**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DOKTORA TEZİ**

# ILGIN LİNYİTİNDEKİ SUYUN MEKANİK YÖNTEMLE AZALTILMA DAVRANIŞININ VE EKONOMİKLİĞİNİN BELİRLENMESİ

**MEHMET SAİT ÇAY**

**KOCAELİ 2020**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**ANABİLİM DALI**

**DOKTORA TEZİ**

# ILGIN LİNYİTİNDEKİ SUYUN MEKANİK YÖNTEMLE AZALTILMA DAVRANIŞININ VE EKONOMİKLİĞİNİN BELİRLENMESİ

**MEHMET SAİT ÇAY**

| | | |
|---|---|---|
| **Prof.Dr. İlhan Tekin ÖZTÜRK** | | |
| **Danışman,** | **Kocaeli Üniversitesi** | **.....** |
| **Prof.Dr. İsmail TEKE** | | |
| **Jüri Üyesi,** | **Yıldız Teknik Üniversitesi** | **.....** |
| **Prof.Dr. Hasan KARABAY** | | |
| **Jüri Üyesi,** | **Kocaeli Üniversitesi** | **.....** |
| **Prof.Dr. Derya Burcu ÖZKAN** | | |
| **Jüri Üyesi,** | **Yıldız Teknik Üniversitesi** | **.....** |
| **Doç.Dr. Müslüm ARICI** | | |
| **Jüri Üyesi,** | **Kocaeli Üniversitesi** | **.....** |

**Tezin Savunulduğu Tarih: 08.09.2020**

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca yardımlarını, bilgi ve tecrübesini esirgemeyen, değerli yardım ve katkılarıyla daha iyi bir çalışma yapmam için beni yönlendiren Prof. Dr. İlhan Tekin ÖZTÜRK'e, Prof. Dr. İsmail TEKE'ye, Prof.Dr. Hasan KARABAY'a, Aydın ERKARSLAN'a ve TÜBİTAK MAM Enerji Enstitüsü yöneticilerine ve kömür temini konusunda yardımlarını esirgemeyen Yeni Çeltek Kömür İşletmesi A.Ş. Ilgın Kömür işletmesi müdürü Ömer Rona'ya teşekkürü bir borç bilirim.

Eylül 2020 Mehmet Sait ÇAY

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR……..i
İÇİNDEKİLER……ii
ŞEKİLLER DİZİNİ ……..v
TABLOLAR DİZİNİ…….vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ……...viii
ÖZET ……....x
ABSTRACT ……xi
GİRİŞ……....1
1. GENEL BİLGİLER……...5
1.1. Kömürün Tanımı ve Sınıflandırılması……..…….5
1.2. Kömürün Enerji Üretimindeki Yeri ve Çevre……....6
1.2.1. Dünyada enerji üretimi ve kömürün enerji üretimindeki yeri……..6
1.2.2. Dünyada kömür üretimi ve tüketimi……..…….6
1.2.2.1. Dünyada kömür üretimi……..6
1.2.2.2. Dünyada kömür tüketimi…….....7
1.2.3. Türkiye'de enerji üretimi ve kömürün enerji üretimindeki yeri…….…8
1.2.3.1. Türkiye'deki kömür rezervleri…….…….…10
1.2.3.2. Türkiye'de kömür üretimi…….....11
1.2.3.3. Türkiye'de kömür tüketimi…….…..12
1.3. Kömürün Yapısı ……...……..…….14
1.3.1. Kömürün kimyasal yapısı……...…..…….....15
1.3.2. Kömürün fiziksel yapısı……...…….……..…….……..16
1.3.2.1. Gözeneklilik / porozite……..……16
1.4. Suyun Kömürlerde Bulunma Şekilleri ve Kömürlere Bağlanma Mekanizması …….……..……..……..19
1.4.1. Suyun kömürlerde bulunma şekilleri……...…….……19
1.4.2. Suyun kömürlere bağlanma mekanizması…….…….…..24
1.5. Kömür ve Su Yapısı ile Kurutma/Su Azaltma Arasındaki İlişki…….....25
1.6. Su Azaltma ile Kömürün Yapısında Meydana Gelen Değişiklikler…….28
1.6.1. Su azaltma ile kömürün fiziksel yapısında meydana gelen değişiklikler.....…….……...……..28
1.6.2. Su azaltma ile kömürün kimyasal yapısında meydana gelen değişiklikler…...……..……..……..……....29
1.7. Kömür Kurutma ve Su AzaltmaYöntemleri…….…….....30
1.7.1. Su azaltma yöntemleri……...……..…….....30
1.7.1.1. Hidrotermal su azaltma yöntemi.…….…….31
1.7.1.2. Mekanik / termal su azaltma yöntemi……...32
1.7.1.3. Çözücü ekstraksiyonu ile su azaltma yöntemi……..33
1.8. Ekonomik Hesap Yöntemleri..……...…...……...35
1.8.1. Geri ödeme süresi yöntemi……...……..…….....35
1.8.2. Net bugünkü değer yöntemi……..……....35
1.8.3. Fayda/masraf oranı yöntemi……...……..……36

2. MALZEME VE YÖNTEM……..……..37
2.1. Malzeme……..……..37
2.1.1. Linyit seçimi ve temini……..……37
2.1.2. Linyit karakterizasyonu……..……..39
2.1.2.1. Linyitin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için yapılan analizler....…….....40
2.1.2.1. Linyitin kimyasal özelliklerinin belirlenmesi için yapılan analizler..…….……...……...42
2.1.3. Mekanik su azaltma deney sistemi……..…..44
2.2. Yöntem……..……45
2.2.1. Deney prosedürü……..……..…..46
2.2.2. Mekanik su azaltma hesabı....……..……..…46
2.2.3. Isıl değer hesabı……..……...48
2.2.4. Sıkıştırma işi hesabı……..……...……....48
2.2.5. Ekstruder hesabı ……..……..……...49
2.2.6. Ekonomik hesaplar……..……..……...52
2.2.6.1. Geri ödeme süresi hesabı……..…52
2.2.6.1. Net bugünkü değer hesabı……..…53
2.2.6.1. Fayda / masraf oranı hesabı……...53
2.2.6.1. İşletme dönemi gelir ve giderleri……..…54
2.2.7. Ölçüm belirsizliği hesabı...……..……..……...56
2.2.7.1. Terazide yapılan tartımlar...…….……56
2.2.7.2. Manometre ile basınç ölçümleri..……..……56
3. BULGULAR VE TARTIŞMA…….....……58
3.1. Linyit Karakterizasyonu……...……...58
3.1.1. Yoğunluk……..……....58
3.1.2. Tane boyut dağılımı……..……....58
3.1.3. Gözenek analizi ve yüzey morfolojisi…….....59
3.1.4. Su yüzdesi tayini……..…….....61
3.1.5. Kısa analiz……..……..64
3.1.6. Elementel analiz ……..……65
3.1.7. Ölçüm belirsizliği..……..……66
3.1.7.1. Terazi belirsizliği……..…….……..66
3.1.7.2. Manometre belirsizliği……....…….……66
3.2. Mekanik Su Azaltma Deneyleri……..…….…….....66
3.2.1. Basıncın ve etki süresinin mekanik su azaltmaya olan etkisinin belirlenmesi……..……..67
3.2.2. Başlangıç neminin mekanik su azaltmaya olan etkisinin belirlenmesi……..…….…….....74
3.2.3. Tane boyutunun mekanik su azaltmaya olan etkisinin belirlenmesi……..…….…….....75
3.2.4. Numune haznesi çapının mekanik su azaltmaya olan etkisinin belirlenmesi……..…….……77
3.2.5. Kademeli basınç artışının mekanik su azaltmaya olan etkisinin belirlenmesi……..…….……...…..78
3.2.6. Kalınlığın mekanik su azaltmaya olan etkisinin belirlenmesi……...79
3.2.7. Korelasyon geliştirilmesi……..……..…..……80
3.3. Ekonomik Değerlendirme Sonuçları…….…...92
3.3.1. Geri ödeme süresi yöntemi……..……....…..94

3.3.2. Net bugünkü değer yöntemi……..…….....95
3.3.3. Fayda/masraf oranı……...……..…...96
3.3.4. Kullanılan ekonomik değerlendirme yöntemlerinin değerlendirmesi...……..…….....97
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER…….....……..98
KAYNAKLAR ...…….....102
EKLER……..107
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER…….....115
ÖZGEÇMİŞ ...……..116

## ŞEKİLLER DİZİNİ


Şekil 1.1. Dünya kömür tüketimi (solda), dünya linyit tüketimi (sağda) (2016).....7
Şekil 1.2. Türkiye birincil enerji arzının kaynaklara göre dağılımı (2016).....8
Şekil 1.3. Türkiye'nin toplam enerji arzında kaynakların payı (1990 – 2016).....8
Şekil 1.4. Türkiye birincil enerji üretiminin yerli kaynaklara göre dağılımı (2014).....9
Şekil 1.5. Türkiye'deki linyit rezervlerinin ısıl değere göre dağılımı.....10
Şekil 1.6. Türkiye linyit üretimleri .....12
Şekil 1.7. Kullanım yerlerine göre Türkiye'deki taşkömürü tüketimi.....12
Şekil 1.8. Kömürün oluşum süreci.....14
Şekil 1.9. Gözenek tipleri (solda), döngü histerizisleri ve onların gözenek yapısıyla bağlantısı (sağda).....17
Şekil 1.10. Farklı uzunluklar alındığında kömürün iç yapısının görünümü .....17
Şekil 1.11. Farklı kömür örneklerinin SEM görüntüleri.....18
Şekil 1.12. Kömürdeki gözenek yapısı ve sınıflandırılması.....19
Şekil 1.13. Nemli kömürün yarık benzeri gözenek modeli.....20
Şekil 1.14. Kömürde bulunan su tipleri.....20
Şekil 1.15. Suyun kömürde bulunma şekilleri.....22
Şekil 1.16. Kömürde bulunan su türleri için yapılan adlandırmalar.....23
Şekil 1.17. Kurutulmuş linyitin bağ yapısı.....24
Şekil 1.18. Su buharının kısmi basınç artışına bağlı adsorbsiyonu.....25
Şekil 1.19. Kahverengi kömürde su içeriğinin bir fonksiyonu olarak su emme ısısı.....26
Şekil 1.20. Kömürdeki dört farklı tip suyun desorpsiyon enerjisi.....27
Şekil 1.21. Kurutulmuş LY kömüründe MTE sıcaklığının ve basıncının gözenek hacimleri üzerindeki etkisi.....29
Şekil 1.22. Hidrotermal banyo tipi reaksiyon sisteminin şematik diyagramı.....31
Şekil 1.23. Mekanik termal su azaltma sisteminin şematik diyagramı.....32
Şekil 1.24 Solvent çözeme tekniği ile kömürün susuzlaştırılması.....34
Şekil 2.1. Maden sahasının görünümü.....38
Şekil 2.2. Linyit damarının en alt tabasından alınan linyit numuneleri.....39
Şekil 2.3. Çeneli kırıcı (solda), titreşimli elek sallayıcı cihazı ve elekler (sağda) .....40
Şekil 2.4. Gaz piknometresi .....40
Şekil 2.5. Partikül boyut dağılım analiz cihazı.....41
Şekil 2.6. Kömür gözenek yapısı ölçüm yöntemleri.....41
Şekil 2.7. SEM cihazı .....42
Şekil 2.8. Hassas tartı (solda), etüv fırını (sağda) .....43

Şekil 2.9. Termogravimetrik analiz cihazı.....43
Şekil 2.10. Elementel analiz cihazı…….....44
Şekil 2.11. Mekanik su azaltma deney düzeneğinin şematik görünümü……45
Şekil 3.1. Tane boyut dağılımı histogramı.....59
Şekil 3.2. 4-2 mm (solda) ve <250 µm (sağda) boyutundaki ham linyitlerin 2000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü .....60
Şekil 3.3. Numunelerin SEM görüntüleri; (a)RWL; (b)DW-100; (c)DW-200; (d)DW-300; (e)DW-400; (f)DW-500; (g)DW-600.....61
Şekil 3.4. Etüvde kurutulan 2 farklı şahit numunenin su/kuru linyit oranın zamana bağlı değişimi.....62
Şekil 3.5. Linyit numunelerinin etüv fırınında kurutma eğrileri.....63
Şekil 3.6. Kurutma şeklinin kurutmaya olan etkisi.....64
Şekil 3.7. Su/kuru linyit oranının basınca ve zamana bağlı değişimi (1. Deney seti).....68
Şekil 3.8. Su/kuru linyit oranının basınca ve zamana bağlı değişimi (2. Deney seti).....69
Şekil 3.9. Su/kuru linyit oranının basınca ve zamana bağlı değişimi (3. Deney seti).....70
Şekil 3.10. Su/kuru linyit oranının basınca ve zamana bağlı değişimi (6. Deney seti).....72
Şekil 3.11. Su/kuru linyit oranının basınca ve zamana bağlı değişimi (7. Deney seti).....73
Şekil 3.12. Başlangıç su/kuru linyit oranının mekanik su azaltmaya etkisi……...75
Şekil 3.13. 2 farklı tane boyutunda su/kuru linyit oranının zamana ve basınca bağlı değişimi.....76
Şekil 3.14. Hazne çapının mekanik su azaltmaya olan etkisi……77
Şekil 3.15. Sıkıştırma ve deformasyonun ölçüsü….....79
Şekil 3.16. Kalınlığın mekanik su azaltmaya olan etkisi……80
Şekil 3.17. Deney ve korelasyon sonuçları (1. Deney seti)……85
Şekil 3.18. Deney ve korelasyon sonuçları (2. Deney seti)……86
Şekil 3.19. Deney ve korelasyon sonuçları (3. Deney seti)……87
Şekil 3.20. Deney ve korelasyon sonuçları (4. Deney seti)……...88
Şekil 3.21. Deney ve korelasyon sonuçları (5. Deney seti)……89
Şekil 3.22. Deney ve korelasyon sonuçları (6. Deney seti)……90
Şekil 3.23. Deney ve korelasyon elde edilen sonuçları (7. Deney seti)……..…91
Şekil 3.24. Yatırım maliyetinin basınç ve etki süresine bağlı değişimi…….....92
Şekil 3.25. Bakım ve işletme maliyetinin basınç ve etki süresine bağlı değişimi.....93
Şekil 3.26. Geri ödeme süresinin basınç ve etki süresine bağlı değişimi…… ..94
Şekil 3.27. Net bugünkü değerin basınç ve etki süresine bağlı değişimi……95
Şekil 3.28. Fayda/masraf oranının basınç ve etki süresine bağlı değişimi……..96
Şekil 3.29. Yatırım maliyetinin, GÖS'nin, nem ve F/M oranın etki süresine ve basınca bağlı değişimi.....97
Şekil G.1. 25 mm iç çaplı kalıp seti…….....114
Şekil G.2. 50 mm iç çaplı kalıp seti.....……..……114

## TABLOLAR DİZİNİ


Tablo 1.1. Genel sınıflandırmada yer alan kömürlerin tanıtıcı özellikleri……..5
Tablo 1.2 Türkiye'deki ana kömür rezervlerinin özellikleri……10
Tablo 1.3. Türk linyitlerinin nem içeriği ……..14
Tablo 1.4. Kömür yapısı için önerilen çeşitli modeller…….…15
Tablo 2.1. Linyit sahasındaki farklı tabakaların özellikleri……...38
Tablo 2.2. Hesaplamalarda kullanılan ekonomik parametreler ve değerleri.....54
Tablo 2.3. Hesaplamalarda kullanılan yakıt, enerji ve hammadde birim fiyatları (KDV Hariç) ……54
Tablo 2.4. Ekstruder sistemi üretim kapasitesi ve yıllık çalışma süreleri.....55
Tablo 2.5. Sistem ilk yatırım maliyeti……...56
Tablo 3.1. Deneylerde kullanılan linyitlerin yoğunlukları……....58
Tablo 3.2. Tüvenan linyitin kısa analiz sonucu……65
Tablo 3.3. Tüvenan linyitin elementel analiz sonucu……....65
Tablo 3.4. Deney setleri ve incelenen parametreler……..67
Tablo 3.5. Mekanik su azaltma deneyinin sonuçları (1. Deney seti)……68
Tablo 3.6. Mekanik su azaltma deneyinin sonuçları (2. Deney seti)……70
Tablo 3.7. Mekanik su azaltma deneyinin sonuçları (3. Deney seti)……71
Tablo 3.8. Mekanik su azaltma deneyinin sonuçları (6. Deney seti)……72
Tablo 3.9. Mekanik su azaltma deneyinin sonuçları (7. Deney seti)…….74
Tablo 3.10. Kademeli basınç artışı için yapılan deney sonuçları……...79
Tablo 3.11. Deney ve korelasyon sonuçlarının karşılaştırması (1. Deney seti)...…86
Tablo 3.12. Deney ve korelasyon sonuçlarının karşılaştırması (2. Deney seti)…...87
Tablo 3.13. Deney ve korelasyon sonuçlarının karşılaştırması (3. Deney seti)…...88
Tablo 3.14. Deney ve korelasyon sonuçlarının karşılaştırması (4. Deney seti)…...89
Tablo 3.15. Deney ve korelasyon sonuçlarının karşılaştırması (5. Deney seti)...…90
Tablo 3.16. Deney ve korelasyon sonuçlarının karşılaştırması (6. Deney seti)…...91
Tablo 3.17. Deney ve korelasyon sonuçlarının karşılaştırması (7. Deney seti)...…91
Tablo A.1. Kullanılan cihazların teknik özellikleri……..107
Tablo B.1. Susuzlaştırılan linyitlerin ısıl değerleri……..109
Tablo C.1. Sıkıştırma işi sonuçları ……..110
Tablo D.1. Ekstruder hesap sonuçları……..111
Tablo E.1. 25 Yıllık enflasyon, linyit, iskonto ve faizin bugünkü değer hesap sonuçları …….....112
Tablo F.1. Deney ve korelasyon sonuçları……..113

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

| | |
|---|---|
| BI | :Yatırımın Bugünkü Değeri, (MTL) |
| $B_t$ | :t yılındaki proje gelirleri/nakit girdileri, (MTL) |
| C | :Taşıma katsayısı |
| $C_t$ | :t yılındaki proje giderleri/nakit çıkışları, (MTL) |
| $D_{helezon}$, | :Helezonun çapı, (m) |
| $D_{kovan}$ | :Kovanın dış çapı, (mm) |
| $D_{mil}$ | :Emniyetli mil çapı, (m) |
| $D_{sc}$ | :Numune haznesinin iç çapı, (m) |
| F/M | :Fayda/Masraf |
| $H_l$ | :Numune haznesine yerleştirilen linyitin kalınlığı, (m) |
| f | :Yıllık gelir, (MTL) |
| I | :Toplam yatırım maliyetini, (MTL) |
| $k_{ilave}$ | :İlave olarak kullanılabilcek malzeme katsayısı |
| $L_{vida}$ | :Helezon vidasının boyu, (m) |
| $M_b$ | :Burulma momenti, (daN.m) |
| $m_{cbw}$ | :Kimyasal bağlı su kütlesi, (g) |
| $m_{dl}$ | :Kuru linyitin kütlesi, (g) |
| $m_{lo}$ | :Linyitin kütlesi, (kg) |
| $m_{helezon}$ | :Helezonun toplam kütlesi, (kg) |
| $m_{helezon,tek}$ | :Tek bir helezonun kütlesi, (kg) |
| $m_{kovan}$ | :Kovanın kütlesi, (kg) |
| $m_{mil}$ | :Milin kütlesi, (kg) |
| $m_{fwl}$ | :Linyitin serbest su kütlesi, (g) |
| $m_{toplam}$ | :Ekstruderde kullanılan toplam malzeme kütlesi, (kg) |
| $m_{tw}$ | :Linyitteki toplam su kütlesi, (g) |
| $m_{wap}$ | :Su azaltma sonrası linyitte kalan su kütlesi, (g) |
| $m_{twp}$ | :Su azaltma ile linyitten uzaklaştırılan su kütlesi, (g) |
| $m_{two}$ | :Kurutma fırınında buharlaştırılan toplam su kütlesi, (g) |
| n | :Helezon milinin devri, (dev/dk) |
| $\eta_{dw}$ | :Su azaltma yüzdesi, (%) |
| $\eta_d$ | :Redüktörün verimi, (%) |
| $\eta_e$ | :Ekstruder verimi, (%) |
| $n_{helezon}$ | :Vida boyunca kullanılan helezon adedi |
| $N_o$ | :Helezon milinde gerekli güç, (kW) |
| $\pi$ | :Pi sayısı |
| $\rho_l$ | :Linyitin yoğunluğu, (kg/m$^3$) |
| $\rho_{mil}$ | :Mil malzemesinin yoğunluğu, (kg/m$^3$) |
| $\rho_{kovan}$ | :Kovan malzemesinin yoğunluğu, (kg/m$^3$) |
| P | :Kovana veya linyite uygulanan basınç, (bar) |
| $p_{dlw}$ | :Su/kuru linyit oranı, (%) |
| $p_{cbw}$ | :Linyitteki kimyasal bağlı su oranı, (%) |
| $p_{fw}$ | :Linyitteki serbest su oranı, (%) |

$p_{dlwp}$ :Su azaltma sonrası su/kuru linyit oranı, (%)
$p_{rtw}$ :Uzaklaştırılan toplam su yüzdesi, (%)
r :İskonto oranı, (%)
$S_{helezon}$ :Helezonun hatvesi
t :Malzemenin helezonda kalacağı süre, (dk)
$t_{kanat}$ :Helezon kanadının kalınlığı, (mm)
$t_{kovan}$ :Kovanın et kalınlığı, (mm)
$V_{malzeme}$ :Malzemenin iletim hızı, (m/s)
$V_{ort}$ :Numune haznesine yerleştirilen linyitin ortalama hacmi, ($m^3$)
$W_g$ :Ekstruderde sıkıştırma için gereken gerçek iş, (kW)
$W_t$ :Ekstruderde sıkıştırma için gereken teorik iş, (kW)
$w_o$ :Malzemenin harekete karşı gösterdiği direnç
$\sigma_a$ :Seçilen malzemenin akma dayanımı, ($N/mm^2$)
$\sigma_o$ :Malzemenin izin verilen akma dayanımı, ($N/mm^2$)
$\dot{V}_{helezon}$ :Ekstuderin besleyebileceği hacimsel debi, ($m^3/h$)
$\dot{m}_{linyit}$ :Ekstrudere beslenen linyitin kütlesel debisi, (kg/h)
$\varphi$ :Malzeme yükleme verimi, (%)
ɣ :Yığın yoğunluğu, ($kg/m^3$)
Ɛ :Tane boyut katsayısı

**Kısaltmalar**

AID :Alt Isıl Değer
ASTM :American Society for Testing and Meterials (Amerika Test Materyalleri Topluluğu)
COOH :Karboksil
>C=O :Karbonil
DKK :Düşük Kaliteli Kömür
F/M :Masraf Oranı
GÖS :Geri Ödeme Süresi
HTD :Hidrotermal Su Azaltma Yöntemi
IEA :Uluslararası Enerji Ajansı
İKO :İç Karlılık Oranı
LY :Loy Yang
MIP :Civa Porozimetresi
MTE :Mekanik/Termal Su Azaltma Yöntemi
MJ :Mega Joule
MTL :Milyon Türk Lirası
mtep :Milyon ton eşdeğer petrol
mton :Milyon ton
NBD :Net Bugünkü Değer
-OH :Hidroksil
$OCH_3$ :Metoksil
SE :Çözücü Ekstraksiyonu Yöntemi
SEM :Taramalı Elektron Mikroskobu
TGA :Thermogravimetric Analysis (Termogravimetrik Analiz)
ÜID :Üst Isıl Değer
YKK :Yüksek Kaliteli Kömür

## ILGIN LİNYİTİNDEKİ SUYUN MEKANİK YÖNTEMLE AZALTILMA DAVRANIŞININ VE EKONOMİKLİĞİNİN BELİRLENMESİ


## ÖZET

Türkiye'deki toplam kömür rezervinin ~%90'ı linyittir ve bu rezervin %90'nından fazlasının ısıl değeri 12560 kJ/kg'ın altındadır. Linyit ısıl değerinin arttırılması için kullanılan yöntemlerden biri mekanik su azaltmadır. Bu çalışmada ortalama %45 su içeriğine sahip Ilgın linyitinin mekanik su azaltma davranışı basınç, etki süresi, başlangıç su/kuru linyit oranı, tane boyutu, numune haznesi çapı ve kalınlığa bağlı olarak deneysel yöntemle incelenmiştir. Ayrıca mekanik su azaltmanın yüzey morfolojisine etkisi SEM ile incelenmiş ve mekanik su azaltma için kullanılabilecek ekstruder sisteminin fizibilite çalışması yapılmıştır. Deneyler iki farklı tane boyutundaki (<250 μm ve 4-2 mm) linyitler ile 5-20 dakika ve 100-600 bar aralıklarında yapılmıştır. Deneyler sonucunda en yüksek su azaltma miktarı olan %51,5, <250 μm boyutundaki linyitler ile 600 barda 20 dakika yapılan deneyde elde edilirken en düşük su azaltma miktarı olan %12,2, 4-2 mm boyut aralığındaki linyitler ile 100 barda 5 dakikada elde edilmiştir. Su azaltma miktarının, basınç ve etki süresinin artışı ile artarken tane boyutunun artışı ile azaldığı ancak artışların ve azalışların lineer olmadığı görülmüştür. Su azaltma miktarı zamana göre basınçtan daha çok etkilenmektedir. Kaba, pürüzlü ve düzensiz yüzeye sahip linyitin su azaltma esnasında uygulanan basınç ile gözenekliliğinin azaldığı, yüzeyin daha pürüzsüz hale geldiği görülmüştür. Geliştirilen korelasyon ile su azaltma sonrası su/kuru linyit oranı basıncın, etki süresinin, tane boyutunun ve hazne çapının fonksiyonu olarak ifade edilmiştir. Ekonomik hesaplamalar neticesinde optimum ektruder sistemi 200 bar basınçta ve 2,5 dakika etki süresinde çalışan sistem olarak bulunmuştur.



**Anahtar Kelimeler:** Enerji, Korelasyon, Kömür, Linyit, Mekanik Su Azaltma.

**DETERMINATION OF DEWATERING BEHAVIOR AND ECONOMY FOR ILGIN LIGNITE BY MECHANICAL METHOD**

## ABSTRACT

Approximately 90% of the total coal reserves in Turkey is lignite and the heating value of more than 90% of this reserve is below 12560 kJ/kg. One method used to increase the lignite heating value is mechanical dewatering. In this study, mechanical dewatering behavior of Ilgın lignite with an average water content of 45% was investigated by experimental method depending on, pressure, time, initial water/dry lignite ratio, particle size, sample chamber diameter and thickness. In addition, surface morphology was investigated by SEM to determine the effect of mechanical dewatering on surface structure. The experiments were carried out with two different particle sizes lignites (<250 μm and 4-2) for 5-20 min and 100-600 bar ranges. As a result of the experiments, the highest amount of dewatering was 51.5% and, achieved with <250 μm lignites at 600 bar for 20 min, while the lowest dewatering amount was 12.2% in the range of 2-4 mm lignites at 100 bar for 5 min. The amount of dewatering was increased with the increase in pressure and time, but the amount of dewatering was decreased with the increase in particle size, it was observed that the increases and decreases were not linear. The amount of dewatering is more affected by the pressure than by the time. It was observed that the lignite with rough and irregular surface, surface porosity decreased due to pressure and the surface became smoother. With the developed correlation, the water / dry lignite ratio after dewatering was expressed as a function of pressure, time, particle size and sample chamber diameter. As a result of the economic calculations, the optimum extruder system was found to be operating at 200 bar pressure and 2.5 minutes.

**Keywords:** Energy, Correlation, Coal, Lignite, Mechanical Dewatering.

## GİRİŞ

Dünya nüfusunun artması ve ekonomilerin büyümesi enerji talebinde ciddi artışlara neden olmaktadır ve bu talebin karşılanmasında kömürün önemli bir yeri bulunmaktadır. 1973-2013 yılları arasındaki dönemde; Dünya'daki enerji üretiminde kömürün payı 4,4 puan artışla %24,5'dan %28,9'e ulaşmıştır [1]. Dünyada yaklaşık 890 milyar ton kanıtlanmış kömür rezervi bulunmaktadır [2] ve bu miktar kanıtlanmış petrol ve doğalgaz rezervinin yaklaşık üç katıdır [3]. Dünyadaki kömür rezervi mevcut kullanım hızıyla kullanılmaya devam edildiğinde 150 yıl daha yetecek büyüklüktedir [1]. Ülkemizin 2014 yılı birincil enerji arzı 124 mtep'tir (milyon ton eşdeğer petrol) ve bu arzın karşılanmasında kullanılan kaynaklara bakıldığında ilk sırada 40,2 mtep (%32,4) ile doğal gaz, ikinci sırada 36,1 mtep (%29) ile kömür yer almaktadır [1]. Kömür günümüzde, enerji üretiminde kullanımı en hızlı artan ve dünyanın elektrik ihtiyacının %42'sini karşılayan yakıttır. ABD gibi birçok ülkede, kullanılan elektriğin yaklaşık yarısı kömürden üretilmektedir ve Çin'de bu rakam %70'den fazladır [4].

Dünya'da kömür rezervleri bol olmakla birlikte, kömür yataklarının yaklaşık yarısı, düşük kaliteli kömür (DKK) sınıfına giren linyitler ve alt bitümlü kömürlerdir [5, 6] ve bu kömürlerin fiyatı yüksek kaliteli kömürlerin (YKK) sadece %20-30'u kadardır [7]. Avustralya, Orta ve Doğu Avrupa, Kuzey Amerika, Almanya, Japonya ve Çin'de DKK'ler çok miktarda bulunmaktadır. Dünyadaki toplam linyit rezervleri yaklaşık 4 trilyon ton olup, Çin'in linyit rezervleri yaklaşık 190.3 milyar tondur (Çin'in toplam kömür rezervinin %41.18'i) [8]. Bu kömürler Çin gibi gelişmekte olan ülkelerde temel enerji ihtiyacının karşılanmasında giderek daha önemli hale gelmektedir [8, 9]. DKK'ler düşük kaliteli yakıt sınıfına girmektedir ve bunların genel özellikleri düşük ısıl değer, yüksek su (%25-65) ve düşük kükürt içeriğidir [8, 10]. Günümüzde bu kömürler ağırlıklı olarak elektrik üretiminde kullanılmaktadır. Ancak taşkömürüne göre düşük çıkarma maliyeti, yüksek reaktivite, yüksek miktarda uçucu içermesi ve kirleticilerin (kükürt, nitrojen ve ağır metaller) az miktarda oluşu vb. sahip olduğu avantajlar [41] nedeniyle diğer alanlarda da kullanımının artması beklenmektedir [6, 8]. Bu nedenle, DKK'lerin temiz ve verimli şekilde kullanılması şarttır. Ülkemiz için

ise en büyük sorunlarından birisi, enerjideki dışa bağımlılıktır. Ülkemiz, fosil yakıtlardan doğal gazda %98, petrolde %94, kömürde %49 oranında dışa bağımlıdır. Dolayısıyla enerji talebi büyük oranda ithalatla karşılanmakta, cari açık artmakta ve enerji arz güvenliği tehlikeye düşmektedir. Örneğin 2007 yılında enerji talebinin karşılanmasında %90 oranında fosil yakıtlar kullanılmıştır [1]. Bu durum ancak yerli kaynakların enerji üretiminde daha yüksek oranda kullanılmasıyla tersine çevrilebilir. Ülkemizin sahip olduğu en büyük fosil enerji kaynağı kömürdür (18,77 milyar ton) ve kömürlerimizin çoğunluğu linyitlerden (17,27 milyar ton - %92) oluşmaktadır [11]. Bu nedenle ülkemizdeki enerji kaynaklarının en ekonomik ve çevreci şekilde kullanılması, enerji arz güvenliğinin sağlanması ve cari açığın azaltılması için linyitlerimizin mümkün olan en iyi şekilde değerlendirilmesi bir zorunluluktur.

DKK'ların, özellikle de linyitin ve kahverengi kömürün en belirgin dezavantajı, yüksek su içeriğidir (%25-65). Kahverengi kömürlerde yanma sonucu açığa çıkan enerjinin %20-25'i suyun buharlaştırılması için harcanmaktadır [4]. Dolayısıyla yüksek su içeriği verimliliği düşürmekte [12, 13], nakliye masraflarını [14, 15] ve $CO_2$ emisyonunu arttırmakta, depolama esnasında kendiliğinden yanmaya neden olmakta [16-18] harmanlamayı zorlaştırmakta, öğütmenin kalitesini ve verimini düşürmekte [19] ve taşkömürü kullanan kazanlara göre daha büyük kazan kullanılmasını gerekli kılarak yatırım maliyetini arttırmaktadır [6, 20]. Kömürdeki suyun sadece %5 azaltılması ile kazanın toplam verimliliğini yaklaşık %2.6 arttırılabilmektedir. Ayrıca, aynı kazan çıkış yükü için yakıt debisi ve baca gazı hacmi sırasıyla %10,8 ve %4 oranında azaltılabilmektedir [18]. Bu nedenle kömürdeki suyun uzaklaştırması büyük öneme sahiptir [21].

Ülkemizdeki linyitler yüksek su içeriği ve düşük ısıl değerlerinden dolayı ağırlıklı olarak enerji üretimi için termik santrallarda kullanılmaktadır. Örneğin en büyük rezervlerimizden olan Afşin-Elbistan linyitlerinin (toplam rezervin yaklaşık %39'u) nem içeriği yaklaşık %50, Konya Karapınar ve Ilgın linyitlerinin (toplam rezervin yaklaşık %16'u) ortalama nem içeriği yaklaşık %46 olup ülkemizin toplam linyit rezervinin ağırlıklı nem ortalaması ise yaklaşık %43'tür. Bu durum daha önce de bahsedildiği gibi hem santral verimliliğinin düşmesine hem de santralın işletmesinin zorlaşmasına veya imkansız hale gelmesine neden olmaktadır. Özellikle yağışın fazla olduğu dönemlerle yüksek nemden dolayı yakıt beslemede ve kazanda alev topu

oluşturmada problem yaşanmakta ve bunun sonucunda üniteler devre dışı kalmakta veya yüksek miktarda yardımcı yakıcı (doğalgaz, fuel oil vb.) kullanarak enerji üretim maliyetlerinin artmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla ülkemizin enerji arz güvenliğini tehlikeye sokabilmektedir. Bu nedenle linyitlerimizin daha verimli kullanılarak ekonomiye daha yüksek oranda kazandırılması için yeni maliyet etkin kurutma/ su azaltma teknolojilerinin geliştirilmesi gerekmektedir.

Linyitteki suyun uzaklaştırılması için kullanılacak kurutma/su azaltma yönteminin belirlenmesinde suyun kömürde bulunduğu form önemlidir. Linyitte bulunan su kimyasal bağlı su, yüzey suyu ve bünye suyu olmak üzere 3 gruba ayrılabilir [4]. Kömürde düşük oranda bulunan kimyasal bağlı suyun uzaklaştırılması yüksek sıcaklık (>100 °C) gerektirdiğinden bu kısım suyun uzaklaştırılması enerji ve ekserji açısından ekonomik değildir. Yüzey suyu mekanik su azaltma ile büyük oranda uzaklaştırılabilirken gözenek yapısına güçlü şekilde adsorbe olmuş bünye suyu [8] sıcaklığın yükseltilmesiyle moleküler kinetik enerji arttırılarak uzaklaştırılabilir [22].

Linyitler tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de düşük ısıl değerinden dolayı ağırlıklı olarak termik santrallarde elektrik üretimi amaçlı kullanılmaktadır. Kömürün kalitesini belirleyen en önemli parametre onun ısıl değeridir ve ısıl değer su içeriği ile ters orantılıdır. Kömürdeki suyun uzaklaştırılması kömürün kullanım alanının/ısıl değerinin arttırılması, kömür kullanımından kaynaklanan emisyonların düşürülmesi ve yakıt veriminin arttırılması açısından büyük öneme sahiptir. Linyitlerimizde yüksek oranda bulunan suyun kurutma ile uzaklaştırılması yüksek miktarda kaliteli enerjinin (ekserjisi yüksek enerji) sarf edilmesini gerekli kılmaktadır. Bu durum linyitlerimizin ekonomik olarak kurutulmasının önündeki en büyük engellerden biridir. Dolayısıyla linyitte bulunan suyun mekanik olarak uzaklaştırılması yani susuzlaştırılması yakıt kalitesinin ekonomik olarak arttırılması için kullanılabilecek bir yöntemdir.

Bu çalışmada ülkemizdeki linyit rezervlerinin ortalama su içeriğine (%43) yakın bir su içeriğine sahip (%45,15) Konya Ilgın linyiti kullanılarak bu linyitin mekanik su azaltma davranışı ve bu su azaltmanın ekonomikliği incelenmiştir. Bu doğrultuda hazırlanan tezin giriş bölümünde tezin konusu, bu konunun önemi, tez bölümlerinin içerikleri ve tezin amacı hakkında bilgi verilmiştir. Genel bilgiler bölümünde kömürün tanımı ve sınıflandırılması, kömürün yapısı, suyun kömürde bulunma şekilleri, kömür

ve su yapısı ile kurutma arasındaki ilişki, su azaltma ile kömür yapısında meydana gelen değişiklikler, kömür kurutma ve su azaltma yöntemleri ve ekonomik hesap yöntemleri hakkında literatür bilgisine yer verilerek hipotez ve tezin literatürde doldurması beklenen boşluk ortaya konulmuştur. Malzeme ve yöntem bölümünde linyit seçimi ve temini, linyit karakterizasyonu, mekanik su azaltma deneyleri, deney prosedürü, su azaltma ve ekonomik hesaplar hakkında bilgi verilmiştir. Bulgular ve tartışma bölümünde linyit karakterizasyonundan, mekanik su azaltma deneylerinden ve ekonomik hesaplamalardan elde edilen bulgular değerlendirilmiş ve literatür bilgisi ile birlikte tartışılmıştır. Tez çalışmasının son bölümü olan sonuçlar bölümünde ise elde edilen sonuçlar özetlenmiş, bu sonuçların olası yararları ve/veya uygulama alanları belirtilmiş ve çalışmanın geliştirilmesi için ileride yapılacak araştırmalara yönelik önerilerde bulunulmuştur.

Bu çalışmanın amacı Konya Ilgın linyitinin su azaltma davranışının ortaya konulması, su azaltma ile linyitin yapısında meydana gelen fiziksel değişikliklerin belirlenmesi, su azaltma parametrelerine bağlı olarak su azaltma miktarını hesaplamayı sağlayan korelasyon geliştirilmesi ve su azaltmanın ekonomik yönden değerlendirilmesidir. Çalışma kapsamında, genel bilgiler bölümünde konunun teorik altyapısı ile ilgili literatür bilgisine; malzeme ve yöntem bölümünde, linyitin seçimi ve temini ile karakterizasyon çalışmalarına, çalışmanın temelini oluşturan deney sistemine, deney prosedürüne ve hesaplamalarda kullanılan bağıntılara; bulgular ve tartışma bölümünde deneylerden ve hesaplaradan elde edilen bulgulara; sonuçlar ve öneriler bölümünde ise çalışma neticesinde elde edilen önemli sonuçlara ve önerilere yer verilmiştir.

# 1. GENEL BİLGİLER

Bu bölümde tez çalışması ile ilgili temel bilgiler yer almaktadır.

## 1.1. Kömürün Tanımı ve Sınıflandırılması

Kömür; çoğunlukla karbon, hidrojen ve oksijenden oluşan az miktarda kükürt ve nitrojen içeren, kimyasal ve fiziksel olarak farklı yapıya sahip maden ve kayaçtır. Diğer içerikleri ise külü teşkil eden inorganik bileşikler ve mineral maddelerdir [23].

Kömürleşme sürecindeki nem, kül ve uçucu madde içeriği, sabit karbon miktarı, kükürt ve mineral madde içeriklerinin yanı sıra jeolojik, petrografik, fiziksel, kimyasal ve termik özelliklerden dolayı kömürler çeşitlilik gösterirler [23]. Uluslararası Kömür Kurulu değişik tipte kömürleri, kullanım amaçlarına göre uluslararası sınıflandırılmaya tabi tutmuştur. Bu sınıflandırmada; ısıl değer, uçucu madde içeriği, sabit karbon miktarı, koklaşma ve kekleşme özellikleri temel alınarak sert (taşkömürü) ve kahverengi (altbitümlü ve linyit) kömürler olarak iki ayrı sınıfa ayrılmıştır [23]. Tablo 1.1'de kömürlerin genel sınıflandırılmasında kullanılan özellikler yer almaktadır. Bu çalışmada kullanılan Ilgın linyiti 17000 kJ/kg altındaki ısıl değeri ile kahverengi kömür sınıfına girmektedir.

Tablo 1.1. Genel sınıflandırmada yer alan kömürlerin tanıtıcı özellikleri [23]

| **TAŞKÖMÜRÜ** | | **KAHVERENGİ KÖMÜRLER** | |
|---|---|---|---|
| **Bitümlü** | **Antrasit** | **Linyit** | **Alt Bitümlü** |
| Koyu siyah | Parlak siyah | Kahverengi | Siyah |
| Blok şeklinde kırılma | Merceksi kırılma | Kırılgan, çabuk toz halinde ufalanma | Oksidasyonla veya kurutma sonucunda ince parçalar ve toz halinde ufalanma |
| Bantlı ve kompakt | Sert ve dayanıklı | Masif, odunsu veya üniform kilsi doku | Masif |
| Isıl Değer: 22566-32238 kJ/kg | Isıl Değer: >29307 kJ/kg | Isıl Değer: <19310 kJ/kg | Isıl Değer: 19310-26753 kJ/kg |
| Uçucu madde miktarı ve nem içeriği düşük | Uçucu madde miktarı ve nem içeriği düşük | Uçucu madde miktarı ve nem içeriği yüksek | Uçucu madde ve nem içerikleri bitümlü kömürlerden daha yüksek |
| Sabit karbon içeriği yüksek | Sabit karbon içeriği | Düşük karbon içeriği | Sabit karbon içeriği bitümlü kömürlerden düşük |

## 1.2. Kömürün Enerji Üretimindeki Yeri ve Çevre

### 1.2.1. Dünyada enerji üretimi ve kömürün enerji üretimindeki yeri

Dünya birincil enerji arzı 1973 ve 2013 yılları arasında iki kattan fazla artarak 2013 yılı itibariyle 13.541 mtep'e ulaşmıştır. Enerji arzı 21. yüzyılın ilk 12 yılında %35 büyürken, artışın yaklaşık dörtte üçü Asya kıtasından kaynaklanmıştır. Söz konusu 12 yılda, enerji arzı Çin'de %159, Hindistan'da ise %76 büyümüş, buna karşılık Avrupa Birliği'nde (AB28) %4, ABD'de ise %2,9 azalmıştır [1].

1973-2013 yılları arasındaki dönemde; Dünya'da petrolün payı %46,2'den %31,1'e düşerken, doğal gazın payı %16'dan %21,4'e, nükleer enerjinin payı %0,9'dan %4,8'e ve hidrolik dâhil yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarının payı ise %1,9'dan %3,6'ya yükselmiştir. Aynı dönemde kömürün payı %24,5'dan %28,9'a ulaşmıştır [1].

21. yüzyılın ilk 13 yılında toplam enerji arzı içerisindeki payı en çok değişen kaynak kömür olmuştur. Söz konusu 13 yılda petrolün payı %36,5'den %31,1'e, nükleerin payı %6,7'den %4,8'e düşerken, doğal gazın payı sadece 0,9 puanlık artışla %20,5'dan %21,4'e yükselmiş, buna karşın kömürün toplam içindeki payı 5,7 puan artışla %23,3'den %29'a çıkmıştır. Dolayısıyla, fosil kaynak payının %80'den %81'e yükseldiği son 13 yıllık dönemin net kazananı kömür olmuştur. Kömürün son yıllardaki tüketim artış hızıyla, gelecekte petrolden üst sıraya yükselmesi kaçınılmazdır [1].

### 1.2.2. Dünyada kömür üretimi ve tüketimi

#### 1.2.2.1. Dünyada kömür üretimi

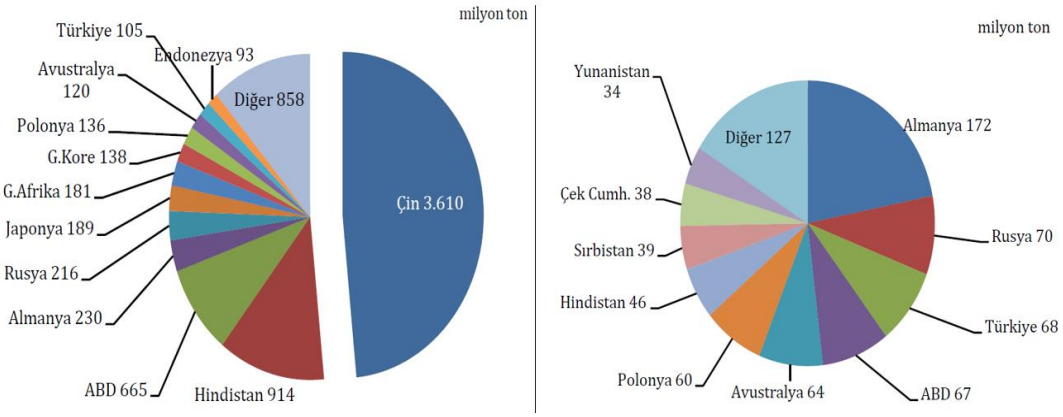
Dünya kömür üretiminin türlere göre dağılımına bakıldığında taşkömürü üretiminin 2013 yılına kadar sürekli arttığı, son iki yılda önemli bir değişim göstermediği ve linyit üretiminde ise küçük miktarda azalma olduğu görülmektedir. 1990 yılında 3,49 milyar ton olan taşkömürü üretimi %106 artışla 2014 yılında 7,2 milyar ton olmuştur [23]. 2016 yılında dünyadaki toplam kömür üretimi ise 7,26 milyar tondur [24].

Dünya linyit üretimi 2016 yılında bir önceki yıla göre %3,5 oranında azalarak 780 milyon ton olmuştur [25]. 2016 yılı dünya linyit üretiminde en büyük pay Almanya'nın olurken ülkemiz üçüncü büyük üretici (%8,8) olmuştur [25].

### 1.2.2.2. Dünyada kömür tüketimi

2016 yılında Dünya'daki kömürün yaklaşık yarısını (3.610 milyon ton) Çin tüketmiştir. Çin'den sonra Hindistan (%12,3), ABD (%8,9), Almanya (%3,1), Rusya (%2,9), Japonya (%2,5), Güney Afrika Cumhuriyeti (%2,4), Güney Kore (%1,9), Polonya (%1,8) ve Avustralya (%1,6) gelmektedir. Bu 10 ülkenin küresel kömür tüketimindeki toplam payı %86'dır ve Türkiye'nin payı ise 105 milyon ton ile %1,4 düzeyindedir (Şekil 1.1) [25].

2016 yılı dünya kömür tüketiminin 1.047 milyon tonu koklaşabilir kömür ve 5.624 milyon tonu ise buhar kömürüdür. Linyit tüketimi ise toplam 785 milyon tondur. 2016 yılı linyit tüketiminde Almanya (172 milyon ton) ilk sıradadır ve Almanya'yı 69,8 milyon ton ile Rusya Federasyonu, 68 milyon ton ile Türkiye, 67,4 milyon ton ile ABD ve 63,6 milyon ton ile Avustralya izlemektedir (Şekil 1.1) [25].




Şekil 1.1.Dünya kömür tüketimi (solda), dünya linyit tüketimi (sağda) (2016) [25]

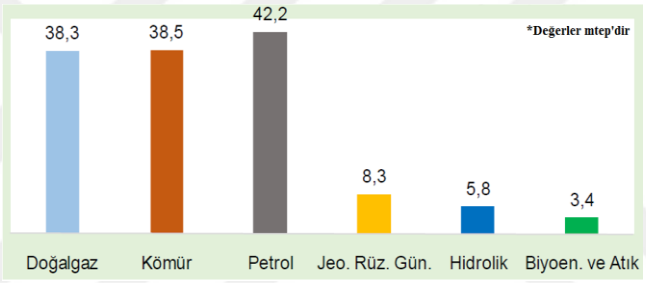
Günümüzde, dünya kömür üretiminin yaklaşık %70'i elektrik ve ticari ısı üretiminde, %13'ü demir-çelik endüstrisinde, %15'i diğer sanayi sektörlerinde ve geriye kalan %3'lük kısım ise ısınma amacıyla tüketilmektedir [25].

Kömür, elektrik üretimi amacıyla kullanılan yakıtlar arasında en yaygın olanıdır. 1990 yılında dünya toplam elektrik üretiminin %37,4'ü kömürden elde edilirken 2016 yılı

itibarıyla bu oran %37,5 olmuştur. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) tarafından yapılan tahminlere göre kömürün elektrik üretimindeki payı 2040 yılında da yaklaşık aynı düzeyde kalacaktır. IEA bu alanda ne doğal gazın ne de nükleer enerjinin kömürün yanına yaklaşabilmesini mümkün görmemektedir [25].

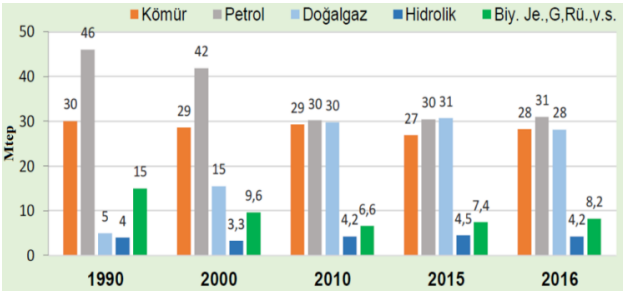
### 1.2.3. Türkiye'de enerji üretimi ve kömürün enerji üretimindeki yeri

Türkiye'nin 2016 yılındaki toplam enerji arzı 136,5 mtep'dir. Bu arzın kaynaklara dağılımında, ilk sırayı 42,2 mtep (%31) ile petrol almıştır. Petrolü, 38,5 mtep (%28) ile kömür, kömüre çok yakın değerle doğal gaz, 8,3 mtep (%6) ile jeotermal, rüzgâr ve güneş toplamı, 5,8 mtep (%4) ile hidrolik, 3,4 mtep (%3) ile biyoenerji, atık ve diğer kaynaklar izlemiştir (Şekil 1.2) [25].



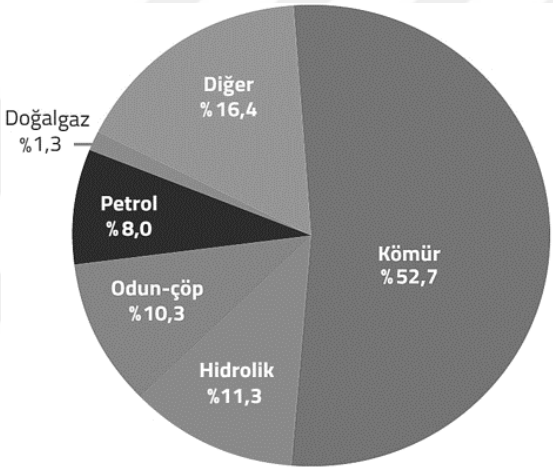

Şekil 1.2. Türkiye birincil enerji arzının kaynaklara göre dağılımı (2016) [25]

1990-2016 yılları arasındaki son 26 yılda 2,6 kat artan Türkiye toplam enerji arzı içinde kömürün payı %30'dan %28'e, petrolün payı %46'dan %31'e, biyoenerji, odun, çöp ve atıkların payı %14'den %2,1'e düşerken doğal gazın payı %5'den %28'e, jeotermal, güneş ve rüzgârın payı %1'den %6,1'e çıkmıştır (Şekil 1.3) [25]. Kömürün enerji arzındaki payı 1990-2016 yılları arasındaki 36 yıllık dönemde belirli seviyede kalmıştır ve bu durumun ileriki yıllarda da aynı kalması muhtemeldir.




Şekil 1.3. Türkiye'nin toplam enerji arzında kaynakların payı (1990 – 2016) [25]

Yerli kömür arzı; 15,3 mtep linyit, 1,1 mtep taşkömürü ve 0,4 mtep asfaltit olmak üzere toplam 16,8 mtep ve ithal kömür arzı ise 19,2 mtep taşkömürü ve 0,2 mtep kok olmak üzere toplam 19,4 mtep düzeyindedir. 2014 yılında yerli kömür arzındaki yıllık artış %15,1 ve ithal kömür arzındaki artış ise %12,8 düzeyinde olmuştur [1]. 2014 sonu itibariyle Türkiye'nin birincil enerji üretimi 31 mtep'tir. Söz konusu yerli üretimin kaynaklara dağılımında, 16,4 mtep ile kömür ilk sırayı alırken, bunu 5,1 mtep ile jeotermal, rüzgâr ve güneş gibi yenilenebilir enerji kaynakları, 3,5 mtep ile hidrolik, 3,2 mtep ile odun, hayvan ve bitki artıkları, 2,5 mtep ile petrol ve 0,4 mtep ile doğal gaz izlemektedir (Şekil 1.4). Yerli kömür üretimi; 14,8 mtep linyit, 1,1 mtep taşkömürü ve 0,4 mtep asfaltit şeklindedir [1].



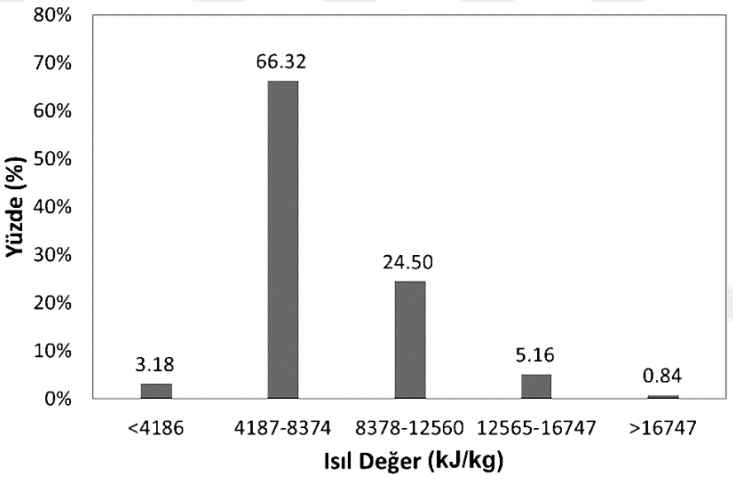

Şekil 1.4. Türkiye birincil enerji üretiminin yerli kaynaklara göre dağılımı (2014) [1]

Eşdeğer petrol bazında kömür üretimindeki artış ise son 10 yıllık dönemde %55,3 olmuştur. Yerli kömür üretiminin enerji tüketimini karşılama oranı 2004 yılında %12 düzeyindeyken 2014 yılında ise %13,2'dir [1]. Enerji arzının karşılanmasında petrolün oranı giderek düşmekte ve yenilenebilir kaynakların payı artmaktadır. 2014 yılına kadar olan 26 yıllık süreçte kömür konumunu korumuştur. 2014 yılı itibariyle Türkiye'deki birincil enerji arzında doğalgaz ve petrolden sonra %16'lık payla taşkömürü kullanılmaktadır ve taşkömüründen sonra %12 ile linyit gelmektedir [23].

1990-2016 arasında geçen 26 yıl incelendiğinde, Türkiye'nin birincil enerji arzındaki net ithalat oranının; %52'den %74'e yükselmiş olması, önemli bir risk oluşturmaktadır. Sonuç olarak, enerji güvenliği ve güvenirliği için yerli kaynaklardan enerji üretiminin artırılması gerekmektedir [25].

### 1.2.3.1. Türkiye'deki kömür rezervleri

Türkiye'de doğal gaz ve petrol rezervleri oldukça sınırlı olmasına karşın yaklaşık 1,3 milyar ton taşkömürü, 15,6 milyar ton linyit rezervi bulunmaktadır [1] ve bu rezerv miktarları yeni keşiflerle birlikte artmaktadır. Ülkemizdeki taşkömürü ve linyit rezervlerimizin alt ısıl değeleri (AID) sırasıyla 25958-30144 kJ/kg arasında ve 4186-17584 kJ/kg arasında değişiklik göstermektedir. Rezervlerin yaklaşık %90'ının AID'si 12560 kJ/kg'ın altındadır (Şekil 1.5) [1] ve oldukça düşük değere sahiptir. Ülkemizdeki linyit rezervlerin ısıl değerinin bu denli düşük olmasının temel sebebi yüksek nem içeriğidir. Linyit rezervlerimizin ağırlıklı ortalama baz alındığındaki nem içeriği %43 olup alt ısıl değeri 6766 kJ/kg'dır (Tablo 1.2).




Şekil 1.5. Türkiye'deki linyit rezervlerinin ısıl değere göre dağılımı [26]

Tablo 1.2. Türkiye'deki ana kömür rezervlerinin özellikleri [27]

| İl | İlçe | Rezerv (Mton) | Toplam Pay (%) | Nem (%) | Alt Isıl Değer (kJ/kg) |
|---|---|---|---|---|---|
| K.Maraş | Elbistan | 4,36 | 34,8 | 50-55 | 4316-5028 |
| Konya | Karapınar | 1,83 | 14,6 | 47 | 5527 |
| Eskişehir | Alpu | 1,29 | 10,3 | 34 | 8583 |
| Afyon | Dinar | 0,94 | 7,5 | 41 | 7369 |
| K.Maraş | Elbistan | 0,52 | 4,1 | 48-50 | 3977-4668 |
| Adana | Tufanbeyli | 0,50 | 4,0 | 41 | 5434 |
| Tekirdağ | Çerkezköy | 0,49 | 4,0 | 32 | 8625 |
| Manisa | Soma (Eynez) | 0,49 | 3,9 | 13 | 13188 |
| Ankara | Beypazarı | 0,31 | 2,5 | 24-26 | 10044-11886 |
| Kütahya | Tunçbilek | 0,26 | 2,0 | 15 | 10718 |

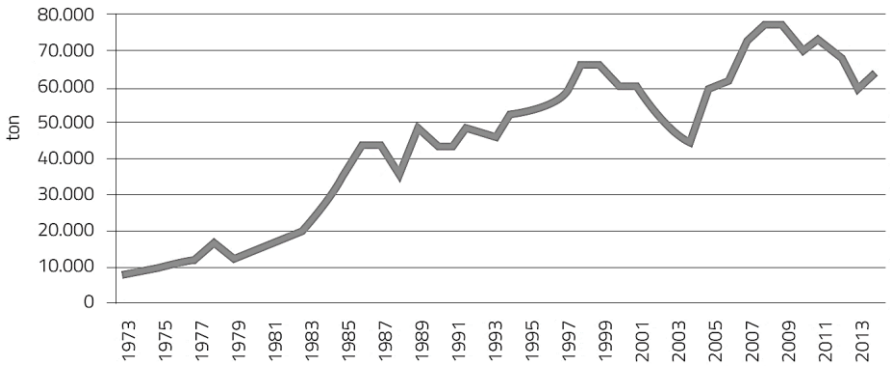
Tablo 1.2. (Devam) Türkiye'deki ana kömür rezervlerinin özellikleri [27]

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Konya | Ilgın | 0,19 | 1,5 | 45 | 9211 |
| Manisa | Soma (Deniş) | 0,17 | 1,4 | 18 | 8709 |
| Kütahya | Seyitömer | 0,14 | 1,1 | 32 | 8709 |
| Tekirdağ | Saray | 0,13 | 1,0 | 45 | 8709 |
| Çankırı | Orta | 0,11 | 0,9 | 48 | 5443 |
| Bingöl | Karlıova | 0,10 | 0,8 | 47 | 6113 |
| Muğla | Yatağan (Bayır) | 0,10 | 0,8 | 24-30 | 9018-11178 |
| Sivas | Kangal | 0,09 | 0,7 | 48-52 | 5053-6255 |
| Muğla | Milas (Karacahisar) | 0,09 | 0,7 | 30 | 9542 |
| Muğla | Milas (Ekizköy) | 0,09 | 0,7 | 29 | 9194 |
| Çanakkale | Çan (Çavuşköy) | 0,07 | 0,6 | 23 | 12560 |
| Bursa | Keles (Harmanalan) | 0,07 | 0,5 | 34-39 | 7975-10065 |
| Ankara | Koyunağılı | 0,05 | 0,4 | 25-50 | 9420 |
| Muğla | Yatağan (Eskihisar) | 0,05 | 0,4 | 33-36 | 8792-8838 |
| Muğla | Milas (Hüsamlar) | 0,05 | 0,4 | 30 | 6728 |
| Bursa | Orhaneli (Sağırlar) | 0,04 | 0,3 | 24 | 10467 |
| | | | **Ağırlıklı Ort.** | **43** | **6766** |

Trakya, Manisa-Soma-Eynez, Eskişehir-Alpu, Afşin-Elbistan ve Konya-Karapınar'da ilave linyit rezervleri tespit edilmesi ile 8,3 milyar ton olarak bilinen linyit rezervlerimiz 2015 sonu itibariyle 15,6 milyar tona ulaşmıştır [1].

### 1.2.3.2. Türkiye'de kömür üretimi

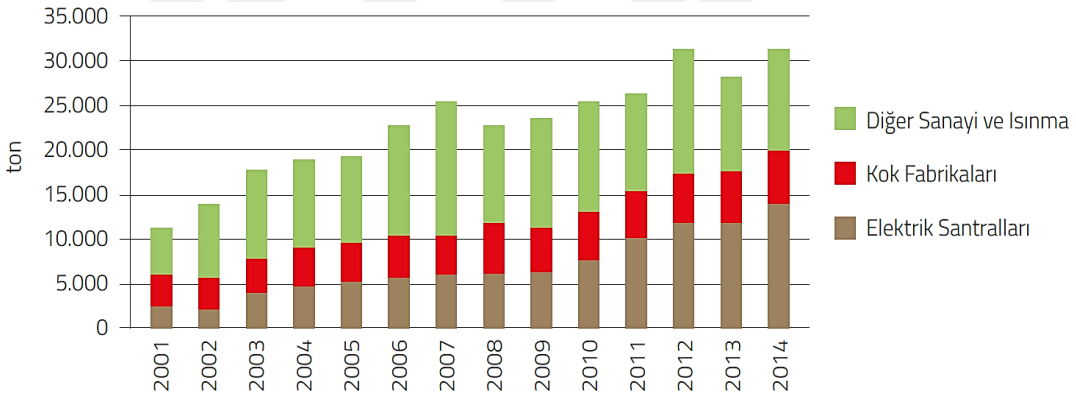
Ülkemiz 2014 yılı toplam kömür üretimi 65,2 milyon tondur. Bu üretimin 62,6 milyon tonu linyit, 1,8 milyon tonu taşkömürü ve 0,8 milyon tonu asfaltittir [1]. Ülkemizde taşkömürü üretimi 2012 yılında 2,3 milyon ton, 2013 yılında ise 1,9 milyon tondur [1]. 1970 yılında 5,8 milyon ton olan linyit üretimi 1998 yılında yaklaşık 65 milyon tondur. Ancak, bu tarihten itibaren, özellikle doğal gaz alım anlaşmaları nedeniyle linyit üretimi sürekli azalmış, 2004 yılında 43,7 milyon ton ile en düşük seviyesini görmüştür. Bu tarihten sonra tekrar artan linyit üretimleri 2008 yılında 76 milyon tona ulaşmış, ancak daha sonra tekrar gerileyerek 2013 yılında 57,5 milyon ton, 2014 yılında ise bir önceki yıla göre %8,9 artarak 62,6 milyon ton olmuştur (Şekil 1.6) [1].




Şekil 1.6. Türkiye linyit üretimleri [1]

### 1.2.3.3. Türkiye'de kömür tüketimi

2014 yılı taşkömürü arzının %44,6 oranındaki en büyük kısmı elektrik üretiminde ve %17,8 oranındaki kısmı ise ısınma amaçlı olarak tüketilmiştir. Kok fabrikalarının payı %18,2 ve diğer sanayinin payı ise %16,9 düzeyindedir (Şekil 1.7) [1].




Şekil 1.7. Kullanım yerlerine göre Türkiye'deki taşkömürü tüketimi [1]

Ülkemizde üretilen linyitler; elektrik üretimi amacıyla termik santrallerde, sanayi sektörlerinde ve ısınma amacıyla konut ve işyerlerinde tüketilmektedir. Linyitin elektrik üretimi için tüketim payı, 1970'li yılların başında ısıl değer bazında %20'lerde iken bu tarihten itibaren artmaya başlamış ve 2001 yılında %80 ile en yüksek seviyeyi görmüştür. Aynı dönemde konut ve hizmetlerin payı %42'den %7'ye ve sanayi sektörlerinin payı ise %36'dan %13'e gerilemiştir. 2001 sonrasında ise süreç tersine dönmüş ve elektrik üretiminde kullanım payı görece düşerken sanayi sektörleri ile konut ve hizmetlerde kullanım payı tekrar artmıştır [1].

2014 yılında 64,7 milyon ton olan toplam linyit arzının %88,8'i elektrik üretimi için termik santrallerde tüketilmiştir. Sanayi sektörlerinde ve konut-işyerlerinde kullanım

payı sırasıyla %6,3 ve %4,7 düzeyindedir. Bununla beraber, elektrik üretiminde kullanılan linyitlerin ısıl değerleri diğer sektörlere nazaran çok daha düşüktür [1].

Ülkemizdeki linyit rezervlerinin değerlendirilmesi bölgesel kalkınma, cari açığın azaltılması, arz güvenliği, elektrik maliyetlerinin düşürülmesi, istihdam, katma değerin yurt içinde kalması gibi olumlu etkileri bulunmaktadır [28]. Ülkemize benzer şekilde Avusturalya, Çin, Fransa, Almanya, Hindistan, Japonya, Güney Kore, İngiltere ve Amerika gibi ülkeler enerjisinin %65'ini fosil yakıtlardan üretmektedir [29].

Ülkemizin başta petrol olmak üzere fosil enerji kaynaklarında dışa bağımlıdır ve toplam ülke ithalatı içerisinde en önemli pay bu kaynaklara ayrılmaktadır. Ülkemiz fosil kaynaklardan doğal gazda %98, petrolde %94, kömürde %49 oranında dışa bağımlıdır. Yerli kaynaklarımızın büyük kısmı daha düşük kalori ve yüksek nem ve kül içeriğine sahip linyitlerden oluşmaktadır [23]. Kömürlerimiz, kömürleşme derecelerine göre farklı oranlarda su içermektedirler. Madenden çıkan taş kömürü %1-3, sert linyitler %20-30, yumuşak linyitler %40-60, turbalar ise %60'ın üzerinde su içerirler. Kömürleşme derecesi azaldıkça kömürün su içeriği artmakta, dolayısıyla ısıl değer/kömür kalitesi azalmaktadır.

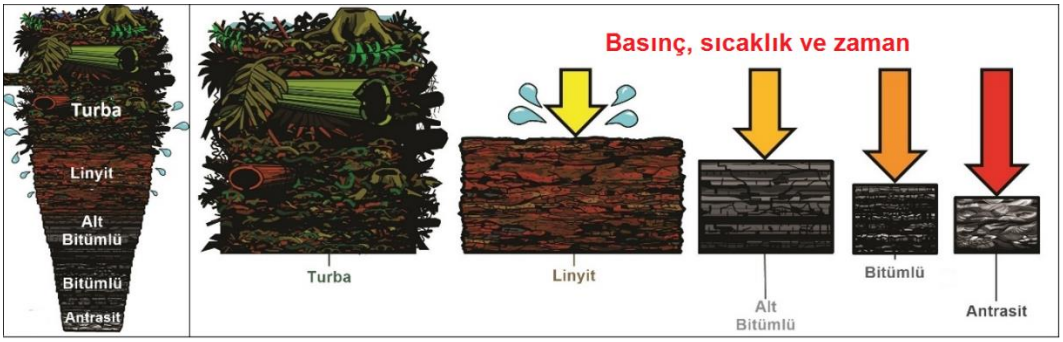
Linyit rezervlerimizin yarısından fazlası %40'ın üzerinde nem içermektedir. Tablo 1.3'de linyit rezervlerimizle ilgili bir değerlendirmeye yer verilmiştir. Isıl değeri 5000 kJ/kg olan nemli kömürün kurutulması/susuzlaştırılması neticesinde ısıl değerde %8-104 arasında artış (5384-10179 kJ/kg) sağlanabilmektedir. Rezervin %71'ini teşkil eden yüksek nem oranına sahip bu kömürlerin (>%30 nem) yakılması esnasında 4.7 milyar ton su yüksek ekserjili enerji ile buharlaştırılmaktadır. Bunun için harcanması gereken enerji miktarı $1{,}15 \times 10^{16}$ kJ'dür. Kömürün ısıya dönüşme verimi %80 kabul edildiğinde kömürlerdeki nemi buharlaştırmak için rezervlerin %22'sine karşılık gelen 3,41 milyar ton (toplam rezerv 15,6 milyar ton) linyitin kullanılması gerekmektedir. Dolayısıyla rezervlerin kullanım ömrü ve üretilen enerji miktarı azalmaktadır. Düşük enerji ve ekserjili mekanik su azaltma ile kömür rezervlerinin ömrü %22 artacaktır. Dolayısıyla kömürdeki suyun ekonomik yöntemlerle (ekserjisi düşük enerji) azaltması ile ısıl değerinde/kalitesinde ciddi oranda artış sağlanacaktır. Böylece yerli kaynaklarımızın daha verimli değerlendirilmesi ve enerji ithalatından kaynaklanan cari açığın azaltılmasına da katkı sağlanacaktır.

Tablo 1.3. Türk linyitlerinin nem içeriği ve kurutma ile ısıl değer artışı

| Nem (%) | Ort. nem (%) | Rezerv (%) | Rezerv miktarı (Mton) | Rezervdeki su (Mton) | Buh. için gereken ısı (kJ) | Kurutma öncesi ısıl değer (kJ/kg) | Kurutma sonrası ısıl değer (kJ/kg) | Isıl değer artışı (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0-10 | 5 | 0,89 | 139 | 7 | 1,7E+13 | 5000 | 5384 | 8 |
| 10-20 | 15 | 14,25 | 2223 | 333 | 8,1E+14 | 5000 | 6245 | 25 |
| 20-30 | 25 | 14,21 | 2217 | 554 | 1,3E+15 | 5000 | 7271 | 45 |
| 30-40 | 35 | 13,21 | 2061 | 721 | 1,7E+15 | 5000 | 8539 | 71 |
| >40 | 45 | 57,44 | 8961 | 4032 | 9,7E+15 | 5000 | 10179 | 104 |
| Top. | | 100 | 15600 | 5648 | 1,37E+16 | | | |

## 1.3. Kömürün Yapısı

Kömür jeolojik devirlerden kalan bitkilerin, alglerin ve sporların biyolojik ve jeotermal bozunması sonucu organik maddelerden oluşan, karakterizasyonu oldukça zor heterojen yapıda karmaşık bir materyaldir [30]. Kömürü oluşturan ana elaman karbondur ve kömürün oluşumu karbon dönüşümüne bağlıdır. Kömürün oluşumu bataklıklarda başlar ve kömürleşmenin ilk basamağı, biyokimyasal olayların olduğu turbalaşma evresidir ve bu evreyi kömürleşme takip eder. Bu basamakta turba, jeolojik ve kimyasal etmenlerin etkisi ile çeşitli derecedeki kömürlere (linyit, alt bitümlü, bitümlü, antrasit) dönüşür (Şekil 1.8). Bu basamakta kömürleşmeye etki eden faktörler, sıcaklık, basınç, zaman, gömülme derinliği ve jeolojik olaylardır. Bu nedenlerden dolayı kömürleşme sürecinde (Şekil 1.8) farklılıklar olmaktadır, bu da kömürleşme derecesi olarak adlandırılmaktadır. Kömürleşmede en etkili faktör sıcaklıktır. Sıcaklık kömürleşmeyi hızlandırır ve kömürleşme derecesini artırır. Kömürleşme derecesi arttıkça kömürün karbon içeriği artarken, hidrojen ve oksijen içeriği azalır [30].



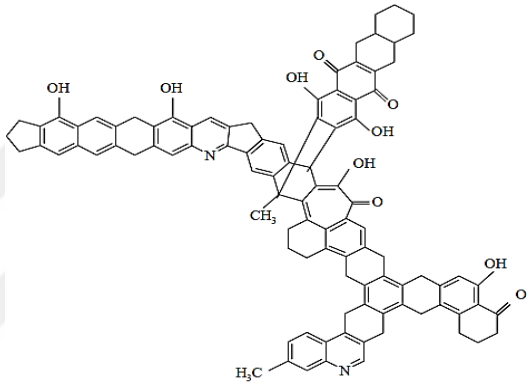
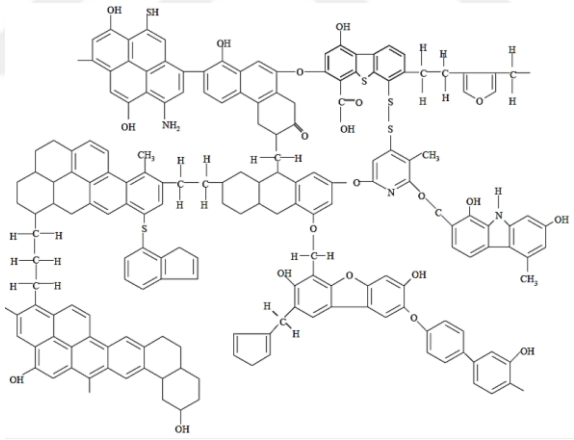
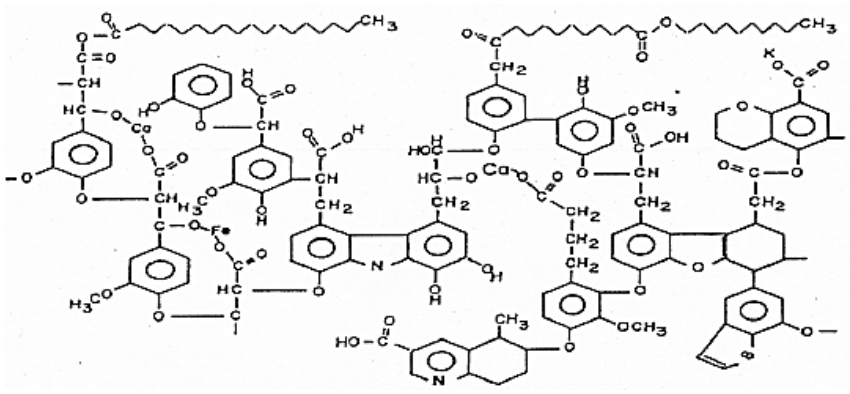

Şekil 1.8. Kömürün oluşum süreci [31]

Kömürün yapısı temel olarak fiziksel ve kimyasal yapı şeklinde 2 ana grupta ele alınabilir.

### 1.3.1. Kömürün kimyasal yapısı

Kömür ana elementleri olan karbon ve hidrojenin dışında, oksijen, azot, kükürt gibi heteroatomlar ve minarel maddeler içerebilmektedir. Organik olarak bağ yapan karbon, hidrojen, oksijen, azot ve kükürt dışındaki tüm elementler mineral madde olarak tanımlanmaktadır. Literatürde kömürlerin kimyasal yapısı için önerilen bazı modeller Tablo 1.4'de verilmiştir [30].

Tablo 1.4. Kömür yapısı için önerilen çeşitli modeller

| | |
|---|---|
| Given tarafından önerilen model yapı [30] |  |
| Wiser tarafından önerilen model yapı [30] |  |
| Linyitin muhtemel yapı modeli [44] |  |

Kömürleşme sürecinde, kömürün yapısında meydana gelen fiziksel ve kimyasal değişiklerle birlikte su miktarı da azalır. DKK'lar hidrofilisiteye (su emiciliğe) neden olan oksijen fonksiyonlu grupları içerir ve bunlar DKK'ların ıslak bazda %30-65 mertebesinde yüksek su içeriğine sahip olmasına neden olur [8]. Oksijen fonksiyonel gruplar karboksil (COOH), hidroksil (-OH), karbonil (>C=O), metoksil ($OCH_3$) ve kalıntı oksijen (eter ve alkol biçimleri) olarak kategorize edilmiştir. DKK'larda ilk üç grubun (karboksil, hidroksil ve karbonil) yüksek konsantrasyonu, hidrofilik doğasına, kararsızlığa, oksidasyona ve kendiliğinden ısınmaya/yanmaya karşı duyarlılığı arttırır [32]. Kömürleşme sürecinde polar fonksiyonel grupların özellikle de hidroksil gruplarının uzaklaştırılmasından dolayı kömürdeki su miktarı azalır (>150 °C). Hidroksil grupların yanı sıra, karboksil, metoksil ve karbonil grupları da bağlı oksijenle birlikte çözünür ve bu yüzden karbon içeriği artar. Kömürdeki karboksil ve hidroksil grupları yok edildiğinde kömür hidrofilisitesini kaybeder [8].

Kömürün hidrofobisitesi (su geçirmezliği) kömürün kalitesi ve karbon oranı düştükçe ve bitümlü kömüre kadar oksijen ve hidroksil oranı arttıkça düşmektedir. Bu, suyun kömür yüzey yapısıyla etkileşiminden kaynaklanmaktadır [8].

### 1.3.2. Kömürün fiziksel yapısı

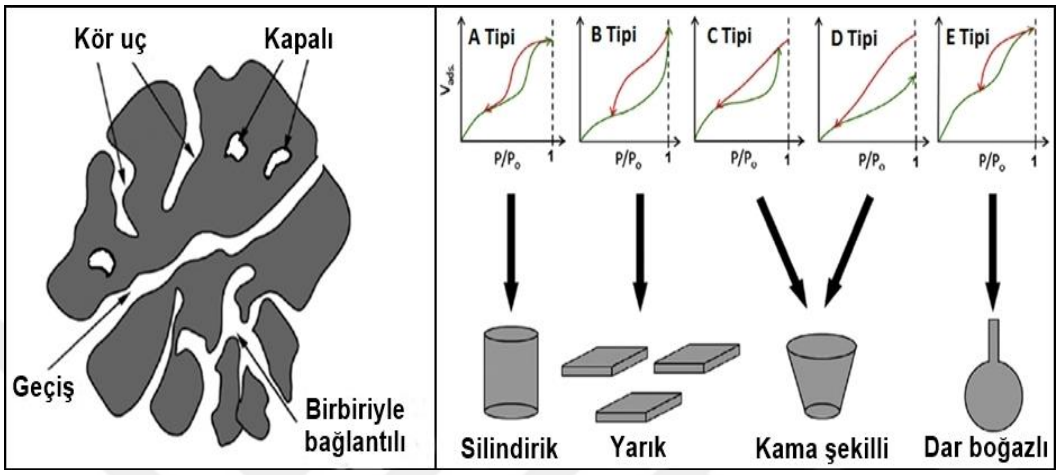
DKK su kaybettiğinde ve kazandığında jele benzer davranış göstererek önemli ölçüde şişer ve büzüşür (hacimsel olarak ~%30) [8]. Kömür doğası gereği karmaşık, gözenekli ve kırık organik kayaçtır. Kömürün yapısı gözeneklilik, geçirgenlik, gözenek çapı, hacim, özgül yüzey alanı, şekil vb. faktörlerden etkilenir [33]. Bu bölümde mekanik su azaltma ile doğrudan ilişkili olan gözeneklilik/porozite hakkında bilgi verilecektir.

#### 1.3.2.1. Gözeneklilik / porozite

Gözeneklilik, gözenek hacimlerinin toplam hacme oranı olarak tanımlanır ve açık ve kapalı gözeneklik şeklinde iki gruba ayrılabilir (Şekil 1.9) [48].

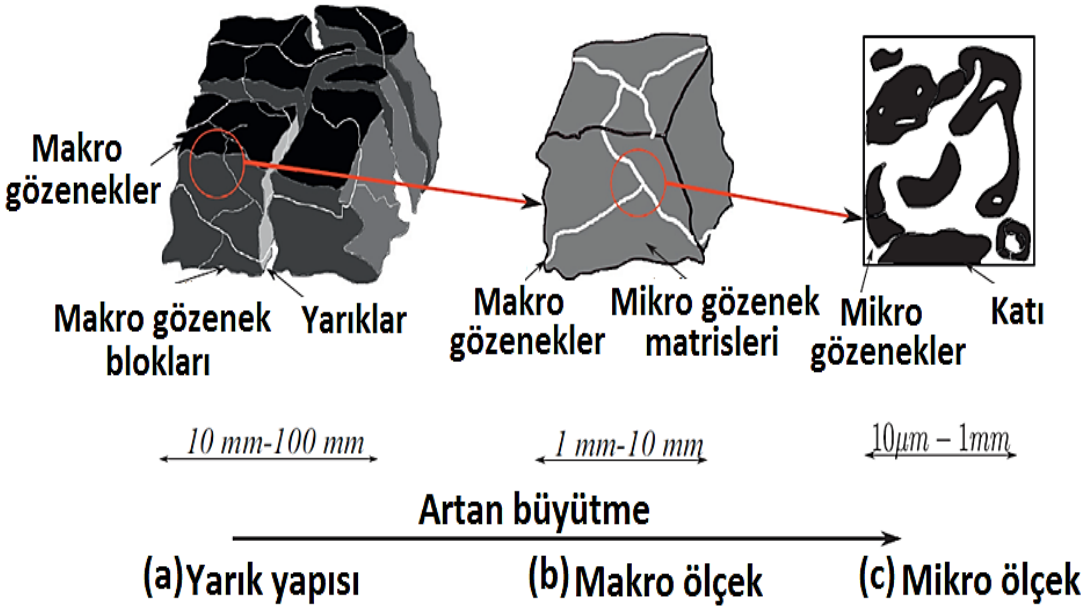
Kömürdeki çeşitli gözenek şekilleri ile ilişkili beş histeriz döngüsü vardır (Şekil 1.9 ve Şekil 1.11). A tipi histerezis silindirik gözeneklere; B tipi yarık biçimli gözeneklere; C ve D tipi histerezisler kama şeklindeki gözeneklere karşılık gelirken E tipi histerezis

şişe boyun tipi gözeneklere karşılık gelmektedir. Gözeneklerin bağlantı şekline bağlı olarak, kömürdeki gözenekler geçiş, birbiriyle bağlantılı, kör uç ve kapalı gözeneklere ayrılabilir (Şekil 1.9). İlk üç tip, açık gözenek olarak adlandırılır ve kömürdeki gaz adsorpsiyonu, desorpsiyonu ve difüzyonu üzerinde büyük etkiye sahiptir [33].

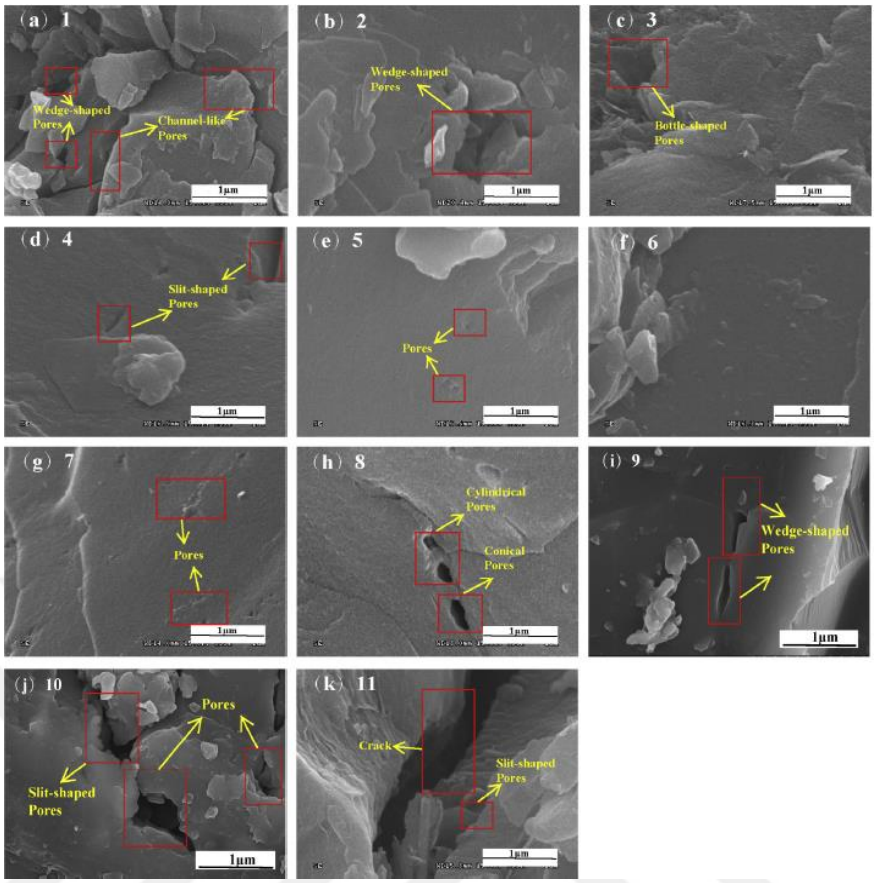



Şekil 1.9. Gözenek tipleri (solda), döngü histerizisleri ve onların gözenek yapısıyla bağlantısı (sağda) [33]

Kömürün gözenekleri yarıklar, makro gözenekler ve mikro gözenekleri içeren hiyerarşik bir yapıya sahiptir (Şekil 1.10). DKK'ların gözenekli yapısı esas olarak mezo ve makro gözeneklerden oluşur ve mezo gözenekler daha fazladır. Dolayısıyla DKK'ların yüzey alanı çoğunlukla mezo gözenekler tarafından kontrol edilir [8].

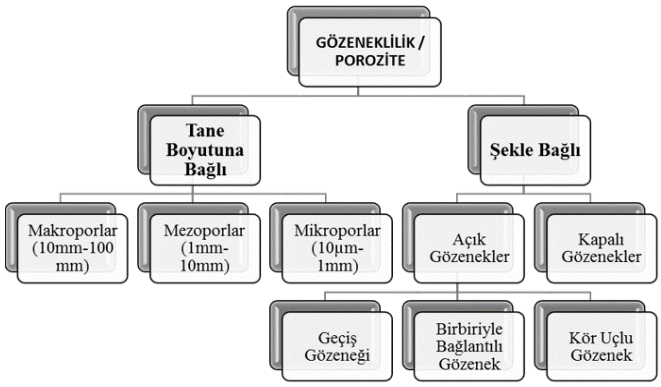



Şekil 1.10. Farklı uzunluklar alındığında kömürün iç yapısının görünümü [34]




Şekil 1.11. Farklı kömür örneklerinin SEM görüntüleri [33]

Kömürdeki yarıklar birkaç milimetre uzunluğunda ve birkaç yüz nanometreden birkaç mikron boyut aralığındadır. Yarıklar arasındaki makro gözenekli bloklar 10-100 mm'lik ölçeğe sahiptir. Makro gözenekli bloklar, makro gözenekleri ve makro gözeneklerin 10-100 nm aralığındaki matrisleri içerir. Mikro gözenekli matrisler, birkaç nanometreden birkaç mikrona kadar olan gözeneklerden oluşur [34]. Şekil 1.12'de kömürdeki gözenek yapısının sınıflandırılması özetlenmiştir.




Şekil 1.12. Kömürdeki gözenek yapısı ve sınıflandırılması

Kömürdeki gözenekler geniş bir boyut dağılımına sahiptir ve birbirine bağlı dar bir ağ oluşturmaktadır. Kömürlerin gözenek yapısının karakteri metamorfizmaya göre değişmektedir. Kömür kalitesi arttıkça, makro gözenekliğin oranı azalır ve mikro gözeneklerin oranı artar. Kömürleşme ile kömür kalitesinin artmasına bağlı olarak orta-YKK'lerde, mikro gözenekler hacmin büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Kömürleşme derecesi arttıkça mezo gözenekler mikro gözeneklere dönüşerek mezo gözenek sayıları azalmaktadır. Sonuç olarak, YKK'larda mezo gözenek sayısında önemli bir azalma ve mikro gözenek sayısında artış gözlenir. Mikro gözenekler ve mezo gözenekler giderek baskın hale gelir. Bu durum kömürün sıkıştırılmasından kaynaklanmaktadır [33].

Gözenek boyutu, gözenek suyuyla birlikte yaklaşık doğrusal biçimde azalmaktadır. Farklı boyutlardaki gözeneklerde depolanan su, farklı yapısal kümeler oluşturur [4]. Bu, kömürün gözenek yapısının su ve doğası ile kuvvetli şekilde ilişkili olduğunu ve kömür suyunun kademeli olarak çıkarılabileceğini göstermektedir [8]. Düşük kaliteli linyit sınıfına giren Türk linyitleri büyük oranda makro gözneklere sahiptir. Bu makro gözeneklere zayıf bağlarla bağlı suların mekanik su azaltma ile büyük oranda uzaklaştırma imkanı bulunmaktadır. Kömür kalitesi artıp gözenekler küçüldükçe kapiler etkinin artmasından dolayı küçük gözeneklerdeki suyun mekanik olarak uzaklaştırılması zorlaşmaktadır.

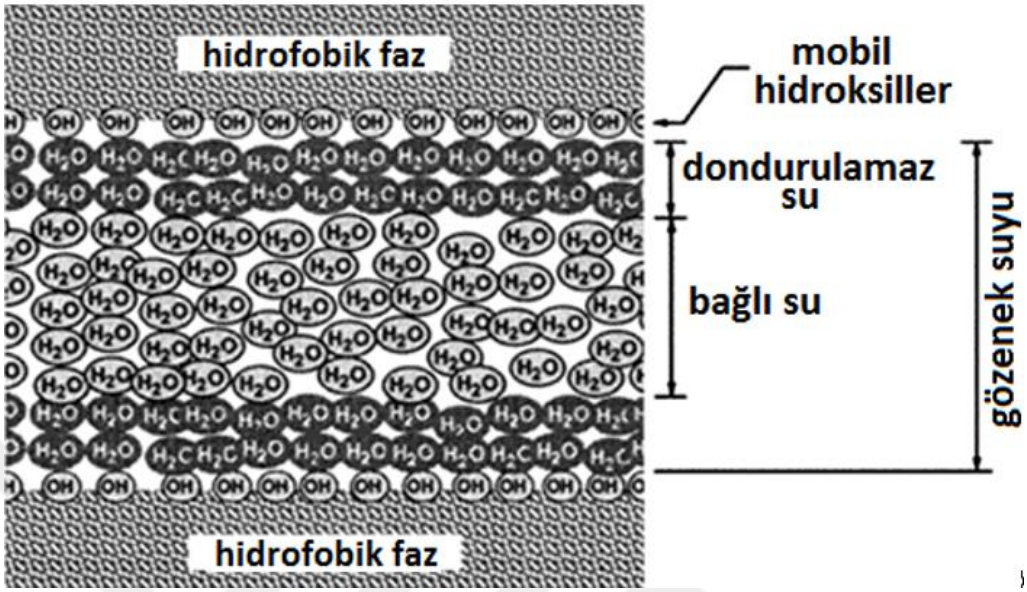
## 1.4. Suyun Kömürlerde Bulunma Şekilleri ve Kömürlere Bağlanma Mekanizması

### 1.4.1. Suyun kömürlerde bulunma şekilleri

Nemli kahverengi kömürde gözenekler su ile doludur ve her bir tanecik, kalınlığı 4-5 su molekülü olan çoklu moleküler su tabakasıyla çevrilidir. Yumuşak kahverengi kömürdeki toplam suyun ancak yirmide biri olan tek tabakalı su, kömüre uygun polar fonksiyonel gruplardaki hidrojen bağlarıyla bağlanır (Şekil 1.13). Taşınabilir kömür protonları hidroksil gruplarınınki ile aynıdır ve tüm hidroksilik gruplar gözenek suyu ile gözenek yüzeyinde çözünür [8].

Kömürde bulunan suyun literatürdeki adlandırılması farklı kişiler tarafından çeşitli şekillerde yapıldığından ortak bir adlandırmaya ihtiyaç bulunmaktadır. Su, DKK'larda çeşitli şekillerde bulunur ve bunların genellikle bağlı fazda ve serbest fazda bulunduğu

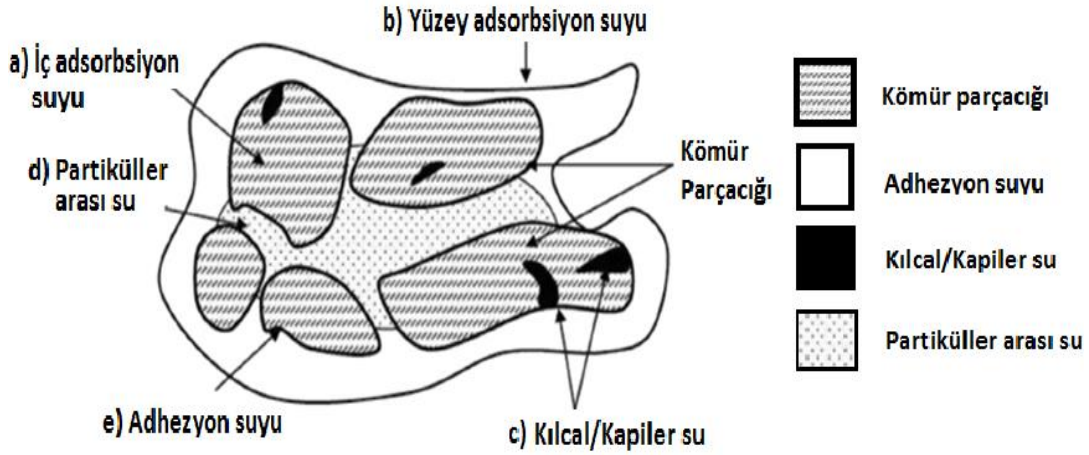
yaygın olarak kabul edilmektedir [8]. Çalışmanın bu bölümünde kömürde bulunan suyun adlandırılması ve bu su türlerinin özellikleri hakkında bilgi verilmiştir.




Şekil 1.13. Nemli kömürün yarık benzeri gözenek modeli [8]

Kömürün yapısında bulunan 5 farklı tipteki su (Şekil 1.14) aşağıdaki şekilde 3 ana gruba ayrılabilir:

- Bünye suyu: yüzey ve iç adsorpsiyon suyu,
- Yüzey suyu: kılcal/kapiler, partiküller arası ve adhezyon suyu,
- Kimyasal bağlı su: karboksil, hidroksil, karbonil ve metoksili içeren polar fonksiyonel gruplarla bağlı su.




Şekil 1.14. Kömürde bulunan su tipleri

Bu su çeşitleri ile ilgili daha detaylı bilgi aşağıda verilmektedir:

1) Bünye suyu: kömürün oluşumu esnasında mikro kanallarda ve mikro gözeneklerde oluşan sudur (Şekil 1.14-a,b). Fizikokimyasal yöntemlerle kömür yüzeyine adsorbe edilen bu su termal kurutma yöntemleriyle uzaklaştırılabilmektedir. Termal yöntemle uzaklaştırılan suyun bir kısmı sıcaklık düştüğünde ve su buharına maruz kaldığında tekrar adsorbe edilebilir. Tekrar adsorbe edilen bu su ancak sıcaklığın tekrar yükseltilmesiyle uzaklaştırılabilir. Bu su türü literatürde fiziksel adsorbsiyon suyu, fizikokimyasal yöntemlerle adsorbe edilen su, bağlı su gibi farklı şekillerde adlandırılmakta ve iki ana gruba ayrılmaktadır;

a) Yüzey adsorpsiyon suyu, kömür moleküllerine yalnızca parçacık yüzeyi ile bağlı şekilde bulunan sudur.

b) İç adsorpsiyon suyu, her bir kömür parçacığında kömürün oluşumu esnasında mikro gözeneklerde ve mikro kanallarda biriken sudur.

2) Serbest yüzey suyu: değişik geometrilere sahip kömür yüzeylerinde (daha büyük gözeneklerde) bulunan, kömürün su ile temasından kaynaklanan, kolay uzaklaştırılabilen ve donma sıcaklığı 0 °C'nin biraz altında olan sudur. Bu su türü literatürde serbest su, fizikomekanik kuvvetler tarafından tutulan su, dondurulabilir su, mikro, makro ve parçacıklar arasında hapsolmuş su gibi farklı şekillerde adlandırılmaktadır [8, 45]. Bu su türü (Şekil 1.14-c,d,e) 3 gruba ayrılmaktadır;

c) Kılcal/kapiler su, makro kılcal damarlarda ve farklı partiküller arasındaki küçük yarıklarda bulunur. Bu tip suyu uzaklaştırmak için kömür yüzeyindeki gözeneklerin boyutundan dolayı (küçük gözeneklerde aynı basınçta daha yüksek sıcaklıkta buharlaşma olduğundan) daha yüksek sıcaklık dolayısıyla daha yüksek ekserjili enerji gerekmektedir. Bu su türü mekanik yöntemlerle de kısmen uzaklaştırılabilmektedir.

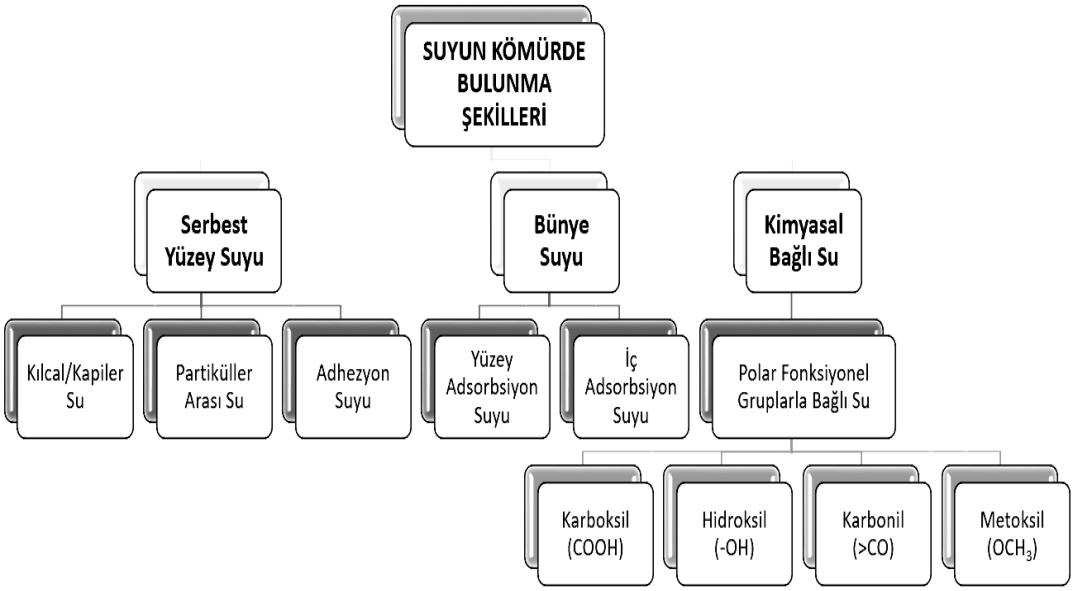
d) Partiküller arası su, iki veya daha fazla partikül arasındaki küçük aralıklarda bulunan sudur ve mekanik su azaltma yöntemleriyle uzaklaştırılabilir.

e) Adhezyon suyu, tek veya yığın halindeki parçacıkların yüzeyi üzerinde film şeklinde bulunan sudur ve mekanik su azaltma yöntemleriyle uzaklaştırılabilir.

3) Kimyasal bağlı su: kömürün temel bileşenleri arasında olup kimyasal reaksiyonlara bağlı olarak oluşmaktadır ve daha güçlü bağlara sahiptir. Bu su türü literatürde kimyasal adsorbsiyon suyu, tek tabakalı su, dondurulamaz su (-3 °C'de hala sıvı fazda bulunan su) ve hidrotasyon suyu gibi farklı şekillerde

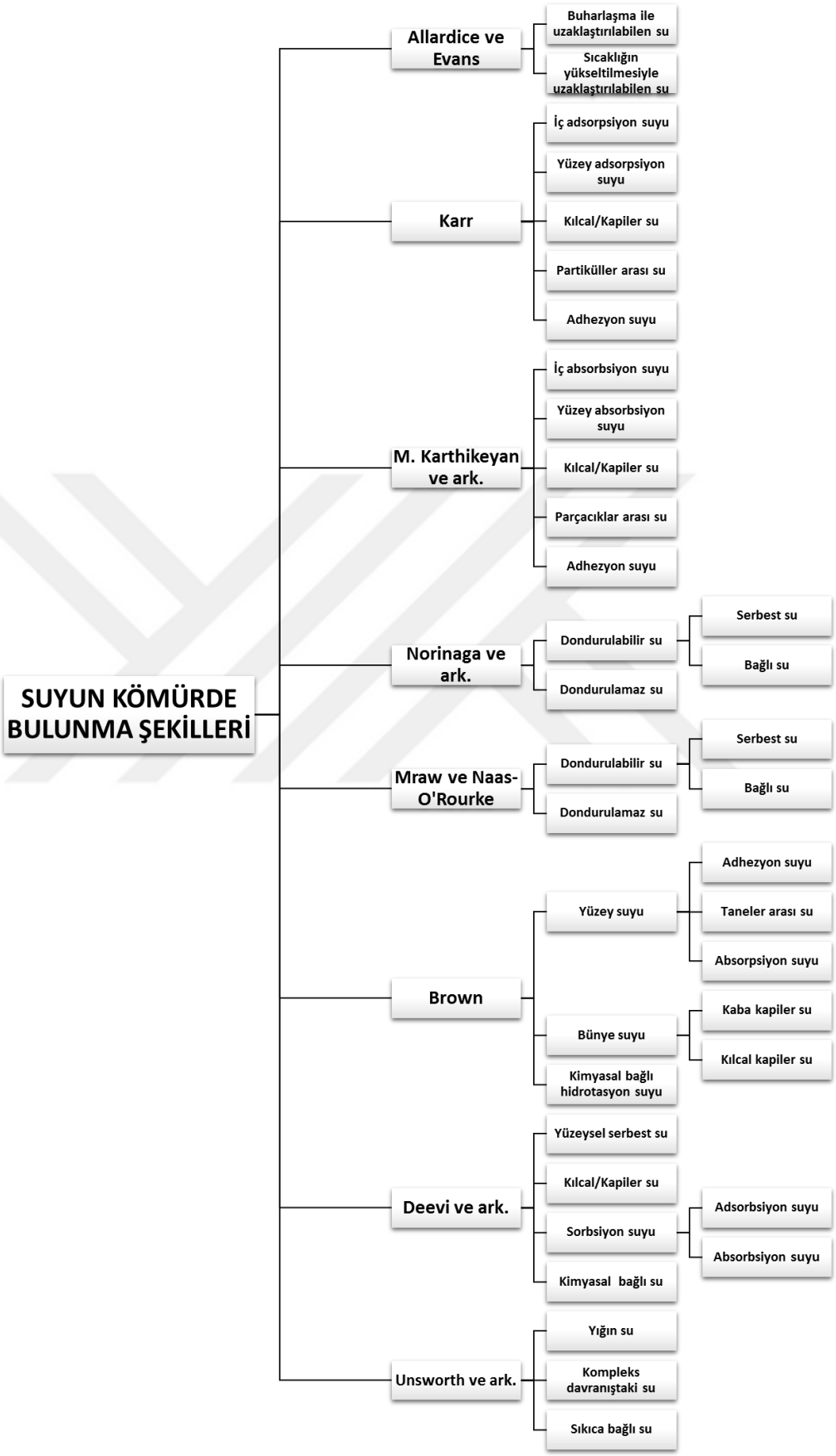
adlandırılmaktadır (Şekil 1.13). Bu su türü sadece sıcaklığın yükseltilerek fonksiyonel grupların termal bozunmasıyla uzaklaştırılmaktadır. Kimyasal bağlı suyun kömürdeki miktarı oldukça düşüktür.

Nemli kahverengi kömürde gözenekler (makro, mikro ve mezo ve kılcal/kapiler) su ile doludur ve her bir tanecik kalınlığı 4-5 su molekülü olan çoklu moleküler su tabakasıyla çevrilidir. Yumuşak kahverengi kömürdeki toplam suyun ancak yirmide biri olan kimyasal bağlı su, kömüre polar fonksiyonel gruplardaki hidrojen bağlarıyla bağlanır (Şekil 1.13). Bu yapılar kömürün hidrofobikliğini (su çekicilik) arttırır ve kömürün su çekiciliği kömürün kalitesi ve karbon oranı ile ters orantılı ve bitümlü kömüre kadar oksijen ve hidroksil oranı ile doğru orantılı olarak artmaktadır [8].




Şekil 1.15. Suyun kömürde bulunma şekilleri

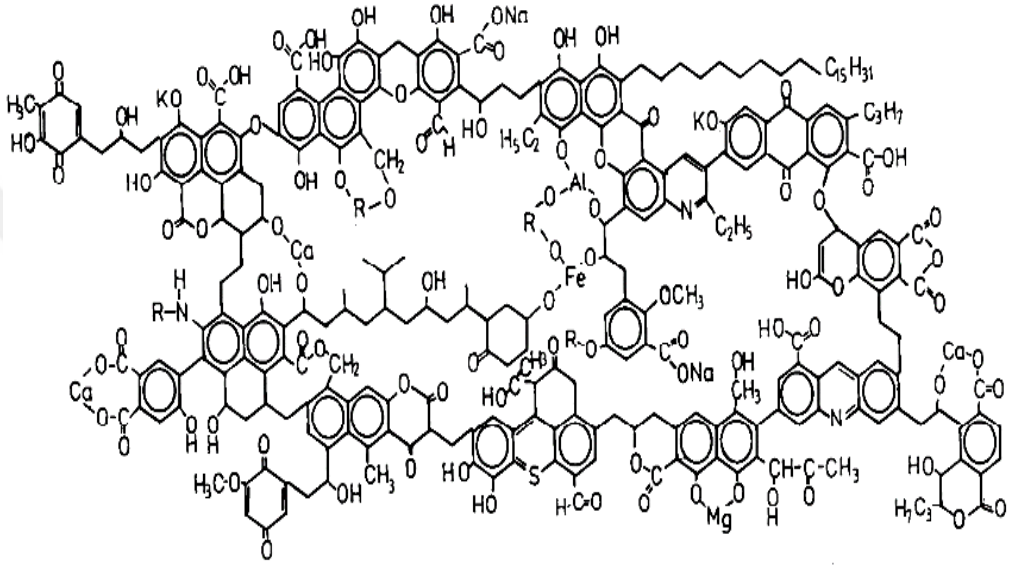
Şekil 1.16'de kömürde bulunan suyu tarif etmek için 8 farklı araştırmacı tarafından kullanılan adlandırmalar özetlenmiştir. Bu konuda hala ortak bir adlandırma bulunamamıştır. Kömürde bulunan su için literatürdeki bilgilerden derlenen ve bu çalışmada kullanılan suyun kömürde bulunma şekilleri Şekil 1.15'de özetlenmiştir. Bu çalışma kapsamında kömürde bulunan su tarif edilirken literatürde yaygın şekilde kullanılan serbest yüzey suyu, bünye suyu ve kimyasal bağlı su olmak üzere 3 farklı adlandırma kullanılmıştır. Tez çalışması kapsamında, kullanılan linyitin içerdiği su türleri ve bunların oranları etüv fırınında farklı şartlarda yapılan kurutma ile tespit edilmiştir. Bu konuda detaylı bilgiye malzeme ve yöntem bölümünde yer verilmiştir.




Şekil 1.16. Kömürde bulunan su türleri için yapılan adlandırmalar

### 1.4.2. Suyun kömürlere bağlanma mekanizması

Suyun kömüre bağlanma şekli, moleküller arası hidrojen bağları, su moleküllerinin katyonlarla olan düzeni, kömür yapısındaki kısa mesafeli yapışma, küçük yarıklarda fizikokimyasal absorbsiyon, fizikomekanik kuvvetler tarafından tutulma ve kimyasal kuvvetlerle bağlanma gibi birçok faktöre bağlıdır. Su molekülleri, oksijen içeren fonksiyonel gruplar ile hidrojen bağı kurarak kömürün yüzeyiyle etkileşime girer [8].

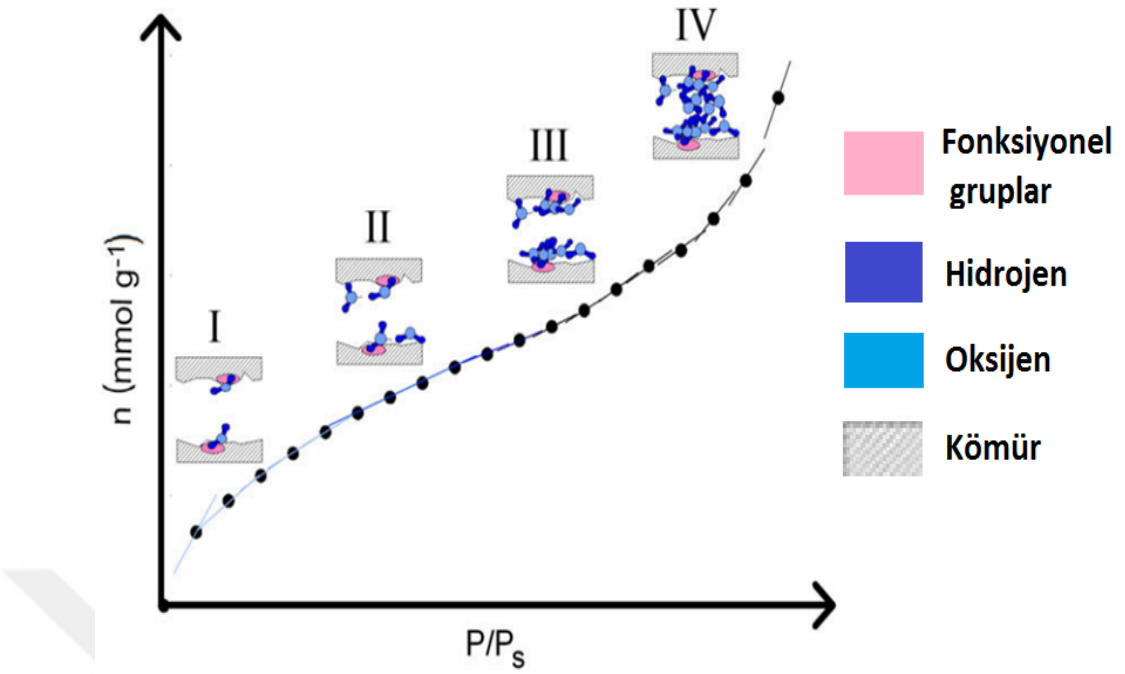


Şekil 1.17. Kurutulmuş linyitin bağ yapısı [46]

Hidrojen bağları; kömürdeki karbona ve suya bağlı hidrojen bağları (kömür ile karboksil ve hidroksil arasında oluşan bağlar) içerir. Su bağlayıcı bölgelerin artışı ile kömürün su tutma kapasitesi lineer olarak artmaktadır. Denge neminin miktarı (kömürün su tutma kapasitesi) ile yüzeyi daha fazla su bağlayıcı yapan polar gruplar arasında doğrusal orantı bulunmaktadır. Dolayısıyla polar fonksiyonel gruplar kimyasal bağlı su oluşturma kapasitesini arttırmaktadır [8].

Suyun kömüre bağlanma mekanizması 4 basamakta gerçekleşmektedir (Şekil 1.18):

I. Oksijen içeren fonksiyonel gruplarda su adsorbsiyonu,
II. I. Bölgede fonksiyonel gruplara bağlanan su molekülleri ile diğer su molekülleri arasında H bağlarının oluşumu,
III. Su molekülleri arasında devam eden H bağları ile su kümelerinin oluşumu,
IV. Su kümelerinin dar kılcal gözeneklerde yoğuşması ve mikro gözenekleri doldurması.



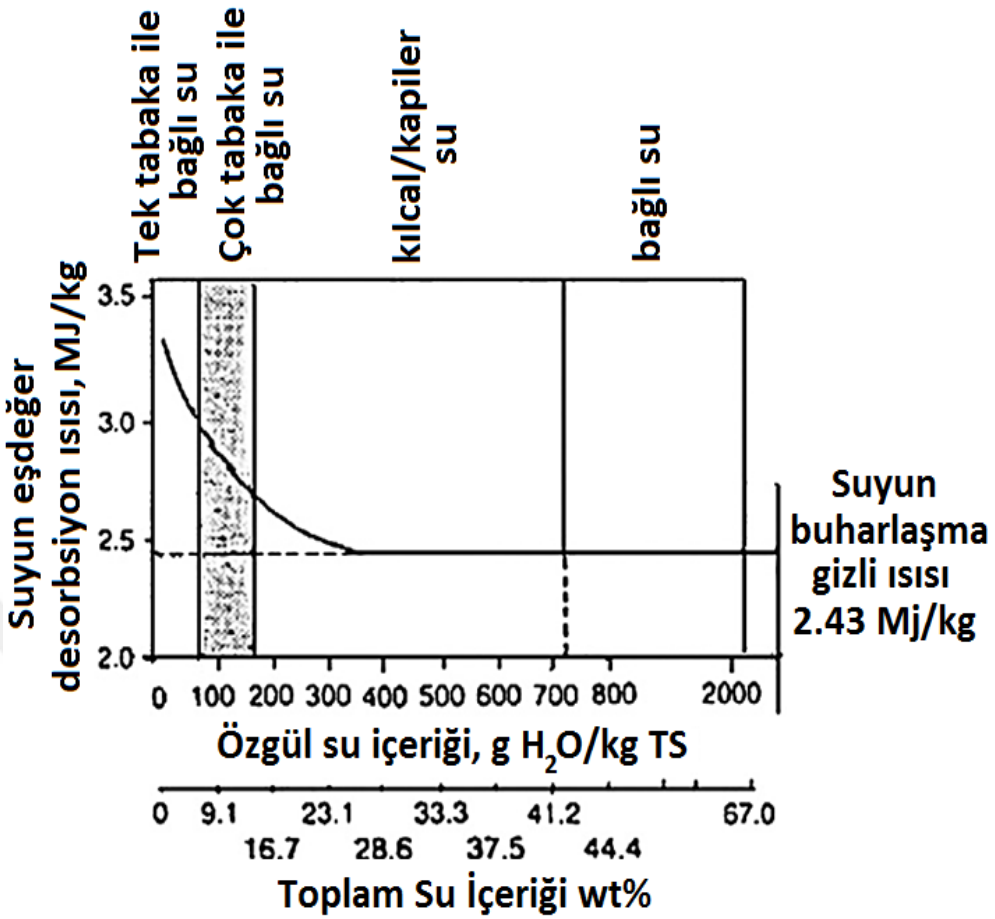

Şekil 1.18. Su buharının kısmi basınç artışına bağlı adsorbsiyonu [40]

Kömürde bulunan toplam hidroksilit ve karboksilit gruplar ile kömürün su adsorbsiyonu doğru orantılıdır. Düşük kısmi basınç için adsorbsiyon esas olarak baskın olmakta iken basıncın artması ile adsorbsiyonun önemi ikinci sıraya düşmektedir [40].

I. proses birincil bölgelerde düşük kısmi basınçtaki adsorbsiyona karşılık gelmektedir. En yüksek difüzyon katsayısı ise II. prosesin başlangıcında gözlenir, burada fonksiyonel grupların etrafında su kümeleri oluşur. Ardından kısmi basıncın artmasıyla ve difüzyon katsayısının düşmesiyle su kümeleri kömürün mikro gözeneklerini doldurur. Son olarak ilave adsorbsiyon, suyun buhar basıncındaki artışın sonucunda meydana gelir, bu su kümeleri büyür ve sonunda kömür parçacıklarındaki kılcal gözeneklerde yoğuşarak gözenekleri doldurur (Şekil 1.18) [8].

### 1.5. Kömür ve Su Yapısı ile Kurutma/Su Azaltma Arasındaki İlişki

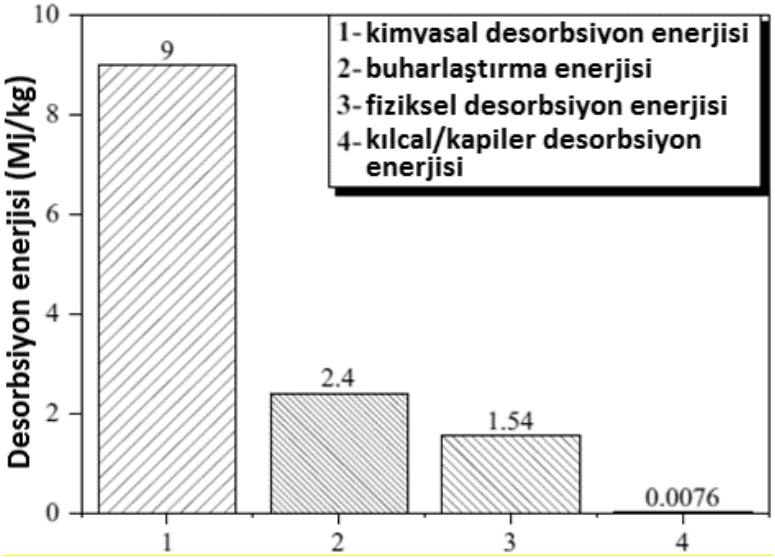
Su kömürde çeşitli şekillerde bulunduğundan kömür ile su arasında karmaşık bir etkileşim vardır ve kömürde bulunan suyun uzaklaştırılması için harcanan enerji miktarı suyun kömürde bulunma şekline göre farklılık göstermektedir (Şekil 1.19). Bu yüzden kömürdeki suyu uzaklaştırmak/kurutmak için harcanan enerjiyi tam olarak tanımlayan temel bir model bulunmamaktadır [45].




Şekil 1.19. Kahverengi kömürde su içeriğinin bir fonksiyonu olarak su emme ısısı [8]

Linyitin termal kurutmasında, suyun buharlaştırılması için gerekli enerji dört bölüme ayrılabilir:

1. Kimyasal bağlı su moleküllerini uzaklaştırmak için gereken enerji (kimyasal desorpsiyon enerjisi), kömür yüzeyi ile kimyasal bağlı su molekülü arasındaki bağ, koparmak için kullanılır. Bu suyun geleneksel termal kurutma yöntemleriyle uzaklaştırılması çok zordur.
2. Moleküller arası fiziksel etkileşimi yenmek için gereken enerji (fiziksel desorpsiyon enerjisi), kömür parçacığı ile moleküler su (bağlı su) arasındaki fiziksel bağı koparmak için gereken enerjidir.
3. Kılcal kuvvetleri yenmek için gereken enerji, kılcal/kapiler kuvvetleri yenmek için gereken enerjidir. Gözenekler küçüldüğünde kapiler etkilerden dolayı suyu buharlaştırmak için gereken ısı bir miktar artar.
4. Suyun faz değişimi için gereken enerji, suyu buharlaştırmak için verilmesi gereken enerjidir ve yığın suyun buharlaşma ısısına eşittir [45].




Şekil 1.20. Kömürdeki dört farklı tip suyun desorpsiyon enerjisi [45]

Kömürdeki dört farklı tip suyun desorpsiyon enerjisi Şekil 1.20'te gösterilmiştir. Kimyasal desorpsiyon enerjisi en büyüğüdür, ancak kömür parçacıklarıyla birlikte suyun yalnızca küçük bir yüzdesi bu formda mevcuttur. Geri kalan üç su çeşidi (serbest yüzey suyu, bağlı su/bünye suyu ve kılcal/kapiler su) için, buharlaşma enerjisi toplam enerjinin yaklaşık %60.8'ini alır ve fiziksel desorpsiyon enerjisi (bağlı su/bünye suyu) %39.0'ı oluşturur. Kılcal desorpsiyon enerjisi sadece %0.2'dir ve termal kurutmada ihmal edilebilir [45].

Kömürde bulunan bünye suyunun ve kimyasal bağlı suyun geleneksel yöntemlerle giderilmesi için yüksek miktarda kaliteli enerji harcanmaktadır. Dolayısıyla ekonomik kurutma için kurutmanın mertebesini belirlemede bu suların miktarı dikkate alınmalıdır. Zira son iki su tabakasını gidermek için harcanan enerji aşamalı olarak arttığından bu kısım suyu gidermek ekonomik değildir. Ayrıca bu su türleri DKK olan linyitlerde az miktarda bulunmaktadır. Kömür kalitesi arttıkça, makro gözenekliğin oranı azalır ve mikro gözeneklerin oranı artar [33]. Ham linyit pürüzlü, düzensiz ve kaba bir yüzey yapısına sahiptir. Linyitin bu yapısından dolayı gözeneklerde kolaylıkla su birikebilmekte ve bu durum su içeriğinin artmasına neden olmaktadır. Linyitlerdeki suyun büyük bir kısmı mekanik su azaltma ile kısmen veya tamamen uzaklaştırılabilen serbest yüzey suyudur. Dolayısıyla ülkemizdeki gibi düşük ısıl değere ve yüksek su içeriğine sahip linyitlerdeki suyun mekanik su azaltma ile uzaklaştırılması daha ekonomik olacaktır.

Ilgın linyiti düşük kaliteli yakıt olduğundan ihtiva ettiği suyun büyük kısmı makro gözeneklerde bulunmaktadır. Bu nedenle deneylerde tane boyutunun ve tane boyut dağılımının su azaltmaya olan etkisini tespit etmek için ince ve kaba öğütülmüş iki farklı tane boyutundaki linyitler kullanılmıştır. İnce öğütülmüş linyitler 250 μm'nin altına indirilerek makro yapının parçalanması, kapalı ve kör uçlu gözeneklerin geçiş ve birbiriyle bağlantılı gözenek haline dönüştürülerek basıncın etkisi ile su çıkışının kolaylaştırılması hedeflenmiştir. Kaba öğütülmüş linyit numunelerinde ise kör uçlu ve kapalı gözenek yapısında değişiklik olmadığı veya basıncın etkisiyle kısmen değiştiği için ince öğütülmüş linyite oranla basıncın mekanik su azaltma üzerindeki etkisinin daha az olacağı düşünülmektedir.

Ülkemizdeki linyitlerin ortalama su oranı yaklaşık %43'tür. Dolayısıyla linyitlerimizdeki su mekanik olarak azaltılmayaelverişlidir. Ancak literatürde linyitlerimizin mekanik su azaltma davranışını gösteren herhangi bir çalışma yer almamaktadır. Ayrıca linyitlerimizin mekanik su azaltma davranışını çok sayıda deney yapmaya gerek kalmadan mekanik su azaltma parametrelerine bağlı olarak ifade eden bir korelasyon da yoktur. Bu çalışma ile literatürdeki bu boşluğun doldurulması hedeflenmiştir.

### 1.6. Su Azaltma ile Kömürün Yapısında Meydana Gelen Değişiklikler

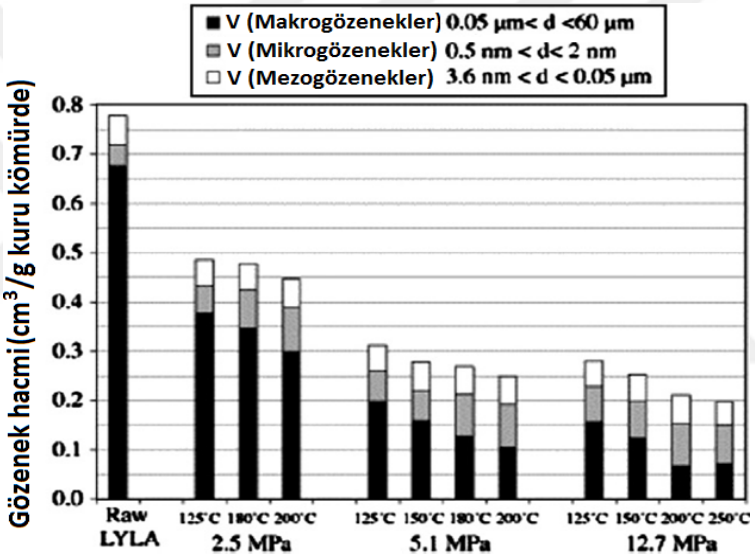
Su azaltma sırasında kömürlerin fiziksel ve kimyasal yapısında değişimler meydana gelmektedir. Linyitin jel benzeri yapısından dolayı suyun uzaklaştırılması esnasında gözenek yapısı ve linyitin fiziksel yapısı değişir [21, 52]. Bu bölümde suyun azaltılması ile kömürün yapısında meydana gelen değişikliklere yer verilmiştir.

#### 1.6.1. Suyun azaltılması ile kömürün fiziksel yapısında meydana gelen değişiklikler

Kömür fiziksel olarak su kaybı ve kazanımı sonucu büzüşen ve şişen jel benzeri bir yapıya sahiptir [42].

Hidrotermal su azaltma (HTD) yöntemi ile proses şartlarının Loy Yang (LY) kahverengi kömürünün susuzlaştırılması üzerindeki etkisi incelenmiştir. İşlem sırasında uygulanan sıcaklığın artışı ile parçacık gözenekliliğinin azaldığı ve sıcaklığın

gözeneklilik üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Gözenek hacmi, Mekanik Termal Su Azaltma (MTE) yönteminden de etkilenmektedir. Artan MTE sıcaklığı ve basıncı ile toplam gözenek hacmi azalmaktadır. Azalmanın nedeni makro gözeneklerin giderek artan çöküşü ve mezo gözenek hacminde meydana gelen hafif bir artıştır. Makro gözeneklerin bazıları muhtemelen gözenek şeklinin deformasyonu ile mezo gözeneklere dönüşmüştür. Buna karşılık, MTE işlemi mikro gözenek hacmi ve yüzey alanını çok az etkilemiştir. Şekil 1.21 MTE basıncının ve sıcaklığının Loy Yang kahverengi kömürün makro, mezo ve mikrogözenek hacimleri üzerindeki etkisini göstermektedir. MTE yöntemi uygulanan kömürün nem tutma kapasitesi, artan sıcaklık ve basınç ile yaklaşık lineer olarak azalmıştır [8].




Şekil 1.21. Kurutulmuş LY kömüründe MTE sıcaklığının ve basıncının gözenek hacimleri üzerindeki etkisi [8]

### 1.6.2. Suyun azaltılması ile kömürün kimyasal yapısında meydana gelen değişiklikler

Kömür yüzeyinin kimyasal niteliğindeki değişiklik çoğunlukla oksijen içeren kutupsal fonksiyonel grupların (karboksil, hidroksil ve karbonil) oluşması ve/veya tahrip edilmesinden kaynaklanmaktadır [32]. Polar gruplardaki azalma, kömürün oksijen içeriğinde ve nem tutma kapasitesinde bir düşüşe neden olmaktadır ve bu durum kömürün kendinden yanmaya karşı gösterdiği eğilimi azaltmaktadır [50].

Kimyasal değişiklikler nedeniyle kömürdeki suyun uzaklaştırılması kömür oksidasyonu üzerinde önemli etkilere sahiptir. Kömürün oksijen reaktivitesi doğrudan

başlangıçtaki serbest radikal konsantrasyonuyla ilişkilidir. Kömür yaş iken kuru halinden daha hızlı oksijenle reaksiyona girer. Bunun nedeni, suyun peroksit ara maddeleri oluşturarak zincir reaksiyonlarını mümkün kılmak için zincir taşıyıcı olarak hareket etmesidir. Kömürdeki su daha fazla giderildiğinde oksidasyon oranı azalır [8].

Mekanik su azaltma yöntemlerinden biri olan HTD yöntemi ile yapılan su azaltma esnasında ise suda çözünen inorganik maddeler suyla birlikte uzaklaştırılır ve dolayısıyla kömürün kimyasal yapısında değişim meydana gelir [4].

### 1.7. Kömür Kurutma ve Su Azaltma Yöntemleri

Günümüzde suyun kömürden uzaklaştırılması için en çok çalışılan yöntemler suyun buharlaştırılıp buharlaştırılamamasına bağlı olarak kurutma ve su azaltma teknolojileri olarak iki gruba ayrılmaktadır [51]. Bunlar;

- Kurutma yöntemleri; döner kurutma, akışkan yataklı kurutma, sıcak yağ daldırmalı kurutma ve mikrodalga kurutma [4, 51]
- Su azaltma yöntemleri; hidrotermal su azaltma, mekanik termal su azaltma ve çözücü ekstraksiyonu [4, 51]

olarak sayılabilir. Yüksek verimli bir kurutma ve su azaltma sistemi tasarlamak için hem kömürün özellikleri hem de farklı kurutma ve su azaltma teknolojilerinin çalışma mekanizmaları dikkate alınmalıdır [4]. Kömür kurutma ve su azaltma teknolojisinin seçimi birçok faktörden etkilenmektedir. Örneğin kömürdeki suyun bir kısmı vakum filtreleri ve santrifüjler gibi klasik yöntemlerle kolaylıkla uzaklaştırılabilirken; diğer bir kısım su ise kömürün yüksek sıcaklığa ısıtılması ile buharlaştırılabilmektedir [4]. Bu nedenle teknoloji seçiminde kömür-su etkileşimi ve suyun kömürde bulunma şekli önemli parametrelerdendir. Bu çalışma kapsamında mekanik su azaltma yöntemi kullanıldığı için yalnızca su azaltma sistemleri hakkında literatür bilgisine yer verilmiştir.

#### 1.7.1. Su azaltma yöntemleri

Su azaltma yöntemlerini kurutma yöntemlerinden ayıran en önemli özellik suyun uzaklaştırılması esnasında buharlaşmanın meydana gelmemesi ve dolayısıyla buharlaşma gizli ısısı harcanmadığından düşük enerji sarfiyatı ile suyun

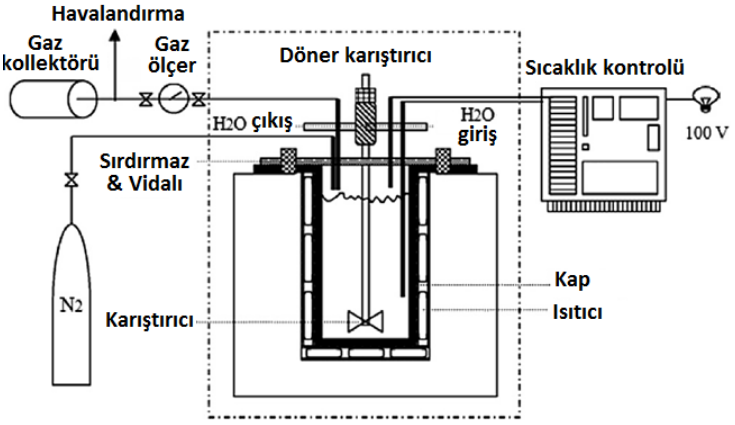
uzaklaştırılabilmesidir [6]. Günümüzde en yaygın olarak kullanılan su azaltma yöntemleri;

- Hidrotermal su azaltma yöntemi (HTD)
- Mekanik/termal su azaltma yöntemi (MTE)
- Çözücü ekstraksiyonu yöntemi (SE)

olarak sıralanabilir. Bu bölümde bahsi geçen 3 yöntem ile ilgili literatür bilgisine yer verilmiştir.

### 1.7.1. Hidrotermal su azaltma yöntemi

Hidrotermal su azaltma yöntemi, yüksek nem içeriğine sahip DKK'lerin kalitesini arttırmak için kullanılan bir yöntemidir. HTD yönteminde DKK herhangi bir ön işleme tabi tutulmadan reaktöre yerleştirilir ve daha sonra $N_2$ gazı ile ortam sıcaklığında belirli bir basınca kadar basınçlandırılır. Basınçlandırmanın ardından DKK hem karıştırıcı ile karıştırılır hem de ısıtılarak istenen reaksiyon sıcaklığına kadar ısıtılır ve suyun kömürden uzaklaştırılması sağlanır. HTD işlemi sırasında su, sıvı olarak uzaklaştırılır. Şekil 1.22'de ham tropik turbanın ısıl değerinin yükseltilmesi ve suyunun azaltılması için tasarlanmış bir HTD sistemi örneğinin şematik diyagramı gösterilmektedir [4].




Şekil 1.22. Hidrotermal banyo tipi su azaltma sisteminin şematik diyagramı [4]

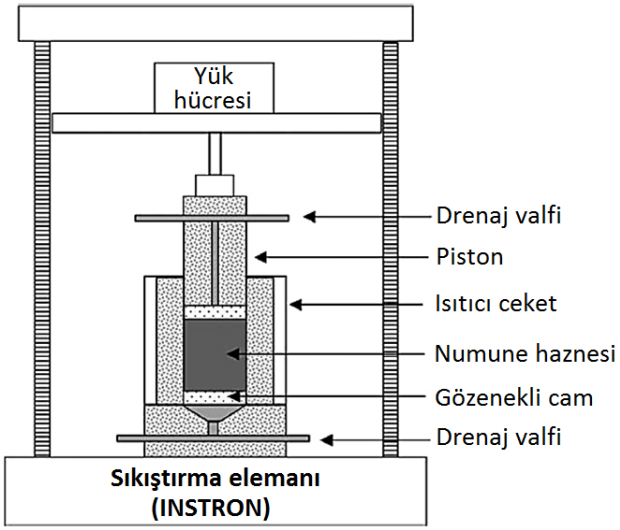
HTD yönteminin en büyük avantajı, kömürdeki suyun buharlaştırılmadan uzaklaştırılması ile buharlaşma gizli ısısının tasarruf edilmesi ve suda çözünen inorganik maddelerin büyük bir kısmının uzaklaştırılması ile kömürün inorganik içeriğinin düşürülmesidir. Dolayısıyla enerji verimliliği yüksek bir yöntemdir [43].

Hidrotermal su azaltmaya tabi tutulan kömürlerin gözenekliliği, makro gözenek hacmi ve mezo gözenekleri, uçucu madde kaybından dolayı ham kömürden daha yüksektir. İşlem sonrası oluşan yeni gözenekler daha küçük çaplı olma eğilimindedir [1].

Pontianak tropik turba peletleri ile yapılan hidrotermal su azaltma deneyinde, optimum su azaltma sıcaklığı 250 °C olarak bulunmuştur [4]. LY ve Victorya kahverengi kömürleri ile yapılan çalışmada, susuzlaştırılmış ürünlerin gözenekliliğini etkileyen ana faktörün reaksiyon sıcaklığı olduğu ve 320 °C'nin optimuma yakın bir sıcaklık olduğu bulunmuştur. Daha yüksek sıcaklıklar kömürün su emme kapasitesini düşürmektedir. Sıcaklık 350 °C'ye yükseltildiğinde, kömürün gözenekliliği çok az miktarda artarken su buharının basıncı ve organik madde kaybı önemli derecede artmıştır. Sıcaklık 300 °C olduğunda, ısıl değer kuru bazda 25.8 MJ/kg'dan 27.8 MJ/kg'e yükselmiş ve kömürde bulunan karbonun yaklaşık %1.5'u suda çözünür organik bileşikler olarak uzaklaştırılan suda çözünmüştür [4].

### 1.7.1.2. Mekanik / termal su azaltma yöntemi

Dortmund Üniversitesi tarafından linyit kullanan elektrik santrallerinin verimliliğini arttırmak için mekanik/termal su azaltma yöntemi (Şekil 1.23) geliştirilmiştir. Su azaltma işlemi sırasında termal ve mekanik enerji bir araya getirilerek hızlı su azaltma ve yatırım maliyetini düşürme imkanı sağlanmıştır. Bu yöntemde su buharlaşmadan uzaklaştırılabildiğinden, yüksek enerji verimliliği sağlanmaktadır [4].




Şekil 1.23. Mekanik termal su azaltma sisteminin şematik diyagramı

MTE sistemi, mekanik/termal su alma teçhizatı, paslanmaz çelik bir numune haznesi, gözenekli bir sinterlenmiş cam ve bir su toplama haznesinden oluşmaktadır. Su azaltma işlemi genelde aşağıdaki dört aşamada gerçekleştirilmektedir;

1) Linyitin odaya ilave su ile yerleştirilmesi
2) Linyitin su azaltma için ayarlanmış bir sıcaklığa kadar ısıtılması
3) Mekanik su azaltma için sabit basınca kadar sıkıştırma
4) Linyitin flaş buharlaştırma suyuyla soğutulması

MTE için en iyi çalışma noktası 200 °C ve 6 MPa civarındadır. Linyitin jeolojik yapısındaki farklılıklar su azaltma üzerinde önemli bir etkiye sahiptir ve yüksek sıcaklıklarda geçirgenlik artarken uzaklaştırılan su miktarı azalmaktadır. DKK'ların su içeriği ve gözenekliliği, alındığı madenden bağımsız olarak (Avustralya, Yunanistan veya Almanya), mekanik/termal su azaltma sıcaklığı ve basıncının artışı ile önemli ölçüde azaltılabilmektedir [4].

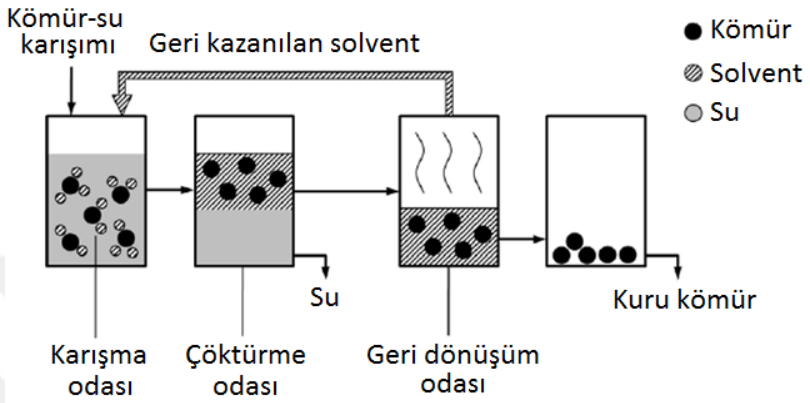
MTE yönteminde uygulanan mekanik basınç, kömür gözenekliliğini azaltmaktadır. MTE sıcaklıkları ve basınçları arttıkça toplam gözenek hacminde düşüş yaşanmaktadır. Buna, mezo gözenek hacminde hafif bir artışla ilişkili olan makro gözeneklerin kademeli çöküşü neden olmaktadır. Makro gözeneklerin bazıları, muhtemelen gözenek şeklinin deformasyonu yoluyla mezo gözeneklere dönüşmektedir. Buna karşılık, MTE işleminin mikro gözenek hacmi ve yüzey alanı üzerinde çok az etkisi olmaktadır. MTE yöntemi uygulanan kömürün nem tutma kapasitesi, artan sıcaklıkla yaklaşık olarak doğrusal olarak ve artan basınçla önemli ölçüde azalmıştır [8]. MTE yönteminde kullanılan yüksek sıcaklık su azaltma için gereken mekanik basıncı azaltmak için kömürü yumuşatmaktadır [6].

#### 1.7.1.3. Çözücü ekstraksiyonu ile su azaltma yöntemi

Çözücü ekstraksiyonu ile su azaltma yönteminde DKK'lardaki su buharlaştırılmadan uzaklaştırılır. Su azaltma işlemi, çok düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilebilir ve bu sayede enerji tasarrufu sağlanır [4].

Çözücü ekstraksiyonu ile su azaltma sistemi (Şekil 1.24), bir reaktör, iki filtre, yüksek basınçlı bir pompa ve diğer ek donanımlardan oluşur. Sistemde, su termal enerji (ısıtma) ile çözücüye salınır; ardından karışım kömürden uzaklaştırılır ve daha sonra

karışım çevre sıcaklığına soğutularak su ve çözücüler kolayca ayrıştırılabilir. Çözücü olarak tetralin kullanılarak ve 150 °C'de ısı uygulayarak, Avustralya kahverengi kömürünün su içeriği %50'den %2'ye düşürülmüştür. Deneylerde, yalnızca 200-300 mg'lık kömür numuneleri kullanılmıştır ve ticari ölçekte bir sistem henüz üretilmemiştir [4].




Şekil 1.24 Çözücü ektraksiyonu tekniği ile kömür suyunun azaltması [49]

Çözücü ekstraksiyonu ile su azaltma sistemi (Şekil 1.24), bir reaktör, iki filtre, yüksek basınçlı bir pompa ve diğer ek donanımlardan oluşur. Sistemde, su termal enerji (ısıtma) ile çözücüye salınır; ardından karışım kömürden uzaklaştırılır ve daha sonra karışım çevre sıcaklığına soğutularak su ve çözücüler kolayca ayrıştırılabilir. Çözücü olarak tetralin kullanılarak ve 150 °C'de ısı uygulayarak, Avustralya kahverengi kömürünün su içeriği %50'den %2'ye düşürülmüştür. Deneylerde, yalnızca 200-300 mg'lık kömür numuneleri kullanılmıştır ve ticari ölçekte bir sistem henüz üretilmemiştir [4].

Literatür tarama çalışmasının neticesinde çoğunluğu yüksek nem içeriğine sahip ülkemiz linyitlerinin mekanik yöntemle suyunun azaltılabileceği, ısıl değerinin dolayısıyla da kalitesinin arttırılabileceği görülmüştür. Mekanik yöntemle suyun azaltılmasındaki enerji sarfiyatı termal kurutmaya göre çok daha düşüktür. Bu nedenle mekanik yöntemle suyun azaltılması ile kömür kalitesinin arttırılması maliyet etkin bir çözüm olarak ön plana çıkmaktadır. Ayrıca bu çalışma ile literatürde yer almayan Türk linyitlerinin mekanik yöntemle suyunun azaltılma davranışı ve mekanik yöntemle suyun azaltılma davranışını hesaplamaya yarayan bir korelasyon ortaya konularak literatürdeki boşluğun doldurması beklenmektedir.

## 1.8. Ekonomik Hesap Yöntemleri

Projelerin finansal ve ekonomik değerlendirmelerinin yapıldığı fizibilite (yapılabilirlik) çalışmalarında yaygın olarak kullanılan yöntemler [47]:

- Geri Ödeme Süresi (GÖS) Yöntemi
- Net Bugünkü Değer (NBD) Yöntemi
- Fayda/Masraf Oranı (F/M) Yöntemi
- İç Karlılık Oranı (İKO) Yöntemi

olarak sıralanır. Bu çalışma kapsamında yapılan fizibilite hesaplarında GÖS, NBD ve F/M yöntemleri kullanılmıştır. Hesaplarda sahadan alınan linyite yakın oranda su/kuru linyit oranına (%83) sahip numunelerin deneysel verileri (24 deney verisi) baz alınmıştır ve baz alınan mekanik su azaltma değerlerine ekstruder sistemi kullanılarak ulaşılabileceği varsayılmıştır. Bu bölümde kullanılan fizibilite yöntemleri hakkında literatür bilgisine yer verilmiştir.

### 1.8.1. Geri ödeme süresi yöntemi

Bir projenin veya yatırımın ekonomik yönden değerlendirilmesi için kullanılan en basit yöntem GÖS yöntemidir. Bu yöntemde yatırımdan sağlanan net gelirlerin, toplam yatırımı ne kadar sürede karşılayacağı hesaplanmaktadır. GÖS ne kadar kısa ise yatırım o derece iyi bir performansa sahip demektir. Bu metodda paranın zaman değeri gözönünde bulundurulmaz [47].

### 1.8.2. Net bugünkü değer yöntemi

Bir yatırım projesinin NBD'si, o projenin ekonomik ömrü boyunca belli bir iskonto oranına göre hesaplanan indirgenmiş gelirlerinin toplamı ile indirgenmiş giderlerinin toplamı arasındaki fark olarak tanımlanır. Kullanılan iskonto oranı, analiz sonuçlarını doğrudan etkileyen bir faktör olduğundan, bu oranın doğru belirlenmesi gerekmektedir. İskonto oranı bir anlamda yatırımdan beklenen verim oranını yansıtmaktadır. İskonto oranı belirlenirken izlenen yaklaşımlar şu şekildedir [47]:

- Yatırım finansmanının yalnız öz kaynaklardan sağlandığı durumlarda, öz kaynağın sermaye maliyeti iskonto oranı olarak belirlenmektedir. Bu durumda öz kaynağın

sermaye maliyeti, alternatif yatırım alanlarından vazgeçilmesinin doğuracağı fırsat maliyeti olarak nitelendirilmektedir. Fırsat maliyetinin en iyi göstergesi piyasalardaki faiz oranlarıdır.

- Yatırım finansmanının yalnız yabancı kaynaklardan sağlandığı durumlarda, sağlanan kredilerin faiz oranları iskonto oranı olarak belirlenebilmektedir. Bu durumda ise Merkez Bankasının uzun dönemli borçlar için uyguladığı faiz oranları kullanılabilmektedir.
- Yatırım proje finansmanının öz kaynaklardan ve yabancı kaynaklardan eşit veya farklı oranlarda sağlandığı durumlarda ise, öz kaynak ve yabancı kaynak sermaye maliyetinin ağırlıklı ortalamasına göre iskonto oranı belirlenmektedir.

Yatırım projesi için hesaplanan NBD'nin sıfırdan büyük olması durumunda söz konusu yatırımın yapılabilir olduğu kabul edilir. Eğer birden fazla proje arasında seçim yapılması gerekiyorsa bu durumda, NBD'si sıfırdan büyük olanlar arasında en yüksek değere sahip projenin diğerlerine göre daha yapılabilir olduğu kabul edilmektedir [47]. Bu çalışmada NBD hesabında Merkez Bankası'nın uzun dönemli borçlar için uyguladığı faiz oranları kullanılmıştır.

### 1.8.3. Fayda/masraf oranı yöntemi

Çok yüksek bir sermaye kullanılarak gerçekleştirilen bir projenin küçük bir sermaye ile gerçekleştirilen bir projeye nazaran daha fazla NBD vermesi doğaldır ancak bu durum yüksek sermaye ile yapılan projenin daha iyi olduğunu göstermemektedir. Birden çok projenin kendi içinde değerlendirilmesi gerektiği durumlarda F/M'nın hesaplanması gerekmektedir. F/M oranı 1'den büyük ise, proje cazip bir yatırım niteliğindedir. Farklı projeler arasında kıyaslama yapıldığında ise F/M oranı en yüksek olan proje tercih edilmelidir [47].

# 2. MALZEME VE YÖNTEM

Çalışmanın bu bölümünde deneysel çalışmalar kapsamında kullanılan yöntemler, cihazlar ve hesap yöntemleri hakkında detaylı bilgi sunulmuştur.

## 2.1. Malzeme

Bu bölümde çalışma kapsamında kullanılan linyitin seçimi ve temini, linyit karakterizasyonu ve mekanik su azaltma deney sistemi hakkında bilgi verilmiştir.

### 2.1.1. Linyit seçimi ve temini

Deneylerde kullanılan linyit seçilirken aşağıdaki kriterler göz önünde bulundurulmuştur;

- Ülkemizde bulunan linyit rezervlerinin çoğunun su içeriğine yakın değerde su içeriğine sahip olarak çoğunluk rezervi temsil etmesi,
- Su içeriğinin yüksek olması,
- Isıl değerinin düşük olması,
- Kolay temin edilebilmesi.

Yukarıda sıralanan kriterler göz önünde bulundurulduğunda, yapılan çalışmada Şekil 2.1'de yer alan Konya Ilgın havzasındaki Türkiye Kömür İşletmeleri ve Yeni Çeltek Kömür ve Madencilik A.Ş.tarafından ayrı ayrı işletilen kömür havzasındaki linyitin kullanılması uygun bulunmuştur. Bu havzada bulunan linyit, ülkemizin 12,5 milyar ton (2015 tarihli verilere göre) olan toplam linyit rezervinin 185 milyon tonluk (%1,5'u) kısmını teşkil etmektedir ve ortalama su içeriği yaklaşık %45'dir. Bunun yanısıra yine Konya'da yer alan Karapınar Havzasının linyitleri (toplam rezervin %14,6'sı) ile nem açısından benzer özellik göstermektedir ancak bu havzada henüz madencilik faaliyeti yapılmadığı için linyit temin etme imkanı bulunmamaktadır.

Ülkemiz linyit rezervinin %70'inin nem içeriği %40'ın üzerindedir (Tablo 1.2) ve deneylerde bu linyitin kullanılması diğer linyitlerin mekanik su azaltma davranışı hakkında da öngörüde bulunmaya imkân tanıyacağı düşünülmektedir.

Deneylerde kullanılmak üzere Konya/Ilgın'da bulunan Yeni Çeltek Kömür İşletmesine ait maden sahasına (Şekil 2.1) gidilerek linyit temin edilmiştir.



Şekil 2.1. Maden sahasının görünümü

1500 metre rakımdaki sahada linyitin üzerinde yaklaşık 30 metre örtü tabakası bulunmaktadır ve bu tabakanın altında ise 20 metrelik linyit damarı bulunmaktadır. Bu damarda yer alan linyitin yaklaşık özellikleri Tablo 2.1'de verilmektedir.

Tablo 2.1. Linyit sahasındaki farklı tabakaların özellikleri

| Tabaka Konumu | Su (%) | Kül (%) | Isıl Değer (kJ/kg) |
|---|---|---|---|
| **Üst tabaka** | ~42 | ~40 | ~7118 |
| **Orta tabaka** | ~40 | ~30 | ~8374 |
| **Alt tabaka** | ~45 | ~29 | ~8792 |

Tabakalar arasındaki linyit özellikleri farklılık gösterdiğinden işletme üç tabakaki linyiti harmanlayarak satmaktadır. Tesisten çıkarılan linyit, yüksek su içeriği ve düşük ısıl değerinden dolayı maden sahası yakınında bulunan kurutma tesisinde kurutulmaktadır. Kurutma tesisinde 10-18 mm boyutundaki yüksek su içeriğine (~%45) sahip linyit, kalitesi daha yüksek farklı bir kömür yakılarak elde edilen 550 °C'lik baca gazı ile döner tamburlu kurutucularda kurutulmaktadır. Kurutma için başka kömür yakılmasının sebebi sahadan çıkan linyitin yanması sonucu yüksek nemden dolayı yeterli baca gazı sıcaklığının elde edilememesidir. Bu durum kurutma için ilave maliyete sebep olmaktadır. Kurutma neticesinde elde edilen ürünün nem içeriği %30 dolaylarına inmektedir. Kurutucu çıkışındaki baca gazı sıcaklığı ise 50 °C

civarındadır. Tesiste kullanılan buharlaştırmalı kurutma sisteminin dışarıdan ilave yakıt satın alınarak ekserji değeri yüksek enerji ile kurutma yapması sonucu ortaya çıkan ek maliyetler ekserji değeri düşük enerji ile suyun azaltmasının ne denli önemli olduğunu da göstermektedir.

Deneylerde kullanılmak üzere linyit damarının en alt tabakasından (en yüksek nem içerikli tabaka) linyit alınmıştır (Şekil 2.2). Linyit örnekleri nemin havaya difüzyonunu engellemek için kapağı contalı ve kelepçeli metal kovalara alınmıştır.



Şekil 2.2. Linyit damarının en alt tabasından alınan linyit numuneleri

### 2.1.2. Linyit karakterizasyonu

Çalışma kapsamında kullanılan linyitin karakterizasyonu için aşağıdaki analizler gerçekleştirilmiştir;

- Linyitin fiziksel özelliklerin belirlenmesi için yapılan analizler
  - Yoğunluk analizi
  - Partikül boyut dağılımı analizi
  - Gözenek analizi
- Linyitin kimyasal özelliklerin belirlenmesi için yapılan analizler
  - Termogravimetrik analiz
  - Elementel analiz

Bu bölümde çalışma kapsamında yapılan analizler ve kullanılan cihazlar ile ilgili bilgi verilecektir.

### 2.1.2.1. Linyitin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için yapılan analizler

Çalışmada kullanılan linyit numuneleri çeneli kırıcı (Retsch BB100) ile kırılarak tane boyutu küçültülmüştür (Şekil 2.3). Kırılan linyitlerin 3 farklı tane boyutuna göre (16-4 mm, 4-2 mm ve <250 µm) tasnifi 16 mm, 4mm, 2 mm ve 250 µm'lik elekler (Utest) ve titreşimli elek sallayıcı cihazı (Retsch AS200) kullanılarak (Şekil 2.3) yapılmıştır.




Şekil 2.3. Çeneli kırıcı (solda), titreşimli elek sallayıcı cihazı ve elekler (sağda)

Kırma ve eleme sonucu elde edilen 16-4 mm aralığındaki linyitler 1. deney grubunu, 4-2 mm aralığındaki linyitler 2. deney grubunu ve <0,250 mm'lik linyitler 3. deney grubunu oluşturacak şekilde sınıflandırılmıştır.

Çalışma kapsamında, elek analizi yapılan linyitlerin yoğunluğu Şekil 2.4'da gösterilen gaz piknometre cihazı (Micrometrics AccuPyc II 1340) ile tespit edilmiştir.



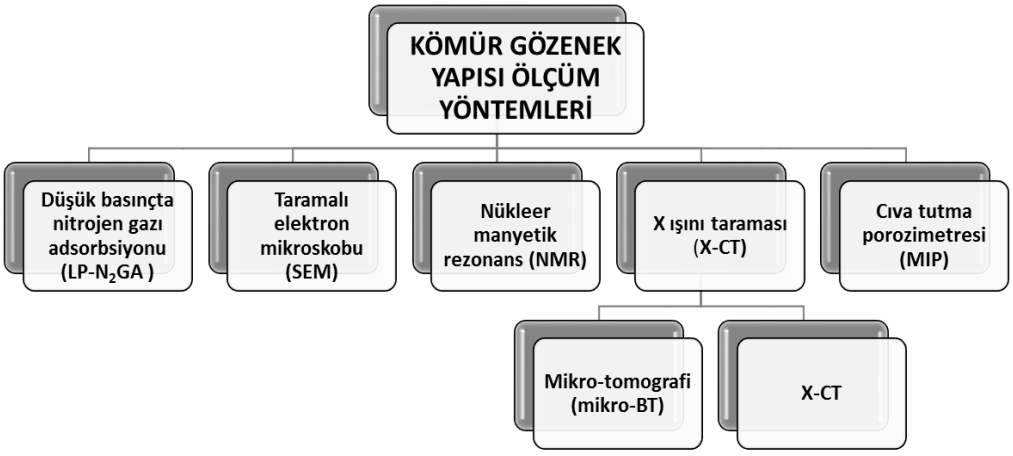

Şekil 2.4. Gaz piknometresi

Şekil 2.5'de gösterilen partükül boyut dağılımı analiz cihazı (Malvern Mastersizer 3000) ile 500 µm'nin altındaki partüküllerin boyut dağılımı ölçülmüştür. Ölçüm, sıvı solüsyon içine yerleştirilen partüküllerin laser ile taranmasıyla yapılmaktadır. Çalışma kapsamında 250 µm'nin altına elenen linyit numunelerinin partikül boyut dağılımı analiz edilmiştir.



Şekil 2.5. Partikül boyut dağılım analiz cihazı

Gözenekli maddenin gözenek boyut dağılımını ve toplam gözenekliliğini karakterize etmek için kullanılan başlıca yöntemler, gaz adsorpsiyonu/düşük basınçta nitrojen gazı adsorbsiyonu, taramalı elektron mikroskopu (SEM), nükleer manyetik rezonans, X ışını taraması, cıva tutma porozimetresi olarak sıralanabilir (Şekil 2.6) [33].




Şekil 2.6. Kömür gözenek yapısı ölçüm yöntemleri

Bu çalışmada kömür gözenek yapısı ölçüm yöntemlerinden olan SEM yöntemi kullanılmıştır. SEM yönteminde nesneler 100000 kez büyütebilmektedir. SEM kullanımı, katı yüzeydeki mikromorfolojiyi daha iyi anlamamıza ve kırık formlarını ve malzemelerin iç yapısını analiz etmemize yardımcı olmaktadır [33]. SEM özellikle kömürün gözenekliliğini ve gözenek yapısını anlamak için kömürün yapısını görselleştirmek için kullanılmaktadır [34]. Çalışma kapsamında yapılan deneylerin öncesinde ve sonrasında linyitin yüzey morfolojisi ve gözenek yapısı Şekil 2.7'de yer alan SEM cihazı (Phenom XL) ile incelenmiştir.



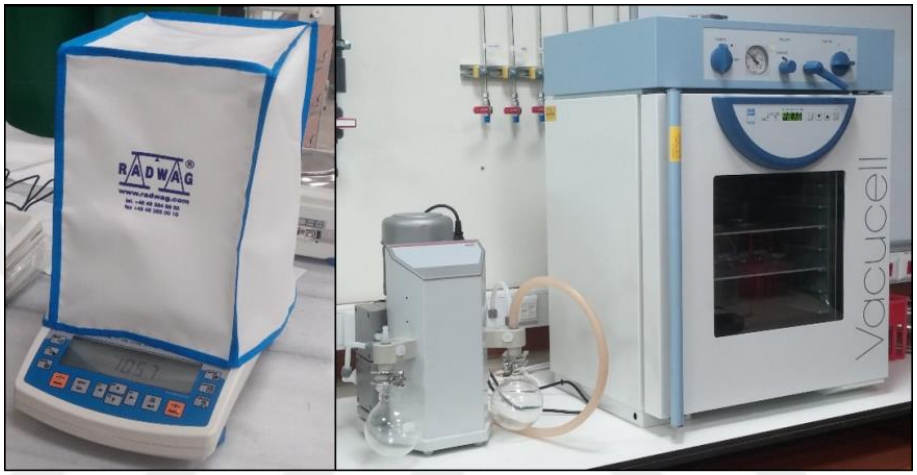

Şekil 2.7. SEM cihazı

### 2.1.2.2. Linyitin kimyasal özelliklerinin belirlenmesi için yapılan analizler

Çalışma kapsamında kullanılan linyitin kimyasal özelliklerini belirlemek için kısa analiz ve elementel analiz yöntemleri kullanılmıştır.

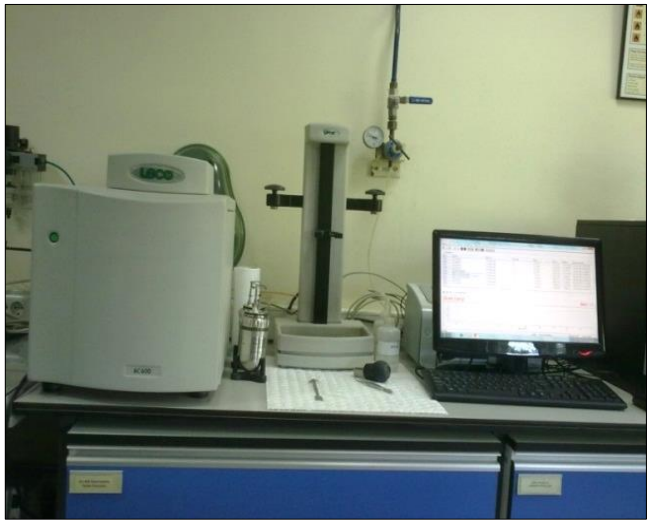
Çalışma kapsamında incelenen linyit numuneleri (tüvenan linyit) ilk olarak nem tayini için ASTM (American Society for Testing and Meterials) D 7582-15 standart test yöntemine göre etüv fırınında kurutmaya tabi tutulmuştur. Etüv fırınında yapılan bu kurutma işlemi aşağıda yer alan iki aşamada gerçekleştirilmiştir:

1) Linyit numuneleri terazi (Radwag - Şekil 2.8) ile tartılarak etüv fırınında (Vacucell 55 ECO - Şekil 2.8) 40 °C'de 24 saat kurutulur (sabit tartıma gelmemişse kurutmaya devam edilir). Kurutmanın ardından tartım yapılarak kütle kaybı hesaplanır. Bu kütle kaybı yüzey nemi miktarını verir.
2) 40 °C'de kurutularak yüzey nemi hesaplanan numune 105 °C'de sabit tartıma gelinceye kadar tekrar kurutulur. Kurutma sonrası tartım yapılarak kütle kaybı hesaplanır. Bu kütle kaybı kimyasal bağlı nem miktarını verir.




Şekil 2.8. Terazi (solda), etüv fırını (sağda)

Nem tayini yapılan numunelerin kısa analizi Termogravimetrik Analiz Cihazı (LECO TGA 701) kullanılarak (Şekil 2.9) ASTM D 7582 standart test metoduna göre gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda linyitin nem, kül, uçucu madde, sabit karbon içeriği ve ısıl değeri tespit edilmiştir.




Şekil 2.9. Termogravimetrik analiz cihazı

Numunelerin elementel analizinde Elementel Analiz Cihazı (LECO Truspec CHN-S - Şekil 2.10) kullanılmıştır. Karbon (C), hidrojen (H) ve azot (N) içerikleri ASTM D 5373 standart test metoduna göre, kükürt (S) içeriği ise ASTM D 4239-standart test metoduna göre hesaplanmıştır.

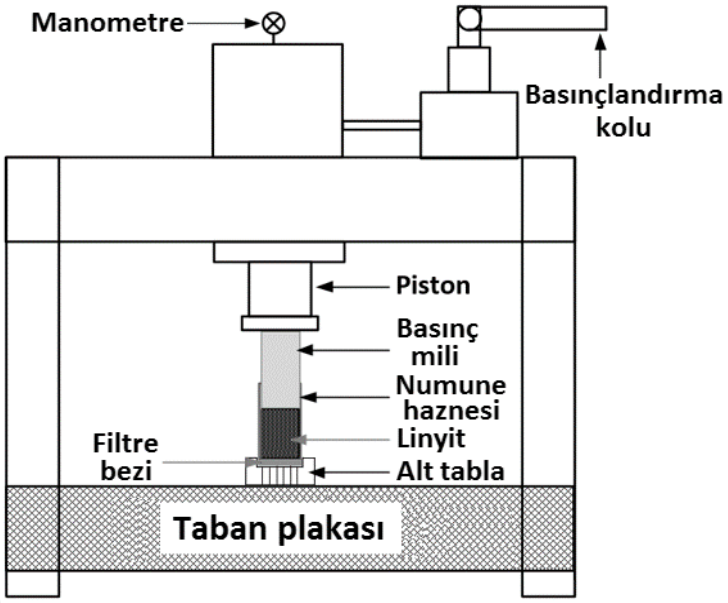


Şekil 2.10. Elementel analiz cihazı

Çalışma kapsamında kullanılan tüm cihazlara ait bilgiler Ek-A'da ayrıca sunulmuştur.

### 2.1.3. Mekanik su azaltma deney sistemi

Mekanik su azaltma deneylerinin yapıldığı deney sistemi iki kısımdan oluşmaktadır (Şekil 2.11). Gerekli test basıncın oluşturulduğu birinci kısım hidrolik sistem, manometre, taban plakası ve basıçlandırma kolunudan oluşmaktadır. Söz konusu sistem yaklaşık 150 kN kuvvet uygulayabilmektedir. Deney kalıp setini oluşturan ikinci kısım ise linyit numunesinin yerleştirildiği metal numune haznesi, numune haznesinin yerleştirildiği alt tabla, kömür ile alt tabla arasına yerleştirilen kumaş filtre bezi ve pistonun uyguladığı basıncı linyite ileten metal basınç milinden oluşmaktadır. Kullanılan kumaş filtre bezi sıkıştırma sonucunda kömürün çıkışını engelleyecek boyutta (<10 μm) gözenek büyüklüğüne ve yeterli mukavemete sahiptir. Yapılan deneyler esnasında kumaş filtre bezi sayesinde kömürün çıkışı engellenerek yalnızca berrak su çıkışı sağlanmaktadır.




Şekil 2.11. Mekanik su azaltma deney düzeneğinin şematik görünümü

Deneyler kapsamında iki farklı deney kalıp seti kullanılmış ve bu setlere ait teknik çizimler Ek-G ve Ek-H'da verilmiştir. İlk deney kalıp setinde linyitin yerleştirildiği numune haznesinin iç çapı 25 mm iken ikinci deney kalıp setinde bu ölçü 50 mm'dir. Her iki kalıp setindeki alt tablada su tahliyesi için açılan delikler 1,5 mm çapa sahiptir ve alt tablaların altında linyitten çıkan suyun kumaş filtreden süzülüp tahliye edilmesi için su tahliye kanalları bulunmaktadır.

## 2.2. Yöntem

Tez çalışması kapsamında yapılan çalışmalar ve incelenen parametreler sıralanmıştır;

- Etüvde fırınında kurutma karakteristiği tayini
- Deney sonrası kurutma şeklinin kurutma karakteristiğine etkisi
- Basıncın ve etki süresinin mekanik su azaltmaya olan etkisi
- Başlangıç neminin mekanik su azaltmaya olan etkisi
- Tane boyutunun mekanik su azaltmaya olan etkisi
- Numune haznesi çapının mekanik su azaltmaya olan etkisi
- Kademeli basınç artışının mekanik su azaltmaya olan etkisi
- Kalınlığın mekanik su azaltmaya olan etkisi

Bu bölümde deney çalışmalarda kullanılan yöntem hakkında detaylı bilgilere yer verilmiştir.

### 2.2.1. Deney prosedürü

Tez kapsamında yapılan deneylerin her biri 4 adımda tamamlanmış ve bu adımlarda yapılan çalışmalar aşağıda sıralanmıştır;

1. Adım: Linyitin öğütülmesi, istenen tane boyutundaki eleklerden (16-4 mm, 4-2 mm ve 250 μm) geçirilmesi, istenen kalınlığı oluşturacak miktarda numunelerin tartılarak hazırlanması, bir numunenin şahit numune olarak alınıp kurutulması ve diğer numunelerin nem kaybına karşı sızdırmaz kaplara alınarak deneylerinin yapılması.

2. Adım: Şahit numunenin 40 °C'de 24 saat (sabit tartıma gelene kadar) kurutularak serbest yüzey suyu ve bünye suyu miktarının ve daha sonra 105 °C'de sabit tartıma gelinceye kadar kurutularak kimyasal bağlı su miktarlarının belirlenmesi

3. Adım: Numune haznesi içindeki kumaş filtreye numunenin yerleştirilmesi ve istenen basıncın uygulanarak sabit tutulması. Deney sonunda numunenin tartılması

4. Adım: Presten çıkan numunenin 40 °C'de 24 saat (sabit tartıma gelene kadar) kurutulması ve presteki su kaybının hesaplanması

### 2.2.2. Mekanik su azaltma hesabı

Deneyler için gereken numune kütlesi ve mekanik su azaltma miktarı aşağıdaki bağıntılar yardımıyla hesaplanmıştır.

Deneylerde kullanılan linyit kütlesi ($m_{lo}$) numunenin kalınlığına ($H_l$) ve yoğunluğuna ($\rho_l$) ve numune haznesi iç çapına ($D_{sc}$) bağlı olarak;

$$m_{lo} = \rho_l \times \pi \times \frac{D_{sc}^2}{4} \times H_l \tag{2.1}$$

bağıntısıyla hesaplanır. Her bir mekanik su azaltma deneyi için deney öncesi ve sonrasındaki su miktarları, numunelerin etüv fırınında 40 °C'de ve 105 °C'de kurutulması ile tespit edilmiştir. Su/kuru linyit oranındaki değişimden mekanik su azaltma miktarı hesaplanmış ve ilgili denklemler aşağıda sıralanmıştır.

Linyitin serbest yüzey suyu kütlesi ($m_{fwl}$) ve bünye suyu yüzdesinin ($p_{fw}$) etüv fırınında 40 °C'de kurutma ile tespit edilmesinin ardından deney yapılan numunedeki serbest yüzey suyu kütlesi ($m_{fwl}$);

$$m_{fwl} = m_{lo} \times p_{fw} \quad (2.2)$$

bağıntısıyla hesaplanır. Linyitin kimyasal bağlı su yüzdesi ($p_{cbw}$) etüv fırınında 105 °C'de kurutma ile tespit edilmesinin ardından deney yapılan numunedeki kimyasal bağlı su kütlesi ($m_{cbw}$);

$$m_{cbw} = m_{lo} \times p_{cbw} \quad (2.3)$$

bağıntısıyla hesaplanır. Linyitteki toplam su kütlesi yani orijinal bazdaki su kütlesi ($m_{tw}$) serbest yüzey suyu bünye suyu ve kimyasal bağlı su kütlelerinin toplamıdır ve aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanır:

$$m_{tw} = m_{fwl} + m_{cbw} \quad (2.4)$$

Kuru linyitin kütlesi ($m_{dl}$) deneyde kullanılan linyitin kütlesi ile toplam su kütlesi arasındaki farktır;

$$m_{dl} = m_{l0} - m_{tw} \quad (2.5)$$

Mekanik su azaltma miktarının ifade edilmesinde kullanılan su/kuru linyit oranı ($p_{dlw}$);

$$p_{dlw} = \frac{m_{tw}}{m_{dl}} \times 100 \quad (2.6)$$

bağıntısı yardımıyla hesaplanır. Presle uzaklaştırılan toplam su kütlesi ($m_{twp}$) serbest su ve bünye suyu kütlesi toplamı ile etüvde buharlaşan su kütlesi ($m_{two}$) arasındaki farktır;

$$m_{twp} = m_{fwl} - m_{two} \quad (2.7)$$

Baskı sonrası linyitte kalan su kütlesi ($m_{wap}$) toplam su kütlesi ile presle uzaklaştırılan su kütlesi arasındaki farktır;

$$m_{wap} = m_{tw} - m_{twp} \quad (2.8)$$

Baskı sonrası su/kuru linyit oranı ($p_{dlwp}$);

$$p_{dlwp} = \frac{m_{wap}}{m_{dl}} \times 100 \quad (2.9)$$

bağıntısıyla hesaplanır. Uzaklaştırılan toplam su yüzdesi ($p_{rtw}$);

$$p_{rtw} = \frac{m_{twp}}{m_{tw}} \times 100 \quad (2.10)$$

bağıntısıyla hesaplanır. Mekanik su azaltma miktarı veya mekanik su azaltma yüzdesi ($\eta_{dw}$) aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanır;

$$\eta_{dw} = \frac{p_{dlw} - p_{dlwp}}{p_{dlw}} \quad (2.11)$$

### 2.2.3. Isıl değer hesabı

Kömürün AID ve ÜID, elemental analizi sonuçları kullanılarak aşağıda yer alan eşitlikler ile hesaplanmıştır.

$$AID = ÜID - h_{fg} \text{ x } (9h_2 + w) \text{ kJ/kg} \quad (2.12)$$

$h_{fg}$, suyun buharlaşma ısısını; w, numune içindeki nemin ağırlıkça yüzdesini ve $h_2$, numune içindeki hidrojenin ağırlıkça yüzdesidir [35].

$$AID = ÜID - 2500 \text{ x } (9h_2 + w) \text{ kJ/kg} \quad (2.13)$$

AID'nin hesaplanmasında kömürün elementel analiz değerleri ve Dulong formülü kullanılarak ÜID, aşağıdaki eşitlik ile yaklaşık olarak hesaplanabilmektedir.

$$ÜID = 33950C + 144200 \text{ x } (H_2 - O_2/8) + 9400S \quad \text{kJ/kg} \quad (2.14)$$

Eş. 2.14'deki tüm değişkenler ilgili elementlerin birim kütle içindeki kesirleridir ve elementel analiz hangi bazda ise (kuru bazda, ojinal bazda vb.) çıkan sonuçta aynı bazdadır [35]. Isıl değer eşitlikleri kullanılarak 24 su azaltma deneyi için elde edilen sonuçlar Ek-B'de sunulmuştur.

### 2.2.4. Sıkıştırma işi hesabı

Linyitin ekstruderde sıkıştırılarak suyunun azaltılması için gereken teorik iş miktarı;

$$W_t = V_{ort} \times (P_{son} - P_{ilk}) \quad (2.15)$$

bağıntısı ile hesaplanır. Burada $W_t$, sıkıştırma için gereken teorik işi, $V_{ort}$, numune haznesine yerleştirilen linyitin ortalama hacmini, $P_{ilk}$, linyitin başlangıçtaki basıncını ve $P_{son}$ ise linyite uygulanan basıncı ifade etmektedir. Ancak burada bulunan iş değeri teorik değer olup ekstruder verimini yansıtmamaktadır, dolayısıyla uygulamadaki gerçek değer, ekstruder verimi %70 kabul edilerek elde edilen iş değeridir ve aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır,

$$W_g = \frac{W_t}{\eta_e} \tag{2.16}$$

Burada $W_g$, sıkıştırma için gereken gerçek işi ve $\eta_e$, ekstruder verimini ifade etmektedir. Hesaplama neticesinde elde edilen sonuçlar Ek-C'de sunulmuştur.

### 2.2.5. Ekstruder hesabı

Bu bölümde deneylerden elde edilen su azaltma oranlarını elde etmek için kullanılabilecek ticari ölçekli ekstruderin tasarımında kullanılan bağıntılara yer verilmiştir.

Ekstruder helezonunun besleme debisi,

$$\dot{V}_{helezon} = \frac{\dot{m}_{linyit}}{\rho_l} \tag{2.17}$$

bağıntısı ile hesaplanır. Burada $\dot{V}_{helezon}$, ekstuderin besleyebileceği hacimsel debiyi, $\dot{m}_{linyit}$, ekstrudere beslenen linyitin kütlesel debisini, $\rho_l$, ise linyitin yoğunluğunu ifade etmektedir. Ekstruderde kullanılan helezonun çapı,

$$D_{helezon} = \sqrt[3]{\frac{4\times\dot{m}_{linyit}}{60\times\pi\times0,8\times n\times\varphi\times\gamma\times C}} \tag{2.18}$$

bağıntısı ile hesaplanır. Burada $D_{helezon}$, helezonun çapını, n, helezon milinin devrini, $\varphi$, malzeme yükleme verimini, $\gamma$, yığın yoğunluğu, C, taşıma katsayısını ifade etmektedir [36].Yığma ağırlığı;

$$\gamma = \frac{\rho_l}{1000} \tag{2.19}$$

bağıntısı ile elde edilmektedir. Malzeme yükleme verimi için yaygın olarak kullanılan 0,125 değeri seçilmiştir. Linyit aşındırıcı bir malzeme olduğundan helezonun devri düşük tutularak 8 dev/dk ve taşıma katsayısı ise 1 seçilmiştir. Helezonun çapı hesaplandıktan sonra helezonun hatvesi,

$$S_{helezon} = 0{,}8 \times D_{helezon} \tag{2.20}$$

bağıntısı ile hesaplanır [36]. Burada $S_{helezon}$, helezonun hatvesini ifade etmektedir. Helezon hatvesiyle ilişkili olarak malzeme iletim hızı,

$$V_{malzeme} = \frac{n \times S_{helezon}}{60} \tag{2.21}$$

bağıntısı ile hesaplanır. Burada $V_{malzeme}$, malzemenin iletim hızını ifade etmektedir [36]. Helezon milinin bağlanacağı vidanın boyu;

$$L_{vida} = V_{malzeme} \times t \tag{2.22}$$

bağıntısı ile hesaplanır. Burada $L_{vida}$, helezon vidasının boyunu, t ise malzemenin helezonda kalacağı süreyi ifade etmektedir [36]. Vida boyunca gereken helezon adedi;

$$n_{helezon} = \frac{L_{vida}}{S_{helezon}} \tag{2.23}$$

bağıntısı ile hesaplanır. Burada $n_{helezon}$, vida boyunca kullanılan helezon adedini ifade etmektedir. Helezon milinde gerekli güç ($N_o$),

$$N_o = \frac{\dot{m}_{linyit} \times L_{vida} \times w_o}{367 \times \eta_d} \tag{2.24}$$

bağıntısı ile hesaplanır. Burada $w_o$, malzemenin harekete karşı gösterdiği dirençtir ve bu değer 6 olarak kabul edilmiştir, $\eta_d$ ise motorun hareketini aktarmak için kullanılan redüktörün verimidir ve %90 olarak kabul edilmiştir. Ekstuder sisteminde kullanılan helezon milin emniyetli çapını hesaplamak için motor tarafından mile uygulanan burulma momenti [36];

$$M_b = \frac{975 \times N_o}{n} \tag{2.25}$$

bağıntısı ile hesaplanır. Burada $M_b$, burulma momentini ifade etmektedir. Bu burulma momentine dayanabilecek emniyetli mil çapı;

$$D_{mil} = \sqrt[3]{\frac{16 \times M_b}{\pi \times \sigma_o}} \tag{2.26}$$

bağıntısı ile hesaplanır. Burada $D_{mil}$, emniyetli mil çapını, $\sigma_o$, ise seçilen malzemenin izin verilen akma dayanımını ifade etmektedir ve

$$\sigma_o = 0{,}27 \times \sigma_a \tag{2.27}$$

bağıntısı ile hesaplanır. Burada $\sigma_a$, seçilen malzemenin akma dayanımıdır [36] ve burada Ç1050 malzeme seçilmiştir ve bu malzemenin akma dayanımı 400 N/mm$^2$'dir. İlave bir emniyet olarak hesaplanan mil çapları %10 daha fazla kabul edilmiştir. Milin kütlesi;

$$m_{mil} = \pi \times L_{vida} \times D_{mil} \times \rho_{mil} \tag{2.28}$$

bağıntısı ile hesaplanır. Burada $m_{mil}$, milin kütlesini, $\rho_{mil}$ ise mil malzemesinin yoğunluğunu ifade etmektedir [36] ve burada seçilen Ç1050 malzemesinin yoğunluğu 7850 kg/m$^3$'tür. Milin üzerine sarılan helezonun toplam kütlesi;

$$m_{helezon} = n_{helezon} \times m_{helezon,tek} \tag{2.29}$$

bağıntısı ile hesaplanır. Burada $m_{helezon}$, helezonun toplam kütlesini, $m_{helezon,tek}$ ise tek bir helezonun kütlesini ifade etmektedir [36] ve;

$$m_{helezon,tek} = \pi \times \frac{D_{helezon}^2}{4} \times t_{kanat} - \pi \times \frac{D_{mil}^2}{4} \times t_{kanat} \tag{2.30}$$

bağıntısı ile hesaplanır. Burada $t_{kanat}$, helezon kanadının kalınlığını ifade etmektedir ve 20 mm seçilmiştir. Malzeme maliyetini hesaplamak için son olarak kovan malzemesinin kütlesi hesaplanmalıdır. Helezonun dış çapına eşit ölçüde iç çapa sahip kovanın et kalınlığı maruz kaldığı basınca göre değişiklik göstermektedir. Dolayısıyla kovanın et kalınlığı;

$$t_{kovan} = \frac{P \times D_{helezon}}{2 \times \sigma_o} \tag{2.31}$$

bağıntısı ile hesaplanır. Burada $t_{kovan}$, mil ve helezonun içine yerleştirildiği kovanın et kalınlığını, P ise kovana uygulanan basıncı dolayısıyla linyite uygulanan basıncı ifade etmektedir. Kovan malzemesi olarak mil mazlemesi ile aynı özellikte malzeme seçilmiştir. Kovanın dış çapı ise,

$$D_{kovan} = D_{helezon} + 2 \times t_{kovan} \tag{2.32}$$

bağıntısı ile hesaplanır. Burada $D_{kovan}$, kovanın dış çapını ifade etmektedir. Kovanın kütlesi ise;

$$m_{kovan} = \left(\pi \times \frac{D_{kovan}^2}{4} - \pi \times \frac{D_{helezon}^2}{4}\right) \times L_{vida} \times \rho_{kovan} \tag{2.33}$$

bağıntısı ile hesaplanır. Burada $m_{kovan}$, kovanın kütlesini ve $\rho_{kovan}$ ise kovan malzemesinin yoğunluğunu ifade etmektedir. Ekstruderde kullanılan toplam malzeme kütlesi;

$$m_{toplam} = (m_{mil} + m_{helezon} + m_{kovan}) \times k_{ilave} \tag{2.34}$$

bağıntısı ile hesaplanır. Burada $m_{toplam}$, ekstruderde kullanılan toplam malzeme kütlesini, $k_{ilave}$ ise ilave olarak kullanılabilecek malzeme katsayısını ifade etmektedir ve bu katsayı 1,1 olarak seçilmiştir. Bu bölümde yer alan eşitlikler kullanılarak 24 farklı çalışma koşulu için ekstruder hesabı yapılmış ve Ek-E'de sunulmuştur.

### 2.2.6. Ekonomik hesaplar

Bu bölümde çalışma kapsamında yapılan ekonomik hesaplar ve işletme dönemi gelir ve giderleri hakkında bilgi verilmiştir.

#### 2.2.6.1. Geri ödeme süresi hesabı

GÖS hesabında sağlanan net gelirlerin , toplam yatırımı ne kadar sürede karşılayacağı aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmaktadır;

$$\text{GÖS} = \frac{\text{I}}{\text{f}} \tag{2.35}$$

Burada I, toplam yatırım maliyetini ve f, yıllık geliri ifade etmektedir [37].

### 2.2.6.2. Net bugünkü değer hesabı

Bir yatırım projesinin NBD'si aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır;

$$\mathrm{NBD} = \sum_{t=0}^{n} \frac{B_t}{(1+r)^t} - \sum_{t=0}^{n} \frac{C_t}{(1+r)^t} \tag{2.36}$$

Burada $B_t$; t yılındaki proje gelirleri/nakit girdilerini; $C_t$, t yılındaki proje giderleri/nakit çıkışlarını; r, iskonto oranı ve n, projenin ekonomik ömrünü ifade etmektedir.

Fizibilite çalışmasında, ekonomik ömür boyunca sağlanacak üretim kazancından elde edilecek linyit satış gelirlerinin bugünkü değeri ile yapılan ilk yatırım ve işletme giderlerinin bugünkü değerleri göz önüne alınmıştır. Hesaplamalarda kullanılan bugünkü değer metodunda, gelecek zaman içindeki tüm para akışları şimdiki değere getirilmektedir. Bu amaçla, alternatif yatırım maliyetlerinin şimdiki değeri hesaplanmaktadır [37].

$$C_{PW} = \sum_{t=0}^{n} C(t)(1+i)^{-t} \tag{2.37}$$

Burada; $C_t$, t periyodu sonundaki masrafları; n, planlanan ödeme süresini; i ise minimum geri dönüş oranı, minimum kar oranı veya iskonto oranı olan geçerli faiz oranıdır [37].

### 2.2.6.3. Fayda/masraf oranı hesabı

Bu yöntemde elde edilmek istenen oran fayda ve masrafların bugüne indirgenmiş değerlerinin birbirine bölünmesiyle elde edilir. Bu oranın hesaplanabilmesi için NBD'nin de hesaplanması gerekmektedir ve aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir;

$$\frac{F}{M} = \frac{\mathrm{NBD}}{\mathrm{BI}} \tag{2.38}$$

Burada F/M, fayda/masraf oranını; BI, yatırımın bugünkü değerini ifade etmektedir [37].

### 2.2.6.4. İşletme dönemi gelir ve giderleri

Bu bölümde fizibilite hesabında kullanılan güncel döviz kurları, ekonomik parametreler (Tablo 2.2), enerji ve hammadde birim fiyatları (Tablo 2.3) yer almaktadır.

Tablo 2.2. Hesaplamalarda kullanılan ekonomik parametreler ve değerleri

| **Açıklama** | **Birim** | **Değer** |
|---|---|---|
| KDV oranı | % | 18 |
| Enflasyon oranı[1] | % | 15,72 |
| Elektrik birim fiyatındaki yıllık artış oranı[2] | % | 18,5 |
| Kömür birim fiyatı yıllık artış oranı[3] | % | 10 |
| Net banka faizi[4] | % | 13 |
| İskonto oranı | % | 17,3 |
| Ekonomik ömür | yıl | 25 |
| Gelir vergisi oranı | % | 20 |
| Amortisman süresi | yıl | 25 |

Tablo 2.3. Hesaplamalarda kullanılan yakıt, enerji ve hammadde birim fiyatları (KDV Hariç)

| **Açıklama** | **Birim** | **Değer** |
|---|---|---|
| Elektrik birim satış fiyatı[5] | TL/$kW_e h$ | 0,428 |
| Linyitin birim maliyeti[6] | TL/ ton | 202 |
| Ekstruder malzemesi birim fiyatı | $/kg | 12 |

Dolar/TL kuru verilen değerler 24.09.2019 günü saat 15:30'da Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası efektif döviz satış kurundaki 5,68 alınmıştır. Tablo 2.4'de 24 farklı sistemin üretim kapasitesi ve yıllık çalışma süresi yer almaktadır.

[1] 2019 Yılı 3. Çeyrek TCMB Enflasyon Raporundaki enflasyın verisi baz alınmıştır.

[2] Elektrik ve Doğal Gaz Fiyatları ve Zamları İnceleme Raporu, Ekim 2018, TMMOB Makina Mühendisleri Odası, elektrik fiyatı değişimi alınmıştır.

[3] KEAŞ'ın 2010 yılı kömür alım fiyatı artış oranı baz alındı.

[4] Net banka faizinin %1,10 üzerinde bir oranda getiri sağlayacak oran olarak alınmıştır.

[5] Ocak 2011-Nisan 2012 TEİAŞ'a satış fiyatı ortalaması alınmıştır

[6] TKİ kurumunca satılan kömürlerin kdv hariç satış fiyatları ve analiz ortalama değerleri alınmıştır.

Tablo 2.4. Ekstruder sistemi üretim kapasitesi ve yıllık çalışma süreleri

| **Açıklama** | **Birim** | **Değer** |
|---|---|---|
| Tesis üretim kapasitesi | ton/saat | 10 |
| Planlanan yıllık çalışma süresi | saat/yıl | 6500 |

10 ton/saat kapasiteli 24 farklı boyutta mekanik su azaltma ekstruderi için yapılan fizibilite çalışmasında; %83 su/kuru linyit oranına sahip linyitin susuzlaştırılması için kullanılabilecek sistemlerin 100-600 bar ve 2,5-10 dakika etki süresi aralığında çalışacağı varsayılmıştır. Ekstruder sisteminde sürekli ürün alma imkanı olduğundan bu sistem ile deney yapılan durağan sistemin yarı etki süresinde, aynı oranda suyu azaltabileceği kabul edilmiştir.

Öngörülen sistemin hayata geçirilmesi için ihtiyaç duyulan temel yatırım maliyetleri;

- Projelendirme ve Mühendislik Maliyeti
- Ekstruder Sistemi Yatırım Maliyeti
- Ekstruder vidası ve kovanı maliyeti
- Vida ve kovan haricindeki kontrüksiyon maliyeti

Sistemin işletilmesi esnasında öngörülen işletme maliyetleri;

- Elektrik maliyeti
- Personel maliyeti
- Bakım maliyeti

Fizibilite çalışması yapılan sisteminin yatırım maliyeti temel olarak; kullanılacak ekstruderin büyüklüğüne ve ektruder malzemesine bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir. Yatırımın ekonomik yapılabilirlik analizleri kapsamında bir baz senaryo oluşturulmuş olup, bu baz senaryoda;

- Yatırımın işletmeye alınması ile su azaltma sonrası linyitin su içeriğinin deneylerden elde edilen ile aynı olacağı,
- Fizibilite çalışmasında kullanılacak ekstruder sisteminde deneylere kıyasla yarı etki süresinde aynı su azaltma değerlerine ulaşılacağı,

kabulleri yapılmıştır. Yapılabilirlik hesaplamalarındaki baz senaryoda, göz önünde bulundurulan ilk yatırım maliyeti ile ilgili bilgiler Tablo 2.5'de yer almaktadır.

Tablo 2.5. Sistem ilk yatırım maliyeti

| Açıklama | Birim | Değer |
|---|---|---|
| Tesisin üretim kapasitesi | ton/saat | 10000 |
| Öngörülen sistemin kurulum maliyeti | TL | 779161 |

### 2.2.7. Ölçüm belirsizliği hesabı

Tez çalışması kapsamında yapılan deneylerdeki ölçüm belirsizlikleri terazi ile yapılan tartımlardan ve manometredeki basınç ölçümlerinden kaynaklanmaktadır. Bu bölümde deneyler kapsamında kullanılan hassas tartının ve manometrenin ölçüm belirsizlikleri hakkında bilgi verilmiştir.

#### 2.2.7.1. Terazide yapılan tartımlar

Deneyler sırasında tartım değerleri, maksimum kapasitesi 220 g, çözünürlüğü 0,1 mg olan dijital Radwag marka AS 220.R2 tipinde seri numarası 559854 olan bir analitik terazi kullanılarak elde edilmiştir. Analitik terazi mermer masa üzerinde konumlandırılmış olup her yıl düzenli şekilde akredite firma tarafından kalibrasyonu gerçekleştirilmektedir. Terazi 20,4 ± 2 °C sıcaklık ve 49,6 ± 10 % bağıl nem değerlerine sahip laboratuvar koşullarında olup üzerine gelen ışık şiddeti sabit tutulmaya çalışılarak ölçüm doğruluğu en iyi seviye tutulmaya çalışılmaktadır. Ölçümler öncesinde terazinin mekanik ve elektronik olarak ısınması için belirli bir süre açık olacak şekilde tutulmuş ve tartım yapılacak test numuneleriyle ısıl dengeye gelebilmeleri için yeterli zaman bekletilmiştir. Tartımlar ön tartımlar ve sonra da gerçek tartımlar şekilde planlanmış olup kararlı değerler deney föyüne kaydedilmiştir. İlgili terazinin en son kalibrasyon sertifikasında yapılan tartımlar üzerindeki toplam belirsizlik, k=2 yani % 95 güvenilirlik düzeyi için aşağıdaki şekilde verilmiştir;

$$U = 0{,}00128\ g + 0{,}0000180 \times R \tag{2.39}$$

Burada U, belirsizliği; ve R, okunan tartım değeri, k güvenilirlik katsayısıdır.

#### 2.2.7.2. Manometre ile basınç ölçümleri

Deney düzeneğinde 0-600 bar aralığında basınç uygulanmış ve bu basınç seviyelerine analog bir manometre ile karar verilmiştir. DasTerm marka 2.5 sınıf analog

manometrenin çözünürlüğü 10 bar olup okunabilirliği 2,5 bar'dır. Tam skala için okuma belirsizliği aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmaktadır:

Okuma belirsizliği = (Okunabilirlik / Maksimum Gösterge Değeri) x 100 (2.40)

Okuma belirsizliğinin standart belirsizliği ise aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmaktadır:

$U_r = k * f$Okunabilirlik belirsizliği / $\sqrt{3}$ (2.41)

Burada Ur, standart belirsizliği; k ise güvenirlilik katsayısını ifade etmektedir [53] Genişletilmiş belirsizlik değeri aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmaktadır:

$U_C = k * U_r$ (2.42)

Burada Uc, genişletilmiş belirsizliği ifade etmektedir ve genişletilmiş belirsizlik hesabında k değeri 2 olarak alınmaktadır [54].

# 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde çalışma kapsamında incelenen linyitin analiz ve deney sonuçları verilmiştir. Ayrıca elde edilen sonuçlar literatür bilgisi ile birlikte tartışılmıştır.

## 3.1. Linyit Karakterizasyonu

### 3.1.1. Yoğunluk

Linyitin karakterizasyonu için yapılan yoğunluk analizi neticesinde elde edilen sonuçlar Tablo 3.1'de verilmiştir. Sonuçlardan da görüldüğü üzere tane boyutuna bağlı olarak yoğunluk değişmektedir. Yoğunluktaki değişim 16-4 mm ile 4-2 mm arasında 24 kg/m$^3$ iken 4-2 mm ile < 250 μm arasında 70,7 kg/m$^3$'e çıkmaktadır. Bu durum tane boyutunun küçülmesiyle buharlaşmanın ve dolayısıyla yoğunluğun artmasından kaynaklanmaktadır.

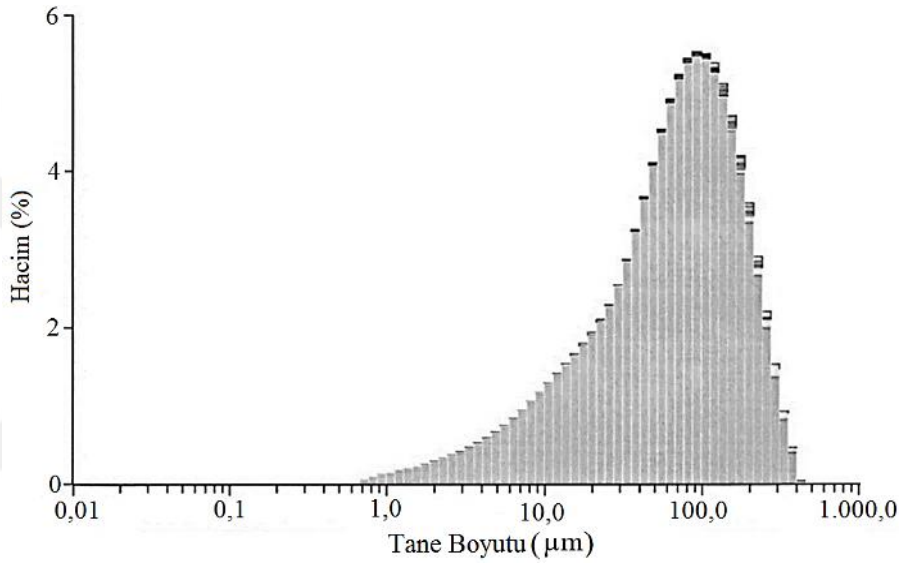
Tablo 3.1. Deneylerde kullanılan linyitlerin yoğunlukları

| Nunume Adı | Tane Boyutu (mm) | Yoğunluk (kg/m$^3$) |
|---|---|---|
| Ilgın tüvenan linyiti | 16-4 mm | 1317,4 |
| Ilgın tüvenan linyiti | 4-2 mm | 1341,4 |
| Ilgın tüvenan linyiti | <250 μm | 1412,1 |

### 3.1.2. Tane boyut dağılımı

Ilgın linyiti düşük kaliteli yakıt olduğundan dolayı ihtiva ettiği suyun büyük kısmı makro gözeneklerde bulunmaktadır. Bu nedenle deneylerde tane boyutunun ve tane boyut dağılımının su azaltmaya olan etkisini tespit etmek için ince ve kaba öğütülmüş olmak üzere iki farklı tane boyutundaki linyitler kullanılmıştır. İnce öğütülmüş linyitler 250 μm'nin altına indirilerek makro yapının parçalanması, kapalı ve kör uçlu gözeneklerin geçiş ve birbiriyle bağlantılı gözenek haline dönüştürülerek basıncın etkisi ile su çıkışının kolaylaştırılması hedeflenmiştir. Kaba öğütülmüş linyit numunelerinde ise kör uçlu ve kapalı gözenek yapısında değişiklik olmadığı veya

basıncın etkisiyle kısmen değiştiği için ince öğütülmüş linyite oranla basıncın su azaltma üzerindeki etkisinin daha az olacağı düşünülmektedir. Çalışma kapsamında kullanılan linyitin yalnızca <250 µm olan kısmına partükül boyut dağılım analizi yapılmıştır. Analiz sonucunda linyitin ortalama boyut dağılımının 193 µm olduğu görülmüştür. Şekil 3.1'de analiz sonucunda elde edilen boyut dağılımının histogramı yer almaktadır. Görüldüğü üzere ortalama partikül boyutu 193 µm olmasında karşın 1-400 µm aralığında tanecikler bulunmaktadır ve tanecikler ağırlıklı olarak 100 µm civarında yığılmaktadır.



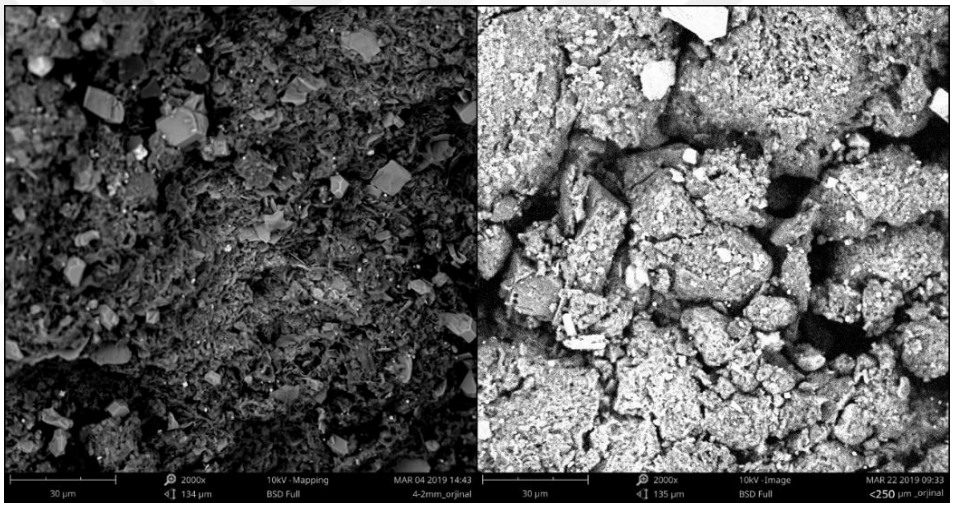

Şekil 3.1. Tane boyut dağılımı histogramı

### 3.1.3. Gözenek analizi ve yüzey morfolojisi

Bu çalışmada katı yüzeydeki mikromorfolojiyi anlamak ve kırık formlarını ve malzemelerin iç yapısını analiz etmek için SEM yöntemi kullanılmıştır. Kömür kalitesi arttıkça, makro gözenekliğin oranı azalır ve mikro gözeneklerin oranı artar [33]. Ham linyit pürüzlü, düzensiz ve kaba bir yüzey yapısına sahiptir (Şekil 3.2). Linyitin bu yapısından dolayı gözeneklerde kolaylıkla su birikebilmekte ve bu durum nem içeriğinin artmasına neden olmaktadır.

Linyitin gözenekliliği ve gözenek büyüklüğü dağılımı, suyun azaltılması ve uygulanan mekanik basınç nedeniyle önemli ölçüde değişmektedir. MTE işlemi ile suyun uzaklaştırılması gözenek hacminin azalmasına, makro gözeneklerin çökmesine ve mezo gözenek ve mikro gözeneklerin artmasına neden olmaktadır [38]. Bu çalışmada

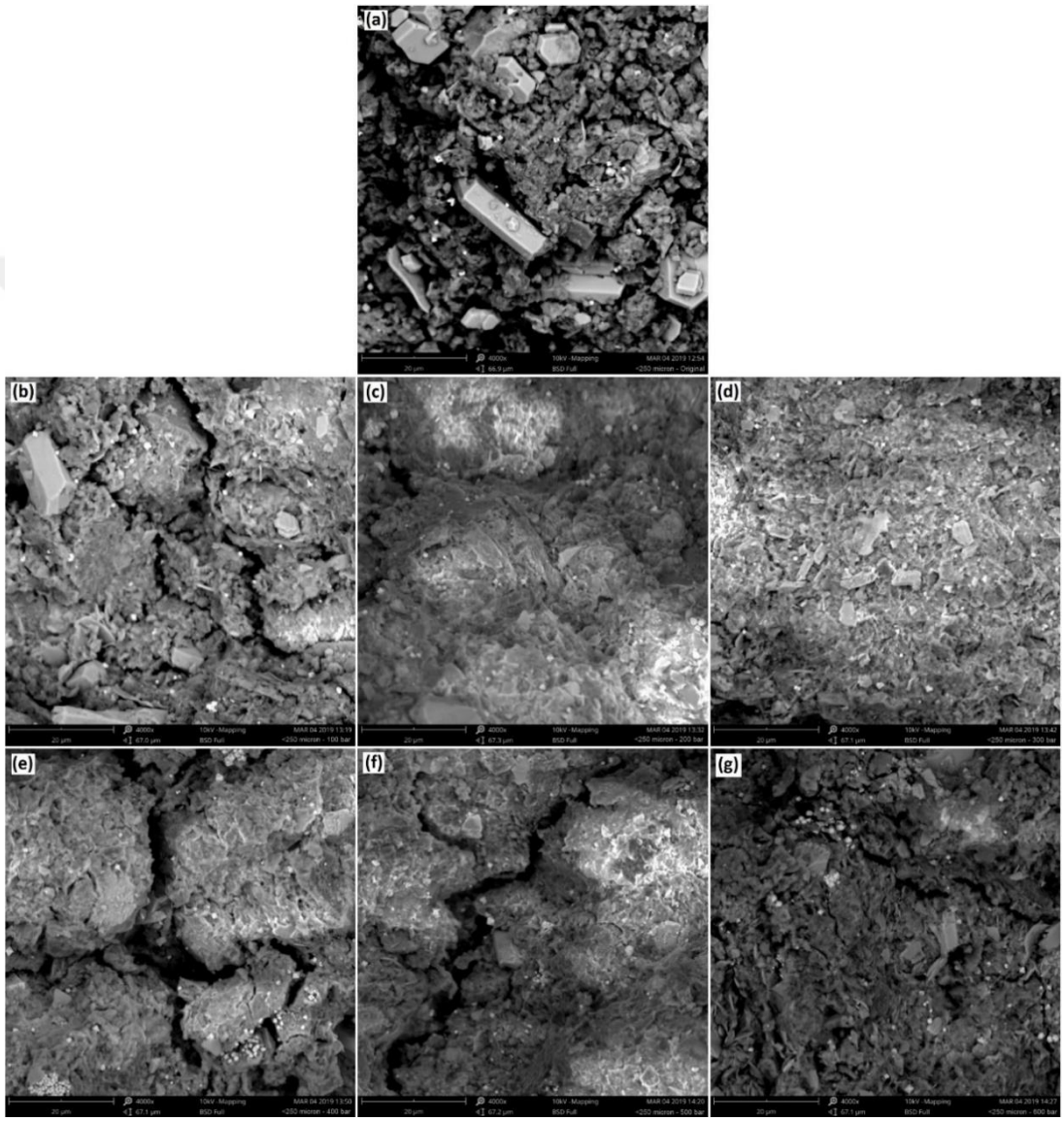
250 µm'nin altında boyuta sahip linyit numunelerinin 6 farklı su azaltma koşulunda (100 - 600 barda 10 dakika) suyun azaltılması öncesi ve sonrasındaki yüzey morfolojisi SEM ile incelenmiştir (Şekil 3.3). SEM analizinde kullanılan numunelerin isimlendirilmesi: ham linyit, RWL olarak; 100, 200, 300, 400, 500 ve 600 barda ve 10 dakika boyunca susuzlaştırılan linyit numuneleri ise sırasıyla DW-100, DW-200, DW-300, DW-400, DW-500 ve DW-600 olarak yapılmıştır. Literatürde yer alan çalışmalara benzer şekilde bu çalışmada kullanılan ham linyitin pürüzlü, düzensiz ve kaba bir yüzey yapısına sahip olduğu (Şekil 3.3a) ancak su azaltılırken uygulanan basıncın etkisiyle gözenek yapısının daha pürüzsüz, düzenli ve sıkı hale geldiği ve basınç arttıkça pürüzlülüğün azalarak daha küçük gözenekli bir yapının oluştuğu görülmüştür (Şekil 3.3b – g).




Şekil 3.2. 4-2 mm (solda) ve <250 µm (sağda) boyutundaki ham linyitlerin 2000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü

Linyitin gözenekliliği ve gözenek büyüklüğü dağılımı, suyun azaltılması ve uygulanan mekanik basınç nedeniyle önemli ölçüde değişmektedir. MTE işlemi ile suyun uzaklaştırılması gözenek hacminin azalmasına, makro gözeneklerin çökmesine ve mezo gözenek ve mikro gözeneklerin artmasına neden olmaktadır [38]. Bu çalışmada 250 µm'nin altında boyuta sahip linyit numunelerinin 6 farklı su azaltma koşulunda (100 - 600 barda 10 dakika) suyun azaltılması öncesi ve sonrasındaki yüzey morfolojisi SEM ile incelenmiştir (Şekil 3.3). SEM analizinde kullanılan numunelerin isimlendirilmesi: ham linyit, RWL olarak; 100, 200, 300, 400, 500 ve 600 barda ve 10 dakika boyunca susuzlaştırılan linyit numuneleri ise sırasıyla DW-100, DW-200, DW-300, DW-400, DW-500 ve DW-600 olarak yapılmıştır. Literatürde yer alan

çalışmalara benzer şekilde bu çalışmada kullanılan ham linyitin pürüzlü, düzensiz ve kaba bir yüzey yapısına sahip olduğu (Şekil 3.3a) ancak su azaltılırken uygulanan basıncın etkisiyle gözenek yapısının daha pürüzsüz, düzenli ve sıkı hale geldiği ve basınç arttıkça pürüzlülüğün azalarak daha küçük gözenekli bir yapının oluştuğu görülmüştür (Şekil 3.3b – g).

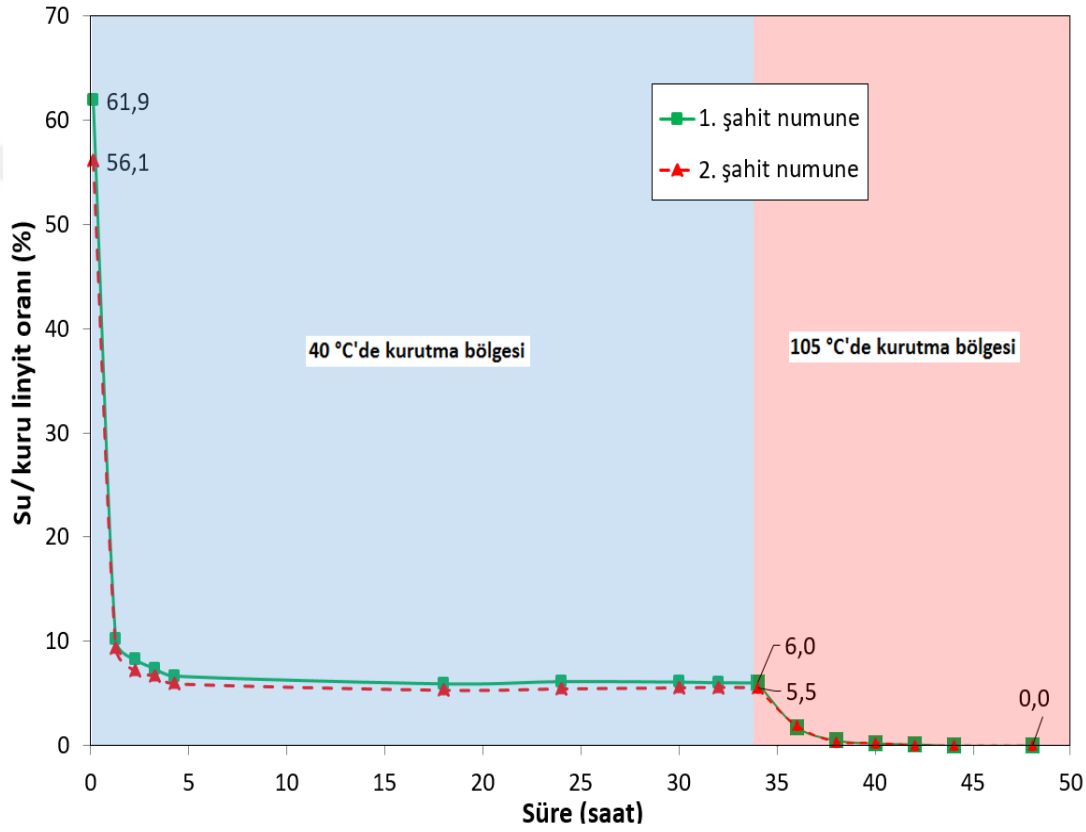



Şekil 3.3. Numunelerin SEM görüntüleri; (a) RWL; (b) DW-100; (c) DW-200; (d) DW-300; (e) DW-400; (f) DW-500; (g) DW-600

### 3.1.4. Su yüzdesi tayini

Deneylerde kullanılan tüvenan linyitin su yüzdesinin analizi sonucunda linyitin %45,15'inin su olduğu görülmüştür (Tablo 3.2). Bu su içeriğinin %5,6'sı ancak yüksek

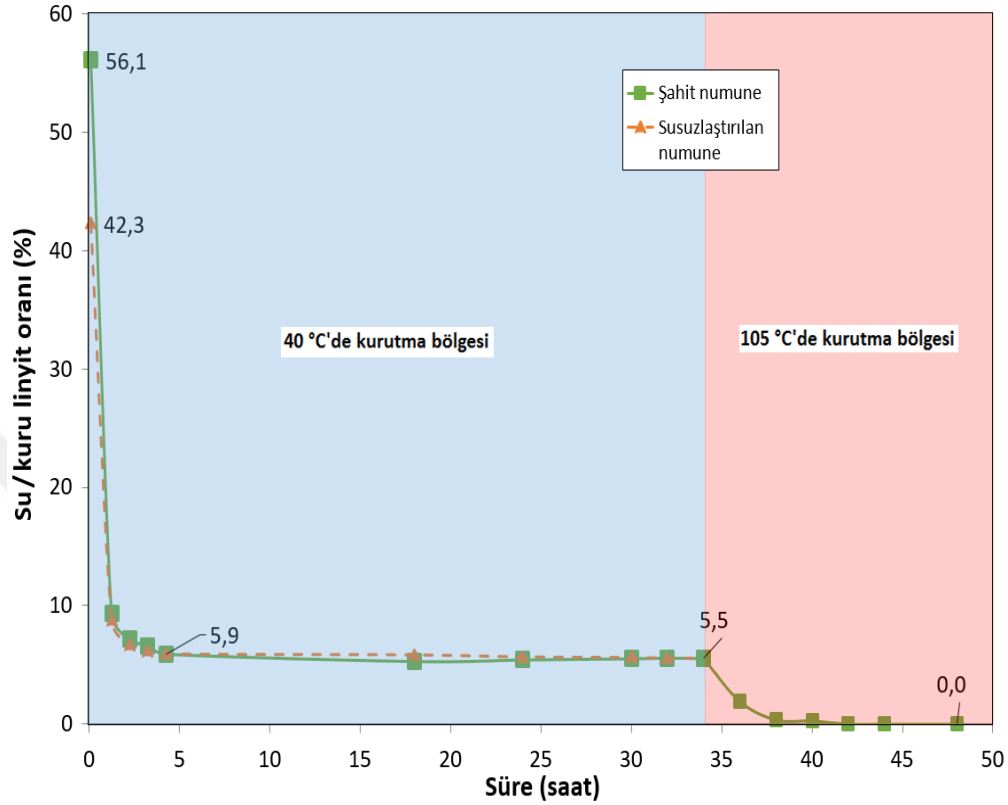
sıcaklıkta (105 ºC'de) uzaklaştırılabilen kimyasal bağlı su iken geri kalan %39,55 mekanik olarak kısmen veya tamamen uzaklaştırılabilen (40ºC'de etüvde uzaklaştırılan su) yüzey suyudur. Çalışma kapsamında suyun azaltılmasını ifade etmek için su oranı yerine su/kuru linyit oranı kullanılmıştır. Bu sayede su azaltma miktarı linyitin su içeriğinden bağımsız hale getirilmiştir. Sonuç olarak çalışmada kullanılan tüvenan linyitin toplam su/kuru linyit oranı %82,32, kimyasal bağlı sudan kaynaklanan su/kuru linyit oranı %5,93'tür.




Şekil 3.4. Etüvde kurutulan 2 farklı şahit numunenin su/kuru linyit oranın zamana bağlı değişimi

Deneylerde kullanılan linyitten kırma, depolama ve eleme esnasında bir miktar su buharlaştığından su/kuru linyit oranı azalmaktadır. Bu azalmayı tespit etmek için 250 µm'nin altındaki 2 farklı linyit numunesi için etüvde kurutma yapılarak elde edilen bulgular Şekil 3.4'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere 1. ve 2. linyitin toplam su/kuru linyit oranları sırasıyla %61,9 ve %56,1 olup; serbest yüzey suyu ve bünye suyu kaynaklı su/kuru linyit yüzdeleri sırasıyla %55,9 ve %50,6 ve kimyasal bağlı su kaynaklı su/kuru linyit yüzdeleri sırasıyla %6,0 ve %5,5'dir. Görüldüğü üzere Ilgın linyitindeki suyun küçük bir kısmı kimyasal bağlı olup kalan kısmının önemli bir

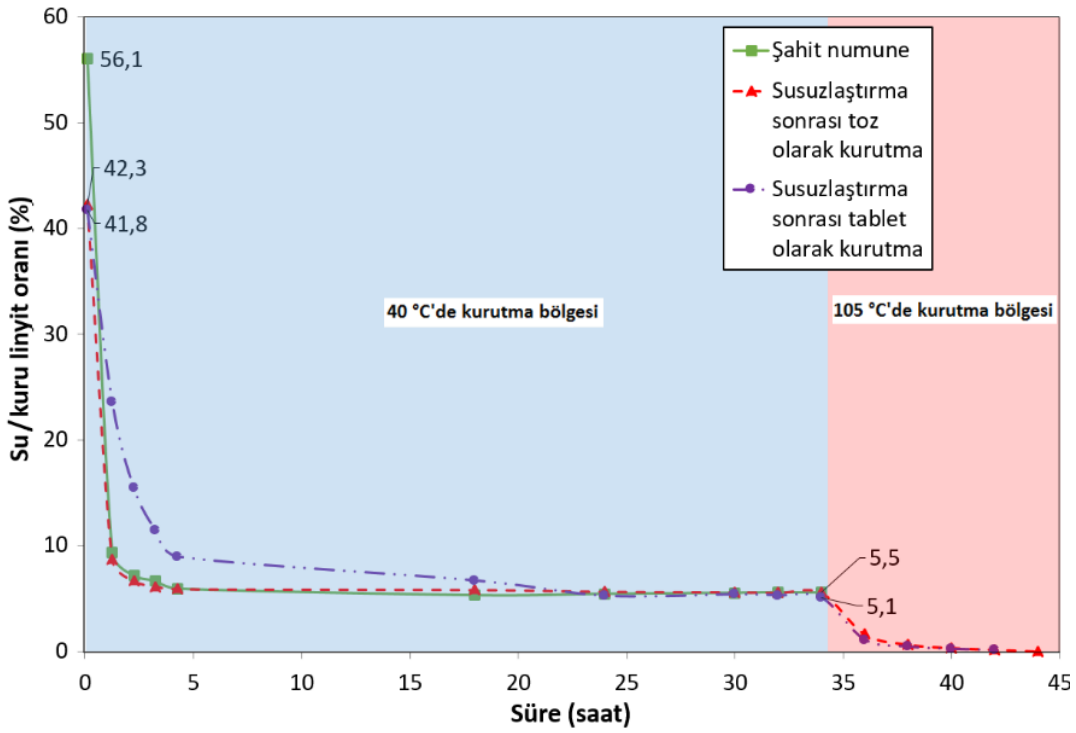
bölümü mekanik su azaltma ile uzaklaştırılabilir. Dolayısıyla bu linyitteki su mekanik yöntemle azaltılmaya uygundur.




Şekil 3.5. Linyit numunelerinin etüv fırınında kurutma eğrileri

Mekanik su azaltma ile uzaklaştırılan su miktarını tespit etmek için her bir deneyde kullanılan şahit numune ve mekanik su azaltma sonrasındaki numune kurutulmaktadır. Bu sayede deney başlangıcındaki ve sonrasındaki su/kuru linyit oranları hesaplanarak mekanik su azaltma miktarı hesaplanabilmektedir. Bununla ilgili örnek bir çalışma 300 bar basınçta 5 dakika süreyle susuzlaştırılan linyit için yapılmıştır (Şekil 3.5). 40 °C ve 105 °C'de yapılan kurutma sonucunda susuzlaştırılan ve şahit numune olarak kullanılan linyit numunelerinin toplam su/kuru linyit oranı sırasıyla %56,1 ve %42,3 olarak bulunmuştur. Su/kuru linyit oranının serbest yüzey suyu ve bünye suyu toplamından kaynaklanan yüzdesi sırasıyla %50,6 ve %36,8 iken kimyasal bağlı sudan kaynaklanan yüzdesi ise her iki numunede de %5,5'dir. Dolayısıyla mekanik su azaltma sonucunda su/kuru linyit oranı %56,1'den %42,3'e düşürülerek %24,6 mekanik su azaltma sağlanmıştır. Ayrıca su/kuru linyit oranının %5,5'i kimyasal bağlı sudan kaynaklandığından bu miktarın mekanik yoldan uzaklaştırma imkanı bulunmamaktadır.

Deneylerde kullanılan ve deney sonrası elde edilen linyitin şekli kurutmayı etkileyen bir parametredir. Şekil 3.6'de <250 µm boyutundaki şahit numunenin, 25 mm çapındaki numune haznesine konularak susuzlaştırılması sonrasında elde edilen tabletin yarısı toz haline getirilerek diğer yarısı ise tablet formunda etüv fırınında kurutulması sonucu elde edilen zamana ve sıcaklığa bağlı kurutma eğrileri verilmiştir. Görüldüğü üzere mekanik su azaltma sonrası toz haline getirilerek mekanik su azaltma miktarının tespiti için kurutulan numune şahit numeye benzer bir kurutma davranışı gösterirken tablet halindeki numunenin kurutma karakteristiği farklılık göstermektedir. Dolayısıyla tablet halindeki linyitin su/kuru linyit oranı ile aynı tabletin toz haline getirilen kısmının su/kuru linyit oranı farklıdır ve bu farklılık deney sonuçlarının yanlış değerlendirilerek mekanik su azaltmanın olduğundan fazla hesaplanmasına neden olmaktadır. Bu nedenle mekanik su azaltma deneyi sonrası mekanik su azaltma miktarının doğru tespit edilmesi için herbir numune toz haline getirilerek kurutulmalıdır.




Şekil 3.6. Kurutma şeklinin kurutmaya olan etkisi

### 3.1.5. Kısa analiz

Nem miktarı tespit edilen numunelerin kısa analizi sonucunda nem, kül, uçucu madde, sabit karbon içeriği ve ısıl değeri tespit edilmiş ve Tablo 3.2'de sunulmuştur.

Tablo 3.2. Tüvenan linyitin kısa analiz sonucu

| Analizler | Birimi | Analiz Sonuçları | | | Yöntem |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Orijinal Bazda | Hava Kuru Bazda | Kuru Bazda | |
| **Nem (su/su+kuru linyit)** | % ağ. | 45,15 | 5,60 | - | ASTM D 7582-15 |
| **Su/kuru linyit** | % ağ. | 82,32 | 5,93 | | |
| **Kül** | % ağ. | 16,67 | 28,70 | 30,40 | ASTM D 7582-15 |
| **Uçucu Madde** | % ağ. | 22,99 | 39,56 | 41,91 | ASTM D 7582-15 |
| **Sabit Karbon** | % ağ. | 15,19 | 26,15 | 27,69 | ASTM D 3172-13 |
| **Toplam Kükürt** | % ağ. | 2,76 | 4,75 | 5,03 | ASTM D 4239-14e2 |
| **Alt Isıl Değer (AID)** | kJ/kg | 8935 | 17040 | 18188 | ASTM D 5865-13 |
| | | | | | ISO 1928-09 |
| **Üst Isıl Değer (ÜID)** | kJ/kg | 14633 | 17974 | 19042 | ASTM D 5865-13 |

Tablo 3.2'den görüldüğü üzere Ilgın linyitinin ısıl değeri oldukça düşük olmakla birlikte, nem içeriği ve dolayısıyla su/kuru linyit oranı oldukça yüksektir. DKK sınıfına giren bu tarz kömürlerdeki suyun önemli bir kısmı mekanik yöntemle uzaklaştırılabilecek niteliktedir.

### 3.1.6. Elementel analiz

Çalışmada kullanılan linyitin elementel analizi sonucunda elde edilen karbon (C), hidrojen (H), azot (N) ve kükürt (S) içeriği Tablo 3.3'da sunulmuştur.

Tablo 3.3. Tüvenan linyitin elementel analiz sonucu

| Analizler | Birimi | Kuru Bazda | Yöntem |
|---|---|---|---|
| **Karbon** | % ağ. | 49,77 | ASTM D 5373-16 |
| **Hidrojen** | % ağ. | 3,70 | ASTM D 5373-16 |
| **Azot** | % ağ. | 1,26 | ASTM D 5373-16 |
| **Kükürt** | % ağ. | 5,03 | ASTM D 4239-14e2 |
| **Kül** | % ağ. | 30,40 | ASTM D 7582-15 |
| **Oksijen** | % ağ. | 9,84 | ASTM D 3176-15 |

Görüldüğü üzere Ilgın linyitinin kalitesini düşüren faktörlerden biri de linyitlerin genel özelliği olan yüksek kül içeriğidir. Ilgın linyitinin yaklaşık 1/3'ü (%30,4) külden oluşmaktadır. Kül miktarının azaltılması için çeşitli yöntemler mevcuttur ancak bu çalışmada kül miktarındaki değişim incelenmemiştir.

### 3.1.7. Ölçüm belirsizliği

#### 3.1.7.1. Terazi belirsizliği

Terazide yapılan deney tartımları en fazla yaklaşık 10 g nominal değer civarında yapılmış olup yukarıdaki belirsizlik hesabından 1,5 mg sonucu elde edilmiştir. Bu sonuçtan, yapılan tartımlar üzerindeki belirsizliğin 2 mg'ı geçmediği varsayılıp deneylere devam edilmiştir. Bahse konu bu değer deneysel sonuçların analizi ve sonrasındaki değerlendirmelere etki edecek seviyede bir belirsizlik değeri olmadığı değerlendirilmiştir.

#### 3.1.7.2. Manometre belirsizliği

Okuma belirsizliği Eş.2.40 kullanılarak % 0,42 olarak hesaplanmış olup, bu değerin Eş.2.41 ile hesaplanan standart belirsizliği % 0,24 (k=1 için) olarak bulunmuştur. Genişletilmiş belirsizlik ise Eş.2.42 ile hesaplanarak (genişletilmiş belirsizlik hesabında k=2 alınmaktadır) % 0,48 olarak bulunmuştur. Bu değer içerisinde manometrenin histerisiz hatası (yükleme-boşaltma rejimi) ve diğer parametreler dikkate alınmamıştır. Bu yaklaşımla basınç seviyesi arttıkça belirsizlik artmakta olup maksimum 600 bar için 2,76 bar'lık bir belirsizlik söz konusudur. Bahse konu basınç seviyeleri, yalnızca deneyde kullanılan sistem için uygulanacak basıncın seviyesini göstermekte olup elde edilen sonuçların doğruluğuna herhangi bir etkisi bulunmamaktadır.

## 3.2. Mekanik Su Azaltma Deneyleri

Tez çalışması kapsamında mekanik su azaltma üzerinde etkili olan parametreler (basınç, etki süresi, başlangıç su/kuru linyit oranı, tane boyutu, hazne çapı, kademeli basınç artışı, kalınlık) ile ilgili deney setleri hazırlanarak kontrollü deneyler gerçekleştirilmiş ve her bir parametrenin mekanik su azaltmaya olan etkisi incelenmiştir (Tablo 3.4). Basıncın alt ve üst sınırını belirlemek için yapılan ön deneylerde 100 bar basınca kadar ciddi bir su çıkışı olmadığı ve 600 bardan yüksek basınçlarda ise su çıkışının durma noktasına geldiği görülmüştür. Bunun sonucunda deneylerde uygulanan basınç alt ve üst sınırı sırasıyla 100 bar ve 600 bar seçilmiştir. Etki süresinin alt ve üst sınırını belirlemek için yapılan ön deneylerde 5 dakikadan kısa

ve 20 dakikadan uzun sürelerde kayda değer miktarda su çıkışı görülmemiştir. Bu nedenle etki süresinin alt sınırı 5 dakika üst sınırı ise 20 dakika seçilmiştir.

Tablo 3.4. Deney setleri ve incelenen parametreler

| Deney seti | Deney no | Başlangıç su/kuru linyit oranı (%) | Basınç aralığı (bar) | Etki süresi (dk) | Hazne çapı (mm) | Tane boyutu | İncelenen mekanik su azaltma parametresi |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **1** | 1-24 | 114,7 | 100-600 | 5-20 | 25 | <250 µm | Basınç, etki süresi ve su/kuru linyit oranı |
| **2** | 25-48 | 104,1 | 100-600 | 5-20 | 25 | <250 µm | Basınç, etki süresi ve su/kuru linyit oranı |
| **3** | 49-72 | 83 | 100-600 | 5-20 | 25 | <250 µm | Basınç, etki süresi, su/kuru linyit oranı, tane boyutu, hazne çapı |
| **4** | 145-168 | 82,7 | 100-600 | 5-20 | 25 | 4-2 mm | Tane boyutu |
| **5** | 169-192 | 83 | 100-600 | 5-20 | 50 | <250 µm | Hazne çapı |
| **6** | 97-120 | 65,6 | 100-600 | 5-20 | 25 | <250 µm | Basınç, etki süresi ve su/kuru linyit oranı |
| **7** | 121-144 | 52 | 100-600 | 5-20 | 25 | <250 µm | Basınç, etki süresi ve su/kuru linyit oranı |
| **8** | 193-194 | 116,5 | 200-600 | 15 | 25 | <250 µm | Kademeli basınç artışı |
| **9** | 195-198 | 62,7 | 300 | 5-20 | 50 | <250 µm | Linyit kalınlığı |
| **10** | 199-202 | 61,4 | 300 | 5-20 | 50 | <250 µm | Linyit kalınlığı |

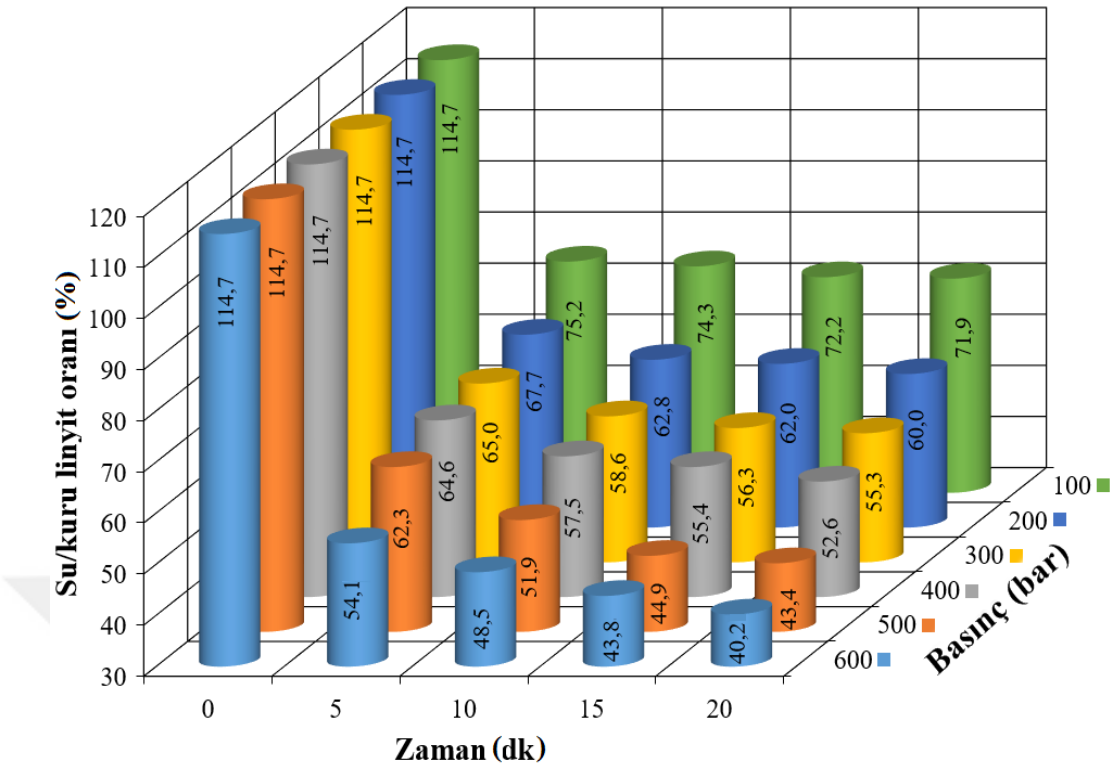
Tez çalışması kapsamında deneysel çalışmalar yapılarak incelenen konular aşağıdaki şekilde sıralanabilir;

- Basıncın ve etki süresinin mekanik su azaltmaya olan etkisi
- Başlangıç neminin mekanik su azaltmaya olan etkisi
- Tane boyutunun mekanik su azaltmaya olan etkisi
- Numune haznesi çapının mekanik su azaltmaya olan etkisi
- Kademeli basınç artışının etkisinin mekanik su azaltmaya olan etkisi
- Kalınlığın mekanik su azaltmaya olan etkisi

Bu bölümde deneylerden elde edilen sonuçlar ve incelenen parametreler hakkında daha detaylı bilgi verilecektir.

### 3.2.1. Basıncın ve etki süresinin mekanik su azaltmaya olan etkisinin belirlenmesi

Basıncın ve etki süresinin mekanik su azaltmaya olan etkisini tespit etmek için 100-600 bar basınçta, 5-20 dakika aralığındaki etki sürelerinde 5 farklı başlangıç su/kuru linyit oranına (%114,7-52) sahip linyit numuneleri ile 1,2,3,6 ve 7 nolu deney setlerindeki 120 deney gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.




Şekil 3.7. Su/kuru linyit oranının basınca ve zamana bağlı değişimi (1. Deney seti)

1. Deney setindeki numuneler ile (%114,7 su/kuru linyit oranı) yapılan 24 deneyin sonuçları tablo (Tablo 3.5) ve grafik (Şekil 3.7) halinde sunulmuştur ve elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir;

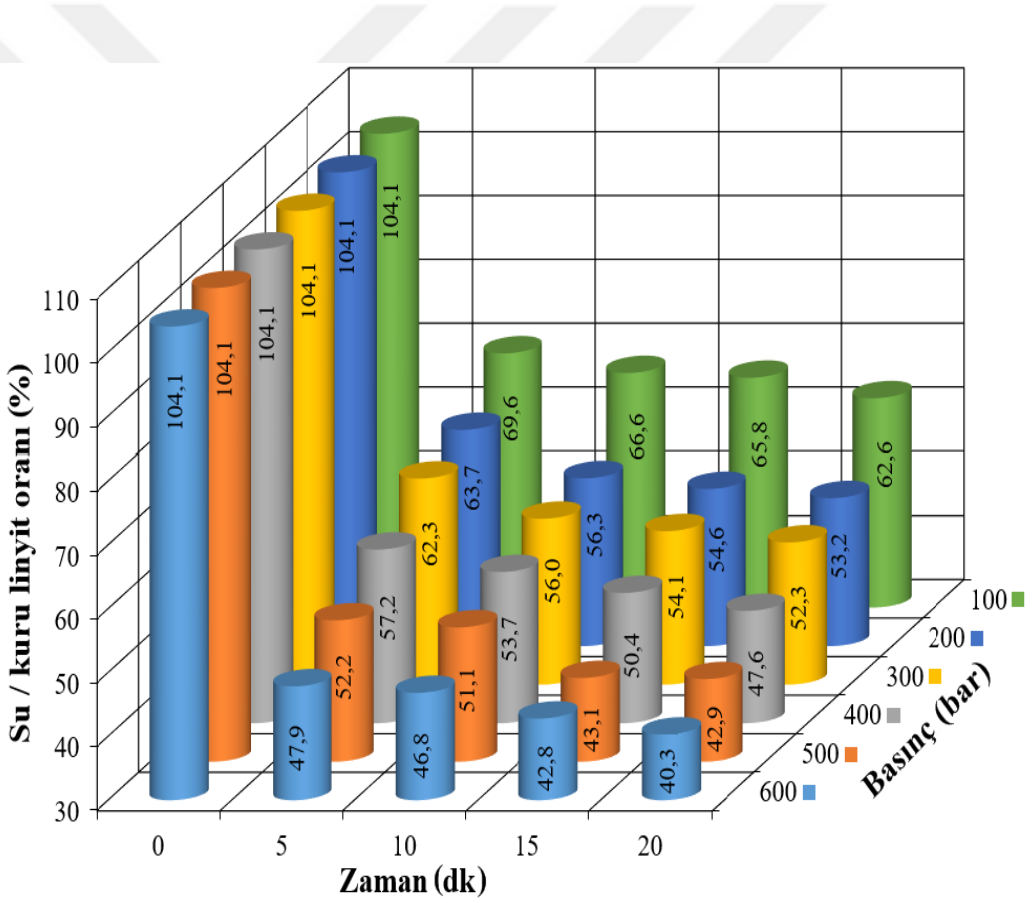
- Yüksek su/kuru linyit oranında, düşük basınçlarda dahi yüksek oranda mekanik su azaltma sağlanabilmektedir.
- Basınç artışı ile birlikte mekanik su azaltma miktarı atmaktadır ancak bu artış azalma eğilimindedir.
- Etki süresinin 5 dakikanın üzerine çıkarılması basınç arttıkça etki süresi artışı ile sağlanan ilave su azaltma miktarını da arttırmaktadır.

Tablo 3.5. Mekanik su azaltma deneyinin sonuçları (1. Deney seti)

| Başlangıç su/kuru linyit oranı (%) | Linyit kalınlığı (mm) | Hazne çapı (m) | Test süresi (dk) | Test basıncı (bar) | Mekanik su azaltma sonrası su/kuru linyit oranı (%) | Mekanik su azaltma oranı (%) | Basınç artışı ile sağlanan ilave mekanik su azaltma (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **114,7** | **0,025** | **0,025** | **5** | **100** | 75,2 | 34,4 | 34,4 |
| | | | **10** | | 74,3 | 35,2 | 0,8 |
| | | | **15** | | 72,2 | 37,1 | 1,9 |
| | | | **20** | | 71,9 | 37,3 | 0,2 |
| | | | **5** | **200** | 67,7 | 40,9 | 40,9 |
| | | | **10** | | 62,8 | 45,2 | 4,3 |
| | | | **15** | | 62,0 | 45,9 | 0,7 |
| | | | **20** | | 60,0 | 47,6 | 1,7 |

Tablo 3.5. (Devam) Mekanik su azaltma deneyinin sonuçları (1. Deney seti)

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | **5** | **300** | 65,0 | 43,3 | 43,3 |
| | | | **10** | | 58,6 | 48,9 | 5,6 |
| | | | **15** | | 56,3 | 50,9 | 2,0 |
| | | | **20** | | 55,3 | 51,8 | 0,9 |
| | | | **5** | **400** | 64,6 | 43,7 | 43,7 |
| | | | **10** | | 57,5 | 49,8 | 6,1 |
| | | | **15** | | 55,4 | 51,6 | 1,8 |
| | | | **20** | | 52,6 | 54,1 | 2,5 |
| | | | **5** | **500** | 62,3 | 45,7 | 45,7 |
| | | | **10** | | 51,9 | 54,8 | 9,0 |
| | | | **15** | | 44,9 | 60,9 | 6,1 |
| | | | **20** | | 43,4 | 62,1 | 1,3 |
| | | | **5** | **600** | 54,1 | 52,8 | 52,8 |
| | | | **10** | | 48,5 | 57,7 | 4,9 |
| | | | **15** | | 43,8 | 61,8 | 4,0 |
| | | | **20** | | 40,2 | 64,9 | 3,2 |




Şekil 3.8. Su/kuru linyit oranının basınca ve zamana bağlı değişimi (2. Deney seti)

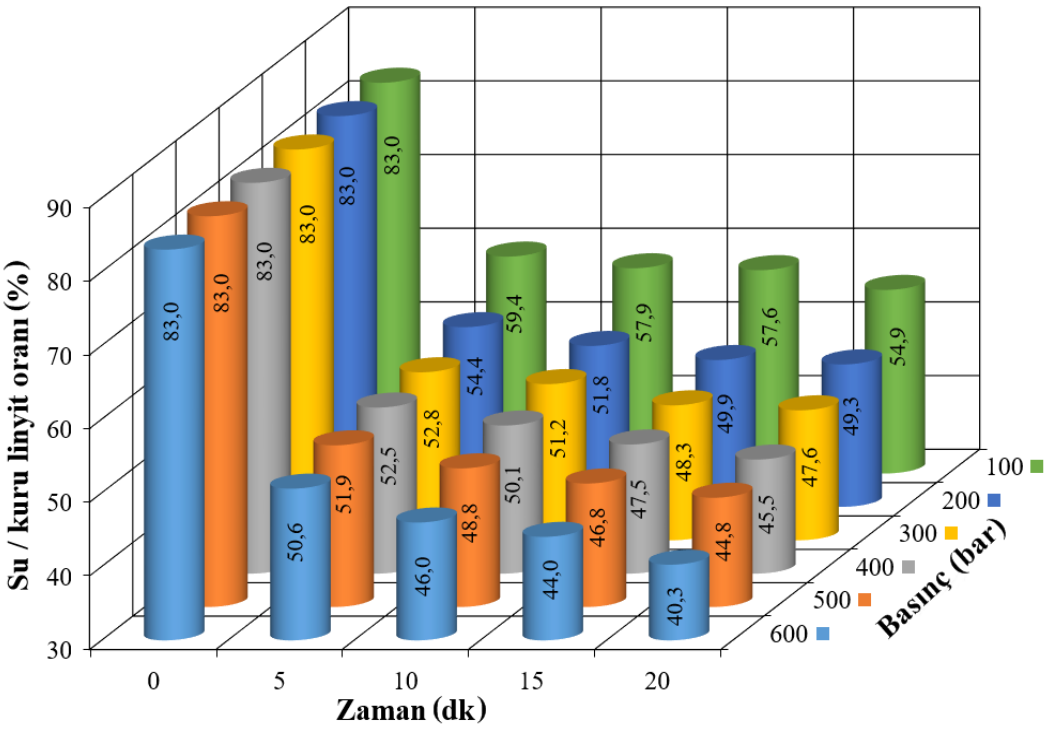
2. Deney setindeki numuneler ile (%104,1 su/kuru linyit oranı) yapılan 24 deneyin sonuçları tablo (Tablo 3.6) ve grafik (Şekil 3.8) halinde sunulmuştur ve elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir;

- Su/kuru linyit oranı düştükçe ilave mekanik su azaltma için basıncın ve etki süresinin arttırılması gerekmektedir.

- Basınç artışı ile birlikte mekanik su azaltma miktarı atmaktadır ancak bu artış azalma eğilimindedir.

Tablo 3.6. mekanik su azaltma deneyinin sonuçları (2. Deney seti)

| Başlangıç su/kuru linyit oranı (%) | Linyit kalınlığı (mm) | Hazne çapı (m) | Test basıncı (bar) | Test süresi (dk) | Mekanik su azaltma sonrası su/kuru linyit oranı (%) | Mekanik su azaltma oranı (%) | Basınç artışı ile sağlanan ilave mekanik su azaltma (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 104,1 | 0,025 | 0,025 | 100 | 5 | 69,6 | 33,1 | 33,1 |
| | | | | 10 | 66,6 | 36,0 | 3,0 |
| | | | | 15 | 65,8 | 36,8 | 0,7 |
| | | | | 20 | 62,6 | 39,8 | 3,1 |
| | | | 200 | 5 | 63,7 | 38,8 | 38,8 |
| | | | | 10 | 56,3 | 45,9 | 7,1 |
| | | | | 15 | 54,6 | 47,5 | 1,6 |
| | | | | 20 | 53,2 | 48,9 | 1,4 |
| | | | 300 | 5 | 62,3 | 40,1 | 40,1 |
| | | | | 10 | 56,4 | 45,8 | 5,7 |
| | | | | 15 | 54,1 | 48,0 | 2,2 |
| | | | | 20 | 52,3 | 49,8 | 1,7 |
| | | | 400 | 5 | 57,2 | 45,0 | 45,0 |
| | | | | 10 | 53,7 | 48,4 | 3,4 |
| | | | | 15 | 50,4 | 51,6 | 3,2 |
| | | | | 20 | 47,6 | 54,3 | 2,7 |
| | | | 500 | 5 | 52,2 | 49,9 | 49,9 |
| | | | | 10 | 51,1 | 50,9 | 1,1 |
| | | | | 15 | 43,1 | 58,6 | 7,6 |
| | | | | 20 | 42,9 | 58,7 | 0,2 |
| | | | 600 | 5 | 47,9 | 54,0 | 54,0 |
| | | | | 10 | 46,8 | 55,0 | 1,0 |
| | | | | 15 | 42,8 | 58,9 | 3,9 |
| | | | | 20 | 40,3 | 61,3 | 2,4 |




Şekil 3.9. Su/kuru linyit oranının basınca ve zamana bağlı değişimi (3. Deney seti)

3. Deney setindeki numuneler ile (%83 su/kuru linyit oranı) yapılan 24 deneyin sonuçları tablo (Tablo 3.7) ve grafik (Şekil 3.9) halinde sunulmuştur ve elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir;

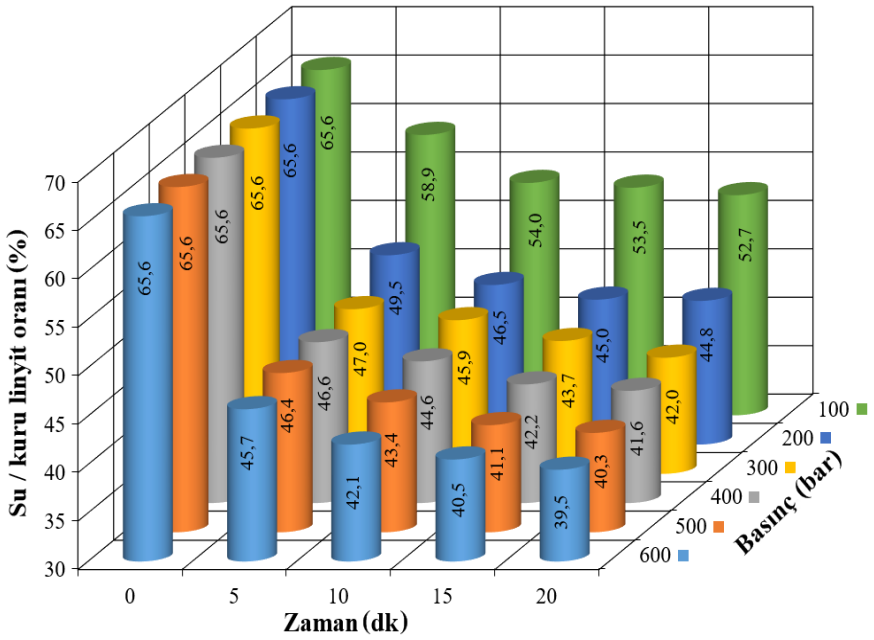
- Su/kuru linyit oranı düştükçe ilave mekanik su azaltma için basıncın ve etki süresinin arttırılması gerekmektedir.
- Basınç artışı ile birlikte mekanik su azaltma miktarı atmaktadır ancak bu artış azalma eğilimindedir.

Tablo 3.7. Mekanik su azaltma deneyinin sonuçları (3. Deney seti)

| **Başlangıç su/kuru linyit oranı (%)** | **Linyit kalınlığı (mm)** | **Hazne çapı (m)** | **Test basıncı (bar)** | **Test süresi (dk)** | **Mekanik su azaltma sonrası su/kuru linyit oranı (%)** | **Mekanik su azaltma oranı (%)** | **Basınç artışı ile sağlanan ilave mekanik su azaltma (%)** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **83,0** | **0,025** | **0,025** | 100 | 5 | 59,4 | 28,4 | 28,4 |
| | | | | 10 | 57,9 | 30,3 | 1,9 |
| | | | | 15 | 57,6 | 30,6 | 0,3 |
| | | | | 20 | 54,9 | 33,9 | 3,2 |
| | | | 200 | 5 | 54,4 | 34,5 | 34,5 |
| | | | | 10 | 51,8 | 37,6 | 3,1 |
| | | | | 15 | 49,9 | 39,9 | 2,3 |
| | | | | 20 | 49,3 | 40,6 | 0,7 |
| | | | 300 | 5 | 52,3 | 37,0 | 37,0 |
| | | | | 10 | 47,4 | 42,9 | 5,9 |
| | | | | 15 | 46,5 | 44,0 | 1,1 |
| | | | | 20 | 44,6 | 46,2 | 2,3 |
| | | | 400 | 5 | 52,5 | 36,7 | 36,7 |
| | | | | 10 | 50,1 | 39,7 | 2,9 |
| | | | | 15 | 47,5 | 42,8 | 3,1 |
| | | | | 20 | 45,5 | 45,2 | 2,5 |
| | | | 500 | 5 | 51,9 | 37,4 | 37,4 |
| | | | | 10 | 48,8 | 41,2 | 3,8 |
| | | | | 15 | 46,8 | 43,7 | 2,5 |
| | | | | 20 | 44,8 | 46,0 | 2,3 |
| | | | 600 | 5 | 50,6 | 39,1 | 39,1 |
| | | | | 10 | 46,0 | 44,6 | 5,5 |
| | | | | 15 | 44,0 | 47,0 | 2,3 |
| | | | | 20 | 40,3 | 51,5 | 4,5 |

6. Deney setindeki numuneler ile (%65,6 su/kuru linyit oranı) yapılan 24 deneyin sonuçları tablo (Tablo 3.8) ve grafik (Şekil 3.10) halinde sunulmuştur ve elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir;

- Su/kuru linyit oranı düştükçe düşük basınçlarda çok düşük oranda mekanik su azaltma sağlanmaktadır.
- Su/kuru linyit oranı düştükçe basınç ve etki süresi artışı ile sağlanan ilave su azaltma miktarı azalmaktadır.



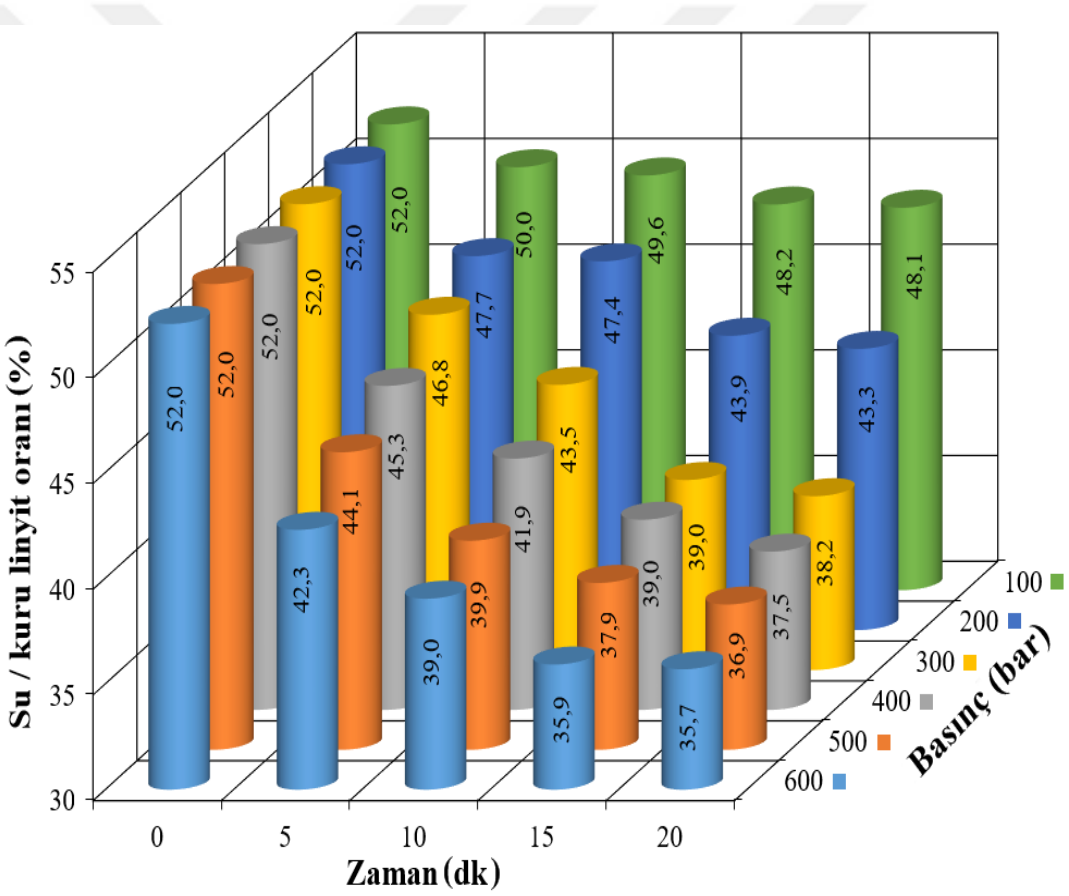

Şekil 3.10. Su/kuru linyit oranının basınca ve zamana bağlı değişimi (6. Deney seti)

Tablo 3.8. Mekanik su azaltma deneyinin sonuçları (6. Deney seti)

| Başlangıç su/kuru linyit oranı (%) | Linyit kalınlığı (mm) | Hazne çapı (m) | Test basıncı (bar) | Test süresi (dk) | Mekanik su azaltma sonrası su/kuru linyit oranı (%) | Mekanik su azaltma oranı (%) | Basınç artışı ile sağlanan ilave mekanik su azaltma (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **65,6** | **0,025** | **0,025** | 100 | 5 | 58,9 | 10,2 | 10,2 |
| | | | | 10 | 54,0 | 17,8 | 7,6 |
| | | | | 15 | 53,5 | 18,5 | 0,7 |
| | | | | 20 | 52,7 | 19,7 | 1,2 |
| | | | 200 | 5 | 49,5 | 24,5 | 24,5 |
| | | | | 10 | 46,5 | 29,2 | 4,7 |
| | | | | 15 | 45,0 | 31,5 | 2,3 |
| | | | | 20 | 44,8 | 31,7 | 0,2 |
| | | | 300 | 5 | 47,0 | 28,4 | 28,4 |
| | | | | 10 | 45,9 | 30,1 | 1,7 |
| | | | | 15 | 43,7 | 33,4 | 3,3 |
| | | | | 20 | 42,0 | 36,0 | 2,6 |

Tablo 3.8. (Devam) Mekanik su azaltma deneyinin sonuçları (6. Deney seti)

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 400 | 5 | 46,6 | 29,0 | 29,0 |
| | | | | 10 | 44,6 | 32,0 | 3,0 |
| | | | | 15 | 42,2 | 35,6 | 3,6 |
| | | | | 20 | 41,6 | 36,7 | 1,0 |
| | | | 500 | 5 | 46,4 | 29,3 | 29,3 |
| | | | | 10 | 43,4 | 33,9 | 4,6 |
| | | | | 15 | 41,1 | 37,5 | 3,6 |
| | | | | 20 | 40,3 | 38,7 | 1,2 |
| | | | 600 | 5 | 45,7 | 30,3 | 30,3 |
| | | | | 10 | 42,1 | 35,9 | 5,6 |
| | | | | 15 | 40,5 | 38,3 | 2,3 |
| | | | | 20 | 39,5 | 39,9 | 1,6 |




Şekil 3.11. Su/kuru linyit oranının basınca ve zamana bağlı değişimi (7. Deney seti)

7. Deney setindeki numuneler ile (%52 su/kuru linyit oranı) yapılan 24 deneyin sonuçları tablo (Tablo 3.9) ve grafik (Şekil 3.11) halinde sunulmuştur ve elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir;

- Su/kuru linyit oranı düştükçe düşük basınçlarda çok düşük oranda mekanik su azaltma sağlanmaktadır.

Tablo 3.9. Mekanik su azaltma deneyinin sonuçları (7. Deney seti)

| Başlangıç su/kuru linyit oranı (%) | Linyit kalınlığı (mm) | Hazne çapı (m) | Test basıncı (bar) | Test süresi (dk) | Mekanik su azaltma sonrası su/kuru linyit oranı (%) | Mekanik su azaltma oranı (%) | Basınç artışı ile sağlanan ilave mekanik su azaltma (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **52,0** | **0,025** | **0,025** | 100 | 5 | 50,0 | 3,9 | 3,9 |
| | | | | 10 | 49,6 | 4,6 | 0,8 |
| | | | | 15 | 48,2 | 7,3 | 2,6 |
| | | | | 20 | 48,1 | 7,6 | 0,3 |
| | | | 200 | 5 | 47,7 | 8,4 | 8,4 |
| | | | | 10 | 47,4 | 8,8 | 0,5 |
| | | | | 15 | 43,9 | 15,6 | 6,8 |
| | | | | 20 | 43,3 | 16,8 | 1,2 |
| | | | 300 | 5 | 46,8 | 10,1 | 10,1 |
| | | | | 10 | 43,5 | 16,4 | 6,4 |
| | | | | 15 | 39,0 | 25,1 | 8,6 |
| | | | | 20 | 38,2 | 26,5 | 1,5 |
| | | | 400 | 5 | 45,3 | 12,9 | 12,9 |
| | | | | 10 | 41,9 | 19,5 | 6,6 |
| | | | | 15 | 39,0 | 25,1 | 5,6 |
| | | | | 20 | 37,48 | 28,0 | 2,9 |
| | | | 500 | 5 | 44,1 | 15,3 | 15,3 |
| | | | | 10 | 39,9 | 23,3 | 8,0 |
| | | | | 15 | 37,9 | 27,2 | 3,8 |
| | | | | 20 | 36,9 | 29,1 | 2,0 |
| | | | 600 | 5 | 42,3 | 18,7 | 18,7 |
| | | | | 10 | 39,0 | 25,0 | 6,3 |
| | | | | 15 | 35,9 | 31,0 | 6,0 |
| | | | | 20 | 35,7 | 31,4 | 0,4 |

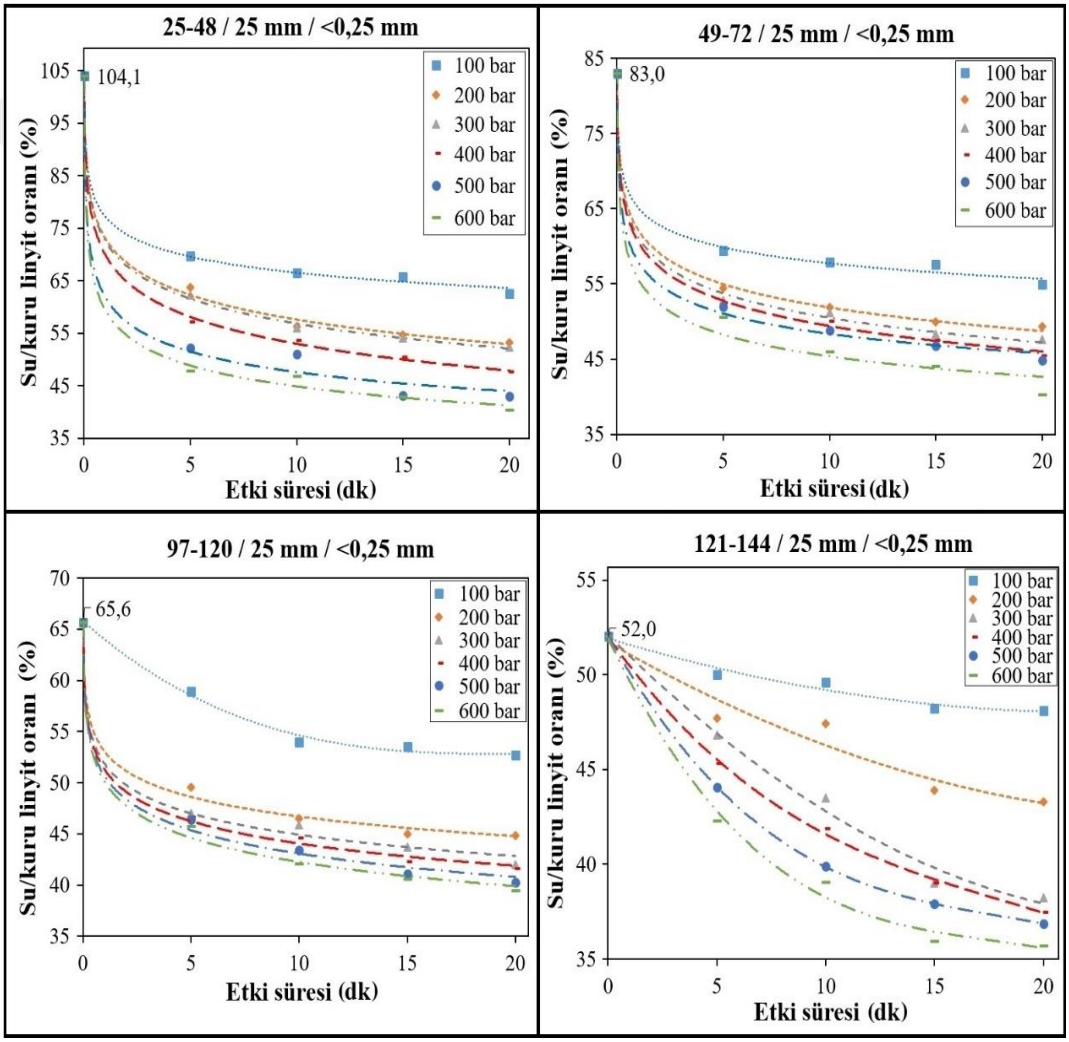
### 3.2.2. Başlangıç neminin mekanik su azaltmaya olan etkisinin belirlenmesi

Başlangıç neminin mekanik su azaltmaya olan etkisini tespit etmek için 4 farklı başlangıç nemine sahip linyit numuneleri ile 100-600 bar basınç ve 5-20 dakika etki süresi aralığında 96 adet deney gerçekleştirilmiş (2,3,6 ve 7 deney setleri) ve sonuçlar grafikler halinde sunulmuştur (Şekil 3.12).

Deneylerden elde edilen bulgular aşağıdaki şekilde sıralanabilir;

- Başlangıç su/kuru linyit oranı arttıkça mekanik su azaltma miktarı artmaktadır.

- Başlangıç su/kuru linyit oranı arttıkça düşük basınçlardaki mekanik su azaltma miktarı artmaktadır.
- Başlangıç su/kuru linyit oranı azaldığında, basınç artışı ile sağlanan ilave mekanik su azaltma miktarı azalmaktadır.
- Başlangıç su/kuru linyit oranı azaldığında düşük basınçlarda çok düşük oranda mekanik su azaltma sağlanmaktadır.
- Başlangıç su/kuru linyit oranı azaldığında düşük basınçlarda etki süresinin arttırılması mekanik su azaltmayı çok düşük oranda etkilemektedir.

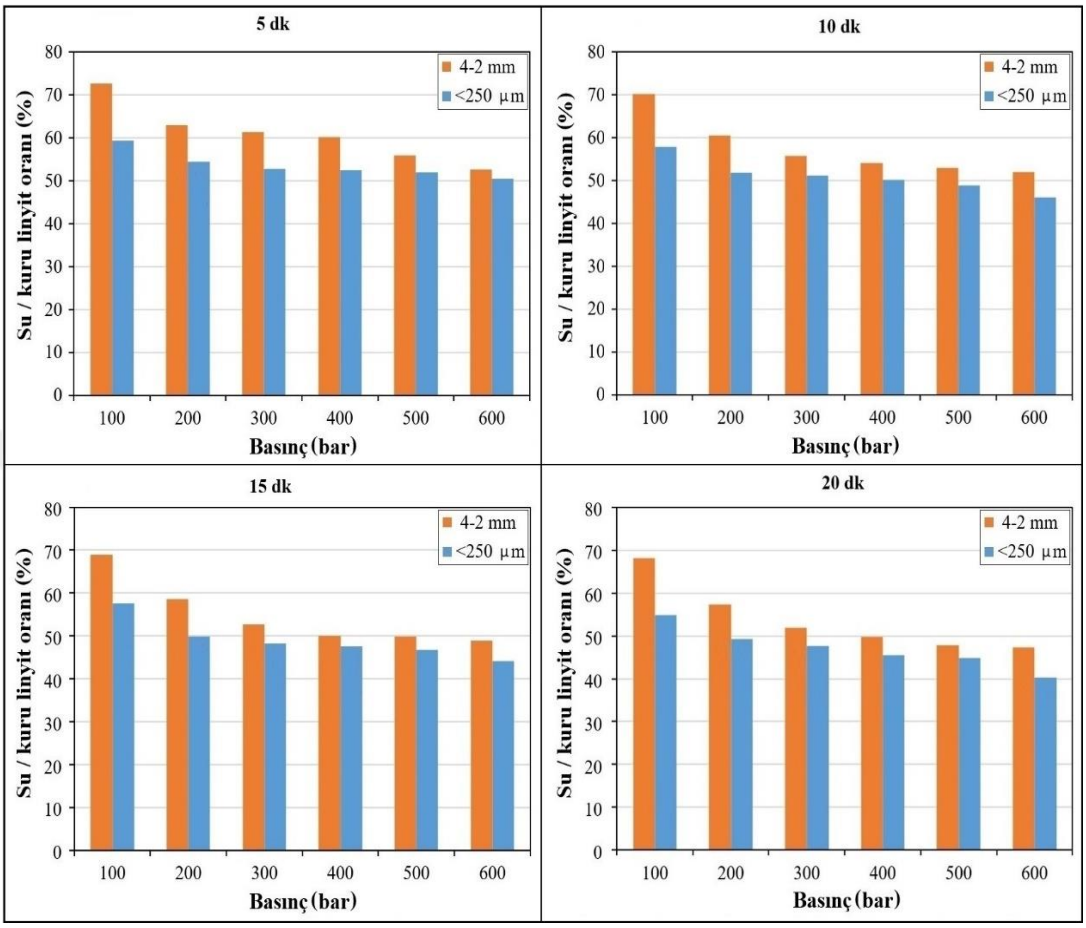



Şekil 3.12. Başlangıç su/kuru linyit oranının mekanik su azaltmaya etkisi

### 3.2.3. Tane boyutunun mekanik su azaltmaya olan etkisinin belirlenmesi

Tane boyutunun mekanik su azaltmaya olan etkisini tespit etmek için <250 µm, 4-2 mm ve 16-4 mm boyutundaki linyitlerle 100-600 bar basınç ve 5-20 dakika etki süresi

aralığında deneyler gerçekleştirilmiş (3. ve 4. deney setleri) ve elde edilen sonuçlar grafikler halinde Şekil 3.13'de sunulmuştur.




Şekil 3.13. 2 farklı tane boyutunda su/kuru linyit oranının zamana ve basınca bağlı değişimi

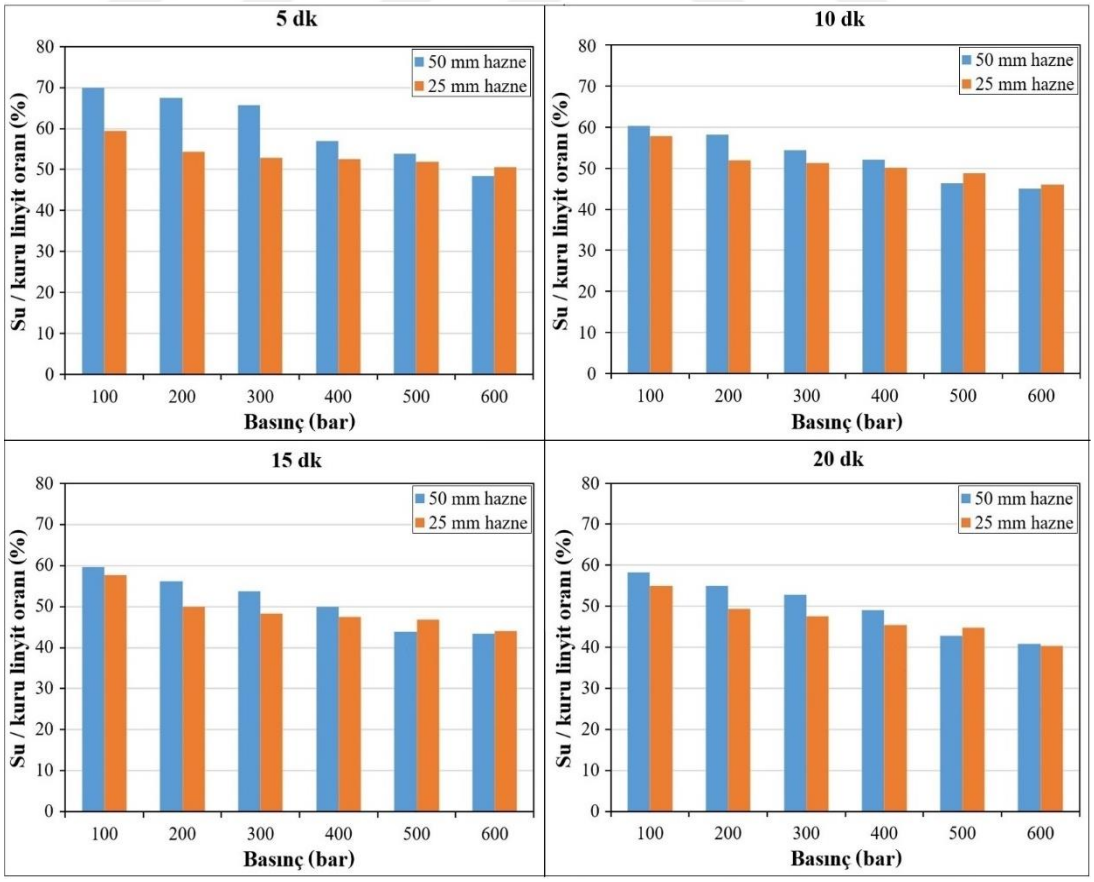
Deneylerden elde edilen bulgular aşağıdaki şekilde sıralanabilir;

- 16-4 mm ve 4-2 mm aralığındaki linyitlerin mekanik su azaltma miktarı arasında önemli bir farklılık görülmemektedir. Dolayısıyla tane boyutunun 4 mm'nin üzerine çıkması mekanik su azaltmayı etkilememektedir.
- Tane boyutu büyüdükçe mekanik su azaltma miktarı azalmaktadır
- Tane boyutu kaynaklı mekanik su azaltma miktarındaki farklılık en fazla düşük basınçlardadır ve basınç arttıkça aradaki fark azalmaktadır.
- Tane boyutu kaynaklı mekanik su azaltma miktarındaki farklılık en fazla %13,2 ile 100 bar basınçta 5 ve 20 dakika etki süresinde meydana gelmiştir.
- Tane boyutu kaynaklı mekanik su azaltma miktarındaki farklılık en az %3 ile 500 bar basınçta 20 dakika etki süresinde meydana gelmiştir

- Tane boyutunun mekanik su azaltmaya olan etkisi zamandan çok basınçtan etkilenmektedir.
- Tane boyutu küçüldükçe makro, kapalı ve kör uçlu gözeneklerin parçalanmasından dolayı düşük basınçlarda dahi daha yüksek oranda mekanik su azaltma sağlandığı düşünülmektedir.
- İri taneli linyitte basınç artışı ile gözenek yapısında değişiklik meydana geldiği ve bundan dolayı mekanik su azaltma miktarının ince taneli linyite yaklaştığı düşünülmektedir. Ancak çalışılan basınç aralığında hiçbir zaman ince taneli linyitle aynı oranda mekanik su azaltma sağlanamadığı görülmüştür.

### 3.2.4. Numune haznesi çapının mekanik su azaltmaya olan etkisinin belirlenmesi

Numune haznesi çapının mekanik su azaltmaya olan etkisinin belirlenmesi için 25 mm ve 50 mm iç çapında iki farklı numune haznesi kullanılarak aynı nem içeriğine sahip linyitle 100-600 bar basınç ve 5-20 dakika etki süresi aralığında 48 deney (3. de 5. deney seti) gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.14).




Şekil 3.14. Hazne çapının mekanik su azaltmaya olan etkisi

Deneylerden elde edilen bulgular aşağıdaki şekilde sıralanabilir;

- 5 dakika etki süresinde 500 bar basınca kadar tüm deneylerde 25 mm çapındaki numune haznesinde daha yüksek oranda mekanik su azaltma sağlanmıştır.
- 10 dakika etki süresinde 400 bar basınca kadar tüm deneylerde 25 mm çapındaki numune haznesinde daha yüksek oranda mekanik su azaltma sağlanmıştır.
- 15 dakika etki süresinde 400 bar basınca kadar tüm deneylerde 25 mm çapındaki numune haznesinde daha yüksek oranda mekanik su azaltma sağlanmıştır.
- 20 dakika etki süresinde 500 bar basınç haricindeki tüm deneylerde 25 mm çapındaki numune haznesinde daha yüksek oranda mekanik su azaltma sağlanmıştır.
- Hazne çapının 25 mm'den 50 mm'ye çıkması sonucunda su/kuru linyit oranındaki en büyük farklılık %10,5 ile 5 dakika etki süresinde 100 bar basınçta meydana gelmiştir ve 25 mm'lik hazne çapında daha yüksek mekanik su azaltma sağlanmıştır.
- Hazne çapının 25 mm'den 50 mm'ye çıkması sonucunda su/kuru linyit oranındaki en az farklılık %0,6 ile 15 ve 20 dakika etki süresinde 600 bar basınçta meydana gelmiştir ve 25 mm'lik hazne çapında daha yüksek mekanik su azaltma sağlanmıştır.
- Numune haznesi çapının artması düşük basınçlarda mekanik su azaltma miktarını azaltırken basınç arttıkça mekanik su azaltma miktarını arttırmaktadır.
- Etki süresi ve basınç arttıkça 50 mm çapındaki haznede elde edilen mekanik su azaltma miktarı daha fazla olmaktadır.

### 3.2.5. Kademeli basınç artışının mekanik su azaltmaya olan etkisinin belirlenmesi

Kademeli basınç artışının etkisini tespit etmek için (8 nolu deney seti) aynı linyit numunesi ile iki farklı deney gerçekleştirilmiştir. Birinci deneyde ilk olarak 5 dakika boyunca 200 bar basınç uygulanmış ardından basınç ani olarak 400 bara çıkarılarak 5 dakika daha basınç uygulanmış ve son olarak basınç 600 bara ani olarak çıkarılarak 5 dakika daha basınç uygulanmış ve toplam 15 dakikalık deney gerçekleştirilmiştir. İkinci deneyde ise 600 bar basınca ani olarak çıkılarak 15 dakika boyunca basınç uygulanarak deney tamamlanmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 3.10'de verilmiştir.

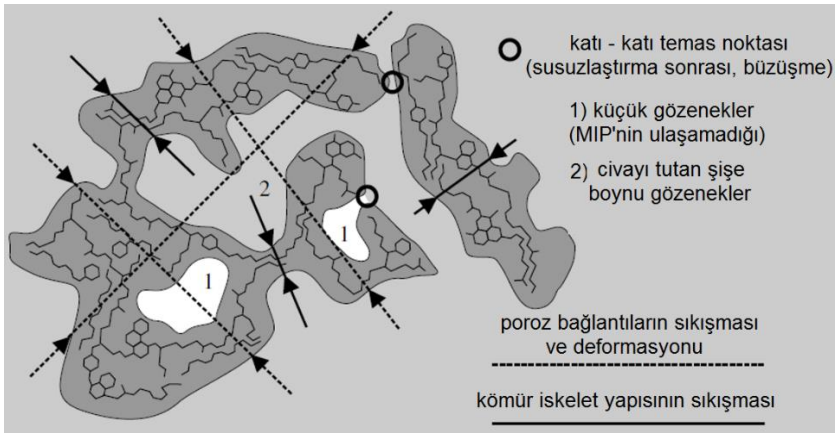
Tablo 3.10. Kademeli basınç artışı için yapılan deney sonuçları

| Deney no | Başlangıç su/kuru linyit oranı (%) | Basınç (bar) | Basınç artış türü | Etki süresi (dk) | Hazne çapı (mm) | Tane boyutu (µm) | Baskı sonrası su/kuru linyit oranı (%) | Mekanik su azaltma yüzdesi (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 193 | 116,5 | 200-600 | Kademeli | 15 dk | 25 | <250 | 48,8 | 58,1 |
| 194 | 116,5 | 600 | Ani | | | | 46,2 | 60,3 |

Deneyler sonucunda her iki numunede başlangıç su/kuru linyit oranı %116,5 iken mekanik su azaltma sonrası bu oran kademeli basınç uygulandığında %48,8'e, ani basınç artışında ise %46,2'ya düşmüştür ve ani basınç artışında %2,2 daha fazla mekanik su azaltma sağlanmıştır. Mekanik su azaltmada meydana gelen çok düşük orandaki bu fark kademeli basınç artışının mekanik su azaltma üzerinde önemli bir etkisi olmadığını göstermiştir.

### 3.2.6. Kalınlığın mekanik su azaltmaya olan etkisinin belirlenmesi

Deney yapılan numunenin kalınlığı linyitin içinde bulunan suyun basıncın etkisiyle linyitten uzaklaştırılmasını doğrudan etkilemektedir. Kalınlığın artışı basınç ile gözeneklerden çıkan suyun daha uzun mesafe almasını ve dışarı çıkabilmek için gerekli olan yarık veya çatlakları bulabilmesini gerekli kılmaktadır. Basınç etkisiyle linyit yapısının sıkışarak su tahliyesi için gereken kanalların kısmen veya tamamen kapanması sözkonusu olabilmektedir (Şekil 3.15) [39].

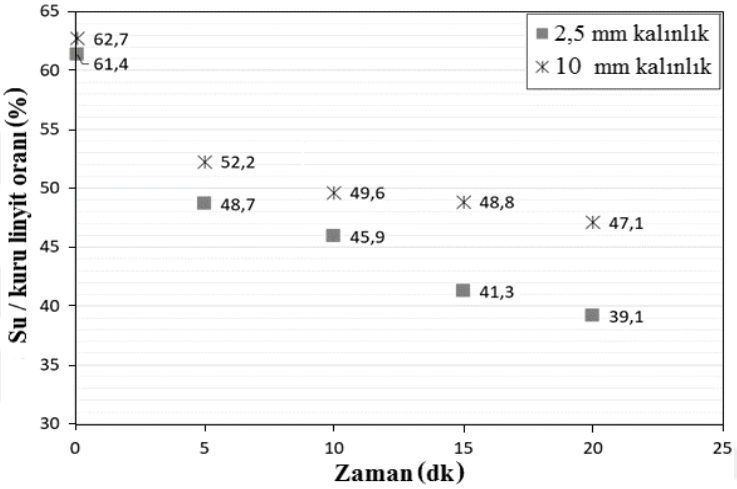



Şekil 3.15. Sıkıştırma ve deformasyonun ölçüsü [39]

Basıncın büzüşmeye olan etkisini incelemek için Avustralya kömürü ile yapılan çalışmada, basınçtaki artış gözenek hacminde azalmaya yol açarak, artan su tahliyesi

ile büzülmenin arttığı (orijinal pelet hacmine göre) görülmüştür [39]. Bu eğilim araştırılan tüm MTE sıcaklıklarında görülmüştür. Yallourn kömürü ile yapılan büzülme çalışmalar, kılcal kuvvetlerin etkisiyle büzülmenin esasen yığın sudan ziyade kılcal ve çok tabakalı suların giderilmesi ile ilişkili olduğunu göstermiştir [39].

MTE ürünlerinin, basınç ile büzülme yüzdesinde gözlenen artış kurutma sırasında kömür yapısına etki eden kılcal kuvvetleri artıran daha büyük çaptan daha küçük çaplı gözeneklere geçişten kaynaklanmaktadır [39].




Şekil 3.16. Kalınlığın mekanik su azaltmaya olan etkisi

Linyit kalınlığı arttığında suyun tahliyesi için gerekli mesafe arttığından bu etki daha belirgin hale gelerek mekanik su azaltma miktarını azaltmakta hatta durma noktasına getirmektedir. Dolayısıyla kalınlığın artması ile mekanik su azaltma miktarı azalmaktadır. Şekil 3.16'den de görüldüğü üzere 300 bar sabit basınçta 5-20 dakika süreyle 2,5 mm ve 10 mm kalınlığında ve 250 µm altı linyit numuneleri ile yapılan deneylerde (9. ve 10. deney seti) kalınlığın artması ile mekanik su azaltma miktarının azaldığı açıkça görülmektedir. Ayrıca 10 mm kalınlığındaki linyitte 10 dakikadan sonraki etki süresinde mekanik su azaltmanın çok düşük oranda devam ettiği ve bunun su çıkışı için gerekli olan gözeneklerin kapanmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

### 3.2.7. Korelasyon geliştirilmesi

Deneyler neticesinde basınç, etki süresi, su/kuru linyit oranı, tane boyutu ve numune haznesi çapının mekanik su azaltma üzerinde etkin parametreler olduğu görülmüştür.

Tüm deneylerden elde edilen eğriler benzer eğilim göstermektedir. Dolayısıyla mekanik su azaltma karakterini mekanik su azaltma parametrelerine bağlı olarak ifade eden ortak bir korelasyon geliştirilebilir. Bu sayede farklı deney koşullarındaki mekanik su azaltma sonuçları korelasyon ile hesaplanarak elde edilebilir. Bu amaçla tüm parametreler için geliştirilen bağıntılar ve katsayılar bu bölümde yer almaktadır.

Mekanik su azaltma miktarını en fazla etkileyen parametreler basınç ve etki süresidir ve mekanik su azaltma miktarı etki süresine göre basınca daha duyarlıdır. Geliştirilen korelasyonda kullanılan ilk deney sonuçları sahadan alınan linyitin su/kuru linyit oranına (%85,15) yakın su/kuru linyit oranına sahip (%83) linyit ile yapılan deneylerden (3.Deney seti) elde edilen değerlerdir ve bu deney setindeki basınç aralığı 100-600 bar, etki süresi aralığı 5-20 dakika, linyitin başlangıç su/kuru linyit oranı %83, hazne çapı 25 mm ve tane boyutu <250 µm'dir. Mekanik su azaltma sonrası elde edilen su/kuru linyit oranını basınca ve zamana bağlı olarak ifade eden korelasyonun en sade hali ile aşağıdaki formda yazılabilir;

$$y_1 = A \times P^{-k} + B \times \frac{1}{\ln(t)} \tag{3.1}$$

Yukarıda verilen bağıntıdaki ifadelerin anlamları ve nasıl seçildiği hakkında bilgiler aşağıda maddeler halinde açıklanmaktadır;

- $y_1$, su/kuru linyit oranını ifade etmektedir.
- Deney sonuçları, basınç artışı ile su/kuru linyit oranının üssel olarak azaldığını göstermiştir (basınç arttıkça su/kuru linyit oranındaki düşüş giderek azalmaktadır). Bu nedenle basınçtan kaynaklanan su/kuru linyit oranı üssel olarak $P^{-k}$ şeklinde ifade edilmiştir. Burada yer alan k ifadesi 3. Deney setinden elde edilen su/kuru linyit oranı eğrisinden gelen 0,16 değeridir.
- Deney sonuçları, etki süresinin artışı ile su/kuru linyit oranının logaritmik olarak azaldığını göstermiştir (etki süresinin artışının su/kuru linyit oranına etkisi giderek sıfıra yaklaşmaktadır). Bu nedenle etki süresinden kaynaklanan su/kuru linyit oranı logaritmik olarak $\log_t^e$ veya 1/ln(t) olarak ifade edilmiştir.
- Eş.3.1'de yer alan A ve B katsayıları 2x2 formundaki matrisin ters matris yöntemi ile çözümünden elde edilen katsayıları ifade etmektedir. Ek-F'de yer alan deney verileri kullanılarak 2x2 matrisin çözümü aşağıdaki şekilde yapılmıştır;

100 bar basınçta ve 5 dakika etki süresinde deneysel olarak elde edilen su/kuru linyit oranı Eş.3.1'de yerine konuldağında elde edilen ilk ifade ($y_{11}$) aşağıdaki şekildedir;

$$y_{11} = A \times 0{,}479 + B \times 0{,}621 = 0{,}594$$

Benzer şekilde 200 bar basınçta ve 5 dakika etki süresinde deneysel olarak elde edilen su/kuru linyit oranı Eş.3.1'de yerine konuldağında elde edilen ikinci ifade ($y_{12}$) ise aşağıdaki şekildedir;

$$y_{12} = A \times 0{,}428 + B \times 0{,}621 = 0{,}544$$

Yukarıda elde edilen bu iki doğrusal denklem takımı 2x2 formundaki matrise (Katsayısı Matrisi X Durum Vektörü = Eşitlik Vektörü) aşağıdaki şekilde dönüştürülebilir;

[a][X]=[Y] (3.2)

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} \\ y_{12} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$y_{11}$ ve $y_{12}$ denklemlerinden elde edilen değerler Eş.3.3'te yerine konulduğunda aşağıdaki sonuç elde edilmektedir.

$$\begin{bmatrix} 0{,}479 & 0{,}621 \\ 0{,}428 & 0{,}621 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0{,}594 \\ 0{,}544 \end{bmatrix}$$

Elde edilen bu denklemin çözümü için [X] yalnız bırakılarak aşağıda verilen bağıntı elde edilmiştir.

$[X]=[a]^{-1}[Y]$ (3.3)

Eş.3.3'te yer alan $[a]^{-1}$, katsayı matrisinin tersini ifade etmektedir ve determinant ile matrisin tersi aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır;

$$[a] = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} ise\ [a]^{-1} = \frac{1}{a_{11} \times a_{22} - a_{12} \times a_{21}} \begin{bmatrix} a_{22} & -a_{12} \\ -a_{21} & a_{11} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Eş.3.4 kullanılarak [a] matrisinin tersi ($[a]^{-1}$) aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

$$[a]^{-1} = \begin{bmatrix} 19{,}903 & 19{,}903 \\ 13{,}722 & 15{,}332 \end{bmatrix}$$

Katsayısı matrisinin tersinin de elde edilmesi Eş.3.3'te yer alan denklem takımının çözümü aşağıdaki şekilde yapılmıştır.

$$[X] = \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 19{,}903 & 19{,}903 \\ 13{,}722 & 15{,}332 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0{,}594 \\ 0{,}544 \end{bmatrix}$$

Eş.3.3 kullanılarak kullanarak elde edilen A ve B değerleri sırasıyla 1,005 ve 0,182'dir Dolayısıyla Eş.3.1 denklem aşağıdaki şekle dönüşmektedir;

$$y_1 = 1{,}005 \times P^{-0{,}16} + 0{,}182 \times \frac{1}{\ln(t)} \tag{3.5}$$

Elde edilen $y_1$ bağıntısı yalnızca basınç ve zamanın fonksiyonudur ve bu fonksiyon deneylerle uyumlu olarak basınç artışından daha çok etkilenmektedir. Ancak $y_1$ bağıntısı mekanik su azaltma davranışına etki eden diğer parametreleri (tane boyutu, hazne çapı ve başlangıç su/kuru linyit oranı) içermemektedir ve bu parametreleri de içeren yeni bağıntılara ihtiyaç vardır. Dolayısıyla $y_1$ bağıntısına bu parametrelerin de etkisi ilave edilmelmesi gerekmektedir. Aşağıda sırasıyla tane boyutu, hazne çapı ve başlangıç su/kuru linyit oranını ifade eden bağıntılar hakkında bilgi verilmiştir.

Deneyler sonucunda tane boyutunun mekanik su azaltmaya etki ettiği ve bu etkinin basıncın artmasıyla logaritmik olarak azaldığı ancak etki süresinden etkilenmediği tespit edilmiştir. Ayrıca tane boyutu 4 mm'nin üzerine çıktığında 4 mm tane boyutundaki su azaltma miktarları ile benzer su azaltma miktarının olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle tane boyutunun mekanik su azaltmaya olan etkisini ifade etmek için aşağıdaki ifade tanımlanmıştır;

$$\text{Ɛ} = \quad [(ln\frac{d_{linyit}}{0{,}25})^{0{,}1} \times (\frac{1}{\ln(P)})^{0{,}9}]^{\frac{1}{3}} \tag{3.6}$$

Burada Ɛ tane boyut katsayısı, $d_{linyit}$ linyit tane boyutunu ve P basıncı ifade etmektedir. Dolayısısıyla $y_1$ ifadesine tane boyut katsayısı da eklenerek aşağıdaki bağıntı elde edilmiştir;

$$y_2 = \text{Ɛ} + A \times x_1 + B \times x_2 \tag{3.7}$$

$$y_2 = [(ln\frac{d_{linyit}}{0,25})^{0,1} \times (\frac{1}{\ln(P)})^{0,9}]^{\frac{1}{3}} + \ 1{,}005 \times P^{-0,16} + 0{,}182 \times \frac{1}{\ln(t)} \quad (3.7)$$

Mekanik su azaltmaya etki eden diğer bir parametre de numune haznesi çapıdır ve hazne çapının artması düşük basınçlarda mekanik su azaltma miktarını azaltırken basınç arttıkça mekanik su azaltma miktarını arttıran bir etkiye sahiptir ve bu etki basınç ve etki süresi artışından logaritmik olarak etkilenmektedir ve etki süresine göre basınca daha duyarlıdır. Bu etkiler göz önünde bulundurularak numune haznesi çapının mekanik su azaltma sonrası su/kuru linyit oranına etkisini ifade etmek için aşağıdaki bağıntı geliştirilmiştir.

$$\phi = \frac{\ln(d_{hazne})^{1,1} \times \ ((\frac{1}{\log(P)})^{1,35} \times (\frac{1}{\ln(t)})^{0,95})^2}{10^{1,1}} \quad (3.8)$$

Burada $\phi$ hazne çapı katsayısını, $d_{hazne}$ hazne çapını ve P basıncı ifade etmektedir. Dolayısıyla Eş.3.7'ye hazne çapının etkisini ifade eden katsayı da ilave edildiğinde mekanik su azaltma sonrası su/kuru linyit oranını ifade eden aşağıdaki $y_3$ bağıntısı elde edilmektedir.

$$y_3 = \phi + \varepsilon + A \times x_1 + B \times x_2 \quad (3.9)$$

$$y_3 = \frac{\ln(d_{hazne})^{1,1} \times \ ((\frac{1}{\log(P)})^{1,35} \times (\frac{1}{\ln(t)})^{0,95})^2}{10^{1,1}} + [(ln\frac{d_{linyit}}{0,25})^{0,1} \times (\frac{1}{\ln(P)})^{0,9}]^{\frac{1}{3}} + \ 1{,}005 \times$$

$$P^{-0,16} + 0{,}182 \times \frac{1}{\ln(t)} \quad (3.9)$$

Deneyler sonucunda başlangıç su/kuru linyit oranının mekanik su azaltma miktarına etki ettiği ve başlangıç su/kuru linyit oranı, basınç ve etki süresi arttıkça mekanik su azaltma miktarının logaritmik olarak arttığı görülmüştür. Ayrıca mekanik su azaltma miktarındak artış etki süresine göre basınç artışından daha fazla etkilenmektedir. Bu etkiler göz önünde bulundurularak başlangıç su/kuru linyit oranının mekanik su azaltma sonrası su/kuru linyit oranına etkisini ifade etmek için aşağıdaki bağıntı geliştirilmiştir.

$$\beta = 2{,}4 \times [ln\frac{p_{dwl}}{0,95} \times \left(\frac{1}{\log(P)}\right)^{2,2} \times \left(\frac{1}{\ln(t)}\right)] \quad (3.10)$$

Burada β başlangıç su/kuru linyit oranı katsayısını ve $p_{dwl}$ su/kuru linyit oranını ifade etmektedir. Sonuç olarak mekanik su azaltma sonrası su/kuru linyit oranını ifade nihai korelasyon aşağıdaki şekle dönüşmektedir;

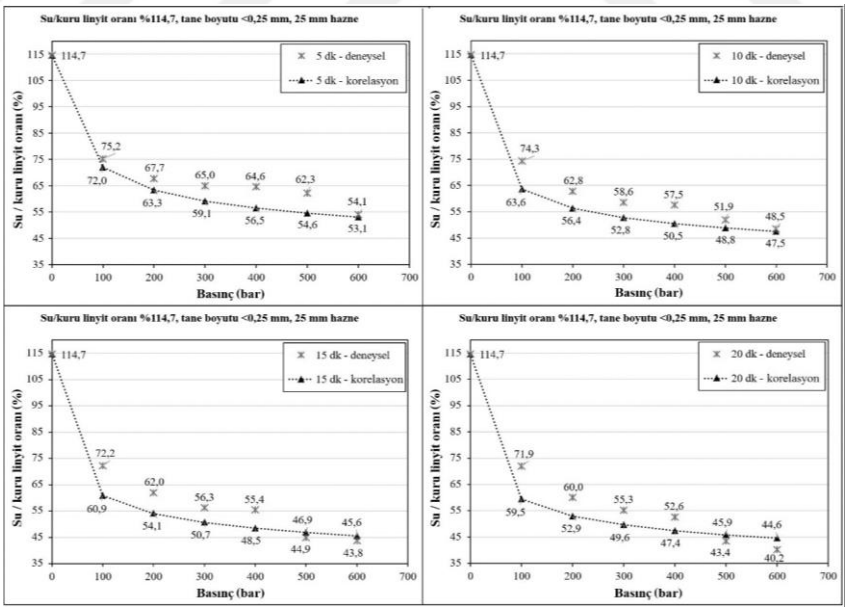
$$y = \beta + \phi + \varepsilon + A \times x_1 + B \times x_2 \tag{3.11}$$

$$y = 2{,}4 \times \left[ln\frac{p_{dwl}}{0{,}95} \times \left(\frac{1}{\log(P)}\right)^{2{,}2} \times \left(\frac{1}{\ln(t)}\right)\right] + \frac{\ln(d_{hazne})^{1{,}1} \times \left(\left(\frac{1}{\log(P)}\right)^{1{,}35} \times \left(\frac{1}{\ln(t)}\right)^{0{,}95}\right)^2}{10^{1{,}1}} +$$

$$\left[\left(ln\frac{d_{linyit}}{0{,}25}\right)^{0{,}1} \times \left(\frac{1}{\ln(P)}\right)^{0{,}9}\right]^{\frac{1}{3}} + 1{,}005 \times P^{-0{,}16} + 0{,}182 \times \frac{1}{\ln(t)} \tag{3.12}$$

Mekanik su azaltma sonrası su/kuru linyit oranını ifade eden y korelasyonu kullanılarak hesaplanan ve deneylerden elde edilen değerler Ek-F'de tablo halinde sunulmuştur.

Ek-F'de yer alan deney sonuçları ve geliştirilen korelasyon ile elde edilen sonuçlar kullanılarak herbir deney seti için grafikler oluşturulmuş ve Şekil 3.17, Şekil 3.18, Şekil 3.19, Şekil 3.20, Şekil 3.21, Şekil 3.22 ve Şekil 3.23'de verilmiştir.




Şekil 3.17. Deney ve korelasyon sonuçları (1. Deney seti)

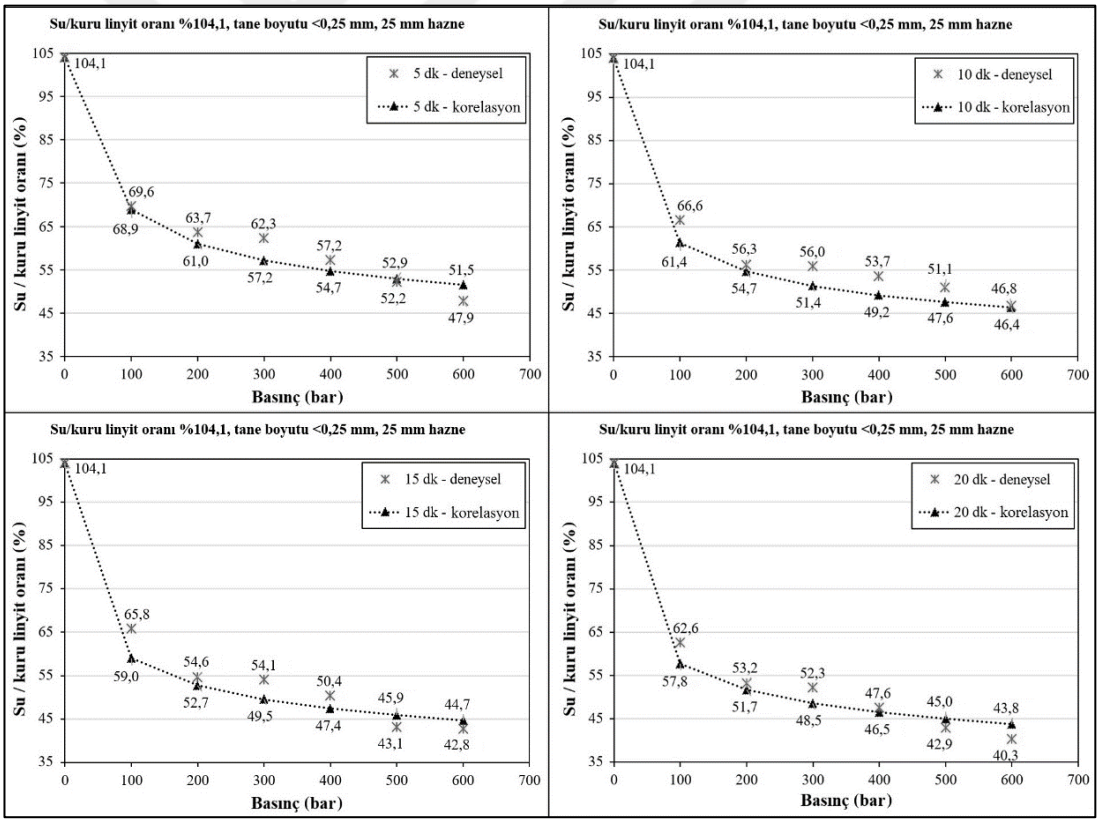
%114,7 su/kuru linyit oranına ve <0,25 mm tane boyutuna sahip linyit numuneleri ile 25 mm çapındaki numune yerleştirme haznesi kullanılarak yapılan deney sonuçları (1.deney seti) ile geliştirilen korelasyon ile elde edilen sonuçların (Şekil 3.17) karşılaştırması Tablo 3.11'de özetlenmiştir.

Tablo 3.11. Deney ve korelasyon sonuçlarının karşılaştırması (1. Deney seti)

| Süre (dk) | En büyük sapma (%) | Sapmanın olduğu basınç (bar) | En küçük sapma (%) | Sapmanın olduğu basınç (bar) |
|---|---|---|---|---|
| **5** | 12,6 | 400 | 1,9 | 600 |
| **10** | 14,4 | 100 | 2,1 | 100 |
| **15** | 15,7 | 100 | 4 | 600 |
| **20** | 17,3 | 100 | 5,6 | 500 |

**Bulgular ve Tartışma**

- Etki süresinin artmasıyla birlikte deney ile korelasyon sonuçları arasındaki en büyük sapma miktarı da artmıştır.
- Etki süresinin artmasıyla birlikte 100 bar basınçta deney ile korelasyondan elde edilen sonuçlar arasındaki sapma miktarı da artmıştır ancak 100 barın üzerinde sapma miktarında ciddi bir değişiklik görülmemiştir.
- 500 ve 600 barlık basınçlar 15 ve 20 dakika etki süreleri haricindeki tüm basınç ve etki sürelerinde deneylerden elde edilen su/kuru linyit oranları korelasyondan elde edilen sonuçlardan daha yüksektir.




Şekil 3.18. Deney ve korelasyon sonuçları (2. Deney seti)

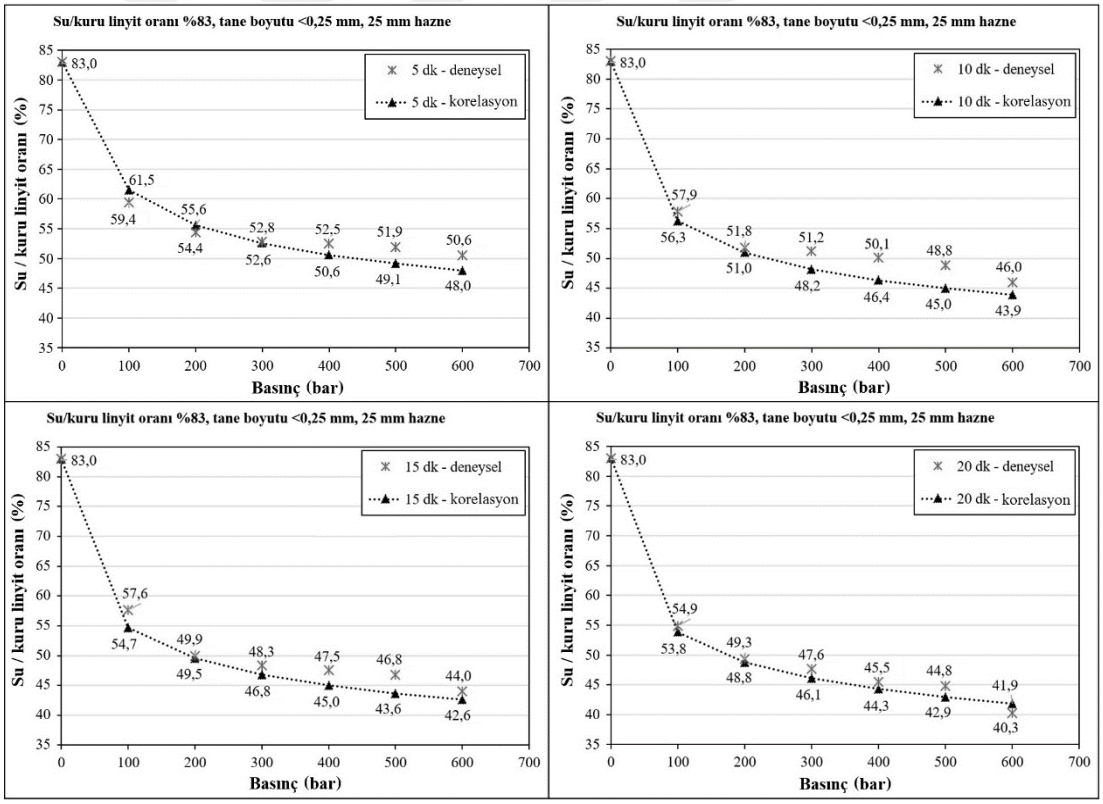
%104,1 su/kuru linyit oranına ve <0,25 mm tane boyutuna sahip linyit numuneleri ile 25 mm çapındaki numune yerleştirme haznesi kullanılarak yapılan deney sonuçları (2.deney seti) ile geliştirilen korelasyondan elde edilen sonuçların (Şekil 3.18) karşılaştırması Tablo 3.12'de özetlenmiştir.

Tablo 3.12. Deney ve korelasyon sonuçlarının karşılaştırması (2. Deney seti)

| Süre (dk) | En büyük sapma (%) | Sapmanın olduğu basınç (bar) | En küçük sapma (%) | Sapmanın olduğu basınç (bar) |
|---|---|---|---|---|
| **5** | 7,7 | 300 | 1,1 | 500 |
| **10** | 8,3 | 300 | 0,9 | 600 |
| **15** | 10,3 | 100 | 3,5 | 600 |
| **20** | 7,7 | 100 | 2,3 | 400 |

**Bulgular ve Tartışma**

- Etki süresinin artmasıyla birlikte 100 barda deney ile korelasyondan elde edilen sonuçlar arasındaki sapma miktarı önce artmış sonra azalmıştır ancak 100 barın üzerindeki basınçlarda sapma miktarında ciddi bir değişiklik görülmemiştir.
- 500 ve 600 barlık basınçlarda 15 ve 20 dakika etki sürelerinde deneylerden elde dilen su/kuru linyit oranları korelasyondan elde edilenlerden daha düşüktür.




Şekil 3.19. Deney ve korelasyon sonuçları (3. Deney seti)

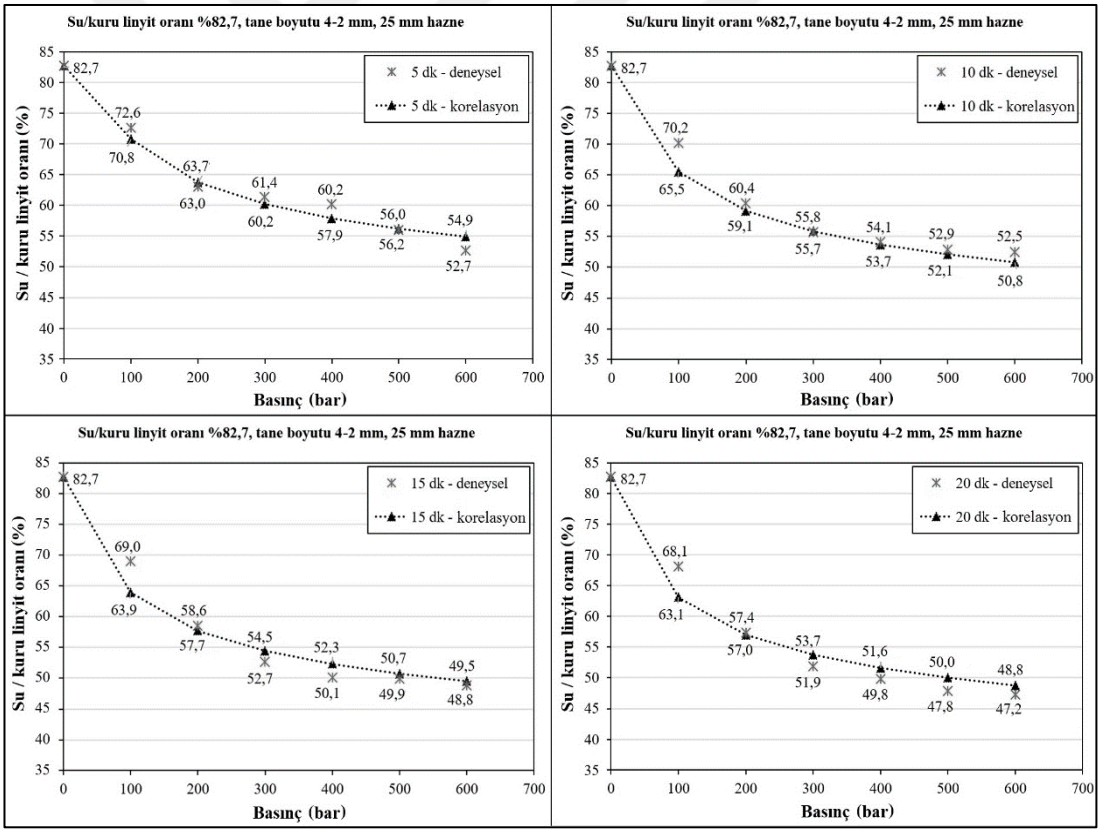
%83 su/kuru linyit oranına ve <0,25 mm tane boyutuna sahip linyit numuneleri ile 25 mm çapındaki numune yerleştirme haznesi kullanılarak yapılan deney sonuçları (3.deney seti) geliştirilen korelasyon ile elde edilen sonuçların (Şekil 3.19) karşılaştırması Tablo 3.13'de özetlenmiştir.

Tablo 3.13. Deney ve korelasyon sonuçlarının karşılaştırması (3. Deney seti)

| Süre (dk) | En büyük sapma (%) | Sapmanın olduğu basınç (bar) | En küçük sapma (%) | Sapmanın olduğu basınç (bar) |
|---|---|---|---|---|
| **5** | 5,4 | 500 | 0,4 | 300 |
| **10** | 7,8 | 500 | 0,7 | 200 |
| **15** | 6,7 | 500 | 0,8 | 200 |
| **20** | 4,2 | 500 | 1,1 | 200 |

**Bulgular ve Tartışma**

- Etki süresinin artmasıyla birlikte 100 barda deney ile korelasyondan elde edilen sonuçlar arasındaki sapma miktarı önce artmış sonra azalmıştır ancak 100 barın üzerindeki basınçlarda sapma miktarında ciddi bir değişiklik görülmemiştir.
- 500 ve 600 barlık basınçlarda 15 ve 20 dakika etki sürelerinde deneylerden elde dilen su/kuru linyit oranları korelasyondan elde edilenlerden daha düşüktür.
- Etki süresinin artmasıyla birlikte deney ile korelasyondan elde edilen sonuçlar arasındaki sapmalarda ciddi bir değişiklik görülmemiştir.
- Yalnızca 600 bar basınçta 20 dakika etki süresinde deneylerden elde dilen su/kuru linyit oranları korelasyondan elde edilenden daha düşüktür.




Şekil 3.20. Deney ve korelasyon sonuçları (4. Deney seti)

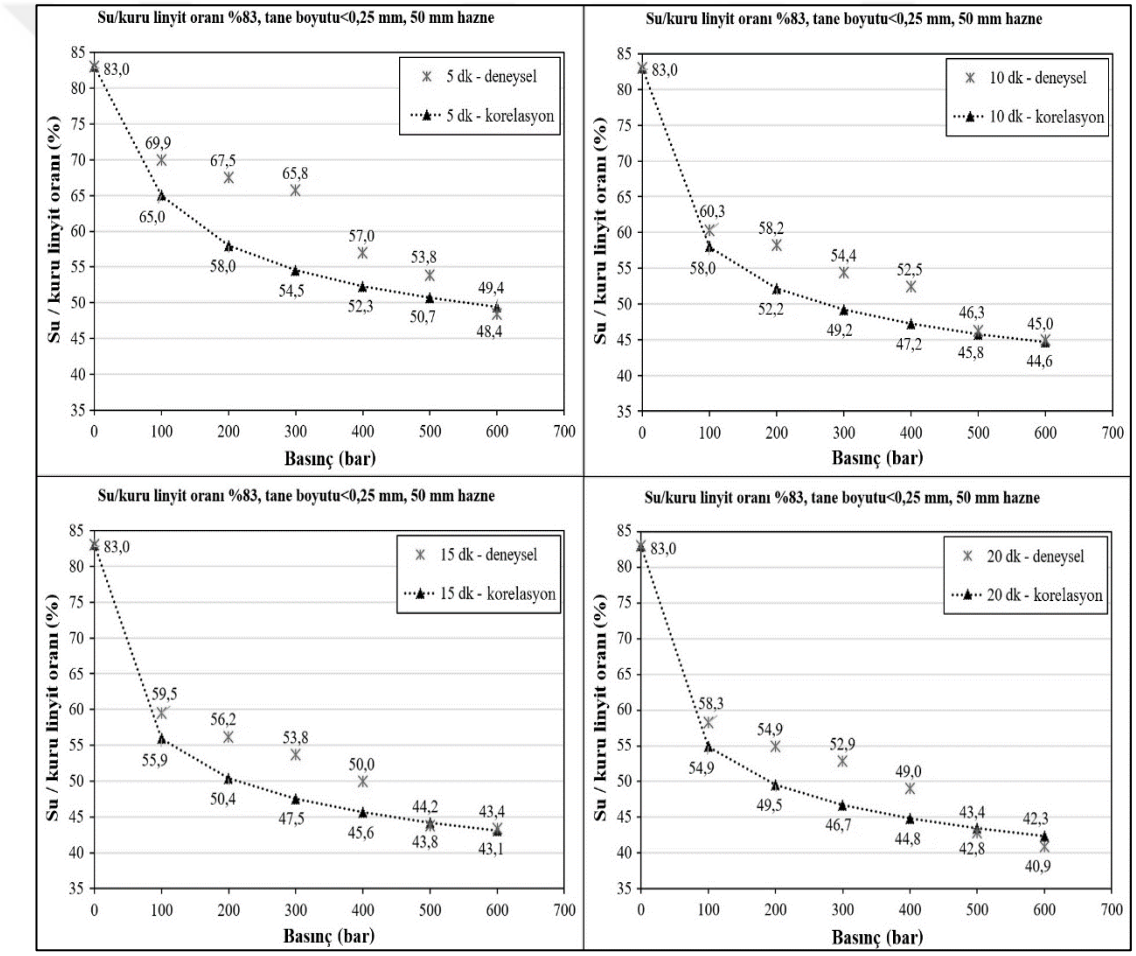
%82,7 su/kuru linyit oranına ve 4-2 mm tane boyutuna sahip linyit numuneleri ile 25 mm çapındaki numune yerleştirme haznesi kullanılarak yapılan deney sonuçları (4.deney seti) geliştirilen korelasyon ile elde edilen sonuçların (Şekil 3.20) karşılaştırması Tablo 3.14'de özetlenmiştir;

Tablo 3.14. Deney ve korelasyon sonuçlarının karşılaştırması (4. Deney seti)

| Süre (dk) | En büyük sapma (%) | Sapmanın olduğu basınç (bar) | En küçük sapma (%) | Sapmanın olduğu basınç (bar) |
|---|---|---|---|---|
| **5** | 4,2 | 400 | 0,4 | 500 |
| **10** | 6,7 | 100 | 0,3 | 300 |
| **15** | 7,3 | 100 | 1,4 | 600 |
| **20** | 7,4 | 100 | 0,8 | 200 |

**Bulgular ve Tartışma**

- Etki süresinin artışıyla birlikte deney sonuçları ile korelasyondan elde edilen sonuçlar arasındaki sapmalarda ciddi bir değişiklik görülmemiştir.




Şekil 3.21. Deney ve korelasyon sonuçları (5. Deney seti)

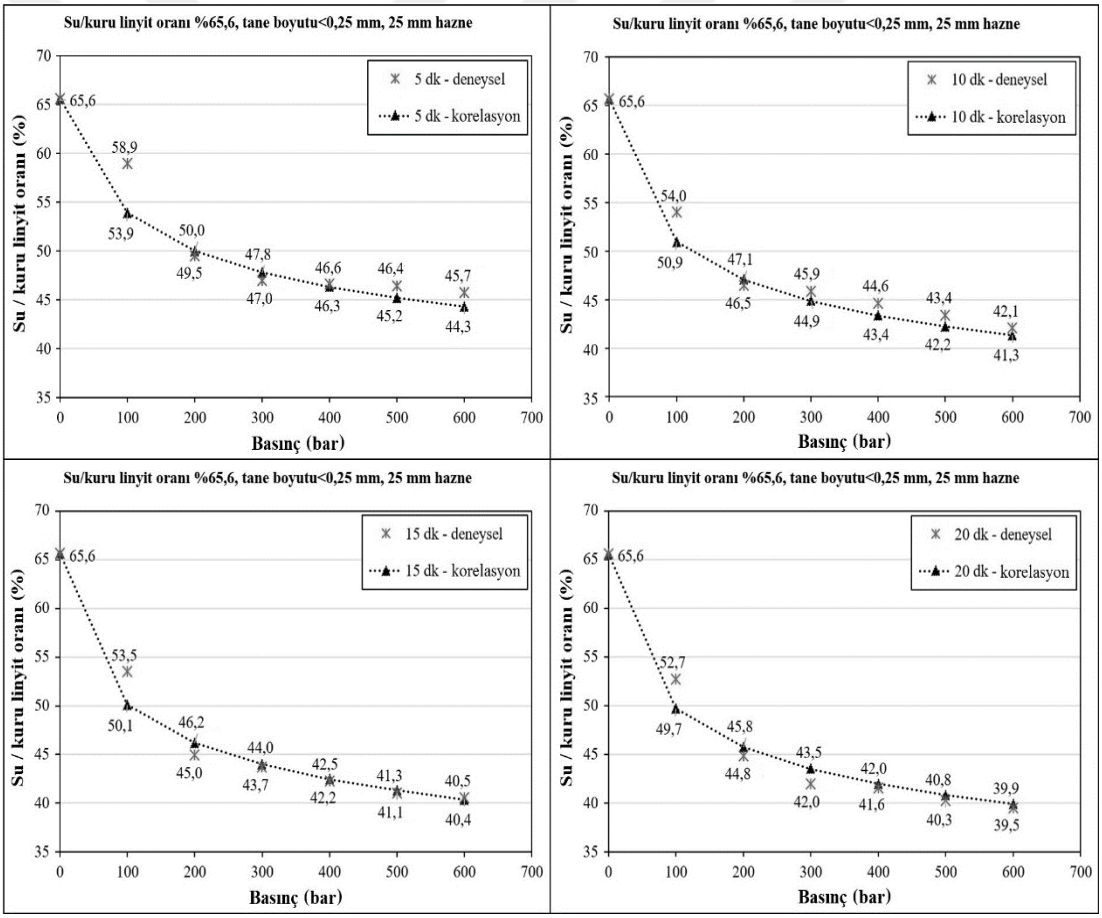
%83 su/kuru linyit oranına ve <0,25 mm tane boyutuna sahip linyit numuneleri ile 50 mm çapındaki numune yerleştirme haznesi kullanılarak yapılan deney sonuçları (5.deney seti) geliştirilen korelasyon ile elde edilen sonuçların (Şekil 3.21) karşılaştırması Tablo 3.15'da özetlenmiştir.

Tablo 3.15. Deney ve korelasyon sonuçlarının karşılaştırması (5. Deney seti)

| Süre (dk) | En büyük sapma (%) | Sapmanın olduğu basınç (bar) | En küçük sapma (%) | Sapmanın olduğu basınç (bar) |
|---|---|---|---|---|
| **5** | 17,1 | 300 | 2 | 600 |
| **10** | 10,4 | 200 | 0,7 | 300 |
| **15** | 11,6 | 300 | 0,7 | 600 |
| **20** | 11,7 | 300 | 1,3 | 500 |

**Bulgular ve Tartışma**

- Basıncın artmasıyla birlikte deney ile korelasyondan elde edilen sonuçlar arasındaki sapmalar önce artma ardından azalma eğilimindedir.

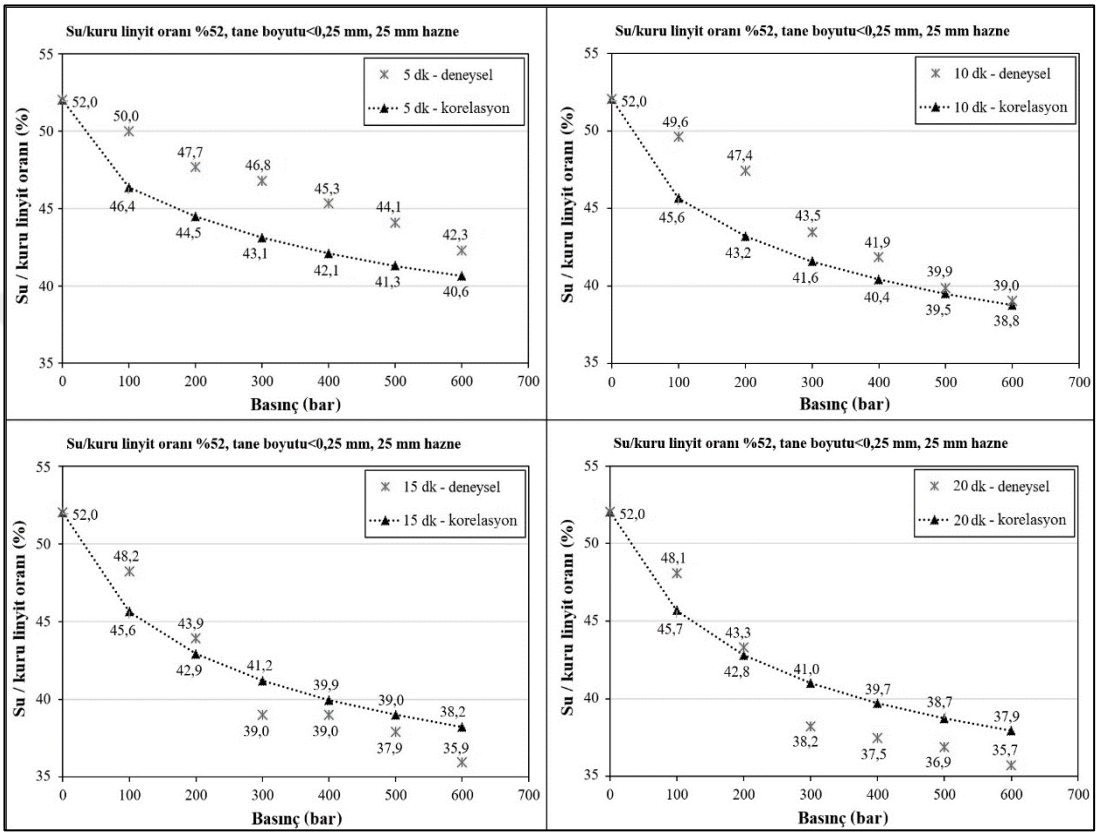



Şekil 3.22. Deney ve korelasyon sonuçları (6. Deney seti)

%65,6 su/kuru linyit oranına ve <0,25 mm tane boyutuna sahip linyit numuneleri ile 25 mm çapındaki numune yerleştirme haznesi kullanılarak yapılan deney sonuçları (6.deney seti) geliştirilen korelasyon ile elde edilen sonuçların (Şekil 3.22) karşılaştırması Tablo 3.16'de özetlenmiştir.

Tablo 3.16. Deney ve korelasyon sonuçlarının karşılaştırması (6. Deney seti)

| Süre (dk) | En büyük sapma (%) | Sapmanın olduğu basınç (bar) | En küçük sapma (%) | Sapmanın olduğu basınç (bar) |
|---|---|---|---|---|
| **5** | 8,5 | 100 | 0,6 | 400 |
| **10** | 5,7 | 100 | 1,3 | 200 |
| **15** | 6,3 | 100 | 0,4 | 500 |
| **20** | 5,7 | 100 | 1 | 400 ve 600 |




Şekil 3.23. Deney ve korelasyon sonuçları (7. Deney seti)

%52 su/kuru linyit oranına ve <0,25 mm tane boyutuna sahip linyit numuneleri ile 25 mm çapındaki numune yerleştirme haznesi kullanılarak yapılan deney sonuçları (7.deney seti) geliştirilen korelasyon ile elde edilen sonuçların (Şekil 3.23) karşılaştırması elde edilen sonuçlar Tablo 3.17'de özetlenmiştir.

Tablo 3.17. Deney ve korelasyon sonuçlarının karşılaştırması (7. Deney seti)

| Süre (dk) | En büyük sapma (%) | Sapmanın olduğu basınç (bar) | En küçük sapma (%) | Sapmanın olduğu basınç (bar) |
|---|---|---|---|---|
| **5** | 7,9 | 200 | 3,9 | 600 |
| **10** | 9 | 200 | 0,7 | 600 |
| **15** | 6,4 | 300 | 2,3 | 200 |
| **20** | 7,3 | 300 | 1,2 | 200 |

**Bulgular ve Tartışma**

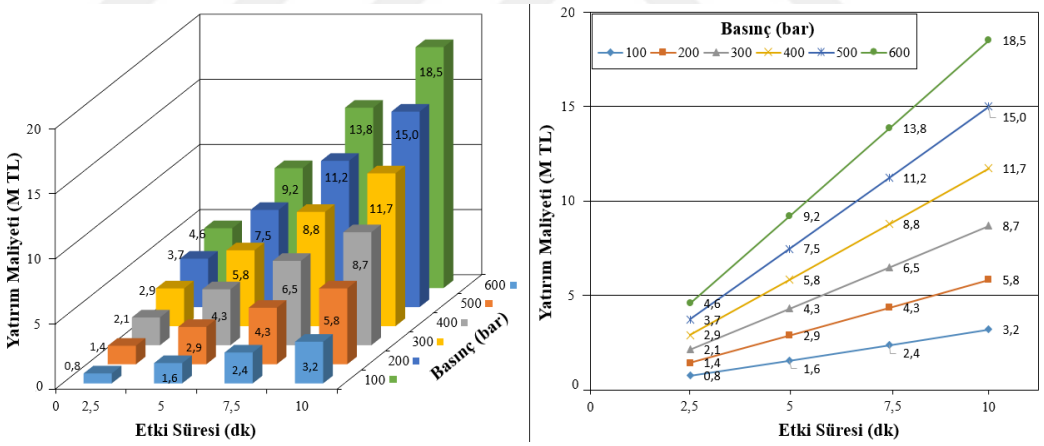
- 5 ve 10 dakika etki sürelerinde basıncın artmasıyla birlikte deney ile korelasyondan elde edilen sonuçlar arasındaki sapmalar önce artma ardından azalma eğilimindedir.

7 farklı deney seti ile yapılan toplam 144 deneyden elde edilen sonuçlar ile geliştirilen korelasyondan elde edilen sonuçlar arasındaki en yüksek ve en düşük ve ortalama sapma miktarı sırasıyla %17,3, %0,3 ve %5,2 olarak bulunmuştur. Yapılan literatür taramasında, geliştirilen korelasyonlar ile deney sonuçları arasında %30 civarında sapmalar [40, 45, 51] bulunduğu görülmüştür. Bu durum göz önünde bulundurulduğunda geliştirilen korelasyonun makul seviyede sapmalar ile hesaplamaya imkan tanıdığı değerlendirilmiştir.

### 3.3. Ekonomik Değerlendirme Sonuçları

Çalışma kapsamında yapılan ekonomik hesaplamalarda, deneylerden elde edilen farklı mekanik su azaltma oranlarını elde etmek için kullanılabilecek 24 farklı boyuttaki ekstruder sisteminin fizibilite çalışması yapılmıştır.

Şekil 3.24'de 24 farklı ekstruder sisteminin yatırım maliyetinin basınç ve etki süresine bağlı değişimi yer almaktadır.



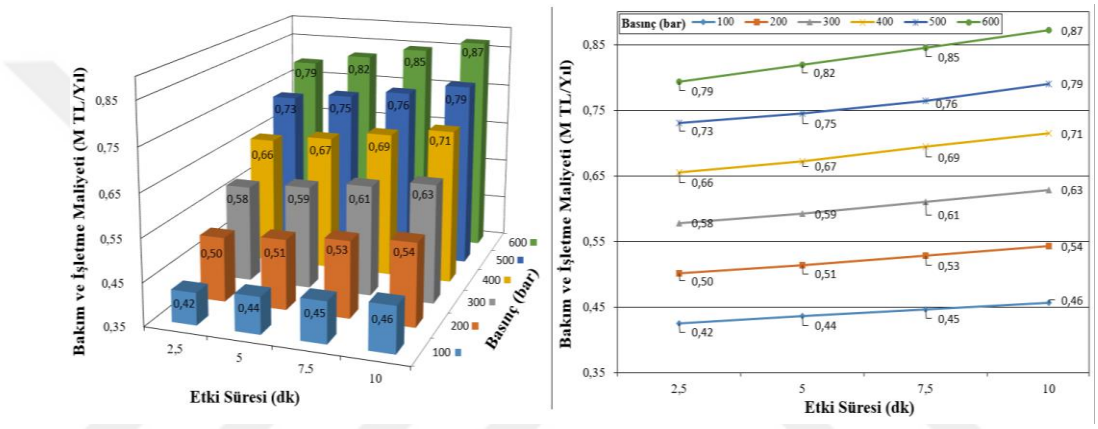

Şekil 3.24. Yatırım maliyetinin basınç ve etki süresine bağlı değişimi

Farklı basınçlar ve etki süreleri için yapılan hesaplardan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir;

- 2,5 dakika etki süresinde en düşük ve yüksek yatırım maliyeti sırasıyla 0,8 MTL ve 4,6 MTL'dir.
- 5 dakika etki süresinde en düşük ve yüksek yatırım maliyeti sırasıyla 1,6 MTL ve 9,2 MTL'dir
- 7,5 dakika etki süresinde en düşük ve yüksek yatırım maliyeti sırasıyla 2,4 MTL ve 13,8 MTL'dir.

- 10 dakika etki süresinde en düşük ve yüksek yatırım maliyeti sırasıyla 3,2 MTL ve 18,5 MTL'dir.
- Basınç artışı yatırım maliyetini önemli ölçüde arttırmaktadır (600 barda çalışan sistemin yatırım maliyeti 100 barda çalışan sistemden yaklaşık 6 kat daha fazladır). Basınç arttıkça maliyet eğrisinin eğimi de artmaktadır.
- Etki süresinin artışı ile yatırım maliyeti yaklaşık lineer olarak artmaktadır.

Şekil 3.25'de 24 farklı ekstruder sisteminin bakım ve işletme maliyetinin basınç ve etki süresine bağlı yıllık değişimi yer almaktadır.




Şekil 3.25. Bakım ve işletme maliyetinin basınç ve etki süresine bağlı değişimi

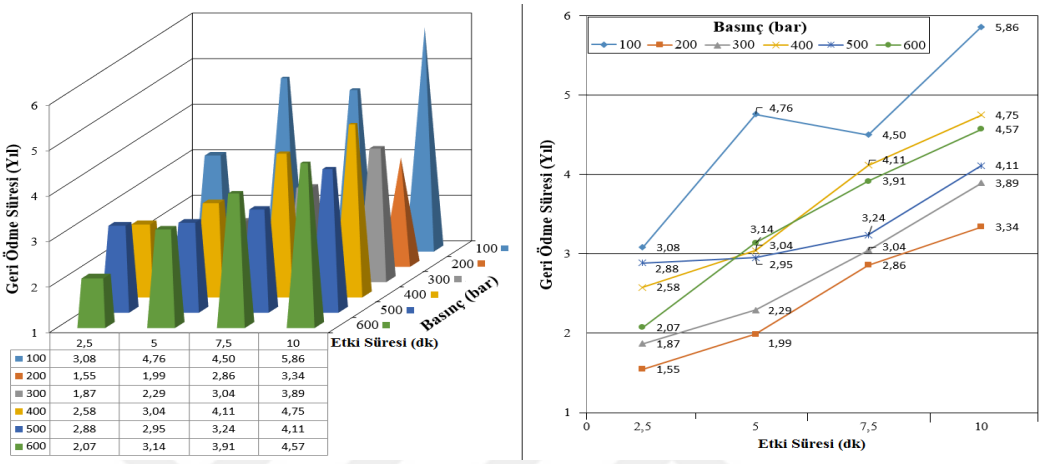
Farklı basınçlar ve etki süreleri için yapılan hesaplardan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir;

- 2,5 dakika etki süresinde en düşük ve yüksek yatırım maliyeti sırasıyla 0,42 MTL ve 0,79 MTL'dir.
- 5 dakika etki süresinde en düşük ve yüksek yatırım maliyeti sırasıyla 0,44 MTL ve 8,2 MTL'dir.
- 7,5 dakika etki süresinde en düşük ve yüksek yatırım maliyeti sırasıyla 0,45 MTL ve 8,5 MTL'dir.
- 10 dakika etki süresinde en düşük ve yüksek yatırım maliyeti sırasıyla 4,6 MTL ve 8,7 MTL'dir.
- Basınç ve etki süresinin artışı ile özelllikle elektrik sarfiyatının artmasından dolayı bakım ve işletme maliyetleri artmaktadır ve artışlar lineerdir.

Bu bölümde GÖS, NBD ve F/M yöntemleriyle elde edilen sonuçlarla ilgili bilgi verilecektir.

### 3.3.1. Geri ödeme süresi yöntemi

2.35 nolu denklem kullanılarak yapılan ekonomik hesaplamalar sonucunda Şekil 3.26'da yer alan, basınç ve etki süresine bağlı GÖS'nin değişimini gösteren iki ve üç boyutlu grafikler elde edilmiştir.




| | 2,5 | 5 | 7,5 | 10 |
|---|---|---|---|---|
| 100 | 3,08 | 4,76 | 4,50 | 5,86 |
| 200 | 1,55 | 1,99 | 2,86 | 3,34 |
| 300 | 1,87 | 2,29 | 3,04 | 3,89 |
| 400 | 2,58 | 3,04 | 4,11 | 4,75 |
| 500 | 2,88 | 2,95 | 3,24 | 4,11 |
| 600 | 2,07 | 3,14 | 3,91 | 4,57 |

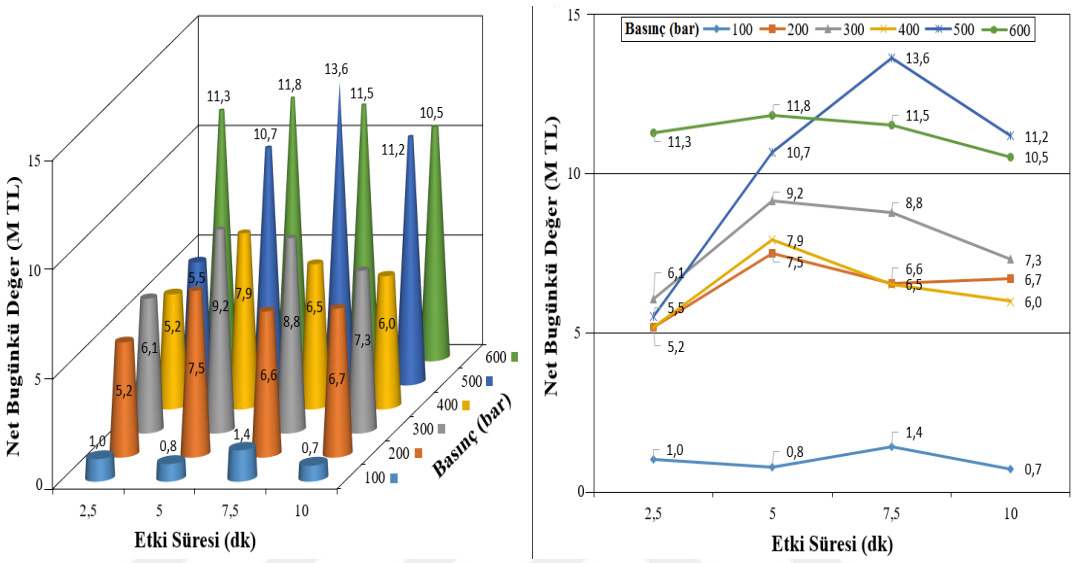
Şekil 3.26. GÖS'nin basınç ve etki süresine bağlı değişimi

GÖS yöntemi kullanılarak yapılan hesaplamalardan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir;

- 2,5 dakika etki süresinde en düşük ve yüksek GÖS sırasıyla 1,55 yıl ve 5,86 yıldır.
- 5 dakika etki süresinde en düşük ve yüksek GÖS sırasıyla 1,99 yıl ve 4,76 yıldır.
- 7,5 dakika etki süresinde en düşük ve yüksek GÖS sırasıyla 2,86 yıl ve 4,5 yıldır.
- 10 dakika etki süresinde en düşük ve yüksek GÖS sırasıyla 3,34 yıl ve 5,86 yıldır.
- Çalışma yapılan tüm etki süresi ve basınçlarda en düşük GÖS 200 bar basınçta elde edilmiştir. 200 bar basınçtaki en düşük GÖS ise en kısa etki süresi olan 2,5 dakikada elde edilmiştir.
- Çalışma yapılan tüm etki süresi ve basınçlarda en yüksek GÖS 100 bar basınçta elde edilmiştir. 100 bar basınçtaki en yüksek GÖS ise en uzun etki süresi olan 10 dakikada elde edilmiştir.
- 200 – 300 bar basınç ve 2,5-5 dakika etki süresi aralığındaki çalışma şartlarında en kısa GÖS elde edilmektedir. Dolayısıyla GÖS metodu ile elde edilen optimum sistem bu aralıktadır ve en ideal koşul 200 bar basınç ve 2,5 dakika etki süresidir.
- Uygulanan basınç 300 barın, etki süreside de 5 dakikanın üzerine çıktığında yatırımın GÖS süresi uzamaktadır. Aynı şekilde basınç 200 bar'ın altına indiğinde GÖS süresi uzamaktadır.

### 3.3.2. Net bugünkü değer yöntemi

2.36 nolu denklem kullanılarak yapılan ekonomik hesaplamalar sonucunda Şekil 3.27'de yer alan, basınç ve etki süresine bağlı NBD'nin değişimini gösteren iki ve üç boyutlu grafikler elde edilmiştir.



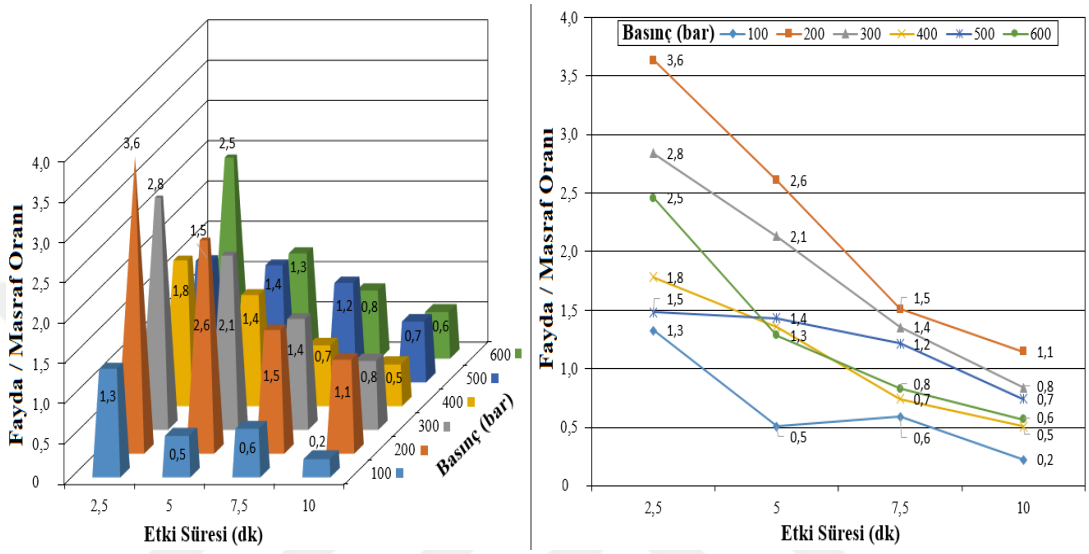

Şekil 3.27. Net bugünkü değerin basınç ve etki süresine bağlı değişimi

NBD yöntemi kullanılarak yapılan hesaplamalardan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir;

- 2,5 dakika etki süresinde en düşük ve yüksek net kar sırasıyla 1 MTL ve 11,3 MTL'dir.
- 5 dakika etki süresinde en düşük ve yüksek net kar sırasıyla 0,8 MTL ve 11,8 MTL'dir.
- 7,5 dakika etki süresinde en düşük ve yüksek net kar sırasıyla 1,4 MTL ve 13,6 MTL'dir.
- 10 dakika etki süresinde en düşük ve yüksek net kar sırasıyla 0,7 MTL ve 11,2 MTL'dir.
- Etki süresinin artışı NBD'yi önce arttırmış sonra azaltmıştır.
- En yüksek NBD'ler yine en yüksek yatırım maliyetinin olduğu 500 ve 600 bar basınçlarda elde edilmiştir. Ancak bu durum tek başına en ekonomik sistemin belirlenmesi için yeterli değildir. Literatürde de bahsedildiği yüksek yatırım yapılan projeler daha yüksek getiri sağlamaktadır. Bu tarz bir durumda daha sağlıklı değerlendirme yapabilmek için F/M oranları da dikkate alınmalıdır.

### 3.3.3. Fayda/masraf oranı

2.38 nolu denklem kullanılarak yapılan ekonomik hesaplamalar sonucunda Şekil 3.28'de yer alan basınç ve etki süresine bağlı F/M oranının değişimini gösteren iki ve üç boyutlu grafikler elde edilmiştir.




Şekil 3.28. Fayda/masraf oranının basınç ve etki süresine bağlı değişimi

F/M oranı yöntemi kullanılarak yapılan hesaplamalardan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir;

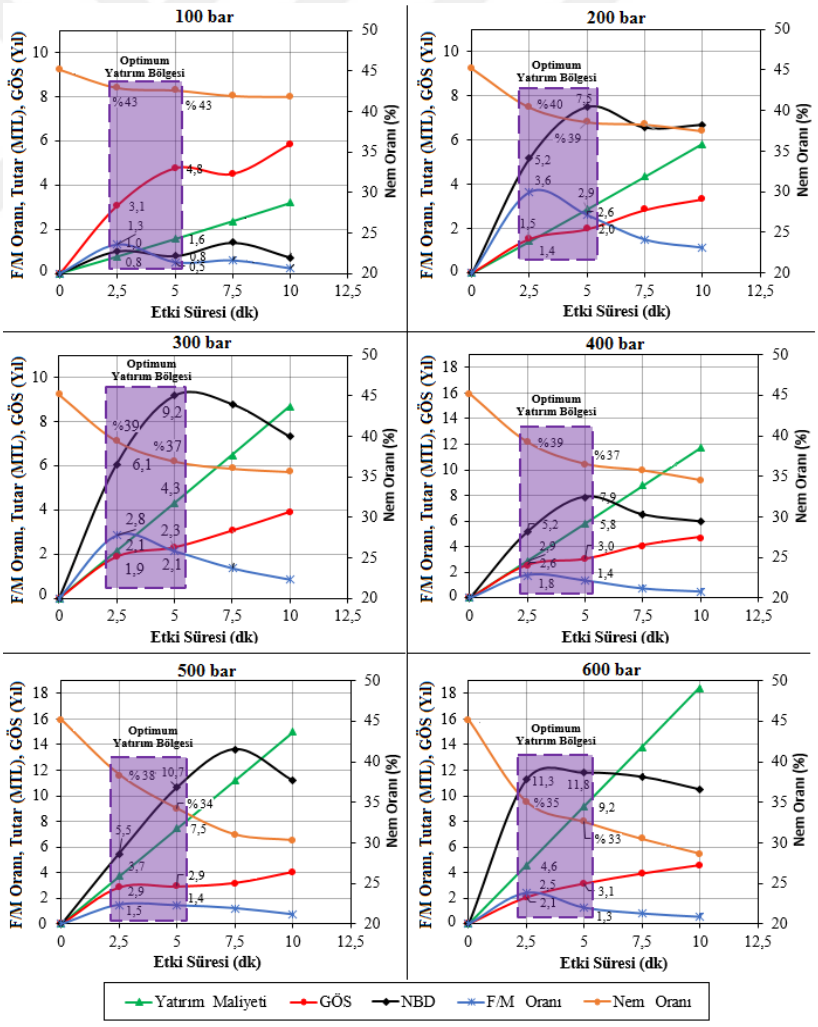
- 2,5 dakika etki süresinde en düşük ve yüksek fayda/maliyet oranı sırasıyla 1,3 ve 3,6'dır.
- 5 dakika etki süresinde en düşük ve yüksek fayda/maliyet oranı sırasıyla 0,5 ve 2,6'dır.
- 7,5 dakika etki süresinde en düşük ve yüksek fayda/maliyet oranı sırasıyla 0,6 ve 1,5'dır.
- 10 dakika etki süresinde en düşük ve yüksek fayda/maliyet oranı sırasıyla 0,2 ve 1,1'dır.
- Tüm etki süreleri ve basınçlar içinde en yüksek F/M oranı 200 bar basınçta elde edilmiştir.
- Tüm etki süreleri ve basınçlar içinde en düşük F/M oranı 100 bar basınçta elde edilmiştir.
- Tüm etki süreleri ve basınçlar içinde 200 bar ve 300 bar'daki F/M oranları birbirine yakındır.

### 3.3.4. Kullanılan ekonomik değerlendirme yöntemlerinin değerlendirmesi

Yatırım maliyetinin, NBD'nin, GÖS'nin, nem ve F/M oranının etki süresine ve basınca bağlı değişimi karşılaştırmalı olarak Şekil 3.29'da verilmiştir. Görüldüğü üzere 6 farklı basıncın tamamında etki süre 5 dakikanın üzerine çıktığında GÖS uzamakta ve F/M oranı azalmaktadır. Dolayısıyla 5 dakika etki süresinin üzerine çıkılması uygun değildir.

En ekonomik yatırımın GÖS'si 1,55 yıl ile en düşük olan, 1,4 MTL yatırım tutarı gerektiren, 5,2 MTL NBD'e sahip ve 3,6 F/M oranı olan 200 bar basınçta ve 2,5 dakika etki süresinde çalışan ekstruder sistemi olduğu görülmektedir.

Optimum çalışma aralığı 200-300 bar basınç ve 2,5-5 dakika etki süresi aralığındadır




Şekil 3.29. Yatırım maliyetinin, GÖS'nin, nem ve F/M oranın etki süresine ve basınca bağlı değişim

# 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Mekanik su azaltma yöntemi kullanılarak Ilgın linyitinin mekanik su azaltma davranışının incelendiği bu tez çalışmasında mekanik su azaltmada etkili olan parametrelerin herbiri (basınç, etki süresi, başlangıç su/kuru linyit oranı, tane boyutu, numune haznesi çapı ve kalınlık) deneysel olarak incelenmiş ve mekanik su azaltma yüzdesi hesaplanmıştır. Ayrıca deneylerde kullanılan tartı ve manonetrenin özelliklerine bağlı olarak belirsizlik hesabı yapılmış ve elde belirsizlik değerlerinin deney sonuçlarına etkisi değerlendirilmiştir. Deney sonuçları kullanılarak mekanik yöntemle suyun azaltması sonrası su/kuru linyit oranını hesaplama imkanı veren bir korelasyon geliştirilmiştir. Buna ilaveten deney linyitinin yüzey yapısı SEM yöntemi ile incelenerek mekanik su azaltmanın yüzey yapısını etkisi incelenmiştir. Buna ilaveten deneyler sonucunda elde edilen mekanik su azaltma yüzdelerini sağlama imkanı bulunan ekstruder sisteminin fizibilite çalışması GÖS, NBD ve F/M oranı yöntemleri kullanılarak yapılmıştır. Ekonomik hesaplar ve esktruder sistemi hesapları için ısıl değer hesabı, sıkıştırma işi hesabı da yapılmıştır. Tez çalışından elde edilen sonuçlar aşağıda ayrı ayrı başlıklar altında sıralanmıştır.

Ön deneysel çalışmalar ve karakterizasyon çalışmalarından elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmaktadır.

- Linyitin tane boyutu küçüldükçe depolama esnasında buharlaşan su miktarı ve yoğunluk artmaktadır.
- 100 bardan düşük basınçlarda kayda değer su çıkışı olmamaktadır ve 600 bardan yüksek basınçlardaki su çıkışı ile 600 barda elde edilen su çıkışı arasında kayda değer bir farklılık bulunmamaktadır.
- Kademeli basınç artışının mekanik su azaltma üzerinde önemli bir etkisi yoktur.
- Ilgın linyiti pürüzlü, düzensiz ve kaba bir yüzey yapısına sahiptir. Basıncın etkisiyle gözenek yapısı deforme olmakta ve basınç arttıkça pürüzlülük azalarak daha küçük gözenekli yüzey yapısı oluşmaktadır.
- Terazi ve monometreden kaynaklanan belirsizlikler deneysel sonuçlarının analizine etki edecek seviyede değildir.Mekanik su azaltma üzerinde en etkili olan

parametreler basınç, etki süresi, su/kuru linyit oranı, tane boyutu, numune haznesi çapı ve kalınlıktır. İncelenen deney parametlerinden elde edilen sonuçla aşağıda sıralanmaktadır.

- Basınç artışı ile birlikte mekanik su azaltma miktarı atmaktadır ancak bu artış azalma eğilimindedir.
- 5 dakikadan kısa ve 20 dakikadan uzun etki sürelerinde yapılan deneylerde çok düşük oranda su çıkışı görülmektedir.
- Su azaltma miktarındaki değişim zamana göre basınçtan daha çok etkilenmektedir.
- Linyitin su içeriği arttığında düşük basınçlarda dahi yüksek oranda mekanik su azaltma sağlanabilirken su içeriği azaldığında düşük basınçlarda ancak çok düşük oranda mekanik su azaltma sağlanabilmektedir.
- Linyitin su içeriği azaldığında düşük basınçlarda etki süresinin arttırılması mekanik su azaltmayı çok düşük oranda etkilemektedir.
- Su/kuru linyit oranı düştükçe ilave mekanik su azaltma için basıncın ve etki süresinin arttırılması gerekmektedir.
- Sabit basınçta etki süresinin artışı ile ince taneli linyitte daha yüksek oranda mekanik su azaltma artışı sağlanmaktadır.
- Tane boyutunun mekanik su azaltmaya olan etkisi zamandan çok basınçtan etkilenmektedir.
- 16-4 mm ve 4-2 mm aralığındaki linyitlerin mekanik su azaltma miktarı birbirine yakındır. Dolayısıyla tane boyutunun 4 mm'nin üzerine çıkmasının mekanik su azaltma üzerinde önemli bir etkisi yoktur.
- Tane boyutu belirli bir ölçüye kadar büyüdükçe (<250 μm'den 4 mm'ye kadar) mekanik su azaltma miktarı azalmaktadır.
- Linyitin öğütülmesi esnasında gözenekler parçalandığından düşük basınçlarda dahi daha yüksek oranda mekanik su azaltma sağlanmaktadır.
- Numune haznesi çapının artması düşük basınçlarda mekanik su azaltmayı azaltırken basınç arttıkça mekanik su azaltmayı arttırmaktadır.
- Numune haznesine konulan linyit kalınlığının artması ile suyun tahliyesi için gereken mesafe artarak mekanik su azaltma miktarını azaltmaktadır.

Geliştirilen korelasyondan elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmaktadır.

- Basıncın artmasıyla birlikte deney ile korelasyondan elde edilen sonuçlar arasındaki sapmalar önce artma ardından azalma eğilimindedir.
- Yüksek su oranında etki süresinin artışıyla birlikte deney ile korelasyon arasındaki sapma miktarı artmaktadır.

Ekonomik hesaplamalardan elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmaktadır.

- En kısa GÖS'leri 200 – 300 bar basınç ve 2,5-5 dakika aralığındadır. En kısa GÖS 200 bar basınç ve 2,5 dakika etki süresinde elde edilmektedir.
- 300 barın ve 5 dakika etki süresinin üzerine çıkıldığında ve 200 bar'ın altına inildiğinde yatırımın GÖS süresi uzamaktadır.
- Basınç artışı ile yatırım maliyeti ve maliyet eğrisinin eğimi artmaktadır.
- Etki süresinin arıtışı NBD'yi önce arttırmış sonra azaltmıştır.
- En yüksek NBD'ler yine en yüksek yatırım maliyetinin olduğu 500 ve 600 bar basınçlarda elde edilmiştir. Ancak ekonomik değerlendirmede NBD tek başına yeterli değildir ve F/M oranı sonucu da dikkate alınmalıdır.
- Tüm etki süreleri ve basınçlar içinde en düşük F/M oranı 100 bar basınçta elde edilmiştir.
- Ekonomik değerlendirme sonucunda optimum çalışma aralığı 200-300 bar arasında ve etki süresi ise 2,5-5 dakika aralığında bulunmuştur.
- En ekonomik yatırımın GÖS'si en düşük ve F/M oranı en yüksek olan 200 bar basınç ve 2,5 dakika etki süresinde çalışan ekstruder sistemi yatırımıdır.

Tez çalışmasının sonucunda ülkemizdeki yüksek su içeriğine sahip linyitlerin kalitesinin mekanik su azaltma ile önemli ölçüde arttırabileceği görülmüştür. Dolayısıyla vidalı ekstruder tipi makinalarla sürekli üretim yapma imkanı sağlanabilirse ülkemizdeki kaynakların kalitesi arttırılabilir, ekonomik ömrü uzatılabilir ve ülkemizin enerji kaynaklı cari açığının kapanmasına katkı sağlanabilir.

Termik santrallarda, özellikle mevsimsel yağışlar sonucu linyitin su içeriği artarak bunkerlerden besleme yapılamamaktadır. Bu durum duruşlara neden olmakta veya yüksek miktarda yardımcı yakıt kullanımına yol açmaktadır. Dolayısıyla bu gibi sorunların ortadan kaldırılmasına veya azaltılmasına katkı sağlanabilir.

Bu çalışmanın geliştirilmesi için sürekli ürün alma imkanı olan ekstruder sistemlerinin linyitteki suyu mekanik olarak azaltmak için denenmesi gerekmektedir. Ayrıca ülkemizdeki birkaç farklı nem içeriğine sahip linyitlerin de mekanik su azaltma davranışının incelenmesinde fayda vardır. Bir diğer konu ise mekanik su azaltma esnasında linyitten çıkan suyun içeriği incelenerek, kozmetik sanayisi gibi farklı sektörlerde kullanım alanı araştırılabilir bu sayede çıkan sudan da katma değer elde edilerek sistemin karlılığı arttırılabilir.

## KAYNAKLAR


[1] TKİ 2015 Kömür (Linyit) Sektör Raporu, *Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu*, Mayıs 2016.

[2] Barzegar R., Yozgatligil A., Atimtay A. T., Combustion Characteristics of Turkish Lignites at Oxygen-Enriched and Oxy-Fuel Combustion Conditions, *Journal of the Energy Institute,* 2019, **92**(5), 1440-1450.

[3] Engin B., Atakül H., Ünlü A., Olgun Z., CFB Combustion of Low-Grade Lignites: Operating Stability and Emissions, *Journal of the Energy Institute,* 2019, **92**(3), 542-553.

[4] Rao Z., Zhao Y., Huang C., Duan C., He J., Recent developments in Drying and Dewatering for Low Rank Coals, *Progress in Energy and Combustion Science,* 2015 ,**46**, 1-11.

[5] Kang T. J., Namkung H., Jang D. H., Kim H. T., Experimental Study on Different Heating Rate Kinetics of Indonesian and Inner Mongolian Low Rank Coal for Catalytic Gasification, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry,* 2014, **20**(4), 2095-2102.

[6] Nikolopoulos N., Violidakis I., Karampinis E., Agraniotis M., Bergins C., Grammelis P., Kakaras E., Report on Comparison Among Current Industrial Scale Lignite Drying Technologies (A Critical Review of Current Technologies), *Fuel,* 2015, **155**, 86-114.

[7] Gwak I. S., Gwak Y. R., Kim Y. B., Lee S. H., Drying Characteristics of Low Rank Coals in a Pressurized Flash Drying System, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry,* 2018, **57**, 154-159.

[8] Yu J., Tahmasebi A., Han Y., Yin F., Li X., A Review on Water in Low Rank Coals: The Existence, Interaction with Coal Structure and Effects on Coal Utilization, *Fuel Processing Technology,* 2013, **106**, 9-20.

[9] Sun B., Yu J., Tahmasebi A., Han Y. An Experimental Study on Binderless Briquetting of Chinese Lignite: Effects of Briquetting Conditions, *Fuel Processing Technology*, 2014, **124**, 243-248.

[10] Cheng J., Zhou F., Wang X., Liu J., Wang Z., Zhou J., Cen K., Physicochemical Properties of Wastewater Produced from the Microwave Upgrading Process of Indonesian Lignite, *Fuel,* 2015, **158**, 435-442.

[11] TKİ Türkiye Kömür İşletmeleri Faaliyet Raporu 2017, *Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu,* 2018.

[12] Niksa S., Krishnakumar B., Predicting the steam drying behavior of brown coals and lignites, *Fuel*, 2015, **159**, 345-353.

[13] Xianchun L., Hui S., Qi W., Meesri C., Terry W. A. L. L., Jianglong Y. U., Experimental Study on Drying and Moisture Re-Adsorption Kinetics of an Indonesian Low Rank Coal, *Journal of Environmental Sciences*, 2009, **21**, S127-S130.

[14] Karthikeyan M., Kuma J. V., Hoe C. S., Ngo D. L. Y., Factors Affecting Quality of Dried Low-Rank Coals, *Drying Technology*, 2007, **25**(10), 1601-1611.

[15] Wu J., Liu J., Zhang X., Wang Z., Zhou J., Cen K., Chemical and Structural Changes in XiMeng Lignite and Its Carbon Migration During Hydrothermal Dewatering, *Fuel*, 2015, **148**, 139-144.

[16] Fujitsuka H., Ashida R., Miura K., Upgrading and Dewatering of Low Rank Coals Through Solvent Treatment at Around 350 C and Low Temperature Oxygen Reactivity of the Treated Coals, *Fuel*, 2013, **114**, 16-20.

[17] Liao J., Fei Y., Marshall M., Chaffee A. L., Chang L., Hydrothermal Dewatering of a Chinese Lignite and Properties of the Solid Products, *Fuel*, 2016, **180**, 473-480.

[18] Tahmasebi A., Yu J., Han Y., Yin F., Bhattacharya S., Stokie D., Study of Chemical Structure Changes of Chinese Lignite Upon Drying in Superheated Steam, Microwave, and Hot Air, *Energy & Fuels*, 2012, **26**(6), 3651-3660.

[19] Karthikeyan M., Zhonghua W., Mujumdar A. S., Low-Rank Coal Drying Technologies - Current Status and New Developments, *Drying Technology*, 2009, **27**(3), 403-415.

[20] Allardice D. J., Clemow L. M., Favas G., Jackson W. R., Marshall M., Sakurovs R., The Characterisation of Different Forms of Water in Low Rank Coals and Some Hydrothermally Dried Products, *Fuel*, 2003, **82**(6), 661-667.

[21] Feng X., Zhang C., Tan P., Zhang X., Fang Q., Chen G. Experimental Study of the Physicochemical Structure and Moisture Readsorption Characteristics of Zhaotong Lignite After Hydrothermal and Thermal Upgrading, *Fuel*, 2016, **185**, 112-121.

[22] Bergins C., Kinetics and Mechanism During Mechanical/Thermal Dewatering of Lignite, *Fuel*, 2003, **82**(4), 355-364.

[23] TTK Taşkömürü Sektör Raporu, *T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı*, 2016.

[24] TKİ 2017 Yılı Taşkömürü Sektör Raporu, *Türkiye Taşkömürü Kurumu*, 2018.

[25] Odası T. M. M., Türkiye'nin Enerji Görünümü, *Oda Raporu*, 2012, Ankara, Yayın Numarası MMO/588, 2.

[26] TKİ 2011 Kömür Sektör Raporu (Linyit), *TKİ*, 2011.

[27] Ziypak M., Türkiye'de Kömürün Görünümü ve Çevresel Tedbirler - Marmaris, Fosil Yakıtlı Santralların Mevcut Promlemleri ve Çözümleri Çalıştayı, Kasım 2015.

[28] Güneş C., Linyit Kömürü Sahalarının Ekonomiye Kazandırılması, *Deloitte Türkiye*, 2012, 44.

[29] Kılıç O., Acarkan B., Ay S., FGD Investments as Part of Energy Policy: a Case Study for Turkey, *Energy Policy*, 2013, **62**, 1461-1469.

[30] Sönmez Ö., Kömür ve Maseral Gruplarının Çeşitli Çözücülerde Şişme Davranışları ve Sıvılaşma Üzerine Etkileri, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Ensititüsü, Çukurova Üniversitesi, 2006.

[31] http://www.uky.edu/KGS/coal/coal-diagram-download.php, (Ziyaret Tarihi : 18.03.2019)

[32] Kadioğlu Y., Varamaz M., The Effect of Moisture Content and Air-Drying on Spontaneous Combustion Characteristics of Two Turkish Lignitesa, *Fuel*, 2003, **82**(13), 1685-1693.

[33] Nie B., Liu X., Yang L., Meng J., Li X., Pore Structure Characterization of Different Rank Coals Using Gas Adsorption and Scanning Electron Microscopy, *Fuel*, 2015, **158**, 908-917.

[34] Pant L. M., Huang H., Secanell M., Larter S., Mitra S. K., Multi Scale Characterization of Coal Structure for Mass Transport, *Fuel*, 2015, **159**, 315-323.

[35] Heper Y., *Buhar Santralları: Teorisi ve Uygulaması*, Türkiye Elektrik Kurumu. Eğitim Başkanlığı Yayınları, 1979.

[36] Hasan Ş., B. D. M. T. Ç. 10 t/h Kapasiteli Helezon Konveyör Tasarimi, 2003

[37] Aybers N., Şahin B. Mühendislik Ekonomisinin Esasları. Şimdiki Değer Metodu: Enerji Maliyeti, *Yıldız Teknik Üniversitesi Yayını,* 1995, 38-45.

[38] Zhang Y., Dong J., Guo F., Chen X., Wu J., Miao Z., Xiao L., Effects of the Evolutions of Coal Properties During Nitrogen and MTE Drying Processes on the Spontaneous Combustion Behavior of Zhaotong Lignite, *Fuel*, 2018, **232**, 299-307.

[39] Bergins C., Hulston J., Strauss K., Chaffee A. L., Mechanical/Thermal Dewatering of Lignite. Part 3: Physical Properties and Pore Structure of MTE Product Coals, *Fuel*, 2007, **86**(1-2), 3-16.

[40] Charrière D., Behra P., Water Sorption on Coals, *Journal of Colloid and Interface Science*, 2010, **344**(2), 460-467.

[41] Zhang Y., Wu J., Ma J., Wang B., Shang X., Si C., Study on Lignite Dewatering by Vibration Mechanical Thermal Expression Process, *Fuel Processing Technology*, 2015, **130**, 101-106.

[42] Deevi S. C., Suuberg E. M., Physical changes accompanying drying of western US lignites, *Fuel,* 1987, **66**(4), 454-460.

[43] Favas G., Jackson W. R., Hydrothermal Dewatering of Lower Rank Coals. 1. Effects of Process Conditions on the Properties of Dried Product, *Fuel,* 2003, **82**(1), 53-57.

[44] Hayta U. Y., Canel A. M., Linyit–Bitümlü Şist Karışımlarının Pirolizi, Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Anabilim Dalı, 2010.

[45] Huang Q., Zhou G., Yu B., Wang S., Chi Y., Yan J., Quantitative Model for Predicting the Desorption Energy of Water Contained in Lignite, *Fuel,* 2015, **157**, 202-207.

[46] Hüttinger K. J., Michenfelder A. W., Molecular structure of a brown coal, *Fuel,* 1987, **66**(8), 1164-1165.

[47] Uygur M., Yatırım Projesi Değerlendirme Yöntemleri, *Demiryolu Mühendisliği,* (2), 56-59.

[48] Li S., Tang D., Xu H., Yang Z., Advanced Characterization of Physical Properties of Coals with Different Coal Structures by Nuclear Magnetic Resonance and X-Ray Computed Tomography, *Computers & Geosciences,* 2012, **48**, 220-227.

[49] Mujumdar A. S., *Handbook of industrial drying,* CRC press, 2014.

[50] Sato Y., Kushiyama S., Tatsumoto K., Yamaguchi H., Upgrading of Low Rank Coal with Solvent, *Fuel Processing Technology,* 2004, **85**(14), 1551-1564.

[51] Stakić M., Cvetinović D., Škobalj P., Spasojević V., An Initial Study on Feasible Treatment of Serbian Lignite Through Utilization of Low-Rank Coal Upgrading Technologies, *Chemical Engineering Research and Design,* 2014, **92**(11), 2383-2395.

[52] Zhang Y., Dong J., Guo F., Chen X., Wu J., Miao Z., Experimental Study on the Effects of Drying Methods on the Stabilities of Lignite, *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2018, *26*(7), 1545-1554.

[53] Basınç Metrolojisi Eğitimi Dokümanı-I, *Analog ve Sayısal Göstergeli Basınç Ölçerlerin ve Basınç Dönüştürücülerinin Kalibrasyonu,* 2006, TÜBİTAK-UME, Gebze KOCAELİ.

[54] BIPM I., IFCC I., ISO I. (2008). Iupap and oiml 2008. Evaluation of Measurement Data - *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, 167

# EKLER

## Ek-A Deneysel çalışmalarda kullanılan cihazların teknik özellikleri

Tablo A.1. Kullanılan cihazların teknik özellikleri

| Cihaz Adı/Markası | Cihaz Özelliği | Fonksiyon ve Özellikler | |
|---|---|---|---|
| **Retsch BB100** | Çeneli Kırıcı | Uygulamalar | Kaba ve ön öğütme |
| | | Besleme malzemesi | Sert, kırılgan, orta sert, sert |
| | | Boyut küçültme prensibi | Basınç |
| | | Malzeme giriş büyüklüğü | < 50 mm |
| | | Çıkış büyüklüğü | < 4 mm |
| | | Öğütücü malzemesi | Mangan çeliği, paslanmaz çelik, tungsten ... |
| | | Çene genişliği | 60 x 60 mm |
| | | Çene aralığı genişliği ayarı | 0 - 20 mm |
| | | Motor gücü | 0.75 kW |
| | | G x Y x D kapalı | 320 x 960 x 800 mm |
| | | Net ağırlık | ~ 137 kg |
| | | Standartlar | CE |
| **Utest** | Tel örgülü elek | Standartlar | TS EN 933-2; ISO 565, 3310-1, 3310-2; ASTM E11, 323 |
| **Retsch AS200** | Titreşimli Elek sallayıcı | Uygulamalar | Ayırma, fraksiyon, partikül boyutu belirleme |
| | | Besleme malzemesi | Tozlar, dökme malzeme, süspansiyonlar |
| | | Ölçüm aralığı | 20 µm - 25 mm |
| | | Eleme hareketi | Açısal ivme ile fırlatma hareketi |
| | | Parti boyutu / besleme miktarı | 3 kg |
| | | Maksimum elek seti ağırlığı | 4 kg |
| | | Genlik | Digital, %1 - 100 (0 - 3 mm) |
| | | Uygun elek ebatları | 100 mm / 150 mm / 200 mm / 203 mm |
| | | Maksimum toplam elek yüksekliği | 510 mm |
| | | G x Y x D | 417 x 212 x 384 mm |
| | | Net ağırlık | ~ 35 kg |
| | | Standartlar | CE |
| **Micrometrics AccuPyc II 1340** | Gaz piknometre cihazı | Çalışma ortamı | 15 - 35 ° C arasında kararlıdır. Sıcaklık stabilitesi, kurulu sirkülatörün özelliklerine bağlıdır. Önerilen aralık: 15 - 50 ° C. |
| | | Nem | %20 - 80 bağıl nem, yoğuşmasız |
| | | Voltaj | 90 to 264 VAC |
| | | Güç | 30 VA |
| | | Frekans | 50 to 60 Hz |
| **Malvern Mastersizer 3000** | Partikül Boyut dağılım ölçüm cihazı | Parçaçık boyutu ölçüm aralığı | 0.01µm - 3500µm |
| | | Analiz tipi | Kuru ve ıslak numune |
| | | Ölçüm metodu | Lazer ışını |

Tablo A.1. (Devam) Kullanılan cihazların teknik özellikleri

| **Cihaz Adı/Markası** | **Cihaz Özelliği** | **Fonksiyon ve Özellikler** | |
|---|---|---|---|
| **Phenom XL Masaüstü SEM** | Masaüstü SEM analiz cihazı | Işık optik büyütme | 3–16x |
| | | Elektron optik büyütme aralığı | 80–100,000x |
| | | Çözünürlük | ≤ 14 nm |
| | | Digital zoom | Max. 12x |
| | | Hafif optik navigasyon kamerası | Renkli |
| | | Hızlanma gerilimleri | Varsayılan ayar: 5 kV, 10 kV ve 15 kV. Gelişmiş mod: 4,8 kV ve 20,5 kV görüntüleme ve analiz |
| | | Numune boyutu | Maks. 100 mm x 100 mm. 36 x 12 mm'ye kadar pin saplamaları |
| | | Numune yüksekliği | Maks.65 mm |
| **Radwag AS 220** | Terazi | Maksimum Kapasite | 220 g |
| | | Minimum Yük | 00 mg |
| | | Okunabilirlik | 0,1 mg |
| | | Dara Ağırlığı | -310 g |
| | | Kefe Boyutu | 85 mm |
| | | Çalışma sıcaklığı | +10 °C - +40 °C ** |
| | | Kalibrasyon Tipi | Internal (Dahili) |
| | | Ekran | LCD (backlight) |
| | | Paket Boyutu | 490×400×505 mm |
| **Vacucell 55 - ECO** | Vakumlu etüv fırını | Hacim | 55 L |
| | | Derinlik | 320 mm |
| | | Genişlik | 400 mm |
| | | Yükseklik | 430 mm |
| | | Tepsi adedi | Maks. 7 |
| | | Çalışma sıcaklığı (düzenleme başlangıcı) | Ortam sıcaklığı üzerinden 5 °C'den 200 °C'ye kadar |
| **LECO TGA 701 Thermogravimetric Analiz Cihazı** | Termogravimetrik analiz cihazı | Numune kütlesi | 1 g |
| | | Hassasiyet | %0,02 |
| | | Sıcaklık kontorlü | Min. 100 °C maks. 1000 °C |
| **LECO Truspec CHN-S** | Elemnter Analiz cihazı | Karbon analizi | %0.002-100 |
| | | Hidrojen | %0.02-50 |
| | | Azot | %0.02-50 |
| | | Kükürt | %0.04-65 |
| | | Oksijen | %0.04-100 |
| | | Numune kütlesi | 2 mg |

## Ek-B Tez kapsamında susuzlaştırılan linyitler için elde edilen ısıl değerler

Tablo B.1. Susuzlaştırılan linyitlerin ısıl değerleri

| | Baz | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Başlangıç su oranı (%) | 45,2 | | | | | | | | | | | | |
| Nihai su oranı (%) | 45,2 | 42,9 | 42,6 | 41,9 | 41,8 | 40,4 | 38,6 | 38,3 | 37,5 | 39,4 | 36,9 | 36,0 | 35,6 |
| Basınç (bar) | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 200 | 200 | 200 | 200 | 300 | 300 | 300 | 300 |
| C (%) | 28,14 | 29,30 | 29,45 | 29,81 | 29,86 | 30,58 | 31,50 | 31,66 | 32,07 | 31,09 | 32,38 | 32,84 | 33,04 |
| $H_2$ (%) | 2,06 | 2,15 | 2,16 | 2,18 | 2,19 | 2,24 | 2,31 | 2,32 | 2,35 | 2,28 | 2,37 | 2,41 | 2,42 |
| $N_2$ (%) | 0,70 | 0,73 | 0,73 | 0,74 | 0,74 | 0,76 | 0,79 | 0,79 | 0,80 | 0,78 | 0,81 | 0,82 | 0,82 |
| S (%) | 2,64 | 2,75 | 2,76 | 2,79 | 2,80 | 2,87 | 2,95 | 2,97 | 3,01 | 2,91 | 3,04 | 3,08 | 3,10 |
| O (%) | 6,51 | 6,77 | 6,81 | 6,89 | 6,90 | 7,07 | 7,28 | 7,32 | 7,41 | 7,19 | 7,48 | 7,59 | 7,64 |
| Kül (%) | 14,80 | 15,41 | 15,49 | 15,68 | 15,70 | 16,08 | 16,57 | 16,65 | 16,86 | 16,35 | 17,02 | 17,27 | 17,38 |
| ÜID (MJ/kg) | 1,16 | 1,20 | 1,21 | 1,22 | 1,23 | 1,26 | 1,29 | 1,30 | 1,32 | 1,28 | 1,33 | 1,35 | 1,36 |
| AID (kJ/kg) | 1,00 | 1,05 | 1,05 | 1,07 | 1,07 | 1,10 | 1,15 | 1,15 | 1,17 | 1,13 | 1,18 | 1,20 | 1,21 |

Tablo B.1. (Devam) Susuzlaştırılan linyitlerin ısıl değerleri

| | Baz | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Başlangıç su oranı (%) | 45,2 | | | | | | | | | | | | |
| Nihai su oranı (%) | 45,2 | 39,2 | 36,5 | 35,7 | 34,5 | 38,4 | 34,2 | 31,0 | 30,3 | 35,1 | 32,6 | 30,5 | 28,7 |
| Basınç (bar) | 100 | 400 | 400 | 400 | 400 | 500 | 500 | 500 | 500 | 600 | 600 | 600 | 600 |
| C (%) | 28,14 | 31,20 | 32,58 | 32,99 | 33,61 | 31,61 | 33,76 | 35,40 | 35,76 | 33,30 | 34,58 | 35,66 | 36,58 |
| $H_2$ (%) | 2,06 | 2,29 | 2,39 | 2,42 | 2,46 | 2,32 | 2,47 | 2,59 | 2,62 | 2,44 | 2,53 | 2,61 | 2,68 |
| $N_2$ (%) | 0,70 | 0,78 | 0,81 | 0,82 | 0,84 | 0,79 | 0,84 | 0,88 | 0,89 | 0,83 | 0,86 | 0,89 | 0,91 |
| S (%) | 2,64 | 2,92 | 3,05 | 3,09 | 3,15 | 2,96 | 3,16 | 3,32 | 3,35 | 3,12 | 3,24 | 3,34 | 3,43 |
| O (%) | 6,51 | 7,21 | 7,53 | 7,63 | 7,77 | 7,31 | 7,80 | 8,18 | 8,27 | 7,70 | 7,99 | 8,24 | 8,46 |
| Kül (%) | 14,80 | 16,40 | 17,13 | 17,35 | 17,67 | 16,62 | 17,75 | 18,62 | 18,81 | 17,51 | 18,18 | 18,75 | 19,24 |
| ÜID (MJ/kg) | 1,16 | 1,28 | 1,34 | 1,36 | 1,38 | 1,30 | 1,39 | 1,45 | 1,47 | 1,37 | 1,42 | 1,47 | 1,50 |
| AID (kJ/kg) | 1,00 | 1,13 | 1,19 | 1,21 | 1,24 | 1,15 | 1,25 | 1,32 | 1,33 | 1,23 | 1,28 | 1,33 | 1,37 |

## Ek-C Mekanik su azaltma için gerekli sıkıştırma işi

Tablo C.1. Sıkıştırma işi sonuçları

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Baş. karışımın hacmi ($m^3$) | 7,08 | | | | | | | | | | | |
| Kuru linyitin yoğunluğu ($kg/m^3$) | 2136,6 | | | | | | | | | | | |
| Karışımın nihai hacmi ($m^3$) | 6,69 | 6,6 | 6,5 | 6,5 | 6,3 | 6,0 | 6,0 | 5,9 | 6,1 | 5,8 | 5,7 | 5,6 |
| Basınç (bar | 100 | | | | 200 | | | | | 300 | | |
| İdeal sıkıştırma işi (kW) | 18,9 | 18,9 | 18,7 | 18,7 | 36,9 | 36,2 | 36,1 | 35,8 | 54,9 | 53,4 | 52,9 | 52,7 |
| Gerçek iş (kW) | 27,0 | 26,9 | 26,7 | 26,7 | 52,8 | 51,7 | 51,5 | 51,1 | 78,4 | 76,3 | 75,5 | 75,2 |

Tablo C.1. (Devam) Sıkıştırma işi sonuçları

| | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Baş. karışımın hacmi ($m^3$) | 7,08 | | | | | | | | | | | |
| Kuru linyitin yoğunluğu ($kg/m^3$) | 2136,6 | | | | | | | | | | | |
| Karışımın nihai hacmi ($m^3$) | 6,1 | 5,7 | 5,6 | 5,5 | 6,0 | 5,4 | 5,0 | 5,0 | 5,5 | 5,2 | 5,0 | 4,8 |
| Basınç (bar | 400 | | | | 500 | | | | 600 | | | |
| İdeal sıkıştırma işi (kW) | 73,1 | 70,9 | 70,3 | 69,5 | 90,6 | 86,6 | 84,0 | 83,4 | 105,0 | 102,3 | 100,3 | 98,6 |
| Gerçek iş (kW) | 104,4 | 101,3 | 100,5 | 99,3 | 129,4 | 123,8 | 119,9 | 119,1 | 149,9 | 146,2 | 143,3 | 140,9 |

## Ek-D Ekstruder hesap sonucu

Tablo D.1. Ekstruder hesap sonuçları

| | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7** | **8** | **9** | **10** | **11** | **12** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Linyit debisi (ton/saat) | 10 | | | | | | | | | | | |
| Basınç (bar) | 100 | | | | 200 | | | | 300 | | | |
| Süre (dk) | 2,5 | 5 | 7,5 | 10 | 2,5 | 5 | 7,5 | 10 | 2,5 | 5 | 7,5 | 10 |
| Kovan iç çapı (mm) | 573 | | | | | | | | | | | |
| Kovan mal. akma dayanımı ($N/m^2$) | 108 | | | | | | | | | | | |
| Kovan et kalınlığı (mm) | 26 | | | | 53 | | | | 79 | | | |
| Kovanın dış çapı (mm) | 630 | | | | 680 | | | | 730 | | | |
| Yığma ağırlığı ($t/m^3$) | 1,412 | | | | | | | | | | | |
| Helezon çapı (mm) | 573 | | | | | | | | | | | |
| Helezonun hatvesi (mm) | 458 | | | | | | | | | | | |
| Malzeme iletim hızı (m/s) | 0,061 | | | | | | | | | | | |
| Vidanın boyu (m) | 9 | 18 | 27 | 37 | 9 | 18 | 27 | 37 | 9 | 18 | 27 | 37 |
| Helezonda gerekli güç (kW) | 1,66 | 3,33 | 4,99 | 6,66 | 1,66 | 3,33 | 4,99 | 6,66 | 1,66 | 3,33 | 4,99 | 6,66 |
| Motorun momenti (daN.m) | 202 | 405 | 608 | 811 | 202 | 405 | 608 | 811 | 202 | 405 | 608 | 811 |
| Helezon adedi | 20 | 40 | 60 | 80 | 20 | 40 | 60 | 80 | 20 | 40 | 60 | 80 |
| Helezonun toplam kütlesi (kg) | 803 | 1598 | 2387 | 3173 | 803 | 1598 | 2387 | 3173 | 803 | 1598 | 2387 | 3173 |
| Emniyetli mil çapı (mm) | 45,7 | 57,6 | 66,0 | 72,6 | 45,7 | 57,6 | 66,0 | 72,6 | 45,7 | 57,6 | 66,0 | 72,6 |
| Seçilen mil çapı (mm) | 51 | 64 | 73 | 80 | 51 | 64 | 73 | 80 | 51 | 64 | 73 | 80 |
| Milin kütlesi (kg) | 147 | 463 | 903 | 1446 | 147 | 463 | 903 | 1446 | 147 | 463 | 903 | 1446 |
| Toplam Malzeme kütlesi (ton) | 5,0 | 10,2 | 15,5 | 20,9 | 9,3 | 18,8 | 28,4 | 38,1 | 13,9 | 28,1 | 42,3 | 56,7 |

Tablo D.1. (Devam) Ekstruder hesap sonuçları

| | **13** | **14** | **15** | **16** | **17** | **18** | **19** | **20** | **21** | **22** | **23** | **24** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Linyit debisi (ton/saat) | 10 | | | | | | | | | | | |
| Basınç (bar) | 400 | | | | 500 | | | | 600 | | | |
| Süre (dk) | 2,5 | 5 | 7,5 | 10 | 2,5 | 5 | 7,5 | 10 | 2,5 | 5 | 7,5 | 10 |
| Kovan iç çapı (mm) | 573 | | | | | | | | | | | |
| Kovan mal. akma dayanımı ($N/m^2$) | 108 | | | | | | | | | | | |
| Kovan et kalınlığı (mm) | 106 | | | | 132 | | | | 159 | | | |
| Kovanın dış çapı (mm) | 780 | | | | 840 | | | | 890 | | | |
| Yığma ağırlığı ($t/m^3$) | 1,412 | | | | | | | | | | | |
| Helezon çapı (mm) | 573 | | | | | | | | | | | |
| Helezonun hatvesi (mm) | 458 | | | | | | | | | | | |
| Malzeme iletim hızı (m/s) | 0,061 | | | | | | | | | | | |
| Vidanın boyu (m) | 9 | 18 | 27 | 37 | 9 | 18 | 27 | 37 | 9 | 18 | 27 | 37 |
| Helezonda gerekli güç (kW) | 1,66 | 3,33 | 4,99 | 6,66 | 1,66 | 3,33 | 4,99 | 6,66 | 1,66 | 3,33 | 4,99 | 6,66 |
| Motorun momenti (daN.m) | 202 | 405 | 608 | 811 | 202 | 405 | 608 | 811 | 202 | 405 | 608 | 811 |
| Helezon adedi | 20 | 40 | 60 | 80 | 20 | 40 | 60 | 80 | 20 | 40 | 60 | 80 |
| Helezonun toplam kütlesi (kg) | 803 | 1598 | 2387 | 3173 | 803 | 1598 | 2387 | 3173 | 803 | 1598 | 2387 | 3173 |
| Emniyetli mil çapı (mm) | 45,7 | 57,6 | 66,0 | 72,6 | 45,7 | 57,6 | 66,0 | 72,6 | 45,7 | 57,6 | 66,0 | 72,6 |
| Seçilen mil çapı (mm) | 51 | 64 | 73 | 80 | 51 | 64 | 73 | 80 | 51 | 64 | 73 | 80 |
| Milin kütlesi (kg) | 147 | 463 | 903 | 1446 | 147 | 463 | 903 | 1446 | 147 | 463 | 903 | 1446 |
| Toplam Malzeme kütlesi (ton) | 18,9 | 38,1 | 57,3 | 76,7 | 24,3 | 48,8 | 73,4 | 98,1 | 30,0 | 60,1 | 90,4 | 120,8 |

**Ek-E 25 Yıllık enflasyon, linyit, iskonto ve faizin bugünkü değeri**

Tablo E.1. 25 Yıllık enflasyon, linyit, iskonto ve faizin bugünkü değer hesap sonuçları

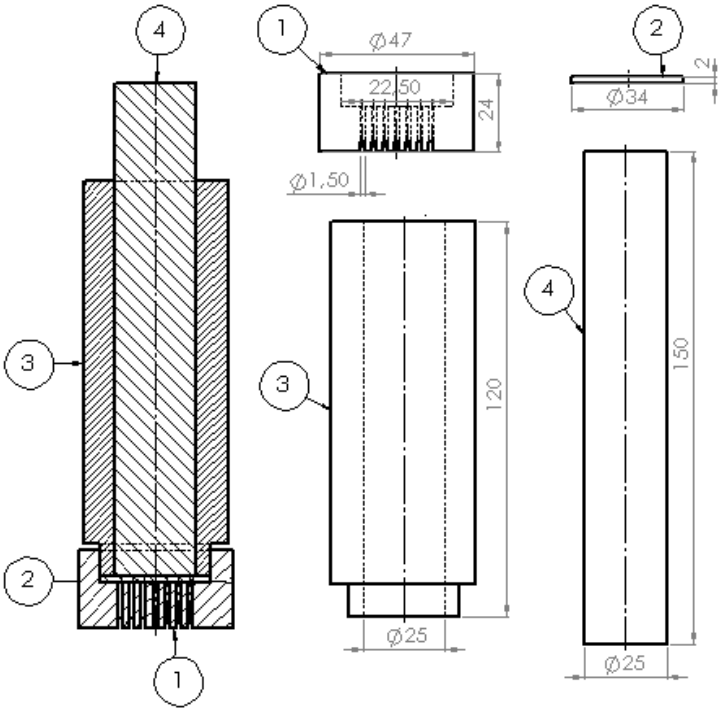
| Yıl | Enflasyon oranı | Bakım eskalasyon | Linyit eskalasyon | Elektrik eskalasyonu | İskonto oranı | Faiz oranı |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **0** | Sistemin devreye alınması | | | | | |
| **1** | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| **2** | 1,16 | 1,16 | 1,10 | 1,19 | 1,17 | 1,13 |
| **3** | 1,34 | 1,34 | 1,21 | 1,40 | 1,38 | 1,28 |
| **4** | 1,55 | 1,55 | 1,33 | 1,66 | 1,61 | 1,44 |
| **5** | 1,79 | 1,79 | 1,46 | 1,97 | 1,89 | 1,63 |
| **6** | 2,08 | 2,08 | 1,61 | 2,34 | 2,22 | 1,84 |
| **7** | 2,40 | 2,40 | 1,77 | 2,77 | 2,60 | 2,08 |
| **8** | 2,78 | 2,78 | 1,95 | 3,28 | 3,05 | 2,35 |
| **9** | 3,22 | 3,22 | 2,14 | 3,89 | 3,58 | 2,66 |
| **10** | 3,72 | 3,72 | 2,36 | 4,61 | 4,20 | 3,00 |
| **11** | 4,31 | 4,31 | 2,59 | 5,46 | 4,93 | 3,39 |
| **12** | 4,98 | 4,98 | 2,85 | 6,47 | 5,78 | 3,84 |
| **13** | 5,77 | 5,77 | 3,14 | 7,67 | 6,78 | 4,33 |
| **14** | 6,67 | 6,67 | 3,45 | 9,09 | 7,95 | 4,90 |
| **15** | 7,72 | 7,72 | 3,80 | 10,77 | 9,33 | 5,53 |
| **16** | 8,94 | 8,94 | 4,18 | 12,76 | 10,94 | 6,25 |
| **17** | 10,34 | 10,34 | 4,59 | 15,12 | 12,83 | 7,07 |
| **18** | 11,97 | 11,97 | 5,05 | 17,91 | 15,05 | 7,99 |
| **19** | 13,85 | 13,85 | 5,56 | 21,23 | 17,65 | 9,02 |
| **20** | 16,02 | 16,02 | 6,12 | 25,16 | 20,71 | 10,20 |
| **21** | 18,54 | 18,54 | 6,73 | 29,81 | 24,29 | 11,52 |
| **22** | 21,46 | 21,46 | 7,40 | 35,33 | 28,49 | 13,02 |
| **23** | 24,83 | 24,83 | 8,14 | 41,86 | 33,41 | 14,71 |
| **24** | 28,73 | 28,73 | 8,95 | 49,60 | 39,19 | 16,63 |
| **25** | 33,25 | 33,25 | 9,85 | 58,78 | 45,97 | 18,79 |

## Ek-F Deneyden ve korelasyondan elde edilen sonuçlar

Tablo F.1. Deney ve korelasyon sonuçları

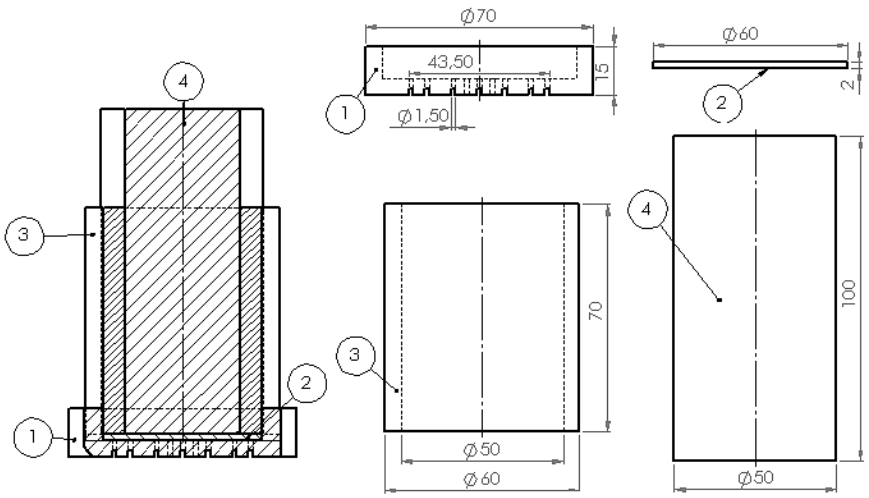
| No | $D_{hazne}$ (mm) | $D_{linyit}$ (mm) | t (dk) | $p_{dlw}$ (%) | Tür | Basınç (bar) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 |
| **1-24** | 25 | 0,25 | 5 | 114,7 | **Deneysel** | 75,2 | 67,7 | 65,0 | 64,6 | 62,3 | 54,1 |
| | | | 5 | | *Korelasyon* | *72,0* | *63,3* | *59,1* | *56,5* | *54,6* | *53,1* |
| | | | 10 | | **Deneysel** | 74,3 | 62,8 | 58,6 | 57,5 | 51,9 | 48,5 |
| | | | 10 | | *Korelasyon* | *63,6* | *56,4* | *52,8* | *50,5* | *48,8* | *47,5* |
| | | | 15 | | **Deneysel** | 72,2 | 62,0 | 56,3 | 55,4 | 44,9 | 43,8 |
| | | | 15 | | *Korelasyon* | *60,9* | *54,1* | *50,7* | *48,5* | *46,9* | *45,6* |
| | | | 20 | | **Deneysel** | 71,9 | 60,0 | 55,3 | 52,6 | 43,4 | 40,2 |
| | | | 20 | | *Korelasyon* | *59,5* | *52,9* | *49,6* | *47,4* | *45,9* | *44,6* |
| **25-48** | 25 | 0,25 | 5 | 104,1 | **Deneysel** | 69,6 | 63,7 | 62,3 | 57,2 | 52,2 | 47,9 |
| | | | 5 | | *Korelasyon* | *68,9* | *61,0* | *57,2* | *54,7* | *52,9* | *51,5* |
| | | | 10 | | **Deneysel** | 66,6 | 56,3 | 56,0 | 53,7 | 51,1 | 46,8 |
| | | | 10 | | *Korelasyon* | *61,4* | *54,7* | *51,4* | *49,2* | *47,6* | *46,4* |
| | | | 15 | | **Deneysel** | 65,8 | 54,6 | 54,1 | 50,4 | 43,1 | 42,8 |
| | | | 15 | | *Korelasyon* | *59,0* | *52,7* | *49,5* | *47,4* | *45,9* | *44,7* |
| | | | 20 | | **Deneysel** | 62,6 | 53,2 | 52,3 | 47,6 | 42,9 | 42,0 |
| | | | 20 | | *Korelasyon* | *57,8* | *51,7* | *48,5* | *46,5* | *45,0* | *43,8* |
| **49-72** | 25 | 0,25 | 5 | 83,0 | **Deneysel** | 59,4 | 54,4 | 52,8 | 52,5 | 51,9 | 50,6 |
| | | | 5 | | *Korelasyon* | *61,5* | *55,6* | *52,6* | *50,6* | *49,1* | *48,0* |
| | | | 10 | | **Deneysel** | 57,9 | 51,8 | 51,2 | 50,1 | 48,8 | 46,0 |
| | | | 10 | | *Korelasyon* | *56,3* | *51,0* | *48,2* | *46,4* | *45,0* | *43,9* |
| | | | 15 | | **Deneysel** | 57,6 | 49,9 | 48,3 | 47,5 | 46,8 | 44,0 |
| | | | 15 | | *Korelasyon* | *54,7* | *49,5* | *46,8* | *45,0* | *43,6* | *42,6* |
| | | | 20 | | **Deneysel** | 54,9 | 49,3 | 47,6 | 45,5 | 44,8 | 40,3 |
| | | | 20 | | *Korelasyon* | *53,8* | *48,8* | *46,1* | *44,3* | *42,9* | *41,9* |
| **145-168** | 25 | 4 | 5 | 82,7 | **Deneysel** | 72,6 | 63,0 | 61,4 | 60,2 | 56,0 | 52,7 |
| | | | 5 | | *Korelasyon* | *70,8* | *63,7* | *60,2* | *57,9* | *56,2* | *54,9* |
| | | | 10 | | **Deneysel** | 70,2 | 60,4 | 55,7 | 54,1 | 52,9 | 52,5 |
| | | | 10 | | *Korelasyon* | *65,5* | *59,1* | *55,8* | *53,7* | *52,1* | *50,8* |
| | | | 15 | | **Deneysel** | 69,0 | 58,6 | 52,7 | 50,1 | 49,9 | 48,8 |
| | | | 15 | | *Korelasyon* | *63,9* | *57,7* | *54,5* | *52,3* | *50,7* | *49,5* |
| | | | 20 | | **Deneysel** | 68,1 | 57,4 | 51,9 | 49,8 | 47,8 | 47,2 |
| | | | 20 | | *Korelasyon* | *63,1* | *57,0* | *53,7* | *51,6* | *50,0* | *48,8* |
| **169-192** | 50 | 0,25 | 5 | 83,0 | **Deneysel** | 69,9 | 67,5 | 65,8 | 57,0 | 53,8 | 48,4 |
| | | | 5 | | *Korelasyon* | *65,0* | *58,0* | *54,5* | *52,3* | *50,7* | *49,4* |
| | | | 10 | | **Deneysel** | 60,3 | 58,2 | 54,4 | 52,5 | 46,3 | 45,0 |
| | | | 10 | | *Korelasyon* | *58,0* | *52,2* | *49,2* | *47,2* | *45,8* | *44,6* |
| | | | 15 | | **Deneysel** | 59,5 | 56,2 | 53,8 | 50,0 | 43,8 | 43,4 |
| | | | 15 | | *Korelasyon* | *55,9* | *50,4* | *47,5* | *45,6* | *44,2* | *43,1* |
| | | | 20 | | **Deneysel** | 58,3 | 54,9 | 52,9 | 49,0 | 42,8 | 40,9 |
| | | | 20 | | *Korelasyon* | *54,9* | *49,5* | *46,7* | *44,8* | *43,4* | *42,3* |
| **97-120** | 25 | 0,25 | 5 | 65,6 | **Deneysel** | 58,9 | 49,5 | 47,0 | 46,6 | 46,4 | 45,7 |
| | | | 5 | | *Korelasyon* | *53,9* | *50,0* | *47,8* | *46,3* | *45,2* | *44,3* |
| | | | 10 | | **Deneysel** | 54,0 | 46,5 | 45,9 | 44,6 | 43,4 | 42,1 |
| | | | 10 | | *Korelasyon* | *50,9* | *47,1* | *44,9* | *43,4* | *42,2* | *41,3* |
| | | | 15 | | **Deneysel** | 53,5 | 45,0 | 43,7 | 42,2 | 41,1 | 40,5 |
| | | | 15 | | *Korelasyon* | *50,1* | *46,2* | *44,0* | *42,5* | *41,3* | *40,4* |
| | | | 20 | | **Deneysel** | 52,7 | 44,8 | 42,0 | 41,6 | 40,3 | 39,5 |
| | | | 20 | | *Korelasyon* | *49,7* | *45,8* | *43,5* | *42,0* | *40,8* | *39,9* |
| **121-144** | 25 | 0,25 | 5 | 52,0 | **Deneysel** | 50,0 | 47,7 | 46,8 | 45,3 | 44,1 | 42,3 |
| | | | 5 | | *Korelasyon* | *46,4* | *44,5* | *43,1* | *42,1* | *41,3* | *40,6* |
| | | | 10 | | **Deneysel** | 49,6 | 47,4 | 43,5 | 41,9 | 39,9 | 39,0 |
| | | | 10 | | *Korelasyon* | *45,6* | *43,2* | *41,6* | *40,4* | *39,5* | *38,8* |
| | | | 15 | | **Deneysel** | 48,2 | 43,9 | 39,0 | 39,0 | 37,9 | 35,9 |
| | | | 15 | | *Korelasyon* | *45,6* | *42,9* | *41,2* | *39,9* | *39,0* | *38,2* |
| | | | 20 | | **Deneysel** | 48,1 | 43,3 | 38,2 | 37,5 | 36,9 | 35,7 |
| | | | 20 | | *Korelasyon* | *45,7* | *42,8* | *41,0* | *39,7* | *38,7* | *37,9* |

## Ek-G Kalıp setlerinin teknik resimleri




| Öğe No. | Parça Adı | Miktar |
|---|---|---|
| 1 | Alt tabla | 1 |
| 2 | Filtre bezi | 1 |
| 3 | Numune haznesi | 1 |
| 4 | Basınç mili | 1 |

Şekil G.1. 25 mm iç çaplı kalıp seti




| Öğe No. | Parça Adı | Miktar |
|---|---|---|
| 1 | Alt tabla | 1 |
| 2 | Filtre bezi | 1 |
| 3 | Numune haznesi | 1 |
| 4 | Basınç mili | 1 |

Şekil G.2. 50 mm iç çaplı kalıp seti

## KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER


[1] **Çay M. S.**, Kömür Yakıtlı Termik Santrallarda Baca Gazı Kanalına Kuru Sorbent Enjeksiyonu ile Kükürt Giderme Sisteminin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 2013.

[2] **Çay M. S.**, & Öztürk I. T., Mechanical Dewatering Characteristics of a Turkish Lignite, *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 2019, 1-15.

[3] **Çay M. S.**, Öztürk I. T., Teke I., Experimental Investigation on Effect of Pressure, Time and Particle Size on the Mechanical Dewatering Characteristics of Ilgın Lignite, *22 nd Congress on Thermal Science and Technology*, Kocaeli, 11-14 September 2019.

## ÖZGEÇMİŞ

İlk ve orta eğitimini Sinop'ta, lise eğitimini ise Ankara'da tamamlamıştır, 2007 yılında Hitit Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü'nü kazanarak 2011yılında mezun olmuştur, 2012 yılında Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda başladığı Yüksek Lisans öğrenimi 2013 yılında tamamlamıştır, 2014 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doktora öğrenimine başlamıştır, 2012 yılında TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Enerji Enstitüsü'nde araştırmacı olarak göreve başlamıştır ve halen görevine devam etmektedir.