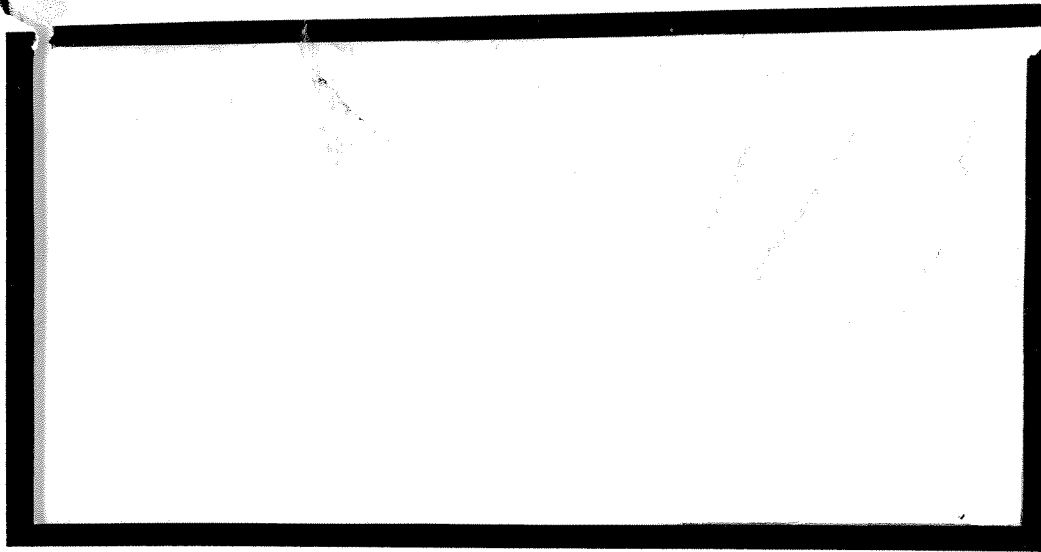


2003-71 DUP



TÜRKİYE BİLİMSEL VE
TEKNİK ARAŞTIRMA KURUMU

THE SCIENTIFIC AND TECHNICAL
RESEARCH COUNCIL OF TURKEY



**Makina, Kimyasal Teknolojiler, Malzeme ve İmalat Sistemleri
Araştırma Grubu**

**Mechanical Engineering, Chemical Technologies, Material
Sciences and Manufacturing Systems Research Grant
Committee**

**TEMİZ KÖMÜR TEKNOLOJİLERİNDEN
AKIŞKAN YATAKTA YAKMA TEKNOLOJİSİ
İLE TÜRK LİNYİTLERİNDEN TEMİZ VE
VERİMLİ ENERJİ ELDESİ**

PROJE NO: MİSAG-159

PROF. DR. NEVİN SELÇUK
TANIL TARHAN
YUSUF GÖĞEBAKAN
AYKAN BATU
IŞIL AYRANCI
HAKAN HARMANDAR
HAKAN ALTINDAĞ

OCAK 2003
ANKARA

ÖNSÖZ

Bu araştırma, Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu tarafından MİSAG-159 kodlu proje ve kısmen Orta Doğu Teknik Üniversitesi tarafından AFP-2001-07-02-00-24 kodlu Bilimsel Araştırma Projesi ile desteklenmiştir.

Raporda sonuçları verilen deneyler ODTÜ Kimya Mühendisliği Bölümü'nde kurulu 0.3 MW Akışkan Yataklı Yakıcı Test Ünitesinde yapılmıştır. Deneylerde kullanılan Beypazarı linyiti Türkiye Kömür İşletmeleri Çayırhan Tesislerinden, kireçtaşı ise Park Termik Elektrik Sanayi ve Ticaret A.Ş.-Çayırhan Termik Santrali'nden temin edilmiştir. Linyit TEAŞ Çayırhan İşletmesi'nde proje ekibinin denetim ve yardımlarıyla, kireçtaşı ise ODTÜ Kimya Mühendisliği Bölümü'nde proje ekibi tarafından kırılıp elenmiştir.

Deneylerde kullanılan kömür ve kireçtaşı analizleriyle, deneylerden çıkan katı akımlardan alınan örneklerin analizlerinin tamamı ODTÜ Kimya Mühendisliği Bölümü'nde yapılmıştır.

Bu projenin gerçekleşmesini sağlayan tüm kuruluşlara ve bu kuruluşların yardımlarını esirgemeyen elemanlarına katkıları için teşekkür ederiz.

27 Ocak 2003

Prof. Dr. Nevin Selçuk

Proje Yöneticisi

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	i
ÖZ.....	1
ABSTRACT	2
1 GİRİŞ.....	3
2 PROJEDEKİ BİLİMSEL GELİŞMELER	5
2.1 0.3 MW Akışkan Yataklı Yakıcı Test Ünitesi.....	5
2.2 Akışkan Yataklı Yakıcı Modeli.....	7
2.3 Işınım Isı Transferi Modeli.....	9
2.4 Deneyler ve Sonuçlar.....	10
2.4.1 Sıcaklık ve Gaz Bileşenleri Dağılımları	10
2.4.1.1 Kireçtaşı katkısız deneyler	10
2.4.1.2 Kireçtaşı katkılı deneyler.....	24
2.4.1.3 Model öngörülerinin deneysel sonuçlarla kıyaslanması.....	36
2.4.2 Işınım Isı Akısı Ölçümleri	38
2.4.2.1 Serbest Bölgede Işınım Isı Transferi Modeli.....	40
2.4.2.2 Işınım Isı Transferi Denkleminin Çözümü.....	41
2.4.2.3 Sonuçlar	42
3 SONUÇLAR ve ÖNERİLER	44
3.1 Sonuçlar	44
3.2 Öneriler.....	45
4 KAYNAKLAR.....	46
EK 1: RAPOR SONUÇLARININ UYGULAMAYA DÖNÜŞTÜRÜLMESİ İÇİN	
GEREKLİ ÖNERİLER	49
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU	50

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.	0.3 MW Akışkan yataklı yakıcının proses akım şeması.....	6
Şekil 2.	Gaz örnekleme ve şartlandırma sistemi.....	8
Şekil 3.	Deney 1'deki yakıcı boyunca ölçülen sıcaklık dağılımları ve model öngörümü ..	14
Şekil 4.	Deney 2'deki yakıcı boyunca ölçülen sıcaklık dağılımları ve model öngörümü ..	15
Şekil 5.	Deney 3'deki yakıcı boyunca ölçülen sıcaklık dağılımları ve model öngörümü ..	16
Şekil 6.	Deney 1-3'deki yakıcı boyunca ölçülen normalize edilmiş sıcaklık dağılımları ..	17
Şekil 7.	Deney 1'deki O ₂ , CO ve CO ₂ konsantrasyonlarının yakıcı boyunca değişimi ve model öngörümüleri	18
Şekil 8.	Deney 2'deki O ₂ , CO ve CO ₂ konsantrasyonlarının yakıcı boyunca değişimi ve model öngörümüleri	19
Şekil 9.	Deney 3'deki O ₂ , CO ve CO ₂ konsantrasyonlarının yakıcı boyunca değişimi ve model öngörümüleri	20
Şekil 10.	Deney 1-3'de yakıcı boyunca ölçülen SO ₂ konsantrasyonları	22
Şekil 11.	Deney 1-3'de yakıcı boyunca ölçülen NO _x konsantrasyonları.....	23
Şekil 12.	Deney 4'deki yakıcı boyunca ölçülen sıcaklık dağılımları ve model öngörümü ..	27
Şekil 13.	Deney 5'deki yakıcı boyunca ölçülen sıcaklık dağılımları ve model öngörümü ..	28
Şekil 14.	Deney 6'deki yakıcı boyunca ölçülen sıcaklık dağılımları ve model öngörümü ..	29
Şekil 15.	Deney 4-6'deki yakıcı boyunca ölçülen normalize edilmiş sıcaklık dağılımları ..	30
Şekil 16.	Deney 4'deki O ₂ , CO ve CO ₂ konsantrasyonlarının yakıcı boyunca değişimi ve model öngörümüleri	32
Şekil 17.	Deney 5'deki O ₂ , CO ve CO ₂ konsantrasyonlarının yakıcı boyunca değişimi ve model öngörümüleri	33
Şekil 18.	Deney 6'deki O ₂ , CO ve CO ₂ konsantrasyonlarının yakıcı boyunca değişimi ve model öngörümüleri	34
Şekil 19.	Deney 4-6'de yakıcı boyunca ölçülen SO ₂ konsantrasyonları	35
Şekil 20.	Deney 4-6'de yakıcı boyunca ölçülen NO _x konsantrasyonları.....	37
Şekil 21.	Deney 1, 3 ve 6'da serbest bölge duvarlarına düşen ışıınım ısı akısı ölçümleri.....	39
Şekil 22.	Deney 1'deki serbest bölge yan duvarları üzerine düşen ışıınım ısı akısı ölçümleri ve elde edilen model öngörümüleri	43
Şekil 23.	Deney 3'deki serbest bölge yan duvarları üzerine düşen ışıınım ısı akısı ölçümleri ve elde edilen model öngörümüleri	43

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.	Kireçtaşı katkısız deneylerde kullanılan kömürün fiziko-kimyasal özellikleri.....	11
Tablo 2.	Kireçtaşı katkısız deneylerde kullanılan kömürün kül analizi (kuru örnek)	11
Tablo 3.	Kireçtaşı katkısız deneylerdeki işletme koşulları ve sonuçlar.....	12
Tablo 4.	Deneylerdeki baca gazı emisyonları (kuru baz)	13
Tablo 5.	Kireçtaşı katkılı deneylerde kullanılan kömürün fiziko-kimyasal özellikleri	24
Tablo 6.	Kireçtaşı katkılı deneylerde kullanılan kömürün kül analizi (kuru örnek).....	24
Tablo 7.	Deneylerde kullanılan kireçtaşının fiziko-kimyasal özellikleri.....	25
Tablo 8.	Kireçtaşı katkılı deneylerdeki işletme koşulları ve sonuçlar	26
Tablo 9.	Deneylerdeki baca gazı emisyonları (kuru baz)	31
Tablo 10.	Kireçtaşı katkılı deneylerde ölçülen SO ₂ emisyonları ve Türkiyedeki limit değer (mg SO ₂ /Nm ³ @ %5 O ₂)	36
Tablo 11.	DeneySEL ve model öngörümü kükürt tutma verimleri.....	38
Tablo 12.	Parçacık ve gaz özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan deneySEL veriler.....	41
Tablo 13.	Işınım ısı transferi modeli girdileri	42

ÖZ

Bu çalışmada ODTÜ Kimya Mühendisliği Bölümü'nde kurulu olan 0.3 MW ısı güçteki kabarcıklı akışkan yataklı yakıcı üzerinde tipik bir Türk linyitini temsil eden kül, uçucu madde ve kükürt içeriği kaliteli kömürlere göre yüksek olan Beypazarı linyiti geri döngüsüz/döngülü ve kireçtaşı katkısız/katkılı işletme koşullarında yakılarak yakıcı boyunca ve baca gazında O_2 , CO_2 , CO , SO_2 ve NO_x konsantrasyonları, sıcaklık dağılımları ve serbest bölgede ışınım ısı akısı ölçümlerle belirlenmiştir. Kireçtaşı katkısız deney koşulları yanma verimi açısından incelendiğinde, Beypazarı linyitinin tek geçişte % 98 verimle yandığını ve bu nedenle geri döngünün yanma verimi üzerine önemli bir etkisi olmadığını göstermiştir. Kireçtaşı katkılı deneylerde ise geri döngü kükürt tutma veriminde % 22 artışa neden olmuştur. Ayrıca kireçtaşı katkısız/katkılı deneylerde geri döngünün NO_x emisyonlarını düşürdüğü gözlenmiştir. Geri döngünün yatak sıcaklığını azalttığı, serbest bölge sıcaklığını ise arttırdığı tesbit edilmiştir. Duvarlardaki ışınım ısı akısı ölçümlerinin ise serbest bölgedeki parçacık yükünden ziyade sıcaklık dağılımından etkilendiği görülmüştür. Daha önce akışkan yataklı yakıcı için geliştirilmiş olan yakıcı ve ışınım ısı transfer modelleri deney koşullarına uygulanmış ve model sonuçlarının ölçümlerle uyum içinde olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Akışkan yataklı yakıcı, linyit, geri döngü, ışınım, emisyonlar, modelleme.

ABSTRACT

In this study, on-line measurements of temperature and chemical species (O_2 , CO_2 , CO , SO_2 , NO_x) in the gaseous combustion products of a typical Turkish lignite, Beypazarı, with high ash, volatile matter and sulfur contents in a 0.3 MW AFBC were carried out with and without recycle and limestone addition. Radiative heat fluxes on the walls of the combustor were also measured under the same conditions. Experiments without limestone show that the lignite burns with 98 % combustion efficiency in a single pass and therefore is not affected significantly by recycle. Recycle was found to increase the sulfur retention efficiency by 22 % in runs with limestone addition. Moreover, it was found to decrease NO_x emissions irrespective of limestone addition. Recycling resulted in decrease and increase of bed and freeboard temperatures, respectively. Freeboard wall radiative heat flux measurements were found to be affected by temperature distributions rather than particle load. Previously developed fluidized bed combustion and radiation models were applied to the combustor. Predictions were found to be in good agreement with experimental data.

Keywords: Fluidized bed combustor, lignite, recycle, radiation, emissions, modeling.

1 GİRİŞ

Ülkemizin hidrolik enerjiden sonra ikincil enerji kaynağının 8 milyar ton bilinen rezervleri ile linyit olduğu göz önüne alındığında, geleceğe yönelik enerji ihtiyacının karşılanmasında bu linyitlerimizin verimli ve temiz olarak yakılabilmelerine olanak sağlayan teknolojilerin uygulanmasına yönelik çalışmalara ağırlık verilmesi önem taşımaktadır. Bu aşamada en uygun çözüm ise son yıllarda geliştirilmiş ve daha çok gelişmiş ülkelerin sanayilerinde ve santrallerinde uygulamaya konulmuş olan akışkan yatakta yakma teknolojisidir (AYYT). Bu teknolojinin Türk linyitlerine adaptasyonu gereğinden hareketle kurulmuş olan 0.3 MW gücündeki akışkan yataklı yakıcı üzerinde sürdürülmekte olan çalışmalar (Selçuk ve diğerleri, 1992, 1998, 1998, Değirmenci ve Selçuk, 1999, Organ ve Selçuk, 1999, Selçuk ve diğerleri, 2000, Kozan ve Selçuk, 2000) AYYT'nin enerji üretiminde verimliliği artırma ve çevreyi koruma amaçları doğrultusunda geri döngünün araştırılması gereğini işaret etmiştir.

Günümüzde akışkan yatakta yakma teknolojinin (AYYT) temiz ve verimli bir yakma teknolojisi olduğu kanıtlanmış durumdadır (Topper ve diğerleri, 1994, Williams ve diğerleri, 1994). Genelde, AYYT'nin ızgaralı ve pulverize kömür yakma sistemlerine kıyasla avantajları; yakıt bileşimine esnekliği, yüksek yanma verimi, düşük NO_x emisyonu, yanma odasında SO₂'nin daha düşük Ca/S oranlarında tutulabilirliği ve temiz ısı transfer yüzeyleridir. Son üç avantaj, bu teknolojiye yanmanın düşük sıcaklıklarda (800-900°C) gerçekleşmesinden kaynaklanmaktadır. Ancak Türk linyitleri gibi kükürtçe zengin kömürlerin geri döngüsüz akışkan yataklı sistemlerde yakılması halinde yönetmeliklerle belirlenen SO₂ emisyon sınırları sağlanamamaktadır (Organ, 1994, Tartan, 1994, Barlas, 1994, Selçuk ve diğerleri, 1995). Yönetmeliklerle belirlenen emisyon düzeyine ancak kireçtaşı katkı oranının artırılmasıyla ulaşılabilmekte, bu da katı atık miktarının artmasına neden olmaktadır. Bir taraftan sürekli indirilen emisyon seviyelerine ulaşabilmek, diğer taraftan ise katı atık sorununu gidermek için geri döngülü AYYT'ye geçiş zorunlu görünmektedir.

Diğer taraftan geri döngülü sistemlerde serbest bölge içindeki yayan, yutan ve saçan tanecik miktarı artmakta, bu da aynı bölgedeki ısı transferinin toplam ısı transferi içindeki payını etkileyebilmektedir. Serbest bölgedeki ısı geri kazanımının sistemin genel ısı verimi üzerindeki etkisi göz önüne alındığında ısı transferinin önemi ortaya çıkmaktadır (Lindsay ve diğerleri, 1986, Filla ve Scalabrin, 1994). ısı transferi

ölçümleri konusunda ise dünyada ilk çalışma ODTÜ 0.3 MW test ünitesinde gerçekleştirilmiş, uluslararası bir sempozyumda sunulmuş ve SCI tarafından taranan uluslararası bir dergide yayına kabul edilmiştir (Kozan ve Selçuk, 2000). Bu çalışmalarda serbest bölgedeki uçucu kül miktarının ısı transferine etkisinin incelenmesi gereği ortaya konulmuştur.

Kaliteli kömürler için (düşük kül ve kükürt oranlı, yüksek ısıl değerli) AYYT'de geri döngünün yanma verimini önemli ölçüde artırdığı ve SO₂ emisyonunu da büyük miktarda azalttığı görülmüştür (Castleman, 1985, Meulink ve diğerleri, 1985, Modrak ve diğerleri, 1982, Tang ve diğerleri, 1982, Valk ve Bijvoet, 1995, Valk ve diğerleri, 1984, Verhoeff ve Holtzer, 1995, Whitney, 1983, Zhaoping ve Jixiang, 1998). Ayrıca geri döngü ile serbest bölgede CO ve kok miktarındaki yükselmeye bağlı olarak NO_x tüketilme hızında artış olduğu ve bu nedenle NO_x emisyonunun da azaldığı literatürde yerini almıştır (Castleman, 1985, Meulink ve diğerleri, 1985, Modrak ve diğerleri, 1982, Krishnan ve diğerleri, 1991, Bramer, 1995, Zhaoping ve Jixiang, 1998). Geri döngünün bir diğer avantajı da kömürün özelliklerinin ve akışkanlaştırma hızının yanma verimi üzerindeki olumsuz etkilerini yok etmesidir (Tang, 1984, Krishnan ve diğerleri, 1991).

Uluslararası düzeyde kaliteli kömürler için geri döngünün AYYT'nin performansı üzerindeki etkileri incelenmiş olmakla birlikte, yüksek kükürt, nem ve kül içeren ülkemiz linyitleri için böyle bir çalışma bugüne kadar yapılmamıştır. Bu nedenle, önerilen çalışmanın amacı, temiz ve verimli yanma için Türk linyitinin kireçtaşı katkılı ve geri döngülü yakılması sonucunda oluşan emisyonların ve serbest bölge duvarlarına düşen ısı akısının ölçümlerle belirlenmesi ve modellenmesidir.

Bu proje; bir Türk linyitinin kireçtaşı katkısız/katkılı, geri döngüsüz/döngülü çalışma koşullarında, tam donanımlı mevcut test ünitesinde yakılmasını, yakıcı boyunca CO₂, CO, O₂, SO₂, NO_x derişimleri ile baca gazı emisyonlarının ve serbest bölge boyunca ısı akısının ölçümlerle belirlenmesini ve bu proseslerin modellenmesini kapsamaktadır.

Dünya kömür rezervlerinin çok, coğrafi dağılımının yaygın olması ve bu nedenle arz güvenilirliğine sahip bir yakıt olması nedeniyle gelişmiş ülkelerin orta ve uzun dönemli enerji planlamalarında kömür egemen durumunu temiz kömür teknolojileriyle devam ettirecektir. Temiz kömür teknolojileri arasında ise AYYT gerek Avrupa Birliği ve gerekse ABD'nin enerji üretim sektöründe üst sıralarda yer almaktadır (Topper ve diğerleri, 1994). Belirtilen ülkelerdeki linyit rezervleri ülkemiz rezervlerinden daha kalitelidir. Ancak AYYT

kaliteli kömürlerin yanı sıra başka şekilde değerlendirilmesi mümkün olmayan düşük kaliteli Türk linyitleri gibi kömürlerin de değerlendirilmesine olanak veren bir teknolojidir. Ancak bu teknolojinin Türk linyitlerine adaptasyonu gerekmektedir. Nitekim ülkemizde bu teknoloji ile kurulacak buhar kazanlarının tasarımı ve çevre etki değerlendirmesi için gerekli olan yakma testleri yurt dışındaki test ünitelerinde yapılmakta ve ülke ekonomisine büyük bir mali yük getirmekte ve enerji dar boğazının aşılmasında büyük bir zaman kaybına neden olmaktadır. Türkiye'nin pek yakın gelecekte Avrupa Birliği'ne katılması ile uyması gerekecek olan hava kirliliği sınır değerleri söz konusu olduğunda, doğal gaz ve katı yakıt yakan konvansiyonel yakıcılara tesis edilmesi zorunlu hale gelecek arıtma teknolojilerinin maliyetinin ortadan kaldırılması bu proje ve devamının ulusal ekonomiye katkısıdır.

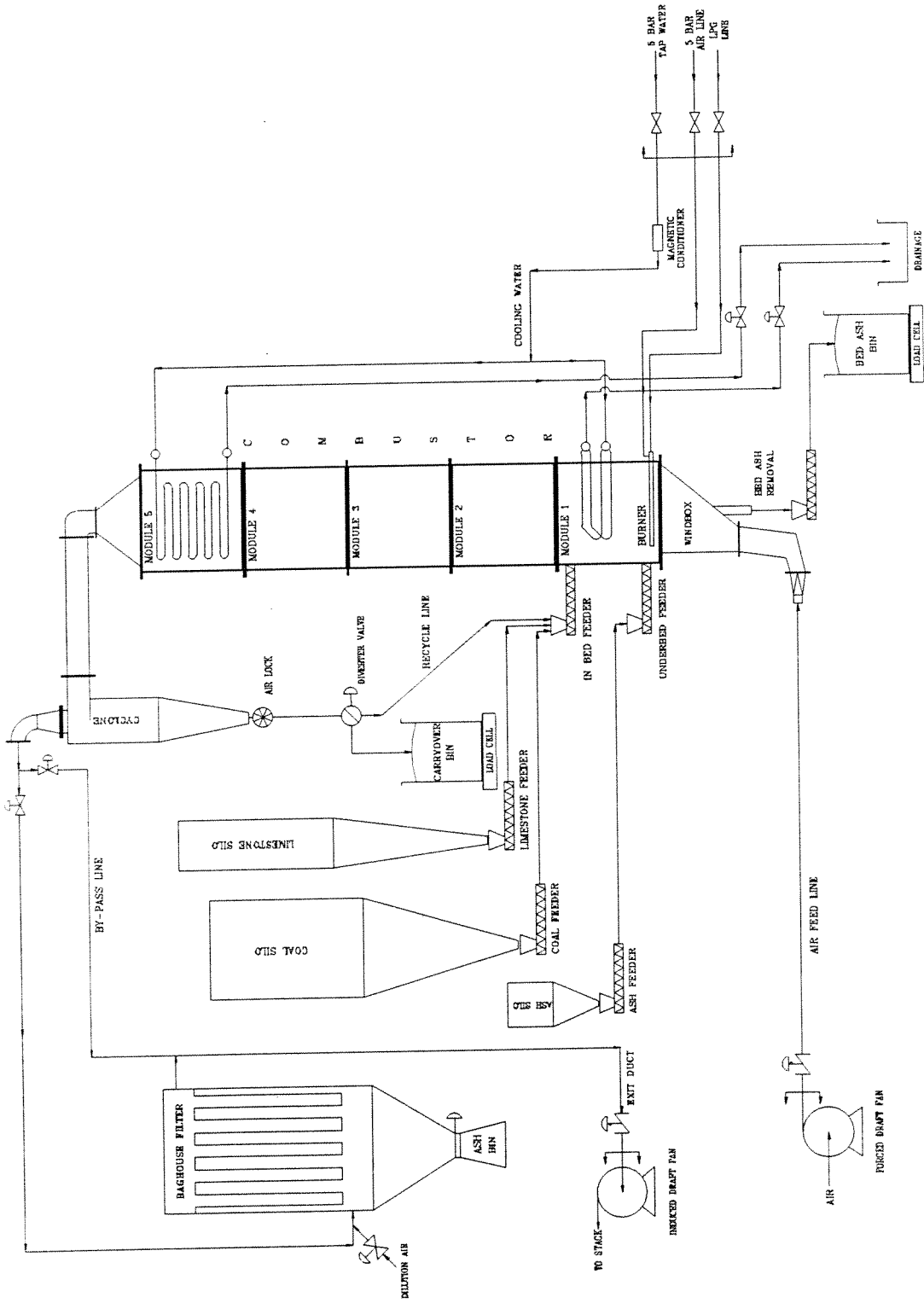
Gelişme raporlarında da belirtildiği gibi MİSAG 159 nolu projemize sarf malzeme sağlamak amacıyla Orta Doğu Teknik Üniversitesi tarafından AFP-2001-07-02-00-24 kodlu "Geri Döngünün Kabarcıklı Akışkan Yataklı Yakıcıların Performansına Etkileri" isimli Bilimsel Araştırma Projesi ile 2001 yılında 1.850.000.000 TL ve 2002 yılında da 1.200.000.000 TL destek sağlanmıştır.

2 PROJEDEKİ BİLİMSEL GELİŞMELER

2.1 0.3 MW Akışkan Yataklı Yakıcı Test Ünitesi

Şekil 1'de proses tasarımı ODTÜ Kimya Mühendisliği Bölümü'nde yapılmış olan 0.3 MW kabarcıklı akışkan yataklı test ünitesinin proses akım şeması görülmektedir. Değişik linyitlerin yakılabilmesi için modüler ve esnek bir yapıda tasarlanmış, birer metrelik beş modülden oluşmuştur. İç kesit alanı 0.45 m x 0.45 m olan bu modüllerin ilki yatak bölgesini, onu takip eden üçü serbest bölgeyi, sonuncusu ise soğutucuyu temsil etmektedir. Ünitenin iç yüzeyi ateş tuğlası ile kaplı olup dış yüzeyi yalıtılmıştır.

Ünitede iki soğutma yüzeyi bulunmaktadır. Bunlardan birincisi yatağı, diğeri serbest bölgeden çıkan gazı soğutmaktadır. Yataktaki soğutma yüzeyi istenen ısı çekişine göre değiştirilebilmektedir. Basma fanından sağlanan akışkanlaştırma havası sırasıyla kalibre edilmiş bir vorteks akış ölçer, hava kutusu ve dağıtıcı plakadan geçtikten sonra yatağa girer. Yakıcıdan çıkan yanma gazları içerdiği uçucu külün irilerini siklonda ve incelerini de MİSAG-159 projesi kapsamında alınan torba filtrede bırakarak bir orifismetreden geçtikten sonra emme fanı aracılığı ile bacaya verilmektedir. Torba filtrenin maksimum işletme



Şekil 1. 0.3 MW Akışkan yataklı yakıcının proses akım şeması.

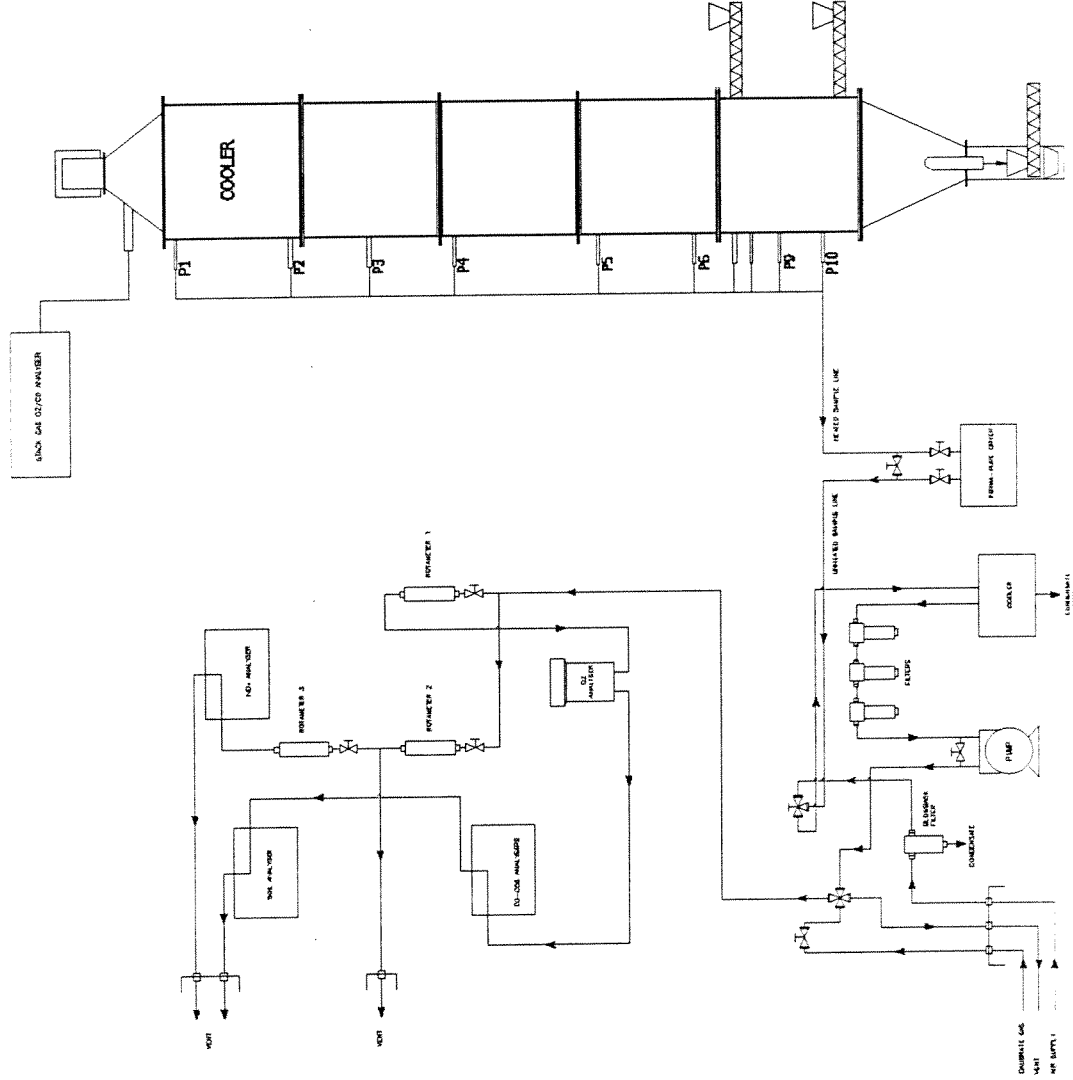
sıcaklığı 260 °C olduğu için yanma gazlarının filtreye giriş sıcaklığı 220 °C'yi geçtiği zaman gazlar bypass hattından bacaya verilebilmektedir.

Kömür ve kireçtaşı, kendi silolarının altındaki hızı ayarlanabilen burgulu besleyicilerden geçerek dağıtıcı plakanın 85 cm üzerindeki besleme noktasından yatağa verilir. Yatak külü, dağıtıcı plakaya bağlı olan drenaj borusu ile boşaltıcıya verilir. Yatak seviyesi bu boşaltıcı ile değiştirilebilir. Siklonda toplanan uçucu kül hava kilidi ile siklondan çekilir. Siklonda toplanan külün tamamı bir yönlendirici ile ya uçucu kül varillerine ya da yatağa geri döndürülür. Külün varillere ve yatağa geri besleme süreleri değiştirilerek farklı geri döngü oranları sağlanmış olur.

Gaz konsantrasyon ve sıcaklık profillerini çıkartmak amacıyla yakıcı boyunca 10 tane gaz probu ve 14 tane de ısı çift yerleştirilmiştir. Bunlardan 4 gaz probu ve 5 ısı çift yatak modülünde diğerleri serbest bölgededir. Gaz örnekleme sondalarından çekilen gazlar şartlandırıldıktan sonra analizörlere gönderilmektedir (Şekil 2). CO₂ ve CO için infrared, SO₂ için nondispersiv infrared, O₂ için termo-manyetik ve NO_x için ise kimyasal ışımaya (chemi-luminescence) analizörleri kullanılmaktadır. Yatak ve serbest bölge serpantinlerinden çıkan suyun sıcaklıkları resistans ısılıçiftleriyle, serpantinlere giren suyun debileri ise orifis metrelerle ölçülmektedir. Tüm ölçüm cihazlarından gelen elektrik sinyalleri Bailey Infi 90 proses kontrol ve veri toplama sistemine iletilmekte ve gerçek değerler bilgisayardan izlenebilmektedir.

2.2 Akışkan Yataklı Yakıcı Modeli

Modellenen fiziksel sistem sürekli çalışan, parçacık ayırıcı bir siklon ve yatak altı kül giderme sistemine sahip atmosferik kabarcıklı akışkan yataklı bir yakıcıdır. Göz önünde bulundurulmuş akışkan yataklı yakıcının yatışkın durumdaki davranışı enerji ve kimyasal bileşenlerin korunumu denkliklerini baz alan bir model ile tanımlanmıştır. Model hidrodinamik, uçucu madde salınımı ve yanması, kok yanması, parçacık boyut dağılımı, parçacık sürüklenmesi, SO₂ tutunumu gibi alt modellerden oluşmaktadır. Modelde 5 kimyasal bileşen, O₂, CO, CO₂, H₂O, SO₂, dikkate alınmıştır. Model ile ilgili detaylar literatürde mevcuttur (Değirmenci, 2000, Değirmenci ve diğerleri, 2000, Göğebakan, 2000, Selçuk ve diğerleri, 2001).



Şekil 2. Gaz örnekleme ve şartlandırma sistemi.

7 Ana modelin içerisindeki alt modellerin varsayımları aşağıda sıralanmıştır:

1. Yatak hidrodinamiğinin modellenmesinde modifiye edilmiş iki fazlı akışkanlaşma teorisi (Grace ve Clift, 1974), Gogolek ve Becker'in (1992) teorisiyle birlikte kullanılmıştır.
2. Serbest bölgenin katı ve gazların karışımından oluştuğu, gazın pistonlu akış içerisinde olduğu ve katı konsantrasyonunun serbest bölge boyunca exponansiyel bir şekilde azaldığı varsayılmaktadır (Kunii ve Levenspiel, 1991).
3. Yakıcının non-adyabatik, yatak sıcaklıklarının eşit ve serbest bölge sıcaklıklarının da değişken olduğu varsayılmaktadır.
4. Kabarcık boyutu yatak yüksekliği boyunca sabittir ve bu değer kabarcık boyutlarının yatak boyunca ortalanması ile bulunur.
5. Kok taneciklerinin sıcaklığı parçacık içinde sabittir ancak parçacık boyutuyla değişkendir.
6. Uçucu maddenin salınımı hem yatakta hem de serbest bölgede olmaktadır. Yatakta ve serbest bölgede salınan uçucu madde miktarı ise Stubington ve diğerleri'nin (1990) parçacık hareketi modeli ile Anthony ve Howard'ın (1976) uçucu salınımı kinetiği modeli esas alınarak yapılmış olan Selçuk ve diğerleri'nin (2000) uçucu madde salınım modeli ile belirlenmektedir. Uçucu salınımı kinetiği modelinin parametreleri yakılan kömür için ısı-kütlesel analiz (TGA) ile saptanmaktadır.
7. Uçucu karbonun CO'e oksitlendiği varsayılmaktadır.
8. Kokun, sabit yoğunlukta küçülen parçacık modeline göre yandığı varsayılmaktadır.
9. Kok, parçacık yüzeyinde CO'e oksitlenir ve bu tepkime kinetik ve yayılım kontrollüdür.
10. CO'in oksitlenmesi hem kabarcık hem de parçacık yoğun fazlarda kinetik kontrollü olarak gerçekleşmektedir.
11. SO₂ tutunumu alt modeli, SO₂ tutunumu tepkimelerinin katalizörün deaktive olmasına benzetilmiştir (Zheng ve diğerleri, 1982).

2.3 Işınım Isı Transferi Modeli

Akışkan yataklı yakma sistemlerinde verimlilik, sıcak yanma gazları ve uçucu kül parçacıklarından kaynaklanan ve büyük ölçüde ışınım yoluyla gerçekleşen ısı transferine bağlıdır. Bu çalışmada kireçtaşı katkısız, geri döngülü ve geri döngüsüz deneylerde (Deney 1

ve 3) serbest bölge duvarları üzerine düşen ışınlam ısı akısı dağılımının tahmini amacıyla ışınlam ısı transferi denkleminin çözümüne dayanan bir model kullanılmıştır (Selçuk ve diğerleri, 2002).

Serbest bölgede ışınlam ısı transferinin modellenebilmesi için bu bölge üç boyutlu bir kapalı hacim olarak düşünülmüştür. Dikdörtgenler prizması şeklindeki bu kapalı hacimin alt sınırını yatak yüzeyi, üst sınırını da serbest bölge soğutma tüpleri oluşturmaktadır. Serbest bölge içinde bulunan yanma gazları ve uçucu kül parçacıkları yayma, soğurma ve saçınımla ışınlam ısı transferine katkıda bulunmaktadır.

2.4 Deneyler ve Sonuçlar

2.4.1 Sıcaklık ve Gaz Bileşenlerin Dağılımları

Türk linyitini kaliteli kömürlerden ayıran unsurlar yüksek kül, uçucu madde ve kükürt içeriğidir. Türk linyitinin yüksek kül oranı kum yatağı yerine kömürün kendi külü içinde yakılmasını ve ayrıca, yüksek yanabilir kükürt oranı deneylerin kireçtaşı katkılı deneyleri gerektirmektedir.

Deneyler; birincisi kireçtaşı katkısız ve ikincisi kireçtaşı katkılı olmak üzere iki seriden oluşmaktadır. Geri döngülü ve kireçtaşı katkılı deneylere temel oluşturması için birinci seride ilk deney geri döngüsüz, diğer deneyler de iki farklı geri döngü oranında gerçekleştirilmiştir. İkinci seride ise, ilk deney geri döngüsüz, diğer deneyler aynı geri döngü oranında iki farklı molar Ca/S oranıyla yapılmıştır. Deneylerde geri döngünün ve kireçtaşının etkilerinin gözlenebilmesi için ilgili deneylerde kömür debisi ve hava fazlası sabit tutulmuştur.

2.4.1.1 Kireçtaşı Katkısız Deneyler

Deneylerde kullanılan Beypazarı linyitinin fiziko-kimyasal özellikleri ve kül analizi Tablo 1-2'de verilmiştir. Beypazarı linyiti Tablo 1'de görüldüğü gibi yüksek kül, kükürt ve uçucu madde/sabit karbon oranına sahip düşük kalorili tipik bir Türk kömürüdür. Külünde düşük miktarda bulunan CaO, % 0.7, SO₂ tutunumu için yeterli olmadığından linyitin kireçtaşı katkısı ile yakılması gerekmektedir. Ancak ilk üç deneyde geri döngünün SO₂ dağılımı ve emisyonları haricindeki parametrelere olan etkisini inceleyebilmek için kireçtaşı kullanılmamıştır. İlk deney geri döngüsüz, diğer deneyler de iki farklı geri döngü oranında, 0.56 ve 2.37 kg geri döngü/kg kömür, yapılmıştır.

Tablo 1. Kireçtaşı katkısız deneylerde kullanılan kömürün fiziko-kimyasal özellikleri.

Boyut Analizi		Kısa Analiz (özgün örnek)		Element Analizi (kuru örnek)	
Boyut (mm)	Ağırlık (%)	Bileşen	Ağırlık (%)	Bileşen	Ağırlık (%)
4.000-3.350	11.5	Nem	13.7	C	38.1
3.350-2.360	20.2	Kül	36.4	H	3.2
2.360-2.000	17.7	UM ¹	32.7	O	12.4
2.000-1.700	16.8	SK ²	17.2	N	1.4
1.700-1.400	8.5			S _{yanabilir}	2.7
1.400-1.180	7.2	ÜİD ³ : 3154 cal/gr		S _{toplam}	4.5
1.180-0.710	12.2	d_p ort : 1.26 mm		Kül	42.2
0.710-0.425	1.8	Yoğunluk:1.58 gr/cm ³			
0.425-0.000	4.1				

¹ Uçucu Madde ² Sabit Karbon ³ Üst Isıl Değer

Deneylelerdeki işletme koşulları ve sonuçlar Tablo 3'te verilmiştir. Geri döngü ile yükselmesi beklenen yanma verimi her üç deneyde de sabit kalmıştır. Beypazarı linyitinin tek geçişte % 98 verimle yandığı ve bu nedenle geri döngünün yanma verimi üzerine önemli bir etkisi olmadığı görülmüştür. Tek geçişle elde edilen bu denli yüksek yanma verimi, düşük kaliteli kömürler sınıfında yer alan linyitin, aslında yüksek uçucu madde/sabit karbon oranı sayesinde AYYT'ye son derece uygun bir yakıt olduğunu ortaya koymaktadır. Bu da kükürt oranı düşük linyitlerin dolaşımli akışkan yataklara göre daha ucuz olan ve işletmesi kolay olan kabarcıklı akışkan yatakta geri döngüsüz çalışma koşullarında başarı ile yakılabileceğini göstermektedir.

Tablo 2. Kireçtaşı katkısız deneylerde kullanılan kömürün kül analizi (kuru örnek).

Bileşen	Ağırlık (%)
SiO ₂	36.6
Al ₂ O ₃	12.5
Fe ₂ O ₃	9.4
CaO	0.7
MgO	1.1
SO ₃	27.4
Na ₂ O	6.5
K ₂ O	1.3
TiO ₂	3.0

Tablo 3. Kireçtaşı katkısız gerçekleştirilen deneylerdeki işletme koşulları ve sonuçlar.

	Deney 1	Deney 2	Deney 3
Kömür debisi, <i>kg/sa</i>	101	101	101
Kireçtaşı debisi, <i>kg/sa</i>	-	-	-
Geri döngü oranı*	0.0	0.56	2.37
Yatak külü çekişi, <i>kg/sa</i>	7	8	10
Uçucu kül debisi, <i>kg/sa</i>	24	24	27
Torba filtre kül debisi, <i>kg/sa</i>	1.1	1.9	3.4
Hava debisi, <i>kmol/sa</i>	22	21	21
Hava fazlası, %	43	36	36
Akışkanlaştırma hızı, <i>m/sn</i>	3.0	2.9	2.8
Ortalama yatak sıcaklığı, <i>K</i>	1148	1156	1119
Ortalama serbest bölge sıcaklığı, <i>K</i>	1120	1201	1178
Yanma verimi, %	98	98	98
Yatak yüksekliği, <i>m</i>	0.9	0.9	0.9
Yatak ısı transfer katsayısı, <i>W/m²-K</i>	258	239	230
Serbest bölge ısı transfer katsayısı, <i>W/m²-K</i>	41	47	52

* Geri döngü oranı = (Geri döngü debisi)/(Kömür debisi)

Deneylerde ölçülen yatak ve serbest bölge sıcaklık dağılımları ile model öngörülerini Şekil 3-5’de verilmiştir. Deney 1 ve 2’de yatak sıcaklıklarında belirgin bir değişim olmamıştır ancak Deney 3’te yatak sıcaklığında bir düşüş gözlenmiştir. Deney 2’ye oranla Deney 3’teki yüksek geri döngü oranı sebebiyle siklondan soğuk döndürülen parçacık miktarındaki yaklaşık 4 kat artış yatak sıcaklığındaki bu düşüşe neden olmuştur. Diğer taraftan, serbest bölge sıcaklıklarında ise tersi bir eğilim gözlenmiştir. Geri döngüsüz deneyde yatak sıcaklığından düşük olan ortalama serbest bölge sıcaklığı geri döngülü deneylerde artış göstererek yatak sıcaklığını geçmiştir. Bu etkiyi daha iyi görebilmek için yakıcı boyunca ölçülen sıcaklıklar ortalama yatak sıcaklığına bölünerek normalize edilmiştir (Şekil 6). Geri döngüyle serbest bölgedeki sıcaklık artışı diğer çalışmalarda da saptanmıştır (Krishnan ve diğerleri, 1991).

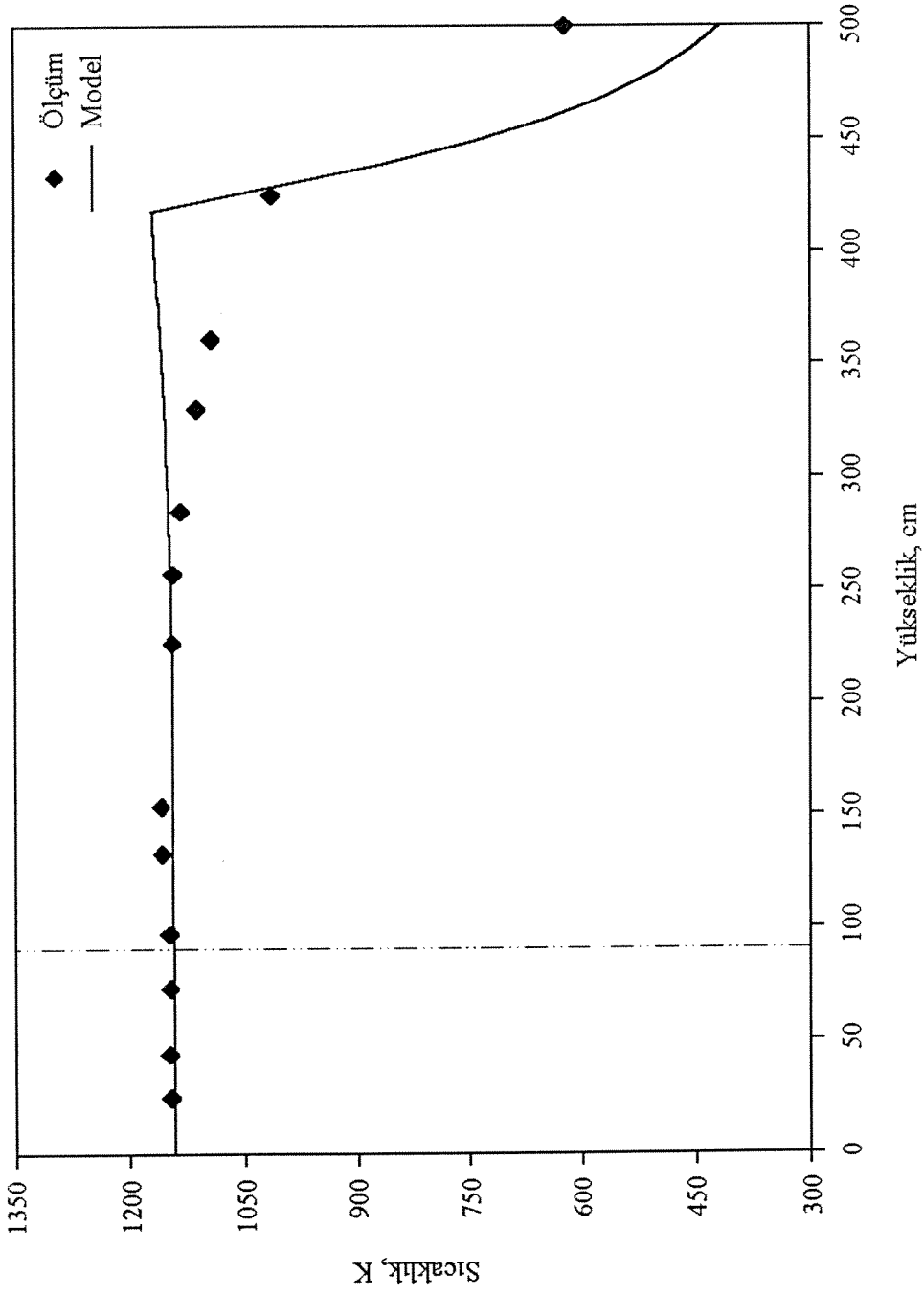
Artan geri döngü oranı ile uçucu kül debisinde önemli bir değişiklik olmamakla beraber, torba filtre debisi ve yatak külü çekişinde belirgin bir artış gözlenmiştir. Torba filtre debisindeki yükselmenin nedeni sistemde dönen parçacık yükünün geri döngü ile artması ve parçacıkların ufalanarak boyutlarının küçülmesidir. Yatak külü çekişi ise geri döngünün yatağa verilmesi ile artan yatak basınç kaybını dengelemek için artırılmıştır.

Akışkan yatakta yakma teknolojisinin en büyük avantajlarından biri yatak bölgesindeki parçacık yoğunluğu nedeniyle yüksek ısı transfer katsayısıdır. Serbest bölgede parçacık yoğunluğu çok daha düşük olduğu için bu katsayı oldukça küçüktür. Ancak bu bölgede geri döngü ile parçacık yoğunluğu arttığından ısı transferi katsayısında yaklaşık % 27 artış hesaplanmıştır.

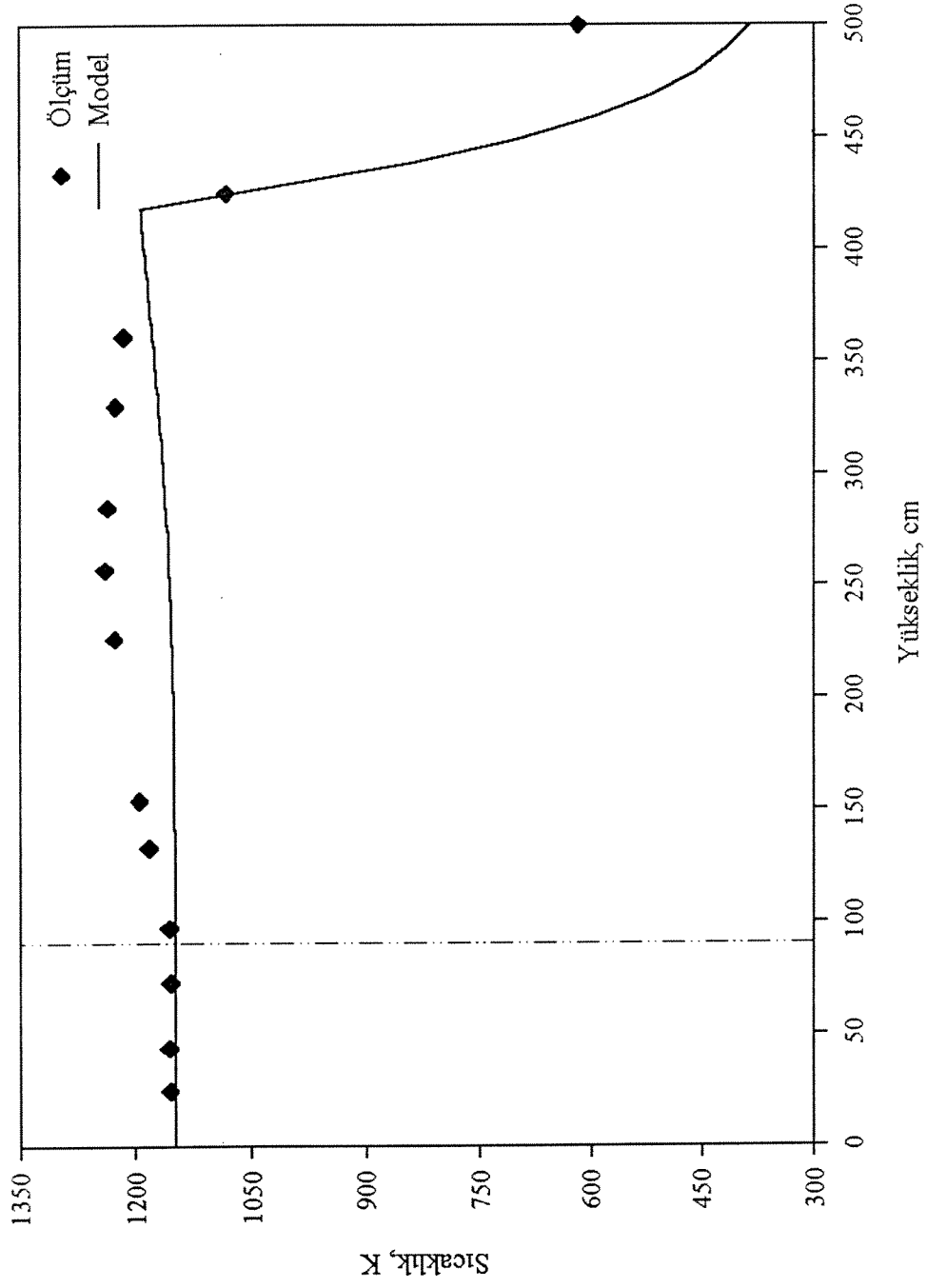
Deneylerde yakıcı boyunca ölçülen O₂, CO₂ ve CO konsantrasyonları ve model öngörümüleri Şekil 7-9'da verilmiştir. Beklendiği gibi O₂ yatakta hızlı bir şekilde tüketilirken CO₂ de hızla artmaktadır ancak O₂'nin artma ve CO₂'nin azalma hızları serbest bölgede düşmektedir. CO ise yatak bölgesinde maksimum konsantrasyona ulaşır yatak çıkışına doğru azalır sabit bir değerle serbest bölgeyi terk eder. Deneylerdeki emisyon değerleri Tablo 4'de verilmiştir. Geçmiş tecrübeler (Selçuk ve Kırmızıgül, 1991) yataktan çekilen gaz örneklerinin kabarcık ve tanecik yoğun olmak üzere iki fazdan örnekleme sonucu olduğunu göstermiştir. Yatağın alt kısımlarında kabarcıklar küçük olduğundan iki faz arasındaki gaz değişimi hızlıdır ve dolayısıyla buradan alınan gaz numunesi her iki fazın mükemmel karışmış örneğidir. Yatağın üst bölümlerinde boyutları çok artan kabarcıkların yatakta kalma süreleri azdır ve iki faz arasındaki gaz değişimi az olur. Buradan alınan numune daha çok tanecik yoğun fazı temsil eder. Yatak çıkışında patlayan kabarcıklarla iki faz karışır ve O₂ değerleri artmaya CO₂ ise azalmaya başlar.

Tablo 4. Deneylerdeki baca gazı emisyonları (kuru baz).

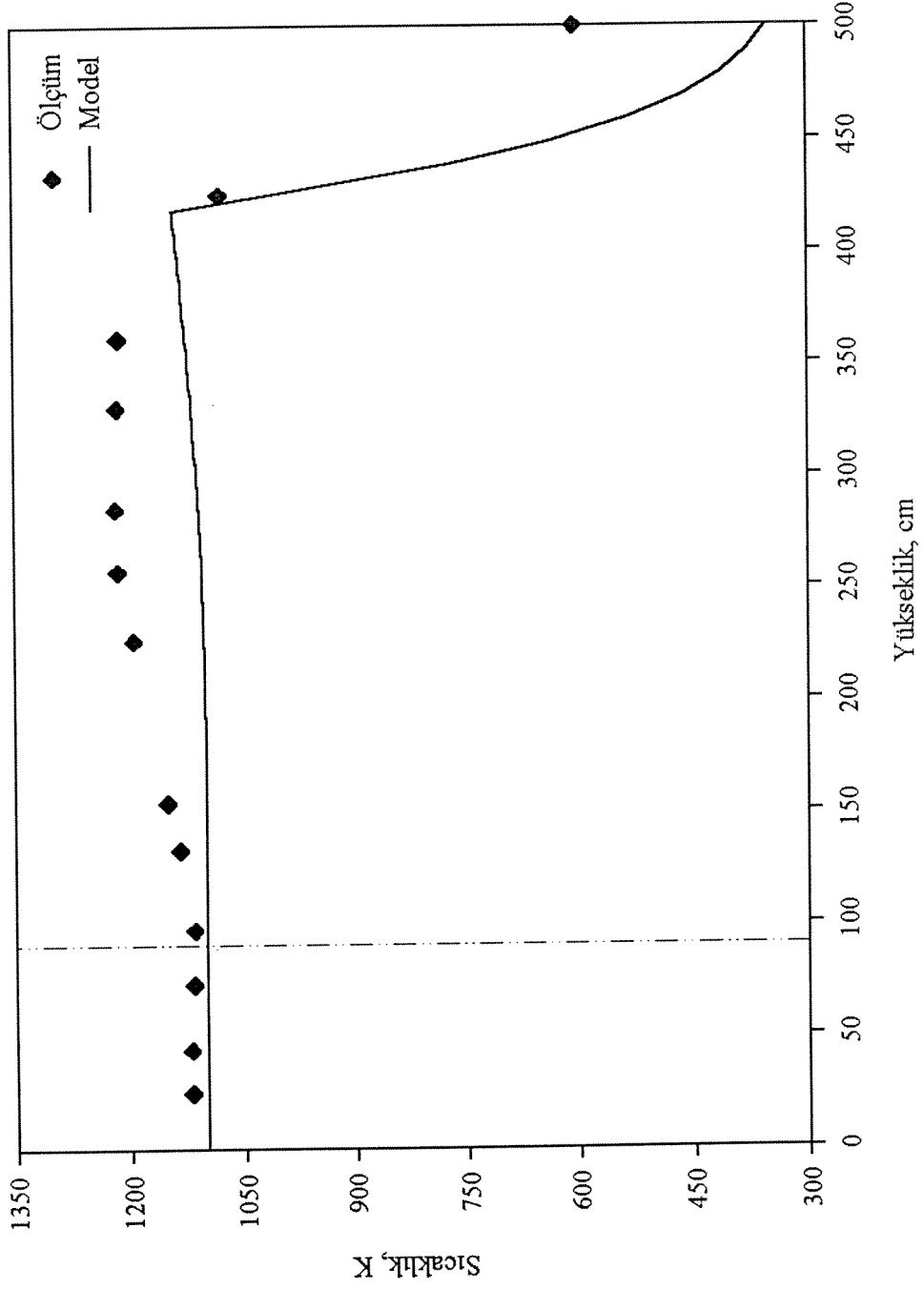
	Deney 1	Deney 2	Deney 3
O ₂ , %	7.27	6.48	5.89
CO ₂ , %	12.04	12.49	13.55
CO, %	0.21	0.26	0.30
SO ₂ , ppm	3678	4314	4079
NO _x , ppm	327	238	215



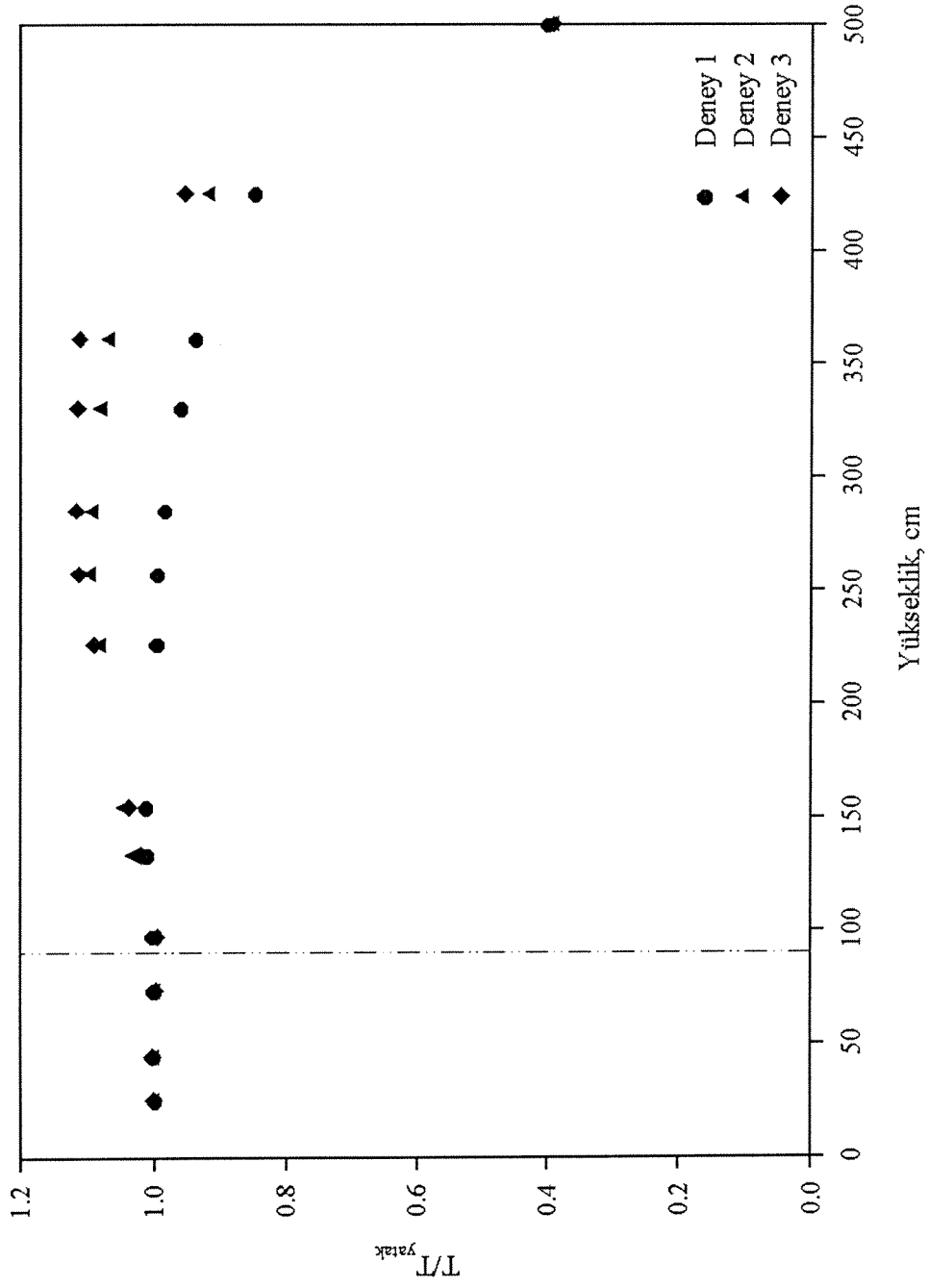
Şekil 3. Deney 1'deki yakıcı boyunca ölçülen sıcaklık dağılımları ve model öngörümü.



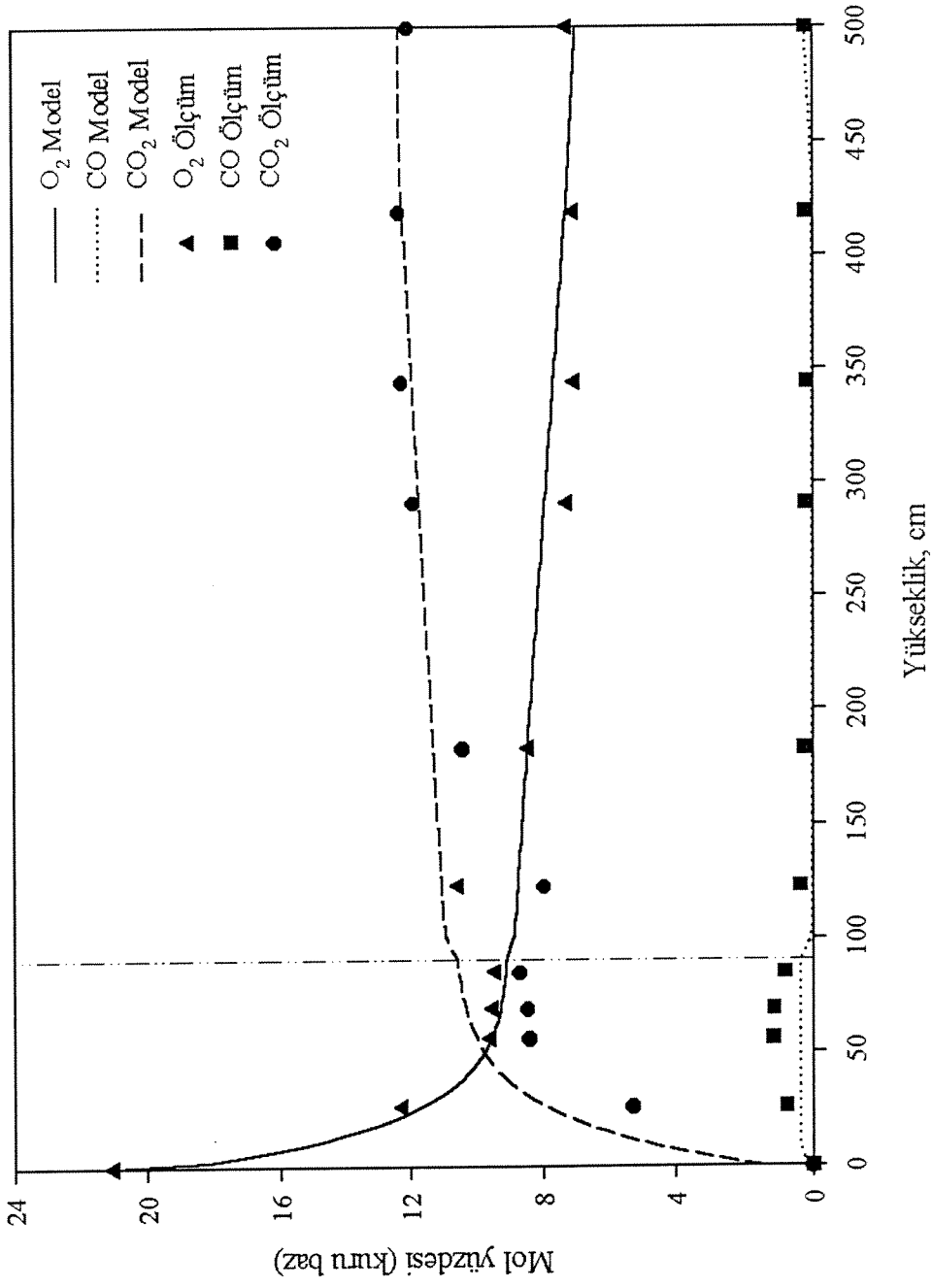
Şekil 4. Deney 2'deki yakıcı boyunca ölçülen sıcaklık dağılımları ve model öngörümü.



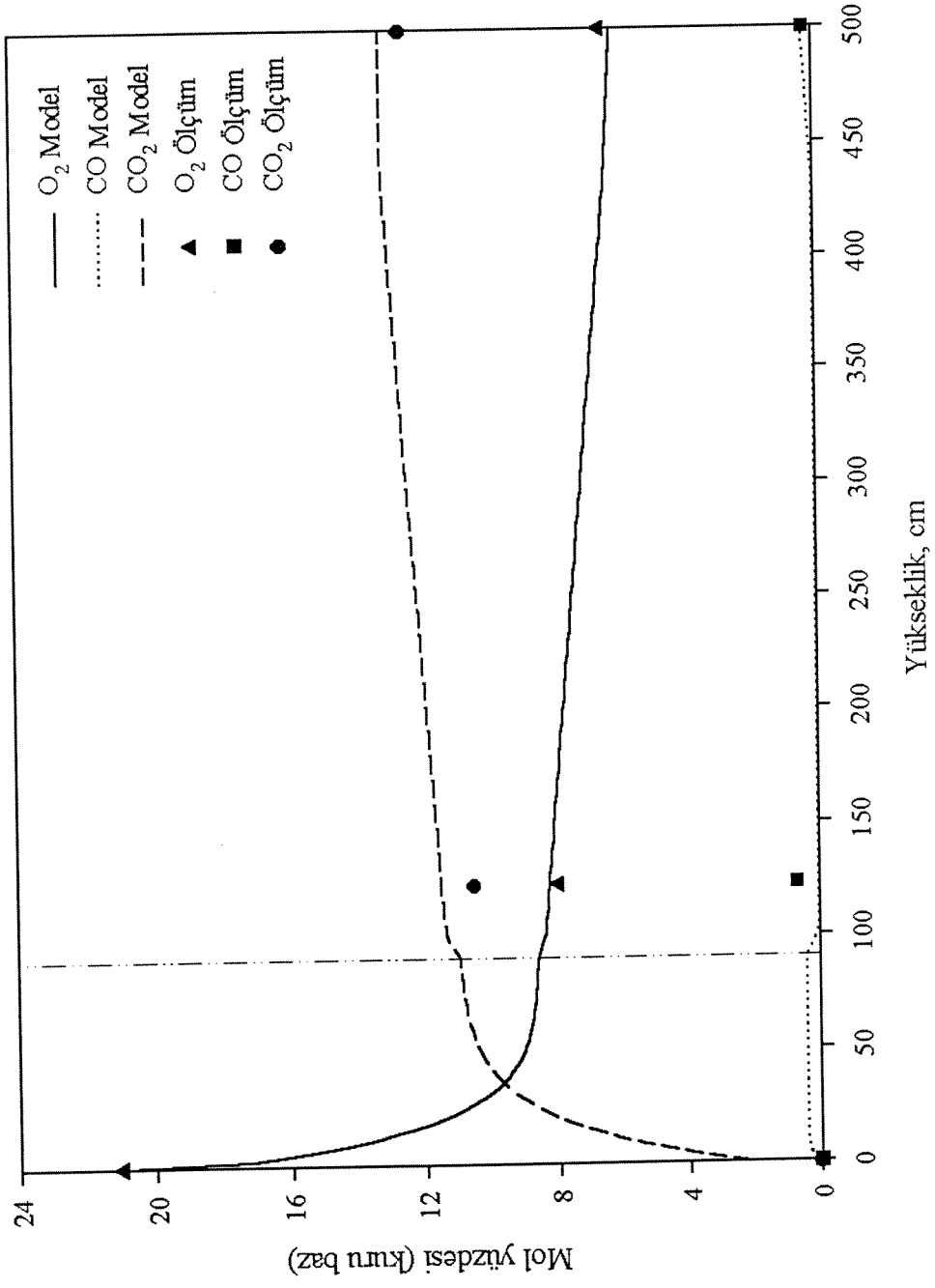
Şekil 5. Deneysel yakıcı boyunca ölçülen sıcaklık dağılımları ve model öngörümü.



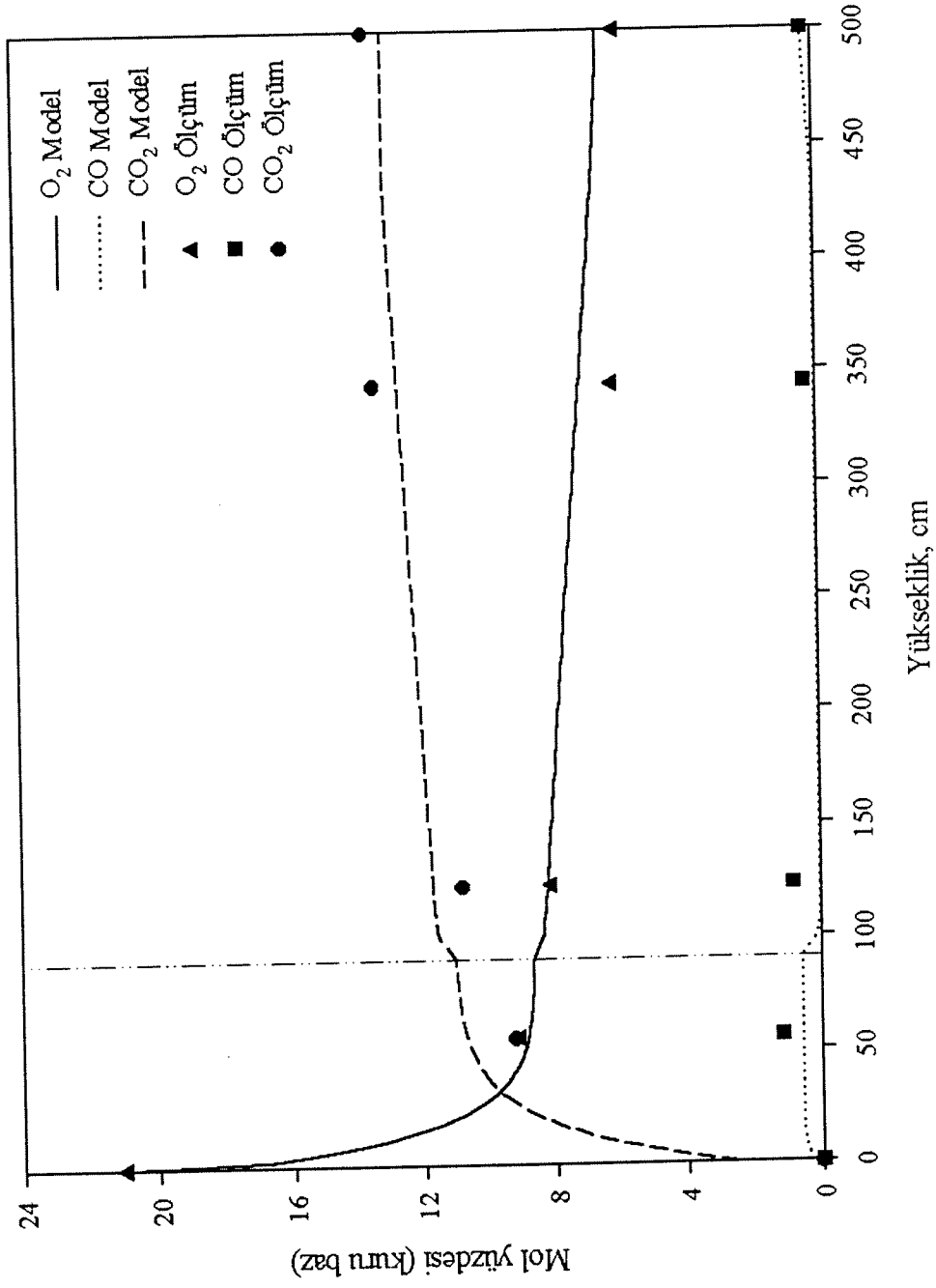
Şekil 6 Deney 1-3'deki yakıcı boyunca ölçülen normalize edilmiş sıcaklık dağılımları.



Şekil 7. Deney 1'deki O₂, CO ve CO₂ konsantrasyonlarının yakıcı boyunca değişimi ve model öngörümüleri.



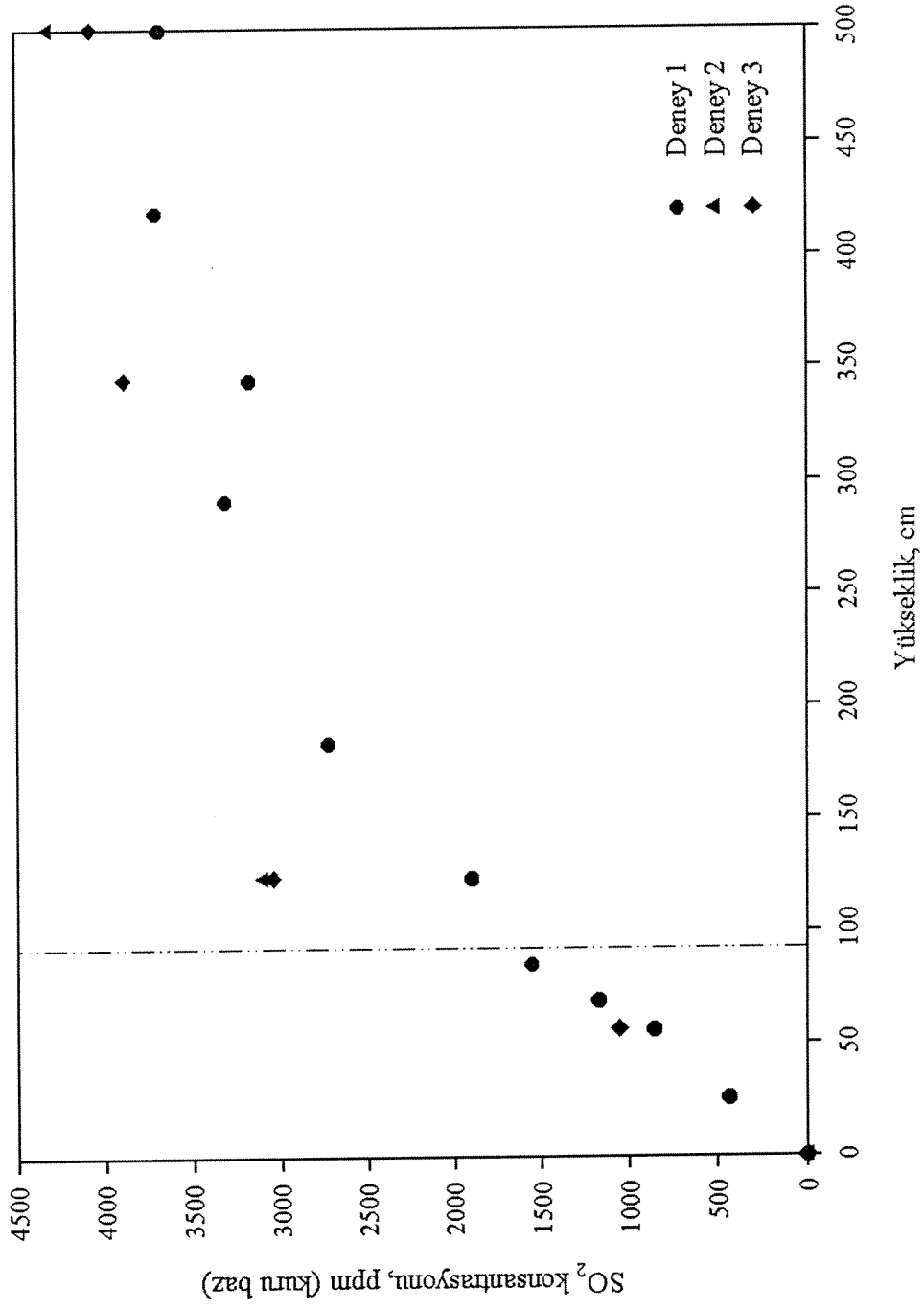
Şekil 8. Deney 2'deki O₂, CO ve CO₂ konsantrasyonlarının yakıcı boyunca değişimi ve model öngörümüleri.



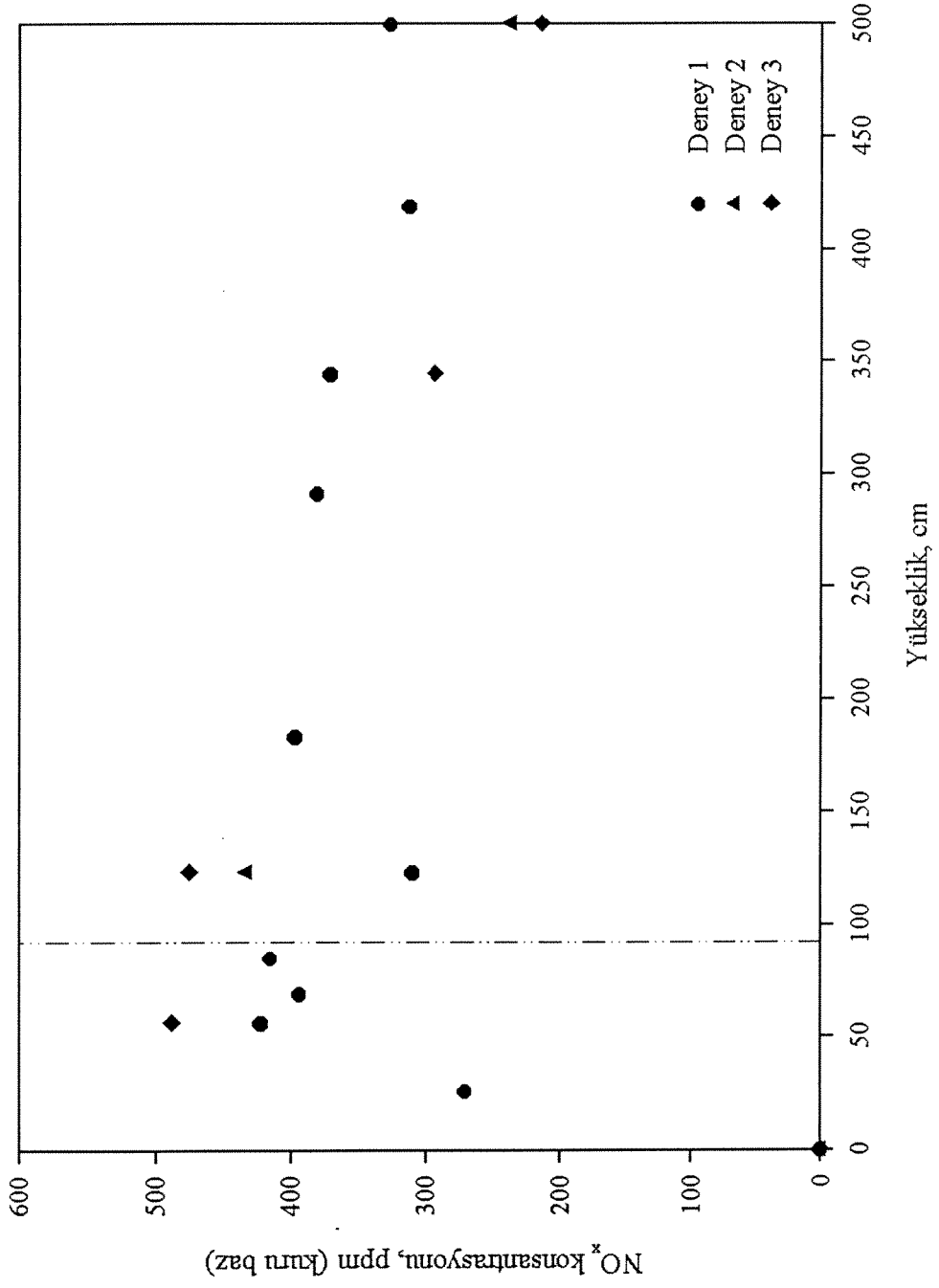
Şekil 9. Deney 3'deki O₂, CO ve CO₂ konsantrasyonlarının yakıcı boyunca değişimi ve model öngörümüleri.

Şekil 10'da görüldüğü gibi yakıcı çıkışındaki SO₂'nin yaklaşık yarısı serbest bölgede açığa çıkmaktadır. Bunun nedeni yanabilir kükürdün bir kısmının uçucu madde içinde olması ve uçucu maddenin de tamamının yatakta serbest kalmaması olabilir. Deneyler kireçtaşı katkısız gerçekleştirildiği için SO₂ tutunumu gerçekleşmemiş ve üç deneyde de benzer SO₂ dağılımları ve emisyon değerleri elde edilmiştir. Dağılımlardaki ve emisyonlardaki değişimler kullanılan linyitin heterojen yapısından kaynaklanmaktadır.

Yakıcı boyunca ölçülen NO_x konsantrasyonları Şekil 11'de gösterilmiştir. Şekilden görülebileceği gibi NO_x konsantrasyonu yatak boyunca hızla yükselmekte ve en yüksek değerine ulaşmaktadır. Serbest bölge boyunca ise hafif bir eğimle azalmaktadır. Akışkan yataklı yakıcılarda NO_x tüketiminin nedenleri kok ve uçucu madde ile NO_x arasındaki tepkimelerdir. NO_x/uçucu madde tepkimeleri kok taneciklerince katalizlenmektedir. Geri döngüsüz deneylerde serbest bölgede kok miktarının az olması ve ayrıca uçucu maddenin bir kısmının bu bölgede salınması nedenleriyle, serbest bölgede NO_x azalmasının nedeninin NO_x/uçucu madde tepkimesi olduğu düşünülmektedir. Ayrıca yine Şekil 11'den görüldüğü gibiserbest bölgedeki NO_x tüketimi geri döngüyle artmaktadır (Castleman, 1985, Meulink ve diğerleri, 1985, Modrak ve diğerleri, 1982, Krishnan ve diğerleri, 1991, Bramer, 1995, Zhaoping ve Jixiang, 1998). Bu artışın nedeniserbest bölgedeki kok miktarının geri döngüsüz deneye kıyasla büyük ölçüde artmış olmasıdır. NO_x emisyonunun geri döngü ile azalmasının diğer bir nedeni de artan serbest bölge sıcaklığından dolayı NO_x tüketim tepkime hızının artmasıdır.



Şekil 10. Deneysel 1-3'de yakıcı boyunca ölçülen SO₂ konsantrasyonları.



Şekil 11. Deneý 1-3'de yakıcı boyunca ölçülen NO_x konsantrasyonları.

2.4.1.2 Kireçtaşı Katkılı Deneyler

Deneylerde kullanılan Beypazarı linyitinin fiziko-kimyasal özellikleri ve kül analizi Tablo 5-6'da verilmiştir. Bu linyit kireçtaşı katkısız deneylerde kullanılan linyitle aynı özellikleri taşımaktadır. Geri döngünün SO₂ dağılımına ve emisyonlarına olan etkisini inceleyebilmek için Deney 4, 5 ve 6 kireçtaşı katkılı olarak yapılmıştır. İlk deney geri döngüsüz, diğer deneyler de aynı geri döngü oranında ve her biri farklı Ca/S oranında yapılmıştır.

Tablo 5. Kireçtaşı katkılı deneylerde kullanılan kömürün fiziko-kimyasal özellikleri.

Boyut Analizi		Kısa Analiz (özgün örnek)		Element Analizi (kuru örnek)	
Boyut (mm)	Ağırlık (%)	Bileşen	Ağırlık (%)	Bileşen	Ağırlık (%)
4.000-3.350	13.6	Nem	14.3	C	37.2
3.350-2.360	18.5	Kül	35.2	H	2.9
2.360-2.000	15.3	UM ¹	31.5	O	14.9
2.000-1.700	13.8	SK ²	19.0	N	1.3
1.700-1.400	7.2			S _{yanabilir}	2.6
1.400-1.180	4.8	ÜID ³ : 3030 cal/gr		S _{toplam}	4.8
1.180-0.710	13.8	<i>d_{p ort}</i> : 0.86 mm		Kül	41.1
0.710-0.425	3.6	Yoğunluk: 1.58 gr/cm ³			
0.425-0.000	9.4				

¹Uçucu Madde ²Sabit Karbon ³Üst Isıl Değer

Tablo 6. Kireçtaşı katkılı deneylerde kullanılan kömürün kül analizi (kuru örnek).

Bileşen	Ağırlık (%)
SiO ₂	39.2
Al ₂ O ₃	11.3
Fe ₂ O ₃	8.0
CaO	0.4
MgO	0.8
SO ₃	12.3
Na ₂ O	5.1
K ₂ O	1.3
TiO ₂	0.9

Deneylerde Beypazarı kireçtaşı kullanılmıştır. Kireçtaşı 0-6 cm boyutunda temin edildikten sonra akışkan yataкта kullanıma uygun boyuta getirmek için önce çeneli kırıcıda daha sonra da çekiçli değirmende kırılmış ve elenmiştir. Tablo 7'de deneylerde kullanılan kireçtaşının fiziko-kimyasal özellikleri verilmiştir.

Tablo 7. Deneylerde kullanılan kireçtaşının fiziko-kimyasal özellikleri

Boyut Analizi		Kimyasal Analizi (kuru örnek)	
Boyut (mm)	Ağırlık (%)	Bileşen	Ağırlık (%)
1.180-1.000	19.2	CaCO ₃	94.7
1.000-0.850	4.6	MgCO ₃	0.7
0.850-0.710	8.7	SiO ₂	4.8
0.710-0.600	6.7	Na ₂ O	0.1
0.600-0.500	4.7	K ₂ O	0.1
0.500-0.425	9.5	Al ₂ O ₃	0.7
0.425-0.300	16.8	Fe ₂ O ₃	0.5
0.300-0.250	10.8	KK*	40.8
0.250-0.150	8.2	Nem**	0.9
0.150-0.053	10.7	<i>d_{p ort} : 0.32 mm</i>	
0.053-0.000	0.1	Yoğunluk: 2.40 gr/cm ³	

* Kızdırma kaybı ** Özgün numunede

Tablo 8’de ise kireçtaşı katkılı deneylerin işletme koşulları ve sonuçları gösterilmiştir. Deneylerde geri döngünün ve kireçtaşının etkilerinin gözlenebilmesi için kömür debisi ve hava fazlası sabit tutulmuştur. Tablodan görülebileceği gibi yanma verimi kireçtaşı/geri döngüsüz deneye (Deney1) kıyasla % 1 azalmakta, ancak geri döngünün olumlu etkisiyle bu azalma telafi edilmektedir.

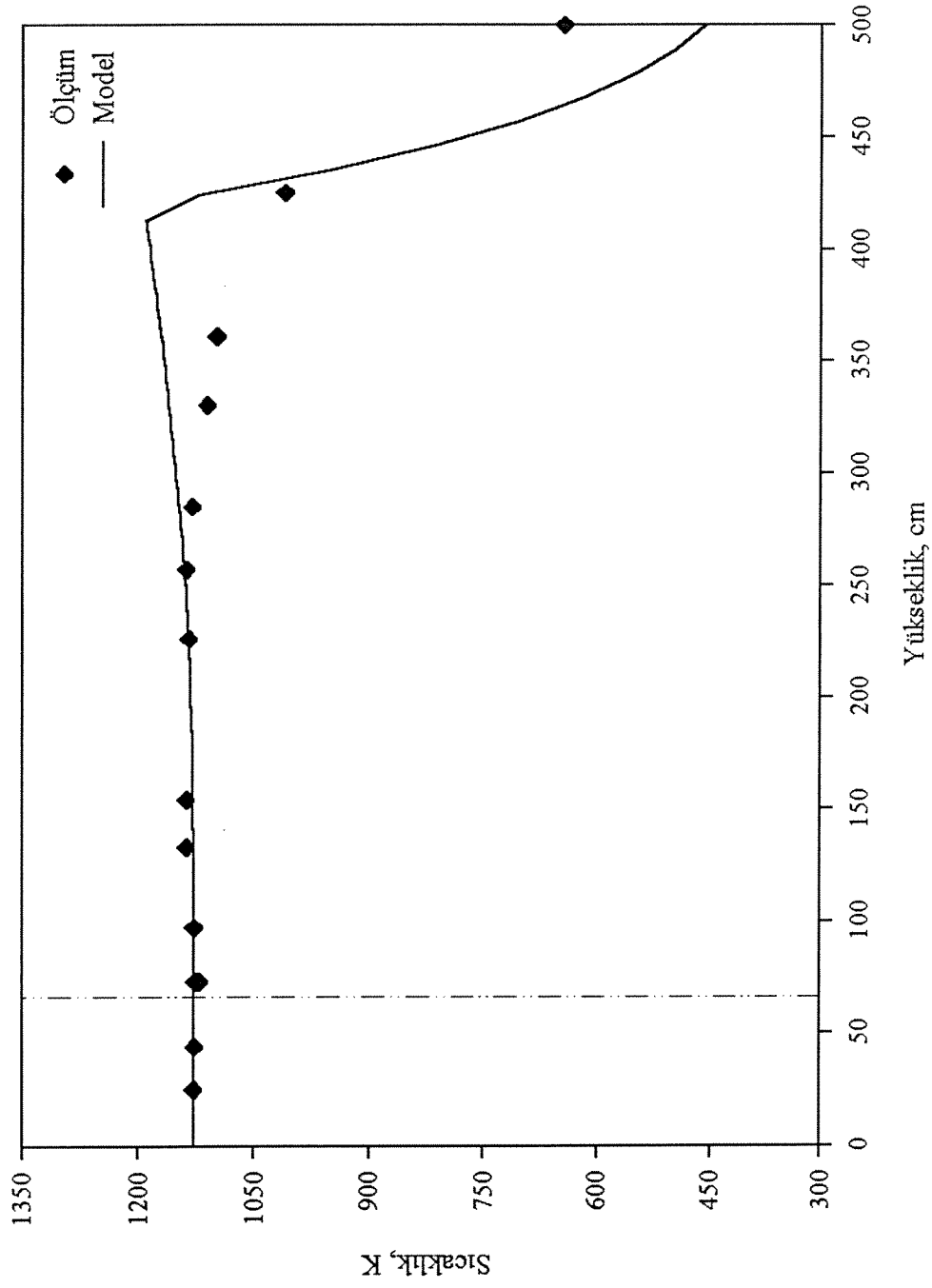
Deneylerde ölçülen yatak ve serbest bölge dağılımları ile model öngörümüleri Şekil 12-14’de verilmiştir. Ortalama yatak sıcaklıklarının kireçtaşı deneylere göre bu deneylerde azaldığı gözlenmiştir. Deney 5’te Deney 4’e göre yatak sıcaklığının daha düşük olmasının sebebi Deney 5 te geri döngüye geçilmesidir. Deney 6’da ise kireçtaşı debisinin artırılması nedeniyle Deney 5’e göre yatak sıcaklığı daha da düşük olmuştur. Kireçtaşı katkısının ve geri döngünün serbest bölge sıcaklık dağılımına etkisinin belirlenebilmesi için serbest bölge sıcaklıkları ortalama yatak sıcaklığına bölünerek normalize edilmiştir (Şekil 15). Deney 5’te serbest bölge sıcaklıklarındaki artış bir önceki bölümde de belirtildiği gibi geri döngüden ancak Deney 6’daki Deney 5’e göre serbest bölge sıcaklıklarındaki düşüş kireçtaşı katkısının artmasından kaynaklanmaktadır.

Geri döngüsüz deneyler (Deney 1 ve Deney 4) karşılaştırıldığında kireçtaşının eklenmesiyle birlikte yatak külü çekişinin, uçucu kül debisinin ve torba filtre kül debisinin belirgin bir oranda arttığı görülmektedir. Uçucu kül debisi, torba filtre kül debisi, yatak külü çekiş, ısı transferi katsayısı gibi parametrelere geri döngünün etkisi kireçtaşı deneylerdekiyle aynıdır.

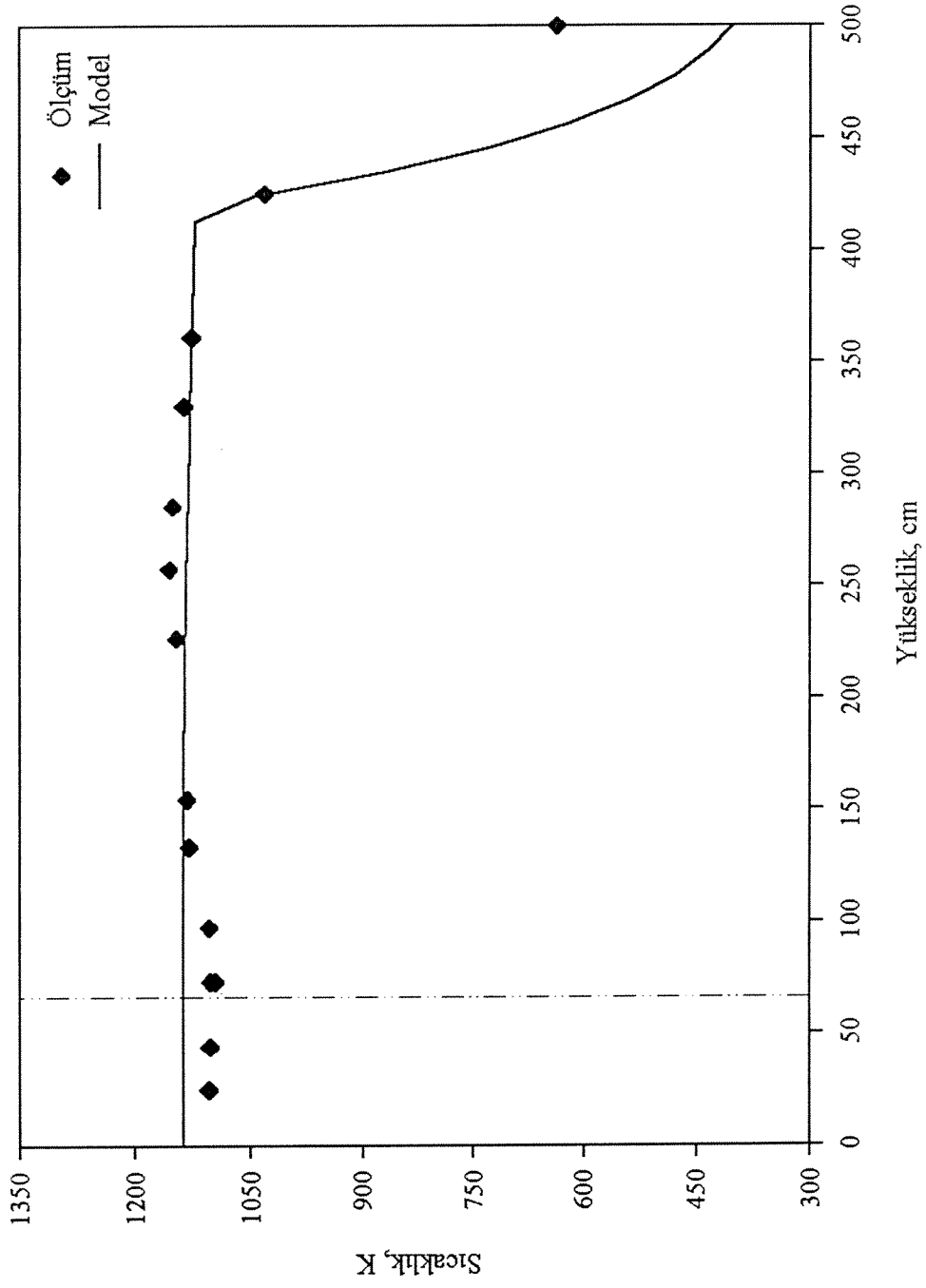
Tablo 8. Kireçtaşı katkılı gerçekleştirilen deneylerdeki işletme koşulları ve sonuçlar.

	Deney 4	Deney 5	Deney 6
Kömür debisi, <i>kg/sa</i>	102	102	102
Kireçtaşı debisi, <i>kg/sa</i>	25	26	33
Geri döngü oranı*	0.0	0.86	0.84
Yatak külü çekişi, <i>kg/sa</i>	13	14	12
Uçucu kül debisi, <i>kg/sa</i>	34	38	36
Torba filtre kül debisi, <i>kg/sa</i>	1.0	2.1	6.2
Hava debisi, <i>kmol/sa</i>	19	19	19
Hava fazlası, %	31	29	29
Akışkanlaştırma hızı, <i>m/sn</i>	2.5	2.5	2.4
Ortalama yatak sıcaklığı, <i>K</i>	1126	1103	1093
Ortalama serbest bölge sıcaklığı, <i>K</i>	1112	1127	1097
Yanma verimi, %	97	98	98
Molar <i>Ca/S</i> oranı	3.3	3.4	4.4
Kükürt tutma verimi, %	58	79	93
Kalsiyum kullanımı, %	18	23	21
Yatak yüksekliği, <i>m</i>	0.7	0.7	0.7
Yatak ısı transfer katsayısı, <i>W/m²-K</i>	255	271	268
Serbest bölge ısı transfer katsayısı, <i>W/m²-K</i>	36	40	40

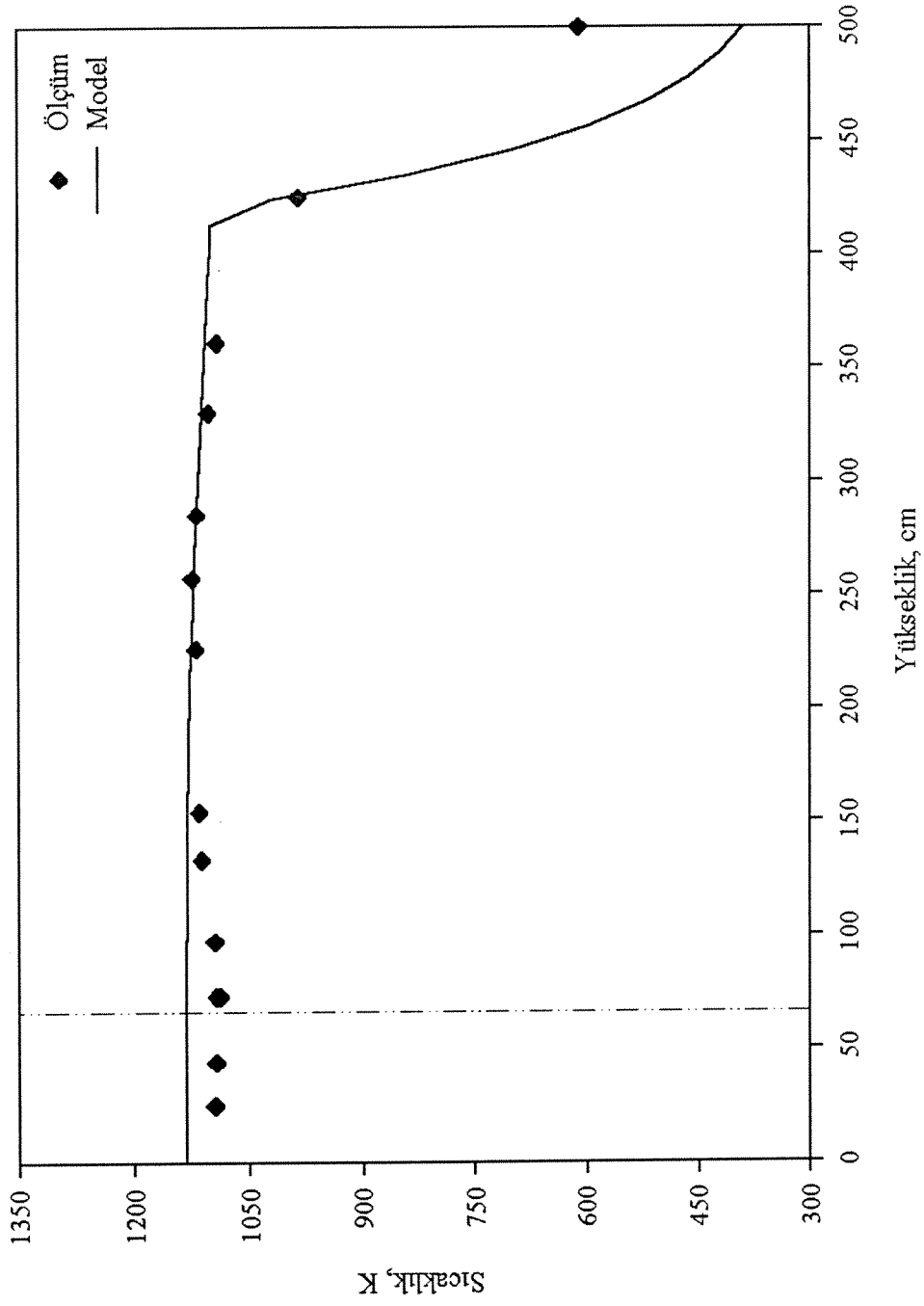
* Geri döngü oranı = (Geri döngü debisi)/(Kömür debisi)



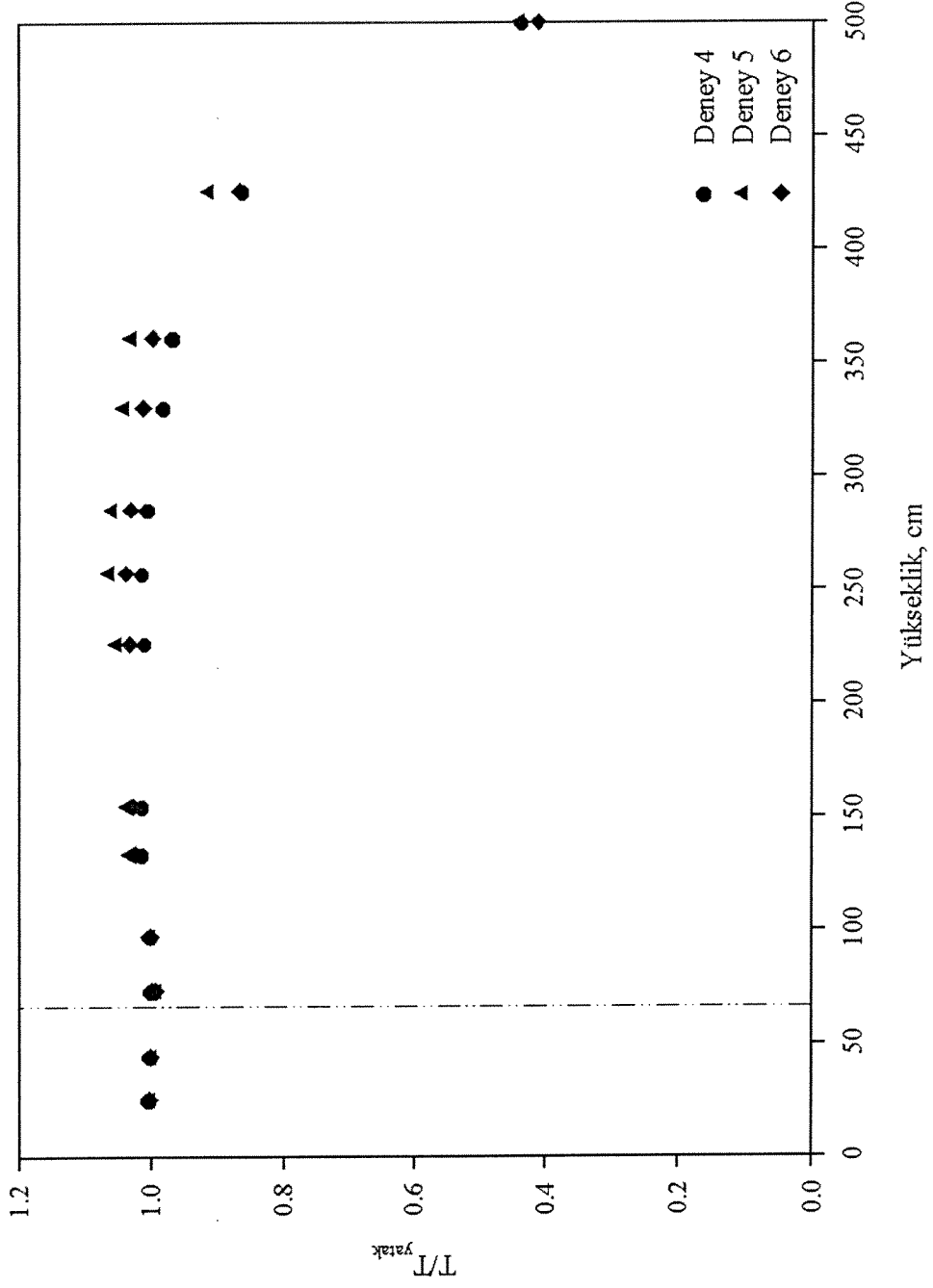
Şekil 12. Deney 4'deki yakıcı boyunca ölçülen sıcaklık dağılımları ve model öngörümü.



Şekil 13. Deneysel yakıcı boyunca ölçülen sıcaklık dağılımları ve model öngörümü.



Şekil 14. Deneysel 6'deki yakıcı boyunca ölçülen sıcaklık dağılımları ve model öngörümü.



Şekil 15 Deney 4-6'daki yakıcı boyunca ölçülen normalize edilmiş sıcaklık dağılımları.

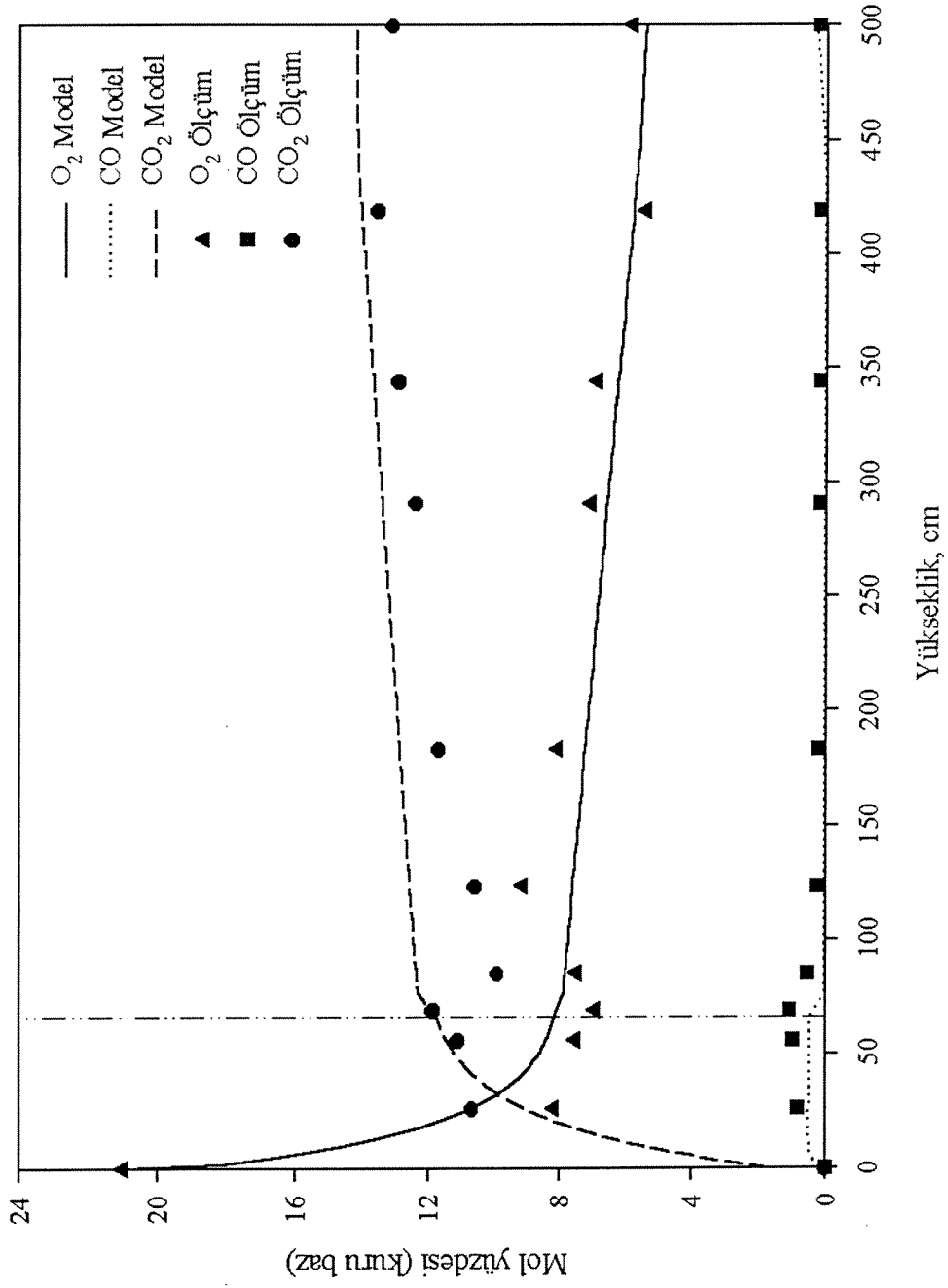
Deneylerde yakıcı boyunca ölçülen O₂, CO ve CO₂ konsantrasyonları ve model öngörümüleri Şekil 16, 17 ve 18’de verilmiştir. Söz konusu gazların dağılımları ve emisyonları kireçtaşı katkısız deneylerdeki sonuçlar ile benzer eğilimleri göstermektedir. Ancak Tablo 9’da görüldüğü gibi kireçtaşının kalsinasyonu sırasında açığa çıkan CO₂’nin etkisi ile CO₂ emisyonlarında hafif bir artış gözlenmiştir.

Tablo 9. Deneylerdeki baca gazı emisyonları (kuru baz).

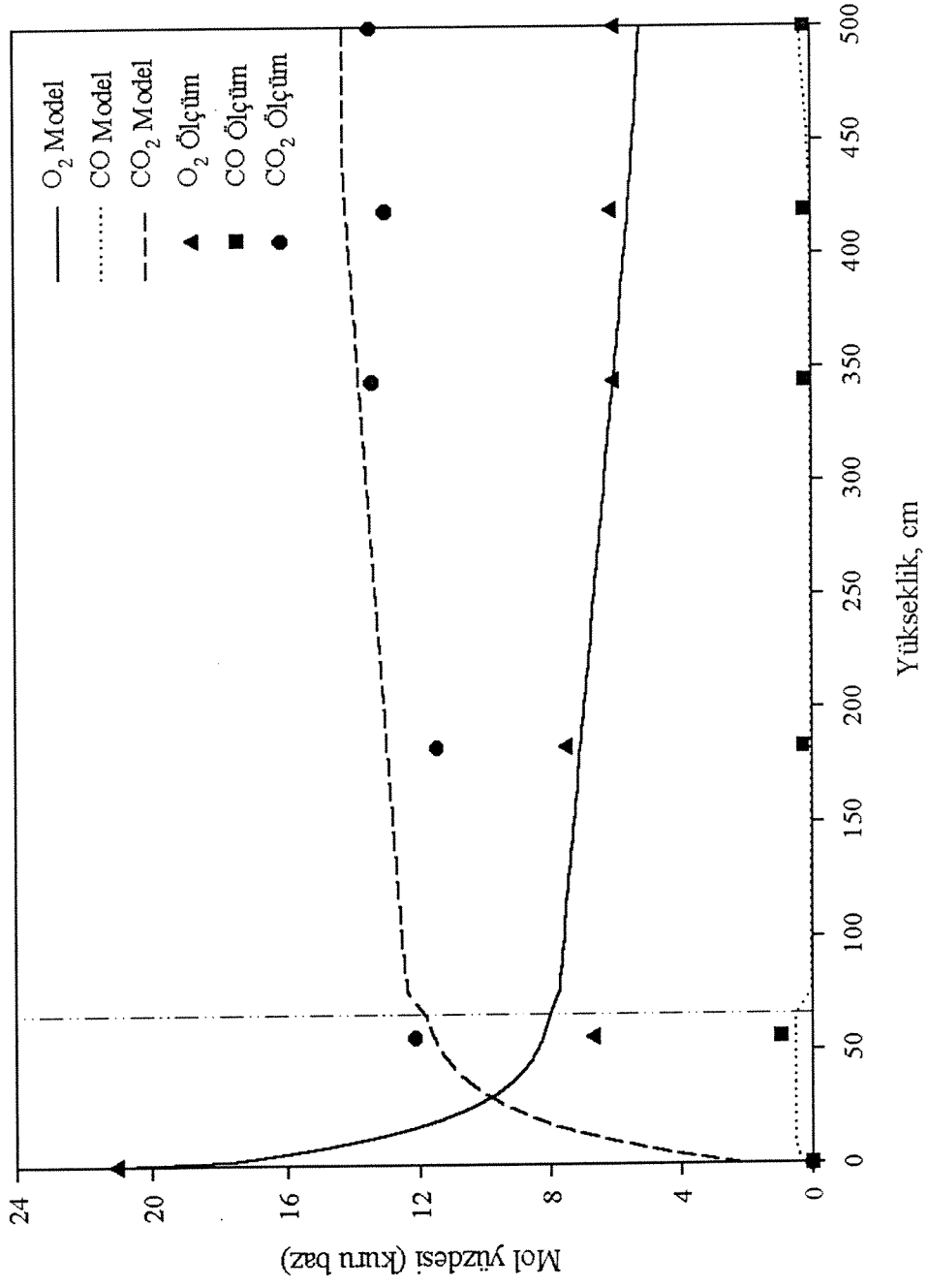
	Deney 4	Deney 5	Deney 6
O₂, %	5.82	5.97	5.37
CO₂, %	13.10	13.42	14.02
CO, %	0.20	0.21	0.17
SO₂, ppm	1660	872	283
NO_x, ppm	237	173	180

Şekil 19’da kireçtaşlı deneylerde ölçülen SO₂ dağılımları gösterilmiştir. Yatak çıkışında elde edilen SO₂ konsantrasyonları (yaklaşık 200 ppm) kireçtaşı katkısız deneylerdeki yatak çıkışı (yaklaşık 1600 ppm) ile karşılaştırıldığında SO₂ tutunumunun büyük bir kısmının yatakta gerçekleştiği görülmektedir. Serbest bölgedeki SO₂ dağılımları incelendiğinde geri döngülü deneylerde serbest bölgedeki SO₂ tutunumunun arttığı gözlenmiştir.

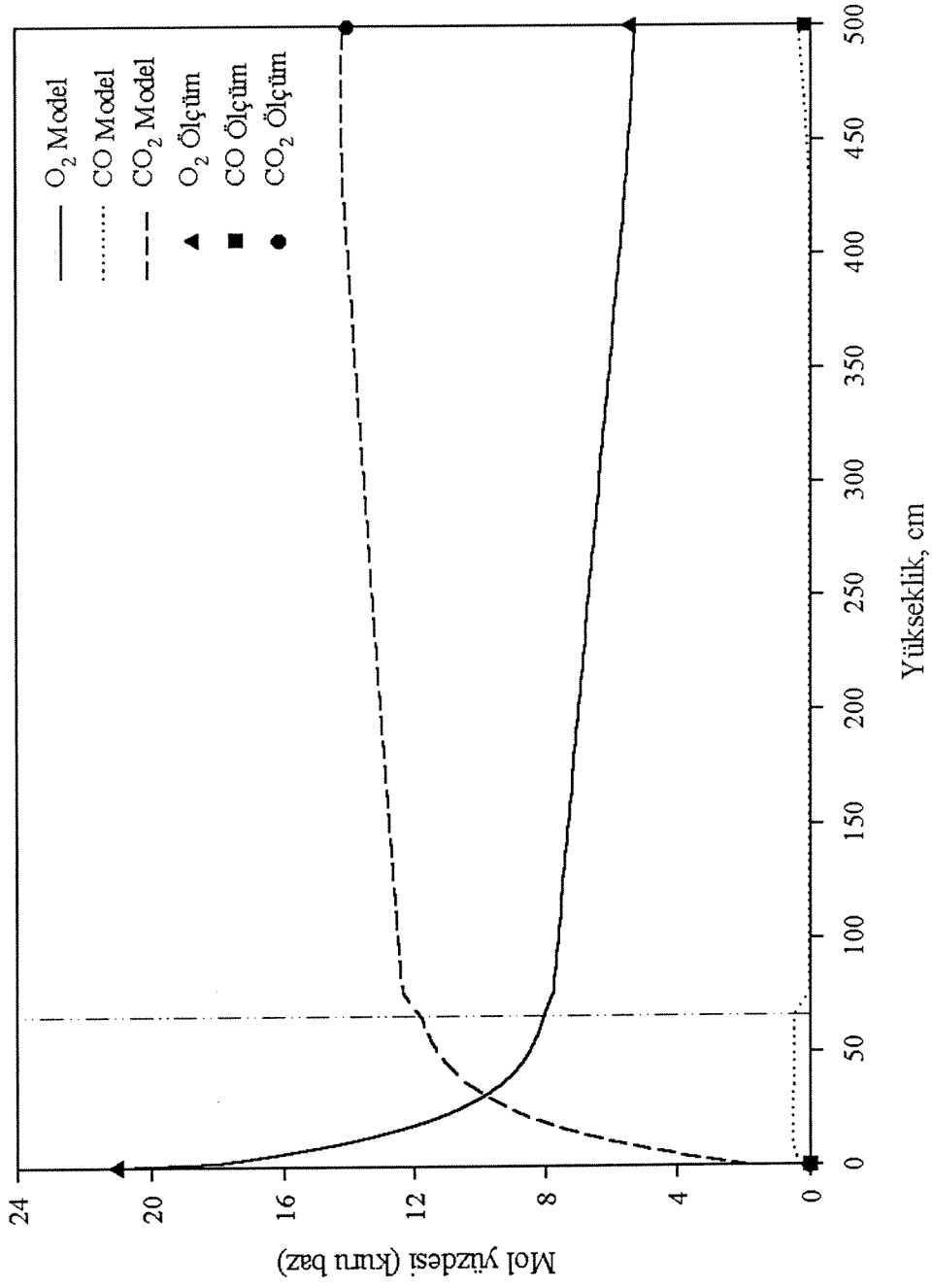
Kireçtaşı katkısız deneylerde elde edilen yaklaşık 4000 ppm SO₂ emisyon değerleri Deney 4’de kireçtaşı katkısı ile 1660 ppm seviyesine çekilmiştir. Deney 5’te Deney 4’deki işletme koşullarında ve Ca/S oranında geri döngüye geçilmiştir ve bunun sonucu olarak SO₂ emisyonu 872 ppm’e indirilmiştir. Emisyon değerindeki bu düşüşün nedeni geri döngü ile kısmen kullanılmış ya da hiç kullanılmamış kireçtaşı taneciklerinin sisteme geri döndürülerek kalsiyum kullanım oranını % 18’den % 23 seviyelerine arttırmasıdır. Daha sonra SO₂ emisyonunu limit değerlere uygun hale getirebilmek için aynı geri döngü oranında Ca/S oranı arttırılmıştır. Bu oran artışı kalsiyum kullanım oranını % 21’e indirmesine rağmen limit değerlerin altında bir emisyon değeri sağlamıştır. Tablo 10’da Türkiye’deki SO₂ emisyonu limit değeri ve Deney 4-6’da elde edilen emisyon değerleri verilmiştir.



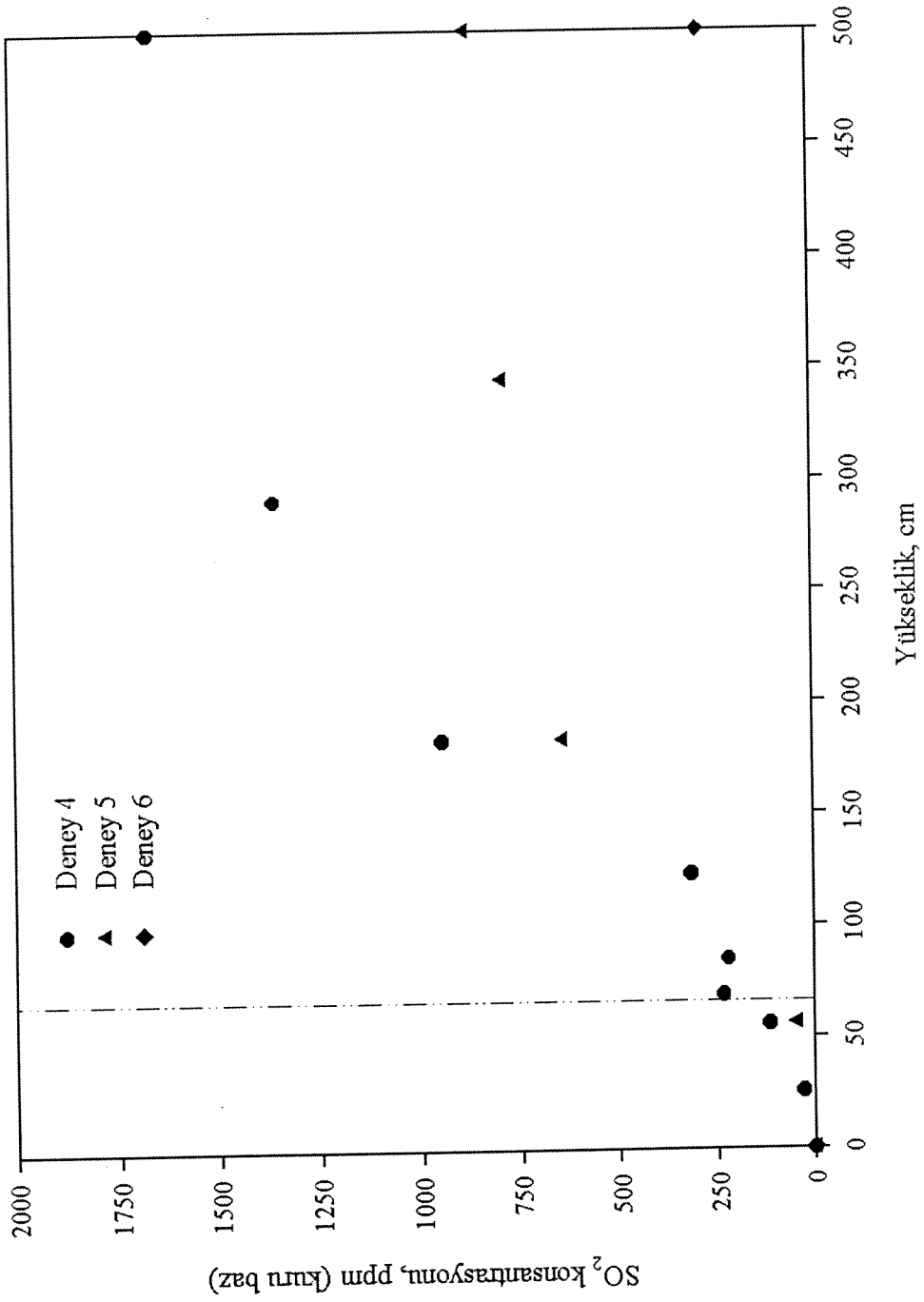
Şekil 16. Deney 4'deki O₂, CO ve CO₂ konsantrasyonlarının yakıcı boyunca değişimi ve model öngörümüleri.



Şekil 17. Deney 5'deki O₂, CO ve CO₂ konsantrasyonlarının yakıcı boyunca değişimi ve model öngörümleri.



Şekil 18. Deneysel O₂, CO ve CO₂ konsantrasyonlarının yakıcı boyuna değişimi ve model öngörümüleri.



Şekil 19. Deney 4-6'da yakıcı boyunca ölçülen SO₂ konsantrasyonları.

Tablo 10. Kireçtaşı katkılı deneylerde ölçülen SO₂ emisyonları ve Türkiye'deki limit değer (mgSO₂/Nm³ @ % 5 O₂).

Deney 4	Deney 5	Deney 6	Limit değer
4999	2652	828	1000

Şekil 20'de Deney 4, 5 ve 6'da elde edilen NO_x dağılımları gösterilmiştir. NO_x dağılımları kireçtaşı katkısız gerçekleştirilen deneylerdeki eğilimi göstermiştir. Kireçtaşının etkisi incelendiğinde ise NO_x emisyonlarının önceki çalışmalarda da olduğu gibi kireçtaşı katkısı ile azaldığı görülmüştür (Selçuk ve diğerleri, 1998).

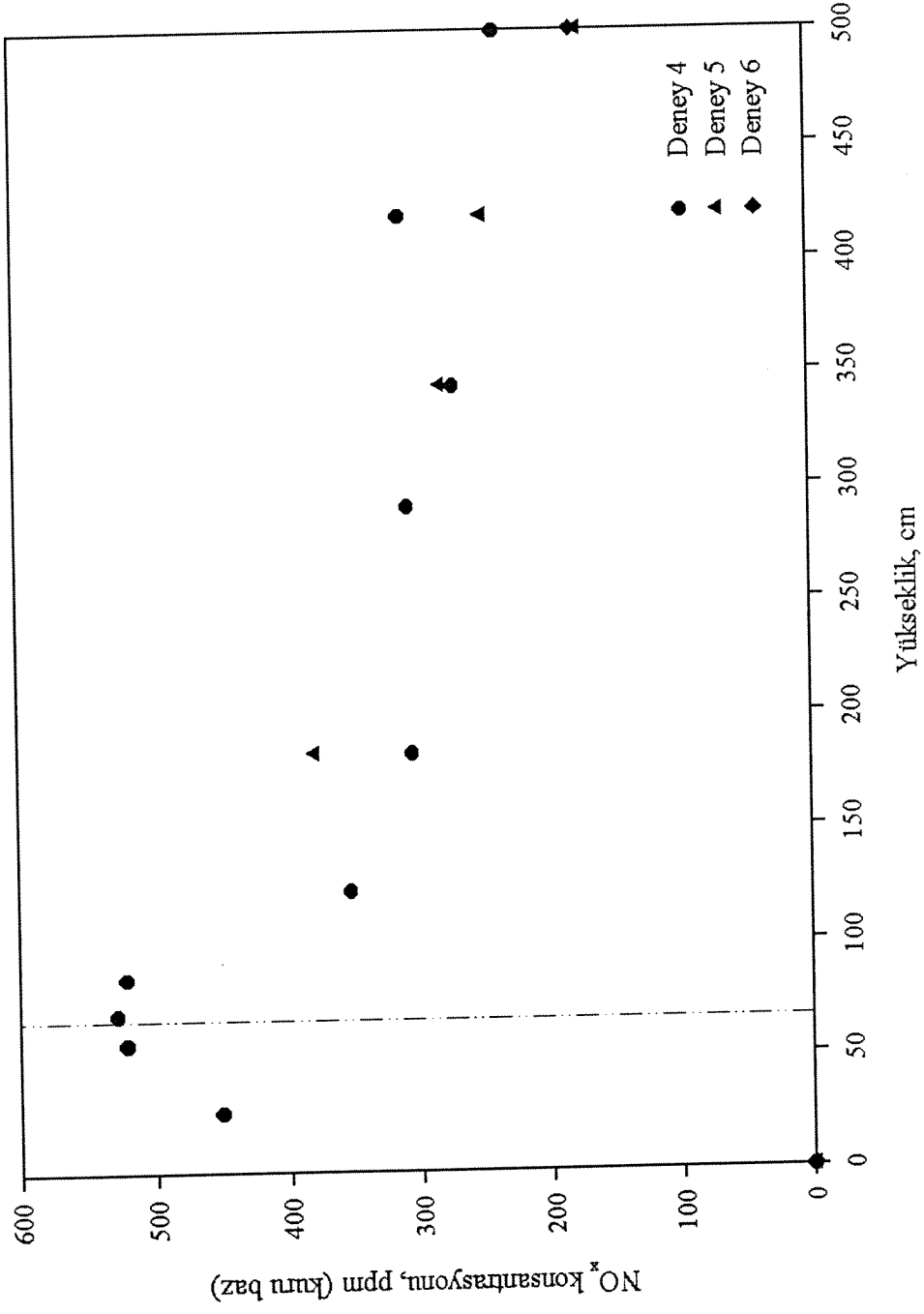
2.4.1.3 Model Öngörülerinin Deneysel Sonuçlarla Kıyaslanması

Atmosferik kabarcıklı akışkan yataklı yakıcı modelinin öngörülerinin doğruluğu proje bünyesinde 0.3 MW AAYY test ünitesinde gerçekleştirilen kireçtaşı katkılı/katkısız geri döngülü/döngüsüz deneylerden alınan ölçümlerle test edilmiştir. Bu deneylerde kullanılan linyit ve kireçtaşının özellikleri Tablo 1, 5 ve 7 de işletme koşulları ise Tablo 3 ve 8 de verilmiştir.

Şekil 7-9 ve 16-18 modelin yakıcı boyunca O₂, CO ve CO₂ öngörülerinin sırasıyla, kireçtaşı katkısız ve katkılı deneylerden alınan ölçümlerle mukayesesi göstermektedir. Şekillerden görülebileceği gibi geliştirilen modelin öngörümüleri yatak ve serbest bölgede deneylerden alınan ölçümlerle aynı eğilimi göstermektedir. Yatak bölgesinde O₂ konsantrasyonundaki hızlı düşüş ve CO₂ konsantrasyonundaki hızlı artış yatak bölgesinde gerçekleşen yanmanın veriminin yüksekliğine, öte yandan serbest bölgede ise aynı eğilimin daha yavaş cereyan etmesi serbest bölgede uçucu maddenin yanmasına işaret etmektedir.

Şekil 3 ve 12-14 yakıcı boyunca modelin sıcaklık öngörülerinin geri döngüsüz kireçtaşı katkısız/katkılı ve geri döngülü kireçtaşı katkılı deneylerden alınan ölçümlerle kıyaslamasını göstermektedir. Şekillerden görülebileceği gibi modelin öngörümüleri yapılan ölçümlerle son derece uyum içerisindedir. Gaz sıcaklığında yakıcı sonundaki düşüş son modülde bulunan soğutucu serpantininden kaynaklanmaktadır.

Şekil 4 ve 5 yakıcı boyunca modelin sıcaklık öngörülerinin geri döngülü, kireçtaşı katkısız deneylerden alınan ölçümlerle kıyaslamasını göstermektedir. Şekillerden görülebileceği gibi modelin öngörümüleri yatak bölgesinde yapılan ölçümlerle son derece uyum içerisindedir. Serbest bölgede ise modelin öngörümüleri ölçümlerden uzaklaşmaktadır. Serbest bölgede



Şekil 20. Deneý 4-6'da yakıcı boyunca ölçülen NO_x konsantrasyonları.

öngörülerle ölçümler arasında görülen farklılığın nedeni yakıcı modelinde ışıyım ısı transferinin yer almamasıdır.

Bu durum yakıcı ve ışıyım ısı transferi modellerinin eş zamanlı çözülecek şekilde birleştirilmesi gereğini göstermiştir. Gaz sıcaklığında yakıcı sonundaki düşüş yine son modülde bulunan soğutucu serpantininden kaynaklanmaktadır.

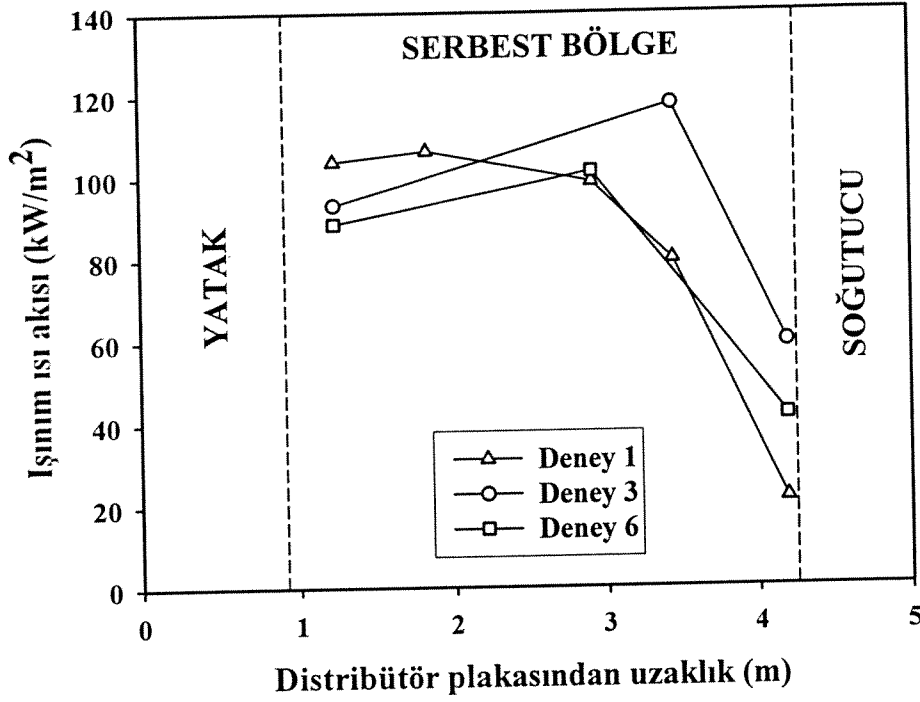
Tablo 11'de, öngörülen ve deney sonucu elde edilen kükürt tutma verimleri karşılaştırılmaktadır. Tablodan görülebileceği gibi öngörülen kükürt tutma verimleri deneysel değerlere oldukça yakındır.

Tablo 11. Deneysel ve model öngörümü kükürt tutma verimleri.

	Deneysel Kükürt Tutma Verimi, %	Kükürt Tutma Verimi Model Öngörüsü, %
Deney 4	58	53
Deney 5	79	79
Deney 6	93	85

2.4.2 Işıyım Isı Akısı Ölçümleri

Işıyım ısı akısı ölçümleri kireçtaşı katkısız geri döngüsüz/döngülü deneylerde ve kireçtaşı katkılı geri döngülü deneyde (Deney 1, 3 ve 6) gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde yatışkın durumda serbest bölge boyunca alınan ölçümler sonucu elde edilen dağılımlar Şekil 21'de sunulmuştur. Şekilde görüldüğü gibi Deney 1'de duvarlara düşen ışıyım ısı akısı yatak yüzeyine en yakın ölçüm noktasında 100 kW/m^2 civarında olup serbest bölgenin yaklaşık yarısına denk gelen 2.9 m seviyesine kadar az bir değişim göstermektedir. Bu noktadan itibaren yukarı doğru serbest bölge üzerindeki soğutucunun etkisiyle ışıyım ısı akısı düşüşe geçmekte, soğutucu öncesinde 20 kW/m^2 düzeyine inmektedir. Elde edilen bu dağılım Şekil 6'da Deney 1 için verilen normalize edilmiş sıcaklık dağılımıyla birlikte incelendiğinde sıcaklık ve ışıyım ısı akısı profillerinin aynı eğilimi gösterdiği görülmektedir. Işıyım ısı transferinin sıcaklığa doğrudan bağlı olduğu düşünüldüğünde elde edilen bu sonuç yapılan ölçümlerin başarılı olduğunu göstermektedir.



Şekil 21. Deney 1, 3 ve 6 için serbest bölge duvarları üzerine düşen ışınlım ısı akısı ölçümleri.

Geri döngünün serbest bölge duvarları üzerine düşen ışınlım ısı akısına etkisi Deney 1 ve Deney 3'ün ısı akısı ölçümleri karşılaştırıldığında açıkça görülmektedir. 1.23 m yüksekliğinde alınan ölçümlerde geri döngüsüz deneydeki ışınlım ısı akısının diğerinden bir miktar fazla olduğu görülmektedir. Bu durumun temel sebebi Tablo 3'den de görülebileceği gibi, Deney 1'deki yatak sıcaklıklarının Deney 3'dekilerden fazla olmasıdır. Dolayısıyla yatağa yakın noktada, Deney 1'de daha yüksek ısı akısı elde edilmesi beklenen bir sonuçtur. Soğutucunun etkisinin fazla gözlenmediği bölgelerde, 3.44 m seviyelerine kadar, alınan ölçümler incelendiğinde serbest bölgede yukarı doğru ilerlendiğinde, geri döngüsüz deneyde yan duvarlara düşen ışınlım ısı akısının azalırken geri döngülü deneyde önemli ölçüde arttığı görülmektedir. Bunun nedenlerinden biri, Şekil 3 ve 5'te de görüleceği gibi, geri döngülü deneyde döngüsüz deneye göre sıcaklığın serbest bölgede ciddi ölçüde artış göstermesidir. ışınlım ısı transferinin geri döngülü deneyde artmasının bir sebebi de serbest bölgede yoğunlaşan parçacıkların soğurma, yayma ve saçılımla ışınlım ısı transferine katkıda bulunmasıdır. Ayrıca soğutucuya yaklaştıkça, beklendiği gibi, ışınlım ısı akısı iki deneyde de azalmaktadır. Sonuç olarak serbest bölge duvarlarına düşen ışınlım ısı akısının her iki

deneyde de sıcaklık dağılımıyla aynı eğilimi gösterdiği görülmüştür. Geri döngülü deneyde serbest bölgenin üst kısımlarındaki ışıınım ısı akısı diğer deneyle karşılaştırıldığında geri döngünün yaklaşık % 45 artışa sebep olduğu belirlenmiştir.

Geride döngülü deneyler olan Deney 6 (kireçtaşı) ve Deney 3 (kireçtaşı) ölçümleri karşılaştırıldığında iki deneyde de yukarıda açıklanan eğilimlerin benzer nitelikte olduğu ancak kireçtaşı deneyde daha düşük ısı akıları ölçüldüğü görülmektedir. Şekil 5 ve 14'deki sıcaklık profilleri göz önüne alındığında bu düşüşün serbest bölge sıcaklıklarına bağlantılı olarak gerçekleştiği sonucu çıkmaktadır.

2.4.2.1 Serbest Bölgede Işıınım Isı Transferi Modeli

Serbest bölgede ışıınım ısı transferinin modellenmesi için bu bölge üç boyutlu bir kapalı hacim olarak düşünülmüştür. Dikdörtgenler prizması şeklindeki bu kapalı hacmin alt sınırını yatak yüzeyi, üst sınırını da serbest bölge soğutma tüpleri oluşturmaktadır. Serbest bölge içinde bulunan yanma gazları ve uçucu kül parçacıkları yayma, soğurma ve saçınım ile ışıınım ısı transferine katkıda bulunmaktadır. Bu sistemde ışıınım ısı transferinin modellenmesi için duvarların ve ortamın ışıınım özelliklerinin belirlenmesi gereklidir.

Ortam ve duvar sıcaklık dağılımları için ışıınım ölçümlerinin yapıldığı zaman diliminde serbest bölge ısı çift ölçümlerinden elde edilen ve Tablo 12'de gösterilen fonksiyonlarla tanımlanmıştır. Üst yüzeydeki soğutma tüpleri ve bunların arasında kalan boşluklar gri bir yüzeyle temsil edilmiş olup sıcaklıklar ve yayma katsayıları alanlara göre ağırlıklı ortalamalar alınarak bulunmuştur. Kapalı hacmin alt sınırındaki yatak yüzeyi siyah bir yüzey olarak kabul edilmiştir.

Model için gerekli girdilerin sağlanabilmesi için son olarak ışıınım ısı transferine katılan yanma gazları (CO₂ ve su buharı) ve uçucu kül parçacıkları içeren ortamın ışıınımsal özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu karışım yayan, soğuran ve izotropik saçılım yapan ve serbest bölge boyunca homojen özelliklere sahip olan bir ortam olarak varsayılmıştır. Bu varsayımın temelinde serbest bölge boyunca ölçülen ve hesaplanan CO₂ ve H₂O konsantrasyonlarının ciddi bir değişim göstermemesi ve serbest bölgedeki parçacık yoğunluğu ve boyut dağılımının siklon ve torba filtrede toplanan parçacıkların özellikleriyle belirlenmiş olması yatmaktadır. Gazların yayma katsayıları Leckner bağdaşımalarıyla, parçacık bulutunun yayma ve saçma katsayılarıysa boyut dağılımı kullanılarak Mie teorisi vasıtasıyla hesaplanmıştır. Tüm bu hesaplamaların detaylı açıklamaları (Selçuk ve diğerleri,

2002)de mevcuttur. Işınımsal özelliklerin belirlenmesi için kullanılan tüm deneysel parametreler Tablo 12’de sunulmuştur. Sonuç olarak elde edilen ışınımsal özellikler model için gerekli diğer tüm verilerle birlikte Tablo 13’de gösterilmiştir.

2.4.2.2 Işınım Isı Transferi Denkleminin Çözümü

Serbest bölgede ışınım ısı transferinin modellenmesi için integro-differansiyel bir denklem olan ve analitik çözümü mümkün olmayan ışınım ısı transferi denkleminin çözülmesi gerekmektedir. Bu çalışmada daha önce performansı serbest bölgedeki gibi saçınımlı ortam içeren çeşitli deneme problemleri üzerinde test edilmiş olan *belirli yönler yönteminin çizgiler metoduyla çözümü* tekniği kullanılmıştır (Selçuk ve diğerleri, 2002). Bu metodun uygulanması için Carlson ve Lathrop tarafından önerilen S_N açısız bölünme düzeni, adi diferansiyel denklem çözücü olarak RKF45 (Runge-Kutta-Fehlberg integrasyon) ara programı kullanılmıştır. Uzaysal türevler ise ışınım yönünü dikkate alan üç-noktalı sonlu farklar bağıntısı ile temsil edilmiştir.

Tablo 12. Parçacık ve gaz özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan deneysel veriler.

	Deney 1	Deney 3
Akışkanlaştırma hızı (m/sn)	3.03	2.83
<i>Siklon akımı</i>		
Debi (kg/sa)	23.65	26.58
Özkütle (kg/m ³)	1028.6	930.7
Boyut aralığı (µm)	0.5<dp<710	0.5<dp<850
Boyut dağılımı fonksiyonu, $W(d_p)=exp(-b.d_p^n)$	b=0.0042, n=1.22	b = 0.0013, n=1.43
Parçacık yükü (kg/m ³)	0.011	0.129
<i>Torba filtre akımı</i>		
Debi (kg/sa)	1.08	3.43
Özkütle (kg/m ³)	535.9	633.4
Boyut aralığı (µm)	0.5<dp<124	0.5<dp<68
Boyut dağılımı fonksiyonu, $W(d_p)=exp(-b.d_p^n)$	b=0.078, n=1.70	b=0.051, n=1.4
Parçacık yükü (kg/m ³)	0.0005	0.0017
<i>Geri döngü akımı</i>		
Debi (kg/sa)	0.0	238.9
H ₂ O konsantrasyonu (%)	10	10
CO ₂ konsantrasyonu (%)	10	11

* Geri döngü akımının diğer özellikleri siklonda tutulan parçacıkların özellikleriyle aynıdır.

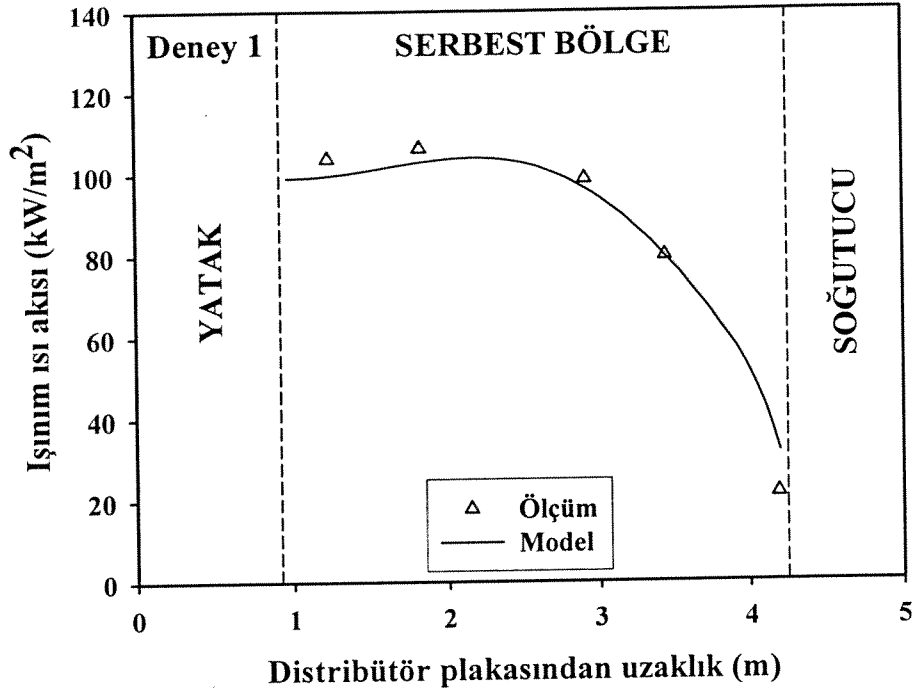
Tablo 13. Işınım ısı transferi modeli girdileri.

	Deney 1		Deney 3	
Gaz yayma katsayısı, κ_g	0.44		0.45	
Parçacık bulutu yayma katsayısı, κ_p	0.6064		4.0117	
Parçacık bulutu saçma katsayısı, σ_s	1.8259		9.4914	
Parçacık söndürme katsayısı,	2.4328		13.5031	
$\beta_p = \kappa_p + \sigma_s$				
Ortam yayma katsayısı, $\kappa = \kappa_p + \kappa_g$	1.0426		4.4623	
Ortam söndürme katsayısı, $\beta = \kappa + \sigma_s$	2.8685		13.9537	
Üst yüzey yayma katsayısı	0.87			
Yan yüzey yayma katsayısı	0.33			
Alt yüzey yayma katsayısı	1.00			
Üst yüzey sıcaklığı	39.5		35.6	
Alt yüzey sıcaklığı	872		851	
Yan yüzey sıcaklık dağılımı	$a_0 = 839.046$	$a_3 = 209.66$	$a_0 = 873.347$	$a_3 = -89.82$
$T_w(h) = \sum_{i=0}^5 a_i h^i$	$a_1 = 192.095$	$a_4 = -56.238$	$a_1 = -163.26$	$a_4 = 21.003$
	$a_2 = -318.964$	$a_5 = 4.9302$	$a_2 = 195.607$	$a_5 = -2.032$
Gaz sıcaklık dağılımı	$b_0 = 876.512$	$b_4 = -30.562$	$b_0 = 841.001$	$b_4 = -38.22$
$T_g(h) = \sum_{i=0}^6 b_i h^i$	$b_1 = -15.501$	$b_5 = 7.83943$	$b_1 = -18.493$	$b_5 = 7.649$
	$b_2 = -1.3505$	$b_6 = -0.7129$	$b_2 = -37.831$	$b_6 = -0.610$
	$b_3 = 42.6516$		$b_3 = 80.490$	

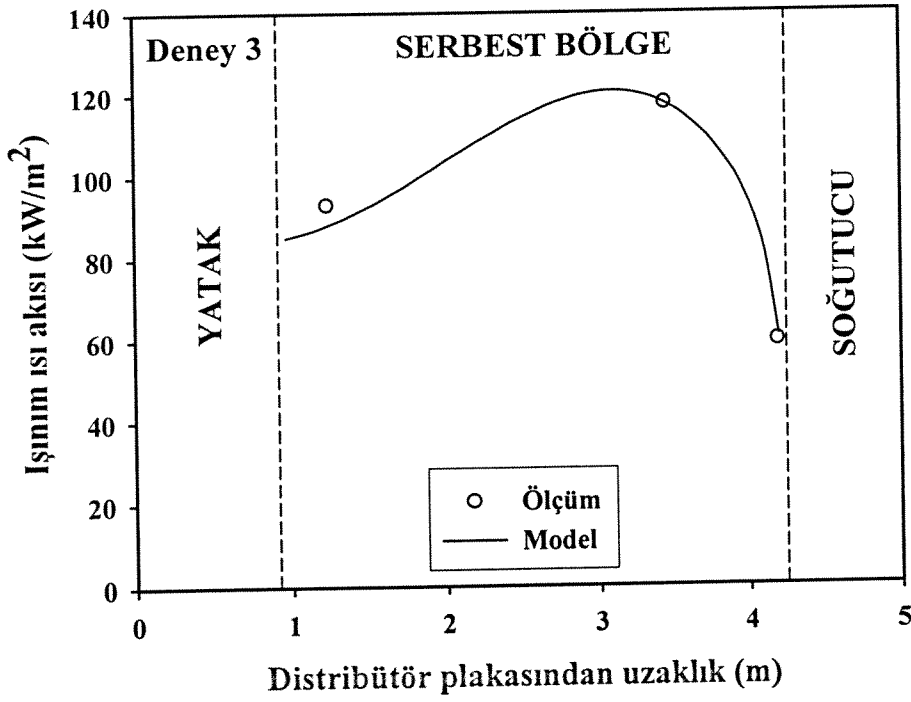
2.4.2.3 Sonuçlar

Deney 1 ve 3'e uygulanan model sonucunda elde edilen serbest bölge yan yüzeyine düşen ışınım ısı transferi dağılımlarının ölçümlerle karşılaştırılması Şekil 21 ve 22'de sunulmuştur. Görüldüğü gibi model öngörümüleri ısı akısı ölçümleriyle tam bir uyum içerisindedir.

Serbest bölgede ışınım ısı transferinin başarıyla modellendiğini gösteren bu sonuçlar ışığında, serbest bölgede geri döngüden kaynaklanan parçacık yükünün ışınım ısı transferine etkisini anlayabilmek amacıyla bir parametrik çalışma yapılmıştır. Deney 3 temel alınarak yapılan bu çalışmada parçacıkların olmadığı varsayılmış, ve bu durumda serbest bölge yüzeyine düşen ışınım ısı akısının ne şekilde değişeceği incelenmiştir. Parçacıkların olmaması durumunda ısı akısı profilinin Şekil 23'le aynı eğilimi gösterdiği ancak profilin tepe noktasını oluşturan 3 m yükseklikteki ısı akısının % 4 kadar azaldığı görülmüştür. Bu sonuca göre Deney 3'te serbest bölgedeki parçacık yükünün yüksek olmasına rağmen parçacıkların duvarlar üzerine düşen ışınım ısı akısını belirgin bir şekilde etkilemediği anlaşılmıştır.



Şekil 22. Deney 1'deki serbest bölge yan duvarları üzerine düşen ışınım ısı akısı ölçümleri ve elde edilen model öngörümleri



Şekil 23. Deney 3'deki serbest bölge yan duvarları üzerine düşen ışınım ısı akısı ölçümleri ve elde edilen model öngörümleri

3 SONUÇLAR ve ÖNERİLER

3.1 Sonuçlar

Projede elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

1. Beypazarı linyitinin sahip olduğu yüksek uçucu madde/sabit karbon oranı yanma veriminin kaliteli kömürlerde geri döngü ile elde edilebilen % 98'ler seviyesine geri döngüsüz ulaşmasını sağlamaktadır. Bu da kükürt oranı düşük linyitlerin dolaşımı akışkan yataklara göre kurulumu daha ucuz ve işletimi daha kolay olan kabarcıklı akışkan yataklarda yakılabileceğini göstermiştir.
2. Geri döngünün içerisindeki kullanılmamış ya da kısmen kullanılmış kireçtaşı parçacıkları sayesinde kalsiyum kullanım oranını artırarak kükürt tutma verimini % 22 yükseltmiş ve bunun bir sonucu olarak kireçtaşı ihtiyacını azalttığı görülmüştür.
3. Geri döndürülen parçacıklar yatak sıcaklıklarında düşüşe ve serbest bölge sıcaklıklarında ise artışa neden olmuştur.
4. Kireçtaşı katkılı deneylerde yatağa kireçtaşı eklenmesi ve endotermik bir reaksiyon olan kalsinasyon nedeniyle yatak ve serbest bölge sıcaklıklarında kireçtaşı katkısız deneylere kıyasla bir düşüş gözlenmiştir.
5. Geri döngü ile serbest bölgede artan parçacık miktarına bağlı olarak bu bölgedeki ısı transferi katsayısı yaklaşık % 27 artmıştır.
6. Geri döngü ile serbest bölgede artan kok miktarının katkısıyla NO_x emisyonlarında geri döngüsüz işletme koşullarına göre bir azalma gözlenmiştir.
7. Kireçtaşı katkılı deneylerde kireçtaşı katkısız deneylere oranla daha düşük NO_x emisyonları elde edilmiştir.
8. Serbest bölge duvarlarındaki ışıma ısı akısı ölçümlerinin bu bölgedeki parçacık yükünden ziyade sıcaklık dağılımından etkilendiği anlaşılmıştır.
9. Deneylerde yakıcı boyunca ölçülen O₂, CO, CO₂ konsantrasyonları, sıcaklık profilleri, deneysel kükürt tutunumu verimi ve ışıma ısı akısı ölçümleri ile modellerin sonuçları son derece uyum içerisinde.

3.2 Öneriler

Bitirilen bu çalışmanın sonuçları ışığında aşağıda önerilen araştırmaların yapılmasında yarar görölmektedir.

1. NO_x ve CO emisyonlarının azaltılabilmesi için gerekli olan kademeli hava besleme yönteminin uygulanarak, NO_x ve CO dağılımlarını veren ölçümlerin alınması.
2. Daha ziyade kademeli hava besleme yönteminde ortaya çıkan ve sera etkisinin artması ile ozon tabakasının incelmesine neden olduğu öne sürölen N₂O dağılımlarının veya emisyonlarının ölçölmesi.
3. Linyitin uçucu madde içeriğinin homojen gaz fazı tepkimeleri üzerindeki etkisinin icelenebilmesi için HCN ve NH₃ gibi gazların konsantrasyonlarının ölçölmesi.
4. Azot oksit emisyonlarının aynı anda cereyan eden homojen ve heterojen tepkimelerden kaynaklanması; bu tepkimelerin emisyon üzerine olan etkilerinin tek tek incelenmesini zorlaştırmaktadır. Bu nedenle NO_x emisyonlarının deneylere paralel olarak matematiksel modelleme aracılığı ile incelenmesi.
5. İz elementlerin yatak külü ve uçucu küilde dağılımlarının ve bunların parçacık boyutuyla olan ilişkisinin incelenmesi.
6. Yakıcı ve ışıınım modellerinin eş zamanlı çözülecek şekilde birleştirilmesi.

4 KAYNAKLAR

- ANTHONY D. B. ve Howard J. B., Coal Devolatilization and Hydrogasification, *AICHE Journal*, 22, 4, 625, (1976).
- BARLAS D., Experimental Investigation of In-Situ Desulfurization in METU 0.3 MW AFBC Test Rig, (Yüksek Lisans Tezi), ODTÜ Mühendislik Fakültesi, (1994).
- BRAMER E. A., Flue Gas Emissions from Fluidized Bed Combustion, *Atmospheric Fluidized Bed Coal Combustion: Research, Development and Application*, ed: Valk M., Elsevier, Netherlands, 57-58, 63-64, (1995).
- CASTLEMAN J. M., Process Performance of the TVA 20-MW Atmospheric Fluidized-Bed Combustion (AFBC) Pilot Plant, Proceedings of 8th International Conference on FBC, March 18-21, Houston, Teksas, ASME, 1, 196-207, (1985).
- DEĞİRMENCİ E. ve Selçuk N., Dynamic Behaviour of an AFBC Test Rig: An Experimental Study, Proceedings of 15th International Conference on Fluidized Bed Combustion, May 16-19, Savannah, GA, (Ed. R. B. Reuther), ASME, Paper No. FBC99-0100 (in CD-ROM), (1999).
- DEĞİRMENCİ E., Göğebakan Y. ve Selçuk N., Assessment of Catalyst Deactivation Model for Sulfur Retention in Fluidized Bed Combustors, *Combustion Science and Technology Journal*, 153, 95-111, (2000).
- DEĞİRMENCİ E., Dynamic Simulation of Fluidized Bed Combustors, (Doktora Tezi), Orta Doğu Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, (2000).
- FILLA M. ve Scalabrin A., Influence of Scattering of Thermal Radiation by Suspended Particles on the Rate of Heat Transfer in the Freeboard of a 1 MWt Fluidized Bed Combustor, *Proceedings of Heat Transfer in Radiating and Combusting System 2*, 37-47, (1994).
- GOGOLEK P. E. G ve Becker H. A., Calculation of the Expansion of a Bubbling Fluidised Bed of Coarse Particles, *Powder Technol.*, 71, 107, (1992).
- GÖĞEBAKAN Y., Char Attrition in Fluidized Bed Combustors, (Yüksek Lisans Tezi), Orta Doğu Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, (2000).
- GRACE J. R. ve Clift R., On the Two Phase Theory of Fluidization, *Chem. Eng. Science*, 29, 327, (1974).
- KOZAN, M. ve Selçuk, N., Investigation of Radiative Heat Transfer in Freeboard of a 0.3 MW_t AFBC Test Rig, *Combust. Sci. Tech.*, 153, 113-126, (2000).

KRISHNAN R. P., Anthony J., Rajavel M., Srinivasan S. V. ve Rao A. V. J., Combustion of High Ash Indian Coals in a FBC, *Fuel*, 70, 1125-1135, (1991).

KUNII D. ve Levenspiel O., *Fluidization Engineering*, 2nd Edition, Butterworth-Heinaman.

LINDSAY J. J., Morton W. Ve Newey D. C., Radiative Heat Transfer in the Freeboard Region of a Fluidized Bed, *Fluidization V*, 385-392, (1986).

MEULINK J. P., Haasteren A. W. M. B. ve Temmink H. M. G., Proceedings of 8th International Conference on Fluidized Bed Combustion, March 18-21, Houston, Teksas, ASME, 1, 179-195, (1985).

MODRAK T. M., Tang J. T. ve Aulisio C. J., Sulfur Capture and Nitrogen Oxide Reduction on the 6'x6' AFBC Test Facility, Symp. on Combustion Chemistry, American Chemical Society, Las Vegas, Nevada, March 29-April 2, (1982).

ORGAN L., Sulfation Characteristics of Limestone in 0.3 MW AFBC Test Rig, (Yüksek Lisans Tezi), Orta Doğu Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, (1994).

ORGAN L. ve Selçuk N., Transient Sulfation Behavior Limestone Particles in an AFBC Test Rig: Data for Validation Studies, Proceedings of 15th International Conference on Fluidized Bed Combustion, May 16-19, Savannah, GA, (Ed. R. B. Reuther), ASME, Paper No. FBC99-0101 (in CD-ROM), (1999).

SELÇUK N. ve Kırmızıgül Ü., Characteristics of a Fluidized Bed Combustor Burning Low Quality Lignite, *Journal of the Institute of Energy*, 64, 9, 151-156, (1991)

SELÇUK N., Kırmızıgül Ü. ve Oymak O., Development of Know-How for an AFBC Burning Lignites with in-situ Desulfurization, *AFP No: 91-03-04-05*, ODTÜ, Ankara, (1992).

SELÇUK N., Oymak O. ve Barlas D., Investigation of Sulfation Characteristics of AFBC Ashes Using SEM-EDX Technique, Proceedings of the 13th International Conference on FBC, (Ed. Heinschel K. J.), ASME, 1, 351-359, (1995).

SELÇUK N., Değirmenci E., Oymak O. ve Organ L., Determination of NO_x Emissions from a Lignite Fired Fluidized Bed Combustor, TÜBİTAK, MİSAG-89, ODTÜ, Ankara, (1998).

SELÇUK N., Değirmenci E. ve Göğebakan Y., Assessment of Catalyst Deactivation Model for Sulfur Retention in Fluidized Bed Combustors, *Combust. Sci. Tech.*, 153, 95-111, (2000).

SELÇUK N., Değirmenci E. ve Göğebakan Y., Modeling of a Bubbling AFBC with Volatiles Release, 16th Int. Conf. on Fluidized Bed Combustion, ASME, Nevada, USA, Paper No:134, (2001).

- SELÇUK N., Batu A., Ayrançı I., Performance of Method of Lines Solution of Discrete Ordinates Method in the Freeboard of a Bubbling Fluidized Bed Combustor, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer (JQSRT)*, 73, 503-516, (2002).
- STUBINGTON, J. F., Chan S. V. ve Clough S. J., A Model for Volatiles Release into a Bubbling Fluidized-Bed Combustor, *AIChE Journal*, 36, 1, 75, (1990).
- TANG J. T., Duqum J. N. ve Modrak T. M., An Overall Review of the EPRI/B&W 6'x6' Fluidized Bed Combustion Test Facility, The 7th International Conference on Fluidized Bed Combustion, Philadelphia, Pennsylvania, October 25-27, (1982).
- TANG J. T., A Review of Critical Design Requirements for a Utility-Scale Atmospheric Fluidized Bed Boiler, Modern Engineering and Technology Seminar, Taipei, Taiwan, December 16-31, (1984).
- TARTAN M., In-Situ Desulfurization in an Atmospheric Fluidized Bed Combustor, (Yüksek Lisans Tezi), Orta Doğu Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, (1994).
- TOPPER J. M., Cross J. I. ve Goldthorpe S. H., Clean Coal Technology for Power and Cogeneration, *Fuel*, 73, 1056-1063, (1994).
- WILLIAMS B. C., Mc Mullan J. T. ve Campell P., Clean Power Generation from Coal, *Fuel*, 73, 1069-1073, (1994).
- VALK M. ve Bijvoet U. H. C., Combustion, *Atmospheric Fluidized Bed Coal Combustion: Research, Development and Application*, ed: Valk M., Elsevier, Netherlands, 1-49, (1995).
- VERHOEFF F. ve Holtzer G. T., 90 MWth Industrial FBC Boiler, *Atmospheric Fluidized Bed Coal Combustion: Research, Development and Application*, ed: Valk M., Elsevier, Netherlands, 387-455, (1995).
- ZHAOPING Z. ve Jixiang L., Desulfurization in the Reducing State and Denitrification with Ammonia Injection in an FBC Test Facility, *Fuel*, 77, 7, pp. 757-762, (1998).
- ZHENG J., Yates J. G. ve Rowe P. N., A Model for Desulphurization with Limestone in a Fluidized Coal Combustor, *Chemical Engineering Science*, 37, 2, 167-174, (1982).

EK 1
RAPOR SONUÇLARININ UYGULAMAYA DÖNÜŞTÜRÜLMESİ İÇİN
GEREKLİ ÖNERİLER

Daha çok Kuzey Amerika ve Avrupa'nın kaliteli kömürleri için geliştirilmiş olan kazan tasarımlarının lisansı ile ülkemizde kurulmuş olan kazanların emisyon yönünden denetiminin sağlanması ve bu raporda verilen sonuçlara göre uygulayıcıların işletme koşullarında gerekli değişikliklere zorlanması, kurulmakta ve kurulması planlanan akışkan yataklı kazan tasarımlarının ise işletmeye alınmadan önce ülkemiz linyitlerine adaptasyonu için, uygulayıcıların bu konuda uluslararası ve ulusal araştırmalar yapan uzman kuruluşlarla temasının sağlanması gerekmektedir. Bu konuda TÜBİTAK'ın katkısı, akışkan yataklı yakıcı teknolojisinin Türk linyitlerine adaptasyonu için gereken tüm verilerin elde edilebileceği donanıma haiz pilot ölçekli sistemlerde yapılacak araştırmaların desteklenmesini sağlamak olacaktır.

PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Kodu: MİSAG-159
Proje Başlığı: Temiz Kömür Teknolojilerinden Akışkan Yatakta Yakma Teknolojisi ile Türk Linyitlerinden Temiz ve Verimli Enerji Eldesi
Proje Yürütücüsü ve Yardımcı Araştırmacılar: Prof. Dr. Nevin Selçuk, Araş. Gör. Tanıl Tarhan, Araş. Gör. Yusuf Gögebakan, Aykan Batu, Araş. Gör. Işıl Ayrancı, Araş. Gör. Hakan Harmandar, Araş. Gör. Hakan Altındağ
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi: Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, 06531
Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi: Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, 06531
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri: 01 Eylül 2000-01 Eylül 2002
Öz: Bu çalışmada ODTÜ Kimya Mühendisliği Bölümü'nde kurulu olan 0.3 MW ısı gücündeki kabarcıklı akışkan yataklı yakıcı üzerinde tipik bir Türk linyitini temsil eden kül, uçucu madde ve kükürt içeriği kaliteli kömürlere göre yüksek olan Beypazarı linyiti geri döngüsüz/döngülü ve kireçtaşı katkısız/katkılı işletme koşullarında yakılarak yakıcı boyunca ve baca gazında O ₂ , CO ₂ , CO, SO ₂ ve NO _x konsantrasyonları, sıcaklık dağılımları ve serbest bölgede ışıyım ısı akısı ölçümleri belirlenmiştir. Kireçtaşı katkısız deney koşulları yanma verimi açısından incelendiğinde, Beypazarı linyitinin tek geçişte % 98 verimle yandığını ve bu nedenle geri döngünün yanma verimi üzerine önemli bir etkisi olmadığını göstermiştir. Kireçtaşı katkılı deneylerde ise geri döngü kükürt tutma veriminde % 22 artışa neden olmuştur. Ayrıca kireçtaşı katkısız/katkılı deneylerde geri döngünün NO _x emisyonlarını düşürdüğü gözlenmiştir. Geri döngünün yatak sıcaklığını azalttığı, serbest bölge sıcaklığını ise arttırdığı tesbit edilmiştir. Duvarlardaki ışıyım ısı akısı ölçümlerinin ise serbest bölgedeki parçacık yükünden ziyade sıcaklık dağılımından etkilendiği görülmüştür. Daha önce akışkan yataklı yakıcı için geliştirilmiş olan yakıcı ve ışıyım ısı transfer modelleri deney koşullarına uygulanmış ve model sonuçlarının ölçümlerle uyum içinde olduğu görülmüştür.
Anahtar Kelimeler: Akışkan yataklı yakıcı, linyit, geri döngü, ışıyım, emisyonlar, modelleme.
Projeden Kaynaklanan Yayınlar: Yayın, proje raporunun teslimini takiben ele alınacaktır.
Bilim Dalı: Temel İşlemler ve Termodinamik Doçentlik Bilim Dalı Kodu: 603 01 02