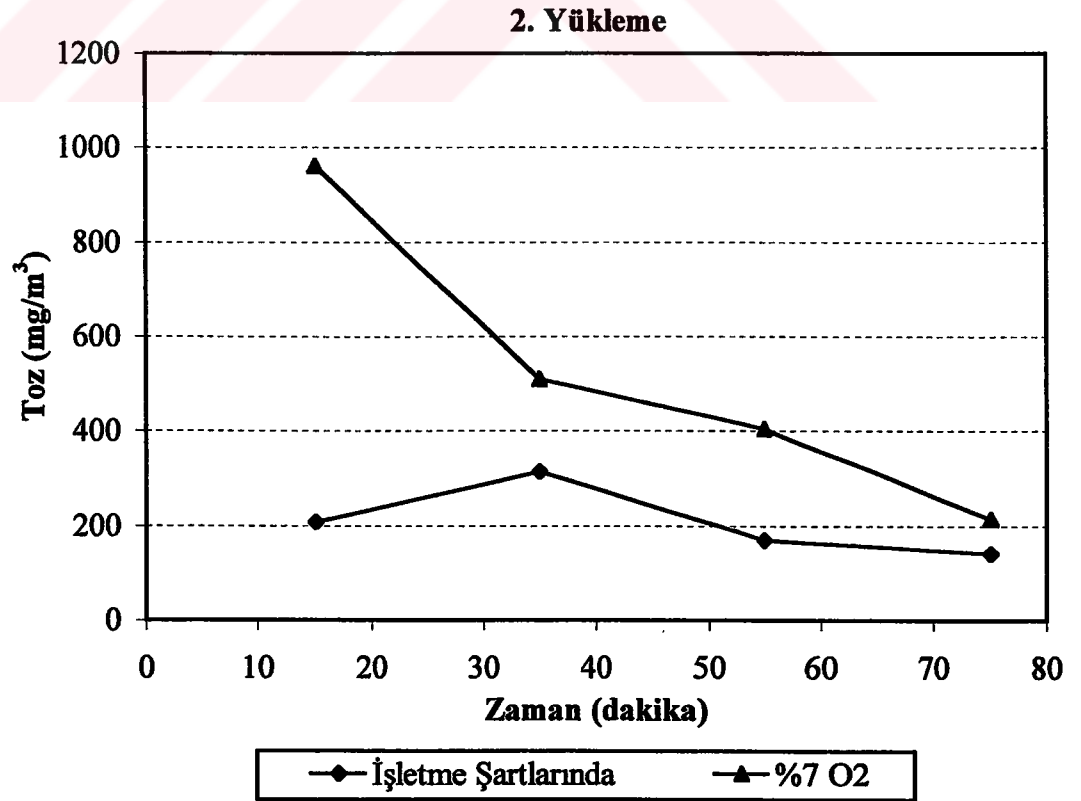
Şekil B.9. % 21.40 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (2.Grup, 1.Yükleme)



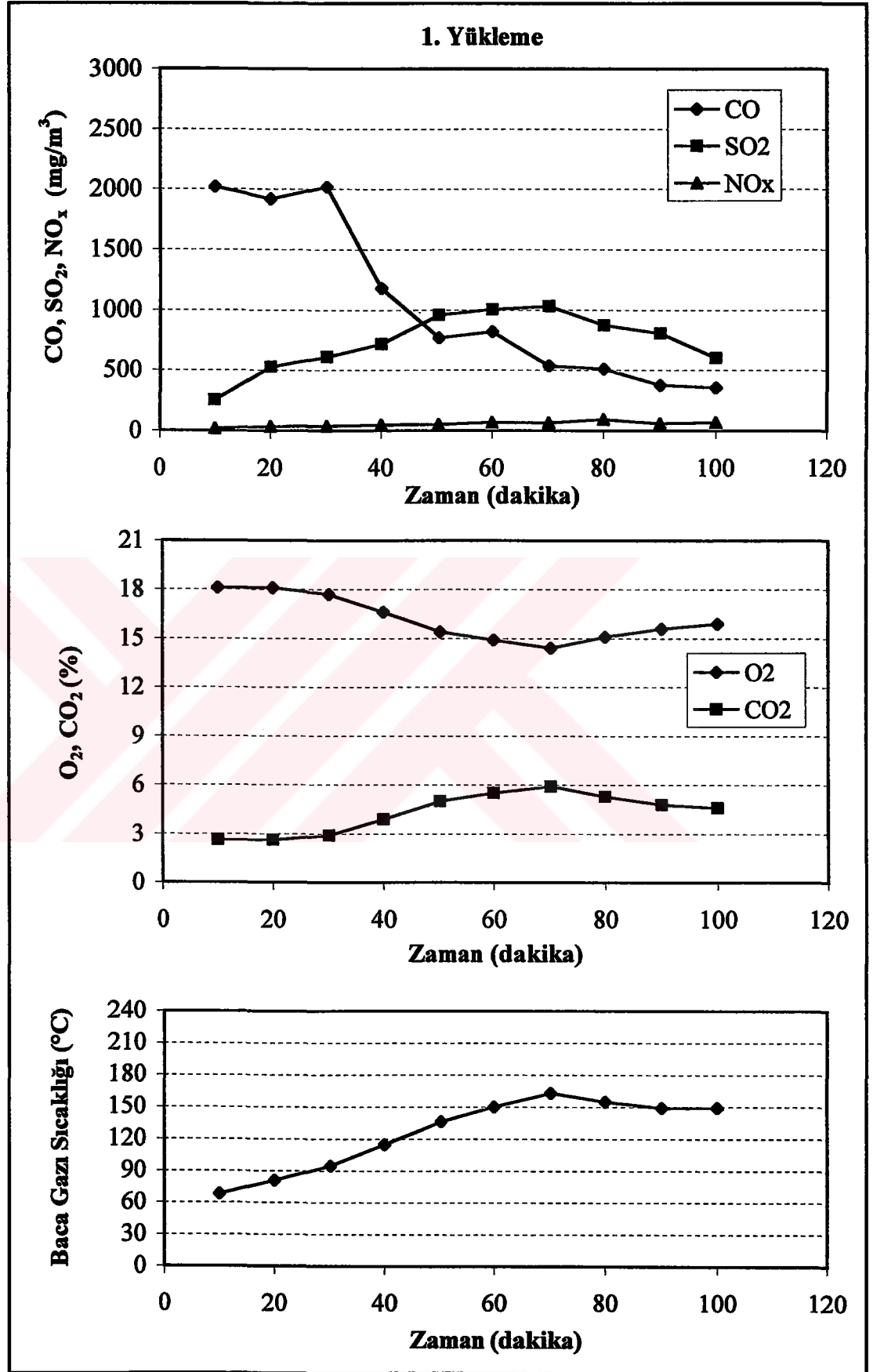
Şekil B.10. % 21.40 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (2. Grup, 2.Yükleme)



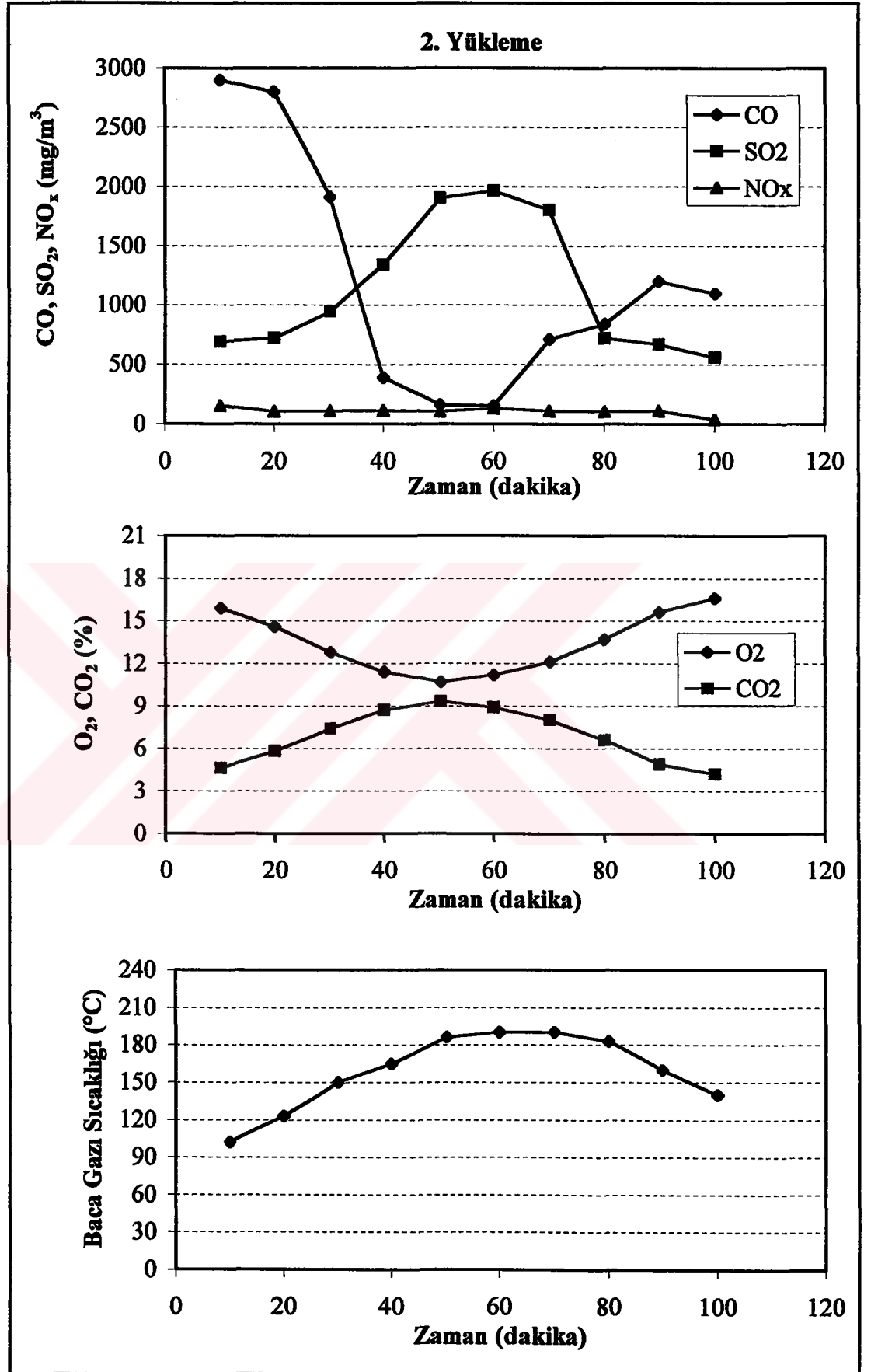
Şekil B.11. %21.40 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Toz Emisyonları
(2. Grup, 1. Yükleme)



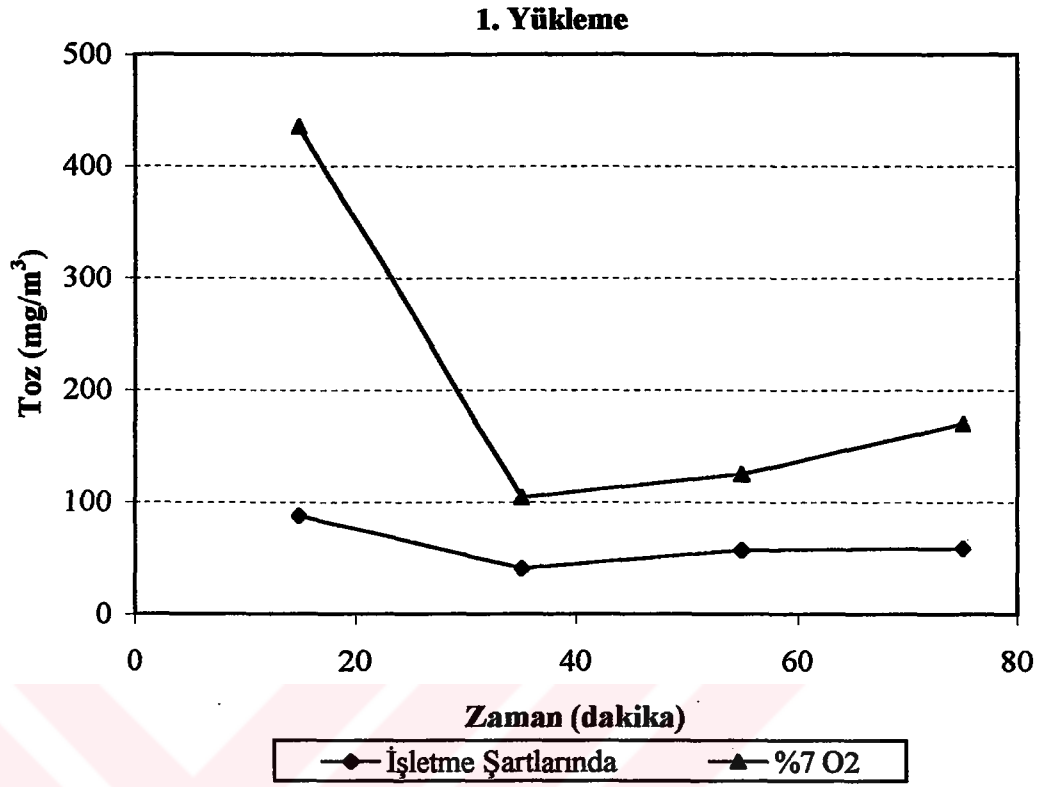
Şekil B.12. %21.40 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Toz Emisyonları
(2. Grup, 2. Yükleme)



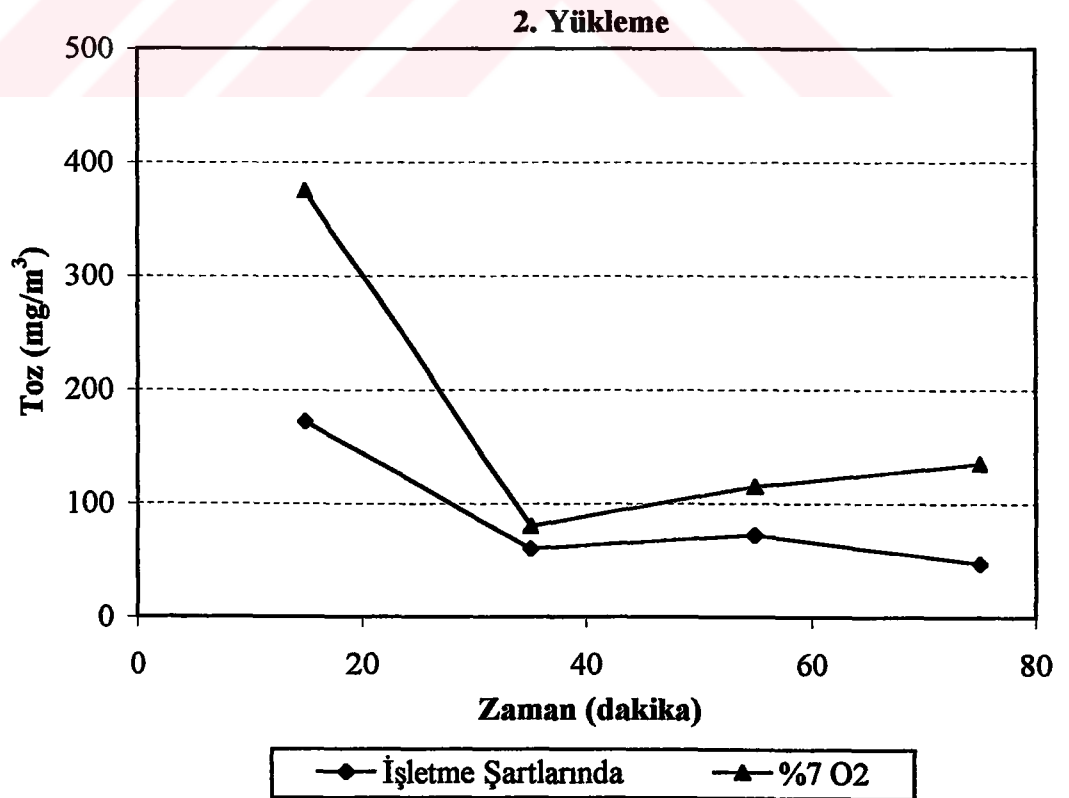
Şekil B.13. % 37.10 Nemli Orijinal Y. Ağaçlı Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (2. Grup, 1.Yükleme)



Şekil B.14. % 37.10 Nemli Orijinal Y. Ağaç Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (2. Grup, 2.Yükleme)



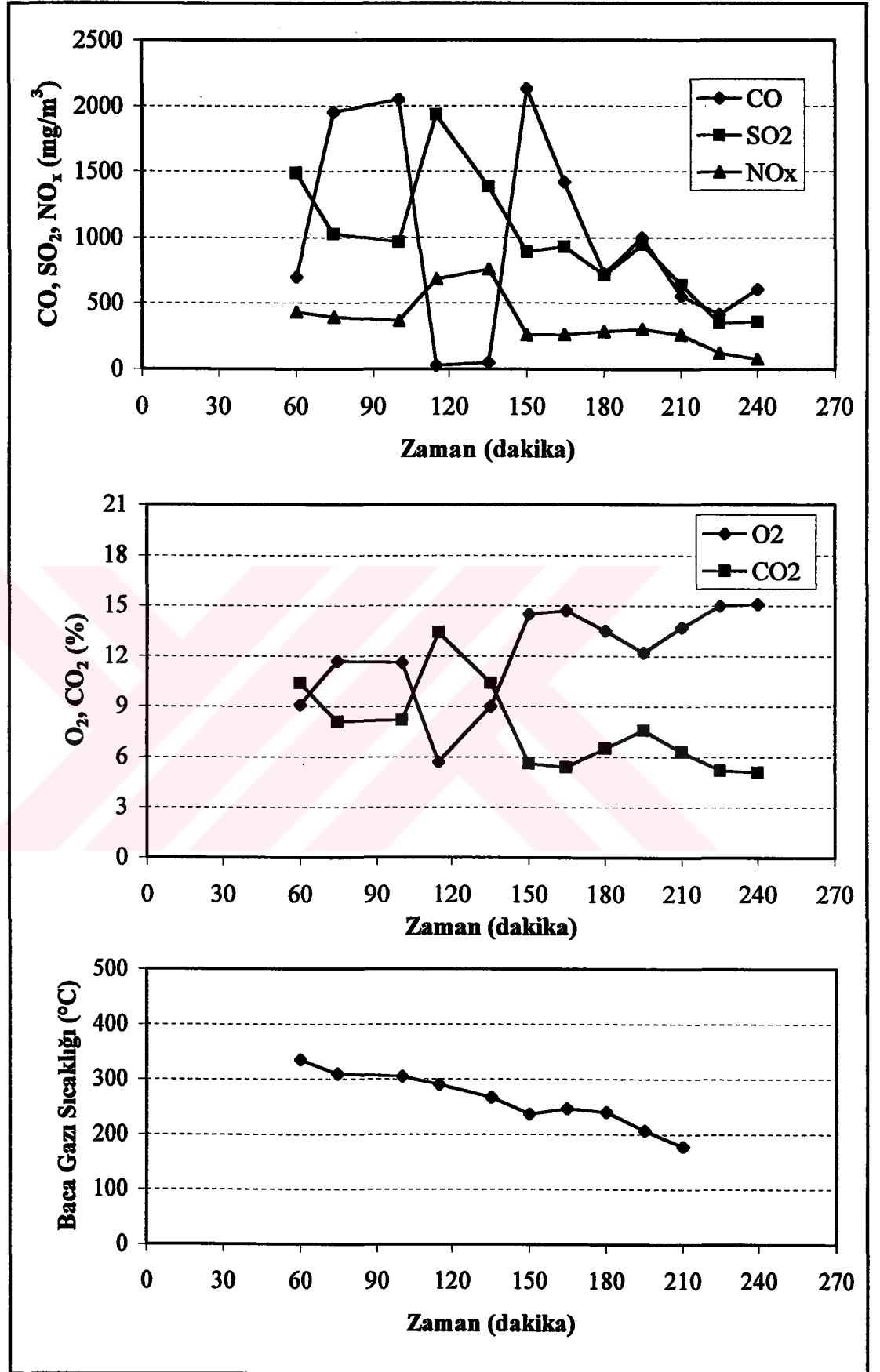
Şekil B.15. %37.10 Nemli Orijinal Y. Ağaçlı Kömürüne Ait Toz Emisyonları (2.Grup, 1. Yükleme)



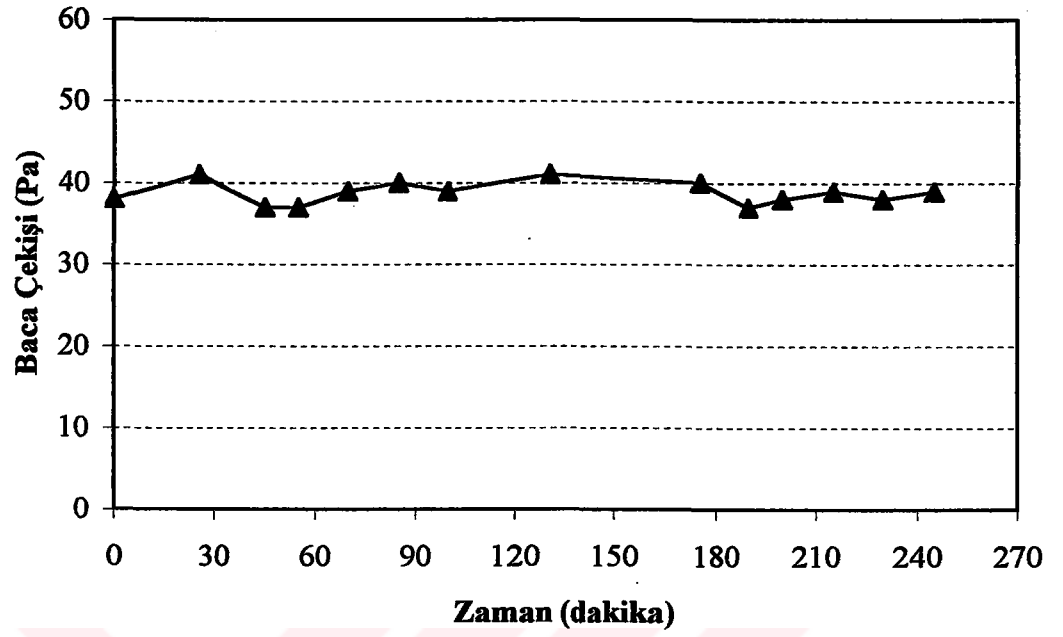
Şekil B.16. %37.10 Nemli Orijinal Y. Ağaçlı Kömürüne Ait Toz Emisyonları (2.Grup, 2. Yükleme)

Ek C. 3. Grup Yanma Deneylerine Ait Şekiller

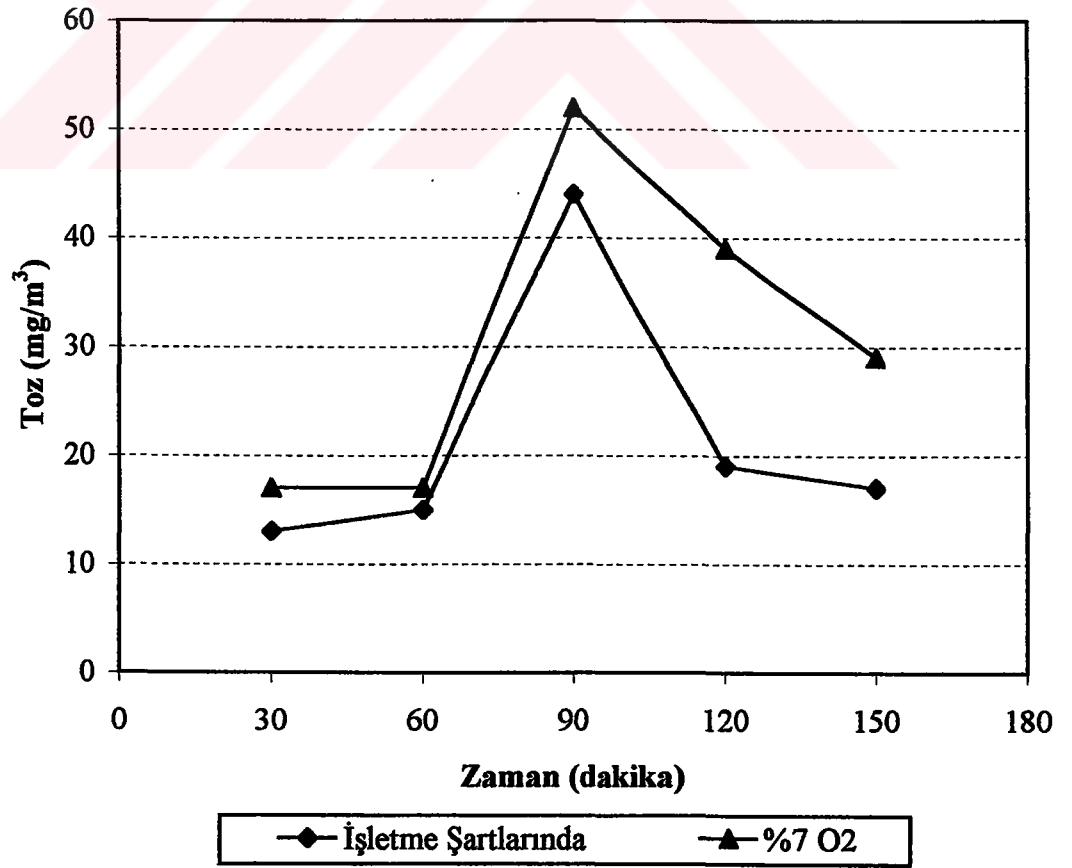




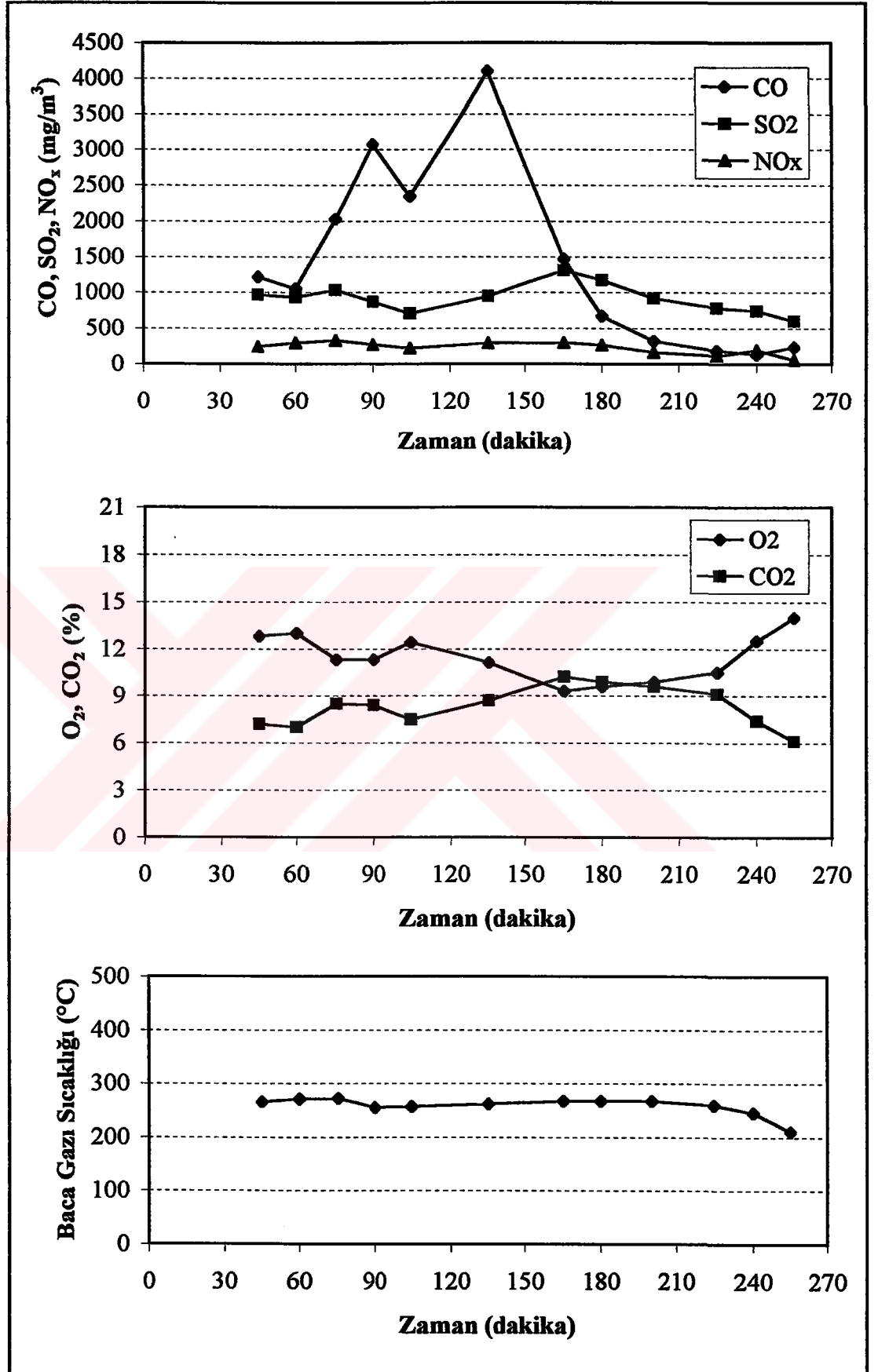
Şekil C.1. % 13.20 Nemli Soma Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (3.Grup)



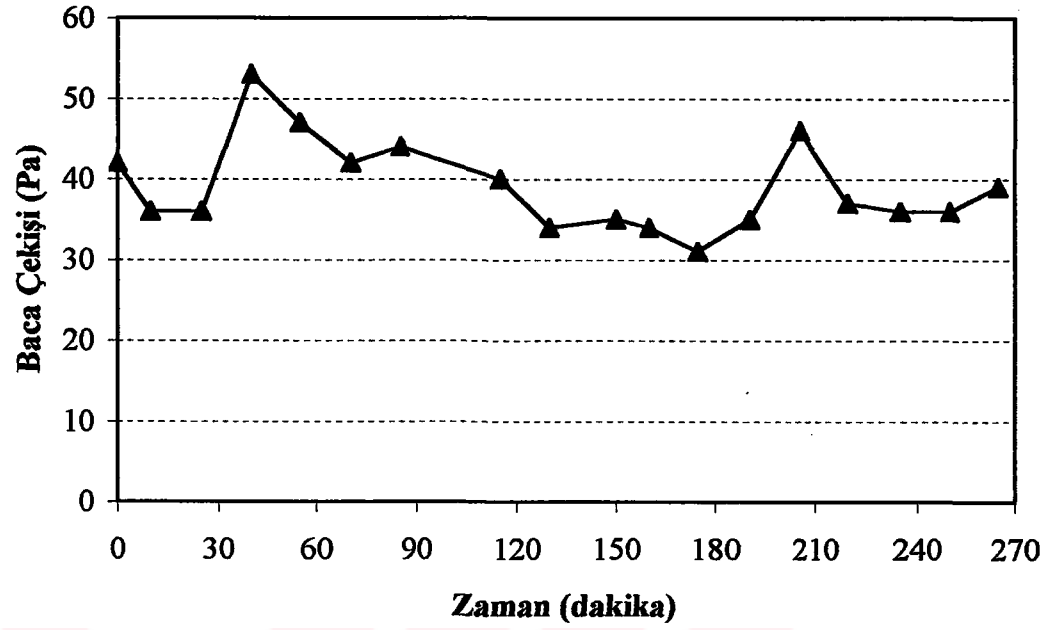
Şekil C.2. %13.20 Nemli Soma Kömürüne Ait Baca Çekışı Değerleri (3. Grup)



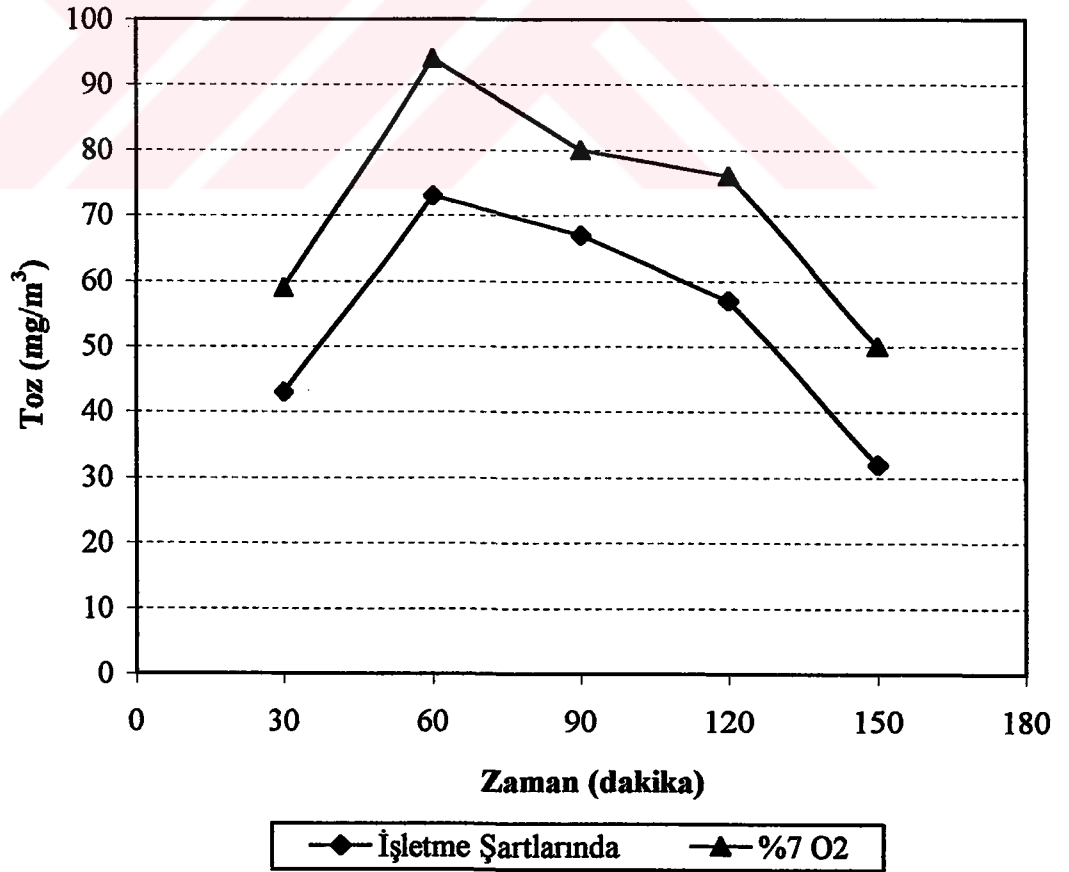
Şekil C.3. %13.20 Nemli Soma Kömürüne Ait Toz Emisyonları (3. Grup)



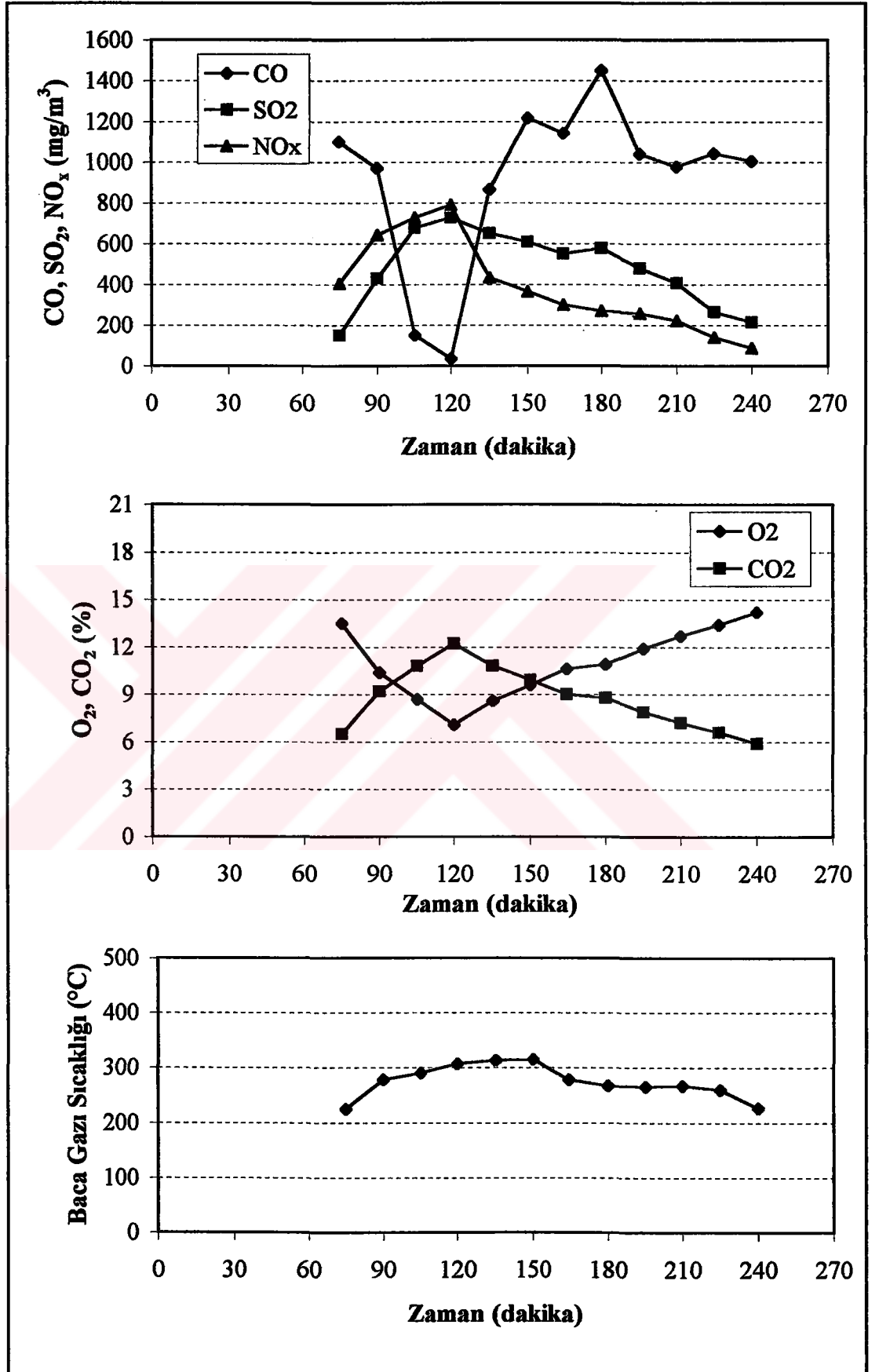
Şekil C.4. % 22.20 Nemli Y.Ağaçlı-G.Afrika Harman Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (3.Grup)



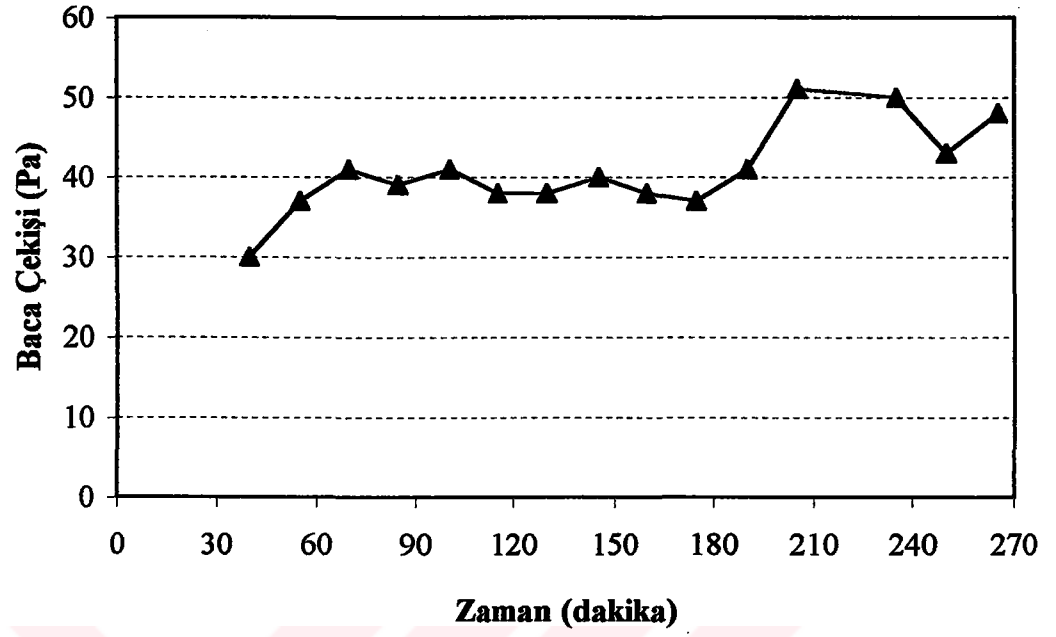
Şekil C.5. %22.20 Nemli Y.Ağaçlı-G.Afrika Harman Kömürüne Ait
Baca Çekişi Değerleri (3. Grup)



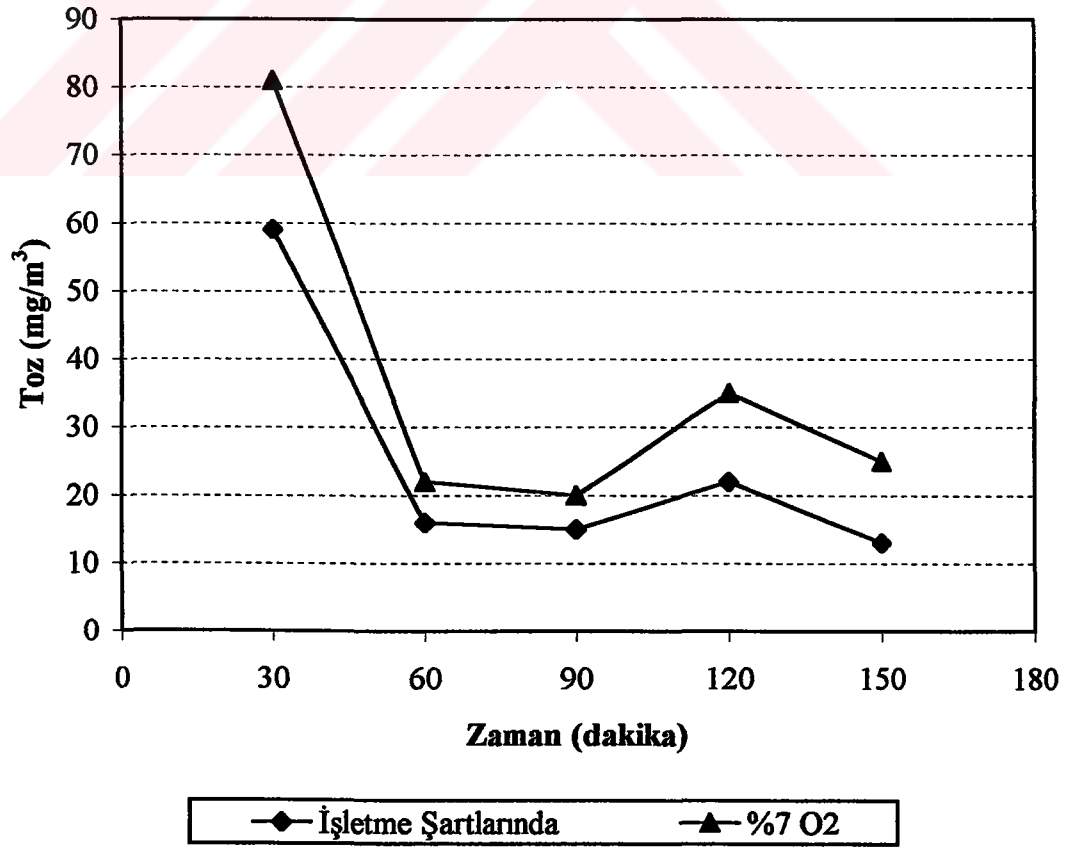
Şekil C.6. %22.20 Nemli Y.Ağaçlı-G.Afrika Harman Kömürüne Ait
Toz Emisyonları (3. Grup)



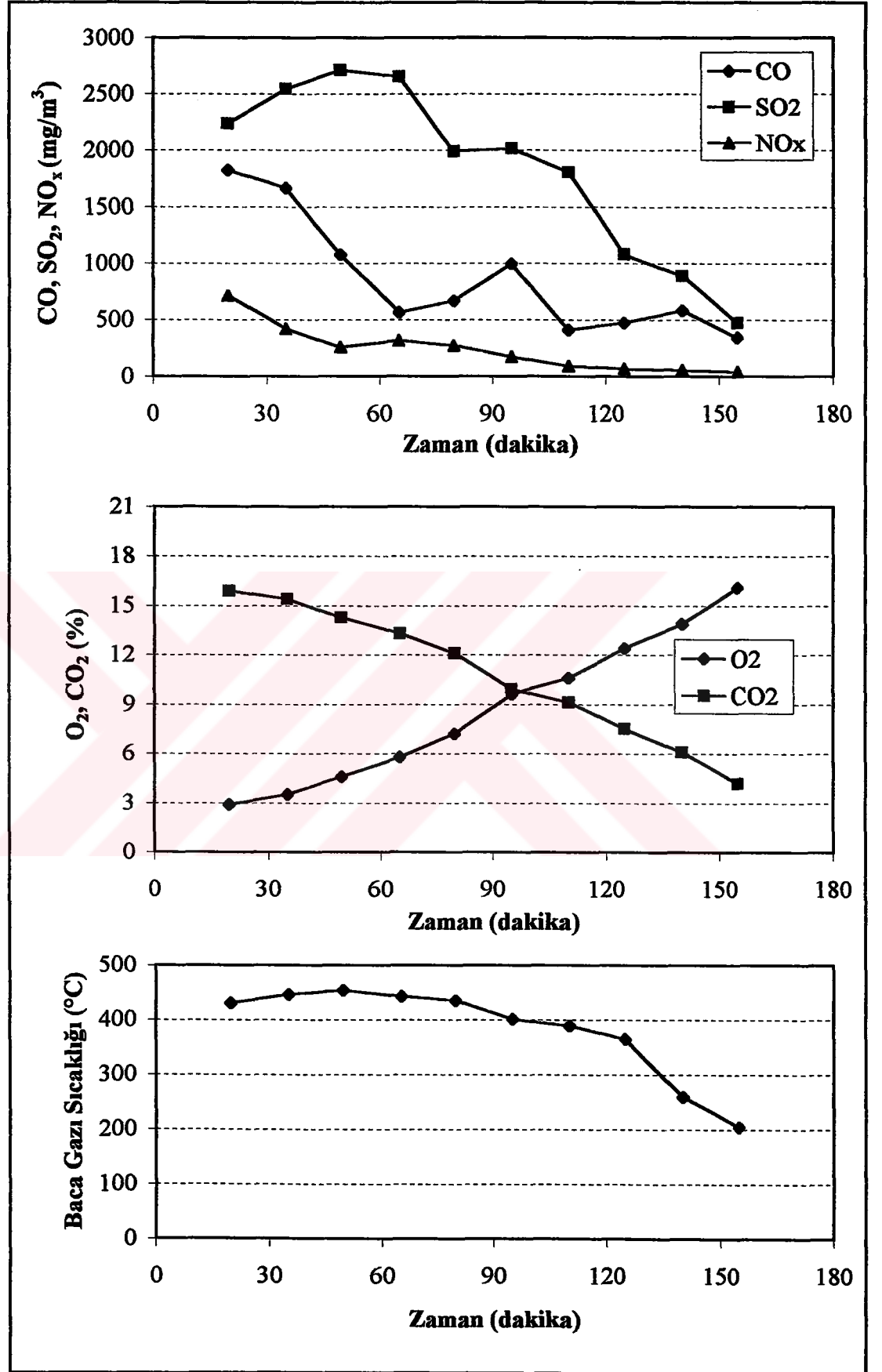
Şekil C.7. % 6.20 Nemli Güney Afrika Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (3.Grup)



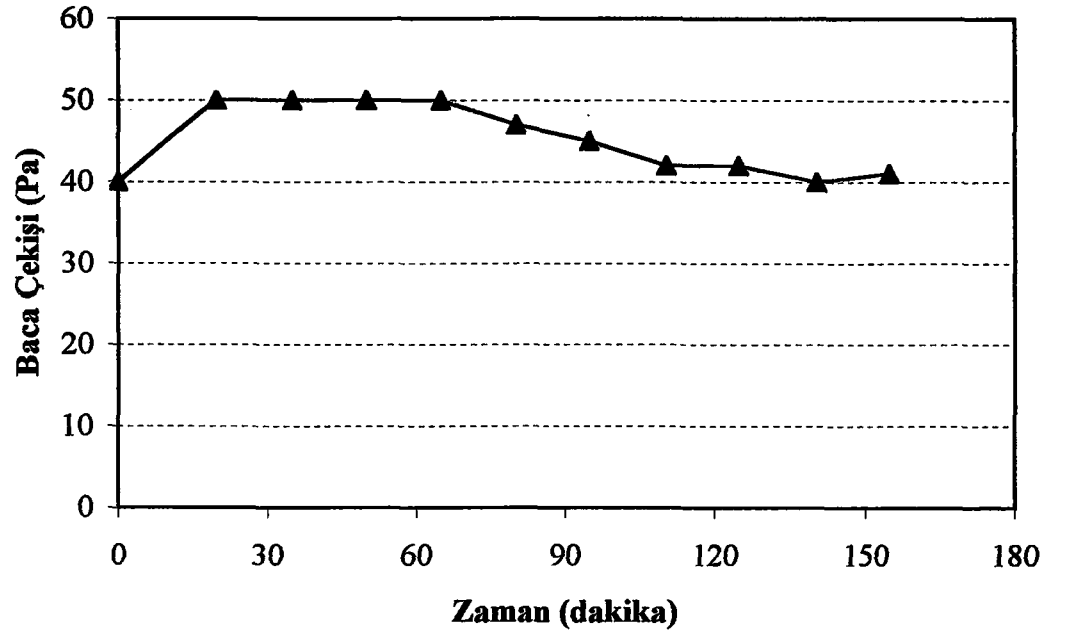
Şekil C.8. %6.20 Nemli Güney Afrika Kömürüne Ait Baca Çekişi Değerleri (3. Grup)



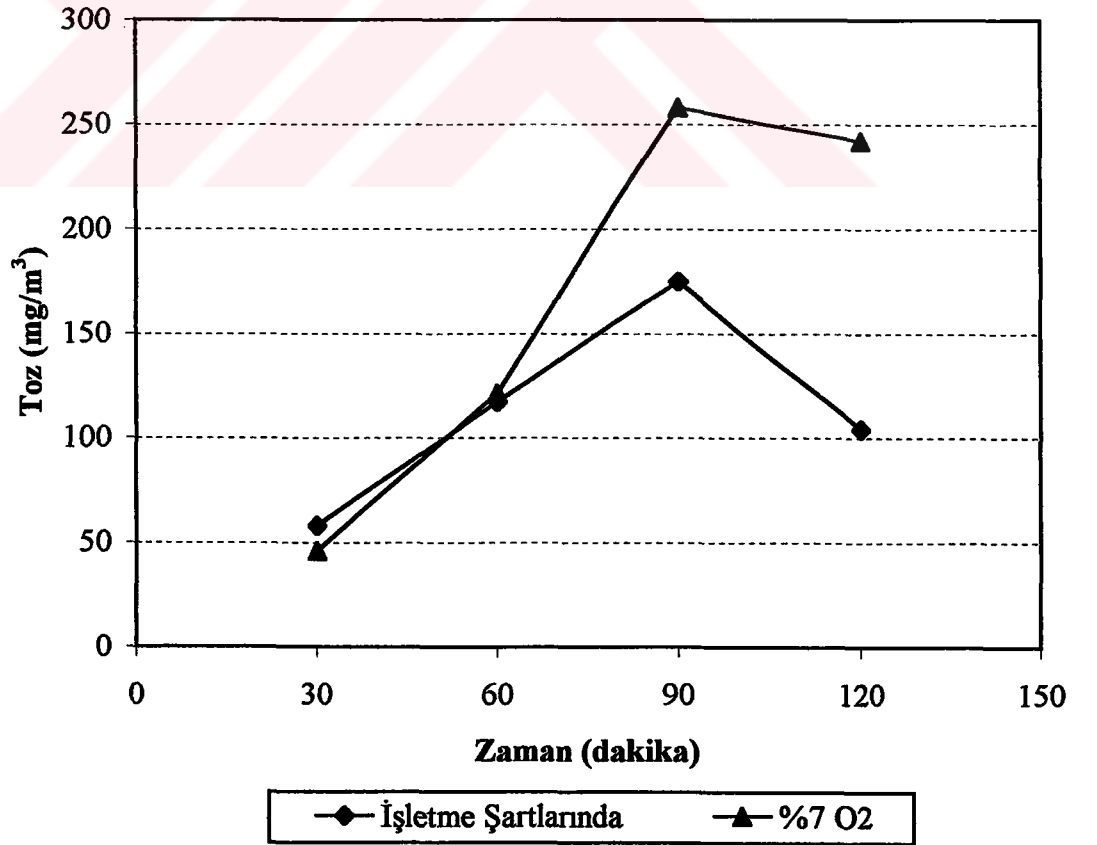
Şekil C.9. %6.20 Nemli Güney Afrika Kömürüne Ait Toz Emisyonları (3. Grup)



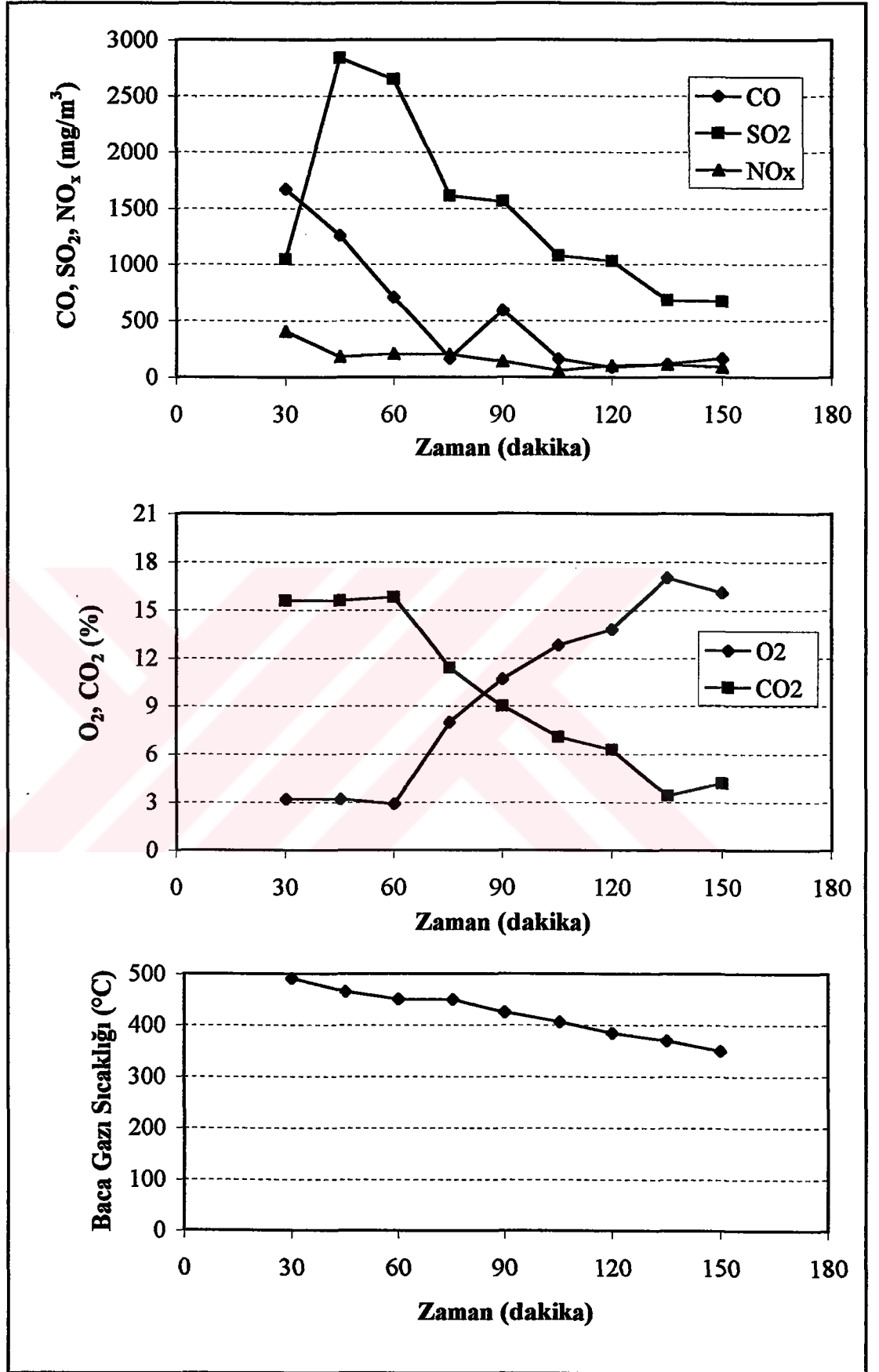
Şekil C.10. % 10.80 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (3.Grup)



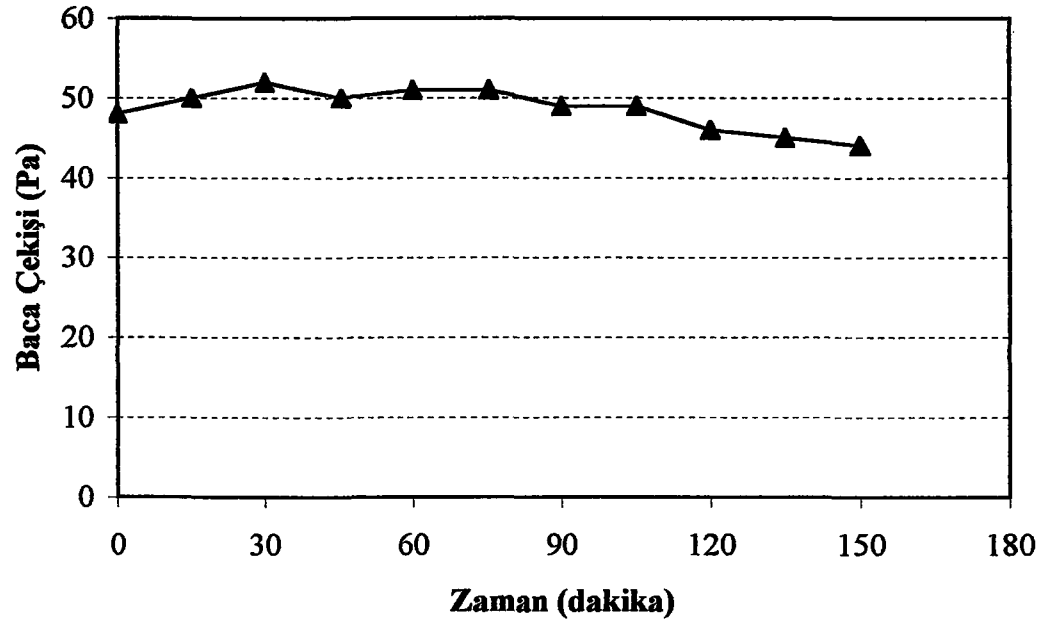
Şekil C.11. %10.80 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Baca Çekişi Değerleri (3. Grup)



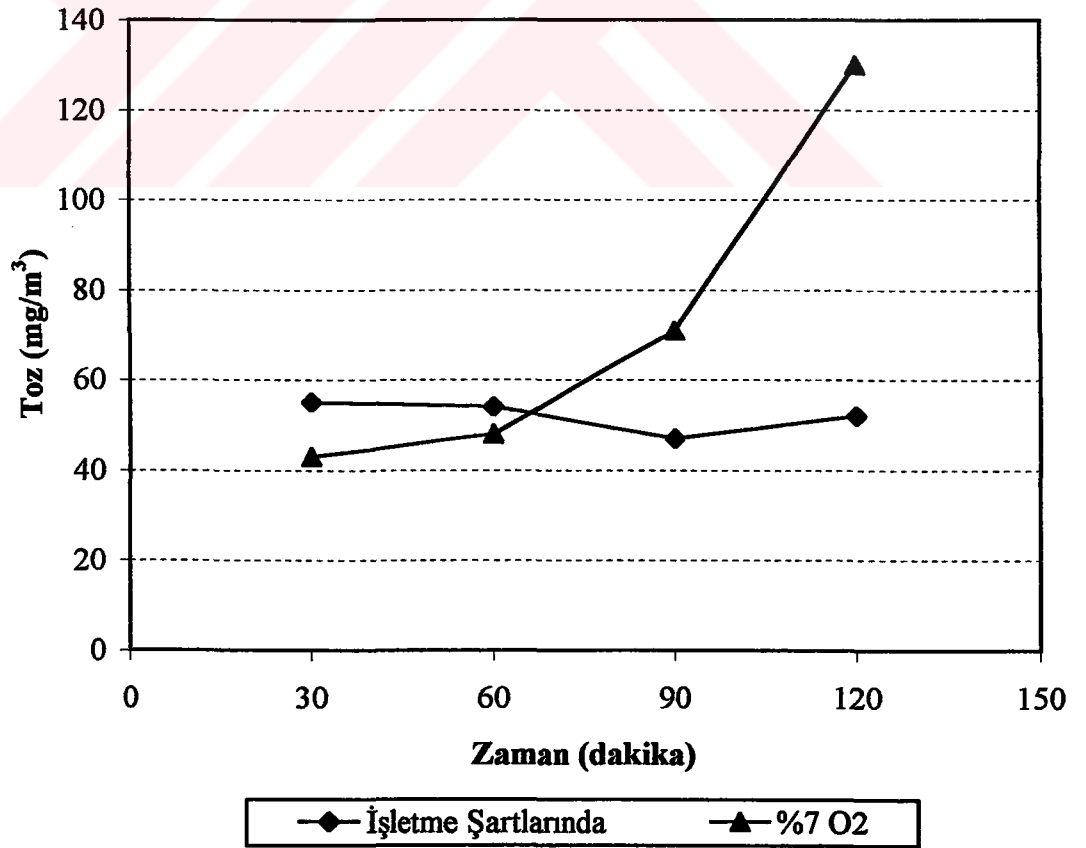
Şekil C.12. %10.80 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Toz Emisyonları (3. Grup)



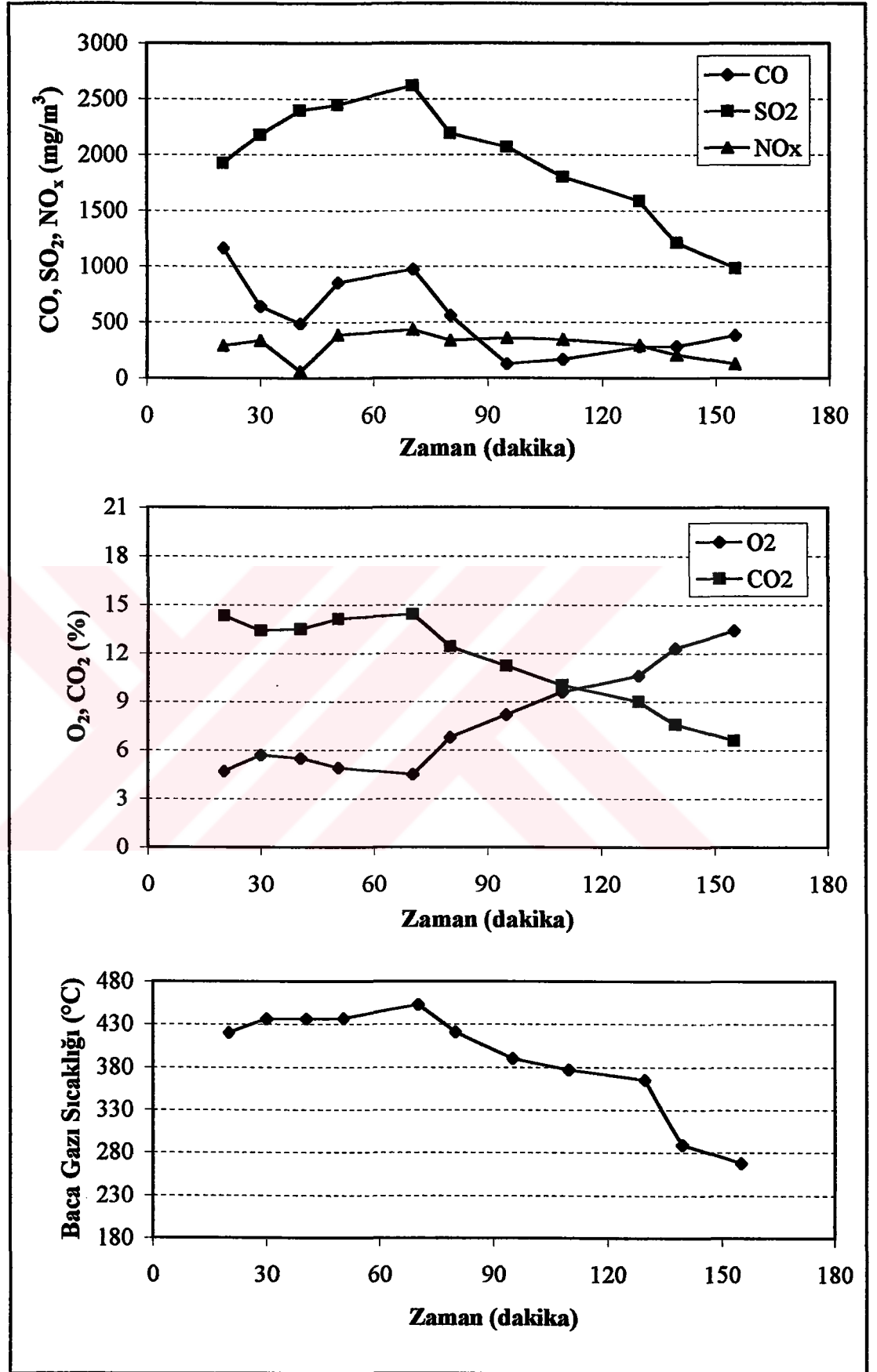
Şekil C.13. % 15.60 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (3.Grup)



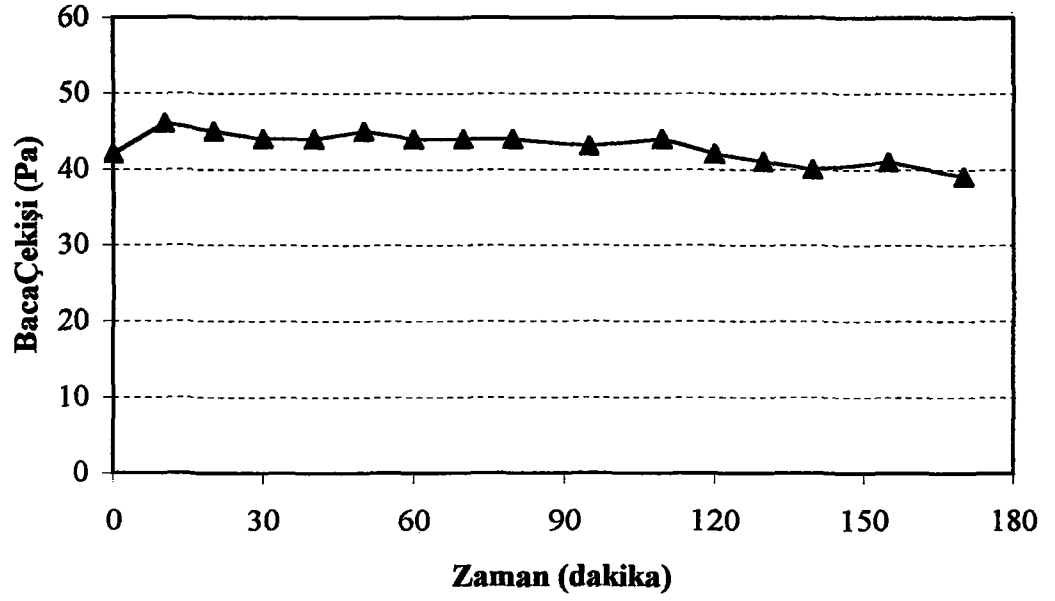
Şekil C.14. %15.60 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Baca Çekişi Değerleri (3. Grup)



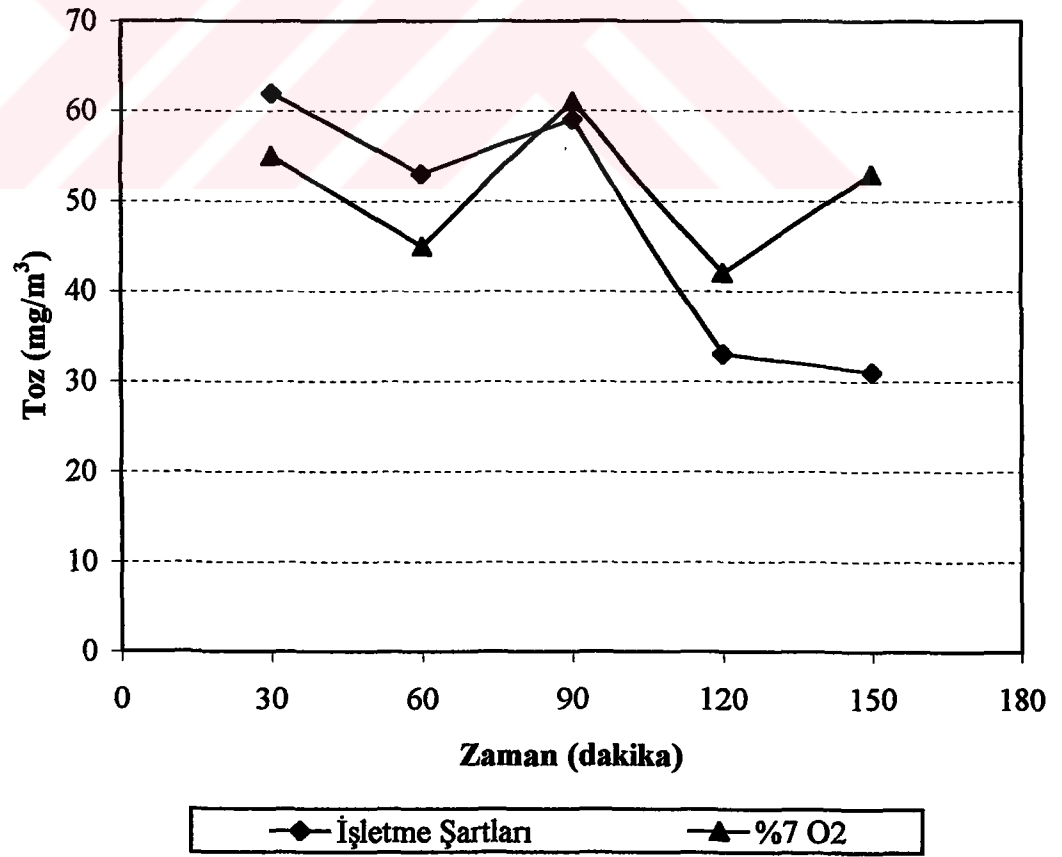
Şekil C.15. %15.60 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Toz Emisyonları (3. Grup)



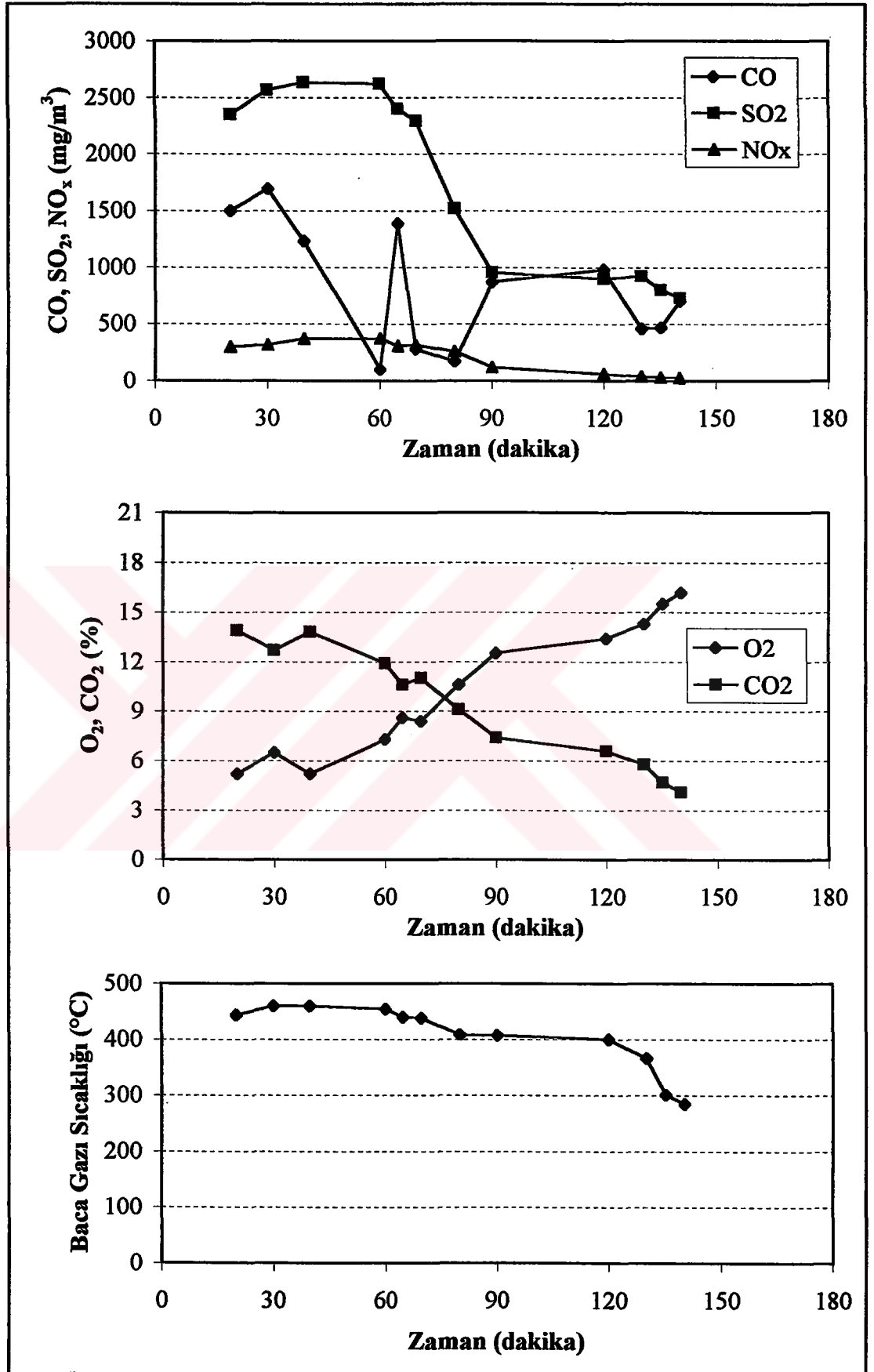
Şekil C.16. % 17.40 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (3.Grup)



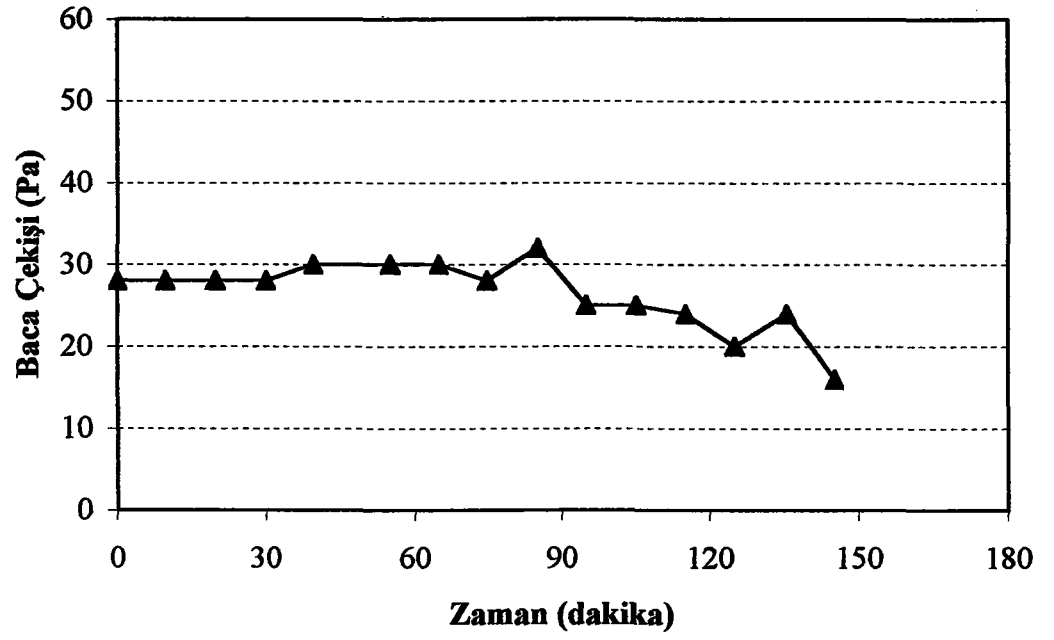
Şekil C.17. %17.40 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Baca Çekişi Değerleri (3. Grup)



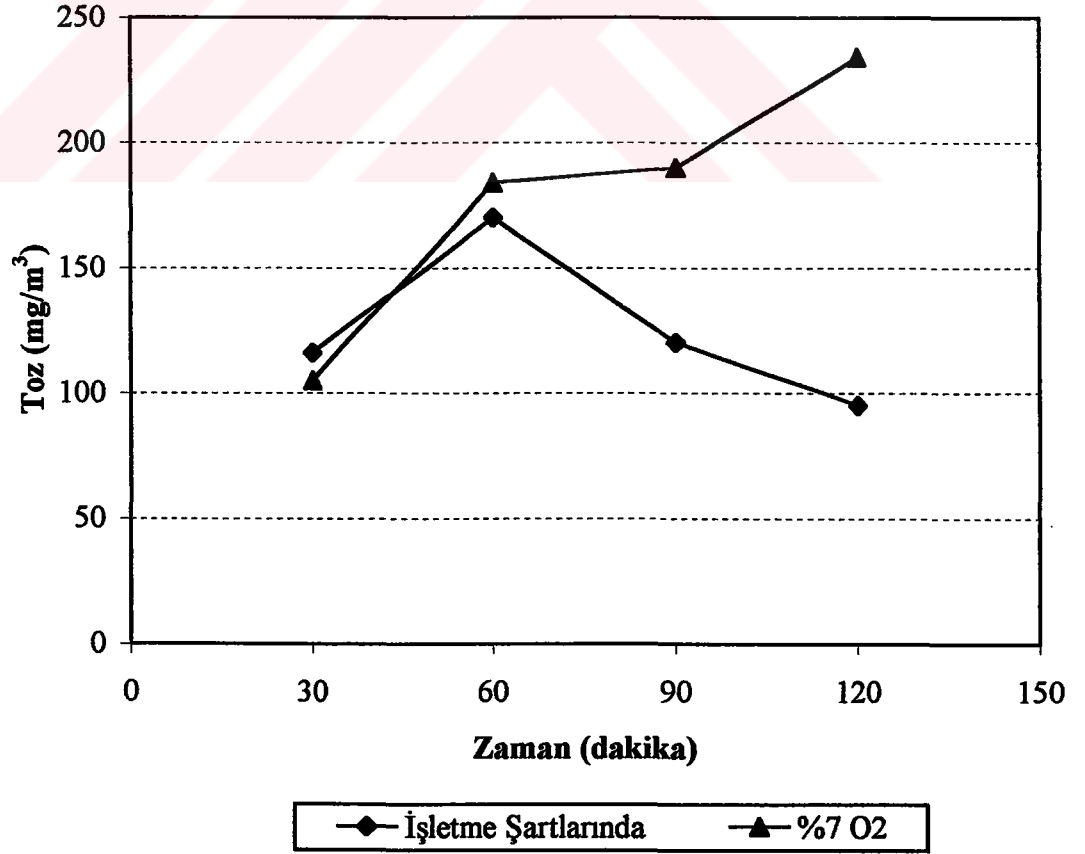
Şekil C.18. %17.40 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Toz Emisyonları (3. Grup)



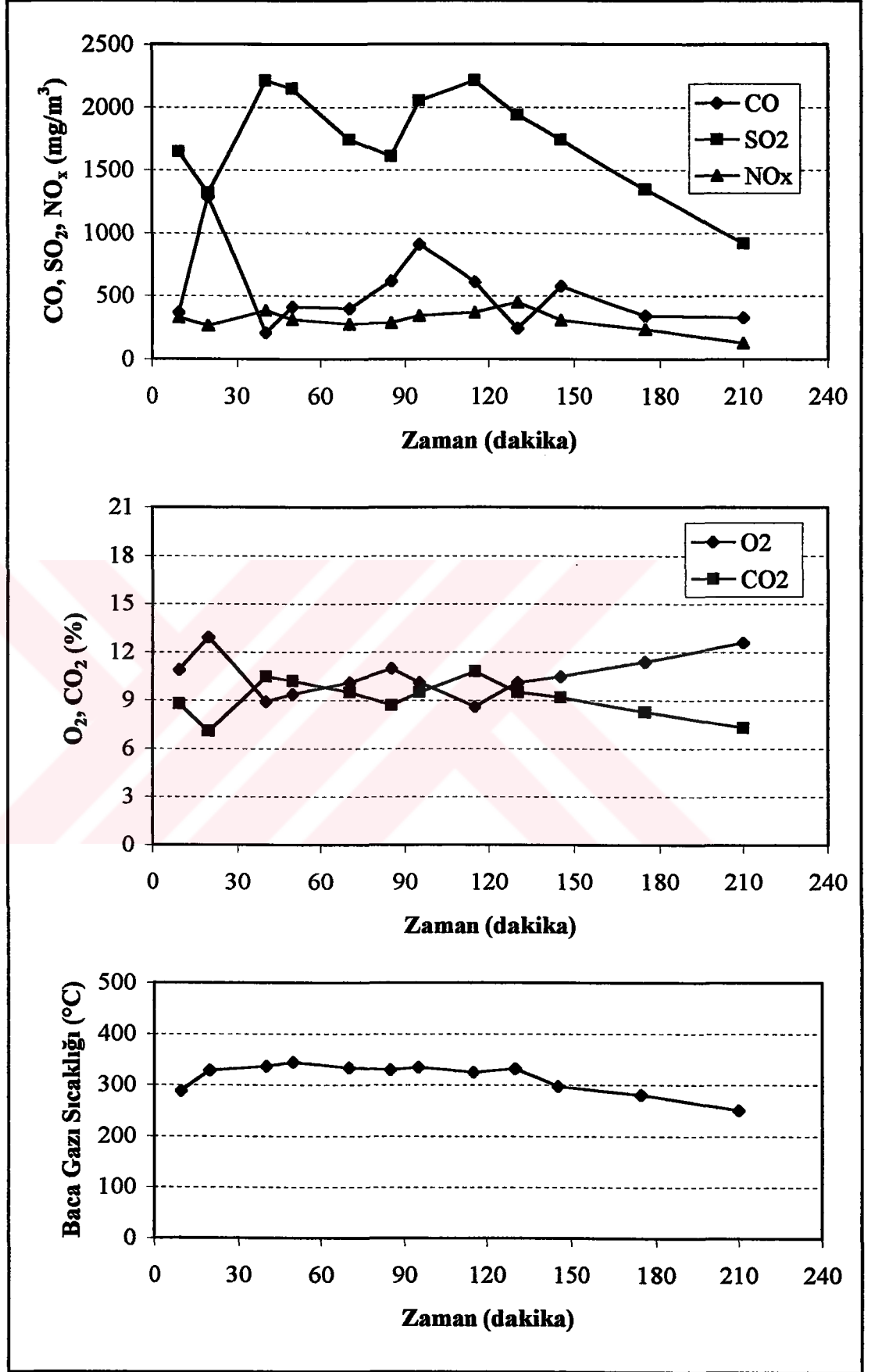
Şekil C.19. % 21.80 Nemli Yenicöy Ağaçlı Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (3.Grup)



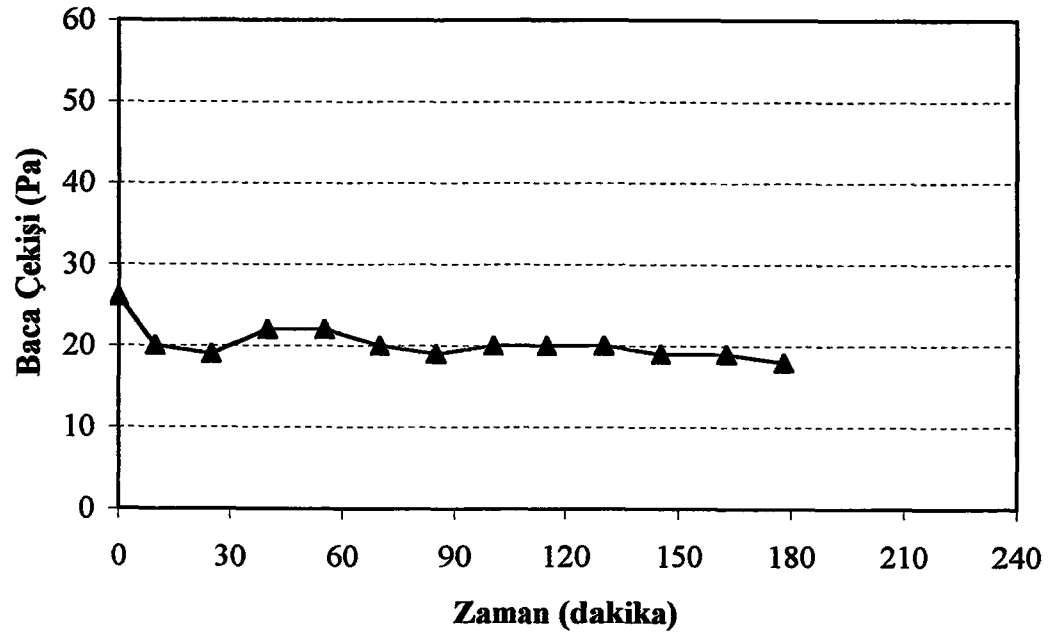
Şekil C.20. %21.80 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Baca Çekışı Değerleri (3. Grup)



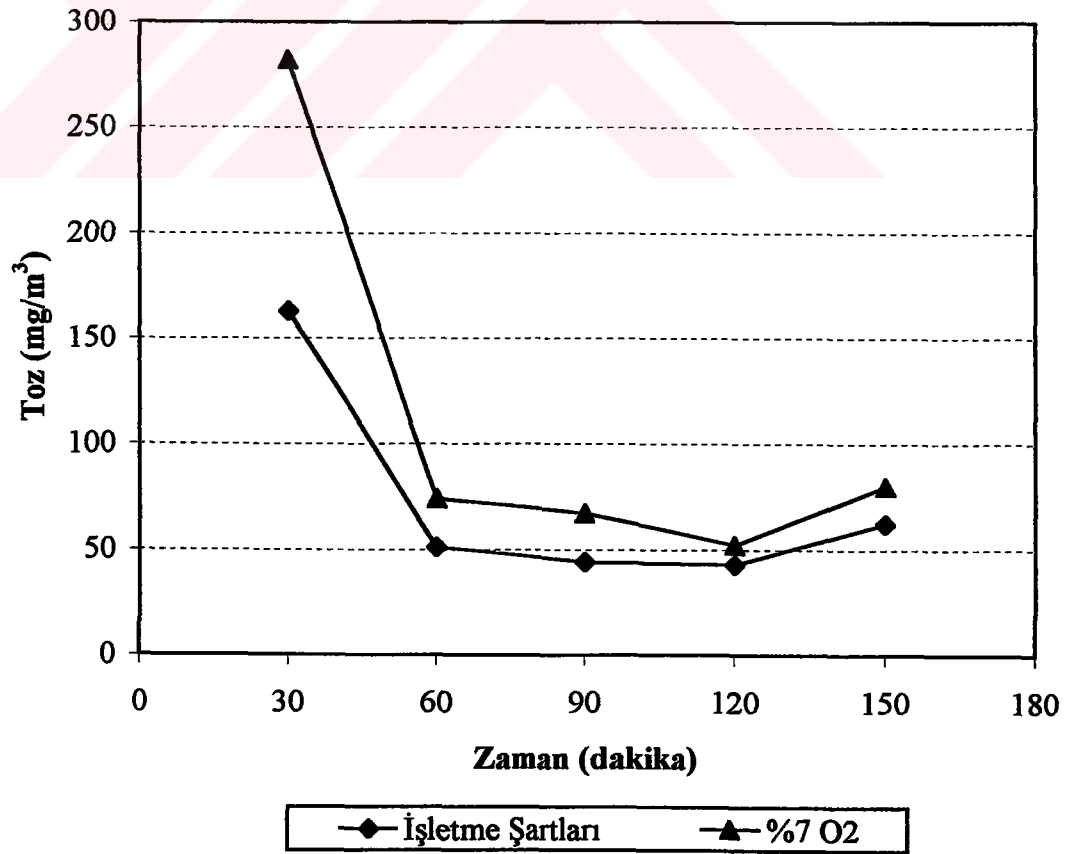
Şekil C.21. %21.80 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Toz Emisyonları (3. Grup)



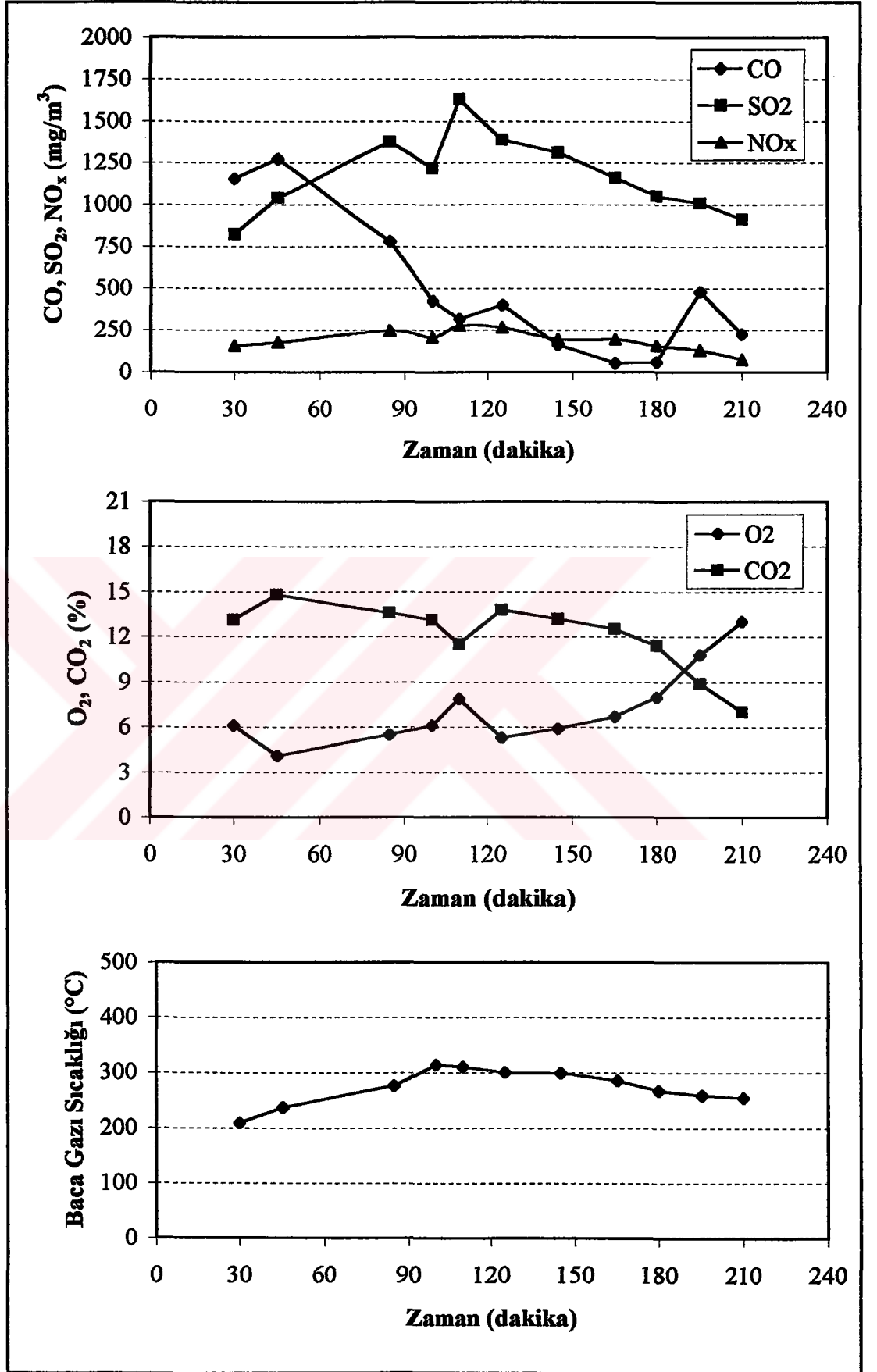
Şekil C.22. % 24.60 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (3.Grup)



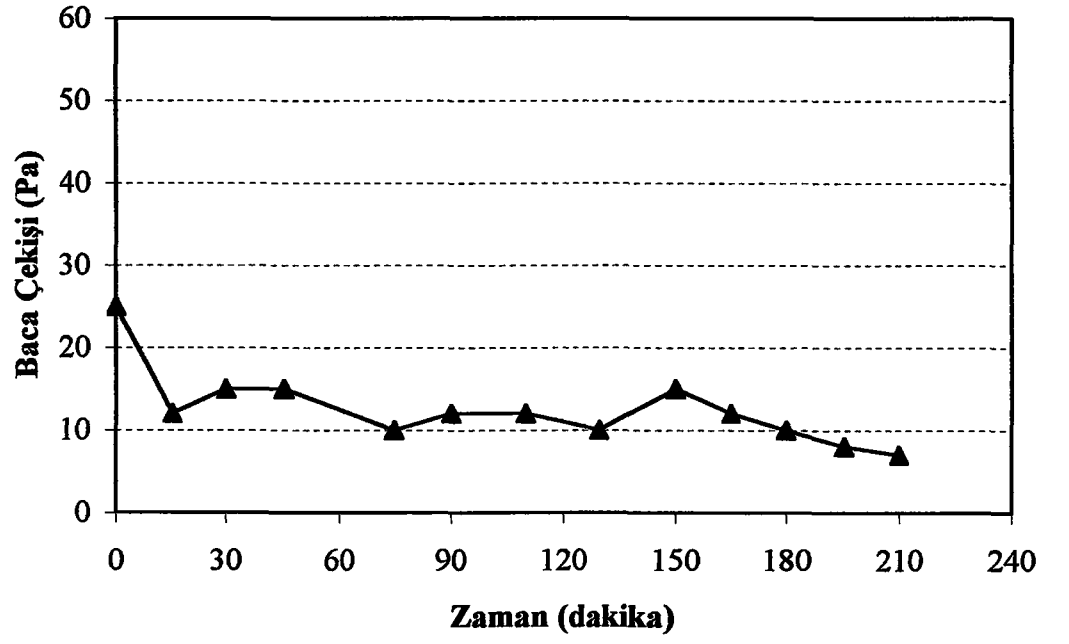
Şekil C.23. %24.60 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Baca Çekişi Değerleri (3. Grup)



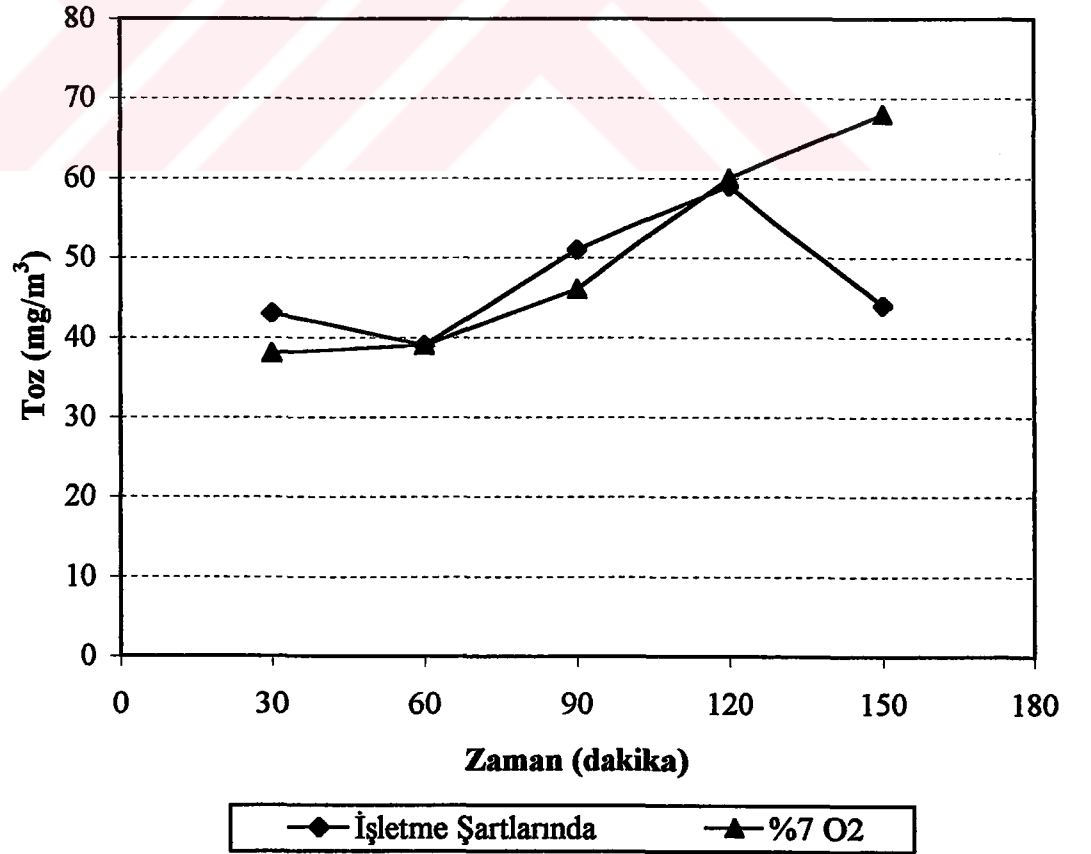
Şekil C.24. %24.60 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Toz Emisyonları (3. Grup)



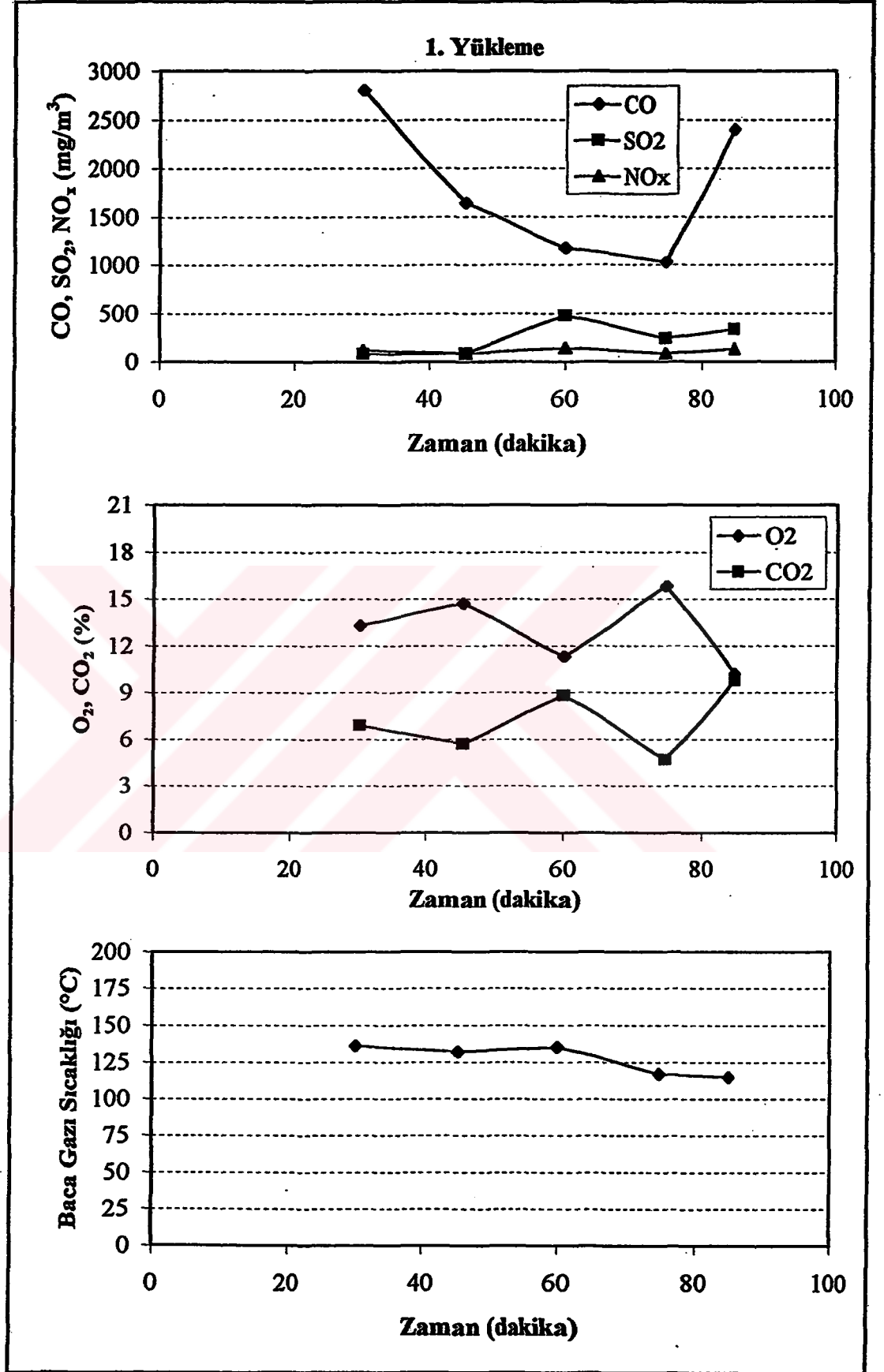
Şekil C.25. % 37.00 Nemli Orijinal Y. Ağaçlı Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (3.Grup)



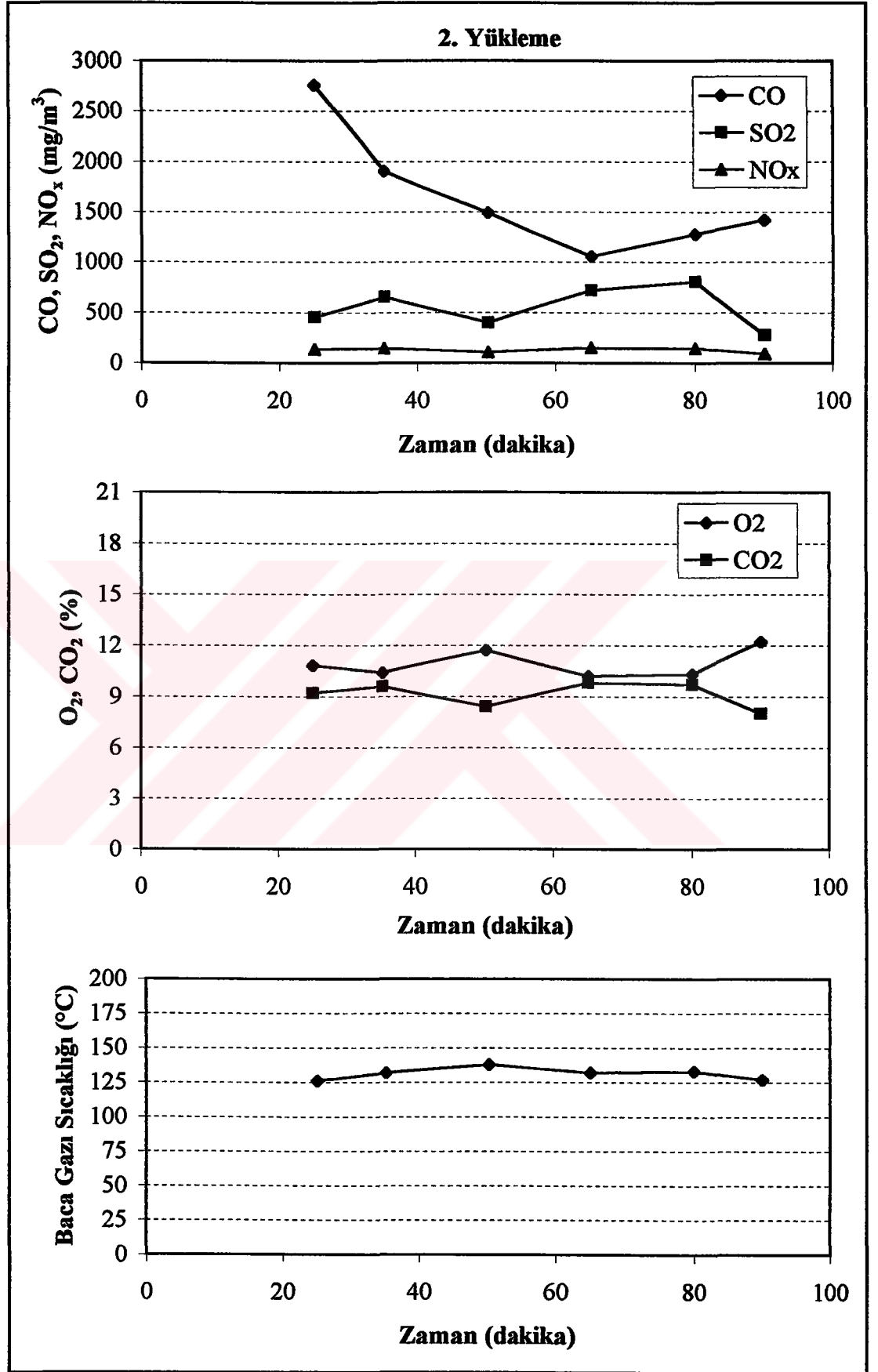
Şekil C.26. %37.00 Nemli Orijinal Y. Ağaçlı Kömürüne Ait Baca Çekişi Değerleri (3. Grup)



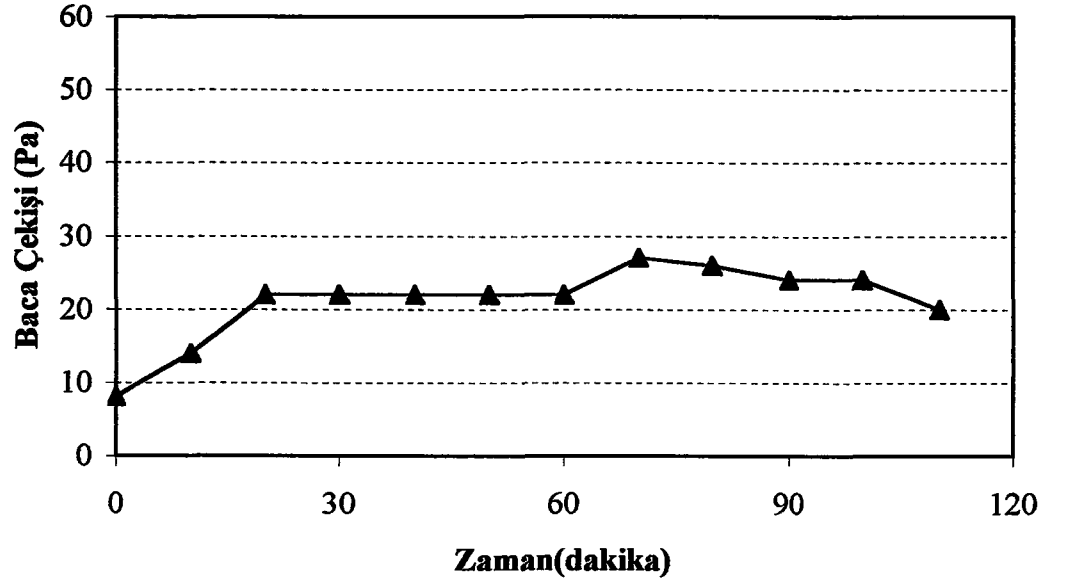
Şekil C.27. %37.00 Nemli Orijinal Y. Ağaçlı Kömürüne Ait Toz Emisyonları (3. Grup)



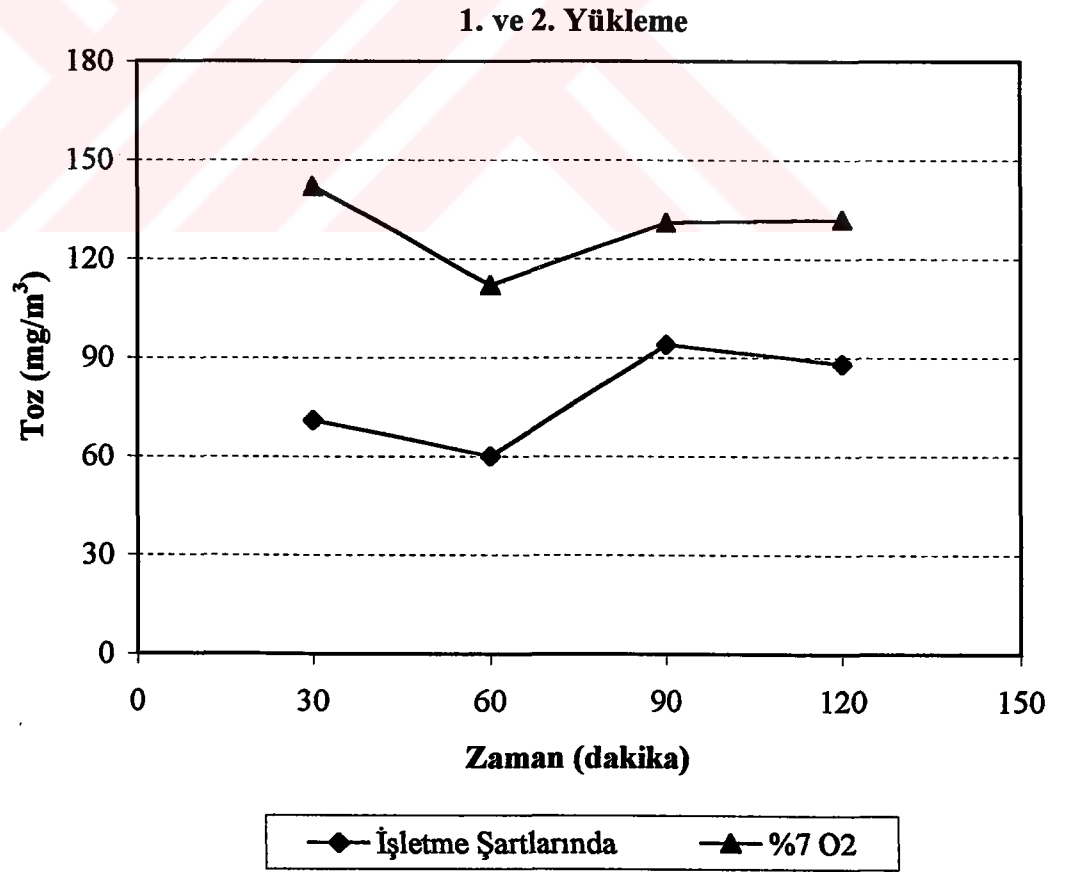
Şekil C.28. % 18.10 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (3.Grup-Azım Kazan,1.Yükleme)



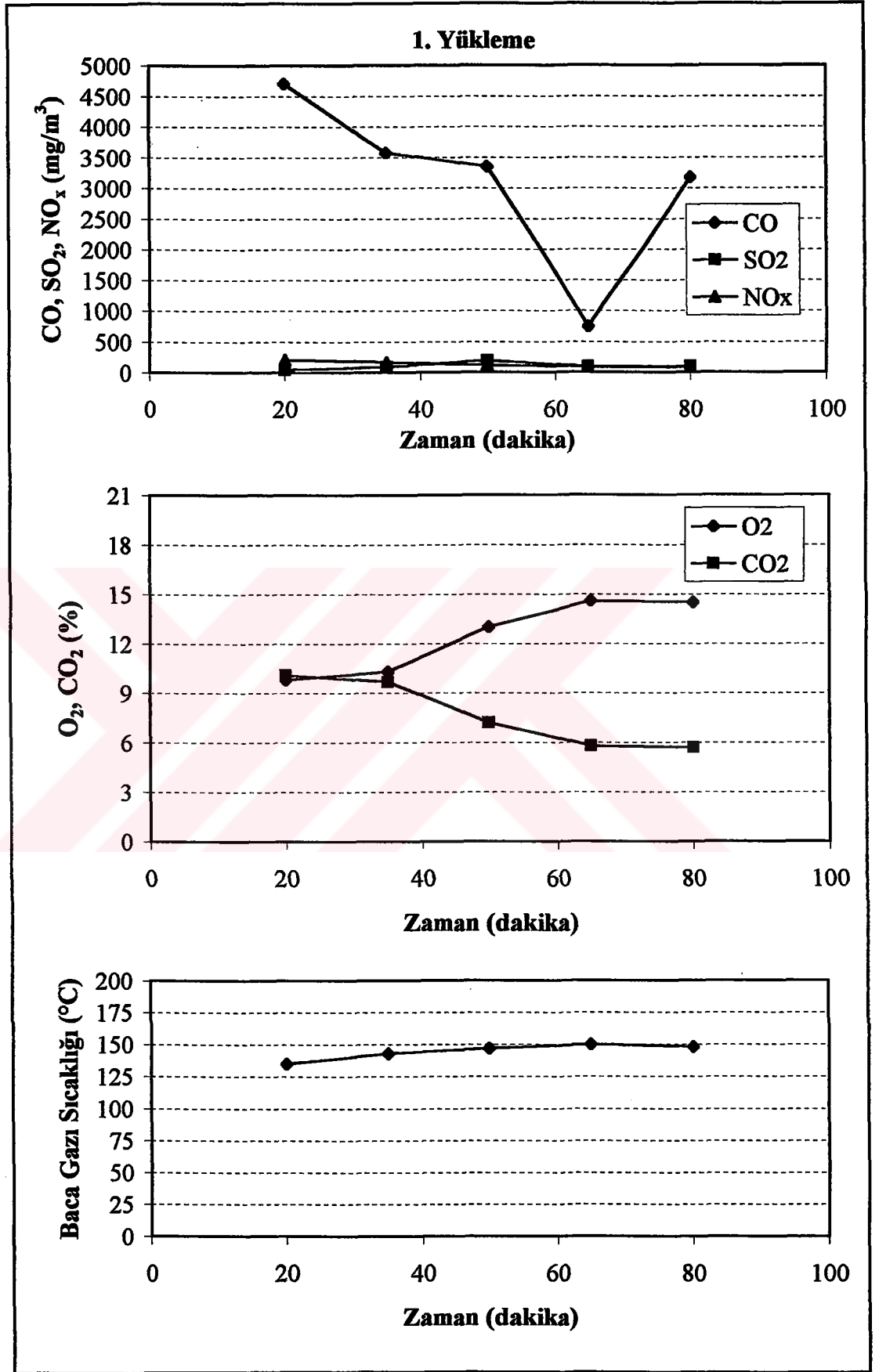
Şekil C.29. % 18.10 Nemli Yeniköy Ağaçlı K     ne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (3.Grup, Azim Kazan, 2.Y     )



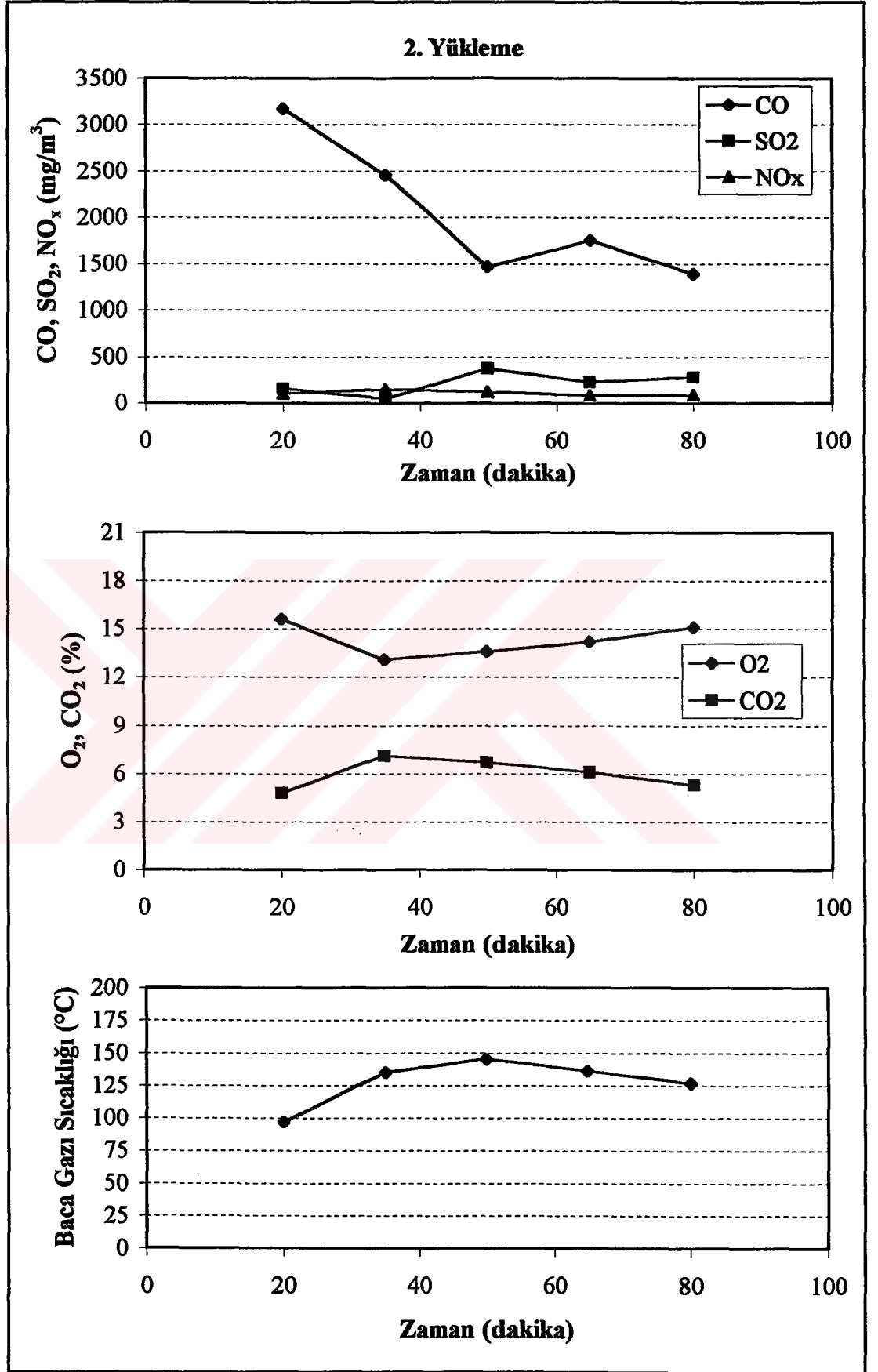
Şekil C.30. %18.10 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Baca Çekişi Değerleri (3.Grup, Azim Kazan)



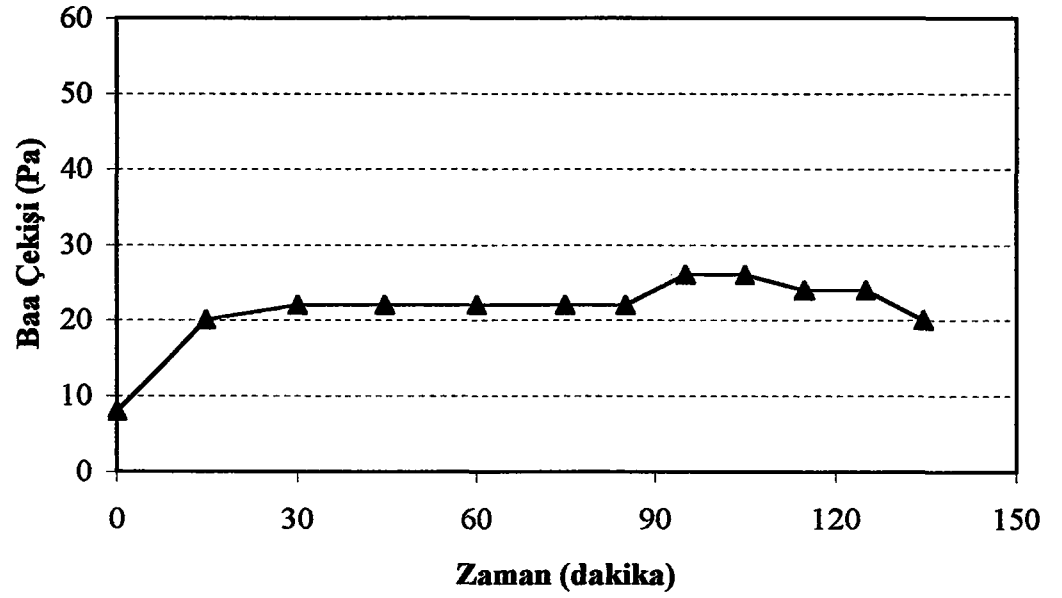
Şekil C.31. %18.10 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Toz Emisyonları (3.Grup, Azim Kazan)



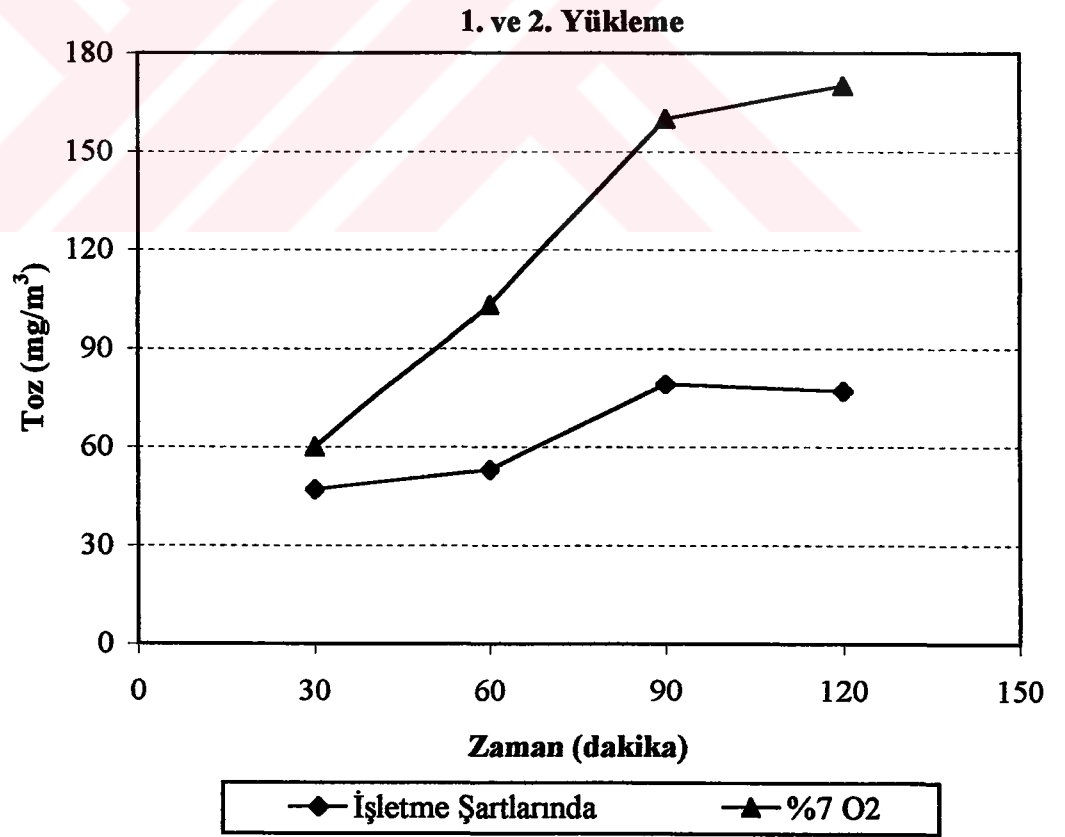
Şekil C.32. % 36.00 Nemli Orijinal Y. Ağaçlı Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (3.Grup, Azim Kazan,1.Yükleme)



Şekil C.33. % 36.00 Nemli Orijinal Y. Ağaçlı Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (3.Grup, Azim Kazan,2.Yükleme)



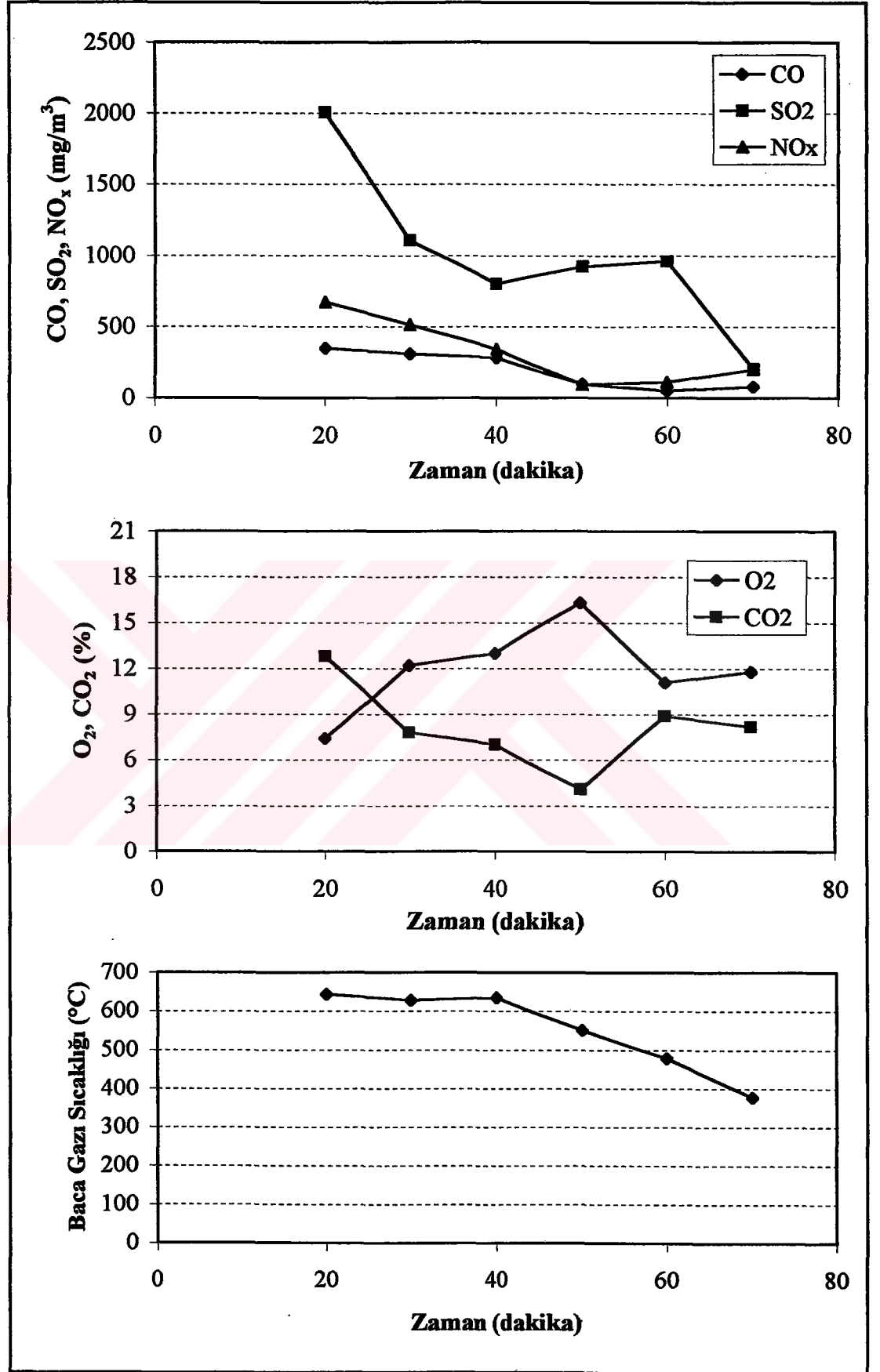
Şekil C.34. %36.00 Nemli Orijinal Y. Ağaçlı Kömürüne Ait Baca Çekışı Değerleri (3.Grup, Azim Kazan)



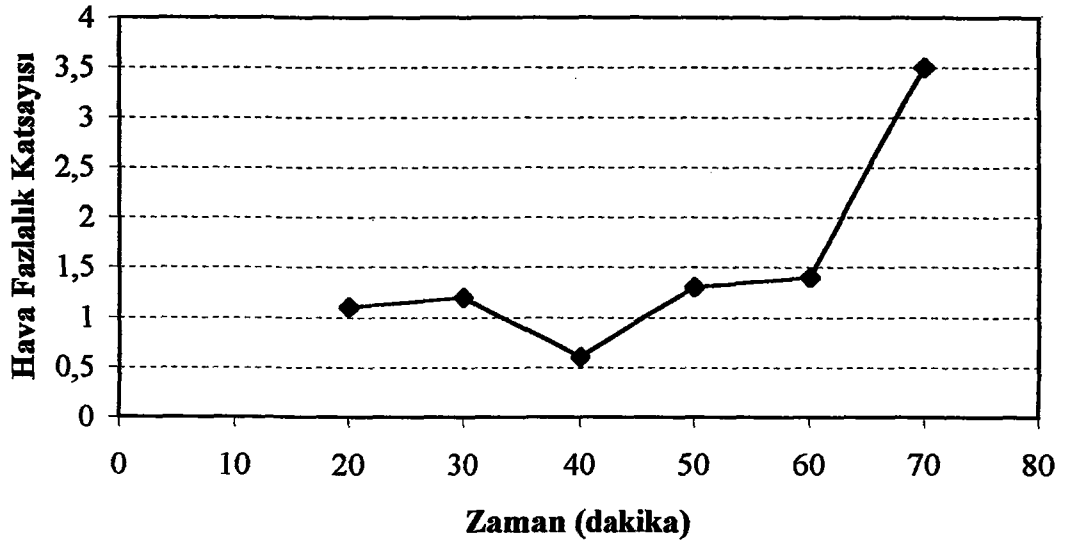
Şekil C.35. %36.00 Nemli Orijinal Y. Ağaçlı Kömürüne Ait Toz Emisyonları (3.Grup, Azim Kazan)

Ek D. 4. Grup Yanma Deneylerine Ait Şekiller

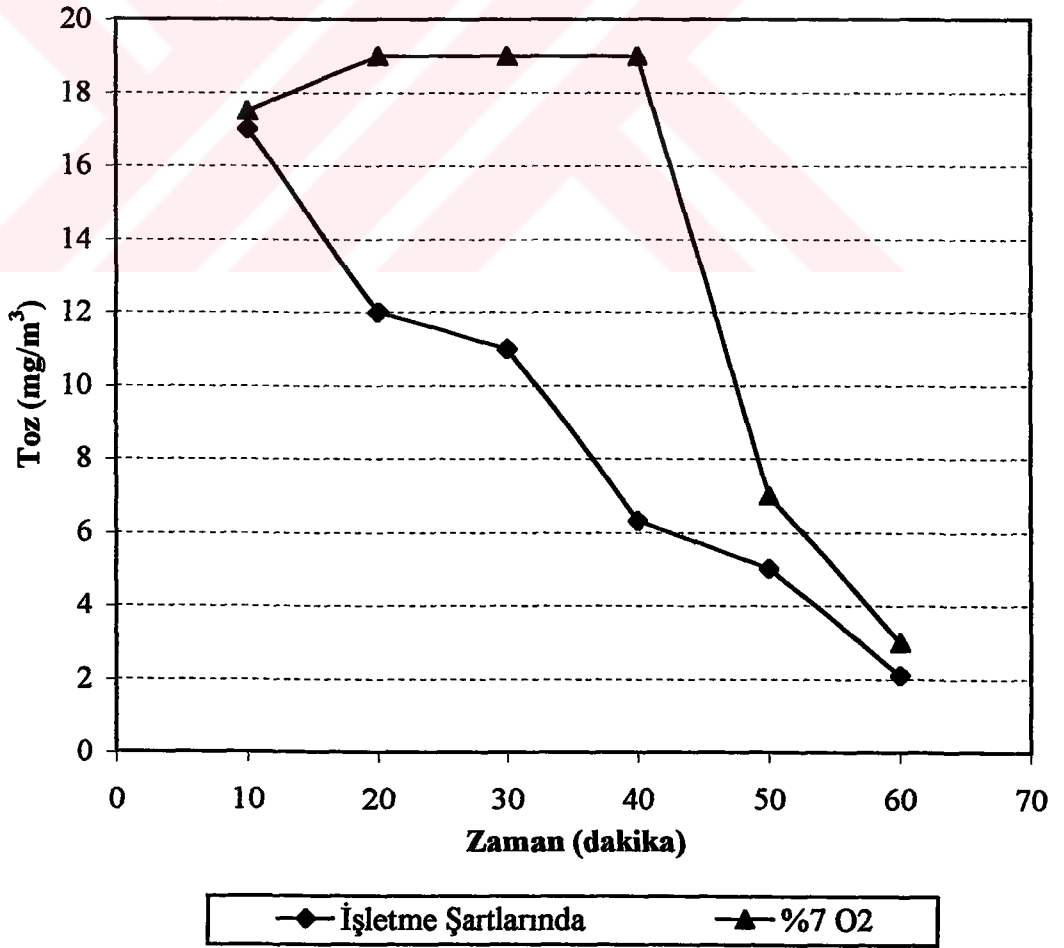




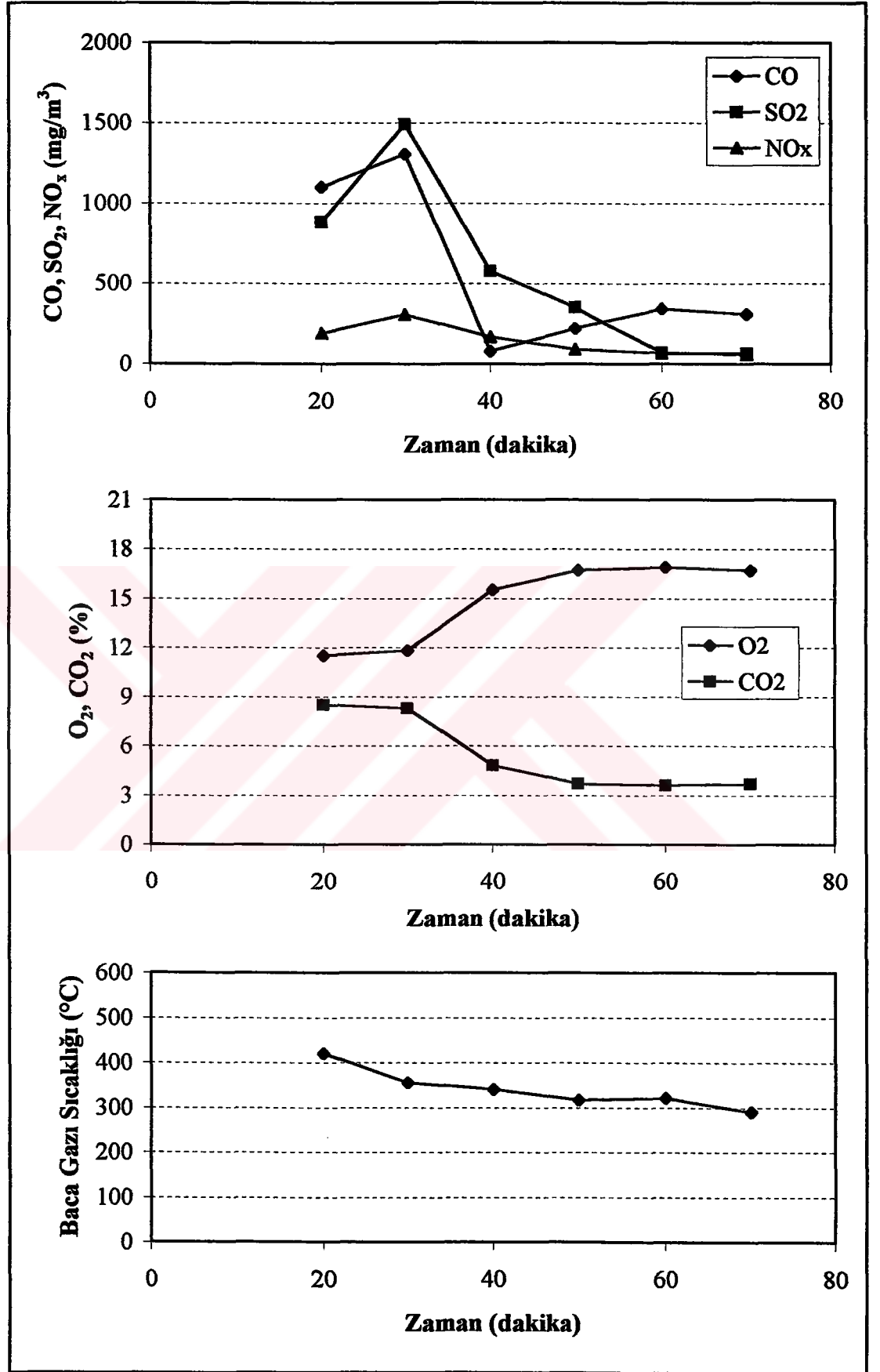
Şekil D.1. % 13.20 Nemli Soma Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (4.Grup, Soba)



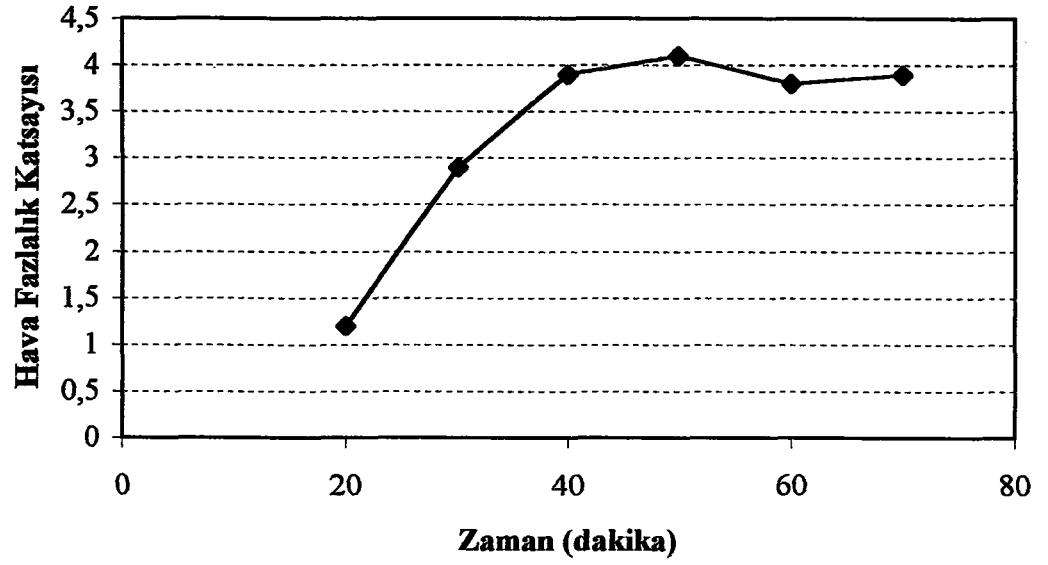
Şekil D.2. %13.20 Nemli Soma Kömürü Hava Fazlalık Katsayıları (4.Grup, Soba)



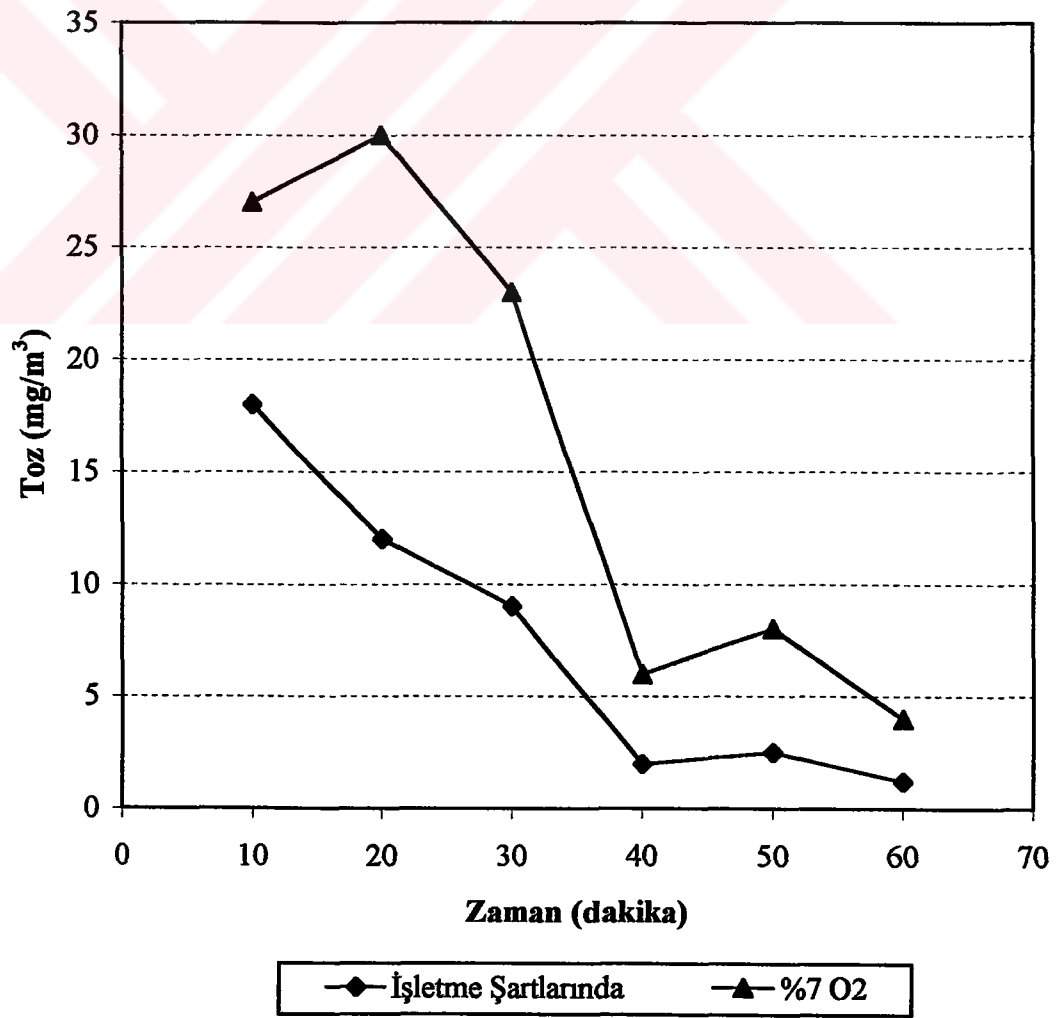
Şekil D.3. %13.20 Nemli Soma Kömürü Toz Emisyonları (4.Grup, Soba)



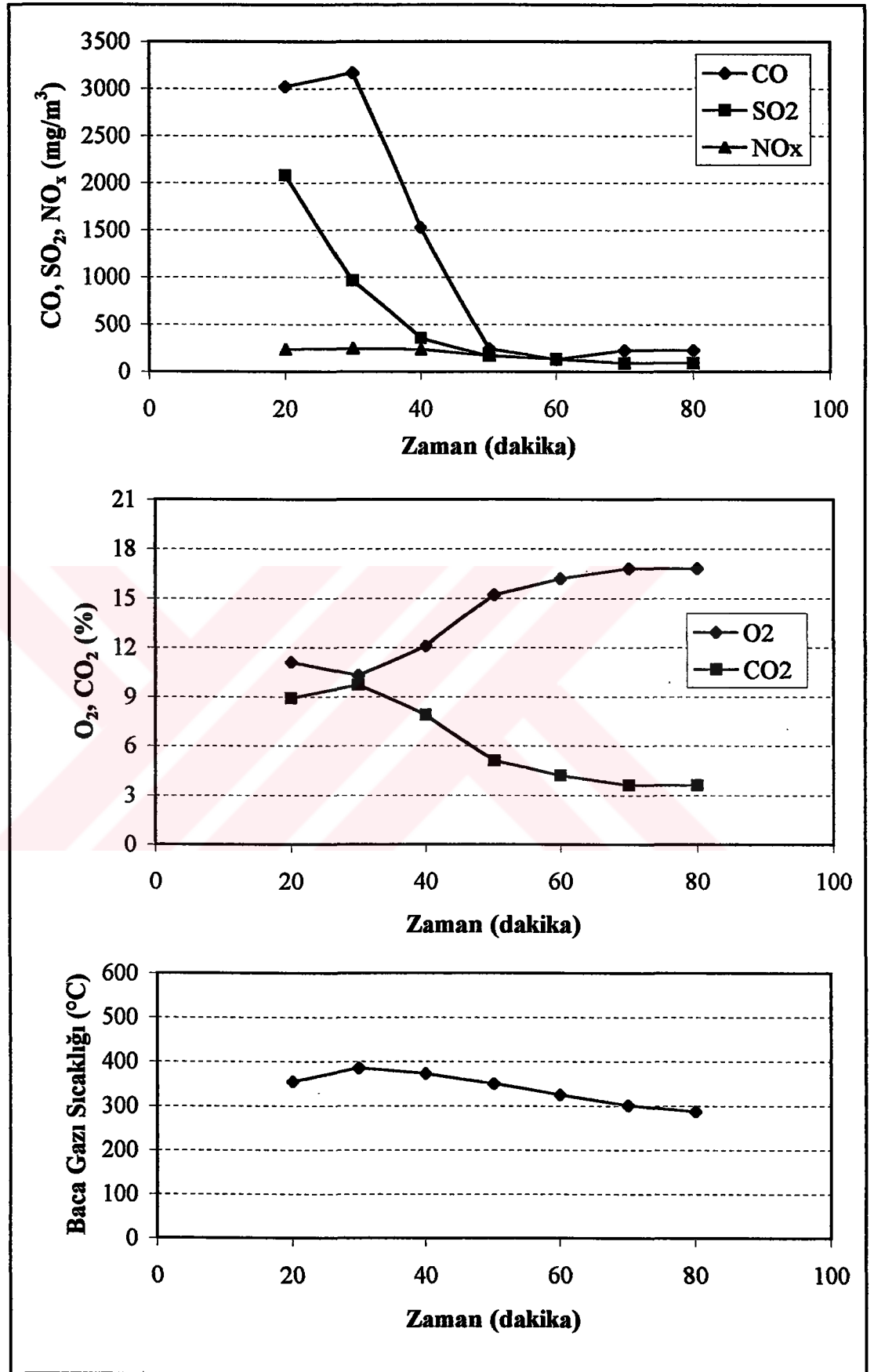
Şekil D.4. % 22.20 Nemli Y.Ağaçlı-G.Afrika Harman Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (4.Grup, Soba)



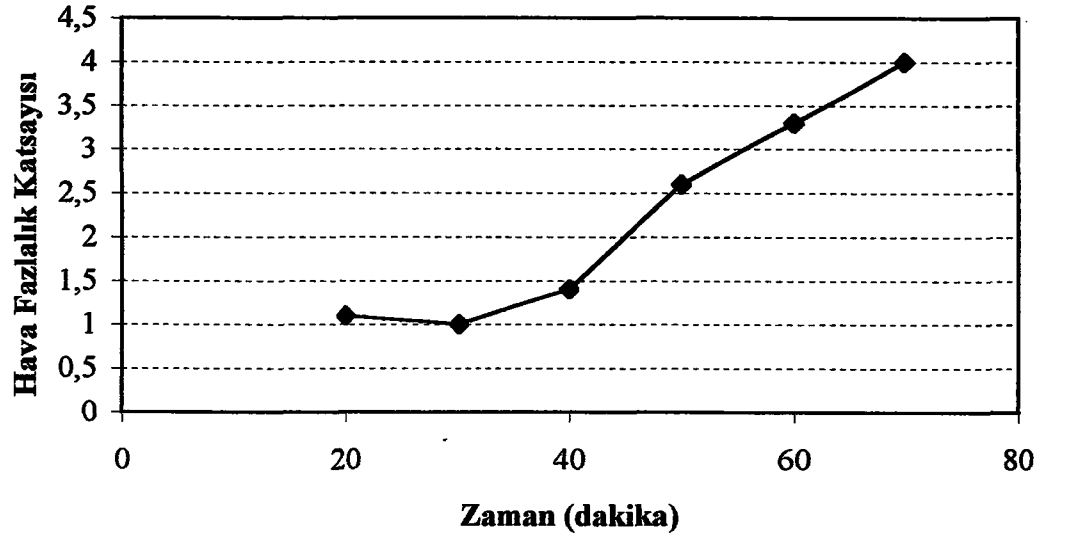
Şekil D.5. %22.20 Nemli Y. Ağaçlı-G.Afrika Harman Kömürüne Ait Hava Fazlalık Katsayıları (4. Grup, Soba)



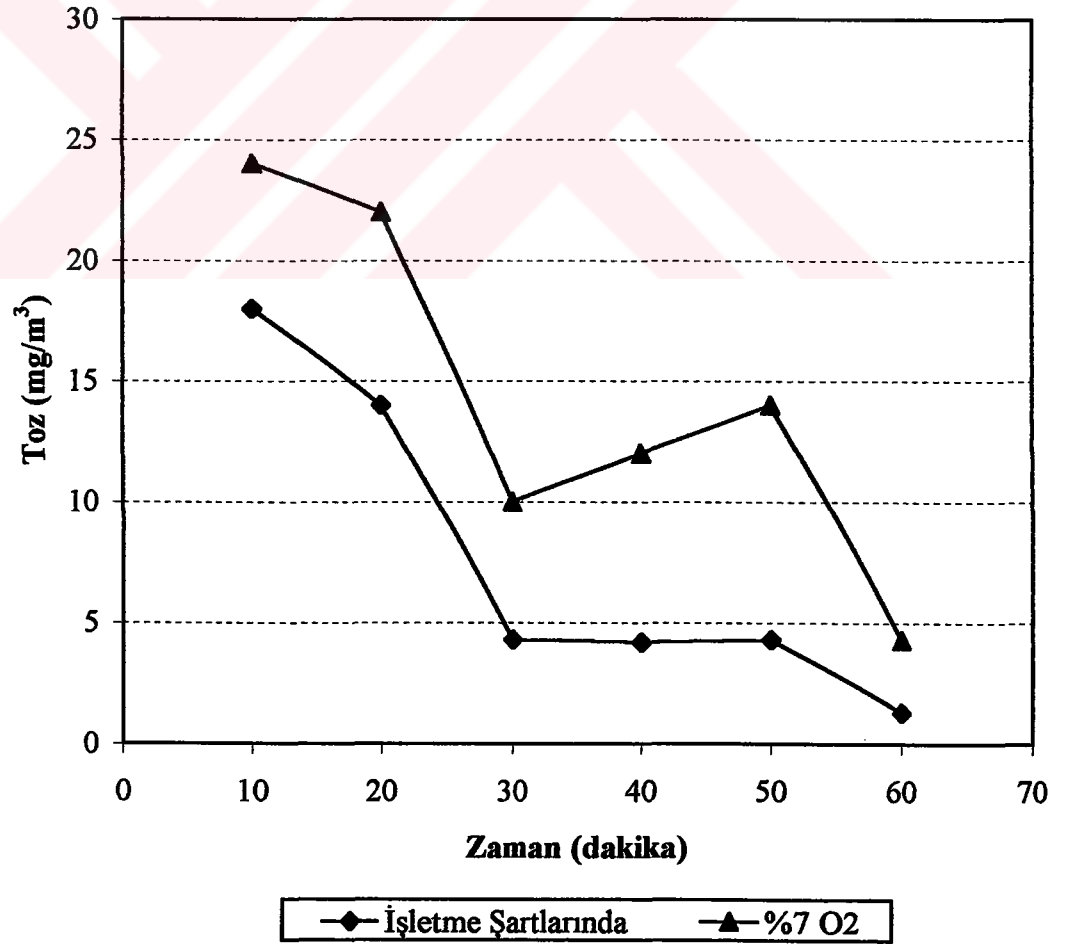
Şekil D.6. %22.20 Nemli Y. Ağaçlı-G.Afrika Harman Kömürüne Ait Toz Emisyonları (4. Grup, Soba)



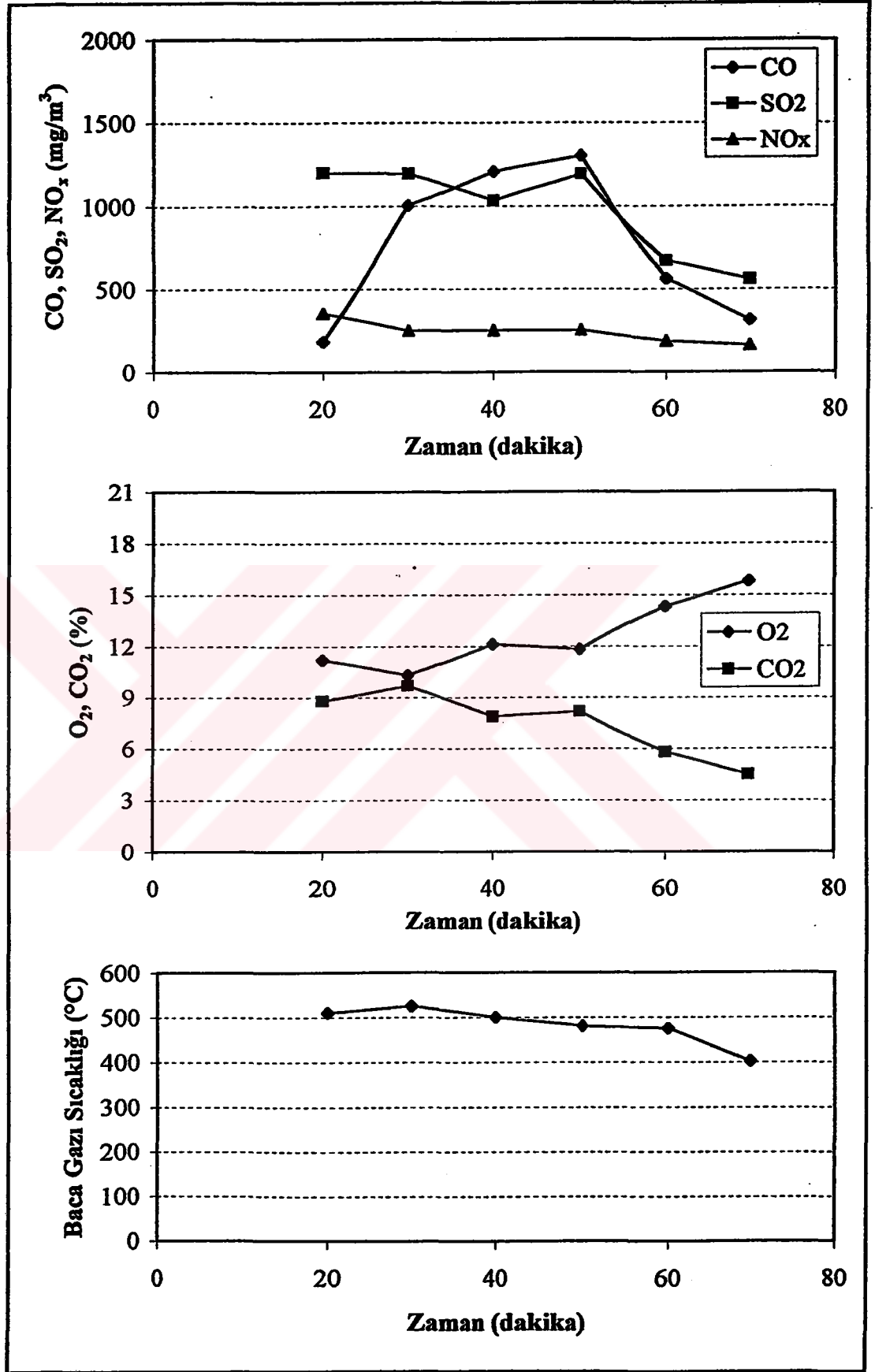
Şekil D.7. % 6.20 Nemli Güney Afrika Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (4.Grup, Soba)



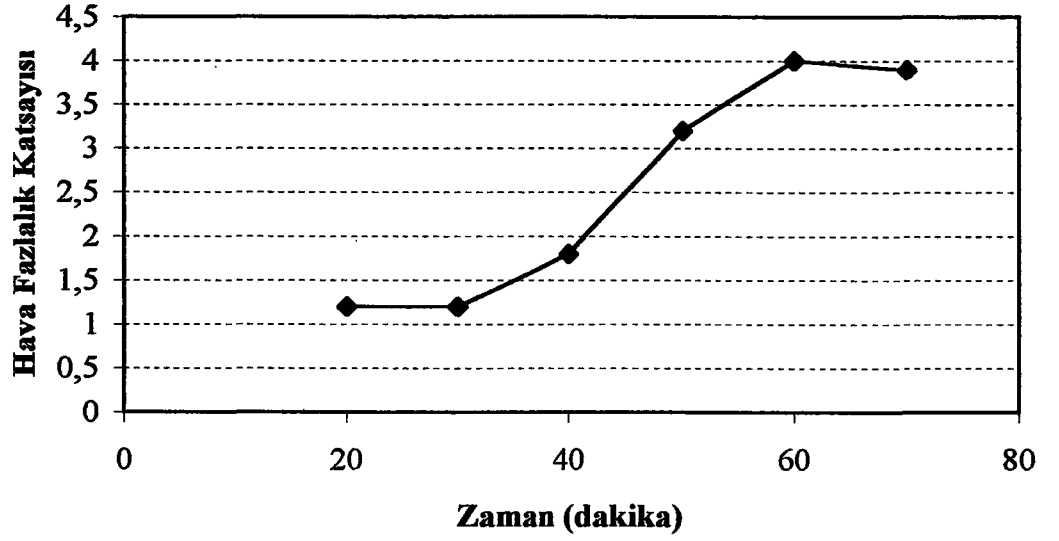
Şekil D.8. %6.20 Nemli Güney Afrika Kömürüne Ait Hava Fazlalık Katsayıları (4. Grup, Soba)



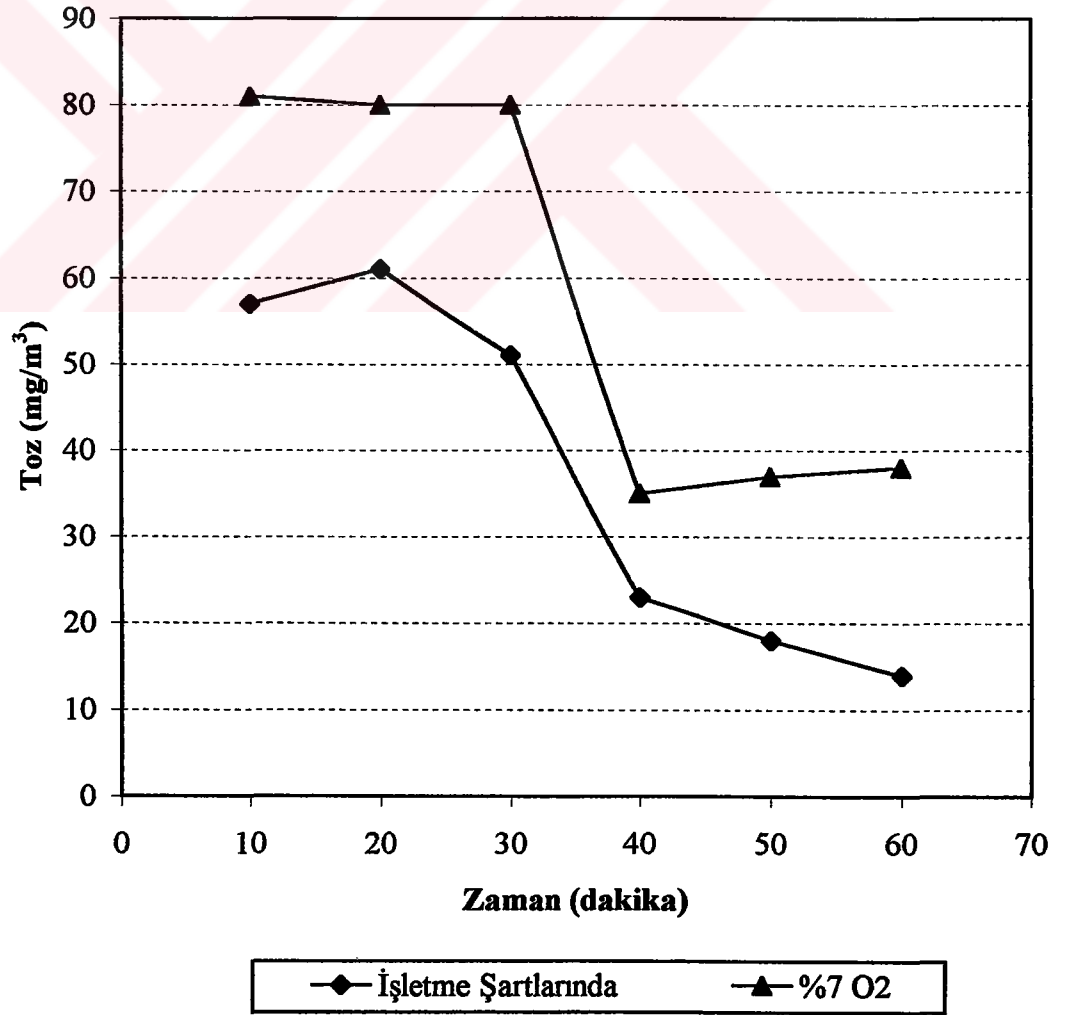
Şekil D.9. %6.20 Nemli Güney Afrika Kömürüne Ait Toz Emisyonları (4. Grup, Soba)



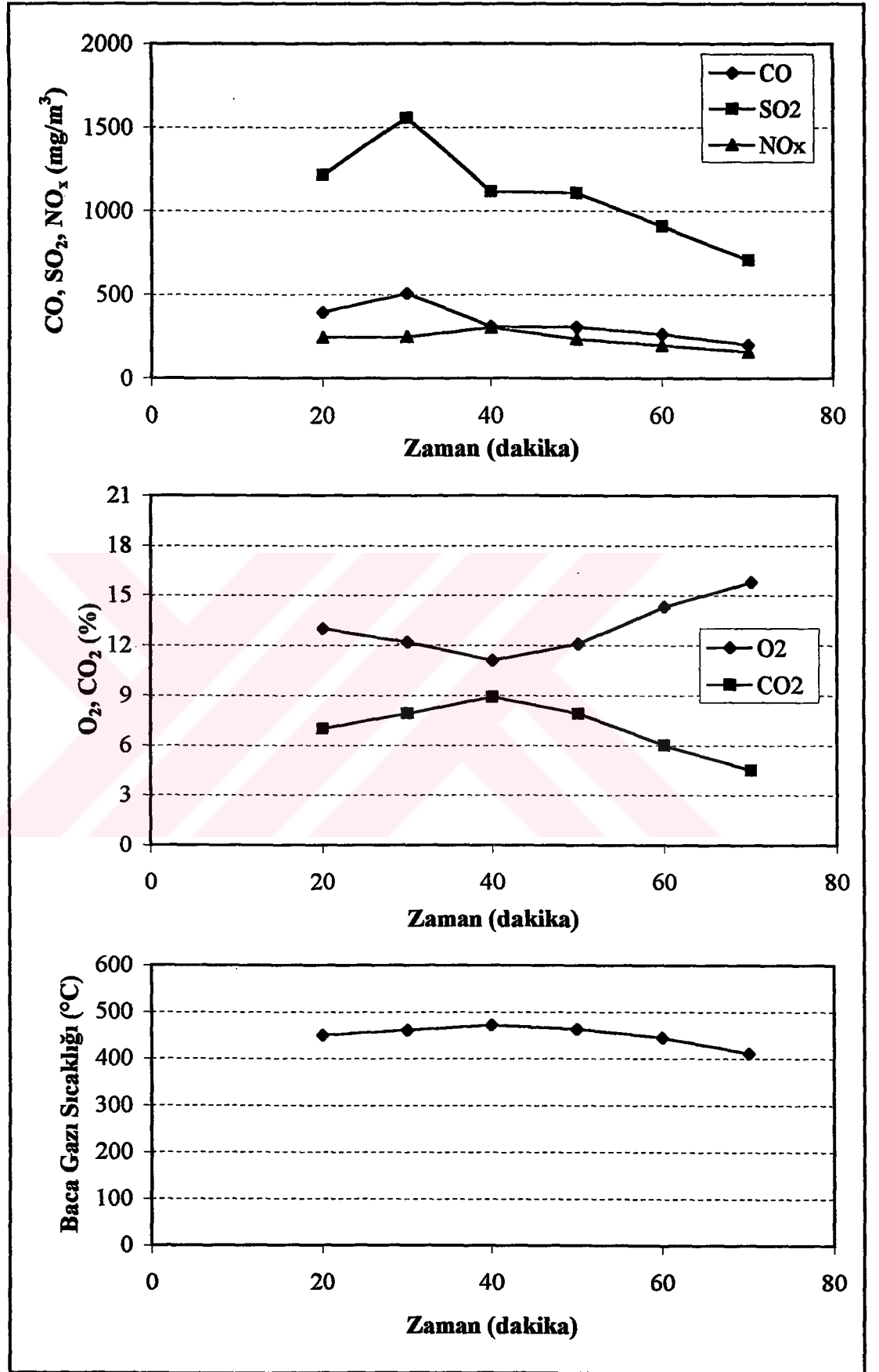
Şekil D.10. % 10.80 Nemli Yeniköy Ağaı Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (4.Grup, Soba)



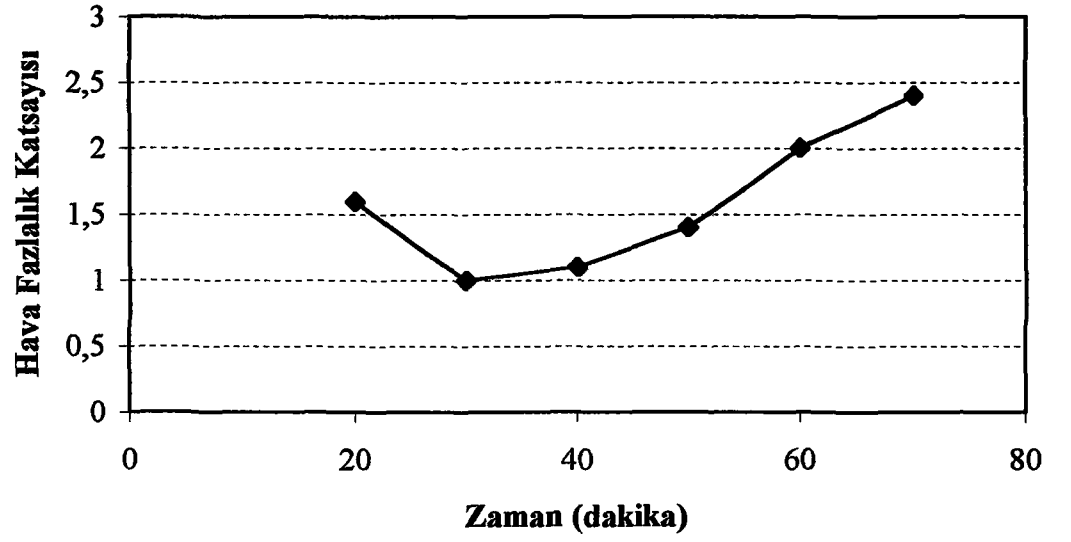
Şekil D.11. %10.80 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Hava Fazlalık Katsayıları (4.Grup, Soba)



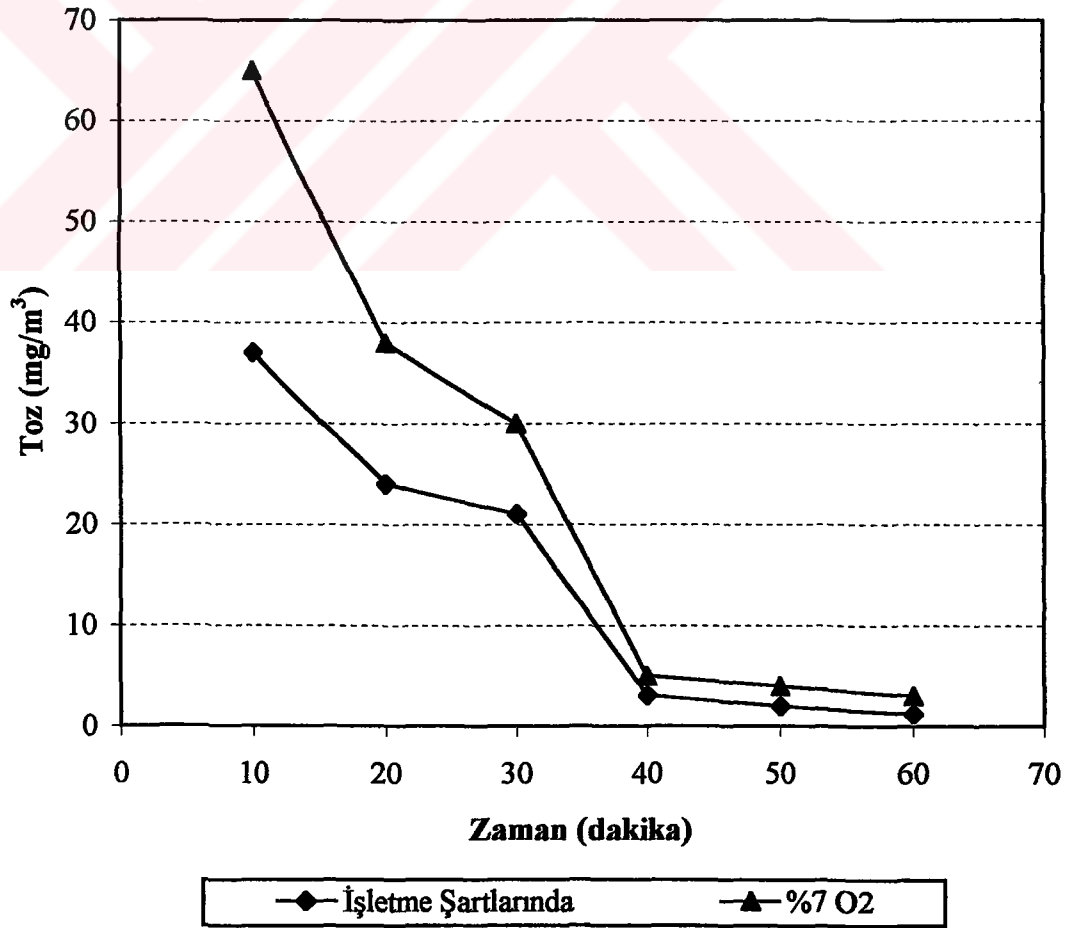
Şekil D.12. %10.80 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Toz Emisyonları (4.Grup, Soba)



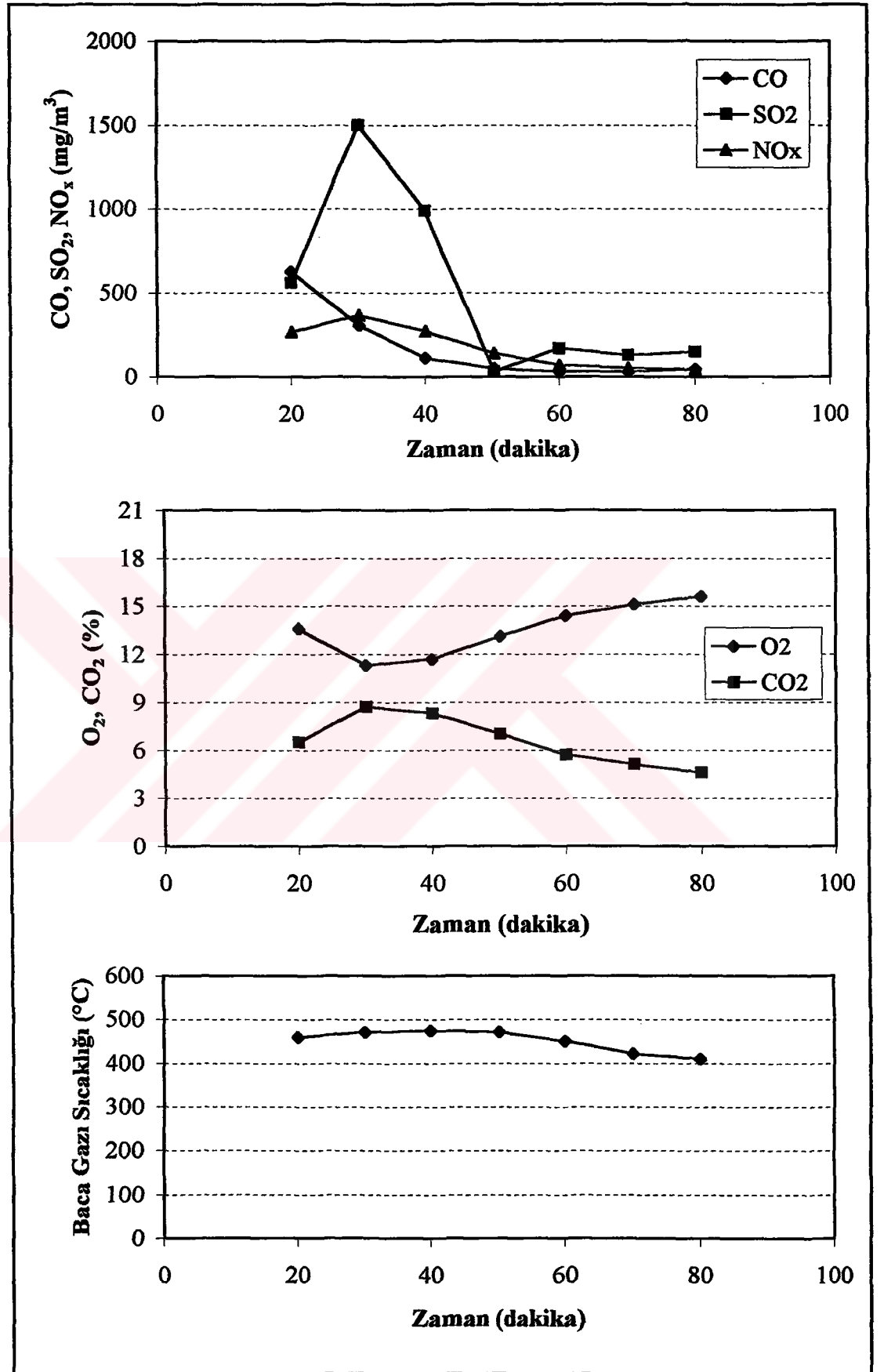
Şekil D.13. % 15.60 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (4.Grup, Soba)



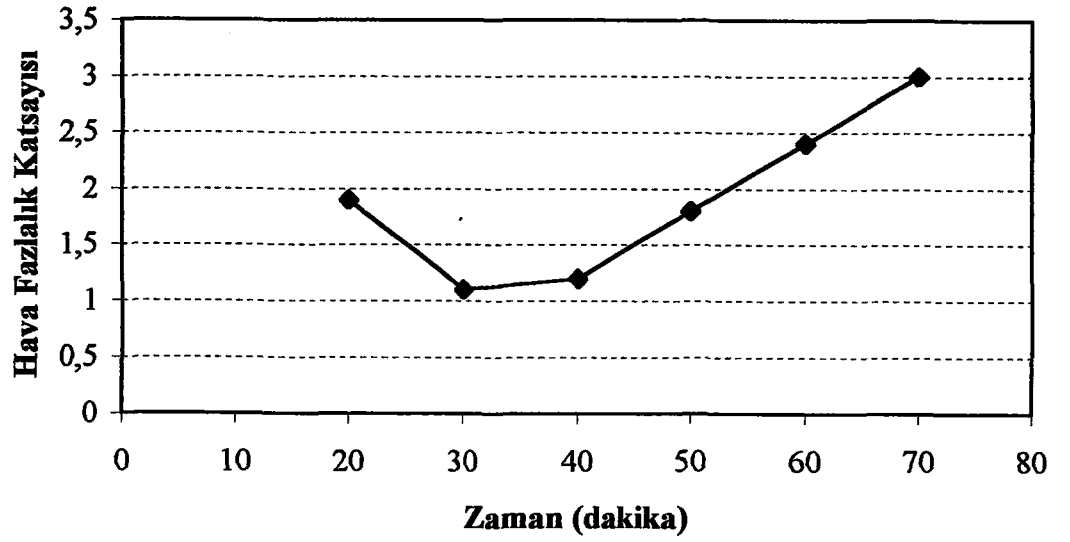
Şekil D.14. %15.60 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Hava Fazlalık Katsayılar (4.Grup, Soba)



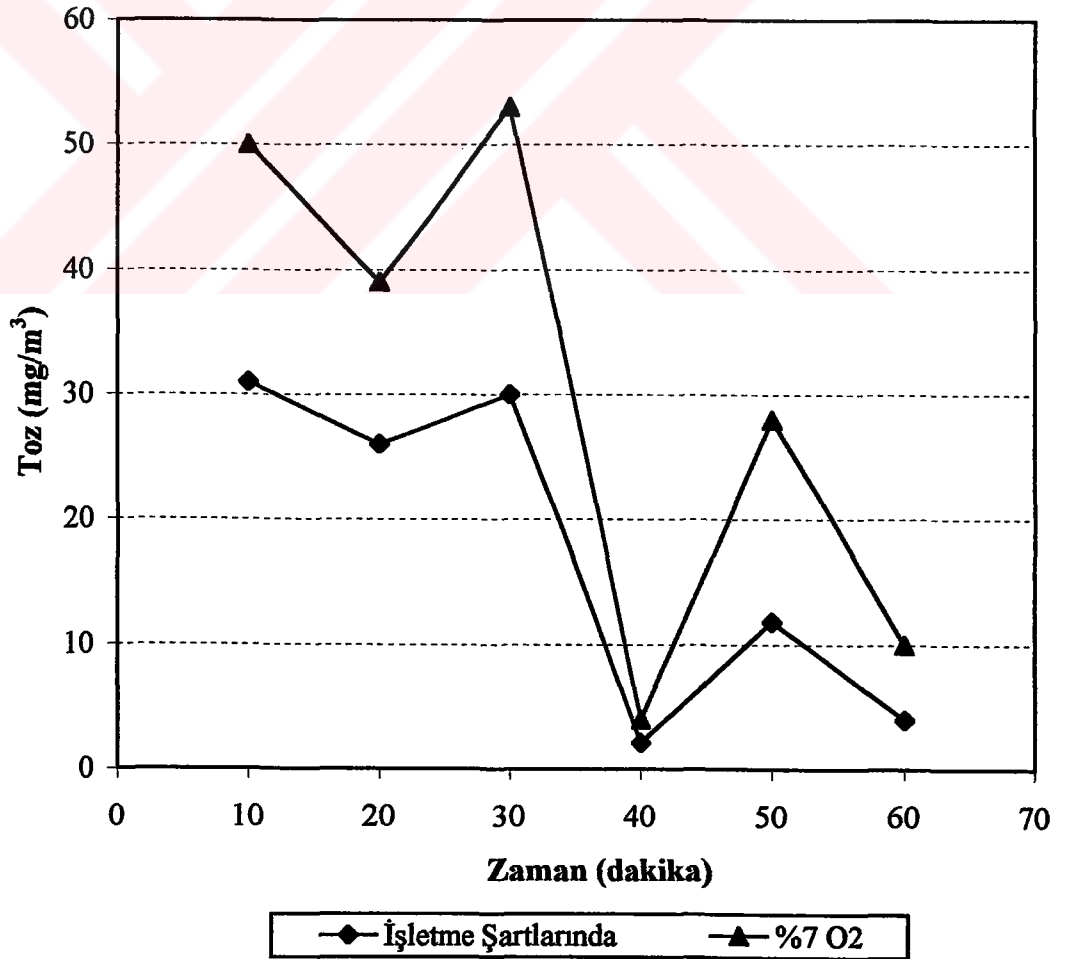
Şekil D.15. %15.60 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Toz Emisyonları (4.Grup, Soba)



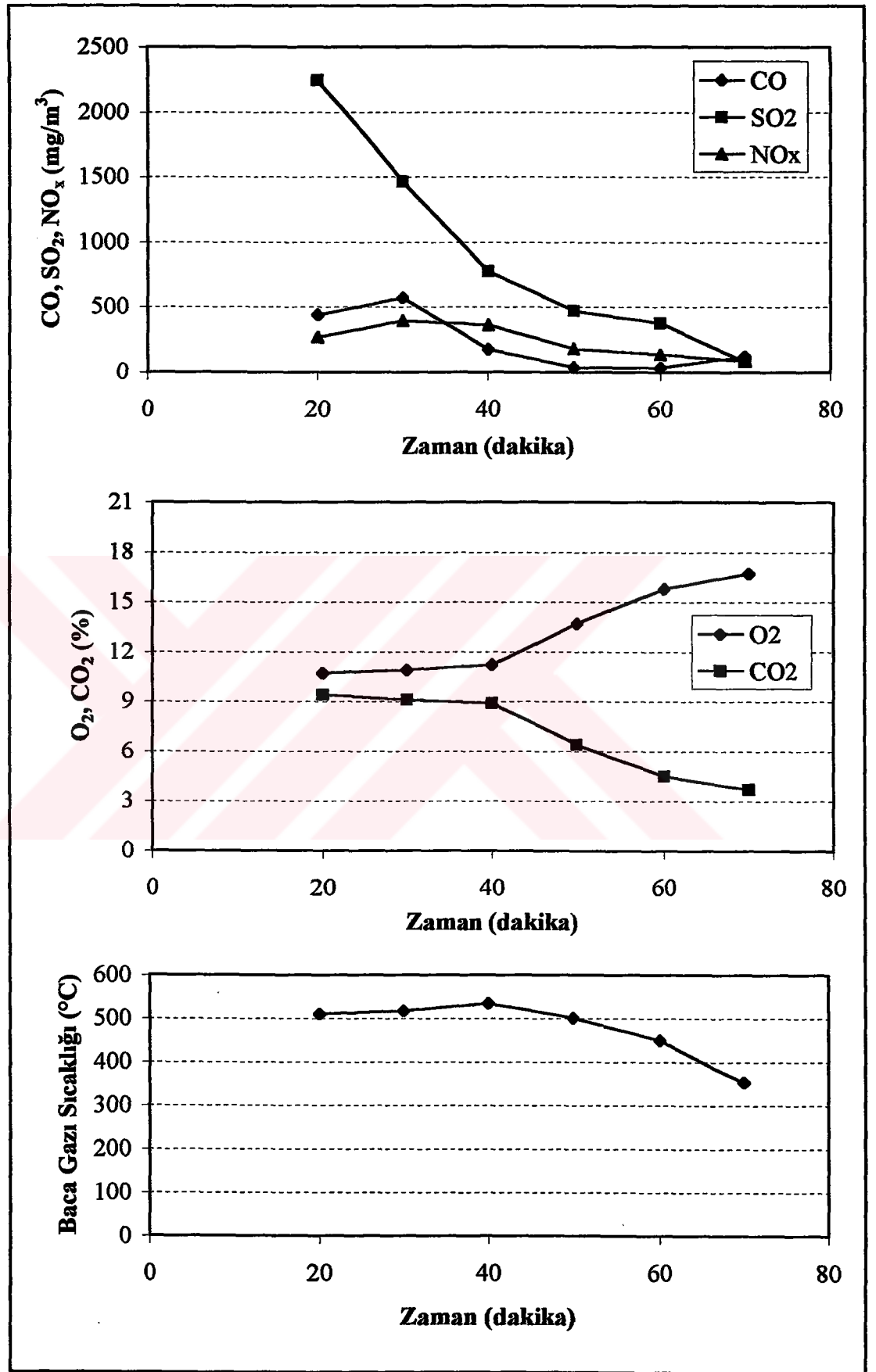
Şekil D.16. % 17.40 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (4.Grup, Soba)



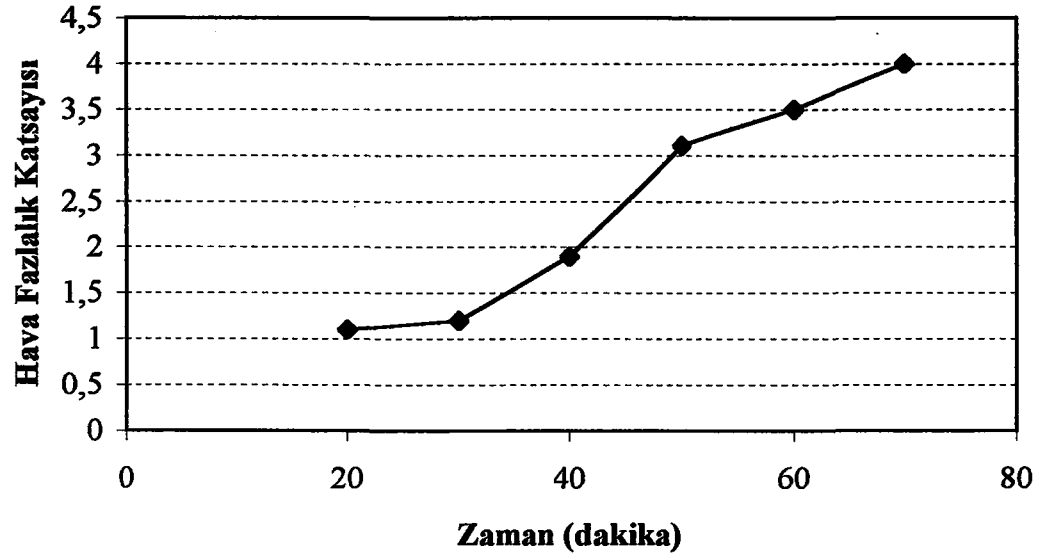
Şekil D.17. %17.40 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Hava Fazlalık Katsayıları (4.Grup, Soba)



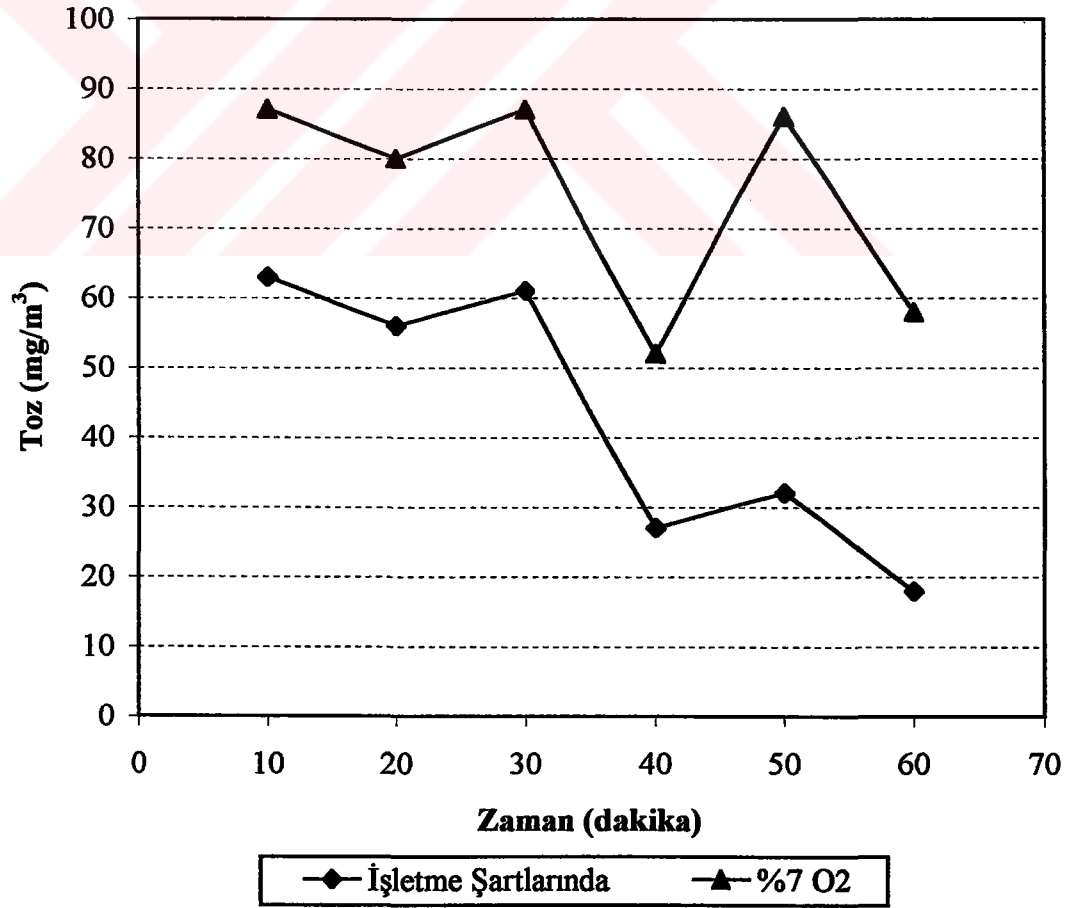
Şekil D.18. %17.40 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Toz Emisyonları (4.Grup, Soba)



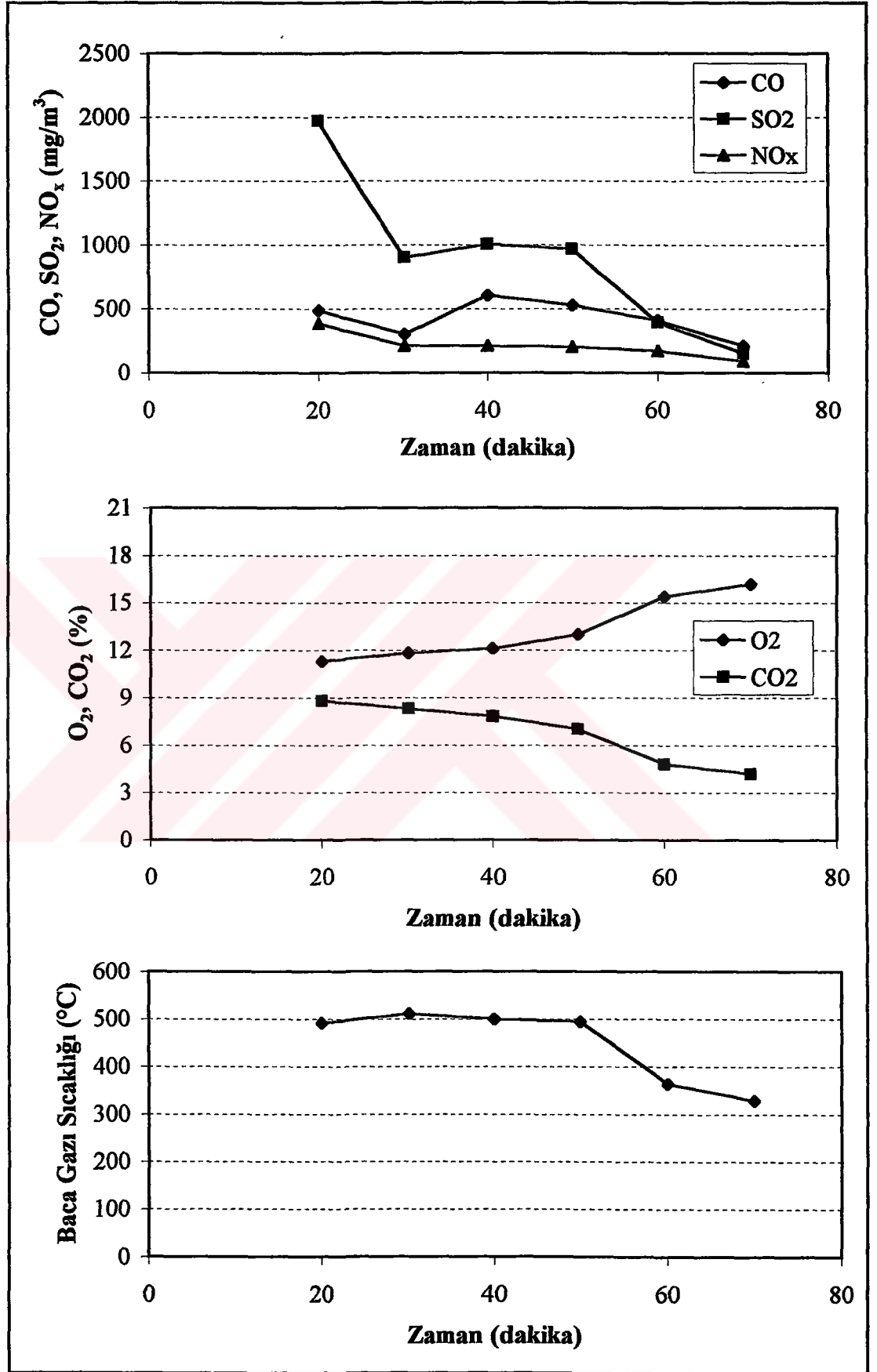
Şekil D.19. % 21.80 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (4.Grup, Soba)



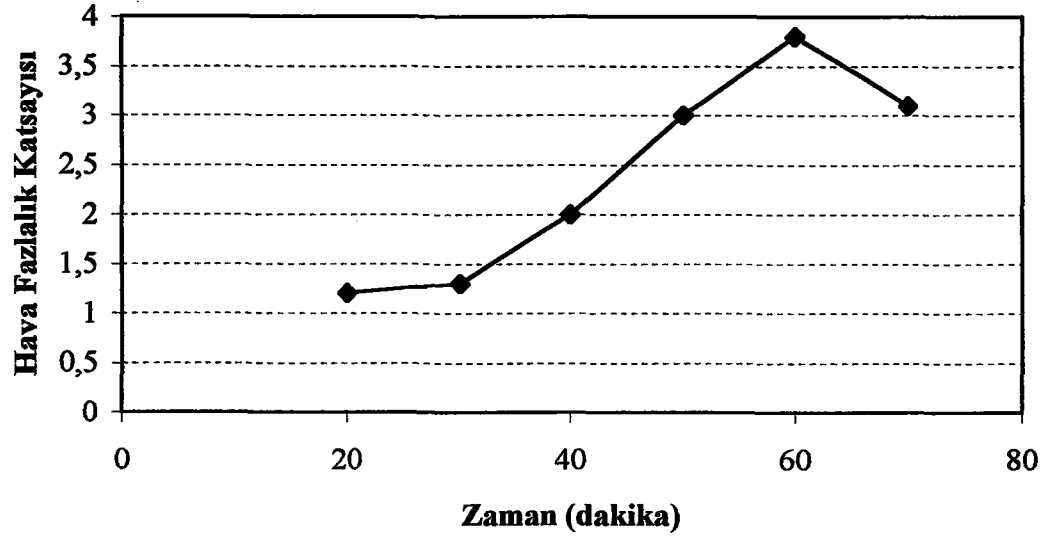
Şekil D.20. %21.80 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Hava Fazlalık Katsayıları (4.Grup, Soba)



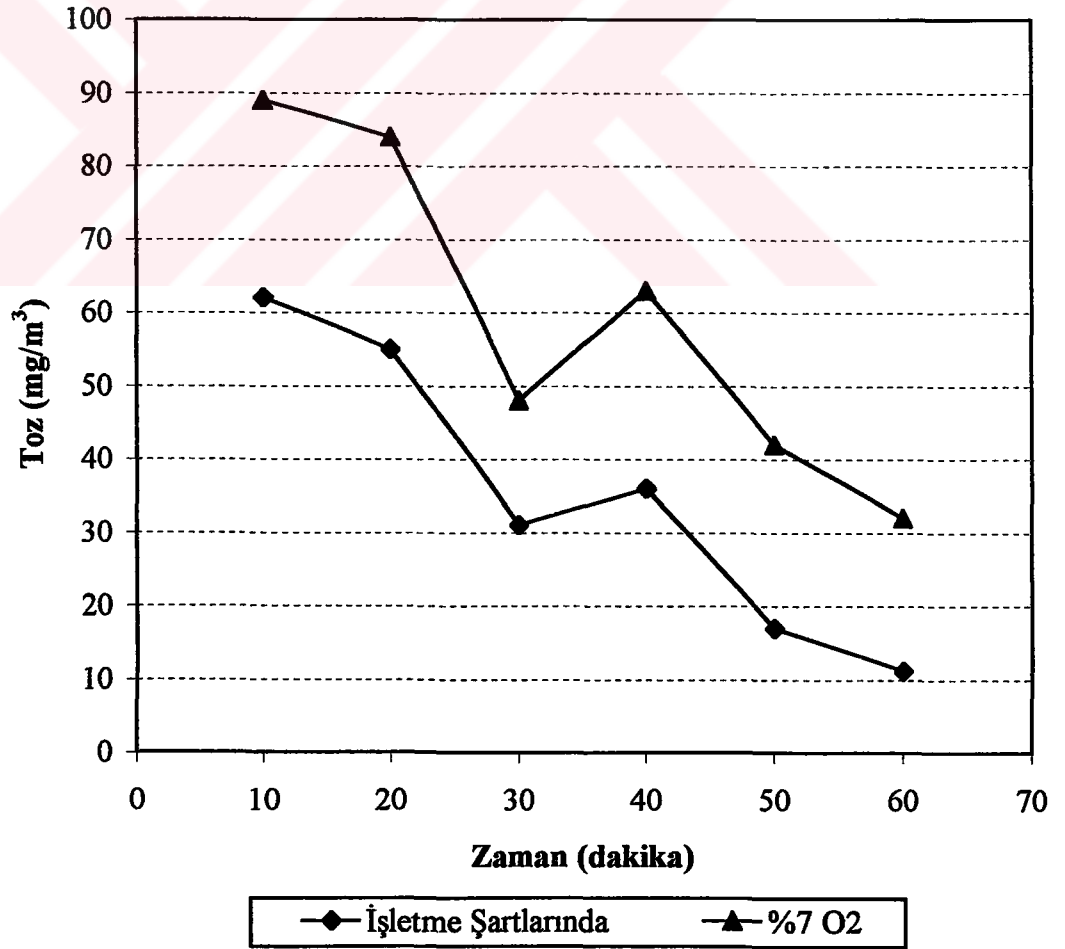
Şekil D.21. %21.80 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Toz Emisyonları (4.Grup, Soba)



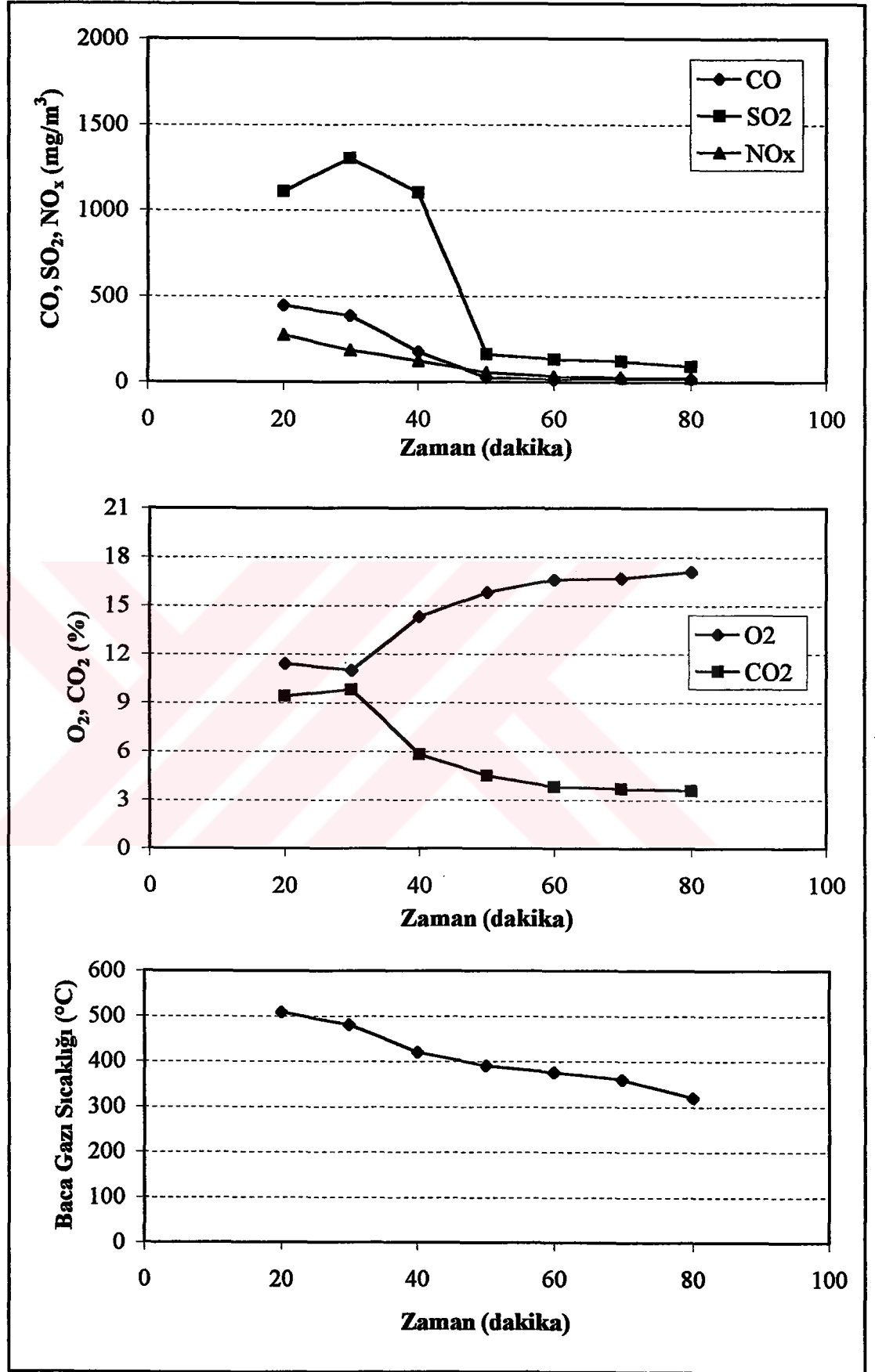
Şekil D.22. % 24.60 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (4.Grup, Soba)



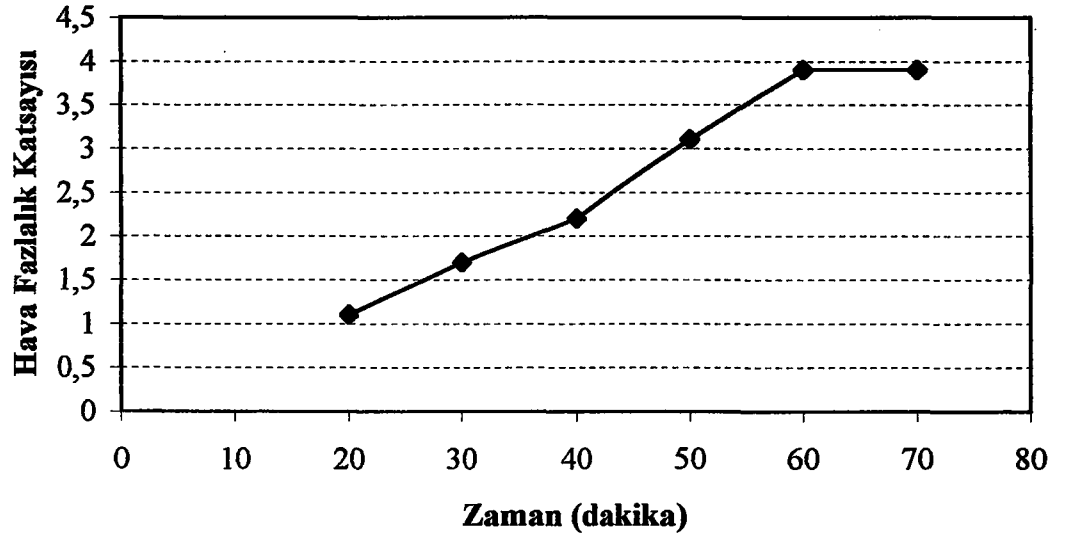
Şekil D.23. %24.60 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Hava Fazlalık Katsayıları (4.Grup, Soba)



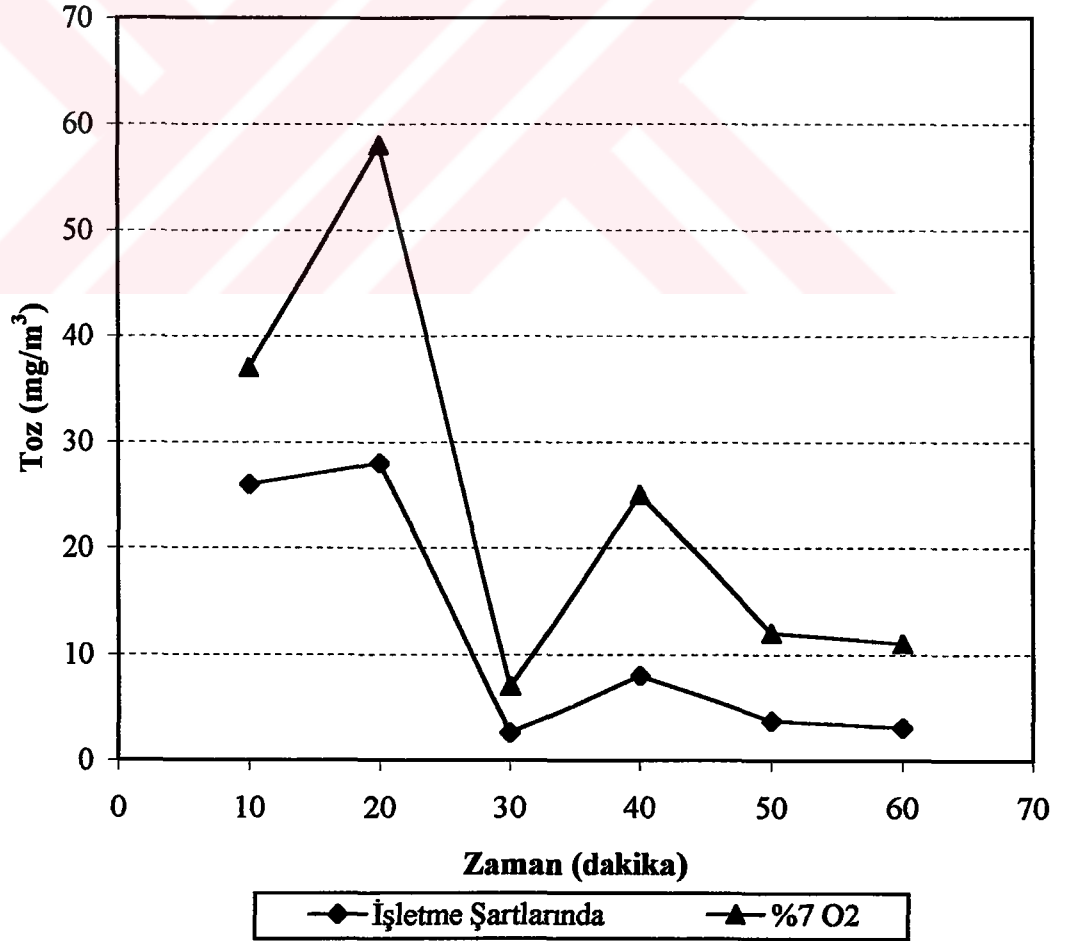
Şekil D.24. %24.60 Nemli Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Toz Emisyonları (4.Grup, Soba)



Şekil D.25. % 37.00 Nemli Orijinal Y. Ağaçlı Kömürüne Ait Gaz Emisyonu ve Baca Gazı Sıcaklığı Değerleri (4.Grup, Soba)



Şekil D.26. %37.00 Nemli Orijinal Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Hava Fazlalık Katsayıları (4.Grup, Soba)



Şekil D.27. %37.00 Nemli Orijinal Yeniköy Ağaçlı Kömürüne Ait Toz Emisyonları (4.Grup, Soba)

ÖZGEÇMİŞ

Nalan ERDÖL AYDIN 1966 yılında Gölcük' te doğdu. İlk ve orta öğrenimini Gölcük Ortaokulu, lise öğrenimini Gölcük Barbaros Hayrettin Lisesi' nde tamamladı. 1986 yılında girdiği İstanbul Teknik Üniversitesi, Kimya-Metalurji Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümünden 1990 Haziran döneminde mezun oldu. Aynı yıl girdiği İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği programındaki Yüksek Lisans öğrenimini 1993 yılında birincilikle bitirdi. 1993 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği programında Doktora öğrenimine başladı. Ekim 1992 tarihinde, İstanbul Teknik Üniversitesi, Kimya-Metalurji Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Temel İşlemler Anabilim Dalı' nda Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı ve halen bu görevine devam etmektedir. Nalan ERDÖL AYDIN evli olup İngilizce ve Almanca bilmektedir.