



YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Akışkan yat. türk kömürl. yakıl.

Doktora Tezi

Akışkan yat. türk kömürl. yakıl.

M.Kemal Urkan

YILDIZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Kim

25000PTL

96

AKIŞKAN YATAKTA TÜRK KÖMÜRLERİNİN YAKILMASI VE
UÇUCU MADDE YANMA DAVRANIŞININ
MEVCUT MODELLERLE KARŞILAŞTIRILARAK İNCELENMESİ

(DOKTORA TEZİ)

KİMYA YÜK. MÜH. M. KEMAL URKAN

İSTANBUL 1990

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
KÜTÜPHANE DOKÜMANTASYON
DAİRE BAŞKANLIĞI

Kot R 361
:... 109

Alındığı Yer :... Fen. Bil. Enstitüsü, ...
.....

Tarih :... 25/3/1992

Fatura :... -

Fiyatı :... 25.000 TL.

Ayniyat No :... 1/1

Kayıt No :... 48251

UDC :.....

Ek :.....

*

Y. T. Ü.

KÜTÜPHANE DOK. DAL. BAŞKANLIĞI

YILDIZ ÜNİVERSİTESİ
D.B. no 46091

YILDIZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTUSU

AKIŞKAN YATAKTA TÜRK KÖMÜRLERİNİN YAKILMASI VE
UÇUCU MADDE YANMA DAVRANIŞININ
MEVCUT MODELLERLE KARŞILAŞTIRILARAK İNCELENMESİ

109

(DOKTORA TEZİ)

KİMYA YÜK. MÜH. M. KEMAL URKAN



İSTANBUL 1990

ÖNSÖZ

Doktora tez yürütücüm Prof.Dr. Doğan Özgür'e, gösterdiği yakın ilgi, anlayış ve yardımları için teşekkür ederim.

Doktora öğrenimim boyunca, başından sonuna kadar bana destek olan, her zaman yakın ilgi ve anlayış gösterip yardım eden, bu çalışma için büyük çaba sarfederek, olumlu eleştiri ve önerileriyle beni yönlendiren, tezime en az benim kadar katkısı olan değerli hocam Prof.Dr. Mahir Arıkol'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Doktora öğrenimim için beni teşvik eden ve izin veren 1985 yılı MESAB Bölüm Başkanı değerli hocam Prof.Dr. Eralp Üzil'e,

Manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve varlıkları bana hep güç veren değerli hocalarım Prof.Dr. Enis Kadioğlu ve Prof.Dr. Ekrem Ekinci'ye,

Deneysel çalışmalarım boyunca teknik ve idari yardımlarını esirgemeyen çalışma arkadaşlarımdan Doç.Dr. Hasan Heperkan'a, Dr. Saim Atakan'a, Yıldız Üniveristesi'nden Dr.Dürriye Bilge'ye, Mak.Yük.Müh. Mehtap Özcan'a, Mak. Müh. Yücel Erdallı'ya, Teknisyen İbrahim Kurtdere'ye, Bölüm Sekreterimiz Aynur Demirtaş'a, Malzeme Bölümü Başkan Vekili Yük. Uçak Müh. Özgür Ergun'a, MESAB Bölümü Başkan Vekili Y.Doç.Dr. Aydın Şalcı'ya ve tüm MESAB çalışanlarıyla birlikte TÜBİTAK kurumuna teşekkür ederim.

Lisans, lisans üstü ve doktora öğrenimim boyunca maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, beni sürekli teşvik eden, varlıkları her zaman bana güç vermiş olan değerli ablam ve eniştem Leyla ve Erol Bağcıgil'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

M.Kemal URKAN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	.....	II
ÖZET	.....	V
ABSTRACT	.....	VI
ŞEKİL LİSTESİ	.....	VII
TABLO LİSTESİ	.....	X
SEMBOLLER	.....	XI
BÖLÖM 1 GİRİŞ	.....	1
BÖLÖM 2 GENEL BİLGİLER	.....	3
2.1 Türk Linyitlerine Genel Bir Bakış	.....	3
2.2 Akışkanlaşma	.....	5
2.3 Akışkan Yataklı Yakma Sistemleri	.....	9
2.4 Uçucu Madde ve Akışkan Yataklı Sistemlerdeki Önemi	.....	19
BÖLÖM 3 UÇUCU MADDENİN AKIŞKAN YATAKTA YANMA DAVRANIŞI	.....	21
3.1 Genel Bilgiler	.....	21
3.2 Uçucu Madde Yanma Süresini Ölçme Yöntemleri	.....	23
3.3 Akışkan Yatakta Uçucu Madde Yanması Üzerine Yapılan Çalışmalar	.....	24
3.4 Türk Kömürleri Üzerinde Yapılan Çalışmalar	.....	34
BÖLÖM 4 DENEY DÜZENİ VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR	.....	41
4.1 Deneylerde Kullanılan Akışkan Yatak Düzenliği	.....	41
4.2 Kömürlerin Seçimi	.....	46
4.3 Kömür Analizlerinin Yapılışı	.....	46
4.4 Deneysel Yöntem	.....	48
4.5 Deneysel Olarak İncelenen Parametreler	.....	50
4.6 Kömür Tanecığının Merkezinde Sıcaklığın Kaydedilmesi	.....	52

BÖLÜM 5	DENEY SONUÇLARI	54
5.1	Kömür Analizleri	54
5.2	Uçucu Madde Yanması ile İlgili Gözlemler	54
5.3	Uçucu Madde Yanma Süreleri	63
5.4	Tanecik Merkezinde Sıcaklık Değişiminin Kaydedilmesi	64
BÖLÜM 6	DENEY SONUÇLARININ YORUMLANMASI VE ÖNERİLER	79
6.1	Uçucu Madde Yanması ile İlgili Gözlemler	79
6.2	Kömür Taneciğinin Sıcaklığının Zamanla Değişimi	80
6.3	Uçucu Madde Yanma Süreleri	81
6.4	Isı Transferinin Uçucu Madde Yanma Süresine Etkisi	85
6.5	Kömür Rankının Uçucu Madde Yanma Süresine Etkisi	88
6.6	Sonuç ve Öneriler	93
EK		96
LİTERATÜR		101
ÖZ GEÇMİŞ		107



ABSTRACT

ÖZET

Bu çalışmada rankları bitümlü ile düşük kaliteli linyit arasında değişen 12 Türk kömürü ve bir yabancı kömür laboratuvar ölçeğinde bir akışkan yatakta yakılarak uçucu maddenin çıkış-yanma süreci incelenmiştir.

Uçucu çıkış-yanma süresi, karakteristik uçucu madde alevi gözlenerek ölçülmüş, ölçülen süreler üzerinde yatak sıcaklığı, rank, tanecik boyu, nem ve kül gibi kömür özelliklerinin etkisi araştırılmıştır.

Akışkan yatakta yakma deneylerinde 1.00-11.20 mm arasında değişen 7 değişik tanecik büyüklüğü ve 650-920°C arasında 7 değişik sıcaklık kullanılmıştır.

13 değişik kömür kumla akışkanlaştırılmış bir yatağa üstten beslenmiş, her kömür için hem kuru, hem de orijinal nemli besleme yapılmıştır.

Derlenen deneysel sonuçların değerlendirilmesinde yardımcı olması için her kömürün standart kısa analizi ve element analizi dışında azot ortamında termogravimetrik analizleri ve değişik sıcaklıklarda kısa analizleri yapılarak uçucu madde-sıcaklık arasındaki ilişki belirlenmiştir.

Önceki çalışmalarda uçucu çıkış-yanma sürecinde hız kontrol edici adımın tanecik-yatak arasında ve tanecik içinde ısı transferi olduğu ileri sürüldüğünden, tanecik-yatak arasındaki ısı transferi katsayısı da deneysel olarak ölçülmüştür, böylece diğer araştırmacılar tarafından önerilen modellerin sınanması mümkün olmuştur.

Sonuçta, deneysel sonuçların ısı transferini kontrol edici adım olarak kabul eden modellere nitel olarak uyum gösterdiği saptanmıştır. Ancak ısı transferinin yanısıra kömür rankının da uçucu madde çıkış-yanma sürecinde etkili bir rol oynadığı, bu olguyu yeterli düzeyde hesaba katmayan mevcut modellerin deneysel sonuçları ile nicel olarak uyum sağlamadığı gözlenmiştir.



ABSTRACT

The fluidized bed combustion behaviour of volatiles has been experimentally investigated for twelve Turkish coals and one imported coal with ranks ranging from bituminous to low rank lignite.

Devolatilization-combustion times have been measured by visual observation of the characteristic flame formed during combustion of volatiles and the effects of bed temperature, particle size, moisture, ash content and type of coal have been studied. Experiments have been conducted with seven different particle sizes ranging from 1.00 to 11.20 mm at seven different temperatures ranging from 650°-920°C. For each coal, behaviour of original samples have been compared with predried samples.

In addition to fluidized bed combustion experiments and standart proximate and elemental analyses of coal samples, thermogravimetric analyses under inert atmosphere and special proximate analyses at different temperatures have been performed to establish the relationship between volatile matter release and temperature for each coal.

In order to arrive at qualitative and quantitative assessments of available models and conditions, another important parameter, particle-bed heat transfer coefficient has also been measured under actual experimental conditions.

It has been concluded that experimental data on combustion of Turkish coals exhibit qualitative agreement with models based on heat transfer to and through the coal particle as the controlling mechanism.

It has also been concluded that coal type plays an important role in devolatilization-combustion behaviour as indicated by decreasing combustion devolatilization times with decreasing coal rank. Hence significant quantative disagreement has been observed between calculations based on models which do not take coal type into account properly and experimental measurements.

ŞEKİL LİSTESİ		
Şekil 2.1	Akışkanlaşma	7
Şekil 2.2	Akışkanlaşma ve Basınç Düşüşü	7
Şekil 2.3	Kabarcık ve Emülsiyon Fazı	8
Şekil 2.4	Atmosferik Basıncıta Çalışan Kabarcıklı Bir Akışkan Yatak	11
Şekil 2.5	Hızlı ve Sirkülasyonlu Bir Akışkan Yatak	17
Şekil 2.6	Sıcak Hava Çevrimli Tipik Bir Basıncılı Akışkan Yatak	18
Şekil 3.1	Kömür Beslemenin Yatak Üzerinden Yapıldığı Bir Durum	23
Şekil 3.2	Tüy "Plume" Modelinin Şeması	27
Şekil 3.3	Kömür Beslemenin Yatak Altından Yapıldığı Bir Durum	29
Şekil 3.4	Kömür Taneciği-Uçucu Madde Bulut ve Alevinin Şematik Gösterimi	30
Şekil 3.5	Uçucu Maddenin Isıl Değeri ile Kuru Külsüz Bazdaki Isıl Değer Arasındaki İlişki	35
Şekil 3.6	Akışkan Yatakta Uçucu Maddenin Neden Olduğu Sıcaklık Artışları	38
Şekil 3.7	Uçucu Madde Alevine Oksijen Konsantrasyonunun Etkisinin Şematik Gösterilmesi	38
Şekil 4.1	Akışkan Yatak Laboratuvarı	42
Şekil 4.2	Akışkan Yatağın Şematik Gösterimi	44
Şekil 4.3	Akışkan Yatağın Fotoğrafı	45

VIII

Şekil 4.4	Uçucu Madde Yanma Süresi Ölçme Deney Sisteminin Şematik Gösterimi	45
Şekil 4.5	Tanecik Merkezine Isıl Çift Yerleştirmenin Şematik Gösterimi	53
Şekil 5.1	Seyitömer Kömürünün Sıcaklığa Bağlı Olarak Değişen Uçucu Madde Miktarı	61
Şekil 5.2	Uçucu Madde Alevinin Fotoğrafı	62
Şekil 5.3	Küreselleştirilmiş Kömür Taneciklerinin Yanmadan Önce ve Sonra Çekilmiş Fotoğrafı	62
Şekil 5.4	Yanmadan Sonra Patlayan Kömür Taneciklerinin Fotoğrafı	63
Şekil 5.5	İthal, Soma-1 ve Konya İlgün Kömürlerinin Uçucu Madde Yanma Sürelerinin Tanecik Çapı ile Değişimi	69
Şekil 5.6	Seyitömer ve Kemerburgaz Kömürlerinin Uçucu Madde Yanma Sürelerinin Tanecik Çapı ile Değişimi	70
Şekil 5.7	Yatağan ve Karlıova Kömürlerinin Uçucu Madde Yanma Sürelerinin Tanecik Çapı ile Değişimi	71
Şekil 5.8	Eşme ve Orhaneli Kömürlerinin Uçucu Madde Yanma Sürelerinin Tanecik Çapı ile Değişimi	72
Şekil 5.9	Kuru Bazda Kemerburgaz ve Seyitömer Kömürlerinin Uçucu Madde Yanma Sürelerinin Tanecik Çapı ile Değişimi	73
Şekil 5.10	İthal, Kemerburgaz ve Seyitömer Kömürlerinin Uçucu Madde Yanma Sürelerinin Sıcaklık ile Değişimi	74
Şekil 5.11	Çan ve Soma-1 Kömürlerinin Uçucu Madde Yanma Sürelerinin Sıcaklık ile Değişimi	75

Şekil 5.12	Konya-İlgın ve Yatağan Kömürlerinin Uçucu Madde Yanma Sürelerinin Sıcaklık ile Değişimi	76
Şekil 5.13	Bakır Parçanın Merkezindeki Sıcaklık Değişimi	77
Şekil 5.14	Seyitömer Kömürünün Merkezindeki Sıcaklık Değişimi	78
Şekil 6.1	Nem ile n Arasındaki İlişki	84
Şekil 6.2	Nem ile Kuru ve Orijinal Haldeki Uçucu madde Yanma Sürelerinin Oranı Arasındaki İlişki	84
Şekil 6.3	Uçucu Maddenin %95'inin Çıktığı Sürenin Hesap Yoluyla Bulunması	88
Şekil 6.4	Uçucu Madde Isıl Değeri ile Yanma Süresi Arasındaki İlişki (orijinal halde)	90
Şekil 6.5	Uçucu Madde Isıl Değeri ile Yanma Süresi Arasındaki İlişki (kuru halde)	91
Şekil 6.6	UM/SK Oranı ile Uçucu Madde Yanma Süresi Arasındaki İlişki (orijinal halde)	92
Şekil 6.7	UM/SK Oranı ile Uçucu Madde Yanma Süresi Arasındaki İlişki (kuru halde)	92



SİMBOLLER TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1	Türk Linyitlerinin Alt Isıl Değerlerine göre Dağılımı	4
Tablo 2.2	Türk Linyitlerinin, Amerikan ve İngiliz Kömürlerinin Ortalama Özellikleri	5
Tablo 3.1	Çeşitli Parametrelerin Uçucu Madde Çıkış Süresine Etkisi ve İnceleyen Araştırmacılar	32
Tablo 3.2	Uçucu Madde Çıkışında Hız Kontrol Edici Adım	33
Tablo 4.1	Kömürlerin Uçucu Madde Oranı ile Isıl Değerinin Karşılaştırılması	47
Tablo 4.2	Tanecik Çapının Etkisinin İncelendiği Deneyler	51
Tablo 4.3	Sıcaklığın Etkisinin İncelendiği Deneyler	52
Tablo 5.1	Kısa Analiz ve Isıl Değer Sonuçları	55
Tablo 5.2	Element Analizi Sonuçları	56
Tablo 5.3	Değişik Sıcaklıklarda Tayin Edilen Uçucu Madde Miktarı	57
Tablo 5.4	Değişik Sıcaklıklardaki Uçucu Madde Miktarının 950°C'daki Uçucu Madde Miktarına Oranı	58
Tablo 5.5	TGA Analiz Sonuçları (Sıcaklığa göre % Kütle Kaybı, Orijinal Halde)	59
Tablo 5.6	Uçucu Madde Yanma Süreleri (Orijinal) ...	65
Tablo 5.7	Uçucu Madde Yanma Süreleri (Kuru)	66
Tablo 5.8	Değişik Sıcaklıklarda Uçucu Madde Yanma Süreleri	67
Tablo 5.9	Regresyon Analizi Sonuçları	68
Tablo 6.1	Kısa Analizde Verilen Uçucu Madde Miktarının %90 ve %95 'inin Açığa Çıktığı Sıcaklıklar	89

SEMBOLLER

A	Alan (m^2)
a	Sabit katsayı ($t_{\nu} = ad^n$)
a', b'	E.3 eşitliğinde yer alan sabitler
Ar	E.6 eşitliği ile tanımlanan Archimed sayısı
Bi	Biot sayısı, (hr/λ , boyutsuz)
C_p	Özgül ısı, (J/kgK)
d	Kömür tanecik çapı (mm)
d_p	Yatak malzemesi çapı (mm)
E	Kömür uçucularının aktivasyon enerjisi ($kJ/kmol$)
F_o	Fourier sayısı ($\alpha t/r^2$, boyutsuz)
f_T	E.7 eşitliği ile tanımlanan bir büyüklük oranı
g	Yerçekimi ivmesi (m/s^2)
h	Isı transfer katsayısı ($W/m^2 K$)
H_{kKB}	Kömürün kuru külsüz bazdaki üst ısı değeri ($kcal/kg$)
H_u	Uçucu maddenin ısı değeri ($kcal/kg$)
k	Hız sabiti ($1/s$)
k_o	Frekans sabiti ($1/s$)
L_m	Sabit yatak yüksekliği (m)
L_{mf}	Min. akışkanlaşmada yatak yüksekliği (m)
L_f	Akışkanlaşma şartlarında yatak yüksekliği (m)
m	Orijinal bazda kömür besleme debisi (g)
m_k	Kuru bazda kömür besleme debisi (g)
n	Sabit katsayı ($t_{\nu} = ad^n$)
Nu	Nusselt sayısı, (hd/λ , boyutsuz)
R	Gaz sabiti ($9.314 kJ/kmol K$)
r	Regresyon katsayısı (Tablo 5.9)
r	Yarıçap
ΔP	Basınç düşüşü (mm H_2O)
SK	Sabit karbon (%)
T	Sıcaklık ($^{\circ}C$)
T_b	Yatak sıcaklığı ($^{\circ}C$)
T_m	Merkez sıcaklığı ($^{\circ}C$)
T_o	Başlangıç sıcaklığı ($^{\circ}C$)
t	Zaman (s)

t_{ν}	Uçucu madde yanma süresi, orijinal bazda, (s)
$t_{\nu k}$	Uçucu madde yanma süresi, kuru bazda, (s)
U	Hız (m/s)
U_{mf}	Minimum akışkanlaşma hızı (m/s)
U_t	Terminal hızı (m/s)
UM	Uçucu madde (%)
V	Hacim (m^3)
W	Uçucu madde çıkışı sırasında herhangi bir t anında kömürde kalan yanabilecek madde miktarı (g)
α	Isıl diffüzyivite (m^2/s)
ϵ_m	Boşluk oranı
ϵ_{mf}	Minimum akışkanlaşma hızında yatak boşluk oranı
λ	Isıl iletkenlik katsayısı (W/mK)
ρ	Yoğunluk (kg/m^3)
μ	Viskozite (centipoise)
ν	Kinematik viskozite (m^2/s)
θ	Boyutsuz sıcaklık
θ_m	Kömür merkezindeki boyutsuz sıcaklık
\emptyset	E.4 eşitliği ile tanımlanan bir büyüklük
[]	Konsantrasyon

1. GİRİŞ

Türkiye'nin birincil enerji kaynakları incelendiğinde, kömürün payının çok yüksek olduğu görülür. Linyitler %79 ve taşkömürü %10 gibi paylara sahiptirler. Enerji üretiminde linyit ve taşkömürünün payı ise, aynı oranda değildir. Bu durumda, Türkiye'nin ekonomik gelişmesini sürdürebilmesi ve dışa bağımlılığını azaltabilmesi için önümüzdeki yıllarda enerji üretiminde linyit ve taşkömürüne giderek daha fazla ağırlık vermesi beklenmektedir.

Taşkömürü üretimimiz ancak ihtiyaca yetmektedir ve önümüzdeki yıllarda bu durum değişmeyecektir. Bu nedenle linyit rezervlerinin özellikle kısa ve orta vadede enerji sorununa çözüm getirebilecek en önemli kaynak olduğu açıktır.

Sanayi sektörü, Türkiye'nin enerji tüketiminde en büyük paya sahiptir; kullandığı enerjinin yaklaşık üçte ikisi de ısı enerjisi şeklindedir. Buradan görülmektedir ki, proses ısısı üretimi ve mahal ısıtılması için doğrudan linyitin kullanılması faydalı olacaktır.

Türkiye'nin toplam linyit rezervi $8 \cdot 10^6$ ton kadardır (1). Bu rezervin önemli bir kısmının ısı değeri düşük buna karşılık kül, nem ve kükürt yüzdesi yüksektir. Türk linyitlerinin bu özellikleri, mevcut yakma sistemlerinde yakılmalarını güçleştirdiği gibi, önemli çevre kirliliği sorunlarına da yol açacaktır. Akışkan yatakta yakma teknolojisi bu sorunlara çözüm getirerek Türk linyitlerinin yaygın ve verimli kullanılmasını sağlayacak önemli bir seçenek olarak karşımıza çıkmaktadır.

Yalnızca işletme koşullarını zorlayarak her çeşit linyiti belli bir akışkan yatakta verimli bir şekilde yakmak mümkün değildir (2). Her akışkan yatak her çeşit kömürü verimli bir şekilde yakmamaktadır; bu nedenle, kullanılacak kömürün özelliklerine uyan bir tasarımın yapılması gerekmektedir.

Nitekim, Türk linyitlerinden çok farklı özellikte olan batı ülkelerinin kömürleri için geliştirilmiş akışkan yataklı yakma sistemleri hiç bir değişikliğe uğratılmadan Türk linyitleri için kullanıldığında başarısız sonuçlar elde edilmektedir. Türk linyitlerinin kül oranının yüksek ve kül ergime noktalarının düşük olması akışkan yatakta çalışma sıcaklığını değiştirebilmekte; yüksek kül yüzdesi ve düşük ısıl değer ise kömür besleme ve kül boşaltma sistemlerinde bazı değişiklikleri zorunlu hale getirmektedir.

Türk linyitlerinin batı ülkeleri kömürlerinden önemli bir farkı da, yüksek uçucu madde içeriğidir. Türk linyitlerinin ısıl değerinde uçucu maddenin payı (3) % 45-50 değerlerine varabilmektedir. Uçucu madde ise linyitler akışkan yatağa beslendikten çok kısa bir süre sonra açığa çıkıp yanmaktadır. Uçucu maddenin yanma süresi, uçucusuz karbonlu yapının yanmasına göre oldukça kısa sürmektedir.

Linyitlerin ısıl değerinin neredeyse yarısını içeren ve yatağa atıldıktan kısa süre sonra yanan uçucu maddenin, akışkan yatağın hangi bölgelerinde ve nasıl yandığının bilinmesi tasarım çalışmalarında büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmada, Türk linyitleri için uygun akışkan yatak tasarımına çok yararlı olacak bir veri tabanı oluşturmak ve uçucu madde davranışının daha iyi anlaşılmasına yardımcı olmak amacı ile 12 Türk kömürü ve bir yabancı kömür akışkan yatakta yakılmış ve uçucu maddenin yanma davranışı ile yatak sıcaklığı, tanecik büyüklüğü gibi parametrelerin bu davranışı nasıl etkilediği incelenmiştir.

2. GENEL BİLGİLER

2.1 Türk Linyitlerine Genel Bir Bakış

Türkiye'deki linyit rezervlerinin toplam değeri aşağıda verilmiştir (1) :

Görünür rezerv	|	4 857 * 10 ⁶	ton
Muhtemel rezerv	|	2 691 * 10 ⁶	ton
Mümkün rezerv	|	498 * 10 ⁶	ton
Toplam rezerv	|	8 046 * 10 ⁶	ton

Türk linyitlerinin kısa analiz sonuçlarına bakıldığında, %10-45 nem, %10-50 kül, %15-45 uçucu madde, %1-10 kükürt olarak çok geniş bir aralıkta değiştiği söylenebilir (4,5,6,7). Türk linyitlerinin özellikleri rezervden rezerve olduğu kadar aynı rezerv içerisinde de önemli değişimler göstermektedir.

Linyit rezervlerinin ısı değerleri 1000-5000 kcal/kg arasında değişmekteyse de önemli bir kısmının 1000-1500 kcal/kg arasında olduğu Tablo 2.1'de görülmektedir.

Kül ergime noktası üzerinde fazla yayın yapılmamıştır ama Türk linyitlerinin kül ergime noktalarının düşük olduğu (çoğunlukla 1000-1250°C arasında) TÜBİTAK-MESAB'da yapılan çalışmalarla belirlendiği gibi; Atakül (8) ve Güner'in (9) çalışmalarında da benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Amerika ve İngiltere'de güç istasyonlarında kullanılan kömürlerin ortalama değerlerinin Türk linyitleri ortalamasıyla karşılaştırılması Tablo 2.2'de verilmiştir.

Klasik ızgaralı kömür yakma kazanlarında yüksek kül içerikli ve buna karşılık düşük ergime noktalı Türk linyitlerinin yakılmasında, kazanın bazı bölgelerinde sıcaklık 1200-1300°C'a çıkmakta ve bu sıcaklıkta kül ergiyip aglomerasyona uğrayarak ızgaraları tıkamakta, dolayısıyla hava geçişine engel olan ölü bölgeler oluşmaktadır (11). Izgaranın bazı bölgelerinden çok

miktarda hava geçmekte, bazı bölgelerinden ise hiç geçmemektedir. Hatta ızgaraların tamamına yakın bir bölümü tıkanabilmektedir, dolayısıyla kazan gücü ve verimi düzgün bir yanma sağlanamadığı için düşmektedir. Yüksek kül miktarı, katı artık sorunu yaratmakta ve ayrıca tanecik yayılımını da arttırmaktadır.

Tablo 2.1 Türk linyitlerinin Alt Isıl Değerlerine Göre Dağılımı (1)

Alt Isıl Değer (kcal/kg)	Dağılım (%)
1000	3.40
1000-1500	53.63
1500-2000	7.21
2000-2500	12.19
2500-3000	14.12
3000-3500	0.12
3500-4000	3.88
4000-4500	3.54
4500-5000	1.15
5000-5500	0.08
5500-6000	0.16

Yüksek uçucu madde içeren Türk linyitleri klasik kazanlarda yakıldığında, uçucu madde kazandaki yanma sıcaklığında kömürü terkedecek ve serbest olarak kömür yığınının üzerinde yanmasını tamamlayacaktır. Çeşitli hidrokarbonlardan oluşan uçucu maddenin yanmasını tamamlayabilmesi için ocak hacminin ve sıcaklığının belirli bir değerin altına düşmemesi gerekmektedir (11); aksi taktirde düşük sıcaklıkta uçucular yanmadan dışarıya atılırlar ve böylece çevreye yanmamış hidrokarbon yayılımı artar.

Akışkan yatakta yakma teknolojisi bu sorunlara çözüm getirerek Türk linyitlerinin yaygın ve verimli bir şekilde kullanılmasını sağlayacak önemli bir seçenek oluşturmaktadır.

Tablo 2.2 Türk Linyitlerinin, Amerikan ve İngiliz Kömürlerinin Ortalama Özellikleri (10)

	Türk Linyitleri Ortalaması	Amerika Güç İstasyonları Kömür Ort. (Genellikle Linyit)	İngiltere'de Kullanılan Kömürlerin Kaba Ortalaması
Isıl değ. (kcal/kg)	2150	5950	8120
Kükürt (%)	2.6	1.6	1.0
Azot (%)	1.8	---	1.5
Kül (%)	17.0	16.4	7.0
Nem (%)	42.0	---	10.0

2.2 Akışkanlaşma

Şekil 2.1'de görüldüğü gibi tabandaki delikli levhanın üzerine küçük katı tanecikleri serbest olarak yığılmış bir kabin (kesiti daire ya da dörtgen v.b. olabilir) içinden bir akışkan, örneğin hava geçirilmektedir.

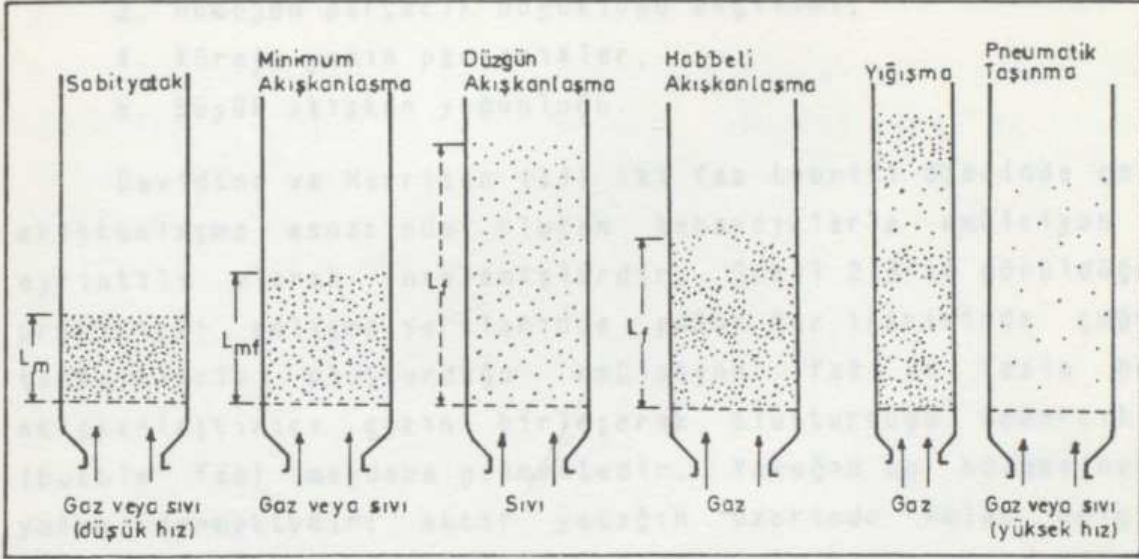
Düşük akış hızlarında, hava katı tanecikler arasındaki boşluklardan geçer. Bu davranıştaki yatağa sabit yatak denir. Havanın geçişi sırasında belirli bir basınç düşüşü olur ve hava hızı arttıkça basınç düşüşü de artar (Şekil 2.2).

Akışkan hızı giderek arttırıldıkça tanecikler birbirinden ayrılmaya, bazıları titreşmeye başlar. Bu tip yatağa genleşmiş yatak adı verilir. Akışkan hızı daha da arttırılırsa aşağıdan yukarıya doğru akışkan içerisinde tanecikler asılı kalırlar. Yatak minimum akışkanlaşma durumundadır, Şekil 2.2'deki U_{mf} noktasına erişilmiştir. Bu noktadaki hava hızına minimum akışkanlaşma hızı denir ve akışkan yataklı sistemlerin en önemli tasarım ve işletme parametresidir (12,13).

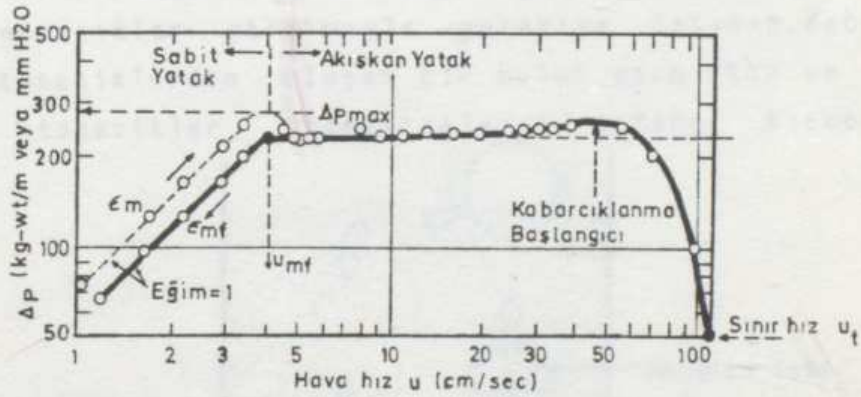
Kullanılan akışkan sıvı ise, minimum akışkanlaşma hızının üzerindeki hızlarda yatak düzgün olarak genleşir ve kabarcıklanma ya da kararsızlık görülmez, yatak düzgün akışkanlaşır. Yatak basınç düşüşü, akışkan hızı artsa da sabit kalır (Şekil 2.2). Kullanılan akışkanın gaz olması halinde minimum akışkanlaşma hızı aşıldığında kararsızlık görülebilir. Akışkan hızının artması ile birlikte kabarcıklanma başlar, yatak yüksekliği fazla değişmez. Bu tip yataklara kabarcıklı akışkan yatak ya da hetrojen olarak akışkanlaşmış yatak denir (Şekil 2.1). Yatak yüksekliğinin yatak çapına göre büyük olduğu durumlarda yığılım (slugging) denilen olay meydana gelebilir. Dağıtıcı elekte, akışkanın deliklerinden geçmesi ile oluşan kabarcıklar yatak yüzeyine erişmeden birleşirler ve üzerlerinde kalan malzemenin alt taraftaki malzemeden ayrılmasına neden olurlar. Bu istenmeyen bir durumdur, verimin ve ısı transferinin kötüleşmesine neden olur. Akışkan hızı daha da artarsa bazı küçük parçacıklar terminal hızlarına erişirler ve sistemi terk ederler. Bu duruma da taşınım evresi denir. Malzeme miktarı azalır ve yerine yenisinin konması gerekir. Yatak malzemesi azaldığı için yeni malzeme eklenmezse basınç düşüşü azalmaya başlar (Şekil 2.2).

Akışkanlaşmanın düzgün veya kabarcıklı olması katı taneciklerin ve akışkanın özelliklerine bağlıdır. Yatak geometrisi, gaz akışkan hızı, dağıtıcı elek, yatak içi bölme, engel ve ısı değiştiriciler, taneciklerin karışma hızına, kabarcıkların büyüklüğüne ve yatak içindeki dağılımına etki eder.

Akışkanlaşmış bir yatak kaynayan bir sıvının özelliklerini gösterir: Yatak içine atılan bir cisim yoğunluğuna göre yüzer ya da batar. Yatak bir yana eğildiği zaman yatağın üst yüzeyi yatay kalır. İki yatak birleştirildiği zaman düzeyleri eşitlenir. Yatak içinde herhangi iki nokta arasındaki basınç farkı yaklaşık olarak bu iki nokta arasındaki malzemenin statik ağırlığına eşittir. Akışkan yatağı içeren bir kabın bir noktasında bir delik açılırsa, katı taneler akışkanla birlikte o noktadaki statik basınçla orantılı olarak şiddetle fırlar.



Şekil 2.1 Akışkanlaşma



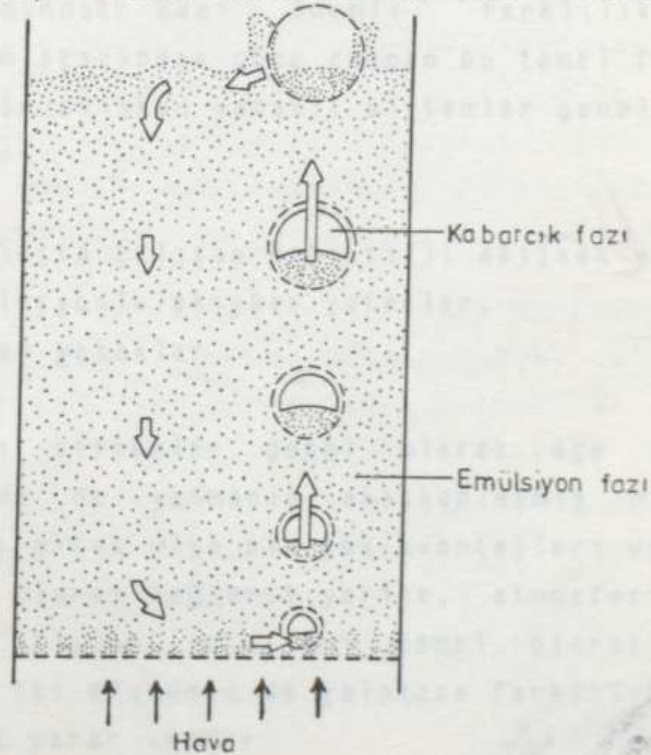
Şekil 2.2 Akışkanlaşma ve Basınç Düşüşü

Şekil 2.2'de minimum akışkanlaşma noktasında bir kambur görülmektedir. Basınç düşüşü eğrisi geriden gelerek, yani hız yavaş yavaş azaltılarak izlenecek olursa bu kambur görülmez. Bunun nedeni ilk akışkanlaşma sırasında tanecikler arasındaki sürtünme kuvvetlerinin yenilmesi gerekliliğidir. Akışkan hızı yavaş yavaş azaltıldığında yatak oturana kadar sürtünme kuvvetleri olmadığı için kambur meydana gelmez. İyi bir akışkanlaşma için şu özellikler aranır:



1. Düşük parçacık yoğunluğu,
2. Küçük parçacık büyüklüğü,
3. Homojen parçacık büyüklüğü dağılımı,
4. Küreye yakın parçacıklar,
5. Büyük akışkan yoğunluğu.

Davidson ve Harrison (14) iki faz teorisi üzerinde çalışarak akışkanlaşma esnasında oluşan kabarcıklarla emülsiyon fazını ayrıntılı olarak incelemişlerdir. Şekil 2.3'te görüldüğü gibi pratikteki çalışma şartlarında yoğun faz içerisinde çoğunlukla taneciklerin oluşturduğu emülsiyon faz ve fazla beslenen akışkanlaştırıcı gazın birleşerek oluşturduğu kabarcık fazı (bubble faz) meydana gelmektedir. Yatağın bu bölgesine aktif yatak denmektedir; aktif yatağın üzerinde kalan bölgeye de serbest bölge adı verilmiştir. Çalışma şartları ve dağıtıcı elek tasarımına göre kabarcıkların hızı ve çapı değişmektedir. İki faz teorisine göre, emülsiyon fazı gönderilen akışkanın hızından bağımsız olup minimum akışkanlaşma koşulundadır. Beslenen havanın fazlası kabarcıklar yardımıyla yukarıya taşınır. Kabarcıkların etrafını taneciklerden oluşan bir bulut sarmıştır ve bu bulut üzerindeki tanecikler, kabarcıklarla beraber kısmen hareket



Şekil 2.3 Kabarcık ve Emülsiyon Fazı

etmektedirler. Kabarcığın alt bölgesinde kalan tanecikler de kabarcık ile birlikte yukarıya çıkmakta, kabarcık yüzeye ulaşıp patlayınca tanecikler, yeniden yatak içine dağılmaktadır.

Kabarcıkların çapları, hızları, kabarcık ile emülsiyon fazı arasındaki kütle transferi gibi akışkanlaşma açısından önem teşkil eden parametreler Davidson ve Harrison (14) tarafından ayrıntılı olarak incelenmiştir.

2.3 Akışkan Yataklı Yakma Sistemleri

1970 yıllarındaki petrol krizi nedeniyle düşük kalorili yakıtları daha verimli yakabilecek, havayı kirletmeyecek ve aynı zamanda birim hacimden daha fazla güç verebilecek yakma sistemlerini geliştirmek için yapılan araştırmalar, akışkan yataklı sistemlerin çok uygun bir yakma sistemi olabileceğini ispatlamıştır (13,15).

Akışkan yataklı yakma sistemlerinin üzerinde yapılan araştırmalar günümüzde de devam etmekte olup geliştirilen sistemlerin tasarımında bazı önemli farklılıklar göze çarpmaktadır. Tasarım açısından göze çarpan bu temel farklılıklar göz önünde tutulursa akışkan yataklı sistemler genel olarak üç ana gruba ayrılabilir:

- Atmosferik basınçta çalışan kabarcıklı akışkan yataklar
- Hızlı ve sirkülasyonlu akışkan yataklar.
- Basıncılı akışkan yataklar

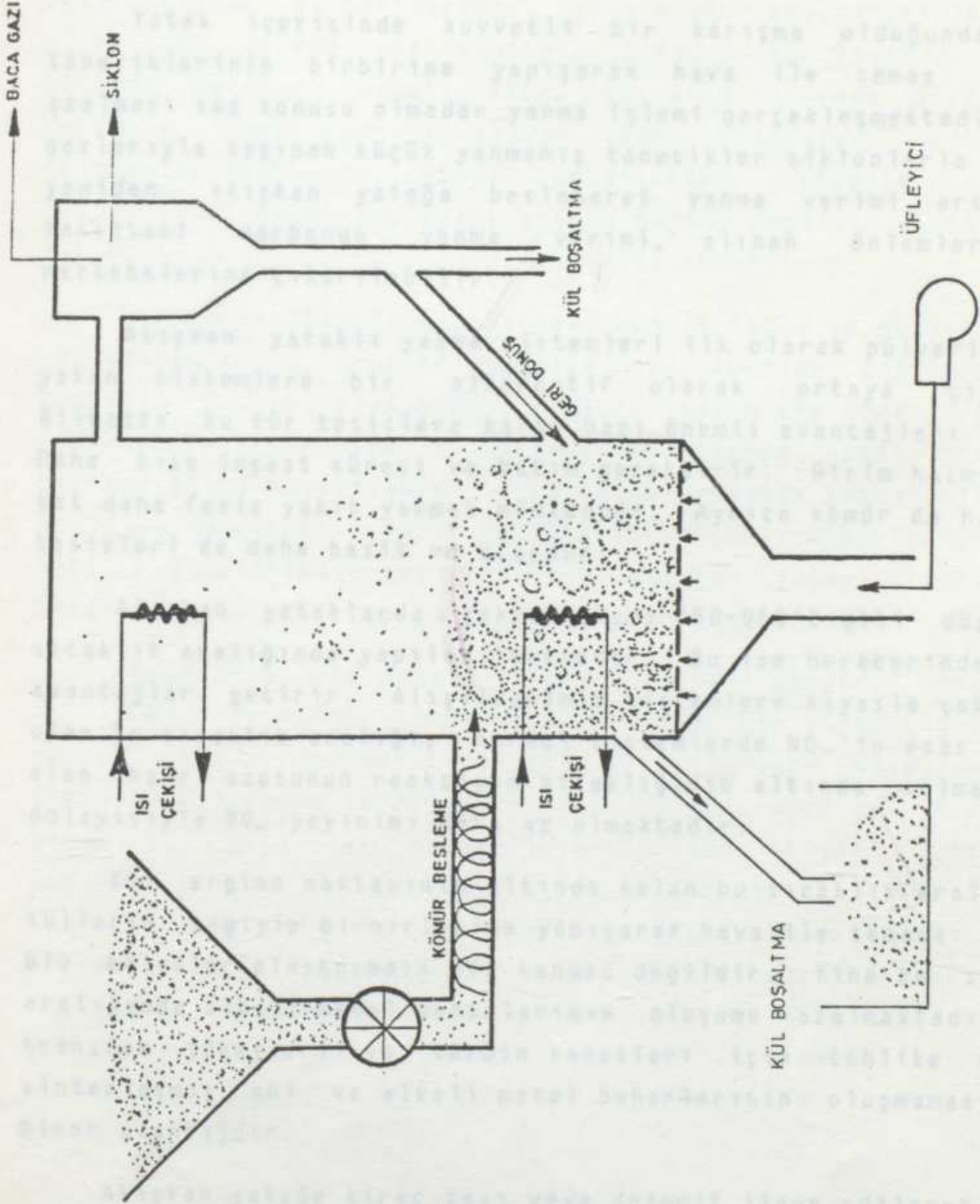
Akışkan yataklı sistemler genel olarak üçe ayrılmakla birlikte, üç sistemde de yanmanın akışkanlaşmış bir rejimde yapılmasından dolayı ortak olan bir çok avantajları vardır. Her üç sisteme ayrıntılı olarak değinmek yerine, atmosferik basınçta çalışan kabarcıklı akışkan yatakları temel olarak ele alıp incelemek ve diğer iki sistemin de yalnızca farklılık gösteren yönlerini belirtmekte yarar vardır.

Atmosferik basınçta çalışan kabarcıklı akışkan yataklar:

Atmosferik basınçta çalışan kabarcıklı bir akışkan yatak sistemi şematik olarak Şekil 2.4'te görüldüğü gibi yatak malzemesi ve kömür karışımını taşıyan ve yanma için verilen akışkanlaştırıcı havanın uygun şekilde dağılmasını sağlayan bir dağıtıcı elek, kömür besleme ve kül boşaltma düzeneği, ısı transfer tüpleri, bir hava üfleyicisi ve kaçan tozları tutacak bir siklondan oluşmaktadır.

Yatak malzemesi olarak kum kullanılır ve dağıtıcı eleğin altından fan yardımıyla hava üflenir, hava debisinin belirli bir değerin üzerine çıkmasıyla dağıtıcı elek üzerindeki yatak malzemesi hareketlenir ve akışkanlaşır. Gaz veya sıvı yakıt yakılarak yatağın 500-600°C'a ön ısınması sağlanır. Bu sıcaklık kömürün tutuşma sıcaklığının üzerinde olduğu için gaz veya sıvı yakıt beslemesi kademeli olarak kesilerek yatağa kömür beslenir ve 800-950°C sıcaklık aralığında kararlı bir şekilde yanma olayı sürdürülür. Klasik yakma sistemlerinden en büyük farkı, alttan verilen hava yardımıyla aktif yatak içerisinde kömür taneciklerinin serbestçe hareket edebilmeleri, dolayısıyla kömür taneciklerinin yanmalarını tamamlayabilmeleri için oksijen ile daha iyi temas edebilmeleridir. Klasik kazanlarda kömür, ızgaralar üzerinde yığın halinde hareketsiz kalmakta ve kömür-oksijen teması iyi olmamaktadır. Akışkan yataklı yakma sistemlerinin diğer yakma sistemlerinden farklılaştığı bu en önemli özelliği, beraberinde bir çok avantajlar getirmektedir.

Yatak içerisindeki taneciklerin her yöne serbestçe hareket etmesinden dolayı tekdüze bir sıcaklık dağılımı elde edilir. Yatağın ısı kapasitesi yüksek olduğu için ısı girdisinde yapılacak değişikliklere sistemin cevabı yavaştır, bu nedenle sıcaklık kontrolünün çok hassas olması gerekmez. Tekdüze sıcaklık ve yüksek ısı kapasitesi kontrol kolaylığı sağlar. Yatak içerisindeki yüksek ısı transfer katsayıları nedeniyle gerekli ısı transferi yüzeyi konvansiyonel sistemlerden %30-40 daha azdır. Bu özelliklerin sonucunda yanma odası hacmi küçülür, bu ise yatırım masraflarını azaltır.



Şekil 2.4 Atmosferik Basıncıta Çalışan Kabarcıklı Bir Akışkan Yatak

Akışkan yataklarda yanma esnasında 1 kömür taneciğine karşılık 200 inert taneciğin var olması, yüksek kül içeren katı yakıtların yakılması için akışkan yatakların çok uygun bir sistem olduğunu gösterir (16).

Yatak içerisinde kuvvetli bir karışma olduğundan kömür taneciklerinin birbirine yapışarak hava ile temas alanının azalması söz konusu olmadan yanma işlemi gerçekleşmektedir. Yanma gazlarıyla taşınan küçük yanmamış tanecikler siklonlarla toplanıp yeniden akışkan yatağa beslenerek yanma verimi arttırılır. Yakıttaki karbonun yanma verimi, alınan önlemlerle %99 mertebelerine çıkarılabilir.

Akışkan yataklı yakma sistemleri ilk olarak pülverize kömür yakan sistemlere bir alternatif olarak ortaya çıkmıştır. Bilhassa bu tür tesislere karşı bazı önemli avantajları vardır. Daha kısa inşaat süresi ve bakım gerektirir. Birim hacminde 10 kat daha fazla yakıt yakmak mümkündür. Ayrıca kömür ön hazırlama tesisleri de daha basit ve ucuzdur.

Akışkan yataklarda yakma işlemi 750-950°C gibi düşük bir sıcaklık aralığında yapılabilir. Bu ise beraberinde birçok avantajlar getirir. Alışıl gelmiş sistemlere kıyasla çok düşük olan bu sıcaklık aralığı, normal sistemlerde NO_x'in esas kaynağı olan hava azotunun reaksiyon sıcaklığının altında kalmakta ve dolayısıyla NO_x yayılımı daha az olmaktadır.

Kül ergime noktasının altında kalan bu sıcaklık aralığında, küllerin ergiyip birbirlerine yapışarak hava ile teması önleyen ölü bölgeler oluşturması söz konusu değildir. Yine bu sıcaklık aralığında alkali metal buharlarının oluşumu azalmaktadır. Isı transfer yüzeyleri ve türbin kanatları için tehlike arzeden sinterleşmiş kül ve alkali metal buharlarının oluşmaması ayrı birer avantajdır.

Akışkan yatağa kireç taşı veya dolomit ilave edilerek oluşan SO₂ gazlarının yatak içerisinde CaSO₄ haline dönüştürülerek tutulması söz konusudur ve bu reaksiyon 850°C'da maksimum göstermektedir. SO₂ gazlarının yatağa katılan absorblayıcılarla

tutulması teknik ve ekonomik olarak kükürt dioksitin yıkama yoluyla baca gazlarından ayrılmasından daha avantajlıdır (17).

Akışkan yataklar yukarıda anlatılan avantajlar yanında bazı dezavantajlar da getirirler. Yatağın ısı kapasitesinin yüksek olmasından dolayı yük kontrolü zordur. Bu nedenle modüller halinde tasarım faydalı olur. Bunların bir veya birkaçı yük durumuna göre devreye alınır veya çıkarılır. Laboratuvar çalışmalarından ve küçük modellerden benzeşim kanunları kullanılarak büyük tesislere geçmek mümkün değildir ve bu nedenle ilk tasarım güç ve pahalıdır, uzmanlık gerektirir.

Kireçtaşı hazırlama gibi yardımcı ek tesis ve beslenen kömür ve kireçtaşının yatakta homojen bir şekilde dağılması için karmaşık besleme sistemleri, klasik sistemlere göre diğer bir dezavantajdır. Yüksek kül içeren linyitlerde yatak içerisinde biriken külün boşaltılması ve bu külde yanmamış karbon miktarının en azda tutulması için az küllü daha kaliteli kömürler yakan ve batı ülkelerinde geliştirilmiş akışkan yataklı yakıcıların tasarımında önemli değişiklikler söz konusu olacaktır.

Atmosferik basınçta çalışan kabarcıklı akışkan yataklardan ısı çekme işleminin biraz daha ayrıntılı ele alınmasında yarar vardır. Isı transfer tüplerinin yerleşim yeri boyutları v.b. özelliklerin uygun seçilmesi ısı verim açısından çok önemlidir. Sıcak su, buhar ve proses ısı üreten akışkan yataklardan çekilen ısıнын %50 si aktif yatak içerisine yerleştirilen ısı transfer borularıyla yapılabilmektedir. Akışkanlaşmış yatak malzemesinin birim hacmindeki ısı kapasite, sıcak gazların birim hacmindeki ısı kapasiteden yaklaşık 1000 kat daha fazladır. Bu nedenle aktif yatağa yerleştirilen birim ısı transfer yüzeyinden serbest bölgeye oranla 6-7 kat fazla ısı çekmek mümkündür (15,18).

Aktif yatak içerisine yerleştirilmiş borular aracılığıyla yatak içerisinde açığa çıkan ısı, boru içinden geçirilen herhangi bir akışkana transfer edilir. Isı transferi sonucunda buhar üretimi amaçlanıyorsa, borular iki şekilde yerleştirilebilir:

Suyun sirkülasyonu pompa ile sağlanıyorsa ısı transfer boruları yatay; doğal sirkülasyon ile sağlanıyorsa, yataya 10° - 20° arasında eğimli olarak yerleştirilir. Boru çapları 25-120 mm arasında değişebilir. Kare veya üçgen yerleşim planına göre borular arası açıklık en az 25 mm olmalıdır. Yatak malzemesi hava kabarcıklarıyla birlikte ısı transfer borularını yalıtılarak aktif yatağın üzerine çıkabilir. Bu yüzden üçgen yerleşim planı ısı transferi açısından daha iyidir. Yatak malzemesinin borular etrafındaki hareketleri nedeniyle ve bilhassa yüksek akışkanlaşma hızlarında borularda erozyon meydana gelebilir. Erozyon daha çok boru altlarında ve kıvrımlarda görülür.

Isı akışının ayarlanması iki yöntemle yapılabilir; (a) yakıt ve hava miktarları değiştirilerek yatak sıcaklığının değiştirilmesi, (b) aktif yatak içerisinde kalan ısı transfer boru sayısının veya yüzeylerinin yatak yüksekliğinin değiştirilerek ayarlanması.

Yatak sıcaklığını sabit tutarak yatak yüksekliğinin azaltılıp çoğaltılmasıyla yapılabilecek ısı akış ayarı ile ısı transfer yüzeyleri efektif olarak değişecektir. Bu iki şekilde gerçekleşebilir: (i) Yatak maksimum güçte çalışırken yatak içerisine yerleştirilen ısı transfer borularının tamamı yatağın içinde kalır. Hava ve yakıt debisi orantılı olarak azaldığı zaman yatak yüksekliği azalacağından, bir kısım ısı transfer borusu yatak seviyesinin üzerine çıkar ve yataktan alınan ısı miktarı azalır. Yataktan daha az ısı çekileceği için yatak sıcaklığı çok fazla değişmez. Yatak yüksekliği ile yapılan güç ayarlamasındaki dezavantajlar iki şekilde ortaya çıkabilir. Birincisi, istenildiğinden daha fazla ısı transfer borusu gereksinimi; ikincisi, yatağın ısı transfer yüzeylerinin tamamını kaplayabilmesi için yüksek akışkanlaşma hızı ile çalışması. İkinci dezavantaj ile birlikte ortaya çıkan diğer bir sorun ise, akışkanlaşma hız limitleri arasında yeterli düzeyde yatak yüksekliğinin azaltılıp çoğaltılmasının daha derin statik yatak yüksekliği gerektirmesidir. Dolayısıyla basınç kayıpları artacağından fan gücü ihtiyacı da artacaktır. (ii) Yatak

yüksekliğinin ayarlanmasında ikinci dezavantajı ortadan kaldırmak için kullanılan bir yöntem ise, yatak malzemesi miktarının dinamik olarak değiştirilmesidir. Kireçtaşı ile kükürtdioksit tutumu yapılan yataklarda bu olay kolaylıkla sağlanabilir. Kükürtdioksitle doymuş kireçtaşının yatak içerisinden çıkarılması geçici olarak durdurularak kireçtaşının beslenmesine devam edilmesiyle yatak yüksekliği arttırılabildiği gibi tam tersi bir işlemle yatak yüksekliği azaltılabilir. Bu işlem kireç taşıyla yapılacağı gibi yatak malzemesini oluşturan kül-kum karışımı ile de yapılabilir.

Akışkan yataklardan ısı çekme işlemi genel olarak hem aktif yatak içerisinden hem de serbest bölgeden yapılmaktadır. Aktif yatak veya serbest bölgeden ısı çekme oranları yatak tasarımına ve kullanılan kömür cinsine bağlıdır. Yüksek uçucu madde içeren kömürlerde, uçucu maddenin kısa sürede çıkıp yatak üst yüzeyi ve serbest bölgede yanması sonucu bu bölgelerde aşırı sıcaklık yükselmesi gözlenmektedir (19,20,21). Böyle kömürlerin kullanılması durumunda ısı transfer borularının yerleştirilmesinde bazı değişiklikler gerekecektir.

Hızlı ve Sirkülasyonlu Akışkan Yataklar:

Hızlı ve sirkülasyonlu akışkan yataklarda kömürün yakılması atmosferik basınçlı kabarcıklı akışkan yataklara nazaran daha fazla türbülanslı bir ortamda gerçekleştirilir; yüksek hızda çalışma nedeniyle serbest bölgeden taşınan partiküller yatağa tekrar beslenir. 7-10 m/s gibi yüksek akışkanlaşma hızında çalışıldığından kolayca oluşabilecek erozyon nedeniyle sirkülasyonlu akışkan yatak sistemlerinde yatak içine ısı transfer boruları konulamaz; yanmanın tamamlanabilmesi için serbest bölgenin yüksek tutulması ve ısı transferinin su borulu duvarlardan yapılması zorunluğuna ortaya çıkar. Isı transferinin yapıldığı hacim daha fazla olmasına rağmen birim yatak alanından elde edilen ısı gücü 4.5 MW/m^2 civarındadır; atmosferik basınçta çalışan kabarcıklı akışkan yataklarda ise bu değer 1.3 MW/m^2 dir.

Hızlı ve sirkülasyonlu akışkan yataklı sistemlerde en az 15 MW ısı gücü üretimi ekonomik olmaktadır (15,22).

Şekil 2.5 'te tipik bir hızlı ve sirkülasyonlu akışkan yatak sistemi ayrıntılı olarak gösterilmektedir.

Basınçlı Akışkan Yataklar:

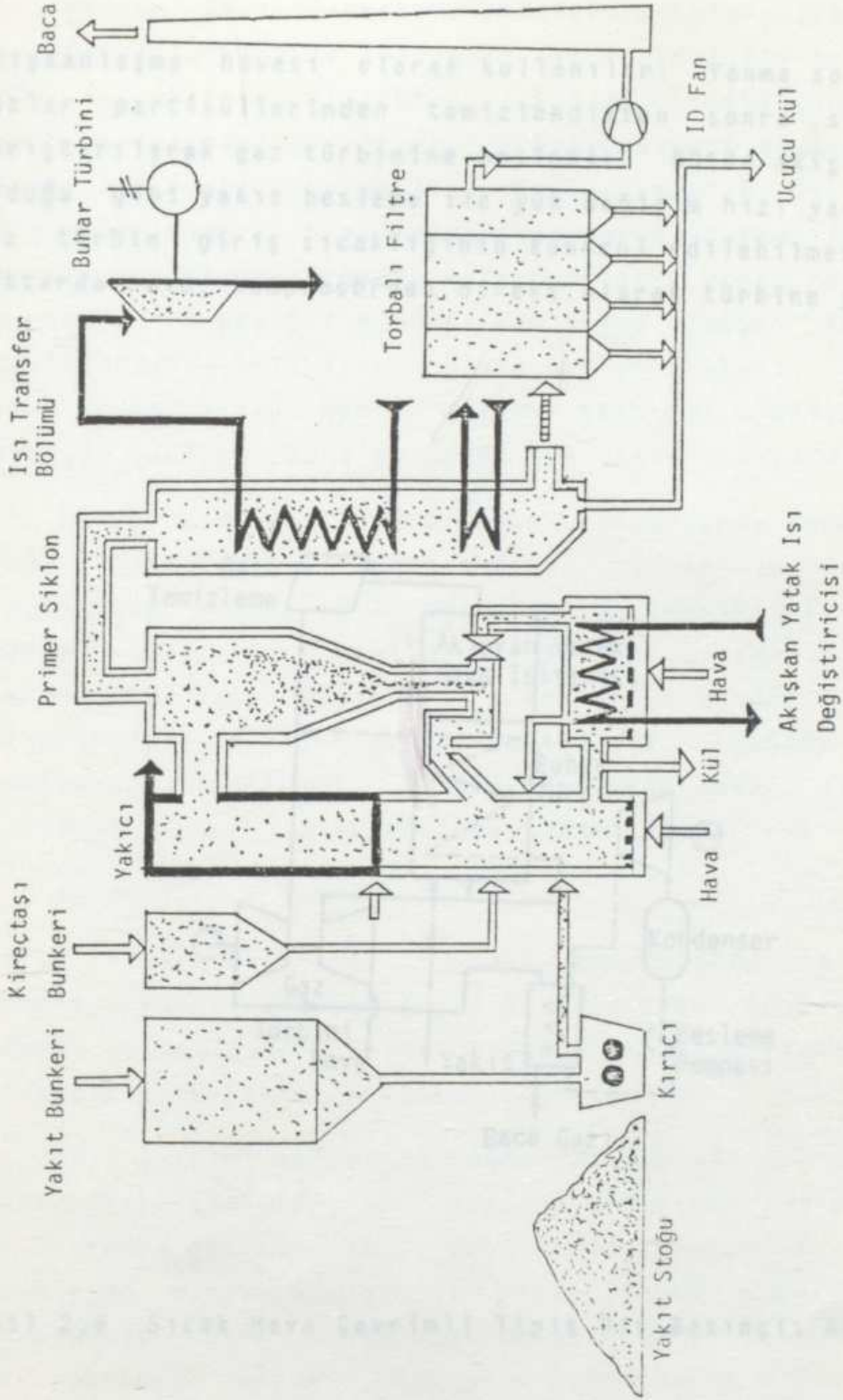
Basınçlı akışkan yatak sistemleri, atmosferik basınçta çalışan akışkan yataklara göre üç önemli avantaja sahiptir (15,23):

- Birim alandan elde edilen güç daha fazladır.
- Buhar türbinleriyle birlikte gaz türbininin çalıştırılması çevrim verimini arttırmaktadır.
- Azot oksit emisyonu daha az olmaktadır.

Basınçlı akışkan yatak sistemlerinde oluşan sıcak yanma gazları bir gaz türbininden geçirildikten sonra buhar üretiminde kullanılır; elde edilen buhar da ayrı bir türbinden geçirilerek kombine halde elektrik enerjisi üretilmiş olur.

Basınçlı akışkan yataklı sistemler, yapıları gereği gaz türbinsiz çalıştırılmaz. Mevcut olan gaz türbinleri yüksek gaz hızı ve sıcaklığında (yaklaşık 1000°C) çalışırlar. Doğal gaz, LPG ve fuel-oil ile çalışan gaz türbinleri, kömürün yakılmasıyla elde edilen sıcak gazlara uygun değildir. Basınçlı akışkan yataklar için yeni tip bir gaz türbininin geliştirilmesi ise çok pahalıya mal olacağından, basınçlı akışkan yatak sistemlerinde elde edilen gazın türbine giriş şartlarının mevcut olan gaz türbinlerinin şartlarına uydurulması zorunluluğu ortaya çıkmaktadır.

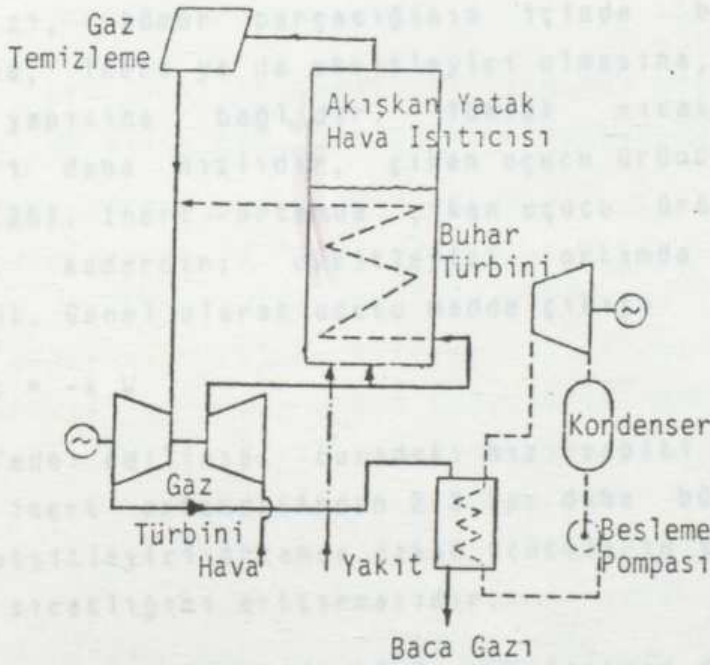
Şekil 2.6'da sıcak hava çevrimli tipik bir basınçlı akışkan yatak şematik olarak gösterilmiştir. Kompresörden çıkan hava ikiye ayrılır; çoğu yatak içi ısı transfer borularından geçirilerek yatak sıcaklığına ısıtılırken, bir kısmı da



Şekil 2.5 Hızlı ve Sirkülasyonlu Bir Akışkan Yatak

2.4 Uçucu Madde ve Akışkan Yataklı Sistemlerdeki Gazlar

akışkanlaşma havası olarak kullanılır. Yanma sonucunda oluşan gazlar partiküllerinden temizlendikten sonra sıcak hava ile karıştırılarak gaz türbinine beslenir. Bütün akışkan yataklarda olduğu gibi yakıt besleme ile yük değişim hızı yavaş olduğundan gaz türbin giriş sıcaklığının kontrol edilebilmesi için az bir miktarda hava, kompresörden direkt olarak türbine yollanır.



Şekil 2.6 Sıcak Hava Çevrimli Tipik Bir Basıncılı Akışkan Yatak

2.4 Uçucu Madde ve Akışkan Yataklı Sistemlerdeki Önemi

Kömür, tarih öncesinde yeraltında kalmış organik maddelerin zamanla ısı etkisiyle bozulması ile oluşmuş bir ara üründür, son ürün saf karbon olacaktır. Doğada kendiliğinden oluşan bu tepkimeyi, sıcaklığı arttırarak hızlandırmak mümkündür. Yeterince sıcak bir ortama bırakılan kömür parçacığında, kendiliğinden oluşan tersinmez tepkimeler sonucunda çıkan ürünlerden, gaz fazında bulunanlara "uçucu madde" denir. Uçucu madde, CO, CO₂, su, katran ve çeşitli hidrokarbonlardan oluşur. Kömürlerin kısa analizleriyle belirlenen uçucu madde miktarı, ısı bozunmada çıkabilecek uçucu madde miktarı hakkında yaklaşık bir fikir vermekle beraber, daha az ya da çok uçucu çıkışı olabilir (24).

Genel bir yaklaşım olarak, çıkan uçucu madde miktarı ve çıkış hızı, kömür parçacığının içinde bulunduğu ortamın sıcaklığına, inert ya da oksitleyici olmasına, tanecik çapına ve gözenek yapısına bağlıdır. Yüksek sıcaklıklarda bozunma tepkimeleri daha hızlıdır, çıkan uçucu ürünün miktarı da daha fazladır (25). Inert ortamda çıkan uçucu ürünün miktarı kısa analizdeki kadardır; oksitleyici ortamda ise bu değer aşılar (26). Genel olarak uçucu madde çıkışı

$$dW/dt = -k.W \quad (2.1)$$

olarak ifade edilirse, buradaki hız sabiti 'k', oksitleyici ortamda, inert ortamdakinden 2-3 kat daha büyüktür (26). Bunun nedeni, oksitleyici ortamda çıkan uçucuların yanmaya başlayarak, taneciğin sıcaklığını arttırmasıdır.

Isıl bozunma sürecinde kömür yapılarının değişimi birbirine uymaz. Bazı kömürler, ısı bozunma sırasında yumuşayarak plastik bir devreden geçerler (27). Bu plastik devre içinde, açığa çıkan uçucuların oluşturdukları gaz habbeciklerinin basıncı yeterince büyüdüğünde küçük jetler halinde gaz çıkışı olur ve kömürde yeni bir gözenek yapısı oluşur. Kömürlerin plastik haldeki akıcılıkları da değişiktir. Bazılarında oluşan gaz habbecikleri kolayca dışarı çıkmaz, habbecikler birleşir. Bu durumda

oluşacak gözenekler daha büyük, fakat sayıca daha azdır. Bu arada oluşan iç basıncın etkisiyle kömürlerde hacımca genişleme, şişme görülebilir (24). Plastik özellik göstermeyen kömürler de vardır. Bu tip kömür parçacıklarının içinde de (çıkan uçucu maddeden dolayı) yüksek basınç bölgeleri oluşur. fakat; oluşan gaz habbecikleri büyüyemezler. Kömürde mevcut olan gözeneklerden, yarık ve çatlaklardan dışarı çıkarlar. Yeni yarık ve çatlaklar oluşabilir, bazen de kömür şeklen bozulur. Linyitlerin de bu tip kömürlerden olduğu sanılmaktadır (25).

Buraya dek özetlendiği gibi, kömürlerin gözenek yapıları, plastik özellik gösterip göstermemelerine veya plastik devredeki davranışlarına göre farklılaşmaktadır. Bu farklı gözenek yapılarının, ısı bozunma sırasında çıkan uçucu madde miktarına ve çıkış hızına etkisi vardır (28). Genel olarak, gözenek çapları daha geniş kömürlerde uçucu madde daha kısa sürede çıkar.

Kömür uçucularının davranışı hakkında daha ayrıntılı bilgi Howard (13) ve Bilge'nin (29) çalışmalarında bulunabilir.

Türk linyitlerinin ısı değerinin %45-50 kadarı uçucu maddeye aittir. Uçucu maddenin akışkan yatakta yanma süresi, uçucularını kaybetmiş karbonlu yapının yanma süresinden oldukça kısadır. Dolayısıyla kömür beslemesi yapıldığında uçucular hemen açığa çıkmakta ve uygun ortam bulurlarsa yanmaktadırlar. Eğer uygun bir hacim ve sıcaklık bulunmazsa yanmadan sistemi terk ederler; bu ise enerji kaybına neden olur. Eğer kömür besleme sistemi ve sistemdeki ısı transferi tüplerinin tasarımı da iyi yapılmamışsa, ilk anda çıkan ve yanan uçucu maddenin ısısından yine yeteri kadar yarar sağlanamaz. Bu ve benzeri nedenlerden dolayı akışkan yatak tasarım çalışmalarında uçucu maddenin yanma davranışının mutlaka göz önüne alınması gereklidir. Akışkan yatakta uçucu maddenin rolü, davranışı, önemi, yanma modelleri ve önceki çalışmaların bir özeti Bölüm 3'te ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

3. UÇUCU MADDENİN AKIŞKAN YATAKTA YANMA DAVRANIŞI

3.1 Genel Bilgiler

Kömürdeki uçucu maddenin akışkan yataklı yakma sistemlerinin performansına etkisi yakın bir geçmişe kadar iyi bir şekilde anlaşılamamıştır. Uçucu maddenin rolü önemlidir; çünkü, bazı kömürlerin kalorifik değerinin önemli bir kısmını uçucu madde içermektedir ve bu ısının büyük bir kısmı yatak üzerinde açığa çıkabilmektedir (3,21,30).

Bir kömür parçacığı kömürün ilk tutuşma sıcaklığından yüksek bir sıcaklıkta olan ve yanması için gerekli oksijeni bol miktarda içeren bir hava akımı içerisine yerleştirilirse aşağıdaki üç olay meydana gelir (13).

- 1) Kömür taneciğinin sıcaklığı ilk tutuşma sıcaklığına kadar artar.
- 2) Kısa bir süre içerisinde uçucu madde kömür taneciğini terkeder ve tanecik yüzeyinde veya terketmiş olarak taneciklerin ötesinde yanar.
- 3) Geriye kalan yanabilir katı madde (genellikle karbondur) kısmen yavaş bir şekilde oksitlenir ve açığa ısı çıkar; bu işlem yanmayan kül kalıncaya kadar devam eder.

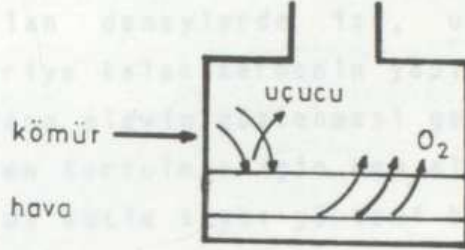
Kömürün kalorifik değerinin önemli bir kısmının uçucuda olması ve uçucu madde yanmasının çok kısa bir sürede tamamlanması tasarım çalışmalarında göz önünde tutulması gereken önemli bir özelliktir. Uçucuların kömür taneciklerini terketme olayının daha iyi anlaşılması için aşağıdaki noktalar dikkate alınmalıdır.

- 1) Uçucuların kömür taneciklerini terketmesi, bir sıvının ısıtılmasında söz konusu olan basit bir fiziksel buharlaşma işlemi değil bir kimyasal reaksiyon sonucudur.
- 2) Ortaya çıkan uçucular, kömür ısıtıldığında meydana gelen ısı bozunma gibi tersinmez kimyasal tepkimelerden oluşan hidrokarbon gazlarıdır. Bu gazların

- yoğuşturulmasıyla veya daha ileri soğutulmasıyla orijinal kimyasal ve fiziksel yapıları elde edilmez.
- 3) Uçucular kömür taneciklerinin içinden yüzeye doğru sızarak dışarıya çıkarlar.
 - 4) Kimyasal tepkime ekzotermik bile olabilir.
 - 5) Uçucuların kömür taneciğini terkettiğini gösteren açıkça belirlenmiş bir sıcaklık yoktur. Fakat sıcaklık yükseldikçe kömür taneciklerinin içine daha fazla ısı akışı olmakta ve dolayısıyla uçucuların tamamen çıkması için gerekli süre kısalmaktadır.
 - 6) Uçucular sıvı yakıt buharlarının yanışına benzer şekilde, yani katı madde yüzeyinin kısa bir mesafe ilerisinde bulunan bir alev şeklinde yanmaktadır. Bu alev tanecik yüzeyine ısı vererek uçucu madde çıkışının devamını sağlar ve bu yanma şekli tüm uçucular çıkıp bitene kadar devam eder.
 - 7) Kömür taneciklerini terkemiş bu hidrokarbonlar tanecik yüzeyinde ve etrafında yanmasını tamamlayamadan genellikle dumanlı sarı bir alev halinde gözükerek yüzeylerde is olarak birikebilir.
 - 8) Yanmalarını tamamlayamamış bu uçucular ancak fazla oksijen içeren bir yüksek sıcaklık bölgesinden geçtiklerinde yanmalarını tamamlayabilirler.

Sıcak bir hava akımına yerleştirilen bir kömür taneciği yukarıdaki safhalardan geçmektedir. Eğer bu tanecik bir akışkan yatağa atılırsa bazı değişiklikler beklenmelidir. Taneciklerin yatak içerisinde hareket etmeleri nedeniyle uçucuların aktif yatak içerisinde yanma şansları vardır. Akışkan yataklarda besleme sisteminin önemi burada bir kez daha ortaya çıkmaktadır. Eğer yatak üzerinden kömür beslemesi yapılırsa (Şekil 3.1) küçük tanecikler için 1-15 saniye gibi kısa sürede olan uçucu çıkışı ve yanması nedeniyle aktif yatağın üzerinde yanma, dolayısıyla serbest bölgede önemli sıcaklık artışı gözlenir. Eğer diğer operasyon parametreleri uygun seçilmemişse, örneğin ani uçucu çıkışına karşılık yeteri kadar oksijen mevcut değil ise veya

sıcak bölge hacmi yetersiz ise uçucular yanmadan yollarına devam edeceklerdir. Bazı kömürlerin kalorifik değerinin %40-50 kadarının uçuculara ait olduğu hatırlanırsa verimde önemli düşüşlerin olacağı görülür.



Şekil 3.1 Kömür Beslemenin Yatak Üzerinden Yapıldığı Bir Durum

3.2 Uçucu Madde Yanma Süresini Ölçme Yöntemleri

Uçucu maddenin kömür taneciğini terkmesi ve yanma süreci çok sayıda değişkenden etkilenmektedir. Akışkan yatak gibi taneciklerin sürekli hareket ettiği bir ortamda ise uçucu madde yanma süresini etkileyen değişkenler daha da artmaktadır. Akışkan yatakta bütün tanecikler hareketli olduğu gibi, emülsiyon ve kabarcık fazları da hareketlidir ve sürekli olarak birbirleriyle etkileşim içindedir. Akışkan yatakta uçucu maddenin çıkışını ve yanmasını tanımlayan gerçekçi bir modelin kurulabilmesi çok zordur. Bu nedenle deneysel çalışmaların sonuçları ayrı bir önem içermektedir.

Uçucu maddenin kömür taneciğinden çıkma ve yanma süresinin deneysel olarak ölçülmesi genel olarak aşağıda belirtilen yöntemlerle gerçekleştirilmektedir.

- Uçucu madde alevinin görüldüğü sürenin gözlenmesi
- Yanma ortamını terkeden gazların analizi
- Kömür taneciğindeki kütle kaybının kaydedilmesi
- Yukarıdaki yöntemlerin iki veya üçünün beraber kullanılması

Yukarıdaki her bir yöntemin kendine özgü avantaj ve dezavantajları vardır. Alevin görüldüğü sürenin tesbit edildiği yöntemde, uçucu alevinin görüldüğü ilk andan önce yaklaşık %5 gibi bir miktar ve alevin sönmesinden sonra da bir miktar uçucunun çıkacağı belirtilmektedir (34).

Gaz analizinin yapıldığı veya kütle kaybının ölçüldüğü bazı yöntemlerde ise kömür taneciği inert ortamda tutulmakta; dolayısıyla yanma olmamakta ve yanmanın uçucu çıkışına olan etkisi gözlenmemektedir. Oksitleyici ortamda yani yanmanın olması durumunda yapılan deneylerde ise, uçucu maddenin yanmasının bittiği ve geriye kalan karbonlu yapının yanmaya başladığı anı saptamak için gene alevin gözlenmesi gerekmektedir (32). Bazen bu belirsizliklerden kurtulmak için hem alevin gözlenmesi, hem gaz analizi, hem de kütle kaybı yöntemi bir arada kullanılmaktadır (25).

3.3 Akışkan Yatakta Uçucu Madde Yanması Üzerinde Yapılan Çalışmalar

Uçucu madde üzerinde yapılmış deneysel çalışmalar incelendiğinde oldukça farklı sonuçlarla karşılaşılmaktadır. Bunun nedeni ise uçucu madde davranışının parçacık boyu, oksijen konsantrasyonu, yatak sıcaklığı ve kömür özelliklerinin yanı sıra kullanılan yatağın türüne (yatak yüksekliği, besleme yöntemi ve operasyon hızı) de bağımlı olmasıdır. Bugün için akışkan yataklarda uçucu madde davranışı hakkında gerek deneysel, gerekse kuramsal olarak yeterli bilgilerin mevcut olduğu ve konunun tam anlamıyla açıklığa kavuştuğu söylenemez. Ama araştırmacılar birçok ortak konuda fikir birliğine varabilmişlerdir (3,19,21,26,28-59).

Agarwal vça (31) yanmanın olmadığı bir ortamda akışkan yatakta uçucu madde çıkışı için basit bir model önermişlerdir. Bu modelde, Anthony vça (34) tarafından türetilen uçucu madde çıkışı kinetiği ile taneciğe ve tanecik içinde olan ısı transferi birleştirilmiştir. Bu model, küçük kömür tanecikleri için kinetik kontrollü uçucu çıkış hızını, büyük kömür tanecikleri için ise, tipik bir akışkan yatak şartlarında ısı transfer kontrollü uçucu madde çıkış hızını ön görmektedir. Agarwal vça (31) lmm çapından daha büyük kömür tanecikleri için uçucu çıkış mekanizmasının, ısı transferi kontrolüne bağlı olduğu sonucuna varmışlardır ve uçucu madde çıkış süresinin tanecik çapının karesi ile $t \propto d^2$)

doğru orantılı olduğunu belirtmişlerdir. Daha sonra, Agarwal vça (35) önerdikleri d^2 kanununun, akışkan yatakta yakma şartları için yalnızca çok özel durumlarda geçerli olabileceğinin farkına varmışlardır; örneğin: iç ısı transfer hızının kontrol ettiği uçucu madde çıkışı durumlarında geçerlidir veya $Nu = 2$ olduğu dış ısı transfer kontrollü uçucu madde çıkışı durumunda geçerlidir. Bu nedenle Agarwal vça (35) önerdikleri yeni modelde uçucu maddenin çıkış hızını incelerken, uçucu maddenin yanmasını takiben gelen etkiler üzerinde durmuşlardır. Böylece, kömür taneciğinin etrafını saran uçucu madde alevinden kömür taneciğine doğru olan ısı akışı, modeldeki formülasyona ilave edilmiştir. Bu son durumda, uçucu madde alevi nedeniyle kömür taneciğinin sıcaklığı artacağı için yeni modeldeki formülasyonla bulunacak uçucu çıkış hızının artacağı açıkça görülmektedir.

Anthony ve Howard (24) 1976 yılına kadar yapılmış ve kömürdeki uçucuların davranışını inceleyen çalışmalarını gözden geçirmişlerdir. Bu çalışmaların çoğunda 1 mm den küçük pülverize kömür tanecikleri kullanılmıştır. Anthony ve Howard (24) 900°C da hızla ısıtılmış 70 μ m çapındaki kömür tanecikleri için uçucuların çıkışının 1 saniyede tamamlandığını gözlemişlerdir. Akışkan yataklarda ise daha büyük boyutlarda kömür tanecikleri yakıldığı için daha uzun uçucu madde çıkış süresi düşünülebilir. Nitekim, uçucu madde çıkış süresi, Ekinci vça (36) tarafından tanecik boyutu 1-5 mm olan üç değişik kömür için 2-14 saniye, Flint ve Karmi (37) tarafından 1.47-3.35 mm boyunda iki değişik kömür için 2-9 saniye, Ragland vça (32) tarafından 2-10 mm boyunda tanecikler için 10-60 saniye, Pillai (38) tarafından 250 μ m - 8 mm aralığında 12 değişik kömür için 2-60 saniye arasında ölçülmüştür.

Ragland vça (32) 705-871°C arasında %21-10.5 oksijen konsantrasyonlarında 2-10 mm tanecik büyüklüğünde kömür kullanarak yaptığı çalışmalarda kömürün yanmasını üç adıma bölerek incelemiştir. İlk adımda kömürün ısınıp nemini ve uçucularını gidermeye başladığını ve bu aradaki yanma gecikmesinin de 2-12 saniye arasında değiştiğini; ikinci adımda

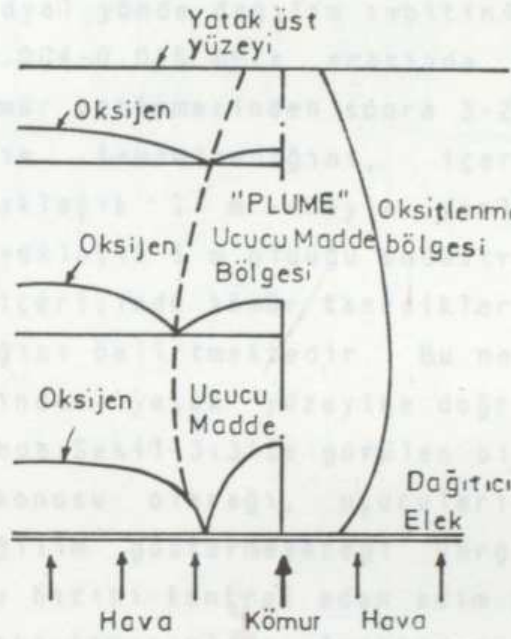
ise uçucuların çıktığını ve kömür taneciklerinin etrafında yandığını, bu sürenin ise tanecik çapı ve diğer parametrelere göre 10-60 saniye arasında değiştiğini; üçüncü ve en uzun adımda ise uçucularını kaybetmiş sabit karbonun yandığını ve bunun da 100-700 saniye arasında değiştiğini göstererek, tasarım çalışmalarında bu üç adımın herbirinin sürelerinin göz önünde bulundurulması gerektiğini vurgulamıştır.

La Nauze (39) ise, uçucu maddenin çıkışını kontrol eden mekanizmaları diğer araştırmacıların sonuçlarını da kullanarak incelemiş ve tanecik-tanecik ısı transfer katsayısının akışkan yatakta bir hayli yüksek olacağından kömür taneciğine olan ısı transfer hızının sınırlayıcı bir faktör olmadığını; Morris ve Keairns'in (40) çalışmalarında iri bir kömür taneciğinin merkezinin 600°C'a gelebilmesi için gerekli sürenin uçucu madde çıkış süresinden %40 daha küçük olduğunu gösterdiğini ve dolayısıyla kömür taneciğinin içindeki ısı transfer hızının sınırlayıcı bir faktör olmadığını belirterek uçucu madde çıkışının kömür taneciği içerisinden dışarıya doğru olan uçucuların diffüzyon hızıyla kontrol edildiğini ileri sürmektedir.

Park vça (41,48) inert yatak malzemesi olarak iri (yaklaşık 1cm) tanecikler içeren, buna karşılık çok ince öğütülmüş kömür taneciklerinin yatağın altından hava ile yüksek hızlarda verildiği geniş çaplı akışkan yataklar için "plume" (tüy) modelini geliştirmişlerdir.

Bu modelde çok küçük olan kömür tanecikleri için uçucu madde çıkış süresinin, kömür taneciklerinin besleme noktasından uzaklara doğru dağılma süresinden çok daha hızlı olduğu kabul edilmiştir. Buna göre uçucu madde yatak içine beslendiği an hemen açığa çıkmakta ve besleme noktasından itibaren tüy şeklinde bir bulut bölgesi oluşturup bu tüy sınırında oksijen ile tepkimeye girerek Şekil 3.2 ' de gösterildiği gibi yanmaktadır. Yatak yüksekliği boyunca bulut sınırında yeteri kadar oksijen ile tepkimeye giremeyen uçucu madde ise, aktif yatak üzerindeki serbest bölgede yanmasını tamamlayarak bu

bölgede sıcaklık artışına neden olmakta, eğer yeteri kadar sıcaklık ve hacim yok ise yanmasını tamamlayamadan sistemi terk etmektedir.

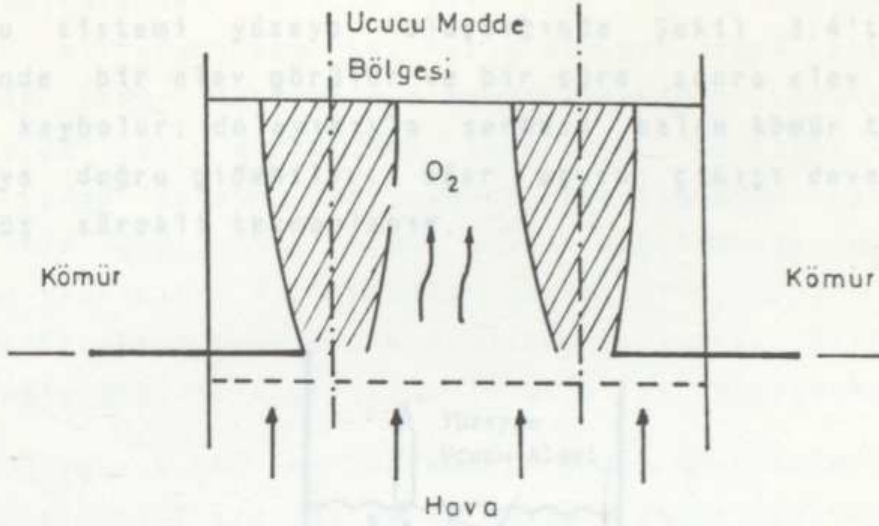


Şekil 3.2 Tü ("Plume") Modelinin Şeması

Yates vça (42) ise Park'ın önerdiği "plume" modelinin aksine, 200 μm 'luk taneciklerden oluşan bir akışkan yatakta bir tele asılı yaklaşık 2 mm çapında bir kömür taneciğinin x-ışını fotoğraflarını çekerek uçucuların bağımsız kabarcıklar halinde çıktığını ileri sürmektedir. Park'ın çalışmalarında iri taneciklerden (yaklaşık 1 cm) oluşan bir akışkan yatak ve alttan çok ince öğütülmüş kömür beslemesi söz konusuysa, Yates'ın çalışmalarında ise tam tersi, yani çok ince öğütülmüş taneciklerden oluşan bir akışkan yatakta iri bir kömür taneciğindeki uçucu madde davranımının incelenmiş olması iki araştırmacının tamamen farklı şartlarda çalıştığını göstermektedir.

Stubington (43) , beslemenin yatak altından yapıldığı durumlarda, kömür taneciklerinin düşey ve radyal yönde karışımlarını öncelikle inceleyip yatak içerisinde radyal yönde tanecik karışımının düşey yöndekinden çok daha küçük olduğunu belirtmektedir. Highley ve Merrick (44) 1.5 m çapında bir yatakta taneciklerin radyal yönde dağılım sabitinin (particle dispersion coefficients) 0.004-0.015 m²/s arasında değiştiğini ölçmüştür. Stubington, kömür beslemesinden sonra 3-20 saniye arasında uçucu madde çıkışının tamamlandığını, içerisinde kömür besleme noktalarının yaklaşık 1 m arayla yerleştirildiği ve yatak yüksekliğinin yaklaşık 1 m olduğu endüstriyel akışkan yataklarda ise, bu süre içerisinde kömür taneciklerinin radyal yönde çok yavaş dağılacakını belirtmektedir. Bu nedenle yatak içerisinde besleme noktasından yatak yüzeyine doğru düşey yönde yavaşça büyüyen r çapında Şekil 3.3'te görülen birden fazla uçucu madde bölgesinin söz konusu olacağı, uçucuların tüm yatak içerisinde düzgün bir dağılım göstermeyeceği vurgulanmaktadır. Böylece uçucuların yanma hızını kontrol eden adım uçucuların ve oksijenin yatak içerisindeki karışımları olmaktadır. Küçük parçacıklar için hava habbesindeki oksijen, yoğun faza transfer olmayıp yatağı terk ettiği durumda, uçucu madde bölgesindeki uçucuların yatak üzerinde yanması söz konusu olacaktır. İri tanecikli yataklar için ise, %40 uçucu madde içeren bir kömürün %15 hava fazlalığında yakıldığı, dolayısıyla oksijenin "bubble" fazından yoğun faza transferinin çok hızlı olduğu durumlarda bile kömür taneciklerinin radyal yönde dağılımının küçük olması dolayısıyla verilen oksijenin sadece 1/4 ü oluşan uçucu madde bölgesinden geçerek uçucuların yanmasını sağlayabilecektir. Bu da, uçucu maddenin yanmasını serbest bölgede tamamlamasını kaçınılmaz kılacaktır.

Uçucularını kaybetmiş kömür taneciklerinin yanma süresi, uçucuların yanma süresine oranla çok uzun olduğundan radyal yönde yavaş dağılım nedeniyle kömür tanecikleri için, yatak içerisinde bir yanma bölgesinin söz konusu olmayacağı yani uzun yanma süreleri nedeniyle tüm yatak içerisinde dağılım gösterecekleri Stubington tarafından belirtilmektedir.

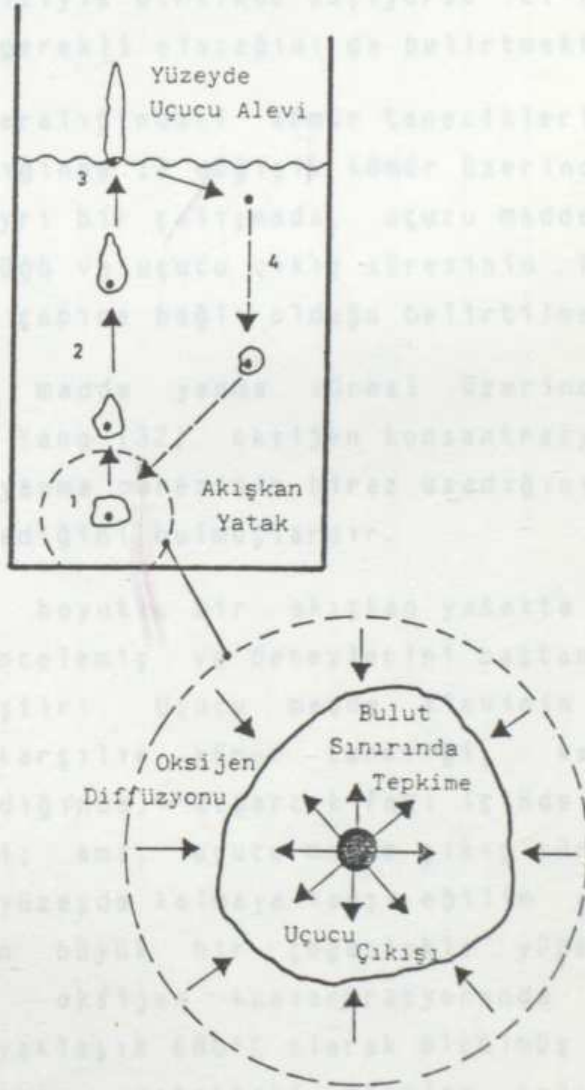


Şekil 3.3 Kömür Beslemenin Yatak Altından Yapıldığı Bir Durum

Stubington (43), uçucu maddenin çıkış süresine kömür neminin neden olacağı etkileri de incelemiştir. Kömürden nemin çıkışının, uçucu madde çıkışından önce ve uçucu çıkışı süresince de olabileceği; yüksek nem içeren kömürlerde nemin, uçucuların bulunduğu fazı seyrelteceği dolayısıyla hem uçucuların hem de uçucusuz karbonlu yapının yanmasının gecikeceği, böylece yatak üzerinde uçucu madde yanmasının söz konusu olacağı belirtilmiştir. Bu sorunun önlenmesi için besleme noktalarının birbirine daha yakın olmasını önermekle birlikte kömürün uçucu maddesi oldukça fazla ise yatak üzerinde uçucu yanmasının yine de ciddi bir sorun yaratacağını vurgulamıştır.

Pillai (38,45,46,47) ise, iri taneli (12-15 mm) kömürlerin akışkan yatakta yanmasını gözlemleyerek, uçucuların yanma mekanizmasına çok daha farklı yoldan yaklaşmaktadır. Yatağa atılan kömür taneciklerinden uçucu madde çıkışı başlar başlamaz uçucular kendi tanecikleri etrafında bir uçucu madde bulutu oluştururlar. Bu uçucu madde bulutunun büyüklüğünü, uçucu madde çıkış hızı ve oksijenin buluta olan diffüzyonu birlikte belirler. Yukarıya doğru kabaran bu uçucu madde bulutu kömür taneciğini de kendisiyle sürüklemeye çalışır. Kömür taneciği-uçucu madde

bulutu sistemi yüzeye ulaştığında Şekil 3.4'teki gibi tüy şeklinde bir alev görülür ve bir süre sonra alev şeklindeki bu bulut kaybolur; dolayısıyla serbest kalan kömür taneciği tekrar aşağıya doğru gidebilir. Eğer uçucu çıkışı devam ediyorsa bu yürüyüş sürekli tekrarlanır.



Şekil 3.4 Kömür Taneciği-Uçucu Madde Bulut ve Alevinin Şematik Gösterimi



Gözlemlerini kısaca yukarıdaki gibi özetleyen Pillai, oksijen diffüzyonunun çok fazla olduğu, yani oksijenle uçucu maddenin kömür taneciğinin hemen yüzeyinde tepkimeye gireceği durumlarda ise, yukarıdaki davranışın geçerli olamayacağını; uçucu madde bulutu kendi kömür taneciğinden ayrılarak yatak içerisinde dağılırsa, uçucu madde dağılımının modellenmesinde iki-faz teorisinin kullanılması gerektiğini; uçucu madde bulutu kömür taneciğini kendisiyle birlikte taşıyorsa iki-faz teorisinde bazı değişikliklerin gerekli olacağını da belirtmektedir.

250 μm - 8 mm aralığındaki kömür tanecikleriyle ve 775-1010°C sıcaklık aralığında 12 değişik kömür üzerinde Pillai (38) tarafından yapılan ayrı bir çalışmada, uçucu madde çıkışının 1 dakikaya kadar sürdüğü ve uçucu çıkış süresinin kömür tipine, sıcaklığa ve parçacık çapına bağlı olduğu belirtilmektedir.

Oksijenin uçucu madde yanma süresi üzerindeki etkisini inceleyen Ragland ve Yang (32) oksijen konsantrasyonunun sadece %4.5 iken uçucuların yanma süresinin biraz uzadığını, %10.5 den sonra değişme göstermediğini bulmuşlardır.

Prins (30), iki boyutlu bir akışkan yatakta uçucu madde yanma davranışını incelemiş ve deneylerini baştan sona video kamera ile kaydetmiştir: Uçucu madde alevinin yoğun fazda oluşmadığı; buna karşılık kömür taneciği, kabarcık fazı sınırlarında yer aldığı anda, kabarcık fazı içinde uçucu madde alevinin oluşabildiği; ama, uçucu madde çıkış süresince kömür taneciği genellikle yüzeyde kalmaya karşı eğilim gösterdiğinden uçucu madde alevinin büyük bir çoğunlukla yüzeyde oluştuğu belirtilmiştir. %21 oksijen konsantrasyonunda uçucu madde alevlenme sıcaklığı yaklaşık 680°C olarak ölçülmüş ve uçucuların alev alma sıcaklığının, yataktaki oksijen konsantrasyonunun azalmasıyla arttığı gözlenmiştir. 1 ile 20 saniye arasında değişen uçucu madde yanma gecikme süresi yüksek sıcaklıklarda azalmıştır. Kömür taneciği çapının uçucu madde yanma süresine etkisi $t = ad^{1.7}$ olarak verilmiştir; sıcaklığın bu süreye etkisinin $680 < T < 850^\circ\text{C}$ aralığında küçük olduğu ve ayrıca, nemli kömür beslenmesi durumunda, havada kuru halde beslemeden daha uzun

Tablo 3.1 Çeşitli Parametrelerin Uçucu Madde Çıkış Süresine Etkisi ve İnceleyen Araştırmacılar

	Ortam	Çalışma	Nem	Tanecik Çapı	Oksijen Konsantrasyonu	Yatak Sıcaklığı	Uçucu Madde Miktarı	Besleme Miktarı
Ekinci vça (36)	0	d		+			0	
Stabington ve Sumaryono (28)	1	d		+		-		
Andrei vça (25)	0	d		+	Alev Süresi + Gaz Analizi 0			
Pillai (38,45)	0	d		+	0		0	+
Urkan vça (19,21)	0	d	+	+	0			
Ragland ve Yang (32)	0	dt		+	0			
Agarwal (35)	0	dt		+				
Beer (58)	0	t		+	-		+	
Stabington (43)	0	dçy	+	+	-		+	
La Nauze (39)	0	dçy		+			+	
Billge (29)	0	d	+	+	+			

0 : oksitleyici ortam

1 : inert ortam

d : deneysel çalışma

t : teorik çalışma

dt : deneysel ve teorik

dçy : diğer çalışmaların yorumu

+ : doğru orantılı

- : ters orantılı

0 : bağımsız

Tablo 3.2 Uçucu Madde Çıkışı Hız Kontrol Edici Adım

	Kontrol Edici Adım	Tanecik Çapı (mm)
Stubington (28)	Taneciğe ve tanecik içinde ısı transferi	3.00-11.0
Andrei (25)	Isıl bozunma tepkimelerinin kinetiği	1.65-3.28
Pillai (38,45)	Isı transferi ve uçucunun tanecikten difüzyonu	0.25-8.00
Ragland (32,59)	Taneciğe ısı transferi	5.30-9.90
Agarwal (31,35)	Taneciğe ve tanecik içinde ısı transferi	>1.00
La Nauze (39)	Uçucuların tanecikten dışarıya difüzyonu	0.50-10.0
Bilge (29)	Taneciğe ve tanecik içinde ısı transferi	1.00-6.00

uçucu madde yanma sürelerinin ölçüldüğü belirtilmektedir. Prins (30) yaptığı deneyler sonucunda, uçucu madde çıkış-yanma süresinin, hem taneciğe olan hem de tanecik içinde olan ısı transferine bağlı olduğu sonucuna varmıştır.

Sonuç olarak, Agarwal'ın (34) tek kömür taneciği modeliyle hesaplanan uçucu madde çıkış sürelerinin Prins'in (30) deneysel çalışmalarındaki uçucu madde alev gözleme sürelerinden çok daha büyük olduğu ortaya çıkmıştır.

Görüldüğü gibi uçucu maddenin akışkan yatakta yanma sürecini etkileyen parametreler ve hız kontrol edici adım hakkında günümüze kadar değişik görüşler ileri sürülmüştür. Belli başlı araştırmacılar tarafından etkileri incelenen parametreler ve önerilen hız kontrol edici adımlar tablo 3.1 ve 3.2'de özetlenmiştir.

3.4 Türk Kömürleri Üzerinde Yapılan Çalışmalar

Uçucu maddenin yanma davranışı üzerine Türkiye'de ilk çalışma Ekinci vça (36) tarafından gerçekleştirilmiş ve konunun önemi belirtilmiştir. Ardından değişik çalışma gurupları bu konuya ilgi göstermişlerdir.

Akışkan yatakta uçucu madde yanma davranışının deneysel olarak incelenmesi halen İTÜ-Kimya-Metalurji Fakültesi'nde ve TÜBİTAK Makina ve Enerji Sistemleri Araştırma Bölümü'nde sürdürülmektedir.

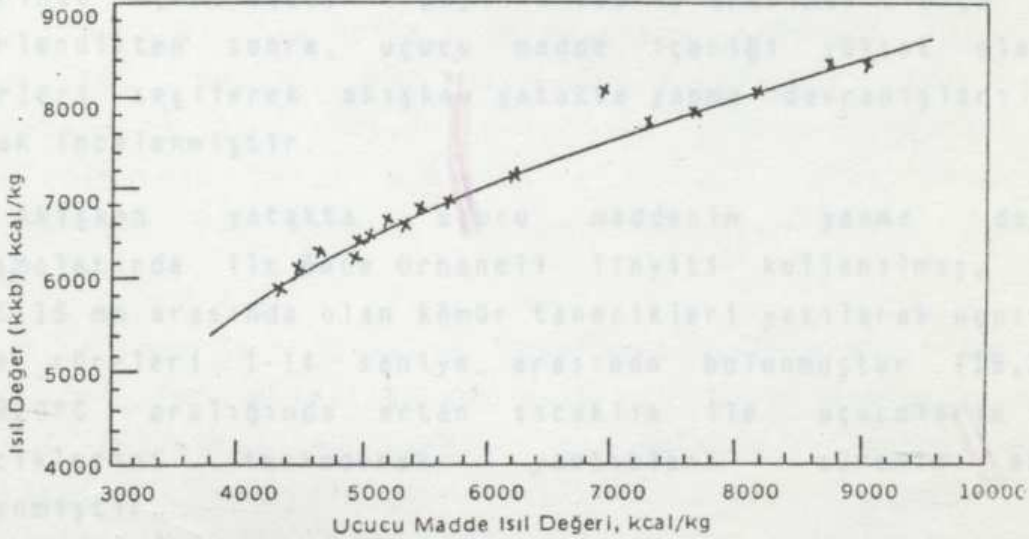
TÜBİTAK-MESAB'ta yapılan çalışmalarda, seçilen 22 adet Türk kömürü üzerinde ASTM standartlarına uygun olarak birçok analiz yapılmış ve kömürlerin kuru külsüz bazdaki ısı değerleri ile uçucu maddelerin ısı değerleri arasındaki ilişki Urkan-Arıkol (3) tarafından geliştirilmiş bir bağıntı ile aşağıda gösterildiği gibi belirlenmiştir.

$$H_{u} = 2.93 \cdot 10^{-4} (H_{k,kb})^2 - 2.296 H_{k,kb} + 7622$$

$H_{k,kb}$ = Kömürün kuru külsüz bazdaki üst ısıl değeri (kcal/kg)

H_{u} = Uçucu maddenin ısıl değeri (kcal/kg)

Yukarıdaki eşitliğin kullanımıyla elde edilen eğri ve 22 değişik kömürün deneysel sonuçları Şekil 3.5'te gösterilmiştir. Eğrinin deneysel noktalara bir nokta dışında oldukça iyi uyduğu görülmektedir; eğrinin üzerinde kalan bu nokta ise asfaltit örneğine aittir. Asfaltit ise, linyit ve taşkömürlerinden yapı olarak tamamen farklı bir katı yakıttır.



Şekil 3.5 Uçucu Maddenin Isıl Değeri ile Kuru Külsüz Bazdaki Isıl Değer Arasındaki İlişki

Kömürün içerdiği uçucu maddenin ısıl değeri deneysel olarak doğrudan ölçülemediği için, kömürün kuru külsüz bazdaki deneysel ısıl değerini kullanarak uçucu madde ısıl değerini veren Urkan-Arikol bağıntısının bu konuda çalışanlara oldukça yararlı olacağı açıktır. Kömürün ısıl değeri deneysel olarak ölçüldüğünde

ve dolayısıyla kömürün kuru külsüz bazda ısı değeri bilindiğinde, Urkan-Arıkol bağıntısı yardımıyla kömürün ısı değerinin yüzde kaçının uçucu maddeye ait olduğu kolayca hesaplanabilir.

Kömürün kalitesi arttıkça, yani genç linyitlerden kaliteli linyitlere ve taşkömüre doğru gidildikçe, uçucu madde ısı değerinin 4000 kcal/kg'dan 9000 kcal/kg değerine arttığı bulunmuştur. Şekil 3.5'te uçucu maddenin ısı değerinin 4000-6000 kcal/kg arasında değiştiği deneysel noktalar linyit örneklerine; 8000-9000 kcal/kg aralığındaki noktalar, taşkömürü örneklerine; 6000-7000 kcal/kg arasında kalan noktalar ise, Soma ve Gediz yörelerinden gelen taşkömürü özelliklerinde olmayan, ama kaliteli olan kömürlere ait bulunmaktadır.

Yapılan analizler sonucunda, Türk kömürlerinin ısı değerinde uçucu maddenin payının %35-45 arasında olduğu böylece belirlendikten sonra, uçucu madde içeriği yüksek olan Türk kömürleri seçilerek akışkan yatakta yanma davranışları planlı olarak incelenmiştir.

Akışkan yatakta uçucu maddenin yanma davranışı çalışmalarında ilk önce Orhaneli linyiti kullanılmış, çapları 1.0-5.15 mm arasında olan kömür tanecikleri yakılarak uçucu madde yanma süreleri 1-14 saniye arasında bulunmuştur (19,20,21). 770-920°C aralığında artan sıcaklık ile uçucuların kömür taneciklerini terkederek yandıkları sürenin azaldığı gözlenmiştir.

Tanecik boyutu arttıkça uçucuların yanma süresi de artmaktadır. Uçucuların yanma süresi t_v ile parçacık boyu d arasındaki ilişki

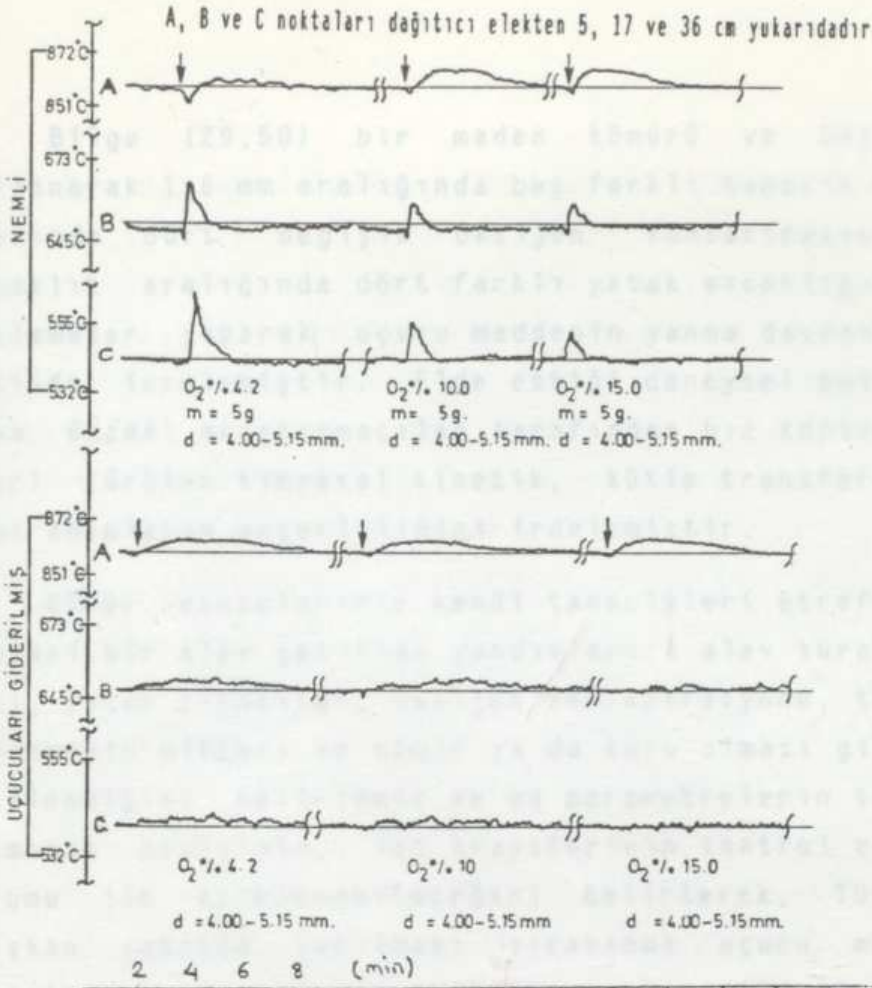
$$t_v = ad^n$$

şeklinde ifade edilmektedir. Deneysel sonuçlara göre bu denklemdeki sabitlerden a , sıcaklık artışıyla düşmektedir, n ile sıcaklık arasındaki ilişki ise tam olarak belirlenmemiş ancak n için 1.6-2.0 arasında değerler bulunmuştur.

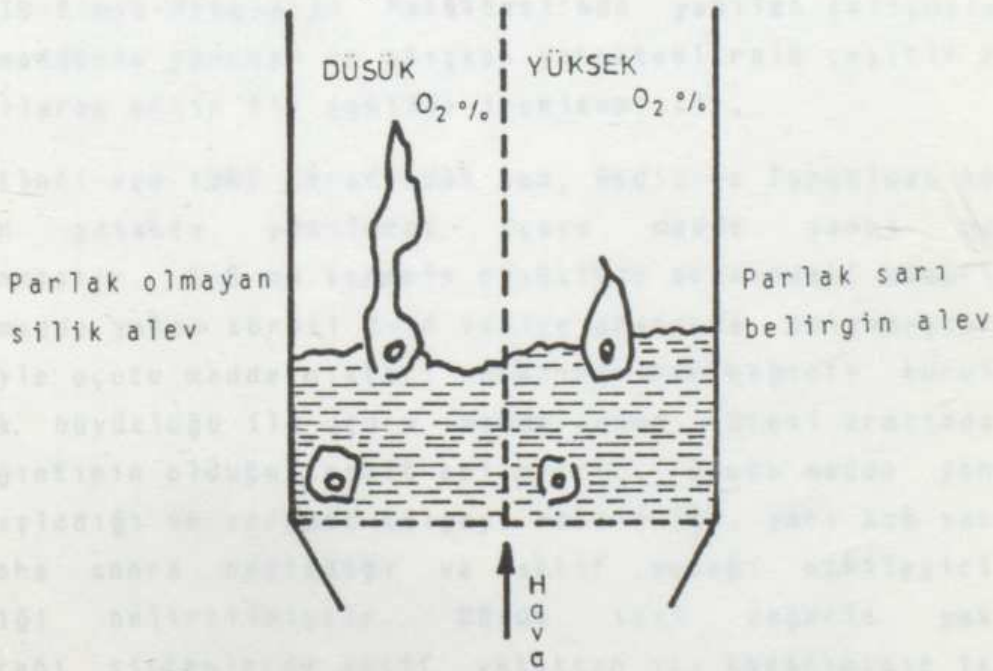
Akışkan yatakta uçucu maddenin kömür taneciğini terketmesi ve yanması için geçen sürenin %4.2-15.0 oksijen konsantrasyonları arasında değişmediği aynı çalışmada belirtilmektedir. %4.2 oksijen konsantrasyonunda daha düşük süreler bulunması, uçucu bulutu etrafındaki yetersiz oksijen miktarı yüzünden uçucu alevinin gözle izlenememesi ile açıklanmıştır. Nitekim uçucu yanmasının aynı nedenle serbest bölgede devam etmek zorunda kaldığı, düşük oksijen konsantrasyonlarında serbest bölgede gözlenen ani sıcaklık artışları ile de deneysel olarak kanıtlanmıştır (Şekil 3.6). Şekil 3.7'de şematik olarak gösterildiği gibi yüksek oksijen konsantrasyonlarında tanecik etrafındaki uçucu bulutu, çapı daha küçük fakat gözle çok rahat görülebilen tüy şeklinde keskin ve parlak bir alev halinde yatak yüzeyinde görülmektedir. Halbuki %4.2 gibi düşük oksijen konsantrasyonlarında uçucu madde bulut çapı Şekil 3.7'de görüldüğü gibi büyümekte, dolayısıyla taneciği saran keskin parlak tüy şeklinde bir alev görülmemektedir. Ama bu bulut tanecikten ve yatak yüzeyinden ayrılıp yanmasını serbest bölgede tamamladığından Şekil 3.6' da görüldüğü gibi %4.2 oksijen konsantrasyonunda serbest bölgede sıcaklık artışı daha fazla olmaktadır.

Aynı kömürün orijinal ve uçucuları önceden giderilmiş olmak üzere iki farklı şekilde ama aynı ısı girdide olacak miktarda kesikli beslenmesiyle yapılan çalışmalarda üç değişik noktada sıcaklıklar kaydedilmiştir. Şekil 3.6'da görüldüğü gibi uçucuların önceden giderildiği durumda yapılan beslemede aktif yataktaki sıcaklık artışı çok belirgin olmuş, buna karşılık serbest bölgede hissedilir ani sıcaklık artışı gözlenmemiştir. Orijinal halde kömür beslendiğinde, uçucular yanmalarını kısmen serbest bölgede tamamladıklarından, sabit yatak yüksekliği 5cm olan yatağın dağıtıcı eleğinden 17 cm yukarıda yaklaşık 16°C ve 36 cm yukarıda yaklaşık 30°C ani sıcaklık artışları gözlenmiştir.





Şekil 3.6 Akışkan Yatakta Uçucu Maddenin Neden Olduğu Sıcaklık Artışları



Şekil 3.7 Uçucu Madde Alevine Oksijen Konsantrasyonunun Etkisinin Şematik Gösterim

Bilge (29,50) bir maden kömürü ve beş değişik linyit kullanarak 1-6 mm aralığında beş farklı tanecik boyu için %4.2-15 arasında dört değişik oksijen konsantrasyonu ve 775-920°C sıcaklık aralığında dört farklı yatak sıcaklığında nemli ve kuru beslemeler yaparak uçucu maddenin yanma davranışını yoğun bir şekilde incelemiştir. Elde ettiği deneysel bulgular yardımıyla, daha önceki araştırmacılar tarafından hız kontrol edici olarak ileri sürülen kimyasal kinetik, kütle transferi, ısı transferi gibi adımların geçerliliğini irdelemiştir.

Kömür uçucularının kendi tanecikleri etrafında parlak tüy benzeri bir alev şeklinde yandıkları; alev süresinin ise, kömür tipi, yatak sıcaklığı, oksijen konsantrasyonu, tanecik büyüklüğü, beslemenin miktarı ve nemli ya da kuru olması gibi değişkenlerden etkilendiğini belirlemiş ve bu parametrelerin tamamına yakın bir kısmının etkisinin, ısı transferinin kontrol edici adım olması durumu ile açıklanabileceğini belirterek, Türk linyitlerinin akışkan yatakta yakılması sırasında uçucu madde çıkış-yanma sürecinin ısı transferi ile kontrol edildiği sonucuna varmış bulunmaktadır.

İTÜ-Kimya-Metalurji Fakültesi'nde yapılan çalışmalarda da uçucu maddenin yanması ve akışkan yataktaki rolü çeşitli kömürler kullanılarak etkin bir şekilde incelenmiştir.

Ekinci vça (36) tarafından Çan, Gediz ve Zonguldak kömürleri akışkan yatakta yakılarak uçucu madde yanma davranışı incelenmiştir. 1-5 mm tanecik büyüklüğü arasındaki kömürler için uçucu madde yanma süresi 2-14 saniye arasında bulunmuştur. Yanma süresiyle uçucu madde miktarı arasında bir bağıntı kurulamamış, tanecik büyüklüğü ile uçucu madde yanma süresi arasında üstel bir bağıntının olduğu tesbit edilmiştir. Uçucu madde yanmasının önce başladığı ve serbest bölgeyi etkilediği, yarı kok yanmasının ise daha sonra başladığı ve aktif yatağı etkileyici yönde geliştiği belirtilmiştir. Düşük ısı değerli yakıtların yakılacağı sistemlerde aktif yataktan ısı kazanımının istendiği durumlarda uçucu madde yanmasını yatak içerisine çekecek önlemlerin alınmasının gerekliliği vurgulanmıştır.

Zonguldak, Gediz, Kütahya, Çan, Elbistan ve Ağaçlı kömürlerinin uçucu madde yanma davranışı Yalkın (51) tarafından 750-850°C arasında ve 1.00-10.0 mm tanecik çapı aralığında 3 gramlık kesikli beslemelerle ayrıntılı olarak incelenmiştir: Uçucu madde yanma süresinin belli bir tane boyutunda sıcaklığın yükselmesi ile kısaldığı; belli bir sıcaklıkta tane boyutunun büyümesiyle arttığı ve en düşük uçucu madde yanma süresinin Elbistan kömüründe ölçüldüğü belirtilmektedir. Uçucu madde yanma süresini veren $t=ad^n$ eşitliğindeki n'nin 0.80 ile 1.50 arasında değiştiği; n sayısının kömürün yapısıyla ilgili olduğu ve ayrıca sıcaklıkla da değiştiği Yalkın (51) tarafından tesbit edilmiştir. Uçucu madde yanma süresini, tanecik çapı ve sıcaklığa bağlayan $t=A+Bd-CT$ şeklindeki bir bağıntının katsayıları her bir kömür için bulunmuştur.

Madralı (52), akışkan yataklarda yanmanın ilk anlarındaki ayrışma eğilimini ve kömür yapısındaki değişimleri incelediği çalışmada, uçucu maddenin ve çıkış sürelerinin kömür taneciklerinin ufalanmasına yönelik önemli bir etken olduğunu belirtmektedir. İncelenen kömürlerde Sundback'in (53) öne sürdüğü gibi parçalanmalar tesbit edilmiştir. Çan kömüründe parçalanma eğiliminin 30 saniye içerisinde 4-5 mm çapındaki taneciklerde daha fazla 1-2 mm çapındaki taneciklerde daha az olduğu belirlenmiştir.

4. DENEY DÜZENİ VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Akışkan yatakta uçucu madde davranışını deneysel olarak incelemek için 12 adet Türk ve 1 adet yabancı kömür kullanılmıştır. Çeşitli tanecik büyüklüklerine ayrılan kömürler, kumla akışkanlaştırılmış sıcak yatağa belirli miktarlarda kesikli olarak beslenmiş, uçucu maddelerin yanarken çıkardıkları alevin süresi gözlenerek ölçülmüştür. Yakma deneylerinde parçacık boyu, yatak sıcaklığı gibi parametreler değiştirilerek bunların etkileri araştırılmıştır. Kullanılan kömürlerin özelliklerini saptamak için gereken kısa analiz ve, element analizi tüm kömürler için yapılmıştır. Ayrıca akışkan yatakta uçucu madde davranışının daha iyi anlaşılabilmesi için bazı özel analizler ve deneyler de yapılmıştır. Özel analizler, her kömür için yapılan termogravimetrik analizler ile değişik sıcaklıklarda tekrarlanan uçucu madde tayinleridir. Kömürün akışkan yatakta yanma sürecinde çok önemli bir parametre olan tanecik-yatak arasındaki ısı transfer katsayısını belirlemek amacı ile de bir dizi özel deney yapılarak tanecik merkezindeki sıcaklığın zaman ile değişimi kaydedilmiştir.

4.1 Deneylerde Kullanılan Akışkan Yatak Düzeni

Akışkan yatakta yakma deneyleri, Şekil 4.1'de şematik olarak gösterilen TÜBİTAK-MBEAM Makina ve Enerji Sistemleri Akışkan Yatak Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Kullanılan akışkan yatağın iç çapı 15 cm, yüksekliği ise 30 cm olup Şekil 4.2'de şematik olarak gösterilmektedir. Yüksekliği 30 cm olan aktif yatağın üzerine gerektiğinde koyulabilen 24 cm yüksekliğinde ikinci bir parça da mevcuttur.

Yüksekliği 30 cm olan aktif yatak üzerinde 3 kömür besleme noktası, 3 kül boşaltma noktası, 6 sıcaklık ölçme noktası ve gaz analizi için 4 adet gaz örnek alma noktası bulunmaktadır.

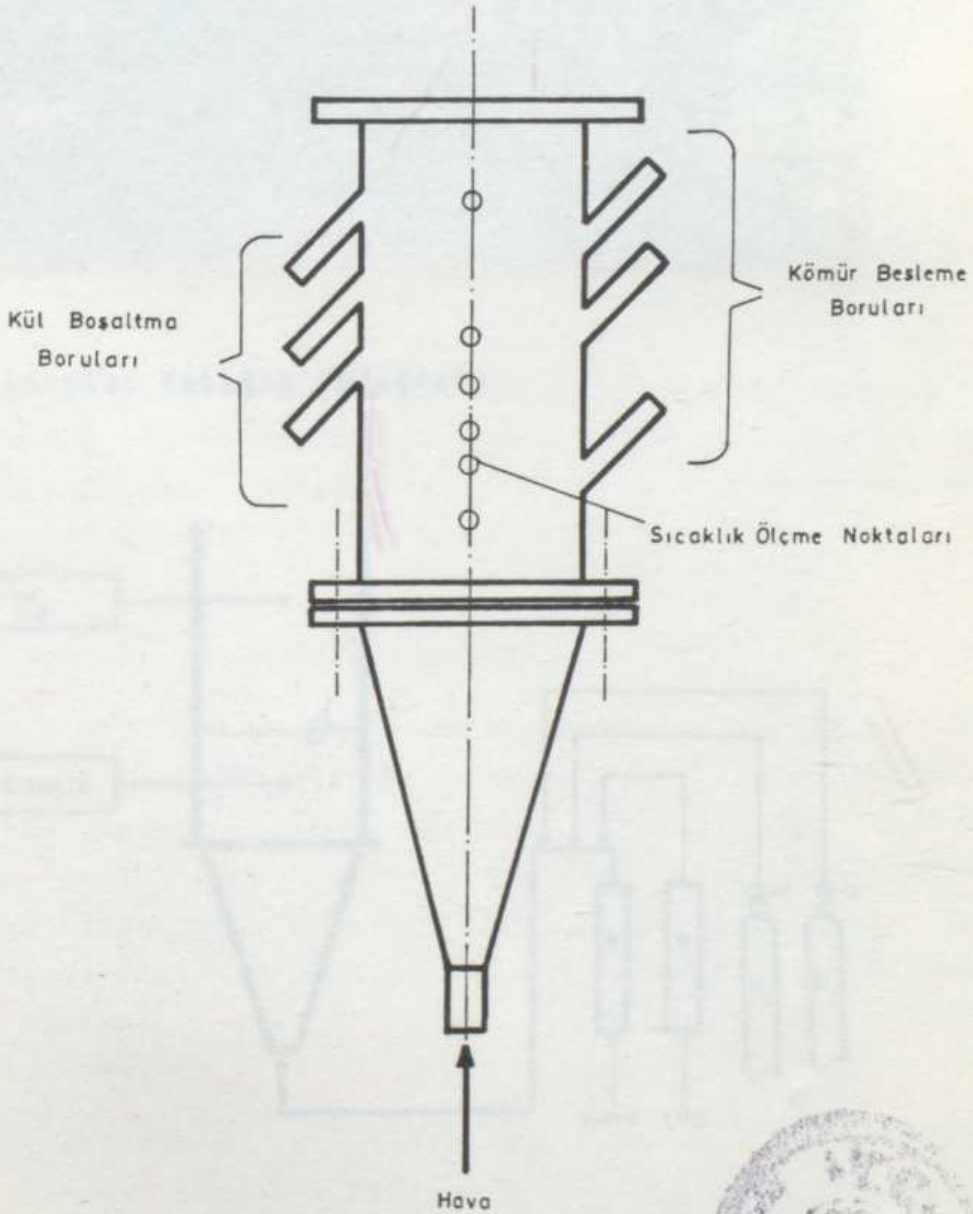
Dağıtıcı elekten itibaren sırasıyla, kömür besleme noktaları 5, 15, 20 cm; kül boşaltma noktaları 12, 17, 21 cm; sıcaklık ölçme noktaları 5, 8, 11, 14, 17, 29, cm ve gaz analizi için örnek alma noktaları 7, 12, 17, 22 cm yukarıda yer almaktadır. Dağıtıcı elek 1mm çapında 892 adet delik içermektedir. Şekil 4.1, 4.2, ve 4.3'te şema, fotoğraf ve özellikleri görülen akışkan yatak değişik amaçlı araştırmalara uygun bulunmaktadır.

Uçucu maddenin yanma davranışının incelenmesi Şekil 4.4'te şematik olarak görülen çalışma sisteminde gerçekleştirilmiştir. Sabit yatak yüksekliği 5 cm olacak şekilde tüm deneylerde 0.5-1.0 mm aralığında 2.65 g/cm^3 yoğunluğunda Şile yöresinin kumu kullanılmıştır. Sıcaklık ölçümü, dağıtıcı elekten 5 cm yukarıda aktif yatağın içinde Ni-Cr-Ni ısılıçift kullanılarak; oksijen konsantrasyonu ise, "Westinghouse Portable Combustion Analyzer" cihazının probu dağıtıcı elekten 22 cm yukarıdan merkeze kadar daldırılmak suretiyle sürekli olarak ölçülmüştür.

Kompresörden gelen hava yağ filtresinden geçirildikten sonra sabit basınç regülatörünün yardımıyla sabit basınca getirilip Fisher-Porter D-10A5455CD tipi rotametrelerden geçirilerek istenilen debide akışkan yatağa alttaki rüzgar odasından beslenmiştir. Sanayi boyutundaki LPG tüpünden temin edilen propan gazı ayrı bir rotametreden geçirilip hava ile karıştırılarak rüzgar odasının girişinden sisteme beslenmiştir. Ateşleme yatak üzerinden yapılmış ve ardından debi ayarları yapılarak sistemin istenilen sıcaklığa gelmesi ve bu sıcaklıkta kararlı halde kalması sağlanmıştır. İncelenen parametrelere bağlı olarak Şekil 4.4 te görüldüğü gibi sisteme oksijen veya azot beslenmiştir. Oksijen konsantrasyonu yatak üzerinden sürekli ölçülmüştür. Arzu edilen oksijen konsantrasyonuna ulaşıncaya kadar, oksijen ve azot tüplerine bağlı olan göstergeli rotametreler yardımıyla bu gazların debisi kontrol edilerek sisteme beslenen havaya, hava rotametrelerinden önce ilave edilmiştir. Böylece sisteme beslenen bütün gazların debileri ölçülmüş bulunmaktadır. Alevin geri tepmesini önlemek için dağıtıcı eleğin altındaki rüzgar odasının içine

yerleştirilmiş olan seramik boncuk ve cam yününden oluşan bir dolgu tabakası aynı zamanda beslenen gazların daha iyi karışmasını sağlamış ve dolayısıyla homojen bir yanma elde edilmiştir.

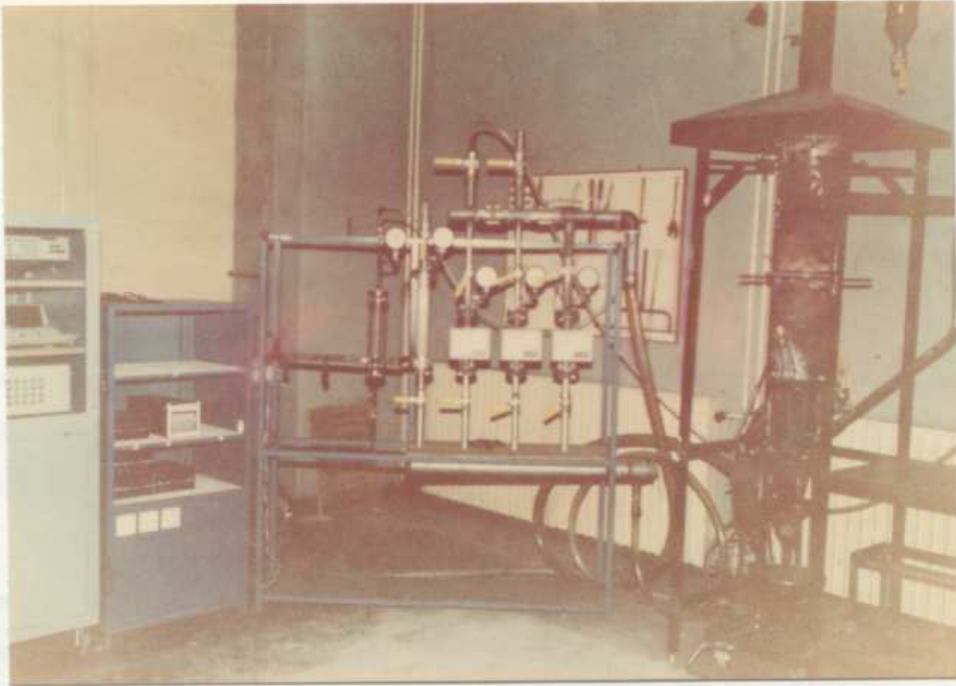
Hava ve LPG beslemesi yapılarak ateşlenen akışkan yatak istenilen sıcaklığa ve oksijen konsantrasyonuna geldiğinde yatak içerisine kesikli olarak kömür beslenmiş ve uçucu madde alev süreleri ölçülmüştür. Uçucu madde alev sürelerinin ölçülmesi bölüm 4.4'te daha ayrıntılı anlatılacaktır.



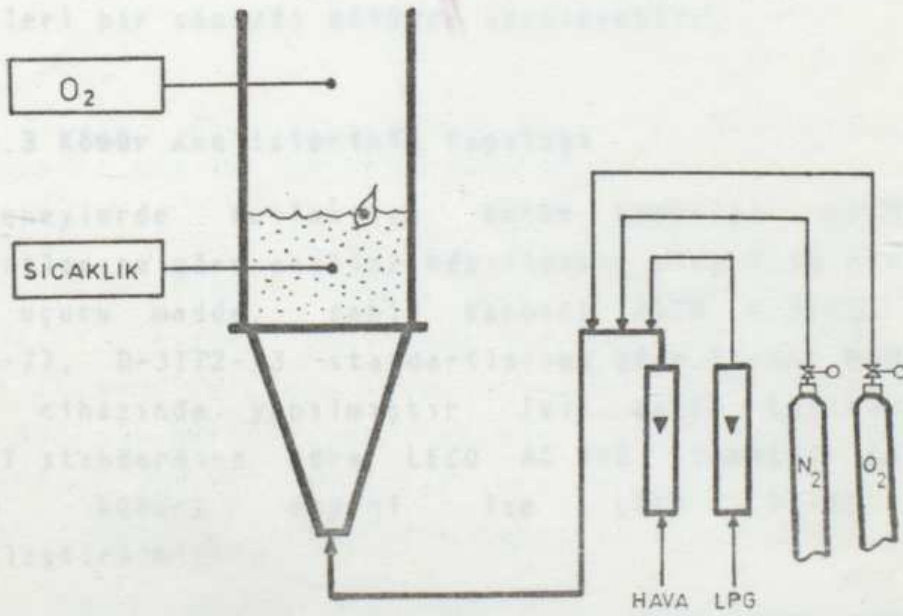
Şekil 4.2 Akışkan Yatağın Şematik Gösterimi



4.2 Kuvvetlerin Ölçülmesi



Şekil 4.3 Akışkan Yatağın Fotoğrafı



Şekil 4.4 Uçucu Madde Yanma Süresi Ölçme Deney Sisteminin Şematik Gösterimi

4.2 Kömürlerin Seçimi

Deneylerde kullanılan Türk kömürlerinin seçiminde özellikle uçucu madde miktarına önem verilmiştir. Bu amaçla, kısa analizdeki uçucu madde/sabit karbon oranı kullanılmıştır. Genelde Türk linyitlerinde bu oran 0.6-2.1 arasında değişmektedir. Kömür seçimi yapılırken bu aralığın tümünün mümkün olduğu kadar düzgün aralıklar ile taranmasına çalışılmıştır. Batı ülkelerinin kömürleri ile Türk kömürlerinin kalite farklılığının yanma davranışında karşımıza çıkardığı önemli değişiklikleri saptamak için çalışmalarda ek olarak yabancı bir ülke kömürü de kullanılmıştır.

Daha önce benzer bir çalışma yapan Bilge (29), uçucu madde yanma süresi ile uçucu madde ısı değeri arasında bir ilişki olduğunu vurguladığından, seçilen kömürlerin uçucu madde ısı değerinin de oldukça geniş bir yelpazeyi taramasına (4200-8000 kcal/kg) özen gösterilmiştir. Kullanılan kömürlere ait uçucu madde/sabit karbon oranları ile Urkan-Arıkol (3) bağıntısından yararlanılarak hesaplanan uçucu madde ısı değerleri Tablo 4.1'de gösterilmiştir. Bu kömürlerin ayrıntılı kısa analiz ve element analizleri bir sonraki bölümde verilecektir.

4.3 Kömür Analizlerinin Yapılışı

Deneylerde kullanılan bütün kömürler ASTM-D 2013-72 standartlarına göre analize hazırlanmış olup kısa analizler (nem, kül, uçucu madde, sabit karbon) ASTM D-3173, D-3174-73, D-3175-77, D-3172-73 standartlarına göre Fisher Model 490 kömür analiz cihazında yapılmıştır. Isıl değer tayinleri ise ASTM 3286-77 standardına göre LECO AC 200 otomatik kalorimetrede; toplam kükürt tayini ise LECO SC-32 cihazında gerçekleştirilmiştir.

Termogravimetrik analizler Du Pont 951 TGA cihazında 20°C/min ısıtma hızı ile 950°C'a kadar 250 cm³/min azot gazı beslenerek inert ortamda 250 µm elek altı kömürler kullanılarak;

Tablo 4.1 Kömürlerin Uçucu Madde Oranı ile Isıl Değerinin Karşılaştırılması

Kömür	UM/SK	UM Isıl Değeri* (kcal/kg)	Uçucunun Kömürün Isıl Değerindeki Payı
Amasra	0.704	7253	0.39
Gediz	0.762	8040	0.43
Karlıova	0.900	6781	0.43
Çan	0.915	5056	0.37
Soma-2	0.983	5592	0.41
İthal	1.001	7002	0.46
Seyitömer	1.256	4871	0.43
Eşme	1.303	5780	0.47
Orhaneli	1.328	4552	0.42
Konya-İlgın	1.332	4747	0.43
Kemberburgaz	1.511	4515	0.45
Yatağan	1.756	4237	0.46
Soma-1	2.036	4423	0.49

* Urkan-Arıkol (3) bağıntısından hesaplanmıştır

element (C, H, N,) analizleri ise W.C.Heraeus cihazında enstrümental analiz yöntemiyle yapılmıştır.

Tablo 5.1 de verilen kısa analiz sonuçlarındaki uçucu madde miktarlarının tayini ASTM-D 3175-77 standardına göre 950°C da yapılmıştır. Fisher kömür analiz cihazında yapılan analizler, 600°C'a kadar 25°C/min ısıtma hızı ve 600 den 950°C'a 35°C/min ısıtma hızıyla gerçekleştirilmiştir. 950°C'a ulaşıldığında kömür örnekleri 7 dakika bu sıcaklıkta bekletilmiş ve daha sonra fırından çıkarılıp desikatörde bekletildikten sonra tartılmıştır.

140-950°C aralığında değişik sıcaklıklarda yapılan uçucu madde miktarının tayin edildiği deneyler ASTM D 3175-77 standardı esas alınarak aynı ısıtma hızıyla ısıtılarak belirlenmiş sıcaklıkta 7 dakika tutulduktan sonra kütle kaybının

saptanmasıyla yapılmıştır. Her sıcaklık için ayrı örnek kullanılmıştır; yani 200°C da uçucu tayini yapılan örnek, tartımdan sonra örneğin 400°C uçucu madde analizi için kullanılmamıştır.

Tüm kömür analizleri ve termogravimetrik analizler TÜBİTAK-MBEAM'nin Makina ve Enerji Sistemleri Araştırma Bölümü, Malzeme Bölümü ve Enstrümantal Analiz Laboratuvarı'nda; element analizleri ise, İTÜ-Kimya Metalurji Mühendisliği Fakültesi'nde yapılmıştır.

4.4 Deneysel Yöntem

Bu çalışmada akışkan yatakta uçucu davranışını incelemek için benimsenen temel yöntem, uçucu yanma süresinin, uçucu alevi gözlenerek saptanmasıdır. Akışkan yatakta uçucu madde yanma süresini tesbit eden yöntemlerin ilkeleri Bölüm 3.2'de anlatıldığından burada sadece yapılan deneyler ile ilgili ayrıntılara yer verilmiştir.

Tüm deneylerde, özellikleri bölüm 4.2 de anlatılan ve Şekil 4.4 te şematik olarak gösterilen akışkan yatak sistemi kullanılmıştır. Sabit yatak yüksekliği 5 cm olacak şekilde 0.5-1.0 mm aralığında yaklaşık 2.65 g/cm³ yoğunluğunda Şile yöresi kumu yatak içerisine doldurulmuş ve LPG+hava karışımı ateşlenerek yatağın yanarak ısınması sağlanmıştır. Dağıtıcı elekten 5 cm yukarıda sıcaklık, 22 cm yukarıda ise oksijen konsantrasyonu ölçülmüştür. Arzu edilen sıcaklık ve oksijen konsantrasyonuna ulaşılması için gerekli debi ayarları yapılarak kararlı hale gelmesi beklenmiştir.

Tüm çalışmalarda akışkanlaşma hızı 0.85 m/s olarak sabit kalacak şekilde hava ve LPG rotametreleri ayarlanmıştır; böylece sıcaklığın ve oksijen konsantrasyonunun etkisinin incelendiği deneylerde yanmanın gerçekleştiği aktif yatağın içerisindeki akışkanlaşma hızı hep aynı kalmıştır.

Akışkan yatak arzu edilen sıcaklık ve oksijen konsantrasyonuna gelip kararlı hale geçtikten sonra kömür tanecikleri birer gramlık kesikli beslemeler halinde yatağın içine yukarıdan bırakılmıştır. Sıcak yatağın içine düşen kömür tanecikleri çok kısa bir sürede ısınıp önce nem ve uçucularını kaybetmektedir.

Uçucu madde, taneciği terk ettiği anda, tanecik etrafında tüy şeklinde bir alev oluşturarak yanmaktadır. Kömür taneciklerinden uçucu madde çıkışı bittiği anda ise tüy şeklindeki uçucu alevi kaybolmakta ve daha sonra uçucularını kaybetmiş karbonlu yapı (char) yanmaktadır. Akışkan yatağa atılan kömür taneciklerinin etrafında tüy şeklinde oluşan sarı alevin ilk görüldüğü ve son görüldüğü zamanlar hafızalı bir kronometre yardımıyla gözlemsel olarak tesbit edilmiş ve bu süre uçucu madde çıkışı veya yanma süresi olarak adlandırılmıştır. Her deney 15-20 kez tekrarlanarak ortalaması alınmıştır. Her kesikli beslemeden sonra tanecik çapına bağlı olarak en az 3-5 dakika beklenerek karbonlu yapının yanması sağlanmıştır. Yanma gecikmesi olarak adlandırılan süre (kömür taneciğinin yatağa düşmesinden itibaren ilk uçucu madde alevinin görüldüğü zamana kadar geçen süre) bazı deneylerde ayrıca ölçülmüştür.

Kömür besleme debisi $m=1$ g olarak tüm deneylerde sabit tutulmuştur. Kuru besleme yapıldığında, orijinal halde 1 g kömürün içerdiği sabit karbon+uçucu madde miktarına eşit olacak şekilde hesaplanan m_k miktarında besleme yapılmıştır.

Uçucu madde alevi ve yaklaşık 1 cm çapındaki taneciklerden bazıları yanma öncesi ve sonrasında fotoğraflanmıştır.



4.5 Deneysel Olarak İncelenen Parametreler

Uçucu alevinin süresinin saptandığı yakma deneylerinde, bu süreyi etkilediği gözönünde tutularak tanecik büyüklüğü, yatak sıcaklığı, gibi parametreler belli aralıklarda değiştirilmiştir. Ayrıca her kömür hem orijinal nemli halinde, hem de kuru olarak yakılıp nemin uçucu yanması süresi üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Kömür tanecik çapının uçucu madde yanma süresine etkisi 1.00-2.00, 2.00-2.60, 2.60-3.15, 3.35-4.00, 4.00-4.76, 8.80-9.00 ve 10.0-11.2 mm aralıklarında olmak üzere 7 değişik çap aralığında incelenmiştir; besleme debisi 1g, oksijen konsantrasyonu %10, sıcaklık 860°C ve akışkanlaşma hızı ise 0.85 m/s olarak sabit tutulmuştur.

650-920°C arasında 7 değişik sıcaklıkta deneyler yapılarak sıcaklığın uçucu madde yanma süresine etkisi incelenmiştir. Sıcaklığın etkisi incelenirken, akışkanlaşma hızının 0.85 m/s olarak sabit tutulmasına özellikle dikkat edildiği gibi oksijen konsantrasyonu %10, tanecik çapı 3.35-4.00 mm ve besleme debisi de 1g olacak şekilde sabit tutulmuştur.

Kömürün içerdiği nemin, uçucu madde yanma süresine etkisini görmek için kömür örnekleri 107°C da etüvde kurutulduktan sonra benzer şekilde uçucu maddelerinin yanma süreleri belirlenmiştir. Kuru ve orijinal halde yapılan deneyleri sağlıklı olarak karşılaştırabilmek için kuru halde beslenen kömürün miktarı orijinal halde 1 g kömürün içerdiği sabit karbon ve uçucu madde miktarına eşit olacak şekilde hesaplanan m_k miktarında yapılmıştır. Sonuç olarak, kömürün yanabilen kısmını içeren sabit karbon ve uçucu madde miktarı toplamının gram olarak orijinal ve kuru beslemelerde eşit olması sağlanmıştır. İncelenen parametreler toplu olarak Tablo 4.2 ve 4.3 te toplu olarak verilmiştir.

Tablo 4.2 Tanecik Çapının Etkisinin İncelendiği Deneyler

T = 860°C [O ₂] = %10 U = 0.85 m/s m = 1 g														
KÖMÜR ADI	TANECİK ÇAPI (mm)													
	ORJİNAL HALDE							KURU HALDE (m=m _c)						
	1.00-2.00	2.00-2.60	2.60-3.15	3.35-4.00	4.00-4.76	8.80-9.00	10.0-11.20	1.00-2.00	2.00-2.60	2.60-3.15	3.35-4.00	4.00-4.76	8.80-9.00	10.0-11.20
Orhaneli	X	X [*]	X [*]	X	X [*]						X			
Karlıova	X	X	X	X		X	X				X			
Yatağan	X	X	X	X	X	X	X				X			
Kemerburgaz	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Eşme	X	X	X	X							X			
Seyitömer	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
Soma-1	X	X	X	X	X	X	X				X			
İthal	X	X	X	X	X	X	X				X			
Konya-İlgin	X	X	X	X	X	X	X				X			
Amasra				X							X			
Gediz				X							X			
Çan				X							X			
Soma-2				X							X			

* ----> 2.00-2.48, 2.48-4.00, 4.00-4.76 mm aralığında yapılmıştır.

Tablo 4.3 Sıcaklığın Etkisinin İncelendiği Deneyler

KÖMÜR ADI	S I C A K L I K , °C						
	650	700	750	800	860	890	920
Kemerburgaz	X	X	X	X	X	X	X
Seyitömer	X	X	X	X	X	X	X
Yatağan	X	X	X	X	X	X	X
Soma-1	X	X	X	X	X	X	X
İthal	X	X	X	X	X	X	X
Konya-İlgın	X	X	X	X	X	X	X
Çan	X	X	X	X	X	X	X

4.6 Kömür Taneciğinin Merkezinde Sıcaklığın Kaydedilmesi

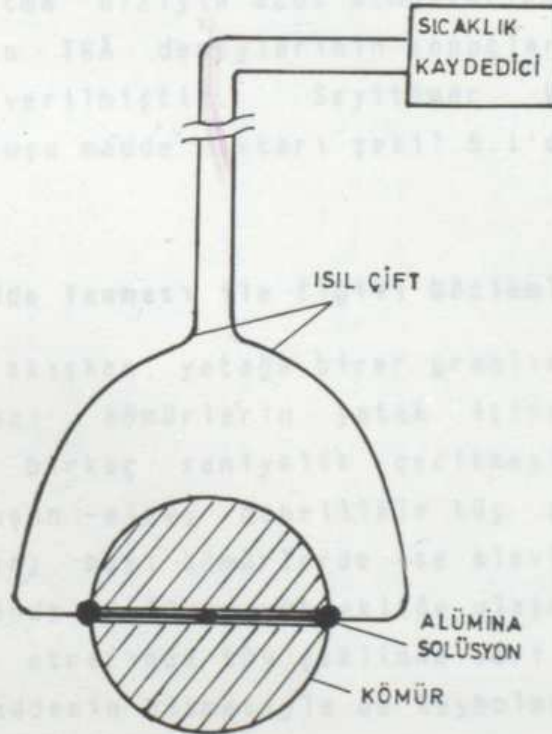
2 cm çapında küre şekline getirilen kömür taneciklerinin tam ortasından yaklaşık 1.5 mm çapında delik açılmıştır. Bu delikten 1 mm çapında Ni-Cr-Ni ısıt çift geçirilmiş ve ısıt çiftin birleştiği nokta, küresel kömür taneciğinin merkezine denk getirilmiştir. Şekil 4.5 te görüldüğü gibi özel bir alümina solüsyon ile ısıt çift ve kömür taneciği birbirine sabitlenmiştir.

Dağıtıcı elekten 5 cm yukarıya yerleştirilmiş olan ısıt çift ile kömür taneciğinin merkezine yerleştirilmiş olan ısıt çift iki kanallı Linear marka sıcaklık kaydediciye bağlanmış ve sıcaklıklar sürekli kaydedilmiştir. Merkezine ısıt çift yerleştirilen kömür taneciği aktif yatağın içine daldırılmış ve yanmasını tamamlayıncaya kadar yatak içinde tutulmuştur; bu daldırma ve tutma esnasında kömür taneciği yatak içerisinde sabit

olarak bir noktada durmayı yaklaşık 5 cm çapında bir alanda hareket edebilme esnekliğine sahip olmuştur: Kullanılan ısı çiftinin çapı 1 mm olduğundan ve yaklaşık 30 cm yukarıdan yatağa daldırıldığından, aktif yatak içerisinde akışkanlaşmaya bağlı olarak kömür taneciği de sınırlı hareket etme esnekliğine sahip olmaktadır.

Tanecik merkezinde sıcaklık ölçme çalışmaları 860°C yatak sıcaklığı, %10 oksijen konsantrasyonu ve 0.85 m/s akışkanlaşma hızı şartlarında Seyitömer kömürü ile gerçekleştirilmiştir.

Tanecik merkezinde sıcaklık değişiminin kaydedildiği deneyler benzer şekilde 1.5 cm çapında, 2 cm boyunda silindirik bir bakır (% 99.9 saflığında) parça ile tekrarlanmıştır. Tüm deneyler en az iki üç kez yinelenerek sonuçların güvenilirliği sağlanmıştır.



Şekil 4.5 Tanecik Merkezine Isıl Çift Yerleştirilmesinin Şematik Gösterimi

5. DENEY SONUÇLARI

5.1 Kömür Analizleri

Deneysel çalışmalarda incelenen 13 değişik kömürün kısa analiz ve ısı değer tayini sonuçları Tablo 5.1' de, kuru bazda olmak üzere element analizi sonuçları ise Tablo 5.2 ' de verilmiştir. Tablo 5.2 ' deki oksijen miktarı farktan hesaplanmıştır.

140-950°C arasında değişik sıcaklıklarda yapılan deneyler sonucunda elde edilen uçucu madde miktarları Tablo 5.3'te verilmiştir. Değişik sıcaklıklardaki uçucu maddenin, ASTM D 3175-77 standardına göre yapılan 950°C daki standart uçucu madde miktarına olan oranı ise Tablo 5.4'te verilmiştir.

20°C/min ısıtma hızıyla azot atmosferinde 950°C ye kadar ısıtılarak yapılan TGA deneylerinin sonuçları 13 kömür için Tablo 5.5'te verilmiştir. Seyitömer kömürünün değişik sıcaklıklardaki uçucu madde miktarı şekil 5.1'de gösterilmiştir.

5.2 Uçucu Madde Yanması ile İlgili Gözlemler

860°C daki akışkan yatağa birer gramlık kömür beslemesi yapıldığında, bazı kömürlerin yatak içine düşer düşmez, bazılarının ise birkaç saniyelik gecikmeyle alev aldıkları gözlenmiştir. Oluşan alev, genellikle tüy şeklinde taneciğin etrafını sarmıştır; bazı kömürlerde ise alevler önce birleşerek kısa bir süre içinde 20-30 cm yüksekliğe ulaşmış olup ardından her bir tanecik etrafında tüy şeklinde sarı bir alev olarak kalmış ve uçucu maddenin bitmesiyle de kaybolmuştur.

Alevin ilk oluştuğu anlarda, kömür taneciği koyu siyah renkte görülmüştür. Alevin ilerleyip bitmesine doğru, kömür taneciğinin rengi değişmiş olup sarı kor halinde yanmaya

Tablo 5.1 Kısa Analiz ve Isıl Değer Sonuçları

KÖMÜR ADI	Kısa Analiz Sonuçları (%)				Üst Isıl Değer (kcal/kg)
	NEM	KÜL	UÇUCU MADDE	SABİT KARBON	
Orhaneli	25.71	21.78	29.96	22.55	3216
Karlıova	9.78	16.50	34.92	38.80	5493
Yatağan	30.66	12.81	36.02	20.51	3317
Kemerburgaz	34.28	11.47	32.65	21.60	3308
Eşme	5.24	32.01	35.50	27.25	4348
Seyitömer	23.71	10.00	36.90	29.39	4216
Soma-1	14.97	20.37	43.36	21.30	3895
İthal	7.10	7.38	42.79	42.73	6462
Konya-İlgın	13.52	11.20	43.00	32.28	4721
Amasra	5.45	9.72	35.04	49.79	6508
Gediz	1.55	15.69	35.78	46.98	6632
Çan	17.89	8.12	35.35	38.64	4799
Soma-2	15.57	10.12	36.84	37.47	5068



Tablo 5.2 Element Analizi Sonuçları

KÖMÜR ADI	K U R U				B A Z D A				KÜL
	C	H	N	S	O	S	O	KÜL	
Orhaneli	44.86	4.40	0.85	3.37	17.20	29.32			
Karlıova	59.64	4.98	1.65	1.33	14.11	18.29			
Yatağan	49.01	4.78	0.71	3.91	23.12	18.47			
Kemerburgaz	51.11	4.86	0.82	3.64	22.12	17.45			
Eşme	45.55	4.26	0.90	12.14	3.37	33.78			
Seyitömer	55.18	5.15	1.19	1.15	24.22	13.11			
Soma-1	48.14	4.90	1.22	4.12	17.66	23.96			
İthal	65.33	5.36	1.56	0.34	19.47	7.94			
Konya-İlgin	55.02	4.93	0.78	2.39	23.93	12.95			
Amasra				1.32		10.28			
Gediz				7.73		15.94			
Çan				6.06		9.89			
Soma-2				0.51		11.99			



Tablo 5.3 Değişik Sıcaklıklarda Tayin Edilen Uçucu Madde Miktarı

KÖMÜR ADI	Nem (107°C)	Uçucu Madde Miktarı (% Kütle, orijinal bazda)													
		140°C	230°C	275°C	330°C	410°C	500°C	600°C	650°C	700°C	800°C	860°C	900°C	950°C	
Orhaneli	25.71	0.00	4.84	7.14	12.59	16.09	20.20	22.80	25.59	25.64	28.50	29.53	29.90	29.96	
Karlıova	9.78	0.00	1.42	2.76	8.20	17.35	24.58	26.73	28.24	28.60	31.25	32.35	33.50	34.92	
Yatağan	30.66	0.00	5.06	9.91	16.61	19.97	25.50	28.35	30.38	31.50	33.50	34.22	35.51	36.02	
Kemerburgaz	34.28	0.00	3.87	5.73	13.47	17.58	22.00	25.29	26.89	27.50	29.50	30.60	31.15	32.65	
Eğne	5.24	0.00	0.16	1.53	7.32	16.00	24.91	28.47	29.37	29.64	32.00	32.80	33.95	35.50	
Soma-1	14.97	0.00	4.56	8.40	17.71	20.08	30.00	33.46	34.38	36.31	38.00	40.17	41.88	43.36	
İthal	7.10	0.00	0.98	2.89	14.80	19.49	28.28	33.56	35.60	35.60	39.00	40.42	41.21	42.79	
Konya-İlgin	13.52	0.00	1.05	1.33	12.97	14.50	27.55	32.38	33.74	36.31	39.22	40.33	41.00	43.00	
Amasra	5.45	0.00	1.02	2.43	8.43	17.05	24.69	26.62	28.87	29.18	31.75	32.19	32.86	35.04	
Gediz	1.55	0.00	1.11	2.64	7.55	23.30	23.61	28.86	30.34	31.00	33.00	33.45	35.04	35.78	
Çan	17.89	0.00	6.30	8.36	14.11	21.17	26.50	27.02	29.53	30.50	32.50	32.83	34.84	35.35	
Soma-2	15.57	0.00	3.77	5.52	12.23	20.91	28.27	28.59	31.12	31.50	33.50	34.38	35.50	36.84	
107°C	140°C	200°C	225°C	260°C	310°C	410°C	530°C	600°C	700°C	800°C	860°C	900°C	950°C		
Seyitömer	23.71	0.31	4.40	5.31	7.95	13.71	22.01	26.05	28.42	31.75	33.61	34.88	36.26	36.90	

Tablo 5.4 Değişik Sıcaklıklardaki Uçucu Madde Miktarının 950°C'deki Uçucu

Madde Miktarına Oranı

KONDR ADI	NEM (107°C)	(UM ₉₅₀ / UM _{950°C}) * 100													
		140°C	230°C	275°C	330°C	410°C	500°C	600°C	650°C	700°C	800°C	860°C	900°C	950°C	
Buhaneli	25.71	0.00	16.15	23.83	42.02	53.70	67.42	76.10	85.41	85.58	95.13	98.56	99.80	100.0	
Karlıova	9.78	0.00	4.07	7.90	23.48	49.68	70.39	76.55	80.87	81.90	89.49	92.64	95.93	100.0	
Yelâğan	30.66	0.00	14.05	27.51	46.11	55.44	70.79	78.71	84.34	87.45	93.00	95.00	98.58	100.0	
Kemerburgaz	34.24	0.00	11.85	17.55	41.26	53.84	67.38	77.46	82.36	84.23	90.35	93.72	95.41	100.0	
Eyüp	5.24	0.00	0.45	4.31	20.62	45.07	70.17	80.20	82.73	83.49	90.14	92.39	95.63	100.0	
Soma-1	14.97	0.00	10.52	19.37	40.84	46.31	69.19	77.17	79.29	83.74	87.64	92.64	96.59	100.0	
İthal	7.10	0.00	2.29	6.75	34.59	45.55	66.09	78.43	83.20	83.20	91.14	94.46	96.31	100.0	
Konya-İlgin	13.52	0.00	2.44	3.09	30.16	33.72	64.07	75.30	78.46	84.44	91.21	93.79	95.35	100.0	
Amesre	5.45	0.00	2.91	6.93	24.06	48.66	70.46	75.97	82.39	83.28	90.61	91.87	93.78	100.0	
Sediz	1.55	0.00	3.10	7.38	21.10	65.12	65.99	80.66	84.80	86.64	92.23	93.49	97.93	100.0	
Çev	17.89	0.00	17.82	23.65	39.91	59.89	74.96	76.44	83.54	86.28	91.94	92.87	98.56	100.0	
Soma-2	15.57	0.00	10.23	14.98	33.20	56.76	76.74	77.61	84.47	85.50	90.93	93.32	96.36	100.0	
Seyitömer	23.71	0.84	11.92	14.39	21.54	37.15	59.65	70.60	77.02	86.04	91.08	94.53	98.27	100.0	

Tablo 5.5 TGA Analiz Sonuçları (Sıcaklığa göre %kütle kaybı, orijinal halde)

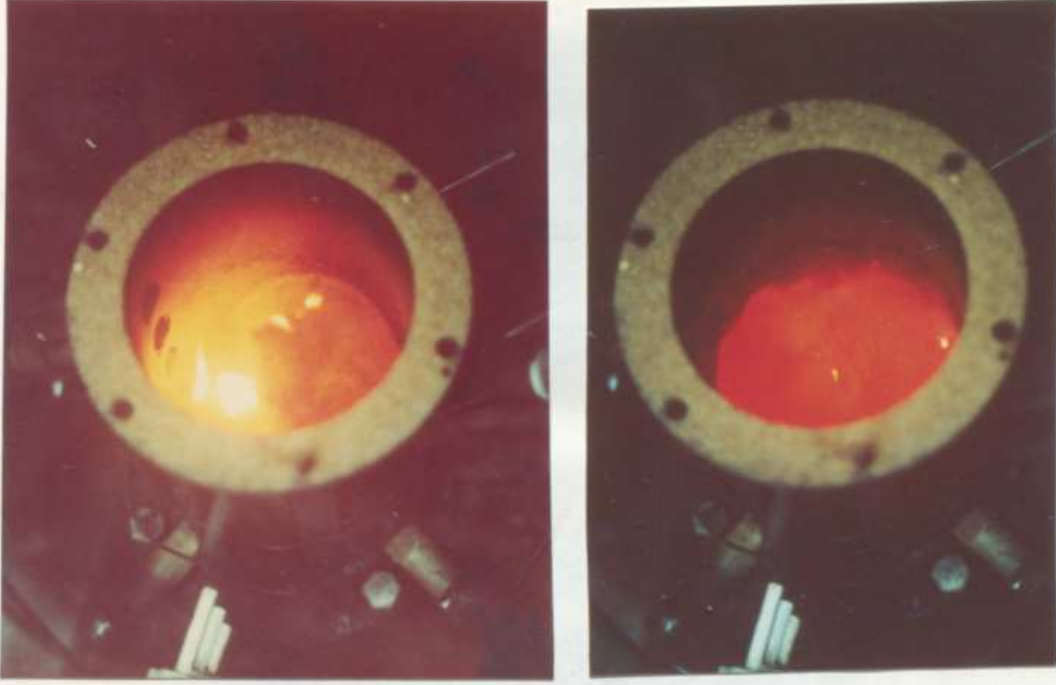
Sıcaklık (°C)	Orhaneli	Karlıova	Yatağan	Kemerburgaz	Eşme	Seyitömer	Soma-1	İthal	Konya-İlgın	Amasra	Gediz	Çan	Soma-2
50	0.0	0.0	0.0	2.5	0.0	0.0	1.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0
75	6.0	2.0	5.0	8.0	1.5	2.5	2.5	0.0	1.5	1.0	0.0	2.5	1.0
100	12.0	4.5	12.0	19.0	2.5	11.0	5.5	1.0	3.5	2.5	0.5	7.5	3.5
125	17.0	6.5	19.5	25.0	3.5	16.0	8.5	2.0	5.5	3.5	1.0	10.5	7.5
150	19.0	7.0	24.0	27.0	4.0	19.0	11.0	2.5	6.5	4.0	1.0	13.0	10.5
175	20.5	7.5	26.0	27.5	4.0	20.0	12.0	3.0	7.0	4.5	1.0	14.0	12.0
200	21.0	7.5	26.5	28.0	4.0	21.0	13.0	3.0	7.5	4.5	1.5	14.5	12.5
225	21.5	7.5	27.0	28.5	4.0	21.5	13.5	3.0	8.0	10.0	1.5	15.0	13.0
250	22.0	8.0	27.5	29.0	4.0	22.0	14.0	3.5	8.5	10.0	2.0	15.5	13.5
275	22.5	8.0	28.5	30.0	4.5	22.5	15.0	3.5	9.0	10.5	2.0	16.0	14.0
300	23.0	8.0	29.5	31.0	4.5	23.0	16.0	3.5	10.0	10.5	2.5	17.0	14.0
325	23.5	8.5	30.5	32.0	4.5	24.0	17.0	4.0	11.0	10.5	3.0	18.0	14.5
350	24.5	8.5	32.0	33.5	5.0	25.0	18.0	4.5	13.0	10.5	3.5	19.0	15.0
375	25.5	9.0	34.0	35.5	5.5	26.5	21.0	5.0	15.5	11.0	4.5	20.5	16.0
400	27.0	9.5	36.0	37.5	6.5	28.0	24.0	7.0	18.5	11.5	5.5	22.0	17.0
425	29.0	10.5	39.0	40.0	7.5	30.0	27.0	10.0	22.5	12.0	7.0	23.5	18.0
450	31.0	11.5	42.5	42.5	11.0	32.5	30.0	15.5	26.0	13.5	10.0	26.0	20.5
475	33.0	14.5	44.0	45.0	16.5	36.0	33.0	22.5	29.5	11.5	15.5	28.5	23.5
500	35.0	18.0	47.0	47.5	21.5	38.5	35.5	28.5	32.0	16.0	21.5	31.5	27.0
525	36.0	24.0	49.0	49.0	24.5	41.0	38.0	32.0	34.0	20.0	25.0	33.5	30.0
550	38.0	27.0	50.5	50.5	26.0	42.5	40.0	34.5	36.0	22.5	27.0	36.0	32.0
575	39.0	29.5	51.5	51.5	27.0	44.0	41.5	36.0	38.0	24.5	28.5	37.5	34.0
600	40.0	31.0	52.5	52.5	29.5	45.0	42.5	37.5	39.5	26.0	29.5	39.0	35.5
625	41.0	32.0	53.5	53.5	31.0	46.5	43.5	39.0	40.5	27.5	30.5	40.5	37.0
650	42.0	33.0	54.5	54.5	32.5	47.5	44.5	40.0	42.0	29.0	31.0	42.0	38.0
675	42.5	34.0	55.0	55.5	33.0	48.5	45.5	41.0	43.0	30.0	32.0	43.0	39.5
700	43.5	35.0	56.0	56.5	33.5	49.5	46.5	41.5	44.5	31.0	32.5	44.5	40.0
725	44.0	36.0	57.0	57.0	34.5	50.0	47.5	42.5	45.5	32.0	33.0	45.5	41.5
750	45.0	36.5	57.5	58.0	35.0	51.0	48.5	43.0	46.5	33.0	33.5	47.0	42.0
775	46.0	37.5	58.5	59.0	35.5	52.0	49.5	44.0	47.5	34.0	34.5	48.0	43.0
800	47.0	38.0	59.5	61.5	36.0	53.0	50.0	44.5	48.0	35.0	35.5	49.0	44.0
825	48.0	38.5	60.0	64.0	36.5	54.0	51.0	45.0	49.0	35.5	36.0	50.5	45.0
850	49.0	39.0	61.0	66.5	37.0	55.0	52.0	45.5	50.0	36.5	36.5	52.0	46.0
865	--	--	--	--	37.5	--	52.5	--	--	--	--	--	--
875	50.0	39.5	61.5	69.0	--	55.5	--	--	--	37.0	37.0	53.5	47.0
885	--	39.5	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
900	51.0	--	--	71.5	--	57.0	--	--	--	37.5	37.5	55.0	47.5
925	52.0	--	--	73.0	--	58.0	--	--	--	--	--	--	--
935	52.3	--	--	73.5	--	58.3	--	--	--	--	--	--	--

başlayan parçacıklar haline dönüşmüştür. 1 cm çapında tek kömür taneciğinin beslendiği deneylerde kömür cinsine bağlı olarak 3-8 saniye arasında yanma gecikmesi ve ardından taneciği saran sarı tüy şeklinde kömür cinsine bağlı olarak zaman zaman 5-10 cm uzunluğunda alev gözlenmiştir; yaklaşık ilk 30 saniye içinde kömür taneciği tüy şeklindeki sarı alevin içinde koyu siyah renkte kalmıştır. Uçucu madde alevinin ilk görüldüğü andan 45-50 saniye sonra oldukça küçülmüş olduğu, kömür taneciğinin koyu siyah renginin de açıldığı yani yüzeyinden hafifçe yanmaya başladığı gözlenmiştir. 1 cm çapında kömür beslendiğinde 60-70 saniye süren uçucu maddenin yanması boyunca kömür taneciği yatak içinde her yöne hareket etmiş olup arasına dibe gitmişse de genellikle yüzeyde kalmıştır. Bütün deneylerde kömür besleme debisi $m=1$ g olarak sabit tutulduğu için yaklaşık 1 cm çapında küreselleştirilmiş olan kömür taneciklerinden 1 tane, 0.8-0.9 cm çapındaki kömür taneciklerinden ise 2 tane yatağa atılarak besleme yapılmıştır.

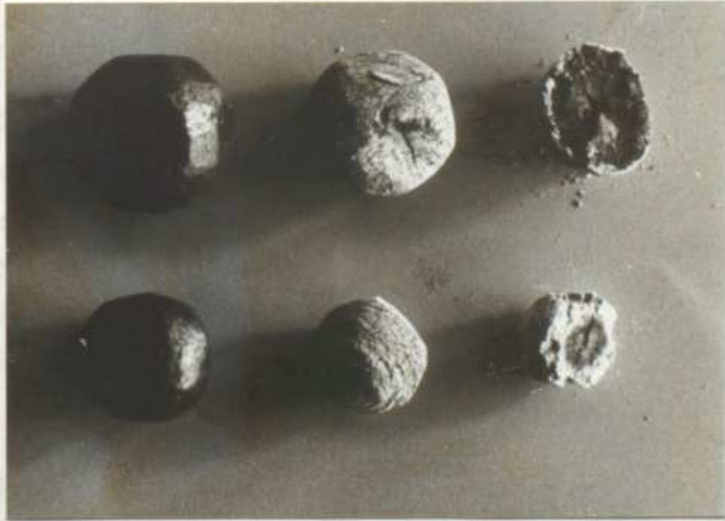
Uçucu maddenin tüy şeklindeki alevi ve uçucu madde bittikten sonra sarı kor halinde yanan kömür taneciklerinin fotoğrafı Şekil 5.2'de görülmektedir.

8.80-9.00 ve 10.0-11.2 mm çapındaki taneciklerle yapılan deneylerde, uçucu maddenin yanması tam bitmek üzereyken veya biter bitmez, bazen de bittikten az bir süre sonra, bazı kömürlerin sapsarı bir hal alıp patlayıp-çatlayarak patlamış mısır gibi bir şekil değişikliğine uğradıkları ve daha sonra da parçalanarak yatak içinde dağıldıkları gözlenmiştir.

Yatak içine daldırılan delikli bir kepçe ile uçucu madde yanması biter bitmez bazı kömür tanecikleri yatak dışına alınarak fotoğraflanmıştır. Şekil 5.3'te, küresel hale getirilmiş iki farklı çaptaki kömür taneciklerinin yanmadan önce ve sonra çekilen fotoğrafları görülmektedir. Tanecikler merkezinden bölünürse dış yüzeylerinin kül renginde olduğu, buna karşılık iç kısmının koyu siyah renkte olduğu; yani ilk 60-70 saniye içerisinde bu çaptaki taneciklerin yalnızca uçucularının ve dış



Şekil 5.2 Uçucu Madde Alevinin Fotoğrafı



Şekil 5.3 Küreselleştirilmiş Kömür Taneciklerinin Yanmadan Önce ve Sonra Çekilmiş Fotoğrafları



Şekil 5.4 Yamnadan Sonra Patlayan Kömür Taneciklerinin Fotoğrafı

5.3 Uçucu Madde Yanma Süreleri

1.00-11.20 mm arasında 7 değişik tanecik çapı aralığında orijinal halde 13 değişik kömürün uçucu maddelerinin akışkan yatakta yanma süreleri $T=860^{\circ}\text{C}$, $U=0.85$ m/s, $[O_2]=\%10$, $m=1$ g olarak sabit tutulmak üzere deneysel olarak saptanmış ve sonuçları Tablo 5.6 'da; kuru halde yapılan deneylerin sonuçları ise Tablo 5.7'de; sıcaklığın etkisinin incelendiği deneylerin sonuçları ise Tablo 5.8'de verilmiştir.

Uçucu madde yanma süreleri 7 değişik tanecik çapına karşılık logaritmik eksende grafiklenmiştir. Şekil 5.5 , 5.6 , 5.7 , 5.8 'de orijinal halde beslemenin yapıldığı deneylerin grafikleri; Şekil 5.9 'da kuru beslemenin yapıldığı deneylerin grafikleri; Şekil 5.10 , 5.11 , 5.12 'de ise, sıcaklığın etkisinin incelendiği deneylerin grafikleri görülmektedir.

Şekil 5.5 - 5.12 incelendiğinde: Kömür tanecik çapı arttıkça uçucu madde yanma süresinin uzadığı; yatak sıcaklığı arttıkça, uçucu madde yanma süresinin kısaldığı belirgin olarak görülmektedir. Kömürlerin, nemleri giderildikten sonra, akışkan yatağa beslendiği durumda ise uçucu maddenin yanma süresinde belirgin bir kısalma gözlenmiştir.

Tanecik çapına bağlı olarak uçucu madde yanma süresini veren $t_v = ad^n$ eşitliğindeki a ve n değerleri regresyon analizi yapılarak hesaplanmış ve korelasyon katsayısı r ile birlikte Tablo 5.9 'da verilmiştir.

5.4 Tanecik Merkezinde Sıcaklık Değişiminin Kaydedilmesi

Seyitömer kömürü ve bakır parçası ile yapılan deneylerde elde edilen merkez sıcaklığının zamanla değişimine ait veriler Şekil 5.13 ve 5.14 'te gösterilmektedir. Merkez sıcaklığının, yatak sıcaklığı olan 860°C'ye yükselmesi için geçen süre, bakır için 106, Seyitömer kömürü için de 243 saniye olarak saptanmıştır. Seyitömer kömürü ile yapılan deneylerde, uçucu madde alevinin kaybolmasından kısa bir süre sonra merkezin yatak sıcaklığına ulaştığı gözlenmiştir. Daha sonra, karbon yanmasından dolayı merkez sıcaklığı yatak sıcaklığının 25-40°C kadar üzerine de çıkmıştır.



Tablo 5.6 Uçucu Madde Yanma Süreleri (Orijinal)

Tablo 5.7 Uçucu Madde Yanma Süreleri (Kara)

KÖMÜR ADI	TANECİK ÇAPI (mm)						
	ORJİNAL HALDE						
	1.00-2.00	2.00-2.60	2.60-3.15	3.35-4.00	4.00-4.76	8.80-9.00	10.0-11.20
Orhaneli	2.10	3.40 ^m	8.50 ^m	9.63	11.70 ^m	--	--
Karlıova	3.20	5.41	7.99	10.79	--	46.00	68.00
Yatağan	1.43	3.45	4.98	7.98	10.22	42.67	63.20
Kemerburgaz	2.51	4.93	6.27	9.17	13.60	46.25	69.20
Eşme	2.83	4.80	7.09	10.00	--	--	--
Seyitömer	1.64	3.45	4.93	8.27	10.46	37.00	58.75
Soma-1	1.54	3.16	4.77	7.33	9.85	33.33	55.25
İthal	3.87	6.38	8.94	13.06	16.66	51.50	72.50
Konya-İlgin	2.53	4.38	6.17	8.87	12.61	36.33	57.00
Amasra	--	--	--	11.62	--	--	--
Gediz	--	--	--	11.96	--	--	--
Çan	--	--	--	8.07	--	--	--
Soma-2	--	--	--	9.27	--	--	--

* ---> 2.00-2.48 , 2.48-4.00 ve 4.00-5.15 mm aralığında yapılmıştır

Tablo 5.7 Uçucu Madde Yanma Süreleri (Kuru)

KÖMÜR ADI	TANECİK ÇAPI (mm)						
	KURU HALDE						
	1.00-2.00	2.00-2.60	2.60-3.15	3.35-4.00	4.00-4.76	8.80-9.00	10.0-11.20
Orhaneli	--	--	--	5.88	--	--	--
Karlıova	--	--	--	8.40	--	--	--
Yatağan	--	--	--	4.98	--	--	--
Kemerburgaz	1.61	2.55	3.54	5.55	7.10	22.50	31.00
Eşme	--	--	--	7.98	--	--	--
Seyitömer	1.43	2.91	3.65	5.83	6.89	--	--
Soma-1	--	--	--	5.32	--	--	--
İthal	--	--	--	11.25	--	--	--
Konya-İlgın	--	--	--	6.37	--	--	--
Amasra	--	--	--	9.96	--	--	--
Gediz	--	--	--	10.78	--	--	--
Çan	--	--	--	6.43	--	--	--
Soma-2	--	--	--	7.60	--	--	--

Tablo 5.8 Değişik Sıcaklıklarda Uçucu Madde Yanma Süreleri

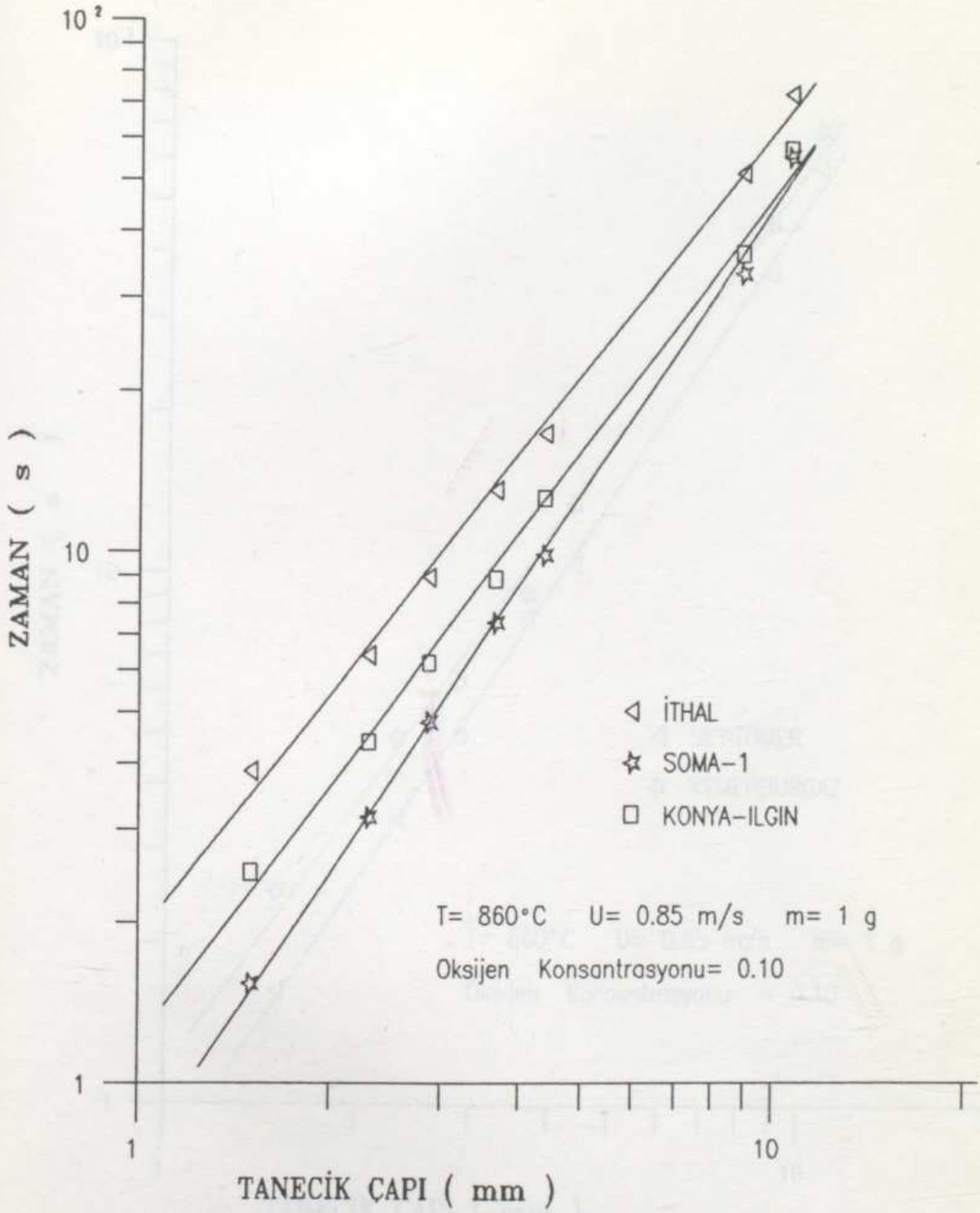
KÖMÜR ADI	U = 0.85 m/s [0 ₂] = %10 m = 1 g d = 3.35-4.00 mm orijinal halde										
	650	700	750	800	860	890	920				
SICAKLIK (°C)											
Kemerburgaz	12.67	11.94	10.89	10.72	9.17	8.64	8.56				
Seyitömer	10.24	9.83	9.08	8.93	8.27	7.55	7.68				
Yatağan	10.25	9.94	8.81	8.91	7.98	7.58	7.07				
Soma-1	9.41	8.97	7.87	7.65	7.33	6.13	6.05				
İthal	18.48	16.81	15.52	14.05	13.06	12.32	11.43				
Konya-İlgin	11.43	10.66	10.15	9.88	8.87	8.77	8.70				
Çan	10.68	10.87	9.22	9.19	8.07	7.74	7.23				

Tablo 5.9 Regresyon Analiz Sonuçları

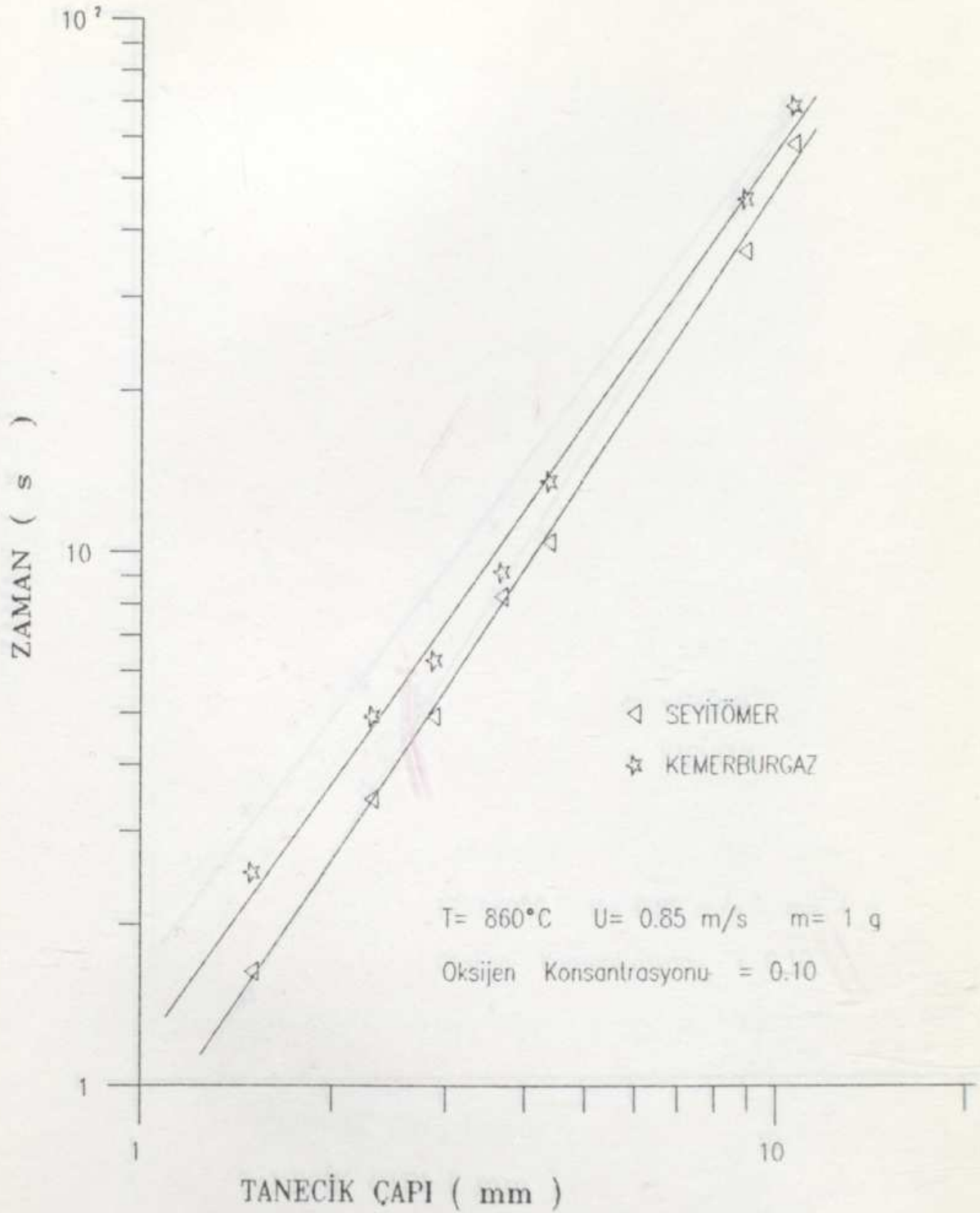
KÖMÜR ADI	Tanecik çapına göre, $t_v = ad^n$ (Orijinal bazda)		
	a	n	r
Orhaneli	1.03	1.67	0.986
Karlıova	1.54	1.57	0.998
Yatağan	0.66	1.91	0.999
Kemerburgaz	1.14	1.70	0.997
Eşme	1.55	1.42	0.998
Seyitömer	0.76	1.81	0.999
Soma-1	0.72	1.80	0.999
İthal	1.88	1.52	0.998
Konya-İlgın	1.21	1.59	0.998

TANECİK ÇAP (Kuru Bazda)

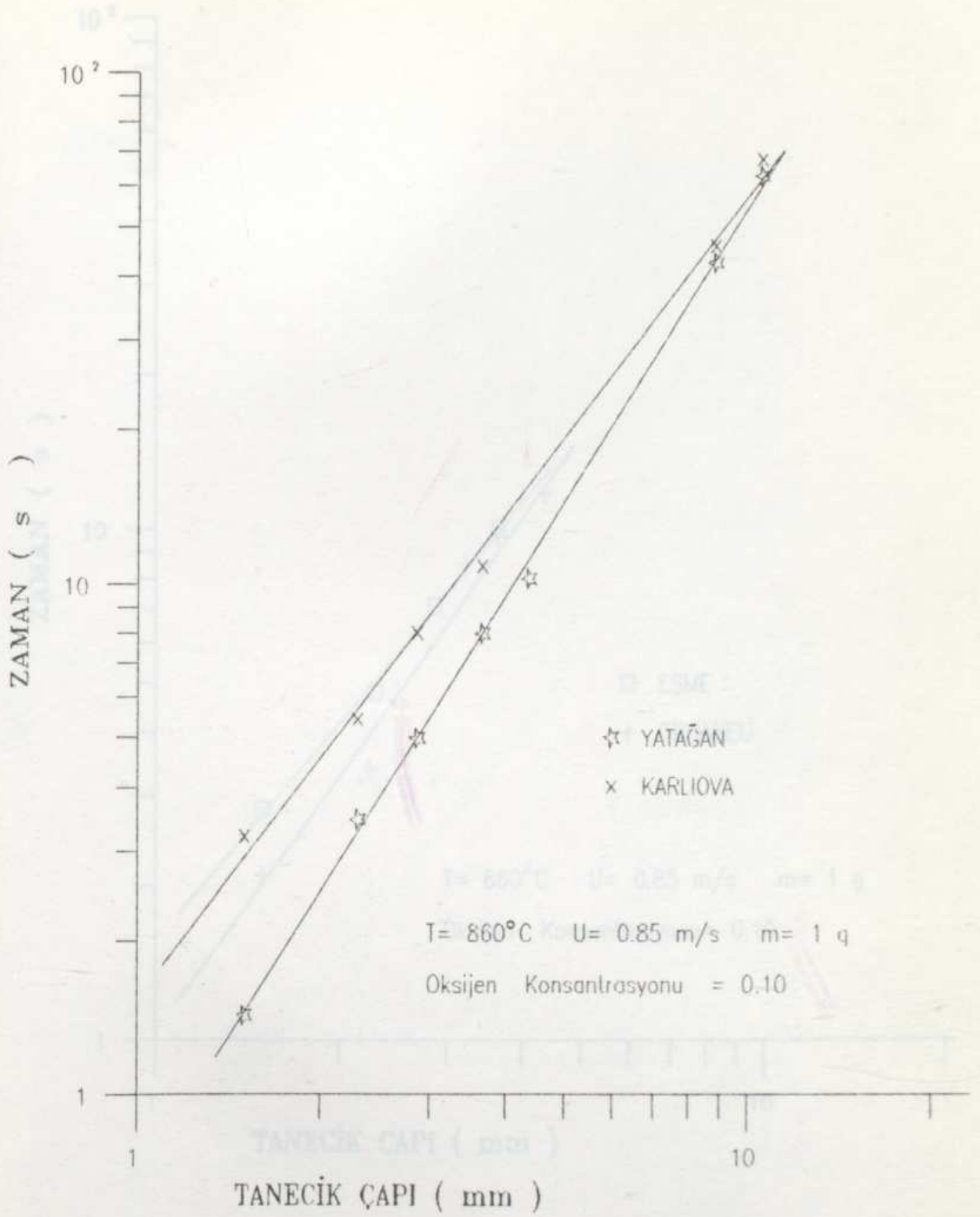
Kemerburgaz	0.75	1.55	0.997
Seyitömer	0.80	1.48	0.997



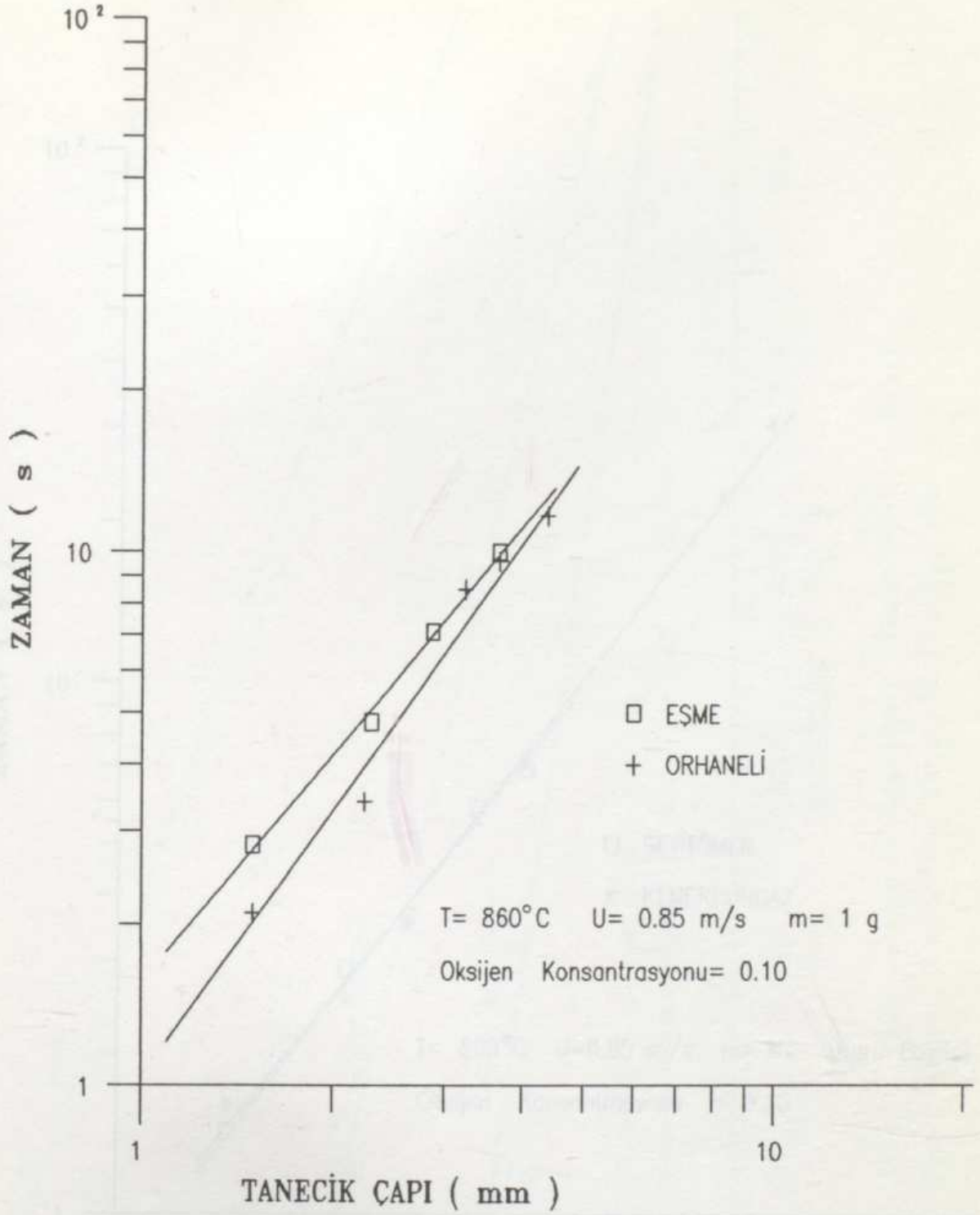
Şekil 5.5 İthal, Soma-1 ve Konya İlgın Kömürlerinin Uçucu Madde Yanma Sürelerinin Tanecik Çapı ile Değişimi



Şekil 5.6 Seyitömer ve Kemerburgaz Kömürlerinin Uçucu Madde Yanma Sürelerinin Tanecik Çapı ile Değişimi

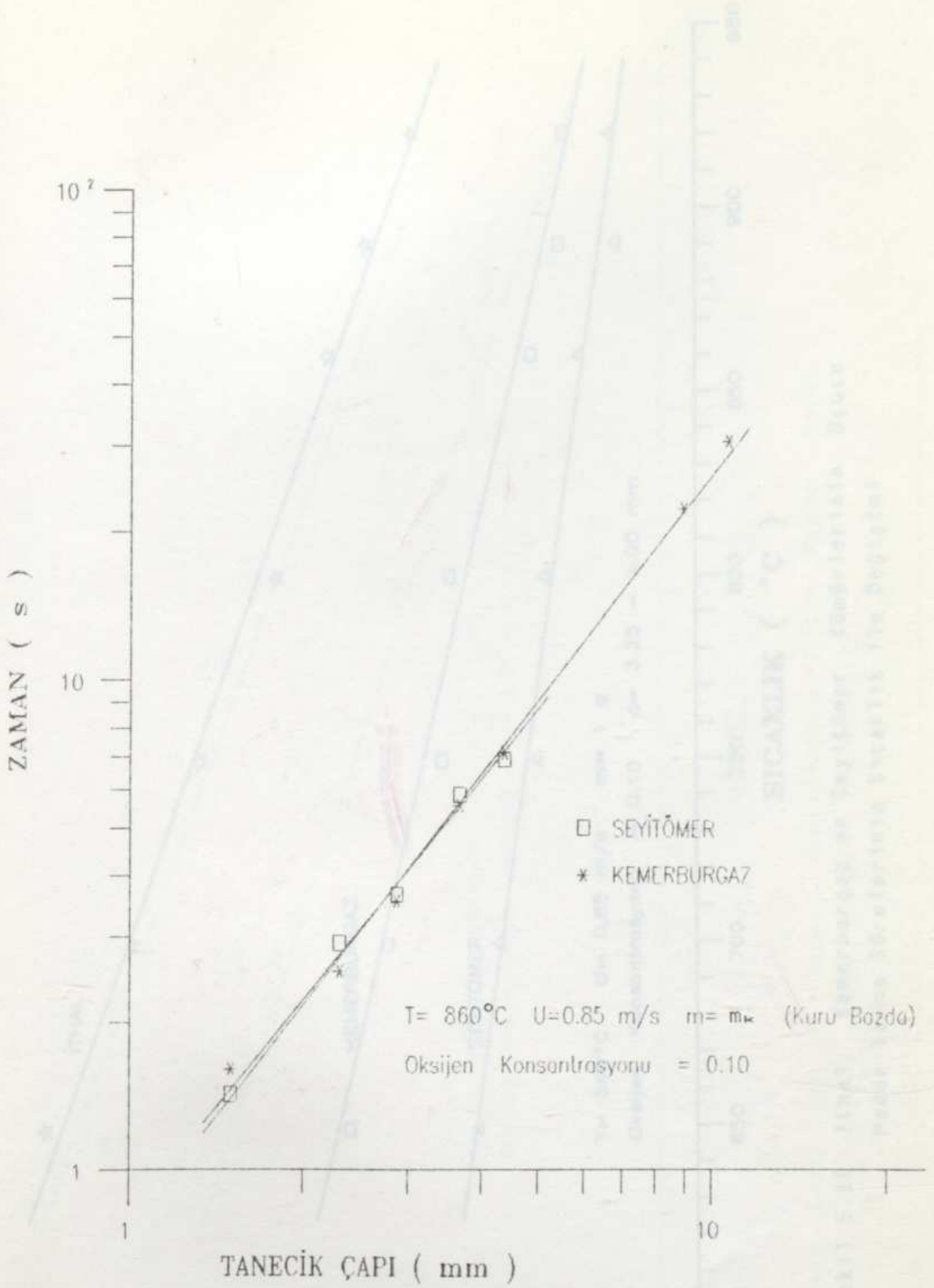


Şekil 5.7 Yatağan ve Karlıova Kömürlerinin Uçucu Madde Yanma Sürelerinin Tanecik Çapı ile Değişimi

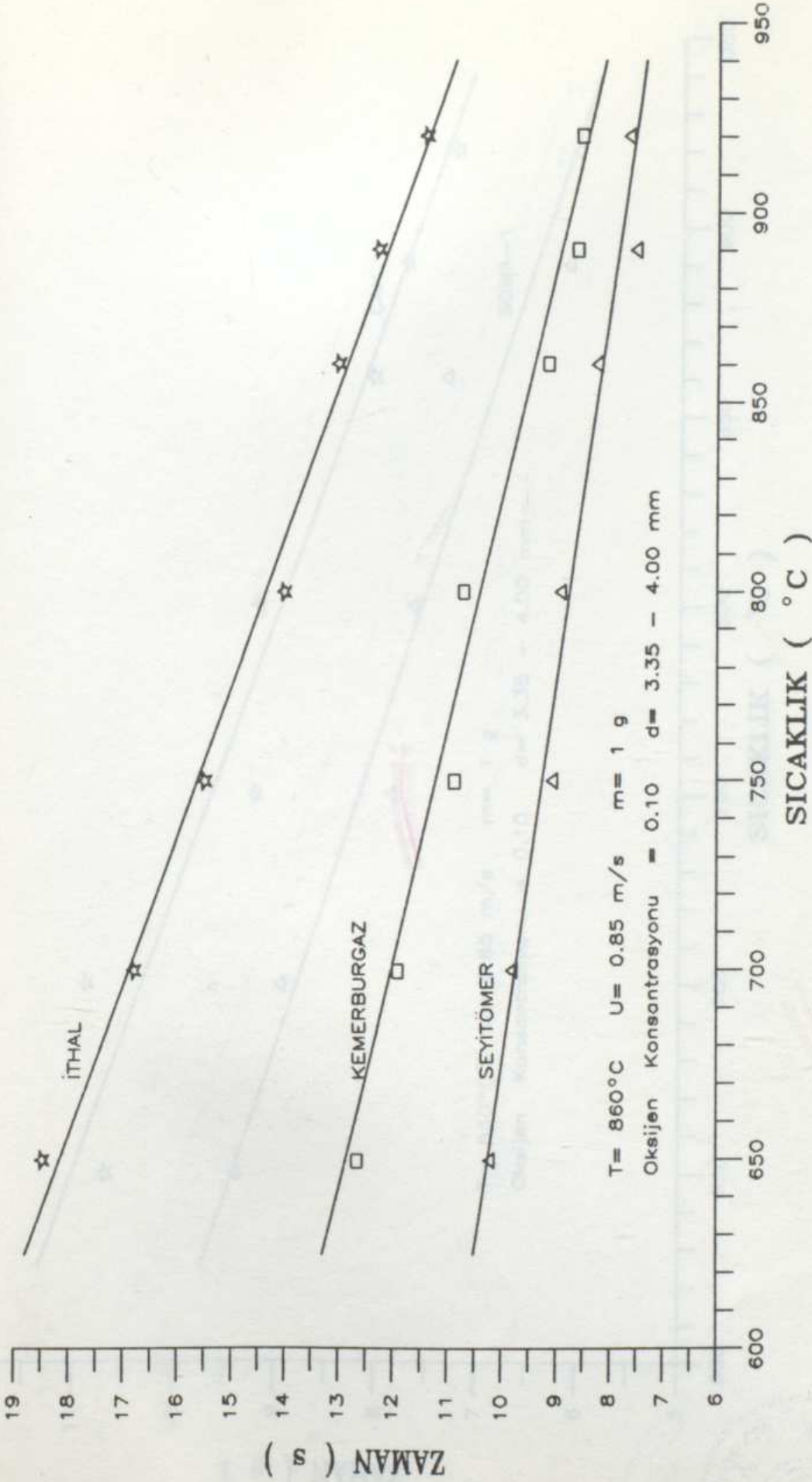


Şekil 5.8

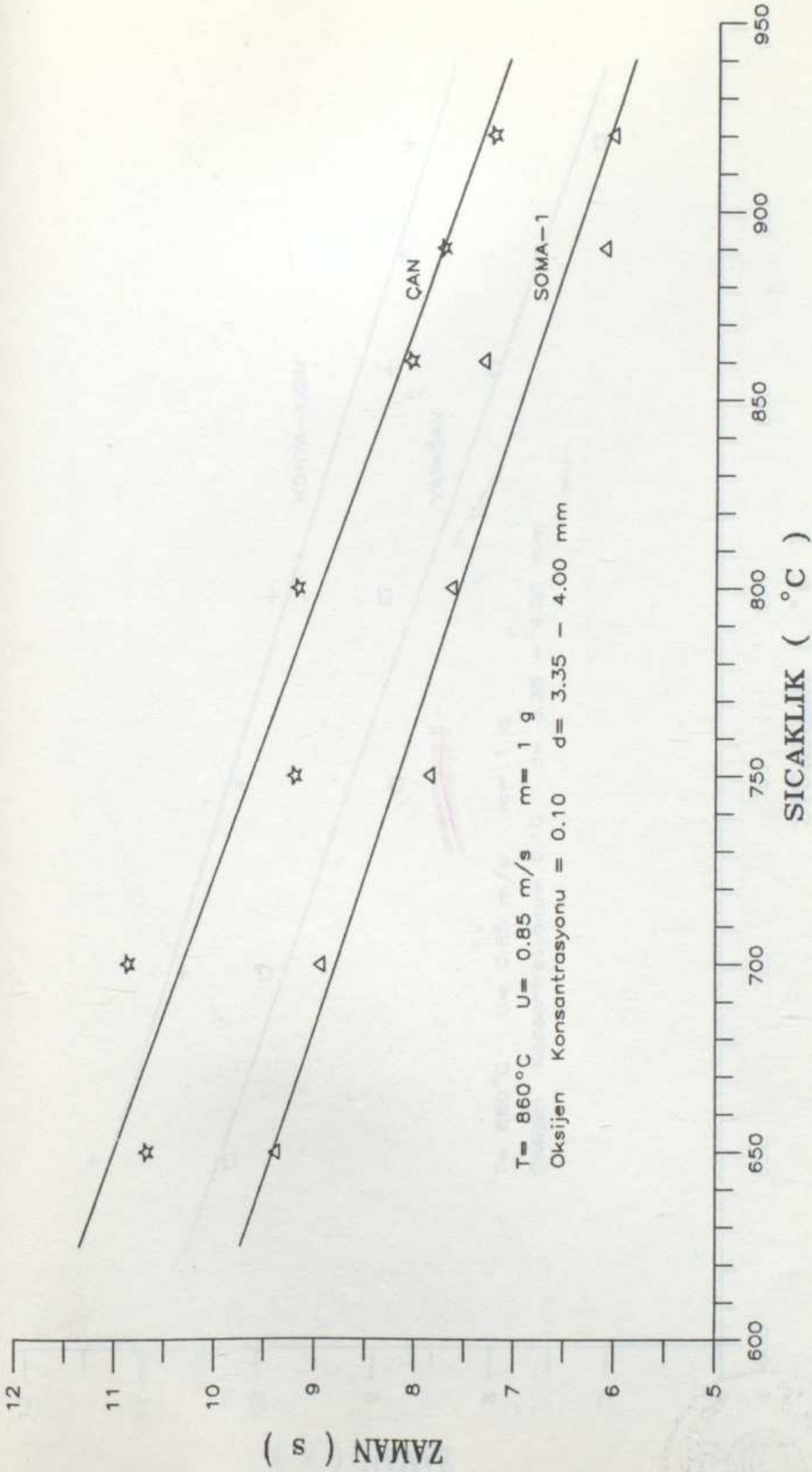
Eşme ve Orhaneli Kömürlerinin Uçucu Madde Yanma Sürelerinin Tanecik Çapı ile Değişimi



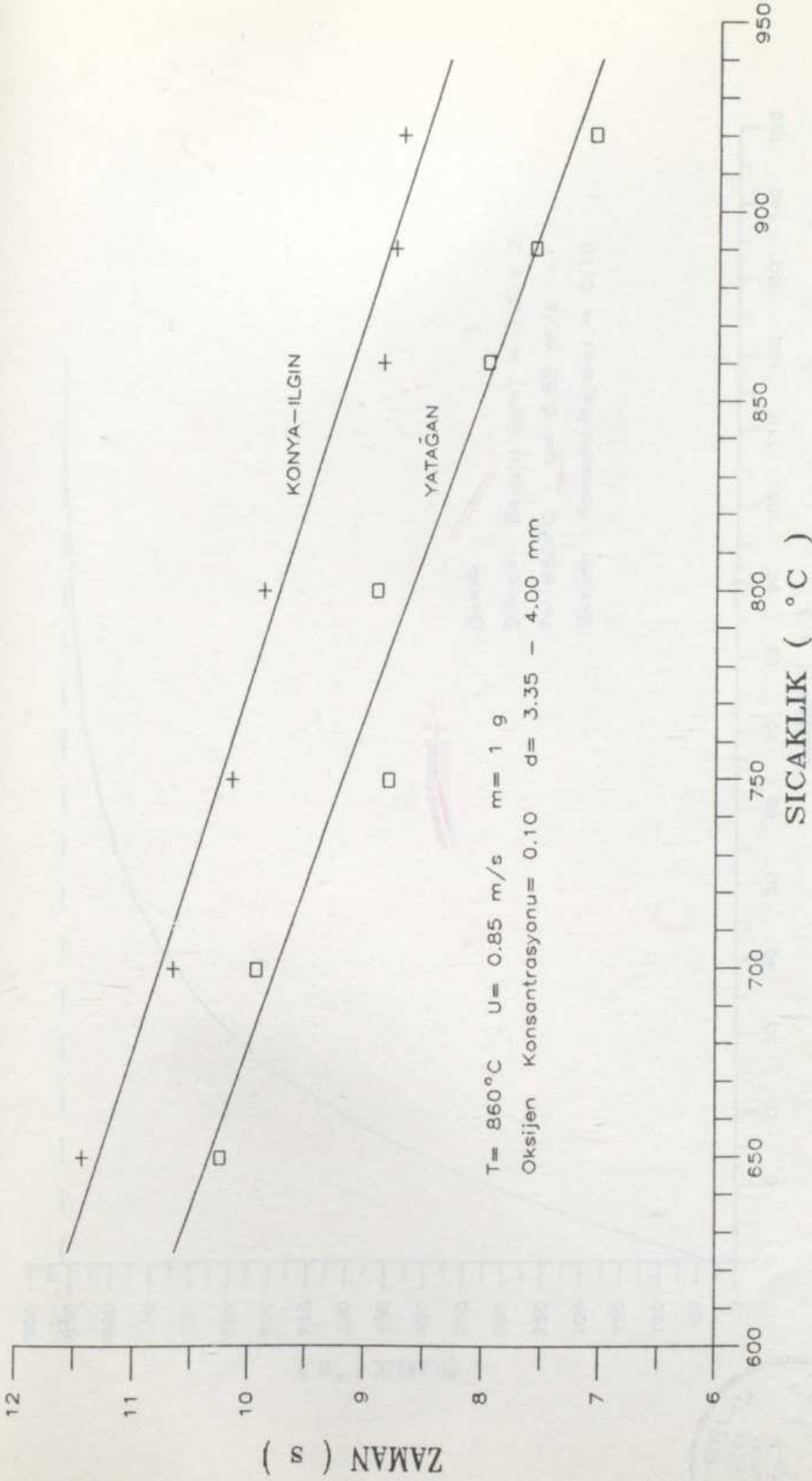
Şekil 5.9 Kuru Bazda Kemerburgaz ve Seyitömer Kömürlerinin Uçucu Madde Yanma Sürelerinin Tanecik Çapı ile Değişimi



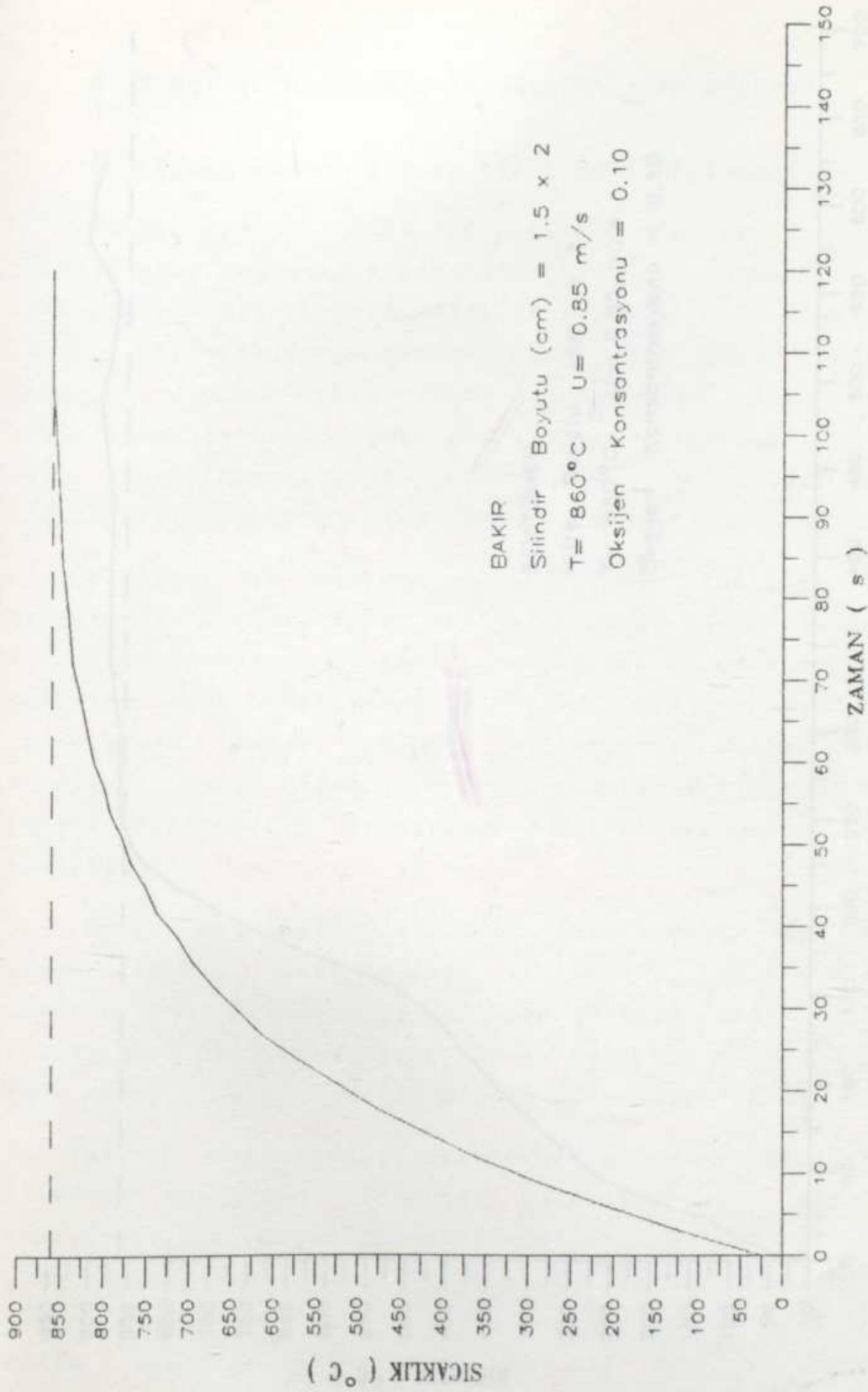
Şekil 5.10 İthal, Kemberburgaz ve Seyitömer Kömürlerinin Uçucu Madde Yanma Sürelerinin Sıcaklık ile Değişimi



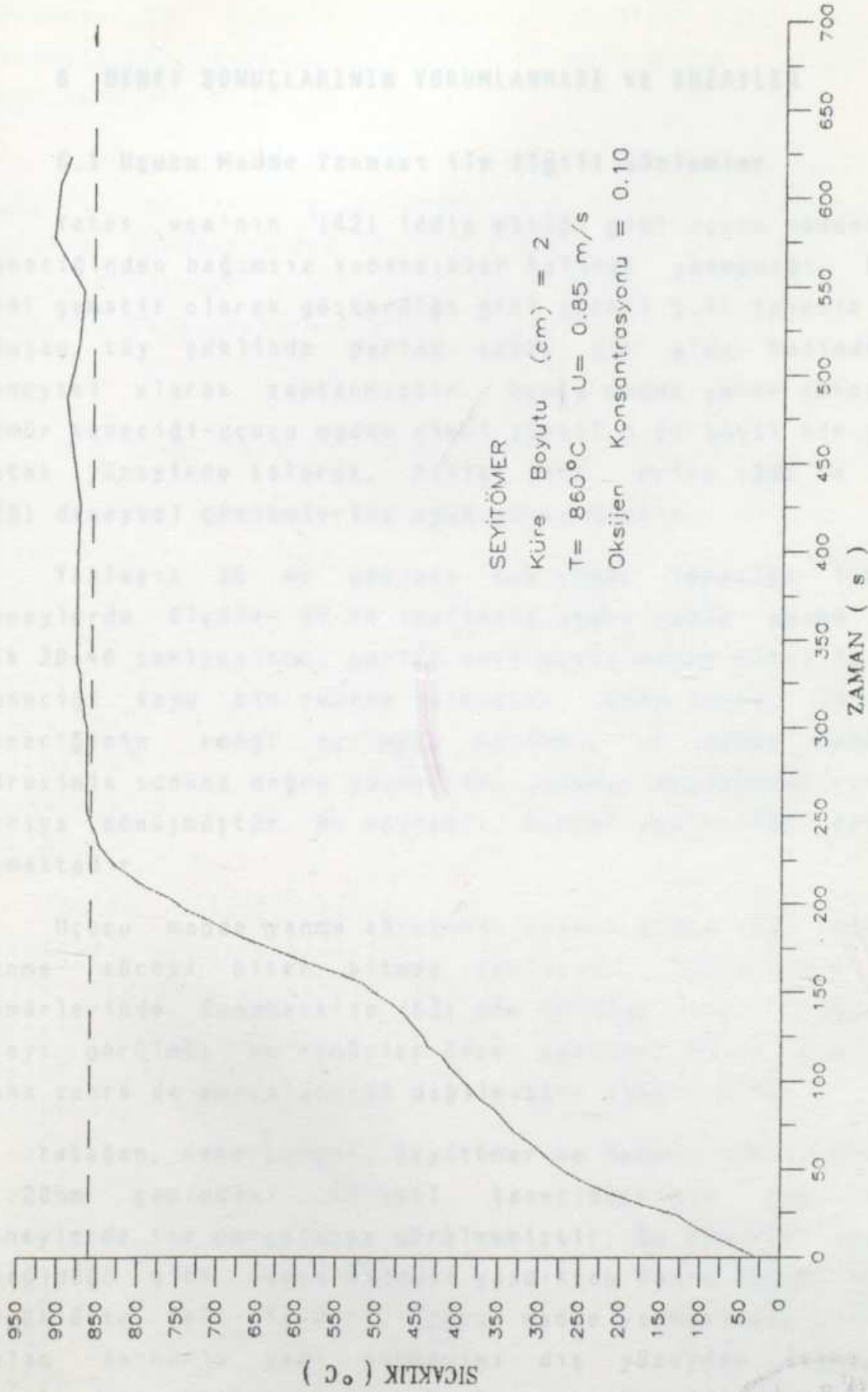
Şekil 5.11 Çan ve Soma-1 Kömürlerinin Uçucu Madde Yanma Sürelerinin Sıcaklık ile Değişimi



Şekil 5.12 Konya-İlgin ve Yatağan Kömürlerinin Uçucu Madde Yanma Sürelerinin Sıcaklık ile Değişimi



Şekil 5.13 Bakır Parçanın Merkezindeki Sıcaklık Değişimi



Şekil 5.14 Seyitömer Kömürünün Merkezindeki Sıcaklık Değişimi

6 DENEY SONUÇLARININ YORUMLANMASI VE ÖNERİLER

6.1 Uçucu Madde Yanması ile İlgili Gözlemler

Yates vça'nın (42) iddia ettiği gibi uçucu maddenin kömür taneciğinden bağımsız kabarcıklar halinde yanmadığı, Pillai'nin (46) şematik olarak gösterdiği gibi (Şekil 3.4) tanecik etrafında oluşan tüy şeklinde parlak küçük bir alev halinde yandığı deneysel olarak saptanmıştır. Uçucu madde yanma süresi boyunca kömür taneciği-uçucu madde alevi (Şekil 5.2) büyük bir çoğunlukla yatak yüzeyinde kalarak, Pillai (46), Prins (30) ve Bilge'nin (29) deneysel gözlemlerine uyum göstermiştir.

Yaklaşık 10 mm çapında tek kömür taneciği ile yapılan deneylerde ölçülen 60-70 saniyelik uçucu madde yanma süresinin ilk 30-40 saniyesinde, parlak sarı uçucu madde alevi içinde kömür taneciği koyu bir renkte kalmıştır. Daha sonra, ısınan kömür taneciğinin rengi açılmaya başlamış ve uçucu madde yanma süresinin sonuna doğru yüzeyinden yanmaya başlayarak rengi parlak sarıya dönüşmüştür. Bu davranış, Andrei vça'nın (25) gözlemlerine uymaktadır.

Uçucu madde yanma süresinin sonuna doğru veya uçucu madde yanma süresi biter bitmez Karlıova, Konya-İlgın ve ithal kömürlerinde Sundback'in (53) öne sürdüğü gibi "fragmentation" olayı görülmüş ve kömürler önce patlamış mısır gibi patlayıp daha sonra da parçalanarak dağılmıştır (Şekil 5.4).

Yatağan, Kemerburgaz, Seyitömer ve Soma-1 kömürlerinin 10.00-11.20mm çapındaki küresel tanecikleriyle yapılan benzer deneylerde ise parçalanma görülmemiştir. Bu kömürler Şekil 5.3'te görüldüğü gibi uçucu maddesi yandıktan sonra hemen hemen aynı büyüklükte kalmışlardır. Uçucu madde yanmasından sonra geriye kalan karbonlu yapı yanmasını dış yüzeyden içeriye doğru ilerleyerek sürdürmektedir; bu ise, uçucu madde yanması bittikten

bir süre sonra kömür taneciğinin yataktan çıkarılıp ikiye bölünmesiyle tanecik merkezinde görülen koyu renkli henüz yanmamış karbonlu yapının varlığıyla (Şekil 5.3) doğrulanmaktadır.

1.00-11.20 mm aralığında değişik tanecik çaplarında ölçülen 1.4-72.5 saniyelik uçucu madde yanma süreleri, kömürün akışkan yatakta yanmasını modellerken uçucu madde çıkışının ani olduğu kabulünü yapan araştırmacıların (41,61) kabullerinin mümkün olamayacağını göstermektedir.

6.2 Kömür Taneciğinin Sıcaklığının Zamanla Değişmesi

2 cm çapında küreselleştirilmiş Seyitömer kömürünün merkezinde sıcaklığın değişimi Şekil 5.14 te görülmektedir. 25-125°C arasında nemin buharlaşması; 250-500°C arasında ise yoğun uçucu madde çıkışı nedeniyle sıcaklık artış hızında bir yavaşlama vardır. Uçucu madde çıkışının sonuna doğru merkezdeki sıcaklık artış hızı artmakta ve kısa bir sürede yatak sıcaklığına ulaşmaktadır. Karbonlu yapının yanmaya başlamasıyla birlikte merkezdeki sıcaklık yatak sıcaklığının 25-40°C kadar üzerinde yer almıştır.

Salam vça (54) 1.5 mm çapında ısı çifti kullanılarak 2.7 cm çapındaki bir turba taneciğinin merkezinde yatak sıcaklığının 282°C üzerinde sıcaklık değeri kaydetmiştir. Salam vça (54) tanecik merkezinde ulaşılabilecek maksimum sıcaklığın, tanecik çapına, tanecikten yatağa olan ısı transferine, tanecik içindeki konduksiyon ısı transferine, gözenekler içindeki radyasyona, tanecik içinde uçucu madde ve oksijenin kütle transferine bağlı olduğunu söylemektedir.

Pillai (45) ise, merkezdeki sıcaklığın yatak sıcaklığından 40-120°C yukarıda olacağını ve 230-350°C arasında yoğun uçucu madde çıkışı nedeniyle sıcaklık artış hızında bir azalmanın olacağını belirtmektedir.

Seyitömer kömürünün merkezinde kaydedilen sıcaklık değerleri nitel olarak literatürdeki sonuçlarla (45,54,60) uyum içinde bulunmaktadır.

6.3 Uçucu Madde Yanma Süresi

Uçucu madde yanma süresi $t_v = ad^n$ şeklindeki bir bağıntı ile birçok araştırmacı tarafından ifade edilmektedir (29,30,38,54,62). 9 kömür için yapılan regresyon analizi sonuçları Tablo 5.9'da verilmiştir. Orijinal bazdaki kömürler ile yapılan deneylerde a katsayısı 0.66-1.88; n katsayısı ise, 1.42 - 1.91 arasında bulunmuştur. Deneysel olarak elde edilen a katsayısının değeri için teorik bir açıklama getirilemediği gibi operasyon şartlarının ve kömür tipinin de a katsayısına olan etkilerinin anlaşılamadığı Essenhigh (62) tarafından belirtilmektedir. Gerçekten de bu ve diğer çalışmalarda (29,38,54,62) a katsayıları arasında bir fark görülmektedir. Örneğin Pillai (38) a katsayısını 0.85-22.5 gibi geniş bir aralıkta bulurken Bilge (29) 0.54-1.74; Essenhigh ise 0.44-1.31 arasında bulmuştur.

Regresyon analizi sonucu 1.42-1.91 arasında bulunan n katsayıları ise diğer araştırmaların sonuçlarıyla (29,30,38,54,62) uyum içindedir; n katsayısının irdelenmesine sıcaklığın etkisi incelenirken ve ayrıca ısı transfer katsayısı hesaplarından sonra tekrar geri dönelecektir.

Orijinal halde ve kurutulmuş halde yapılan deneylerde ölçülen uçucu madde süreleri karşılaştırıldığında (Şekil 5.6, 5.9 ve Tablo 5.6, 5.7), kuru beslemenin yapıldığı durumda uçucu madde yanma süresinin belirgin bir şekilde kısaldığı görülmektedir. Kemerburgaz ve Seyitömer kömürleri için yapılan regresyon analizi sonucunda $t_v = ad^n$ bağıntısındaki a katsayısı orijinal halde sırasıyla 1.14 ve 0.76 iken, kuru halde 0.75 ve 0.80 olarak; n katsayısı ise orijinal halde 1.70 ve 1.81 iken, kuru halde 1.55 ve 1.48 olarak bulunmuştur. Bu ise, nemli halde beslemenin uçucu madde yanma süresini geciktirdiğini göstermektedir. Kömürün içerdiği nemin buharlaşması için gereken gizli ısı miktarı, kömür

taneciğinin ısınmasını geciktirmekte ve dolayısıyla uçucu madde yanma süresi uzamaktadır. Stubington (43), Bilge (29), Prins (30) ve Urkan vça (19, 21) nemin etkisini benzer şekilde vurgulamışlardır.

Kömürün içerdiği nem miktarı ile artmakta olan ve iri taneler için 3-8 saniye arasında ölçülen yanma gecikme süresi Stubington (43) ve Prins'in (30) çalışmalarıyla uyum göstermektedir.

Nemin artmasıyla uçucu madde yanma süresinin artışı, Bilge'nin (29) deney sonuçlarının da bu çalışma sonuçlarına ilave edilmesiyle elde edilen Şekil 6.1 ve 6.2'de görülmektedir. Kömürlerdeki nem miktarı arttıkça $t_{\checkmark} = ad^n$ bağıntısındaki n katsayısı artmaktadır. Benzer şekilde, kuru bazda ölçülen uçucu madde yanma sürelerinin (t_{\checkmark}) orijinal halde ölçülen uçucu madde yanma sürelerine (t_{\checkmark}) oranının, artan nem ile düşmesi de, nem miktarının artmasıyla ($t_{\checkmark} - t_{\checkmark}$) farkının arttığını, göstermektedir (Şekil 6.2).

Sıcaklığın artmasıyla uçucu madde yanma süreleri de azalmıştır (Şekil 5.10-12 ve Tablo 5.8). 650-920°C arasında, 3.35-4.00 mm çapındaki tanecikler üzerinde yapılan ölçümlerde uçucu madde yanma süresi 1.3-1.6 kat kısalmıştır.

Uçucu çıkış-yanma süresinin sıcaklıkla azalması değişik nedenlerden kaynaklanabilir: (i) Kinetik hız sabitinin sıcaklık ile üstel olarak artması, (ii) yatak sıcaklığı arttıkça parçacığa ısı transferinin giderek hızlanması veya (iii) diffüzyon katsayısının artması nedeni ile parçacık içinde kütle aktarımının hızlanması.



Bilindiği gibi kinetik hız sabiti $k = k_0 e^{-E/(RT)}$ şeklinde yazılabilir. Ragland (32), $E = 154390$ kJ/kmol, $k_0 = 2.91 \times 10^{10}$ s⁻¹; Fu vça (57), 923 K için $E = 58750$ kJ/kmol, $k_0 = 0.7 \times 10^4$ s⁻¹ ve 1193 K için $E = 79400$ kJ/kmol, $k_0 = 8.08 \times 10^4$ s⁻¹; Borghi vça (55), $E = 203845$ kJ/kmol, $k_0 = 1.07 \times 10^{10}$ s⁻¹; Agarwal (35) ve Bilge (29), $E = 236000$ kJ/kmol, $k_0 = 1.67 \times 10^{10}$ s⁻¹ olarak almışlardır; $R = 8.314$ kJ/kmol K dir. Bu araştırmacıların değerleri kinetik hız eşitliğinde yerlerine koyulursa, sıcaklığın 923 K' den 1193 K' e çıkarılmasıyla uçucu madde yanma süresinin, Ragland vça'na (32) göre 95; Fu vça'na (57) göre 8; Borghi vça'na (55) göre 400; Agarwal vça (35) ve Bilge' ye (29) göre 1000 kat kısalması gerekmektedir.

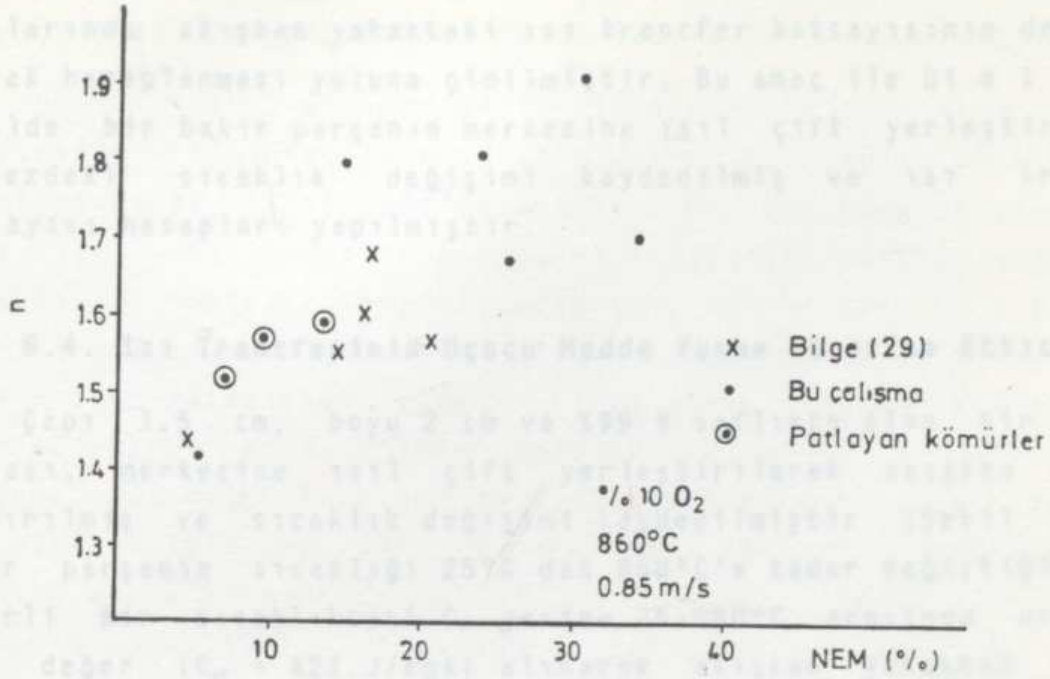
Pillai'nin (38) 775 - 875°C'da üç değişik kömür için verdiği a ve n katsayıları kullanılarak $d=3.675$ mm çapındaki kömür tanecikleri için uçucu madde yanma süreleri hesaplanırsa, sıcaklığın bu aralıkta arttırılmasıyla sürelerin iki kömür için sırasıyla 1.27 ve 1.17 kat azaldığı, üçüncü kömür için ise, 0.95 kat arttığı bulunur. Bu çalışmada ise, sıcaklığın aynı aralıkta arttırılmasıyla sürenin 1.12-1.21 kat kısaldığı bulunmuştur. Benzer şekilde Andrei vça (25) 750-900°C sıcaklıklar arasında sürenin 1.4-1.6 kat kadar kısaldığını gözlemiştir. Sıcaklığın uçucu çıkış süresine etkisi açısından deneysel sonuçların diğer araştırmacılar ile nicel olarak uyum sağladığı söylenebilir.

Bilge (29) Türk linyitlerinde, gözeneklilik ile uçucu madde arasında bir ilişki olup olmadığını araştırmış ve uçucu madde çıkış süresinin gözeneklilikten bağımsız olduğunu, yani diffüzyon kontrollü olmadığını belirtmiştir.

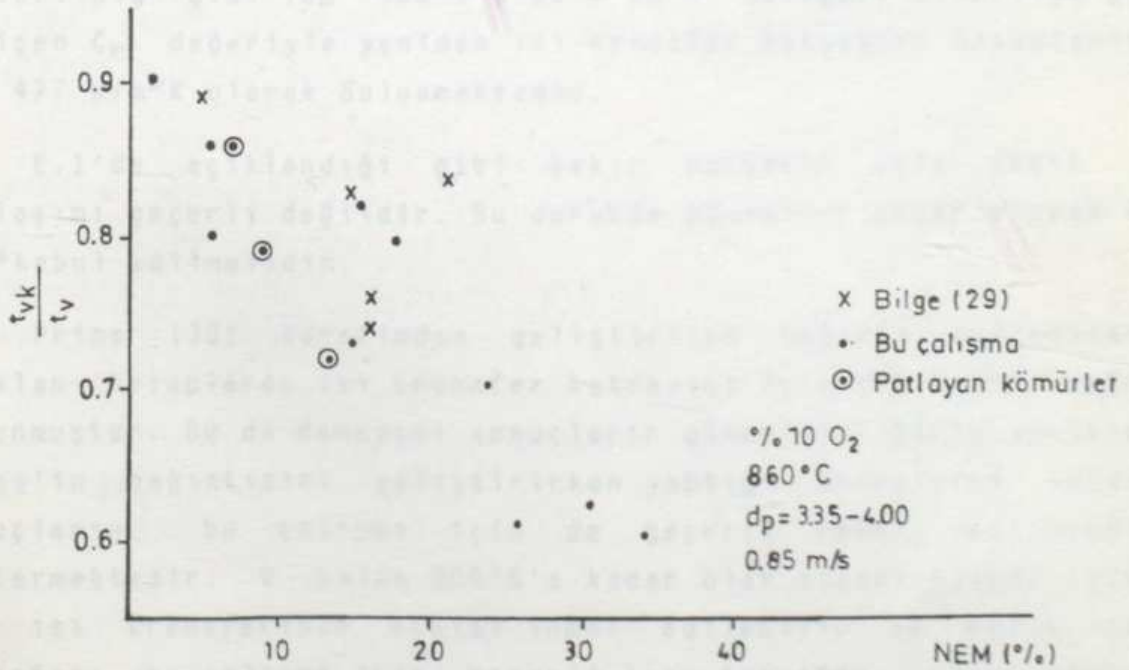
Bu çalışmada da gözenek yapılarının birbirinden çok farklı olması beklenen değişik kömürler (parçalanmış ve parçalanmayan) kullanıldığı halde ölçülen uçucu yanma sürelerinin bundan etkilenmediği görülmüştür (Şekil 6.1 ve 6.2).

Bütün bu sonuçlar, ısı transferinin hız kontrol edici adım olduğunu düşündürmektedir. Isı transferinin hız kontrol edici





Şekil 6.1 Nem ile n Arasındaki ilişki.



Şekil 6.2 Nem Miktarının Uçucu Madde Yanma Sürelerine Etkisi



adım olup olmadığının görülmesi için öncelikle çalışma şartlarında akışkan yataktaki ısı transfer katsayısının deneysel olarak hesaplanması yoluna gidilmiştir. Bu amaç ile Bi « 1 olacak şekilde bir bakır parçanın merkezine ısı çift yerleştirilerek merkezdeki sıcaklık değişimi kaydedilmiş ve ısı transfer katsayısı hesapları yapılmıştır.

6.4. Isı Transferinin Uçucu Madde Yanma Süresine Etkisi

Çapı 1.5 cm, boyu 2 cm ve %99.9 saflıkta olan bir bakır parçası, merkezine ısı çift yerleştirilerek akışkan yatağa daldırılmış ve sıcaklık değişimi kaydedilmiştir (Şekil 5.13). Bakır parçanın sıcaklığı 25°C dan 860°C'a kadar değiştiği için belirli bir sıcaklıktaki C_p yerine 25-860°C arasında ortalama bir değer ($C_p = 421 \text{ J/kgK}$) alınarak akışkan yataktan yatağa daldırılmış cisme doğru olan ısı transfer katsayısı E.1.1.'de gösterildiği gibi hesaplanırsa, $h = 453 \text{ W/m}^2\text{K}$ olarak bulunmaktadır.

Eğer C_p değerinin değiştiği göz önüne alınır ve E.1.2'de gösterildiği gibi ($C_p = 358 + 9.61 \times 10^{-6}T \text{ (J/kgK)}$) sıcaklığa göre değişen C_p değeriyle yeniden ısı transfer katsayısı hesaplanırsa $h = 477 \text{ W/m}^2\text{K}$ olarak bulunmaktadır.

E.1'de açıklandığı gibi bakır parçacık için sabit C_p yaklaşımı geçerli değildir. Bu durumda güvenilir değer olarak 477 W/m^2 kabul edilmelidir.

Prins (30) tarafından geliştirilen bağıntı kullanılarak yapılan hesaplarda ısı transfer katsayısı için 502 $\text{W/m}^2\text{K}$ değeri bulunmuştur. Bu da deneysel sonuçların güvenilirliğinin yanısıra, Prins'in bağıntısını geliştirirken yaptığı deneylerde vardığı sonuçların, bu çalışma için de geçerli kabul edileceğini göstermektedir. 0 halde 900°C'a kadar olan sıcaklıklarda ışınlam ile ısı transferinin etkisi ihmal edilebilir ve Prins (30) bağıntısı, bu çalışma için geçerli ısı transfer katsayılarının hesaplanmasında kullanılabilir. Prins'in (30) oksitleyici ortamda

ölçtüğü uçucu çıkış süreleri ile bu çalışmada ölçülen sürelerin nicel olarak uyum göstermesi de bu kabulü desteklemektedir.

Prins (30), sistemdeki ısı transfer katsayısının, yatağa daldırılan cismin çapının yatak malzemesinin çapına olan (d/d_p) oranıyla değiştiğini söylemektedir. Her bir tanecik çapı için ayrı ayrı ısı transfer katsayısı E.2.1.'de gösterildiği gibi hesaplanıp, Heisler (64) diyagramları kullanılarak $\theta = 0.1$ için gerekli t zamanı bulunmuştur. E.2.3.'de anlatıldığı gibi tanecik çapı ile hesaplanan süreler logaritmik kağıt kullanılarak grafiklenirse, elde edilen doğrunun eğimi $n = 1.75$ olarak bulunur. Bu değer $t_v = ad^n$ eşitliğindeki n sabitidir. Eğer her bir tanecik için ayrı ayrı ısı transfer katsayısı hesaplanmayıp $h = 475 \text{ W/m}^2\text{K}$ alınırsa $n = 1.62$ bulunmaktadır. Deney sonuçlarında n sabitinin 1.42-1.91 arasında değiştiği bulunmuştu; bu ise ısı transferinin hız kontrol edici adım olabileceği savını desteklemektedir.

920 ve 650°C'da ayrı ayrı deneylerde yapılan $d = 3.675 \times 10^{-3} \text{ m}$ çapındaki taneciğin merkezindeki sıcaklığın 600°C'a gelmesi için gereken süreler E.2.2.'de gösterildiği gibi hesaplanırsa; 920°C çalışma şartlarında tanecik merkezi 6.19 saniyede, 650°C çalışma şartlarında tanecik merkezi 11.25 saniyede 600°C'a ulaşmaktadır.

Isı transfer hesap yöntemiyle hesaplanan bu iki süre birbirine oranlanırsa, sürenin sıcaklık ile 1.82 kat azaldığı görülmektedir. Deney sonuçlarında ise bu süre 1.3-1.6 kat azalmıştır. Ancak deneysel olarak ölçülen süreler, merkez sıcaklığının 600°C'a ulaştığı süreler değil, uçucu madde çıkışının devam ettiği sürelerdir. Yatak sıcaklığı 920°C iken, merkez sıcaklığının 600°C'a ulaşması, uçucu madde çıkışı bitmeden gerçekleşeceğinden, süreler arasındaki oranın aslında 1.3-1.6 arası değil, daha fazla azalması ve 1.8'e yaklaşması beklenmelidir. Yatak sıcaklığının uçucu madde çıkış süresine olan etkisi de, ısı transferinin kontrol edici adım olduğu savını desteklemektedir. Yapılan hesaplarda ısı ile olan ısı transferinin dikkate alınmaması, daha önce Prins'in (30)

gözlemleri doğrultusunda yapılan bu kabulün geçerliliğini göstermektedir.

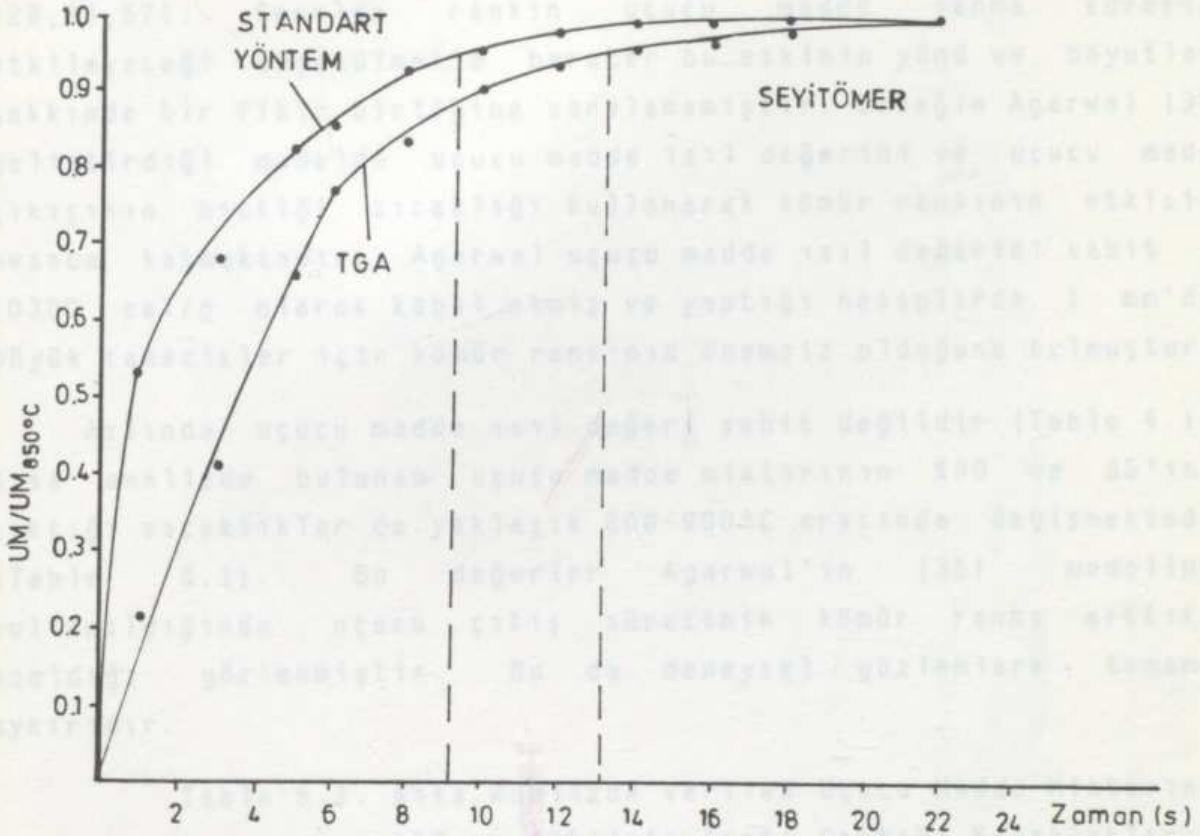
Aynı kömür için yapılan nemli ve kuru beslemeler arasındaki fark da, yine ısı transferi, kontrol edici adım kabul edilerek açıklanabilir. Kömürün nem içeriği, etkin termofiziksel özelliklerini (özellikle ısı diffüzivite) değiştirerek parçacık içindeki ısı transfer hızını yavaşlatmaktadır. Bu durumda nem içeriği arttıkça sürenin de doğru orantılı olarak uzaması beklenmelidir ki, deneysel gözlemler de bu doğrultudadır (Şekil 6.1 ve 6.2).

Isı transferi, hız kontrol edici adım kabul edilerek, kömür taneceği içerisindeki sıcaklık dağılımı Heisler (64) diyagramları yardımıyla bulunabilir.

Sıcaklığa bağlı olarak çıkan uçucu madde miktarı da E.3.1'deki gibi hesaplanabilir. Örnek olarak Seyitömer kömürü için bu yöntem ile değişik sürelerdeki sıcaklık dağılımı ve ardından açığa çıkan uçucu madde miktarı hesaplanmıştır. Hesaplarda Seyitömer kömürü için Şekil 5.1'de verilen değerler kullanılmıştır; açığa çıkan uçucu madde miktarı, 860°C'da açığa çıkan uçucu madde miktarına oranlanarak Şekil 6.3'te gösterilmiştir. Şekil 5.1'de hem TGA hem de standart yöntem sonuçları verilmiştir; aradaki fark yöntem ve ısıtma hızından kaynaklanmaktadır; Merrick (63) TGA ile bulunan uçucu madde miktarının kısa analiz yöntemiyle bulunan uçucu madde miktarından her zaman daha az olacağını belirtmektedir.

Şekil 6.3'den Seyitömer kömürünün 860°C'da içerdiği uçucu maddenin %95'inin açığa çıkması için gereken süreler, standart yönteme göre 8.6 saniye, TGA yöntemine göre 12.6 saniye olarak okunmaktadır. Hesaplanan süreler arasındaki fark, TGA ve standart yönteme göre belirlenen sıcaklık-kütle kaybı ilişkisindeki farklılıktan kaynaklanmaktadır (Şekil 5.1). Benzer farklılıklar değişik ranktaki kömürlerin sıcaklık-kütle kaybı ilişkileri arasında da mevcuttur. Bu nedenle ısı transferi kontrollü bir

modelin değişik kömürler arasındaki uçucu madde çıkış süresi farklılıklarını da açıklayabileceği anlaşılmaktadır.



Şekil 6.3 Uçucu Maddenin %95'inin Çıktığı Sürenin Hesap Yoluyla Bulunması

6.5 Kömür Rankının Uçucu Yanma Süresine Etkisi

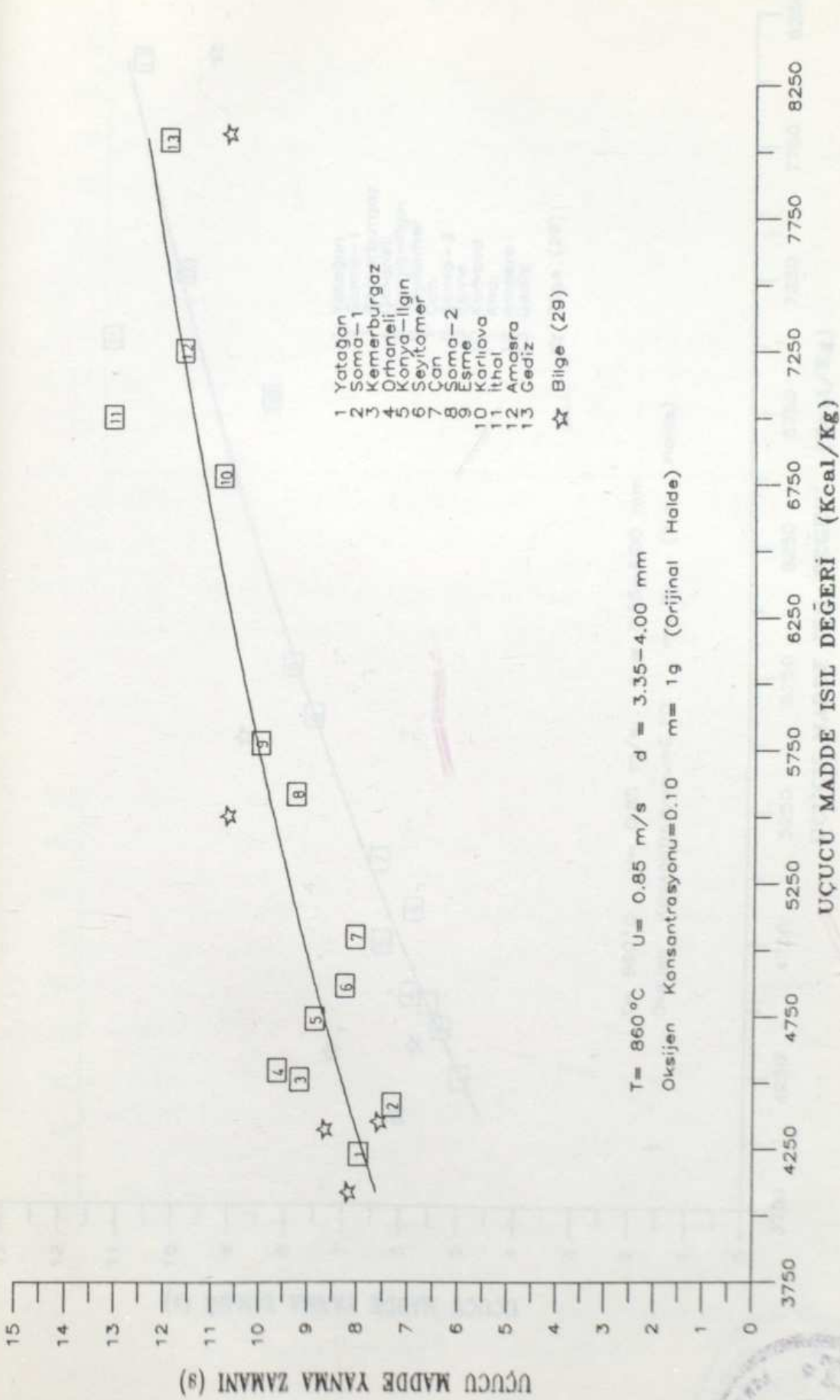
Aynı tanecik çapında farklı kömürler için farklı uçucu madde yanma sürelerinin ölçülmesi kömür rankının bu süre üzerinde etkili olabileceğini düşündürmektedir. Deneylerde kullanılan kömürlerin uçucu madde ısıl değerleri Urkan-Arıkol (3) bağıntısıyla hesaplanıp, $d = 3.35-4.00$ mm çapındaki taneciklerin uçucu madde yanma sürelerine karşı grafiklendiğinde uçucu madde ısıl değeri arttıkça uçucu madde yanma süresinin de arttığı görülmektedir (Şekil 6.4 - 6.5). Uçucu maddenin ısıl değeri ise, rank ile artmaktadır (3), dolayısıyla kömür rankının artmasıyla uçucu madde yanma süresinin arttığı görülmektedir. Kömür rankındaki artışın etkisi benzer şekilde UM/SK oranına karşı t_w ve t_{wK} 'nin grafiklenmesiyle de Şekil 6.6 ve 6.7'de görülmektedir.

Kömür rankının uçucu yanma süresine etkisi bundan önce yapılan çalışmalarda değişik şekillerde ele alınmıştır (29,35,57). Genelde rankın uçucu madde yanma süresini etkileyeceği düşünülmeyle beraber bu etkinin yönü ve boyutları hakkında bir fikir birliğine varılamamıştır. Örneğin Agarwal (35) geliştirdiği modelde uçucu madde ısı değerini ve uçucu madde çıkışının bittiği sıcaklığı kullanarak kömür rankının etkisini hesaba katmaktadır. Agarwal uçucu madde ısı değerini sabit ve 10300 cal/g olarak kabul etmiş ve yaptığı hesaplarda 1 mm'den büyük tanecikler için kömür rankının önemsiz olduğunu bulmuştur.

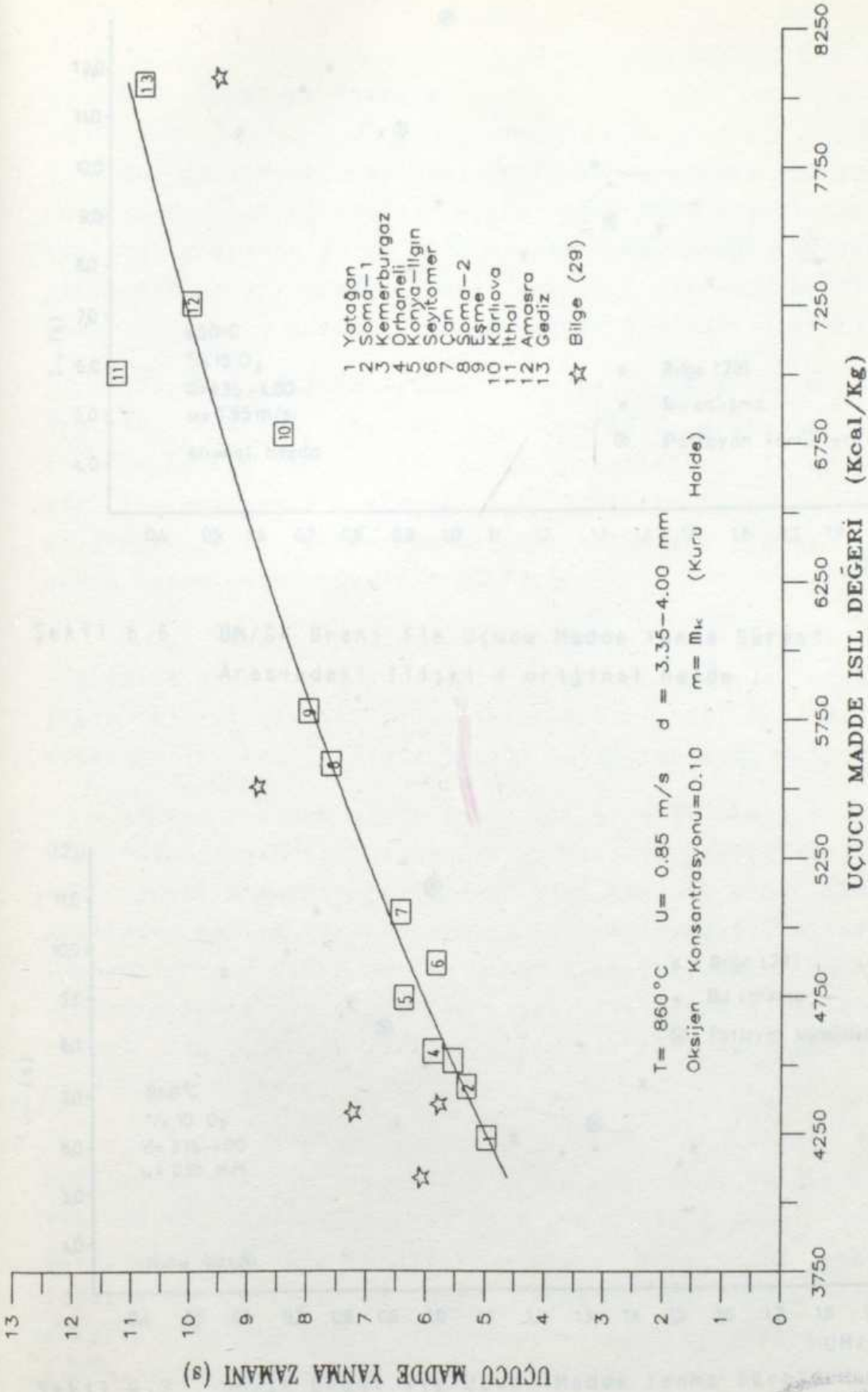
Aslında uçucu madde ısı değeri sabit değildir (Tablo 4.1). Kısa analizde bulunan uçucu madde miktarının %90 ve %95'inin çıktığı sıcaklıklar da yaklaşık 800-900°C arasında değişmektedir (Tablo 6.1). Bu değerler Agarwal'ın (35) modelinde kullanıldığında uçucu çıkış süresinin kömür rankı arttıkça azaldığı gözlenmiştir. Bu da deneysel gözlemlere tamamen aykırıdır.

Tablo 6.1. Kısa Analizde Verilen Uçucu Madde Miktarının %90 ve %95'inin Açığa Çıktığı Sıcaklıklar

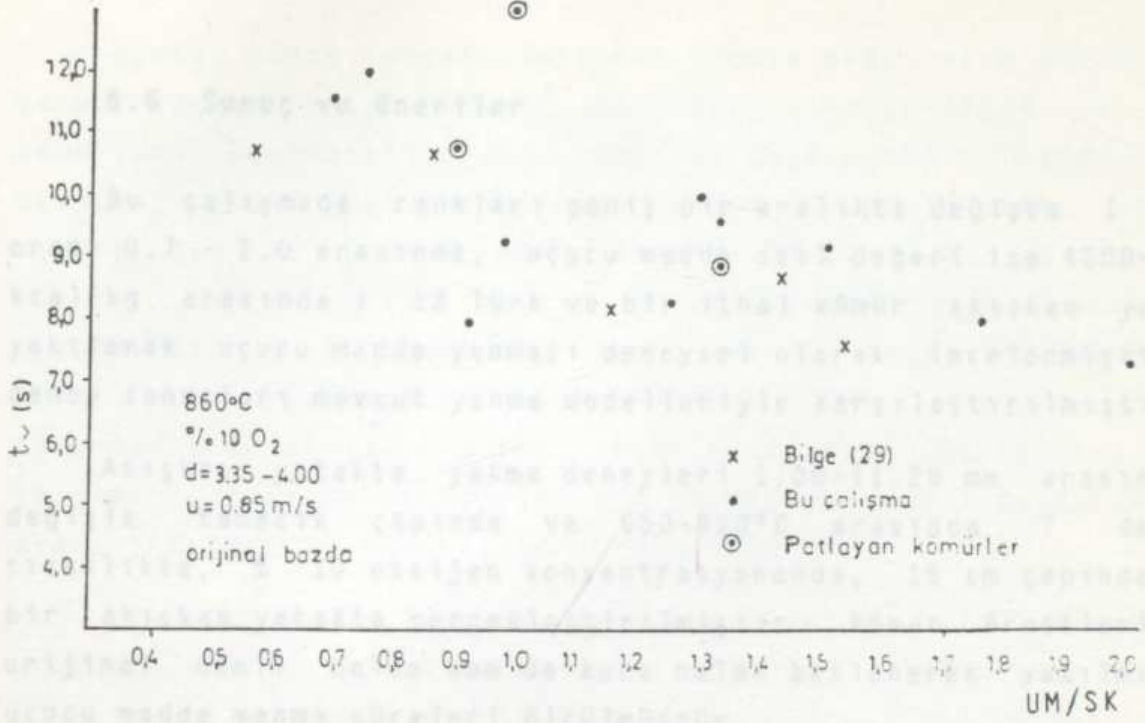
Kömür Adı	Sıcaklık (°C)	
	(%90)	(%95)
Orhaneli	746	799
Karlıova	810	889
Yatağan	746	860
Kemerburgaz	794	890
Eşme	798	892
Seyitömer	779	865
Soma-1	828	884
Konya Ilgın	786	872
İthal	782	891
Amasra	792	910
Gediz	760	874
Çan	766	875
Soma-2	783	882



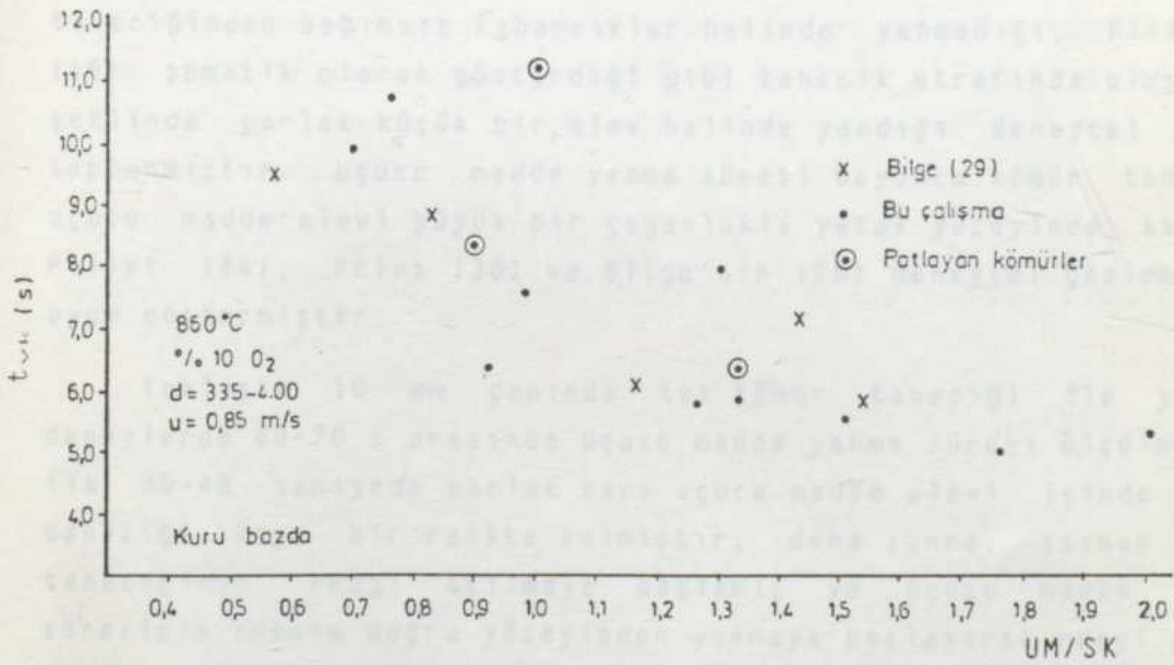
Şekil 6.4 Uçucu Madde Isıl Değeri ile Yanma Süresi Arasındaki İlişki (original halde)



Şekil 6.5 Uçucu Madde Isıl Değeri ile Yanma Süresi
Arasındaki İlişki (kuru halde)



Şekil 6.6 UM/SK Oranı ile Uçucu Madde Yanma Süresi Arasındaki İlişki (orijinal halde)



Şekil 6.7 UM/SK Oranı ile Uçucu Madde Yanma Süresi Arasındaki İlişki (kuru halde)

6.6 Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada rankları geniş bir aralıkta değişen (UM/SK oranı 0.7 - 2.0 arasında, uçucu madde ısı değeri ise 4200- 8000 kcal/kg arasında) 12 Türk ve bir ithal kömür akışkan yatakta yakılarak uçucu madde yanması deneysel olarak incelenmiştir ve deney sonuçları mevcut yanma modelleriyle karşılaştırılmıştır.

Akışkan yatakta yakma deneyleri 1.00-11.20 mm arasında 7 değişik tanecik çapında ve 650-920°C arasında 7 değişik sıcaklıkta, % 10 oksijen konsantrasyonunda, 15 cm çapında olan bir akışkan yatakta gerçekleştirilmiştir. Kömür örnekleri hem orijinal nemli halde hem de kuru halde beslenerek yakılmış ve uçucu madde yanma süreleri ölçülmüştür.

Uçucu madde miktarı, TGA yöntemi ve standart kısa analiz yöntemine göre değişik sıcaklıklarda saptanmış ve uçucu maddenin yoğun olarak çıktığı sıcaklıklar belirlenmiştir; daha sonra bu değerler ısı transferiyle ilgili hesaplamalarda kullanılmıştır.

Yates vça'nın (42) iddia ettiği gibi uçucu maddenin kömür taneciğinden bağımsız kabarcıklar halinde yanmadığı, Pillai'nin (46) şematik olarak gösterdiği gibi tanecik etrafında oluşan tüy şeklinde parlak küçük bir alev halinde yandığı deneysel olarak saptanmıştır. Uçucu madde yanma süresi boyunca kömür taneciği- uçucu madde alevi büyük bir çoğunlukla yatak yüzeyinde kalarak, Pillai (46), Prins (30) ve Bilge'nin (29) deneysel gözlemlerine uyum göstermiştir.

Yaklaşık 10 mm çapında tek kömür taneciği ile yapılan deneylerde 60-70 s arasında uçucu madde yanma süresi ölçülmüş ve ilk 30-40 saniyede parlak sarı uçucu madde alevi içinde kömür taneciği koyu bir renkte kalmıştır; daha sonra, ısınan kömür taneciğinin rengi açılmaya başlamış ve uçucu madde yanma süresinin sonuna doğru yüzeyinden yanmaya başlayarak rengi parlak sarıya dönüşmüştür. Bu davranış, Andrei vça'nın (25) gözlemlerine uymaktadır.



Uçucu madde yanma süresinin sonuna doğru veya uçucu madde yanma süresi biter bitmez Karlıova, Konya-Ilgın ve ithal kömürleri Sundback'in (53) öne sürdüğü gibi "fragmentation" davranışı göstererek patlayıp parçalanarak dağılmıştır. Yatağan, Kemerburgaz ve Soma-1 kömürlerinin 10.00-11.20 mm çapındaki küresel tanecikleriyle yapılan benzer deneylerde ise parçalanma görülmemiştir; bu kömürler, uçucu maddesi yandıktan sonra hemen hemen aynı büyüklükte kalmışlardır. Uçucu madde yanması tamamlandıktan bir süre sonra, tanecikler yatak dışına çıkarılarak incelendiğinde, karbonlu yapının yanmasını dış yüzeyden içeriye doğru ilerleyerek sürdürdüğü görülmüştür.

1.00-11.20 mm tanecik çapındaki kömürler için 1.4 - 72.5 s arasında değişen uçucu madde yanma süreleri ölçülmüştür. Birçok araştırmacının kabul ettiği gibi uçucu madde yanma süresi $t_w = ad^n$ şeklinde bir bağıntı ile ifade edilip deney sonuçları kullanılarak regresyon analizi yapıldığında, orijinal nemli halde beslenen kömürler için a katsayısı 0.66-1.88; n katsayısı ise, 1.42-1.91 arasında bulunmuştur. Kuru halde yapılan deneylerde uçucu madde yanma süresinin belirgin bir şekilde azaldığı görülmüştür; Kemerburgaz ve Seyitömer kömürleri için yapılan regresyon analizi sonucunda a katsayısı orijinal halde sırasıyla 1.14 ve 0.76 iken, kuru halde 0.75 ve 0.80 olarak; n katsayısı ise orijinal halde 1.70 ve 1.81 iken, kuru halde 1.55 ve 1.48 olarak bulunmuştur.

650-920°C aralığında sıcaklığın arttırılmasıyla 3.35-4.00 mm tanecikler üzerinde yapılan ölçümlerde uçucu madde yanma süreleri 1.3-1.6 kat kısalmıştır.

Akışkan yatağa daldırılan silindirik bir bakır parçanın merkezinde sıcaklık değişimi kaydedilmiş ve sistemin ısı transfer katsayısı hesaplanmıştır. Benzer şekilde Seyitömer kömüründen küreselleştirilmiş 2 cm çapındaki bir taneciğin merkezinde sıcaklık değişimi kaydedilmiştir; uçucu maddenin yanmasından bir süre sonra kömür taneciğinin merkezindeki sıcaklık yatak sıcaklığının 25- 40°C üzerinde yer almıştır.

Tüm deneysel bulgular incelendiğinde (t_{v-d} , t_{v-k-t_v} , t_{v-T}) akışkan yatakta uçucu maddenin yanmasında, yataktan taneciğe ve tanecik içerisinde olan ısı transferinin hız kontrol edici adım olduğu görülmektedir.

Uçucu madde yanma süresini etkileyen önemli bir parametrenin de kömür rankı olduğu anlaşılmıştır. Ölçülen uçucu madde yanma sürelerinin kömür rankından doğrudan etkilendiği; uçucu madde yanma süresi ile UM/SK oranı ve uçucu madde ısı değeri arasında bir ilişki olduğu saptanmıştır.

ÖNERİLER:

Tüm kömürler için orijinal nemli halde ve uçucu maddesi giderilmiş halde olmak üzere gözeneklilik ölçümlerinin ayrı ayrı yapılması ve gözenek yapısının etkisinin incelenmesinde yarar vardır.

Uçucu madde yanma süresi ölçme deneylerinin inert bir ortamda yapılarak sonuçların karşılaştırılarak alevin etkisi araştırılabilir.

Deneysel sonuçların, kontrol edici adım olarak ısı transferini kabul eden modellere nitel olarak uyum gösterdiği; ancak ısı transferinin yanısıra kömür rankının da uçucu madde çıkış-yanma sürecinde etkili bir rol oynadığını yeterli düzeyde hesaba katmayan mevcut modeller ile nicel olarak uyum sağlamadığı gözlemlendiğinden, uçucu madde çıkış-yanma sürecini etkileyen tüm parametreleri dikkate alan bir matematiksel modelin geliştirilmesine ihtiyaç vardır.



E1- Bakır Silindir için Isı Transfer Katsayısı Hesabı

E1.1- Ortalama C_p kabulüyle

$$\theta = \frac{T - T_b}{T_o - T_b} = \exp [- ((hA) / (\rho V C_p)) t] \quad \dots \dots \dots E.1$$

Bakırın termofiziksel özellikleri:

$$\begin{aligned} \rho &= 8933 \text{ kg/m}^3 & T_b &= 860^\circ\text{C} \\ \lambda_{300} &= 403 \text{ W/mK} & T_o &= 25^\circ\text{C} \\ \lambda_{1100} &= 345 \text{ W/mK} & A &= 12.95 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \\ \text{ortalama } \lambda &= 374 \text{ W/mK} & V &= 3.53 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \\ C_p &= 376 \text{ J/kgK } 300^\circ\text{C için} \\ C_p &= 466 \text{ J/kgK } 1100^\circ\text{C için} \\ C_p &= 421 \text{ J/kgK ortalama} \\ Bi &\ll 0.1 \end{aligned}$$

Yukarıdaki eşitlikteki θ için çeşitli değerler verilip T sıcaklığı bulunur; bakır merkezinde sıcaklığın bu T değerine gelmesi için geçen süre Şekil 5.13'teki deneysel değerlerden alınıp eşitlikte yerine koyularak ısı transfer katsayısı hesaplanır. θ için çeşitli değerler verildiğinde ortalama olarak $h = 453 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ bulunmuştur.

E.1.2 Değişken C_p Kabulüyle

$$\rho C_p (dT/dt) = hA(T_b - T) \quad \dots \dots \dots E.2$$

$$C_p = a' + b'T \quad \dots \dots \dots E.3$$

$$\theta = (a' + b'T_b) [\ln(T_b - T) / (T_b - T_o)] + b'(T - T_o) = -((hA) / (\rho V)) t$$

$$\rho = 8933 \text{ kg/m}^3 \quad \dots \dots \dots E.4$$

$$\lambda = 374 \text{ W/mK}$$

$$A = 12.95 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$V = 3.353 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$T_b = 860^\circ\text{C} = 1133 \text{ K}$$

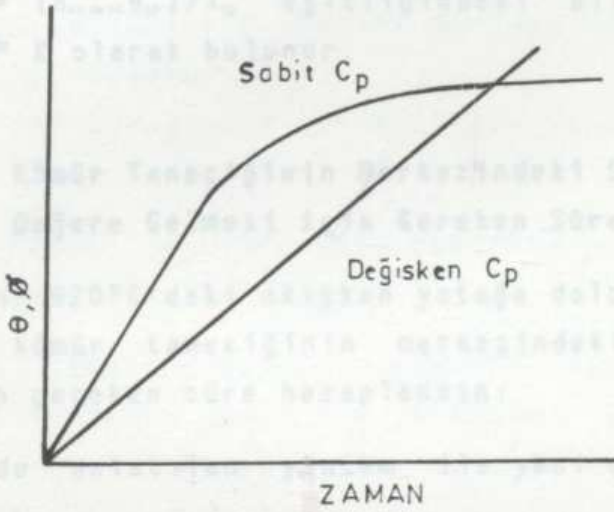
$$T_o = 25^\circ\text{C} = 298 \text{ K}$$

$$C_p = 358 + 9.61 \times 10^{-2} T \text{ J/kgK}$$

$$Bi \ll 0.1$$



Merkezdeki değişik T sıcaklıkları için gereken süreler Şekil 5.3'teki deneysel değerlerden alınıp yukarıdaki termofiziksel özelliklerle birlikte formülde yerine koyulur ve zamana karşı eşitliğin diğer tarafı grafiklenirse, doğrunun eğiminden ısı transfer katsayısı hesaplanabilir. $h = 477$ W/mK olarak bulunmuştur. Aşağıdaki grafik, sabit ve değişken C_p alınması halinde aradaki farkı göstermektedir.



Buradan, C_p 'nin sabit kabul edilmesinin uygun olmadığı ve ısı transfer katsayısı için daha sağlıklı değerin $h = 477$ W/m²K olduğu açıkça görülmektedir.

E.2 Kömür Taneciği için Isı Transfer Hesapları

E.2.1. Prins'e (30) göre değişik d/d_p durumunda ısı transferi

$$Nu_{maks} Ar^{-n} (f_T)^{-1} = 3.539 (d/d_p)^{-0.257} \dots \dots \dots E.5$$

$$Ar = (g(d_p)^3 \rho_p) / (\rho_a (v_a)^2) \dots \dots \dots E.6$$

$$f_T = 0.844 + 0.0756 (T_b(K)/273) \dots \dots \dots E.7$$

$$n = 0.105 (d/d_p)^{0.082} \dots \dots \dots E.8$$

$d_p = 0.7 \times 10^{-3}$ m ortalama yatak malzemesi çapı

$g = 9.81$ m/s²

$\rho_p = 2650$ kg/m³ yatak malzemesi

$d = 2 \times 10^{-2}$ myatak içine daldırılmış cismin çapı

$T_b = 860^\circ\text{C}$



$$\rho_g = 0.31 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda_g = 7.3 \times 10^{-2} \text{ W/m K} \quad \dots\dots 860^\circ\text{C için}$$

$$\mu = 0.045 \text{ centipoise}$$

$$\nu = \mu/\rho = 0.1447 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$$

Yukarıdaki değerler formüllerde yerine koyulursa 860°C 'da akışkan yatağa daldırılmış 2 cm çapındaki bir cisim için $Nu_{max} = 4.689$ olarak bulunur.

$Nu_{max} = (h_{max} d_p) / \lambda_g$ eşitliğindeki bilinmeyen h çekilerek $h = 489 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ olarak bulunur.

E.2.2 Kömür Taneciğinin Merkezindeki Sıcaklığın Belirli Bir Değere Gelmesi İçin Gereken Süre Hesabı

Örneğin: 920°C 'daki akışkan yatağa daldırılmış $d = 3.675 \text{ mm}$ çapındaki kömür taneciğinin merkezindeki sıcaklığın 600°C 'a gelmesi için gereken süre hesaplınsın:

E.2.1'de anlatılan yöntem ile yeni durum için h hesabı yapılır.

$$\lambda_g = 7.62 \times 10^{-2} \text{ W/mK} \quad \dots\dots 920^\circ\text{C}$$

$$\nu = 0.1589 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$T_b = 920^\circ\text{C}$$

$$d_p = 0.7 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$d = 3.675 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$\rho_p = 2650 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_g = 0.2958 \text{ kg/m}^3$$

Bu değerler E.2.1. deki formülde yerleştirilirse;

$$n = 0.120209$$

$$Ar = 1194$$

$$f_T = 1.1743$$

$$Nu_{max} = 6.3639$$

$$h = 693 \text{ W/m}^2 \text{ K} \text{ olarak bulunur.}$$

Prins (30) d/d_p oranı değiştikçe yatağa daldırılan cisme olan ısı transfer katsayısının değişeceğini belirtmektedir.

$$T_m = 600^\circ\text{C}$$

$$T_b = 920^\circ\text{C}$$

$$d = 3.675 \text{ mm} \dots r = 1.8375 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$\lambda = 0.25 \text{ W/mK}$$

$$\alpha = 1.5 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\theta = (T - T_b) / (T_m - T_b) = (600 - 920) / (25 - 920) = 0.36$$

$$Bi = hr / \lambda = 5.09$$

$$1/Bi = 0.196$$

$\theta = 0.36$ ve $1/Bi = 0.196$ ile Heisler (64) diyagramlarından

$Fo = 0.275$ bulunur.

$Fo = \alpha t / r^2$ olduğundan $t = 6.19$ saniye olarak bulunur.

E.2.3 Prins' e (30) Göre Değişken h Kabulü Yapılarak n Sabitinin Bulunması

Değişik kömür tanecik çapları için örneğin 860°C 'da E.2.1'deki yöntemle göre ısı transfer katsayısı ayrı ayrı hesaplanır. Herbir tanecik çapı için bulunan h değerleriyle o taneciğe ait Bi sayısı hesaplanır ve E.2.2.'deki yöntemle göre örneğin $\theta = 0.1$ için Fo ve t bulunur. Her bir tanecik çapı ve bulunan t süreleri grafiklenirse, $t = ad^n$ şeklindeki ifadenin n katsayısı eğimden bulunur.

Bu çalışmada kullanılan değişik tanecik çapları için 860°C 'da yapılan hesaplamalar ile $n = 1.75$ olarak bulunmuştur.

Eğer $h = 475 \text{ W/m}^2\text{K}$ olarak sabit alınırsa, benzer yöntemle $n = 1.62$ olarak bulunur.

E.3. Uçucu Madde Kaybı Hesabı

E.3.1. Isı Transferi Hesap Yöntemleriyle Kömür Kütlesindeki Kayıpların Hesaplanması

Küresel kömür taneciğini 6 tabakaya ayırılım ve her bir tabakanın dış yüzeyinin merkeze uzaklığının tanecik çapına oranı sırasıyla 1, 0.9, 0.8, 0.6, 0.4 ve 0.2 olsun.

Her bir tabakanın hacmi:

$$V_1 = (4/3)\pi(0.2 r)^3$$

$$V_2 = (4/3)\pi((0.4 r)^3 - (0.2 r)^3)$$

⋮

V_6

$$V_1 + V_2 + \dots + V_6 = V$$

Her bir tabakanın yüzey sıcaklıkları ortalaması o tabaka için ortalama sıcaklık kabul edilsin. Örneğin $t=5$ saniye sonra tanecik içindeki tabakaların sıcaklıkları bulunmak istensin: $t = 5$ s değeri F_0 formülünde yerine koyulursa F_0 bulunur; Bi ve F_0 yardımıyla θ Heisler (64) diyagramlarından bulunur. $\theta = (T_m - T_b)/(T_0 - T_b)$ eşitliğinden merkez sıcaklığı T_m hesaplanır. Örneğin $T_m = 400^\circ\text{C}$ bulunur. θ/θ_m ile $1/Bi$ arasındaki ilişkiyi veren diyagramların kullanılmasıyla kürenin 6 tabakasının yüzey sıcaklıkları hesaplanır.

Örneğin:

$$r_2/r = 0.9 \text{ ise } \theta/\theta_m = 0.4 \dots\dots Bi = 3.5$$

$$\theta/\theta_m = (T - T_b)/(T_m - T_b)$$

$$0.4 = (T - 860)/(400 - 860)$$

$T = 676^\circ\text{C}$ yüzey sıcaklığı dıştan içeriye doğru olan ikinci tabaka için bulunur.

Her bir tabakanın yüzey sıcaklıkları bulunduktan sonra yüzey sıcaklık ortalamaları o tabaka için ortalama sıcaklık kabul edilir ve bu sıcaklıkta kömürden çıkan uçucu madde miktarı Tablo 5.3 ve 5.5 yardımıyla bulunarak her bir tabakanın hacimsel oranıyla çarpıldıktan sonra toplanarak 5 saniyenin sonunda olacak uçucu madde kaybı hesaplanır.

LİTERATÖR

- 1) HAS, F., EYYÜBOĞLU, T., "Türkiye'de Kömür Rezervleri ve Üretimi", SEGEM, Ankara, 1983.
- 2) VURAL, H., URKAN, M.K., ARIKOL, M., "Akışkan Yataklarda Yakma Teknolojisini Uygularken", Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, Cilt 9, Sayı 1, 1986.
- 3) URKAN, M.K., ARIKOL, M., "Correlations for the Heating Value of Turkish Coals", FUEL, Vol 68, pp 2x527-530, April 1989.
- 4) AKÇURA, F., GERGER, M., "Başlıca Türk Kömürlerinin Özellikleri", MTA yayını, Ankara, 1982.
- 5) KALAFATÇIOĞLU, A., "Türkiye Kömür Envanteri", MTA yayını, No 171, Ankara, 1978.
- 6) "Türkiye 4. Enerji Kongresi, Dünya Enerji Konferansı Türk Milli Komitesi", İzmir, 1986.
- 7) Kural, O. "Kömür Kimyası ve Teknolojisi", 1.Baskı, 1978.
- 8) ATAKÜL, H., "Çan Bölgesi Linyitlerinin Akışkan Yatak Sürecindeki Davranımı", Doktora Tezi, İTÜ, 1985.
- 9) GÜNER, H., "Bazı Türk Linyitlerinin Küllerinin Ergime Sıcaklıkları ile Bileşimleri Arasındaki İlişkinin Araştırılması", Master Tezi, İTÜ, Ocak 1990.
- 10) EKİNCİ, E., ATAKÜL, H., ÖNER, T., TOLAY, M., "Enerji Girdisi Olarak Türk Linyitlerinin Çevre Kirlenme Özellikleri", Hava Kirliliği Sempozyumu, İstanbul, 14-15 Mart 1985.
- 11) ARISOY, A., YETİŞEN, M.H., "Kömürün Yakılması", (Kömür Kitabı 2.Baskı, ed: Kural, O.) Baskıda, 1990.
- 12) KUNII, D., LEVENSPIEL, O., "Fluidization Engineering", Krieger Publ. Co., New York, 1977.

- 13) HOWARD, J.R., "Fluidized Beds Combustion and Applications", Applied Science Pub. London, 1983.
- 14) DAVIDSON, J.R., HARRISON, D., "Fluidization", Academic Press, London, 1983.
- 15) ATAKAN, S., "Düşük Kalorili Yakıtlar ve Yakma Teknolojileri", TÜBİTAK Yayını, Gebze, 1987.
- 16) AVEDESİAN, M.M., DAVIDSON, J.F., "Combustion of Carbon Particles in a Fluidized Bed", Trans. Instn. Chem. Engrs, Vol 51, 1973.
- 17) AĞABAY, M., "Tipik Türk Linyitlerinin Akışkan Yataklı Yakıcıda Yakılmasıyla Oluşan SO₂'nin Tutulması", Master Tezi, İTÜ, 1987.
- 18) BOTTERIL, J.S.M., "Fluidized Bed Heat Transfer", Academic Press, London, 1983.
- 19) URKAN, M.K., ARIKOL, M., VURAL, H., "Akışkan Yatakta Uçucu Madde Yanma Davranışının İncelenmesi", 5. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, Taşkışla-İstanbul, 18-20 Eylül 1985.
- 20) URKAN, M.K., HEPERKAN, H., KINAYIĞİT, G., "Düşük Kaliteli Türk Linyitlerinin Akışkan Yataklı Sistemlerde Yakılarak Değerlendirilmesi", 4. Türkiye Enerji Kongresi, Özel Oturum Tebliği, Sayfa 247-261, İzmir, 1986.
- 21) URKAN, M.K., BİLGE, D., ARIKOL, M., HEPERKAN, H., "Devolatilization of Some Turkish Lignites in a Fluidized Bed", Int. Conf. on Coal Science, The Netherlands, 20-30 Oct. 1987.
- 22) BASU, P. (ed.), "Circulating Fluidized Bed Technology, Pergamon Press, 1985.
- 23) Van KOPPEN, C.W.S., "Pressurized Fluidized Bed Combustion To-Day an Introduction", Colloquim on PFBC-Delft, April 1983.
- 24) ANTHONY, D.B., HOWARD, J.B., "Coal Devolatilization and Hydrogasification", AIChEJ, Vol 22, No 4, 1976.

- 25) ANDREI, M.A., SAROFIM, A.F., BEER, J.M., "Time-Resolved Burnout of Coal Particles in a Fluidized Bed", Combustion and Flame, Vol 61, pp 17-27, 1985.
- 26) SATIO, M., SADAKATA, M., SATO, M., SAKAI, T., "Devolatilization Characteristics of Single Coal Particles for Combustion in Air and Pirolysis in Nitrogen", FUEL, Vol 66, 1987.
- 27) BERKOWITZ, M., "An Introduction to Coal Technology" Academic Press, 1979.
- 28) STUBINGTON, J.F., SUMARYONO, "Release of Volatiles from Large Coal Particles in a Hot Fluidized Bed", FUEL, Vol 63, 1984.
- 29) BILGE, D., "Akışkan Yatakta Uçucu Madde Yanma Davranışının incelenmesi", Doktora Tezi, Yıldız Üniversitesi, İstanbul, 1988.
- 30) PRINS, W., "Fluidized Bed Combustion of a Single Carbon Particle", Doktora Tezi, Enschede, The Netherlands, 1987.
- 31) AGARWAL, P.K., GENETTI, W.E., LEE, Y.Y., "Model for Devolatilization of Coal Particles in Fluidized Beds", FUEL, Vol 63, pp 1157-1165, Aug. 1984.
- 32) RAGLAND, K.W., YANG, J.T., "Combustion of Milimeter Sized Particles in Convective Flow", Combustion and Flame, Vol 60, pp 285-297, 1985.
- 33) AGARWAL, P.K., GENETTI, W.E., LEE, Y.Y., "Devolatilization of Large Coal Particles in Fluidized Beds", FUEL, Vol 63, pp 1748-1752, Dec. 1984.
- 34) ANTHONY, D.B., HOWARD, J.B., HOTTEL, H.C., MEISSNER, H.P., 15 th Symposium (Int.) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1975.

- 35) AGARWAL, P.K., "A Single Particle Model for Evolution and Combustion of Coal Volatiles", FUEL, Vol 65, pp 803-810, 1986.
- 36) EKİNCİ, E., TOLAY M., KADIOĞLU, E., "Akışkan Yataklarda Uçucu Madde Davranımı", 1. Yanma Sempozyumu, Uludağ Üniversitesi, Bursa, 1983.
- 37) FLINT, W.L., KARMI, E.R., "A Model to Predict the Devolatilisation of Coal in a Fluidized Bed: Comparison of Theoretical Predictions with Experimental Results", The Institute of Energy, 3rd Int. Fluidized Conference, Oct. 1984.
- 38) PILLAI, K.K., "The Influence of Coal Type on Devolatilization and Combustion in Fluidized Beds", Journal of the Institute of Energy, pp 142-150, September 1981.
- 39) LA NAUZE, R.D., "Coal Devolatilization in Fluidized-Bed Combustors", FUEL, Vol 61, pp 771-774, 1982.
- 40) Morris, J.R., Kearins, D.L., FUEL, Vol. 58, 1979.
- 41) PARK, D., LEVENSPIEL, O., FITZGERALD, T.J., "Plume Model for Large Particle Fluidized Bed Combustors", FUEL, Vol 60, pp 295-304, April 1981.
- 42) YATES, J.G., MACGILLIVRAY, M., CHEESMAN, D.J., "Coal Devolatilisation in Fluidised Bed Combustors", Chem. Eng.Sci., Vol 35, pp 2360-2361, 1980.
- 43) STUBINGTON, J.F., "The Role of Coal Volatiles in Fluidized Bed Combustion", Journal of the Institute of Energy, pp 191-195, Dec. 1980.
- 44) HIGHLEY J., MERRICK, D., "The Effect of the Spacing Between Solid Feed Points on the Performance of a Large Fluidized-Bed Reactor", AIChE Symposium Series, No 116, Vol.67, pp 219-228, 1971.

- 45) PILLAI, K.K., "Devolatilization and Combustion of Large Coal Particles in a Fluidized Bed", Journal of the Institute of Energy. pp 3-7, March 1985.
- 46) PILLAI, K.K., "A Schematic for Coal Devolatilization in Fluidized Bed Combustors", Journal of the Institute of Energy, pp 132-133, Sept. 1982.
- 47) PILLAI, K.K., "Premixed Gas Combustion in Shallow Fluidized Beds", Journal of the Institute of Fuel, pp 200-205, Dec. 1976.
- 48) PARK, D., LEVENSPIEL, O., FITZGERALD, T.J., "A Comparison of the Plume Model with Currently Used Models for Atmospheric Fluidized Bed Combustion", Chem. Eng. Sci., Vol 35, pp 295-301, 1980.
- 49) HEPERKAN, H., URKAN, M.K., BİLGE, D., "Akışkan Yatak Sistemleri", Makina ve Mühendis Dergisi, Cilt 27, Sayı 320, Sayfa 3-11, Eylül 1986.
- 50) BİLGE, D., ARIKOL, M., URKAN, M.K., "Akışkan Yatakta Uçucu Madde Davranımının İncelenmesi", 2. Yanma Sempozyumu, İTÜ-Maçka, 18-20 Eylül 1989.
- 51) YALKIN, G., "Akışkan Yatakta Yanma Sonucu Uçucu Madde Davranımı", Master Tezi, İTÜ, 1985.
- 52) MADRALI, E.C., "Akışkan Yataklarda Yanmanın İlk Anlarında Ayrışma Eğilimi ve Kömür Yapısındaki Değişimler" Master Tezi, İTÜ, 1989.
- 53) SUNDBACK, C.A., "Fragmentation Behavior of Single Coal Particles in a Fluidized Bed", PhD thesis, Dept. of Chem. Eng., Massachusetts Inst. of Tech., 1984.
- 54) SALAM, T.F., NADEEM, S.A., OMAR, K.I., GIBBS, B.M., "Combustion Characteristics of Bangladeshi Peat in a Fluidized Bed Combustor", 4 th Int. Fluidized Combustion Conference, The Institute of Energy, London, 1988.

- 55) BORGHI, G., SAROFIM, A.F., BEER, J.M., "A Model of Coal Devolatilization and Combustion in Fluidized Beds", Combustion and Flame, Vol 61, pp 1-16, 1985.
- 56) SAITO, M., SADAKATA, M., SATO, M., SAKAI, T., "Devolatilization Characteristics of Single Coal Particles for Combustion in Air and Pyrolysis in Nitrogen, FUEL, Vol 66, pp 717-721, May 1987.
- 57) FU, W., ZHANG, Y., HAN, H., DUAN, Y., "A Study on Devolatilization of Large Coal Particles" Combustion and Flame, Vol 70, pp 253-266, 1987.
- 58) BEER, J.M., "The Fluidised Combustion of Coal", Sixteenth Symp. (Int.) on Combustion, p.439, 1977.
- 59) RAGLAND, K.W., WEIS, C.A., "Combustion of Single Coal Particles in a Jet", Midwest Energy Conference, Chicago, Illinois, Nov. 1978.
- 60) CHAKRABORTY, R.K., HOWARD, J.R., "Burning Rates and Temperatures of Carbon Particles in a Shallow Fluidized-Bed Combustor", Journal of the Institute of FUEL, PP 220-224, Dec.1978.
- 61) SELÇUK, N., PEKYILMAZ, A., "Akışkan Yataklı Kömür Yakıcılarının Modellenmesi", Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, Cilt 5, Sayı 3, 1982.
- 62) ESSENHIGH, R.H., J.Eng. Power, 85, 183, 1963.
- 63) MERRICK, D., "Mathematical Models of the Thermal Decomposition of Coal ; Part 1, The Evolution of Volatile Matter." FUEL, Vol 62, 1983.
- 64) INCROPERA, F.P., De WITT, D.P., "Fundamentals of Heat Transfer", John Wiley and Sons Inc., 1981.



ÖZGEÇMİŞ

1981 yılında İTÜ Kimya Fakültes'inden mezun oldu. 1985 yılında aynı fakültede master eğitimini tamamladı. 1983-1984 yıllarında Delft Üniversitesi'nde akışkan yataklar üzerine araştırmada bulundu. 1985 yılında TÜBİTAK Makina ve Enerji Sistemleri Araştırma Bölümü'ne girdi ve halen bu bölümde çalışmaktadır.



