

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DÜŞÜK KALİTELİ TEK KÖMÜR TANESİNİN BUHAR VE HAVA
İLE KURUTULMASININ DENEYSEL İNCELENMESİ VE
MODELLENMESİ**

Pınar CELEN

DOKTORA TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Enerji Programı

Danışman

Doç. Dr. Hasan Hüseyin ERDEM

Ekim, 2019

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DÜŞÜK KALİTELİ TEK KÖMÜR TANESİNİN BUHAR VE HAVA İLE
KURUTULMASININ DENEYSEL İNCELENMESİ VE MODELLENMESİ**

Pınar CELEN tarafından hazırlanan tez çalışması çalışması 21.10.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Enerji Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Hasan Hüseyin ERDEM

Yıldız Teknik Üniversitesi

Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Hasan Hüseyin ERDEM, Danışman

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Sabiha YILDIZ, Üye

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. İsmail EKMEKÇİ, Üye

İstanbul Ticaret Üniversitesi

Prof. Dr. Osman ISIKAN, Üye

Marmara Üniversitesi

Doç. Dr. Burhanettin ÇETİN, Üye

Yıldız Teknik Üniversitesi

Danışmanım Doç. Dr. Hasan Hüseyin ERDEM sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Düşük Kaliteli Tek Kömür Tanesinin Buhar ve Hava ile Kurutulmasının Deneysel İncelenmesi ve Modellenmesi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Pınar CELEN

İmza

Bu alışma, Öğretim Üyesi Yetiştirme Programı (ÖYP) tarafından desteklenmiştir.

TEŞEKKÜR

Düşük kalorili linyitlerin kullanıldığı termik santrallerde linyitin nem içeriğinin yüksek olması değirmenlerden başlayarak çeşitli sorunlara yol açmaktadır. Linyitin yakılması için harcanacak enerjinin bir kısmı içindeki nemin buharlaştırılması için kullanılır bu da santralin veriminin düşmesine sebep olur.

Türkiye’deki linyit kaynaklarının daha verimli kullanılması için önemli bir kaynak olacağını düşündüğüm bu tez çalışması sırasında benden desteğini esirgemeyen, beni her zaman motive eden bilgisiyle ve öngörleriyle bana her zaman yol gösteren tez danışmanım Doç. Dr. Hasan Hüseyin ERDEM’ e çok teşekkür ederim. Değerli zamanını benim için harcayan, bilgisiyle bana her zaman yardımcı olan Prof. Dr. Sabiha YILDIZ’a gönülden teşekkür ederim. Tez izleme komitemde bulunan Prof. Dr. İsmail EKMEKÇİ’ ye ve tez jürimde yer alan Prof. Dr. Osman Isıkan ve Doç. Dr. Burhanettin ÇETİN’e katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Bana her zaman yardımcı olan, moral veren çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olan, beni destekleyen, bana inanan anneme, babama, kardeşlerime ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Hem fiziken hemde manevi olarak yanımda olan eşime, beni mutlu eden, güç veren ve motivasyonumda büyük payı bulunan canım kızıma teşekkür ederim.

Pınar CELEN

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	viii
KISALTMA LİSTESİ	x
ŞEKİL LİSTESİ	xi
TABLO LİSTESİ	xv
ÖZET	xvi
ABSTRACT	xviii
1 Giriş	1
1.1 Literatür Özeti	7
1.2 Tezin Amacı	25
1.3 Hipotez	29
2 Deney Düzenegi ve Numunenin Tanıtılması	31
2.1 Deney Düzenegi	31
2.1.1 Deneylerde Kullanılan Ölçü Aletleri ve Ekipmanlar	33
2.1.2 Deney Numunesinin Tanıtılması (Afşin-Elbistan Linyiti)	35
2.1.3 Deney Numunesinin Hazırlanması	35
3 Deneysel Çalışmalar ve Analizler	37
3.1 Kızgın Buharla Kurutma	38
3.1.1 Ön Isıtma ve Yoğuşma Periyodu	38
3.1.2 İlk Buharlaşma Periyodu	42
3.1.3 Sabit Hızda Kurutma Periyodu	43
3.2 Sıcak Hava İle Kurutma	47
3.2.1 Ön Isıtma Periyodu	47
3.2.2 Azalan Hızda Kuruma Periyodu	51
3.3 Kızgın Buharla Kurutma ve Sıcak Hava ile Kurutmanın Karşılaştırılması	54
4 Kömür Kurutmanın Matematik Modellemesi	58
4.1 Matematiksel Modelleme	62

4.1.1	Kızgın Buharla Kurutmanın Modellenmesi.....	62
4.1.2	Sıcak Hava İle Kurutmanın Modellenmesi	83
4.1.3	Kurutmada Hava ve Buharın Birlikte Kullanılması	94
5	Belirsizlik Analizi	98
5.1	Sıcaklık Ölçümünde Yapılan Hatalar	98
5.1.1	Merkez Sıcaklığının Ölçülmesinde Yapılabilecek Toplam Hata	98
5.1.2	Yüzey Sıcaklığının Ölçülmesinde Yapılabilecek Toplam Hata	99
5.2	Kütle Kayıplarının Ölçülmesinde Yapılabilecek Toplam Hata.....	99
6	Sonuç ve Öneriler	101
A	EES Kodları	105
	Kaynakça	113
	Tezden Üretilmiş Yayınlar	119

SİMGE LİSTESİ

A_p	Parçacık yüzey alanı (m^2)
$C_{p,w}$	Suyun özgül ısısı (kJ/kgK)
$C_{p,p}$	parçacık özgül ısısı (kJ/K)
C_c	Kömürün özgül ısısı (kJ/K)
D_{AB}	Kütle yayılım katsayısı (m^2/s)
D	Numune çapı (m)
h_{fg}	Buharlaştırma entalpisi (kJ/kg)
h_{fg}^*	Düzeltilmiş entalpi (kJ/kg)
h_{conv}	Taşıma ısı transfer katsayısı (W/mK)
h_{cond}	Yoğuşma ısı transfer katsayısı (W/mK)
h_{nc}	Doğal taşıma ısı transfer katsayısı (W/mK)
m_{evap}	Buharlaştırma kütlesi (kg)
M_{H_2O}	Suyun moleküler ağırlığı ($kg/kmol$)
m_{cond}	yoğuşan kütle (kg)
$\dot{m}_{cond}$	yoğuşma hızı (kg/s)
m_p	Zamanla değişen parçacık külesi (kg)
$m_{p,ini}$	Parçacık başlangıç kütlesi (kg)
m_{wd}	su damlacığı kütlesi (kg)
P_{atm}	Atmosfer basıncı (kPa)
$P_{sat}(T_p)$	Numune yüzey sıcaklığında suyun doyma basıncı (kPa)
R	Değişen numune yarıçapı (m)
R_0	Numune başlangıç yarıçapı (m)
R_u	Evrensel gaz sabiti ($J/kmol.K$)
R_{wd}	yoğuşmada oluşan damlacık yarıçapı (m)
t	Zaman (s)
T_{doy}	Akışkan doyma sıcaklığı ($^{\circ}C$)
T_p	Parçacık sıcaklığı ($^{\circ}C$)
T_g	Kurutma akışkanı sıcaklığı ($^{\circ}C$)
T_s	Numune yüzey sıcaklığı ($^{\circ}C$)
T_{∞}	Kurutma ortamı sıcaklığı ($^{\circ}C$)
V	Hız (m/s)
V_p	Numune hacmi (m^3)
$y_{A,L}$	Havadaki buhar basıncının ortam basıncına oranı (P_{buhar}/P)
$y_{A,0}$	Yüzeydeki buhar basıncının ortam basıncına oranı oranın (P_{buhar}/P)
X_{kb}	Numune kuru bazda nem içeriği ($kg su/kg$ kuru kömür)
$X_{kb,in}$	Numunenin başlangıçtaki nem içeriği ($kg su/kg$ kuru kömür)
X_{yb}	Numune yaş bazda nem içeriği ($kg su/kg$ kömür)
$X_{yb,ini}$	Numunenin başlangıçtaki nem içeriği ($kg su/kg$ kömür)
W_w	Kömürdeki nem kütlesi (kg)
W_c	Kömürdeki kuru madde kütlesi (kg)
W_p	Toplam parçacık kütlesi (kg)
$\dot{Q}_{yoğuşma}$	Yoğuşmadan kaynaklanan ısı transfer hızı (W)
$\dot{Q}_{taşıma}$	Taşıma ısı transfer hızı (W)
$\dot{Q}_{radyasyon}$	Radyasyondan kaynaklanan ısı transfer hızı (W)

ε	Yayıcılık
σ	Stefan-Boltzmann sabiti (W/m ² K)
ρ_w	Suyun yoğunluğu (kg/m ³)
ρ_p	Parçacık yoğunluğu (kg/m ³)
$\emptyset$	R/R ₀

KISALTMA LİSTESİ

EES	Engineering Equation Solver
Ja	Jacob sayısı
PLC	Programlanabilir Mantıksal Denetleyici
Pr	Prandtl sayısı
Ra	Rayleigh sayısı
s	Saniye
TKİ	Türkiye Kömür İşletmeleri

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	Kömürün yapısı [1]	3
Şekil 1.2	Katı bir maddenin kuruma periyotları a) Nem içeriğinin zamanla değişimi b) Kurutma hızının zamanla değişimi c) Kurutma hızı nem içeriği arasındaki ilişki [18].	5
Şekil 1.3	Zhang ve You deney düzeneği [32]	10
Şekil 2.1	Deney düzeneği resmi	31
Şekil 2.2	Deney düzeneği	32
Şekil 2.3	Yüzey ısı çiftleri	33
Şekil 2.4	Hassas terazi	33
Şekil 2.5	Fırın	34
Şekil 2.6	Veri toplama cihazı	34
Şekil 2.7	Isıtıcılar	35
Şekil 3.1	Kızgın buharla kurutma kuruma periyodları	38
Şekil 3.2	Ön ısıtma ve yoğunlaşma periyodu parametrelerinin çaplara göre değişimi	39
Şekil 3.3	Kızgın buharla kurutma ön ısıtma periyodunda numune yüzey sıcaklıklarının zamanla değişimi	40
Şekil 3.4	Kızgın buharla kurutma ön ısıtma periyodunda numune merkez sıcaklıklarının zamanla değişimi	41
Şekil 3.5	Kızgın buharla kurutma ön ısıtma periyodunda numune nem içeriğinin zamanla değişimi	41
Şekil 3.6	Kızgın buharla kurutma ön ısıtma periyodunda numune kurutma hızlarının zamanla değişimi	42
Şekil 3.7	İlk buharlaşma süresinin çaplara göre değişimi	43
Şekil 3.8	Linyit numunesinin görünümü (a) kurutulmadan önce (b) kurutulduktan sonra	44
Şekil 3.9	Linyit numunelerinin kızgın buhar ile kurutulması esnasında yüzey sıcaklıklarının zamanla değişimi	44
Şekil 3.10	Linyit numunelerinin kızgın buhar ile kurutulması esnasında merkez sıcaklıklarının zamanla değişimi	45
Şekil 3.11	Linyit numunelerinin kızgın buhar ile kurutulması esnasında kurutma hızının zamanla değişimi	46
Şekil 3.12	Linyit numunelerinin kızgın buhar ile kurutulması esnasında ön ısıtma periyodunda ıslak bazda nem içeriğinin zamanla değişimi	47
Şekil 3.13	Linyit numunelerinin sıcak hava ile kurutulması esnasında ön ısıtma periyodunda yüzey sıcaklıklarının zamanla değişimi	48
Şekil 3.14	Linyit numunelerinin sıcak hava ile kurutulması esnasında ön ısıtma periyodunda merkez sıcaklıklarının zamanla değişimi	49
Şekil 3.15	Linyit numunelerinin sıcak hava ile kurutulması esnasında ön ısıtma periyodunda kurutma hızının zamanla değişimi	50
Şekil 3.16	Linyit numunelerinin sıcak hava ile kurutulması esnasında ön ısıtma periyodunda ıslak bazda nem içeriğinin zamanla değişimi	50
Şekil 3.17	Linyit numunelerinin sıcak hava ile kurutulması esnasında azalan hızda kuruma periyodunda yüzey sıcaklıklarının zamanla değişimi	51
Şekil 3.18	Linyit numunelerinin sıcak hava ile kurutulması esnasında azalan hızda kuruma periyodunda merkez sıcaklıklarının zamanla değişimi	52

Şekil 3.19	Linyit numunelerinin sıcak hava ile kurutulması esnasında azalan hızda kurutma periyodunda kurutma hızının zamanla değişimi.....	53
Şekil 3.20	Linyit numunelerinin sıcak hava ile kurutulması esnasında azalan hızda kuruma periyodunda ıslak bazda nem içeriğinin zamanla değişimi	53
Şekil 3.21	Sıcak hava ve kızgın buhar ile kurutmada yüzey sıcaklıklarının zamanla değişimi	54
Şekil 3.22	Sıcak hava ve kızgın buhar ile kurutmada yüzey sıcaklıklarının farklı çaplar için ayrı ayrı zamanla değişimi	55
Şekil 3.23	Sıcak hava ve kızgın buhar ile kurutmada numunelerin ıslak bazda nem içeriğinin zamanla değişimi	56
Şekil 3.24	Sıcak hava ve kızgın buhar ile kurutmada numunelerin ıslak bazda nem içeriğinin farklı çaplar için ayrı ayrı zamanla değişimi.....	57
Şekil 4.1	Kiriyama vd. matematiksel modeli [69]	59
Şekil 4.2	Kızgın buharla kurutma yoğuşma periyodu	63
Şekil 4.3	20 mm çapındaki linyit numunelerinin kızgın buhar ile kurutulmasının ön ısıtma ve yoğuşma periyodunda deneysel ve model ile bulunan yüzey sıcaklığının zamanla değişimi	64
Şekil 4.4	30 mm çapındaki linyit numunelerinin kızgın buhar ile kurutulmasının ön ısıtma ve yoğuşma periyodunda deneysel ve model ile bulunan yüzey sıcaklığının zamanla değişimi	65
Şekil 4.5	40 mm çapındaki linyit numunelerinin kızgın buhar ile kurutulmasının ön ısıtma ve yoğuşma periyodunda deneysel ve model ile bulunan yüzey sıcaklığının zamanla değişimi	66
Şekil 4.6	50 mm çapındaki linyit numunelerinin kızgın buhar ile kurutulmasının ön ısıtma ve yoğuşma periyodunda deneysel ve model ile bulunan yüzey sıcaklığının zamanla değişimi	67
Şekil 4.7	Kızgın buharla kurutma ilk buharlaşma periyodu	68
Şekil 4.8	Bir linyit partikülünün yüzeyinde oluşmuş bir su damlası ve sıvı filmi için basit model bir model [38]	68
Şekil 4.9	Kızgın buharla kurutma ilk buharlaşma periyodu	70
Şekil 4.10	20 mm çapındaki numune için kızgın buharla sabit hızda kurutma periyodunda nem içeriğinin zamanla değişimi deneysel ve model ile bulunan değerlerin karşılaştırılması.....	72
Şekil 4.11	30 mm çapındaki numune için kızgın buharla sabit hızda kurutma periyodunda nem içeriğinin zamanla değişimi deneysel ve model ile bulunan değerlerin karşılaştırılması.....	72
Şekil 4.12	40 mm çapındaki numune için kızgın buharla sabit hızda kurutma periyodunda nem içeriğinin zamanla değişimi deneysel ve model ile bulunan değerlerin karşılaştırılması.....	73
Şekil 4.13	50 mm çapındaki numune için kızgın buharla sabit hızda kurutma periyodunda nem içeriğinin zamanla değişimi deneysel ve model ile bulunan değerlerin karşılaştırılması.....	73
Şekil 4.14	20 mm çapındaki numune için yüzey sıcaklığının zamanla değişimi	75
Şekil 4.15	20 mm çapındaki numune yüzey sıcaklığı deney ve model sonuçları karşılaştırılması.....	75
Şekil 4.16	20 mm çapındaki numune için nem oranının zamanla değişimi	76
Şekil 4.17	20 mm çapındaki numune nem oranı deney ve model sonuçları karşılaştırılması.....	76
Şekil 4.18	30 mm çapındaki numune için yüzey sıcaklığının zamanla değişimi	77

Şekil 4.19	30 mm çapındaki numune yüzey sıcaklığı deney ve model sonuçları karşılaştırılması.....	77
Şekil 4.20	30 mm çapındaki numune için nem oranının zamanla değişimi	78
Şekil 4.21	30 mm çapındaki numune nem oranı deney ve model sonuçları karşılaştırılması.....	78
Şekil 4.22	40 mm çapındaki numune için yüzey sıcaklığının zamanla değişimi	79
Şekil 4.23	40 mm çapındaki numune nem oranı deney ve model sonuçları karşılaştırılması.....	79
Şekil 4.24	40 mm çapındaki numune için nem oranının zamanla değişimi	80
Şekil 4.25	40 mm çapındaki numune nem oranı deney ve model sonuçları karşılaştırılması.....	80
Şekil 4.26	50 mm çapındaki numune için yüzey sıcaklığının zamanla değişimi	81
Şekil 4.27	50 mm çapındaki numune yüzey sıcaklığı deney ve model sonuçları karşılaştırılması.....	81
Şekil 4.28	50 mm çapındaki numune için nem oranının zamanla değişimi	82
Şekil 4.29	50 mm çapındaki numune nem oranı deney ve model sonuçları karşılaştırılması.....	82
Şekil 4.30	Numune çaplarına göre ön ısıtma periyodu süresinin değişimi	83
Şekil 4.31	Sıcak hava ile kurutma.....	84
Şekil 4.32	20 mm çapındaki linyit numunelerinin sıcak hava ile kurutulmasının azalan hız periyodunda deneysel ve model ile bulunan numune kütlesinin zamanla değişimi.....	86
Şekil 4.33	20 mm çapındaki numune nem içeriği deney ve model sonuçları karşılaştırılması.....	86
Şekil 4.34	20 mm çapındaki linyit numunelerinin sıcak hava ile kurutulmasının azalan hız periyodunda deneysel ve model ile bulunan numune yüzey sıcaklığının zamanla değişimi.....	87
Şekil 4.35	20 mm çapındaki numune yüzey sıcaklığı deney ve model sonuçları ..	87
Şekil 4.36	30 mm çapındaki linyit numunelerinin sıcak hava ile kurutulmasının azalan hız periyodunda deneysel ve model ile bulunan numune kütlesinin zamanla değişimi.....	88
Şekil 4.37	30 mm çapındaki numune yüzey sıcaklığı deney ve model sonuçları karşılaştırılması.....	88
Şekil 4.38	30 mm çapındaki linyit numunelerinin sıcak hava ile kurutulmasının azalan hız periyodunda deneysel ve model ile bulunan numune yüzey sıcaklığının zamanla değişimi.....	89
Şekil 4.39	30 mm çapındaki numune nem içeriği deney ve model sonuçları	89
Şekil 4.40	40 mm çapındaki linyit numunelerinin sıcak hava ile kurutulmasının azalan hız periyodunda deneysel ve model ile bulunan numune kütlesinin zamanla değişimi.....	90
Şekil 4.41	40 mm çapındaki numune nem içeriği deney ve model sonuçları karşılaştırılması.....	91
Şekil 4.42	40 mm çapındaki linyit numunelerinin sıcak hava ile kurutulmasının azalan hız periyodunda deneysel ve model ile bulunan numune yüzey sıcaklığının zamanla değişimi.....	91
Şekil 4.43	40 mm çapındaki numune yüzey sıcaklığı deney ve model sonuçları karşılaştırılması.....	92

Şekil 4.44	50 mm çapındaki linyit numunelerinin sıcak hava ile kurutulmasının azalan hız periyodunda deneysel ve model ile bulunan numune kütlesinin zamanla değişimi.....	92
Şekil 4.45	50 mm çapındaki numune nem oranı deney ve model sonuçları karşılaştırılması.....	93
Şekil 4.46	50 mm çapındaki linyit numunelerinin sıcak hava ile kurutulmasının azalan hız periyodunda deneysel ve model ile bulunan numune yüzey sıcaklığının zamanla değişimi.....	93
Şekil 4.47	50 mm çapındaki numune yüzey sıcaklığı deney ve model sonuçları karşılaştırılması.....	94
Şekil 4.48	Farklı kurutma şekilleri için 20 mm çapındaki numunenin nem oranının zamanla değişimi (buhar, hava, buhar+hava)	95
Şekil 4.49	Farklı kurutma şekilleri için 30 mm çapındaki numunenin nem oranının zamanla değişimi (buhar, hava, buhar+hava)	96
Şekil 4.50	Farklı kurutma şekilleri için 40 mm çapındaki numunenin nem oranının zamanla değişimi (buhar, hava, buhar+hava)	96
Şekil 4.51	Farklı kurutma şekilleri için 50 mm çapındaki numunenin nem oranının zamanla değişimi (buhar, hava, buhar+hava)	97

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1 Kömürdeki nem ve uzaklaştırma yöntemleri [17].....	4
Tablo 1.2 Literatürde bulunan kurutma ile ilgili çalışmalar	19
Tablo 2.1 Afşin- Elbistan linyit numunesinin kısa analiz sonuçları [77].....	36
Tablo 4.1 Model ile hesaplamada yapılan kabuller	62
Tablo 4.2 Ön ısıtma, yoğunlaşma ve ilk buharlaşma periyotlarının deneysel verilerinin model ile karşılaştırılması	69
Tablo 5.1 Deneylere ait belirsizlik analizi sonuçları	100

Düşük Kaliteli Tek Kömür Tanesinin Buhar ve Hava ile Kurutulmasının Deneysel İncelenmesi Ve Modellenmesi

Pınar CELEN

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Doç. Dr. Hasan Hüseyin ERDEM

Türkiye'deki kömür kaynaklarının büyük kısmını düşük kalorili ve yüksek nem içeriğine sahip linyitler oluşturmaktadır. Özellikle termik santrallerde kullanılan bu linyitlerin kurutulması, hem santralde oluşan sorunların çözülmesi hem de santralde enerji veriminin artırılması açısından büyük öneme sahiptir. Ancak kurutma tekniğinin ve kurutucu akışkanın doğru belirlenmesi durumunda beklenen bu faydalar elde edilebilecektir. Ayrıca kurutmaya etki eden tane boyutunun santraldeki sorunların çözümüne yardımcı olacak şekilde seçilmesi gerekmektedir. Bu nedenle uygun tane boyutlarında ve farklı kurutma ortamlarında düşük kaliteli enerji ile kömürün kurutulmasının modellenmesi doğru sistem tasarımı, ekonomik kurutma ve sistemin entegrasyonu için gereklidir. Bu tez çalışması kapsamında iki farklı kurutma ortamında linyit kurutma deneyleri yapılmıştır. 20 mm, 30 mm, 40 mm ve 50 mm çapındaki küresel numuneler alçak basınçlı kızgın buhar ve sıcak hava ile kurutulmuştur. Yüzey sıcaklığı, numune kütlesi ve kurutma hızının zamanla değişimleri göz önüne alınarak kurutma işlemleri periyotlara ayrılmıştır. Kurutma süresinin belirlenmesi için önemli olan ilk kurutma periyotları üzerinde durularak çapa göre değişimleri incelenmiştir. Hem sıcak hava ile kurutmada hem de kızgın

buharla kurutmada küçük çaplı numunelerde kurutma hızının daha yüksek olduğu görülmüştür. Ön ısıtma, yoğunlaşma ve ilk buharlaşma periyotlarında kurutma hızının kızgın buharla kurutmada, sonraki periyotlarda ise sıcak hava ile kurutmada daha yüksek olduğu görülmüştür. Linyitlerin kurutma esnasında her periyot için ayrı ayrı anlık sıcaklık ve nem değerlerinin hesaplanabileceği matematiksel modeller oluşturulmuştur. Bulunan matematiksel model deneysel datalarla karşılaştırılıp doğrulanmıştır. Yapılan bu çalışma kurutma ortamlarının kurutma hızı, sıcaklık dağılımı ve kurutma periyotları arasındaki farkları net olarak ortaya koymuştur. Herbir akışkan için herbir periyodun modellerinin elde edilmesi kurutma sistemlerinin tasarlanmasında büyük fayda sağlayacaktır. Santrallerde değirmen öncesinde kömür kurutma sisteminin entegrasyonun önünü açacaktır.

Anahtar Kelimeler: Kömür, kurutma, ısı ve kütle transferi, linyit

Experimental Investigation and Modelling of Single Particle of Low Rank Coal Dried in Superheated Steam and Hot Air

Pınar CELEN

Department of Mechanical Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Hasan Hüseyin ERDEM

Most of the coal in Turkey have low calorific value and high moisture content. Especially drying of these lignites used in thermal power plants is of great importance both in terms of problems in the power plant and in terms of energy efficiency of the power plant. If the drying technique and the drying fluid are correctly determined, these expected benefits can be achieved. In addition, the particle size affecting the drying should be selected to help solve problems in the plant. Therefore, it is necessary to model the drying of coal with low quality energy in the appropriate particle sizes and different drying environments for the correct system design, economical drying and entaration of the system. In this thesis, lignite drying experiments were carried out in two different drying environments. Spherical samples of 20 mm, 30 mm, 40 mm and 50 mm diameter were dried with low pressure superheated steam and hot air. Considering the changes in surface temperature, sample mass and drying rate over time, drying processes are divided

into periods. The first drying periods, which are important for determining the drying time, were examined with respect to the changes in diameter.

Both the hot air drying and superheated steam drying showed higher drying speed in the smaller samples. Both hot air drying and hot steam drying have shown a higher drying rate in small-diameter samples. In preheating, condensation and first evaporation periods, the drying rate was higher in superheated steam drying and in the following periods it was higher in hot air drying. Mathematical models have been developed in which the instantaneous temperature and humidity values of lignites can be calculated separately for each period during drying. The mathematical model was compared with the experimental data and verified. In this study, the effects of drying environments on drying speed, temperature distribution and drying periods are observed. Obtaining models of each period for each fluid will be of great benefit in designing drying systems. It will pave the way for the integration of coal drying system before the mill in the plants.

Keywords: Coal, drying, heat and mass transfer, lignite

Düşük kaliteli kömürler tüm dünyadaki kömür rezervlerinin yaklaşık %45'lik kısmını oluşturmaktadırlar [1]. Kömür madeninin önümüzdeki yıllarda daha yoğun şekilde çıkarılacağı ve 2100 yılına kadar linyit ve antrasitin ana enerji tedarikçileri olacağı öngörülmektedir [2]. Bunun başlıca sebebi elektriğe olan ihtiyacın artmasıdır. Elektrik üretim kaynaklarının çeşitleri ve kullanımı her geçen yıl artsa da, kömürün ucuz ve bol bulunan bir kaynak olması kömüre olan talebi devam ettirmektedir [3].

Günümüzde elektrik piyasasının liberalleşmesi ile elektrik ticaretindeki rekabet artmıştır. Bu rekabet termik santrallerde yakıt masraflarını azaltmak amacı ile termik verimin yükseltilmesi seçeneklerinin araştırılmasına neden olmuştur. Kömürün içerdiği nem santral verimini olumsuz yönde etkileyen unsurlardan biridir [4]. Santrallerde kullanılan düşük kaliteli kömürün içindeki nem içeriğinin artması, kömürü taşıma ve depolama sistemlerinde tıkanmalara, sıvanmalara, kazan yanma odasında sıcaklık düşmesine, baca gazının sıcaklığının ve debisinin değişmesine yol açmaktadır, bunun sonucunda elektrofiltre ve baca gazı desülfürizasyon tesislerinin verimi değişmektedir [5].

Enerji verimliliği açısından da, uygun maliyetli ve güvenli bir kurutma işlemi, genel verimin artmasına neden olacaktır. Düşük maliyet ve enerji tüketimi ile güvenli kömür kurutma, düşük kaliteli kömürlerin kalitesini arttırmanın en iyi yoludur [3]. Düşük kaliteli kömür yakan santrallerde kömür neminin santralden atılan enerji ile düşürülmesinin termik verimi arttıracığı belirlenmiştir [1], [6], [7]. Çünkü kömürdeki nemin fazla olması sebebiyle bacadan atılan enerji kayıpları armaktadır. Bu nedenle kömürün yüksek nemle birlikte yakılması hem düşük verimlilik hemde daha fazla karbon emisyonu açığa çıkmasına sebep olur[8]. Bunun nedeni ise yanma işlemi esnasında ısının yaklaşık %20-25'i kömürdeki nemin buharlaştırılmasında kullanılarak boşa harcanmasıdır [9].

Pülverize kömür yakan santrallerde genellikle değirmende uygulanan bir  n kurutma işlemi mevcuttur. Bu sistemde kömür kazana ulaşmadan önce değirmende, kazan içerisinden emilen sıcak yanma gazı vasıtasıyla kömür içindeki nem buharlaştırılarak kazandaki yanmanın iyileştirilmesi amaçlanır. Fakat bu sistemde kömürün nemi belirli bir değerin üzerinde olduğunda nem yeterince alınamaz ve yapılmak istenen pulverizasyon işlem tam olarak gerçekleşmez. Bundan dolayı yüksek nem içeren kömür yakan santrallerde değirmenden önce de düşük kalitedeki atılan enerjiler ile bir  n kurutma işlemi yapılması uygun olacaktır [4]. Mevcut teknolojilerde uygulanan kazandan alınan sıcak gazlar ile değirmende kurutma işleminde kömürden buharlaşan su tekrar kazana girdiği için termik verim düşmektedir. Bu nedenle termik verimi artıracak şekilde yapılacak kömür kurutma mutlaka santralden atılan düşük kaliteli enerji ile yapılmalı ve oluşan su buharı kazana girmeden atılmalıdır. Kurutma işleminin düşük kalitedeki atılan enerji ile yapılması gerekliliği araştırmacıları düşük sıcaklıktaki sıcak hava ve düşük basınçlı kızgın buhar ile kurutma yapmaya yönlendirmiştir.

Sadece termik santrallerde değil tüm linyit uygulamalarında, bir ön işleme adımı olarak kurutma gereklidir[1]. Kömür taşıma işleminin önce linyitin kurutulması, taşıma maliyetlerinde büyük tasarruflara neden olabilir [10]. Örneğin, Lucarelli bir kömür üreticisinin, linyiti % 35'ten% 25'e kadar nem içeriğine kadar kuruttuğunda depolama, taşıma ve nakliye maliyetlerinde 0.19 \$/GJ enerji tasarrufu sağlayabileceğini, bununla birlikte lojistik maliyetlerinde tasarruf sağlayabileceğini bildirmiştir [11].

Düşük kaliteli kömürlerin kurutulması işleminin daha bilinçli bir şekilde yapılabilmesi için öncelikle kömürün yapısı bilinmelidir. Düşük kaliteli kömür düşük dereceli yakıt sınıfına girer ve düşük kalorifik değer, yüksek su içeriği ve düşük sülfür içeriğine sahiptir. Düşük kaliteli kömürün siyah kömüre göre önemli dezavantajları olmasına rağmen düşük maden maliyeti, yüksek reaktivite, yüksek miktarda uçucu madde içermesi gibi bazı avantajları da mevcuttur[12].

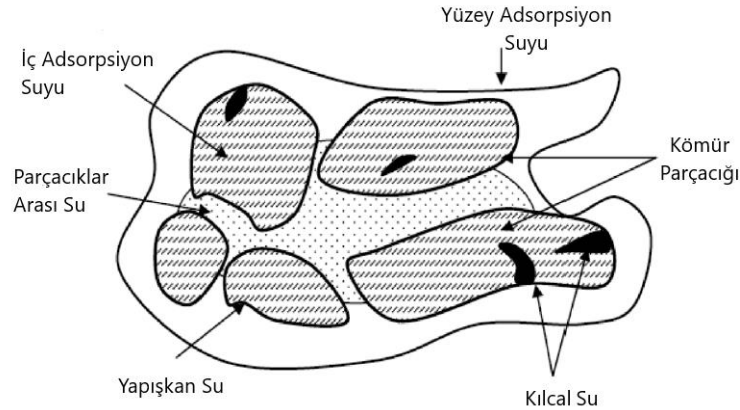
Düşük kaliteli kömürün yapısını ağırlıklı olarak mezopor ve makroporlar oluşturmaktadır ve mezoporlar makroporlardan daha fazladır [13]. Ayrıca düşük kaliteli kömür içinde farklı formlarda su bulunduğu, kömür kurutulduğunda fiziksel ve kimyasal değişime uğradığı, kahverengi kömürün jel benzeri yapısının nem

kaybından dolayı büzüldüğü, kömür içindeki su uzaklaştırılırken gözenek çökmesi sebebiyle makropor ve mezopor hacminde düşüş olduğu gözlemlenmiştir [14].

Buna ek olarak, düşük kaliteli kömürler çok sayıda oksijen fonksiyonel gruplara sahiptirler ve bu sebeple ıslak bazda %30-65 kadar yüksek oranda su içerirler [15], [16]. Kömürdeki su içeriği kömürleşme süresince azalır. Bunun sebebi ise polar işlevsel grupların özellikle hidroksil grupların ortadan kalkmasıdır.

Su ve kömür etkileşimi çok karmaşıktır ve su kömür içerisinde çok çeşitli formlarda bulunur. Bu literatürde birçok kez incelenmiş ve yapılan çalışmalarda çeşitli sınıflandırmalar ortaya çıkmıştır. Genel olarak dondurulabilen ve dondurulamayan su, serbest su, yüzey suyu, yığın su, kılcal su, ayrılamayan (iç) su, hidroskopik su, bağlı su ve bünye suyu gibi tanımlamalar kullanılmıştır [9], [14].

Şekil 1.1 'de kömür içerisindeki nem çeşitleri görülmektedir. Burada incelenen kömür yapısı ele alındığında iç adsorpsiyon suyu, yüzey adsorpsiyon suyu, kılcal su, parçacıklar arası su, yapışkan su olmak üzere 5 farklı nem türü tanımlanmıştır [1], [17] ise çalışmalarında kömürdeki bu nem içeriklerini incelemiştir, her birisinin bulunduğu yeri ve uzaklaştırma yöntemini açıklamışlardır [14], [17].



Şekil 1.1 Kömürün yapısı [1]

Tablo 1.1 Kömürdeki nem ve uzaklaştırma yöntemleri [17]

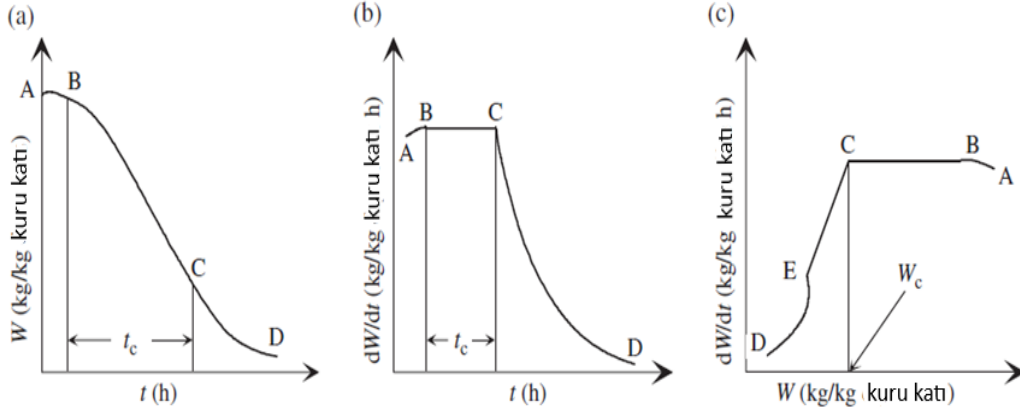
Kategori	Bulunduğu Yer	Genel İsmi	Uzaklaştırma Yöntemi	
İç adsorpsiyon suyu	Mikrogözenekler ve mikrokılcallar	Bünye nemi	Termal	veya kimyasal
Yüzey adsorpsiyon suyu	Parçacık yüzeyi	Bünye nemi	Termal	veya kimyasal
Kılcal su	Kömür parçacığındaki kılcallar	Bünye nemi	Termal	veya kimyasal
Parçacıklar arası su	İki veya daha fazla parçacık arasındaki çatlaklar	Yüzey nemi	Mekanik	veya termal
Yapışkan su	Birbirine bağlı veya birbirinden ayrı parçacık yüzeylerindeki sıvı filmi	Yüzey nemi	Mekanik	veya termal

Kömürde bulunan nem yukarıda anlatılan çalışmalarda olduğu gibi birçok çalışmada farklı özellikleri kıstas alınarak kategorilere ayrılmıştır.

Kurutma Periyotları

Katıların kuruma karakteristiği, nem içeriğinin ya da kurutma hızının zamana bağlı değişimine göre belirlenir. Kurutma hızı ise birim zamanda nem miktarındaki değişimdir.

Kömür kurutma çalışmalarında yukarıda tanımlanan kurutma karakteristiğine bağlı olarak 3 ana periyot mevcuttur. Şekil 1.2’de katı bir maddenin kurutulmasında nem içeriğinin zamanla, kurutma hızının zamanla ve kurutma hızının nem içeriği ile değişimlerinde bu periyotları şematik olarak göstermişlerdir. Bunlar ısınma periyodu (A-B), sabit hızda kuruma periyodu (B-C) ve azalan hızda kuruma periyodudur (C-D) [18].



Şekil 1.2 Katı bir maddenin kuruma periyotları a) Nem içeriğinin zamanla değişimi b) Kurutma hızının zamanla değişimi c) Kurutma hızı nem içeriği arasındaki ilişki [18].

- **Isınma periyodu (A-B):**

Isınma periyodu kızgın buhar ve sıcak hava kullanıldığında birbirinden farklıdır. Bu periyotta kızgın buhar kullanıldığında sırasıyla ön ısıtma, yoğuşma ve ilk buharlaşma evreleri görülür. Çevre sıcaklığındaki kömür numunesi, kızgın buharın akışkan olarak kullanıldığı kuruma ortamına girince, kızgın buhar, doyma sıcaklığının altında olan numune yüzeyiyle temas eder ve yoğuşma meydana gelir. Numune yüzeyinde yoğuşma suyuyla kaplı bir film tabakası oluşur. Bu sırada kömürün ağırlığı yüzeyinde bulunan yoğuşma suyu ve yüzeyden iç katmanlara difüze olan nem sebebiyle artarken, numune sıcaklığı da yükselir. Yoğuşma evresinin sonunda numune ağırlığı kurutma başlangıcındaki değerden daha büyük bir değere yükselerek maksimum değerine ulaşır.

Yüzey sıcaklığı doyma sıcaklığına ulaştığı için bundan sonraki periyod ilk buharlaşma [19] ya da onarım periyodu [20] olarak adlandırılır. Ön ısıtma periyodu esnasında küresel yüzey üzerinde biriken sıvı filmi buharlaşmaya başlar. Numune ağırlığı ilk andaki ağırlığına ulaştığında sıvı filmi tamamen buharlaşmış olup kömür numunesi kurumaya başlar.

Buharla kurutmanın ilk aşaması olan ön ısıtma, yüzeyde yoğuşma ve ilk buharlaşma periyodu genellikle kısadır ve kurutma deneylerinde her zaman gözlenemeyebilir. Ön ısıtma ve ilk buharlaşma periyotları arasında kurutma esnasında kızgın buharın numune yüzeyine teması sonucu yüzeyde yoğuşma meydana gelir. Yoğuşma

sırasında oluşan yoğuşum filmi zamanla kalınlaşır ve maksimum kalınlığa ulaştığında yüzeyden damlamalar meydana gelir. Deneyler sırasında damlamaların takip edilmesi ve büyüklüklerinin belirlenmesi bu periyodun kısa olmasından dolayı zordur. Deneysel ve nümerik hesaplamalar arasında bu nedenlerden dolayı farklılıklar oluşmaktadır. Bu sebeplerle ön ısıtma, yoğuşma ve ilk buharlaşma periyodları kurutma süresinin hesaplanmasında sıklıkla ihmal edilir [21].

Kurutma akışkanı olarak sıcak hava kullanıldığında ise kızgın buharla kurutmada görülen yoğuşma ve numune ağırlığının artması evreleri görülmez. Isınma periyodu süre olarak kızgın buhara göre daha uzundur. Isınma periyodunda numune ağırlığı değişmezken, numune yüzey sıcaklığı hızla yükselir. Kurutma odasındaki numunenin sıcak havadan transfer edilen ısıyla yüzeyi ısındıktan sonra merkezine doğru ısı iletimi gerçekleşir.

- **Sabit Hız Periyodu (B-C):**

Kızgın buhar ile kurutmada numune ağırlığı başlangıç ağırlığına ulaştığında sıvı filmi tamamen buharlaşmıştır ve bu noktadan itibaren kömür numunesi kurumaya başlar. Sabit hız periyodunun sonuna doğru, nemin katı maddenin içinden yüzeye kılcal kuvvetler tarafından taşınması gerekir ve kurutma hızı hala sabit olabilir [22]. Sıcak hava ile kurutmada ise ısınma periyodunda yüzey sıcaklığı aniden artan numune bu periyotta kurumaya başlar. Numune ağırlığı zamanla azalır.

Bu süreçte, kurutucu akışkan olarak kullanılan sıcak hava ya da kızgın buhardan numuneye ısı enerjisinin aktarılma hızı, buharlaşma hızına eşit olur.

- **Azalan hızla kuruma periyodu (C-D-E):**

Sabit hız periyodu sona erdikten sonra kuruma eğrisinin eğimi hızla azalmaktadır. Bu andan sonra kuruma hızının giderek azaldığı başka bir periyoda geçilmiştir. Azalan hızla kuruma periyodu olarak adlandırılan bu süreç, kızgın buharla ya da sıcak hava ile kurutma yapıldığında aynıdır. Sabit hız periyodunun sonuna doğru partikülün iç kısmından dışına difüze olan nem artık devamlı bir sıvı filmi oluşturamayacak duruma gelir. Nem içeriği azaldığından dolayı parçacık dış yüzeyinde kuru yerler oluşur. Bu esnada kuruma hızı azalmaya başlar ve bu süreçte azalan hızla kuruma periyodu adı verilir [23].

Nem Tanımları ve Tayini

Kömür nemi için standartlarda farklı nem tanımlamaları bulunmaktadır[24], [25]. Bu standartlarda kömürün orijinal halinde hava ortamına bırakılması ile dengeye ulaştığı neme kaba nem, yüzey nemi yada serbest nem tanımı yapılmıştır. Bu numuneyede havada kurumuş kömür adı verilir. Havada kurumuş kömürün 105°C sıcaklıkta oksijensiz ortamda sabit ağırlığa gelene kadar kaybettiği neme ise bünye nemi yada higroskopik nem adı verilir[26]. Yüzey nemi ve bünye neminin toplamına toplam nem yada orijinal nem denilmektedir. Ancak literatürde kömür kurutma çalışmalarında bu nem tanımlamalarına ilave olarak aşağıdaki tanımlamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Denge nemi: Kurutma işlemi esnasında numune ağırlığı artık değişmiyorsa kuruma işlemi denge konumuna gelmiş demektir. Bu sırada numunenin nem miktarına denge nemi adı verilir. Denge nemi genellikle deneysel olarak belirlenir [27].

Islak bazda nem içeriği: Kullanılan numunenin nem miktarının toplam madde miktarına oranıdır.

$$X_{yb} = \frac{W_w}{W_c + W_w} = \frac{W_w}{W_p} \quad (1.1)$$

Buradaki; X_{yb} ıslak nem içeriği, W_w su kütlesi ve W_p toplam partikül kütlesidir.

Kuru bazda nem içeriği: Kuru madde esasına göre ürün nemi (X_{kb}) üründeki nem miktarının (W_w) kuru madde miktarına (W_c) oranıdır:

$$X_{kb} = \frac{W_w}{W_c} \quad (1.2)$$

1.1 Literatür Özeti

Literatürde kurutma ile ilgili çalışmalar geniş kapsamlı olarak incelenmiş ve şöyle özetlenmiştir:

Debaste vd. dairesel enine kesite sahip bir kılcal tüpten saf sıvının buharlaşmasını gözenekli ağ modeli kullanarak incelemişlerdir. Oluşturdukları her model farklı fiziksel olguları incelemektedir. Birinci yaklaşım kılcal tüp içerisindeki gaz fazında buhar taşınımı ile ilgili olup, kütle ve momentum taşınım eşitlikleri gaz fazı için

nümerik olarak çözülmüştür. İkinci yaklaşım kılcal tüp içerisindeki termal gradyanlarla ilgilidir. Kütle ve enerji taşınım denklemleri gaz, sıvı ve katı için çözülmüştür. Son yaklaşımda kurutma oranları üzerine duvarlara hapsedilmiş ince sıvı filmlerinin etkisi araştırılmıştır [28].

Yu vd. çalışmalarında belirli sıcaklık aralıklarında (18 °C ve 600 °C arasında) kömürün bazı temel karakteristiklerini gözenek gelişimiyle ilgili olarak incelemişlerdir. 18 °C ve 200 °C arasında zayıf kömürün gözenekliliğinin, dehidrasyon, gaz giderme (gazsızlaştırma) ve katı yapının termal genleşmesi sonucu azaldığı ortaya çıkmıştır. 200 °C ve 400 °C arasında piroliz ve fiziksel reaksiyonun birleşme etkisinden dolayı gözeneklilik büyük ölçüde artmıştır. 400 °C'nin üzerinde pirolizin karmaşık kimyasal etkisinden dolayı gözeneklilik büyük ölçüde azalmıştır [14].

Bongers vd. üç farklı kömür için farklı sıcaklık ve basınçlarda buharla kurutma deneyleri yapmışlardır. Kurutma koşulları ile kurutulan kömürün özellikleri ve salınan organik madde miktarı arasındaki ilişki incelenmiştir. Suyun önemli bir kısmı uzaklaştırıldığında organik madde salınımı önem kazanmıştır. Deneylerde kullanılan kömürler 4 mm'nin altına kırılmış ve denge nemi ile buharın kızgınlık derecesi arasında ilişki kurulmaya çalışılmıştır. Deney sistemi ham kömürün yüksek basınç altında buhar doyma sıcaklığının üzerinde kalmasını sağlar. Buhar 20 ve 65 saatlik kuruma süresince devamlı olarak otomatik selenoid yardımıyla basınçlı kaptan uzaklaştırılır. Deneyler sonucunda; sıcaklık ve basınç profilleri oluşturulmuş, sıcaklık artışı ve zamana bağlı nem değişim grafiği oluşturulmuş ve ortalama nem dengesi ve kızgınlık derecesi arasında bir bağıntı bulunmuştur [29].

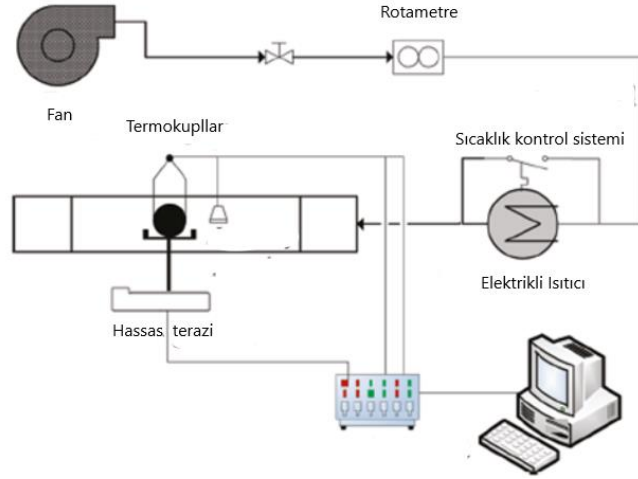
Bongers vd. ikinci makalede kömürün yüksek basınçlı buharlı kurutma sırasında büzülmesi ve ürünün fiziksel yapısı civa gözeneklilik ölçme cihazı ve geçirimli elektron mikroskobu (TEM) ile incelenmiştir. Bu çalışmada buharla kurutulan kömürün fiziksel özellikleri ve yapısı araştırılmıştır. Bu özellikler gazlaştırma, yanma, kömürleşme (karbonizasyon) ve sıvılaşmada önemlidir. Özellikle yüzey alanı ve gözenek boyut dağılımı, karbon ürünleriyle reaksiyon oranı üzerinde önemli etkiye sahiptir. Kömür gözenekliliği buharlı kurutmada sıcaklık-zaman profili kontrol edilerek ayarlanabilir ve ılımlı koşullar altında kurutma yapıldığında yüksek gözenekliliği olan numuneler elde edilebilir. Yapılan deneyler sonucunda;

kılcallardan alınan nemin önemli bir büzüşme ve poroziteye sebep olduğu görülmüştür [4].

Levy tarafından yapılan çalışmada 537 MWe gücündeki linyit yakıtlı bir santralin ünitelerinden birine sıcak hava ile kömür kurutma sistemi eklenmiş ve maliyet çalışması yapılmıştır. Bu sistemde kurutma işlemi sırasında kondenserden çıkan atık ısı ve kazan baca gazındaki termal enerji kullanılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda sisteme eklenen kömür kurutma düzeneğinin yakıt maliyetini azalttığı ve kurutmayla birlikte artan ısı eldesinin emisyon maliyetlerini azalttığı görülmüştür. Diğer yandan planmamış değirmen kesintileri ve değirmen bakım maliyetlerinin azalması ve kömür külü imha miktarının azalmasından dolayı yapılan tasarruflarla daha düşük kayıp miktarları elde edilmiştir [30].

Niksa ve Krishnakumar düşük kaliteli kömürün içerisindeki üç çeşit nemin (tek katmanlı, çok katmanlı ve bünye nemi) kuruma davranışını ve düşük kaliteli numunelerin enerji gereksinimlerini incelemişlerdir. Nem formlarının kütleli yükleri denge nem içeriği datalarından hesaplanmış, buda kömürün yaklaşık ve elemanter analizleriyle doğrulanmıştır. Oluşturulan modelden elde edilen sonuçlar literatürdeki deneysel datalarla uyum içerisindedir. Fakat elde edilen model sadece Avusturalya linyiti için geçerli olup, diğer bölgeler için yeni korelasyonlar yapılmamıştır [31].

Zhang ve You iki farklı linyit türünün sıcak hava ile kurutulmasını deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. Geliştirilen teorik model serbest suyun konveksiyonunu, bünye neminin difüzyonunu ve linyit parçacığı içerisindeki gaz karışımının konveksiyonunu ve difüzyonunu içermektedir. Şekil 1.3' te görülen deney düzeneği yardımıyla kurutucu havanın sıcaklığı (100 ve 140 °C), hızı (0.7 ve 1.5 m/s) ve kömürün boyutunun (20 ve 30 mm) kuruma hızı ve ortalama nem içeriği üzerine etkisi incelenmiştir ve deneysel bulgularla matematiksel modelin sonuçlarının uyum gösterdiği belirlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda; sıcaklık arttıkça kurumanın hızlandığı, hava hızının kuruma hızı üzerinde etkisinin çok küçük olduğu, tane boyutu küçüldükçe kuruma hızının arttığı görülmüştür. Deneysel bulgularla matematiksel modelin sonuçlarının uyum gösterdiği belirlenmiştir [32].



Şekil 1.3 Zhang ve You deney düzeneği [32]

Looi vd. basınçlandırılmış kızgın buharlı akışkan yatakta linyit ve seramik için tek tane kurutma kinetiğini deneysel olarak incelemiş ve matematiksel model geliştirmiştir. Farklı basınç, hız ve sıcaklıklarda farklı tanecik boyutlarıyla deneyler yapılmıştır. Geliştirilen matematiksel model (nemli küçülen çekirdek) seramik parçacıklarıyla yapılan deneylerle karşılaştırılmış ve sonuçların gözenekli parçacıdaki kuruma hızı, toplam kuruma zamanı ve nem içeriğini doğruladığı görülmüştür. Her deney için 2 tane benzer tanecik kurutma odasına yerleştirilmiştir. Toplam buharın %5 inden daha az olan helyum gazı sürekli sisteme gönderilip, buharla birlikte sistemden çıkarılmıştır. Tanecikler askıya alınan tel sepet içine yerleştirilmiştir. Helyum ve buhar arasındaki büyük yoğunluk farkı, helyumun kurutma odasındaki tanecik ile temasını engellemiştir. Yapılan deneyler sonucunda; yüksek basınçta denge nemine daha çabuk ulaşıldığı, buhar sıcaklığı arttıkça çekirdek sıcaklığının arttığı ve nem kaybının hızlandığı, buhar hızı arttıkça kuruma hızının arttığı, yüzey sıcaklığının çekirdek sıcaklığından daha önce yükseldiği görülmüştür. Oluşturulan nümerik model ile gözenekli parçacıdaki kuruma hızı, toplam kuruma zamanı ve nem içeriği doğru bir şekilde elde edilmiştir [33].

Chen vd. tanecikli ürünlerin kızgın buhar ile kurutulmasını model olarak alıp, tek tane modelini geliştirmiştir. Model ile elde edilen hesaplamalar literatürdeki seramik kurutma ile ilgili deneysel datalarla karşılaştırılmış ve doğrulanmıştır. Doğrulan model ile kurutmaya geçirgenliğin, tane boyutunun, ilk tane sıcaklığının ve gaz akış hızının etkisi parametrik olarak incelenmiştir. Yapılan simülasyonlar

sonucunda; geçirgenlik ve kömür tane boyutunun kararlı duruma ulaşması için gereken zaman üzerinde ve taneciğin ilk sıcaklığının ilk yoğunlaşma üzerinde çok etkili olduğu görülmüştür. Ayrıca yüksek buhar debisi ve sıcaklığının buharlaşma hızında önemli artışa sebep olduğu belirlenmiştir [34].

Komatsu vd. yaptıkları çalışmada büyük Polonya linyit madeninden çıkarılan Belchatow linyitinin kuruma kinetiğini incelemişlerdir. 5-10 mm çapında küre şeklindeki linyitler buhar ile kurutmuşlardır. Deneyler 110-170 °C arasındaki sıcaklıklarda yapılmıştır. Her deneyde tek tane için ağırlık ve sıcaklık değişimleri anlık olarak ölçülmüştür. Kızgın buharda kuruma zamanı ve hızının, numune boyutu ve buhar sıcaklığına bağlı olduğu belirlenmiştir. 5 ve 10 mm'lik numuneler için deney sıcaklığı ve kuruma süresi arasında korelasyon oluşturulmuştur [35]. Yaptıkları diğer bir çalışmada (Komatsu vd., 2016) aynı deney düzeneğini kullanarak 110-170 °C arasındaki sıcaklıklarda 2,5 mm'lik küresel şekilli numuneleri kurutmuşlardır. Elde ettikleri deneysel verilerini daha önceki yaptıkları çalışmadaki verilerle karşılaştırmışlardır. Kuruma hızını; ısı transfer katsayısı, suyun gizli ısı, buhar sıcaklığı ve kurutulan numunenin boyutuna bağlı olarak elde edebilecek bir denklem oluşturulmuştur [36].

Kiriyama vd. yaptıkları çalışmada 30 mm çapında küresel Loy Yang linyitni kızgın buhar ile tek tane şeklinde kurutmuşlardır. Kurutma akışkanı olan kızgın buhar atmosferik basınçta 110°C ve 170°C sıcaklık aralığındadır. İlk olarak yüzey su damlacıklarının yoğunlaşması gözlenmiştir. Sonrasında sabit hızda kuruma periyodu ve azalan hızda kuruma periyodu görülmüştür. Tanecik içerisindeki serbest suyun transferi, denge nem içeriği ve linyit taneciğinin büzülmesi göz önüne alınarak nümerik bir model geliştirilmiştir [37].

Kiriyama vd. bir başka çalışmada ise 10, 5 ve 2,5 mm çapındaki Loy Yang linyit parçacıklarını kızgın buharla 110 °C' den 170 °C' ye kadar değişen sıcaklıklarda kurutmuşlardır. Linyit sıcaklığı 100 °C' ye yükselinceye kadar yüzeyde buhar yoğunlaşması, tüm parçacık sıcaklığı 100 °C' de sabit kaldığında sabit kuruma hızı periyodu, yüzey sıcaklığı 100 °C' nin üzerine çıktığında ise azalan hızda kuruma hızı periyodu gözlemlenmiştir. Suyun buharlaşma hızı, tanecik çapının bir fonksiyonu olarak ifade edilmiştir. Model, uygun bir ısı transfer katsayısı verildiğinde, çeşitli kurutucularda linyitin kurutma davranışı için uygulanabileceği belirtilmiştir [38] .

Chen, vd. yaptıkları çalışmada tek tane modeli, iki fazlı hidrodinamik modele entegre ederek akışkan yatakta kızgın buhar ile sürekli kömür kurutma için uygulanmışlardır. Model, yatak içerisinde kalma süresine bağlı olarak tane sıcaklık ve nem değişimi, ısıtma periyodundaki yoğunlaşmanın etkisi ve kömürden alınan buharın yataktaki buhar debisine etkisini dikkate almaktadır [39].

Salmas vd. Yunan linyitinin gözenek yapısını incelemişlerdir. Vakum altındaki linyit numunelerinin izotermal kurutulması, ısıtma nedeniyle ciddi partikül boyutu azalmasına rağmen, mezogözenek yapısının açığa çıkmasına neden olur. Mezogözenek hacmi ve yüzey alanı kurutma sıcaklığı 200 °C' ye yükselirken, artar. 250 °C sıcaklığının üzerine çıkılması kurutma mezogözenek hacmi ve yüzey alanının azalmasına sebep olur. Kurutma işlemi 100 °C sıcaklığında üç saat süre ile yapılırsa mezogözenek yapı özelliklerinde sürekli bir artış göstermiştir. Altı saat gibi daha uzun süreli ısıtmada kütle kaybında hafif bir artış olsa da, gözenek hacmi ve yüzey alanı azalmıştır [40].

Stokie, vd. bu deneysel çalışmada 3 çeşit Victorian linyitinin buharlı akışkan yatakta ve havalı akışkan yatakta kurutulmasını kinetik olarak karşılaştırmaktadır. Gaz sıcaklığı (100-200°C) gaz hızı (0,32-0,61 m/s) , tane boyutu (0,5-1,7 mm) etkileri kurutma kinetiği ile incelenmiştir. Hem hava hem de buharlı akışkan yatakta kurutma sonuçları benzer eğilimdedir, ancak hava buhar ile karşılaştırıldığında daha hızlı kurutma yapmaktadır. Sıcaklığın ve hızın artması ve parçacık boyutunun küçülmesi kurutma süresini azaltmaktadır. Hava ile akışkan yataklı kurutma, kurutmanın çok küçük olduğu yada hiç olmadığı ilk ısınma evresi ve bunu takip eden sabit hızda kurutma evresi ile azalan hızda kurutma evresinden oluşur. Kurutma işlemi denge nemine geldiğinde biter. Buharla kurutmada ise ilk ısınma periyodundaki farkla birlikte benzer bir eğilim oluşur. Isınma periyodundaki nem parçacık yüzeyinde yoğunlaşır ve bir kütle artışına sebep olur [41]. Woo vd. yaptıkları bir başka çalışmada ise tek tane kömür kurutma dataalarını kullanarak kızgın buharla kurutulan gözenekli parçacıklar için model oluşturmuşlardır[42].

Yang ve Chen iki boyutlu, izotermal yatay bir levha üzerindeki sürekli film yoğunlaşması problemini, soğuk bir plakanın yukarıya dönük olduğu düşünülerek teorik olarak incelemiştir. Plakadaki boyutsuz film kalınlığı, Jakob ve Prandtl sayılarının ve emme parametresinin fonksiyonudur. Mevcut analizin önemli bir

kısmı, plaka kenarındaki sınır tabakası derinliğinin kritik (minimum) derinliğe eşit olduğu koşulunun kullanılmasıdır. Boyutsuz ısı iletim katsayısının Ja/Pr , Ra/Ja ve Sw (emme) parametrelerinin fonksiyonları olduğu bulunmuştur. Ayrıca, boyutsuz ısı transfer katsayıları emme parametreleri arttıkça artmıştır [43].

Sciazko vd. yaptıkları çalışmanın ana konusu jeolojik kökenden kaynaklanan spesifik kömür özellikleri ile kurutma özelliklerinin arasındaki kolerasyonun saptanmasıdır. Bunun için deneysel bir araştırma yapmışlardır. Çünkü kızgın buhar ile kurutma yakıtta tutulan suyun gizli ısısının ve duyulur ısısının buharlaştırılması açısından, linyit yakıtlı bir enerji santralinin termal verimliliğini arttırmak için büyük bir potansiyele sahiptir. Bununla birlikte, kurutucunun optimum tasarımı, kullanılan yakıttaki münferit özelliklere bağlı olarak kuruma özelliklerinin temel bilgisini gerektirir. Çalışmada Polonya linyiti kullanmıştır. 110°C ve 170°C sıcaklık aralığında kızgın buhar ile 5 mm ve 10 mm çaplı küresel numuneler kurutularak bu numunelerin kurutma kinetiği incelenmiştir. Ağırlık, yüzey ve iç sıcaklıklardaki değişiklikler sürekli ölçülmüş ve kuruma davranışı incelenmiştir. Sıcaklık ölçümleri yüzey, merkez ve orta noktadan yapılmıştır. Sunulan araştırmada bir coğrafi bölgeden kaynaklanan ve farklı jeolojik kökenlerden kaynaklanan linyit için kuruma davranışı, kuruma hızı ve kuruma süresinde önemli farklılıklar gözlemlenmiştir [44].

Yang vd. bu çalışmada buhar ve katı fazdaki türbülanslı akışı tanımlamak için Eulerian modeli kullanılarak, bir akışkan yataklı kurutucuda kızgın buharla kurutma işlemi için kararsız, eksenel simetrik ve iki boyutlu bir matematiksel model oluşturmuşlardır. Matematiksel model korunum denklemleri, parçacıkların dinamik modeli, türbülanslı akış modeli, sürüklenme kuvveti modeli ve ısı ve kütle transfer modellerini içermektedir. Model ilk buhar yoğunlaşmasını ve buhar ile parçacıklar arasındaki etkileşimi dikkate alarak kuruma prosesini tanımlamak ve normal bir atmosferdeki çeşitli termodinamik parametrelerin dağılımını tahmin etmek için kullanılır. Çalışmada tahıl ve diğer zirai ürünler kızgın buharlı akışkan yataklı kurutucuda kurutulmuştur [45].

Akkoyunlu vd. yaptıkları çalışmada, yığın kömürün akışkan yatakta hava ile kurutulmasını incelemişlerdir. Kömürün nem içeriği üzerinde en etkili parametreleri belirlemek için deneysel çalışmalar yapılarak kurutma modellenmiş

ve kurutmaya etki eden parametreler incelenmiştir. İncelenen parametreler; kurutucu yatak yüksekliği, kurutma havası giriş sıcaklığı, kurutma havası giriş nemi ve kurutma havası giriş hızıdır. Çalışmada % 50' den daha fazla neme sahip Konya-Ilgın linyitleri kullanılmıştır. Yapılan deneylerle kömürün nem içeriği üzerindeki etkili parametrelerin yatak yüksekliği ve süre olduğu, en az etkiye sahip parametrelerin ise havanın girişteki bağıl nemi ve hızı olduğu belirlenmiştir [46].

Zhang ve You geniş ölçekli yaklaşımla linyit parçacığının sabit yatakta kurutulması için nümerik bir model oluşturmuşlardır. Kurutma ortamı ile linyit numune yüzeyleri arasındaki ısı ve kütle transferi, geçici sınır koşulları kullanılarak belirlenmiştir. Mikroskobik ısı transferi, serbest suyun konveksiyonunu, bağlı suyun difüzyonu ve gaz karışımının linyit partikülünde konveksiyon ve difüzyonunu içeren kütle transferini içermektedir. Oluşturulan model ortalama ağırlık kaybı hızı ve numune sıcaklıkları için deneysel verilerle uyushmaktadır [47].

Song vd. yaptıkları çalışmada sıcaklığı 120-200 °C aralığında sıcak hava ile sabit yataklı bir kurutucuda ve maksimum gücü 200 W olan mikrodalga fırında yüksek nem içeriğine sahip kömür çamuruna kombine bir kurutma yapmışlardır. Farklı nem içerikleri ve mikrodalga güçlerinin kurutma performansı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Yüksek mikrodalga gücü ve yüksek nem içeriğinin, önemli ölçüde yüksek kurutma hızına, daha kısa kurutma süresine ve dolayısıyla daha az enerji tüketimine yol açtığını gözlemlemişlerdir. Geleneksel sıcak havayla kurutma ile karşılaştırıldığında kombine kurutma işleminin kurutma süresinin kısılması bakımından etkili bir yöntem olduğunu kanıtlamışlardır [48].

Iyota vd. ham patates dilimlerini 170-240 °C sıcaklık aralığındaki atmosfer basıncında kızgın buhar ve sıcak hava ile kurutmuşlardır. Deney esnasında sürekli kütle ölçümü yapılmış ve yüzeye yakın bir bölge elektron mikroskobu ile gözlemlenerek renk değişimleri ölçülmüştür. Buharla kurutma yapılırken ilk aşamada buharın yoğunlaşmasından dolayı kütlenin geçici olarak arttığı görülmüştür. Özellikle kızgın buharla kurutma yapılırken akışkan sıcaklığı yükseldikçe kurutma süresinin azaldığı belirlenmiştir [20].

Iyota vd. bu çalışmada kızgın buharla kurutmanın ilk aşamalarına odaklanarak kütle ve ısı transfer modeli geliştirmişlerdir. Nem içeriği, sıcaklık dağılımı, malzemenin kütle değişimi ve karakteristik kurutma eğrisi çizimi için malzemenin ilk kalınlığının

etkisi ve ısı transfer katsayısı araştırılmıştır. Ters proses modeli dikkate alınarak küçülen sonsuz düz plakadaki kurutma denklemleri oluşturulmuştur. Buna ek olarak hesaplama sonuçları zamana bağlı karakteristik kurutma eğrisi ve malzemenin kütle değişimi göz önüne alınarak deneysel çalışmalar ile karşılaştırılmış ve kurutmanın ilk aşaması için iyi bir uyum görülmüştür [49].

Iyota vd. çalışmalarında kızgın buharla kurutmanın ilk aşamalarında gerçekleşen yoğunlaşma ve buharlaşma için ısı ve kütle transfer mekanizmalarını açıklamışlardır. Kuruyan madde olarak su yüzeyi (atmosfer basıncında) kullanılmıştır. Su yüzeyine yakın yerlerde hem gaz fazında hem de sıvı fazında sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümler sonucunda su yüzeyindeki ısı transfer hızı ve yoğunlaşma miktarı hesaplanmıştır. Bu ikisi arasındaki ilişki hem deneysel hem de teorik olarak incelenmiştir. Dahası, yoğunlaşma ve buharlaşma aşamalarıyla birlikte kurutma eğrisi yarı ampirik olarak elde edilmiştir. Bu kurutma eğrisinde hem yoğunlaşma hem de buharlaşmanın olmadığı nokta ters nokta olarak tanımlanmıştır [50].

Hager vd. yaptıkları çalışmada amaç gözenekli maddelerin kızgın buharla kurutulmasını deneysel olarak gözlemlemek ve teorik olarak doğrulamaktır. Geliştirilen model kütle ve ısı transfer denklemlerine dayanmaktadır. Geliştirilen model ile deneysel sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür [51].

Hu vd. bu çalışmada linyit yakıtlı enerji üretim santrallerinde ön kurutma yapılması durumunda santral veriminin nasıl değiştiğini incelemişlerdir. Akışkan yataklı bir ön kurutma sistemi 1000 MWe gücündeki santrale entegre edilmiştir. Kurutma akışkanı olarak kızgın buhar ve sıcak hava kullanılmıştır. Santral verimi kızgın buharın kullanıldığı kurutma sistemi ile % 1,16 hava ile %1,43 artmıştır. Kömürün nem içeriği %40 dan %10 a düştüğünde kazan verimi % 80,35'ten %86,83'e yükselmiştir [52].

Hamawand yapmış olduğu çalışmada, kızgın buharla kurutma ile ilgili modelleri incelemiştir. Kızgın buharla kurutmaya aşamalara ayırmıştır. Bu aşamalar; tanecik yüzeyi üzerindeki ilk yoğunlaşma, ilk yoğunlaşmayla oluşan tanecik yüzeyindeki suyun buharlaşması ve son olarak tüm taneciğin kurutulmasıdır. Bu aşamalar sonlu elemanlar yöntemi kullanarak MATLAB yardımıyla modellenmiştir. Model ve deneysel dataların birbiriyle uyumlu olduğu belirtilmiştir [19].

Hamawand vd. muz dilimlerinin kızgın buharla kurutulmasını deneysel olarak incelemiş ve model oluşturmuşlardır. Modelleme yaparken kurutma prosesini üç periyoda bölmüşlerdir. Bunlar; ilk yoğuşma-buharlaşma periyodu, sabit hız periyodu ve azalan hız periyodudur. Model sonuçları en fazla % 14, %1,5 ve % 5 lik hatalarla birlikte deneysel verilerle oldukça uyumlu çıkmıştır [53].

Agarwal vd. yaptıkları çalışmada basit kararlı küçülen çekirdek modelini literatürdeki linyit kurutma dataları ile karşılaştırmışlardır. Üç farklı linyit çeşidi için uygulanan modelin datalarla uyumlu olduğu görülmüştür. Linyit parçacığının içindeki sıcaklık profilleri belirlenmiştir [54].

Chandramohan yaptığı çalışmada hava sıcaklığı ve akış hızının kurutma üzerine etkisini incelemiştir. Sıcaklığı 40°C ve 70°C arasında hızı ise 2 m/s ve 6 m/s aralığında değiştirerek patates kurutmuş ve kurutma eğrileri çizmiştir. Kurutma hızının sıcaklık ve hava akış hızı arttıkça arttığını tespit etmiştir. Deneysel datalar yardımıyla sıcaklık ve hıza bağlı olarak difüzyon katsayısının hesaplanabilmesi için korelasyon oluşturmuştur [55].

Messai vd. çalışmalarında gözenekli bir taneciğin kızgın buharla ve nemli hava ile kurutulmasını modellemişlerdir. Isı ve kütle transfer modelini kullanarak inversiyon sıcaklığını sayısal olarak tahmin etmişlerdir. Kızgın buhar ile nemli hava içindeki buharlaşma hızlarının eşit olduğu sıcaklık, inversiyon sıcaklığı olarak tanımlanmıştır. Oluşturulan model ile literatürdeki küresel gözenekli seramik parçacığın deneysel verileri karşılaştırılmış ve doğrulanmıştır [56].

Messai vd. tarafından yapılan çalışmada gözenekli parçacığın düşük basınçlı kızgın buhar ile kurutulması için teorik bir model geliştirilmiştir. Çalışmada küresel gözenekli seramik ve kömür taneleri dikkate alınmıştır. Oluşturulan model ortalama hacim yöntemine dayanmaktadır ve literatürdeki datalar ile doğrulanmıştır. Bu çalışma sonucunda efektif gözenekliliğin kurutma üzerinde etkili bir parametre olduğu anlaşılmıştır [57].

Liu vd. hem baca gazı hem de buharla kurutmanın termodinamik analizini yapmışlardır. Santrallerde hem yeterli hem de düşük maliyetli olan baca gazı ve buhar linyit ön kurutma işlemi için uygun kurutma ortamlarıdır. Sonuçlar her iki yöntemde santral ısı verimini arttırdığını göstermiştir. Kazan baca gazı ile kurutma yalnızca kurutucu egzoz sıcaklığı yeterince düşük ve kurutucu verimi

yeterince yüksek olduğunda santral ısı verimini arttırmıştır. Buharla yapılan ön kurutma işleminin santral ısı verimini iyileştirmede daha yüksek bir potansiyele sahip olduğu görülmüştür [58].

Zakrzewski yaptığı çalışmada Belchatow ve Turow madenlerinden çıkan kömürleri kızgın buharla kurutmuştur. Numuneler 2,5 ile 30 mm arasında değişen çaptaki kürelerden oluşturulmuştur. Kızgın buhar sıcaklığı 110 ve 170 °C arasında değişen farklı sıcaklıklarda sabit tutulmuştur. Nem içeriği, kurutma hızı ve sıcaklık değerlerinin zamanla değişim grafikleri kurutma karakteristiklerini oluşturmak için çizilmiştir. Tek boyutlu matematiksel model oluşturulup deneysel datalarla karşılaştırılmış ve birbirleriyle uyumlu oldukları görülmüştür [59]. Ayrıca Zakrzewski vd. yaptıkları başka bir çalışmada 30 mm çapındaki numunelerin kurutma kinetiğini incelemişlerdir [60]. Daha önceki çalışmalarında Komatsu vd. [35], inceledikleri 5 ve 10 mm çapındaki numunelerin kurutma karakteristiği ile karşılaştırma yapmışlardır [61]. Yapılan bir diğer çalışmada ise 10 mm çapındaki Polonya linyitinin 110 ve 170 °C sıcaklıkları arasında kurutulmasına ilişkin sayısal model oluşturulup, deneysel verilerle karşılaştırılması yapılmıştır [62]. Yapılan deneylerle ve modelleme ile elde edilen sonuçlar doğrultusunda kurutmanın enerji üretim verimliliği üzerine etkiside farklı bir çalışmalarında teorik olarak incelenmiştir [60].

Pusat yaptığı çalışmada, Konya-İlgın linyitlerinin sabit yatakta hava ile yığın kurutulmasını incelemiştir. Kurutma havası sıcaklığı ve hızının, kömür tane boyutu ve yığın yüksekliğinin kurutma hızı üzerine etkileri parametrik olarak incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda literatürden farklı olarak kömür yığın yüksekliğinin de kurutmayı etkileyen önemli bir parametre olduğu belirlenmiştir [63]. Yaptıkları farklı çalışmalarda kurutma parametrelerinin kömürün parçalanması üzerine etkilerini araştırmışlardır. Ayrıca Konya-İlgın linyitinin sabit yatakta hava ile kurutulması için en uyumlu modeli belirlemişlerdir [64]. 80, 130 ve 150 mm yatak yüksekliklerinde 20, 35 ve 50 mm boyutlarında kömür kurutarak tane boyutu ve yatak yüksekliğinin kurutma hızı üzerine etkileri belirlenmiştir [65]. Yapılan başka bir çalışmada Yatağan linyitinin akışkan yatakta kurutulması incelenmiştir [66]. Literatürdeki kurutma modelleri göz önüne alınarak bir model oluşturulmuş ve deneysel verilerle doğrulanmıştır [67].

Kaya tarafından yapılan çalışmada kurutmada ısı ve kötü transferi deneysel ve teorik olarak incelenmiş; kivi ve karayemiş meyveleri hava ile kurutulmuştur. Dikdörtgen ve silidir şeklinde ürünler için hız ve sıcaklık dağılımları paket programlarla belirlenmiştir [68].

Tablo 1.2 Literatürde bulunan kurutma ile ilgili çalışmalar

No	Araştırmacı	Araştırma Metodu		Kurutucu Akışkan Parametreleri				Kömür Boyutu (mm)
				Türü	Sıcaklık (°C)	Basınç (bar)	Hız (m/s)	
1	Agarwal vd. [54]	Deneysel ve model	Tek tane	Hava Ve Buhar	190-150	1	2,1	2,38-4
2	Akkoyunlu [66]	Deneysel ve model	Yığın kurutma	Hava	70, 100, 130, 160	1	0,40, 71,1	20,35,50
3	Akkoyunlu vd. [46]	Deneysel ve model	Yığın kurutma	Hava	70, 100, 130, 160	1	0,40, 71,1	20,35,50
4	Bongers vd. [29]	Deneysel	Yığın kurutma	Buhar	180 - 260	10 Ve 25	-	4
5	Bongers, vd. [4]	Deneysel	Yığın kurutma	Buhar	180 - 260	10 Ve 25	-	4
6	Chen vd. [34]	Model	Tek tane	Buhar	120-250	-	-	5
7	Chen vd. [39]	Model	Yığın kurutma	Buhar	-	-	-	-
8	Hager vd. [51]	Deneysel ve model	Tek tane	Buhar	125-150-175	1		10
9	Hamawand [19]	Model	Tek tane	Buhar	125-150-175	1		10
10	Hamawand vd. [53]	Deneysel ve model	Tek tane	Hava Ve Buhar	120-140-160	1	-	-
11	Iyota vd. [50]	Deneysel ve model	-	Buhar	-	-	-	-

Tablo 1.2 Literatürde bulunan kurutma ile ilgili çalışmalar (devamı)

No	Araştırmacı	Araştırma Metodu		Kurutucu Akışkan Parametreleri				Kömür Boyutu (mm)
				Türü	Sıcaklık (°C)	Basınç (bar)	Hız (m/s)	
12	Iyota vd. [20]	Dilimlenmiş patatesin renk değişimi gözlemlenmiştir	-	Hava ve Buhar	170-240	1	-	-
13	Iyota vd.[49]	Model	Tek tane	Buhar	-	-	-	-
14	Kiriyama vd. [37]	Model	Yığın kurutma	Buhar	110-170	1	-	100, 50, 6
15	Kiriyama vd. [69]	Deneyssel ve model	Tek tane	Buhar	110-170	1	-	30
16	Kiriyama vd. [38]	Deneyssel ve model	Tek tane	Buhar	110-170	1	-	10, 5, 2.5
17	Komatsu vd.[36]	Deneyssel ve model	Tek tane	Buhar	110-170	1	-	2,5
18	Komatsu vd. [35]	Deneyssel	Tek tane	Buhar	110-170	1	-	5-10
19	Levy [30]	Deneyssel ve model	Yığın kurutma	Hava	66	1	-	-
20	Liu vd. [58]	Santrallerde farklı kurutma yöntemlerinin etkileri	Yığın kurutma	Baca Gazı Ve Buhar	-	-	-	-
21	Looi vd. [33]	Deneyssel ve model	Tek tane	Buhar	155 - 197	1.7-8.4	1,1-4.3	10,12, 13,14
22	Messai vd. [56]	Model	Tek tane	Buhar Ve Hava	125-150-175	-	-	10

Tablo 1.2 Literatürde bulunan kurutma ile ilgili çalışmalar (devamı)

No	Araştırmacı	Araştırma Metodu		Kurutucu Akışkan Parametreleri				Kömür Boyutu (mm)
				Türü	Sıcaklık (°C)	Basınç (bar)	Hız (m/s)	
23	Messai vd. [57]	Model	Tek tane	Buhar	70-80-90-100	-	1,5-2-2,5-3	6-10-12-15
24	Niksa ve Krishnakumar [31]	Model	Tek tane	Buhar	100-250	1-10		0,5-5
25	Olufemi ve Udefiagbon [70]	Matematiksel model	Yığın kurutma	Buhar	170-197	2,5 5,8 8,4 2,0	2,7 3,5 1,4	12,10
26	Pusat [63]	Deneyssel	Yığın kurutma	Hava	70-110-130	1	-	5-7-8-10
27	Pusat vd. [67]	Deneyssel	Yığın kurutma	Hava	70, 100, 130	-	0,4, 1,1, 1,7	-
28	Pusat vd. [65]	Deneyssel	Yığın kurutma	Hava	70-130	-	0,4, 1,1, 1,7	20,35,50
29	Pusat vd. [46]	Deneyssel	Yığın kurutma	Hava	70, 100, 110, 130	-	0,4, 0,7	-
30	Salmas vd. [40]	Deneyssel ve model	Tek tane	Hava	-	-	-	5-10
31	Sciazko vd. [44]	Deneyssel ve model	Tek tane	Buhar	110-170	1	-	5, 10

Tablo 1.2 Literatürde bulunan kurutma ile ilgili çalışmalar (devamı)

No	Araştırmacı	Araştırma Metodu		Kurutucu Akışkan Parametreleri				Kömür Boyutu (Mm)
				Türü	Sıcaklık (°C)	Basınç (Bar)	Hız (m/s)	
32	Song vd. [48]	Kurutma karakteristiği ve enerji analizi	Yığın kurutma	Hava	120-200	-	1, 2, 3	10, 20, 30
33	Stokie vd. [41]	Deneyssel ve model	Yığın kurutma	Buhar Ve Hava	130, 170, 200	-	0,32-0,67	0.5-1.2 1.2-1.7
34	Yang vd. [45]	Model	Yığın kurutma	Buhar	-	-	-	-
35	Yu vd. [14]	Deneyssel	Tek tane	-	200-600	-	-	1
37	Zakrzewski vd. [61]	Deneyssel ve model	Tek tane	Buhar	110-170	1	-	5-10
38	Zakrzewski vd. [62]	Deneyssel ve model	Tek tane	Buhar	110-170	1	-	10
39	Zakrzewski [59]	Deneyssel ve model	Tek tane ve çok tane	Buhar	110-170	1	-	30, 10, 5, 2.5
40	Zhang ve You [32]	Deneyssel ve model	Tek tane	Hava	100-140	-	0,7 Ve 1.5 m/S	20, 30
41	Zhang ve You [47]	Deneyssel ve model	Yığın kurutma	Hava	100,140	-	0,7 /1,5	20, 30
42	Woo vd. [42]	Model	Tek tane	Buhar	-	-	-	-

Kurutma Modelleri

Literatürde kurutma ile ilgili yapılan çalışmalar sonucu elde edilen çeşitli kurutma modelleri mevcuttur. Bu modellerden en çok kullanılanları nemli küçülen çekirdek modeli ve ince tabaka kurutma modelleridir.

Küçülen çekirdek modelinde nemin buharlaşmasının yalnızca parçacık yüzeyine paralel olan tanımlanmış bir kurutma cephesinde meydana geldiğini varsayılır. Kurutma ilerledikçe, kurutmanın gerçekleştiği yüzey, ön parçacık yüzeyinden çekirdeğe doğru hareket eder. Looi vd. tarafından yapılan çalışmada küçülen çekirdek modeli esas alınarak seramik kurutma deneyleri için destekleyen sonuçlar elde edilmiştir[33].

İnce tabaka kurutma modelinde kurutulacak ürünün katmanlara ayrılarak her bir katmanın içinden geçerken sıcaklık ve nem değerlerinde bir değişiklik olmadığı varsayılmaktadır. Literatürde yapılan çalışmalardan Kiriya vd. yaptıkları çalışmada 30 mm çaplı küre şeklindeki Loy Yang linyitini kullanmışlardır [38], [69]. Başlangıç nem içeriği %62 olan linyit numuneleri 110°C'den 170°C'ye kadar çeşitli sıcaklıklarda ve atmosferik basınç altında kurutulmuştur. Linyitin kuru kömür, serbest su ve bağlı sudan oluştuğu varsayılmıştır. Serbest suyun atmosferik basınçta 100°C'de buharlaştığı, bağlı suyun ise 100°C 'nin üzerinde buharlaştığı belirtilmiştir. Kurutma işlemi modellenirken yüzeye olan ısı transferi, linyit numunesi içerisine olan ısı transferi, ısı tüketimi ve yüzeydeki yoğunlaşan ve akan su ayrı ayrı düşünülmüştür.

Kurutma modellenmesinde yaygın olarak kullanılan modellerden biri Dincer modelidir. Bu model çeşitli geometrik katı cisimler için difüzyon katsayısının hesaplanmasını sağlamaktadır. Daha önceden Carslaw ve Jaeger [71] tarafından çalışılmış olan kömür nem dağılımının belirli sabitlere göre hesaplanması amacına dayanmaktadır. Dincer ve Dost ise bu ifadeyi çok karmaşık bulup basitleştirmiş ve daha uygulanabilir hale getirmişlerdir [72].

Dincer ve Hussain yaptıkları çalışmada küresel cisimlerin kurutulmasında ısı ve kütle transferini 2 boyutlu olarak incelemişlerdir. Isı iletimi ve nem difüzyonu modellerini kullanmış ve bilgisayar kodu geliştirmişlerdir. Bu kod sayesinde cismin sıcaklık ve nem dağılımları tahmin edilebilmektedir. Bulunan numerik modelin deney sonuçlarıyla analitik modelden daha uyumlu olduğu görülmüştür [73].

Komatina vd. tarafından yapılan çalışmada bir kömür tanesinin akışkan yataklı yanma odasında kurutulması teorik ve deneysel olarak incelenmiştir. Deneylerde Kosova ve Bogovia linyiti kullanılmıştır. Deneyde kömür tanesinin merkez sıcaklığı ölçülmüş ve bu sıcaklık 100°C ye geldiğinde kurumanın tamamlandığı kabul

edilmiştir. Oluşturulan model ile farklı parametrelerin kömür tanesi kuruma süresi ve sıcaklık profili üzerindeki etkisi incelenmiştir. Kuruma süresi ve kömür tane yarıçapı arasındaki ilişki deneysel ve teorik olarak incelenip, oluşturulan model deneysel datalarla doğrulanmıştır [74].

Olufemi ve Udefiagbon yaptıkları çalışmada gözenekli kömür taneciklerinin kızgın buharda kurutulması ve modellenmesini incelemişlerdir. Oluşturdukları model % 60 nem içeriğine sahip Victorian linyiti için geliştirilmiştir. Taneciğin kurutma esnasında büzülmesini de göz önünde bulundurmışlardır. Modelleme yaparken ortaya çıkan denklemi sonlu elemanlar metodu kullanarak sayısal olarak çözmüşlerdir[70]. Model sonuçlarını Looi vd.[33] yaptıkları çalışmadaki deney sonuçları ile karşılaştırmış ve birbirleriyle uyumlu olduklarını görmüşlerdir.

Kömür kurutma işleminin matematiksel olarak modellenmesi ile ilgili Chen ve Agarwal[34] küre şeklindeki seramik ve kömürlerin yüzey suyunun kurutulmasını analiz etmişlerdir. Kurutma akışkanı olarak sıcak hava ve kızgın buhar kullanmışlardır. Uygulamış oldukları model küçülen çekirdek modelidir. Uygulanan model ile yapmış oldukları deneylerin birbirleriyle uyumlu oldukları görülmüştür. Chen ve Agarwal [34] yaptıkları çalışmada buharla tek parçacık kurutmanın karakteristiğini incelemiştir. Buhar ve hava ile su damlacığı kurutulmasından hareketle buharla kömür kurutmaya ait matematiksel model geliştirilmiştir.

Kızgın buharla kurutmanın matematiksel olarak modellenmesi amacıyla Hamawand[19] tarafından yapılan bir başka çalışmada oluşturulan model üç mekanizmayı içermektedir. Birincisi; kuruma ortamından parçacık yüzeyine taşınım ve radyasyonla olan ısı transferi; ikincisi, parçacığa doğru iletimle olan iç ısı transferi ve sonuncuda; parçacığın geçirgenliğinin bir fonksiyonu olan kütle transferidir.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde tek tane kömür kurutmaya ilgili çalışmaların azlığı görülmektedir. İncelenen tek tane kurutma çalışmalarında kullanılan kömür boyutları ise genellikle 0-30 mm aralığındadır. Bu çalışmada ise 40 mm ve 50 mm çapındaki linyit numuneleride kurutulmuş ve matematiksel model oluşturulmuştur.

Literatürde yapılan çalışmalara bakıldığında kurutmanın ilk aşamaları olan ön ısıtma ve ilk buharlaşma periyodlarının üzerinde yeterince durulmadığı

görülmektedir. Oysaki termik santrallerde yapılan kurutma işleminin bünye nemine kadar olması enerji verimliliğinin optimum seviyeye ulaşılmasını sağlamaktadır. Bünye nemine kadar yapılan kurutma işlemi ise ön ısıtma, ilk buharlaşma periyotlarını da içermektedir. Özellikle kızgın buharla yapılan kurutma işleminde bu periyotların önemi yapılan deneyler sonucunda görülmüştür.

Literatürdeki çalışmalarda kurutma işlemi yapılırken radyasyon (ışınım) yoluyla gerçekleşen ısı transferinin etkisi ihmal edilmiştir. Oysaki oluşturulan matematiksel model ve yapılan hesaplamalar sonucunda radyasyonla ısı transferinin azımsanmayacak boyutta olduğu görülmüştür.

Literatüre bakıldığında Afşin-Elbistan linyitlerini kurutmaya yönelik herhangi bir uygulama veya model çalışması bulunmadığı görülmektedir. Kalorifik değeri oldukça düşük ve nem oranı yüksek olan bu linyitlerin kurutulması enerji verimliliği açısından önemlidir. Literatürdeki bu eksiklikler düşünülerek Afşin-Elbistan linyiti hem hava hemde buhar ile kurutulmuştur. Her iki kurutma şeklinin avantaj ve dezavantajları belirtilmiştir. Özellikleri bilinen herhangi bir kömürün kurutulması esnasında istenilen zamandaki sıcaklık ve kütle değerlerinin hesaplanabileceği matematiksel model geliştirilmiştir. Geliştirilen bu model deneysel datalarla karşılaştırılmış ve uyumlu olduğu görülmüştür.

1.2 Tezin Amacı

Yerli enerji kaynakları içinde en büyük potansiyelin kömüre ait olması bu yakıtın Türkiye için önemini artırırken, özellikle ısıl değerinin düşük, kül ve nem oranının yüksek olması ise dezavantaj oluşturmaktadır. Türkiye yerli kömürlerinin yaklaşık %66'sının ısıl değeri 1000-2000 kcal/kg aralığındadır. Isıl değerin düşük olmasının başlıca nedeni yerli kömürlerin içindeki kül ve nem oranının fazla olmasıdır. Türkiye kömür rezervlerine bakıldığında %57'sinin nem oranının %40'dan daha fazla, %27'sinin nem oranının ise %20-40 arasında olduğu görülmektedir. Sonuç olarak Türkiye'nin sahip olduğu linyit kömürleri oldukça yüksek nem içermektedir. Kömür içindeki nem oranının yüksek olması, kaynaktan çıkartılmasından son kullanıcıya kadar olan süreçte oldukça fazla ve önemli sorunları beraberinde getirmektedir.

Yerli kömürlerin kalitesinin düşük olması nedeni ile büyük bir kısmı elektrik üretiminde kullanılmaktadır. 2018 yılında Türkiye Kurulu gücünün 10213,6 MW_e

ile % 11,5'lük kısmı yerli kömür yakıtlı termik santrallere aittir. Yine aynı yılda 303.413 GWeh olan elektrik üretiminin %15,8'i (48.078 GWeh) bu santrallerde üretilmiştir. 2018 yılında bu üretimi gerçekleştirmek için 54.558.265 ton linyit ve 1.700.458 ton taşkömürü harcanmıştır. Ayrıca, 118.245 ton fuel oil ve 13.935 ton motorin de yardımcı yakıt olarak kullanılmıştır.

Türkiye linyit yakıtlı santrallerinin, yıllık ortalama 7000 h/yıl çalışma süresi kabulü ile, mevcut kurulu gücün üretebileceği yıllık elektrik üretim potansiyeli 57.000 GWeh'dir. Fiili üretim değeri ile bu değer arasındaki fark 18.000 GWeh olup, potansiyelin %32'sini oluşturmaktadır. Üretilmeyen bu enerji ise başta doğalgaz olmak üzere ithal yakıtlardan karşılandığından enerji ve cari açığı artırmaktadır. Kullanılmayan bu üretim potansiyelini karşılamak için yaklaşık 3,8 milyar m³ doğal gazın ithal edilmesi gerekmektedir. Bunun ekonomik değeri ise yaklaşık olarak 4 milyar TL dir. Ayrıca kullanılmayan üretim potansiyelini karşılamak için yeni santral kurulması gerekirse yaklaşık 2.500 MW linyit yakıtlı santral için 4 milyar \$'a yakın yatırım yapılması gerekmektedir. Sonuç olarak bakıldığında, linyit yakıtlı termik santrallerdeki üretim potansiyelinin tam olarak kullanılmaması önemli miktarda ekonomik kayba ve yatırım ihtiyacının doğmasına sebep olmaktadır. Bunun başlıca sebepleri; linyit yakıtlı termik santrallerin işletilmesi esnasındaki kapasite düşüşü, boru patlakları, plansız duruşlar gibi önemli sorunların yaşanmasıdır. Aşağıda da açıklandığı üzere bu sorunların esas nedenlerinin başında kömürün değirmende iyi öğütülememesi gelmektedir. İyi öğütülememenin başlıca nedeni ise kömür içindeki nemin yüksek olmasıdır. Düşük kaliteli kömürler, kömür yakıtlı termik santrallerde ünitenin işletilmesinin yanında termik verimi de olumsuz etkilemektedir. Kömür nem içeriğinin yüksek olması santrallerde birçok soruna yol açmaktadır. Bunlar kömürün depolama alanından taşınması ile başlayıp ve kazanda yanmasına kadar devam etmektedir. Kömür neminin fazla olmasından kaynaklanan işletme sorunları şunlardır:

- **Kömür bunkerlerinin tıkanması:** Yüksek nem içeriğine sahip kömür, değirmende öğütülmeden önce bekletildiği bunkerlerde tıkanmalara neden olmaktadır. Bu tıkanmalar kömürün bunkerden değirmene iletilirken alınamaması ya da süresiz alınmasına yol açar. Bu sebeple kazanda alev kopmaları oluşur. Bu alev kopmaları üniteyi kullanılamaz hale getirerek üretim kayıplarına neden

olmaktadır. Ayrıca alev kopmasını önlemek için kullanılan pahalı ve ithal yardımcı yakıt yakılması sonucunda elektrik üretim maliyetleri artırmaktadır.

- **Değirmenlerin kapasite düşüşü:** Kömür içerisindeki nemin yüksek olması, kömürün öğütülmesini zorlaştırmaktadır. Yüksek nemli kömürler iyi öğütülememekte ve değirmenin bazı durumlarda devre dışı kalmasına yol açmaktadır. Bu durum ünite kapasitesinin düşmesine ve daha az elektrik üretilmesine sebep olmaktadır.

- **Değirmen arızaları ve bakım aralığının azalması:** Nemli kömür, değirmendeki öğütmeyi zorlaştırır ki bu durum değirmen arızalarına ya da değirmen bakım süresinin kısalmasına neden olmaktadır. Bu nedenle ünitelerde üretim kayıpları meydana gelmektedir.

- **Kömür tane büyüklüğünün artması:** Santrallarda kullanılan kömür neminin yüksek olması değirmenlerin öğütme karakteristiklerini etkileyerek, değirmen çıkışındaki kömür tane boyutlarının büyümesine yol açmasıdır. Kömürün tane boyutlarının büyümesi kazandaki yanma veriminin düşmesine, yine kazan içerisinde aşınmalara ve cüruf oluşmasına neden olmaktadır. Kömür tane büyüklüğünün artması, separatörden geri beslenen kömür miktarını artırarak değirmenin net kapasitesini düşürmektedir. Bu durumda kazan kapasitesi de düşmektedir. Kömür tane boyutunun santrallerde istenenden büyük olması yanmayı etkileyerek, kül içerisindeki yanmamış karbon oranını artırmakta ve ünite toplam verimini de düşürmektedir. Ayrıca kömür boyutunun büyümesi, kazan içerisindeki yanmanın yerini değiştirmektedir. Isı transfer yüzeylerinde oluşan cüruf sebebiyle, kazanın ısı dengesi bozulmakta ve verim kayıpları oluşmaktadır. Cürufun artması ile ünite çalışamaz hale gelmekte ve cürufunmanın olduğu yüzeyleri temizlemek için uzun süreli ünite duruşları gerektiğinden de elektrik üretim kayıpları meydana gelmektedir. Ayrıca cürufunma boru patlaklarını artırmakta ve buda ünite duruşlarına neden olmaktadır.

- **Kazan veriminde düşüş:** Mevcut termik santrallerdeki kömür kurutma prosesi, kazandan alınan yüksek sıcaklıktaki gazlar ile değirmen içinde yapılmaktadır. Fakat bu işlem sırasında kömürden elektrik üretmek amacıyla elde edilen enerjinin bir miktarı kömürün içindeki nemin uzaklaştırılması için harcanmaktadır. Harcanan bu enerji su buharı baca sıcaklığında (yaklaşık 160°C) çevreye atıldığından, kazanda geri kazanılamamaktadır. Geri kazanılamayan bu

enerji, kömür neminin yüksek olduğu durumlarda, önemli miktarda enerji kaybına sebep olduğundan kazan verimini düşürmektedir. Bu verim düşüşü, kazanda aynı miktarda buhar üretimi için daha fazla yakıt yakılması ve daha fazla emisyon anlamına geldiğinden hem ekonomik kayıplara neden olmakta hem de çevre kirliliğini artırmaktadır.

- **Yardımcı yakıt tüketiminde artış :** Kömür içerisindeki nem miktarının yüksek olması, kazanın yanma devamlılığını bozmaktadır. bu durumu engellemek için ise santrallerde fazla miktarda yardımcı yakıt (fuel-oil, motorin) tüketilmesi gerekmektedir. İthal ve pahalı olan yardımcı yakıtlar üretim maliyetlerini artırmakta, ayrıca bu yakıtların temin edilmesi ve depolanması santral işletilmesinde ilave yükler oluşmasına sebep olmaktadır.

Kömür nemine bağlı olarak yukarıda bahsedilen önemli işletme sorunlarının ortadan kaldırılması için, kömür neminin ekonomik bir yöntem ile değirmen öncesinden başlayarak optimal değerlere indirilmesi gereklidir. Termik santrallarda kömürün kurutulması ile ilgili en önemli husulardan birisi kömürün değirmenden önce kurutularak öğütmenin iyileştirilmesi ve sonrasında kazandaki yanma problemlerinin iyileştirilmesidir. Halbuki literatürdeki bir çok çalışmaya ve uygulamaya bakıldığında kurutmanın tane boyutu küçük kömürler için ele alındığı, yani değirmen sonrası için kurutma yapıldığı görülmektedir. Gerçekte ise değirmen öncesinde kömür tane boyutu 0-50 mm aralığındadır. Bu nedenle istenen faydaların elde edilmesi için küçük tane değil değirmen öncesindeki tane boyutlarının kurutulması uygundur. Bu gerekçeler ile bu çalışmada 0-50 mm tane boyutları için kurutma deneyleri ve modellenmesi yapılmıştır.

Termik santrallarda kurutmanın ekonomik olabilmesi, santraldan atılan enerjilerin kullanılması, kurutma sonu nemin santraldan alınabilecek enerjiye bağlı olarak belirlenmesi ve tasarlanan kurutma sisteminin maliyetlerinin düşük olmasına bağlıdır. Kurutma sisteminin ekonomik olarak tasarlanabilmesi için büyük tane boyutlarında kömür kurutma karakteristiğinin bilinmesi gereklidir. Ancak kömür özelliklerinin her kömür sahası için farklı olduğu gibi her santralde kömür boyutlarının dağılımı da oldukça farklıdır. Tasarımdan önce kurutma deneylerinin yapılması zaman ve maliyet alacağından zorluklar oluşturacaktır. Tüm farklı kömür ler ve kömür boyutları için deneylere gerek kalmadan tasarımlarda kullanılacak

kurutma modellerinin elde edilmesi tasarım açısından oldukça önemlidir. Bu çalışmada yukarıda bahsedilen nedenler ile 20-50 mm arasındaki kömür taneleri için tasarımlarda kullanılmak üzere kurutma modellerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

1.3 Hipotez

Dünya’da ilerleyen teknoloji ile birlikte gelişen birçok kömür kurutma sistemi mevcuttur. Kömür kurutmanın temel amacı kömür içerisindeki nem miktarını azaltarak kömür ve linyit kaynaklarının daha verimli kullanılmasını sağlamaktır. Bu bakımdan kömür kurutma sistemlerinin düşük sıcaklık ve basınçtaki enerji kullanarak en az yatırım ile kurutma yapması önemlidir.

Literatürdeki birçok çalışmada kömür tane boyutunun kurutmaya etkisi incelenmiş ve tane boyutu küçülmesinin kurutma hızını arttırdığı belirlenmiştir. Ancak termik santrallerde kömür tane büyüklüğü değirmen öncesinde 0-50 mm aralığındadır. Kömürün değirmenden önce kurutulması performansı arttırmakta bu da hem kazanda yanmayı hem de kazan verimini iyileştirmektedir. Bu nedenle çalışmamızda 20, 30, 40 ve 50 mm boyutunda kömür numunelerinin kurutulması hedeflenmiştir. Bu boyuttaki kömür tanesi santraller için yapılacak kurutma sistemlerindeki kömür boyutlarını temsil etmektedir.

Bu çalışmada amacımız kömürü büyük boyutlu olarak kurutmak ve bunu yaparken de yüksek sıcaklıktaki buharı kullanmak yerine alçak basınç türbini çıkışındaki düşük sıcaklıklı buhardan faydalanmaktır. Böylece kaybedilen enerji kazanılacak ve santralde daha çok güç üretilcektir.

Literatürdeki çalışmalarda kurutma bünye nemine kadar sürdürülmüştür. Termik santrallerde kömürün kurutma sonu nemi santralin termik verimindeki artışa göre belirlenecektir. Bu nedenle kurutma sonu neminin bünye nemine kadar düşmesi gerekmemektedir.

Kömür kuruma karakteristiğini etkileyen en önemli parametrelerden birisi kurutma hızıdır. Bu tez çalışması kapsamında en yaygın kurutma akışkanı olan hava ile buhar kullanılarak tek tane linyit kurutma deneyleri yapılmıştır. Her iki akışkan için matematiksel model oluşturulmuştur. Termik santrallerde kullanılan ve ısıtma amacıyla kullanılan linyitler için hangi akışkanın daha avantajlı olduğu geliştirilen

matemetiksel model sayesinde anlaşılabilecektir. Böylece önemli yerli kaynaklarımızdan olan linyitler daha verimli kullanılabilecektir. Termik santrallerde nem oranı yüksek linyitlerin neden olduğu sorunlar azaltılabilecektir. Bu çalışmanın linyit kurutmayla ilgili gelecekte yapılacak çalışmalara katkı sağlaacağı düşünülmektedir.

Deney Düzeneği ve Numunenin Tanıtılması

2.1 Deney Düzeneği

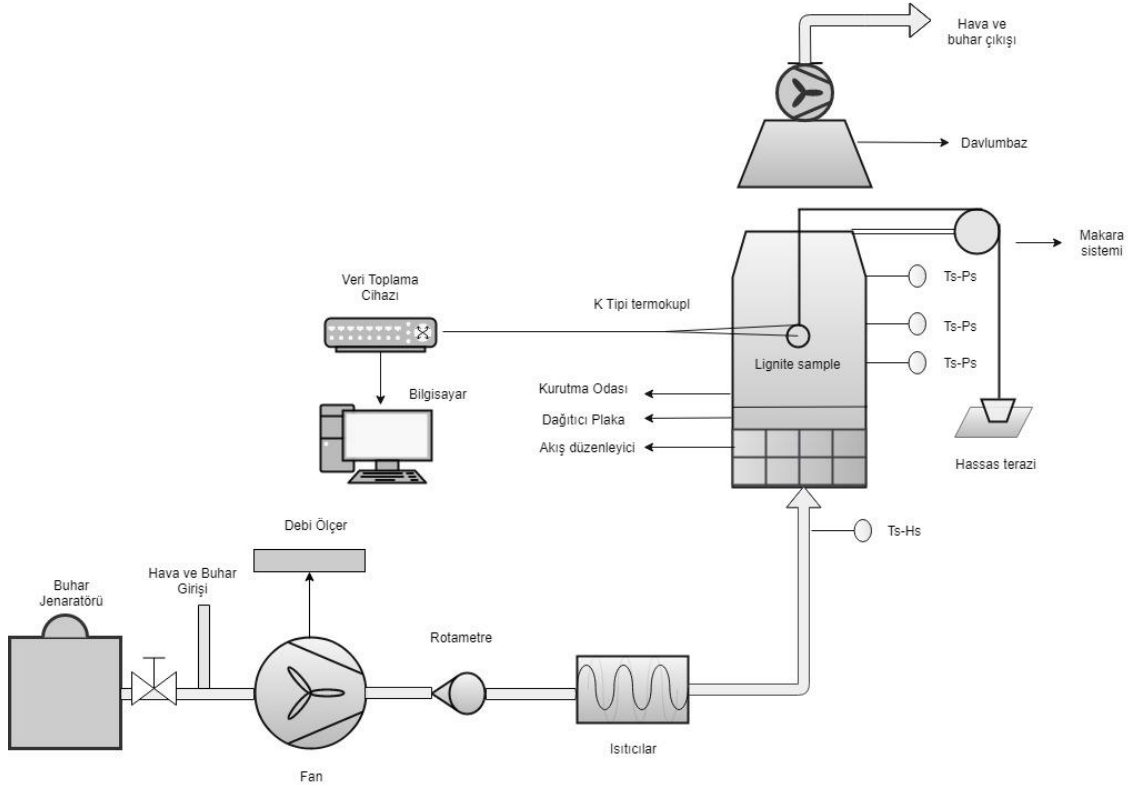
Tez çalışması kapsamında sıcak hava ve kızgın buhar ile yapılması planlanan kömür kurutma deneyleri için Şekil 2.1’ de görölen uygun kurutma düzeneği tasarımı yapılmıştır.



Şekil 2.1 Deney düzeneği resmi

Tasarımı yapılan deney düzeneği ASOS Mekatronik firması tarafından imal edilmiştir. İmalat tamamlandıktan sonra test deneyleri yapılmıştır. Böylece deney seti üzerindeki ekipmanların çalışması kontrol edilmiştir. Bu ekipmanlardan debimetrenin kalibrasyonu yapılmıştır. Deneyler için gerekli olan kızgın buhar sisteme entegre edilen buhar jeneratörü ile sağlanmıştır. Diğer bir kurutucu akışkan olan hava ise frekans kontrollü fan yardımıyla sisteme gönderilmiştir. Hava debisi

orifis tipi bir debi ölçer ile ölçülmüştür. Hava 6x1,5 kW lık resistanslarla istenilen sıcaklığa getirilmiştir.



Şekil 2.2 Deney düzeneği

Kurutma odasının hemen altında ise giren havanın akışını düzenleyebilmek için bir akış düzenleyici bulunmaktadır. Kurutma odası üzerinde bir makara sistemi oluşturulmuş ve sistemin bir tarafında kurutulacak linyit bulunurken diğer tarafına dengeleyici bir ağırlık eklenmiştir. Oluşturulan bu makara sistemi sayesinde kömürün ağırlık değişimi hassas terazi ile anlık olarak belirlenebilmektedir. Ayrıca linyit yüzeyine ve merkezine K tipi termokupl yapıştırılarak yüzey ve merkez sıcaklık değişimleri ölçülebilmektedir. Termokupllar data logger ve bilgisayar bağlanarak anlık sıcaklık değişimleri kaydedilmektedir. Deney seti üzerindeki sıcaklık (Ts), basınç (Ps) ve bağıl nem (Hs) sensörlerinin konumları Şekil 2.2’de görüldüğü gibidir. Deney setinin kontrolü Programlanabilir Mantıksal Denetleyici (PLC) ile sağlanmaktadır. Kurutma odasından çıkan buharın tahliyesi için buhar çıkışına davlumbaz montajı yapılmıştır. Böylece hem ortam havasının kalitesi korunup hem de kurutma odası çıkışındaki buhar yoğunluğu büyük ölçüde önlenmiştir.

2.1.1 Deneylerde Kullanılan Ölçü Aletleri ve Ekipmanlar

Yüzey ısı çiftleri (Termokupl): Linyit numunesinin yüzey sıcaklığının ve merkez sıcaklığının ölçülmesi için yüzeye yapışma özelliği bulunan ısı çiftler kullanılmıştır (Şekil2.3). Isıl çiftler 3 m boyunda ve K tipi olur hassasiyetleri $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ dir.



Şekil 2.3 Yüzey ısı çiftleri

Hassas terazi: Kurutma deneyleri esnasında kurutma odasındaki numunenin anlık olarak kütlesi Şekil 2.4'te görülen hassas terazi ile ölçülmüştür. Bu ölçümler için Sartorius marka (CPA1003S-0CE) 1 mg hassasiyetinde hassas terazi kullanılmıştır.



Şekil 2.4 Hassas terazi

Fırın: Linyit numunelerinin ilk nem değerini belirlemek için kurutma deneylerine başlamadan önce numunelerden alınan parçacıklar Elektro- Mag (M 420 p) marka fırında (Şekil 2.5) 24 saat kurutulmuştur. Fırının hassasiyeti $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ' dir.



Şekil 2.5 Fırın

Veri toplama cihazı (Data logger): Deneyler sırasında ölçülen sıcaklıkların izlenmesi ve kaydedilmesi amacıyla Agilent marka 34972A model Şekil 2.6' da görülen veri toplama cihazı kullanılmıştır.



Şekil 2.6 Veri toplama cihazı

Debimetre: Hava deneyleri yapılırken debi ölçümü orifis tipi debimetre ile yapılmıştır. Debimetrenin markası Bass Instrument olup hassasiyeti %1'dir.

Fan: Hava sirkülasyonu frekans kontrollü fan yardımıyla sağlanmıştır.

Isıtıcı: Hava sıcaklığı rezistanslarla ile ayarlanmaktadır (Şekil 2.7). Toplam rezistans gücü $6 \times 1.5 = 9 \text{ kW}$ 'tır. Sıcaklık kontrolüne bağlı olarak ayrı ayrı kontrol edilebilmektedirler.



Şekil 2.7 Isıtıcılar

Akış düzenleyici plaka: Kurutma odasının hemen altında bulunan akış düzenleyici sayesinde hava ve buhar akışı düzenlenmektedir.

Buhar jeneratörü: Düşük basınçtaki kızgın buharın elde edilmesi için sisteme ilave edilmiş ekipmandır. Ortam sıcaklığındaki suyun istenilen basınçta doymuş olarak düzenekteki ısıtıcılara gönderilmesini sağlar.

2.1.2 Deney Numunesinin Tanıtılması (Afşin-Elbistan Linyiti)

Ülkemiz linyit kaynağının yaklaşık %29,5'i Afşin-Elbistan havzasında yer alırken %10,5'i Konya-Karapınar, %8,3'ü Eskişehir-Alpu, %5,4'ü Afyon-Dinar, %4,9'u Manisa-Soma ve %4,3'ü Muğla-Milas'ta yer almaktadır [75]. Doğu bölümünde Elbistan, batı bölümünde ise Afşin ovaları bulunan Afşin-Elbistan havzası Kahramanmaraş il sınırları içerisinde yer almaktadır. Yapılan deneysel çalışmalarda da kullanılan Afşin-Elbistan linyitleri Türkiye'nin büyük çoğunluğundaki rezervlerde bulunan linyitler gibi düşük kalorili linyitlerdir [75], [76]. Afşin-Elbistan linyitinin kısa analiz sonuçları Tablo 2.1'de verilmiştir.

2.1.3 Deney Numunesinin Hazırlanması

Deneyler için gerekli olan linyit numuneleri Afşin-Elbistan Linyitleri İşletme Müdürlüğü'nden temin edilmiştir. Nem değerlerini kaybetmemek adına 2 adet naylon torba içerisine koyulmuştur. Naylon torbalarında çuvala yerleştirilmesiyle linyitlerin havayla teması kesilmiş ve olabildiğince orijinal nemlerinde kalmaları sağlanmıştır. Numunelerin temininden sonra her deney başlangıcında hazırlanacak numune boyutuna en yakın numune seçilerek geriye kalan numuneler nemlerini kaybetmemesi için tekrar poşetler ve çuval içinde muhafaza edilmiştir. Numune hazırlanması esnasında numuneden arta kalan kısımlar fırına koyulup 107°C

sıcaklığında 24 saat bekletilerek ıslak bazda ve kuru bazda nem içeriği hesaplanmıştır. Her deneyin başlangıcında numuneler el ile kesici bir alet yardımıyla 20 mm, 30 mm, 40 mm ve 50 mm çaplarında olmak üzere küre haline getirilmiştir. Hazırlanan numune kütlesi hassas terazi yardımıyla ölçülmüştür. Daha sonra merkezine ve yüzeyine termokulp yerleştirilen numune makara sisteminin bir tarafına koyulmuştur. Termokupllar veri toplama cihazına bağlanarak bilgisayardan anlık sıcaklık değişimi gözlenmiş ve kaydedilmiştir. Makara sisteminin diğer tarafına ise dengeleyici bir cisim yerleştirilerek bu cisim hassas terazi üzerine yerleştirilmiştir. Bu sayede cismin kütlesi hassas terazinin bilgisayara bağlanmasıyla sürekli olarak ölçülmüştür. Ölçülen değerler cismin ilk kütlesinden çıkarılarak numunenin kaybettiği nem miktarı belirlenmiştir.

Hava deneyleri yapılırken sistem çalıştırılmış, sistem 120 °C ' ye ayarlanmıştır. Sistemdeki kontrol mekanizması yardımıyla bu değer 117-122°C 'de tutulmuştur. Sistem sıcaklığı 120°C sıcaklığında dengeye gelince numune deney sistemine bırakılmıştır. Kızgın buhar ile yapılan çalışmalarda ise sisteme önce sıcak hava gönderilerek sistem denge sıcaklığına getirilmiştir. Bunun sebebi önce buhar gönderildiğinde sistemde yoğunlaşmalar meydana gelmesi bunda ölçümleri etkilemesidir. Sistem denge sıcaklığına gelince ise vanaların yönü değiştirilerek kızgın buhar akışı sağlanmıştır. Kızgın buhar deneyleri yapıldıktan sonra ısıtıcı kısmında yoğunlaşma ile oluşan su tahliye edilmiştir. Hem kızgın buhar hem de sıcak hava deneyleri atmosfer basıncında (1 atm olduğu kabul edilmiştir) yapılmıştır.

Tablo 2.1 Afşin- Elbistan linyit numunesinin kısa analiz sonuçları [77]

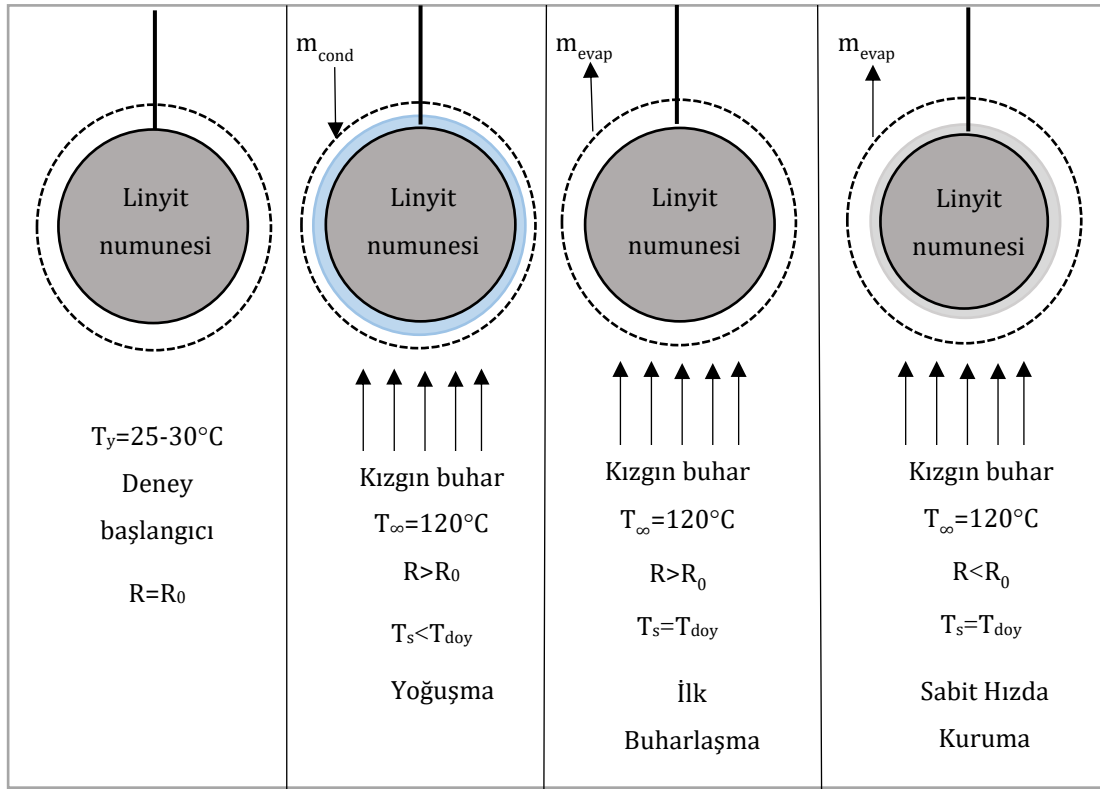
Parametre	Orijinal	Havada Kuru	Kuru Değer
Alt Isıl Değer (kcal/kg)	1703	-	3871
Üst Isıl Değer (kcal/kg)	1870	3546	4251
Toplam Nem (%)	56,00	16,58	-
Toplam Kükürt (%)	0,57	1,08	1,29
Uçucu Madde (%)	20,64	40,23	46,90
Kül (%)	13,32	25,26	30,28

Deneysel çalışmalar kapsamında 20 mm, 30 mm, 40 mm ve 50 mm çaplı küresel linyit numunelerinin 120°C deki sıcak hava ve kızgın buharla kurutulmasında numune kütlesinin, yüzey ve merkez sıcaklıklarının zamana bağlı olarak değişimi incelenmiştir. Bu değişimler göz önünde bulundurularak tezin giriş bölümünde tanımlı yapılan kurutma periyotları belirlenmiştir. Sıcak hava ve kızgın buharla yapılan linyit kurutma işlemleri farklı fiziksel mekanizmaları barındırır.

Kızgın buharla kurutmada ön ısıtma, yoğuşma, ilk buharlaşma ve sabit hızda kuruma periyotları görülmüştür. Kurutma işleminin ilk periyodu olan ön ısıtma periyodunda 120°C sıcaklığındaki kızgın buharla temas eden 25-30 °C sıcaklıklarındaki numunenin sıcaklığı ani bir artış göstermiştir. Yoğuşma periyodunda ise numune yüzeyinde oluşan yoğuşmadan dolayı bir sıvı filmi oluşmuştur. Numune yüzey sıcaklığı doyma sıcaklığına ulaşınca bu sıvı filmi buharlaşmaya başlamış ve ilk buharlaşma periyodu başlamıştır. Sıvı filmi tamamen buharlaştığında ise sabit hız periyoduna geçilmiş ve numunenin kuruması başlamıştır.

Sıcak hava ile kurutmada yine ön ısıtma periyodunda numune yüzey sıcaklığı hızlı bir artış göstermiştir. Bu periyotta numune kütlesinde herhangi bir değişiklik olmamıştır. Ön ısıtma periyodundan sonra numune kütlesi azalmaya başlarken, yüzey sıcaklığı artmaya devam etmiştir. Bu periyot ise azalan hız periyodu olarak belirlenmiştir. Sıcak hava ile kurutmada yoğuşma, buharlaşma ve sabit hız periyotları görülmemiştir.

3.1 Kızgın Buharla Kurutma



Şekil 3.1 Kızgın buharla kurutma kuruma periyodları

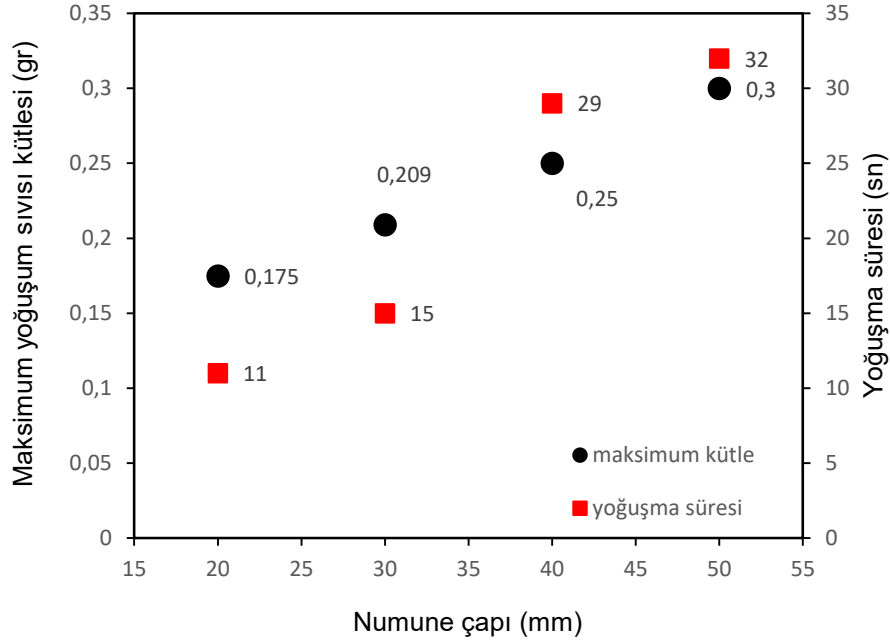
Şekil 3.1’de linyit numunesinin kızgın buharla kurutma periyodları görülmektedir. Sırasıyla ön ısıtma ve yoğuşma periyodu, ilk buharlaşma periyodu ve sabit hızda kurutma periyodu gözlemlenmiştir.

3.1.1 Ön Isıtma ve Yoğuşma Periyodu

Kızgın buharla kurutmanın ilk aşaması olan ön ısıtma periyodunda amaç linyitin yüzey sıcaklığının ortam sıcaklığı ile dengeye gelmesidir.

Deneyler esnasında kurutma ortamı sıcaklığı 120 °C’ de sabit tutulmuştur. Numune sıcaklıkları ise deney yapılan ortamın sıcaklığına bağlı olarak 25-30° C aralığında değişmektedir. Düşük sıcaklıktaki numune kurutma odasına koyulduğunda 120°C’ deki kızgın buharla temas etmektedir. Kızgın buharın sıcaklığının numunenin küçük boyutlu olması sebebiyle değişmediği kabul edilebilir. Yaptığımız deneylerle numune ön ısıtma periyodu sonunda sıcaklığın 50-70 °C aralığında olduğu tahmin edilmiştir. Dengeye gelme süresi yaklaşık 3-5 saniye içerisinde olmaktadır. Numuneye temas eden akışkanın sıcaklığı düştüğünde ise numune yüzeyinde yoğuşma başlamaktadır. Deney başlangıcından 3-5 saniye gibi bir süre sonra

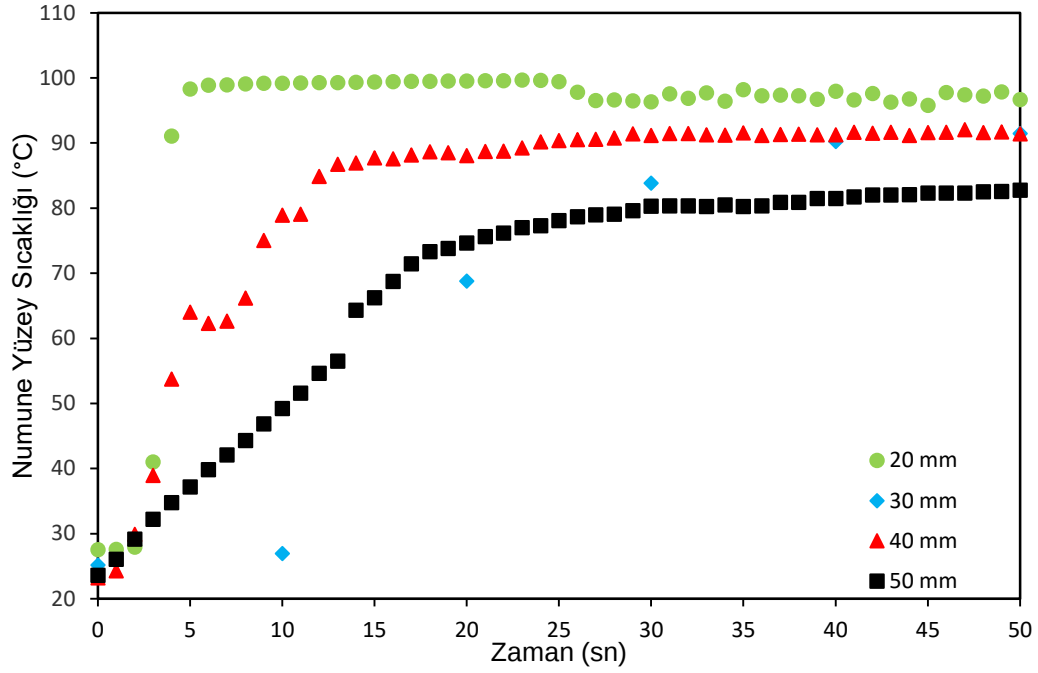
gerçekleşmeye başlayan bu yoğunlaşma işlemi esnasında 20, 30, 40 ve 50 mm çaplarındaki numuneler üzerinde farklı kalınlıklarda sıvı filmi tabakası oluşmuştur. Şekil 3.2’de farklı çaplar için sıvı filmi kütlesi ve yoğunlaşma periyodu süresi verilmiştir.



Şekil 3.2 Ön ısıtma ve yoğunlaşma periyodu parametrelerinin çaplara göre değişimi

Deneyler esnasında hassas terazi sayesinde sürekli takip edilebilen kütle ölçümüyle bu yoğunlaşma filmi kütlelerinin 20 mm için 0,18 gram, 30 mm için 0,21 gram, 40 mm için 0,25 gram, 50 mm 0,3 gram olduğu belirlenmiştir. Yoğunlaşma periyodu süreleri ise 20 mm için 11 saniye, 30 mm için 15 saniye, 40 mm için 29 saniye, 50 mm 32 saniyedir.

Şekil 3.3’te farklı çaplardaki linyit numunelerinin atmosferik basınç altında 120° C sıcaklığındaki kızgın buhar ile kurutulması esnasında yüzey sıcaklıklarının değişimi göstermektedir. Şekilden de görüleceği üzere 20 mm çapındaki linyit numunesinin yüzey sıcaklığı yaklaşık 11 saniye sonunda atmosferik basınçta akışkanın doyma sıcaklığına kadar ısınmaktadır. Sabit hız periyodunun sonuna kadar bu sıcaklıkta kalmaktadır. 30 mm’lik linyit numunesinde ise bu sürenin 15 saniye olduğu görülmektedir.

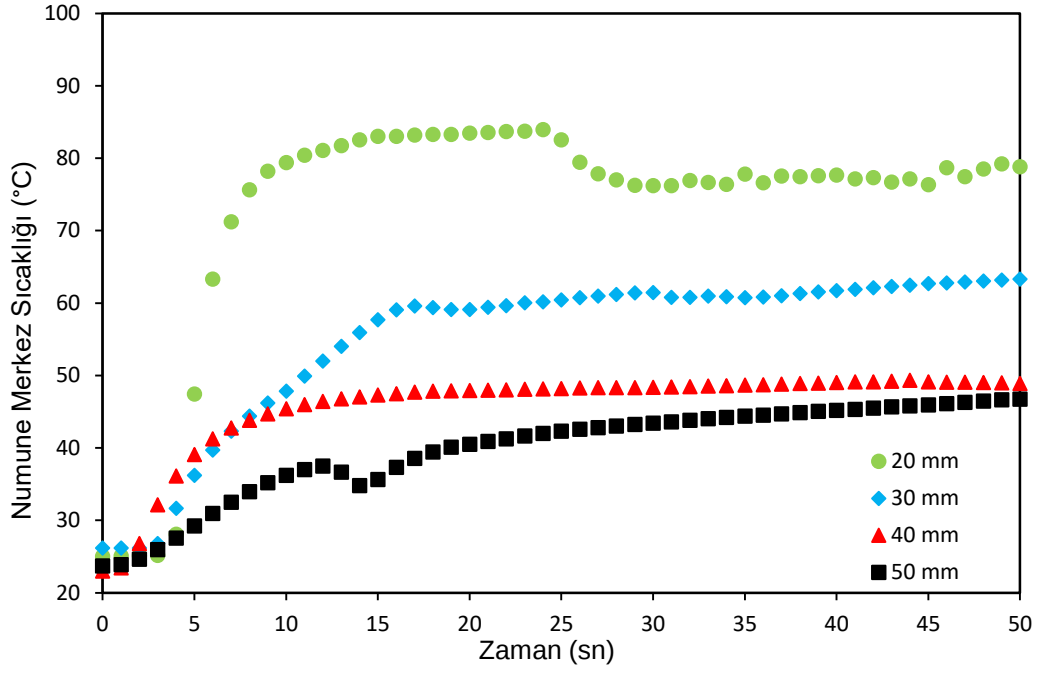


Şekil 3.3 Kızgın buharla kurutma ön ısıtma periyodunda numune yüzey sıcaklıklarının zamanla değişimi

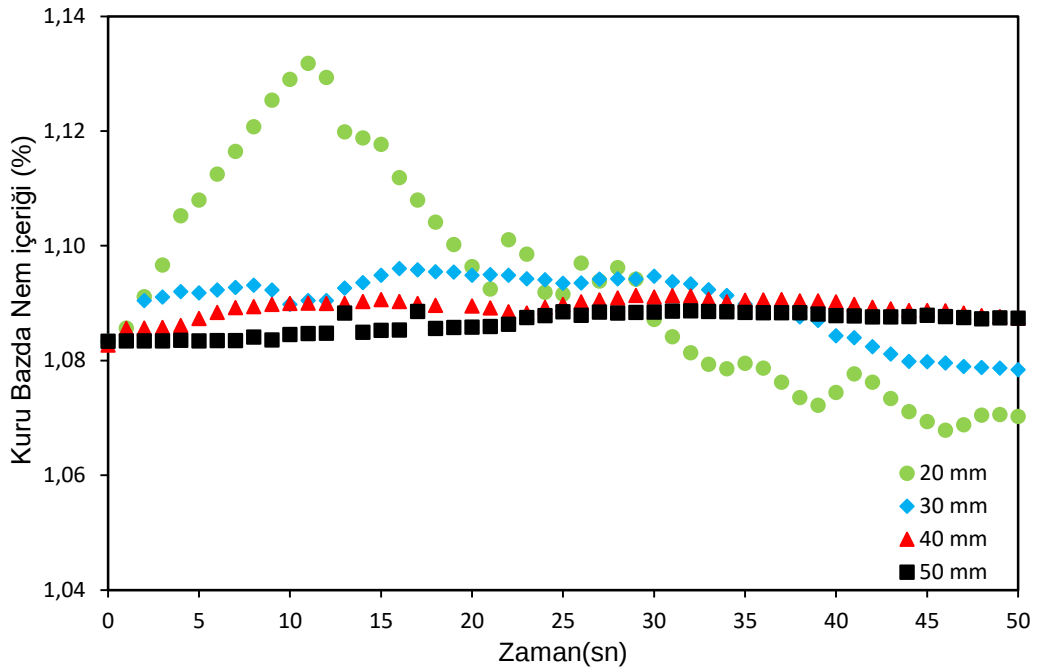
40 mm'lik linyit numunesinin yüzey sıcaklığının zamanla değişimine bakılacak olursa sıcaklığın bu kez 29 saniye sonra sabit kaldığını görülmektedir. Bu doyma sıcaklığına erişim süresi 20 mm ve 30 mm'lik linyit numunelerine göre daha uzundur. En uzun doyma sıcaklığına erişim süresi ise 50 mm'lik linyit numunesinde 32 saniye olarak görülmektedir. Bunun sebebi ise çap büyüdükçe yüzey alanı büyümesi ve aynı sıcaklığa erişmek için daha fazla ısıya ihtiyaç duyulmasıdır.

Şekil 3.4'te ise kızgın buharla kurutulan numunelerin ön ısıtma periyodunda merkez sıcaklıklarının zamanla değişimi görülmektedir. Merkez sıcaklığındaki en hızlı yükseliş 20 mm çapındaki en küçük boyutlu numunede görülmektedir. Ön ısıtma periyodunun sonunda 20 mm çapındaki numunenin merkez sıcaklığı 80°C ve 50 mm çapındaki numunenin merkez sıcaklığı 44°C olarak ölçülmüştür.

Kızgın buharla kurutulan numunenin ön ısıtma periyodunda nem içeriğinin zamanla değişimi Şekil 3.5'teki gibidir. Nem içeriği ön ısıtma periyodundan sonraki yoğuşma periyodunda artmaktadır.



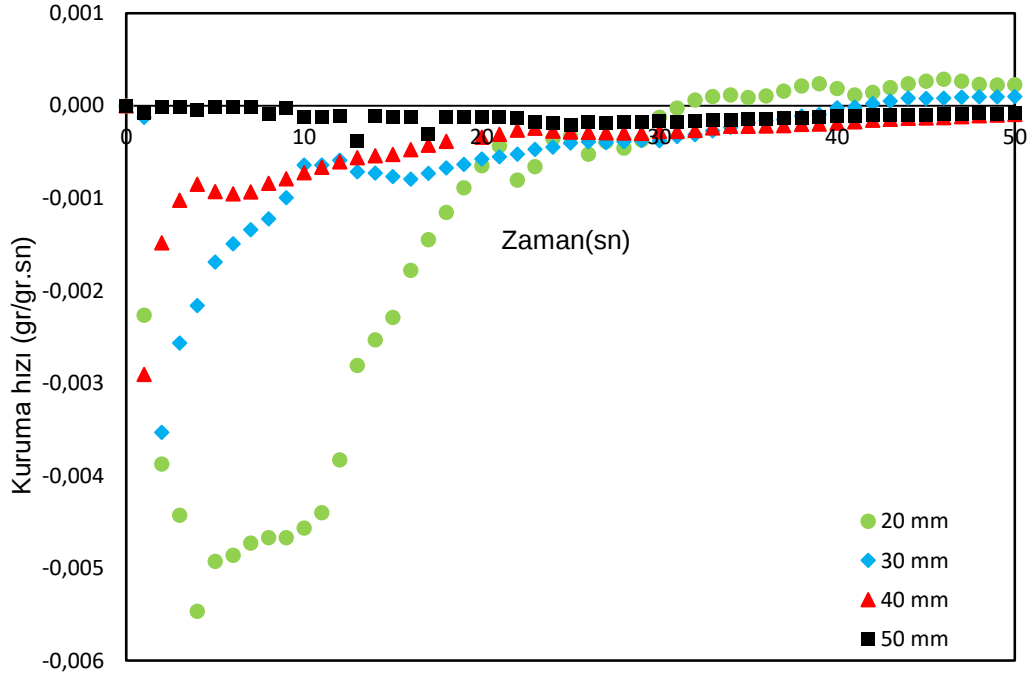
Şekil 3.4 Kızgın buharla kurutma ön ısıtma periyodunda numune merkez sıcaklıklarının zamanla değişimi



Şekil 3.5 Kızgın buharla kurutma ön ısıtma periyodunda numune nem içeriğinin zamanla değişimi

Kızgın buharla kurutmada görülen ön ısıtma ve yoğunlaşma periyotlarına ait kurutma hızının zamanla değişimi Şekil 3.6'da görülmektedir. Daha öncede bahsedildiği gibi

bu periyotta yoğuşma meydana geldiği için numune ağırlığı artmakta ve kurutma hızının bu sebeple negatif olduğu görülmektedir. Numunenin yüzeyinde meydana gelen yoğuşmadan ilk buharlaşma periyodunun sonuna kadar kurutma hızının negatif olma durumu devam etmektedir.

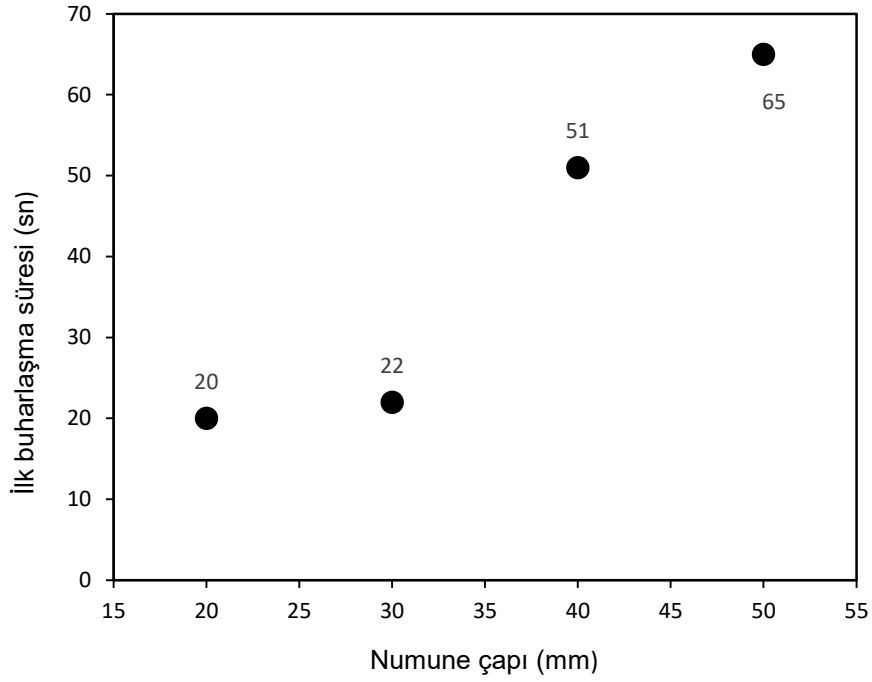


Şekil 3.6 Kızgın buharla kurutma ön ısıtma periyodunda numune kurutma hızlarının zamanla değişimi

Numune ağırlığı maksimum değerine ulaştıktan sonra yüzeydeki kayma gerilmelerinden ve yerçekimi kuvvetinden dolayı numune yüzeyindeki sıvı filmi damlacık halinde yüzeyden ayrılmıştır. Herbir numune için kaç adet damla olduğu ve bu damlamaların hangi zamanlarda meydana geldiği gözlemlenmiştir. Damlamaların başlamasıyla numune ağırlığı artıp azalır. Bu esnada numune sıcaklığı, kızgın buhardan gerçekleşen ısı taşınımı ve radyasyonla ısı transferi sebebiyle doyma sıcaklığına gelinceye kadar sürekli artar.

3.1.2 İlk Buharlaşma Periyodu

Numunenin yüzey sıcaklığı atmosferik basınçtaki suyun doyma sıcaklığına eşit olduğunda ilk buharlaşma diye adlandırılan periyot başlamıştır. İlk buharlaşma periyodunda numune yüzeyinde oluşan yoğuşum sıvısı buharlaşır. Numune ağırlığı deney başlangıcında ölçülen ilk ağırlığına geldiğinde sıvı filminin tamamının buharlaştığı kabul edilmiştir.

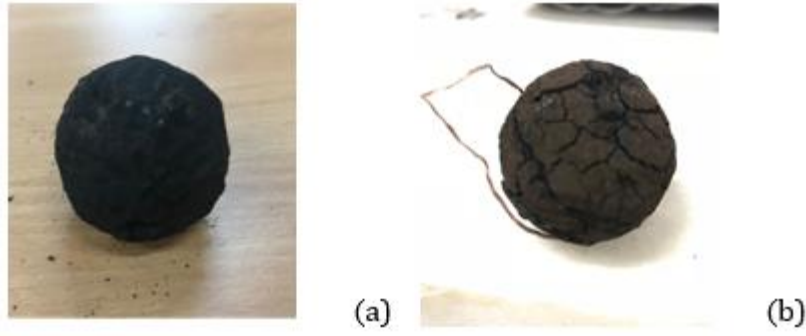


Şekil 3.7 İlk buharlaşma süresinin çaplara göre değişimi

Yapılan deneysel çalışmada buharlaşma süresi, numunenin maksimum ağırlıkta olduğu süre ile ilk ağırlığına döndüğü süre arasındaki fark alınarak belirlenmiştir. Şekil 3.7’de görüldüğü gibi bu süre her çaptaki numune için farklı olmakla birlikte 20 mm çapındaki numune için 20 saniye, 30 mm çapındaki numune için 22 saniye, 40 mm çapındaki numune için 51 saniye ve 50 mm çapındaki numune için 65 saniye sürmüştür.

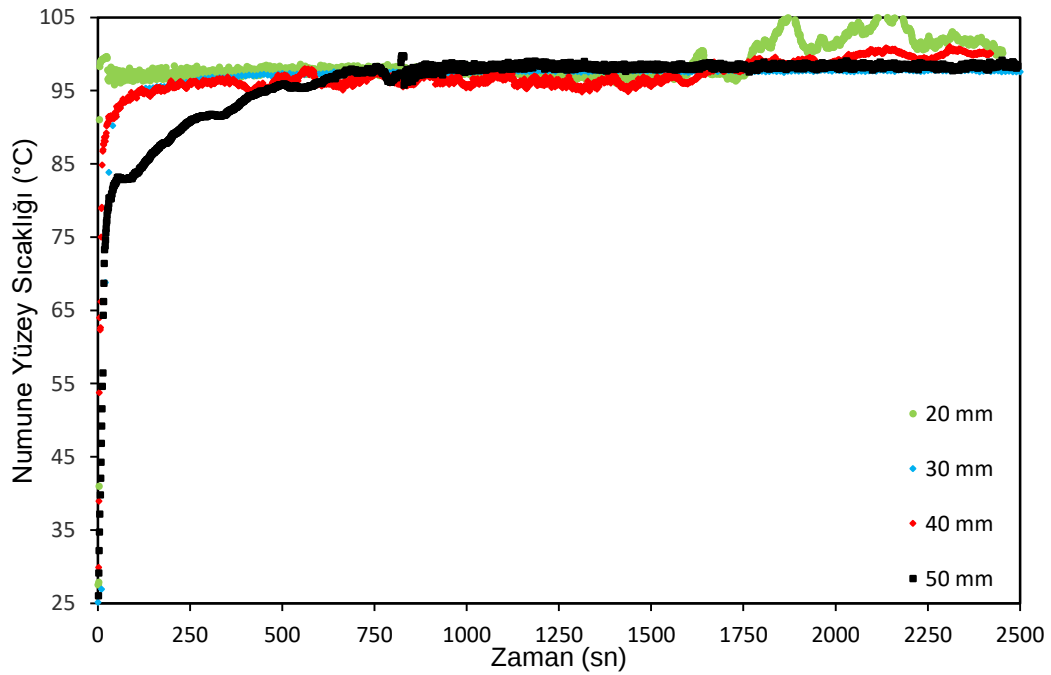
3.1.3 Sabit Hızda Kurutma Periyodu

Yüzeydeki yoğuşma suyu tamamen buharlaşıp, numune ilk ağırlığına geri döndüğünde ilk buharlaşma periyodu bitip, kuruma periyodu başlar. Sıvı filmi tamamen buharlaştıktan sonra numune merkezinden yüzeye doğru kütle transferi gerçekleşir. Yüzeye doğru transfer edilen nem buharlaşmaya başlar ve numunenin ağırlığı sürekli azalır. Kuruma periyodu başladığında numune yüzey sıcaklığı suyun deney yapılan basınçtaki doyma sıcaklığına ulaşmıştır. Bu çalışmada deneyler atmosferik basınçta yapıldığı için numune yüzey sıcaklığının 100 °C ye ulaşip, kuruma periyodu boyunca sabit kaldığı kabul edilmiştir. Aşağıdaki Şekil 3.8’de linyit numunesinin kurutulmadan önceki ve kurutulduktan sonraki fotoğrafları görülmektedir.



Şekil 3.8 Linyit numunesinin görünümü (a) kurutulmadan önce (b) kurutulduktan sonra

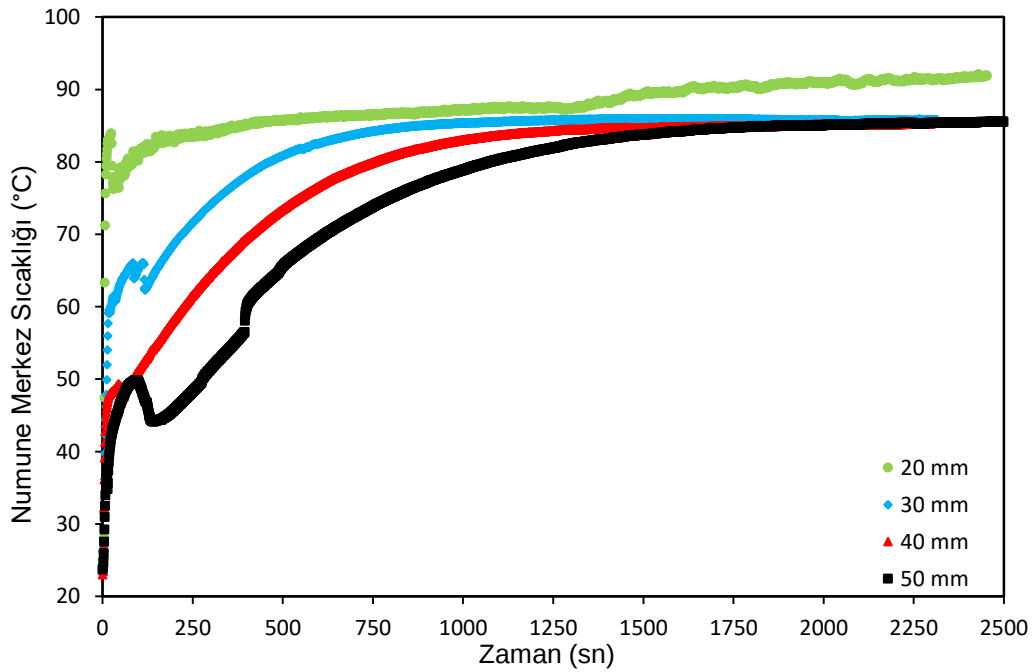
DeneySEL çalışmalar kapsamında 20 mm, 30 mm, 40 mm ve 50 mm çaplı küresel linyit numunelerinin 120°C deki sıcak hava ve kızgın buharla kurutulmasında numune kütlesinin, yüzey ve merkez sıcaklıklarının zamana bağlı olarak değişimi Şekil 3.9’da verilmiştir.



Şekil 3.9 Linyit numunelerinin kızgın buhar ile kurutulması esnasında yüzey sıcaklıklarının zamanla değişimi

Şekil 3.9 farklı çaplardaki linyit numunelerinin atmosferik basınç altında 120° C sıcaklığındaki kızgın buhar ile kurutulması esnasında yüzey sıcaklıklarının değişimini göstermektedir. Şekilden de görüleceği üzere 20 mm çapındaki linyit numunesinin yüzey sıcaklığı yaklaşık 11 saniye sonunda atmosferik basınçta

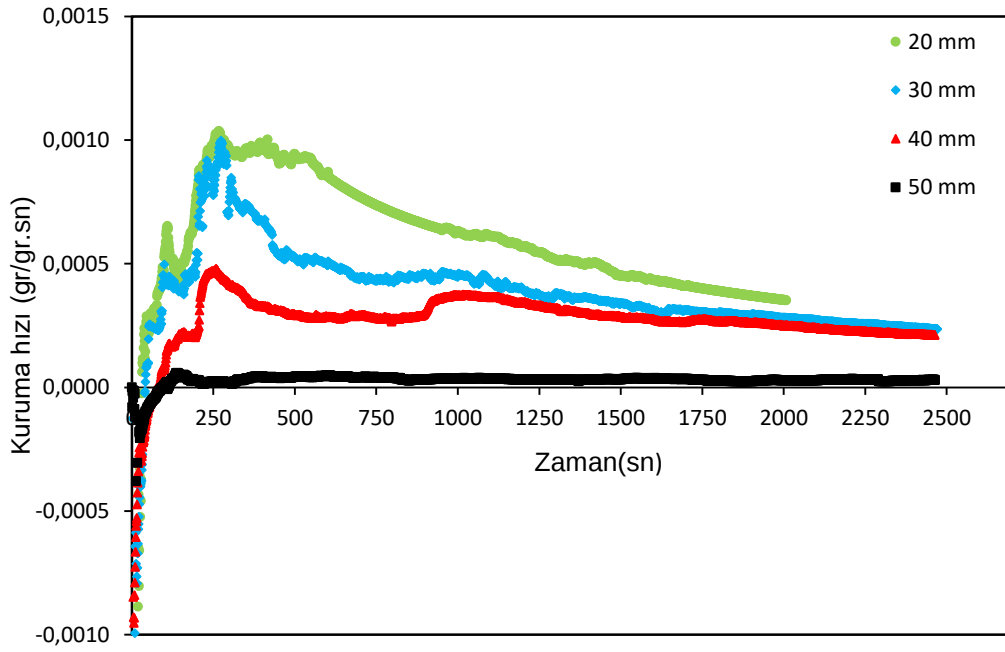
akışkanın doyma sıcaklığına kadar ısınmaktadır. Sabit hız periyodunun sonuna kadar bu sıcaklıkta kalmaktadır. 30 mm'lik linyit numunesinde ise bu sürenin 15 saniye olduğu görülmektedir. 40 mm'lik linyit numunesinin yüzey sıcaklığının zamanla değişimine bakılacak olursa sıcaklığın bu kez 29 saniye sonra sabit kaldığını görülmektedir. Bu doyma sıcaklığına erişim süresi 20 mm ve 30 mm'lik linyit numunelerine göre daha uzundur. En uzun doyma sıcaklığına erişim süresi ise 50 mm'lik linyit numunesinde 32 saniye olarak görülmektedir. Bunun sebebi ise çap büyüdükçe yüzey alanı büyümesi ve aynı sıcaklığa erişmek için daha fazla ısıya ihtiyaç duyulmasıdır.



Şekil 3.10 Linyit numunelerinin kızgın buhar ile kurutulması esnasında merkez sıcaklıklarının zamanla değişimi

Şekil 3.10'da ise farklı çaplardaki linyit numunelerinin merkez sıcaklıklarının 120 °C sıcaklığındaki kızgın buharla kurutulurken zamanla değişimlerini görülmektedir. Yüzey sıcaklığında olduğu gibi çap büyüdükçe merkez sıcaklığı daha yavaş bir şekilde yükselmiştir. Şekil 3.9'da verilen yüzey sıcaklığının zamanla değişimine kıyasla linyit numunesinin merkez sıcaklığı daha yavaş bir şekilde yükselmektedir. Doyma sıcaklığına erişmesi numune yüzey sıcaklığına göre daha geç olmaktadır. Deney sonunda 20 mm çapındaki numunenin merkez sıcaklığı 92 °C, 30 mm

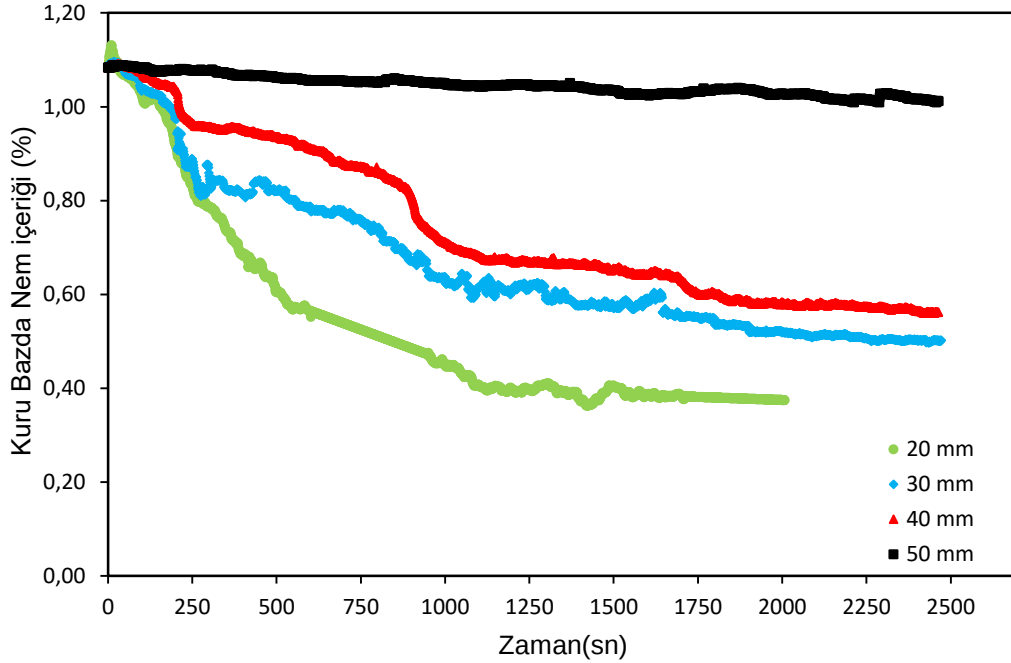
çapındaki numuneninki 90°C, 40 mm çapındaki numunenunki 87°C ve 50 mm çapındaki numuneninki ise 85°C sıcaklığına yükselmiştir.



Şekil 3.11 Linyit numunelerinin kızgın buhar ile kurutulması esnasında kurutma hızının zamanla değişimi

Şekil 3.11'de ise farklı çaplardaki linyit numunelerinin 120 °C sıcaklığında ve atmosfer basıncındaki kızgın buharla kurutulması esnasındaki kurutma hızının zamanla değişimi görülmektedir. Linyit numunesinin çapı azaldıkça kurutma hızı artmıştır. Çünkü büyük çaplı numunelerin yüzey alanı daha büyüktür ve aynı sıcaklığa erişmek için daha fazla ısıya ihtiyaç duyarlar. Yapılan deneysel çalışmaların süresi yaklaşık 45 dakika olduğundan sabit hızla kurutma periyodundan sonra gelen azalan hız periyodu grafiklerde görülmemektedir. Kurutma işlemi süresince anlık olarak ölçülen numune ağırlığı sayesinde kurutma esnasında nem miktarında meydana gelen değişimler hesaplanabilmektedir. Şekil 3.11'de 20 mm, 30 mm, 40 mm ve 50 mm çapındaki linyit numunelerinin kızgın buharla kurutulması sırasında nem içeriğinin zamanla değişimi gösterilmiştir. Nem içeriğindeki en hızlı düşüş en küçük çapa sahip 20 mm' lik linyit numunesinde görülmektedir. En yavaş nem içeriği düşüşü ise en büyük çapa sahip 50 mm'lik linyit numunesinde meydana gelmiştir. 2000 saniye sonundaki nem miktarlarına baktığımızda 20 mm çapındaki numune için % 37,5, 30 mm çapındaki numune için % 51,8, 40 mm çapındaki

numune için %58,2, 50 mm çapındaki numune için ise %1,02 olduğu görülmektedir. Grafikten de görüldüğü gibi çap arttıkça kurutma hızının düşmesine bağlı olarak nem miktarındaki azalma yavaşlamaktadır.



Şekil 3.12 Linyit numunelerinin kızgın buhar ile kurutulması esnasında ön ısıtma periyodunda ıslak bazda nem içeriğinin zamanla değişimi

3.2 Sıcak Hava İle Kurutma

Sıcak hava ile kurutma deneylerinde elde edilen kurutma karakteristiklerinin buhar ile kurutma ile karşılaştırma yapabilmesi için çap ve sıcaklıklar aynı seçilmiştir. Bu nedenle 20, 30, 40 ve 50 mm çaplar için hava sıcaklığı 120 °C'ye set edilerek deneyler yapılmıştır. Ancak daha önceki bölümlerde de bahsedildiği üzere özellikle ön ısıtma aşamasında bazı farklılıklar bulunmaktadır.

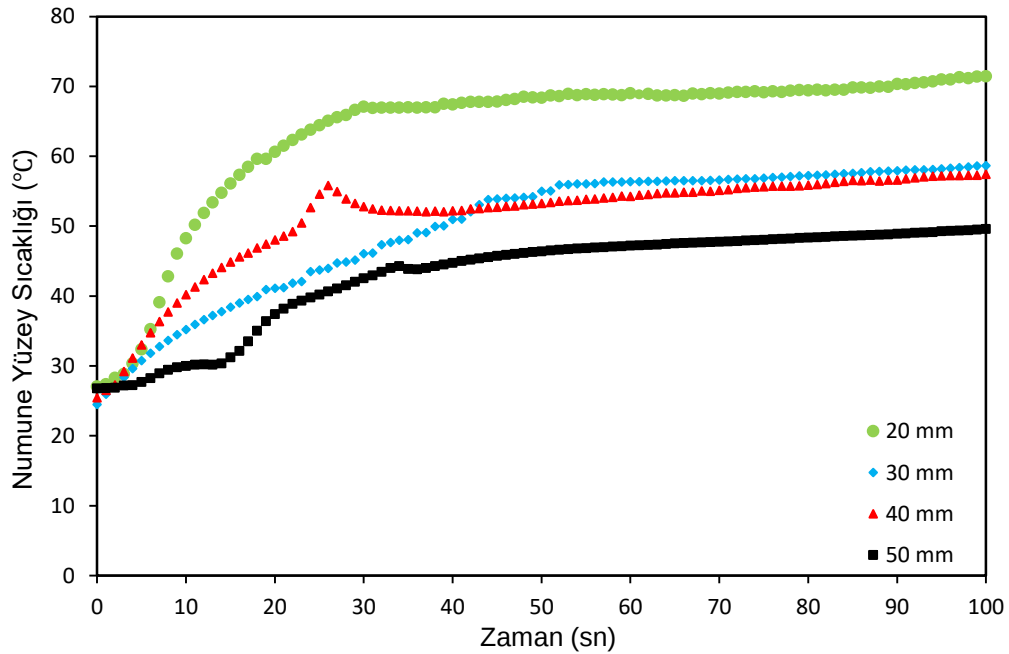
3.2.1 Ön Isıtma Periyodu

Sıcak hava ile kurutma deneyleri yapılırken deney başlangıcında numune yüzeyinde hızlı bir ısınma gerçekleşir. Sıcak havadan linyit yüzeyine geçen ısı enerjisi ile yüzey sıcaklığı aniden yükselir. Ön ısıtma periyodu adı verilen bu evrede kütle transferinin yok denecek kadar az olduğu görülmüştür. Sadece ısı transferi olduğu kabul edilmektedir. Sıcak hava ile kurutma işlemine başlamadan önce linyit numunesinin yüzey sıcaklığı ortam sıcaklığıyla dengede olup 25-28°C sıcaklıklarındadır. Kurutma

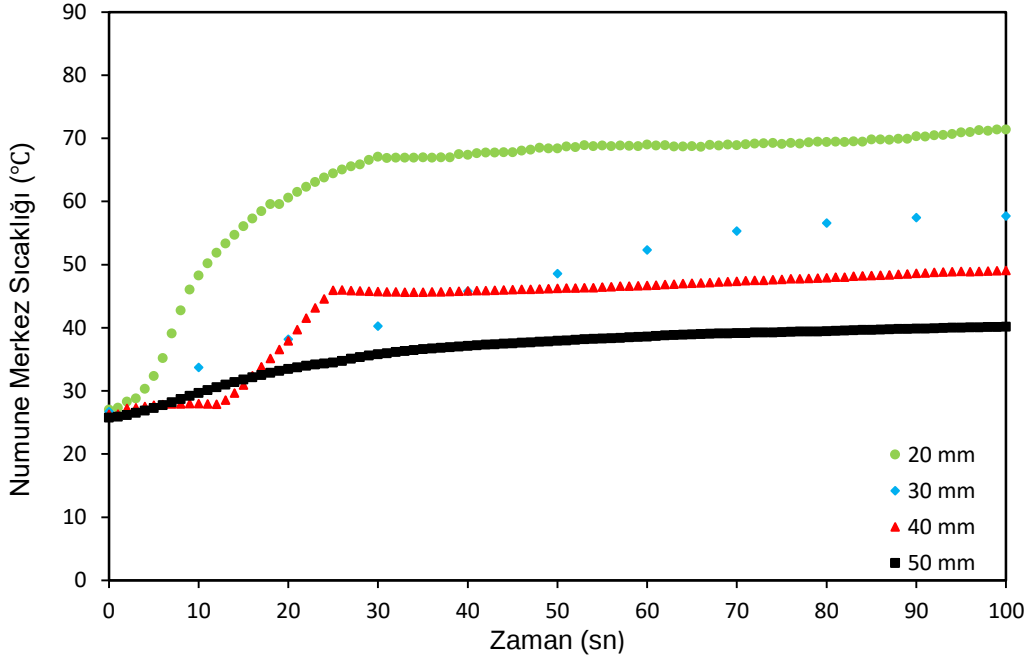
odasındaki hava sıcaklığı 120°C de sabitlendikten sonra gönderilen linyit numunesinin sıcaklığı hızlı bir şekilde yükselir. Bu periyod gerçekleşirken numune kütlesinde herhangi bir değişme olmadığı kabul edilmiştir. Sadece numune sıcaklığının ani bir şekilde arttığı bu periyod oldukça kısadır.

Deneysel veriler göz önünde bulundurularak bu periyodun her bir numune için ne kadar uzunlukta olduğu belirlenmiştir. Ön ısıtma periyodunun süresi deneyler sırasında ölçülen numune kütlesinin sabit kaldığı fakat sıcaklığının hızla yükseldiği zaman dilimi olarak belirlenmiştir. Yani deney başlangıcından numune ağırlığının azalamaya başladığı zamana kadar olan kısım ön ısıtma periyodudur.

50 mm için 40 saniye, 40 mm için 26 saniye, 30 mm için 19 saniye ve 20 mm için 7 saniye sürmektedir. Bu süre sonunda numune sıcaklıkları her çapa göre değişmekte olup 40-45 °C arasındadır. Şekil 3.13’de farklı çaplardaki linyit numunelerinin 120 °C sıcaklığındaki sıcak hava ile kurutulurken ön ısıtma periyodunda yüzey sıcaklıklarının zamanla değişimlerini görülmektedir. Çap büyüdükçe yüzey sıcaklığı daha yavaş bir şekilde yükselmiştir. En küçük çaplı numune olan 20 mm çapındaki numune aynı süre içerisinde en yüksek sıcaklığa ulaşmıştır.



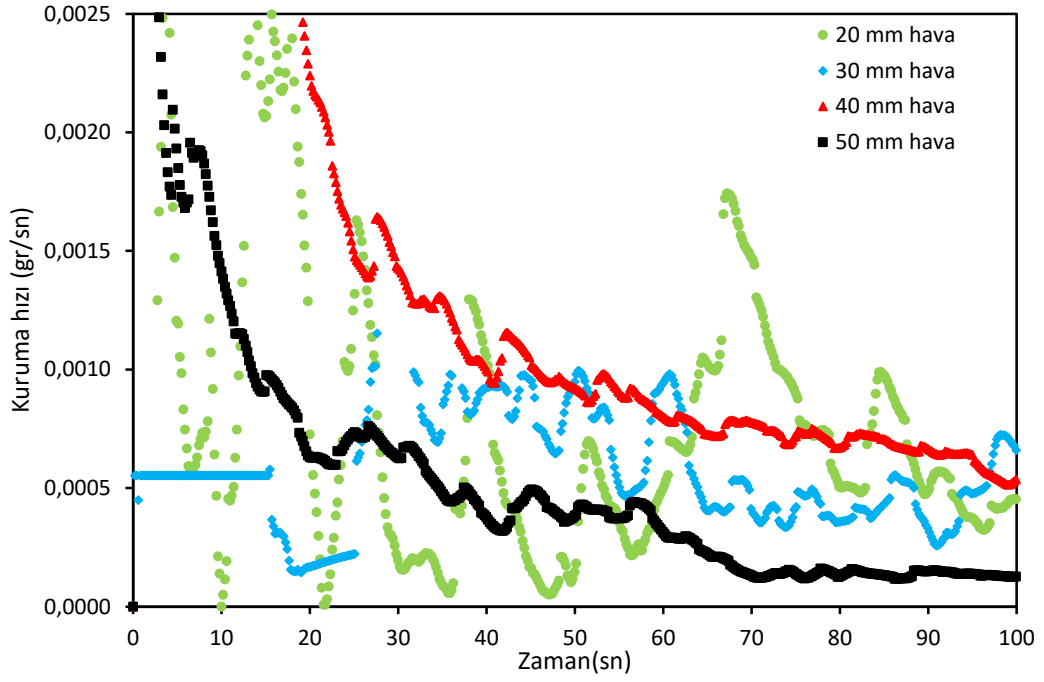
Şekil 3.13 Linyit numunelerinin sıcak hava ile kurutulması esnasında ön ısıtma periyodunda yüzey sıcaklıklarının zamanla değişimi



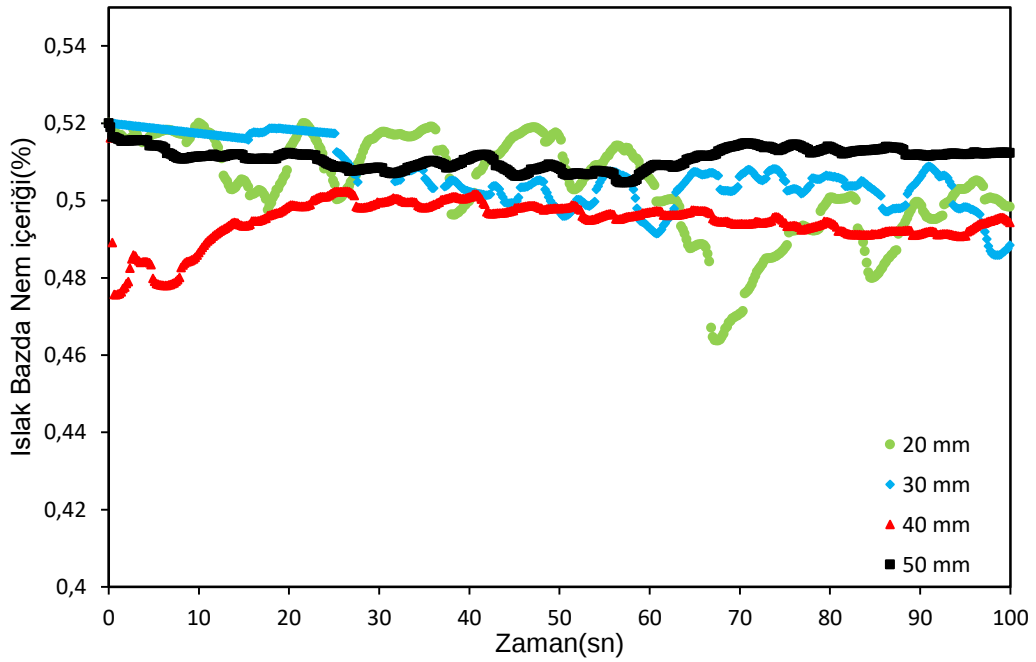
Şekil 3.14 Linyit numunelerinin sıcak hava ile kurutulması esnasında ön ısıtma periyodunda merkez sıcaklıklarının zamanla değişimi

Şekil 3.14'te ise farklı çaplardaki linyit numunelerinin 120 °C sıcaklığındaki sıcak hava ile kurutulurken merkez sıcaklıklarının zamanla değişimlerini görülmektedir. Yüzey sıcaklığında olduğu gibi çap büyüdükçe merkez sıcaklığı daha yavaş bir şekilde yükselmiştir. Şekil 3.10'da verilen yüzey sıcaklığının zamanla değişimine kıyasla linyit numunesinin merkez sıcaklığı daha yavaş bir şekilde yükselmektedir. Doyma sıcaklığına erişmesi numune yüzey sıcaklığına göre daha geç olmaktadır.

Şekil 3.15' te farklı çaplardaki linyit numunelerinin 120°C sıcak havada ve 1 atm basınçta kurutulması esnasında ön ısıtma periodunda kurutma hızının zamanla değişimi görülmektedir. Linyit numunesinin çapı arttıkça kurutma hızı azalmaktadır. Bunun sebebi ise küçük çaplardaki numunenin daha hızlı bir şekilde ısınması ve nemini kaybetmesidir. Kızgın buharla kurutmada görülen yoğunlaşma ve ilk buharlaşma periyodu sıcak hava ile kurutmada görülmediği için kurutma hızı her zaman pozitifdir. En küçük çaplı numune olan 20 mm çapındaki numunenin kütlesi küçük olduğunda hız değerleri geniş bir aralıkta salınım yapmaktadır.



Şekil 3.15 Linyit numunelerinin sıcak hava ile kurutulması esnasında ön ısıtma periyodunda kurutma hızının zamanla değişimi



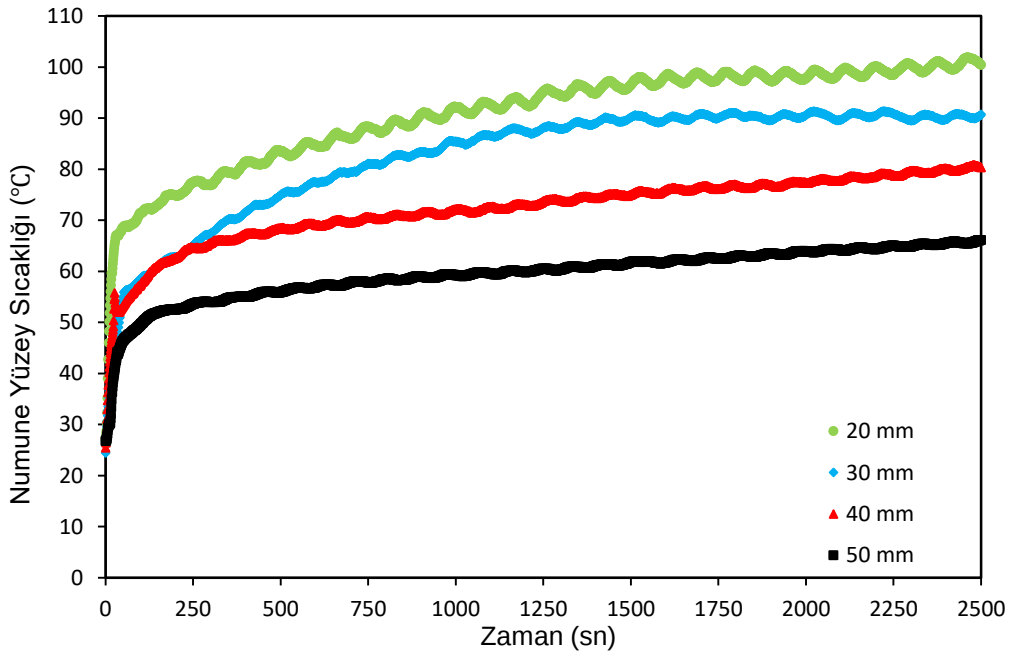
Şekil 3.16 Linyit numunelerinin sıcak hava ile kurutulması esnasında ön ısıtma periyodunda ıslak bazda nem içeriğinin zamanla değişimi

Şekil 3.16'da 20 mm, 40mm, 30 mm ve 50 mm çapındaki linyit numunelerinin sıcak hava ile kurutulması sırasında ön ısıtma periyodunda nem içeriğinin zamanla

değişimi gösterilmiştir. Kızgın buharla kurutmaya benzer olarak numune çapı küçüldükçe nem içeriğinin azalması daha hızlı bir şekilde olmaktadır. Belirli bir zaman sonrasında bakılacak olursa en düşük nem içeriği 20 mm çapındaki numuneye aittir, en yüksek nem içeriği ise 50 mm çapındaki numuneye aittir.

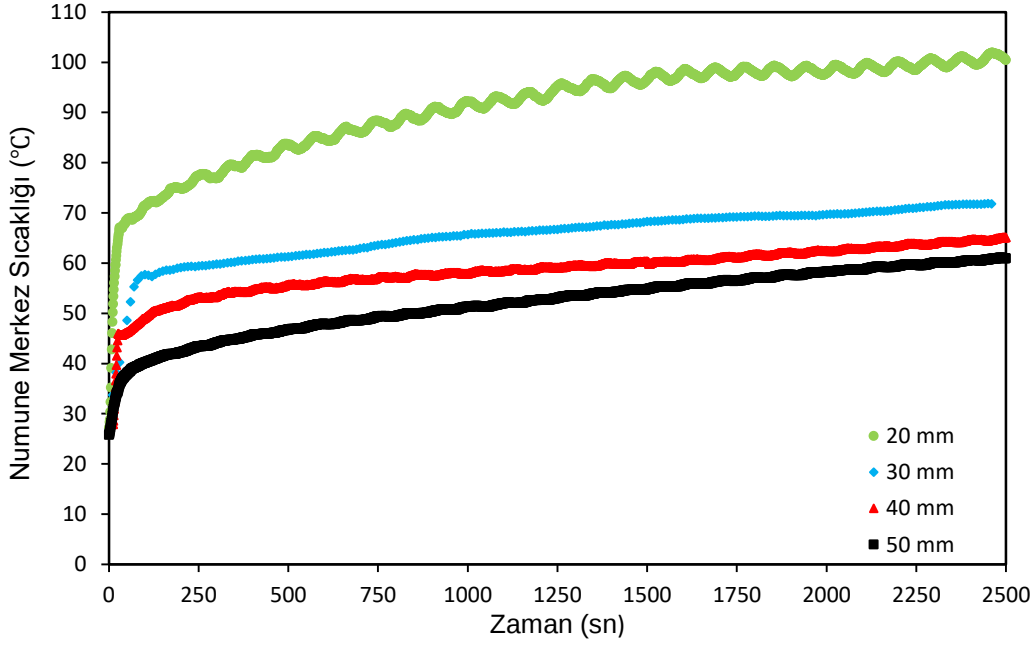
3.2.2 Azalan Hızda Kuruma Periyodu

Sıcak hava ile kurutmada ısıtma periyodundan sonra sıcaklık yükselmeye devam etmiş ve aynı zamanda da numune kütlesi azalmıştır. Sıcaklığın sabit hız periyodunda olduğu gibi doyma sıcaklığında sabit kalmamasından dolayı sabit hız periyodunun gözlenmediği anlaşılmaktadır. Azalan hız periyodu olarak belirlenen bu periyotta linyit numunesinin yüzey sıcaklığı yükselmeye devam ederken aynı zamanda numuneden sürekli nem kaybı olmaktadır.



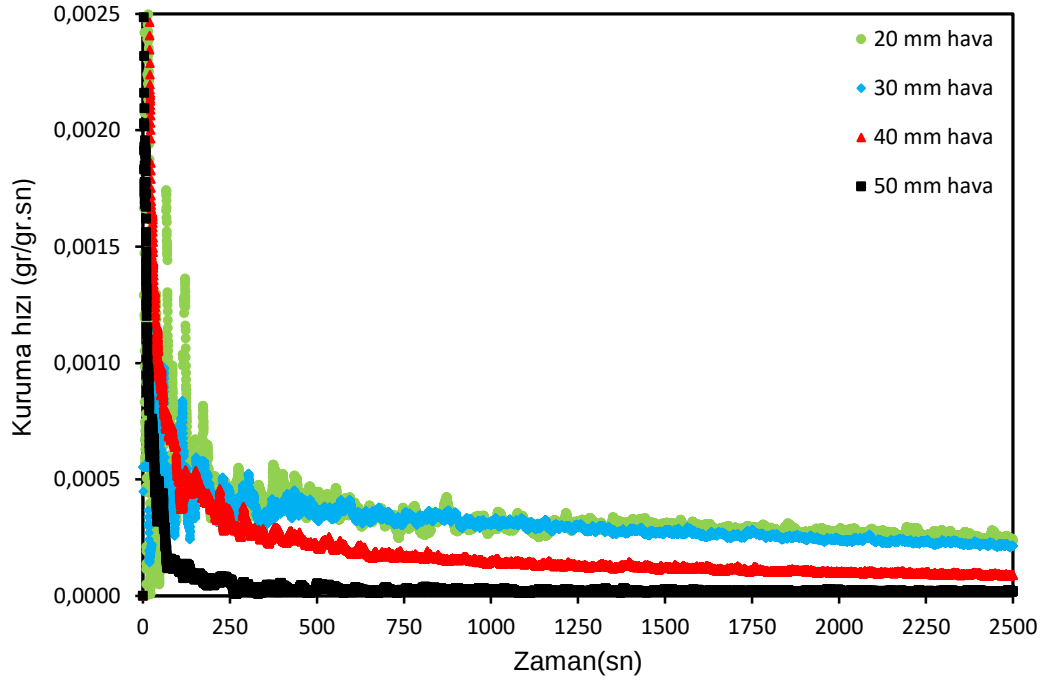
Şekil 3.17 Linyit numunelerinin sıcak hava ile kurutulması esnasında azalan hızda kuruma periyodunda yüzey sıcaklıklarının zamanla değişimi

Şekil 3.17'deki grafik incelendiğinde çap büyüdükçe yüzey sıcaklığı daha yavaş bir şekilde yükseldiği görülmektedir. En küçük çaplı numune olan 20 mm çapındaki numune aynı süre içerisinde en yüksek sıcaklığa ulaşmıştır. Deney sonunda 20 mm çapındaki numune 100°C, 30 mm 91°C, 40 mm çapındaki numune 80°C, 50 mm çapındaki numune 66°C sıcaklığındadır.

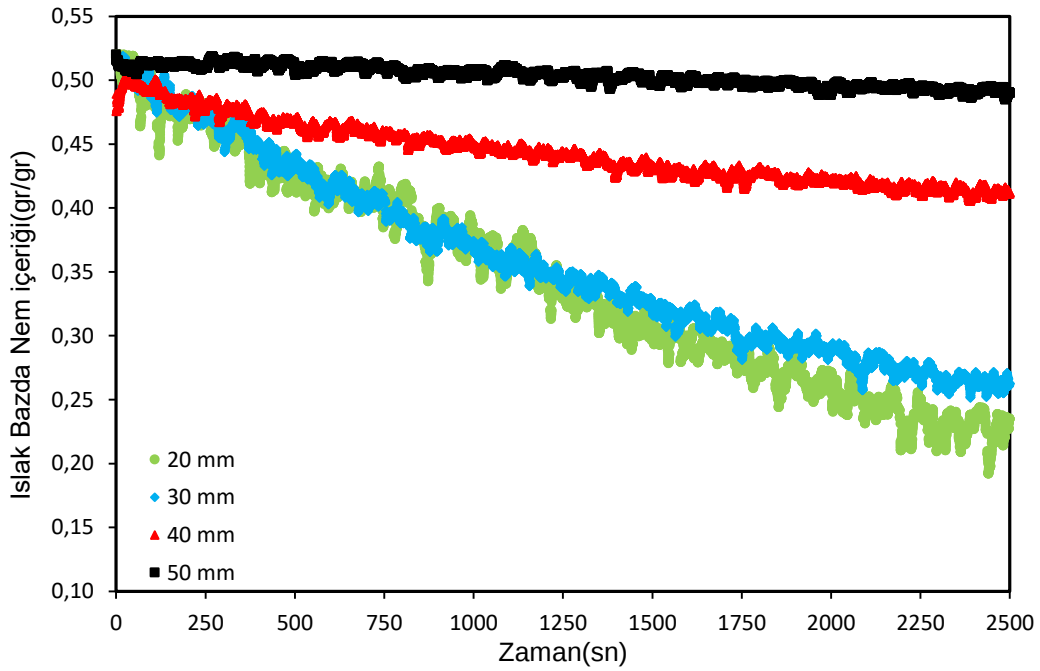


Şekil 3.18 Linyit numunelerinin sıcak hava ile kurutulması esnasında azalan hızda kuruma periyodunda merkez sıcaklıklarının zamanla değişimi

Şekil 3.18’de görüldüğü üzere yüzey sıcaklığında olduğu gibi çap büyüdükçe merkez sıcaklığı daha yavaş bir şekilde yükselmiştir. Şekil 3.17’de verilen yüzey sıcaklığının zamanla değişimine kıyasla genel olarak linyit numunesinin merkez sıcaklığı daha yavaş bir şekilde yükselmektedir. Doyma sıcaklığına erişmesi numune yüzey sıcaklığına göre daha geç olmaktadır. Deney sonunda 20 mm çapındaki numune 100°C, 30 mm 71°C, 40 mm çapındaki numune 65°C, 50 mm çapındaki numune 61°C sıcaklığındadır. Şekil 3.19’ da farklı çaplardaki linyit numunelerinin 120°C sıcak havada ve 1 atm basınçta kurutulması esnasında azalan hızda kurutma periodunda kurutma hızının zamanla değişimi görülmektedir. Linyit numunesinin çapı arttıkça kurutma hızı azalmaktadır. Bu durum kızgın buharla kurutmada görülmüştür. Kızgın buharla kurutmada görülen yoğuşma ve ilk buharlaşma periyodu sıcak hava ile kurutmada görülmediği için kurutma hızı her zaman pozitifdir. En küçük çaplı numune olan 20 mm çapındaki numunenin kütlesi küçük olduğunda hız değerleri geniş bir aralıkta salınım yapmaktadır. Bu durum 20 mm’lik numunenin kurutma ortam şartlarının istenmeyen ani değişimlerine daha hızlı adapte olması ile açıklanabilir.



Şekil 3.19 Linyit numunelerinin sıcak hava ile kurutulması esnasında azalan hızda kurutma periyodunda kurutma hızının zamanla değişimi



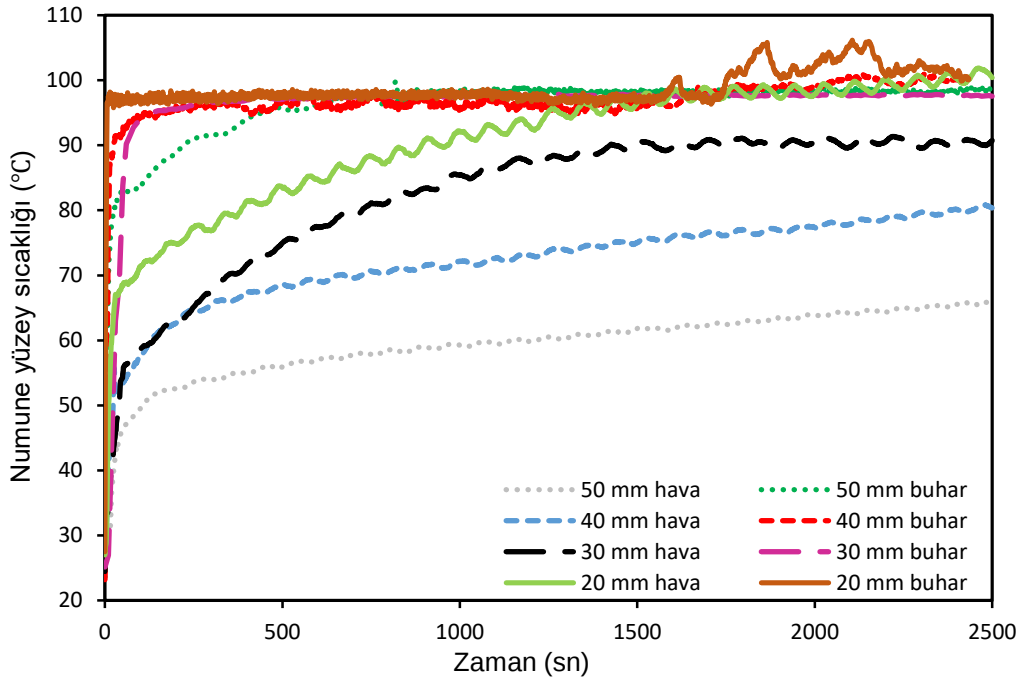
Şekil 3.20 Linyit numunelerinin sıcak hava ile kurutulması esnasında azalan hızda kuruma periyodunda ıslak bazda nem içeriğinin zamanla değişimi

Şekil 3.20’ de 20 mm, 40mm, 30 mm ve 50 mm çapındaki linyit numunelerinin sıcak hava ile kurutulması sırasında azalan hızda kuruma periyodunda nem içeriğinin

zamanla değişimi gösterilmiştir. Kızgın buharla kurutmaya benzer olarak numune çapı küçüldükçe nem içeriğinin azalması daha hızlı bir şekilde olmaktadır. Belirli bir zaman sonrasında bakılacak olursa en düşük nem içeriği 20 mm çapındaki numuneye aittir, en yüksek nem içeriği ise 50 mm çapındaki numuneye aittir.

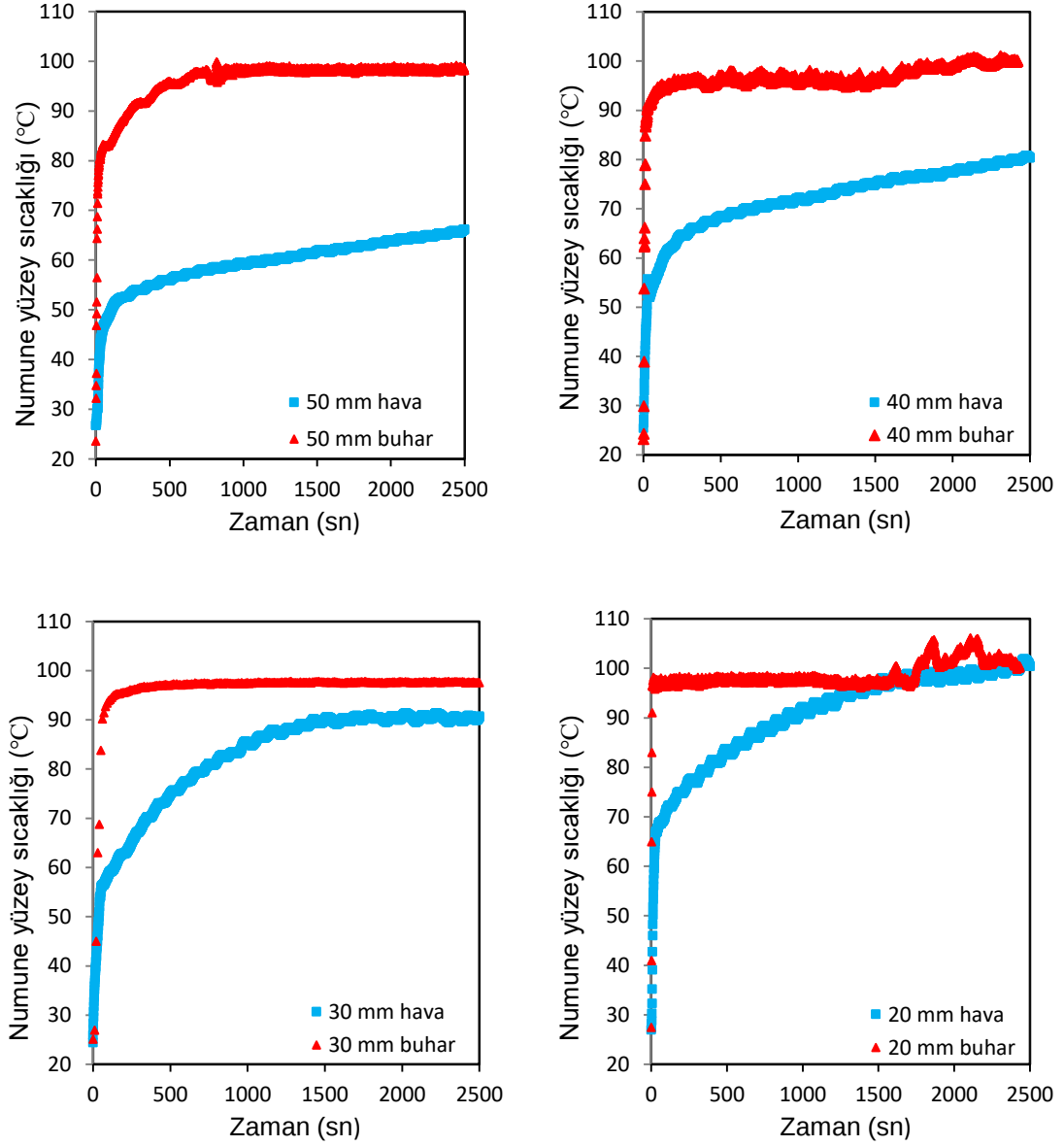
3.3 Kızgın Buharla Kurutma ve Sıcak Hava ile Kurutmanın Karşılaştırılması

20 mm, 30 mm, 40 mm ve 50 mm çapındaki linyit numuneleri için sıcak hava ve kızgın buharla yapılan deneyler aynı grafik üzerinde ve her numune için ayrı ayrı gösterilerek karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.21 Sıcak hava ve kızgın buhar ile kurutmada yüzey sıcaklıklarının zamanla değişimi

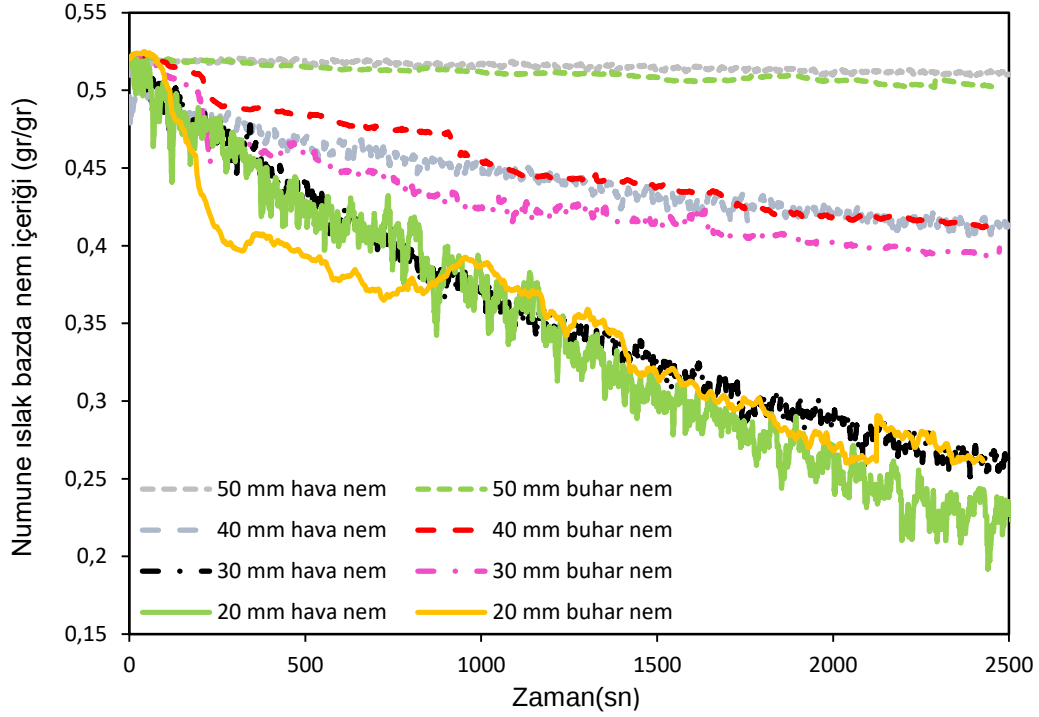
Kızgın buharla kurutmada yüzey sıcaklığı sıcak hava ile kurutmaya göre daha hızlı bir şekilde artmaktadır. 50 mm çapındaki numune sıcak hava ile kurutulduğunda 2500 saniye sonunda 66°C'ye çıkmışken kızgın buharla kurutulduğunda 32 saniye sonra 100°C'ye ulaşmıştır. 40 mm çapındaki numune sıcak hava ile belirlenen süre içerisinde kurutulduğunda yüzey sıcaklığı 80°C'ye çıkmıştır. Kızgın buhar ile kurutulduğunda ise 29 saniye sonra atmosferik şartlarda suyun doyma sıcaklığına yükselmiştir. 30 mm çapındaki numune ise Şekil 3.22'den görüleceği üzere sıcak hava ile kurutulduğunda numune yüzey sıcaklığı 90°C'ye çıkmıştır.



Şekil 3.22 Sıcak hava ve kızgın buhar ile kurutmada yüzey sıcaklıklarının farklı çaplar için ayrı ayrı zamanla değişimi

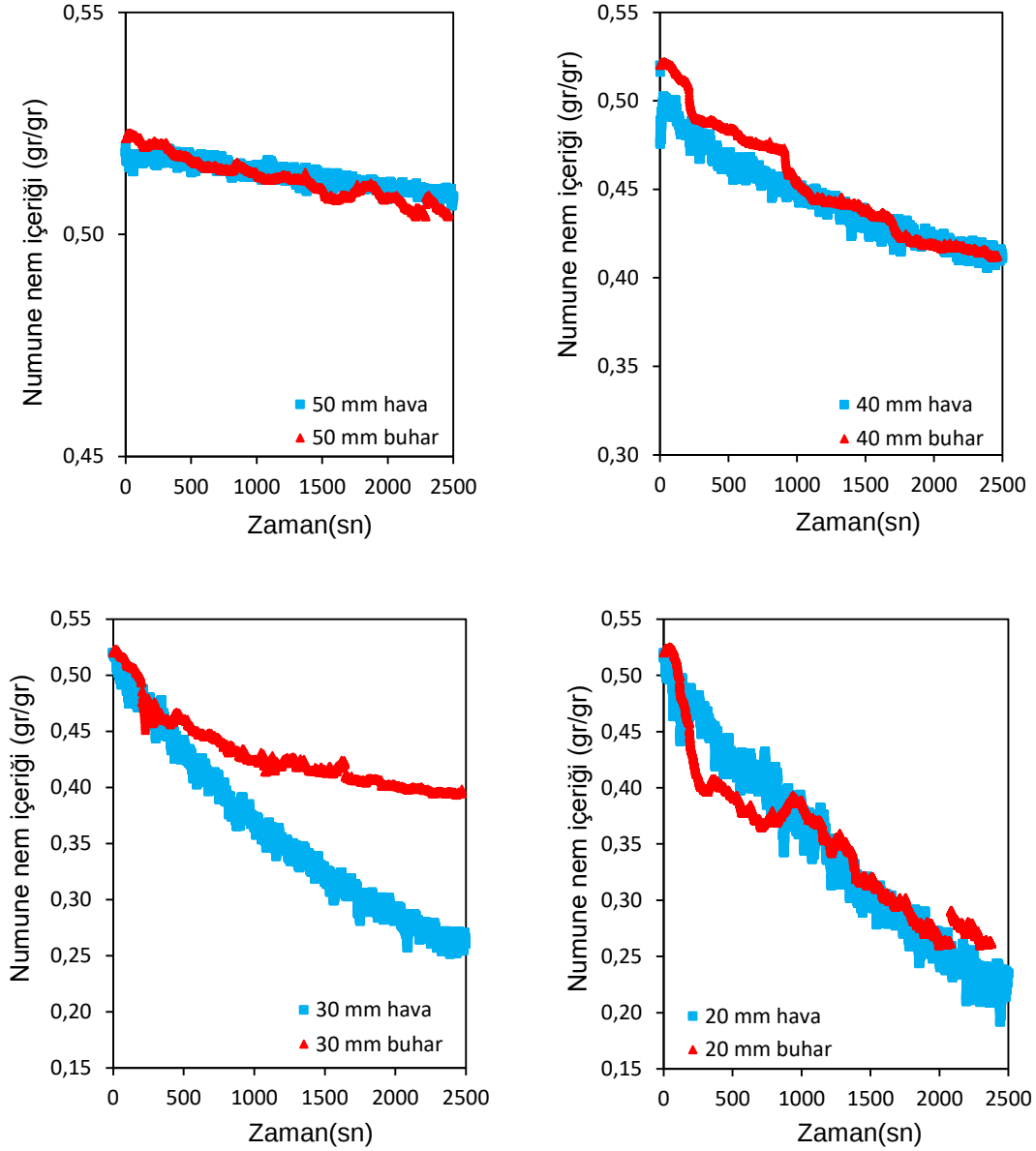
Kızgın buhar ile kurutulduğunda ise 100°C'ye çıkması sadece 15 saniye sürmüştür. Küçük çaptaki numunelerin daha küçük yüzey alanına sahip oldukları için daha çabuk ısındığı şekilde de görülmektedir. Yapılan deneylerdeki en küçük çaptaki 20 mm'lik numune sıcak hava ile kurutulduğunda 100°C'ye kadar yükselmiştir. Kızgın buhar ile kurutulduğunda ise 100°C'ye çıkması 11 saniye sürmüştür. Kızgın buharla kurutulan numunelerin yüzey sıcaklıklarının daha hızlı yükselmesinin sebebi kurutma başlangıcında meydana gelen yoğuşmadır. Yoğuşma ısı transfer katsayısı taşınım ısı transfer katsayısından çok daha büyük olduğu için kızgın buharla

kurutmada yoğuşma esnasında açığa çıkan ısıda oldukça yüksektir ve bu ısı numuneye aktarılmıştır. Bu sebeple kızgın buhara maruz kalan numune üzerinde yoğuşma periyodunda numune yüzey sıcaklığı hızlı bir şekilde yükselir.



Şekil 3.23 Sıcak hava ve kızgın buhar ile kurutmada numunelerin ıslak bazda nem içeriğinin zamanla değişimi

Şekil 3.23 ve 3.24'te sıcak hava ve kızgın buharla kurutulmuş linyit numunelerinin ıslak bazda nem içeriğinin değişimi görülmektedir. Kızgın buharla kurutmada başlangıçta meydana gelen yoğuşma sebebiyle numune ağırlığında artış meydana gelir. Buda ıslak bazda nem içeriğinde yükselmesine sebep olur. Ön ısıtma, yoğuşma ve ilk buharlaşma periyotlarından sonra numune ağırlığı azalmaya başlar. Sıcak hava ile kurutmada nem içeriği azalan hız periyodundan itibaren kızgın buhardan daha hızlı bir şekilde düşmeye başlar. 20 mm çapındaki numune sıcak hava ile kurutmada 2500 saniye sonunda % 21 nem içeriğine kadar, kızgın buhar ile kurutmada ise 2500 saniye sonunda % 26 nem içeriğine kadar düşmüştür. 30 mm çapındaki numune sıcak hava ile kurutmada % 27 nem içeriğine kadar, kızgın buhar ile kurutmada ise % 39 nem içeriğine kadar düşmüştür.



Şekil 3.24 Sıcak hava ve kızgın buhar ile kurutmada numunelerin ıslak bazda nem içeriğinin farklı çaplar için ayrı ayrı zamanla değişimi

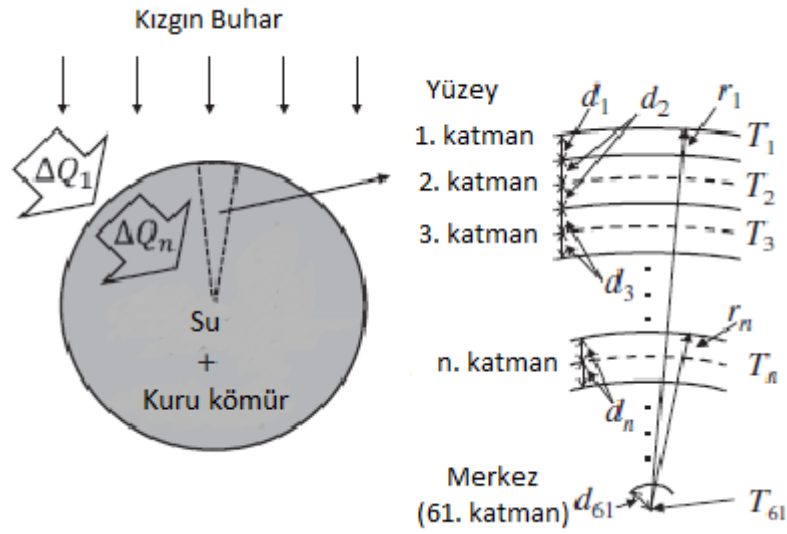
40 mm çapındaki numune sıcak hava ile kurutmada % 40 nem içeriğine kadar, kızgın buhar ile kurutmada ise % 41 nem içeriğine kadar düşmüştür. 50 mm çapındaki numune sıcak hava ile kurutmada % 50 nem içeriğine kadar, kızgın buhar ile kurutmada ise % 51 nem içeriğine kadar düşmüştür.

Kömür Kurutmanın Matematik Modellemesi

Kurutma, bir partikül ile çevresi arasında ve parçacığın içerisindeki ısı ve kütle transferlerini içeren karmaşık bir olaydır (Dejahang, 2015). Kurutma çalışmalarında en yaygın kullanılan kurutma akışkanlardan kızgın buhar ve sıcak hava ile kurutma çalışmaları literatür özetinde incelenmiştir. Bu çalışmalarda sıklıkla rastalanan analitik ve nümerik modellere bakıldığında birçoğunun kurutma hızının ve nem içeriğinin zamanla değişimini veren ifadeler olduğu görülmektedir. Bu modeller gerek kurutma hızını gerekse nem içeriğinin değişimini elde etmeyi amaçlayan deneysel verilerden yararlanan ince tabaka modelleridir. Nümerik yöntemler ile oluşturulan bu ampirik ve yarı ampirik modeller deneysel verilerin doğruluğunu kontrol etmek amacıyla kullanılırlar. Bu modellerin en çok kullanılanı Dincer ve Hussain (2003), ile Midilli vd. (2002), oluşturdukları modellerdir. Bu modeller oluşturulurken yapılan deneylerdeki verilere ihtiyaç vardır. Bu çalışmanın amaçlarından biriside deneye gerek kalmaksızın kömür kurutma için kullanılabilecek bir model oluşturmak olduğu için bahsedilen modellerin bu çalışmaya uygun olmadığı değerlendirilmiştir. Bu modeller daha çok gıda kurutma işlemlerinde uygulanmaktadır ve kurutma yapılan maddeye özel ifadeleri barındırmaktadır.

Literatürde mevcut olan bir başka çalışmada ince tabaka modeli bu kez linyit için kullanılmıştır. Kiriya vd. (2013, 2014), oluşturduğu matematiksel modelde linyit numunesinin izotropik olduğunu kabul edilerek, tek boyutlu bir model oluşturulmuştur. 30 mm çapındaki parçacık merkez ve yüzey katmanlar hariç olmak üzere Şekil 4.1’de görüldüğü gibi 61 tane eşmerkezli dairesel kabuğa bölünmüştür. 61 katman yüzeyden merkeze kadar numaralandırılmıştır ve dış yarıçap yani n . katman r_n ile gösterilmiştir. Her katmandaki ağırlık ve sıcaklığın homojen olduğu kabul edilmiştir. Yüzey sıcaklığı 100 °C ye yükselinceye kadar olan kısımda yoğunlaşma olduğu, 100 °C’ nin üzerine çıktığında ise buharlaşmanın başladığı düşünülerek yüzeydeki ısı transferi, parçacığın içerisindeki ısı transferi eşitlikleri

oluşturulmuştur. Çalışmada radyasyonla ısı transferide dikkate alınmış ve bu nedenle sonuca etkileri değerlendirilmiştir.



Şekil 4.1 Kiriya vd. matematiksel modeli [69]

Yüzey sıcaklığı T_1 100°C 'nin altındayken yüzeye olan ısı transferi buharın yoğuşmasıyla gerçekleşir. Yüzeydeki yoğuşma sıcaklığı 100°C kabul edilirse, yüzeye olan ısı transferi :

$$\Delta\dot{Q}_1 = \Delta\dot{Q}_{\text{cond}} = h_{\text{cond}} 4\pi R_1^2 (100 - T_1) \Delta t \quad T_1 < 100 \quad (4.1)$$

$$\Delta\dot{Q}_1 = \Delta\dot{Q}_{\text{conv}} + \Delta\dot{Q}_{\text{rad}} \quad T_1 \geq 100 \quad (4.2)$$

$$\Delta\dot{Q}_1 = h_{\text{conv}} 4\pi R_1^2 (T_\infty - T_1) \Delta t + \epsilon \cdot \sigma \cdot 4\pi R_1^2 (T_\infty^4 - T_1^4) \Delta t \quad (4.3)$$

Dış katmandan n. katmana olan iletimle ısı girişi, $\Delta\dot{Q}_n$,

$$\Delta\dot{Q}_n = k_{n-1,n} / (d_{n-1} + d_n) \cdot 4\pi R_1^2 (T_{n-1} - T_n) \Delta t \quad 2 \leq n \leq 61 \quad (4.4)$$

Denklem 4.4' te $k_{n-1,n}$ bitişik katmanlar arasındaki ısı iletkenlik katsayısı, d_n ve d_{n-1} katmanlar arası mesafedir n ise burada katman sayısını temsil eder. Herhangi bir katmana ısı girişi ve çıkışı arasındaki fark, $\Delta\dot{Q}_n - \Delta\dot{Q}_{n-1}$, sıcaklığı yükselmesi ya da linyit içerisindeki suyun buharlaşmasına sebep olur.

$$\Delta\dot{Q}_n - \Delta\dot{Q}_{n+1} = (c_c\dot{m}_{c,n} + c_w(\dot{m}_{w,n} - \Delta\dot{m}_{\text{evap},n})).\Delta T_n + \Delta\dot{m}_{\text{evap},n}\Delta H_{\text{evap}} \quad (4.5)$$

$$\Delta\dot{Q}_n - \Delta\dot{Q}_{n+1} = (c_c\dot{m}_{c,n} + c_w\dot{m}_{w,n}).\Delta T_n \quad T_1 < 100 \quad (4.6)$$

$$\Delta\dot{Q}_n - \Delta\dot{Q}_{n+1} = \dot{m}_{\text{evap},n}L \quad T_1 = 100 \quad (4.7)$$

Bu çalışmada kullanılamamasının sebebi açıklanan modeldeki bazı parametrelerin yapılan deneylerde ölçümünün oldukça zor olmasıdır.

Chen ve Agarwal (2000) ise yaptıkları çalışmada bir su damlacığının hava ve buhar ile kurutulmasından yola çıkarak model oluşturmuşlardır.

$$\frac{\rho_w c_{p,w} R_0}{3} \frac{dT_p}{dt} = h_{\text{conv}}(T_g - T_p) + \rho_w h_{fg} \frac{dR_0}{dt} \quad (4.8)$$

Kurutma prosesi yine periyodlara ayrılarak incelenmiştir. İlk periyodlarda ısı transferinin, son periyodlarda ise kütle transferinin etkin olduğu belirtilmiştir. Çalışmada radyasyonla ısı transfer miktarı ihmal edilmiştir. Kızgın buharla kurutmanın ilk aşaması olan yoğunlaşma kısmı için enerji dengesi;

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \{ [\rho_p c_{p,p} + \rho_p X_{kb,in} c_{p,w} + (\phi^3 - 1) \rho_w c_{p,w}] T_p \} \\ = \frac{3h_{\text{conv}}}{R_0} \phi^2 [T_g - T_p] - \frac{3\phi h_{fg}}{R_0} (-\rho_w \frac{dR}{dt}) \end{aligned} \quad (4.9)$$

Kütle dengesi ise denklem 4.10 ile ifade edilmiştir.

$$-\rho_w \frac{dR_0}{dt} = \sqrt{\frac{M_{H_2O}}{2\pi R_u}} \left[\frac{P_{\text{sat}}(T_p)}{\sqrt{T_p}} - \frac{P_{\text{atm}}}{\sqrt{T_\infty}} \right] \quad (4.10)$$

Hava ile kurutmada buharla kurutmada olduğu gibi enerji dengesi için denklem 4.8 kullanılmış olup, kütle dengesi için ise denklem 4.11 kullanılmıştır.

$$-\rho_w \frac{dR_0}{dt} = E \left(P_{\text{sat}}(T_p) \sqrt{\frac{M_w}{2\pi R_u T_p}} P_{\text{atm}} \sqrt{\frac{M_w}{2\pi R_u T_\infty}} \right) \quad (4.11)$$

Bu model, bu çalışmadaki kömür ve deney şartları için çalışılmış ancak elde edilen sonuçların deneysel sonuçlar ile uyumlu olmadığı görülerek bu çalışma için uygun bir model olmadığı sonucuna varılmıştır. Bunun sebeplerinden birisi radyasyonla ısı transferinin modelde ihmal edilmesidir. İkinci sebep ise modelde bir su damlacığının kuruması göz önüne alınmıştır. Fakat kömürün içindeki kapiler yapıdan dolayı kuruma periyodundaki buharlaşma hızı su damlasındaki değerlerden daha düşük olmaktadır. Sonuç olarak bu model kömür tanesinin kurutulması için kullanıldığında buharlaşma hızı deneysel olarak elde edilen değerlerden yüksek çıkmakta ve deneysel sonuçlar ile uyum görülmemektedir.

Kızgın buharla kurutmanın matematiksel olarak modellenmesi amacıyla Hamawand (2013) tarafından yapılan bir başka çalışmada daha önceden incelemiş olduğumuz literatürdeki Chen ve Agarwal (2000) tarafından oluşturulan matematiksel modelden faydalanılmış ve bu modele ek olarak ilk yoğuşma ve ısınma periyodunda termodinamik dengeden yola çıkılarak parçacık sıcaklığı ve yarıçapı için aşağıdaki eşitlikler oluşturulmuştur:

$$T_p^{j+1} = \frac{\left[\rho_p c_{p,p} + \rho_w c_{p,w} X_{kb,in} + \left(\left(\frac{R_{i+1}}{R_0} \right)^3 - 1 \right) \rho_w c_{p,w} \right] T_p^j + \Delta t \left(\frac{3h_{conv}}{R_0} \left(\frac{R_i}{R_0} \right)^2 (T_g - T_p^j) + \frac{3h_{fg}\rho_w}{R_0} \left(\frac{R_i}{R_0} \right)^2 \left(\frac{R_{i+1} - R_i}{\Delta t} \right) \right)}{\left[\rho_p c_{p,p} + \rho_w c_{p,w} X_{kb,in} + \left(\left(\frac{R_{i+1}}{R_0} \right)^3 - 1 \right) \rho_w c_{p,w} \right]} \quad (4.12)$$

$$R_{i+1} = R_i - \frac{\Delta t}{\rho_w} \sqrt{\frac{M_{H_2O}}{2\pi R_u}} \left[\frac{P_{sat}(T_p^j)}{\sqrt{T_p^j}} - \frac{P_{atm}}{\sqrt{T_g}} \right] \quad (4.13)$$

Burada i ve j değişken konum ve zamanı temsil etmektedir. Sabit hızda kuruma periyodu için ıslak bazda nem içeriğinin ise denklem 4.14 ile bulunabileceği ifade edilmiştir.

$$X_{yb} = X_{yb,ini} - h_{conv} \left[\frac{3(T_\infty - T_p)dt}{h_{fg}[\rho_w X_{kb} + \rho_w(1 - X_{kb})]R} \right] \quad (4.14)$$

Hamawand (2013) tarafından geliştirilen bu model radyasyonla ısı transferinin de dahil edilmesiyle kızgın buharla kurutmanın sabit hız periyodunda kullanılmıştır.

4.1 Matematiksel Modelleme

Kızgın buhar ve sıcak hava ile kurutma deneylerinde ölçülen yüzey sıcaklığı, kurutma hızı ve nem içeriği değişimlerinin incelenmesiyle deneyler esnasında her iki akışkan içinde farklı periyotlar olduğu belirlenmiştir. Kızgın buharla kurutmada ön ısıtma ve yoğunlaşma, ilk buharlaşma ve sabit hızda kuruma periyotları, sıcak havada ise ön ısıtma ve azalan hızda kuruma periyotları dikkate alınmıştır. Bu sebeple her periyot için farklı model geliştirilmiştir. Geliştirilen modeller EES programı yardımıyla sonlu eleman

Kızgın buhar ve sıcak hava ile kurutmada model oluştururken akışkan sıcaklıkları 120 °C' de sabit ve ortam basıncı atmosferik basıncında olarak kabul edilmiştir. Kurutma ortamında kızgın buhar ve hava hızının 0,4 m/s sabit hızda olduğu kabul edilmiştir. Literatürde dikkate alınmadığı görülen radyasyonla ısı transferi etkisi bu çalışmada yapılan matematiksel modellemelerde dikkate alınmıştır. Modelleme ile yapılan çalışmalarda yapılan kabuller Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1 Model ile hesaplamada yapılan kabuller

ρ_p	1800 (kg /m ³)
c_p	1300 (kJ/kgK)
ε	1
T_g	120°C
T_{doy}	100°C
V	4 (m/s)
P_{atm}	100 kPa

4.1.1 Kızgın Buharla Kurutmanın Modellenmesi

Linyitin düşük basınçta kızgın buhar ve sıcak hava ile kurutulmasının matematiksel modellemesi yapılırken ön ısıtma, yoğunlaşma, ilk buharlaşma ve sabit hızda kurutma

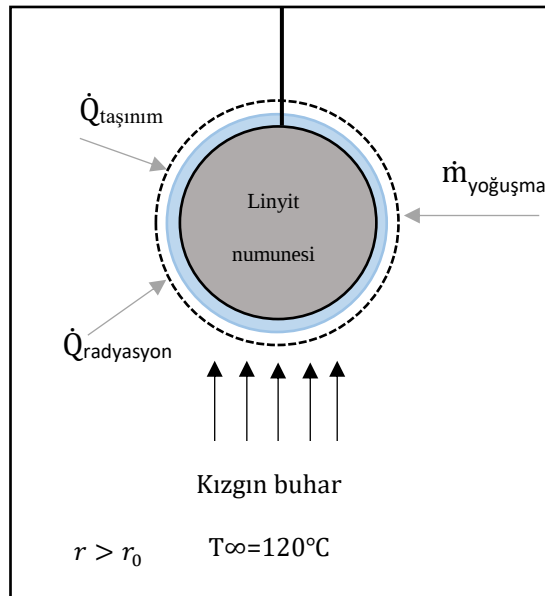
periyotları kendi içinde incelenip uygun bir model geliştirmeye çalışılmıştır. Öncelikle linyit düşük basınçta, kızgın buhara maruz kaldığında meydana gelen fiziksel mekanizmalar belirlenmiştir. Kurutma işlemi sırasında hem ısı transferi hem de kütle transferi gerçekleşmektedir. Bazı aşamalarda kütle transferi daha önemliken bazı aşamalarda ısı transferi önem kazanır.

Kızgın buharla kurutma modellenirken bazı kabuller yapılmıştır.

- Kurutma deneyleri sırasında kızgın buharın 120°C sabit sıcaklıkta ve 0,4 m/s sabit hızda olduğu kabul edilmiştir.
- Kızgın buhar ile kurutmada buhar hızı çok küçük olduğu için ihmal edilmiş, doğal taşınım ısı transferi olduğu kabul edilmiştir.
- Radyasyonla ısı transferi göz önünde bulundurulmuştur.
- Deneyler esnasında parçacık sıcaklığının parçacığın her yerinde eşit olduğu kabul edilmiştir.

4.1.1.1 Ön Isıtma ve Yoğuşma Periyodu

Deney başlangıcında kurutma odası atmosfer basıncındaki kızgın buharla doldurulup içerisi 120°C sıcaklığında dengeye getirilir.



Şekil 4.2 Kızgın buharla kurutma yoğuşma periyodu

Farklı çaplarda küresel hale getirilmiş linyit numuneleri makara sistemi yardımıyla sabit sıcaklıkta bulunan kurutma odasına gönderilir. Bu esnada numune yüzeyinde kızgın buhar ile temas sonucu yoğuşma meydana gelmiştir. Yoğuşmuş buharın

oluşturduğu sıvı filmi sıcaklığı yaklaşık olarak 50-70°C aralığında olduğu yapılan ölçümlerle tespit edilmiştir.

Şekil 4.2’ deki gibi düşünülerek linyit numunesi için bir enerji dengesi yazılırsa;

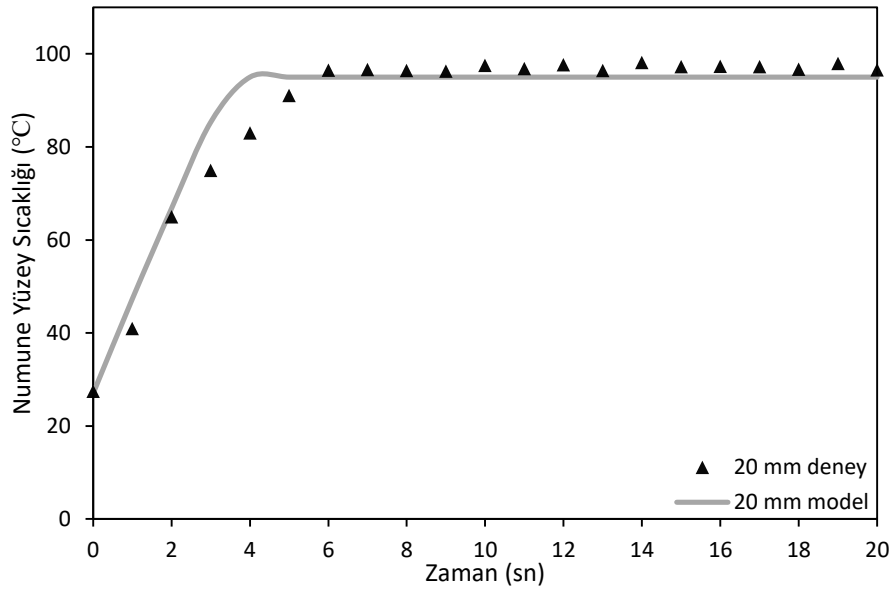
$$\dot{E}_g - \dot{E}_c = \frac{dE_{\text{system}}}{dt} \quad (4.15)$$

$$\dot{Q}_{\text{conv}} + \dot{Q}_{\text{rad}} + \dot{Q}_{\text{cond}} = \frac{d}{dt}(m_p c_{p,p} T_p) \quad (4.16)$$

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{6}{\rho_p c_p D} \left(h_{nc}(T_g - T_p) + \varepsilon \sigma (T_g^4 - T_y^4) + \frac{\dot{m}_{\text{cond}} \cdot h_{fg}}{A_p} \right) \quad (4.17)$$

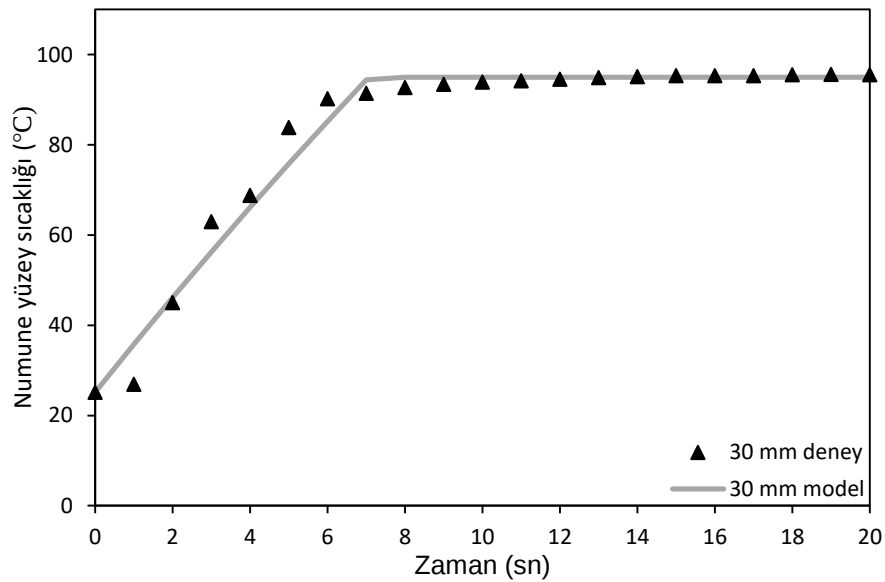
Denklem 4.17’den yüzey sıcaklığının zamanla değişimini hesaplayabilmek için doğal taşınım ile ısı transferi denklemleri kullanılmıştır. Denklem 4.18 kullanılarak yoğuşan sıvı miktarı bulunmuştur.

$$h_{\text{cond}} A (T_g - T_p) = h_{fg} \dot{m}_{\text{cond}} \quad (4.18)$$



Şekil 4.3 20 mm çapındaki linyit numunelerinin kızgın buhar ile kurutulmasının ön ısıtma ve yoğuşma periyodunda deneysel ve model ile bulunan yüzey sıcaklığının zamanla değişimi

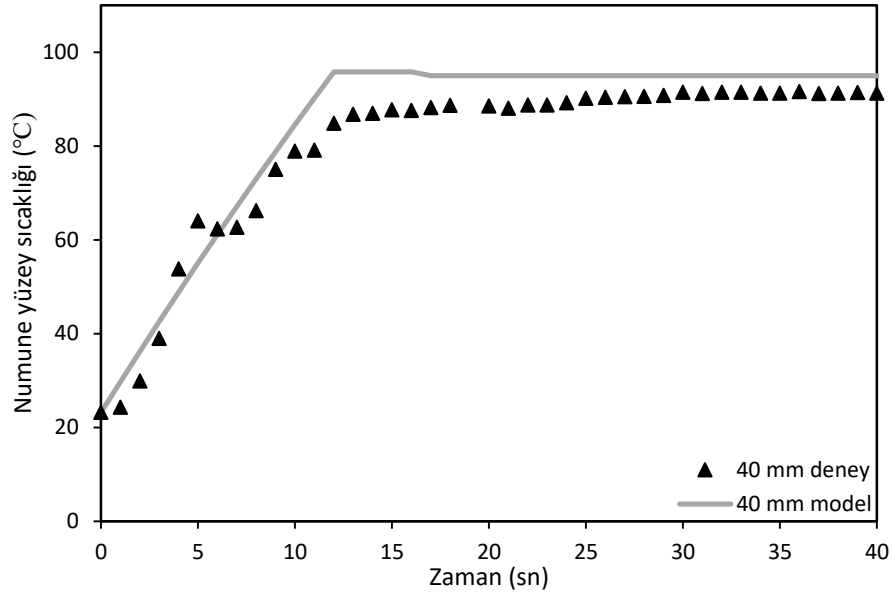
Şekil 4.3'te 20 mm çapındaki linyit numunesinin kızgın buharla kurutulurken ön ısıtma ve yoğuşma periyodundaki yüzey sıcaklığının zamanla değişimi görülmektedir. Oluşturulan matematiksel model ile deney dataları oldukça uyumludur. 20 mm çapındaki linyit numunesi kurutulurken ön ısınma ve yoğuşma periyodu toplam 11 saniye sürmüştür. 11 saniye sonunda ise numune ağırlığı maksimum değerine ulaşmış ve yaklaşık olarak ilk ağırlığından 0,175 gr daha fazladır. Grafikte başlangıçta yüzey sıcaklığı hızla yükselmiştir bu kısmın ön ısıtma periyodu olduğu düşünülmektedir. Ön ısıtma kısmında parçacık yüzeyi hızla ısınarak buharla ısıl dengeye gelmeye çalışır yüzey hala doyma sıcaklığının altındadır yoğuşma sırasında numune yüzeyine ısı aktarımı olur ve sıcaklık bir miktar daha yükselmeye devam eder. Numune ağırlığı maksimum değerine ulaştığında bu periyod sona erer.



Şekil 4.4 30 mm çapındaki linyit numunelerinin kızgın buhar ile kurutulmasının ön ısıtma ve yoğuşma periyodunda deneysel ve model ile bulunan yüzey sıcaklığının zamanla değişimi

Şekil 4.4'te 30 mm çapındaki linyit numunesinin kızgın buharla kurutulurken ön ısıtma ve yoğuşma periyodundaki yüzey sıcaklığının zamanla değişimi görülmektedir. Oluşturulan matematiksel model ile deney dataları oldukça uyumludur. 30 mm çapındaki linyit numunesi kurutulurken ön ısınma ve yoğuşma periyodu toplam 15 saniye sürmüştür. 15 saniye sonunda ise numune ağırlığı

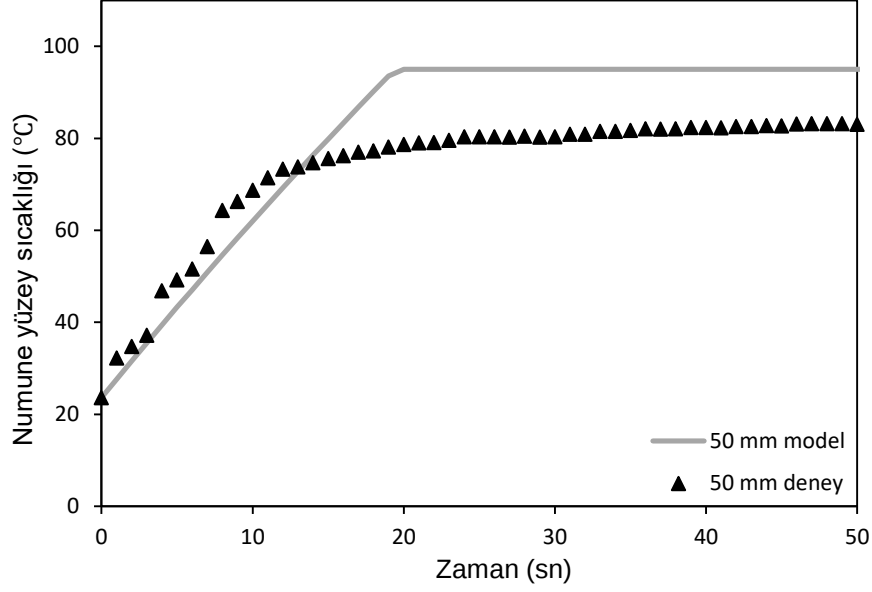
maksimum değerine ulaşmış ve yaklaşık olarak ilk ağırlığından 0,209 gr daha fazladır.



Şekil 4.5 40 mm çapındaki linyit numunelerinin kızgın buhar ile kurutulmasının ön ısıtma ve yoğuşma periyodunda deneysel ve model ile bulunan yüzey sıcaklığının zamanla değişimi

Yukarıdaki grafikte 40 mm çapındaki linyit numunesinin atmosfer basıncı altındaki 120 °C sıcaklığında kızgın buhar ile kurutulması esnasında ön ısıtma ve yoğuşma periyodunda ölçülen yüzey sıcaklığı ve matematiksel model ile oluşturulan yüzey sıcaklığının zamanla değişimi görülmektedir. Deneysel datalar ve matematiksel model oldukça uyumludur. 40 mm çapındaki numune için bu periyod 29 saniye gibi kısa bir zaman diliminde gerçekleşmiştir. Bu 29 saniye sonunda numune ağırlığı maksimum değerine ulaşmış ve yaklaşık olarak ilk ağırlığından 0,250 gr daha fazladır. Bu ağırlık bize linyit numunesi üzerinde oluşan film tabakasının en kalın olduğu zamandaki ağırlığını vermektedir.

Grafik 4.6'da 50 mm çapındaki numunenin kızgın buhar ile kurutulmasının ilk aşaması olan ön ısıtma ve yoğuşma periyodları görülmektedir. 50 mm çapındaki numune için bu periyod 32 saniye gibi kısa bir zaman diliminde gerçekleşmiştir. Bu 32 saniye sonunda numune ağırlığı maksimum değerine ulaşmış ve yaklaşık olarak ilk ağırlığından 0,3 gr daha fazladır. Grafikte deneysel veriler ve oluşturulan modelle bulunan yüzey sıcaklık verileri mevcuttur.

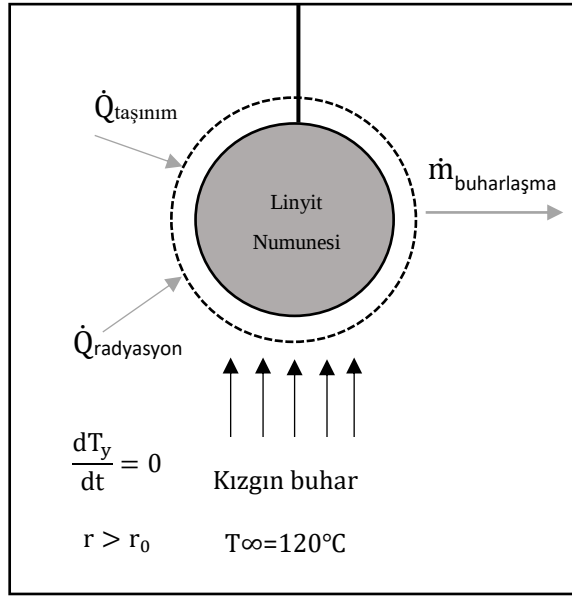


Şekil 4.6 50 mm çapındaki linyit numunelerinin kızgın buhar ile kurutulmasının ön ısıtma ve yoğuşma periyodunda deneysel ve model ile bulunan yüzey sıcaklığının zamanla değişimi

Deneysel veriler ve hesaplanan verilerin 13 saniyeye kadar uyumlu olduğu görülmekle birlikte, 13 saniyeden sonra model sonuçlarının deneysel ölçümlere göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

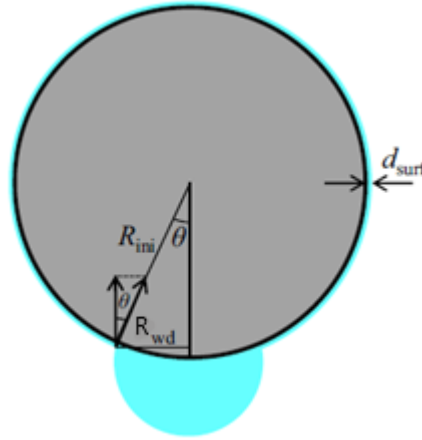
4.1.1.2 İlk Buharlaşma Periyodu

Numune yüzey sıcaklığı atmosferik basınçta suyun doyma sıcaklığına ulaştığında yüzeyde meydana gelen yoğuşma sonucu oluşan yoğuşum suyu buharlaşmaya başlar. İlk buharlaşma periyodu yüzeyde yoğuşma sonucu oluşan suyun tamamı buharlaşıncaya kadar devam eder. Periyodun sonunda numune ağırlığı deney başlangıcındaki ağırlığına ulaşır. Bu periyod boyunca yüzey sıcaklığı sabit kalır. Bu sebeple oluşturulan model ile ilk buharlaşma periyodunun süresi hesaplanabilir. Bu ulaştığında meydana gelen damlamalarda göz önünde bulundurulmalıdır. süre hesaplanırken numune yüzeyindeki film kalınlığı maksimum değerine Damlacıkların büyüklüğü göz önüne alınmadan yapılan hesaplamalar ile gerçek değerinden oldukça uzak sonuçlar elde edilmiştir. Damlacıkların büyüklüğünün belirlenmesinde Kiriya vd. kızgın buharla kurutma çalışırken oluşturdukları Şekil 4.8’de görülen model kullanıldı. Bu model ile yoğuşma suyunun linyitin yüzeyinde ince bir tabaka oluşturduğu ve altından sarkan yarım küre şeklindeki damlacığa sahip olduğu varsayılmıştır [38].



Şekil 4.7 Kızgın buharla kurutma ilk buharlaşma periyodu

Dikey yönde etki eden yüzey gerilimi ve damlacığa etki eden yerçekimi kuvvetinin dengesi göz önünde bulundurulmuştur.



Şekil 4.8 Bir linyit partikülünün yüzeyinde oluşmuş bir su damlası ve sıvı filmi için basit model bir model [38]

Oluştulan model ile damlacık yarıçapı (R_{wd}) denklem 4.19'dan hesaplanmıştır. Denklem 4.20' de yerine koyulup linyit parçacığından damlayan kütle miktarı hesaplanmıştır. 4.19 numaralı denklemde $E=3\gamma/2gq$ eşitliğinden hesaplanmıştır.

$$R_{wd} = \left(\frac{\sqrt{\left(\frac{E}{R_0}\right)^4 + 4E^2} - \left(\frac{E}{R_0}\right)^2}{2} \right)^{1/2} \quad (4.19)$$

$$m_{wd} = \frac{4}{3} \pi R_{wd}^3 q_p \quad (4.20)$$

$$\dot{E}_g - \dot{E}_c = \frac{dE_{system}}{dt} \quad (4.21)$$

$$\dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad} - \dot{m}_{evap} h_{fg}^* = \frac{d}{dt} (m_p c_p T_s) \quad (4.22)$$

İlk buharlaşma periyodunda yüzey sıcaklığı 100°C' de sabit kalır (dT_s/dt=0);

$$\dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad} = \dot{m}_{evap} h_{fg}^* \quad (4.23)$$

$$t_{evap} = \frac{m_{condens} - m_{wd}}{\dot{m}_{evap}} \quad (4.24)$$

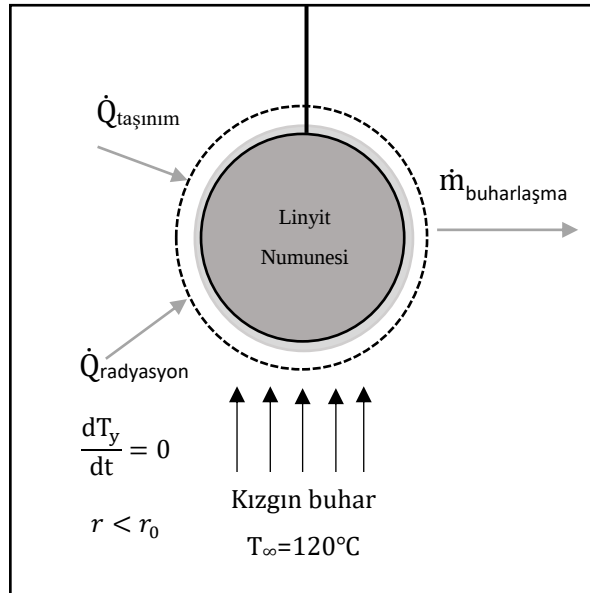
Tablo 4.2 Ön ısıtma, yoğuşma ve ilk buharlaşma periyotlarının deneysel verilerinin model ile karşılaştırılması

Numune çapı (mm)	ÖN ISITMA VE YOĞUŞMA PERİYODU				İLK BUHARLAŞMA PERİYODU			
	Ölçülen yoğuşma periyodu süresi (s)	Max. Yoğuşum filmi kütlesi (gr)			Hesaplanan damlacık kütlesi (gr)	Buharlaşma periyodu süresi(s)		
		Deney	Model	Hata (%)		Deney	Model	Hata (%)
20	11	0,175	0,179	3	0,1317	20	17	15
30	15	0,209	0,245	17	0,1376	22	20	10
40	29	0,250	0,287	15	0,1497	51	50	2
50	32	0,310	0,378	22	0,1527	65	54	17

Tablo 4.1’de ön ısıtma yoğuşma ve ilk buharlaşma periyotlarına ait veriler ve model sonuçları bulunmaktadır. Model sonuçları ve deneysel data lar karşılaştırılarak yapılan hatanın büyüklüğü de tabloda mevcuttur.

4.1.1.3 Sabit Hız Periyodu

Kızgın buharla kurutma deneylerinde ilk buharlaşma periyodu sonunda numune ilk ağırlığına ulaşmıştır. Böylece sabit hız periyodu başlar. Bu periyotta numune ağırlığı zamanla birlikte giderek azalır. Bunun sebebi numune yüzeyinde oluşan kurumalar sonucunda merkezden yüzeye doğru hareket eden nemin buharlaşmasıdır. Bu periyotta yüzey sıcaklığı doyma sıcaklığına ulaşmış ve ilk buharlaşma periyodunda olduğu gibi sabit kalmıştır. Sabit hızda kuruma periyodunu modellemek için linyit numunesi ve kurutma ortamı arasında enerji dengesi yazılmıştır.



Şekil 4.9 Kızgın buharla kurutma ilk buharlaşma periyodu

$$\dot{Q}_{\text{conv}} + \dot{Q}_{\text{rad}} - \dot{Q}_{\text{evap}} = \frac{d}{dt} (m_p \cdot c_p \cdot T) \quad (4.25)$$

Kuruma periyodunda yüzey sıcaklığı 100°C’ de sabit kalır ($dT_p/dt=0$);

$$-\frac{dR}{dt} = \frac{h_{\text{conv}}(T_g - T_s) + \epsilon \sigma (T_g^4 - T_s^4)}{\rho_w h_{fg}^*} \quad (4.26)$$

$$-\frac{dm_p}{dt} = \frac{h_{conv}(T_{\infty} - T_s) + \varepsilon\sigma(T_g^4 - T_s^4)}{h_{fg}^*} A_p \quad (4.27)$$

$$m_p = m_{p,ini} - \frac{h_{conv}(T_g - T_s) + \varepsilon\sigma(T_g^4 - T_s^4)}{h_{fg}^*} A_p dt \quad (4.28)$$

Yukarıdaki eşitliğin her tarafı kurutulan parçacığın ilk kütlesine bölünürse nem içeriğinin (ıslak bazda) zamanla değişimi bulunur.

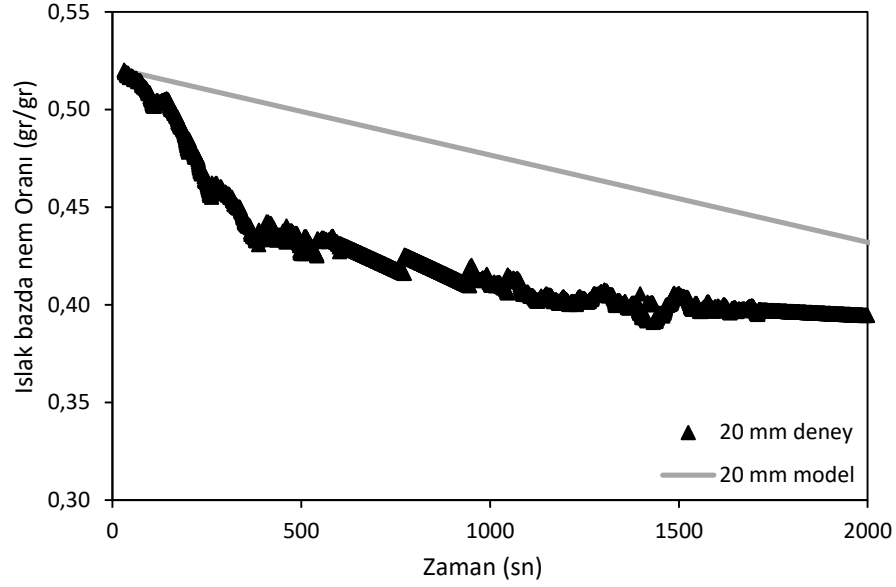
$$m_p = [\rho_p X_{yb} + \rho_w(1 - X_{yb})] V_p \quad (4.29)$$

$$X_{yb} = X_{yb,in} - \frac{3[h_{conv}(T_g - T_s) + \varepsilon\sigma(T_g^4 - T_s^4)]dt}{[\rho_p X_{yb} + \rho_w(1 - X_{yb})] h_{fg}^* R} \quad (4.30)$$

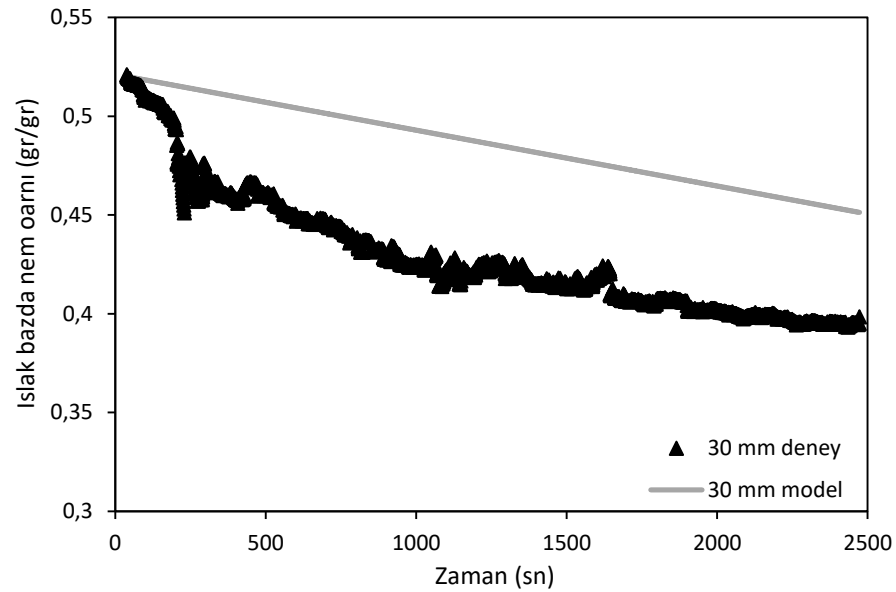
Oluşturulan matematiksel model 20 mm, 30 mm, 40 mm ve 50 mm çapındaki linyit numunelerine ayrı ayrı uygulanmış ve elde edilen sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Sabit hızda kuruma periyodunda yüzey sıcaklığı sabit kaldığından, nem içeriğinin zamanla değişimi deneysel ve modelden hesaplanan olmak üzere grafikte karşılaştırılmıştır. Matematiksel model ile deneysel verilerin birbirleriyle oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Numune çapı büyüdükçe model ile deneysel sonuçlar arasındaki hata oranının azaldığı görülmüştür.

20 mm çapındaki numunenin atmosferik basınçta kızgın buhar ile kurutulmasının sabit hız periyodundaki ıslak bazda nem içeriği değişimi Şekil 4.10' da görülmektedir. Sabit yüzey sıcaklığındaki numunenin nem içeriği zamanla azalmaktadır. . Bütün numuneler için ortalama olarak başlangıçta % 52 olarak ölçülen nem içeriği 20 mm çapındaki numune için deney sonunda %39 olarak ölçülmüştür.

30 mm çapındaki numunenin atmosferik basınçta kızgın buhar ile kurutulmasının sabit hız periyodundaki ıslak bazda nem içeriği değişimi Şekil 4.11'de görülmektedir. Sabit yüzey sıcaklığındaki numunenin nem içeriği zamanla azalmaktadır. Bütün numuneler için ortalama olarak başlangıçta % 52 olarak ölçülen nem içeriği 30 mm çapındaki numune için deney sonunda %40 olarak ölçülmüştür.



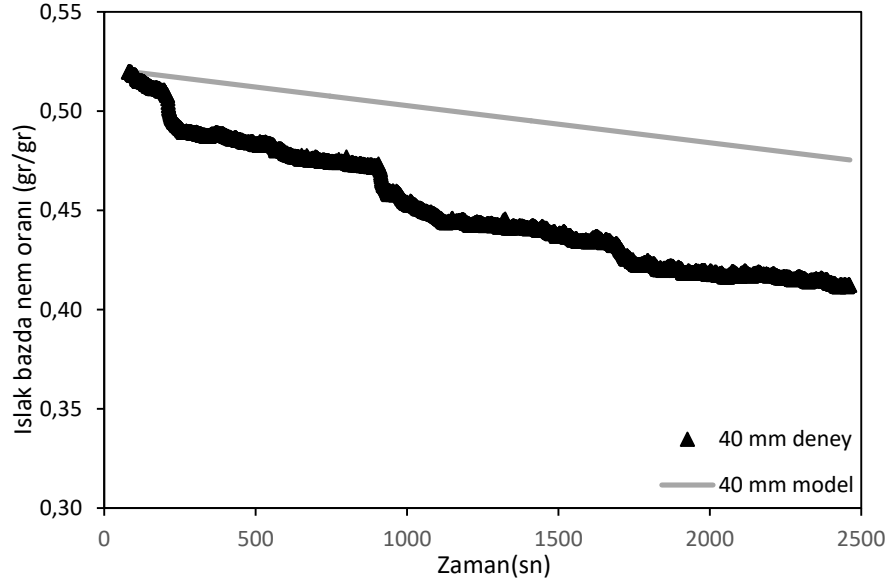
Şekil 4.10 20 mm çapındaki numune için kızgın buharla sabit hızda kurutma periyodunda nem içeriğinin zamanla değişimi deneysel ve model ile bulunan değerlerin karşılaştırılması



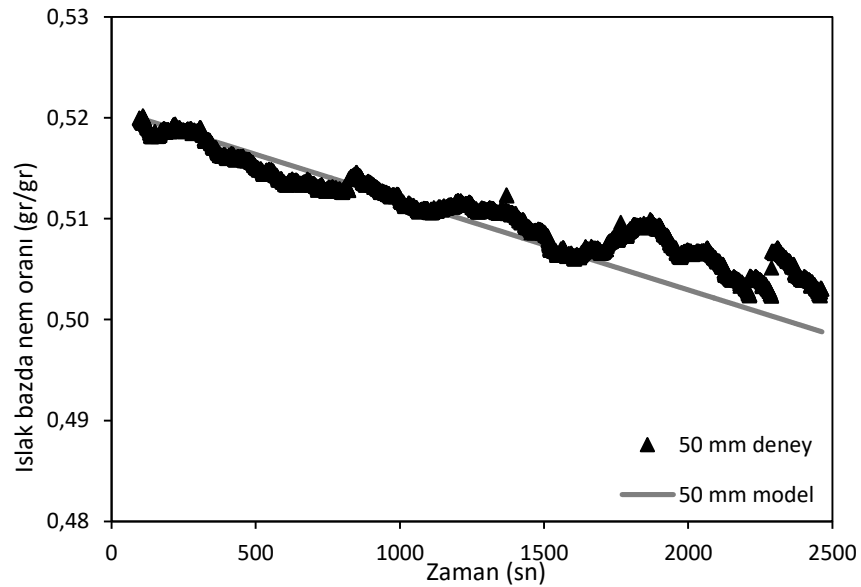
Şekil 4.11 30 mm çapındaki numune için kızgın buharla sabit hızda kurutma periyodunda nem içeriğinin zamanla değişimi deneysel ve model ile bulunan değerlerin karşılaştırılması

40 mm çapındaki numunenin atmosferik basınçta kızgın buhar ile kurutulmasının sabit hız periyodundaki ıslak bazda nem içeriği değişimi Şekil 4.12’de görülmektedir. Sabit yüzey sıcaklığındaki numunenin nem içeriği zamanla azalmaktadır. Bütün numuneler için ortalama olarak başlangıçta % 52 olarak

ölçülen nem içeriği 40 mm çapındaki numune için deney sonunda %41 olarak ölçülmüştür. Grafikte görüleceği üzere 2500 saniye sonunda nem içeriği %11 oranında azalmıştır.



Şekil 4.12 40 mm çapındaki numune için kızgın buharla sabit hızda kurutma periyodunda nem içeriğinin zamanla değişimi deneysel ve model ile bulunan değerlerin karşılaştırılması

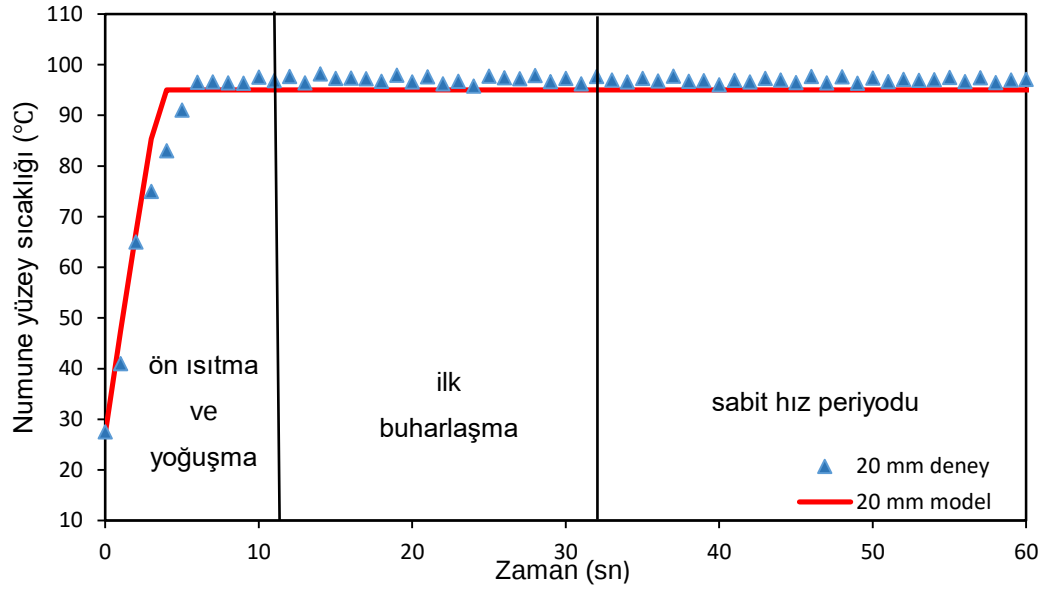


Şekil 4.13 50 mm çapındaki numune için kızgın buharla sabit hızda kurutma periyodunda nem içeriğinin zamanla değişimi deneysel ve model ile bulunan değerlerin karşılaştırılması

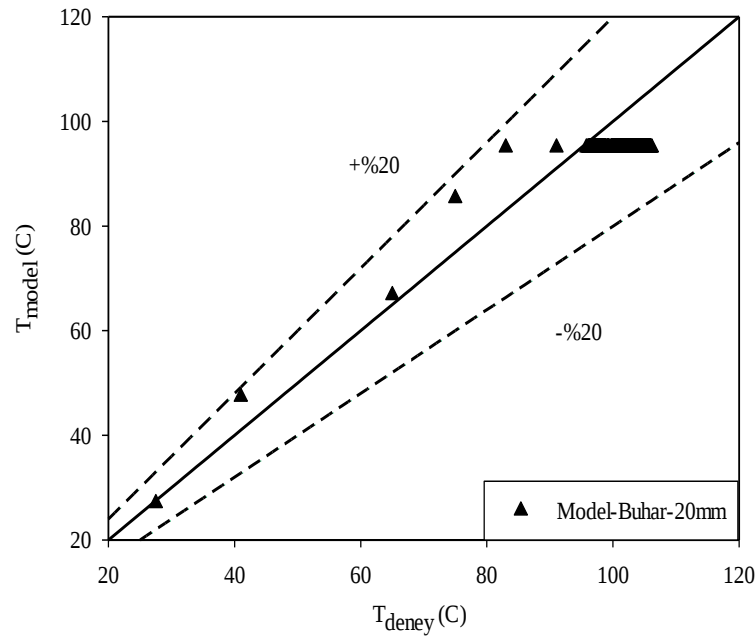
50 mm çapındaki numunenin atmosferik basınçta kızgın buhar ile kurutulmasının sabit hız periyodundaki ıslak bazda nem içeriği değişimi şekil 4.13'de görülmektedir. Sabit yüzey sıcaklığındaki numunenin nem içeriği zamanla azalmaktadır. Bütün numuneler için ortalama olarak başlangıçta % 52 olarak ölçülen nem içeriği 50 mm çapındaki numune için deney sonunda %50 olarak ölçülmüştür. Grafiktende görüleceği üzere 2500 saniye sonunda nem içeriği %2 oranında azalmıştır.

Düşük basınçta kızgın buhar ile kömür kurutma deneyleri sonucunda elde edilen ve herbir periyot için ayrı ayrı oluşturulan matematiksel model yardımıyla hesaplanan, yüzey sıcaklığı ve ıslak bazda nem oranının değişimleri tüm numune çapları için aşağıdaki grafiklerde gösterilmiştir.

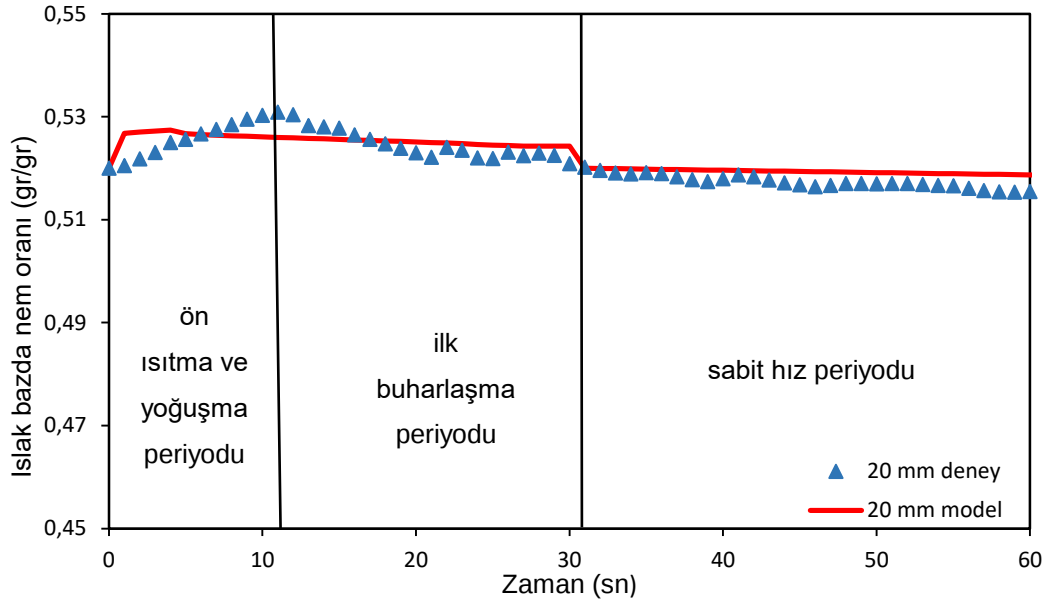
Şekil 4.14' te 20 mm çapındaki numune kurutulması esnasında ölçülen, ön ısıtma, yoğunlaşma, ilk buharlaşma ve sabit hız periyodundaki yüzey sıcaklığının zamanla değişimi görülmektedir. 20 mm için ön ısıtma ve yoğunlaşma periyodu 11 saniye, ilk buharlaşma periyodu 20 saniye sürmüştür. Sonrasında ise sabit hız periyodu görülmektedir. Modelle hesaplanan ile deneysel sonuçların uyumlu olduğu ve %20' lik hata bandı içerisindeydir.



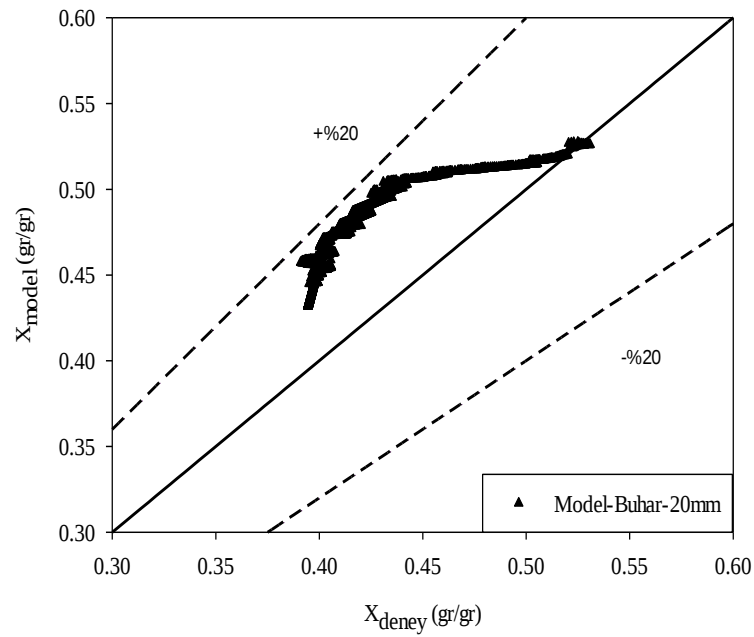
Şekil 4.14 20 mm çapındaki numune için yüzey sıcaklığının zamanla değişimi



Şekil 4.15 20 mm çapındaki numune yüzey sıcaklığı deney ve model sonuçları karşılaştırılması



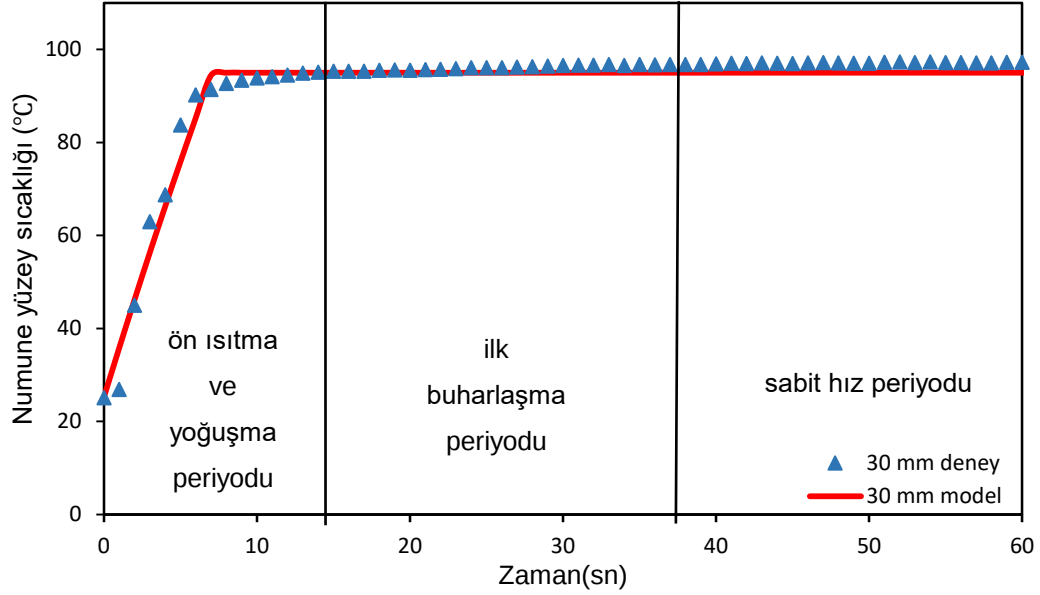
Şekil 4.16 20 mm çapındaki numune için nem oranının zamanla değişimi



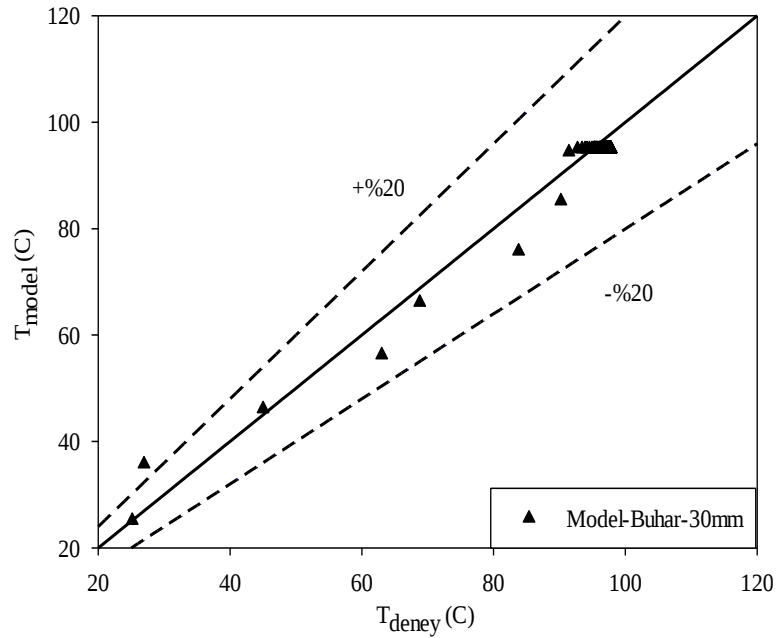
Şekil 4.17 20 mm çapındaki numune nem oranı deney ve model sonuçları karşılaştırılması

Şekil 4.16'da kurutma deneyi esnasında görülen tüm periyotlar için ıslak bazda nem oranının zamanla değişimi görülmektedir. Ön ısıtma ve yoğuşma periyodunda numune kütlesi maksimum yoğuşma kütlesine gelene kadar artmaktadır. Daha sonra yüzey sıcaklığının doyma sıcaklığına ulaşmasıyla ilk buharlaşma periyoduna geçilmiş ve numune kütlesi deney başlangıcındaki değerine ulaşana

kadar bu periyot devam etmektedir. Sonrasında ise numune kütlesinin zamanla azaldığı sabit hız periyodu görülmektedir. Şekil 4.17’de görülen grafikte ise deneysel datalar ve model sonuçları karşılaştırılmıştır. Grafikten görüldüğü üzere modelle hesaplanan sonuçlar %20 lik hata bandı içerisinde.



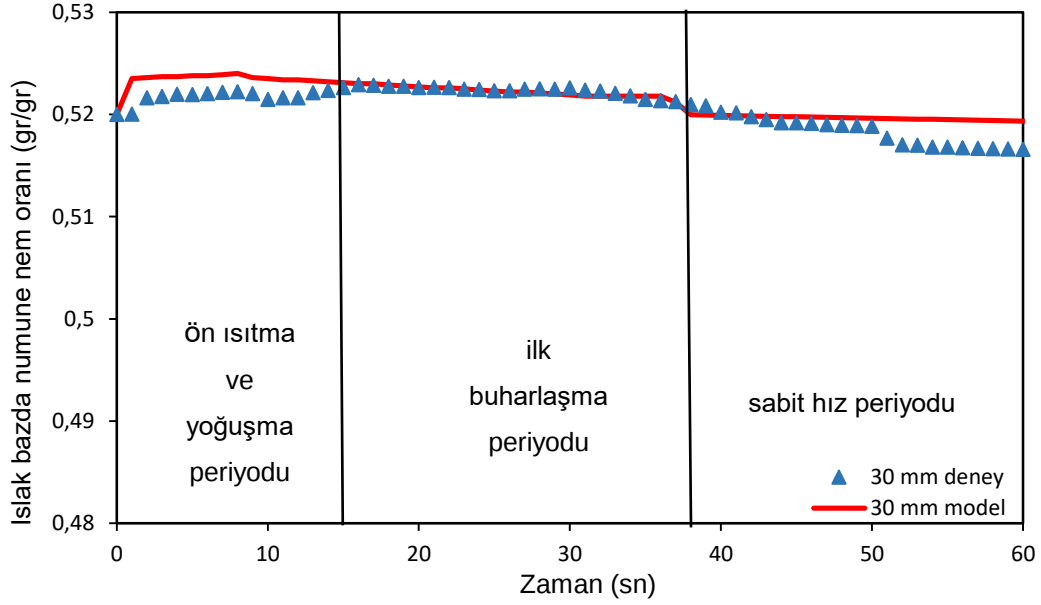
Şekil 4.18 30 mm çapındaki numune için yüzey sıcaklığının zamanla değişimi



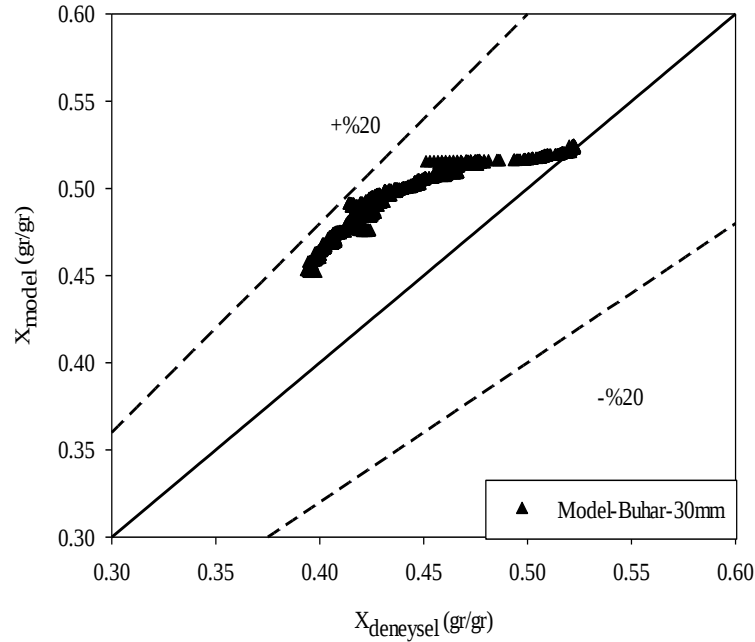
Şekil 4.19 30 mm çapındaki numune yüzey sıcaklığı deney ve model sonuçları karşılaştırılması

30 mm çapındaki numunenin kurutulması esnasında yüzey sıcaklığındaki değişim

Şekil 4.18’de görülmektedir. Ön ısıtma ve yoğuşma periyodu 15 saniye sürmüştür ve bu periyotta sıcaklık hızlı bir şekilde yükselip doyma sıcaklığına erişmektedir. İlk buharlaşma periyodunda sıcaklık doyma sıcaklığında sabit kalmaktadır ve bu periyot 22 saniye sürmüştür. Sonrasında sıcaklığın doyma sıcaklığında sabit kaldığı görülmektedir.

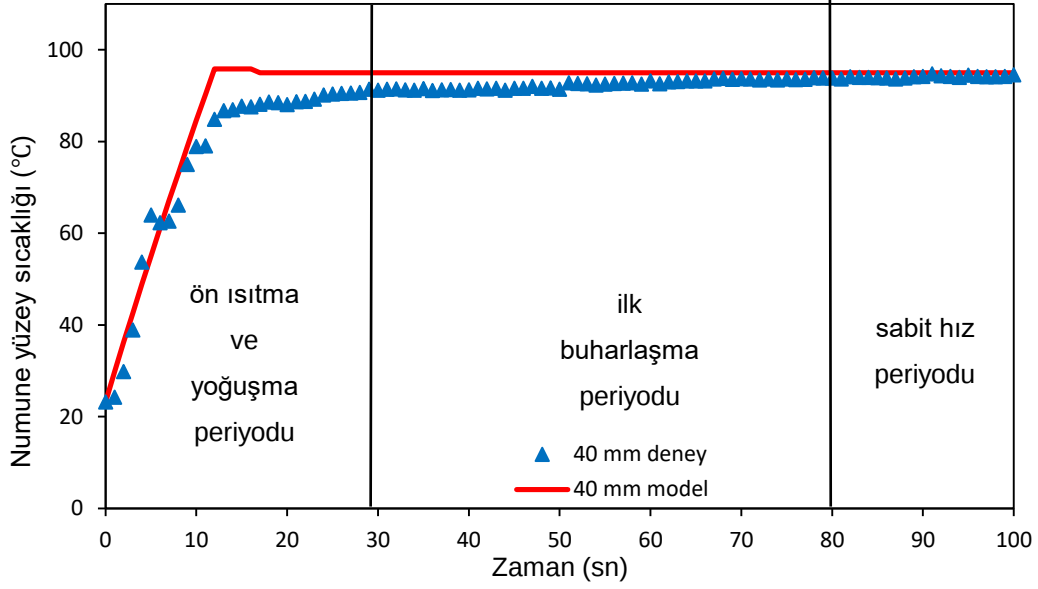


Şekil 4.20 30 mm çapındaki numune için nem oranının zamanla değişimi

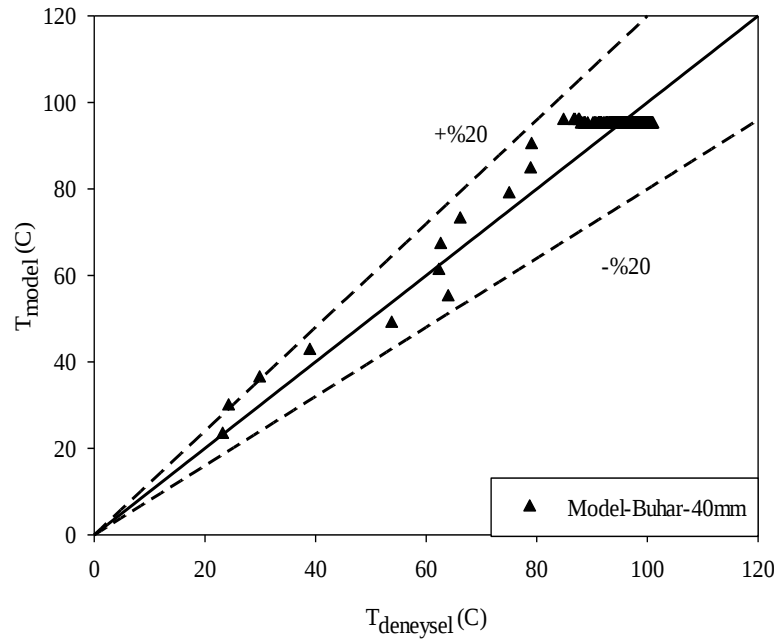


Şekil 4.21 30 mm çapındaki numune nem oranı deney ve model sonuçları karşılaştırılması

30 mm çapındaki numunenin kızgın buharla kurutulurken ölçülen yüzey sıcaklığı ve modelle hesaplanan yüzey sıcaklığı Şekil 4.19’da karşılaştırılmıştır. Modelle elde edilen sonuçların %20’lik hata bandı içerisinde kaldığı görülmektedir.



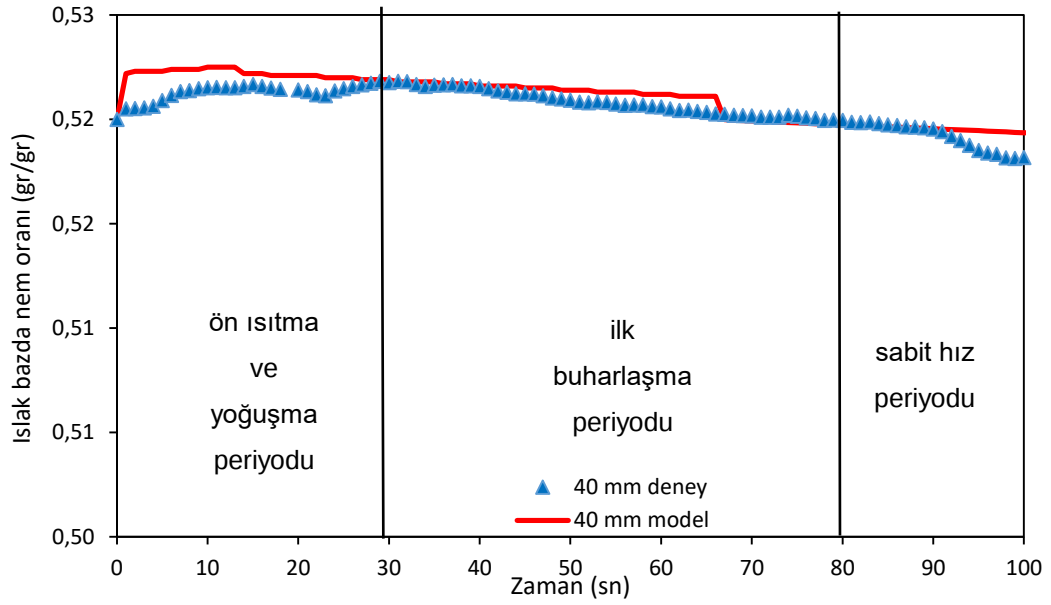
Şekil 4.22 40 mm çapındaki numune için yüzey sıcaklığının zamanla değişimi



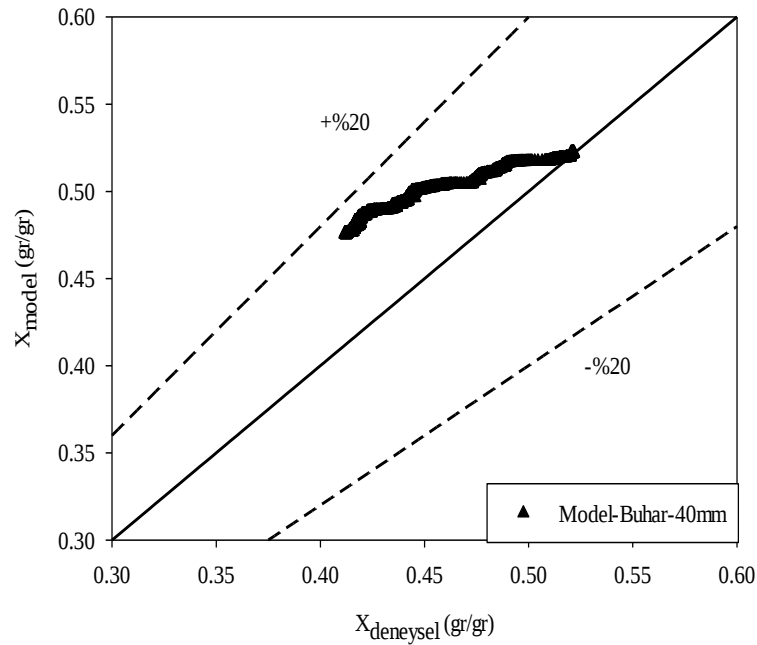
Şekil 4.23 40 mm çapındaki numune nem oranı deney ve model sonuçları karşılaştırılması

30 mm çapındaki numunenin kızgın buharla kurutulurken nem içeriğinin zamanla değişimi Şekil 4.20’de görülmektedir. Sırasıyla ön ısıtma ve yoğuşma periyodu, ilk

buharlaşma periyodu ve sabit hız periyodu grafikte verilmiştir. DeneySEL ve model ile hesaplanan datalar karşılaştırılmıştır. şekil 4.21’de model ve deney dataları arasındaki hata oranı hesaplanıp, hata bandı oluşturulmuştur. Model sonuçlarının %20’lik hata bandı içerisinde olduğu grafikten anlaşılmaktadır.

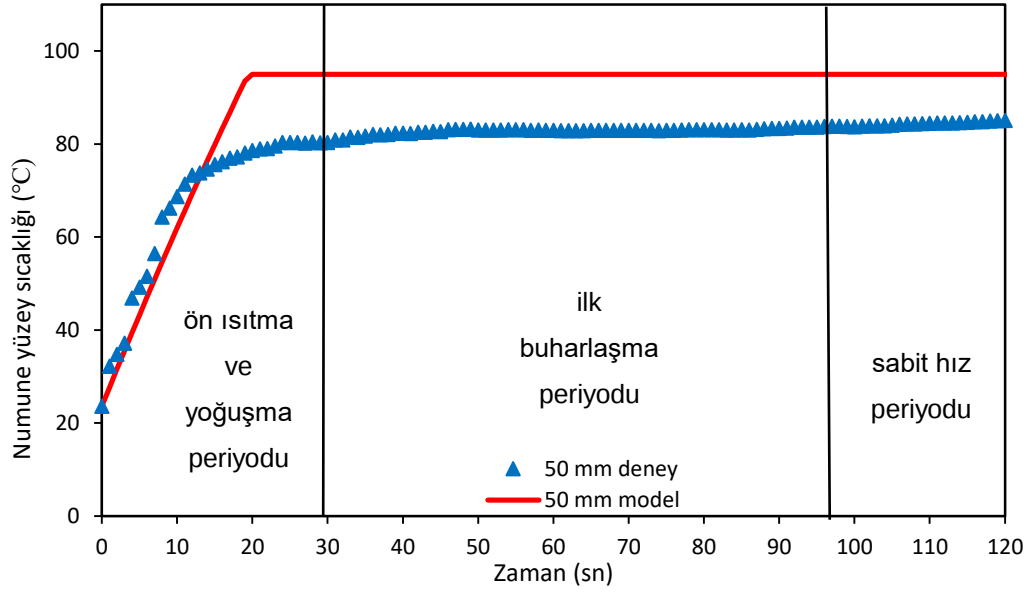


şekil 4.24 40 mm çapındaki numune için nem oranının zamanla değişimi

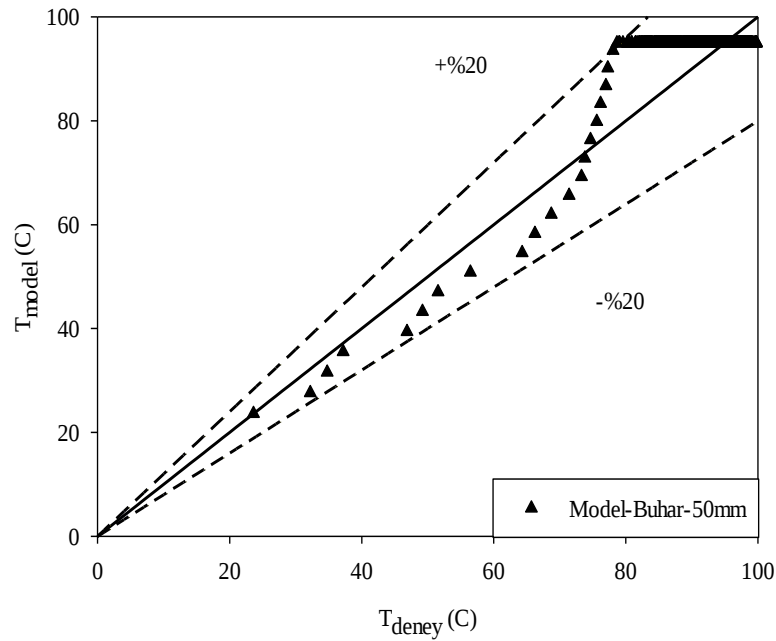


şekil 4.25 40 mm çapındaki numune nem oranı deney ve model sonuçları karşılaştırılması

40 mm çapındaki numunenin kızgın buharla kurutulurken görülen periyotlar için yüzey sıcaklığı ve nem oranı değişimi sırasıyla Şekil 4.22 ve Şekil 4.24’ te görülmektedir. Grafiklerde ayrıca deneysel ve modelle hesaplanan dataların uyumuda görülmektedir. Şekil 4.23 ve Şekil 4.24’te ise model ile hesaplanan dataların hata oranları görülmektedir. Model sonuçları %20’lik hata bandı içerisindedir.

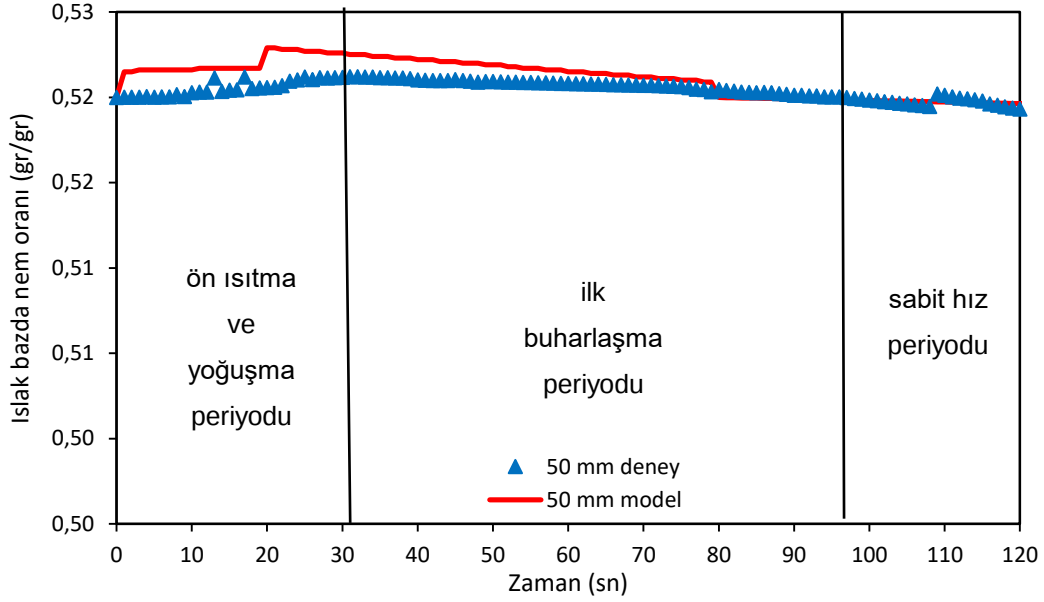


Şekil 4.26 50 mm çapındaki numune için yüzey sıcaklığının zamanla değişimi

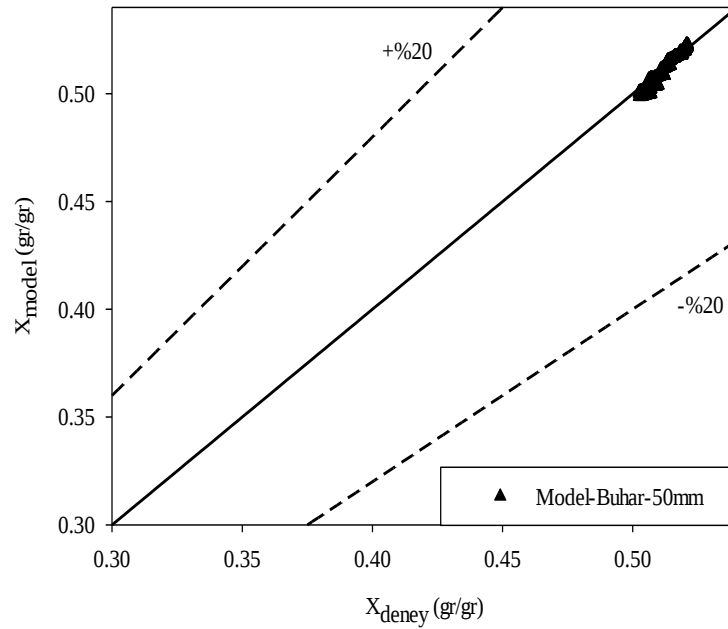


Şekil 4.27 50 mm çapındaki numune yüzey sıcaklığı deney ve model sonuçları karşılaştırılması

Şekil 4.26 ve Şekil 4.28’de 50 mm çaplı numunenin kurutulurkenki tüm periyotları için yüzey sıcaklığı ve nem oranı değişimi yer almaktadır. Model sonuçları ile deneysel datalar karşılaştırılmış ve Şekil 4.27 ve 4.29’da ise model ile elde edilen dataların sırasıyla %20 hata bandları içerisinde olduğu görülmektedir.



Şekil 4.28 50 mm çapındaki numune için nem oranının zamanla değişimi



Şekil 4.29 50 mm çapındaki numune nem oranı deney ve model sonuçları karşılaştırılması

4.1.2 Sıcak Hava İle Kurutmanın Modellenmesi

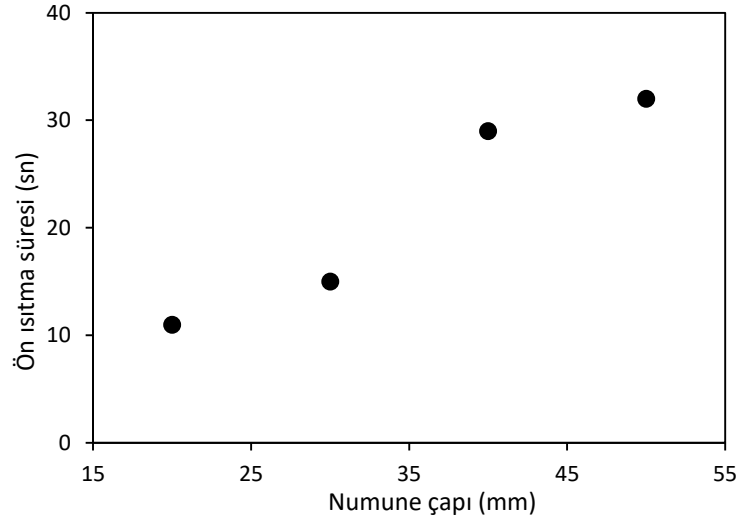
Linyitin düşük basınçta sıcak hava ile kurutulmasının matematiksel modellenmesi yapılırken deneyler sırasında sabit hızda kurutma periyodu görülmediğinden, ön ısıtma ve azalan hızda kurutma periyotları kendi içinde incelenip uygun bir model geliştirmeye çalışılmıştır.

Sıcak hava ile kurutma modellenirken bazı kabuller yapılmıştır.

- Sıcak hava ile kurutma yapılırken ortamın kuru hava olduğu kabul edilmiştir.
- Kurutma deneyleri sırasında kurutma odasındaki havanın 120°C sabit sıcaklıkta ve 0,4 m/s sabit hızda olduğu kabul edilmiştir.
- Radyasyonla ısı transferi göz önünde bulundurulmuştur.
- Deneyler esnasında parçacık sıcaklığının parçacığın her yerinde eşit olduğu kabul edilmiştir.
- Azalan hız periyodunda havanın çok düşük bir hıza sahip olduğu göz önünde bulundurularak stefan akışı ile kütle taşınım hızı hesaplanmıştır.

4.1.2.1 Ön Isıtma Periyodu

Sıcak hava ile kurutma deneyleri yapılırken öncelikle kurutma odası sıcaklığının 120°C sıcaklığında stabil hale gelmesi beklenmektedir.



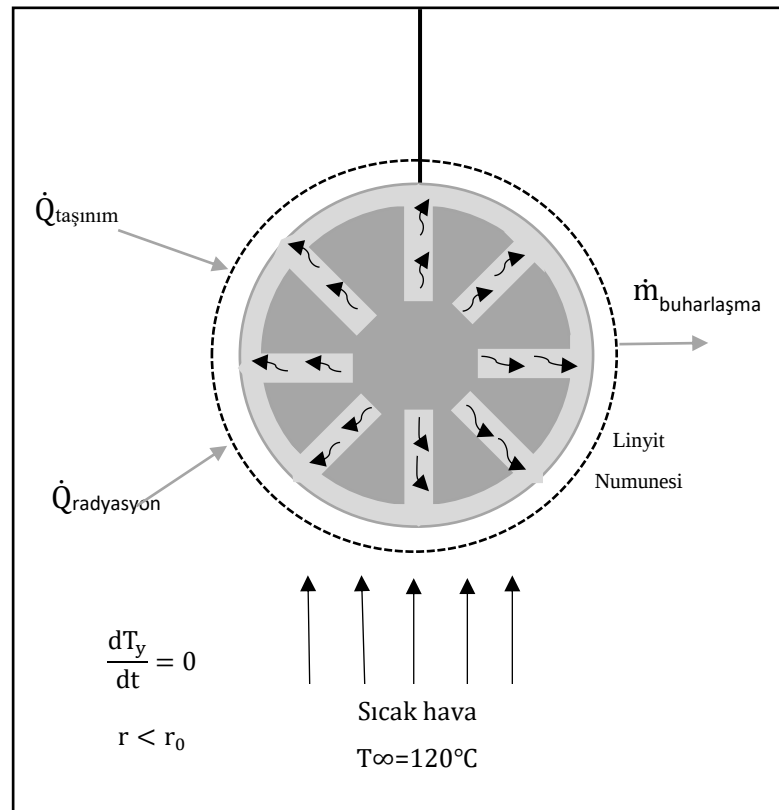
Şekil 4.30 Numune çaplarına göre ön ısıtma periyodu süresinin değişimi

Sıcaklık dengeye geldikten sonra ortam sıcaklığı ile dengede olan 25-28°C sıcaklığındaki numune kurutma odasına gönderilmiştir. Numunenin yüzey sıcaklığı hızlı bir şekilde yükselirken, numune kütlesinde bir değişim olmamıştır. Numune

kütlesinin azalmaya başladığı ana kadar olan bu süreye ön ısıtma periyodu adı verilir. Bu periyod çok kısa sürdüğünden herhangi bir matematiksel işlem yapılmamış sadece deneysel datalardan faydalanılmıştır. Bu periyodun uzunluğu 50 mm için 40 saniye, 40 mm için 26 saniye, 30 mm için 19 saniye ve 20 mm için 7 saniyedir. Bu süre sonunda numune sıcaklıkları her çapa göre değişmekte olup 40-45 °C arasındadır.

4.1.2.2 Azalan Hız Periyodu

Linyitteki nem buharlaşmaya başlar bundan dolayı zamanla azalmaktadır. Matematiksel model kızgın buharla kurutmadaki sabit hız periyoduna benzer fakat orada sıcaklık sabittir.



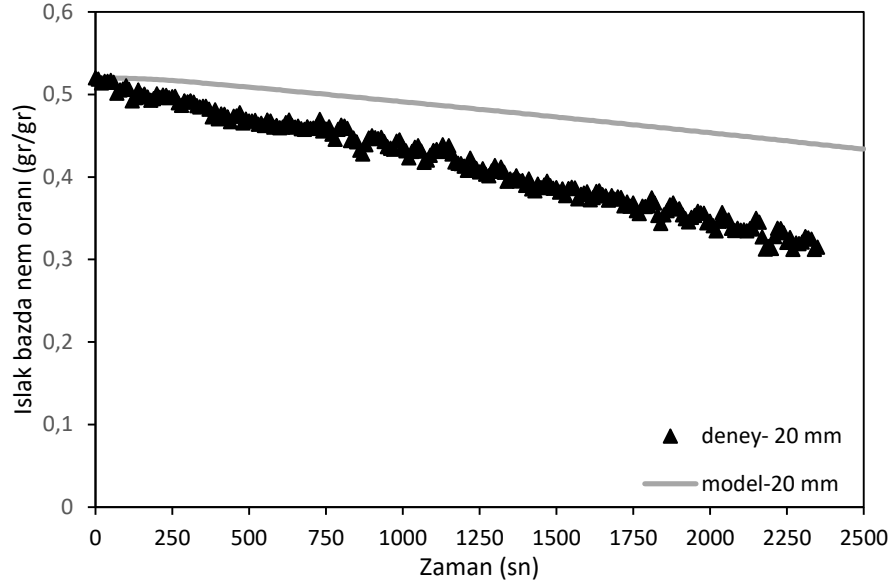
Şekil 4.31 Sıcak hava ile kurutma

Sıcak hava ile kurutmada ise sıcaklık yükselirken aynı zamanda nem içeriği de azalmaktadır. 120°C sıcaklığına kadar ısıtılan hava kuru hava olarak kabul edilmiştir yani içerisindeki su buharı ihmal edilmiştir. Linyit numunesi içerisindeki nem, su buharı yoğunluğu daha düşük olan sıcak havaya doğru hareket edecektir. Nem içeriğinin değişimi kütle transfer denklemleri kullanılarak hesaplanmıştır. Bu

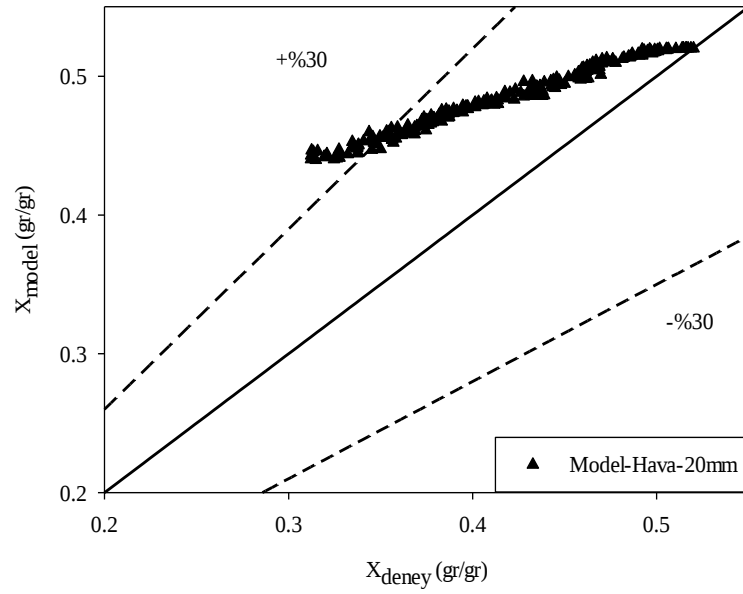
hesaplamalarda gerekli olan kütle transfer hızı doğal taşınım veya zorlanmış taşınım gibi düşünülerek hesaplanmış fakat buharlaşma hızının deneysel datalara göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu sebeple hava ile kurutmada durgun bir gaz içerisindeki buhar yayılımı için kullanılan stefan akışından faydalanılmıştır. Stefan akışı sayesinde bulunan Denklem 4.32 yardımıyla bulunan kütle transfer hızından faydalanılarak numune yüzey sıcaklığının zamanla değişimi belirlenmiştir (Bird, Stewart, ve Lightfoot 2007).

$$\frac{dT}{dt} = \frac{6}{\rho_p c_{p,p} D} \left(h_{nc} (T_{\infty} - T_y) + \varepsilon \sigma (T_{\infty}^4 - T_y^4) - \frac{\dot{m}_{\text{evap}} \cdot h_{fg}}{A_p} \right) \quad (4.31)$$

$$\frac{dm_{\text{evap}}}{dt} = M_{\text{H}_2\text{O}} A_p \frac{D_{AB} P_{\text{atm}}}{R_u T_y \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0} \right)} \ln \frac{1 - y_{A,L}}{1 - y_{A,0}} \quad (4.32)$$



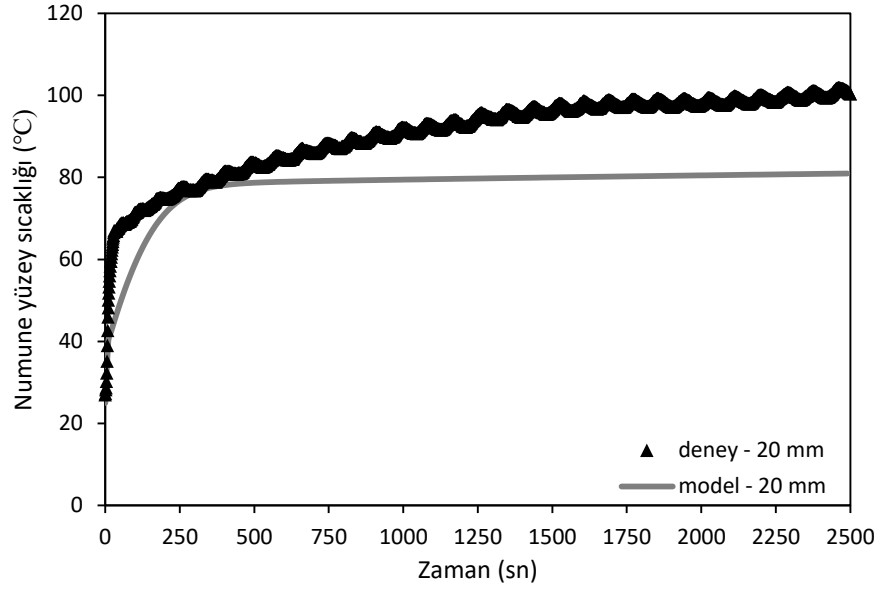
Şekil 4.32 20 mm çapındaki linyit numunelerinin sıcak hava ile kurutulmasının azalan hız periyodunda deneysel ve model ile bulunan numune kütlesinin zamanla değişimi



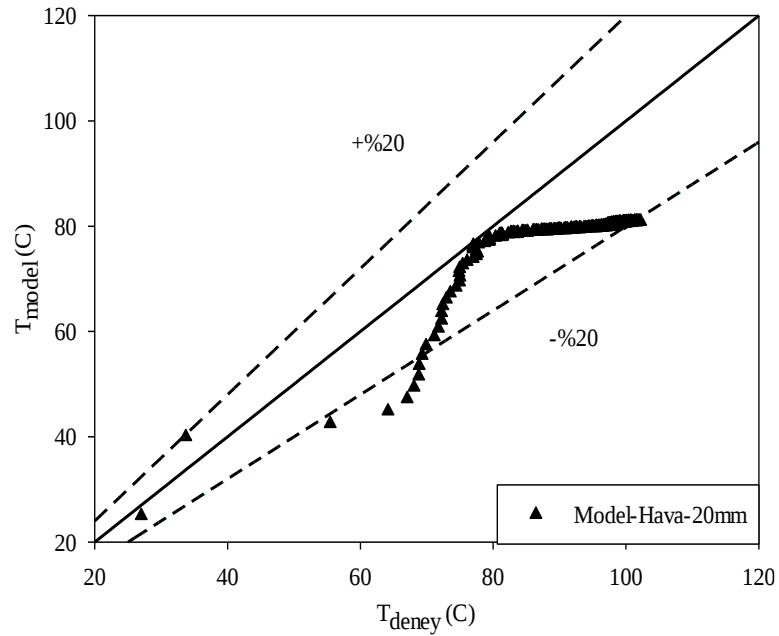
Şekil 4.33 20 mm çapındaki numune nem içeriği deney ve model sonuçları karşılaştırılması

Şekil 4.32’de 20 mm çapındaki linyit numunesinin deney esnasında bulunan nem oranı ve model ile hesaplanan nem oranı gösterilmiştir. Her iki eğride de nem oranının zamanla azaldığı görülmektedir. 2500 saniye sonunda numune kütlesi 4 gram azalmıştır. Nem oranı ise %52 den %31’e kadar azalmıştır. Oluşturulan

matematiksel model ve 20 mm çapındaki numune için yapılan ölçümün oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. 4.33'te ise model sonuçlarının deney dataları ile karşılaştırıldığında %30 hata bandı içerisinde yer aldığı görülmektedir.



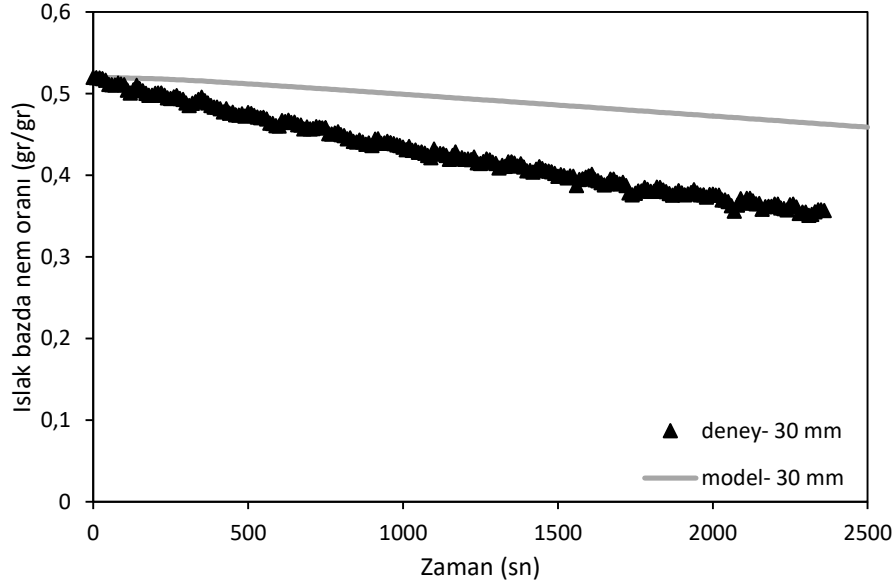
Şekil 4.34 20 mm çapındaki linyit numunelerinin sıcak hava ile kurutulmasının azalan hız periyodunda deneysel ve model ile bulunan numune yüzey sıcaklığının zamanla değişimi



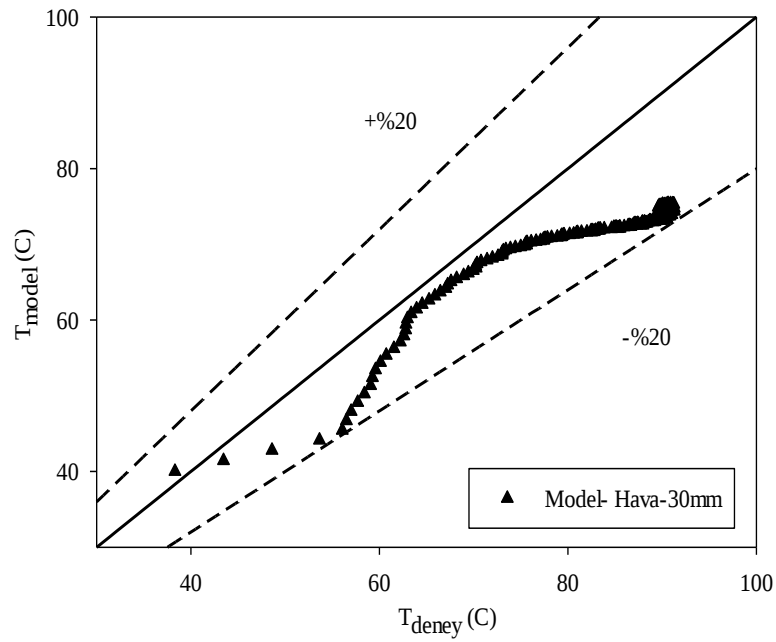
Şekil 4.35 20 mm çapındaki numune yüzey sıcaklığı deney ve model sonuçları

Şekil 4.34'te 20 mm çapındaki linyit numunesinin deney esnasında ölçülen yüzey

sıcaklığı ve model ile hesaplanan yüzey sıcaklığı gösterilmiştir. Oluşturulan matematiksel model ve 20 mm çapındaki numune için yapılan ölçümün uyumlu olduğu görülmektedir. Şekil 4.35'te model sonuçlarının deney datalarıyla karşılaştırıldığında %20'lik hata bandı içerisinde yer aldığı görülmektedir.

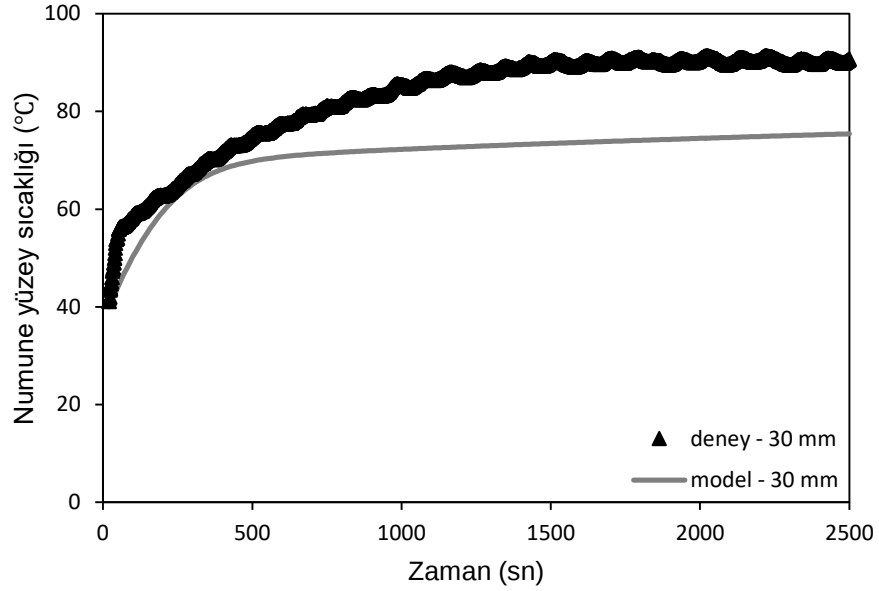


Şekil 4.36 30 mm çapındaki linyit numunelerinin sıcak hava ile kurutulmasının azalan hız periyodunda deneysel ve model ile bulunan numune kütlesinin zamanla değişimi

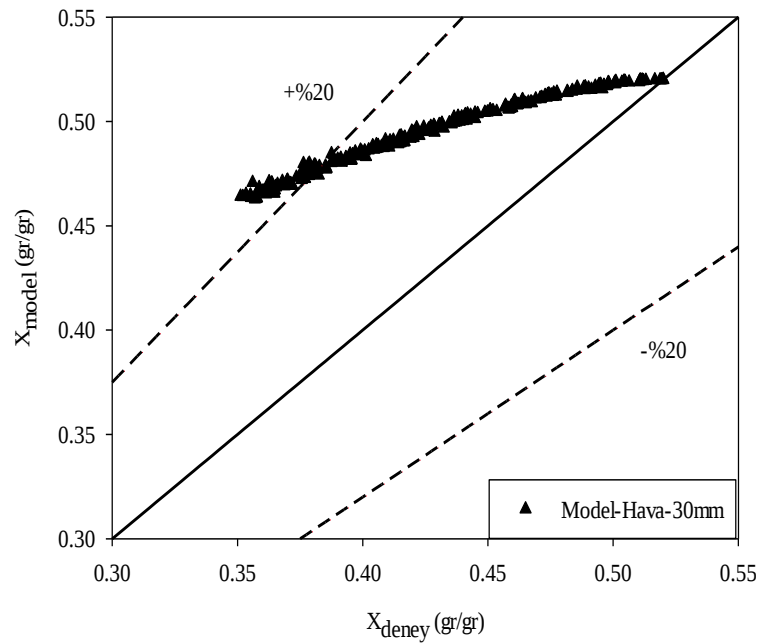


Şekil 4.37 30 mm çapındaki numune yüzey sıcaklığı deney ve model sonuçları karşılaştırılması

Şekil 4.36'da 30 mm çapındaki linyit numunesinin deney esnasında ölçülen nem oranı ve model ile hesaplanan nem oranı gösterilmiştir. Deney sonunda nem oranı 0,35 iken model ile hesaplandığında ise 0,45 olmaktadır. Şekil 4.37 de görüldüğü gibi model sonuçları %20'lik hata bandı içerisinde yer almaktadır.

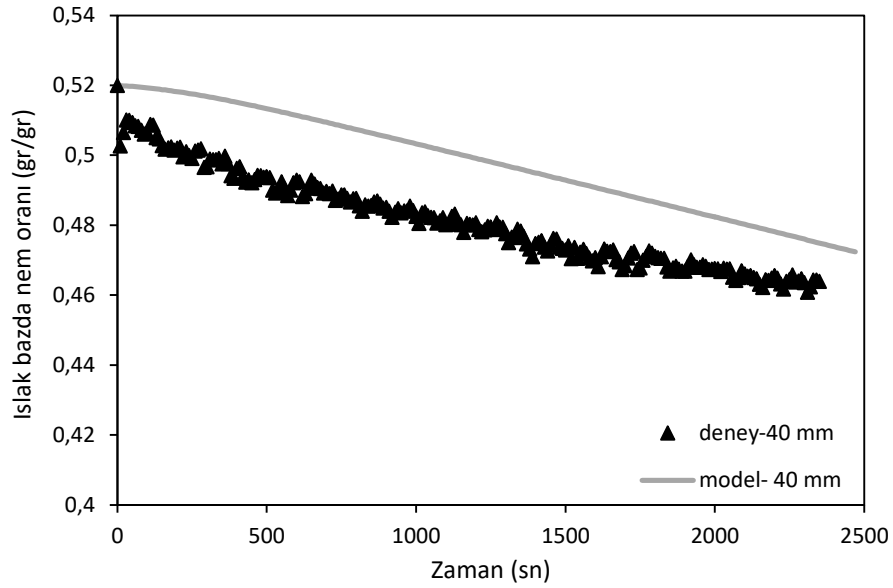


Şekil 4.38 30 mm çapındaki linyit numunelerinin sıcak hava ile kurutulmasının azalan hız periyodunda deneysel ve model ile bulunan numune yüzey sıcaklığının zamanla değişimi



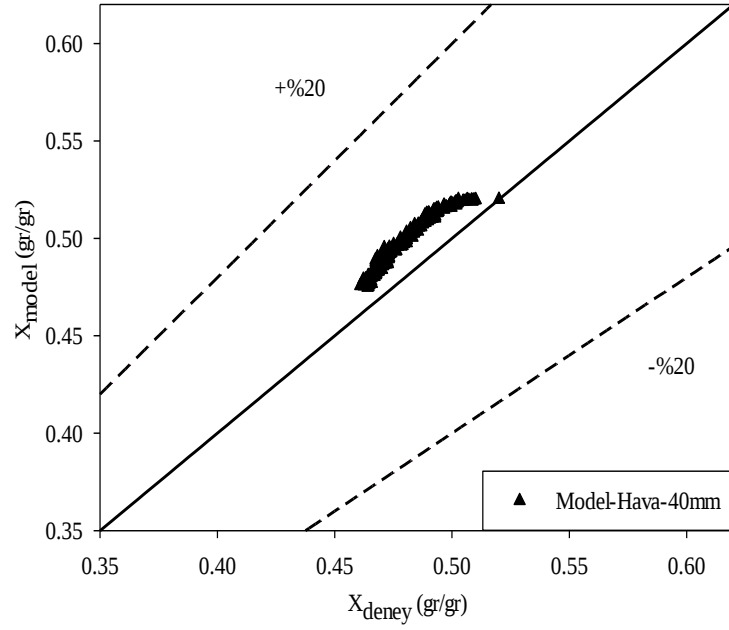
Şekil 4.39 30 mm çapındaki numune nem içeriği deney ve model sonuçları

Şekil 4.38’de 30 mm çapındaki linyit numunesinin deney esnasında ölçülen yüzey sıcaklığı ve model ile hesaplanan yüzey sıcaklığı gösterilmiştir. Deney sonunda ölçülen yüzey sıcaklığı 91 °C iken model ile hesaplandığında 75 olmaktadır. Oluşturulan matematiksel model ve 30 mm çapındaki numune için yapılan ölçümün uyumlu olduğu görülmektedir. Şekil 4.39 da gösterildiği gibi model sonuçları %20 hata bandı içerisinde yer almaktadır.

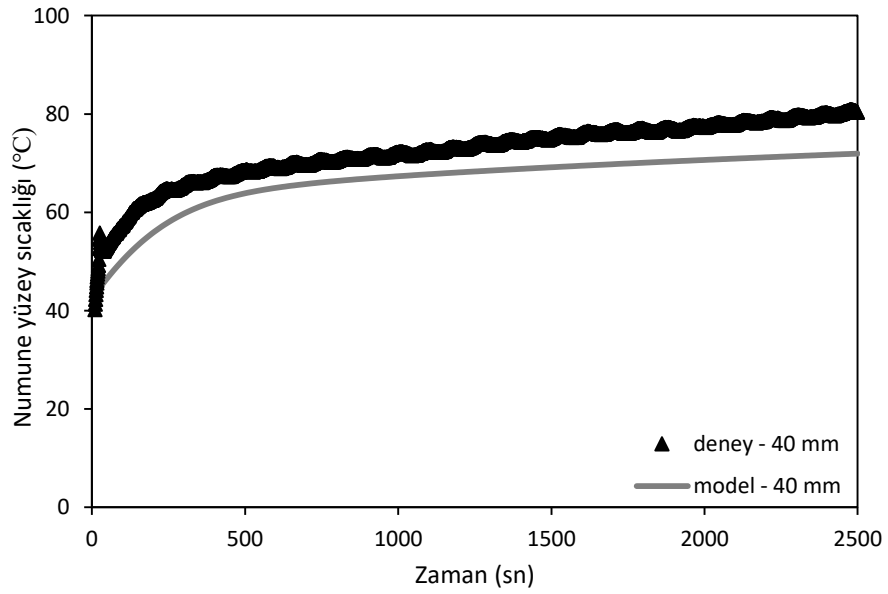


Şekil 4.40 40 mm çapındaki linyit numunelerinin sıcak hava ile kurutulmasının azalan hız periyodunda deneysel ve model ile bulunan numune kütlesinin zamanla değişimi

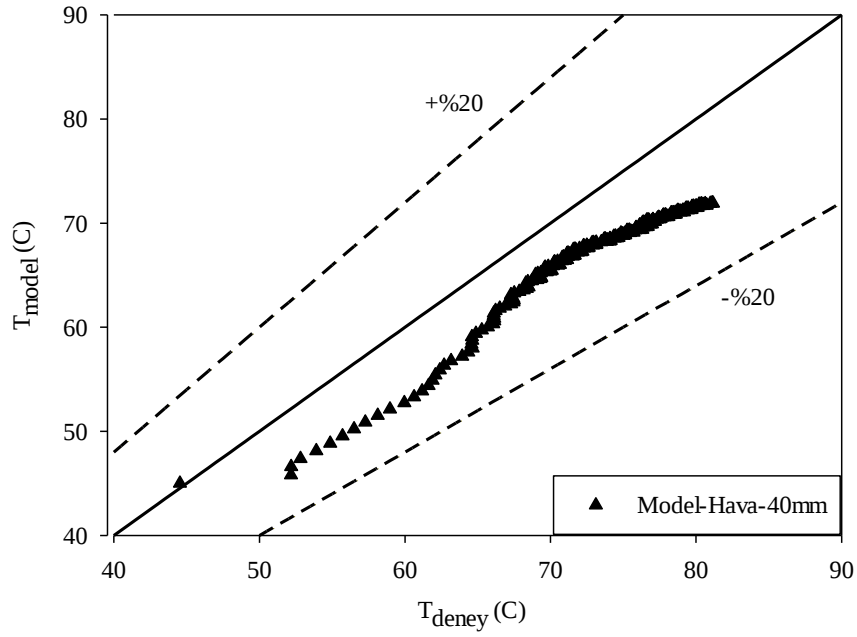
Şekil 4.40’da 40 mm çapındaki numunenin sıcak hava ile kurutulurken zamanla değişen nem oranı ve model ile hesaplanan nem oranı değişimi görülmektedir. Yapılan deney sonucunda ıslak bazda nem oranı %52’ den %46 ya düşerken model sonuçlarına göre 0,47’ ye düşmektedir. Şekil 4.41’ de görüldüğü gibi model sonuçları %20 hata bandı içerisinde yer almaktadır.



Şekil 4.41 40 mm çapındaki numune nem içeriği deney ve model sonuçları karşılaştırılması

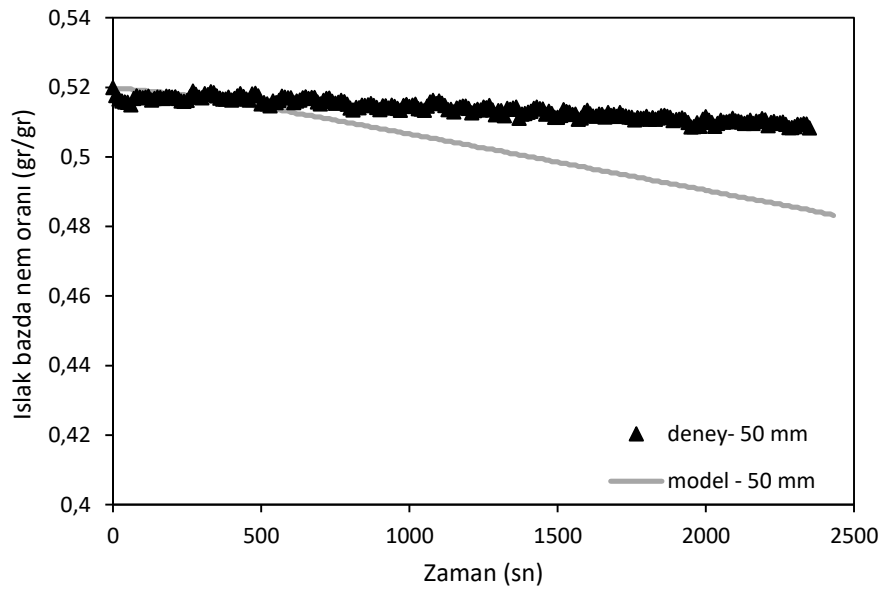


Şekil 4.42 40 mm çapındaki linyit numunelerinin sıcak hava ile kurutulmasının azalan hız periyodunda deneysel ve model ile bulunan numune yüzey sıcaklığının zamanla değişimi

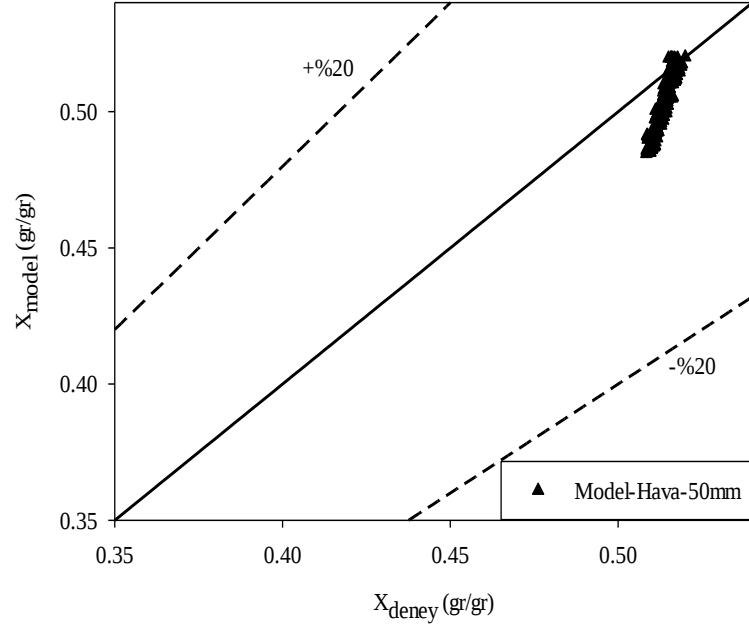


Şekil 4.43 40 mm çapındaki numune yüzey sıcaklığı deney ve model sonuçları karşılaştırılması

Şekil 4.42’de 40 mm çapındaki linyit numunesinin deney esnasında ölçülen yüzey sıcaklığı ve model ile hesaplanan yüzey sıcaklığı gösterilmiştir. Deney sonunda numune yüzey sıcaklığının 80 °C ye ulaştığı görülmektedir. Oluşturulan matematiksel model verilerinin %15 hata bandı içerisinde olduğu Şekil 4.43’den anlaşılmaktadır.

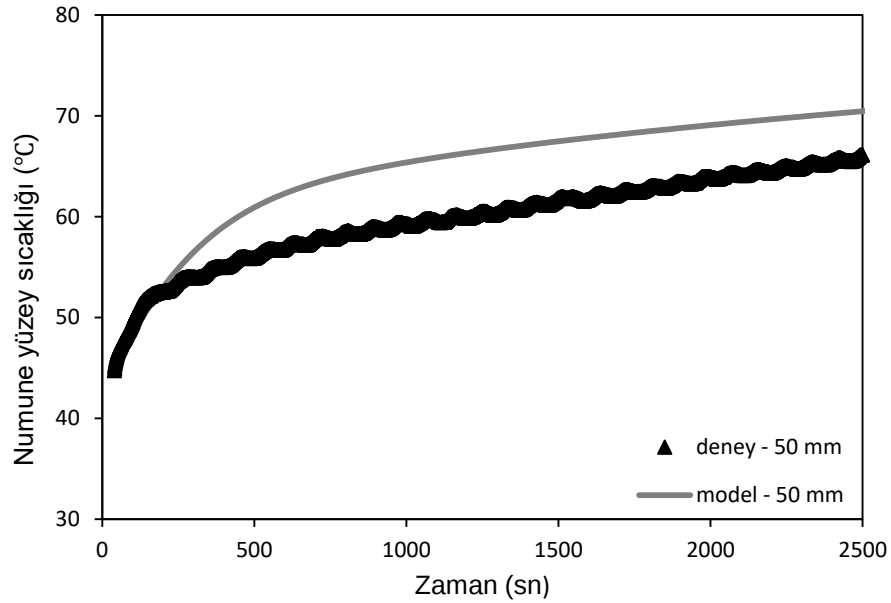


Şekil 4.44 50 mm çapındaki linyit numunelerinin sıcak hava ile kurutulmasının azalan hız periyodunda deneysel ve model ile bulunan numune kütlesinin zamanla değişimi

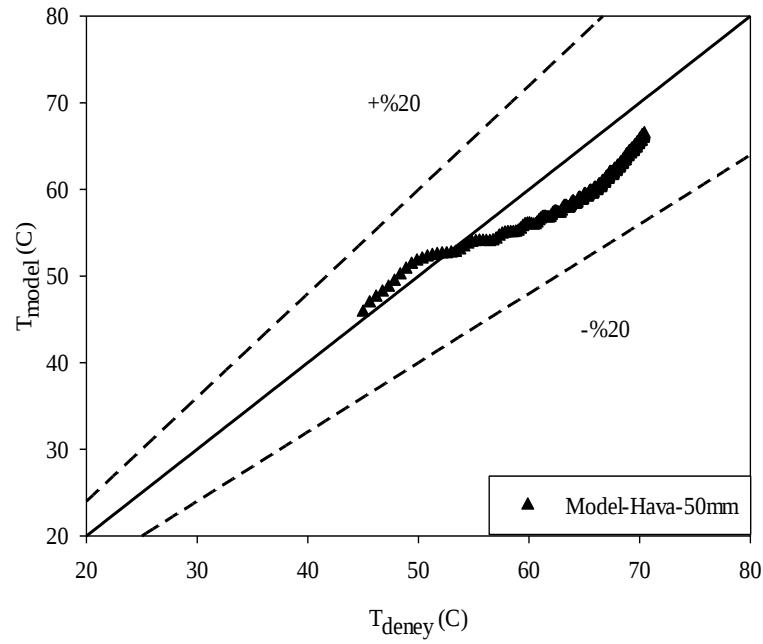


Şekil 4.45 50 mm çapındaki numune nem oranı deney ve model sonuçları karşılaştırılması

Şekil 4.44'te 50 mm çapındaki lintir numunesinin deney datalarıyla hesaplanan nem oranı ve model ile hesaplanan nem oranı gösterilmiştir. Şekil 4.45'te görüldüğü gibi model sonuçları %20 hata bandı içerisindedir.



Şekil 4.46 50 mm çapındaki linyit numunelerinin sıcak hava ile kurutulmasının azalan hız periyodunda deneysel ve model ile bulunan numune yüzey sıcaklığının zamanla değişimi



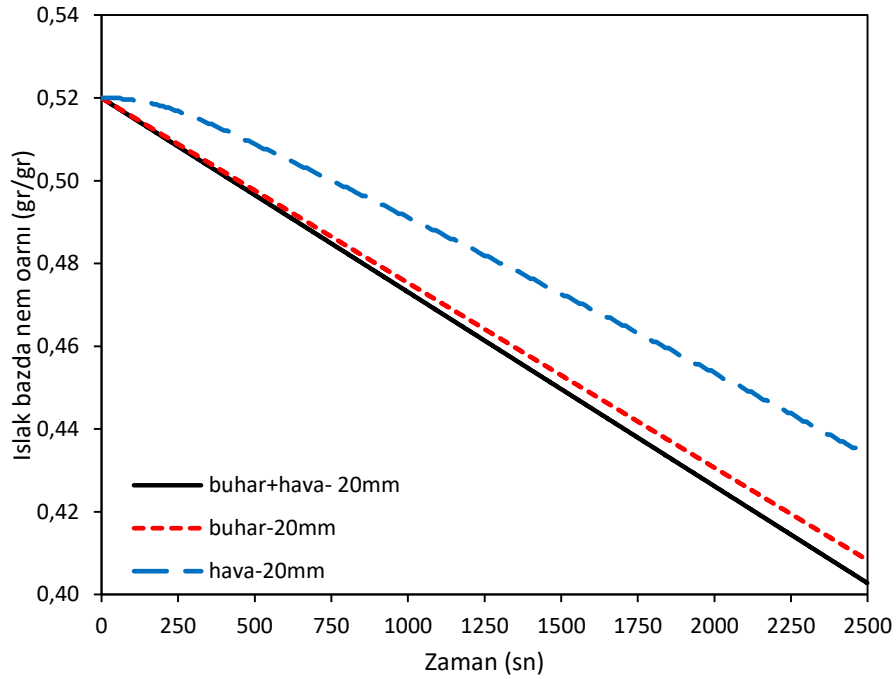
Şekil 4.47 50 mm çapındaki numune yüzey sıcaklığı deney ve model sonuçları karşılaştırılması

Şekil 4.46’de 50 mm çapındaki linyit numunesinin deney esnasında ölçülen yüzey sıcaklığı ve model ile hesaplanan yüzey sıcaklığı gösterilmiştir. Her iki egride yüzey sıcaklığının zamanla arttığı görülmektedir. Oluşturulan matematiksel model ve 50 mm çapındaki numune için yapılan ölçümün uyumlu olduğu görülmektedir. Sonuçların %20 hata bandı içerisinde olduğu Şekil 4.47’ den anlaşılmaktadır.

4.1.3 Kurutmada Hava ve Buharın Birlikte Kullanılması

Alçak basınçta kızgın buhar ve sıcak hava ile yapılan kurutma deneylerine ait veriler ve model sonuçları göz önünde bulundurulursa, kurutma işlemi açısından her iki akışkanında farklı periyotlarda üstünlükleri olduğu görülmektedir. Kızgın buharla kurutmada ön ısıtma ve yoğuşma periyotlarında, yoğuşmada ısı transfer hızının yüksek olması sebebiyle numune yüzey sıcaklığı kısa sürede yükselerek doyma sıcaklığına erişir (Şekil 3.5). Sıcak hava ile kurutmada ise numune yüzey sıcaklığının doyma sıcaklığına erişmesi çok uzun zaman alır (Şekil 3.14). Fakat sıcak hava ile kurutmada ön ısıtmadan sonraki zaman dilimi içerisinde kurutma hızı kızgın buharla kurutmadakinden daha yüksektir. Bu iki akışkanın birbirine karşı üstün olduğu kuruma zamanları düşünülerek hibrit bir kurutma şekli tasarlanmıştır. Bu tasarlanan kurutma yöntemi için deneysel datalar ile doğrulanmış kurutma modelleri kullanılmıştır. Farklı çaplardaki numunelerin kurutma odasına

gönderildikten sonra 120°C kızgın buhara maruz kalarak sıcaklıklarının doyma sıcaklığına eriştiği düşünülmüştür. Daha sonra ise sistemdeki kızgın buharın yerini sıcak hava olarak üstün olduğu periyotlarda daha iyi bir kurutma işlemi sağlayacağı planlanmıştır. Bu hibrit kurutma yönteminde ilk buharlaşma ve yoğuşma periyotlarında kızgın buharla kurutma modeli kullanılıp, doyma sıcaklığına eriştikten sonra sabit hız periyodunda hava ile kurutma modeli kullanılmıştır. Uygulanan model ile elde edilen sonuçlar her bir çap için ayrı ayrı olmak üzere aşağıdaki grafiklerde gösterilmiştir.

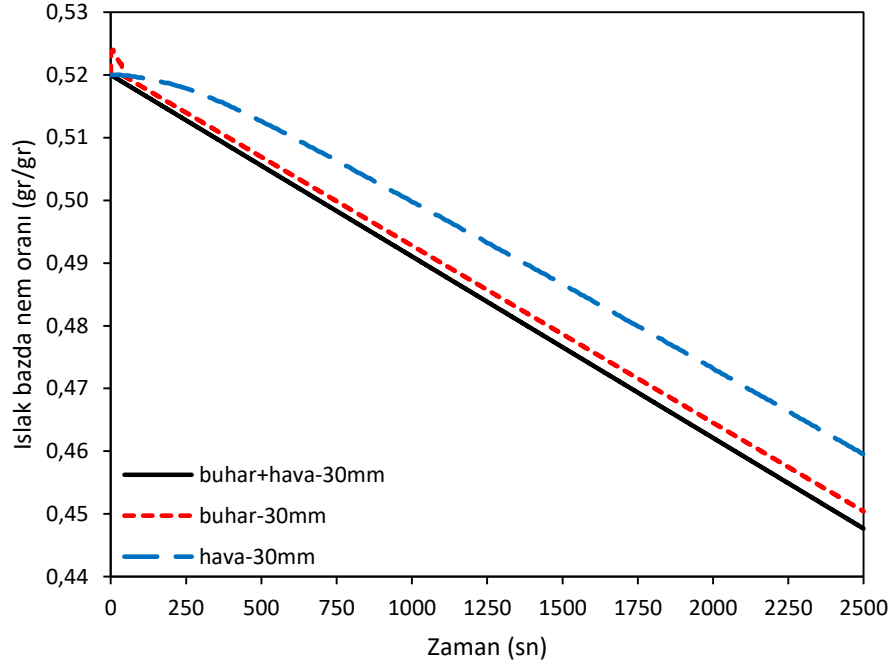


Şekil 4.48 Farklı kurutma şekilleri için 20 mm çapındaki numunenin nem oranının zamanla değişimi (buhar, hava, buhar+hava)

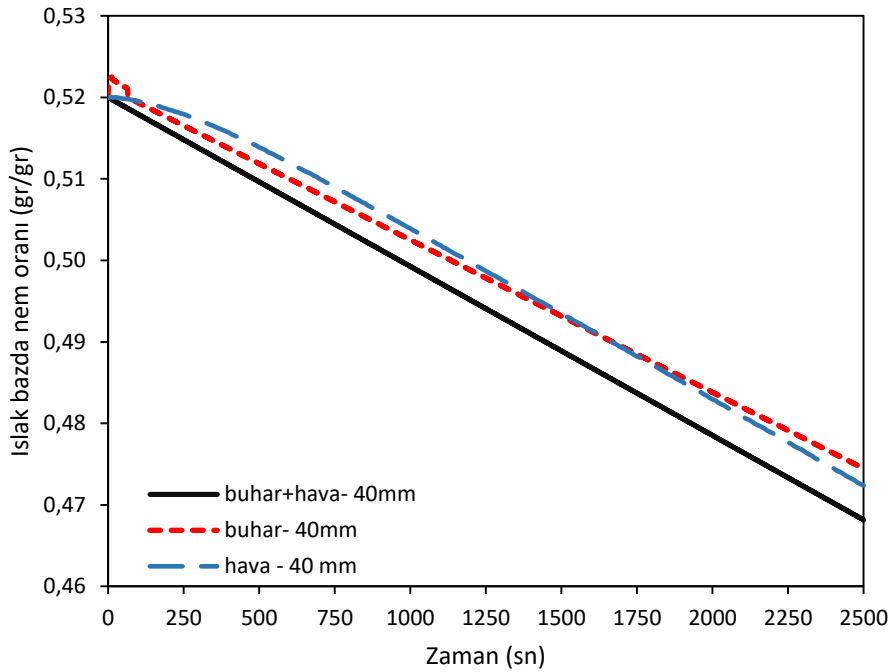
Şekil 4. 48 deki grafikte 20 mm çapındaki numune için kızgın buharla kurutma, hava ile kurutma ve hem buhar hem hava ile kurutma (hibrit kurutma) yöntemleri için model sonuçları görülmektedir. 2500 saniyelik kurutma işleminden sonra numunedeki nem oranları havada 0,43, buharda 0,41 ve hibrit kurutmada ise 0,40 değerine ulaşmıştır.

Şekil 4.49’ da 30 mm çapındaki numunenin kızgın buhar, sıcak hava ve hem buhar hem hava ile kurutulması sonucu elde edilen nem oranı- zaman değişim grafiği görülmektedir. Kurutma işlemleri sonunda hava kullanıldığında numune nem oranı

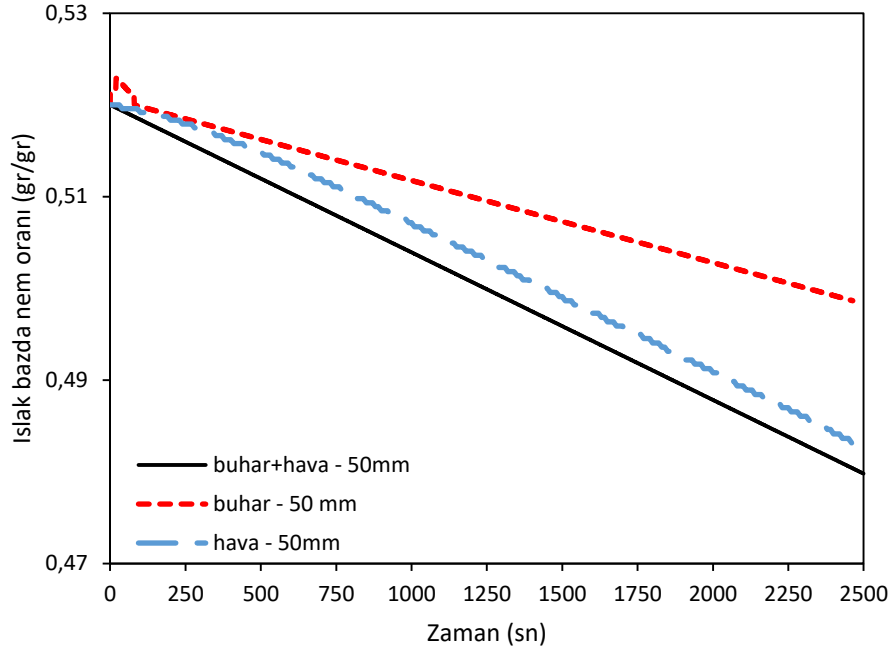
0,46 buhar kullanıldığında 0,45 hibrit kurutma uygulandığında ise 0,447 olmaktadır.



Şekil 4.49 Farklı kurutma şekilleri için 30 mm çapındaki numunenin nem oranının zamanla değişimi (buhar, hava, buhar+hava)



Şekil 4.50 Farklı kurutma şekilleri için 40 mm çapındaki numunenin nem oranının zamanla değişimi (buhar, hava, buhar+hava)



Şekil 4.51 Farklı kurutma şekilleri için 50 mm çapındaki numunenin nem oranının zamanla değişimi (buhar, hava, buhar+hava)

Şekil 4.50’de farklı kurutma ortamlarında kurutulan 40 mm çapındaki numunenin nem oranının zamanla değişimi görülmektedir. Deneysel datalarla doğrulanan modeller ile buharla kurutma sonucu nem oranının 0,4745, hava ile kurutma sonunda 0,4723, önce buhar sonra hava ile kurutma sonunda ise 0,4618 değerine ulaştığı grafikten anlaşılmaktadır.

Şekil 4.51’ de ise 50 mm çapındaki numune için farklı kurutma akışkanlarıyla kurutulurken nem içeriğinin zamanla değişimi görülmektedir. Oluşturulan matematiksel model kullanılarak hava ile kurutma sonucu 0,4831, buharla kurutma sonucu 0,4986 önce buhar sonra hava ile kurutma sonucu ise 0,4798 nem oranına ulaşıldığı görülmektedir.

Deneysel çalışmalar sayısal çalışmalardan farklı olarak çeşitli hatalar içerirler. Bu hataları belirlemek için deneysel çalışmalar sırasında belirlenen parametrelerin hata analizi yapılmaktadır. Bu hata analizi deney sonuçlarının yorumlanması ve uygun ölçüm metodu ile ölçüm aracının seçimi için önemlidir.

Deneysel çalışmalar yapılırken deney yapan kişiden kaynaklı hatalar ve kullanılan ekipmanların hassasiyetlerinden kaynaklı hatalar ortaya çıkabilir. Birinci tür hatalar deneyler sırasında deney yapan kişinin dikkati sayesinde giderilebilir. İkinci tür hatalar ise kullanılan deney aletlerinin seçiminden, özelliklerinden, kalibrasyonundan, çevre ve deney şartlarından ve okuma özelliklerinden kaynaklanmaktadır [78]. Kurutma deneylerinde hata ve belirsizlik analizi yapılırken deney sırasında kullanılan sıcaklık ve kütle ölçümleri dikkate alınmıştır. Bu çalışmada deneyler esnasında meydana gelen sabit hataların hesaplanmasında Kline[79] tarafından tanımlanan belirsizlik analizi metodu kullanılmıştır.

5.1 Sıcaklık Ölçümünde Yapılan Hatalar

5.1.1 Merkez Sıcaklığının Ölçülmesinde Yapılabilecek Toplam Hata

Deneylerde linyit numunesinin merkez sıcaklığının ölçülmesinde kullanılan termokupllar T tipi termokupl olup, hata değerleri $\pm 0,1$ °C' dir. Merkez sıcaklığının ölçülmesinde dikkate alınacak hatalar;

(a₁) termokupllardan kaynaklanan hata $\pm 0,1$ °C,

(b₁) bağlantı elemanları ve noktalarından kaynaklanan hatalar $\pm 0,1$ °C,

(c₁) veri toplama cihazından kaynaklanan hata $\pm 0,1$ °C,

(d₁) merkez sıcaklığının ölçülmesinden kaynaklanan ortalama hata $\pm 0,25$ °C,

Toplam hata değeri ise denklem 5.1 kullanılarak 0,304 °C olarak bulunmuştur.

$$W_{Tm} = [(a_1)^2 + (b_1)^2 + (c_1)^2 + (d_1)^2]^{1/2} \quad (5.1)$$

5.1.2 Yüzey Sıcaklığının Ölçülmesinde Yapılabilecek Toplam Hata

Linyit numunesinin yüzey sıcaklığı ölçümü numune yüzeyine yapıştırılan K tipi termokupl'lar ile yapılmıştır. Bu termokuplların hata değerleri $\pm 0,3$ °C' dir. Yüzey sıcaklığının ölçülmesinde dikkate alınacak hatalar;

(b₁) bağlantı elemanları ve noktalarından kaynaklanan hatalar $\pm 0,1$ °C,

(c₁) veri toplama cihazından kaynaklanan hata $\pm 0,1$ °C,

(e₁) termokupllardan kaynaklanan hata $\pm 0,3$ °C,

(f₁) merkez sıcaklığının ölçülmesinden kaynaklanan ortalama hata $\pm 0,25$ °C,

Toplam hata değeri ise denklem 5.2 kullanılarak 0,415 °C olarak bulunmuştur.

$$W_{Tm} = [(b_1)^2 + (c_1)^2 + (e_1)^2 + (f_1)^2]^{1/2} \quad (5.2)$$

5.2 Kütle Kayıplarının Ölçülmesinde Yapılabilecek Toplam Hata

Deney süresi boyunca sürekli takip edilen numune kütlesi hassas terazi ile ölçülmüştür. Hassas terazinin hata değeri $\pm 0,001$ gramdır. Numune kütlesi ölçümünde deney düzeneği bölümünde anlatılan makara sistemi kullanıldığı için hata analizi yapılırken de göz önüne alınmıştır.

(a₂) hassas teraziden kaynaklanan hata $\pm 0,001$ gr

(b₂) makara sisteminden kaynaklanan hata $\pm 0,5$ gr

Toplam hata değeri ise denklem 5.3 kullanılarak 0,5 gr olarak bulunmuştur.

$$W_{Tm} = [(a_2)^2 + (b_2)^2]^{1/2} \quad (5.3)$$

Tablo 5.1 Deneylere ait belirsizlik analizi sonuçları

Büyükölük	Belirsizlik
Merkez sıcaklık	$\pm 0,304 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Yüzey sıcaklık	$\pm 0,415 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Kütle	$\pm 0,5 \text{ gr}$

Tablo 5.1’de yukarıdaki hesaplama yöntemi kullanılarak elde edilen belirsizlik analizi sonuçları görölmektedir.

Kurutulan linyitlerin nem oranı düşerken ısı değeri artmaktadır. Buna bağlı olarak daha verimli bir yanma ve emisyon değerlerinde azalmalar olmaktadır. Aynı miktardaki enerji daha az linyit kullanılarak elde edilebilecektir. Bu da en önemli yerli kaynaklarımızdan olan linyitin daha verimli kullanımını sağlayacaktır. Bu tez kapsamında termik santrallerde kullanılan düşük ısı değere sahip linyitlerin hem işletme sorunlarının ortadan kaldırılması hem de daha verimli kullanılabilmesi için gerekli olan kömürün kurutulmasına ait deneysel ve teorik çalışmalar yapılmıştır. Kurutmanın literatürdeki çalışmalarda olduğu gibi küçük çaplarda değil değirmenden önceki büyük çaplarda uygun olacağı değerlendirilerek 20-50 mm aralığındaki tek tane kömürün kurutulması için çalışmalar yapılmıştır. Ekonomik bir kurutma sistemi için hem enerji masraflarının hem de yatırım masraflarının önemli olduğu düşünülerek kömür kurutmada termik santrallardan atılan düşük sıcaklıklı akışkanların kullanılması gerektiğinden deneyler kızgın buhar ve sıcak hava için 120°C de yapılmıştır.

Kızgın buharla kurutmada;

- Sırasıyla ön ısıtma, yoğuşma, ilk buharlaşma ve sabit hız periyotları görülmüştür.
- Ön ısıtma periyodunda numune kütleinde bir değişiklik olmazken, numune sıcaklığında hızlı bir artış olduğu görülmüştür. Bunu takiben yüzey sıcaklığı henüz doyma sıcaklığına erişmediği için numune yüzeyinde buharın yoğuşması gerçekleşmiştir.
- Kurutmada meydana gelen yoğuşma sebebiyle numune kütleinde artış meydana gelmektedir. Bu artış çaplara göre 50 mm için 0,31 gr, 40 mm için 0,25 gr, 30 mm için 0,209 gr, 20 mm için ise 0,175 gr olarak ölçülmüştür.
- Yoğuşma periyodunda linyit numunesi üzerinde biriken yoğuşma suyu zamanla artarak damlamalar meydana gelmesine sebep olur. Damlacık kütleleri

deneysel ve teorik analizlerde dikkate alınmıştır. Damlacık sayısının belirlenmesi daha doğru sonuçların elde edilmesi açısından önemlidir.

- Numune çapı büyüdükçe yüzeyde oluşan yoğuşum sıvı filmi kütlesi artmaktadır. Buna paralel olarak yoğuşma periyodu süresi uzamaktadır. Bu süre 50 mm çapındaki numune için 32 saniye, 40 mm çapındaki numune için 29 saniye, 30 mm çapındaki numune için 15 saniye ve 20 mm çapındaki numune için 11 saniyedir.

- İlk buharlaşma periyodunda yoğuşum sıvısının kurumasıyla numune kütlesi başlangıçtaki değerine dönmektedir.

- İlk buharlaşma periyodunun süresi numune çapı arttıkça uzamaktadır. Bu süre 20 mm çapındaki numune için 20 saniye, 30 mm çapındaki numune için 22 saniye, 40 mm çapındaki numune için 51 saniye ve 50 mm çapındaki numune için 65 saniye olarak ölçülmüştür. Bunun sebebi çapla birlikte artan yoğuşma suyu kütlesinin kuruması için daha fazla zaman gerekmesidir.

- Kızgın buhar ile kurutmada numune çapı küçüldükçe nem içeriği daha hızlı bir şekilde düşmektedir. En küçük çaplı numune için ıslak bazda nem içeriği deney sonunda 0,21 olarak en büyük çaplı numune için ise 0,48 olarak belirlenmiştir.

- Kızgın buharla kurutmada numune yüzey sıcaklığı ve merkez sıcaklığı sıcak hava ile kurutmaya göre daha hızlı bir şekilde artmaktadır. Bunun sebebi yoğuşma ısı transfer katsayısı taşınım ısı transfer katsayısından çok daha büyük olduğu için kızgın buharla kurutmada yoğuşma esnasında açığa çıkan ısısında oldukça yüksek olmasıdır.

Sıcak hava ile kurutmada;

- Sırasıyla ön ısıtma ve azalan hızda kurutma periyotları görülmüştür.

- Ön ısıtma periyodunda ulaşılan sıcaklık değerinin kızgın buharla kurutmaya göre daha düşük olduğu görülmüştür.

- Sabit hızda kuruma periyodu görülmemiştir. Ön ısıtma periyodundan sonra kömürün sıcaklığı yükselirken kütlesinin de azaldığı azalan hız periyodu meydana gelmiştir.

- Yüzey sıcaklığı deney boyunca doyma sıcaklığına kadar yükselememiştir.

Kızgın buhar ile kurutma ve sıcak hava ile kurutmanın karşılaştırılması;

- Hem buhar ile kurutma hemde sıcak hava ile kurutmanın farklı aşamalardan oluştuğu görülmüştür. Buharla kurutmada sırasıyla ön ısıtma periyodu, yoğunlaşma periyodu, ilk buharlaşma ve sabit hız periyodu gözlemlenmiştir. Hava ile kurutmada ise sırasıyla ön ısıtma ve azalan hızda kurutma periyotları gözlemlenmiştir. Gözlemlenen periyotların herbiri ayrı ayrı modellenmesi gerektiği sonucu elde edilmiştir.
- Çalışmada verildiği üzere her bir kurutma akışkanı ve aşama için numune yüzey sıcaklığı ve nem değişimini veren modeller oluşturularak deneysel veriler ile doğrulanmıştır. Bu modeller kömürün çapı, yoğunluğu, özgül ısısı, başlangıç kütlesi, numunenin başlangıç sıcaklığı, aynı zamanda kurutma akışkanının sıcaklığı, basıncı kullanılarak oluşturulmuştur.
- Aynı sıcaklık ve basınç altında gerçekleştirilen sıcak hava ve kızgın buhar ile kurutma deneylerinde parçacık çapı küçüldükçe numune nem içeriğinin daha hızlı azaldığı görülmüştür. Tanecik çapı küçüldükçe aynı zamanda kurutma hızı da artmaktadır.
- Her iki kurutma akışkanı içinde ön ısıtma periyodunun oldukça kısa olduğu görülmüştür. Bu süre çapa bağlı olarak değişmektedir. Kızgın buharla kurutmada yoğunlaşma periyodu ile birlikte düşünülüp Tablo 4.1 de farklı çaplar için süreler belirtilmiştir. Sıcak hava ile kurutmada ise Şekil 4.14'te numune çapı ile ön ısıtma süresinin değişimi gösterilmiş olup, 50 mm için 40 saniye, 40 mm için 26 saniye, 30 mm için 19 saniye ve 20 mm için 7 saniyedir.
- Hem kızgın buharla hem de sıcak hava ile kurutmada yüzey sıcaklığının zamanla değişimine kıyasla linyit numunesinin merkez sıcaklığı daha yavaş bir şekilde yükselmektedir. Yüzey sıcaklığı bütün numuneler için deney sonunda 95-100 °C aralığındadır. Deney sonunda merkez sıcaklığı en küçük çaplı numune olan 20 mm çapındaki numune için 92 °C, en büyük çaplı numune olan 50 mm çapındaki numune için ise 85,5 °C olarak ölçülmüştür.
- Hem kızgın buharla hem de sıcak hava ile kurutmada linyit numunesinin çapı azaldıkça kurutma hızı artmıştır. (Şekil 3.7 ve Şekil 3.16).

- Gerek kızgın buharla kurutmada gerekse sıcak hava ile kurutmada literatürdeki çalışmaların aksine ışınlama ısı transferinin kurutma modeli oluşturulurken dikkate alınması gerektiği görülmektedir ve bu çalışmada oluşturulan modelde dikkate alınmıştır.

Kızgın buhar ve sıcak hava ile kurutmanın her bir periyodu için ayrı ayrı modeller geliştirilmiştir. Deneysel sonuçlarla modelden elde edilen sonuçların genellikle birbirleriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Yüzey sıcaklığı ve nem içeriğinin zamanla değişimini veren bu modeller en fazla %30 hata içermektedir.

Bu çalışmada farklı çaplarda tek tane kömür kurutması incelenmiş olup elde edilen modeller büyük taneli kömür kurutma sistemlerinin tasarlanmasında kullanılabilir. Mevcut termik santrallerde ise kömür kırıcılardan geçirilerek depolanmaktadır. Kömür karışımındaki tane boyutu büyüklüklerinin kurutmaya etki eden en önemli parametrelerden biri olduğu bu çalışmada ortaya konmuştur. Elde edilen modeller, farklı boyutlardaki kömür taneciklerinin kurutma karakteristiklerinin belirlenmesinde kullanılabilir. Ayrıca bu modeller geliştirilerek yığın kömürlerin kurutulmasının modellenmesinde de alt yapı oluşturabilir. Bu modeller kullanılarak farklı oranlardaki yığın kömürlerin kurutulmasının modellenmesi gereklidir. Düşük sıcaklı kurutma prosesindeki zamana bağlı nem içeriklerinin elde edilmesi sistem boyutlandırılmasında hesaplamaları kolaylaştıracaktır.

$$m_{coal,1} = 0,118$$

$$Q_{basin(i)} = h_{dt(i)} \cdot (T_g - T_{lk(i)}) \cdot A_i \quad (\text{for } i = 1 \text{ to } 25)$$

$$h_{dt(i)} = \frac{Nus_i \cdot k_{sj}}{D_i} \quad (\text{for } i = 1 \text{ to } 25)$$

$$Nus_i = 2 + \frac{0,589 \cdot Ra_i^{(1/4)}}{\left[1 + \left[\frac{0,469}{Pr_i}\right]^{0,5625}\right]^{(4/9)}} \quad (\text{for } i = 1 \text{ to } 25)$$

$$\nu_i = \text{KinematicViscosity}(\text{steam}; T = T_{tj}; P = P_{atm}) \quad (\text{for } i = 1 \text{ to } 25)$$

$$Pr_i = \text{Pr}(\text{steam}; T = T_{tj}; P = P_{atm}) \quad (\text{for } i = 1 \text{ to } 25)$$

$$k_{sj} = k(\text{steam}; T = T_{tj}; x = 1) \quad (\text{for } i = 1 \text{ to } 25)$$

$$Q_{radiasyon(i)} = \sigma \cdot ((T_g + 273)^4 - (T_{lk(i)} + 273)^4) \cdot A_i \quad (\text{for } i = 1 \text{ to } 25)$$

$$h_{conden(i)} = 0,815 \cdot \left[\frac{g \cdot \rho_{ij} \cdot (\rho_{ij} - \rho_v) \cdot h_{fg} \cdot k_{ij}^3}{\mu_{ij} \cdot (T_{day} - T_{lk(i)}) \cdot D_i} \right]^{0,25} \quad (\text{for } i = 1 \text{ to } 25)$$

$$\rho_{ij} = \rho(\text{water}; T = T_{tj}; x = 0) \quad (\text{for } i = 1 \text{ to } 25)$$

$$\Delta h_{vap(i)} = \text{Enthalpy}_{\text{vaporization}}(\text{water}; T = T_{day}) \quad (\text{for } i = 1 \text{ to } 25)$$

$$cp_i = \text{Cp}(\text{water}; T = T_{tj}; P = P_{atm}) \quad (\text{for } i = 1 \text{ to } 25)$$

$$k_{ij} = k(\text{water}; T = T_{tj}; x = 0) \quad (\text{for } i = 1 \text{ to } 25)$$

$$\mu_{ij} = \text{Visc}(\text{water}; T = T_{tj}; x = 0) \quad (\text{for } i = 1 \text{ to } 25)$$

$$\frac{T_{lk(i+1)} - T_{lk(i)}}{t} = \frac{6}{q_{coal} \cdot cp_{coal} \cdot D_i} \cdot \left[h_{dt(i)} \cdot (T_g - T_{lk(i)}) + e \cdot \sigma \cdot (373^4 - T_{lk(i)}^4) + m_{cond,1} \cdot \frac{h_{fg,i}}{A_i} \right] \quad (\text{for } i = 1 \text{ to } 25)$$

$$M_{wet} = \frac{m_{coal,1} \cdot 0,52 + m_{cond(i)}}{m_{coal,1} \cdot 0,52 + m_{cond(i)} + m_{coal,1} \cdot 0,48} \quad (\text{for } i = 1 \text{ to } 25)$$

$$T_{lk(i)} = T_{lk} + 273 \quad (\text{for } i = 1 \text{ to } 25)$$

$$m_{\text{coal}(j+1)} = m_{\text{cond}(j)} + m_{\text{coal}(j)} \quad (\text{for } i = 1 \text{ to } 25)$$

$$A_i = 4 \cdot \pi \cdot r_{1i}^2 \quad (\text{for } i = 1 \text{ to } 25)$$

$$r_{1i} = \frac{D_i}{2} \quad (\text{for } i = 1 \text{ to } 25)$$

$$cp_{\text{coal}} = 1800$$

$$T_{gk} = T_g + 273$$

$$\rho_v = \rho(\text{water}; T = T_g; P = P_{\text{atm}})$$

$$\sigma = \frac{5,67}{10^8}$$

$$P_{\text{atm}} = 100$$

$$g = 9,81$$

$$q_{\text{coal}} = 1800$$

$$T_g = 120$$

$$t = 1$$

$$e = 1$$

$$Q_{\text{taslim}} = h_d \cdot A \cdot (T_g - T_{ik})$$

$$h_d = \frac{Nus \cdot k_s}{D}$$

$$Nus = 2 + \frac{0.599 \cdot Ra^{(1/4)}}{\left[1 + \left[\frac{0.469}{Pr} \right]^{0.5625} \right]^{(4/9)}}$$

$$Ra = g \cdot \beta \cdot (T_g - T_{ik}) \cdot D^3 \cdot \frac{Pr}{\nu^2}$$

$$\nu = \text{KinematicViscosity}(\text{steam}; T = T_f; P = P_{\text{atm}})$$

$$Pr = Pr(\text{steam}; T = T_{ik}; x = 1)$$

$$k_s = k(\text{steam}; T = T_{ik}; x = 1)$$

$$\beta = \frac{1}{T_f + 273}$$

$$\rho_l = \rho(\text{water}; T = T_f; x = 0)$$

$$\Delta h_{\text{vap}} = \text{EnthalpyVaporization}(\text{water}; T = T_{\text{doy}})$$

$$cp = Cp(\text{water}; T = T_f; P = P_{\text{atm}})$$

$$k_l = k(\text{water}; T = T_f; x = 0)$$

$$\mu_l = \text{Visc}(\text{water}; T = T_f; x = 0)$$

$$A = 4 \cdot \pi \cdot r^2$$

$$T_f = \frac{T_{\text{doy}} + T_{ik}}{2}$$

$$r = \frac{D}{2}$$

$$cp_{\text{coal}} = 1300$$

$$\rho_v = \rho(\text{water}; T = T_g; P = P_{\text{atm}})$$

$$\sigma = \frac{5.67}{10^8}$$

$$P_{\text{atm}} = 100$$

$$g = 9.81$$

$$D = 0.05$$

$$t = 1$$

$$T_g = 120$$

$$m_{ik} = 0,0614$$

$$m_{max} = m_{top} - m_{damtlack}$$

$$t_{buh} = \frac{m_{top} - m_{damtlack}}{m_{buhar}}$$

$$r_{red} = \left[\frac{\left[\left(\frac{E}{r} \right)^4 + 4 \cdot E^2 \right]^{0,5} - \left(\frac{E}{r} \right)^2}{2} \right]^{0,5}$$

$$E = 0,0000106$$

$$M_{dry} = \frac{m_{coal} \cdot 0,52 + m_{top} - m_{buhar} \cdot t}{m_{coal} \cdot 0,48}$$

$$M_{wet} = \frac{m_{coal} \cdot 0,52 + m_{top} - m_{buhar} \cdot t}{m_{coal} \cdot 0,52 + m_{top} - m_{buhar} \cdot t + m_{coal} \cdot 0,48}$$

$$Q_{\text{transm}} = h_d \cdot A \cdot (T_g - T_{ik})$$

$$Nus = 2 + \frac{0,589 \cdot Ra^{(1/4)}}{\left[1 + \left[\frac{0,469}{Pr} \right]^{0,9625} \right]^{(4/9)}}$$

$$\nu = \text{KinematicViscosity}(\text{steam}; T = T_f; P = P_{\text{atm}})$$

$$Pr = Pr(\text{steam}; T = T_{ik}; x = 1)$$

$$k_s = k(\text{steam}; T = T_{ik}; x = 1)$$

$$\beta = \frac{7,501}{10^{-4}}$$

$$\Delta h_{\text{vap}} = \text{Enthalpy}_{\text{vaporization}}(\text{water}; T = T_{\text{sat}})$$

$$M_t = M_0 - \left[\frac{(h_d \cdot (T_g - T_{ik}) + e \cdot \sigma \cdot (T_{gk}^4 - T_{ikk}^4)) \cdot t \cdot 3}{r \cdot \Delta h_{\text{vap}} \cdot (q_p \cdot E_s + q_w \cdot (1 - E_s))} \right]$$

$$T_{gk} = T_g + 273$$

$$T_{ikk} = T_{ik} + 273$$

$$E_s = 0,52$$

$$M_0 = 0,52$$

$$\sigma = \frac{5,67}{10^{-8}}$$

$$r = \frac{D}{2}$$

$$cp_{\text{coal}} = 1300$$

$$t = 1$$

$$\rho_v = \rho(\text{water}; T = T_g; P = P_{\text{atm}})$$

$$\frac{M_t}{1 - M_t} = M_{\text{dry}}$$

$$P_{\text{atm}} = 100$$

$$g = 9,81$$

$$D = 0,05$$

$$T_g = 120$$

$$m_{\text{coal},1} = 0,115$$

$$\frac{T_{\text{ikj}+1} - T_{\text{ikj}}}{t} = \frac{6}{q_{\text{coal}} \cdot c_{p\text{coal}} \cdot D_i} \cdot \left[h_i \cdot (T_g - T_{\text{ikj}}) + e \cdot \sigma \cdot (T_g^4 - T_{\text{ikj}}^4) - m_{\text{evap},j} \cdot \Delta h_{\text{vap}} \right] \cdot \frac{1000}{\pi \cdot D_i^2} \quad (\text{for } i = 1 \text{ to } 250)$$

$$\Delta h_{\text{vap},j} = \text{Enthalpy}_{\text{vaporization}} (\text{water}; T = T_{tj}) \quad (\text{for } i = 1 \text{ to } 250)$$

$$c_{p,i} = \text{Cp} (\text{water}; T = T_{tj}; P = P_{\text{atm}}) \quad (\text{for } i = 1 \text{ to } 250)$$

$$m_{\text{coal},j+1} = m_{\text{coal},j} - m_{\text{evap},j} \cdot t \quad (\text{for } i = 1 \text{ to } 250)$$

$$Pr_i = \text{Pr} (\text{Air}_{\text{ha}}; T = T_{tj}; P = P_{\text{atm}}) \quad (\text{for } i = 1 \text{ to } 250)$$

$$T_{tj} = \frac{T_g + T_{\text{ikj}}}{2} \quad (\text{for } i = 1 \text{ to } 250)$$

$$h_i = \frac{\text{Nus}_{\text{gj}} \cdot k_i}{D_i} \quad (\text{for } i = 1 \text{ to } 250)$$

$$\text{Re}_i = \frac{V \cdot D_i}{\nu_i} \quad (\text{for } i = 1 \text{ to } 250)$$

$$T_{\text{ikj}} = T_{\text{ikj}} + 273 \quad (\text{for } i = 1 \text{ to } 250)$$

$$y_{\text{buhar},j} = \frac{P_{\text{b},j}}{P_{\text{atm}}} \quad (\text{for } i = 1 \text{ to } 250)$$

$$P_{\text{b},j} = P_{\text{sat}} (\text{steam}; T = T_{\text{ikj}}) \quad (\text{for } i = 1 \text{ to } 250)$$

$$C_i = \frac{P_{\text{atm}}}{Ru \cdot T_{\text{ikj}}} \quad (\text{for } i = 1 \text{ to } 250)$$

$$N_{A,j} = \left[\frac{4 \cdot \pi \cdot C_i \cdot D_{A,B,j}}{\frac{1}{r_i} - \frac{1}{0,025}} \right] \cdot \ln \left[\frac{1}{1 - y_{\text{buhar},j}} \right] \quad (\text{for } i = 1 \text{ to } 250)$$

$$r_i = \frac{D_i}{2} \quad (\text{for } i = 1 \text{ to } 250)$$

$$m_{\text{coal},j} = q_{\text{coal}} \cdot 4 / 3 \cdot \pi \cdot r_i^3 \quad (\text{for } i = 1 \text{ to } 250)$$

$$q_{T_{\text{ikj}}} = \rho (\text{steam}; T = T_{\text{ikj}}; x = 1) \quad (\text{for } i = 1 \text{ to } 250)$$

$$\nu_i = \text{KinematicViscosity}(\text{Air}_{hs}; T = T_{tj}; P = P_{atm}) \quad (\text{for } i = 1 \text{ to } 250)$$

$$u_g = \text{Visc}(\text{Air}_{hs}; T = T_g; P = P_{atm})$$

$$T_g = 120$$

$$\sigma = \frac{5.67}{10^8}$$

$$e = 1$$

$$T_{gk} = T_g + 273$$

$$q_{cool} = 1800$$

$$T_{dry} = 100$$

$$P_{atm} = 100$$

- [1] M. Karthikeyan, W. Zhonghua, and A. S. Mujumdar, "Low-rank coal drying technologies - Current status and new developments," *Dry. Technol.*, vol. 27, no. 3, pp. 403–415, 2009.
- [2] T. Thielemann, S. Schmidt, and J. Peter Gerling, "Lignite and hard coal: Energy suppliers for world needs until the year 2100 - An outlook," *Int. J. Coal Geol.*, vol. 72, no. 1, pp. 1–14, 2007.
- [3] S. V. Jangam, M. Karthikeyan, and A. S. Mujumdar, "A critical assessment of industrial coal drying technologies: Role of energy, emissions, risk and sustainability," *Dry. Technol.*, vol. 29, no. 4, pp. 395–407, 2011.
- [4] G. D. Bongers, W. R. Jackson, and F. Woskoboenko, "Pressurised steam drying of Australian low-rank coals Part 2. Shrinkage and physical properties of steam dried coals, preparation of dried coals with very high porosity," *Fuel Process. Technol.*, vol. 64, no. 1, pp. 13–23, 2000.
- [5] S. Elevli and A. Demirci, "BAZI KOMUR ÖZELLİKLERİNİN TERMİK SANTRAL VERİMLİLİĞİ ve KÖMÜR FİYATLARI ÜZERİNE ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI," in *Türkiye 14 Kömür Kongresi*, 2004, pp. 285–291.
- [6] M. Liu, J. Yan, B. Bai, D. Chong, X. Guo, and F. Xiao, "Theoretical study and case analysis for a Predried Lignite-Fired Power System," *Dry. Technol.*, vol. 29, no. 10, pp. 1219–1229, 2011.
- [7] X. Guo, M. Liu, F. Lai, D. Chong, J. Yan, and F. Xiao, "Theoretical Study and Case Analysis of a Predried Lignite-Fired Power Plant with the Waste Heat Recovery System," *Dry. Technol.*, vol. 30, no. 4, pp. 425–434, 2012.
- [8] H. S. Kim *et al.*, "Fluidized bed drying of Loy Yang brown coal with variation of temperature, relative humidity, fluidization velocity and formulation of its drying rate," *Fuel*, vol. 105, pp. 415–424, 2013.
- [9] D. J. Allardice, L. M. Clemow, G. Favas, W. R. Jackson, M. Marshall, and R. Sakurovs, "The characterisation of different forms of water in low rank coals and some hydrothermally dried products," *Fuel*, vol. 82, no. 6, pp. 661–667, 2003.
- [10] M. Karthikeyan, J. V. M. Kuma, C. S. Hoe, and D. L. Y. Ngo, "Factors affecting quality of dried low-rank coals," *Dry. Technol.*, vol. 25, no. 10, pp. 1601–1611, 2007.
- [11] B. Lucarelli, "Benefits of ' Drying ' Indonesian Low Rank Coals," *Clean. Coal Work.*, no. October, pp. 19–21, 2008.
- [12] W. G. Willson, D. Walsh, and W. Irwin, "Overview of low-rank coal (LRC) drying," *Coal Preparation*, vol. 18, no. 1–2. Routledge, pp. 1–15, 1997.
- [13] Y. S. Nugroho, A. C. McIntosh, and B. M. Gibbs, "Low-temperature oxidation of single and blended coals," *Fuel*, vol. 79, no. 15, pp. 1951–1961, 2000.
- [14] Y. Yu, W. Liang, Y. Hu, and Q. Meng, "Study of micro-pores development in lean coal with temperature," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 51, pp. 91–96,

2012.

- [15] C.-Z. Li, *Advances in the science of Victorian brown coal*. Elsevier, 2004.
- [16] T. K. Gale, T. H. Fletcher, and C. H. Bartholomew, "Effects of Pyrolysis Conditions on Internal Surface Areas and Densities of Coal Chars Prepared at High Heating Rates in Reactive and Nonreactive Atmospheres," *Energy & Fuels*, vol. 9, no. 3, pp. 513–524, May 1995.
- [17] H. Osman, S. V. Jangam, J. D. Lease, and A. S. Mujumdar, "Drying of Low-Rank Coal (LRC)—A Review of Recent Patents and Innovations," *Dry. Technol.*, vol. 29, no. 15, pp. 1763–1783, Dec. 2011.
- [18] I. Dincer and C. Zamfirescu, *Drying phenomena: theory and applications*. John Wiley & Sons, 2016.
- [19] I. Hamawand, "Drying Steps under Superheated Steam: A Review and Modeling," *Energy Environ. Res.*, vol. 3, no. 2, 2013.
- [20] H. Iyota, N. Nishimura, T. Onuma, and T. Nomura, "Drying of sliced raw potatoes in superheated steam and hot air," *Dry. Technol.*, vol. 19, no. 7, pp. 1411–1424, 2001.
- [21] Z. Berk, *Food process engineering and technology*. Academic Press, 2018.
- [22] A. S. Mujumdar, *INDUSTRIAL*. 2014.
- [23] N. İzli, "Bazı tarımsal ürünlerin mikrodalga konvektif kurutma yöntemiyle ince tabaka kurutma kuramına göre kurutulmasında kurutma parametrelerinin belirlenmesi," Uludağ Üniversitesi, 2012.
- [24] ISO 1170, "Coal and Coke - Calculation of analyses to different bases," 2013.
- [25] ASTM D 3180, "Standard Practice for Calculating Coal and Coke Analyses from As-Determined to Different Bases," 2002.
- [26] ASTM D 2216, "Standard Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass ;," 1998.
- [27] M. Özdeş, "Kurutma prosesinde kurutma hava hız ve sıcaklığının ekserji verimine etkisi," Aksaray Üniversitesi, 2013.
- [28] F. Debaste, F. Dubois, and V. Halluin, "Experimental study and modelling of the evaporation in capillary tubes simulating a porous media," *CHISA 2006 - 17th Int. Congr. Chem. Process Eng.*, 2006.
- [29] G. D. Bongers, W. R. Jackson, and F. Woskoboenko, "Pressurised steam drying of Australian low-rank coals Part 1. Equilibrium moisture contents," *Fuel Process. Technol.*, vol. 57, no. 1, pp. 41–54, 1998.
- [30] E. Levy, "Use of Coal Drying To Reduce Water Consumed in Pulverized Coal Power Plants," *Analysis*, no. October, 2005.
- [31] S. Niksa and B. Krishnakumar, "Predicting The Steam Drying Behavior Of Brown Coals And Lignites," *Fuel*, vol. 159, pp. 345–353, Nov. 2015.
- [32] K. Zhang and C. You, "Experimental and Numerical Investigation of Convective Drying of Single Coarse Lignite Particles," *Energy & Fuels*, vol. 24, no. 12, pp. 6428–6436, Dec. 2010.

- [33] A. Y. Looi, K. Golonka, and M. Rhodes, "Drying kinetics of single porous particles in superheated steam under pressure," *Chem. Eng. J.*, vol. 87, no. 3, pp. 329–338, Aug. 2002.
- [34] Z. Chen, W. Wu, and P. K. Agarwal, "Steam-drying of coal. Part 1. Modeling the behavior of a single particle," *Fuel*, vol. 79, no. 8, pp. 961–974, 2000.
- [35] Y. Komatsu *et al.*, "An experimental investigation on the drying kinetics of a single coarse particle of Belchatow lignite in an atmospheric superheated steam condition," *Fuel Process. Technol.*, vol. 131, pp. 356–369, 2015.
- [36] Y. Komatsu *et al.*, "Experimental and analytical evaluation of the drying kinetics of Belchatow lignite in relation to the size of particles," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, vol. 745, no. 3.
- [37] T. Kiriya, H. Sasaki, A. Hashimoto, S. Kaneko, and M. Maeda, "Evaluation of Drying Rates of Lignite Particles in Superheated Steam Using Single-Particle Model," *Metall. Mater. Trans. E*, vol. 3, no. 4, pp. 308–316, Dec. 2016.
- [38] T. Kiriya, H. Sasaki, A. Hashimoto, S. Kaneko, and M. Maeda, "Size Dependence of the Drying Characteristics of Single Lignite Particles in Superheated Steam," *Metall. Mater. Trans. E*, vol. 1, no. 4, pp. 349–363, Dec. 2014.
- [39] Z. Chen, P. K. Agarwal, and J. B. Agnew, "Steam drying of coal. Part 2. Modeling the operation of a fluidized bed drying unit," *Fuel*, vol. 80, no. 2, pp. 209–223, 2001.
- [40] C. E. Salmas, A. H. Tsetsekou, K. S. Hatzilyberis, and G. P. Androutsopoulos, "Evolution lignite mesopore structure during drying. Effect of temperature and heating time," *Dry. Technol.*, vol. 19, no. 1, pp. 35–64, 2001.
- [41] D. Stokie, M. W. Woo, and S. Bhattacharya, "Comparison of Superheated Steam and Air Fluidized-Bed Drying Characteristics of Victorian Brown Coals," *Energy & Fuels*, vol. 27, no. 11, pp. 6598–6606, Nov. 2013.
- [42] M. W. Woo, D. Stokie, W. L. Choo, and S. Bhattacharya, "Master curve behaviour in superheated steam drying of small porous particles," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 52, no. 2, pp. 460–467, 2013.
- [43] S. A. Yang and C. K. Chen, "Laminar film condensation on a finite-size horizontal plate with suction at the wall," *Appl. Math. Model.*, vol. 16, no. 6, pp. 325–329, 1992.
- [44] A. Sciazko *et al.*, "Experimental attempts to investigate the influence of petrographic properties on drying characteristics of lignite in superheated steam atmosphere," *Energies*, vol. 9, no. 5, 2016.
- [45] D. Yang, Z. Wang, X. Huang, Z. Xiao, and X. Liu, "Numerical simulation on superheated steam fluidized bed drying: I. Model construction," *Dry. Technol.*, vol. 29, no. 11, pp. 1325–1331, Jan. 2011.
- [46] M. T. Akkoyunlu, E. Pekel, M. C. Akkoyunlu, S. Pusat, C. Özkan, and S. S. Kara, "Determination of Effective Parameters for Coal Moisture Content Determination Using a 'Design of Experiment' Method," *Int. J. Coal Prep. Util.*, vol. 38, no. 8, pp. 443–450, 2018.

- [47] K. Zhang and C. You, "Experimental and Numerical Investigation of Lignite Particle Drying in a Fixed Bed," *Energy & Fuels*, vol. 25, no. 9, pp. 4014–4023, Sep. 2011.
- [48] Z. Song *et al.*, "Coal slime hot air/microwave combined drying characteristics and energy analysis," *Fuel Process. Technol.*, vol. 156, pp. 491–499, 2017.
- [49] H. Iyota, N. Nishimura, M. Yoshida, and T. Nomura, "Simulation of superheated steam drying considering initial steam condensation," *Dry. Technol.*, vol. 19, no. 7, pp. 1425–1440, 2001.
- [50] H. Iyota, T. Nomura, and N. Nishimura, "A reverse process of superheated steam drying from condensation to evaporation," *Heat Transf. Res.*, vol. 28, no. 5, pp. 352–366, 1999.
- [51] J. Hager, M. Hermansson, and R. Wimmerstedt, "Modelling steam drying of a single porous ceramic sphere: Experiments and simulations," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 52, no. 8, pp. 1253–1264, 1997.
- [52] S. Hu, C. Man, X. Gao, J. Zhang, X. Xu, and D. Che, "Energy Analysis of Low-Rank Coal Pre-Drying Power Generation Systems," *Dry. Technol.*, vol. 31, no. 11, pp. 1194–1205, 2013.
- [53] I. Hamawand, T. Yusaf, and J. Bennett, "Study and modelling drying of banana slices under superheated steam," *Asia-Pacific J. Chem. Eng.*, p. n/a-n/a, Jan. 2014.
- [54] P. K. Agarwal, W. E. Genett, and Y. Y. Lee, "Pseudo steady state receding core model for drying with shrinkage of low ranked coals," *Chem. Eng. Commun.*, vol. 27, no. 1–2, pp. 9–21, 1984.
- [55] V. P. Chandramohan, "Influence of air flow velocity and temperature on drying parameters: An experimental analysis with drying correlations," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 377, no. 1.
- [56] S. Messai, J. Sghaier, D. Lecomte, and A. Belghith, "Drying kinetics of a porous spherical particle and the inversion temperature," *Dry. Technol.*, vol. 26, no. 2, pp. 157–167, 2008.
- [57] S. Messai, J. Sghaier, M. El Ganaoui, L. Chrusciel, and S. Gabsi, "Low-Pressure Superheated Steam Drying of a Porous Media," *Dry. Technol.*, vol. 33, no. 1, pp. 103–110, 2015.
- [58] M. Liu, J. J. Yan, D. T. Chong, J. P. Liu, and J. S. Wang, "Thermodynamic analysis of pre-drying methods for pre-dried lignite-fired power plant," *Energy*, vol. 49, no. 1, pp. 107–118, 2013.
- [59] M. Zakrzewski, "An analysis of drying characteristics of Polish lignite in superheated steam atmosphere," 2018.
- [60] M. Zakrzewski *et al.*, "Numerical analysis of single and multiple particles of Belchatow lignite dried in superheated steam," *Heat Mass Transf. und Stoffuebertragung*, vol. 54, no. 8, pp. 2215–2230, Aug. 2018.
- [61] M. ZAKRZEWSKI *et al.*, "Comprehensive study on the kinetics and modelling of superheated steam drying of Belchatow lignite from Poland," *Mech. Eng. J.*,

- vol. 3, no. 5, pp. 16-00365-16-00365, 2016.
- [62] M. Zakrzewski *et al.*, "An experimental verification of numerical model on superheated steam drying of Belchatow lignite," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, vol. 745, no. 3.
- [63] S. Pusat, "KONYA- ILGIN LİNYİTİNİN KURUTMA KARAKTERİSTİĞİNİN BELİRLENMESİ," Yıldız technical university, 2015.
- [64] S. Pusat, M. T. Akkoyunlu, and H. H. Erdem, "Fragmentation of a Turkish Low Rank Coal During Fixed-bed Evaporative Drying Process," *Int. J. Coal Prep. Util.*, pp. 1–9, Mar. 2018.
- [65] S. Pusat, M. T. Akkoyunlu, H. H. Erdem, and I. Teke, "Effects of Bed Height and Particle Size on Drying of a Turkish Lignite," *Int. J. Coal Prep. Util.*, vol. 35, no. 4, pp. 196–205, Jul. 2015.
- [66] M. T. Akkoyunlu, "Yatağan linyitinin akışkan yatakta kurutulması incelenmesi," Yıldız Technical University, 2015.
- [67] S. Pusat, M. T. Akkoyunlu, H. H. Erdem, and A. Dağdaş, "Drying kinetics of coarse lignite particles in a fixed bed," *Fuel Process. Technol.*, vol. 130, no. C, pp. 208–213, Feb. 2015.
- [68] A. Kaya, "Kurutmada ısı ve kütle transferinin teorik ve deneysel olarak incelenmesi," Karadeniz Teknik Üniversitesi, 2008.
- [69] T. Kiriya, H. Sasaki, A. Hashimoto, S. Kaneko, and M. Maeda, "Experimental observations and numerical modeling of a single coarse lignite particle dried in superheated steam," *Mater. Trans.*, vol. 54, no. 9, pp. 1725–1734, 2013.
- [70] B. A. Olufemi and I. F. Udefiagbon, "Modelling the drying of porous coal particles in superheated steam," *Chem. Biochem. Eng. Q.*, vol. 24, no. 1, pp. 29–34, 2010.
- [71] J. C. Jaeger and H. S. Carslaw, *Conduction of heat in solids*. Clarendon P, 1959.
- [72] I. Dincer and S. Dost, "A modelling study for moisture diffusivities and moisture transfer coefficients in drying of solid objects," *Int. J. Energy Res.*, vol. 20, no. 6, pp. 531–539, Jun. 1996.
- [73] I. Dincer and M. M. Hussain, "Development of a new Biot number and lag factor correlation for drying applications," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 47, no. 4, pp. 653–658, 2004.
- [74] M. Komatina, V. Manovic, and A. Saljnikov, "A model of coal particle drying in fluidized bed combustion reactor," *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.*, vol. 29, no. 3, pp. 239–250, 2007.
- [75] TKİ, "Linyit Sektör Raporu," 2009.
- [76] Ç. Koçak, N. Tamzok, and S. Yılmaz, "AFŞİN- ELBİSTAN KÖMÜR HAVZASININ ELEKTRİK ÜRETİMİ BAKIMINDAN DEĞERİNİ BİLİYOR MUYUZ?"
- [77] M. Altınar, "Kurutmanın Afşin-Elbistan linyitinin öğütme karakteristiğine etkisi," Çukurova Üniversitesi.
- [78] E. Kavak Akpınar, "DENEYSEL ÇALIŞMALARDAKİ HATA ANALİZİNE BİR

ÖRNEK: KURUTMA DENEYLERİNDEKİ HATA ANALİZİ.”

- [79] S. J. Kline, “Describing uncertainty in single sample experiments.,” *Mech. Eng.*, pp. 3–8, 1953.

Makaleler

1. Celen, P., & Erdem, H. H. (2018). An experimental investigation of single lignite particle dried in superheated steam and hot air. International Journal of Coal Preparation and Utilization, 1-10.