

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KÜÇÜK BOYUTLU KÖMÜRLERİN SUSUZLANDIRILMASINDA
ULTRASONİK VE MEKANİK TİTREŞİM
MEKANİZMALARININ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

**DOKTORA TEZİ
Fırat BURAT**

Anabilim Dalı : Maden Mühendisliği

Programı : Maden Mühendisliği

MART 2011

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KÜÇÜK BOYUTLU KÖMÜRLERİN SUSUZLANDIRILMASINDA
ULTRASONİK VE MEKANİK TİTREŞİM
MEKANİZMALARININ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

DOKTORA TEZİ

Fırat BURAT

(505032101)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 01 Şubat 2011

Tezin Savunulduğu Tarih : 14 Mart 2011

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Güven ÖNAL (İTÜ)
Eş Danışman : Prof. Dr. Ayhan A. SİRKECİ (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Gündüz ATEŞOK (İTÜ)
Prof. Dr. Şafak G. ÖZKAN (İÜ)
Doç. Dr. Alim GÜL (İTÜ)
Prof. Dr. Ercan AÇMA (İTÜ)
Prof. Dr. İhsan TOROĞLU (ZKEÜ)

MART 2011

ÖNSÖZ

Gerek tez çalışmalarında gerekse öğrencilik ve akademik hayatımda bana yardımcı olan ve her türlü imkanı sağlayan, bilgi ve desteğini esirgemeyen danışmanım Sayın Prof. Dr. Güven ÖNAL'a ve eş danışmanım Sayın Prof. Dr. Ayhan A. SİRKECİ'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez izleme komitemde yer alarak çalışmalarında yapıcı eleştirileriyle beni yönlendiren Sayın Prof. Dr. Gündüz ATEŞOK'a ve Prof. Dr. Şafak G. ÖZKAN'a, tez çalışmam boyunca teknik imkanlarından yararlandığım Cevher Hazırlama Mühendisliği Bölüm Başkanı Sayın Prof. Dr. Fatma ARSLAN'a ve bölümde görev yapan saygıdeğer bütün hocalarıma teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca bana bilgileriyle, tecrübeleriyle ve yardımlarıyla destek olan Yük. Müh. Mustafa ÖZER, Araş. Gör. Dr. Tahsin K. PEREK, Araş. Gör. Ozan KÖKKILIÇ, Araş. Gör. Fırat KARAKAŞ, Araş. Gör. Onur GÜVEN, Yard. Doç. Dr. M. Fatih CAN, Yük. Müh. Gafure ERSEVER, Ömer KURULU ve Adnan UYSAL'a teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, kimyasal analizlerin yapılmasında yardımlarını gördüğüm sayın Kim. Müh. Sezin BAKAN'a teşekkür ederim.

Bütün eğitim ve öğrenim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini hiç bir zaman eksik etmeyen, çok sevdiğim anneme, babama ve her zaman yanımda olan arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Benden bir an bile olsun desteğini ve yardımlarını esirgemeyen sevgili eşim Yard. Doç. Dr. Ayfer KALKAN BURAT'a SONSUZ TEŞEKKÜRLER...

Mart 2011

Fırat BURAT

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER	v
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
SEMBOL LİSTESİ.....	xix
ÖZET.....	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
2. KÖMÜR VE ZENGİNLEŞTİRME YÖNTEMLERİ.....	5
2.1 Kömürün Tanımı ve Önemi	5
2.2 Kömürün Sınıflandırılması.....	6
2.3 Kömürün Petrografik İçeriği	8
2.4 Kömürün İçerdiği Safsızlıklar	8
2.4.1 Nem	9
2.4.2 Kül	9
2.4.3 Kükürt.....	9
2.5 Kömürün Türkiye’de Bulunuş Şekilleri	10
2.5.1 Linyit.....	10
2.5.2 Taşkömürü	10
2.5.3 Asfaltit	10
2.5.4 Bitümlü şist	11
2.5.5 Turba.....	11
2.6 Dünyada Mevcut Durum	12
2.6.1 Dünya kömür rezervleri	12
2.6.2 Dünya kömür üretimi	12
2.6.3 Dünya kömür tüketimi	13
2.6.4 Dünya elektrik üretiminde kömür kullanımı.....	13
2.7 Ülkemizde Mevcut Durum.....	14
2.7.1 Türkiye kömür rezervleri	14
2.7.1.1 Türkiye taşkömürü rezervleri.....	14
2.7.1.2 Türkiye linyit rezervleri	14
2.7.2 Türkiye kömür üretimi	16
2.7.3 Türkiye kömür tüketimi	16
2.7.4 Ülkemizde elektrik üretiminde kömür kullanımı.....	17
2.8 Kömür Kullanım Alanları	17
2.9 Kömür Zenginleştirme Yöntemleri	17
2.9.1 Yaş zenginleştirme yöntemleri.....	18
2.9.1.1 İri kömür zenginleştirme yöntemleri.....	18
2.9.1.2 İnce kömür zenginleştirme yöntemleri.....	25

3. KÖMÜRÜN SUSUZLANDIRILMASI	27
3.1 Kömürün Su İçeriği ve Analizi	28
3.2 Kömürün Susuzlandırılmasını Etkileyen Faktörler	29
3.3 Teknolojik Uygulamalarda Nem Sınırlamaları	31
3.4 Kömür Susuzlandırma Yöntemleri	32
3.4.1 Elekler	32
3.4.2 Santrifüjler	35
3.4.2.1 Tüp tipi santrifüjler	36
3.4.2.2 Sepet tipi santrifüjler	36
3.4.2.3 Konveyör tip santrifüjler	37
3.4.2.4 Disk tipi santrifüjler	38
3.4.3 Hidrosiklonlar	38
3.4.4 Filtreler	39
3.4.4.1 Döner tambur filtre	40
3.4.4.2 Döner diskli filtre	40
3.4.4.3 Bantlı filtreler	41
3.4.4.4 Basınç tipi filtreler	41
3.4.5 Tikinerler	42
3.5 Kömürün Kurutulması	44
3.5.1 Kömür kurutma sistemleri	45
3.5.1.1 Döner kurutucular	45
3.5.1.2 Akışkan yataklı kurutucular	45
3.6 Susuzlandırma İşlemlerinde Yardımcı Prosesler	47
3.6.1 Flokülasyon-koagülasyon ve yüzey aktif maddeler ile susuzlandırma	47
4. ULTRASONİK TİTREŞİM VE UYGULAMA ALANLARI	49
4.1 Ses ve Ultrasonik	49
4.2 Ultrasonik Dalgalar	51
4.2.1 Dalganın yayılımı	51
4.2.2 Dalga uzunluğu ve frekans	52
4.3 Dalga Çeşitleri	53
4.3.1 Boyuna dalga	54
4.3.2 Enine dalga	55
4.3.3 Yüzey dalgaları	55
4.4 Ultrasonik Enerjinin Temel Özellikleri	56
4.4.1 Yayılma hızı	56
4.4.2 Akustik empedans	56
4.4.3 Ultrasonik enerji şiddeti	58
4.4.4 Ultrasonik basınç	58
4.5 Ultrasonik Enerjinin Üretilmesi ve Algılanması	58
4.6 Ultrasonik Titreşimin Oluşturulması	59
4.6.1 Piezoelektrik titreştiriciler	59
4.6.2 Manyetostriksiyon titreştiriciler	62
4.6.3 Elektriksiyon titreştiriciler	63
4.7 Ultrasonik Laboratuvar Cihazları	63
4.7.1 Ultrasonik temizleme banyoları	64
4.7.2 Doğrudan daldırılmalı ultrasonik problemler	64
4.7.3 Yüksek şiddetli su banyoları	65
4.7.4 Korna reaktörler	65
4.8 Ultrasonik Dalgaların Ara Yüzeylerdeki Davranışları	66
4.8.1 Kırılma ve yansıma geometrisi	66

4.8.2 Kırılma ve yansımada enerji bölüşümü	67
4.9 Ultrasonik Demet	68
4.9.1 Demetin geometrisi	68
4.9.2 Demet içinde enerji dağılımı	69
4.9.2.1 Eksenel enerji dağılımı	69
4.9.2.2 Radyal enerji dağılımı	70
4.9.3 Ultrasonik enerjinin zayıflaması	71
4.9.3.1 Demetin genişlemesi	71
4.9.3.2 Yol kayıpları	71
4.9.3.3 Ara yüzey kayıpları	72
4.10 Kaviteasyon (Oyuklanma) Etkisi	72
4.10.1 Kaviteasyonu etkileyen faktörler	74
4.10.1.1 Çözücünün fiziksel özellikleri	74
4.10.1.2 Reaksiyon sıcaklığı	75
4.10.1.3 Ses alanı	75
4.10.1.4 Çözünmüş gazların varlığı	76
4.10.1.5 Tepkime sisteminin temizliği	76
4.10.1.6 Çevre basıncı	76
4.10.1.7 Ara yüzeyin etkisi	76
4.11 Ultrasonik Titreşimin Kullanıldığı Yerler	77
4.11.1 Cevher hazırlama dışındaki uygulamalar	77
4.11.2 Ultrasonik titreşimin cevher hazırlamada önemi ve kullanımı	79
4.11.2.1 Susuzlandırma amaçlı kullanımı	79
4.11.2.2 Yüzey temizleme ve kaplama işlemlerinde kullanımı	81
4.11.2.3 Gaz-katı ve sıvı-katı sistemlerinden katının ayrılması işlemlerinde kullanımı	82
4.11.2.4 Flotasyon işlemlerinde kullanımı	83
4.11.2.5 Selektif zenginleştirme işlemlerinde kullanımı	86
4.11.2.6 Öğütme ve dağıtma ile zenginleştirme işlemlerinde kullanımı	87
4.11.2.7 Liç işlemlerinde kullanımı	87
4.11.2.8 Boyut ölçümü ve eleme işlemlerinde kullanımı	88
5. MALZEME VE YÖNTEM	89
5.1 Malzeme	89
5.1.1 Temsili numunelerin fiziksel özellikleri	89
5.1.1.1 Nem içeriğinin tespiti	89
5.1.1.2 Boyut dağılımı özelliklerinin tespiti	91
5.1.2 Temsili numunelerin kimyasal özellikleri	91
5.2 Yöntem	93
5.2.1 Deneylerde kullanılan aygıtlar ve reaktifler	93
5.2.1.1 Aygıtlar	93
5.2.1.2 Deneylerde kullanılan reaktifler ve özellikleri	95
5.2.2 Yüzey geriliminin tayini	95
5.2.3 Temas açısının tayini	96
5.2.4 Numunenin elektrokinetik özelliklerinin tespiti	97
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	101
6.1 Yüzey Gerilimi Ölçümleri	101
6.2 Temas Açısı Ölçümleri	103
6.3 Zeta Potansiyel Ölçümleri	105
6.4 Susuzlandırma Deneyleri	110
6.4.1 Elek eğiminin tespiti	110

6.4.2 Besleme hızının tespiti	111
6.4.3 Frekans değerinin tespiti	112
6.4.4 Elek açıklığının tespiti.....	114
6.4.5 Yatay titreşime dik titreşim mekanizmasının ilave edilmesinin susuzlandırma üzerine etkisi.....	114
6.4.6 Motor kuvveti artırılmış yatay titreşim ile yapılan deneylerin susuzlandırma üzerindeki etkisi.....	116
6.4.7 Açısal titreşim ile yapılan susuzlandırma deneyleri.....	118
6.4.8 Yatay titreşim+açısal titreşim ile yapılan susuzlandırma deneyleri.....	119
6.4.9 Beslenen malzemedeki nem içeriğinin susuzlandırma üzerindeki etkisi	120
6.4.10 Reaktif ilavesi olmadan pH'ın etkisinin incelendiği deneyler	122
6.5 Reaktif İlavesinin Etkisinin Araştırıldığı Susuzlandırma Deneyleri	123
6.5.1 Aerodri 100-E ilavesi ile yapılan susuzlandırma deneyleri	124
6.5.1.1 Reaktif miktarının saptanması.....	124
6.5.1.2 Karıştırma süresinin saptanması.....	124
6.5.1.3 pH'ın saptanması	126
6.5.2 Aerodri 104 ilavesi ile yapılan susuzlandırma deneyleri	127
6.5.2.1 Reaktif miktarının saptanması.....	128
6.5.2.2 Karıştırma süresinin saptanması.....	128
6.5.2.3 pH'ın saptanması.....	130
6.5.3 TTAB ilavesi ile yapılan susuzlandırma deneyleri	131
6.5.3.1 Reaktif miktarının saptanması.....	132
6.5.3.2 Karıştırma süresinin saptanması.....	132
6.5.3.3 pH'ın saptanması.....	134
6.5.4 PEGM ilavesi ile yapılan susuzlandırma deneyleri.....	135
6.5.4.1 Reaktif miktarının saptanması.....	136
6.5.4.2 Karıştırma süresinin saptanması.....	136
6.5.4.3 pH'ın saptanması.....	138
6.5.5 Fusifloc 5922 ilavesi ile yapılan susuzlandırma deneyleri.....	139
6.5.5.1 Reaktif miktarının saptanması.....	140
6.6 Elek Yüzey Alanının Arttırılmasının Susuzlandırma Üzerindeki Etkisinin İncelendiği Deneyler	140
6.7 Ultrasonik Titreşimin Susuzlandırma Üzerindeki Etkisi.....	142
6.7.1 Reaktif ilavesi ve ultrasonik titreşimin susuzlandırma üzerindeki etkisinin incelendiği deneyler.....	147
6.7.1.1 Reaktif+ultrasonik titreşimin susuzlandırmadaki etkisi.....	147
6.7.1.2 Ultrasonik titreşim+reaktifin susuzlandırmadaki etkisi	148
6.7.1.3 Reaktif ve ultrasonik titreşimin susuzlandırmadaki etkisi	149
6.7.2 Farklı elek açıklıklarında reaktif ilavesi ve ultrasonik titreşim ile kademeli olarak yapılan susuzlandırma deneyleri	150
6.7.3 Titreşimli elek yüzeyine yerleştirilen ultrasonik transdüser'in susuzlandırma üzerindeki etkisinin incelendiği deneyler.....	151
6.8 Buchner Vakum Filtresi Kullanılarak Yapılan Susuzlandırma Deneyleri	153
7. DENEYSEL VERİLERİN MODELLENMESİ	157
7.1 Titreşimli Elek ile Yapılan Deneyler.....	157
7.1.1 Besleme hızı-eğim değerlerinin modellenmesi	158
7.1.2 Elek açıklığı-frekans değerlerinin modellenmesi.....	158
7.1.3 Motor kuvveti-eğim değerlerinin modellenmesi.....	159
7.2 Reaktif İlavesi ile Yapılan Deneylerin Modellenmesi	159
7.2.1 Aerodri 100-E ilavesi ile yapılan deneylerin modellenmesi	160

7.2.2 Aerodri 104 ilavesi ile yapılan deneylerin modellenmesi.....	161
7.2.3 TTAB ilavesi ile yapılan deneylerin modellenmesi.....	161
7.2.4 PEGM ilavesi ile yapılan deneylerin modellenmesi.....	162
7.3 Elek Yüzey Alanının Arttırılmasıyla Yapılan Susuzlandırma Deneylerinin Modellenmesi.....	163
7.3.1 Aerodri 100-E ilavesi ile yapılan elek yüzey alanının arttırıldığı deneylere ait verilerin modellenmesi.....	163
7.3.2 Aerodri 104 ilavesi ile yapılan elek yüzey alanının arttırıldığı deneylere ait verilerin modellenmesi.....	164
7.3.3 TTAB ilavesi ile yapılan elek yüzey alanının arttırıldığı deneylere ait verilerin modellenmesi.....	164
7.3.4 PEGM ilavesi ile yapılan elek yüzey alanının arttırıldığı deneylere ait verilerin modellenmesi.....	165
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	167
KAYNAKLAR	173
ÖZGEÇMİŞ.....	181

KISALTMALAR

TTK	: Türkiye Taşkömürü Kurumu
TKİ	: Türkiye Kömür İşletmeleri
EÜAŞ	: Elektrik Üretim Anonim Şirketi
MTA	: Maden Tetkik ve Arama
TTAB	: Tetradecil Trimetil Amonyum Bromür
PEGM	: Polietilen Glikol Monooleat

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Uluslararası genel kömür sınıflandırılması	7
Çizelge 2.2 : Çeşitli kömürleşme derecelerinde kömür özellikleri.....	7
Çizelge 2.3 : Genel sınıflandırmada yer alan kömürlerin tanıtıcı özellikleri	8
Çizelge 2.4 : Türkiye taşkömürü kurumu kömür sahalarına ait rezervler	15
Çizelge 2.5 : 2009 sonu itibarıyla kurumlara ait linyit rezervleri.....	16
Çizelge 3.1 : Başlıca kömür teknolojilerindeki nem sınırlamaları	32
Çizelge 4.1 : Çeşitli ortamlarda akustik hızlar.....	57
Çizelge 4.2 : Ultrasonik uygulama alanları	77
Çizelge 5.1 : Numunenin elek analizi sonuçları	91
Çizelge 5.2 : 0,5 mm altındaki kömür numunesinin kimyasal analizleri	92
Çizelge 5.3 : Boyut aralıklarında kül içerikleri ve dağılımları	92
Çizelge 5.4 : A, B ve C kodlu numunelerin kimyasal analizleri	93
Çizelge 6.1 : Farklı reaktif miktarlarında elde edilen yüzey gerilimi değerleri.....	102
Çizelge 6.2 : Farklı pH değerlerinde yapılan temas açısı ölçümleri.....	103
Çizelge 6.3 : Farklı reaktif miktarlarında yapılan temas açısı ölçümleri.....	104
Çizelge 6.4 : Doğal pH'ta yapılan zeta potansiyel ölçüm değerleri	105
Çizelge 6.5 : Farklı pH değerlerinde yapılan deneylerde elde edilen zeta potansiyel değerleri	106
Çizelge 6.6 : Farklı miktarlarda reaktif ilavesi ile yapılan zeta potansiyel ölçüm değerleri.....	107
Çizelge 6.7 : Farklı elek eğimlerinde elde edilen nem değerleri	110
Çizelge 6.8 : Farklı besleme hızlarında elde edilen nem değerleri.....	111
Çizelge 6.9 : Farklı frekans değerlerinde elde edilen nem değerleri	113
Çizelge 6.10 : Farklı elek açıklıklarında elde edilen nem değerleri	114
Çizelge 6.11 : Farklı elek açıklıklarında yatay titreşim+dik titreşim ile yapılan deneylerde elde edilen nem değerleri	115
Çizelge 6.12 : Farklı elek eğimlerinde motor kuvveti arttırılmış yatay titreşim ile yapılan deneylerden elde edilen nem değerleri.....	117
Çizelge 6.13 : Açısal titreşim ile farklı eğimlerde elde edilen nem değerleri	118
Çizelge 6.14 : Yatay titreşim+açısal titreşim ile yapılan deneylerde elde edilen nem değerleri.....	120
Çizelge 6.15 : Farklı nem içeriklerinde yapılan besleme sonucunda elde edilen nem değerleri.....	121
Çizelge 6.16 : Farklı pH değerlerinde reaktif ilavesi olmadan yapılan deneylerde elde edilen nem değerleri	122
Çizelge 6.17 : Farklı miktarlarda Aerodri 100-E ilavesi ile elde edilen nem değerleri	124
Çizelge 6.18 : Farklı karıştırma sürelerinde elde edilen nem değerleri.....	125
Çizelge 6.19 : Farklı pH değerlerinde Aerodri 100-E ilavesi ile elde edilen nem değerleri	127
Çizelge 6.20 : Farklı miktarlarda Aerodri 104 ilavesi ile elde edilen nem değerleri	128

Çizelge 6.21 : Farklı karıştırma sürelerinde elde edilen nem değerleri.....	129
Çizelge 6.22 : Farklı pH değerlerinde Aerodri 104 ilavesi ile elde edilen nem değerleri.....	131
Çizelge 6.23 : Farklı miktarlarda TTAB ilavesi ile elde edilen nem değerleri.....	132
Çizelge 6.24 : Farklı karıştırma sürelerinde elde edilen nem değerleri.....	133
Çizelge 6.25 : Farklı pH değerlerinde TTAB ilavesi ile elde edilen nem değerleri.....	135
Çizelge 6.26 : Farklı miktarlarda PEGM ilavesi ile elde edilen nem değerleri.....	136
Çizelge 6.27 : Farklı karıştırma sürelerinde elde edilen nem değerleri.....	137
Çizelge 6.28 : Farklı pH değerlerinde PEGM ilavesi ile elde edilen nem değerleri.....	139
Çizelge 6.29 : Farklı miktarlarda flokülant ilavesi ile elde edilen nem değerleri....	140
Çizelge 6.30 : Elek yüzey alanının artırılmasının incelendiği deneylerde elde edilen nem değerleri.....	141
Çizelge 6.31 : Korna tipi ultrasonik titreşim cihazıyla yapılan deneyler sonucunda elde edilen nem değerleri.....	143
Çizelge 6.32 : Tambur tipi ultrasonik titreşim cihazıyla yapılan deneyler sonucunda elde edilen nem değerleri.....	144
Çizelge 6.33 : Farklı kondüsyon sürelerinde elde edilen nem değerleri.....	146
Çizelge 6.34 : Farklı elek açıklıkları kullanılarak yapılan kademeli susuzlandırma deneylerinde elde edilen nem değerleri.....	150
Çizelge 6.35 : Elek yüzeyi üzerine yerleştirilmiş ultrasonik transdüser ile yapılan susuzlandırma deneylerinde elde edilen nem değerleri.....	152
Çizelge 6.36 : En uygun şartlarda yapılan susuzlandırma deneyleri sonucunda elde edilen ürünlerin kimyasal analiz değerleri (kuru esasa göre). ..	155

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Türkiye kömür sahaları ve potansiyel kullanım alanları	15
Şekil 2.2 : Kömürün enerji ve ısı kaynağı olarak potansiyeli ve kullanımı.....	18
Şekil 2.3 : Kömür zenginleştirme yöntemleri ve uygun oldukları tane irilikleri.....	19
Şekil 2.4 : Ağır ortam ayırması ile zenginleştirme akım şeması	20
Şekil 2.5 : Tekne (oluk) tipli ve iki ürünlü Dutch State Mines tekne yıkayıcısı	21
Şekil 2.6 : Wemco ağır ortam tamburu.....	21
Şekil 2.7 : Teska yıkayıcısı	21
Şekil 2.8 : Drewboy ayırıcısı	22
Şekil 2.9 : İki ürün alınan Larcodem ayırıcısı	22
Şekil 2.10 : Dynawhirlpool ayırıcısı	23
Şekil 2.11 : Batak jigi	24
Şekil 3.1 : Tane boyutuna bağlı olarak yüzey neminin değişimi.....	30
Şekil 3.2 : Emme basıncına bağlı olarak nem içeriği değişimi.....	31
Şekil 3.3 : Kavisli eleğin şematik görünüşü	33
Şekil 3.4 : Elliptex susuzlaştırıcısı.....	34
Şekil 3.5 : Derrick eleğinin şematik görünüşü.....	35
Şekil 3.6 : Tüp tipi santrifüjün şematik görünüşü.....	36
Şekil 3.7 : Deliksiz sepet tipi santrifüjün şematik kesiti.....	37
Şekil 3.8 : Konveyör tipi sepet santrifüjün şematik görünüşü.....	37
Şekil 3.9 : Disk tipi santrifüjün şematik kesiti.....	38
Şekil 3.10 : Sürekli çalışan döner tambur filtre	41
Şekil 3.11 : Döner diskli filtre	42
Şekil 3.12 : a) Levhalı pres filtre b) Oyuklu pres filtre	43
Şekil 3.13 : Tikiner'in şematik gösterimi	43
Şekil 3.14 : Döner kurutucu.....	46
Şekil 3.15 : Akışkan yataklı kurutucu	46
Şekil 4.1 : Ultrasonik spektrum	51
Şekil 4.2 : Titreşim hareketinin dalgasal gösterimi	53
Şekil 4.3 : Ses ötesi dalga çeşitleri	55
Şekil 4.4 : a) Bir kuvars kristali, b) Curie kesiti, c) Kuvars kristalden kesilmiş bir x kesimli levha.....	60
Şekil 4.5 : Yük altındaki kuvarsta elektrik yük merkezlerinin oluşumu	61
Şekil 4.6 : Manyetostriksiyon prensibine dayalı olarak çalışan ultrasonik verici ...	63
Şekil 4.7 : Ultrasonik temizleme banyosu	64
Şekil 4.8 : Doğrudan daldırılmalı sonik prob	64
Şekil 4.9 : Yüksek şiddetli su banyosu	65
Şekil 4.10 : Korna reaktör.....	66
Şekil 4.11 : Ultrasonik ışının ara yüzeylerde kırılması ve yansımaları.....	67
Şekil 4.12 : Ultrasonik demetin geometrisi	68
Şekil 4.13 : Çeşitli frekanslarda ve ortamlarda demet oluşumu	69
Şekil 4.14 : Demet eksenini boyunca ses basıncının uzaklıkla değişimi.....	70

Şekil 4.15 : Demet uzak alanı içinde ses basıncının radyal dağılımındaki değişimi	70
Şekil 4.16 : Dairesel kaynak demetinin ses basıncının eksenel ve radyal dağılımları	71
Şekil 4.17 : Ses dalgalarının oluştuğu sıkışma ve gevşeme evreleri	73
Şekil 4.18 : Bir kabarcığın en büyük boyuta büyüyerek çökmesi	73
Şekil 5.1 : Gürmin madencilige ait kömür yıkama tesisinin akım şeması.....	90
Şekil 5.2 : Numunenin elek analiz eğrisi	92
Şekil 5.3 : Yüksek frekanslı titreşimli susuzlandırma eleği.....	94
Şekil 5.4 : Korna tipi ultrasonik titreşim cihazı	94
Şekil 5.5 : Tambur tipi ultrasonik titreşim cihazı	94
Şekil 5.6 : Yüzey geriliminin ölçüldüğü Du-Nouy tensiyometresi	96
Şekil 5.7 : Temas açısının ölçüldüğü goniometre cihazı	97
Şekil 5.8 : Temas açısının (θ) bulunması.....	98
Şekil 5.9 : Elektriksel çift tabaka	99
Şekil 5.10 : Zeta Meter 3.0 cihazının görünümü	100
Şekil 6.1 : Farklı reaktif miktarlarında ölçülen yüzey gerilimi değerlerinin değişimi	102
Şekil 6.2 : Goniometre kullanarak temas açısının bulunması.....	103
Şekil 6.3 : Farklı pH değerlerinde bulunan temas açılarının değişimi.....	104
Şekil 6.4 : Farklı reaktif miktarlarında ölçülen temas açılarının değişimi	105
Şekil 6.5 : Farklı pH değerlerinde elde edilen zeta potansiyel değerlerinin değişimi	106
Şekil 6.6 : Aerodri 100-E ile yapılan ölçümlerde elde edilen zeta potansiyel değerlerinin değişimi.....	108
Şekil 6.7 : Aerodri 104 ile yapılan ölçümlerde elde edilen zeta potansiyel değerlerinin değişimi.....	108
Şekil 6.8 : TTAB ile yapılan ölçümlerde elde edilen zeta potansiyel değerlerinin değişimi.....	109
Şekil 6.9 : PEGM ile yapılan ölçümlerde elde edilen zeta potansiyel değerlerinin değişimi.....	109
Şekil 6.10 : Eğimin nem değişimi üzerindeki etkisi	111
Şekil 6.11 : Besleme hızının nem değişimi üzerindeki etkisi	112
Şekil 6.12 : Frekansın nem değişimi üzerindeki etkisi	113
Şekil 6.13 : Elek açıklığının nem değişimi üzerindeki etkisi	115
Şekil 6.14 : Yatay titreşim+dik titreşimin farklı elek açıklıklarında nem değişimi üzerindeki etkisi.....	116
Şekil 6.15 : Arttırılmış yatay motor kuvvetinin farklı eğimlerde nem değişimi üzerindeki etkisi.....	117
Şekil 6.16 : Açısal titreşim motorunun şematik olarak gösterimi.....	118
Şekil 6.17 : Açısal titreşimin nem değişimi üzerindeki etkisi	119
Şekil 6.18 : Yatay titreşim+açısal titreşimle yapılan deneylerin nem değişimi üzerindeki etkisi.....	120
Şekil 6.19 : Beslenen malzemedeki nem içeriğinin nem değişimi üzerindeki etkisi	121
Şekil 6.20 : pH'ın nem değişimi üzerindeki etkisi.....	123
Şekil 6.21 : Aerodri 100-E miktarının nem değişimi üzerindeki etkisi	125
Şekil 6.22 : Karıştırma süresinin nem değişimi üzerindeki etkisi	126
Şekil 6.23 : Aerodri 100-E ilavesi ile yapılan deneylerde pH'ın nem değişimi üzerindeki etkisi	127

Şekil 6.24 : Aerodri 104 miktarının nem değişimi üzerindeki etkisi.....	129
Şekil 6.25 : Karıştırma süresinin nem değişimi üzerindeki etkisi	130
Şekil 6.26 : Aerodri 104 ilavesi ile yapılan deneylerde pH'ın nem değişimi üzerindeki etkisi.....	131
Şekil 6.27 : TTAB miktarının nem değişimi üzerindeki etkisi.....	133
Şekil 6.28 : Karıştırma süresinin nem değişimi üzerindeki etkisi	134
Şekil 6.29 : TTAB ilavesi ile yapılan deneylerde pH'ın nem değişimi üzerindeki etkisi	135
Şekil 6.30 : PEGM miktarının nem değişimi üzerindeki etkisi.....	137
Şekil 6.31 : Karıştırma süresinin nem değişimi üzerindeki etkisi	138
Şekil 6.32 : PEGM ilavesi ile yapılan deneylerde pH'ın nem değişimi üzerindeki etkisi	139
Şekil 6.33 : Flokülant miktarının nem değişimi üzerindeki etkisi.....	141
Şekil 6.34 : Elek yüzey alanının artırılmasının incelendiği deneylerde elde edilen nem miktarlarının değişiminin ortak gösterimi	142
Şekil 6.35 : Frekans'ın nem değişimi üzerindeki etkisi (Korna tipi).....	144
Şekil 6.36 : Frekans'ın nem değişimi üzerindeki etkisi (Tambur tipi)	145
Şekil 6.37 : Kondüsyon süresinin nem değişimi üzerindeki etkisi.....	146
Şekil 6.38 : Reaktif+ultrasonik titreşimin nem değişimi üzerindeki etkisi	147
Şekil 6.39 : Ultrasonik titreşim+reaktif ilavesinin nem değişimi üzerindeki etkisi	148
Şekil 6.40 : Reaktif ve ultrasonik titreşimin nem değişimi üzerindeki etkisi.....	149
Şekil 6.41 : Farklı elek açıklıklarında yapılan kademeli susuzlandırmanın nem değişimi üzerindeki etkisi.....	151
Şekil 6.42 : Titreşimli elek üzerine yerleştirilmiş korna tip ultrasonik transdüser..	152
Şekil 6.43 : Elek yüzeyi üzerine yerleştirilmiş ultrasonik transdüser'in nem değişimi üzerindeki etkisi.....	153
Şekil 6.44 : Filtrasyon işlemlerinin yapıldığı deney düzeneği	154
Şekil 7.1 : Yatay titreşim ile yapılan deneylerde besleme hızının ve eğimin nem değişimi üzerindeki etkisi	158
Şekil 7.2 : Yatay titreşim ile yapılan deneylerde elek açıklığı ve frekansın nem değişimi üzerindeki etkisi	159
Şekil 7.3 : Yatay titreşim ile yapılan deneylerde motor kuvveti ve eğimin nem değişimi üzerindeki etkisi	160
Şekil 7.4 : Aerodri 100-E ilavesi ile yapılan deneylerde reaktif miktarı ve pH'ın nem değişimi üzerindeki etkisi	160
Şekil 7.5 : Aerodri 104 ilavesi ile yapılan deneylerde reaktif miktarı ve pH'ın nem değişimi üzerindeki etkisi	161
Şekil 7.6 : TTAB ilavesi ile yapılan deneylerde reaktif miktarı ve pH'ın nem değişimi üzerindeki etkisi	162
Şekil 7.7 : PEGM ilavesi ile yapılan deneylerde reaktif miktarı ve pH'ın nem değişimi üzerindeki etkisi	162
Şekil 7.8 : Elek yüzey alanının artırıldığı deneylerde yüzey alanının ve Aerodri 100-E miktarının nem değişimi üzerindeki etkisi.....	163
Şekil 7.9 : Elek yüzey alanının artırıldığı deneylerde yüzey alanının ve Aerodri 104 miktarının nem değişimi üzerindeki etkisi	164
Şekil 7.10 : Elek yüzey alanının artırıldığı deneylerde yüzey alanının ve TTAB miktarının nem değişimi üzerindeki etkisi	165
Şekil 7.11 : Elek yüzey alanının artırıldığı deneylerde yüzey alanının ve PEGM miktarının nem değişimi üzerindeki etkisi	165

SEMBOL LİSTESİ

A	: Titreşim genliği
E	: Elastisite modülü
f	: Frekans
I	: Ultrasonik enerji şiddeti
λ	: Dalga boyu
γ	: Poisson oranı
N	: Yakın dalga boyu
θ	: Temas açısı
ρ	: Yoğunluk
P	: Ultrasonik basınç
ω	: Açısal frekans
w	: Ortamın akustik empedansı
V	: Ses hızı
T	: Periyot

KÜÇÜK BOYUTLU KÖMÜRLERİN SUSUZLANDIRILMASINDA ULTRASONİK VE MEKANİK TİTREŞİM MEKANİZMALARININ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Önümüzdeki 20 yıllık süreçte de kömürün enerji tüketimindeki payının değişmeyeceği ifade edilmektedir. Diğer fosil kaynaklarına göre kömürün dünya üzerinde homojen dağılımı ve rezervi, kömürü özellikle arz güvenliği açısından stratejik bir üstünlüğe taşımaktadır. Tipik bir kömür hazırlama tesisi beslenen kömürün yaklaşık %20'si oranında ve tamamı 0,5 mm altında olan malzeme üretir. Genellikle bu boyutun altındaki malzeme yüksek işlem maliyetleri yüzünden kullanılmaz. Ancak, gelişen kömür temizleme teknolojileri sayesinde bu kömürler düşük kül ve düşük piritik sülfür içerikleriyle verimli olarak değerlendirilebilirler. İnce boyutlu kömür temizleme teknolojilerindeki en büyük zorluk bu malzemelerin ekonomik bir şekilde susuzlandırılmasıdır. İnce boyutlu temiz kömürlerin susuzlandırılması ekonomik ve pratik bir çözüm bulunana kadar temiz kömür teknolojileri geliştirmek için gösterilen çabalar gereksiz olacaktır.

Susuzlaştırmada mekanik, kurutmada ise ısı yöntemleri kullanılarak, kömürlerin nem içeriği azaltılır. Mekanik yöntemler ile giderilebilecek nem miktarı sınırlıdır, daha fazla nem gidermek için kömürün kurutulması gerekir. Hem susuzlandırma hem de kurutma yapılmasının belli başlı nedenleri; nakliye, stoklama ve yakma işlemlerinde enerji kaybını azaltmak, kırma, öğütme, yakma kapasitelerini arttırmak ve teknolojik gereksinimlere uygun kömür sağlamaktır.

Katı-su karışımlarının özelliklerinin ve yapılarının değiştirilmesi susuzlandırma işlemlerinin verimini etkilemektedir. Bu özelliklerin değiştirilmesi, katı tanecik yüzeyleri ile su arasındaki bağ kuvvetlerinin azalmasına neden olarak, mekanik susuzlandırma işlemlerinde suyun daha kolay ayrılmasını sağlamaktadır. Mekanik susuzlandırma işlemlerinde verimi arttırmak amacıyla, değişik fiziksel ve kimyasal yöntemler kullanılmaktadır. Bilindiği üzere elektrokinetik potansiyel, katı-su karışımlarının susuzlandırılmasında, en önemli parametrelerden biridir. Yüzey aktif maddelerin susuzlandırma sistemleri ile birlikte kullanılmasıyla katı ve su arasındaki moleküller arası kuvvetler azalmakta ve böylece susuzlandırma metodlarının kapasitesi ve verimi artmaktadır. Bununla birlikte kolloid stabilitesini değiştiren ultrasonik alanın elektrokinetik susuzlandırma işleminin yanında kullanılması, geleneksel susuzlandırma metodlarının kapasitelerini ve verimini arttırmaktadır. Ayrıca, ultrasonik titreşim filtrelerin tıkanmalarını önlemekte ve emici bir etki yaratarak nemin uzaklaştırılmasını kolaylaştırmaktadır.

Bu araştırma kapsamında, küçük boyutlu kömür içeren pülplerdeki kömürün yüksek frekanslı titreşimli elek kullanılarak susuzlandırılması amaçlanmış, yatay titreşime ek olarak verilen dik ve açılı titreşimin nem değişimi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Mekanik susuzlandırma işlemlerinin verimini arttırmak amacıyla çeşitli yüzey aktif maddeler ve ultrasonik titreşim kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiş, elde edilen veriler ışığında model fonksiyonları ve üç boyutlu grafikler oluşturulmuştur. Ayrıca, eleklerle yapılan susuzlandırma işlemleri sırasında kömür içerisinde bulunan artık

karakterdeki ince boyutlu kil ve şistlerin eleme yoluyla uzaklaştırılarak, susuzlandırılacak malzemenin aynı zamanda zenginleştirilmesi amaçlanmıştır.

Yüksek titreşim frekanslı susuzlandırma eleğinin en uygun eğim, frekans, besleme hızı ve elek açıklığı parametrelerinin tespiti amacıyla yapılan deneyler sonucunda, yaklaşık %82,5 nem oranından %44,77 nem oranına; elek eğiminin 4°, frekans değerinin 50 Hz, besleme hızının 20 lt/dakika ve elek açıklığının 0,100 mm olduğu durumlarda ulaşılmıştır.

Motor kuvvetinin artırılmasıyla yapılan susuzlandırma deneylerinde en düşük nem değerine (%43,04) besleme hızının 20 lt/dakika, elek açıklığının 0,100 mm ve eğimin 3° olduğu deneyde ulaşılmıştır.

Yatay titreşim motoru ile birlikte kullanılan açısız titreşim motorunun susuzlandırma üzerindeki etkisinin araştırılması amacıyla en uygun koşullarda deneyler gerçekleştirilmiş ve en düşük nem değeri olarak %41,00 bulunmuştur.

Reaktif ilavesinin susuzlandırılma üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla sırasıyla; Aerodri 100-E, Aerodri 104, Tetradesil Trimetil Amonyum Bromür (TTAB), Polietilen Glikol Monooleat (PEGM) ve Fusifloc 5922 kullanılarak deneyler yapılmıştır. En düşük nem oranı olan %39,48'e reaktif olarak PEGM kullanıldığı, karıştırma süresinin 10 dakika, pH'nın doğal pH (7,25) ve reaktif miktarının 200 g/ton seçildiği durumlarda ulaşılmıştır.

Elek yüzey alanının artırılmasının susuzlandırma üzerindeki etkisinin araştırılması amacıyla bulunan en iyi koşullar sabit tutularak, reaktifsiz ve reaktif ilavesi ile deneyler yapılmıştır. 4 kademe olarak gerçekleştirilen bu deneylerde en düşük nem oranına PEGM ilave edildiği durumlarda ulaşılmıştır. Reaktif ilave edilmeden yapılan deneylerde nem oranı %41,00'dan %39,15'e indirilirken, PEGM'in ilave edilmesi durumunda %39,48'den %37,75'e düşmüştür.

Süspansiyon içerisindeki kömür tanelerinin yüzey özelliklerini değiştirerek susuzlandırma işleminin veriminin artırılması amacıyla korna ve tambur tipi ultrasonik transdüser kullanarak reaktif ilavesi olmadan deneyler yapılmıştır. 25 kHz frekans değerinde çalışan tambur tipi ultrasonik transdüser'in kullanıldığı deneylerde nem oranı %41,00'dan %39,45'e düşürülmüştür.

Reaktif ilavesi ve ultrasonik şartlandırmanın küçük boyutlu kömür içeren pülp'ün susuzlandırmasındaki etkisinin araştırılması amacıyla, en uygun koşullar sabit tutularak değişik kombinasyonlarda deneyler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde en düşük nem değerlerine ultrasonik titreşim+reaktif ilavesi ile yapılan deneylerde ulaşıldığı görülmektedir.

Titreşimli elek üzerine yerleştirilen farklı elek açıklıklarına sahip elek yüzeylerinin susuzlandırma üzerindeki etkilerinin araştırılması amacıyla reaktif ilavesi ve reaktif ilavesi olmadan kademeli olarak susuzlandırma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Reaktif ilavesi ile yapılan deneylerde ilk olarak pülp tambur tipi ultrasonik transdüser kullanılarak şartlandırılmış daha sonra yüzey aktif madde (PEGM) ilave edilmiştir. 100 ve 150 mikron elek açıklıklarına sahip yüksek frekanslı titreşimli elek kullanılarak yapılan susuzlandırma sonucunda sırasıyla %37,66 ve %36,89 nem içeriklerine sahip malzeme üretilmiştir.

Yüksek frekanslı titreşimli eleğin elek yüzeyine temas edecek şekilde yerleştirilen korna tipi ultrasonik transdüser kullanılarak susuzlandırma deneyleri gerçekleştirilmiş ve nem oranında yaklaşık olarak %0,3'lük bir düşüş sağlanmıştır.

EFFECTS OF ULTRASONIC AND VIBRATION MECHANISM ON DEWATERING OF COAL FINES

SUMMARY

It is forecast that coal will constitute a principal source of energy for the next several decades. According to the other source of fossil homogenous distribution and reserve of coal brings a strategic advantage in terms of security. A typical coal preparation plant produces about 20 percent of the mined coal as minus 0,5 mm. Generally, this fine fraction is discarded due to its high cost of processing. However, with the development of advanced coal cleaning technology, cleaning of fine size coal to low ash and low pyritic sulfur is feasible at high recovery. One of the biggest hurdles in utilization of fine coal cleaning technology by the coal industry is the economic dewatering of the fine clean coal product. Until an economical and practical solution to dewatering of fine clean coal is achieved, the efforts devoted to developing fine clean coal technology will be wasted.

Mechanical and drying methods are used to reduce moisture content of coal. The removal of moisture with mechanical methods is limited. The coal must be dried for further removal. The main reasons of dewatering and drying are to decrease energy loss in transportation, stocking and combustion processes, increase the capacities of crushing, grinding and combustion and prepare a suitable coal for technological purposes.

Changes in the properties and structures of solid-water mixtures affect the efficiency of dewatering processes. By modifying these properties, bond forces between solid particle surfaces and water is decreased and water is easily removed by mechanical dewatering techniques. Nowadays, to increase the efficiency of mechanical dewatering processes, different chemical and physical techniques were developed. As it is known, elektrokinetic potential is one of the most important parameter for dewatering of solid-water mixtures. Chemical reagents used along with conventional systems enhance the mechanical dewatering processes by diminishing the intermolecular forces between solid surfaces of the particles and water, thus increasing the capacity of the dewatering method and the yields. When ultrasonic field which can change colloid stability is used along with electrokinetic dewatering process the efficiencies and capacities of conventional dewatering methods are increased. Also, ultrasonic field helps to clear screen's openings and provide a further dewatering.

Within the frame of this study, application of vertical and angular vibration mechanisms and chemical reactive addition experiments had been accomplished by using high frequency vibration screen mechanism. To increase mechanical dewatering processes ultrasonic field was tested along with chemical reactivities and optimum dewatering conditions were obtained. Finally, by using Mathematica algebra computer package, experimental data were analyzed and model functions and three-dimensional graphics were produced. In addition, it was aimed to enrich

coal after removing fine size waste materials that are clay and schist by vibration screening.

At the end of the optimization experiments of the high frequency vibration screen unit for incline, frequency, feed rate and screen size parameters, 82,5% moisture ratio of the feed was reduced to 44,77% with screen incline of 4°, frequency of 50 Hz, feed rate of 20 lt/min and screen opening size of 0,100 mm.

Dewatering experiments were accomplished to investigate the effect of motor's force. The minimum moisture ratio (43,04%) was found when the screen incline of 3°, frequency of 50 Hz, feed rate of 20 lt/min and screen opening size of 0,100 mm were chosen.

By keeping last operating parameters constant, angular vibrating mechanism was added on vibration screen and the moisture was reduced to 41,00%.

To investigate surface active agents' effects on the clean coal sample Aerodri 100-E, Aerodri 104, Tetradecyl Trimethyl Ammonium Bromid (TTAB), Polyethylene Glycol Monooleate (PEGM) and Fusifloc 5922 were used. The best result had been accomplished as moisture ratio 39,48% with 200 g/t of PEGM at the natural pH of the pulp, which is 7,25.

The increasement of screen surface area of vibrating screens on the moisture differentiation had been investigated by having the best conditions constant, with and without reactive. The experiments were run by 4 stages without reactive the moisture value at the first step 41,00% reduced to 39,15% and with reactive (PEGM) the moisture value at the first step 39,48% was reduced to 37,75%.

In order to change surface properties of coal particles and increase dewatering efficiency two different ultrasonic transducers (horn and drum type) were used with and without reactive. The moisture content was reduced from 41,00% to %39,45 when drum type ultrasonic transducer which has capable to reach 25 kHz frequency was used.

To investigate the effects of reactive addition and ultrasonic treatment on dewatering of fine size clean coal, the best conditions were kept constant and experiments were realized at different combinations. The best results were gained when the ultrasonic treatment was applied first then the addition of reactive.

Experiments were accomplished to find the effect of screen opening size on dewatering. The pulp was first treated with ultrasonic vibration then PEGM was added. After conditioning dewatering experiment were done by using two different size screens (100 and 150 microns) and the moisture content was reduced to 37,66% and 36,89%, respectively.

Horn type ultrasonic probe was attached on the surface of screen and differentiation in moisture were investigated. At the end of the experiments the moisture content was reduced about 0,3% for all conditions.

1. GİRİŞ

Fosil yakıtlar (petrol, doğalgaz, kömür) sadece enerji hammaddesi değil; aynı zamanda birçok sanayinin (boya, plastik, eczacılık, kozmetik, demir-çelik, alüminyum, vs. gibi) ana girdilerinin üretildiği hammaddelerdir. Bugünkü tüketim seviyeleri ile dünya petrol rezervlerinin 40 yıl, doğalgaz rezervlerinin 60 yıl ve kömür rezervlerinin ise 200 yılda tükeneceği tahmin edilmektedir.

Fosil enerji kaynaklarından olan kömür; Dünya üzerinde yaygın olarak bulunması, üretilmesi ve görünür kömür rezervlerinin şu anki üretim seviyeleri baz alındığında diğer fosil yakıtlara göre ömürlerinin fazla oluşu, fiyat istikrarı, taşıma kolaylığı, depolama imkanlarının rahatlığı, kullanımının kolaylığı yönünden emniyetli ve güvenilir olması, kullanıcıya arzının ucuzluğu ve sürekliliği, gibi özellikleri ile vazgeçilmez bir enerji kaynağıdır. Kömürün bu konumu, geçmişte olduğu gibi gelecekte de sürdürülebilir kalkınma ve enerjide güvenilirlik açısından önemli bir role sahip olmaya devam edecektir.

Bugün varolan ve önümüzdeki yıllarda giderek büyük boyutlara tırmanacak olan kömür (özellikle linyit) açığının azaltılabilmesi için üretim düzeyinin artırılması zorunluluğu vardır. Bu, kendi özkaynaklarımıza dayalı bir enerji üretim-tüketim dengesinin kısa ve orta vadede kurulabilmesi, başka bir deyişle dışarıdan karşılanan kömür, gaz, petrol gibi yakıtların tüketimdeki paylarının azaltılması, açısından önemlidir.

Kömür madenciliği sürekli yatırım gerektiren ve yoğun sermaye isteyen bir madencilik türüdür. Uzun vadeli planlama, arama ve hazırlık, etkin ve verimli üretim, hızlı pazarlama zorunludur. Kömür madenciliğinin gelişimine bakıldığında, dışa bağımlı alternatif yakıtların ülkemize girmesi kamu sektöründe yaşanan yönetsel ve özelleştirme politikalarının belirsizliğinden kaynaklanan sorunlar, kömür madenciliğinin gelişme dinamiğinin kaybolmasına yol açmıştır. Hızlı kentleşmenin sonucu olarak büyük şehirlerimizde yaşanan hava kirliliği, yerli kömürlerimizin yakılmasına getirilen kısıtlamalar üretim ve yatırım düşüşleri meydana getirmiştir.

Kazı mekanizasyonundaki yeni teknikler, küçük boyutlarda serbestleşme ve ardından flotasyon, flokülasyon, gravite ayırması ve manyetik ayırma gibi cevher hazırlama teknikleri küçük boyutlarda üretimi zorunlu hale gelmiştir. Küçük boyutlu malzeme üretiminin giderek artması, küçük boyutlu minerallerin oluşturduğu süspansiyonlardaki suyun uzaklaştırılmasını ekonomik ve teknolojik bakımdan zorunluluk haline getirmiş ve bu çoğu zaman çok zor ve pahalı bir iş olmuştur.

Fakat küçük boyutlarda tanelerin susuzlandırılması boyuta bağlı olarak daha da zorlaşmaktadır. Tanelerin boyutu küçüldükçe yüzey alanı artmakta ve susuzlandırma için bir sorun haline gelmektedir.

Bilindiği gibi, turbalar %60'ın, yumuşak linyitler %35'in ve mat sert linyitler de %25'in üzerinde orjinal nem içermektedir. Sayılan bu kömürlerin saf (mineral maddesiz) kömür bazındaki ısı değerleri de, 5.000-6.500 Kcal/kg arasındadır, yani düşüktür. Bu kömürlerin kül oranları azaltılsa bile, kurutulmadıkları takdirde, alt ısı değerlerini istenen seviyelere yükseltmek (4.500 Kcal/kg'ın üzerine çıkarmak) mümkün değildir.

Örneğin, saf kömür bazında 5.640 Kcal/kg alt ısı değeri, %39 nem oranı ve %42 kül oranı (kuru kömür bazında) olan bir kömür zenginleştirilerek, kül oranı %15'e (kuru kömür bazında) indirilse bile, alt ısı değeri, 1879'dan 2.854 Kcal/kg'a çıkacaktır. Bu kömür kurutulmuş nem oranı da, %15'e indirildiğinde ise, alt ısı değeri 3.986 Kcal/kg'a yükselecektir, yani ısıtmada kullanılabilir yakıt niteliği kazanacaktır. Bu basit hesapta gösteriyor ki, nem, kömürün ısı değerini külden daha fazla etkilemektedir.

Katı-su karışımlarının özelliklerinin ve yapılarının değiştirilmesi susuzlandırma işlemlerinin verimini etkilemektedir. Bu özelliklerin değiştirilmesi, katı tanecik yüzeyleri ile su arasındaki bağ kuvvetlerinin azalmasına neden olarak, mekanik susuzlandırma işlemlerinde suyun daha kolay ayrılmasını sağlamaktadır. Mekanik susuzlandırma işlemlerinde verimi arttırmak amacıyla, değişik fiziksel ve kimyasal yöntemler kullanılmaktadır. Bilindiği üzere elektrokinetik potansiyel, katı-su karışımlarının susuzlandırılmasında, en önemli parametrelerden biridir. Bununla birlikte kolloid stabilitesini değiştiren ultrasonik alanın elektrokinetik susuzlandırma işleminin yanında kullanılması, konvansiyonel susuzlandırma metodlarının kapasitelerini ve verimini arttırmaktadır. Ayrıca, ultrasonik titreşim filtrelerin

tıkanmalarını önlemekte ve emici bir etki yaratarak nemin uzaklaştırılmasını kolaylaştırmaktadır.

Bu kapsamda, küçük boyutlu kömür içeren pülplerdeki kömürün yüksek frekanslı titreşimli elek kullanılarak susuzlandırılması amaçlanmış, yatay titreşime ek olarak verilen dik ve açılı titreşimin nem değişimi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Mekanik susuzlandırma işlemlerinin verimini arttırmak amacıyla çeşitli yüzey aktif maddeler ve ultrasonik titreşim kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiş, elde edilen veriler ışığında model fonksiyonları ve üç boyutlu grafikler oluşturulmuştur. Ayrıca, eleklerle yapılan susuzlandırma işlemlerinin bir boyut sınıflama işlemi olduğu göz önüne alınarak, kömür içerisinde bulunan artık karakterdeki ince boyutlu kil ve şistlerin eleme yoluyla uzaklaştırılarak, susuzlandırılacak malzemenin aynı zamanda zenginleştirilmesi amaçlanmıştır.

Bu tez, kömür zenginleştirme yöntemleri, kömürün susuzlandırılması, ultrasonik titreşim ve uygulama alanları hakkındaki genel bilgileri, deneyde kullanılan malzemeleri, yöntemleri, deney sonuçlarını ve deneysel verilerin modellenmesini içermektedir.

2. KÖMÜR VE ZENGİNLEŞTİRME YÖNTEMLERİ

2.1 Kömürün Tanımı ve Önemi

Kömür; çoğunlukla karbon, hidrojen ve oksijenden oluşan az miktarda kükürt ve nitrojen içeren, kimyasal ve fiziksel olarak farklı yapıya sahip maden ve kayadır. Diğer içerikleri ise kül teşkil eden inorganik bileşikler ve mineral maddelerdir. Kömürü yapan ana eleman karbondur. Bu nedenle oluşumu karbon çevrimine çok bağlıdır. Kömür çevrimi bataklıklarda başlar. Uygun ortamlarda, bataklıklarda çürüme ve bozunmadan kurtulan bitkisel kalıntı birikimlerinin, zamanla fiziksel ve biyokimyasal etkilerle değişimi sonucu kömür oluşmaktadır. Kömürde genelde iki evre benimsenir. Biyokimyasal evre, turbalaşma; dinamo kimyasal veya başkalaşma evresi ise kömürleşmedir (Kural, 1998).

Kömür, dünyada en yaşlı şekilde bulunan, güvenilir, aynı zamanda düşük maliyetlerle elde edilebilen, temiz bir fosil yakıttır. Kömür yaygındır; dünyada 50'den fazla ülkede üretilmektedir. Kömür rezervleri diğer fosil yakıtlar gibi (petrol ve doğalgaz) dünyanın belli bir bölümünde değil, tüm dünyada yaygın bir şekilde bulunmaktadır.

Kömür; kullanımı, depolaması ve nakliyesi açısından en emniyetli fosil yakıttır. Endüstriyel ve diğer alanlarda elektrik enerjisinin, rekabetçi fiyatlarla ve güvenilir olarak temini açısından; kömürün dünyada yaygın bir şekilde bulunuşu ve birçok ülke tarafından üretiliyor oluşu tedarikte güvenilirliği sağlamaktadır. Günümüzde kömür, tüm dünyada temiz kömür teknolojileri kullanılarak doğayı kirletmeden kullanılmaktadır.

Elektrik enerjisi üretiminde ucuz ve rekabetçi bir yakıt olması nedeniyle, dünya elektrik üretiminin yaklaşık %40'ı kömürden karşılanmaktadır. Fosil kaynaklardan petrol ve doğalgaz rezervlerimizin az olması, gelecekte kömürü bugünkünden daha fazla ön planda tutacaktır. Sadece diğer fosil kaynaklara göre rezervin büyüklüğü açısından değil, kömür yataklarının yurdumuzun çeşitli bölgelerine dağılmış olması, ekonomik, bölgesel ve kültürel kalkınmaya son derece olumlu etkide bulunması,

işletilmesi nedeniyle ortaya çıkan katma değer, elektrik enerjisi üretiminde kW/saat başına ucuz hammadde olması ve emniyetli taşınması vb. faktörler, kömürü ülkemizin en önemli fosil enerji kaynağı haline getirmektedir.

2.2 Kömürün Sınıflandırılması

Kömürleşme süreci ve yataklanma, nem içeriği, kül ve uçucu madde içeriği, sabit karbon miktarı, kükürt ve mineral madde içeriklerinin yanı sıra jeolojik, petrografik, fiziksel, kimyasal ve termik özellikler yönünden kömürler çok çeşitlilik gösterirler. Bu durum birçok ülkede kömürlerin birbirine benzer özellikler ve yakın değerler temelinde sınıflandırılmasını zorunlu kılmıştır.

Kömür üretimi, kullanımı ve teknolojisinde ileri ülkeler öncelikle kendi kömürlerinin özelliklerine göre bir sınıflama yaptıkları gibi uluslararası genel bir sınıflama için ortak standartlar da geliştirmişlerdir (Kural, 1998).

Değişik tipte kömürlerin kullanım amaçlarına göre uluslararası sınıflandırılmasında; ilk olarak 1957 yılında çeşitli ülkelerden üyelerin oluşturduğu Uluslararası Kömür Kurulu'na birçok ülkeden temin edilen numuneler üzerinde yapılan çalışmalar, Uluslararası Standartlar Örgütü (ISO) tarafından da desteklenerek genel bir sınıflama yapılmıştır (Çizelge 2.1). Bu sınıflamada; kalorifik değer, uçucu madde içeriği, sabit karbon miktarı, koklaşma ve kekleşme özellikleri temel alınarak sert ve kahverengi kömürler olarak iki ayrı sınıfa ayrılmıştır:

a) Sert kömürler; ıslak ve külsüz bazda 5.700 Kcal/kg'ın üzerinde kalorifik değerdedir. Uçucu madde içeriği, kalorifik değer ve koklaşma özelliklerine göre alt sınıflara ayrılırlar.

b) Kahverengi kömürler; ıslak ve külsüz bazda 5.700 Kcal/kg'ın altında kalorifik değerdedir. Toplam nem içeriği ve kalorifik değere göre alt sınıflara ayrılırlar.

Düşük ısı ve basınç altında meydana gelen kömürler, düşük kaliteli linyiti oluşturur. Yüksek sıcaklık ve basınç altında alt bitümlü ve bitümlü kömürler; çok yüksek sıcaklık ve basınç altında ise, en yüksek kaliteli kömürler (antrasitler) ortaya çıkmıştır (Elevli, 2003).

Yerin ısı arttıkça, önceleri “turba” olarak adlandırılan, ama kömür sayılmayan bu organik madde, önce linyit, daha sonra alt bitümlü kömür, sonra taş kömürü, antrasit

ve en sonunda şartlar uygun olursa grafitte dönüşür. Bu ilerleyen olgunlaşma sürecine “kömürleşme” her seviyeye de “kömürleşme derecesi” (rank) denmektedir.

Çizelge 2.1 : Uluslararası genel kömür sınıflandırılması (Coal Information Report, 1983).

Sert Kömürler	Kahverengi Kömürler
1. Koklaşabilir kömürler (Yüksek fırınlarda kullanıma uygun kok üretimine izin veren kalitede)	1. Alt bitümlü kömürler (4.165 – 5.700 Kcal/kg arasında kalorifik değerde olup topaklaşma özelliği göstermez)
2. Koklaşmayan kömürler a) Bitümlü kömürler b) Antrasit	2. Linyit (4.165 Kcal/kg'ın altında kalorifik değerde olup topaklaşma özelliği göstermez)

Kömür rank sınıflaması (kömürleşme derecesi sınıflaması) uluslararası kömür sınıflamasında kabul edilen diğer bir sınıflamadır. Bu sınıflandırmada karbon içeriği temel değişkendir. Yüksek ranklı (kömürleşme derecesi yüksek) kömürlerde uçucu madde içeriği, düşük ranklı (kömürleşme derecesi düşük) kömürlerde ise kalorifik değer baz alınarak sınıflandırılmıştır (Url-1). Çizelge 2.2’de kömür rank sınıflaması ve özellikleri, Çizelge 2.3’te genel sınıflandırmada yer alan kömürlerin tanıtıcı özellikleri gösterilmiştir.

Çizelge 2.2 : Çeşitli kömürleşme derecelerinde kömür özellikleri (Tsai, 1982).

Rank (Kömürleşme Derecesi)	Uçucu Madde İçeriği, % (Islak-Külsüz)	Karbon İçeriği, % (Islak-Külsüz)	Kalorifik Değer Btu/Lb, (Mineral Maddesiz)	Nem İçeriği, %
1. Linyit	69-44	76-62	8.300-6.300	52-30
2. Alt Bitümlü	52-40	80-71	11.500-8.300	30-12
3. Bitümlü				
a) Yüksek Uçuculu	50-29	86-76	13.000-10.500	15-2
b) Orta Uçuculu	31-22	91-86	14.000	5-1
c) Düşük Uçuculu	22-14	91-86	14.000	5-1
4. Antrasit	14-2	99-91	14.000	5-1

Çizelge 2.3 : Genel sınıflandırmada yer alan kömürlerin tanıtıcı özellikleri (Mervit, 1981).

Linyit	Alt Bitümlü Kömürler	Bitümlü Kömürler	Antrasit
Kahverengi	Siyah	Koyu siyah	Kahverengi parlak siyah
Kırılğan, çabuk toz halinde ufalanma	Oksidasyonla veya kurutma sonucunda ince parçalar ve toz halinde ufalanma	Bloksu kırılma	Merceksi kırılma
Masif, odunsu veya üniform kilsli doku	Masif	Bantlı ve kompakt	Sert ve dayanıklı
4.610 Kcal/kg'ın altında	Isı değeri; 4.610-6.390 Kcal/kg arasında	Isı değeri; 5.390-7.700 Kcal/kg arasında	Isı değeri; 7.000 Kcal/kg'ın üzerinde
Uçucu madde miktarı ve nem içeriği yüksek	Uçucu madde ve nem içerikleri bitümlü kömürlerden daha yüksek	Uçucu madde ve nem içeriği düşük	Uçucu madde ve nem içeriği düşük
Sabit karbon İçeriği düşük	Sabit karbon içeriği bitümlü kömürden düşük	Sabit karbon içeriği yüksek	Sabit karbon içeriği yüksek

2.3 Kömürün Petrografik İçeriği

Kömürün petrografik içeriği, koklaştırma, sıvılaştırma ve gazlaştırma alanlarında büyük önem kazanır. Bir taşkömürü numunesine gözle bakıldığında parlak ve donuk bantlardan oluştuğu gözlenir. Parlak bantlar vitren ve klaren iken, donuk bantlar durain ve füzendir. Bunların hepsine kömür kayacı anlamına gelen litotip denir. Litotipler de maserallerden oluşurlar. Maseraller, kömürleri oluşturan en küçük mikroskobik birimlerdir ve az veya çok homojen yapıya sahiptirler. İnorganik kayaçların en küçük birimleri olan minerallere benzetilebilirler (Kural, 1998).

2.4 Kömürün İçerdiği Safsızlıklar

Kömürün içerdiği ve gerek kullanım gerekse kömür yıkamada önem taşıyan safsızlıklar üç grupta toplanmaktadır: Nem, Kül, Kükürt.

2.4.1 Nem

Kömür, yerindeyken, kuru ve yağlı gözükmeye karşın, su ile doygundur. Bu nem varlığı, yatak nemi olarak adlandırılır. Nem, kömürün yüzeyinde olduğu gibi, kömür içindeki çatlak ve gözeneklerde de bulunabilir. Taşkömürleri, orijinal bazda, genellikle %10'un altında nem içerirken, linyitler, kalitesine bağlı olarak %55'lere kadar ulaşan oranlarda nem içerebilirler.

2.4.2 Kül

Bütün kömürler organik olmayan maddeler içerirler. Kömürün yanmasından sonra, yanmayan maddelerden oluşan artığa kül denir. Külün büyük bir kısmı kimyasal bileşim olarak silisyum, alüminyum ve demir oksitlerinden ibarettir.

Kömürlerde iki türlü kül bulunur. Bunlar bünye külü ve harici kül'dür. Bünye külü, kömürü oluşturan bitkilerden gelen inorganik maddelerdir ve kömürdeki toplam külün %2-3'ünü oluştururlar. Harici kül ise, kömürü oluşturan bitkilerin dışında kömüre karışan yabancı maddelerdir. Bu maddeler, kömüre, kömürleşme esnasında karışabileceği gibi, kömürleşmeden sonra da kömür damarları içindeki çatlak ve kırıklar boyunca girebilir. Bu yabancı maddeler kil, şist, kumtaşı, kireçtaşı ve benzerleri olabilir. Bunlar, kömür içinde mikroskobik parçalar halinde bulunabileceği gibi, damarlar ve/veya tabakalar halinde de bulunabilir. Yabancı maddeler, tüvenan kömüre, üretim esnasında tavan ve taban yan taşlarından da karışabilir. Bunların hepsi harici külü oluştururlar. Bünye külü, kömürden, yıkama yöntemleriyle uzaklaştırılmazken, harici kül, kömür yıkama yöntemleriyle belli bir oranda azaltılabilir.

2.4.3 Kükürt

Bütün kömürler az miktarda da olsa, kükürt içerirler. Kömürlerde bulunan kükürt üç formda olabilir. Bunlar, organik, inorganik ve sülfat kükürtüdür. Bunlara ek olarak bazı kömürlerde elementer kükürtle karşılaşılmasıdır. Organik kükürt, kömürün organik materyalinin bir parçasıdır. Bu nedenle, kömürden fiziksel yöntemlerle uzaklaştırılması mümkün değildir. Sülfat kükürtü, kömürde toplam kükürtün çok az bir kısmını oluşturur. Jips (CaSO_4) halinde bulunduğu gibi, kömürün hava ile uzun süre teması sonucu FeSO_4 olarak da bulunabilir. Piritik kükürt ise, pirit ve markasit minerallerine bağlı olarak bulunur. Kömür içerisinde bantlar, damarlar, merccekler,

küresel veya dissemine tanecikler halinde türlü şekil ve biçimlerde dağılırlar. İster gözle görülebilir (makroskobik), ister mikroskobik olsun piritik kükürt, kömürden serbestleştiği takdirde flotasyon veya diğer zenginleştirme yöntemleriyle kömürden temizlenebilir.

2.5 Kömürün Türkiye’de Bulunış Şekilleri

2.5.1 Linyit

Türkiye’de linyit yatakları Alp Orojenezini’nin etkisiyle oluşmuş dağ silsilelerinin arasında sıkışan çöküntü havzalarında gelişmiştir. Linyitlerimizin çökelim yaşları genellikle Miosen ve Pliosen’dir. Ancak Eosen ve Oligosen’de de çökelmiş linyit yatakları bulunmaktadır. Linyit sahaları ülkemizde bütün bölgelere yayılmış olup ısı değerleri 1.000-5.000 Kcal/kg arasında değişmektedir. Toplam linyit rezervlerimizin yaklaşık %6,9’u 3.000 Kcal/kg’ın üzerinde, %13,2’si 2.500-3.000 Kcal/kg arasında, %79,9’u ise 2.500 Kcal/kg’ın altında ısı değerine sahiptir.

2.5.2 Taşkömürü

Ülkemizin en önemli taşkömürü rezervleri Zonguldak ve civarındadır. Zonguldak havzasında bugüne kadar yapılan çalışmalar sonucunda 1,1 milyar ton rezerv saptanmıştır. Bu rezervin yaklaşık 423 milyon tonu görünür niteliktedir. Havza, Karadeniz Ereğli’den başlayarak Kandilli, Zonguldak, Amasra, Pelitovası, Azdavay ve Söğütözü’ne kadar uzanan bölgeyi kapsamaktadır. Bölge, Karbonifer devrinde çökelmiş, Hersiniyen ve Alpin Orojenezleri’nin etkisiyle kıvrılmış, kırılmış ve çok karmaşık bir yapı kazanmıştır. Havzada çok sayıda kömür damarı olmakla beraber 22 damar işletilebilmektedir. Damar eğimleri 0-90 derece arasındadır. Üretim, +284 ve -560 kotlarında tamamen yeraltı işletmeciliğiyle yürütülmektedir. Kömürün ortalama kimyasal özellikleri %55 sabit karbon, %26 uçucu madde, %11 kül, %8 nem, ısı değeri ise, 6.000 Kcal/kg düzeyindedir.

2.5.3 Asfaltit

Asfaltit, petrol kökenli bir kayadır. Derinlerde bulunan sıvı veya yarı sıvı durumdaki asfalt maddesinin hidrostatik basınç ve sıcaklık gibi etkenlerle taşınarak, yarık, çatlak ve boşluklara yerleşmesiyle oluşmuştur. Ekonomik kalınlıkta filon tipi yataklar

Şırnak ve Silopi'dedir. Yapılan etüt ve sondajlarla 79,9 milyon ton asfaltit rezervi belirlenmiştir. Bu rezervin 44,5 milyon tonu görünür niteliktedir.

2.5.4 Bitümlü şist

Bitümlü şistler veya bitümlü şeyller, kerojen kapsayan ince taneli tortul kayaçlardır. Kerojen, organik bir madde olup, hidrojen, oksijen, azot ve kükürt içerir. Kerojen içeren ince taneli kayaçlar başlıca kalsiyum karbonat, feldspat, kuvars, kil, pirit ve nadir elementlerden oluşur. Bitümlü şistler çeşitli ortamlarda çökelirler. Kömür oluşumu ile ilgili bataklıklar, lagünler, kıta platformları ve çanaklar bitümlü şeyllerin oluşumuna uygun ortamlardır. Oluşumları belirli bir jeolojik zamana bağlı değildir. Yaşları Paleozoik, Mesozoik ve Senozoik olabilir.

Bitümlü şist, kömür gibi termik santral yakıtı olarak veya damıtma yoluyla sentetik petrol üretimi için kullanılabilen bir enerji kaynağıdır. Bununla ilgili olarak önceki yıllarda Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü tarafından aramalar yapılmış ve tamamı Anadolu'nun batı yarısında yer alan Beypazarı, Seyitömer, Göynük, Ulukışla, Mengen, Bahçecik ve Burhaniye'de 7 saha tespit edilmiştir. Çalışmalar sonucu bulunan bitümlü şist rezervi toplam 1,1 milyar tondur. Tespit edilen sahalardaki bitümlü şistlerin toplam rezervi önemli görülmeyle birlikte, ortalama kalorifik değeri 1.000 Kcal/kg dolayında olup, oldukça düşüktür.

2.5.5 Turba

Turba, havasız ortamda suya doymuş koşullarda çökelerek birikmiş az veya çok oranda hümfikasyona uğrayarak ayrılmış bitkisel materyal/humus ve inorganik materyalden oluşan heterojen bir karışımdır. Kömürün ilk oluşum aşaması olup, kömürlerin evrimi ve kökeni hakkında bilgi verirler. Turbanın ortalama kimyasal analizi, C; %50-60, H; %5,5 - 6, O; %32,5-33, N; %1,65-2, Su; %65-90, uçucu madde; %48-72 olup, genellikle C₆H₉O kimyasal formülüne sahiptir. Ayrıca turbadaki inorganik bileşenler Na, K, Ca, Mg, Al, Si, Fe, P gibi elementlerin sülfat ve karbonatları şeklindedir. Kimyasal analizler turbanın özelliklerine bağlı olarak değişkenlik gösterdiğini ortaya koymuştur (Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Raporu, 2001).

2.6 Dünyada Mevcut Durum

Dünya toplam birincil enerji tüketimi, 2008 yılında 11.295 milyon ton petrol eşdeğeri olarak gerçekleşmiştir. Toplam tüketimin kaynaklara göre dağılımında %34,8 ile petrol ilk sırada yer almaktadır. Daha sonra %29,2 ile kömür ve %24,1 ile Uluslararası Enerji Ajansı tarafından yapılan tahminlerde, dünya birincil enerji arzının 2030 yılında 17.014 milyon ton petrol eşdeğeri olacağı ve bu miktarın kaynaklara dağılımında önemli farklılıkların olmayacağı öngörülmektedir. Buna göre; 2030 yılında en büyük pay %30,1 ile yine petrolün olacaktır. Petrolü %28,8 ile kömür, %21,6 ile doğalgaz, %11,8 ile odun, çöp, jeotermal, güneş, rüzgâr vb kaynakların, %5,3 ile nükleer ve %2,4 ile hidrolik kaynakların izleyeceği tahmin edilmektedir.

Dolayısıyla, yapılan tahminlere göre, kömürün dünya toplam enerji arzı içerisindeki payı 2030 yılına kadar önemli bir değişim göstermeyecektir. Bu öngöründe, kömür rezervlerinin petrol ve doğalgaz gibi diğer enerji kaynaklarına göre dünya üzerinde daha geniş bir yayılım gösteriyor olması rol oynamaktadır (Kömür Sektör Raporu, 2010).

2.6.1 Dünya kömür rezervleri

Enerji kaynaklarının kalan ömürleri dikkate alındığında, kömürün, özellikle 2030 yılından sonra çok daha büyük önem kazanacağı anlaşılmaktadır. Mevcut üretim seviyeleri ile dünya görünür kömür rezervlerinin 200 yılı aşkın bir sürede tüketileceği tahmin edilmektedir. Buna karşılık görünür petrol ve doğal gaz rezervlerinin tükenme ömürlerinin mevcut üretim seviyeleri ile sırasıyla yaklaşık 40 ve 60 yıl süreceği tahmin edilmektedir. Dünya kömür rezervi toplam 826 milyar ton olup 70'den fazla ülkede bulunmaktadır. En büyük rezerv miktarı 238 milyar ton ile ABD'ye aittir. Bu ülkeyi, 157 milyar ton ile Rusya ve 114 milyar ton ile Çin izlemektedir.

2.6.2 Dünya kömür üretimi

Dünya kömür üretimi 2008 yılında 6,8 milyar ton olarak gerçekleşmiştir. Bu miktarın yaklaşık %80'i taşkömürü ve geriye kalanı ise linyit üretimidir. Dünya kömür üretiminin yaklaşık %82'si toplam 7 ülke tarafından yapılmaktadır. Bu ülkeler; Çin, ABD, Hindistan, Avustralya, Rusya, Güney Afrika Cumhuriyeti ve Endonezya'dır.

2008 yılında en yüksek üretim, yaklaşık 2,8 milyar ton ile Çin tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu ülkeyi, 1.063 milyon ton ile ABD, 512 milyon ton ile Hindistan, 401 milyon tonla Avustralya, 327 milyon tonla Rusya ve 250 milyon tonla Güney Afrika Cumhuriyeti izlemektedir.

2.6.3 Dünya kömür tüketimi

Dünya toplam kömür tüketimi, üretimlere nazaran daha dengeli dağılmaktadır. Yaklaşık 3,3 milyar ton petrol eşdeğeri olan 2008 yılı tüketiminin %42,6 Çin'in ve %17,1'i ise ABD'nin tüketimidir. Bu iki ülkeyi, %7 ile Hindistan, %3,9 ile Japonya, %3,1 ile Rusya izlemektedir.

Dünya kömür talebinin, 2030 yılına kadar 10 milyar tonlara yaklaşacağı öngörülmektedir. Buna göre, kömüre olan talep Batı Avrupa ülkelerinde önemli oranlarda azalırken, özellikle Asya Pasifik Bölgesi'nde iki katından daha fazla artacaktır.

2.6.4 Dünya elektrik üretiminde kömür kullanımı

Dünya kömür üretiminin yaklaşık %70'i elektrik üretimi amacıyla kullanılmaktadır. Diğer kullanımları ise ısınma, demir-çelik ve çimento sektörlerinde yoğunlaşmıştır. Elektrik üretiminde kullanılan kaynaklar içerisinde en büyük pay, %41,5 ile kömürdür. Kömürü %20,9 ile doğalgaz, %15,6 ile hidrolik, %13,8 ile nükleer, %5,6 ile petrol ve %2,6 ile diğer kaynaklar izlemektedir.

Dolayısıyla kömür, elektrik üretimi amacıyla kullanılan yakıtlar arasında en yaygın olanıdır. Kömürün elektrik üretiminde en yüksek oranda kullanılan yakıt olma niteliğinin öngörülebilir bir gelecekte de değişmeyeceği tahmin edilmektedir.

2007 yılı itibariyle dünya elektrik enerjisi üretiminde kömür %41,5 oranında kullanılmıştır. Kömür rezervleri bakımından en zengin 20 ülkenin elektrik üretimindeki kömür kullanımı ise ortalama %46'dır. Söz konusu 20 ülke içerisinde 10'u elektrik üretiminde kaynak kullanımının en az yarısından fazlasını kömür kaynaklarına dayandırmıştır. Bu ülkelerdeki elektrik üretiminde kömür kullanım payları, 2006 yılı itibariyle, Polonya'da %93, Güney Afrika Cumhuriyeti'nde %93, Çin ve Avustralya'da %80, Kazakistan'da %70, Hindistan'da %68, Çek Cumhuriyeti'nde %60, Yunanistan'da %53, Almanya ve ABD'de ise %48 şeklindedir (Kömür Sektör Raporu, 2010).

2.7 Ülkemizde Mevcut Durum

Ülkemizde, 2008 yılı sonu itibariyle toplam birincil enerji tüketimi, 106,3 milyon ton petrol eşdeğeri olmuştur. Söz konusu arzın kaynaklara dağılımında, %31,8 ile doğalgaz ilk sıradadır. Doğalgazı %29,9 ile petrol, %15,5 ile yerli kömür, %14 ile ithal kömür, %4,5 ile odun, hayvan ve bitki artıkları, %2,7 ile hidrolik ve %1,5 ile jeotermal, rüzgar ve güneş gibi yenilenebilir kaynaklar izlemektedir.

2008 yılında toplam enerji arzının %20'si yurtiçi kaynaklardan ve %80'ise ithal kaynaklardan sağlanmıştır. Toplam 29,2 milyon ton petrol eşdeğeri tutarındaki yurtiçi birincil enerji üretimi içerisinde kömürün payı %57,1'dir. Üretilen diğer kaynaklar ise, sırasıyla, %16,5 odun, hayvan ve bitki artıkları, %9,8 hidrolik kaynaklar, %7,8 petrol, %3,2 doğal gaz ve %5,6 diğer kaynaklar şeklindedir. İthal kaynakların dağılımında ilk sırayı %43,6 ile petrol almaktadır. Petrolü %37,9 ile doğalgaz ve %16,7 ile kömür izlemektedir (Kömür Sektör Raporu, 2010).

2.7.1 Türkiye kömür rezervleri

Türkiye'de kömür genel olarak linyit ve taşkömürü başlıkları altında değerlendirilmekte olup taşkömürü rezervleri TTK tarafından, linyit rezervlerimiz ise EÜAŞ, TKİ ve Özel Sektör tarafından işletilmektedir. MTA ise rezerv tespit çalışmalarını yürütmektedir. Şekil 2.1'de yer alan haritada Türkiye'de bulunan kömür sahaları görülmektedir.

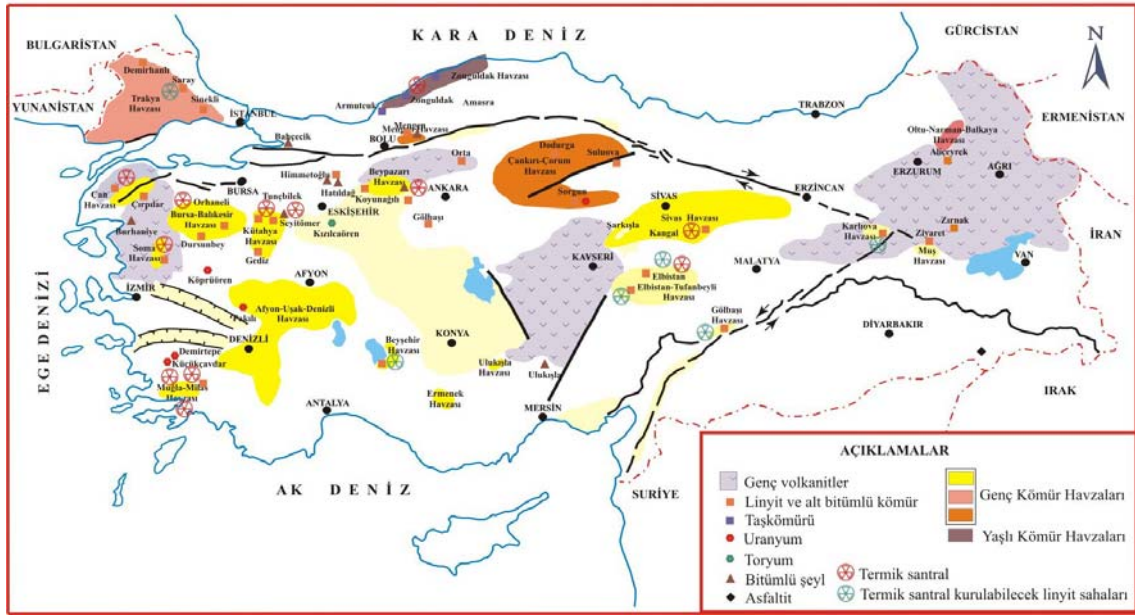
2.7.1.1 Türkiye taşkömürü rezervleri

Ülkemizde Zonguldak bölgesinde çıkarılan taşkömürü bitümlü kömür kategorisinde yer almakta olup ısı değeri 6.200-7.200 Kcal/kg arasında değişmektedir. Türkiye'de bulunan taşkömürü Türkiye Taş Kömürü Kurumu tarafından işletilmekte olup rezerv miktarı Çizelge 2.4'te görülmektedir. 2009 yılı sonu itibari ile Türkiye taşkömürü rezervimiz toplam 1 milyar 334 milyon ton'dur.

2.7.1.2 Türkiye linyit rezervleri

Ülkemiz linyit rezervlerinin büyük kısmı 1976-1990 yılları arasında bulunmuştur. 1990 sonrasında ise kapsamlı rezerv geliştirme etüt ve sondajları yapılamamıştır. 2005 yılından günümüze kadar yürütülen çeşitli rezerv belirleme çalışmalarından sonra Trakya'da 495, Manisa-Soma-Eynez'de 170 ve Eskişehir-Alpu'da 275 milyon

ton, Afşin-Elbistan'da 1,915 ve Konya-Karapınar'da 1,28 milyar ton olmak üzere toplam 4,135 milyar ton linyit rezervi tespit edilmiştir. Uzun yıllardır 8,3 milyar ton olarak bilinen linyit rezervlerimiz 12,4 milyar tona ulaşmıştır. Ancak, işletme yapılan linyit sahalarında bugüne kadar yapılan kömür üretimini dikkate aldığımızda, bugün için ülkemiz linyit rezervlerinin yaklaşık 11,5 milyar ton civarında olduğu ortaya çıkmaktadır.



Şekil 2.1 : Türkiye kömür sahaları ve potansiyel kullanım alanları (Url-2).

Çizelge 2.4 : Türkiye taşkömürü kurumu kömür sahalarına ait rezervler (Url-1).

Yeri	Rezerv (1.000 ton)			
	Görünür	Muhtemel	Mümkün	Toplam
Zonguldak-Ereğli	11.241	15.860	7.883	34.984
Zonguldak -Merkez	351.272	294.043	239.029	884.345
Bartın-Amasra	172.107	115.052	121.535	408.694
Bartın-Kurucaşile		1.000		1.000
Kastamonu-Azdavay		5.593		5.593
Toplam	534.620	431.548	368.447	1.334.615

TKİ Genel Müdürlüğünde 37, EÜAŞ Genel Müdürlüğünde ise 3 adet işletme ruhsatlı linyit sahası bulunmaktadır. Bunun dışında ETİ Maden'in 1, Özel İdare'nin 2, Belediyelerin 7 ve özel sektörün 434 olmak üzere toplam 444 adet işletme ruhsatlı linyit kömürü sahası bulunmaktadır.

2009 yılı sonu itibarıyla kurumlara ait linyit rezervleri Çizelge 2.5'te görülmektedir.

**Çizelge 2.5 : 2009 sonu itibarıyla kurumlara ait linyit rezervleri
(Kömür Sektör Raporu, 2010).**

Kurumlar	Rezerv (milyon ton)			
	Görünür	Muhtemel	Mümkün	Toplam
EÜAŞ	4.718	104		4.822
TKİ	2.239	218	1	2.458
MTA	1.803	685	123	2.611
Özel Sektör	1.077	337	138	1.554
Toplam	9.837	1.344	262	11.445

2.7.2 Türkiye kömür üretimi

Ülkemizde, 2009 yılı itibarıyla kömür üretimi 66,7 milyon ton linyit ve 2,9 milyon ton taşkömürü olmak üzere toplam 69,6 milyon ton olmuştur.

1980’li yıllardan itibaren sürekli bir azalış eğilimine giren taşkömürü üretimleri 2004 yılında 1,9 milyon tona kadar gerilemiştir. Bu tarihten sonra tekrar hareketlenen üretim 2009 yılında 2,9 milyon ton düzeyine kadar yükselmiştir.

Benzer bir gelişim çizgisi linyit üretimleri için de söz konusudur. Linyit üretimleri, özellikle 1970’li yılların başlarından itibaren, petrol krizlerine bağlı olarak elektrik üretimine yönelik linyit işletmeleri yatırımlarının başlaması ile hızlanmıştır. 1970 yılında yaklaşık 5,8 milyon ton olan linyit üretimi 1998 yılında yaklaşık 65 milyon ton olarak gerçekleşmiştir. Ancak, bu tarihten itibaren, özellikle enerji yönetimleri tarafından yapılan doğalgaz alım anlaşmaları nedeniyle, sürekli bir iniş yaşayan linyit üretimi 2004 yılında 43,7 milyon ton ile en düşük seviyesini görmüş, ancak bu tarihten sonra tekrar yükselmeye başlamış, 2009 yılı üretimi 66,7 milyon ton olarak gerçekleşmiştir.

2.7.3 Türkiye kömür tüketimi

Ülkemizdeki nüfus ve Gayri Safi Milli Hasıla artışına paralel olarak kömür kullanım miktarları da her yıl artmaktadır. Ülkemizin 2002 yılı kömür tüketim miktarı 63,5 milyon ton iken 2007 yılında 97,3 milyon üzerinde olmuştur. Bu tüketimin yaklaşık 13,3 milyon tonu ısınmada, 12,1 milyon tonu sanayide, 64,7 milyon tonu ise elektrik üretiminde kullanılmıştır. Yerli kömür üretiminin tüketim içindeki payı 2002 yılına göre artmakla birlikte, tüketim artış oranına göre yetersiz kalmıştır.

2.7.4 Ülkemizde elektrik üretiminde kömür kullanımı

Ülkemizde, 2009 yılında 193 TWh brüt elektrik üretimi gerçekleştirilmiştir. Söz konusu üretimin kaynaklara göre dağılımı, %48,5 doğalgaz, %21 yerli linyit ve taşkömürü, %18,5 hidrolik, %7,1 ithal taşkömürü, %3,4 sıvı yakıtlar ve %1,5 diğer kaynaklar şeklindedir.

2.8 Kömür Kullanım Alanları

Kömür teknolojisi, kömürün ocaktan çıkarılması ile başlamakta ve kimyasal madde üretiminin en son aşamasına kadar sürmektedir. Gelişen kömür teknolojisi sayesinde kömürü, basit bir yakıt olarak değil, naftalinden benzene kadar onbine yakın ürünün elde edilebileceği çok kıymetli bir hammadde olarak tanımlamak gereklidir. Petrolden elde edilen ürünleri, kömürden de elde etmek mümkündür.

Kömürün kullanım alanları oldukça çeşitli olup, her sanayi toplumunda önemli bir rolü vardır. Günümüzde daha çok bir enerji kaynağı olarak tüketilen kömür, gelişmiş ülkelerde özellikle kimya sanayinde, boyadan ilaca, gübreden plastiğe kadar çok geniş bir alanda, önemli bir hammadde olarak yer almaktadır. Şekil 2.2’de kömürün enerji ve ısı kaynağı olarak potansiyeli ve kullanımı özet olarak verilmiştir.

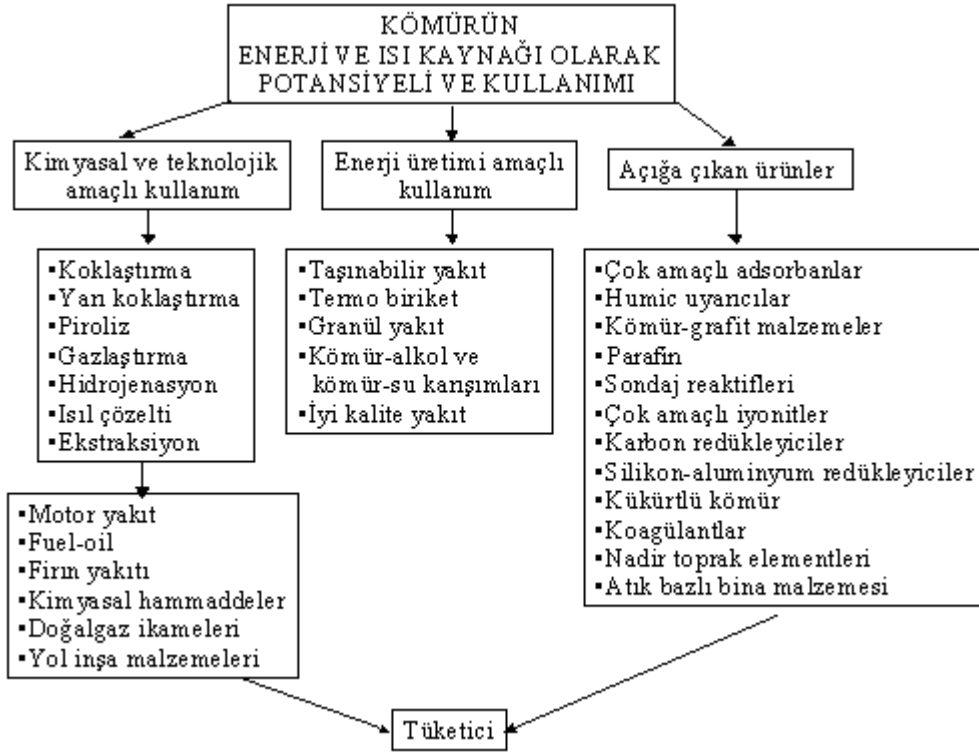
2.9 Kömür Zenginleştirme Yöntemleri

Oluşum koşulları, yapısı ve içerdiği safsızlıklara bağlı olarak kömür zenginleştirmesinde çok çeşitli zenginleştirme yöntemleri kullanılmaktadır. Bunlar çok basit yıkama teknikleri olabileceği gibi, tüketim alanının istekleri doğrultusunda daha karmaşık ve gelişmiş tekniklerde olabilmektedir (Önal ve Ateşok, 1994).

Kömüre bağlı olarak bulunan safsızlıkların miktarı, fiziksel yöntemlerle temizlemede ulaşılabilecek en üst sınırı belirlemektedir. Kömüre bağlı nem (bünye suyu), kömürleşme derecesinin bir özelliği olup, kömürleşme arttıkça azalmaktadır. Taşkömürlerinde %1-3 olduğu halde, linyitlerde %45’e kadar çıkabilmektedir.

Kömüre bağlı kül (sabit kül), kömürleşme sırasında, kömürü oluşturan bitkinin içindeki inorganik maddelerin bünyeye bağlanmasından ileri gelir. Sabit kül miktarı nadiren %2’den az, genellikle %7-8 civarındadır (Gitmez, 2005).

Kükürt, diğer safsızlıkların yanında en önemlilerinden biri olup, sülfat kükürdü, piritik kükürt, organik kükürt ve elementer kükürt halinde bulunur. Kömürün bünyesine bağlı olarak bulunan kükürt, organik kükürttür. Teorik olarak, organik kükürt yüzdesi, yıkama yöntemleri ile ulaşılabilir en düşük kükürt oranını belirlemektedir (Osborne, 1988).



Şekil 2.2 : Kömürün enerji ve ısı kaynağı olarak potansiyeli ve kullanımı (Ateşok, 2004).

Linyitlerde kül ve kükürt oranının düşürülmesinde sınırı belirleyen önemli bir faktör serbestleşme boyutudur. Külü oluşturan mineraller ile piritik kükürdün serbestleşmesi çok ince boyutlarda gerçekleştiği takdirde, yıkama yöntemi ile kalite arttırımı, ekonomik olmaktan çıkmaktadır.

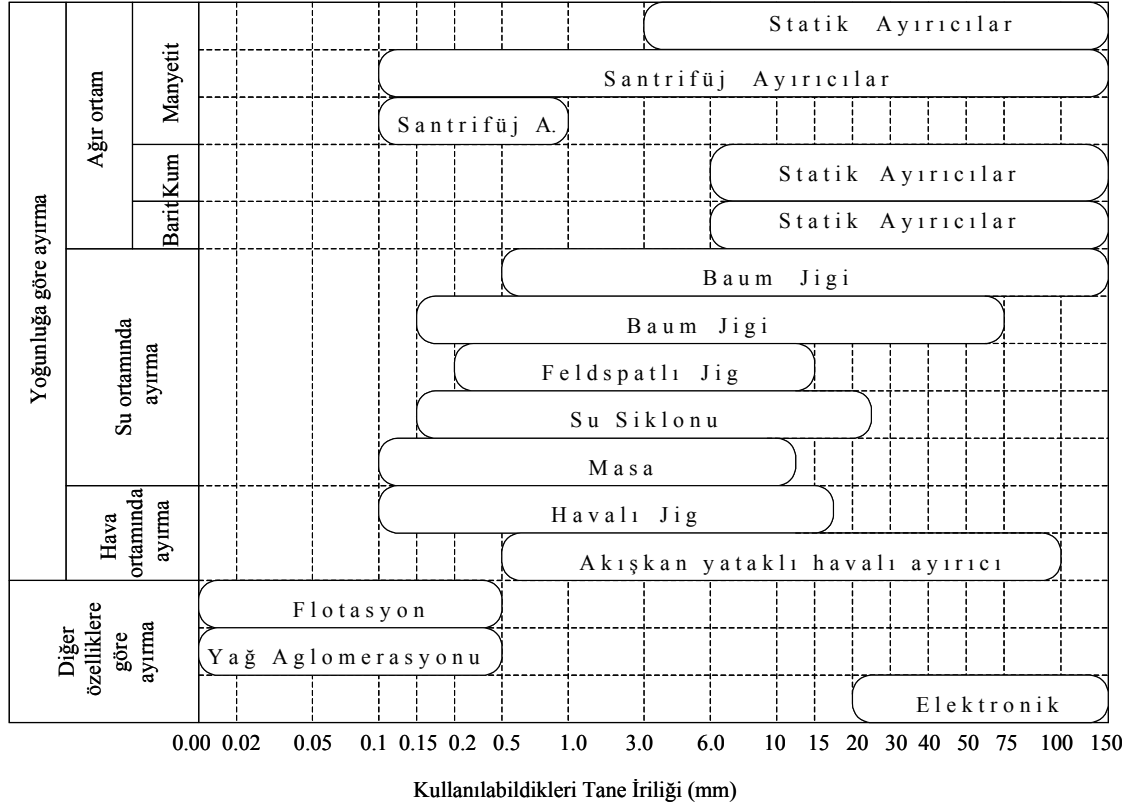
Kömür zenginleştirme yöntemleri yıkanan kömürün boyutuna bağlı olarak “İri Kömür Yıkama” ve “İnce Kömür Yıkama” olarak iki grupta toplanmaktadır.

2.9.1 Yaş zenginleştirme yöntemleri

2.9.1.1 İri kömür zenginleştirme yöntemleri

İri boyut kömür zenginleştirmesinde, üst boyut brüt eleğin açıklığına göre 150 veya 100 mm olarak seçilmekte ve genel olarak ağır ortam sistemi ve jiglerle zenginleştirilmektedir. Genellikle yıkaması güç olan kömürlerin temizlenmesinde

ağır ortamlarla zenginleştirme tercih edilmektedir (Weiss, 1985). Kömür zenginleştirmede, kömürün yıkanabilme özelliğinin ve ayırma yoğunluğuna yakın yoğunluktaki madde miktarının bilinmesi çok önemlidir (Osborne, 1988). Zenginleştirme yöntemi bu özellikler göz önüne alınarak seçilmektedir. Şekil 2.3'te görüldüğü gibi, yoğunluk farkına dayanan kömür zenginleştirme yöntemleri, kullanılan ortama göre; ağır ortam, hidrolik ve havalı yöntemler olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır.



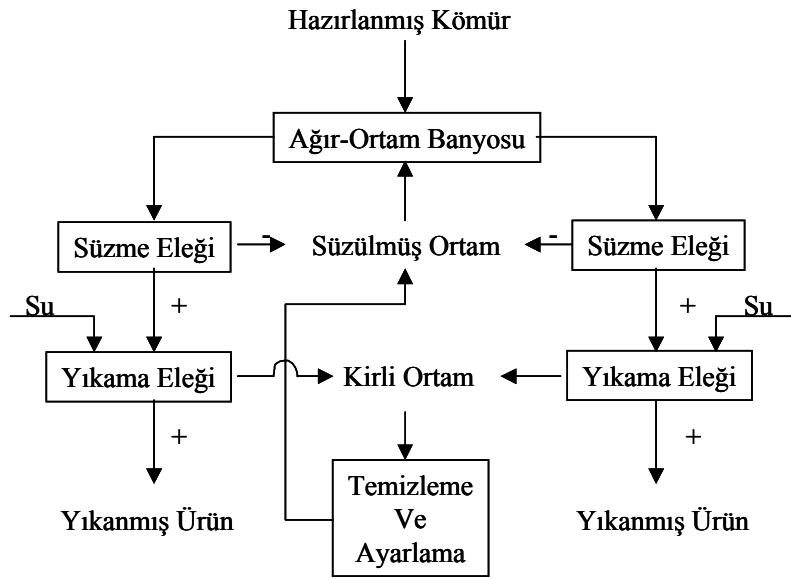
Şekil 2.3 : Kömür zenginleştirme yöntemleri ve uygun oldukları tane irilikleri (Osborne, 1988).

Ağır Ortam Ayırması

Ağır ortam ayırması yöntemi, gravite yöntemleri arasında en basiti olup bu yöntem kullanılarak yapılan zenginleştirme işlemlerinden daha ekonomik olarak temiz kömür üretilmektedir.

Kömürü artığından ayırmak için ağır ortam sisteminde genellikle özgül ağırlığı 2'den küçük olan ağır ortamlar kullanılır. Ağır ortam süspansiyolarında kullanılan başlıca maddeler, ferrosilikon ve manyetit'dir. Özellikle manyetit kömür yıkama tesislerinin en önemli ağır ortam malzemesidir. İri boyutlu zenginleştirmede kullanılan manyetit %30'u; ince boyutlu zenginleştirmede ise %85'i 45 mikron altında bir

dağılım gösterir. Bu tip ayırıcılarda, kömürün ağır ortam içerisinde rahat hareket etmesini sağlamak için, süspansiyonu oluşturan katı hacmi %25-45 arasında tutulur. Yüksek katı hacimlerde (genellikle %30'dan yüksek) tanelerin hareketini başlatmak amacıyla ya süspansiyon karıştırılır ya da tanelerin kayma hareketini arttırmak amacıyla santrifüj kuvveti kullanılır. Ağır ortam yöntemi ile yıkanacak kömürlerin 6-8 mm'den daha iri olanları iri boyutta yer çekimi etkin, 0,5 mm ile 38 mikron arasında olanları ise santrifüj kuvveti etkin ayırıcılara beslenir (Goshin, 1983). Şekil 2.4'de ağır ortam zenginleştirme işleminin genel bir akım şeması verilmiştir.

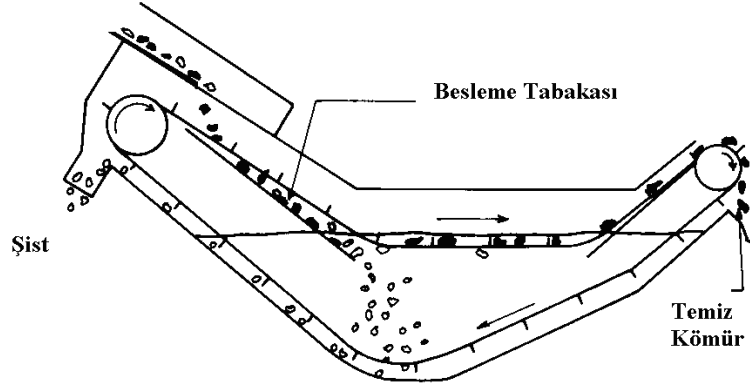


Şekil 2.4 : Ağır ortam ayırması ile zenginleştirme akım şeması.

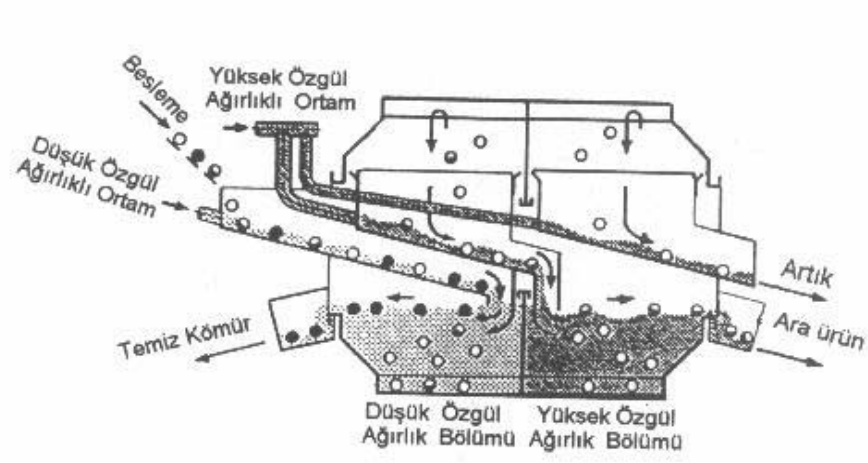
Şekil 2.4'te görüldüğü gibi, malzeme ve ağır ortam, ağır ortam ünitesine devamlı beslenir. Yüzen kısım (lave) taşma yoluyla, batan kısımlarda (mikst, şist) banyo dibinden alınarak, birlikte gelen ağır ortamın ayrılması için, ayrı ayrı süzme eleklerine verilir. Eleklerin altına geçen ortam direkt olarak üniteye, elek üstü malzemesi ise yıkanmak üzere yıkama eleğine verilir. Yıkama eleğinden elde edilen elek altı kirli ağır ortam, temizleme ve ayarlama işlemine tabi tutulduktan sonra tekrar ağır ortam banyosuna verilir.

Endüstriyel çapta kullanılan ve genellikle üst boyutu 100 mm olan kömürlerin zenginleştirildiği ağır ortam ayırıcıları tekne (oluk), koni ve tambur şeklindedirler. Tekne tipi ayırıcıların kapasiteleri 100-900 ton/saat arasında değişmektedir. Şekil 2.5'te Dutch State Mines tekne yıkayıcısı görülmektedir. Wemco (Şekil 2.6), Teska (Şekil 2.7) ve Drewboy (Şekil 2.8) gibi yıkayıcılar endüstriyel çapta kullanılan tambur tipli ağır ortam ayırıcılarıdır.

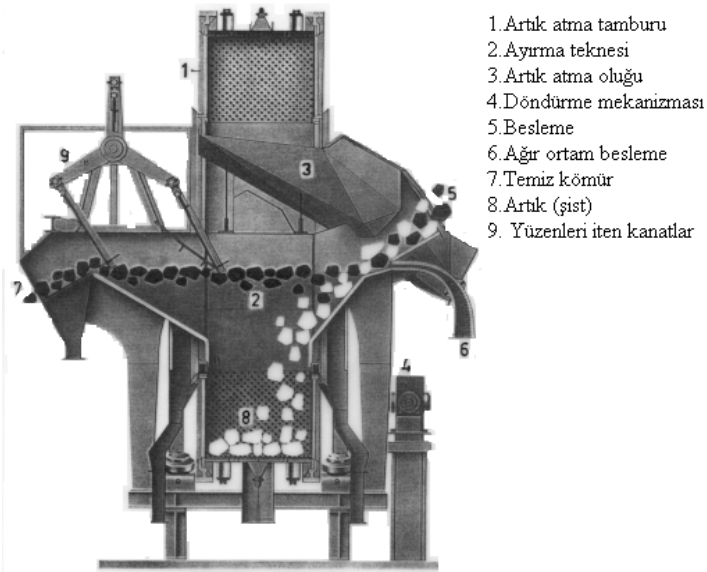
Beslenen Kömür



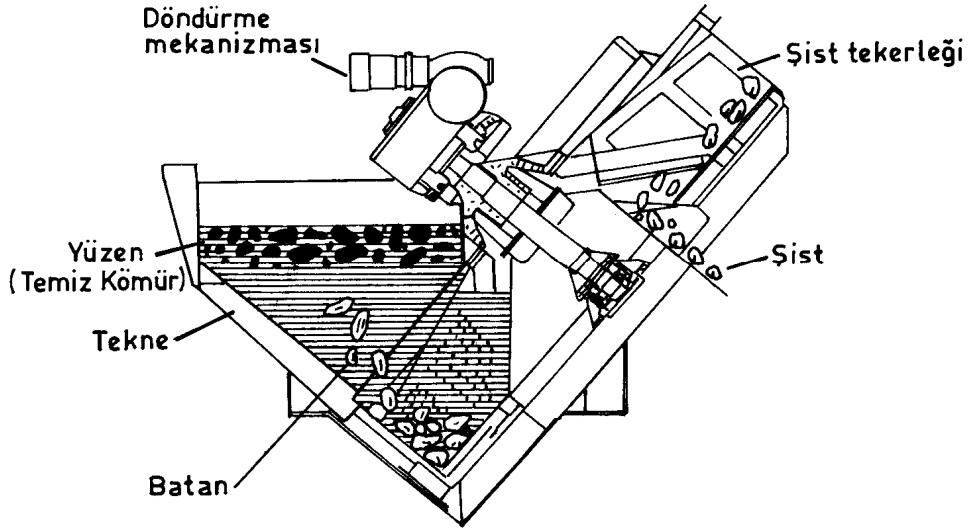
Şekil 2.5 : Tekne (oluk) tipli ve iki ürünlü Dutch State Mines tekne yıkayıcısı (Ateşok, 2004).



Şekil 2.6 : Wemco ağır ortam tamburu (Ateşok, 2004).

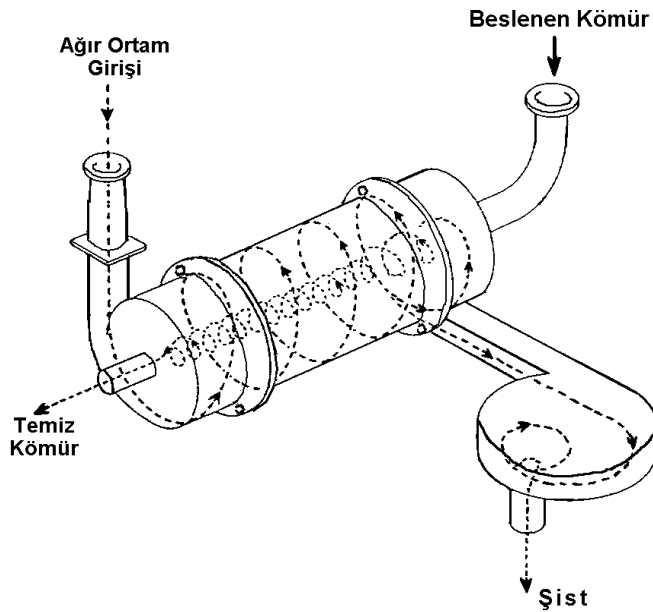


Şekil 2.7 : Teska yıkayıcısı (Ateşok, 2004).



Şekil 2.8 : Dredge ayırıcısı (Kural, 1998).

Geniş bir boyut aralığında zenginleştirme yapabilen diğer bir ağır ortam aygıtı ise İngiliz patentli Larcodem ayırıcısıdır. Ağır ortam olarak manyetitın kullanıldığı ve santrifüj kuvvet etkisiyle ayırma yapabilen bu aygıt, jiglere alternatif olarak geliştirilmiştir. Şekil 2.9'da iki ürün alabilen Larcodem ayırıcısının şematik görünüşü verilmiştir. Geniş bir boyut aralığında zenginleştirme yapmakta ve kapasiteleri oldukça yüksektir. $-100+0,5$ mm boyut aralığındaki kömürü 250 ton/saat kapasite ile zenginleştirebilen Larcodem ayırıcılarının performansı ve kontrol olanakları oldukça yüksektir (Brookes ve Miles, 1987).



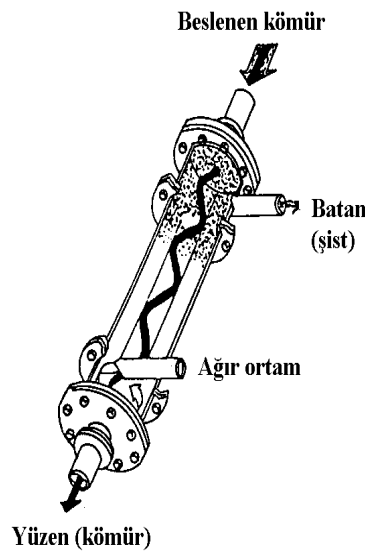
Şekil 2.9 : İki ürün alınan Larcodem ayırıcısı (Ateşok, 2004).

Ağır Ortam Siklonları

Diğer bir ağır ortam ayırıcısı, ağır ortam siklonlarıdır. Santrifüj kuvvetinin uygulandığı bu ayırıcılarda, ortam akışkanlığı düşürebildiği için, statik ayırıcılara nazaran daha küçük boyuttaki (-20+0,5 mm) kömürler yıkanabilmektedir. Ağır ortam siklonlarının çalışma prensibi, hidrosiklonlara benzemektedir.

Kömür, ince öğütülmüş manyetitle hazırlanmış ağır ortam ile karıştırılarak, basınç altında siklona beslenmektedir. Eğik olarak çalışan ağır ortam siklonlarının, farklı çaplara sahip olanları vardır. Besleme kapasiteleri, ortalama 60 ton/saat'tir. Bu siklonlar ile 40-0.5 mm boyutlu kömürleri yıkamak mümkün olabilmektedir. Son zamanlarda, daha geniş çaplı siklonların geliştirilmesiyle tane boyutu 50 mm'ye kadar çıkmıştır.

Dynawhirpool ayırıcısı (Şekil 2.10) eğik vaziyette çalışan ağır ortam ayırıcısıdır. Giriş ve çıkışlar gövdenin her iki ucunda gövdeye teğet durumdadır. Bu ayırıcının kapasitesi saatte 100 ton'a ulaşabilmekte ve 50 mm'ye varan boyuttaki kömürü zenginleştirebilmektedir (Deurbrouck ve Hucko, 1981).



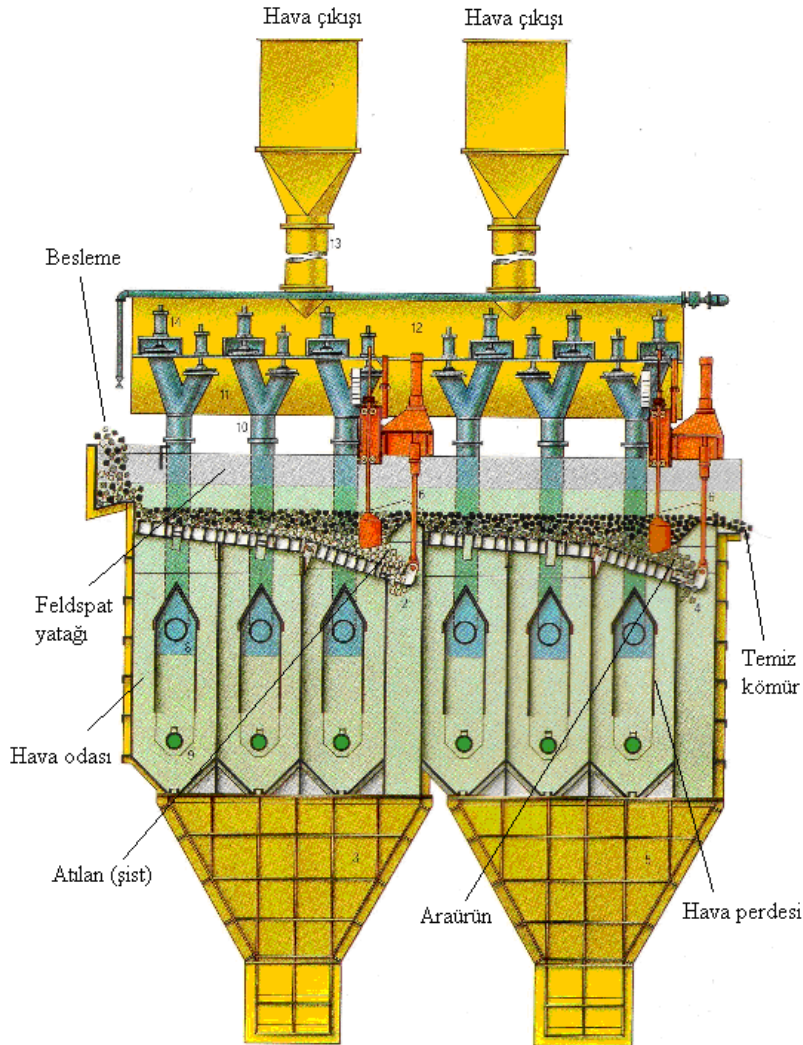
Şekil 2.10 : Dynawhirpool ayırıcısı (Ateşok, 2004).

Jigler

İnce kömür kadar iri kömürün temizlenmesinde de çok yaygın olarak kullanılır. Jiglerde ortam olarak su kullanılır. Suyun pulsasyon hareketi piston veya hava vasıtasıyla sağlanır. Suyun hareketi ile kömür ve kömürle beraber olan artıklar yoğunluklarına göre tabakalaşır. Kömürde kullanılan jigler Baum ve Batak jigleridir. Baum jiginin maksimum kapasitesi, beslenen kömürün özelliklerine bağlı olarak 250

ton/saat civarındadır. Boyut aralığı ise $-100+0,5$ mm'dir. Genelde bu jigde lave, mikst ve şist halinde üç ürün alınır. İlk odada şist, ikinci odada ise dipten mikst ürünü alınır. Lave ise üstten alınır.

Batak jigi (Şekil 2.11) ise Baum jiginin geliştirilmiş ve kapasitesi arttırılmış dizaynıdır. Batak jiginin Baum jiginden en önemli farkı, tasarımda hava kompartımanı olarak ayrı bir kısım bulunmamasıdır. Bunun yerine eleğin altında seri halde konulmuş hava odaları vardır. Jigdeki hava vanaları elektronik kontrollü olup, hava giriş ve çıkışı otomatik olarak kesilir. Batak jig altı hücre ve üç kompartımandan oluşur. Her bir hücre iki adet hava odası içermektedir. Genelde ağır malzeme (şist) ilk oda sonundan, ara ürün (mikst) ikinci oda sonundan ve temiz ürün (lave) de son oda sonundan alınır. Endüstriyel çapta çalıştırılan en büyük batak jiginin kapasitesi saatte 540 ton'dur (Leonard ve Byron, 1991).



2.9.1.2 İnce kömür zenginleştirme yöntemleri

İnce kömür zenginleştirme yöntemleri olarak, ağır ortam siklonlarını, ince kömür jiglerini, sallantılı masaları, su siklonlarını, olukları, spiralleri, konileri ve flotasyon yöntemini vermek mümkündür.

Yaş Sarsıntılı Masalar

Mineral zenginleştirme işlemlerinde kullanılan ve çok bilinen klasik Wilfley masaları kömür hazırlama tesislerinde de kullanılırlar. Fakat kömür zenginleştirme tesislerinde daha çok Deister masaları kullanılmaktadır. Masaların kapasiteleri, beslenen kömürlerin yıkanabilirlik özelliklerine bağlıdır. -9,5 mm boyutlu kömürler için bir masanın kapasitesi en fazla saatte 10 ton olmaktadır. Tane boyutunun üst limiti 25 mm'ye yükseltildiğinde, kapasite saatte 15 ton'a çıkmaktadır. Çok katlı masaların kullanılmasıyla kapasitenin artırılması mümkündür (Weiss, 1985).

Oluklar ve Spiraller

Kömür hazırlama tesislerinde kullanılan oluklar düz (Rheolaveur) veya dairesel (Reichert-Wickers) olabilir. Reichert-Wickers spiralleri son yıllarda, ince kömürün zenginleştirilmesinde en fazla kullanılan cihazlardan birisi olmuştur. Kömür için özel olarak hazırlanmış ve poliüretandan imal edilmiş 10-12 dönümlü spiraller 8-16 adetlik bataryalar halinde çalıştırılarak, dar bir alanda yüksek kapasitelere ulaşabilmektedir. Reichert-Wickers spiralleri için en uygun boyut 0,1 ile 0,3 mm arasındadır. Özellikle 0,5 mm boyutlu ince kömürlerin zenginleştirilmesinde kullanılırlar.

Reichert Konileri

Koniler, çapları 2 m ve konik açıları 145° civarında olan, genellikle seri halinde kullanılan ince malzeme ayırma aygıtlarıdır. Kapasiteleri 65-90 t/saat arasındadır ve 0,050-3 mm tane boyutlu kömürlerin yıkanması için uygundur (Osborne, 1988).

Konilerde, %35-45 katı oranı olan pülp, koninin üst kısmından beslenmekte ve koni yüzeyinden aşağı doğru akarken, yoğunluğu düşük tanecikler, akıma kapılıp hızlanırken, yoğunluğu yüksek taneler, koni yüzeyine sürtündükleri için daha yavaş olarak aşağıya inmektedir. Koninin alt kısmına yerleştirilen ayırma tertibatı ile yavaş ve hızlı olan fraksiyonlar ayrı yerlere alınmakta ve ayırım gerçekleşmektedir.

Kömür Flotasyonu

Flotasyon yöntemi 0,5 mm altı kömürlerin temizlenmesinde uygulanmaktadır. Temiz kömür yüzeyinin hidrofob özellik göstermesi, yani kömürün doğal yüzebilirliğe sahip olması, kömür şist ve pirit ayrımını kolaylaştırmaktadır. Kömürün doğal yüzebilirlik özelliği kömürün kimyasal ve petrografik yapısına ve kömürleşme derecesine bağlıdır. En yüksek doğal yüzebilirlik %89 C (kuru-külsüz) içeren kömürde saptanmıştır. Bu değer in altında ve üstünde kömürün doğal yüzebilirliği azalmaktadır. Kömürleşme derecesi genç olan linyitler hidrofilik özellik gösterirler. Bu nedenle flotasyon işlemleri taşkömürü ve antrasitlerde yaygındır.

Kömür geniş bir pH aralığında yüzebilmektedir, fakat en uygun yüzebilirliği nötr pH noktasındadır. Yağ tipi toplayıcılarla yapılan kömür flotasyonunda en uygun randımana pH 7,5'ta ulaşılmıştır (Brown, 1962).

Kömür flotasyonunda mekanik ve havalı karıştırmalı flotasyon makineleri kullanılır. Genellikle pülp yoğunluğu %14-18 katı arasında değişmektedir. Zor yüzme özelliğine sahip kömürlerle, 100 mikronun altındaki tane iriliklerinde pülp yoğunluğu %10 seviyelerine indirilmektedir. Flotasyon devresinden elde edilen konsantre doğrudan vakum filtresine gönderilir. Artıklar ise ya bir artık havuzuna, ya da tükine boşaltılarak suyun geri kazanılması sağlanır.

Bugün özellikle flotasyon teknolojisindeki gelişmelerle 0,045 mm altı kömürlerden süper düşük küllü (%4'ün altında) temiz kömürler üretmek mümkün olmaktadır. Günümüzde en çok kullanım alanı bulan flotasyon sistemleri; Kolon ve Jet (Jameson) flotasyon sistemleridir (Özbayoğlu, 1987).

3. KÖMÜRÜN SUSUZLANDIRILMASI

Kömürlerin ocakta üretildikleri gibi tüketimlerini engelleyen en önemli safsızlıklar; kükürlü bileşikler, inorganik bileşikler ve nemdir. Ocak çıkışında, taş kömürleri %1-10, sert linyitler %20-30, yumuşak linyitler %40-60, turbalar ise %60'ın üzerinde nem içerirler. Tüvenan kömürlerin nemi, kömürleşme derecesi azaldıkça artmaktadır. Türk linyitlerinin ancak %14 kadarının nem içeriği %20'nin altında olup, geri kalan %86'sı yüksek oranda nem içermektedir ve ortalama nem içerikleri %41,8'dir.

Fazla miktarlarda su kullanılan kömür hazırlama uygulamalarının sonunda suyun uzaklaştırılması hem ürün hem de atık açısından önemlidir. Elde edilen temiz kömürün suyundan ayrılması nakliye, stoklama, satış şartları ve izleyen işlemleri etkilerken, atığın susuzlaştırılması çevresel problemler açısından gereklidir. Tüvenan ve yıkanmış kömürün gerektiğinde, susuzlaştırılması ve/veya kurutulması yaygın olarak uygulanmaktadır (Ateşok, 2004).

Kömür susuzlaştırmanın genel nedenleri aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Kömürün ısıl değerini azaltan suyun uzaklaştırılması
- Suyun uzaklaştırılmasıyla nakliye giderlerinin azaltılması
- Nakliye sırasında nem nedeniyle ortaya çıkacak sorunların ortadan kaldırılması
- Kırma ve öğütme cihazlarının kapasitesinin artırılması
- Kok, briket ve çeşitli kimyasal maddelerin üretimi için uygun bir kömürün sağlanması
- Kuru kömür zenginleştirilmesine olanak sağlanması

Kömürün susuzlaştırılması ve kurutulması sonucu, ısıl değeri yükselir. Böylelikle, üretim noktasından tüketime kadar taşımada, önemli ölçüde enerji tasarrufu sağlanabilir. Islak kömür, taşıma, boşaltma ve kullanımı esnasında, iklim şartlarına göre de önemli problemler yaratabilir.

Yakma sistemlerinde, yakıtın nem ve kül içeriği arttıkça ısı verim düşer. Ticari kömür değerlendirme yöntemlerinin öngördüğü nem sınırlarına uymayan kömür kullanıldığında da, sistem verimi azalır ve/veya ürün kalitesi düşer. Sistem veriminin düşmesi, birim ısı enerji ve/veya ürün gereksinimini karşılamak için beslenmesi gereken kömür miktarını arttırır. Böylece, kömür tüketimi, buna bağlı olarak da çevre kirliliği artar. Baca gazlarının içerdiği nem miktarı yükseldikçe, baca gazı çıkış sıcaklıklarını arttırmak gerekir. Aksi takdirde, baca gazlarında yoğuşma ve asidik karakterdeki sıvı damlacıkları veya filmi, metal aksamda korozyona neden olur.

Susuzlaştırmada mekanik, kurutmada ise ısı yöntemleri kullanılarak, kömürlerin nem içeriği azaltılır. Mekanik yöntemler ile giderilebilecek nem miktarı sınırlıdır, daha fazla nem gidermek için kömürün kurutulması gerekir. Hem susuzlandırma hem de kurutma yapılmasının belli başlı nedenleri; nakliye, stoklama ve yakma işlemlerinde enerji kaybını azaltmak, kırma, öğütme, yakma kapasitelerini arttırmak ve teknolojik gereksinimlere uygun kömür sağlamaktır (Atak ve Ateşok, 1991; Kural, 1998).

3.1 Kömürün Su İçeriği ve Analizi

Su, kömürde üç şekilde bulunur. Bunlar; yüzey suyu, bünye suyu ve molekül suyu'dur.

Yüzey suyu: Kömür yüzeyinde tutulan ve yüzeydeki gözenekleri dolduran suya kaba nem veya yüzey nemi denir.

Bünye suyu: Fiziksel olarak, yani absorpsiyon ve kapiler kuvvetlerle kömüre bağlı olan suya bünye nemi veya higroskopik nem denir.

Molekül suyu: Kömürde, kimyasal olarak bağlı olan suya molekül suyu veya hidrasyon suyu denir. Molekül suyunun toplam kömür suyu içinde payı azdır.

Kömürün içerdiği yüzey nemi (kaba nem); kömürün, ağırlığı sabit kalana kadar hava ile temasta bırakılmasıyla saptanan ağırlık kaybından hesaplanır. Sabit tartıma gelmiş bu kömür, havada kuru olarak adlandırılır.

$$(\%Nem) = \frac{a - b}{a} \times 100 \quad (3.1)$$

a: Orijinal kömür ağırlığı

b: Havada kurutulmuş kömür ağırlığı

Bünye nemini belirlemek için kömürün 0,2 mm altına öğütülerek, 105 °C' da 2 saat etüvde bekletilmesi gerekmektedir. Etüv öncesi ve sonrası tartımlar alınarak, aşağıdaki formül yardımıyla bünye nemi hesaplanır.

$$(\%Nem) = \frac{x-y}{x} \times 100 \quad (3.2)$$

x: Havada kurutulmuş kömürün etüve konmadan önceki ağırlığı

y: Etüvden çıkarıldıktan sonraki ağırlığı

Yüzey ve bünye nemi ayrı ayrı değerlendirilmeye tutulmadan bulunan nem değeri ise, o kömürün toplam nem değerini verir (Ateşok, 2004).

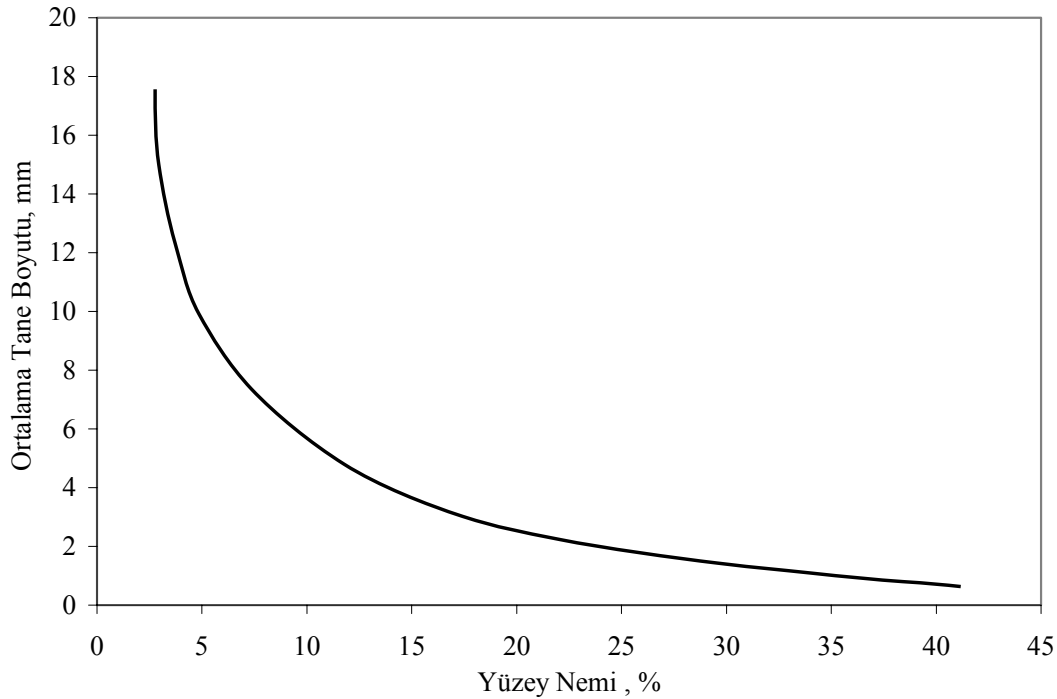
3.2 Kömürün Susuzlandırılmasını Etkileyen Faktörler

Susuzlaştırma işlemi sırasında kömürün davranışını belirleyen faktörler, kömürün yapısına ve kullanılan susuzlaştırma yöntemine bağlı olarak ikiye ayrılabilirler. Yapıya bağlı faktörlerin en önemlileri; tane iriliği, nem içeriği ve kömürleşme derecesidir (Schick ve Villa, 1983). Kömürün nem içeriği ve kömürleşme derecesi, birbirinden tam olarak bağımsız değildir. Kullanılan yöntemle ilgili faktörler ise, kullanılan enerjinin miktarı (örneğin; basınç farkının miktarı), uygulama şekli ve uygulama süresi gibi kavramlardır (Yoon ve diğ., 2004).

Kömürün tane boyutu küçüldükçe, birim kütle başına yüzey alanı ve nem tutma oranı artar, susuzlaştırma eğilimi zorlaşır (Şekil 3.1). Tane boyutu küçüldükçe yüzey alanı artacağı için, taneler arası (harici) porların miktarı, dolayısı ile yüzey neminin oranı artar. Ayrıca tane içi (dahili) porların, yaş işlemlerde kullanılan su tarafından erişilebilirlik oranı ve dolayısıyla nem içerikleri de, tane boyutu küçüldükçe artar. Yüzey nemi ya da harici porlardaki nem, susuzlaştırma ile uzaklaştırmaya en uygun nemdir. Dahili porlardaki bünye nemi, kömürün por yapısına bağlı olarak susuzlaştırılma işlemlerinde sorun çıkarabilir. Kimyasal olarak bağlı nem, ancak, kurutma ile bünyeden uzaklaştırılabilir (Özdoğan ve diğ., 1998).

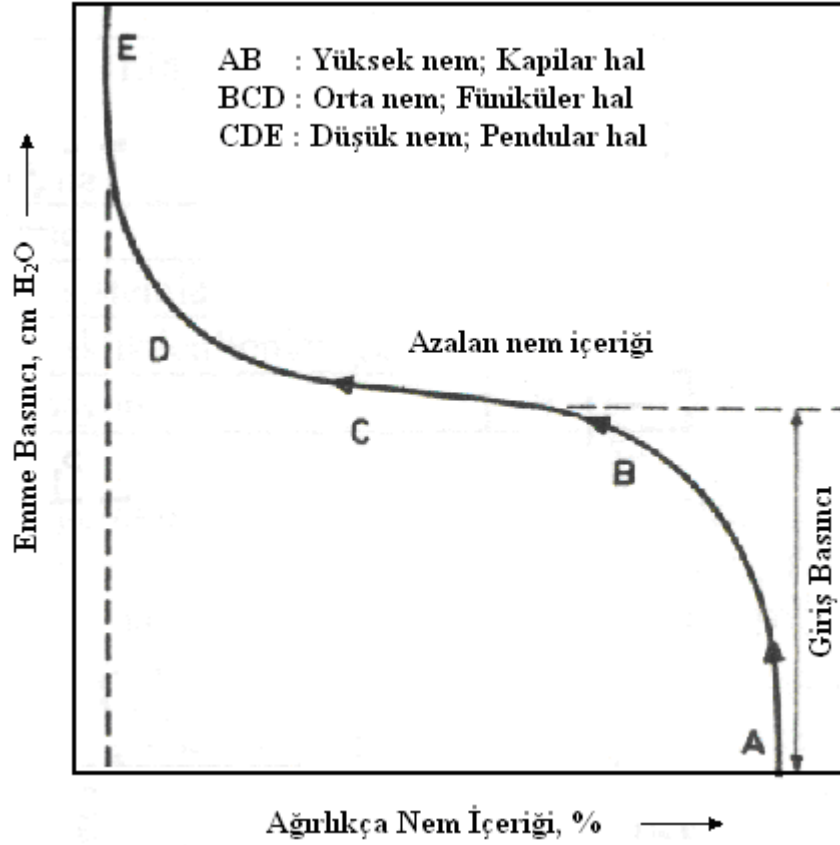
Harici ve dahili porlardaki nem, taneler arasındaki geometrik ilişki ve tanenin porozitesi ile yakından ilişkilidir. Küresel tanelerden oluşan temsili bir yapıda, nem, üç belirgin fiziksel durumda bulunabilir: Kapılar nem, föniküler nem ve pendular nem. Kapılar nem, suyun doygun durumda ve hareket yeteneğine sahip olduğu durumdur. Pendular nem ise, suyun, hareket yeteneğine sahip olmadığı durumdur ve tane ile su molekülleri arasındaki kuvvetli fiziksel bağlarla (van der Waals bağları)

tanımlanır. Füniküler nem, kapılar ve pendular nem arasındaki durumdur. Taneler, basınç farkı uygulanarak nemden arındırılmaya çalışıldığında, basınç farkı ile nem içeriği arasındaki ilişki, bu üç halin ortak etkisi ile belirlenir (Şekil 3.2). AB bölgesinde (kapılar hal), porlar arasındaki sıvı hareketi, sadece suyun hareketidir. BD bölgesinde (füniküler hal), porlar arasındaki suyun yanı sıra havanın da hareketi söz konusudur. DE bölgesinde (pendular hal), porlar arasında suyun hareketi durmuştur, sadece havanın bir akımı vardır. Görüldüğü gibi, pendular nem durumunda basınç farkı ne kadar artırılırsa artırılınsın, sistemin neminde daha fazla bir düşüş gözlemek mümkün değildir. Kömürlerde, bu üç halin kısmi oranları, dolayısıyla ne kadar nem uzaklaştırılabileceği, kömürleşme derecesine de bağlı olarak değişir.



Şekil 3.1 : Tane boyutuna bağlı olarak yüzey neminin değişimi (Osborne, 1990).

Aplan (1988), kömürleşme derecesi ile temas açısı (hava-sıvı-katı sisteminde, sıvıya doğru ölçülen katı ile hava arasındaki açı) arasında yakın bir ilişki olduğunu göstermiştir. Düşük derecede kömürleşmiş kömürlerde, temas açısı, 0°'ye kadar düşerken; yüksek derecede kömürleşmiş kömürlerde, bu açı, 70°'ye kadar çıkar. Yüksek temas açısına sahip kömürlerin nemi basınç farkı artırılarak azaltılabilir. Yani, bu kömürlerde nem, büyük oranda kapılar veya füniküler haldedir. Bunun yanı sıra, düşük dereceli kömürlerin nemi, çok yüksek basınçlarda bile güçlükle uzaklaştırılmaktadır. Dolayısıyla, bu kömürlerde, nemin, büyük oranlarda pendular halde olduğunu gösterir.



Şekil 3.2 : Emme basıncına bağlı olarak nem içeriği değişimi (Mishra, 1988).

3.3 Teknolojik Uygulamalarda Nem Sınırlamaları

Kömürlerin nem içeriği, teknolojik uygulamalarda, yüksek verim ve/veya kaliteli ürün eldesi açısından önemli bir parametredir. Yakma, briketleme, koklaştırma, gazlaştırma, düşük sıcaklık karbonizasyonu, sıvılaştırma gibi kömür değerlendirme proseslerinin öngördüğü nem sınırlamaları farklıdır. Kömürün susuzlandırılması, ekonomik açıdan, külünden arındırılması kadar önemlidir. Kömürlerde, yaklaşık %1 oranında nem artışının, %4,5 oranında kül artışına eş değer miktarda ısı verimi düşüreceği bilinmektedir (Singh, 1998).

Koklaştırma, kömür kurutmanın önemini sergileyen tipik bir örnektir. Nispeten düşük bir ilk yatırım masrafı gerektiren kurutucuların kullanılmasıyla, hem nem giderilir hem de ön ısıtma yapılır. Böylece, koklaştırma sisteminin kok üretim kapasitesi, kurutmaya bağlı olarak %10-15, ön ısıtmaya bağlı olarak da %30-50 oranında arttırılabilir. Bu yöntemle oluşan kokun, mekanik direnci yüksek, öğünülebilirliği düşük, tane yapısı homojen olur.

Kömürün nem içeriği briketlemede de önemlidir. Bağlayıcı ilavesinden önce, briketlenecek kömürün neminin mümkün olduğunca azaltılması gerekmektedir. Briketleme için kömürün nem oranının ideal olarak %8-10 civarında olması istenmektedir (Beker ve Kural, 1998).

Günümüzde büyük çapta uygulanan belli başlı kömür değerlendirme teknolojilerine ilişkin nem sınırlamaları Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 : Başlıca kömür teknolojilerindeki nem sınırlamaları (Kural, 1998).

Taş Kömürü	Nem, %	Linyit	Nem, %
Koklaştırma (besleme yöntemi)	<8	Gazlaştırma	5-15
Koklaştırma (ramming yöntemi)	8-12	Briketleme	8-10
Briketleme	<4	Pulverize sistemlerde yakma	12-15
Pulverize sistemlerde yakma	<2	Düşük sıcaklık karbonizasyonu	<15
Düşük sıcaklık karbonizasyonu	=0	Hidrojenasyon	=0
Hidrojenasyon	=0		

3.4 Kömür Susuzlandırma Yöntemleri

Kömürün susuzlaştırılmasında kullanılan ekipmanlar, başlıca dört ana grup altında toplanabilir. Uygulandıkları tane boyutuna göre, bu ekipmanlar şu şekilde sınıflandırılabilir (İpekoğlu, 1994; Özdoğan ve diğ., 1998).

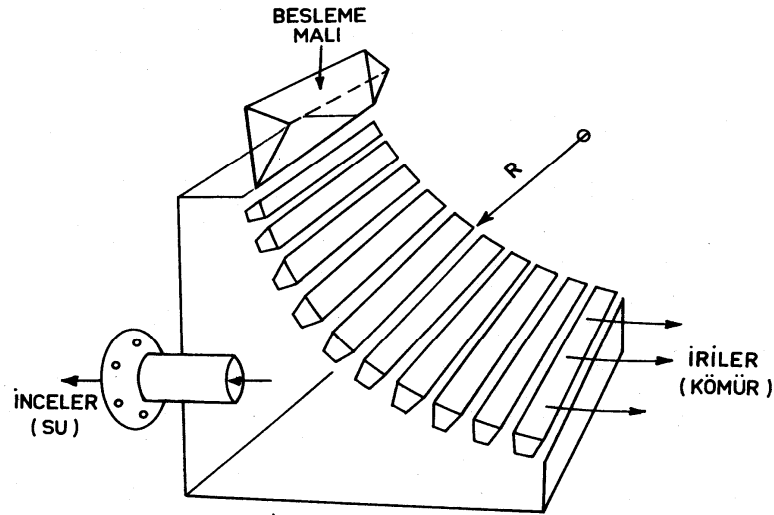
- Hareketli elekler (sallantılı > 20 mm ve titreşimli 0,2-10 mm), hareketsiz elekler, kavisli elekler (0,1-3 mm).
- Santrifüj etkisi kullanan ekipmanlar; hidrosiklonlar (0,2-10 mm), santrifüjler (0,05-10 mm).
- Basınç farkı kullanan ekipmanlar; filtreler < 2mm.
- Yer çekimi ivmesi kullanan ekipmanlar; tikinerler (koyulaştırıcılar < 0,05 mm).

3.4.1 Elekler

Eleme işlemi, sınıflandırmada kullanılabileceği gibi, malzemeyi suyundan arındırmakta da kullanılabilir. Nem oranı, tane boyutuna bağlı olarak değiştiği için, eleme esnasında, suyun katı tanelerden süzülerek ayrılması suyun dağılımını boyuta göre düzenler.

Susuzlandırmada kullanılan elekler, genel olarak, hareketli ve hareketsiz elekler olmak üzere ikiye ayrılabilirler. Hareketsiz eleklerin en çok kullanılanı, kavisli elek olarak bilinen sieve bend eleğidir. Susuzlandırmada kullanılan bu elek, genellikle, hareketli (titreşimli) eleklerin önüne yerleştirilir. Kavisli elek, pülp akışına teğetsel eğri bir yüzey üzerinde akıma dik olarak yerleştirilmiş paralel çubuklardan oluşur (Şekil 3.3). Malzeme, 3-8 m/s'lik bir hızla eleğe beslenir ve hız çıkışa doğru azalır.

Beslenen malzemenin katı madde oranı %20'yi aşmamalıdır. Aksi takdirde, malzemenin yoğunluğu, elek yüzeyinden süzülme kabiliyetini ve dolayısıyla çalışma performansını büyük ölçüde etkiler. Eleğin açısı 45° ile 300° arasında değişir, fakat en yaygın kullanım açısı 45-60 derece arasındadır. Yarıçap R, yaklaşık 750 mm civarındadır.



Şekil 3.3 : Kavisli eleğin şematik görünüşü (Atak ve Ateşok, 1991).

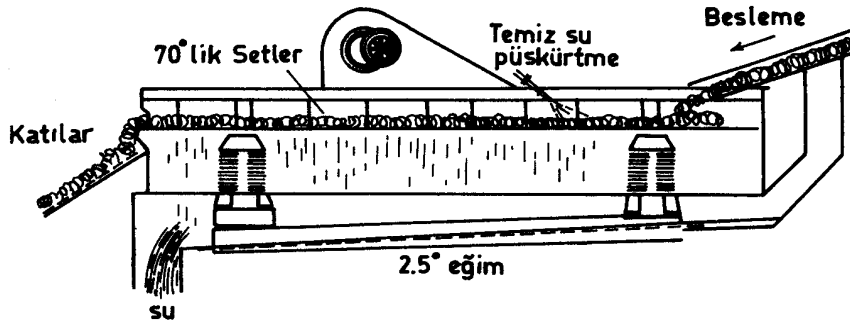
Kavisli elekler, yüksek kapasiteleri ve performansları nedeni ile susuzlaştırmanın ilk aşamasında tercih edilirler. Örneğin; ağırlıkça %30-50 katı oranındaki, -0,5 mm boyutundaki kömür pülpünü, 1 m genişliğindeki kavisli bir elekten 8-10 m³/saat kapasite ile geçirmek mümkündür. Bu eleklere, bazı durumlarda bir titreşim mekanizması ile sarsıntı sağlanarak kapasiteleri artırılabilir.

Hareketli elekler, sallantılı, titreşimli ve rezonans olmak üzere üçe ayrılırlar.

Sallantılı elekler, genellikle, eğimli olarak yerleştirilirler ve yavaş (150 devir/dakika; 70-100 mm strok), hızlı (200-300 devir/dakika; 25-75 mm genlik) olmak üzere iki şekilde tasarlanırlar. En iyi uygulama alanları kömür hazırlamadadır.

Titreşimli elekler; yüksek frekanslı (500-2500 devir/dakika; 10 mm'den kısa strok) ve düşük (25-500 devir/dakika; 15-30 mm genlik) frekanslı olmak üzere ikiye ayrılırlar. Titreşimli elekler, yapısal olarak çok çeşitlilik gösterirler (Keller ve Stahl, 1997). Şekil 3.4'te gösterilen Elliptex susuzlaştırıcı adı verilen bu elekte, malzeme, eleğe eliptik olarak beslenir. Elek üzerinde, kıyılarından 70 derece eğimli ve 30 mm yüksekliğinde ve 1 m aralıklarla yerleştirilmiş bir seri set bulunur. Kömür taneleri, elek yüzeyi üzerindeki hareketleri esnasında, bu setler tarafından yavaşlatılır ve sıkışma ile tabakalaşmaya maruz kalarak suyun çoğundan kurtulurlar.

Taneler, elek üzerinde ilerlemek için setleri aşmak zorundadırlar ve bu olay sırasında genişirler. Böylece, taneler arasında kalmış olan suyun bir kısmı daha ortamdaki uzaklaştırılır. Bu elekle, boyutu -3 mm olan taş kömürünün nem oranının, yaş elemeye rağmen, %12,2'ye düşürülebildiği görülmüştür. Bu elekle, boyutu 0,2 mm'ye kadar olan taneler dahi susuzlaştırılabilir (Ateşok, 2004).



Şekil 3.4 : Elliptex susuzlaştırıcısı (Osborne, 1990).

Diğer tip eleklerde hareketin yönü sürekli değiştiği için enerjinin çoğu harcanmakta ve bu nedenle yüksek güçlü motorlar gerekmektedir. Bu nedenden dolayı, harcanan enerjiyi koruyup gerekli motor gücünü düşürmeye yönelik rezonans tipi elekler dizayn edilmiştir ve bu elekler 50 mm'den 0,5 mm'lere kadar boyutlarda ve çok değişik malzemeler için kullanılabilirler. Şekil 3.5'te, rezonans tipi eleklerden biri olan Linatex-Derrick eleğinin şematik görünüşü görülmektedir. Bu eleğin kasası bölümlere ayrılmıştır ve her bir bölümün eğimi değişiktir. Başlangıçta daha düz olan yüzey akmakta olan süspansiyondan suyun süzülmesine olanak verir. Nem içeriği azaldıkça, katıların akışkanlığı azalacağından kasanın eğimi gittikçe artmaktadır (Önal ve diğ., 1986).



Şekil 3.5 : Derrick eleğinin şematik görünüşü (Önal ve diğ., 1986).

3.4.2 Santrifüjler

Santrifüjlerde de siklonlarda olduğu gibi, katı sıvı ayırımı, katı sıvı arasındaki yoğunluk farkına dayanır. Taneler, yer çekiminin bir kaç katı ivmelere maruz bırakılarak sudan ayrılırlar. Dolayısıyla, santrifüjler, yer çekimi ivmesiyle çöktürülemeyen ince tanelerin ayrılabilirdiği gravite cihazlarının bir uzantısı olarak düşünülebilirler.

Susuzlaştırmada kullanılan santrifüjler çok çeşitlidir (Svarovsky, 1990). Genel olarak, kullanılan sepetin cinsine ve malzemenin boşaltıldığı mekanizmaya bağlı olarak dört ana tipe ayrılabilirler. Bunlar; tüp, sepetli, konveyör ve disk tipi santrifüjlerdir. Bu santrifüjler içinde en fazla kullanım alanı bulan ise, sepetli tip santrifüj susuzlandırıcıdır.

Genellikle susuzlaştırma amacıyla ince tanelerin oluşturduğu süspansiyon doğrudan veya katı oranları arttırıldıktan sonra santrifüj sepeti içine beslenir. Sepet yüzeyi delikli bir yapıya sahiptir ve bu yüzey üzerinde geçirgen bir filtre bezi (veya ince elek) bulunmaktadır. Sepet döndürüldüğünde, taneler suya göre daha yüksek özgül ağırlığa sahip olduğundan kısa bir süre içinde filtre bezi yüzeyine çökelirler ve pülp içerisindeki su; kek, filtre bezi ve ardından da sepetin delikli yüzeylerinden geçerek dışarı atılır. Suyun kek yüzeyini terk ettiği duruma kadar olan kısma filtrasyon, kekten tamamen ayrıldığı kısma da drenaj periyodu denilmektedir. Drenaj periyodu filtrasyon periyoduna göre daha uzun sürebilmektedir (Leung, 2000; Leonard, 1991).

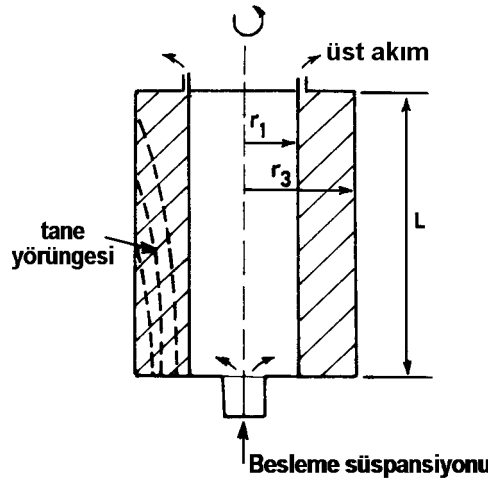
Malzemelerin santrifüj ile susuzlaştırılmasında en önemli parametrenin tane boyutu (veya yüzey alanı) olduğu anlaşılmıştır. Kömür ve mineral konsantrileri üzerine

yapılan susuzlaştırma deneylerinde boyut küçüldükçe veya tanelerin yüzey alanları büyüdükçe, kekin nem içeriği belirgin bir şekilde artmaktadır.

Kömürde bulunan inorganik malzemenin susuzlaştırmaya büyük bir etkisi vardır. Farklı mineraller (kalsit, kil, kuvars ve galen) üzerinde yapılan susuzlaştırma deneylerinde, mineral çeşidinin ve yapısının susuzlaştırmaya çok büyük etkiler yaptığı tespit edilmiştir. İnce boyutlu kil ve kalsit numunesi, nispeten daha iri boyutlardaki kuvars ve kurşun konsantrelerinden daha fazla nemli kek vermektedirler. Ayrıca, aynı boyuttaki kurşun mineralinin de kuvars mineralinden daha düşük nem içerikli kek verdiği saptanmıştır. Bu verilerden, minerallerin spesifik özgül ağırlığının ve yüzey özelliklerinin susuzlaştırmada önemli bir rol oynadığı sonucuna varılmaktadır (Asmatülü, 2001).

3.4.2.1 Tüp tipi santrifüjler

İşlem kesikli, malzemenin çıkışı manüeldir. Tüp santrifüjlerin tanımlayıcı özelliği yüksek (4-8 arasında) sepet uzunluğu-sepet çapı oranıdır. Pülp tüpün tabanından verilir ve yukarı doğru ilerlerken, santrifüj kuvvetiyle katılar sıvıdan ayrılarak tüp cidarları boyunca çökelirler. Su ve çok ince taneler, üst kısımdan santrifüjü terk ederler (Şekil 3.6).

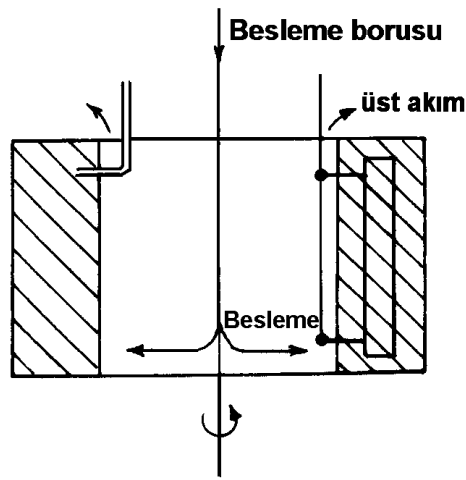


Şekil 3.6 : Tüp tipi santrifüjün şematik görünüşü (Ateşok, 2004).

3.4.2.2 Sepet tipi santrifüjler

Çok sepetli santrifüj tipinde operasyon kesikli, deşarj manüeldir. Deliksiz sepetli santrifüj tipinde ise operasyon yarı-süreklidir. Deşarj periodiktir. Sepetli tip santrifüjlerde küçük sepet uzunluğu-sepet çapı oranı en belirgin özelliklerinden

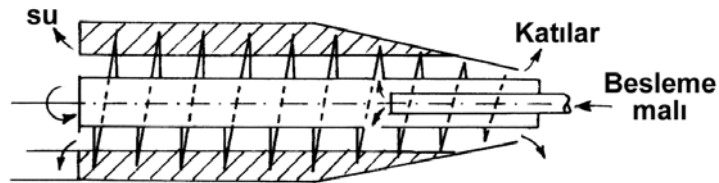
biridir. Bu oran genellikle 0,6 civarındadır. Delikli sepetli santrifüjlerde suyun atımı santrifüsel filtrasyonla gerçekleşirken, deliksiz sepetli tiplerde santrifüj kuvvetine bağlı olarak hızlandırılmış çökeltme sayesinde gerçekleşir. Cowper ve arkadaşları (1972), delikli sepetli santrifüjlerin nem atımında deliksiz sepetli santrifüjlere kıyasla daha başarılı olduğunu gözlemişlerdir. Bu tür santrifüjlerle -6+0,5 mm boyutlu taneler sıkıştırılabilir ve besleme malının yüzey nemi %20-30'lardan %6'ya kadar düşebilir. Genel olarak dik eksen etrafında dönecek şekilde tasarlanmaktadır ve bazı durumlarda ikinci bir motorla sepete titreşim verilerek katı malın boşaltılmasına yardım edilebilir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7 : Deliksiz sepet tipi santrifüjün şematik kesiti (Ateşok, 2004).

3.4.2.3 Konveyör tip santrifüjler

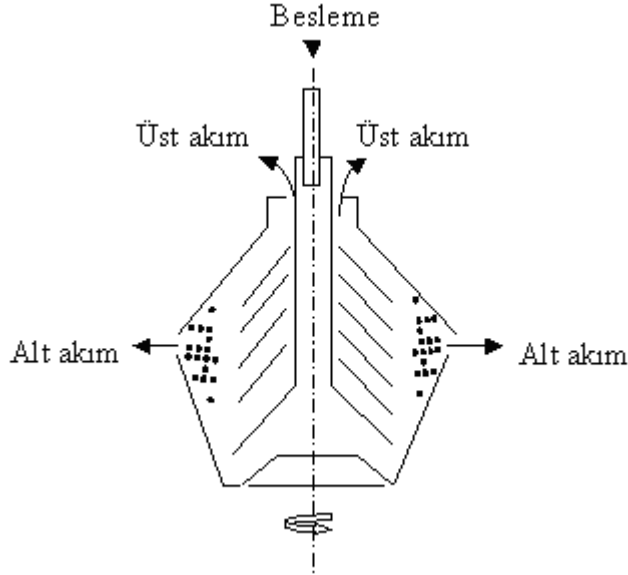
Operasyon ve deşarj süreklidir. Konveyör tip (dekantör tip) santrifüjler, 1,5-3,5 arasında bir sepet uzunluğu-sepet çapı oranına sahiptirler. Sepetin ortasında, sepete göre biraz yavaş ya da daha hızlı dönen bir burgulu konveyör bulunur. Besleme malı, burgulu konveyörün ortasından girer, cidarlardaki açıklıklardan geçerek sepetin cidarlarına savrulur. Katılar konveyör tarafından, beslenen kömürün ters istikametinde dışarı taşınırlar (Şekil 3.8).



Şekil 3.8 : Konveyör tipi sepet santrifüjün şematik görünüşü (Ateşok, 2004).

3.4.2.4 Disk tipi santrifüjler

Bu tip santrifüjler üst üste birleştirilmiş konik diskler içermektedir (Şekil 3.9). Malzeme merkezden verilir. Sıvı, diskler arasından ince film halinde geçerek çıkışa giderken taneler çökelirler. Burada temel fikir fazla tabaka kullanarak çökeltme kapasitesini arttırmaktır.



Şekil 3.9 : Disk tipi santrifüjün şematik kesiti (Ateşok, 2004).

3.4.3 Hidrosiklonlar

Siklonlar susuzlaştırma uygulamalarının yanı sıra gaz temizleme, yakma, atomize etme ve toz sınıflandırma gibi pek çok değişik alanda kullanılırlar. Sıvı için tasarlananlarına hidrosiklonlar veya hidrolik siklonlar denir. Santrifüjlerde olduğu gibi, katı-sıvı ayırımı, katı ile sıvının arasındaki yoğunluk farkına dayanır. Süspansiyondaki taneler merkezkaç kuvvetine maruz bırakılarak sıvı kısımdan ayrılırlar. Santrifüjlerden farklı olarak hiçbir hareketli parça içermezler. Gerekli olan vorteks hareketi sıvının kendisi tarafından sağlanır. Siklon çapı, siklon koni açısı, besleme girişi, alt ve üst çıkışların çapları, silindirik kısmın uzunluğu ve besleme basıncı genel olarak siklonun yapısal özellikleri ile ilgili faktörlerdir. Malzeme ile ilgili faktörler ise beslenen ürünün katı oranı ve tane boyutudur. Siklon boyu tane boyutunun küçülmesi ile doğru orantılı olarak azalır. Beslenen katı malzeme içerisindeki tanelerin %50'sinin alt akıma, %50'sinin üst akıma yöneldiği tane boyutu siklonun ayırma boyutu (d_{50}) olarak tanımlanır. Tasarımları genelde aynı olmasına rağmen boyutları çok değişkendir.

Genellikle siklon yarıçapı 10 mm'den 2,5 m'ye kadar değişirken, ayırma boyutu; 2 μm 'den 250 μm 'ye kadar değişebilir. Saatlik besleme kapasitesi 0,1 m³ ten 7200 m³'e kadar olabilir. Kömür susuzlandırmada kullanılan hidrosiklonların çapları 50 mm ile 610 mm arasında; kapasite, 1,8 m³/saat ve 570 m³/saat arasında, değişir. Sırası ile bu siklonlardaki ayırma boyutu 0,60 mm ve 25 mm'dir. Hidrosiklonlarda alt kısımdan alınan iri malzemenin nem oranı, genellikle %50-55 civarındadır.

Hidrosiklonun basitliği ve ucuzluğu, katı-sıvı ayırma proseslerinde büyük avantajdır. Ancak elde edilen çökelek katı konsantrasyonu ve siklona beslenen pülpün alt ve üst akım olarak ayrılma oranları açısından önemli kısıtlamalar göstermektedir. Küçük tane boyutlarında küçük çaplı bir hidrosiklonun dahi ayırma verimi hızla düşmekte ve 10 μm altındaki tanelerin yoğunlukları çok yüksek olmadıkları takdirde daima üst akıma kaçmaktadırlar. Bu nedenle hidrosiklonlar bazı özel uygulamalar dışında katı-sıvı ayırma yöntemlerinden ziyade klasifikasyonda tercih edilmektedir (Leonard ve Mitchell, 1968).

3.4.4 Filtreler

Filtrasyon, gözenekli bir ortamda katıların tutularak sıvının bu ortamdan geçmesi ve böylece katıların sıvılardan ayrılması yöntemi olarak ifade edilir. Genellikle filtre olarak kullanılan ortamın delikleri ayrılması istenen katı tane ebadından büyük olmakta ve iyi bir filtrasyon işlemi ancak katı malzeme filtre ortamında birikmeye başladıktan sonra gerçekleşebilmektedir. Bir başka deyişle, filtre ortamı kek tabakası oluşuncaya kadar filtre çamuruna destek görevi yapar. Gerçek filtre ortamı olan kekin ilk tabakalarının oluşması esnasında ince tanelerin başlangıç anındaki filtre ortamının deliklerini tıkamasına engel olmak gerekir. Bu nedenle filtre ortamı mümkün olduğunca iri delikli seçilmelidir (Önal ve Ateşok, 1994).

Herhangi bir filtrasyon işlemi için en uygun filtre genel olarak maliyeti en düşük olanıdır. Filtrenin maliyeti filtre alanı ile artmaktadır. Bu yüzden filtre alanını arttırmadan filtrasyon hızının artırılması tercih edilen bir durumdur. Bu ise yüksek basınçların kullanılmasını gerektirir. Yüksek basınçlar ise mekanik dizaynlar bakımından sınırlı olmak zorundadır (Roux ve diğ., 2005). Sürekli çalışan filtreler aralıklı çalışanlara (batch tipi) göre daha ekonomiktir ve daha fazla malzeme filtre etme imkanı vardır. Ancak bazı hallerde, özellikle filtre kekinin direncinin yüksek olduğu durumlarda aralıklı çalışan filtre kullanmak gerekebilir. Bunun nedeni sürekli

çalışan filtrelerde kullanılan maksimum basınçların oldukça düşük tutulmasıdır. Bunlar dışında bir filtreden istenen diğer özellikler kekin kolaylıkla uygun bir fiziksel formda elde edilebilmesi ve süzülen kısmın kalitesinin tesis içinde istenildiği zaman kontrol altında bulundurulabilmesidir. Filtreler genel anlamda filtre edilecek pülpü ortamdaki kuvvetin basınç veya emme (vakum) oluşuna göre iki gruba ayrılabilir. Süzülen kısmın daha önemli olduğu hidrometalurjik işlemlerde genellikle basınç tipi filtreler kullanılmaktadır. Süzülen kısımdan ziyade, filtre kekinin önemli olduğu ve büyük miktarlarda konsantre pülpünün filtre edildiği cevher hazırlama işlemlerinde ise genel olarak vakum tipi filtreler kullanılmaktadır (Parekh ve Groppo, 1997; Asmatülü, 2002).

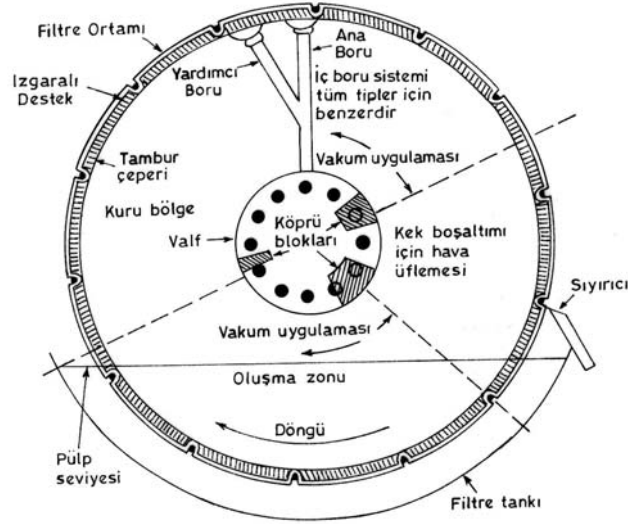
3.4.4.1 Döner tambur filtre

Kekin filtreden alınmasını otomatik olarak yapan emme esasına göre çalışan filtredir. Döner tambur filtre yatay eksen etrafında dönen bir silindirden ibarettir (Şekil 3.10). Silindirin dış yüzeyi delikli ve üzeri filtre bezi ile kaplanmıştır. Silindir birkaç bölmeye ayrılmıştır. Her bölme ile ortada dönen valf arasında ayrı bağlantı yapılmıştır. Silindir belirli bir pülpün içine batırılmıştır ve pülp içindeki katı kısmın çökmesini önlemek amacıyla, bir karıştırıcı pülp tankını karıştırmaktadır. Silindirin pülpe batan kısımlarına vakum uygulanmaktadır. Her bölme sırasıyla pülp tankına batar, kek daha sonra yıkanır ve bir hava akımı ile kısmen ısıtılır. Son olarak filtre bezinin altına basınç uygulanarak kekin silindirden ayrılması sağlanır. Tambur dönüş hızını ayarlayarak (0,1-1 devir/dakika) yaklaşık 10 cm kalınlığa kadar kek elde edilebilir. Devir sayısının artması daha ince kek elde edilmesine yol açar ve filtrasyon hızı artar. Bu aletlerin kapasiteleri filtre yüzeyinin her m²'si için saatte 500-20.000 kg katı arasındadır ve bu kekin cinsine göre değişir. Aletin en can alıcı noktası daha önceden belirlenmiş pozisyonlarda emmeden basınca geçişi sağlayan valf sistemidir. Genel olarak 1 tam devrin 1/3'ü filtrasyon 1/2'si yıkama ve kurutma ve 1/6'sı kekin sıyırılması için kullanılır. Kekin sıyırılması için sıyırma bıçağı veya güç sıyırılan keklerde sicimli ayırma metotları kullanılır (İpekoğlu, 1994).

3.4.4.2 Döner diskli filtre

Bunlar da tambur filtreler gibi filtrasyon, yıkama, kısmen kurutma ve kekin filtreden alınmasını otomatik olarak yapan emme esasına göre çalışan filtrelerdir. Madencilik endüstrisinde kullanılmak üzere geliştirilmişlerdir. Fakat günümüzde kimya

endüstrisinde de geniş uygulama alanı bulmuşlardır. Döner disk filtre daire şeklinde çeşitli sayıda filtre levhalarından meydana gelmiştir ve bu yaprak levhalar boru şeklinde ağır bir shaft üzerine oturtulmuştur. Disklerin her bir bölümü ayrı bir çıkış noktasına bağlanmış ve çeşitli disklerin aynı hizaya gelen bölümlerinin çıkışları birleştirilerek sürekli bir kanal oluşturulmuştur.



Şekil 3.10 : Sürekli çalışan döner tambur filtre (Kural, 1998).

Bu kanallar tambur filtrede olduğu gibi döner bir valf sistemine bağlanmışlardır (Şekil 3.11). Disk filtrenin çalışma prensibinin döner tambur filtreye çok benzemesine rağmen bu filtrelerde elde edilen kekin yıkanması ve sıyırılması daha zordur. Bu tip filtrede disklerin farklı pülp tankları içine batırılması ile farklı pülp aynı zamanda filtre edilebilir. Bu durumda süzülen kısmın ayrılması mümkün değildir. Disk filtrenin döner filtreye göre en önemli avantajı tesis içinde aynı boşluk için disk filtrenin çok daha fazla filtre alanına sahip olmasıdır (Parekh, 1996; Wills, 1979).

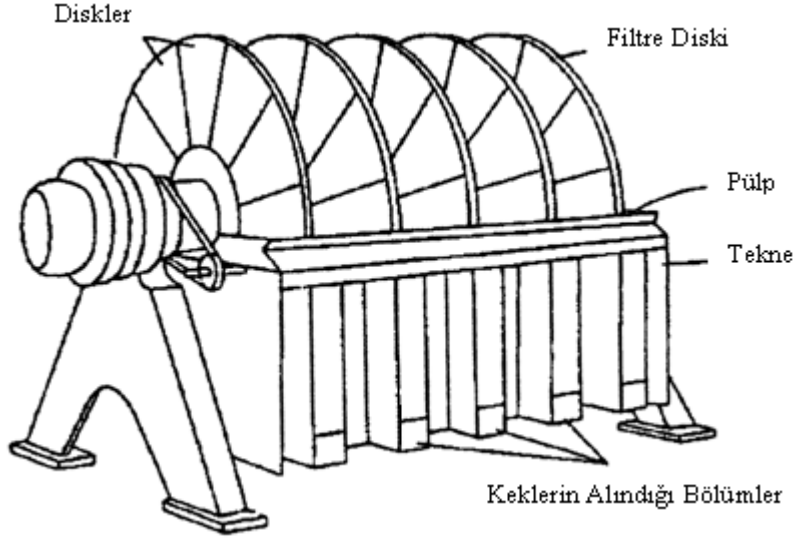
3.4.4.3 Bantlı filtreler

Bantlı filtrelerde, filtre ortamı hareket halindeki bir bandın üzerindedir. Filtrasyon, iki bant arasında, pülpü basınç altında sıkıştırarak sağlanır.

3.4.4.4 Basınç tipi filtreler

Katıların fiilen sıkıştırılmalarının zorluğu nedeni ile basınç altında yapılan filtrasyonun vakumlu filtrasyona göre belirli avantajlarından söz edilebilir. Bu tip filtrelerde kullanılan yüksek basınçlar daha yüksek bir süzülme hızı ve aynı zamanda

daha iyi yıkama ve kurutma olanakları sağlayabilmektedir. Diğer yandan filtrasyon esnasında oluşan kekin basınçlı filtre odalarından sürekli olarak dışarı alınması çok zor bir işlemdir. Bu nedenle her ne kadar sürekli çalışan filtreler mevcut ise de basınç tipi filtrelerin büyük bir çoğunluğu kesikli olarak çalıştırılmaktadır (Patwardhan ve diğ., 2002).



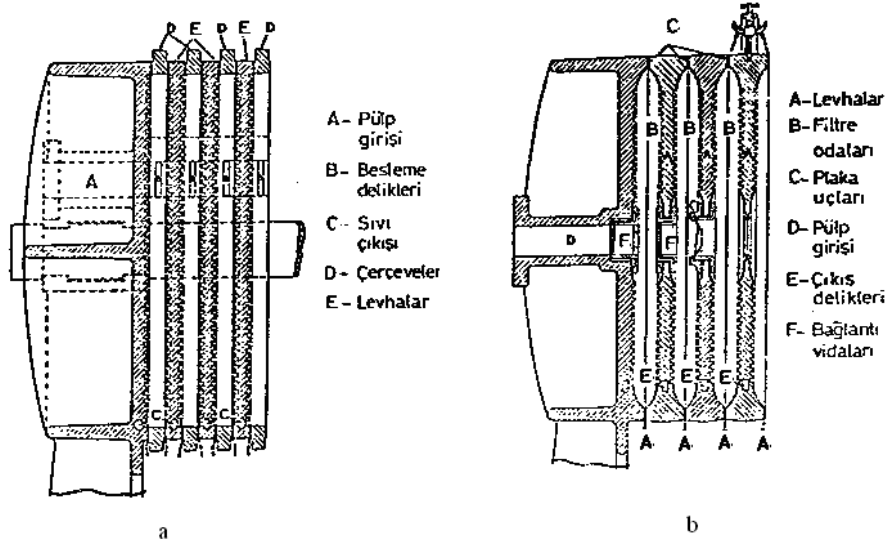
Şekil 3.11 : Döner diskli filtre (Kural, 1998).

Pres filtre en yaygın olarak kullanılan basınç tipi filtredir. Levhalı ve oyuklu olmak üzere iki şekilde imal edilmektedir. Oyuklu pres filtrelerin yapımı levhalı filtreye göre daha ucuz, kek boşaltılması kolay, fakat filtre ortamının yerleştirilmesi daha zordur. Ayrıca oyuklu filtrelerin aşınması ve yırtılması daha kolay olmaktadır. İki tip pres filtreden oyuklu filtre katı konsantrasyonu daha yüksek pülpler için daha uygundur. Son derece temiz, bir süzülen kısım elde edebilmek ve kekin kolaylıkla alınması özelliklerinden dolayı kömür hazırlamada ince artığın susuzlandırılmasında tercih edilen filtredir. Bu filtrelerde vakum filtrasyonuna nazaran %7 daha düşük nem değeriyle filtre keki elde edilmektedir. Kek oranı ise %50-100 daha yüksektir. Ancak pres filtrasyon işlemlerinde birim kek maliyetleri bir miktar yüksektir. Şekil 3.12’de levhalı ve oyuklu pres filtre görülmektedir (Kural, 1998).

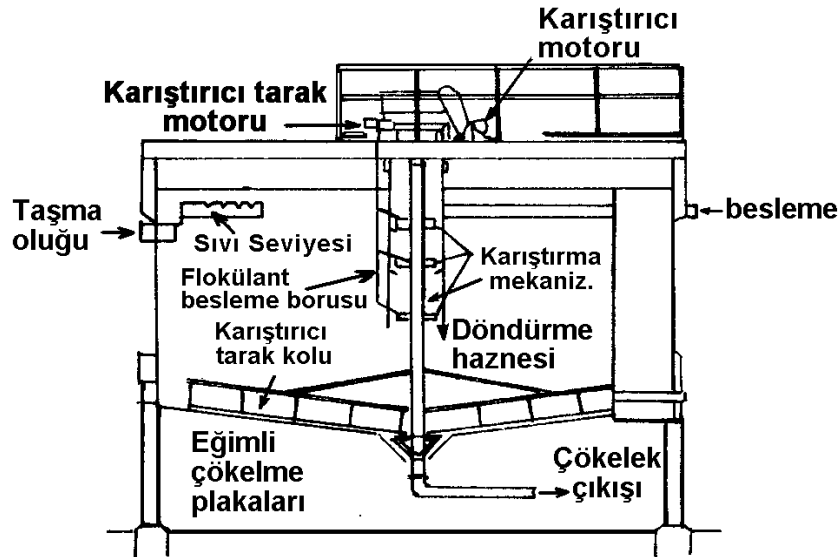
3.4.5 Tikinerler

Tikinerler, katı-sıvı karışımı halinde beslenen kömürün katı konsantrasyonunun çökelme ile arttırılmasını ve aynı zamanda üst kısımda katılardan arınmış berrak bir sıvının elde edilmesini sağlayan endüstriyel cihazlardır. Tikinerler aralıklı veya sürekli çalışabilecek şekilde dizayn edilebilirler. Sürekli çalışan tikinerler madencilik

dahil olmak üzere bir çok endüstride (kimya, çevre sularının temizlenmesi gibi prosesler) yaygın olarak kullanılırlar. Madencilikte kullanılan tikinerler diğerlerine göre çok daha büyük ve sağlam yapıda olmak zorundadır. Bunun nedeni metalurjik pülplerin büyük tonajlarda ve çoğunlukla yüksek özgül ağırlıklarda olmaları ve %60-75 gibi yüksek konsantrasyonlarda çökeltmeleridir. Şekil 3.13'te basitleştirilmiş tipik bir tikiner şeması görülmektedir.



Şekil 3.12 : a) Levhalı pres filtre b) Oyuklu pres filtre (Ateşok, 2004).



Şekil 3.13 : Tikiner'in şematik gösterimi (Kural, 1998).

Belirli boyuttaki ve tipteki bir tikinerde en yüksek verimi almak için çökeltme hızı mümkün olduğu kadar fazla olmalıdır. Bu hız küçük miktarlarda flokülant veya koagülant kullanılarak efektif tane boyutunun irileştirilmesi ile artırılabilir (Ateşok 1986).

Özellikle flokülantların seçimi, benzer uygulamalar için bile farklı işlev gösterebilmeleri ve yüksek fiyatları nedeni ile ön denemeler sonucu yapılmalıdır. Bir tikinerin iki temel fonksiyonu vardır. Birincisi, tikinerden berrak bir sıvı elde edilmelidir. Bu doğrudan çökeltme alanı ile ilgilidir. Dolayısıyla belirli miktarda besleme malı için berrak sıvı elde etme kapasitesi tikinerin çapı ile ilgilidir. İkinci olarak, tikinerin belirli bir katı konsantrasyonunda bir çökelek elde etmesi gerekir. Bu da tanelerin tikinerde kalma süresi, dolayısıyla tikiner yüksekliği ile ilgilidir. Bu nedenle, tikinerlerin çapının ve yüksekliklerinin tespiti susuzlaştırmada büyük önem taşır.

Gravite çökmesinin verimliliği, kullanılan çökeltme tankı alanı ile yakından ilgili olduğundan ve geniş bir alana yayılan tortunun çıkış noktasına doğru sürekli hareketinin arzu edilmesi düşüncesi Lamella veya eğik plakalı tikiner adı verilen tikinerlerin geliştirilmesine neden olmuştur. Bu tip tikinerde eğimli paralel plakalarda oluşan bir kafes içinde katı tanelerin çökeltme mesafesi azaltılmakta ve aynı zamanda efektif çökeltme alanı arttırılmaktadır. Bir lamella tikinerin tesis içinde kaplıyacağı alan aynı çökeltme kapasitesine sahip bir konvensiyonel tikinerin %20'si kadardır. Eğimli paralel levhalar çökeltme katıların graviteyle koni şeklindeki boşalma ucuna doğru kaymasını sağlamaktadır. Böylece efektif çökeltme alanı, bu paralel levhaların yatay eksenindeki izdüşümleri olmaktadır

3.5 Kömürün Kurutulması

Termal susuzlaştırma, teknolojik nedenlerle uygulanmaktadır. Arzulanan nem oranına kadar kömürün nemini azaltmayı mümkün kılar. Koklaşma, briketleme, gazlaştırma vb. öncesi yüzey neminin tamamının giderilmesini sağlayan bir işlemdir. Termik santrale gidecek kömürün ısı değerinin arttırılması için de bu tür susuzlaştırma yapılır. Yüksek enerji sarfiyatından dolayı termal kurutma sadece mekanik kurutmanın iyi sonuç vermediği durumlarda kullanılır. Kömürün yüzey ve bünye nemi, susuzlaştırma yöntemleri uygulanarak giderildiğinde, öyle bir nem sınırına ulaşılır ki, daha fazla nem giderilmesi, yalnızca kurutma yapılarak mümkün olur. Kurutma, enerji ve kütle transferinin eş zamanlı gerçekleştiği bir işlemdir. Kurutmada, ısıtma uygulanarak kömürün içerdiği su buharlaştırılır ve ortamdan uzaklaştırılır. Kurutma yöntemi ile nem gidermede, suyun kaynama noktası civarında buharlaştırma yapılır. Kömürlere uygulanan iki kurutma sistemi vardır. Bu sistemler

direkt ve indirekt kurutma olarak bilinir. Ancak bazı durumlarda her iki sistemi de içeren karışım kurutma sisteminde uygulanır (Ateşok, 1986).

3.5.1 Kömür kurutma sistemleri

Geliştirilen birçok kurutma sistemi ürünlerin fiziksel özelliklerine dayanmaktadır. Kurutucular, kurutma yöntemine (direk, indirek veya bunların karışımı) ve sürekli veya süreksiz çalışmalarına göre sınıflandırılmaktadırlar. Direk kurutucu, sıcak kurutma gazları ile yaş malzemenin yakın temasta olduğu ve nemin kurutucuyu dışarı giden gazlarla terkettiği tip kurutucu olarak tanımlanır. Endirek kurutucuda ise malzeme ile sıcak gazlar arasında bir duvar vardır. Isı bu duvar arasından malzeme üzerine iletilmektedir ve nem kurutucuyu başka bir yoldan terkettirir.

Cevher hazırlama endüstrisinde en çok direk ve sürekli çalışan kurutucular kullanılmaktadır. Özellikle malzemede bulunan bünye rutubetinin uzaklaştırılması kurutucunun boyutlarını ve kurutma süresini önemli ölçüde etkilemektedir. Bunun yanı sıra, kurutulacak malzeme ve ısıtma gazları da kurutucu seçimini etkileyen faktörlerdir. Kurutma sıcaklığı, malzeme ve kurutucu tipi ile sınırlanmaktadır ve genel olarak kullanılan en yüksek sıcaklıklar 750°C civarındadır. Malzemenin fiziksel ve kimyasal özellikleri de kurutucu seçiminde gözönüne alınması gereken önemli parametrelerdir. Kömür kurutmada en çok kullanılan sistemlerin başında döner ve akışkan yataklı kurutucular gelmektedir (Kural, 1998; Ateşok, 1986).

3.5.1.1 Döner kurutucular

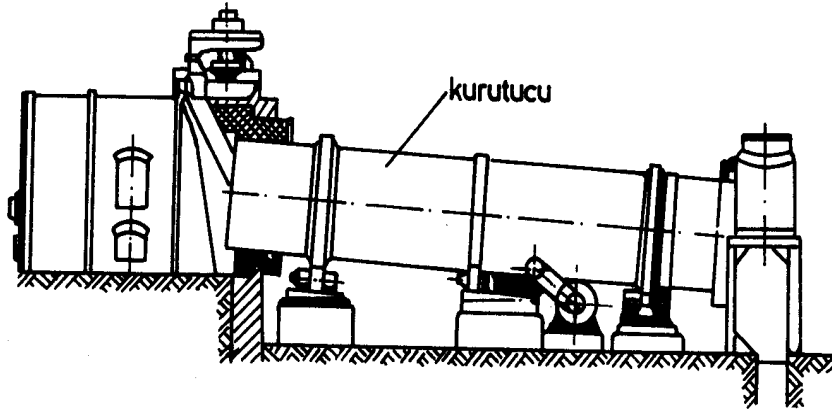
Gerek büyük parçalı, gerekse ufak tane boyutlu kömürlerin kurutulmasında, sanayide yaygın olarak kullanılmaktadır (Şekil 3.14). Isıtıcı akışkan, sıcak hava veya yanma gazlarıdır. Silindirik yapı, 1,5-3,5 m çapında, 12-30 m uzunluğunda olup, boylamasına yatay düzlemle 2-5°'lik açı oluşturacak şekilde yerleştirilmiştir. Dönme hızları 2-27 d/d'dir. Isıtma gazları direk veya indirek olarak malzeme ile aynı veya ters yönde verilebilir. En iyi sistem silindirin iç basıncı ile dış basıncını dengeleyen üfleme-emme sistemidir. Kömüre hareket kazandırmak amacıyla, duvar çeperleri işlenebilir (Kural, 1998; Ateşok, 1986).

3.5.1.2 Akışkan yataklı kurutucular

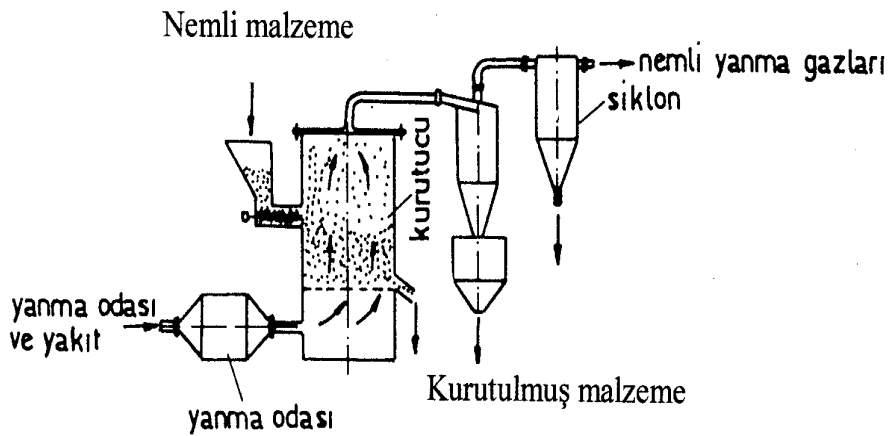
Döner kurutucuların yanı sıra madencilik endüstrisine hızla giren ve büyük bir kullanım alanı bulan diğer bir kurutucu da akışkan yataklı kurutucu tipleridir (Şekil

3.15). Bu kurutucular tabanı ızgaralı ve arasından sıcak gazın aşağıdan yukarıya doğru üflendiği düşey bir silindirden oluşmaktadır. Kurutucu bölümünde gaz hızı o şekilde ayarlanır ki malzeme bir akışkan gibi süspansiyon halinde tutulup kaynamaktadır. Döner kurutucularla karşılaştırıldığında, ısı transfer oranı daha düşüktür, yapısı daha basit ve tesis içinde kapladığı alan daha küçüktür. Bunun yanı sıra kurutmaya verilen malzemenin boyutunun daha küçük olması nedeniyle bir toz tutma sisteminin akışkan yataklı kurutucu ile birlikte çalıştırılması zorunludur.

Genel olarak bu kurutucularda istenilen hassasiyete kadar kurutma yapılabilmektedir. %30'a kadar beslenen rutubetli olan kömürden %1-3 rutubetli kömür elde edilir. Yakıt sarfiyatı oldukça düşük, kurutma odasının korozyonu az ve bakım masrafları ilk yatırım maliyetinin %2-3'ü kadardır (Kural, 1998; Ateşok, 1986).



Şekil 3.14 : Döner kurutucu (Kural, 1998).



Şekil 3.15 : Akışkan yataklı kurutucu (Ateşok, 1986).

3.6 Susuzlandırma İşlemlerinde Yardımcı Prosesler

Katı-su karışımlarının özelliklerinin ve yapılarının değiştirilmesi susuzlandırma proseslerinde verimi etkilemektedir. Bu özelliklerin değiştirilmesi, katı tanecik yüzeyleri ile su arasındaki bağ kuvvetlerinin azalmasına neden olarak, mekanik susuzlandırma işlemlerinde suyun daha kolay ayrılmasını sağlamaktadır (Rong ve Hitchins, 1995). Mekanik susuzlandırma işlemlerinde verimi arttırmak amacıyla, değişik fiziksel ve kimyasal yöntemler kullanılmaktadır. Bilindiği üzere elektrokinetik potansiyel, katı-su karışımlarının susuzlandırılmasında, en önemli parametrelerden biridir. Koagülasyon işleminde çok önemli olan bu parametre, polielektrolit ilavesi ile değiştirilebilmektedir. Bununla birlikte kolloid stabilitesini değiştiren ultrasonik alanın elektrokinetik susuzlandırma işleminin yanında kullanılması, konvensiyonel susuzlandırma metodlarının kapasitelerini ve verimini arttırmaktadır (Parekh, 2009; Bien ve diğ., 1997).

3.6.1 Flokülasyon-koagülasyon ve yüzey aktif maddeler ile susuzlandırma

Koagülasyon ve flokülasyon genelde susuzlandırmanın iki temel yöntemi olan çöktürme ve filtrasyon operasyonlarının verimliliğini arttırmak amacıyla kullanılmaktadır. Bilindiği üzere ince öğütülmüş mineral parçaları ile suyun meydana getirdiği süspansiyonlarda, tanecikler bazen birbirlerinden uzaklaşarak ayrılırlar bazen de birbirlerine yapışarak daha büyük taneler meydana getirirler. Birinci duruma dispersiyon (dağılma) ikinci duruma da flokülasyon (salkımlaşma) adı verilmektedir. Bu iki durum da pülpün normal hali değildir, her ikisi de suni olarak yaratılabilir. Katı ve suyun birlikte bulunduğu çeşitli cevher hazırlama sistemlerinde bu iki durum daima mevcuttur. Klasifikatörlerde, mineral tanelerinin disperse edilmesine, çöktürme tanklarında ise floküle edilmesine çalışılır. Flokülasyon terimi genel olarak koagülasyon ile aynı anlamda kullanılmaktadır. Bunlar arasındaki fark koagülasyonun elektriksel çekim kuvvetleri ile kontrol edilen bir salkımlaşma olması, flokülasyonun ise yüksek molekül ağırlıklı organik maddelerin etkisiyle partiküller arasında fiziksel bir köprü getirilerek elde edilmesidir (Singh, 1999; Schick ve Villa, 1983; Singh ve diğ., 1998).

Koagülasyon çok ince öğütülmüş mineral taneciklerinin direkt olarak birbirlerine yapışmasına neden olmaktadır. Bu şekilde elde edilen salkımlar küçük ve kompakt bir yapıda olmakta, çökme hızları artmakta ancak çökme sonucu elde edilen

Çökelek filtrasyon işlemi için yeteri kadar poroziteye sahip olmamaktadır. Ayrıca elde edilen salkımlar oldukça zayıf ve kesme kuvvetleri etkisiyle kolayca parçalanabilir bir karakterdedir. Flokülasyon ise, suda çözünebilen yüksek moleköl ağırlıklı doğal veya sentetik organik polimerlerle yapılmaktadır. Bunların bir ucu tane yüzeyine adsorbe olur, diğeri ucu ise başka bir taneye bağlanarak bir köprü meydana getirirler. Nişasta, tutkal, jelatin, reçine gibi doğal flokülantların moleköl ağırlıkları, sentetik flokülant polimerlere göre çok daha az ve floküle etme kabiliyetleri oldukça düşüktür. Bu nedenle günümüzde genellikle sentetik polimerler kullanılmaktadır. Bunlardan moleköl ağırlıkları yüksek olanlar aynı anda birden fazla partiköl yüzeyine adsorbe olarak üç boyutlu bir matris meydana getirebilmektedirler (Dentel ve diğ., 1993; Hamza ve diğ., 1988). Yüksek moleköl ağırlıklı flokülantların büyük miktarlarda kullanılması susuzlandırma işlemlerinde ters bir etki yaratabilmektedir. Bu nedenden dolayı flokülant miktarının kullanılacağı sistemler için dikkatli olarak saptanması gerekmektedir (Mishra, 1988; Sabah ve diğ., 2004).

Bunun yanında, flokülasyonun susuzlandırma üzerindeki rolü geniş ölçüde araştırılmış, fakat yüzey aktif maddelerin çok başarılı uygulamalarına rağmen, hareket mekanizması hakkında çok az bilgi elde edilmiştir. Yüzey aktif maddeler, genel olarak hidrofilik ve hidrofobik gruplardan oluşturulmuş amfifilik moleküllerinden meydana gelirler. Bu oluşum, filtre kekinin kapilerindeki suyun uzaklaştırılmasına imkan sağlayarak, kekin nihai nem içeriğini düşürür (Hogg, 2000; Tao ve diğ., 2003).

4. ULTRASONİK TİTREŞİM VE UYGULAMA ALANLARI

4.1 Ses ve Ultrasonik

Esnek bir ortamda mekanik titreşimler halinde yayılan boyuna dalgalara ses denmektedir. Esnek madde ortamı katı, sıvı veya gaz olabilir. Ses ancak madde ortamında yayılabilir. Elektromagnetik dalgalar gibi boşlukta yayılamazlar. Madde ortamında atom veya moleküllerin boyuna titreşimleri, küresel olarak yayılınca ses meydana gelir.

Sesin havada yayılması şöyle olmaktadır; bir ses kaynağının titreşimleri hava moleküllerine çarpınca, bu molekülleri titreştirir, bu titreşimlerde yanlarındaki hava moleküllerini titreştirerek, ses dalgaları yayılır. Ses iletilirken, hava moleküllerinin kendisi gitmez, titreşimi iletmış olur. Elektrik telleri ve elektromagnetik haberleşmede iletilen ses değil, titreşimi ses kaynağının titreşimine benzeyen elektromagnetik titreşimlerdir. Bu sebeple ses yayın cihazlarının hoparlörlerinden yayılan ses, esas ses kaynağından yayılan ses olmayıp, titreşimleri bu sese benzeyen başka bir sestir.

Sesin fizyolojik özellikleri:

a) *Yükseklik* : Sesin frekansıdır. İnsan kulağı yaklaşık 20 ile 20.000 Herzt olan sesleri işitebilir. Sesin frekansına bağlı olarak yüksekliği tarif edilir. İnce seslerin frekansı büyük, kalın seslerin ise küçük değerlerdedir. Frekansları, 20 Hz'den küçük olan seslere "infrasonik", 20.000 Hz'den büyük olanlara ise "Ultrasonik" denir.

b) *Şiddet*: Ses dalgalarının bir santimetrelilik yüzeydeki güçlerine denmektedir. Birimi watt/cm²'dir. Ses şiddeti, dalganın, frekansına ve dalga genliğinin karesine bağlıdır. Şiddet sebebi ile ses kuvvetli veya zayıf olarak duyulur. İnsan kulağı 10¹⁶ watt/cm² ile 10⁴ watt/cm² şiddet değerleri arasındaki sesi duyabilir.

c) *Tını ve Harmoniler*: Ses kaynakları, genellikle ana ses denilen (en kalın) sesle birlikte, frekansları ana sesin frekansının tam katları olan tali sesler çıkarır. Bu tali seslere ana sesin harmonileri denir. Bu sesler etrafa ana sesle birleşmiş olarak yayılır.

Tını ise, bir sesin kulağa tesiri olup, farklı kaynaklardan çıkan sesler aynı frekans ve şiddette olsalar da tınları farklıdır.

Katı, sıvı, gaz gibi esnek ortamlarda mekanik titreşimler halinde yayılan 20 kHz'den yüksek frekanslardaki ses dalgalarına ultrasonik ses dalgaları denmektedir. Genel olarak ultrasonik dalgaların uygulamaları iki ana grupta incelenir. Bunların düşük ve yüksek yoğunluklarda kullanımı ile ilgili olarak ışınlanmış ortamlarda bazı kalıcı etkiler üreten yüksek yoğunluklu uygulamalar, 20-100 kHz frekans aralığında 0,1 watt/cm²'den bir kaç kwatt/cm² yoğunlukta uygulamalar olup bunlara yüksek yoğunluklu ultrasonikler denmektedir.

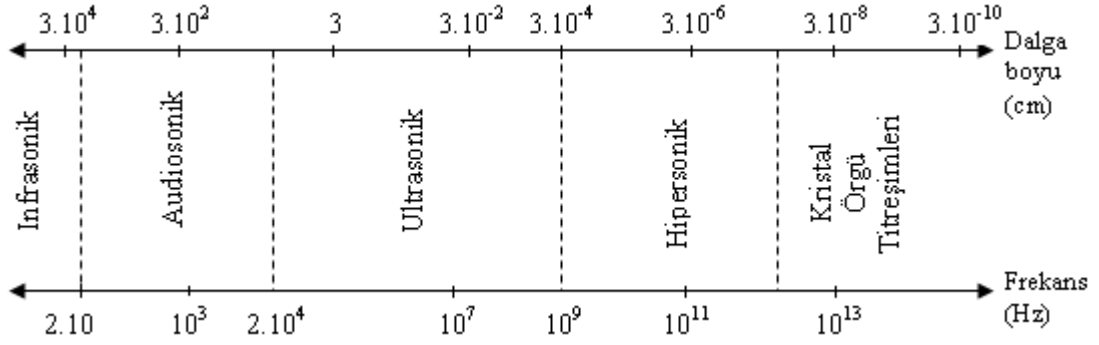
Elastik bir özelliğe sahip sıvı ve gaz ortamlar, bu özelliklerinden dolayı ses dalgalarını yaymaya izin verirler. Sıvı ile gaz arasında en belirgin fark; sıvı ortamın gaz ortama göre daha yoğun olması ve çok daha az sıkıştırılabilir özelliğe sahip olmasıdır. Su ortamında çok büyük basınçlar uygulansa bile suyun hacminde bir değişiklik yapmak çok zordur (Krasilnikov, 1963).

Ultrasonik titreşim dalgalarının hava ortamında kullanımı ve uygulaması su ortamında kullanımından daha az yaygındır. Çünkü hava ortamında dalgaların yüksek absorpsiyon özelliği vardır.

Çok yüksek (>20 kHz) frekansa sahip ses dalgalarının (ultrasonik) verdiği enerji, mekanik enerjinin bir formudur. Sonik ve ultrasonik enerji sıvı, katı ve gaz gibi ortamlarda tüm materyallerde dalgalı olarak karakteristik bir hızda yayılmaktadır. Bu dalga hızı ortamın elastik özelliğine ve ortamın atalet özelliklerine bağlıdır. Üretilen sonik ve ultrasonik dalgalar, ortamdaki malzemenin yorulmasına, bozunmasına ve fiziksel özelliklerinin değişmesine neden olabilmektedir (Muralidhara ve diğ., 1985).

Ultrasonik aynen ses gibi bir titreşim hareketidir. Titreşim hareketi olarak doğar, titreşim hareketi olarak yayılır ve titreşim hareketi olarak algılanır. Atomların veya moleküllerin denge konumları etrafında titreşimidir. Dolayısıyla ultrasonik enerji mekanik bir enerjidir. Aynı zamanda ışık, radyo dalgaları ve x-ışınlarıyla birçok ortak özelliklere sahiptir. Dalga boyları dikkate alındığında ultrasonik dalga boyunun, ışık dalga boyunun altında fakat çok yakınında olduğu görülür (Şekil 4.1). Elektriksel olarak oluşturulabilmesi ve bir noktaya odaklanabilmesinin mümkün olması ışık dalgalarına benzer davranışlarıdır. Farklılığı, moleküllerin mekanik

titreşimleriyle ilerleyebilmesinden dolayı boşlukta ilerleyememesidir. İlerleyebilmesi için hava, sıvı, katı, doku gibi bir ortam gereklidir (Özden, 1981).



Şekil 4.1 : Ultrasonik spektrum (Alp, 1988).

4.2 Ultrasonik Dalgalar

4.2.1 Dalganın yayılımı

Ses, maddesel ortamın titreşim hareketidir. Ancak maddesel ortamda vardır. Boşlukta ses veya ultrasonik yayılmaz. Sesi yaratabilmek için bir maddesel ortam titreşime zorlanmalıdır. Bir parçacığın titreşimi onun denge konumu etrafında gidip gelme hareketidir. Dalga hareketi, titreşen parçacığın zamana göre titreşim genliğinin bir maksimum ile minimum arasında salınımını yani zamanla değişimini gösterir (Gürpınar, 2007).

Ses kaynakları aldığı çeşitli enerjiler sayesinde titreşim hareketi yapar ve sahip olduğu enerjiyi bulunduğu ortamdaki taneciklere aktararak taneciklerin kinetik enerji kazanmasını sağlar. Kinetik enerji kazanan tanecikler etrafındaki diğer taneciklere çarparak diğer tanecikleri de titreştirir. Sesin yayıldığı ortamdaki taneciklerin titreşim enerjilerini birbirlerine aktarması sonucu ses dalgaları oluşur ve ses dalgaları kinetik enerjinin taşınmasını sağlar. Ses dalgaları su dalgalarına benzer fakat su dalgaları gibi görünen dairesel dalgalar şeklinde değil, görünmeyen küresel dalgalar şeklinde yayılır.

Ses, ortam taneciklerini titreştirerek hareket ettiği için ortamdaki taneciklerin birbirlerine yakınlıkları sesin hızını etkiler. Sesin yayılma hızı bazı etkenlere bağlı olarak değişir. Yani ses her ortamda aynı hızla yayılmaz.

1) Sesin yayılma hızı ortamın cinsine bağlıdır. Sesin katı, sıvı ve gaz ortamlardaki yayılma hızı farklıdır. Gaz tanecikleri birbirinden çok uzak, katı tanecikler ise

birbirine çok yakındır. Bu nedenle ses katılarda en hızlı, gazlarda ise en yavaş yayılmaktadır. Ortama göre sesin yayılma hızı karşılaştırılırsa $V_{\text{Kati}} > V_{\text{Sivi}} > V_{\text{Gaz}}$ 'dir.

2) Sesin yayılma hızı ortamın yoğunluğuna bağlıdır. Ortamın yoğunluğu arttıkça sesin yayılma hızı da artar.

3) Sesin yayılma hızı ortamın sıcaklığına da bağlıdır. Ortamın sıcaklığı arttıkça sesin hızı da artar. Çünkü sıcak ortamın tanecikleri, soğuk ortamın taneciklerinden daha hızlıdır (Alp, 1988).

4.2.2 Dalga uzunluğu ve frekans

Ses, ses kaynaklarının titreşim hareketi sonucu oluşur ve ses dalgaları halinde yayılır. Ses dalgalarının frekans, genlik ve periyot gibi özellikleri vardır. Şekil 4.2'de titreşim hareketinin dalgasal gösterimi verilmiştir.

a) Ses dalgalarının tepe noktası (Dalga tepesi) : Ses enerjisini ileten taneciklerin sık olduğu (taneciklerin diğer taneciklere enerjilerini aktardığı) bölgeye ses dalgasının tepe noktası veya dalga tepesi denir.

b) Ses dalgalarının çukur noktası (Dalga çukuru) : Ses enerjisini ileten taneciklerin seyrek olduğu (enerjiyi aktaran taneciklerin bulunduğu) bölgeye ses dalgasının çukur noktası veya dalga çukuru denir.

c) Ses dalgalarının genliği: Bir dalga tepesi ile dalga çukuru arasındaki uzaklığın yarısına genlik denir.

d) Ses dalgalarının frekansı: Ses kaynağı tarafından 1 saniyede üretilen dalga sayısına veya bir noktadan 1 saniyede geçen dalga sayısına frekans (f) denir. Frekans dalga sayısı ile doğru orantılıdır ve ses kaynağından bir saniyede üretilen dalga sayısı ne kadar fazla ise sesin frekansı o kadar büyük, dalga sayısı ne kadar az ise sesin frekansı o kadar küçük olur.

e) Ses dalgalarının periyodu: Bir tam dalganın üretilmesi için geçen süreye periyot (T) denir. Periyot, ardışık iki tepe veya iki çukurun oluşması için geçen süredir. Birim zamandaki periyot sayısına frekans denir. Periyot ile frekans arasındaki bağıntı;

$$T \cdot f = 1 \text{ 'dir.} \quad (4.1)$$

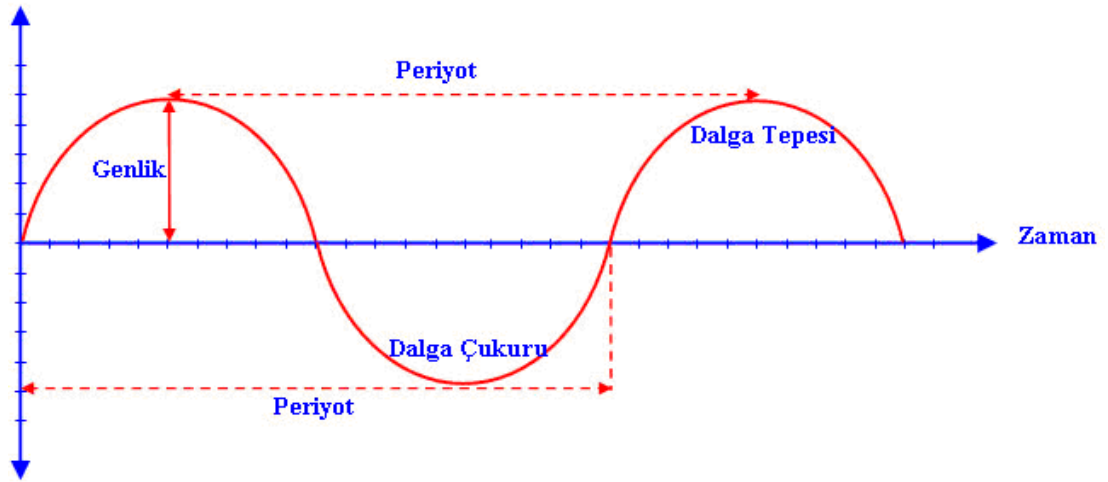
T saniye biriminde olduğundan $f = 1/\text{Saniye} = 1 \text{ Cycle} = 1 \text{ Hertz (Hz)}$ birimli olacaktır.

Titreşim hareketinin bir periyodu dalga boyuna (λ) eşittir. Bir başka deyimle, dalgasal hareket bir periyoda karşılık olan bir zaman zarfında ortam içerisinde bir dalga boyu kadar yol kat eder. Bu nedenle frekansla dalga boyunun çarpımı sesin ortam içinde birim zamanda kat ettiği yolu, yani ses hızını verir (Gürpınar, 2007).

$$V = \lambda/T \text{ (m/s)} \quad (4.2)$$

$T=1/f$ ifadesi yerine konulursa hız;

$$V = \lambda \cdot f \text{ olarak ifade edilir.} \quad (4.3)$$



Şekil 4.2 : Titreşim hareketinin dalgasal gösterimi.

Frekans ve periyot, sesi üreten noktanın titreşim hızı ile ilgilidir ve o titreşim hareketi için sabittirler. Aynı titreşim hareketi havanın moleküllerini titreştirerek çevreye yayılırken de frekans ve periyodu hep aynı kalır. Dalga boyu bir periyot zarfında ve ses hızı birim zamanda sesin ortamda yayılım uzaklıkları olarak ortamın cinsine bağlı büyüklüklerdir. Ses dalgaları her ortamda değişik hızlarda yayılır. Eşitliğe göre ses hızı farklılaştığı zaman yani ses bir ortamdan diğer bir ortama geçerken frekansı aynı kaldığı halde, ses hızı değişeceğinden dalga boyu değişmek zorunda kalacaktır. Böylece dalga boyu ortama göre kısalmış veya uzayabilir.

4.3 Dalga Çeşitleri

Bilinen dalgalar olarak su dalgalarını, ses dalgalarını, ışık dalgalarını, radyo dalgalarını ve elektromagnetik dalgaları sayabiliriz. Bunlardan ışık dalgaları, radyo dalgaları ve elektromagnetik dalgalar boşlukta rahatlıkla yayılabilmektedirler. Fakat su ve ses dalgalarının yayılabilmeleri için esnek bir ortam gerekmektedir. Bu şekilde esnek bir ortamda yayılan dalgalara mekanik dalgalar adı verilir ve esnek ortamın

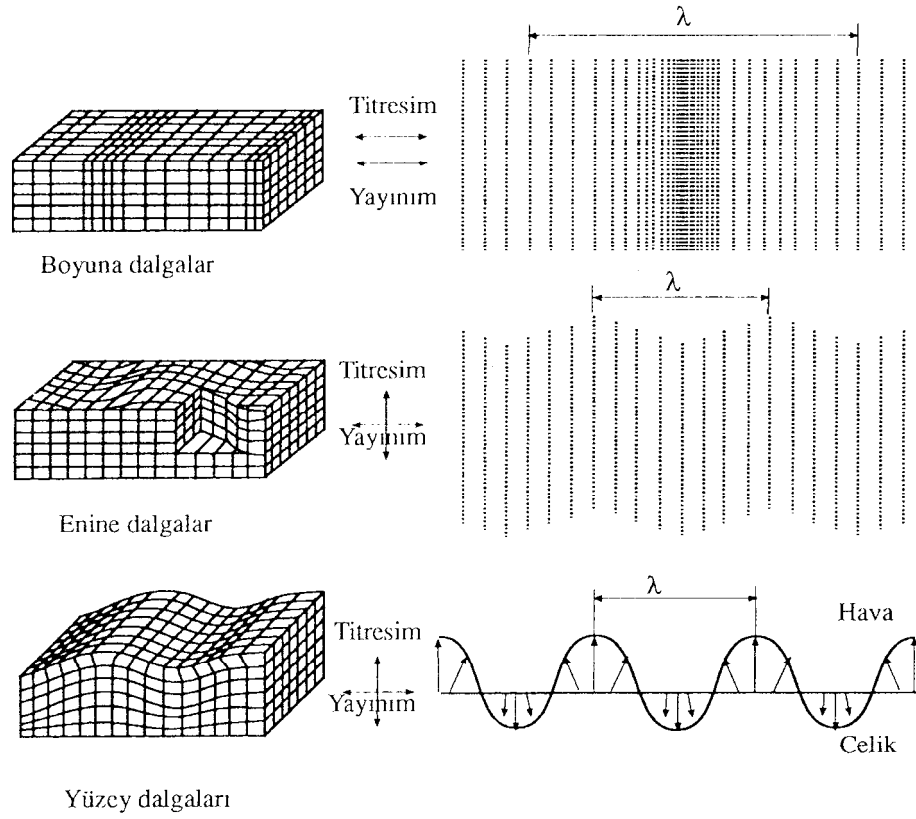
denge konumu etrafında salınmasıyla oluşur. Mekanik dalgalar esnek ortamın herhangi bir noktasına uygulandığında, dalga tarafından bu noktaya uygulanan kuvvet bu noktadan diğer noktalara da aktarılır. Ortamın tüm olarak hareket etmediği, yalnızca titreşimin yer değiştirdiği bu tür mekanik dalgalarla enerji, madde içerisinde bir noktadan diğerine iletebilir (Gürpınar, 2007).

Ultrasonik mekanizmasını anlamak için, ilk olarak ses dalgalarının nasıl oluştuğunu ve hareketini bilmek gerekir. Ses; titreşimin gaz, katı, sıvı gibi elastik bir ortam içerisinde hareketi olarak tanımlanır. Bir “darbe” olayı veya “titreşim” hareketi gibi, bir tek veya tekrarlanan hareket; ses geçirgen bir ortamda oluşturulduğunda bir ses dalgası oluşur (Fuchs, 2002).

Ultrasonik dalgalarının yayılabilmeleri için bir ortam gerektiğinden, ultrasonik dalganın ilerleme yönü ile parçacıkların hareketinin yönü ultrasonik dalganın çeşidini göstermektedir. Uygulamada en çok kullanılan ultrasonik dalgalar enine, boyuna ve yüzey dalgalarıdır. Şekil 4.3’te 3 tür dalga gösterilmektedir.

4.3.1 Boyuna dalga

Ultrasonik dalgalar ortam içinde ilerlerken parçacıkları kendi ilerleme doğrultusu boyunca hareket ettiriyorsa bu tip dalgalara boyuna ultrasonik dalgalar denir. Yani boyuna ultrasonik dalga için dalga yayılma doğrultusu ile parçacık hareket doğrultusu aynıdır. Bu tip dalgalara basınç dalgası da denir. Titreşen atomlar bir periyodun yarısında birbirlerine yaklaşarak sıkışırlar, periyodun diğer yarısında ise birbirlerinden uzaklaşarak kendi aralarında bir çekme kuvvetinin doğmasına neden olurlar. Böylece malzeme içinde, elastik sınırlar içerisinde kalan ve alternatif olarak değişen basınç ve çekme kuvvetleri doğar. İki sıkışma ve gevşeme arasındaki uzaklık λ dalga boyu kadardır. Boyuna dalganın yayılma hızı eşitlik (4.3)’e uyar. İnsan kulağının nitelediği ses bu türdür ve diğer dalga kuvvetlerine göre daha hızlı yayılır. Ortamda yayılan ultrasonik dalganın yayılma hızı sabit olursa frekansın değiştirilmesi ile dalga boyu değiştirilebilir. Boyuna dalgalarda parçacık titreşimleri dalga yayılma doğrultusu ile aynı olduğundan parçacıklar arası bağ ne kadar zayıf olursa olsun boyuna dalgalar sıvı, gaz ve katı ortamlarda yayılabilirler.



Şekil 4.3 : Ses ötesi dalga çeşitleri (Alp, 1998).

4.3.2 Enine dalga

Bu türde ise titreşim doğrultusu yayılım doğrultusuna diktir. Buna aynı zamanda “kayma dalgası” adı da verilir. Atom düzlemleri birbirini sıkıştırarak değil birbirlerine göre kayarak titreşim hareketini iletirler. Atomlar arasında bağ kuvveti olan atomlar, yani katılar içinde kayma gerilmesi doğabilir. Dolayısıyla enine dalgalar ancak katı ortamlarda yayılabilirler, sıvı ve gaz ortamlarda yayılamazlar. Enine dalgaların katı ortamda yayılma hızı boyuna dalgaların yaklaşık yarısıdır.

4.3.3 Yüzey dalgaları

Enine ve boyuna dalgaların bileşimi olan yüzey dalgalarında ortam parçacıklarının hareketi dalga yayılma doğrultusuna dik elipsler şeklindedir. Boyuna dalgaların yüzeye paralel ve yayılma doğrultusunda, enine dalgaların yüzeye ve yayılma doğrultusuna dik hareket ettirmek istediği parçacık yayılma doğrultusuna dik eliptik hareket yapar.

Enine ve boyuna ultrasonik dalgaların birleşimi olan bu dalgaların genlikleri bir dalga boyu mesafe sonra sıfır olur. Bu nedenle, bu tür dalgalarla cisimlerin yalnızca yüzeyleri incelenebilir. Bu dalgaların yayılma hızları ise enine ultrasonik dalgalarının hızından daha düşüktür.

4.4 Ultrasonik Enerjinin Temel Özellikleri

4.4.1 Yayılma hızı

Ultrasonik enerjinin bir ortamdaki yayılma hızı, dalga şekline göre değişir. Ayrıca yayılma hızı, ortamın elastik özelliklerine ve yoğunluğuna bağlıdır. Elastik modülü E, poisson oranı γ ve yoğunluk ρ cinsinden, bir katı ortamın sesötesi dalga hızlarını veren denklemler şöyledir (V_e : enine dalgaların yayılma hızı, V_b : boyuna dalgaların yayılma hızı, V_y : yüzey dalgalarının yayılma hızı) (Alp, 1998).

$$V_b = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1-\gamma}{(1+\gamma)(1-2\gamma)}} \quad (4.4)$$

$$V_e = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2(1+\gamma)}} \quad (4.5)$$

$$V_y = V_e \frac{0.87 + 1.12\gamma}{1-\gamma} \quad (4.6)$$

Çizelge 4.1’de bazı malzemelerde akustik hızlar verilmiştir.

4.4.2 Akustik empedans

Akustik empedans, ortamın ses yayılımına gösterdiği dirençtir. Kısaca ses direnci de diyebiliriz. Ortamın yoğunluğu ile bu ortamdaki ses hızı çarpımına, akustik empedans adı verilmiştir (Özden, 1981; Özer, 1986).

$$w = \rho \cdot V \quad (4.7)$$

w = Akustik empedans ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{sn}$)

V = Sesin ortamdaki yayılma hızı (m/sn)

ρ = Yoğunluk (kg/m^3)

Çizelge 4.1 : Çeşitli ortamlarda akustik hızlar (Carlin, 1960).

Malzeme	Akustik Hız $V(\text{cm/sn}) * 10^5$	Yoğunluk $\rho (\text{g/cm}^3)$	Akustik empedans $\rho.V * 10^6$
Hava	0,343	1,205	0,00000413
Etan	0,308	1,357	0,000041
Etilen	0,317	1,260	0,000040
Metan	0,430	0,717	0,0000308
Hidrojen	1,28	0,090	0,000011
Oksijen	0,316	1,42	0,0000452
Alkol	1,44	0,79	0,11
Su	1,43	1,00	0,143
Gliserin	1,90	1,26	2,42
Polisitrin	2,67	1,10	0,294
Motoryağı	1,25-1,74	0,88-1,02	1,1-1,7
Petrol	1,33	0,70	0,93
Ağaç	4,17	0,5-0,8	0,17-0,35
Naylon	1,8-2,2	1,00-1,20	1,8-2,7
Pleksiglas	2,73	1,18	3,20
Lastik	1,48	1,30-2,10	1,9-3,1
Bakalit	2,59	1,4	0,363
Cam	3,40-5,90	2,5-5,9	1,2-2,1
Porselen	5,6-6,2	13-14	2,40
Granit	3,90	2,75	1,09
Mermer	3,80	2,65	1,01
Bakır	4,60	8,93	4,11
Pirinç	4,25	8,55	3,61
Çelik	5,81	7,80	4,76
Kalay	3,32	7,29	1,99
Demir	5,85	7,87	4,07
Alüminyum	6,22	2,65	1,70
Gümüş	3,80	10,50	3,90
Altın	3,24	19,32	3,92
Kurşun	2,13	11,40	2,73
Tungsten	5,46	19,30	8,32

4.4.3 Ultrasonik enerji şiddeti

Ultrasonik mekanik bir enerjidir. Ultrasonik enerjinin şiddeti ile titreşen atomun veya molekülün genliği arasında şu bağıntı vardır (Alp, 1998).

$$I = 1/2 \cdot (w \cdot \omega^2 \cdot A^2) \quad (4.8)$$

I = Ultrasonik enerji şiddeti (W/m^2)

A = Titreşim genliği (m)

w = Ortamın akustik empedansı ($kg/m^2 \cdot sn$)

ω = Açısal frekans $2\pi f$ ($s^{-1} = Hz$)

4.4.4 Ultrasonik basınç

Sesin yarattığı titreşim yayıldığı ortamda bir basınç oluşturur. Buna ultrasonik basınç adı verilir. Ultrasonik basınç P (N/m^2) aşağıdaki eşitlikten hesaplanabilir.

$$P = w \cdot \omega \cdot A \quad (4.9)$$

Akustik enerji ile akustik basınç arasında şu bağıntı vardır (Mason, 1990):

$$I = 1/2 \cdot (P^2/w) \quad (4.10)$$

Ses basıncı duyularımızla algılayabildiğimiz ve bu nedenle günlük hayatta bildiğimiz bir kavramdır. Şiddetli bir gürültü kulak zarını zorlar, sıvı içine konan bir ses kaynağının çevresinde bir akış başlar, sıvı içinde asılı duran parçacıklar bu akıntı ile kaynağından uzaklaşır. Katı atomları veya molekülleri yer değiştirmediklerinden ses enerjisi bunlar içinde basınç ve çekme gerilmeleri doğurur.

2 MHz frekansta $10 w/cm^2$ şiddetindeki ultrasonik enerjinin çelik içinde yarattığı basınç; $P = w \cdot \omega \cdot A = 3 \cdot 10^6 N/m^2 = 30 kg/cm^2$ gibi büyük bir değer olarak bulunur.

4.5 Ultrasonik Enerjinin Üretilmesi ve Algılanması

Ses bir mekanik enerjidir ve ses üretimi, titreşim enerjisi üretmek demektir. Bir teli, bir zarı veya hava moleküllerini titreştirmek günlük hayattan bildiğimiz ses üretme yöntemleridir. Bütün ses üretim araçları bu yöntemlerden biriyle çalışır. Sesin algılanması da benzer ilkeye dayanır. Havadan gelen ses dalgaları, kulağın veya mikrofonun zarını titreştirir. Zarın titreşim enerjisi, örneğin mikrofonda, elektrik enerjisine dönüştürülerek algılanır.

Bu yöntemler ve araçlar ancak işitilebilir frekanslardaki sesin üretimine ve algılanmasına uygundur. Ultrasonik frekansları üretmek yine bir titreşim hareketi üretmek ve algılamak, titreşim enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmek demektir. Ancak bu kez, yararlanılan fiziksel olaylar ve araçlar çok farklıdır.

Ultrasonik titreşim üretmek için kullanılan sistemler; Kornalar, Sirenler, Mekanik, Hidrodinamik, Piezoelektrik, Manyetostriktif, Elektrostriktif titreştiriciler, Alev sesi (ark) olarak sıralanabilir (Stoiev ve diğ., 1992).

4.6 Ultrasonik Titreşimin Oluşturulması

Ultrasonik titreşim üretmek amacıyla kullanılan araçlar, yapı bakımından oldukça farklıdırlar. Bu amaçla kullanılan araçlara transdüser (titreştiriciler) adı verilmektedir. Bunlar, elektrik enerjisini titreşim enerjisine ve aynı zamanda da gelen titreşim enerjilerini elektrik enerjisine çevirebilmektedirler. Yani; aynı transdüser, hem verici hem de alıcı olarak kullanılabilir. Ultrasonik transdüserler; gaz sürücülü, sıvı sürücülü ve elektromekanik transdüserler olmak üzere üçe ayrılır. Aşağıda bunların başlıcalarından söz edilmiştir.

4.6.1 Piezoelektrik titreştiriciler

Piezoelektrik titreştiriciler, piezoelektrik etki gösteren materyallerden yapılırlar. Piezoelektrik etkinin kullanımıyla yapılan titreştiriciler, her iki enerji türünü de birbirine çevirebilir. Uygun frekans bölgesi 20 kHz'den 10 GHz'e kadar uzanır.

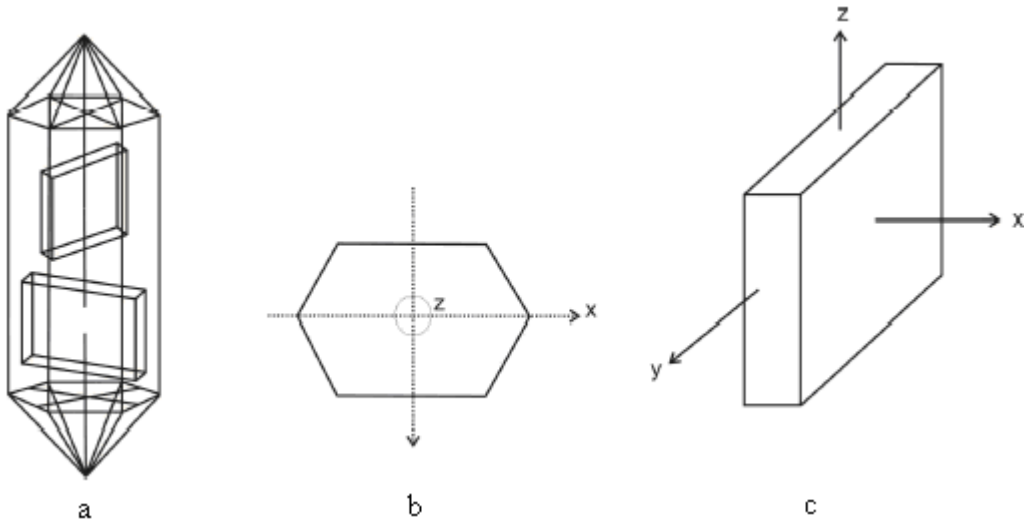
Piezoelektrik etki 1880 yılında Pierre ve Jacques Curie kardeşler tarafından bulunmuştur. Bir yıl sonra Lippman'ın zıt piezoelektrik olayla ilgili tezini ortaya atmasıyla çok sayıda fizikçi çalışmalarını bu konu üstünde yoğunlaştırmıştır. Lord Kelvin, Voight, Duhem gibi araştırmacıların çeşitli katkıları ile gittikçe önem kazanan konu; I. Dünya savaşı sırasında Fransız fizikçisi Langevin'in düşman denizaltı gemilerinin hareketlerini kontrol amacı ile kendi adını taşıyan sesötesi verici-alıcı sistemini gerçekleştirmesi sonucunda teknik alana uygulanmıştır (Jordan ve diğ., 2001).

Bazı anizotrop cisimler sıkıştırıldığında yüzeylerinde elektrik yükleri, çekildiğinde de yüzeylerinde zıt elektrik yükleri oluşuyorsa bu olay, piezoelektrik olay olarak adlandırılmaktadır. Başka bir deyişle piezoelektrik olay, temel olarak kristallerin

mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmesi işlemidir. Piezoelektrik maddeye bir potansiyel fark uygulandığında, madde mekaniksel şekil değişimine uğrar. Bu olaya ise ters piezoelektrik olay denir.

Kuvars, turmalin, lityum sülfat, kadmiyum sülfid, çinko oksit, rochelle tuzu ($\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), baryum titanat, kurşun zirkonat titanat gibi doğada bulunan tek kristal polar eksenine sahip maddelerde bu etki görülür. Amonyum dihidrojen fosfat (ADP), lityum fosfat (LP), etilen diamin tartarat (EDT), dipotasyum tartarat (DPT) gibi suni kristallerde daha az oranlarda olmakla beraber ultrasonik titreşim kaynağı yapımında kullanılır.

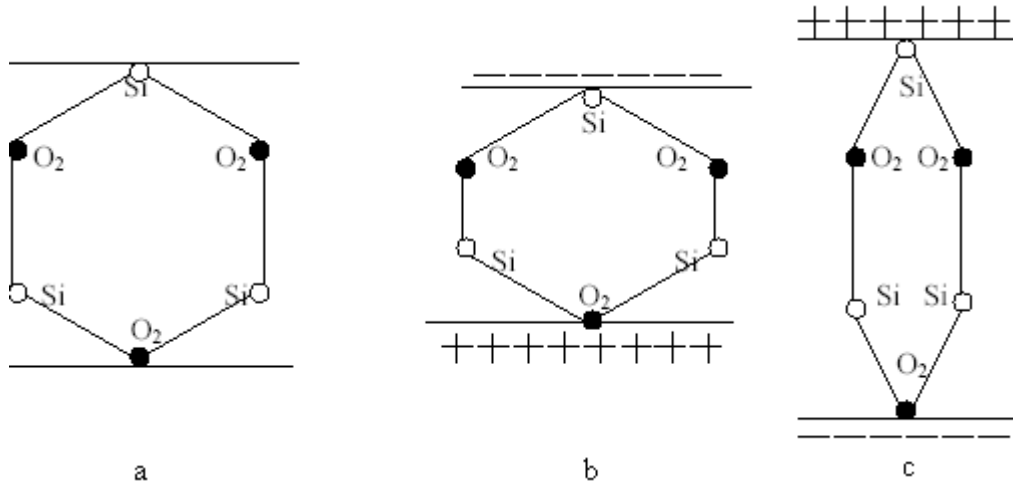
Doğal formdaki bir kuvars kristali, Şekil 4.4a'da görülmektedir. Kristal, z eksenine etrafında 120° 'lik bir dönme simetrisine sahiptir. Bu nedenle, z eksenine boyunca kristal optik açıdan izotrop'tur ve optik eksen adını almaktadır. Z eksenine dik bir düzlem kesite Curie kesiti adı verilmektedir. Curie kesiti altı kenarlıdır (Şekil 4.4b). Bu kesitin köşelerini birleştiren x eksenine elektrik eksenine, kesitin kenarlarının ortasını birleştiren y eksenine de üçüncü eksen olarak adlandırılmaktadır. X eksenine dik olarak kesilen kuvars kristal levhasına, x kesimli kuvars levha adı verilmektedir (Şekil 4.4c). Bu şekilde kesilmiş kuvars levhaya basınç uygulandığında, x eksenine dik yüzeylerde zıt yükler oluşur. Bu levhaya germe kuvveti uygulandığında da geçen yükler yer değiştirmiş olarak oluşurlar. Meydana gelen bu olay piezoelektrik olay olarak tanımlanmaktadır (Gürpınar, 2007).



Şekil 4.4 : a) Bir kuvars kristali, b) Curie kesiti, c) Kuvars kristalden kesilmiş bir x kesimli levha (Baugh, 1977).

Şekil 4.5'teki piezoelektrik olay, SiO_2 kristali yardımıyla açıklanmıştır. Kuvars kristali denge durumunda iken Si atomları 4 adet (+), O_2 atomları da 4 adet (-) yük taşımaktadırlar. Bu nedenle; simetriden dolayı, yükler birbirlerini dengelemektedirler (Şekil 4.5a). Kristal sıkıştırıldığında bu merkezler birbirlerine göre yer değiştirirler ve böylelikle kristal içinde elektriksel dipol dolayısıyla yüzey yükleri oluşur (Şekil 4.5b). Oluşan yüzey yükleri, polarizasyon voltajının yönü ile ilgilidir. Piezoelektrik maddeye polarizasyon voltajının tersine bir voltaj uygulanırsa piezoelektrik malzeme kısılacak; polarizasyon yönünde bir voltaj uygulanırsa bu kez malzeme uzayacaktır (Şekil 4.5c). Piezoelektrik maddeye alternatif akım uygulanırsa maddenin şekil değiştirmesi periyodik olacaktır. Bu uzayıp kısıalma şeklindeki değişimler, uygulanan alternatif akımın frekansında olacaktır (Alp, 1998).

Kristale bir basınç ve germe kuvveti uygulamak yerine elektrik alanı uygulandığı takdirde uygulanan elektrik alanı yük dengesini bozacağından kristalin boyutları x ve y yönünde değişecektir. Elektrik alanın yönü değiştirildiğinde ise, boyut değiştirme de yön değiştirecektir. Bu olay zıt piezoelektrik olay adını alır. Elektrik alan yerine bir elektriksel titreşim uygulanırsa kristalde aynı frekanslı titreşim hareketi oluşacaktır. Zıt piezoelektrik ile 1000 MHz'e kadar yüksek frekanslı ultrasonik dalgaları oluşturmak mümkündür.



Şekil 4.5: Yük altındaki kuvarsta elektrik yük merkezlerinin oluşumu (Dora, 1975).

Boyuna ultrasonik dalgaları x kesimli, enine ultrasonik dalgaları ise y kesimli kuvars levhalardan elde edilir. Piezoelektrik özellik gösteren kristallerin iki yüzü titreşim yapabilmeleri için iletken bir metalle, gümüşle ya da altınla kaplanır. Piezoelektrik özellik gösteren seramiklerden transdüser yapımında yararlanılmıştır. Bunlar rahatlıkla istenilen şekillere getirilmekte ve fırınlarda sertleştirilmektedirler. Seramik

kristaller polikristal yapıda olup yüzleri altın veya gümüşle kaplanmaktadır. Seramik transdüserlere istenilen şekil verebildiği için, ultrasonik dalgaları tek noktada toplayan konkav transdüserlerin yapımına olanak sağlamıştır.

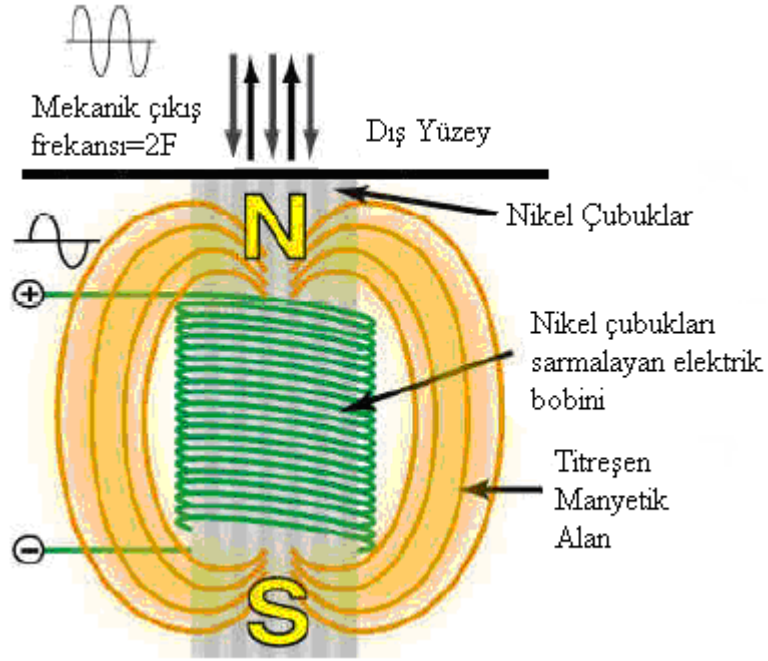
4.6.2 Manyetostriksiyon titreştiriciler

Bu yöntemle 20-40 kHz frekanslara ve hatta verim düşük olmakla birlikte 100 kHz'e kadar ultrasonik titreşimler elde etmek mümkündür. Manyetostriktif problemler ucuz ve dış etkenlere dayanıklıdır. Bu nedenle betonun ve kayaların muayenesinde, denizaltı sonar sisteminde ve düşük ultrasonik frekansları gerektiren uygulamalar için manyetostriktif problemler tercih edilir.

Çok sayıda metal ve alaşım bir manyetik alan içine getirildiğinde boyutlarında değişme görülür. Nikel, demir, krom, kobalt ve Permall (45 Ni, 55 Fe) gibi metal ve metal alaşımlarında daha belirli olarak görülen bu olaya manyetostriksiyon denir. Piezoelektrik olay gibi manyetostriksiyon da tersinirlik özelliği gösterir. Yani sözü edilen maddelere uygulanacak bir sıkıştırma ve genişletme sonucu maddenin manyetik özelliklerinde değişimler olur ve buna bağlı bir manyetik alan ortaya çıkar. Aynı maddeler bir manyetik alana girdiğinde boyutlarında değişimler gözlenir.

Etrafına bobin sarılmış manyetik bir çubuğun basınç ve gerilme ile boyu değiştirilirse bobin üzerinde bir voltaj oluşacaktır. Çubuk belli bir AC frekansında titreştirilirse aynı frekansta bir akım bobin üzerinde oluşur. Voltajın büyüklüğü titreşim genliği ile orantılı olur. Bu özellik tersinirdir. Yani bobin üzerine belli bir frekans ve voltajla gerilim uygulanırsa bu frekans ve voltaja uygun olarak çubuk titreşmeye başlar. Böylece çubuk ses dalgaları üretmeye başlar. Her iki durumda çubuk ortadan desteklenir. Böylece ikinci bir titreşim noktasına sahip olur. Çubuk uygulanan voltajın frekansının iki katı frekansta titreşir (Gürpınar, 2007).

Manyetostriksiyon titreştiriciler, manyetostriksiyon özellik gösteren bir metalin sarmal makara içerisine konulmasıyla yapılırlar. Sarmal makaraya alternatif bir gerilim uygulandığında metal çubuğun boyunda alternatif bir değişim oluşur. Çubukta oluşturulan boyuna titreşimin frekansı, uygulanan alternatif frekansın iki katı kadardır. Şekil 4.6'da manyetostriksiyon prensibine göre çalışan bir ultrasonik vericisi görülmektedir.



Şekil 4.6 : Manyetostriksiyon prensibine dayalı olarak çalışan ultrasonik verici (Alp, 1998).

4.6.3 Elektriksiyon titreştiriciler

Bazı cisimler elektrik alan içerisine sokulduklarında boylarında uzama ya da kısılma oluşur. Böyle elektrik alan içerisinde boylarını değiştiren maddelere ferroelektrik maddeler adı verilir. Boyda meydana gelen uzama ve kısılma miktarı, yaklaşık olarak elektrik alan şiddetinin karesiyle orantılıdır.

Ferroelektrik madde, elektrik alan içerisine sokulduğunda boyunda bir uzama oluşuyorsa elektrik alan şiddetinin yönü değiştirildiğinde de boyunda uzama oluşmaktadır. Bu nedenle, bu tür maddelerin polarlanması yoluyla elde edilen titreşimin sinüsoidal olması sağlanır. Bu şekliyle artık bir piezoelektrik madde gibi kullanılabilir. Baryum titanat, kurşun zirkonat gibi maddeler, çok kullanılan elektriksiyon transdüser malzemelerine örnek verilebilir. Bu transdüserlerin güçleri büyüktür ve yüzeyleri konveks ya da konkav yapılabilmektedir. Bu nedenle, ultrasonic enerjiyi bir noktada toplamak ve bir matkap gibi metalleri delmek mümkündür (Alp, 1998).

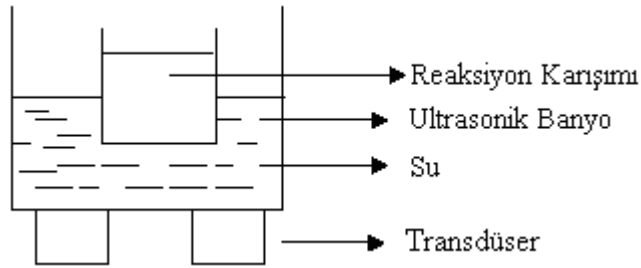
4.7 Ultrasonik Laboratuvar Cihazları

Laboratuvar ölçeğinde, bir reaksiyon sistemine ultrasonik dalganın verilmesi için iki temel yöntem vardır. Bunlardan birincisinde reaksiyon kabı, altında ultrasonik

üreticinin olduğu bir sıvı içerisinde daldırılır (genellikle bu sıvı sudur), ikinci yöntemde ise prob, doğrudan reaksiyon sıvısı içerisinde verilir. Aşağıda en çok karşılaşılan ultrasonik laboratuvar ekipmanları verilmiştir.

4.7.1 Ultrasonik temizleme banyoları

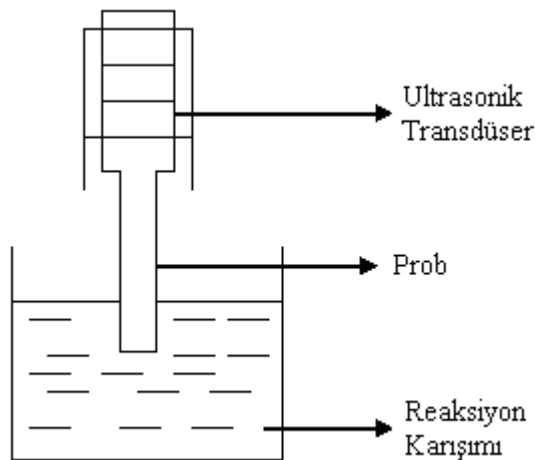
Bu, en fazla kullanılan yöntemdir. Çünkü ultrasonik temizleme banyoları piyasada hazır halde bulunmaktadır. Birçok şirket tarafından 0,5 litre ve 100 litre arasındaki boyutlarda temizleme banyoları üretilmiştir. Bir temizleme banyosundaki ultrasonik titreşim, temizleme banyosunun dış duvarlarına monte edilen transdüserler tarafından üretilir. (Şekil 4.7). Bu sistemin en büyük engeli, ultrasonik titreşimin cam-su ara yüzeyinde ve reaksiyon kabının içinde azalmasıdır. Ucuz olmaları ve güvenilir olması tercih edilmelerini sağlamaktadır (Mason, 1990).



Şekil 4.7 : Ultrasonik temizleme banyosu.

4.7.2 Doğrudan daldırılmalı ultrasonik problemler

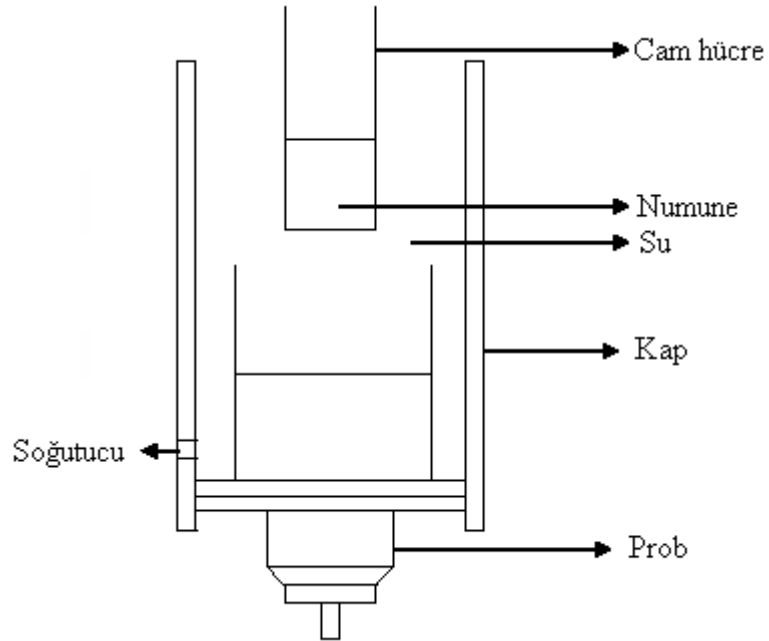
Sonik problemler reaksiyon karışımının içine direkt olarak daldırılmaktadır (Şekil 4.8). Bu problemler, temizleme banyolarından daha pahalıdır. Fakat ultrasonik şiddet temizleme banyolarınınkinden daha fazladır.



Şekil 4.8 : Doğrudan daldırılmalı sonik prob.

4.7.3 Yüksek şiddetli su banyoları

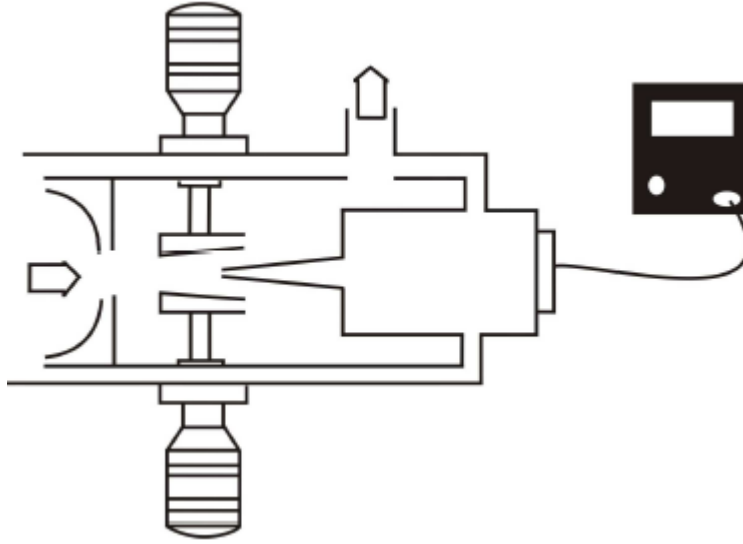
Plastik ile kaplanmış küçük bir kap, çapı 5 cm'den daha büyük bir uç üzerine vidalanmış ve reaksiyon kabı su dolu kap içerisine yerleştirilmiştir (Şekil 4.9). Ultrasonik dalgalar, prob'tan su aracılığı ile reaksiyon karışımına iletilir. Karışım içerisindeki ultrasonik dalgalarının şiddeti, su içerisindeki şiddetten daha düşüktür ve direk olarak daldırma problemleri kullanılarak elde edilen şiddetten çok daha azdır. İlave plastik kap, probun reaksiyon karışımına girmesini önler. Bu nedenle, karışımın kirlenmesi azalır.



Şekil 4.9 : Yüksek şiddetli su banyosu.

4.7.4 Korna reaktörler

Korna reaktörler, düdüğ içerisinde reaksiyon sıvısını sıkıştıran bir pompa içerirler. Bu aletler gaz veya sıvı kullanabilirler. Bir açıklık boyunca akan gaz veya sıvı ile üretilen ultrasonik enerji, onun tarafından üretilen ve ortam boyunca hareket eden girdaplar tarafından oluşturulur. Bu girdaplar periyodiktir ve frekansları üretilen ses dalgalarının da frekansıdır. Korna reaktörler özellikle sıvı-sıvı reaksiyonları için uygundur. Katı malzemenin düdüğten geçmesi güç olduğundan, katı-sıvı reaksiyonları için daha az uygun olur. Şekil 4.10'da korna reaktör görülmektedir.



Şekil 4.10 : Korna reaktör (Davidson ve diğ., 1987).

4.8 Ultrasonik Dalgaların Ara Yüzeylerdeki Davranışları

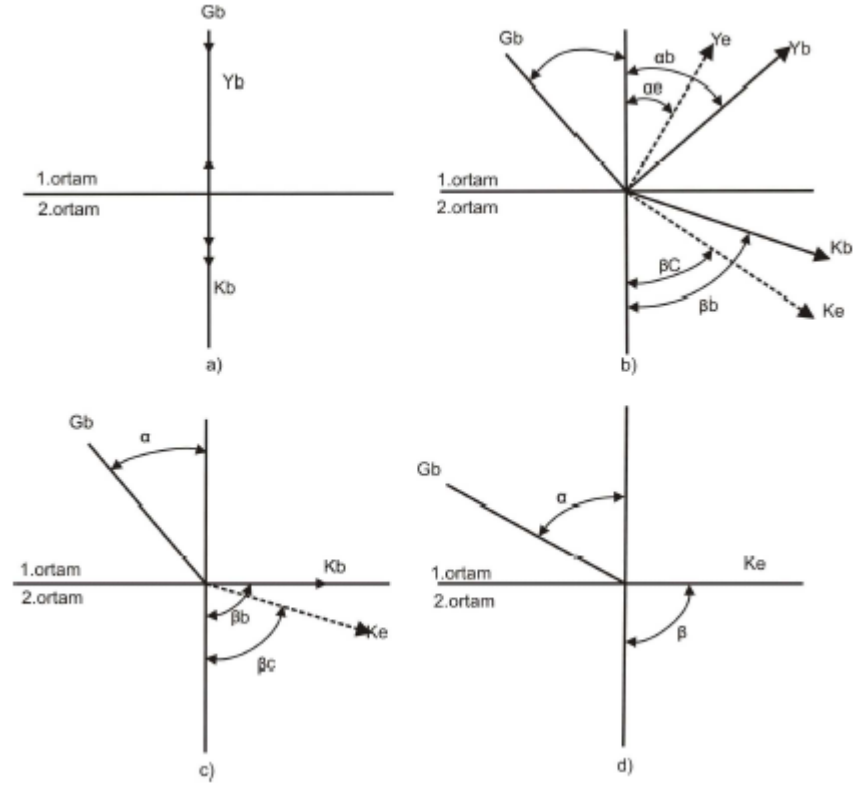
4.8.1 Kırılma ve yansıma geometrisi

Ultrasonik dalgalar ortamları birleştiren ara yüzeylerde kırılırlar, yansılırlar ve yön değiştirirler. Kırılma açısı ortamın akustik direncine bağlıdır. Şekil 4.11’de ultrasonik enerjinin bir ara yüzeye çeşitli açılarla düşmesi halinde kırılma ve yansıma geometrileri verilmiştir. Yüze dik olarak gelen ultrasonik enerji, aynı doğrultu içinde kalmak şartıyla kısmen yansıyarak geri döner. Kalan enerji yoluna devam ederek diğer ortama geçer (Şekil 4.11a).

Ultrasonik enerji ara yüzeye eğik olarak gelmişse bir dallanma olur (Şekil 4.11b). Gelen bir enerji ışını 4 ışına bölünür. Bunlardan ikisi yansıyan ikisi de kırılan ışınlardır. Bu durum iki farklı olayın ortak sonucudur. Birincisi beklenen yansıma ve kırılma olayıdır. İkincisi dalga dönüşümüdür. Gelen boyuna dalga enerjisi kısmen enine dalgaya dönüşür.

Böylece yansımış boyuna ve enine dalgalarla, kırılmış boyuna ve enine dalgaların oluşturduğu 4 farklı ses dalgası oluşur. Yansıma ve kırılma açılan Snell Kanunu ile hesaplanır. Snell kanununa göre; α geliş açısının sinüsü ile yansıma veya kırılma açısının sinüsü oranı her iki ortamın akustik hızları oranına eşittir (Alp, 1998).

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{V_1}{V_2} \quad (4.11)$$



Şekil 4.11 : Ultrasonik ışının ara yüzeylerde kırılması ve yansımaları (Alp, 1998).

Boyuna ve enine dalgalar için akustik hızlar farklı olduğundan, her iki dalganın yansıma ve kırılma açıları da farklı olacaktır. Gelen tek bir ışının, ara yüzeyde dört farklı yöne dallanmasının nedeni budur.

4.8.2 Kırılma ve yansımada enerji bölüşümü

Ara yüzeye dik düşen ultrasonik enerjinin yansıyıp geri dönen ve yoluna devam ederek ikinci ortama geçen enerji oranları;

$$\text{Yansıyan Enerji Oranı} \quad Y = \left(\frac{w_2 - w_1}{w_2 + w_1} \right)^2 \quad (4.12)$$

$$\text{Geçen (kırılan) Enerji Oranı} \quad G = \frac{4w_2 \cdot w_1}{(w_2 + w_1)^2} \quad (4.13)$$

bağıntıları ile hesaplanabilir. Burada w_1 ve w_2 ortamların akustik empedanslarıdır.

Görüleceği gibi, yansıyan ve geçen enerji oranları, ara yüzeylerin yoğunluğundan ve elastik özelliklerinden şiddetle etkilenirler (Alp, 1998).

Çelik-su ara yüzeyine dik gelen ultrasonik enerji;

Çelik için; $w_1 = 46,5 \cdot 10^6 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{sn}$, su için; $w_2 = 1,5 \cdot 10^6 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{sn}$ olarak alındığında,

$$Y = ((1,5 - 46,5) / (1,5 + 46,5))^2 = \%87,9$$

$$G = 4 \cdot 1,5 \cdot 46,5 / (1,5 + 46,5)^2 = \%12,1 \text{ bulunur.}$$

Çelik-hava ara yüzeyine dik gelen ultrasonik enerjinin yansıyan ve geçen akustik enerji oranları ise;

Hava için $w_2 = 0,0004 \cdot 10^6 \text{ kg/sn} \cdot \text{m}^2$ olarak alınırsa,

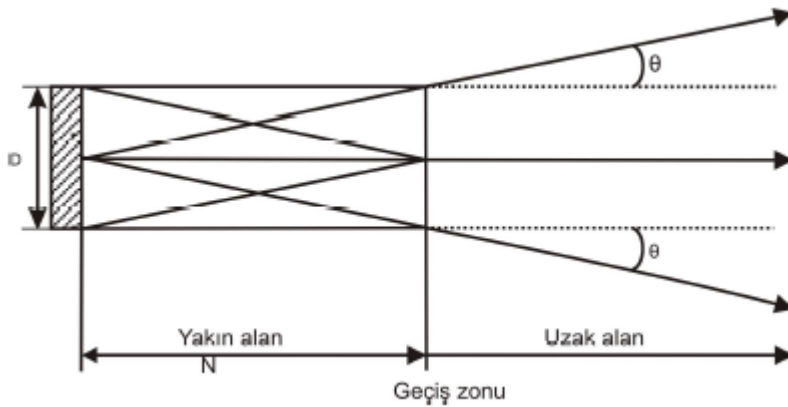
$Y = \%100$ yansıyan, $G = \%0$ geçen olur.

Çelik-hava ara yüzeyinden geçiş pratik olarak sıfırdır (Alp, 1998).

4.9 Ultrasonik Demet

4.9.1 Demetin geometrisi

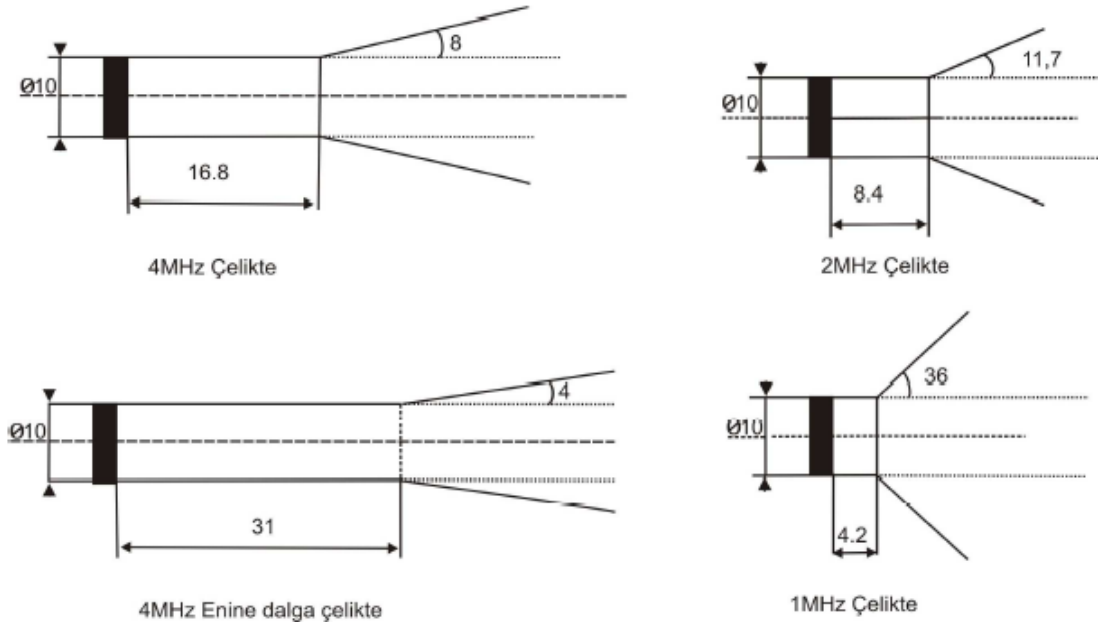
Ultrasonik kaynağının ürettiği enerji, yönlendirilmiş bir demet şeklinde yayılır. Demetin çapı, kaynağın yani piezoelektrik transdüserin çapı kadardır. Boyu ise koşullara bağlı olarak değişir (Şekil 4.12).



Şekil 4.12 : Ultrasonik demetin geometrisi (Alp, 1988).

Dairesel kesitli transdüserle sahip prob'dan çıkan demet bir süre silindirik şeklinde uzadıktan sonra, konik şekilde yayılır. Ultrasonik demetin iki farklı bölgesi vardır. Silindirik olana “yakın alan” ve konik olana da “uzak alan” isimleri verilir. Silindirik şeklindeki yakın alanın çapı, ses kaynağının çapına eşittir. Boyu ise bir taraftan kaynağın frekansına diğer taraftan ortamın ses hızına bağlıdır. Uzak alan konisinin tepe açısı da yine aynı değişkenlere bağlıdır (Gürpınar, 2007).

Şekil 4.13'te çeşitli frekans ve ortamlarda oluşan demetlerin bazılarına örnekler verilmiştir. Ses hızının azaldığı ortamlarda demet, boyca uzamakta ve konisel açılım daralmaktadır. Yani ses hızının azaldığı ortamlarda demet daha fazla yönsellik kazanmakta, buna karşın ses hızının yüksek olduğu ortamlarda ise demet genişleyerek açılma eğiliminde olmaktadır. Ses demetinin yönetilebilirliği, transducer çapı ile dalga boyu arasındaki ilişkiye bağlıdır. Bu nedenle, yönlendirme özelliği olan bir çapta ve pratik kullanım için yeterli küçüklükte transdüsör yapımı gerekir.



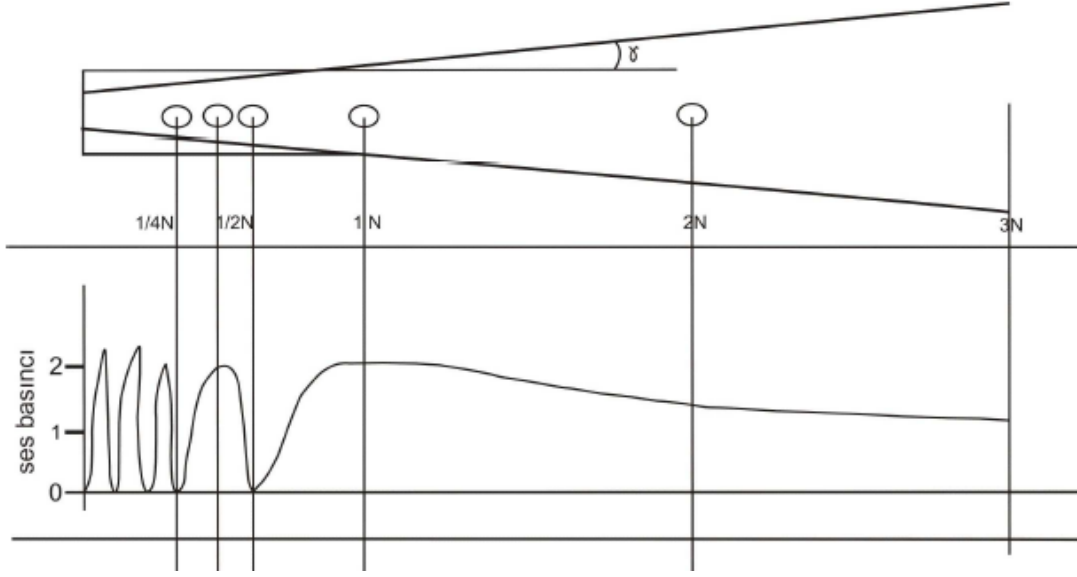
Şekil 4.13 : Çeşitli frekanslarda ve ortamlarda demet oluşumu (Gürpınar, 2007).

4.9.2 Demet içinde enerji dağılımı

Demet karışık bir enerji dağılımına sahiptir. Karışıklığın nedeni ise girişim olayıdır. Kaynağın yakınında, yani demetin başlangıcında, girişim olayı fazladır. Kaynaktan uzaklaştıkça girişim azalır.

4.9.2.1 Eksenel enerji dağılımı

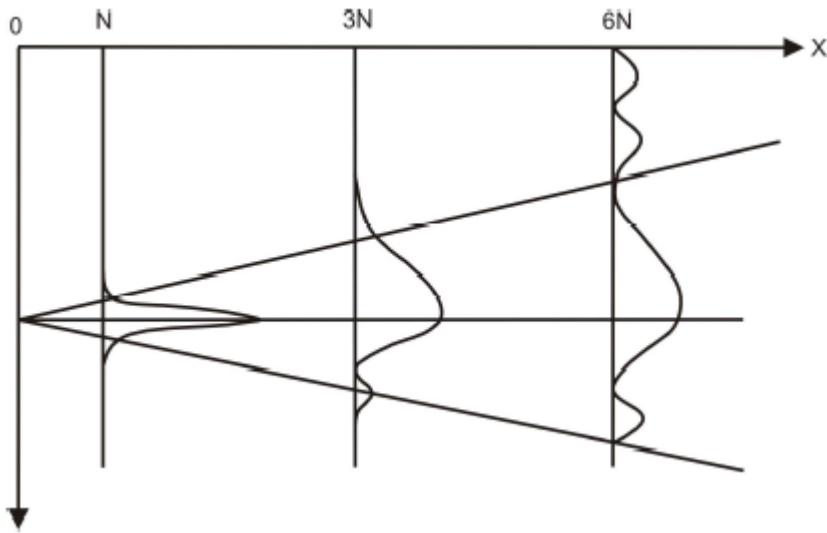
Şekil 4.14'te demet ekseninde ses basıncının uzaklıkla değişimi gösterilmektedir. Eksen boyunca ses basıncı, bir maksimum değerle sıfır arasında salınır. Maksimumlar ve minimumlar başlarda sıktır fakat giderek araları açılır. Son minimum $N/2$ 'de, yani yakın alanın ortasında ve son maksimum N 'de, yani yakın alanın sonundadır. N 'den sonra ses basıncı, uzak alan içinde sürekli azalarak gitmektedir (Alp, 1998).



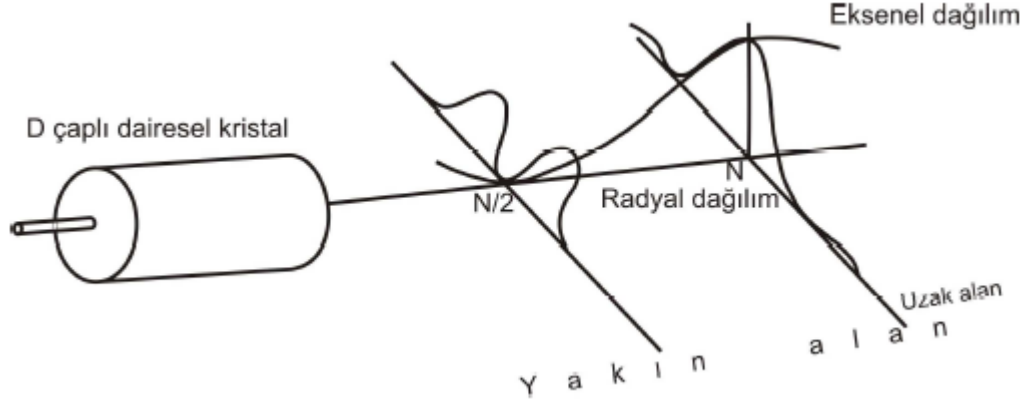
Şekil 4.14 : Demet ekseninde ses basıncının uzaklıkla değişimi (Gürpınar, 2007).

4.9.2.2 Radyal enerji dağılımı

Demetin genişliğini tayin eden radyal enerji dağılımıdır. Aslında bir enerji alanından başka bir şey olmayan demetin sınırı kuramsal olarak ses basıncının sıfıra indiği yerdir. Pratik olarak eksendeki ses basıncının onda bir değerine düştüğü yer sınır olarak kabul edilir. Şekil 4.15'te uzak alan içinde demetin radyal profilinin uzaklık ile giderek yatıklaştığı ve genişlediği görülmektedir. Kaynağın yaydığı ultrasonik enerji, giderek daha büyük kesitlere yayılmakta ve dolayısıyla şiddeti azalmaktadır. Şekil 4.16'da ise, her iki dağılım bir arada ve perspektif olarak görülmektedir.



Şekil 4.15 : Demet uzak alanı içinde ses basıncının radyal dağılımındaki değişimi (Gürpınar, 2007).



Şekil 4.16 : Dairesel kaynak demetinin ses basıncının eksenel ve radyal dağılımları (Gürpınar, 2007).

4.9.3 Ultrasonik enerjinin zayıflaması

Ultrasonik enerji, ortamlarda yayılırken ve ara yüzlerden geçerken büyük ölçüde zayıflar. Zayıflamanın başlıca nedenleri şunlardır:

- Demetin genişlemesi,
- Yol kayıpları (soğrulma ve saçılma),
- Ara yüzey kayıpları.

4.9.3.1 Demetin genişlemesi

Demet, yakın alanın bitiminden sonra uzak alan içinde genişleyerek gitmektedir. Demetin genişlemesi nedeniyle birim kesitten geçen ultrasonik enerji, prob'tan uzaklaştıkça azalır.

4.9.3.2 Yol kayıpları

Ultrasonik enerji bir ortamda yayılırken ortamın özelliklerine bağlı olarak da zayıflar. Bu zayıflamanın iki temel nedeni; ortamın ultrasonik enerjinin soğurması ve saçmasıdır.

Soğrulma: Ultrasonik enerjinin ısıya dönüşerek kaybolmasıdır. Ultrasonik enerjinin ortamın atomlarını titreştirerek yaydığı bilinmektedir. Titreşim enerjisinin bir bölümü komşu atoma aktarılırken, diğer bölümü de atomun hareketini frenleyen kuvvetleri yenmek için harcanır. Frenleme enerjisi ısıya dönüşür. Buna sönmölenen titreşimin neden olduğu kayıp veya kısaca sönmö kaybı adı da verilir. Bu tür enerji kaybı frekans yükseldikçe artar (Alp, 1998).

Saçılma: Mikroskobik ara yüzelerde yansıma ve kırılma olaylarının ortaya koyduğu bir sonuçtur. Saçılmaya neden olan sebepler şu şekilde sıralanabilir;

- Metalürjik yapıda tane büyüklüğü,
- Alaşımı oluşturan ince dağılmış fazlar,
- Mikroskobik hatalar (örneğin gözenekler),
- Çok küçük zerrelere halinde bünyeye dağılmış yabancı kalıntılar,
- Ayrışmış fazlar.

4.9.3.3 Ara yüzey kayıpları

Ara yüzey kayıplarının artışının nedeni olarak;

- Yüzey pürüzlülüğü
- Yüzey derinliğinin yetersizliği,
- Yüzeyde tam kaynaşmamış oksit veya boya tabakası varlığı,
- Yüzey eğriliği,
- Akustik bağ formülünün cinsi ve homojenliği sıralanabilir.

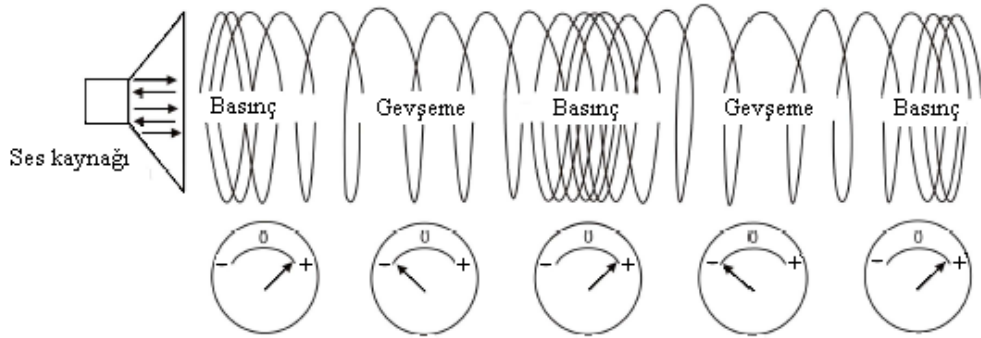
Ancak, bunların neden olduğu kayıpları kuramsal olarak hesaplamak olanaksızdır. Pratikte bu nedenler ortadan kaldırılmaya çalışılmaktadır.

4.10 Kaviteasyon (Oyuklanma) Etkisi

Kaviteasyon, latince cavus kelimesinden türemiştir ve bir sıvıda buhar kabarcıklarının oluşması anlamına gelmektedir (Leucker, 1998). Güçlü ultrasonik dalgalar bir sıvı ortamda oyuklanma olarak bilinen bir etki meydana getirirler. İlk olarak geçen yüzyılın sonlarında Sir John Thomycroft ve Sidney Barby tarafından karakterize edilen bu olay gemi pervanelerindeki aşınmanın nedenleri araştırılırken gözlenmiştir. Yanlış olarak yerleştirilen pervanelerin su içinde hızlı hareketi tarafların arka yüzeyinde büyük bir basınç düşmesi oluşturarak küçük köpükler üretir. Düzgün olarak yerleştirilen pervaneler bile oyuklanma etkisi nedeniyle erozyona maruz kalır. Oyuklanma o kadar güçlü olur ki pervanenin yapımında kullanılan en iyi pirinç alaşımlar bile normal kullanımda erozyondan etkilenir. Bu aynı oyuklanma köpükleri suyun güçlü ultrasonik enerji ile muamelesi sayesinde üretilebilir. Bu kabarcıkların

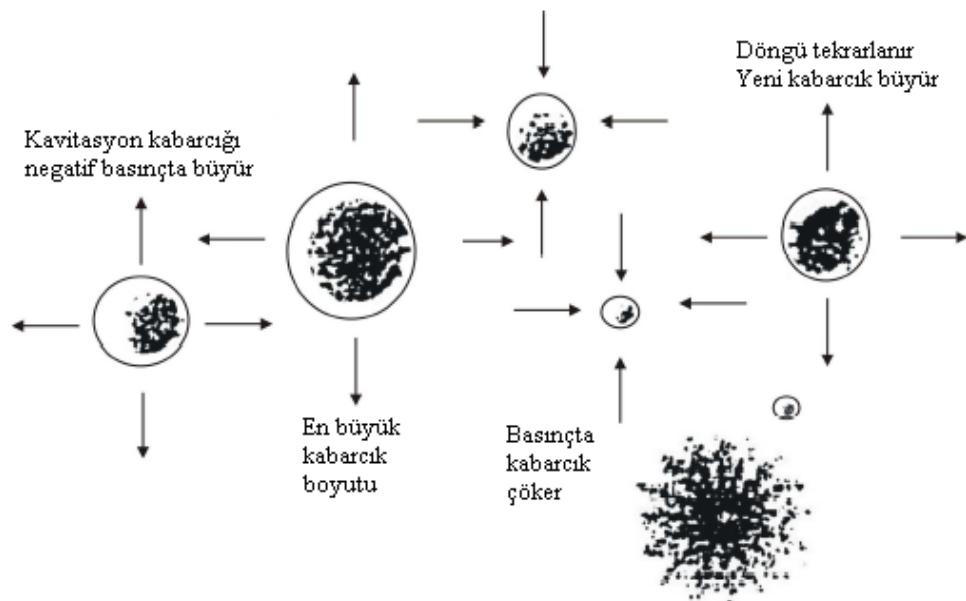
dağılması sonucu oluşan enerji kimyasal işlemlerde, büyük çapta kimyasal hızlanma ve değişimlere sebep olabilir.

Ses titreşimleri, herhangi bir sıvı içerisinde basınç ve gevşeme evrelerinden oluşan bir dalga olarak ilerlemektedir (Şekil 4.17). Ultrasonik dalga kaynağını sıvı içerisine batmış çok küçük fakat oldukça hızlı vuruşları olan bir piston olarak düşünebiliriz. Buradan basınç dalgalarının, sıvı içerisine molekülsel etkileşimler sayesinde iletilen ileriye doğru vuruş şeklinde olduğu anlaşılır.



Şekil 4.17 : Ses dalgalarının oluştuğu sıkışma ve gevşeme evreleri (Alp, 1998).

Dalganın gevşeme kısmını üreten pistonun çekme hareketidir. Piston saniyede 20.000 vuruşluk bir hızla çalıştığı zaman ortamda ultrasonik titreşim oluşturulur. Eğer gevşeme evresi yeterince güçlüyse sıvıyı bağlayan moleküller arası kuvvetleri yenecek büyüklükte negatif bir basınç oluşur. Bu durumda moleküller ortam boyunca küçük mikro kabarcıklar oluşturmak üzere birbirlerinden ayrılırlar ve gevşeme evresini izleyen basınç evresinde mikro kabarcıklar çökerler (Şekil 4.18).



Şekil 4.18 : Bir kabarcığın en büyük boyuta büyüyerek çökmesi (Alp, 1998).

Ultrasonik kavitasyonu için gevşeme dönemini izleyen bir sıkıştırma döngüsü mevcuttur. Bu mikro kabarcıkların büyük miktarda enerji açığa çıkararak ani olarak dağılmasına yol açar. 25°C sıcaklıktaki bir suda güçlü ultrasonik enerji tarafından yaratılan kavitasyon kabarcıklarının çökmesi yoluyla 5000°K bir sıcaklık ve 1000 Atm'ye varan basınçların yaratıldığı tahmin edilmektedir (Fuchs, 2002; Suslick, 1998).

Bir sıvı içindeki mikro kabarcıkların nasıl oluştuğunu, onların bir ses ortamının etkisi altında nasıl maksimum boyuta büyüdüğü ve sonra nasıl aniden çöktüğünü açıklamak amacıyla çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Araştırmalara göre oyuklanma kabarcıkları; ani olarak çöken geçici oyuklar ve titreşerek duraylı olarak kalan kalıcı oyuklar olarak ikiye ayırmak mümkündür.

Blake (1988) tarafından yapılan araştırmada 60 kHz ses ortamında oluşan kavitasyon kabarcıkları 3 farklı türe ayrılmıştır. İlki çok düşük basınçlarda büyük kabarcıkların köpürmesi ile oluşan kabarcıklaşmadır. Bu kabarcıklar ses üretmemişlerdir. Daha yüksek basınçlarda oluşan uzun süre dayanıklı olarak kalabilen kabarcıklar ise ikinci türü oluşturmaktadır. Bu kabarcıklar kızarma sesi veya yumuşak bir ısıyla birlikte gelişir. Ses ortamının merkezinde küçük kabarcıkların bir akışı olarak gözlenmiştir. Kabarcıkların oluşum hızı ses basınç genliğindeki değişimlere hassas olduğundan bu tipin başlangıç eşiği kolaylıkla bulunabilmektedir.

Bu tip kavitasyon, fazla miktarda çözünmüş gaz içeren sıvılarda olduğundan gazlı kavitasyon adını da alır. Üçüncü tip ise gazsızlaştırılmış sıvı içinde açıkça duyulabilen vurma sesi üreterek büyüme ve çökme evrelerinin doruğuna ulaşan, çok kısa ömürlü oyuklanma kabarcıklarının oluşumudur. Bu tip kavitasyona ise buharlı kavitasyon adı verilmektedir. Eşik değerindeki genliğinin %15 değişimi ya hiç kavitasyonun olmamasına ya da 5 katı daha fazla kavitasyon oluşmasına neden olmuştur (Alp, 1998).

4.10.1 Kavitasyonu etkileyen faktörler

4.10.1.1 Çözücünün fiziksel özellikleri

Sıvının termodinamik durumu çevre denge basıncı ve onun sıcaklığı tarafından tayin edilmektedir. Diğer bir sıvı özelliği de onun sıkıştırılabilirliğidir. Normalde basıncın bir fonksiyonu olarak ses hızı veya basıncı tarafından belirlenir.

Örneğin, sıkıştırılabilirlik bir geçici oyuğun çökmesinin maksimum hızını onda bir veya daha fazla seviyede azaltabilir.

Diğer taraftan sıvının viskozitesi kavitasyon dinamiğinde küçük bir rol oynar. Sıvının viskozitesinin minimuma getirilmesiyle kavitasyon etkileri maksimum yapılabilir. Viskoz sıvılar kavitasyon kabarcıklarının oluşumu ve ani patlaması için gerekli hızlarda karşılık veremezler. Birçok sıvıda sıcaklıkla viskozite düşmektedir. Sıvının termal iletkenliği de aynı şekildedir (Alp, 1998).

4.10.1.2 Reaksiyon sıcaklığı

Sıcaklık kavitasyon şiddetini arttırmak için dikkat edilecek en önemli parametredir. Bu, kavitasyonu etkileyen birçok özelliğin sıcaklıkla ilgili olarak değişebilmesinden kaynaklanır. Sıcaklığın değişmesi viskozite, gaz çözünürlüğü, gaz difüzyon hızı ve buhar basıncı gibi özellikleri değiştirir. Sıcaklığın yükselmesi viskoziteyi arttırırken çözülmüş gaz miktarını da azaltır. Aynı zamanda gaz difüzyon hızını da arttırarak gazsızlaştırmayı hızlandırır. Saf suda kavitasyon etkisi yaklaşık 70°C’de maksimuma gelir. Daha yüksek sıcaklıklarda etki azalarak kaybolur.

4.10.1.3 Ses alanı

Ses frekansı: Genelde 20-50 kHz arasında frekanslar kullanılır. Bunun iki amacı vardır. Birisi geleneksel olarak kullanılan ekipmanlar bu aralıkta çalışmaktadır. Diğeri ise yüksek frekanslarda kavitasyonun başarılmasının oldukça zor olmasıdır. Çok yüksek frekanslarda bir akışkana uygulanan basınç dalgaları ve bu akışkanın moleküllerinin cevabı arasında doğal bir gecikme olacaktır. MHz seviyesindeki frekanslarda daha şiddetli bir dalga kullanımı ile bu gecikme telafi edilmelidir. Böylece moleküllerin efektif olarak çekilip ayrılması daha büyüktür. Maalesef gerekli titreşim şiddetlerinde çok yüksek frekanslı transdüserleri çalıştırmak bir mühendislik problemidir.

Ses Şiddeti: Şiddetteki her artış genelde kimyasal etkide bir artış sağlayacaktır. Fakat basınç genliğinin çok fazla artması ile kabarcıklar genleşme döneminde o kadar büyüyebilir ki çökme için kullanacak zaman bulamaz. Eğer bu kabarcıklar ses kaynağının yüzeyinde oluşursa yastık kabarcık oluşturur. Bu ses enerjisinin sisteme etkin iletimini azaltacaktır. Genellikle 0,3 watt/cm²’yi geçen güçlerde kavitasyon olayı başlamaktadır.

4.10.1.4 Çözünmüş gazların varlığı

Ses dalgalarının negatif basınç döneminde sıvı ayrılarak kavitasyon kabarcığı oluşmaya başlar. Kabarcık içinde negatif basınç gelişirken sıvı içindeki çözünmüş gazlar kabarcık içine sınır boyunca yayılmaya başlar. Ses dalgalarının alçak basınç devresinin geçmesi ve atmosferik basınca ulaşmasından dolayı negatif basınç azalırken kavitasyon kabarcığı büzülmeye başlar. Ses dalgasının basınç dönemi boyunca kabarcık içinde yayılan gazlar sıkışarak tekrar sıvı içine yayılmaya çalışacaktır. Fakat bu yayılma ilk durumdaki gibi kolaylıkla gerçekleşemez. Çünkü bir kere büzülmüş oyuğun yüzey alanı daha küçülmüştür. Sonuç olarak gaz içeren sıvı içinde oluşan kavitasyon kabarcığı tamamen çökerek patlayamaz. Kabarcık içindeki gazın özgül ısı oranı çok önemli bir faktördür. Çökme sıcaklığı ve basıncı göz önüne alındığı zaman bu oran tek atomlu gazlar için en yüksektir.

4.10.1.5 Tepkime sisteminin temizliği

Çözücü içinde var olan bütün zerre ve taneler oyuklanma için tohum görevi yapar. Böyle tanelerin yarık ve girintilerinde tuttuğu gazlar oyuklanma kabarcıklarının yeniden oluşumu için çekirdek olarak görev yapar. Çekirdek veya mikro kabarcıklar kavitasyonun ortaya çıkması için var olmak zorundadır.

4.10.1.6 Çevre basıncı

Dış basıncın artması sistemin kavitasyon eşiğini artırır. Bunu gevşeme fazı içinde daha büyük negatif basınç gerektirmesi ve çözücü ile reaksiyon unsurlarının buhar basıncını düşürmesi ile sağlar. Bu kavitasyonu başarmak için gerekli olan ultrasonik enerji şiddetini artırır. Şiddetin artırılması ise çökmenin daha da kuvvetli olmasına neden olacaktır.

4.10.1.7 Ara yüzeyin etkisi

Oyuk içeriği ile sıvı arasındaki ara yüzey ile ilgili en önemli parametre onun şeklidir. Genel olarak ara yüzeyin küresel olduğu ve bütün aşamalar boyunca öyle kaldığı kabul edilmektedir. Ara yüzeyle ilgili diğer en önemli parametre yüzey gerilimidir. Yüzey gerilimi bir ses alanının kavitasyonu başlatmasında önemli bir rol oynar. Yüzey gerilimi geçici oyuk çökmesinin kuvvetli şekilde şiddetini etkiler.

4.11 Ultrasonik Titreşimin Kullanıldığı Yerler

4.11.1 Cevher hazırlama dışındaki uygulamalar

Ultrasonik titreşim, malzemelerin fiziksel özelliklerini karakterize etmek amacıyla kullanımı çok yaygın olmakla birlikte, tıbbi tasarımlarda, malzeme test yöntemlerinde, çatlak bulma, okyanus geometrisinde, temizleme işlemlerinde, akışkan akış ölçümleri alanında yüzey açma, kaynak (ergitme) ve plastiklerin montajı işlemlerinde, emülsiyonlarda parçacık dispersiyon stabilitesini sağlamak amacıyla birçok endüstride kullanılmaktadır (Gallego-Juarez ve diğ., 1994). Ultrasonik frekansa göre ortaya çıkan çeşitli uygulamalar Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2 : Ultrasonik uygulama alanları (Mason, 1964).

Frekans, kHz	Uygulama alanı
3-20	Gaz üretme, köpük söndürme, delme, gazsızlaştırma,
1-100	Metalürjik etkiler
20	Hırsız alarmı
20-100	Depolimerizasyon
20-40	Endüstriyel temizleme
300	Rezonans testi
100-500	Fotoemülsiyon ve emülsiyon
150	Su-yağ karıştırma
300	Fiziksel ve biyolojik etkiler
330	Virüs muamelesi
450	Civanın bastırılması
500-15000	Puls testi, katılaştırken çinko üzerine etkileri
200-200	Halojen-gümüş üzerine etkileri
1.000.000	Ulaşılabilen en yüksek frekans

Ultrasonik dalgalarının geçtiği ortamlarda değişen özelliklerinden ve gidiş-geliş sürelerinin tespit edilmesiyle denizaltı sonar sistemi, körler için klavuz aletler ve iç organların muayenesi gibi uygulamalara olanak sağlanmıştır.

Ultrasonik titreşimin gıda dehidratasyonunda, köpük gidermede, tekstil ürünlerinin yıkanması gibi değişik endüstriyel uygulamalarından bahsedilebilmektedir. Daha çok endüstride kavitasyon işlemi ile katıların temizlenmesi işlemlerinde kullanılan

akustik enerjinin tekstil ürünlerinin yıkanması amaçlı olarak da kullanımı üzerine çalışmalar da mevcuttur (Rodriguez ve diğ., 1985).

Bununla birlikte, gıda ürünlerinin korunması için kullanılan bir yöntem olan dehidratasyon ultrasonik etki ile sağlanabilmektedir. Sıcak hava ve dondurularak kurutma işlemleri diğer konvensiyonel yöntemler olup, sıcak hava yöntemi gıdanın bozulmasına neden olabilmekte, bu olumsuzluğu gidermek amacıyla da dondurularak kurutma yöntemi tercih görmektedir. Bu yöntemdeki dezavantaj ise prosesin çok pahalı olmasıdır. Bu yöntemlerin dışında yüksek yoğunluklu ultrasonik titreşim nemin buharlaşma hızını arttırarak bu işlem için kullanılabilir. Fakat bu etkinin geliştirilmesi limitlidir.

Makine parçalarının temizlenmesinde ultrasonik banyoların pek çok uygulaması mevcuttur. Temizleme işlemlerinde iki ayrı durum söz konusu olmaktadır. İlki parça yüzeylerindeki kirleticilerinin bir temizleyici kimyasalıyla çözünebildiği durumdur. Bu işlemde yüzeyde kirletici ile doymuş bir temizleyici tabakası oluşmakta ve temizleme işlemini zayıflatmaktadır. Ultrasonik titreşim uygulanması ile oluşan kavitasyon kabarcıkları oluşan bu tabakayı bozarak dağıtmaktadır. Kirleticilerinde aşınarak çözelti içine karışmasını da sağlamaktadır (Gallego-Juarez, 1996).

İkinci durumda ise çözünmeyen kirleticilerin yüzeylerde bulunması durumudur. Burada da ultrasonik kavitasyon etkisi ile yüzeyindeki kirleticiler sıvı ortama alınarak uzaklaştırılmaktadır. Bu işlemin etkin olarak gerçekleşebilmesi için temas eden sıvının uzaklaştırılacak kirleticileri ıslatabilme yeteneğine sahip olması gerekir.

Genel olarak bu sistem, dokuma, plastik, cam, kömür fiberleri, kağıt, mukavva, kauçukların kesiminde veya ergitilmesinde kullanılmaktadır. Sprey yıkama, fırçalama, çırpma ve elektro temizleme gibi birçok sisteme göre çok daha avantajlı ve etkin bir sistemdir. Ayrıca plastik parçaların eritilmesi, yapışkanların (tutkalların) ısıtılması, plastik tabakalı konteynerlerin kapatılması ve zımbalama işlemleri diğer kullanım alanlarıdır. Malzeme yüzeylerinin girintili olduğu birçok durum için belki de vazgeçilmez bir tercih olarak ortaya çıkmaktadır (Blitz, 1963).

4.11.2 Ultrasonik titreşimin cevher hazırlamada önemi ve kullanımı

4.11.2.1 Susuzlandırma amaçlı kullanımı

Susuzlandırma işlemleri ekonomik açıdan en önemli işlemlerden biridir. Santrifüj, çöktürme, filtrasyon, eleme, gravite çökmesi ve termal kurutma gibi konvansiyonel yöntemler, pülpün katı konsantrasyonunu arttıran ve süspansiyonlardan suyun ayırımını sağlayan yöntemler olup, bu yöntemlere ultrasonik etki uygulandığında konvansiyonel yöntemlerinin kullanımında ortaya çıkan problemler ortadan kaldırılmaktadır.

Çok ince katı parçacıkların suyla karışımından oluşan süspansiyonlarda, katı sıvı ayırımını yapmak amacıyla kullanılan filtrasyon işlemlerinde, çok ince boyutlu tanelerin filtreyi tıkaması olayı ortaya çıkar. Bu da filtrasyon hızını belirgin bir şekilde düşürür. Bu tür güçlükler, özellikle de, çok ince parçacıklardan oluşan süspansiyonların susuzlandırılmasında çok sık rastlanmaktadır. Mesela termal kurutma işlemlerindeki toz problemleri ve yüksek enerji sarfiyatı; doğal ortam gravite çöktürmesinde karşılaşılan büyük alan ihtiyacı gibi problemler bunlardan bazılarıdır. Bu tür problemlerin ortadan kaldırılması amacıyla, susuzlandırma proseslerinde ultrasonik alan uygulamaları üzerine çalışmalar yoğunlaştırılmıştır (Riera-Franco ve diğ., 2000; Juarez ve diğ., 2003). Filtrasyon işlemlerinin kolaylaştırılmasında, elektriksel alan, manyetik alan ve ultrasonik alan kullanılabilir. Ultrasonik alan özellikle kömür ve gıda dispersiyonlarında pülpün susuzlandırılması amacıyla, geleneksel filtrasyon işlemleri ile uzaklaştırılamayan bond suyunun uzaklaştırılmasında çok daha kullanışlı olmaktadır (Stepniak ve diğ., 2003).

Ultrasonik titreşim kullanılması, geleneksel susuzlandırma metotlarının kapasitelerini ve verimini arttıran bir unsurdur. Katı-sıvı ayırımında ultrasonik titreşim filtrelerin tıkanmalarını önlemenin dışında, emici bir etki yaratarak nemin uzaklaştırılmasını kolaylaştırıcı bir etki yaratır.

Süspansiyon kömür-su karışımı gibi iki veya daha çok farklı fazdaki malzemelerin karışımından oluşuyorsa, ortam atalet ve elastik kuvvetleri bunlar arasındaki bağ kuvvetlerinden daha yüksek olacaktır. Bu yüksek atalet ve elastik kuvvetler yüzey gerilimini kırarak katı-sıvı ayırımını gerçekleştireceklerdir.

Yapılan bir çalışmada ultrasonik titreşimin, yüzey aktif reaktiflerle yapılan vakumlu filtrasyon işleminde etkisi incelenerek sonuçları ortaya koyulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre kekin neminin düştüğü ve filtrasyon hızının da bu etki ile arttığı görülmüştür (Singh, 1999).

Sarabia ve arkadaşları (2000) çok ince parçacıkların gazlardan ve sıvılardan uzaklaştırılması işleminde, yüksek yoğunluklu ultrasonik dalgalar kullanmışlardır. Yüksek yoğunluklu ultrasonik titreşim kullanımı, geleneksel ayırma yöntemlerinde kapasite ve verimi arttırmıştır.

Özer ve diğerleri (2001) ultrasonik titreşimi killerin çöktürülmesinde kullanarak daha yüksek pülpte katı oranlarına ulaşmışlardır.

Önal ve arkadaşları (2003) ultrasonik ortamda killerin susuzlandırılması için çalışmışlar, farklı yerlerden alınan kil örnekleri üzerinde ultrasonik enerji, flokülant ilavesi ve pülp yoğunluğu gibi birçok parametrenin etkisini araştırarak, en uygun şartları belirlemişlerdir. Sedimentasyon süresince uygulanan ultrasonik işlemin, kilin sedimentasyonunu etkilediğini ve sedimentasyon süresini kısalttığı sonucuna varmışlardır.

Swamy ve arkadaşları (1983) kurutma öncesi taneli örneklerin susuzlandırılması üzerine ses dalgalarının etkisini araştırmışlardır. Kullanılan örnekler magnezit, kalsiyum karbonat, kum ve talaştır. Susuzlandırma prosesi boyunca ultrasonik titreşim kullanıldığında nem içeriğinde bir düşme gerçekleştiği bulunmuştur. Çalışmalarda 9.8 kHz'de 138 dB'lik yüksek yoğunluklu ses dalgalarını üretmek için akıslı bir korna kullanılmıştır.

Kowalska ve arkadaşları (1978) atık şehir sularının temizleme tesisinin organik atıklı çamurlarının ve metal endüstrisinin atık mineral çamurlarının susuzlandırılmasında ultrasonik titreşimin etkisini incelemişlerdir. Çamurlar organik kolloitlerle muamele edilmeden önce 20 kHz'lik frekansta 900 watt'lık bir ultrasonik alandan geçirilmişlerdir. Uygulanan flokülantların türü ne olursa olsun örneklerin sesle muamelesi susuzlandırma etkinliğini arttırmıştır. Mineral çamurlarının filtreleme özelliklerini iyileştiren etkinin kavitasyon şartlarında oluşan dağıtıcı ve yıkıcı etkiden kaynaklandığı sonucu çıkarılmıştır. Ultrasonik dalgaların diğer etkilerde suyun yüzey gerilimini, adhezyon ve kohezyon kuvvetlerini ve elektro kinetik potansiyeli düşürerek moleküller arasındaki kuvvetlerin uyumunda değişimler oluşturmasıdır.

Ayrıca ultrasonik dalgalar filtre yatağının dokusunu ve geçirgenliğini değiştirerek filtreleme özelliklerini iyileştirmektedir.

Temel olarak ultrasonik filtrasyonu iyileştiren iki etkisi vardır;

- a) Kek içinde çok ince tanelerin aglomerasyonu,
- b) Kısmen asılı taneleri tutan kek için yeterli titreşim enerjisinin temini.

Böylece çözücüler için daha fazla kanallar üretilir. Özellikle etkileyici bir durum kömür pülplerindedir. Geleneksel filtrasyon teknikleri ile çoğu pülplerden suyu uzaklaştırmak zordur. Maalesef, kömür solüsyonları %30'dan fazla nem içeriğinde yakılamaz. Fakat ultrasonik yardımcı vakum filtrasyonu %20 nem içerikli yanabilir bir ürünü direkt olarak üretebilir.

4.11.2.2 Yüzey temizleme ve kaplama işlemlerinde kullanımı

Ultrasonik sistem, bir temizleme çözeltisi içerisine daldırılabilir ve hızlı bir temizleme temin eder. Temizleme işlemi ekipman ayarlarında herhangi bir değişiklik ve kırılğan parçalara zarar verme riski olmadan yerine getirilir. Ultrasonik temizlemede amaca uygun olarak iki yolla başarıya ulaşılır. Temizlenecek solüsyonun yüksek yoğunluklu titreşimlerle fiziksel olarak temizlenmesi ve temizleme solüsyonu içerisinde çözülebilir olanların kimyasal olarak çözülmesi ve çözülemeyen kirliliğin de dağıtılmasıdır. Bu method ile aygıtların, bilgisayarların, motorların, değerli metal veya taşların, metalden, plastikten, fiberden, seramikten veya camdan yapılmış dekoratif çerçevelerin çatlaklarında bulunan bütün yabancı maddeler uzaklaştırılır (Veneta, 1988).

Ultrasonik temizleme sistemi belli başlı iki parçaya sahiptir; katı fazlı bir jeneratör ve tank içerisine daldırılabilir veya tankın kenarına monte edilebilir piezo-elektrik transdüser. Jeneratör yüksek yoğunluklu elektrik enerjisini (25 KHz) üretir, transdüser bu elektrik sinyalini temizleme sıvısı içerisinde aynı sıklıkla yayılan ses dalgalarına çevirir. Yüksek yoğunluklu ultrasonik enerji yüksek ve alçak basınçlı alanlar üretir. Alçak basınç periyodu etkisi altında, pratik olarak bir vakum meydana getiren mikroskobik boşluklar oluşturulur. Bu sayısız mikroskobik oyuklar boyut olarak artarlar ve aniden ortaya çıkan sıkıştırmalar ile bozunurlar. Ortama daldırılmış maddelerin yüzeyinde 100 kg/cm^2 ve daha yüksek enerji ortaya çıkarır (Url-4).

Temizleme ve yıkama işlemlerinde ultrasonik titreşim dalgalarından yararlanılmakta olup, tellerin ve profillerin endüstriyel olarak temizlenmesi işlemlerinde yaygın olarak faydalanılmaktadır. Ultrasonik etki ile yüksek yoğunluklu kavitasyon sonucu yıkama daha hızlı olmakta, yıkama malzemesi ve zamandan tasarruf sağlanmaktadır. Malzemelerin yağdan temizlenmesi, yağ çekme ve teller üzerindeki pasın çekilmesi gibi işlemler yaygın kullanım alanlarıdır (Farmer, ve diğ., 2000).

Revnitzev ve Dmitriev (1965) minerallerin saflaştırılması için ultrasonik enerjinin direkt uygulamalarını araştırmışlardır. Ultrasonik kimyasal temizleme ve ultrasonik temizleme kromit konsantreleri, kayaç kristalleri, cam kumları ve de sentetik aşındırıcı gibi suni orijinli mineraller için uygulanmıştır.

Ultrasonik enerji, elektrot yüzeyini aktive edip temizlemesi, elektro kaplamada kullanılmasında önemini arttırmaktadır. Prasad ve diğerleri (1993) ultrasonik banyoyu nikel kaplama çalışmalarında kullanarak, kaplamanın aşınma karakteristiğini azalttığını, ultrasonik dalgaların etkisi ile daha iyi yerleşen moleküllerin mikro sertliğinin arttığını ve aşınmaya karşı daha fazla dayanıklılık gösterdiğini tespit etmişlerdir.

Farmer ve arkadaşları (2000) ultrasonik prob kullanarak silika taneciklerinin yüzeyindeki demiri uzaklaştırmışlardır. Bu teknikle Fe_2O_3 içeriğini %0,025'den %0,012'ye düşürmeyi başarmışlardır.

Verimli bir temizleme için yüksek dereceli ultrasonik dalgaların etkisi ile yaratılan yüksek kavitasyona ihtiyaç vardır. Ultrasonik banyoların içinde sağlanan daha yoğun sonik etki (50 kat daha fazla) ile oluşturulan büyük bir kavitasyon, yüzeylerin bilinen yöntemlerden daha etkin ve verimli temizlenmesini sağlamaktadır.

4.11.2.3 Gaz-katı ve sıvı-katı sistemlerinden katının ayrılması işlemlerinde kullanımı

Çok ince parçacıkların gazlardan ve sıvılardan ayrılması, uzaklaştırılması işlemi önemli bir endüstriyel uygulamadır. Yüksek yoğunluklu ultrasonik titreşim kullanımının, geleneksel ayırma yöntemlerinin kapasitelerini ve verimini arttırmada katkısı bulunmaktadır. Bu etki ve iyileşme genel olarak temizlenen ortama bağlı olmaktadır (Riera-Franco ve diğ., 2000; Kobayashi ve diğ., 2003).

Yüksek yoğunluklu akustik enerji süspansiyon içindeki çok ince taneleri aglomere edebilme özelliğinden dolayı, çok ince tanelerin süspansiyonlardan uzaklaştırılmasında kullanılabilir. Özellikle termik santrallerde çıkan dumanın içindeki kömür parçacıklarının tutulması sağlanarak, filtrasyon işleminde verim yükseltilebilmektedir. Yapılan bir çalışmada dikdörtgen biçimdeki aglomerasyon odalarının duvarlarına bir kaç ultrasonik transdüser yerleştirilerek çok ince boyuttaki (<1 mikron) parçacıkların filtrasyonda tutma veriminin %7 oranında artması sağlanmıştır (Gallego-Juarez, 1996).

İçerisinde uzaklaştırılması gereken çok ince taneciklerin bulunduğu gaz süspansiyonlarında ultrasonik titreşim, taneciklerin aglomerasyonunu sağlamaktadır. Bu etki ile oluşan aglomerasyon işlemi, taneciklerin tane boyutunu büyütür, elektrostatik filtreler ve siklonlar gibi geleneksel filtrelerde katı toplama verimini arttırmaktadır. Bahsedilen geleneksel filtreler genellikle daha iri parçacıkların toplanmasında verimli iken 2,5 mikron'dan daha küçük tane boyutları için efektif olamamaktadır. Ultrasonik titreşim katı tanelerin konumunu değiştirebilmekle birlikte flokülasyon, koagülasyon ve dispersiyona sebep olmaktadır. Ayrıca ultrasonik etki kimyasal reaktiflerin mineral yüzeyine adsorpsiyonunu kuvvetlendirmektedir (Singh, 1999; Field ve Minasny, 1999).

4.11.2.4 Flotasyon işlemlerinde kullanımı

Aldrich ve Feng'in (1999) yapmış oldukları bir çalışmada sülfürlü cevherlerin flotasyonunda ultrasonik titreşimin yüzebilirliği belirli bir şekilde arttırdığı ve prosesi geliştirdiği ortaya koyulmuştur. Ayrıca diğer bir çalışmada ultrasonik titreşimin mineral tanelerinin yüzey özelliklerini değiştirdiği ve selektif zenginleştirmede silikatların bastırıldığı bunun sonucu olarak da flotasyon hızının, tenörün ve kazanma veriminin arttığı, kullanılacak reaktif sarfiyatının ise azaldığı ortaya koyulmuştur (Stoev ve diğ., 1992)

Gürpınar ve diğerleri (2004), kalsit, barit ve kuvars flotasyonunda ultrasonik enerjinin etkisini incelemişler ve ultrasonik dalgaların, kalsit ve barit flotasyon verimini pozitif etkilerken, kuvars flotasyon verimini ise negatif etkilediği sonucuna varmışlardır.

Feng ve Aldrich (2005), kömür flotasyonunda ön kondisyonlamanın etkisini araştırmışlar, ultrasonik ön kondisyonlamanın oksitli kömür flotasyonunu

iyileştirdiği, daha küçük fraksiyonlarda flotasyon hızı ve randımanını arttırdığı sonucuna varmışlardır.

Özkan ve Kuyumcu (2005), kömür flotasyonunda ultrasonik enerjinin etkisini araştırmış ve sonuç olarak kömür flotasyon zamanını kısalttığı, reaktif sarfiyatını azalttığı ve kömür flotasyonunda verimi pozitif olarak etkilediği sonucuna varmışlardır.

Asai ve Sasaki (1958) flotasyon pülpünün ultrasonik işlemde geçirilmesiyle ince kömürün kazanma veriminin iyileştirildiğini rapor etmişlerdir. Zubkov ve Below (1982) ultrasonik ön koşullandırmanın nadir metal cevherlerinin flotasyonundaki etkisi üzerine çalışmışlardır. Bu araştırmacılar artan flotasyon verimini reaktiflerin daha iyi dağıtılmasına bağlamışlardır. Stoev ve Kuzev (1966)'in çalışması daha önceki çalışmadan farklı olmuştur. Bu araştırmacılar flotasyon hücresi içerisinde ultrasonik enerji ile hava kabarcıkları oluşturmayı denemişlerdir. Ultrasonik kornanın kullanıldığı bu sistemde ince kömür flotasyonunda verim açısından olumlu sonuç vermiştir.

Kowalski ve Kowalska (1978), hidrofobik minerallerin flotasyonunda polar olmayan toplayıcıların ultrasonik aktivasyonunu araştırmıştır. Araştırma sonucunda nonpolar reaktiflerin ultrasonik etki ile çok daha iyi emülsiyeye edildikleri ve %89,3'ü 0,001 mm boyutundan daha küçük olacak şekilde oluştuğunu bulmuşlardır. Bu çalışmalarını bir fosfat cevheri üzerinde uygulayarak yüksek verimler elde etmişlerdir. Bu iyileşmenin nedenleri olarak da toplayıcının iyi dağıtılmasını, mikro kabarcık oluşturarak katı-sıvı-hava ara yüzey çarpışma olasılığının daha fazla arttırılmasını göstermişlerdir. Ayrıca araştırmalarda frekansın daha da büyümesi durumunda bu faydalı etkilerin azaldığını bulmuşlardır. Bunu da elektriksel çift tabakadaki karışıklığa bağlamışlardır. Sonuç olarak ultrasoniğin kullanılması ile (25 kHz, 500 w), flotasyon zamanının azaltılması, kullanılan toplayıcı ve köpürtücülerin miktarının azaltılması, köpüklerin daha sonraki aşamalarda söndürülmesi gibi faydalarının olduğunu bildirmişlerdir.

Özkan (2002) manyezit artıkları üzerindeki ultrasonik işlemin sonuçlarını geleneksel flotasyon sonuçları ile karşılaştırmış, ayrıca ultrasonik titreşimin köpük alma zamanını ve köpük stabilitesini arttırdığını belirlemiştir.

Barit-flüorit-kuvars cevherinden baritin flotasyonunun seçimliliğinde ultrasonik alanın etkisi Slaczka (1987) tarafından incelenmiştir. Çalışmalarda 22 kHz'lik bir frekans $0,5 \text{ w/cm}^2$ 'lik bir yoğunlukla kullanılmıştır. Deneyleerde yüksek frekansın saf minerallerin flotasyonuna etkisi, şlam atmaya olan etkisi ve mineral üzerine toplayıcı adsorbsiyonu üzerine etkileri araştırılmıştır. Sonuç olarak ultrasonik ön işlemin baritin seçimliliğini oldukça büyük oranda arttırdığı bulunmuştur. Bu baritin yüzeyinin daha kırılğan olduğundan çukurlaştırılarak adsorblanma kabiliyetinin arttırılması ve ters şekilde daha sert olan flüorit yüzeyinin düzlenerek ve böylece adsorbsiyon'u düşürülerek seçimliliğin arttırıldığı sonucuna varılmıştır.

Djendova tarafından (1987) hidrodinamik olarak ultrasonik titreşim üreten bir cihaz tasarlanarak bakır cevheri flotasyonunda kullanılmıştır. Bu deneyleerde metal veriminde %6 oranında bir düzelme gerçekleşmiştir. İşlem sulu ksantat solüsyonlarının sonikleştirilmesiyle gerçekleştirilmiştir.

Özkan ve Veasey (1994) tarafından yapılan bir araştırmada ise, kolemanit flotasyonunda oluşan şlam kaplamalarını önleyebilmek için uygulanan ultrasonik ön koşullandırmanın etkisi incelenmiş ve ultrasonik işleminden sonra şlamları atılan kolemanit numunelerinin çok yüksek konsantre, tenör ve verimde yüzdürülebileceği saptanmıştır.

Diğer bir çalışmada ultrasonik ön koşullandırma işleminin kömür ve galenin yüzebilirlikleri üzerine etkisi incelenmiştir. Kömür, yüzdürmeden önce sonik işleminden geçirilmesinin, kömürün hidrofobikliğini tümüyle eski durumuna döndürdüğü bulunmuştur. Toplayıcı yokluğunda sonik işleminden geçirme sonrası şlam giderme ve toplayıcı ile koşullandırma, sonik işlem olmadan yapılan oranla daha yüksek verim sağlamıştır. Verimdeki iyileşmeyi açıklamak için temiz yüzeylerin oluşmasının ardından su iten katı üzerinde mikro kabarcıkların oluşması ve bundan kaynaklanan kabarcık-tane bağlanmasının neden olabileceği bildirilmiştir. Bu sonuçlar ayrıca, uygun koşullar altında yapılan ultrasonik işlemin galen/ksantat sistemindeki toplayıcı tüketimini en az %50 oranında azaltabileceğini göstermiştir. Çalışmalar 22 kHz'de ve $0,5 \text{ w/cm}^2$ gücünde yapılmıştır (Çelik, 1988).

Çelik ve diğerleri (1998), kolemanit flotasyonunda fazla reaktif tüketimine neden olan ve seçimliliği azaltan şlamın uzaklaştırılmasında ultrasonik işlemin etkisini incelemiştirlerdir. Bu araştırmacılar tarafından ultrasonik işlem, kolemaniti kaplayan

kil taneciklerinin seçimli olarak ayrılması için yeni bir yöntem olarak ileri sürülmüştür.

Mısra ve diğerleri (2003), arsenopirit flotasyonunda ultrasonik ile ön koşullandırmanın etkisini incelemişler ve ultrasoniğin oksitli arsenopiritin oksit tabakasını uzaklaştırarak randımanı arttırdığı sonucuna varmışlardır.

Vargas-Hernandez ve diğerleri (2003), kavitasyonun flotasyon işlemine olan etkisini araştırmışlar ve ultrasonik dalgaların, ultra ince tanelerin kabarcık tarafından yakalanarak verimliliğin artışı sağlayan ince kabarcık üretimine neden olduğunu bulmuşlardır.

Çoğu araştırmalar göstermiştir ki yoğun akustik alan mineral konumunu kimyasal ve dağıtma etkilerine bağlı olarak değiştirebilmektedir. Kimyasal etkiler kavitasyonun neticesi olarak açıklanabilmektedir. Basınç ve sıcaklıktaki yükseliş etkisinde buna eşlik etmektedir. Sıvı-katı etkileşimler sıvının kohezyon kuvvetinden daha zayıf olduğu için, katı-sıvı ara yüzeyi daha uysal davranmaktadır. Özellikle sudaki hidrofobik parçacıklar daha zayıf katı-sıvı etkileşimleri yaşamaktadırlar. Çünkü kavitasyon etkisi kolaylıkla ara yüzeylerin çoğunda oluşabilmektedir. Bu olay mineral yüzey özelliklerini değiştirerek, mineral yüzeyine kollektör adsorpsiyonunu kolaylaştırarak minerallerin flotasyon yeteneğini arttırmaktadır (Smythe ve Wakeman, 2000).

Kavitasyon tarafından açığa çıkan enerjinin en basit etkisi bir süspansiyon içinde asılı olan tanelerin yüzeylerini temizliyor olmasıdır. Bunun çok parçalı etkisinin ise mineral yüzey özelliklerini bozacağı düşünülebilir. Kavitasyonun flotasyon öncesi ve flotasyon işlemi boyunca kullanıldığı zaman bazı reaktiflerin kimyasal yapısını değiştirebildiği bilinmektedir (Tao ve diğ., 2000).

4.11.2.5 Selektif zenginleştirme işlemlerinde kullanımı

Katı sıvı sistemlerinde çok büyük etkiler üreten ultrasonik titreşimin, flotasyon işlemlerinin yanında selektif flokülasyon ve yağ aglomerasyonu işlemlerinde kullanımına yönelik çalışmalar yapılmaktadır.

Uçucu küllerin zenginleştirilmesine yönelik, inorganik maddelerin yanmamış kömürden ayrılması amacıyla yapılan bir çalışmada, kolon flotasyon hücresine adapte edilen ultrasonik transdüser ve ön kondisyonlama tankında kullanılan bir

ultrasonik prob ile yağ aglomerasyonu yapılarak, ultrasonik titreşimin bu işlemde karbon kalitesini olumlu yönde etkilediği ortaya koyulmuştur.

Demir cevherleri artığının (%50,5 Fe) değerlendirilmesine yönelik olarak ultrasonik titreşim altında yapılan selektif flokülasyon çalışmalarında %65 Fe içerikli demir konsantresi %91 kazanma verimi ile elde edilirken, ultrasonik etki olmaksızın bu değer %59 Fe içeriği ve %75 demir kazanma verimi olduğu görülmektedir. Buradaki bu iyileşme, katı-sıvı ara yüzeylerinde oluşan bozunmalara bağlıdır ki buda flokülant'ın mineral yüzeyine adsorpsiyonunu kolaylaştırır. Buna bağlı olarak seçimlilik ve verim artmaktadır. Ayrıca ultrasonik etki ile birlikte aktivasyonun artması dispersiyona sebep olur ki buda sonucu etkileyen bir olaydır (Singh ve Singh, 1997).

4.11.2.6 Öğütme ve dağıtma ile zenginleştirme işlemlerinde kullanımı

Gaete-Garretton ve diğerleri (2000) öğütmede ultrasonik titreşimin kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Ultrasonik enerjinin uygulanması ile normal öğütme koşulları karşılaştırıldığında, ultrasonik titreşimin sarf edilen enerjiyi, gerekli olan torku ve shaftın üzerindeki baskıyı azalttığı sonucuna varmışlardır.

Yerkovic ve arkadaşları (1993) Şili porfiri bakır cevherinin ultrasonik öğütmesi ile ilgili çalışmalarında, daha önce test edilen kömür ve kireçtaşı gibi yumuşak malzemelere ek olarak, bakır cevherleri gibi sert malzemelerin öğütülmesi için ultrasonik merdaneli öğütücünün ümit vaat ettiğini göstermişlerdir. Öğütme sonuçları aynı boyut ve kapasitedeki bilyalı değirmen ile karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

Alp ve Özdağ (2000) kolemanit atıklarının ultrasonik dalgalar ile zenginleştirilebilirliğini araştırmışlardır. -3 mm boyutundaki %24,44 B₂O₃ tenörlü kolemanit artığından ultrasonik banyoda, 60 dk'lık yıkama sonucunda %97,8 verimle %43,35 B₂O₃ tenörlü konsantre elde etmişlerdir.

4.11.2.7 Liç işlemlerinde kullanımı

Slaczka (1986) karbonatlı çinko cevherinin amonyak liçi üzerine ultrasonik enerjinin etkisini araştırmıştır. Ultrasonik alanın kullanılması ile liç edilen karbonatlı cevherin yüzeyi üzerindeki difüzyon tabaka kalınlığı düşürülmüş ve daha kısa sürede liç yapılmıştır. Ultrasonikle birlikte gelen kavitasyon, yayılma basıncı ve kuvvetli türbülanslı akış gibi olaylar sıvı içine batırılmış katı yüzeyinde oluşmuş difüzyon

tabakasının karakterini değiştirmektedir. Kavitasyon etkileri ultrasonik uygulanan katı yüzeyi üzerinde birçok mikro çatlakların ortaya çıkmasını sağlamaktadır. Difüzyon hızı artarak solüsyon kapiler boşlukların içlerine kadar gider ve liç hızlanır. Çalışmalarda 22 kHz ve 100 watt gücünde piezoelektrik transdüserli bir üreteç tank içinde daldırılarak kullanılmıştır,

Swamy ve diğerleri (1995), ultrasonik titreşimin nikel cevherinin mikrobiyal liç işlemini üzerine etkisini incelemişlerdir. Ultrasonik işlem ile gerçekleştirilen mikrobiyal liç işleminin sıradan asit liçleri ile kıyaslandığında nikel veriminin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

4.11.2.8 Boyut ölçümü ve eleme işlemlerinde kullanımı

Ultrasonik etki boyut ölçümü işlemlerinde dispersiyonu sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Edwards ve Bremmer (1967)'e göre katılar, makro ve mikro agregatlardan oluşmaktadır. Makro agregatlar çok kolay ıslatma ve düşük enerji karıştırmaları ile yok edilerek mikro agregatlar haline getirilebilmektedirler. Özellikle de çok ince boyuttaki tanelerin boyut tespitinde, aglomerat halindeki taneler dağıtılarak gerçek boyut ölçümü sağlanmaktadır.

5. MALZEME VE YÖNTEM

Bu bölümde deneysel çalışmalarda kullanılan numuneler, kimyasal maddeler, cihazlar ve deneysel yöntemler açıklanmıştır.

5.1 Malzeme

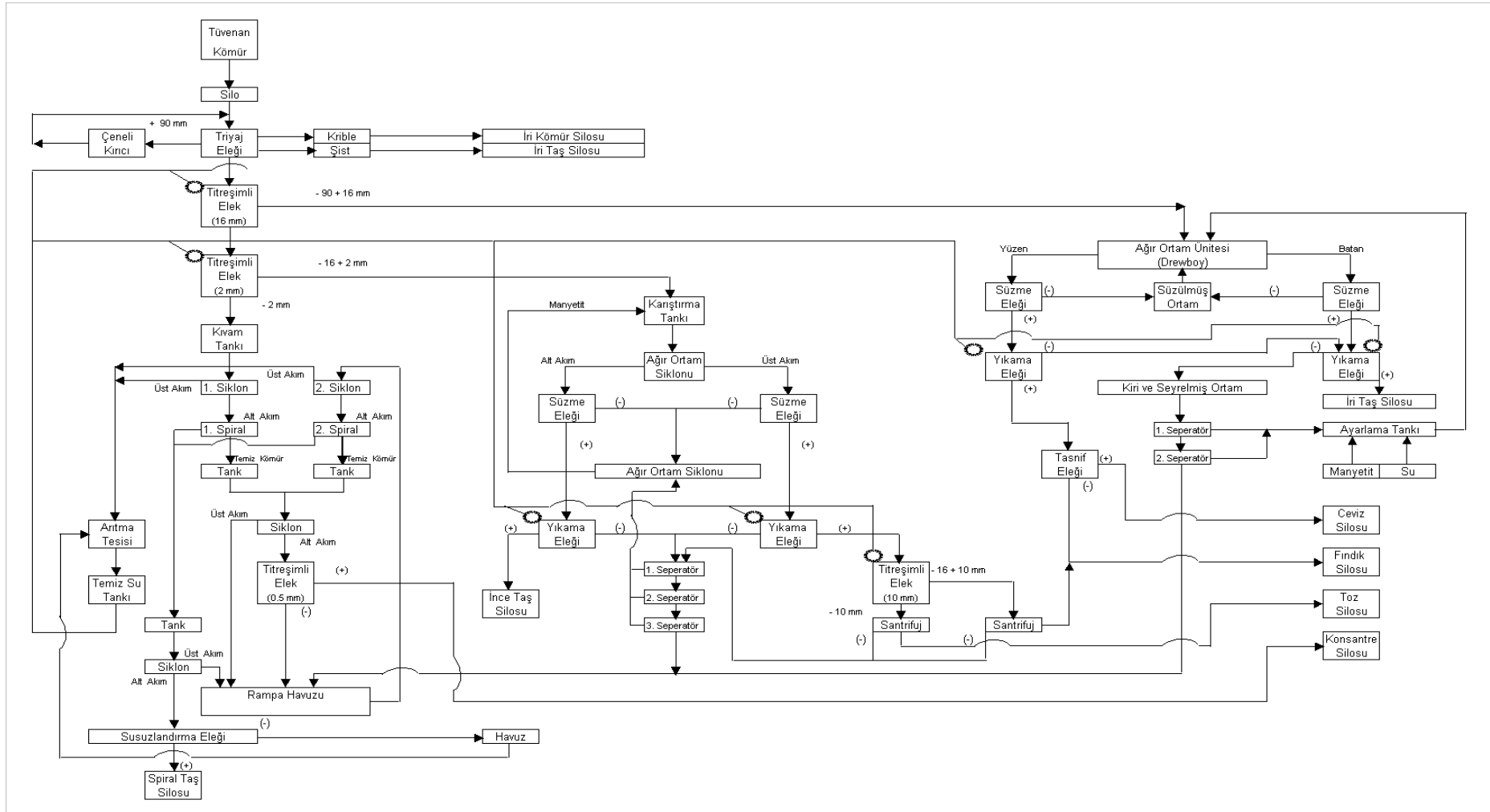
Deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere 0,5 mm altındaki kömür numunesi ve iri parçalı zenginleştirilmiş kömür numunesi Manisa-Soma'da bulunan ve Gürmin Madencilik tarafından işletilen kömür lavvarı ziyaret edilerek temin edilmiştir. Şekil 5.1'de görüldüğü üzere tesiste bulunan spiral üniteleri ile zenginleştirilen 2 mm'nin altındaki temiz kömür, toplama haznesinden pompa vasıtası ile susuzlandırma siklonuna gönderilmektedir. Ön susuzlandırılması siklon tarafından yapılan kömür bir sonraki susuzlandırma işlemi için 0,5 mm elek açıklığındaki titreşimli eleğe beslenmektedir. Susuzlandırma çalışmalarında kullanılmak üzere 0,5 mm elek açıklığındaki titreşimli eleğin altından alınan malzeme su sızdırmaz varillere konularak Cevher ve Kömür Hazırlama Anabilim Dalına ait Pilot Tesis'e ulaştırılmıştır. Ayrıca, malzemenin elektrokinetik özelliklerinin ve temas açısının tespitinde kullanılmak amacıyla tesisten iri parçalı lave kömür numunesi alınmıştır.

5.1.1 Temsili numunelerin fiziksel özellikleri

Deneysel çalışmalara esas olan numuneler Cevher Hazırlama Mühendisliği Bölümü'ne ait Pilot Tesis'e getirildikten sonra, temsili numuneler alınarak, nem içerikleri ve boyut dağılım özellikleri saptanmıştır.

5.1.1.1 Nem içeriğinin tespiti

Deneysel çalışmalarda kullanılan 0,5 mm altındaki kömür numunesinin toplam nem içeriğinin hesaplanması amacıyla temsili numuneler alınmıştır. Pülp ağırlıkları alınan bu numuneler, 105°C sıcaklığındaki etüv'de kuruyana kadar bekletilmiştir ve kuru ağırlıkları hesaplanmıştır. Elde edilen verilerin aşağıda verilen eşitlikte yerine konulması sonucunda, malzemenin toplam nem içeriği %82,5 olarak bulunmuştur.



Şekil 5.1 : Gürmin madencilğe ait kömür yıkama tesisinin akım şeması.

$$\text{Nem İÇeriği (\%)} = (\text{Pülp AĞırlığı} - \text{Kuru AĞırlık}) / \text{Pülp AĞırlığı} \quad (5.1)$$

Kömürün bünye nemini bulmak amacıyla iri parĐalı zenginleştirilmiş kömür (lave) numunesinden temsili numuneler alınmıştır. Bu numuneler ağırlıkları sabit kalana kadar hava ile temasta bırakılmıŐtır. Sabit tartıma gelmiş bu numunedeki ağırlık farkının orijinal numunenin ağırlığına bölünmesiyle yüzey nemi hesaplanmıştır. Numunenin toplam nem değerinden yüzey neminin farkı ile bünye nemi %18,9 olarak bulunmuştur.

5.1.1.2 Boyut dağılım özelliklerinin tespiti

Temsili numunelerin boyut dağılım özelliklerinin belirlenmesi amacıyla 0,5 mm altındaki numuneye elek analizi yapılmıştır. Bu malzemeye ait elek analizinin sonuÇları izelge 5.1’de, elek analiz eğrisi ise Şekil 5.2’de verilmiştir.

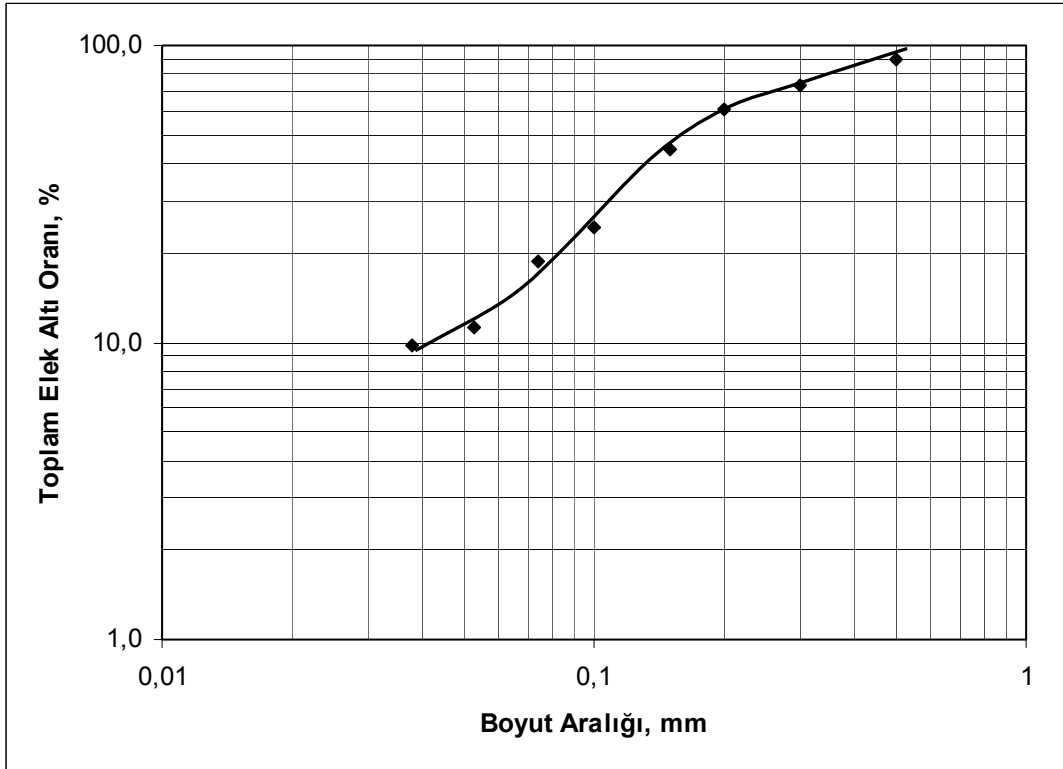
Çizelge 5.1 : Numunenin elek analizi sonuÇları.

Boyut Aralığı, mm	Miktar, %	∑ Elek st Oranı, %	∑ Elek Altı Oranı, %
+ 0,500	9,6	9,6	100,0
- 0,500 + 0,300	16,3	25,9	90,4
- 0,300 + 0,212	13,2	39,1	74,1
- 0,212 + 0,150	15,7	54,8	60,9
- 0,150 + 0,106	20,8	75,6	45,2
-0,106 + 0,074	5,8	81,4	24,4
-0,074 + 0,053	7,5	88,9	18,6
-0,053 + 0,038	1,4	90,3	11,1
-0,038	9,7	100,0	9,7
TOPLAM	100,0		

5.1.2 Temsili numunelerin kimyasal zellikleri

Susuzlandırma deneylerinde kullanılan 0,5 mm altındaki kömür numunesinin kimyasal özelliklerinin belirlenmesi amacıyla, Cevher Hazırlama Mühendisliği Kimya Analiz Laboratuvarında tüvenan numunede kl, kükürt, sabit karbon, uÇucu madde, ısıl değer analizleri ile boyut aralıklarında kl analizleri yapılmış ve yanabilir verimleri hesaplanmıştır. Bu analizlere ait veriler sırasıyla izelge 5.2 ve izelge 5.3’te verilmiştir. Ayrıca, tesisten alınan iri boyuttaki temiz kömür numuneleri çeneli kırıcı ile kırıldıktan sonra fiziksel farklılıklarına göre üç boyuta ayrılmıştır. A, B ve C

olarak kodlanan bu numunelerin kimyasal analizleri yapılmış, sonuçları Çizelge 5.4'te verilmiştir.



Şekil 5.2 : Numunenin elek analiz eğrisi.

Çizelge 5.2 : 0,5 mm altındaki kömür numunesinin kimyasal analizleri (kuru esasa göre).

Eleman	İçerik
Kül, %	41,07
Kükürt, %	0,97
Sabit Karbon, %	19,14
Uçucu Madde, %	36,79
Üst Isıl Değer, Kcal/kg	2760

Çizelge 5.3 : Boyut aralıklarında kül içerikleri ve dağılımları.

Boyut Aralığı, mm	Miktar, %	Kül, %		Yanabilir Verim, %
		İçerik	Dağılım	
+ 0,500	9,6	16,39	3,9	13,5
- 0,500 + 0,300	16,3	17,10	6,8	22,8
- 0,300 + 0,212	13,2	23,16	7,5	17,1
- 0,212 + 0,150	15,7	32,67	12,6	17,8
- 0,150 + 0,106	20,8	56,99	29,1	15,1
-0,106 + 0,074	5,8	60,79	8,7	3,8
-0,074 + 0,053	7,5	69,63	12,8	3,8
-0,053 + 0,038	1,4	75,43	2,6	0,6
-0,038	9,7	67,38	16,0	5,3
TOPLAM	100,0	40,74	100,0	100,0

Çizelge 5.4 : A, B ve C kodlu numunelerin kimyasal analizleri (kuru esasa göre).

Eleman	İçerik		
	A	B	C
Kül, %	9,63	7,50	5,70
Kükürt, %	1,46	0,95	1,15
Sabit Karbon, %	45,02	45,10	44,90
Uçucu Madde, %	45,35	47,40	49,40
Üst Isıl Değer, Kcal/kg	6086	6200	6218

5.2 Yöntem

Bu araştırma kapsamında, küçük boyutlu kömür içeren pülplerdeki kömürün susuzlandırmasının incelenmesi amacıyla ilk olarak yüksek frekanslı titreşimli elek kullanılarak eğim, frekans, besleme hızı ve elek açıklığı gibi titreşimli eleğe ait parametreler tespit edilmiştir. Bulunan en uygun koşullar sabit tutularak, yatay titreşime ek olarak dik ve açılı titreşim verilmiş ve bu işlemlerin nem değişimi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Daha sonra, yüzey aktif maddelerin susuzlandırma üzerindeki etkisi araştırılmış, en düşük nem oranının elde edildiği reaktif miktarı, karıştırma süresi ve pH değeri saptanmıştır. Daha önceki deneylerde tespit edilen titreşimli eleğe ve reaktiflere ait en uygun koşullar sabit tutularak kömür içeren süspansiyon ultrasonik titreşim ile koşullandırılmıştır. Son olarak, titreşimli eleğin yüzeyine ultrasonik titreşim veren transdüser yerleştirilmiş ve susuzlandırma üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Laboratuvar ölçekli olarak gerçekleştirilen deneylerde elde edilen veriler ışığında model fonksiyonları ve üç boyutlu geliştirilen grafikler oluşturulmuştur.

5.2.1 Deneylerde kullanılan aygıtlar ve reaktifler

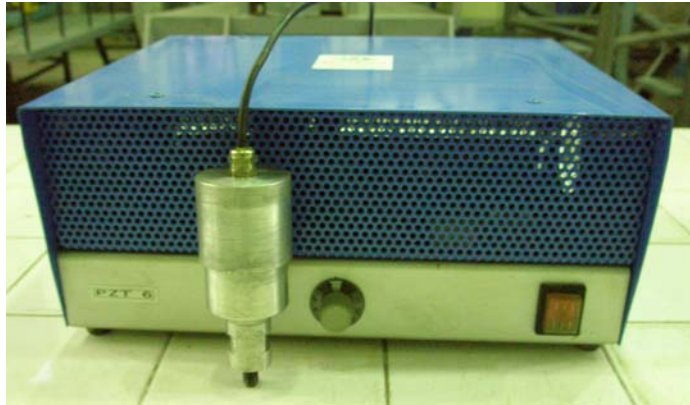
5.2.1.1 Aygıtlar

Susuzlandırma deneyleri, İTÜ Maden Fakültesi Cevher Hazırlama Mühendisliği Bölümüne ait Pilot Tesis laboratuvarında bulunan, 0° ile 9° arasındaki eğimlere ayarlanabilen, 0-50 Hz frekans değerleri arasında çalışabilen, 40 cm eninde ve 70 cm uzunluğunda elek yüzeyine sahip, 2 adet yüksek frekanslı motoru bulunan yüksek frekanslı titreşimli elek ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.3). Ultrasonik titreşimin etkisinin araştırıldığı deneylerde Ecotecne firmasında temin edilen 26,5 kHz frekans'a ve yaklaşık 80 watt güce sahip, 14 cm uzunluğunda ve 6 cm çapında korna tipi piezoelektrik ultrasonik transdüser (Şekil 5.4) ile 25 kHz frekans'a ve yaklaşık 500 watt güce sahip, 11

cm uzunluğunda ve 27 cm çapında tambur şekilli piezoelektrik ultrasonik transdüser kullanılmıştır (Şekil 5.5).



Şekil 5.3 : Yüksek frekanslı titreşimli susuzlandırma eleği.



Şekil 5.4 : Korna tipi ultrasonik titreşim cihazı.



Şekil 5.5 : Tambur tipi ultrasonik titreşim cihazı.

5.2.1.2 Deneylerde kullanılan reaktifler ve özellikleri

Reaktif ile yapılan susuzlandırma deneylerinde Cytec firmasına ait anyonik tip Aerodri 100-E ve Aerodri 104, katyonik tip Tetradecil Trimetil Amonyum Bromür ($C_{14}H_{29}(CH_3)_3NBr$), noniyonik tip Polietilen Glikol Monooleat ($C_{18}H_{33}O_2(C_2H_4O)_nH$) ve Hidrosis firmasından temin edilen yüksek molekül ağırlıklı Fusifloc 5922 anyonik tip flokülant kullanılmıştır. Yapılan çalışmalarda, yüzey aktif maddelerinin 20-500 g/t arasında kullanım miktarlarının olduğu tespit edilmiştir (Groppo ve diğ., 1999).

5.2.2 Yüzey geriliminin tayini

Yoğun bir fazın yüzey alanı arttığı zaman, atomları bir arada tutan fiziksel veya kimyasal bağlar kopar. Hiç bir atom veya molekül komşu atomlardan kendi kendine ayrılamayacağı için, yüzey alanının artışı esnasında sistem bir iş yapar. Atomların faz sınırlarının genişlemesine karşı gösterdiği direnç, yeni meydana gelen yüzeyin mümkün mertebe küçülmesine sebep olur. Atom veya moleküller arasında hareket kabiliyeti arttıkça, yani katıdan sıvıya gidildikçe, maddenin yüzeyini küçültmesi daha kolay olur. İki faz arasındaki arayüzeyin birim miktarda artışı ile yapılan tersinir işe yüzey gerilimi denir (Atak, 1982).

Çözünen tanecikler içindeki çözücü moleküllerinin yüzeydeki çözücü moleküllerini içe doğru çekmesini belli ölçüde engellediğinden çözeltilerin yüzey gerilimi saf çözücüye göre genellikle düşüktür.

Yüzey ve ara yüzey gerilimlerinin ölçümleri statik, koparma ve dinamik yöntemlerle gerçekleştirilir. Bu çalışmada değişik konsantrasyonlarda yüzey aktif madde içeren çözeltilerin yüzey gerilimleri Du-Nouy tensiyometresi kullanılarak halka koparma yöntemi ile ölçülmüştür (Şekil 5.6). Platin-iridyum halka sıvının içerisine tamamen daldırıldıktan sonra maksimum kuvvete erişine kadar yukarıya doğru çekilmiş, sıvıyla halkanın birbirinden ayrıldığı noktadaki kuvvet skaladan okunarak bulunmuştur. Bu değer saf su için 72,5 mN/m olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.6 : Yüzey geriliminin ölçüldüğü Du-Nou tensiyometresi.

5.2.3 Temas açısının tayini

Katıların ve ara yüzeylerin serbest yüzey enerjilerinin belirlenmesi için kullanılan standart yöntem ıslanma deneyleridir. Katıların yüzey özelliklerinin belirlenmesinde geniş çapta kullanılan ve günümüzde önemi gittikçe artan yöntem ise temas açısı yöntemidir.

Katı bir yüzeye sıvı damlatıldığında damla yüzeyde yayılır. Su damlasının şekli damlatılan katı malzemenin fiziksel ve kimyasal özelliklerine göre şekil alır. Su damlası hareket edene kadar 3 fazın yüzey gerilimleri toplamı sıfırdır. Yüzey gerilimi ve temas açısı arasındaki bağıntı aşağıda verilmektedir.

$$\cos \theta_c = \frac{\gamma_{KH} - \gamma_{SK}}{\gamma_{HS}} \quad (5.2)$$

Burada θ_c , temas açısı γ_{KH} katı-hava arasındaki yüzey gerilimi, γ_{SK} sıvı-katı yüzey gerilimi ve γ_{HS} hava-sıvı yüzey gerilimidir (Atak, 1982).

Yüksek temas açısı değeri, yüksek hidrofobisiteye sahip katı yüzeyini gösterir (Asmatülü, 2008). Katı/sıvı ara yüzeylerindeki temas açılarının belirlenmesi, hidrofobisite şartlarının etkin olduğu çeşitli endüstriyel uygulamalar için önemlidir. Bu endüstri dalları arasında yapıştırma, kaplama, baskı, boyama, yağlama, flotasyon,

flokülasyon, filtrasyon, koyulaştırma gibi cevher hazırlama teknikleri bulunmaktadır (Stroh ve Stahl, 1990).

Temas açıları genellikle, bir mineral yüzeyi üzerinde su damlası veya bir kabarcık temasının yaptığı açının hava veya sıvı fazdan ölçüldüğü “yerleştirilen damla= sessile drop” veya “tutsak hava kabarcığı=captive bubble technique” teknikleriyle tespit edilmektedir (Subrahmanyam ve diğ., 1996).

Bu çalışmalarda tutsak hava kabarcığı yöntemi kullanılarak kömür numunelerin temas açıları ölçülmüştür. Temas açısının ölçüldüğü goniometre Şekil 5.7’de verilmiştir. Yüzeyi zımparalanarak düzleştirilen ve parlatılan bu numuneler sıvı ortam içerisine daldırılmış, üzerlerine yapıştırılan hava kabarcığının katı ile yaptığı açı goniometre skalasında mikroskop yardımıyla tespit edilmiştir (Şekil 5.8).

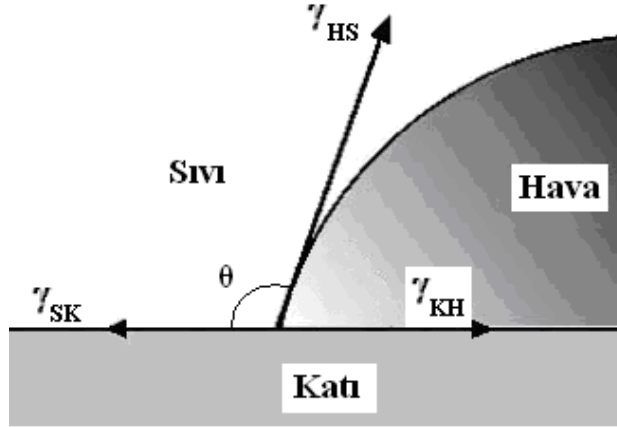


Şekil 5.7 : Temas açısının ölçüldüğü goniometre cihazı.

5.2.4 Numunenin elektrokinetik özelliklerinin tespiti

Katı bir madde su içine konulduğu zaman, ortamda başka iyonlar bulunmasa bile, katı maddeden suya geçen iyonlar ve sudaki H^+ ve OH^- iyonları nedeniyle katı madde yüzeyi pozitif veya negatif işaretli bir elektrik yük kazanır. Elektrik yüklü bir yüzey ile bunu çevreleyen ve çeşitli iyonları ihtiva eden çözeltinin birbirine nazaran

hareketleri elektrokinetik olayları meydana getirir. Yüzey ve zeta potansiyeli, elektriksel çift tabaka, Stern düzlemi, yaygın ve çift tabaka gibi olaylar elektrokinetiğin temel elemanlarıdır.



Şekil 5.8 : Temas açısının (θ) bulunması.

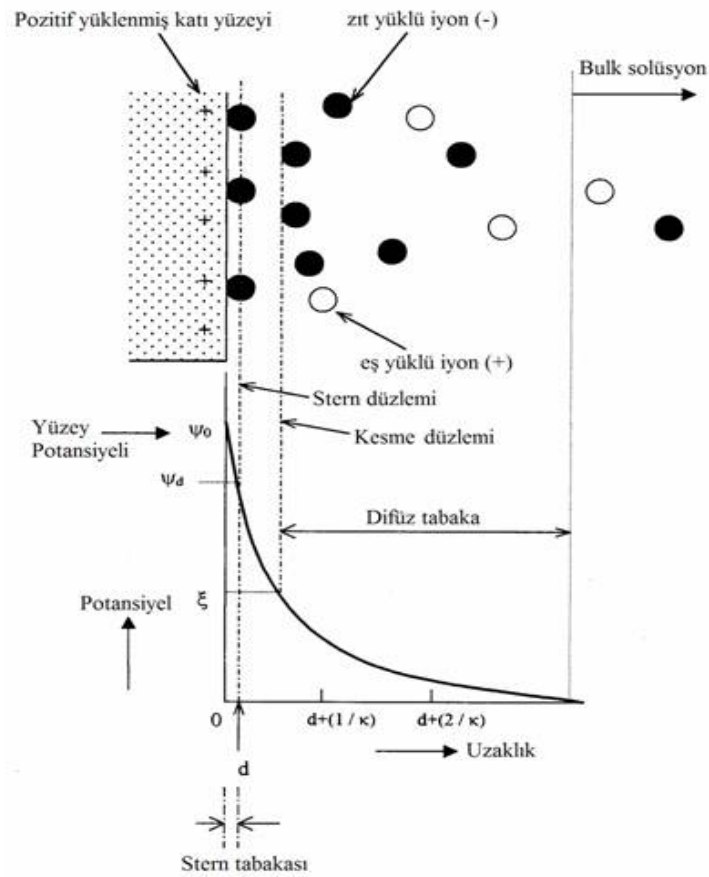
Her tane, potansiyeli tayin eden iyonlar nedeniyle, sıvı içerisinde bir elektrik yüküne sahiptir. Bu sayede, taneler birbirlerini iter veya çekerler. Örneğin negatif yüklü bir tane, sıvı içerisinde pozitif iyonları kendine çekerken, genel olarak katyonlar ve anyonlar bir denge halindedir. Tane yüzeyinde katyonlar en yoğun şekilde yer alırlar.

Tane yüzeyinden itibaren bir molekül kalınlığındaki tabakaya “Stern tabakası”; bu noktadan başlayıp anyon ve katyonların dengeye ulaştığı mesafeye kadar olan tabakaya “Yaygın tabaka” (diffuse layer); her ikisinin de birlikte olduğu sisteme ise “Elektriksel çift tabaka” denir. Şekil 5.9’da yüklü bir tane ve bunu çevreleyen çift tabaka görülmektedir.

Katı yüzeyinin ölçülebilen elektrik yüküne “elektrokinetik potansiyel” veya “zeta potansiyel (ζ)” adı verilir. Bu potansiyel, tane yüzeyinden bir molekül kalınlığı uzaklıkta bulunan ve Stern düzlemi olarak adlandırılan hayali kesme düzleminde ölçülebilen potansiyeldir. Zeta potansiyel değerini ölçmek için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler Mikroelektroforezis, Streaming Potansiyel, Elektroosmosis ve Sedimentasyon Potansiyelidir.

pH’ın bir fonksiyonu olarak çizilen zeta potansiyel değerlerinin oluşturduğu eğriye zeta potansiyel eğrisi adı verilir. Bu eğrinin pH eksenini kestiği noktada zeta potansiyel sıfır olmaktadır. Bu noktadaki pH değeri o malzeme için yükün sıfır olduğu nokta yani hareketin olmadığı pH değeridir. Bu noktaya sıfır yük noktası (iso electric point) yani eş yük noktası adı verilir. Oksit ve silikat

minerallerine uygulanan titrasyon yönteminde asit ve bazın titre edilmesi sonucu H^+ ve OH^- tüketimlerinin nötr olduğu pH değerine de sıfır yük noktası (zero point of charge) adı verilmektedir. Stern tabakasında özel bir adsorpsiyon olmadıkça zeta potansiyel değerleriyle elde edilen sıfır yük noktası (kısaca iep) ile titrasyon yöntemiyle elde edilen sıfır yük noktası (kısaca zpc) birbirine eşittir. Yani $zpc = iep$ 'dir. Buradaki özel adsorpsiyondan kasıt, kalsiyum, aliminyum ve magnezyum gibi çok değerlikli katyonlar ile sülfat ve fosfat gibi çok değerlikli anyonlar özel adsorpsiyona maruz kalmaktadırlar. Dolayısıyla bu tür yüksek değerlikli anyon ve katyonlar varlığında zpc ile iep birbirine eşit olmamaktadır.



Şekil 5.9 : Elektriksel çift tabaka.

Bu çalışmada zeta potansiyel ölçümleri, mikro işlem donanımlı mikroeletroforezis yöntemi ile çalışan Zeta Meter 3.0 cihazı ile yapılmıştır (Şekil 5.10). Cihaz, voltaj ve tane hızını dikkate alarak, zeta potansiyel değerini otomatik olarak hesaplayabilmektedir. Cihazın numune konulan hücresi pleksiglas'tan imal edilmiştir. Ölçüm işlerinde gerilim, iletkenliğe bağlı olarak ayarlanmıştır. 2,5'den daha düşük ve 11,5'den daha yüksek pH'larda iletkenlik yüksek olduğundan zeta potansiyel ölçümleri yapılmamıştır.

pH ayarlayıcı olarak HCl ile NaOH kullanılmıştır. Deneyler oda sıcaklığında ($25\pm 2^{\circ}\text{C}$) yapılmıştır. Değişik pH ve reaktif miktarlarında gerçekleştirilen zeta potansiyel ölçümlerinde yaklaşık $53\ \mu\text{m}$ altına indirilen numune 0,05 gr tartılarak 50 cc'lik beher içerisinde manyetik karıştırıcı ile 10 dakika karıştırılmıştır. Bu sürenin bitimini izleyen 10. dakikada berrak kısımdan numuneler alınmış ve ortalama 10 ölçüm yapılmıştır. Bütün ölçümlerde dengeleyici olarak $10^{-3}\ \text{M}$ NaCl çözeltisi kullanılmıştır.



Şekil 5.10 : Zeta Meter 3.0 cihazının görünümü.

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalarda; küçük boyutlu kömür içeren katı-sıvı karışımının mekanik titreşim ve ultrasonik titreşim kullanılarak, yüksek frekanslı titreşimli elek mekanizması ile susuzlandırılması amaçlanmıştır. İncelenen literatür çalışmalarında, kömür içeren süspansiyonlardaki tanelerin gözeneklik çapının susuzlandırmadaki rolünün çok önemli olduğu ortaya çıkmıştır. Bu sebeple kömürün gözeneklerinde hapsolmuş yüzey neminin bu çalışmada ilk defa kullanılan ve yatay titreşime ek olarak verilen dik ve açılı titreşim ile serbest bırakılması hedeflenmiştir.

Titreşimli elek kullanılarak yapılan deneyler sonucunda elde edilen nem değişimi incelenerek en uygun susuzlandırma koşulları ortaya konmuş, elek üzerine yerleştirilen ultrasonik titreşim yaratan transdüserin susuzlandırmadaki etkisi araştırılmış, süspansiyon içerisindeki kömür tanelerinin yüzey gerilimlerini düşürecek reaktiflerin ultrasonik titreşim yaratan sistemlerle kullanılmasıyla ortaya çıkan değişiklikler irdelenmiştir. Laboratuvar ölçekli olarak gerçekleştirilen bu deneylerde elde edilen veriler ışığında model fonksiyonları ve üç boyutlu grafikler oluşturulmuştur.

Ayrıca, yüksek frekanslı titreşimli elek kullanılarak yapılan susuzlandırma işlemleri sonucunda kömür içerisinde bulunan artık karakterdeki ince boyutlu kil ve şistlerin eleme yoluyla uzaklaştırılması ve susuzlandırılan malzemenin aynı zamanda zenginleştirilmesine yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Kömürde yapılacak yaklaşık %1 oranında nem düşüşünün bile, %4,5 oranında kül azalmasına eş değer miktarda ısı verim artışına sebep olacağı bilindiğine göre, yapılan deneyler sonucunda inilebilecek en düşük nem oranına ulaşılarak, elde edilecek temiz kömürün pazarlanabilmesi veya daha sonraki aşamalarda değerlendirilmesine olanak sağlanacaktır.

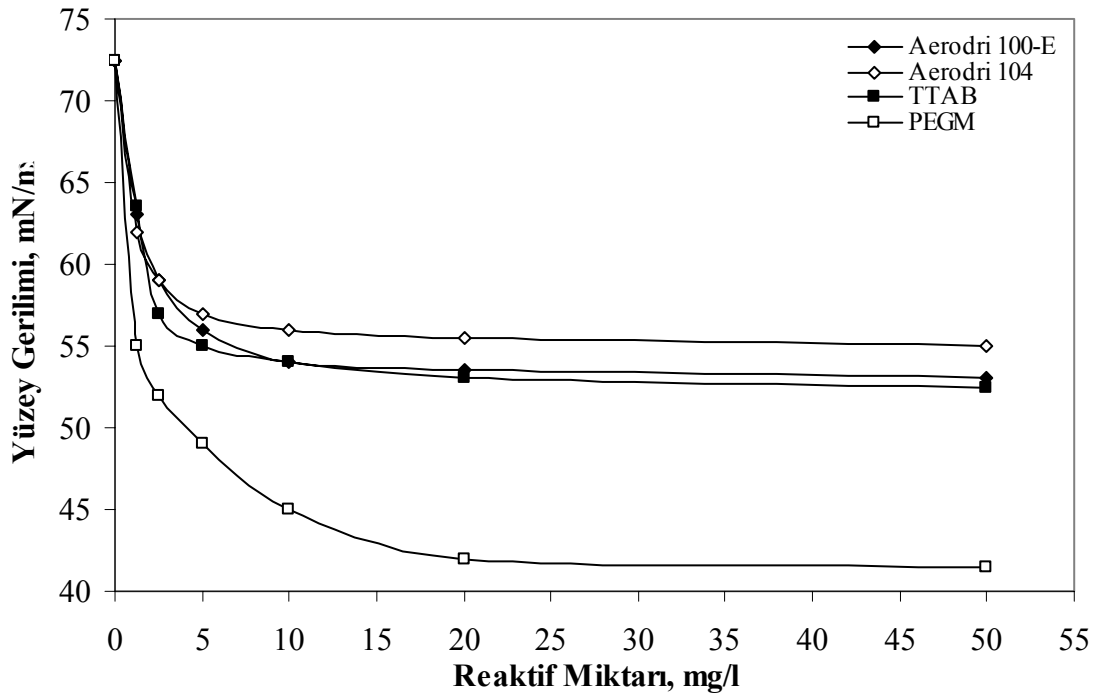
6.1 Yüzey Gerilimi Ölçümleri

Yüzey geriliminin çeşitli yüzey aktif maddelerin ilavesi ile azaltılarak susuzlandırma işlemlerinin veriminin arttırıldığı ve elde edilen ürünün nem içeriğinin düşürüldüğü

birçok araştırmacı tarafından belirtilmiştir (Singh, 1999; Asmatülü, 2008). Bu amaçla; Aerodri 100-E, Aerodri 104, TTAB ve PEGM kullanarak değişik reaktif konsantrasyonlarında yüzey gerilimi ölçümleri gerçekteşirilmiiştir. Bu ölçümler sonucunda elde edilen değerler Çizelge 6.1, bu değerlerin değişimi ise Şekil 6.1’de verilmektedir.

Çizelge 6.1 : Farklı reaktif miktarlarında elde edilen yüzey gerilimi değerleri.

Miktar, mg/l	Yüzey Gerilimi, mN/m			
	Aerodri 100-E	Aerodri 104	TTAB	PEGM
0	72,5	72,5	72,5	72,5
1,25	63	62	63,5	55
2,5	59	59	57	52
5	56	57	55	49
10	54	56	54	45
20	53,5	55,5	53	42
50	53	55	52,5	41,5

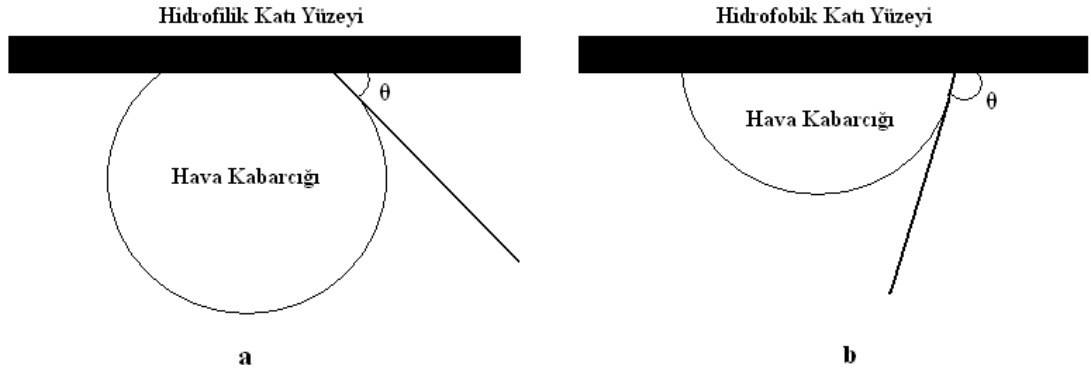


Şekil 6.1 : Farklı reaktif miktarlarında ölçülen yüzey gerilimi değerlerinin değişimi.

Şekil 6.1’de görüldüğü üzere, reaktif miktarının artmasıyla sıvının yüzey gerilimi düşmekte ve her bir reaktif için belli konsantrasyonda sabitlenmektedir. En fazla düşüş PEGM’in kullanıldığı durumda gerçekteşmiştir.

6.2 Temas Açısı Ölçümleri

Temas açısı ölçümlerinde kömür yıkama tesisinden alınan iri boyutlu temiz kömür numunesi kullanılmıştır. Çeneli kırıcı kullanılarak boyutu küçültülen kömür parçaları fiziksel farklılıklarına göre üç boyuta ayrılmıştır. A, B ve C olarak isimlendirilen bu temiz kömür numuneleri üzerinde kül, kükürt, sabit karbon, uçucu madde ve ısı değer analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçları, Malzeme ve Yöntem bölümünde gösterilmiştir. Temas açısı ölçümleri için numunelerin yüzeyleri kesilmiş, zımpara yardımıyla düzleştirilmiş ve parlatılmıştır. Yüzey parlatma işlemlerinden sonra numuneler sıvı ortam içerisine daldırılmış, üzerlerine yapıştırılan hava kabarcığının katı yüzeyi ile yaptığı açı tespit edilmiştir (Şekil 6.2). A, B ve C olarak isimlendirilen bu numunelerin temas açıları sırasıyla 61° , 59° ve 57° olarak bulunmuştur.



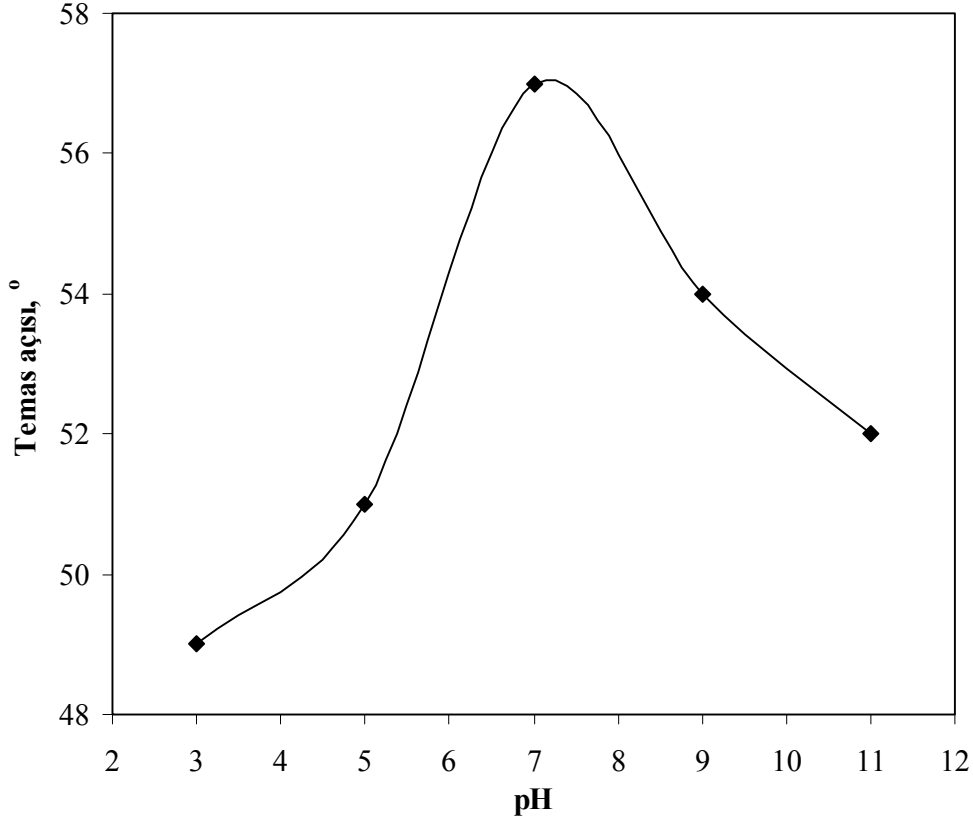
Şekil 6.2 : Goniometre kullanarak temas açısının bulunması.

Temas açısı değerlerinin farklı pH değerlerindeki değişimini araştırmak amacıyla C kodlu numune kullanılarak deneyler yapılmıştır. Ölçümler sonucunda elde edilen temas açıları değerleri Çizelge 6.2, temas açısı değerlerinin ve nem miktarının pH'a göre değişimi Şekil 6.3'te verilmektedir.

Çizelge 6.2 : Farklı pH değerlerinde yapılan temas açısı ölçümleri.

pH	Temas Açısı, °
3	49
5	51
7	57
9	54
11	52

Şekil 6.3'te görüldüğü üzere temas açısının en yüksek olduğu değer malzemenin doğal pH' olan 7 civarında elde edilmiştir. Daha asidik ve bazik koşullarda temas açısı değerlerinde düşüş gözlenmektedir.



Şekil 6.3 : Farklı pH değerlerinde bulunan temas açılarının değişimi.

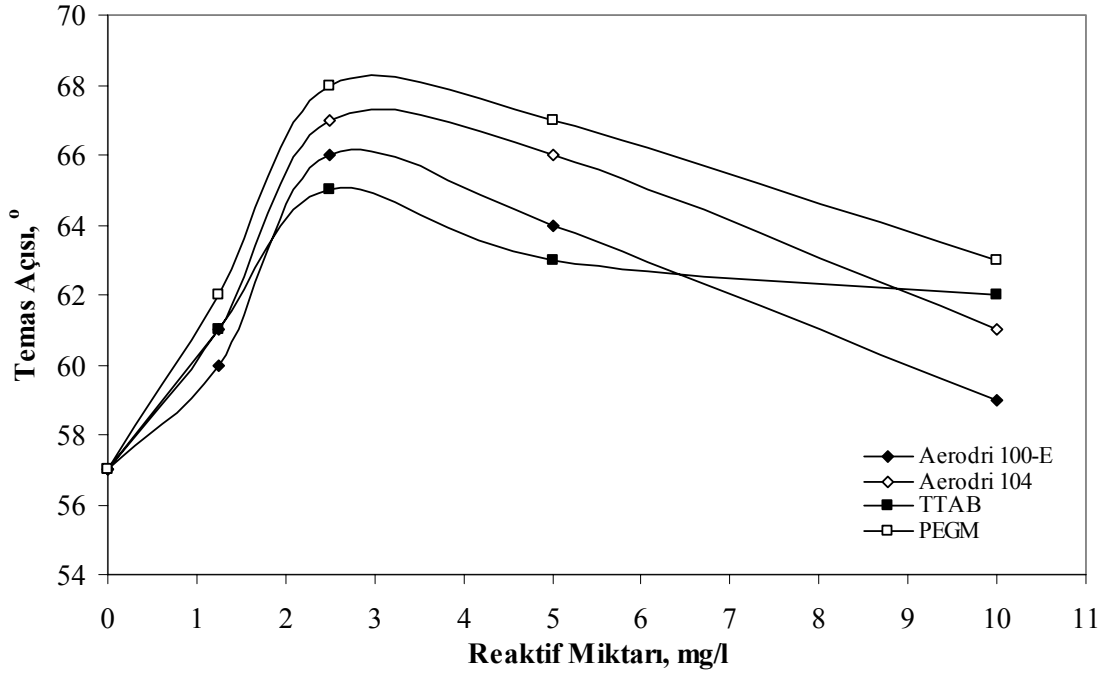
Reaktif ilavesinin temas açısı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla doğal pH'ta (7) farklı reaktif miktarlarında ölçümler gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümlerde elde edilen temas açısı değerleri Çizelge 6.3, temas açılarının değişimi ise Şekil 6.4'te verilmektedir.

Çizelge 6.3 : Farklı reaktif miktarlarında yapılan temas açısı ölçümleri.

Miktar, mg/l	Temas Açısı, °			
	Aerodri 100-E	Aerodri 104	TTAB	PEGM
0	57	57	57	57
1,25	60	61	61	62
2,5	66	67	65	68
5	64	66	63	67
10	59	61	62	63

Çizelge 6.3'teki sonuçlar incelendiğinde, 2,5 mg/l reaktif miktarında yapılan ölçümlerde temas açısı değerlerinin ortalama olarak 10° arttırdığı görülmektedir. Bu artışın nedeni kullanılan yüzey aktif maddelerin kömür yüzeyinde adsorplanması ve böylece hidrofobikliğin artmasıdır. 2,5 mg/l'den yüksek reaktif miktarlarında ise, temas açısı değerlerinde azalma görülmektedir.

Bu düşüşün sebebi ise, yüzeyleri tamamen kaplanan kömürün daha fazla yüzey aktif maddenin adsorplanmasına olanak vermemesi, çözelti içerisindeki reaktif miktarının artması sonucunda yüzeyde ikinci bir tabakanın oluşmasıdır.



Şekil 6.4 : Farklı reaktif miktarlarında ölçülen temas açılarının değişimi.

6.3 Zeta Potansiyel Ölçümleri

A, B ve C olarak kodlanmış numuneler ve bu numunelerin ağırlıkları oranlarında birleştirilmesiyle elde edilen ABC Karışım olarak isimlendirilmiş temiz kömür numuneleri üzerinde doğal pH'ta (7) zeta potansiyel ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümlerde elde edilen değerler Çizelge 6.4'te gösterilmiştir. Ölçüm metodu, Malzeme ve Yöntem bölümünde anlatılmıştır.

Çizelge 6.4 : Doğal pH'ta yapılan zeta potansiyel ölçüm değerleri.

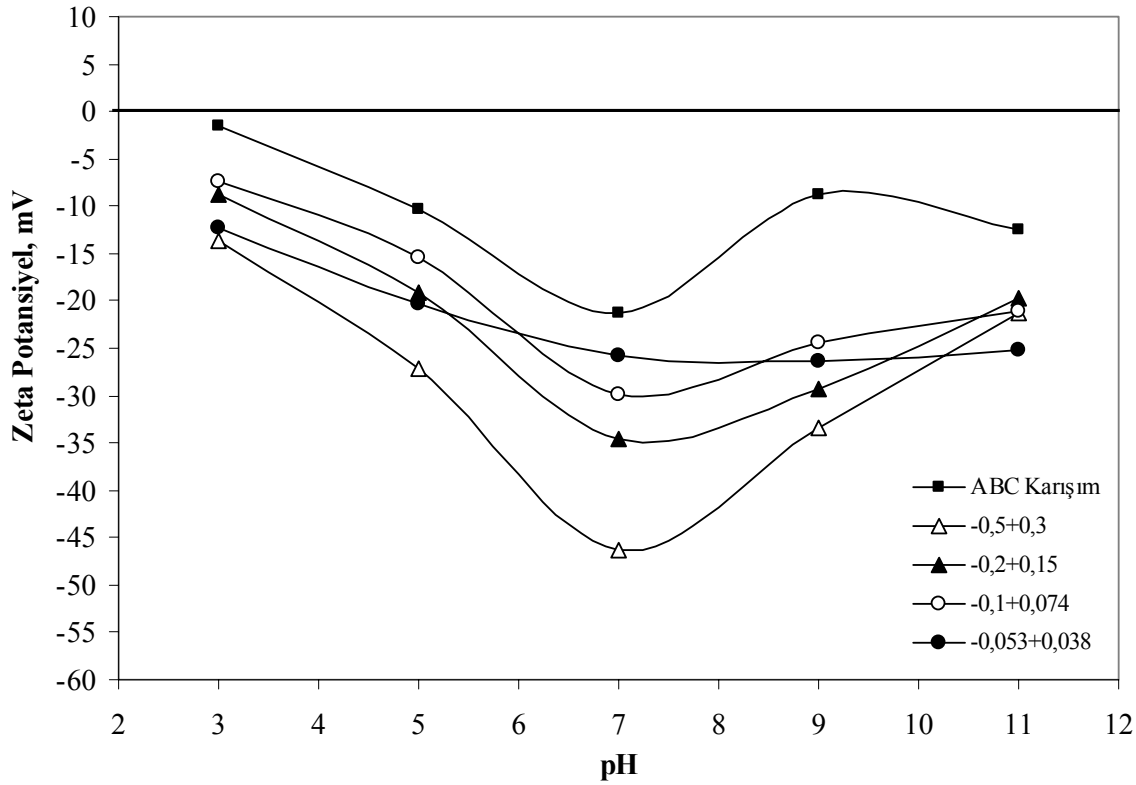
Numune	Zeta Potansiyel, mV
A	-28,7
B	-41,5
C	-24,2
ABC Karışım	-22,4

Değişik kül içeriklerine sahip malzemelerin zeta potansiyel değerlerinin tespiti amacıyla farklı pH değerlerinde ölçümler gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla kül içerikleri sırasıyla; %6,63; %17,10; %32,67; %60,79 ve %75,43 olan ABC karışım

ile $-0,5+0,3$; $-0,2+0,15$; $-0,1+0,074$; $-0,053+0,038$ boyut aralıklarındaki numuneler seçilmiştir. Sonuçlar Çizelge 6.5'te verilirken, zeta potansiyel değerlerinin değişimi ise Şekil 6.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 6.5 : Farklı pH değerlerinde yapılan deneylerde elde edilen zeta potansiyel değerleri.

pH	Zeta potansiyel, mV				
	ABC Karışım	$-0,5+0,3$	$-0,2+0,15$	$-0,1+0,074$	$-0,053+0,038$
3	-1,6	-13,7	-8,71	-7,34	-12,2
5	-10,4	-27,1	-19,1	-15,5	-20,3
7	-21,3	-46,4	-34,5	-29,8	-25,7
9	-8,85	-33,5	-29,3	-24,4	-26,3
11	-12,5	-21,3	-19,7	-21,1	-25,2



Şekil 6.5 : Farklı pH değerlerinde elde edilen zeta potansiyel değerlerinin değişimi.

Literatüre uyumlu olarak, ölçümleri yapılan düşük kömürleşme derecesine sahip kömür numunelerinin yüzey yükleri negatif olarak bulunmuştur (Quast ve Readett, 1987; Sabah ve diğ., 2004). Şekil 6.5'te görüldüğü üzere, yüksek ve düşük pH değerlerinde zeta potansiyel değerlerinde düşüş gözlenmiş, pH 7'de her bir grup için en yüksek zeta potansiyel değerine ulaşılmıştır.

En düşük kül içeriğine sahip ABC Karışım numunesinin zeta potansiyel değerlerinin değişimi incelendiğinde özellikle yüksek asidik koşullar altında yüzey yükünün sıfıra yaklaştığı görülmektedir. Bu durum düşük pH değerlerinde asidik fonksiyonel gruplarının iyonize olması, hidronyum iyonlarının kömür üzerinde adsorplanması ve kutupsallığı tersine çevirmesinden kaynaklanmaktadır (Quast ve Readett, 1987). Daha düşük pH değerlerinde yüzey yükünün şarjın sıfır noktasına yaklaşma eğilimi görülmektedir.

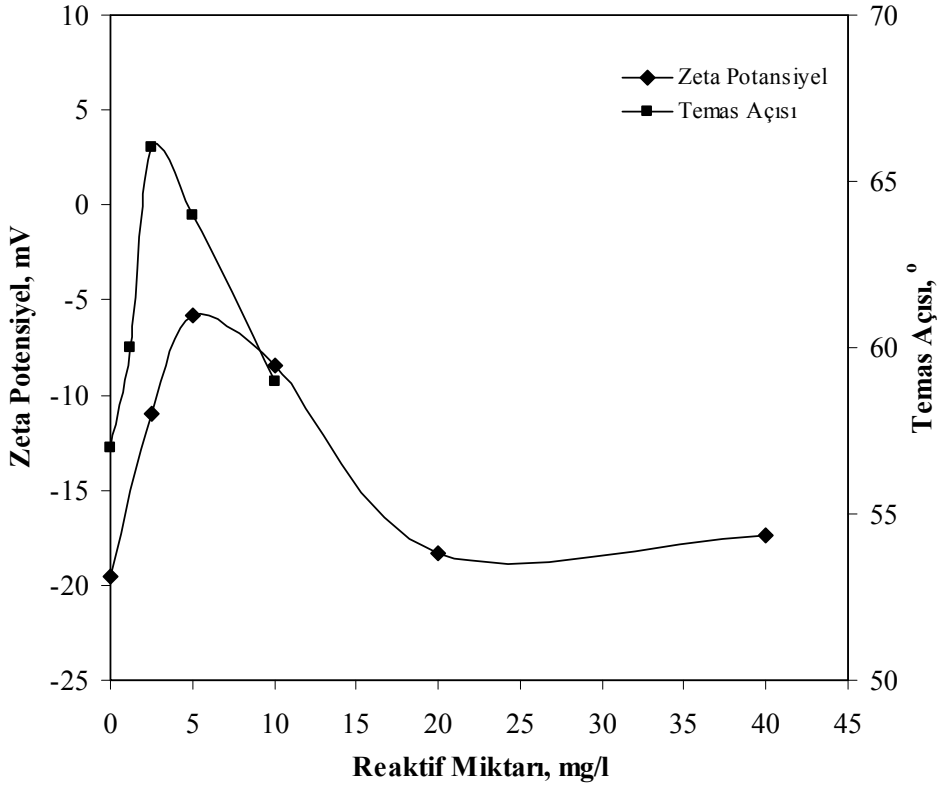
Reaktif ilavesinin zeta potansiyel üzerindeki etkisini incelemek amacıyla doğal pH'ta Aerodri 100-E, Aerodri 104, TTAB ve PEGM kullanarak ABC karışım numunesi üzerinde ölçümler yapılmıştır. Toplu sonuçlar Çizelge 6.6'da verilirken, zeta potansiyel ve temas açısı değerlerinin reaktif miktarına göre değişimi Şekil 6.6, 6.7, 6.8 ve 6.9'da gösterilmiştir.

Çizelge 6.6 : Farklı miktarlarda reaktif ilavesi ile yapılan zeta potansiyel ölçüm değerleri.

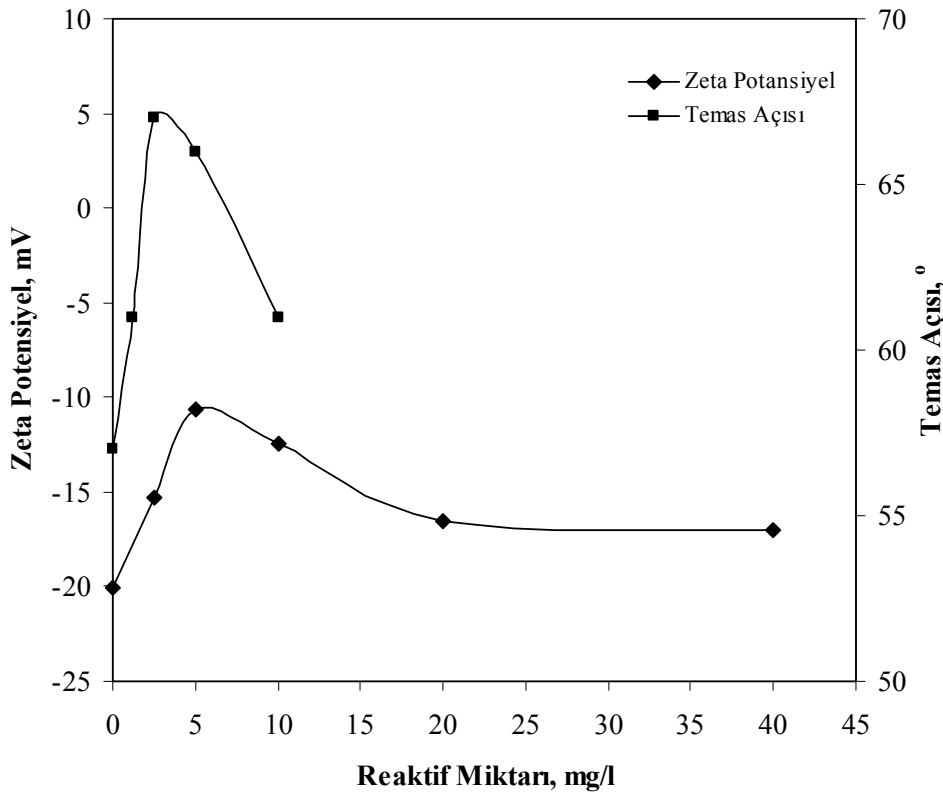
Miktar, mg/l	Zeta Potansiyel, mV			
	Aerodri 100-E	Aerodri 104	TTAB	PEGM
0	-19,5	-20,1	-20,3	-19,9
2,5	-11,0	-15,3	-22,4	-32,3
5	-5,8	-10,6	-32,8	-31,1
10	-8,4	-12,4	-29,8	-19,9
20	-18,3	-16,5	-17,7	-15,5
40	-17,4	-17,0	-7,7	-15,7
80	-	-	-9,2	-

Gerek anyonik gerekse katyonik tip reaktiflerde düşük konsantrasyonlarda yüzey yükünün değişimi beklentilerin tersi yönde gelişmektedir. Örneğin anyonik tip reaktiflerde yüzey yükü 5 mg/l değerine kadar pozitif olarak gelişmekte bu değer üstünde negatif olmaktadır.

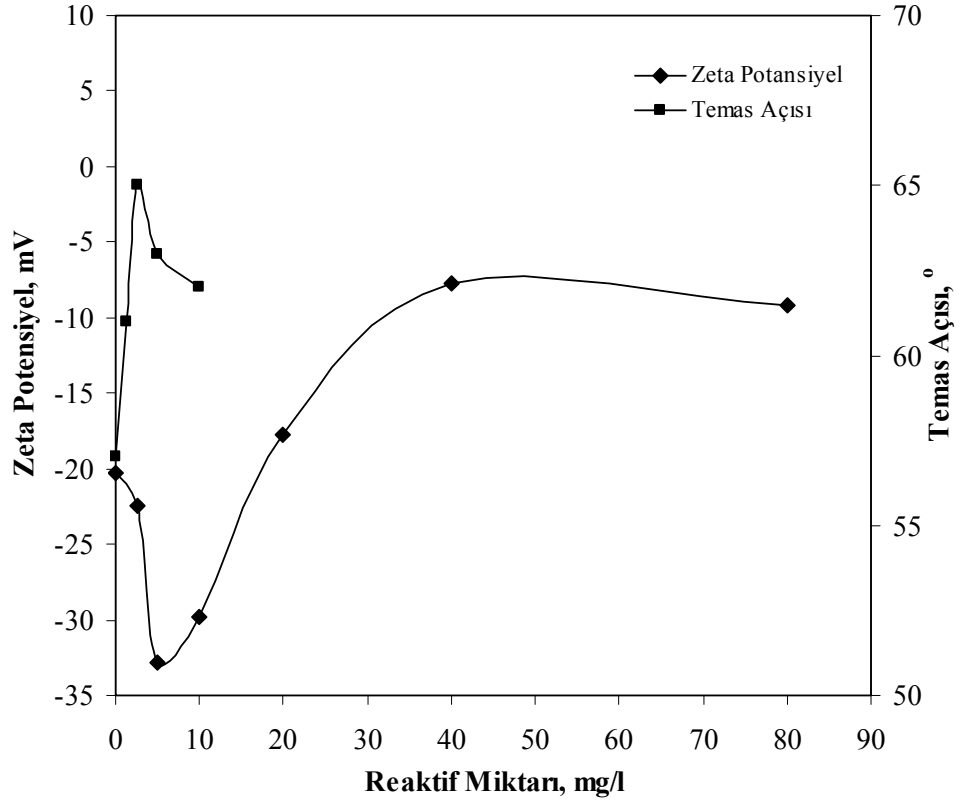
Katyonik ve noniyonik tip reaktiflerde ise, bu durumun tersi görülmektedir. Bu durumun reaktifin yüzeye olan adsorpsiyonu ile açıklanması mümkün görülmemektedir. Bu davranış temas açısı ölçümleri ile paralellik göstermekte olup, benzer şekilde belli bir reaktif konsantrasyonuna kadar temas açısı artmakta daha sonra azalmaya başlamaktadır.



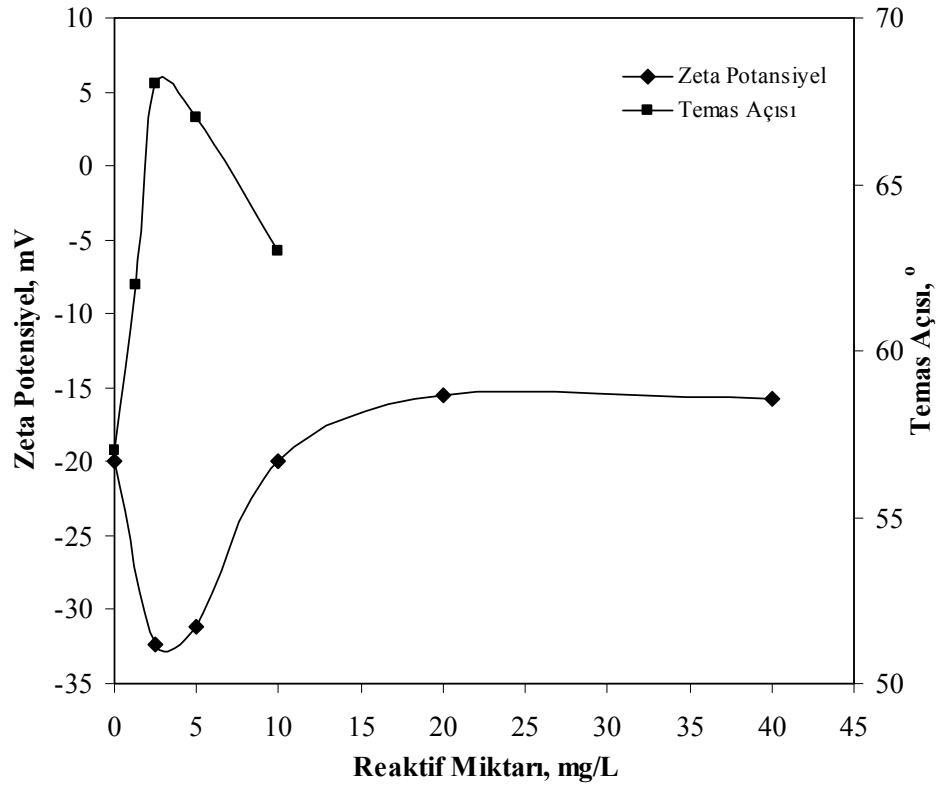
Şekil 6.6 : Aerodri 100-E ile yapılan ölçümlerde elde edilen zeta potansiyel değerlerinin değişimi.



Şekil 6.7 : Aerodri 104 ile yapılan ölçümlerde elde edilen zeta potansiyel değerlerinin değişimi.



Şekil 6.8 : TTAB ile yapılan ölçümlerde elde edilen zeta potansiyel değerlerinin değişimi.



Şekil 6.9 : PEGM ile yapılan ölçümlerde elde edilen zeta potansiyel değerlerinin değişimi.

6.4 Susuzlandırma Deneyleri

İlk aşamadaki susuzlandırma deneyleri, yüksek frekanslı titreşimli eleğin eğim, frekans, besleme hızı ve elek açıklığı gibi parametrelerinin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında sadece yatay titreşim veren yüksek frekanslı motor kullanılmıştır. Deneyler sonunda elde edilen ürünlerin nem analizleri ise, numunenin etüvde 105° C sıcaklıkta sabit ağırlığa gelene kadar kurutulması sonucunda belirlenmiştir. Aynı koşullarda tekrarlanan deneyler sonucunda elde edilen veriler kullanılarak gerçekleştirilen istatistiksel çalışmalara göre, nem değerlerinin doğruluk oranı %99'un üzerindedir.

6.4.1 Elek eğiminin tespiti

Titreşimli eleğin en uygun eğim değerinin belirlenmesi amacıyla, susuzlandırılacak malzemenin nem analizi yapılmış ve nem değeri %82,5 olarak bulunmuştur. Deneylerde titreşimli eleğin eğimi; 0, 2, 4, 6 ve 8° olarak seçilmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 6.7 ve Şekil 6.10'da verilmiştir.

Sabit tutulan şartlar;

Yatay Motor Frekansı : 50 Hz

Yatay Motor Kuvveti : 1,18 kN

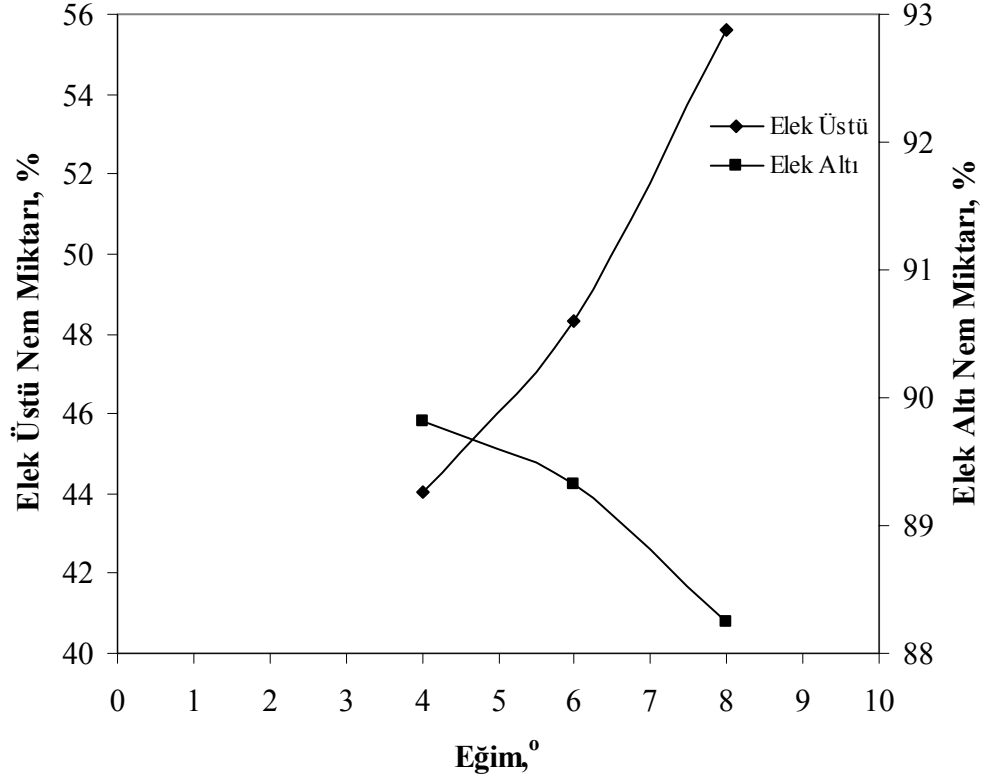
Elek Açıklığı : 0,150 mm

Besleme Hızı : 30 l/dk.

Çizelge 6.7 : Farklı elek eğimlerinde elde edilen nem değerleri.

Eğim, ^o	Nem Değerleri, %	
	Elek Üstü Ürün	Elek Altı Ürün
4	44,02	89,81
6	48,32	89,32
8	55,62	88,25

Elek eğiminin 4° olarak seçildiği durumda, bu deneylerde bulunan en düşük nem değeri olan %44,02'ye ulaşılmıştır. Elek eğiminin 0 ve 2° seçilmesi durumunda malzeme elek üzerinde taşınmamakta, yüksek eğim değerlerinde ise malzeme elek yüzeyini hızla terk etmekte, dolayısıyla elek üzerinden alınan malzemenin nem değeri de çok yüksek olmaktadır.



Şekil 6.10 : Eğimin nem değişimi üzerindeki etkisi.

6.4.2 Besleme hızının tespiti

Besleme hızının etkisinin incelenmesi amacıyla 10, 20, 30, 40 ve 50 litre/dakika değerlerinde deneyler gerçekleştirilmiş ve elde edilen nem değerleri Çizelge 6.8, nem miktarlarının değişimi ise Şekil 6.11’de gösterilmiştir.

Sabit tutulan şartlar;

Yatay Motor Frekansı : 50 Hz

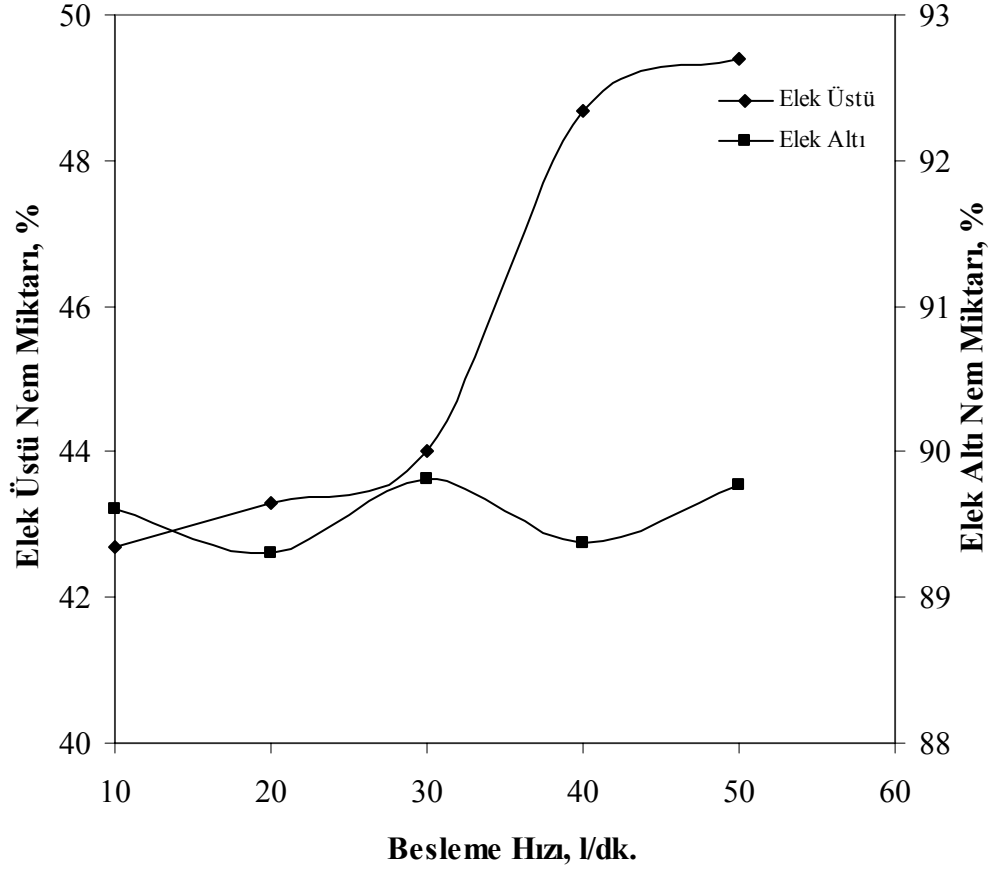
Yatay Motor Kuvveti : 1,18 kN

Elek Açıklığı : 0,150 mm

Elek Eğimi : 4°

Çizelge 6.8: Farklı besleme hızlarında elde edilen nem değerleri.

Besleme Hızı, litre/dakika	Nem Değerleri, %	
	Elek Üstü Ürün	Elek Altı Ürün
10	42,69	89,61
20	43,31	89,31
30	44,02	89,81
40	48,68	89,37
50	49,39	89,77



Şekil 6.11 : Besleme hızının nem değişimi üzerindeki etkisi.

En uygun besleme hızı değerinin tespiti için yapılan deneylerde en düşük nem değeri olan %42,69 besleme hızının 10 litre/dakika olduğu durumda ulaşılmıştır. Besleme hızının düşürülmesi ile elde edilen ürünün nem içeriğinde azalma gözlenmekte ve besleme hızının daha düşük değerlere çekilmesi durumunda daha az nem içerikli bir malzeme elde edileceği anlaşılmaktadır.

Fakat 20 litre/dakika besleme hızında elde edilen %43,31 nem değerinden sonra çok önemli bir düşüş olmadığından ve besleme hızı yaklaşık iki kat artacağından dolayı, en uygun besleme hızının bundan sonraki incelenecek parametrelerde 20 litre/dakika olarak seçilmesine karar verilmiştir.

6.4.3 Frekans değerinin tespiti

Titreşimli eleğin en uygun frekans değerinin belirlenmesi amacıyla 18, 26, 34, 42 ve 50 Hz frekans değerlerinde deneyler yapılmıştır. Elde edilen nem değerleri Çizelge 6.9 ve nem miktarlarının değişimi Şekil 6.12’de gösterilmiştir.

Sabit tutulan şartlar;

Yatay Motor Kuvveti : 1,18 kN

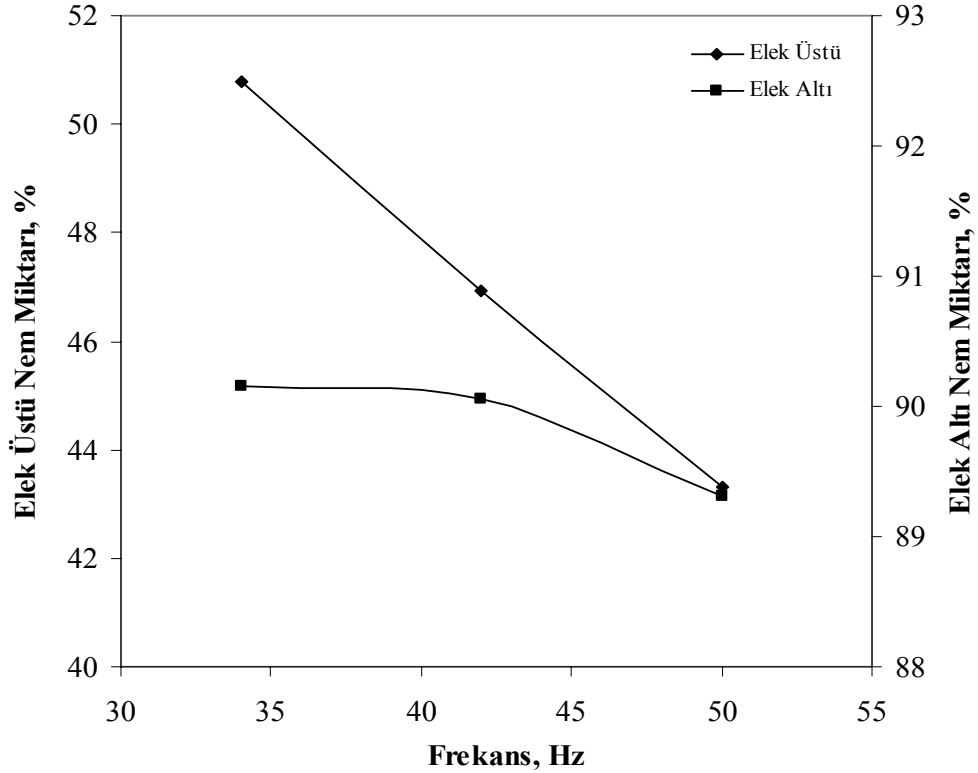
Besleme Hızı : 20 l/dk.

Elek Açıklığı : 0,150 mm

Elek Eğimi : 4°

Çizelge 6.9 : Farklı frekans değerlerinde elde edilen nem değerleri.

Frekans, Hz	Nem Değerleri, %	
	Elek Üstü Ürün	Elek Altı Ürün
36	50,77	90,16
42	46,92	90,06
50	43,31	89,31



Şekil 6.12 : Frekansın nem değişimi üzerindeki etkisi.

Yapılan susuzlandırma deneylerinde 18 ve 26 Hz frekans değerlerinde malzeme elek yüzeyinden taşınmamıştır. Deney sonuçlarında görüldüğü üzere frekans değerinin artması ile nem değerinde düşüş gözlenmiş, titreşimli eleğin çıkabileceği en yüksek frekans değeri olan 50 Hz frekans değerinde %43,31 nem oranına ulaşılmıştır. Şekil 6.12'deki sonuçlara göre frekans'ın daha yüksek değerlere çıkartılabildiği durumunda, nem oranının daha düşük değerlere indirilebileceği izlenimi elde edilmektedir.

6.4.4 Elek açıklığının tespiti

Elek açıklığının susuzlandırmaya etkisinin incelenmesi amacıyla, daha önceden bulunan en uygun koşullarda 53, 74, 100, 150 ve 210 µm elek açıklığına sahip elek yüzeyleri kullanılarak susuzlandırma deneyleri yapılmıştır. Elde edilen nem değerleri Çizelge 6.10 ve nem miktarlarının değişimi Şekil 6.13'te gösterilmiştir.

Sabit tutulan şartlar;

Elek Eğimi : 4°

Besleme Hızı : 20 l/dk.

Yatay Motor Frekansı : 50 Hz

Yatay Motor Kuvveti : 1,18 kN

Çizelge 6.10 : Farklı elek açıklıklarında elde edilen nem değerleri.

Elek Açıklığı, µm	Nem Değerleri, %	
	Elek Üstü Ürün	Elek Altı Ürün
53	63,58	91,71
74	54,01	91,43
100	44,77	91,03
150	43,31	89,31
210	43,15	89,21

Çizelge 6.10'da görüldüğü üzere elek açıklığının artmasıyla nem oranı düşmektedir. Bu düşüşün sebebi ise büyük yüzey alanına ve yüksek nem tutma kabiliyetine sahip küçük boyutlu malzemenin elek altına daha fazla geçmesi, elek üzerinden alınan ürünün nem içeriğinin azalmasıdır. 74 ile 100 mikron elek açıklığında yapılan deneylerden elde edilen nem miktarları arasında yaklaşık %10 fark gözlenmektedir. 100 mikron'dan büyük elek açıklıklarında bu fark giderek azalmaktadır. Bundan dolayı 100 mikron bir sonraki deneyler için en uygun elek açıklığı olarak seçilmiştir. Bu deneylerde, elek altına geçen katı miktarı 53, 74, 100, 150 ve 200 mikron elek yüzeyleri için sırasıyla %12,9; %19,4; %25,2; %47,2 ve % 62,4 olmuştur.

6.4.5 Yatay titreşime dik titreşim mekanizmasının ilave edilmesinin susuzlandırma üzerine etkisi

Bu deneylerde elek üzerine eklenen ve dik titreşim uygulayan titreşim ünitesi yatay titreşim sağlayan motor ile birlikte kullanılmıştır. Daha önceki deneylerde bulunan en iyi şartlar sabit tutularak; 53, 74, 100, 150 ve 210 µm elek açıklıklarında dik titreşimin etkisi

incelenmiştir. Deneye ait nem değerleri Çizelge 6.11 ve nem miktarlarının değişimi Şekil 6.14'te gösterilmiştir.

Sabit tutulan şartlar;

Besleme Hızı : 20 l/dk.

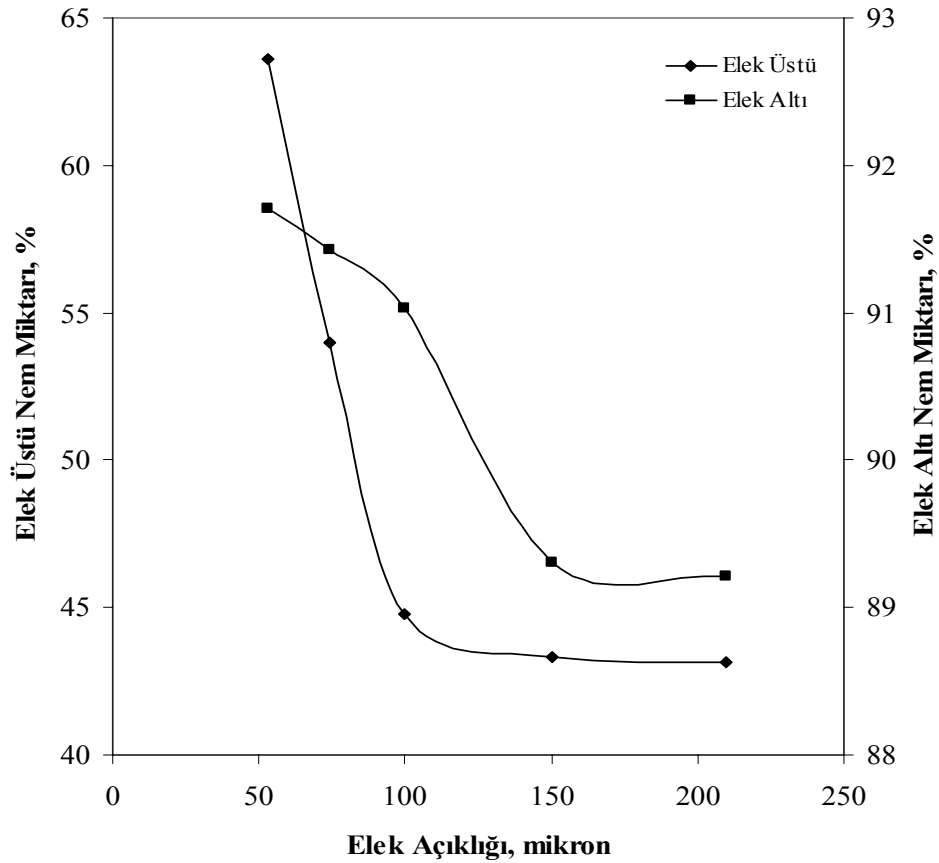
Elek Eğimi : 4°

Yatay Motor Frekansı : 50 Hz

Yatay Motor Kuvveti : 1,18 kN

Dik Motor Frekansı : 50 Hz

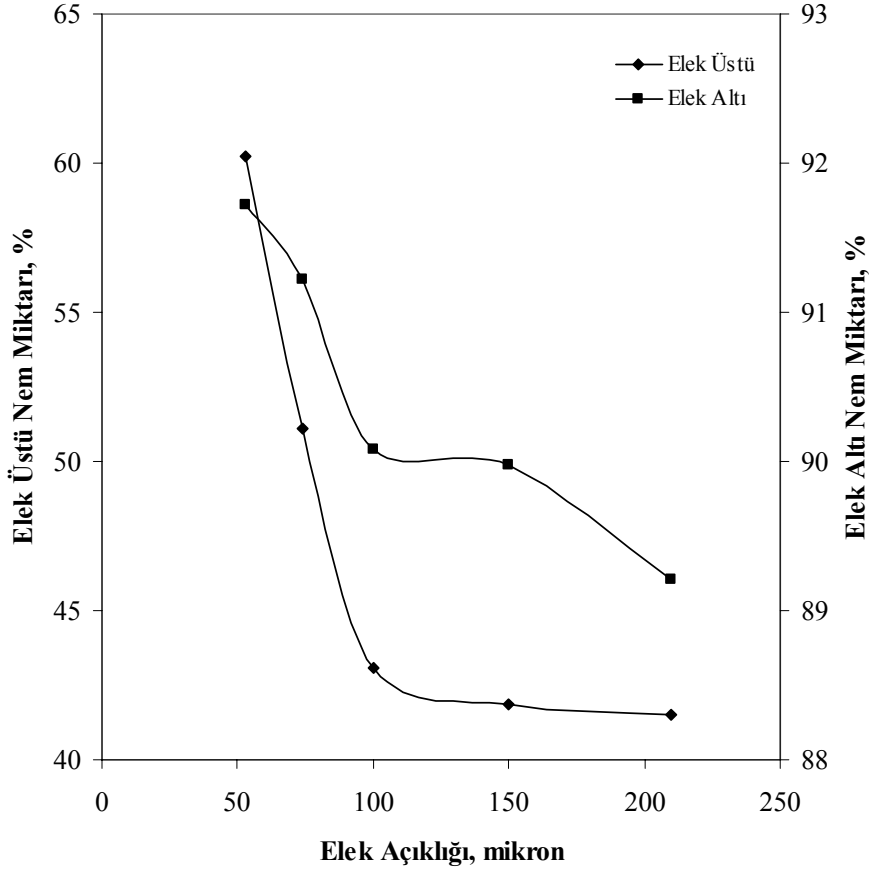
Dik Motor Kuvveti : 1,18 kN



Şekil 6.13 : Elek açıklığının nem değişimi üzerindeki etkisi.

Çizelge 6.11 : Farklı elek açıklıklarında yatay titreşim+dik titreşim ile yapılan deneylerde elde edilen nem değerleri.

Elek Açıklığı, µm	Nem Değerleri, %	
	Elek Üstü Ürün	Elek Altı Ürün
53	60,23	91,72
74	51,11	91,22
100	43,08	90,08
150	41,88	89,98
210	41,53	89,19



Şekil 6.14 : Yatay titreşim+dik titreşimin farklı elek açıklıklarında nem değişimi üzerindeki etkisi.

Titreşimli elek üzerine yerleştirilen ve dik titreşim uygulayan titreşim mekanizmasının titreşimli elek ile birlikte kullanılması sonucu, nem oranı %44,77'den %43,08 değerine indirilmiştir. Yaklaşık %1,7'lik nem düşüşünün elde edildiği bu sistemde, yukarı-aşağı uygulanan dik titreşimin elek yüzeyinde bulunan kömür taneleri üzerinde zıplama etkisi doğurarak, bu tanelerin elek yüzeyine ve birbirlerine çarpmasına, böylece daha etkin bir şekilde susuzlandırılmasına olanak verdiği anlaşılmaktadır. Deneysel çalışmalar sırasında elde edilen sonuçlar ve yapılan gözlemler, uygulanan dik titreşim mekanizmasının susuzlandırmada oldukça etkin olabileceğini göstermiştir.

6.4.6 Motor kuvveti arttırılmış yatay titreşim ile yapılan deneylerin susuzlandırma üzerindeki etkisi

1,18 kN kuvvetindeki yatay titreşim motoru 4^oden düşük eğimlerde malzemenin taşınmasına olanak vermediğinden frekans değeri bir önceki motorla aynı, fakat kuvveti 7,48 kN olan yatay titreşim motoru ile susuzlandırma deneyleri

gerçekleştirilmiştir. Deneylerde titreşimli eleğin eğimi; 0, 1, 2, 3, 4, 6 ve 8° derece olarak seçilmiş ve elde edilen sonuçlar Çizelge 6.12 ve nem miktarlarının değişimi ise Şekil 6.15’te verilmiştir.

Sabit tutulan şartlar;

Besleme Hızı : 20 l/dk.

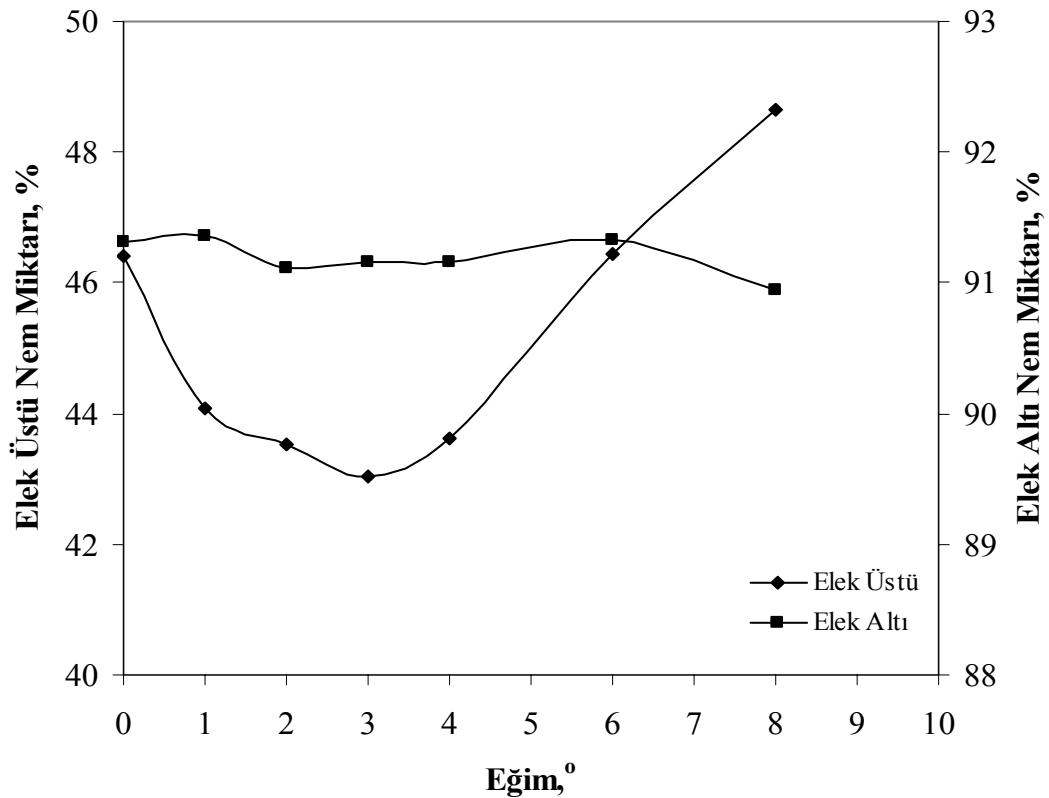
Elek Açıklığı : 0,100 mm

Yatay Motor Frekansı : 50 Hz

Yatay Motor Kuvveti : 7,48 kN

Çizelge 6.12 : Farklı elek eğimlerinde motor kuvveti artırılmış yatay titreşim ile yapılan deneylerden elde edilen nem değerleri.

Eğim,°	Nem Değerleri, %	
	Elek Üstü Ürün	Elek Altı Ürün
0	46,40	91,32
1	44,08	91,36
2	43,91	91,11
3	43,04	91,16
4	43,61	91,16
6	46,43	91,33
8	48,64	90,95



Şekil 6.15 : Arttırılmış yatay motor kuvvetinin farklı eğimlerde nem değişimi üzerindeki etkisi.

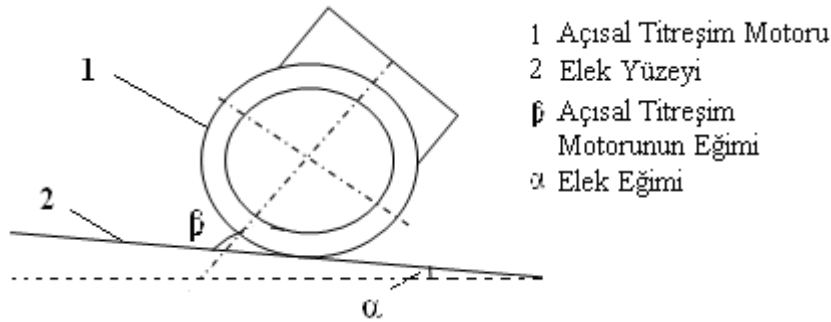
Şekil 6.15'te görüldüğü üzere elek eğiminin 3° seçildiği durumda en düşük nem değeri olan %43,04'e ulaşılmıştır. Daha düşük eğimlerde malzeme elek üzerine yayılamamakta ve etkin bir susuzlandırma işlemi yapılamamaktadır. 3° 'den yüksek eğimlerde ise nem oranı düzenli olarak artmaktadır. Bunun sebebi ise malzemenin artan eğimle birlikte eleği daha hızlı terketmesi ve bu süre zarfına etkin bir susuzlandırma işleminin yapılamamasıdır. Motor kuvvetinin 1,18 kN, besleme hızının 20 l/dakika, elek açıklığının 0,100 mm ve eğimin 4° olduğu deneyde elde edilen %44,77 nem oranı, sadece motor kuvvetinin artırılması sayesinde %43,61'e kadar gerilemiştir.

6.4.7 Açısal titreşim ile yapılan susuzlandırma deneyleri

Bu deneylerde titreşimli elek üzerine yerleştirilen ve elek yüzeyine değişik açılarda ayarlanabilen titreşim motorunun susuzlandırma üzerindeki etkisi araştırılmıştır (Şekil 6.16). Motorunun elek yüzeyi ile yaptığı açı, 30° , 60° , 90° , 120° ve 150° olarak seçilmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 6.13 ve Şekil 6.17'de verilmiştir.

Sabit tutulan şartlar;

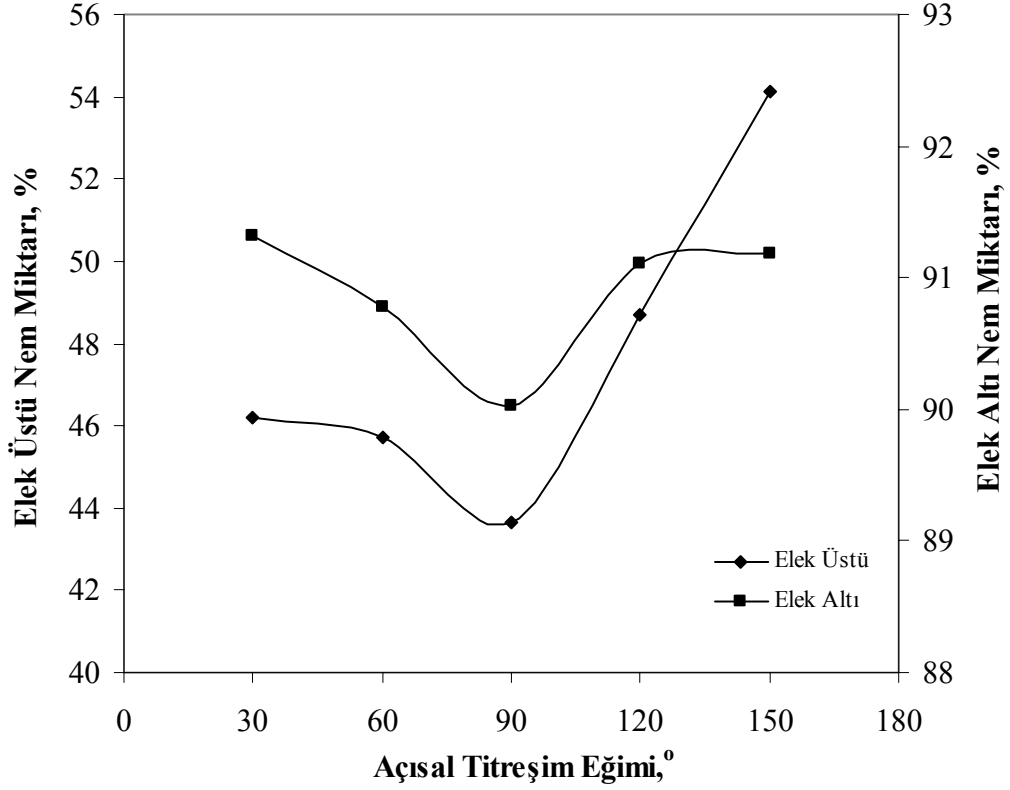
Besleme Hızı	: 20 l/dk.	Elek Eğimi	: 3°
Elek Açıklığı	: 0,100 mm	Açısal Motor Kuvveti	: 1,18 kN
Açısal Motor Frekansı	: 50 Hz		



Şekil 6.16 : Açısal titreşim motorunun şematik olarak gösterimi.

Çizelge 6.13 : Açısal titreşim ile farklı eğimlerde elde edilen nem değerleri.

Eğim, °	Nem Değerleri, %	
	Elek Üstü Ürün	Elek Altı Ürün
30	46,22	91,32
60	45,71	90,78
90	43,64	90,02
120	48,68	91,11
150	54,11	91,18



Şekil 6.17 : Açısal titreşimin nem değişimi üzerindeki etkisi.

Sadece açısal titreşim motorunun kullanıldığı bu deneylerde en iyi sonuç olan %43,64'e motor ile elek arasındaki açının 90° olduğu durumda ulaşılmıştır. Bu değerden düşük ve yüksek eğim değerlerinde susuzlandırmanın etkin olamamasının nedeni elek genliğinin artması ve buna bağlı olarak kömür tanelerinin eleği hızlı olarak terk etmesidir.

6.4.8 Yatay titreşim+açısal titreşim ile yapılan susuzlandırma deneyleri

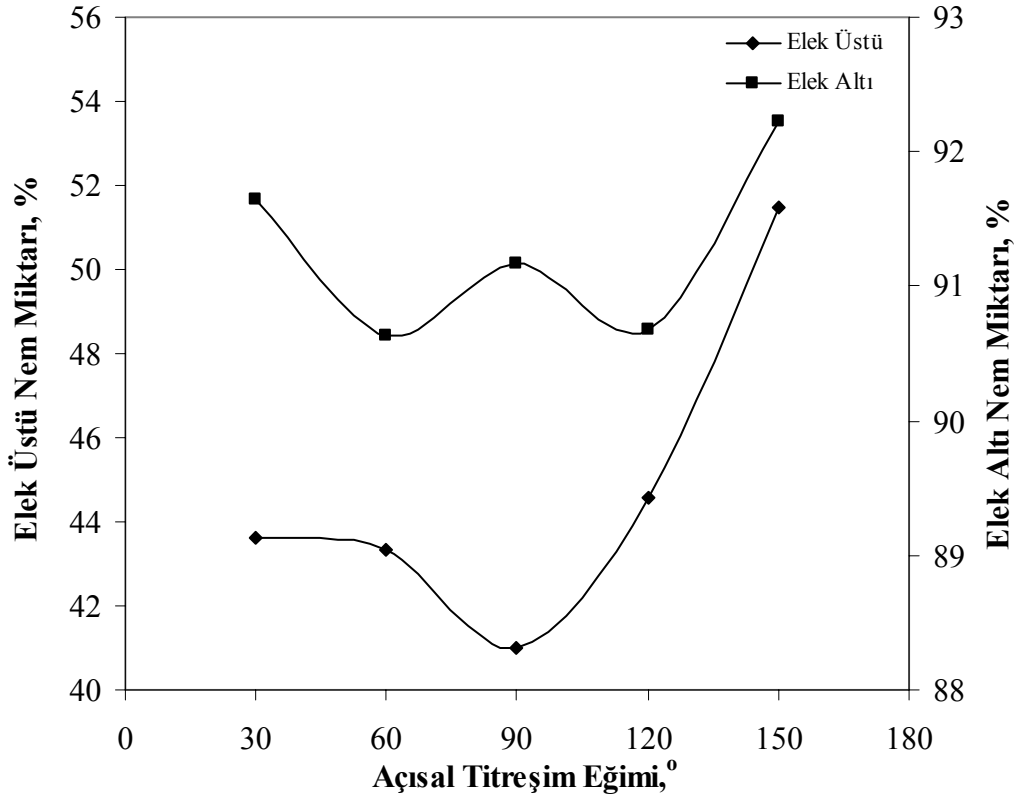
Bu deneylerde yatay titreşim motoru ile birlikte kullanılan açısal titreşim motorunun susuzlandırma üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Açısal titreşim motorunun elek yüzeyi ile yaptığı açı, 30, 60, 90, 120 ve 150° olarak seçilmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 6.14 ve Şekil 6.18'de verilmiştir.

Sabit tutulan şartlar;

Besleme Hızı	: 20 l/dk.	Elek Açıklığı	: 0,100 mm
Elek Eğimi	: 3°	Yatay Motor Frekansı	: 50 Hz
Yatay Motor Kuvveti	: 7,48 kN	Açısal Motor Frekansı	: 50 Hz
Açısal Motor Kuvveti	: 1,18 kN		

Çizelge 6.14 : Yatay titreşim+açısal titreşim ile yapılan deneylerde elde edilen nem değerleri.

Eğim, °	Nem Değerleri, %	
	Elek Üstü Ürün	Elek Altı Ürün
30	43,62	91,64
60	43,32	90,64
90	41,00	91,17
120	44,57	90,68
150	51,47	92,22



Şekil 6.18 : Yatay titreşim+açısal titreşimle yapılan deneylerin nem değişimi üzerindeki etkisi.

Açısal titreşim uygulayan motorun yatay titreşimli motor ile birlikte kullanılması sonucunda 90°'de %41,00 nem değerine ulaşılmıştır. Sadece yatay titreşim sağlayan motorun kullanıldığı deney sonuçları ile kıyaslandığında yaklaşık %2 oranında nem düşüşünün elde edildiği görülmektedir. Daha sonraki deneylerde bu iki çeşit motor birlikte kullanılmıştır.

6.4.9 Beslenen malzemedeki nem içeriğinin susuzlandırma üzerindeki etkisi

Değişik nem içeriklerine sahip malzemeyle yapılan beslemenin susuzlandırma üzerindeki etkisinin araştırılması amacıyla daha önceki deneylerde bulunan en iyi

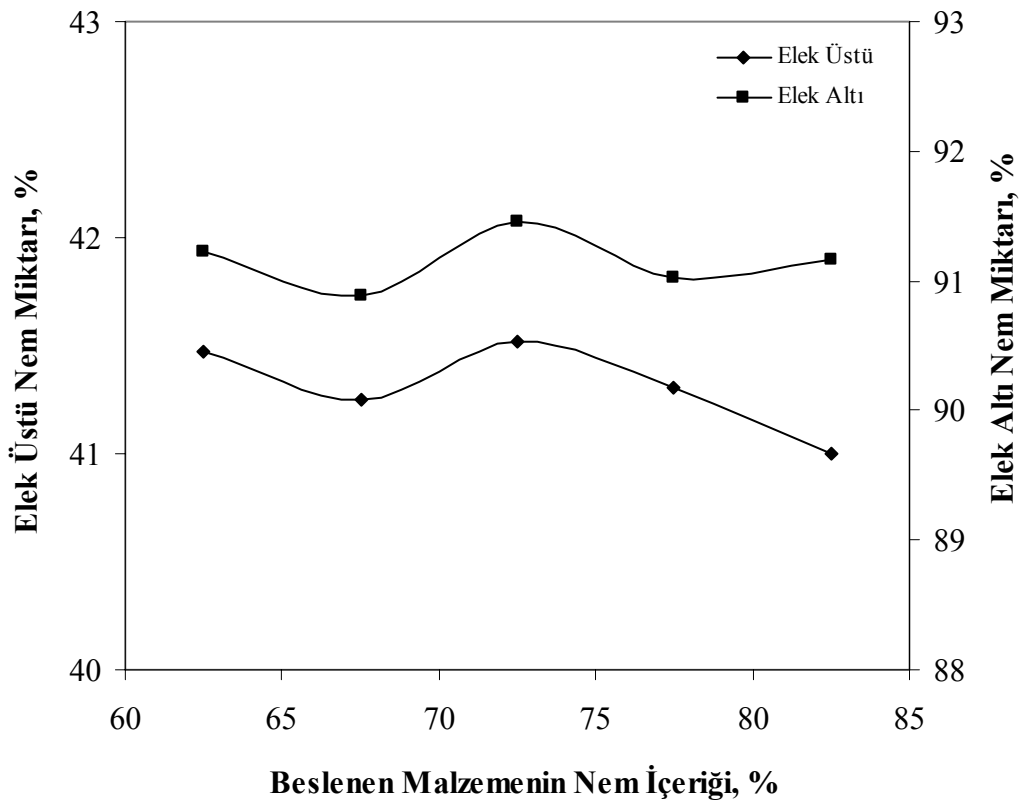
koşullar sabit tutularak deneyler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 6.15 ve Şekil 6.19’da verilmiştir.

Sabit tutulan şartlar;

Besleme Hızı	: 20 l/dk.	Elek Açıklığı	: 0,100 mm
Elek Eğimi	: 3°	Açısal Motor Eğimi	: 90°
Yatay Motor Kuvveti	: 7,48 kN	Yatay Motor Frekansı	: 50 Hz
Açısal Motor Kuvveti	: 1,18 kN	Açısal Motor Frekansı	: 50 Hz

Çizelge 6.15 : Farklı nem içeriklerinde yapılan besleme sonucunda elde edilen nem değerleri.

Beslenen Malzemenin Nem İçeriği, %	Nem Değerleri, %	
	Elek Üstü Ürün	Elek Altı Ürün
62,5	41,47	91,22
67,5	41,25	90,88
72,5	41,52	91,45
77,5	41,31	91,02
82,5	41,00	91,17



Şekil 6.19 : Beslenen malzemedeki nem içeriğinin nem değişimi üzerindeki etkisi.

Şekil 6.19’da görüldüğü gibi %62,5 ve %82,5 nem içerikleri arasında beslenen malzemenin susuzlandırma deneyleri sonrasında elde edilen sonuçları birbirlerine çok yakındır. Beslenen malzemenin nem oranının susuzlandırma üzerinde etkisi bulunmamaktadır.

6.4.10 Reaktif ilavesi olmadan pH’ın etkisinin incelendiği deneyler

Bu deneylerde reaktif ilavesi olmadan daha önce bulunan en iyi koşullarda 3,5; 5,5; 7,25; 9,5 ve 11,5 pH değerlerinde susuzlandırma deneyleri yapılmıştır. Elde edilen nem değerleri Çizelge 6.16’da, nem miktarlarının ve temas açısı değerlerinin pH’a göre değişimi Şekil 6.20’de gösterilmiştir.

Sabit tutulan şartlar;

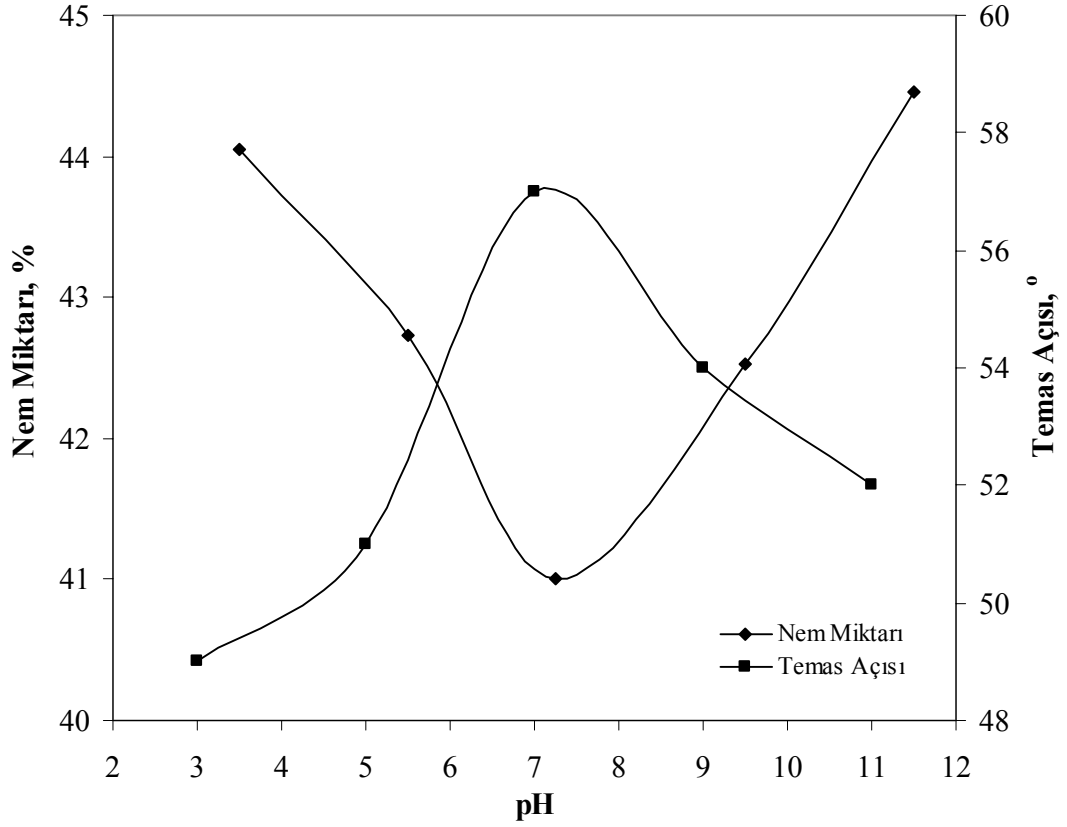
Besleme Hızı	: 20 l/dk.	Elek Açıklığı	: 0,100 mm
Elek Eğimi	: 3°	Açısal Motor Eğimi	: 90°
Yatay Motor Kuvveti	: 7,48 kN	Yatay Motor Frekansı	: 50 Hz
Açısal Motor Kuvveti	: 1,18 kN	Açısal Motor Frekansı	: 50 Hz

Çizelge 6.16 : Farklı pH değerlerinde reaktif ilavesi olmadan yapılan deneylerde elde edilen nem değerleri.

pH	Nem Değerleri, %	
	Elek Üstü Ürün	Elek Altı Ürün
3,5	44,05	91,59
5,5	42,73	91,38
7,25	41,00	91,17
9,5	42,53	91,49
11,5	44,45	91,81

Farklı pH değerlerinde yapılan susuzlandırma deneylerinden elde edilen sonuçlar incelendiğinde, en düşük nem miktarı olan %41,00’e literatüre uyumlu olarak pülp’ün doğal pH’ında ulaşıldığı görülmüştür (Singh, 1999; Sabah ve Erkan, 2006).

Temas açısı ve nem oranları arasında ters bir durum gözlenmektedir. Temas açısının artmasıyla nem oranı azalmakta, daha düşük ve yüksek pH değerlerinde ise temas açısı düşmektedir.



Şekil 6.20 : pH'nin nem değişimi üzerindeki etkisi.

6.5 Reaktif İlavesinin Etkisinin Araştırıldığı Susuzlandırma Deneyleri

-0,5 mm boyutundaki kömür numunesinin susuzlandırılmasında reaktif ilavesinin etkisinin incelenmesi amacıyla, sırasıyla; Cytec firmasına ait anyonik tip Aerodri 100-E ve Aerodri 104, katyonik tip Tetradecil Trimetil Amonyum Bromür (TTAB), noniyonik tip Polietilen Glikol Monooleat (PGEM) ve Hidrosis firmasından temin edilen yüksek molekül ağırlıklı Fusifloc 5922 anyonik tip flokülant kullanılarak deneyler yapılmıştır.

Reaktif ilavesinin susuzlandırmaya etkisinin araştırıldığı bu deneylerde önce en uygun reaktif miktarı tespit edilmiş daha sonra her bir reaktif için karıştırma süreleri bulunmuştur. Karıştırma süresinin tespitinden sonra değişik pH değerlerinde deneyler yapılarak en uygun susuzlandırma koşulları tespit edilmiştir. Yapılan literatür çalışmaları küçük boyutlu kömürlerin susuzlandırılmasında yüzey aktif maddelerin 20-500 g/t oranlarında ilave edildiğini göstermiştir (Selomuly ve diğ., 2006; Groppo ve diğ., 1999).

6.5.1 Aerodri 100-E ilavesi ile yapılan susuzlandırma deneyleri

Kömürün susuzlandırılmasında Aerodri 100-E ilavesinin etkisinin araştırıldığı deneylerin ilk aşamasında doğal pH'ta (7,25) değişik miktarlarda reaktif ilavesinin etkisi araştırılmıştır. En uygun reaktif miktarı bulunduktan sonra, bu değer sabit tutularak karıştırma süresinin etkisi araştırılmıştır. Daha sonra farklı pH değerlerinin susuzlandırma üzerindeki etkisi incelenmiştir.

6.5.1.1 Reaktif miktarının saptanması

Doğal pH'ta 25, 50, 100, 200 ve 500 g/t reaktif ilavesi ile deneyler yapılmış olup, elde edilen nem değerleri Çizelge 6.17 ve nem miktarlarının değişimi Şekil 6.21'de gösterilmiştir.

Sabit tutulan şartlar;

Besleme Hızı	: 20 l/dk.	Elek Açıklığı	: 0,100 mm
Elek Eğimi	: 3°	Açısal Motor Eğimi	: 90°
Yatay Motor Kuvveti	: 7,48 kN	Yatay Motor Frekansı	: 50 Hz
Açısal Motor Kuvveti	: 1,18 kN	Açısal Motor Frekansı	: 50 Hz
Karıştırma Süresi	: 15 dk.	Karıştırma Devri	: 250 d/d
pH	: 7,25		

Çizelge 6.17 : Farklı miktarlarda Aerodri 100-E ilavesi ile elde edilen nem değerleri.

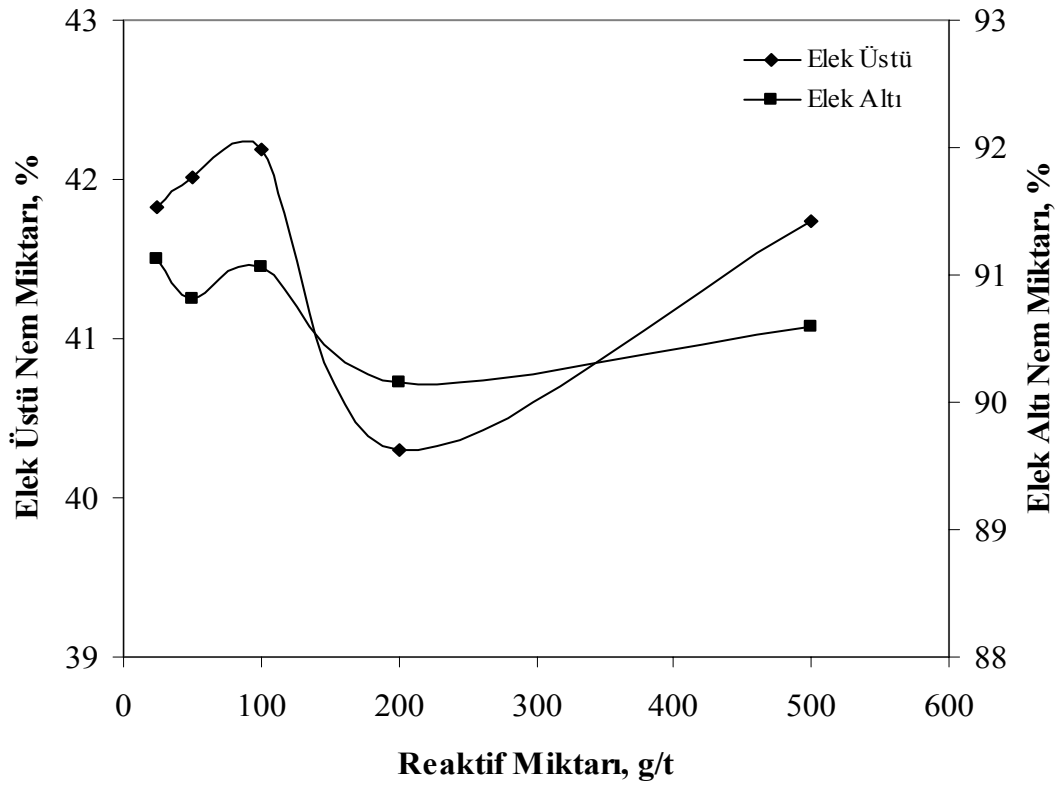
Reaktif Miktarı, g/t	Nem Değerleri, %	
	Elek Üstü Ürün	Elek Altı Ürün
25	41,82	91,12
50	42,01	90,81
100	42,19	91,07
200	40,30	90,16
500	41,74	90,59

En uygun reaktif miktarının araştırıldığı bu deneylerde doğal pH'ta çeşitli reaktif miktarlarında deneyler yapılmıştır. Şekil 6.21'de görüldüğü üzere en düşük nem değeri olan %40,30'a reaktif miktarının 200 g/t olarak seçildiği durumda ulaşılmıştır. Sonraki deneylerde bu miktar sabit tutulmuştur.

6.5.1.2 Karıştırma süresinin saptanması

En uygun karıştırma süresinin tespiti amacıyla, bir önceki deneylerde bulunan en uygun reaktif miktarı olan 200 g/t sabit tutularak 10, 15 ve 20 dakika karıştırma

sürelerinde deneyler yapılmış ve elde edilen nem değerleri Çizelge 6.18’de, nem miktarlarının değişimi ise Şekil 6.22’de verilmiştir.



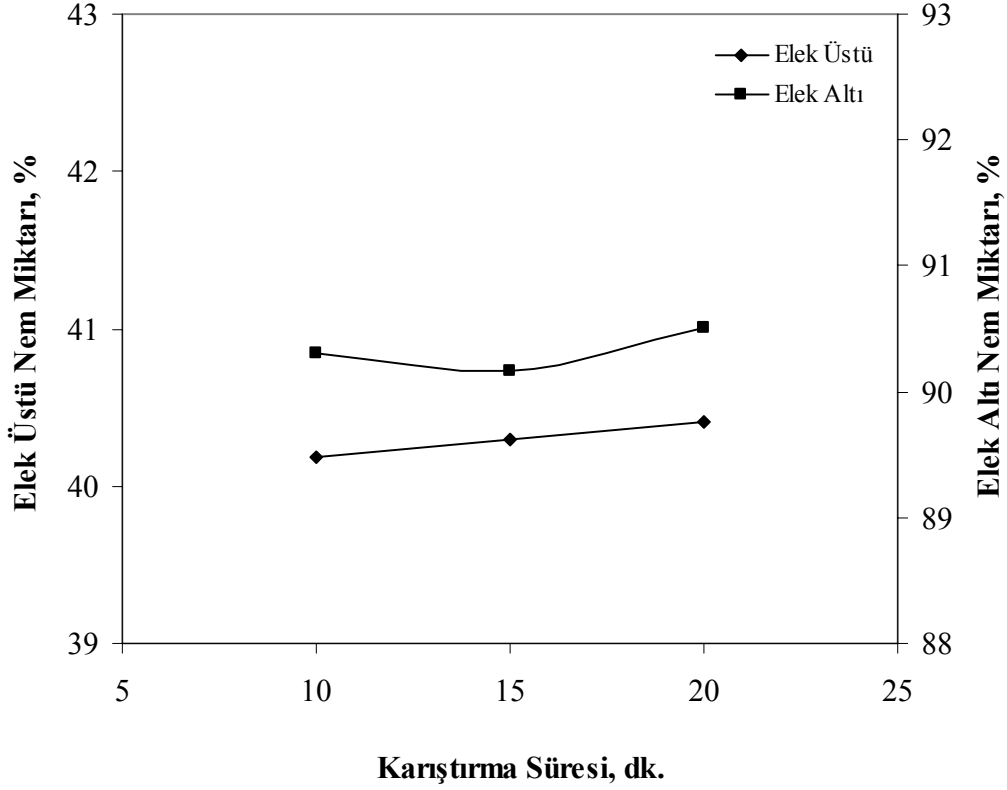
Şekil 6.21 : Aerodri 100-E miktarının nem değişimi üzerindeki etkisi.

Sabit tutulan şartlar;

Besleme Hızı	: 20 l/dk.	Elek Açıklığı	: 0,100 mm
Elek Eğimi	: 3°	Açısal Motor Eğimi	: 90°
Yatay Motor Kuvveti	: 7,48 kN	Yatay Motor Frekansı	: 50 Hz
Açısal Motor Kuvveti	: 1,18 kN	Açısal Motor Frekansı	: 50 Hz
Reaktif Miktarı	: 200 g/t	Karıştırma Devri	: 250 d/d
pH	: 7,25		

Çizelge 6.18 : Farklı karıştırma sürelerinde elde edilen nem değerleri.

Karıştırma Süresi, dakika	Nem Değerleri, %	
	Elek Üstü Ürün	Elek Altı Ürün
10	40,19	90,31
15	40,30	90,16
20	40,41	90,51



Şekil 6.22 : Karıştırma süresinin nem değişimi üzerindeki etkisi.

Farklı karıştırma sürelerinde yapılan susuzlandırma deneylerinden elde edilen sonuçlar incelendiğinde nem oranları açısından belirgin bir fark görülmemektedir. Bu sebeple daha sonraki deneylerde karıştırma süresi 10 dakika olarak seçilmiştir.

6.5.1.3 pH'ın saptanması

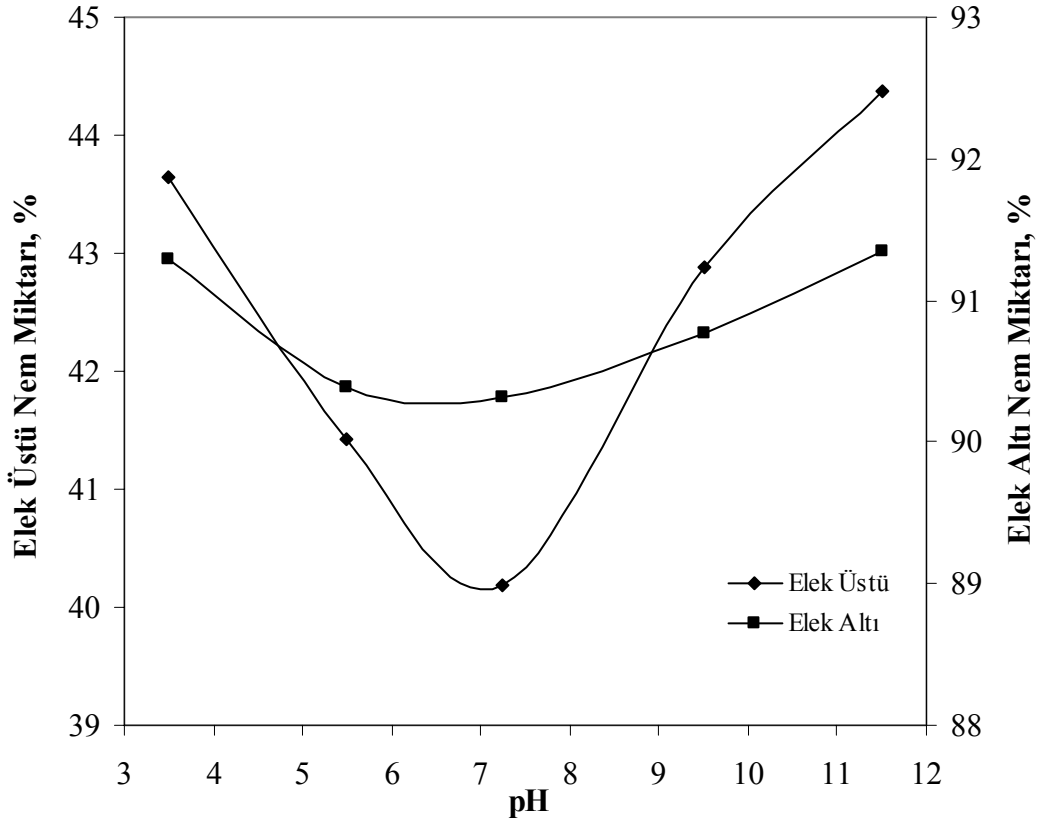
Daha önce yapılan deneylerde bulunan en uygun reaktif miktarı ve karıştırma süresi sabit tutularak 3,5; 5,5; 7,25; 9,5 ve 11,5 pH değerlerinde susuzlandırma deneyleri yapılmış ve elde edilen nem değerleri Çizelge 6.19'da, nem miktarlarının değişimi ise Şekil 6.23'te gösterilmiştir.

Sabit tutulan şartlar;

Besleme Hızı	: 20 l/dk.	Elek Açıklığı	: 0,100 mm
Elek Eğimi	: 3°	Açısal Motor Eğimi	: 90°
Yatay Motor Kuvveti	: 7,48 kN	Yatay Motor Frekansı	: 50 Hz
Açısal Motor Kuvveti	: 1,18 kN	Açısal Motor Frekansı	: 50 Hz
Reaktif Miktarı	: 200 g/t	Karıştırma Süresi	: 10 dk.
Karıştırma Devri	: 250 d/d		

Çizelge 6.19 : Farklı pH değerlerinde Aerodri 100-E ilavesi ile elde edilen nem değerleri.

pH	Nem Değerleri, %	
	Elek Üstü Ürün	Elek Altı Ürün
3,5	43,65	91,29
5,5	41,43	90,39
7,25	40,19	90,31
9,5	42,88	90,77
11,5	44,37	91,35



Şekil 6.23 : Aerodri 100-E ilavesi ile yapılan deneylerde pH'nın nem değişimi üzerindeki etkisi.

Aerodri 100-E miktarı 100 g/t seçilerek değişik pH değerlerinde deneyler yapılmış ve nem oranları tespit edilmiştir. Çizelge 6.19'da görüldüğü gibi bu deneylerdeki en düşük nem değeri olan %40,19'a pülp'ün doğal pH değeri olan 7,25'te ulaşılmıştır. Bu pH değeri sonraki çalışmalarda sabit tutulmuştur.

6.5.2 Aerodri 104 ilavesi ile yapılan susuzlandırma deneyleri

Kömürün susuzlandırılmasında Aerodri 104 ilavesinin etkisinin araştırıldığı deneylerin ilk aşamasında doğal pH'ta değişik miktarlarda reaktif ilavesinin etkisi araştırılmıştır. En uygun reaktif miktarı bulunduktan sonra, bu değer sabit tutularak

kariştırma sũresinin etkisi araştırılmıştır. Daha sonra farklı pH değerlerinin susuzlandırma ũzerindeki etkisi incelenmiştir.

6.5.2.1 Reaktif miktarının saptanması

Doğal pH'ta 25, 50, 100, 200 ve 500 g/t reaktif ilavesi ile deneyler yapılmış olup, elde edilen nem değerleri izelge 6.20'de ve nem miktarlarının değişimi Şekil 6.24'te gũsterilmiřtir.

Sabit tutulan Şartlar;

Besleme Hızı	: 20 l/dk.	Elek Açıklığı	: 0,100 mm
Elek Eğimi	: 3°	Açısal Motor Eğimi	: 90°
Yatay Motor Kuvveti	: 7,48 kN	Yatay Motor Frekansı	: 50 Hz
Açısal Motor Kuvveti	: 1,18 kN	Açısal Motor Frekansı	: 50 Hz
Kariştırma Sũresi	: 15 dk.	Kariştırma Devri	: 250 d/d
pH	: 7,25		

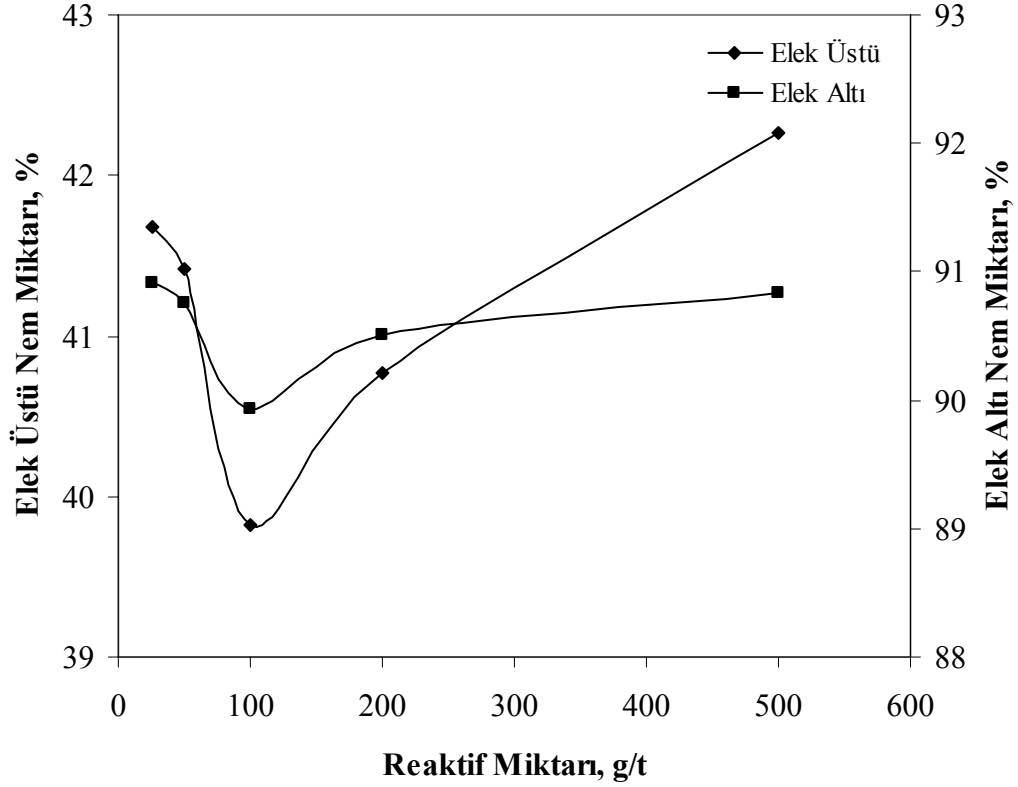
Çizelge 6.20 : Farklı miktarlarda Aerodri 104 ilavesi ile elde edilen nem değerleri.

Reaktif Miktarı, g/t	Nem Değerleri, %	
	Elek ˘st˘ ˘r˘n	Elek Altı ˘r˘n
25	41,68	90,91
50	41,42	90,76
100	39,82	89,93
200	40,77	90,51
500	42,27	90,84

En uygun reaktif miktarının araştırıldığı bu deneylerde doğal pH'ta çeşitli reaktif miktarlarında deneyler yapılmıştır. Çizelge 6.20'de gũr˘ld˘ę˘ ˘zere reaktif miktarının 100 g/t olarak seçildiği durumda en d˘ř˘k nem değeri olan %39,82'ye ulaşılmıştır. Sonraki deneylerde bu miktar sabit tutulmuştur.

6.5.2.2 Kariştırma sũresinin saptanması

Bir ˘nceki deneylerde bulunan 100 g/t reaktif miktarı sabit tutularak 10, 15 ve 20 dakika kariştırma sũrelerinde deneyler yapılmış ve elde edilen nem değerleri izelge 6.21'de, nem miktarlarının değişimi ise Şekil 6.25'te verilmiştir.



Şekil 6.24 : Aerodri 104 miktarının nem değişimi üzerindeki etkisi.

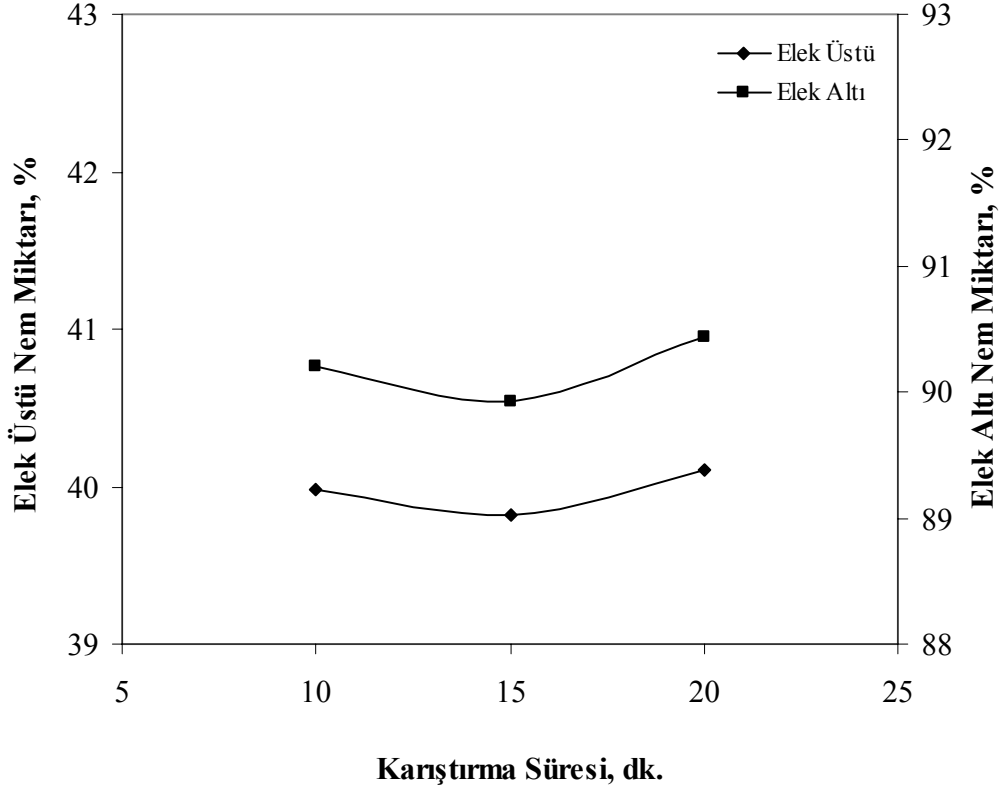
Sabit tutulan şartlar;

Besleme Hızı	: 20 l/dk.	Elek Açıklığı	: 0,100 mm
Elek Eğimi	: 3°	Açısal Motor Eğim	: 90°
Yatay Motor Kuvveti	: 7,48 kN	Yatay Motor Frekansı	: 50 Hz
Açısal Motor Kuvveti	: 1,18 kN	Açısal Motor Frekansı	: 50 Hz
Reaktif Miktarı	: 100 g/t	Karıştırma Devri	: 250 d/d
pH	: 7,25		

Çizelge 6.21 : Farklı karıştırma sürelerinde elde edilen nem değerleri.

Karıştırma Süresi, dakika	Nem Değerleri, %	
	Elek Üstü Ürün	Elek Altı Ürün
10	39,98	90,21
15	39,82	89,93
20	40,10	90,44

Farklı karıştırma sürelerinde yapılan susuzlandırma deneylerinden elde edilen sonuçlar incelendiğinde nem oranları açısından belirgin bir fark görülmemektedir. Bu sebeple daha sonra yapılan deneylerde en düşük karıştırma süresi olan 10 dakika seçilmiştir.



Şekil 6.25 : Karıştırma süresinin nem değişimi üzerindeki etkisi.

6.5.2.3 pH'ın saptanması

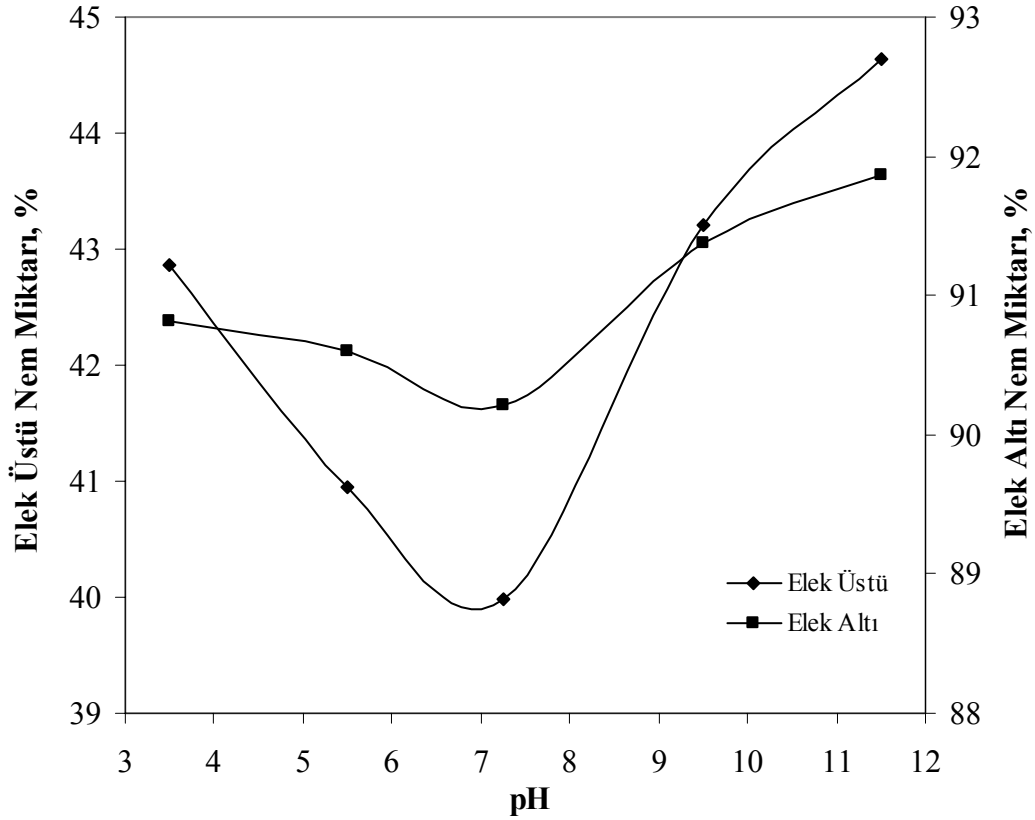
Daha önce yapılan deneylerde bulunan en uygun reaktif miktarı ve karıştırma süresi sabit tutularak 3,5; 5,5; 7,25; 9,5 ve 11,5 pH değerlerinde susuzlandırma deneyleri yapılmış ve elde edilen nem değerleri Çizelge 6.22'de, nem miktarlarının değişimi ise Şekil 6.26'da gösterilmiştir.

Sabit tutulan şartlar;

Besleme Hızı	: 20 l/dk.	Elek Açıklığı	: 0,100 mm
Elek Eğimi	: 3°	Açısal Motor Eğimi	: 90°
Yatay Motor Kuvveti	: 7,48 kN	Yatay Motor Frekansı	: 50 Hz
Açısal Motor Kuvveti	: 1,18 kN	Açısal Motor Frekansı	: 50 Hz
Reaktif Miktarı	: 100 g/t	Karıştırma Süresi	: 10 dakika
Karıştırma Devri	: 250 d/d		

Çizelge 6.22 : Farklı pH değerlerinde Aerodri 104 ilavesi ile elde edilen nem değerleri.

pH	Nem Değerleri, %	
	Elek Üstü Ürün	Elek Altı Ürün
3,5	42,86	90,82
5,5	40,95	90,6
7,25	39,98	90,21
9,5	43,20	91,38
11,5	44,63	91,86



Şekil 6.26 : Aerodri 104 ilavesi ile yapılan deneylerde pH'ın nem değişimi üzerindeki etkisi.

Aerodri 104 miktarı 100 g/t seçilerek değişik pH değerlerinde deneyler yapılmış ve nem oranları tespit edilmiştir. Çizelge 6.22'de görüldüğü üzere bu deneylerdeki en düşük nem değeri olan %39,98'e pülüp'ün doğal pH değeri olan 7,25'te ulaşılmıştır. Bu pH değeri sonraki çalışmalarda sabit tutulmuştur.

6.5.3 TTAB ilavesi ile yapılan susuzlandırma deneyleri

Kömürün susuzlandırılmasında TTAB ilavesinin etkisinin araştırıldığı deneylerin ilk aşamasında doğal pH'ta değişik miktarlarda reaktif ilavesinin etkisi araştırılmıştır. Optimum reaktif miktarı bulunduktan sonra, bu değer sabit tutularak karıştırma

süresinin etkisi araştırılmıştır. Daha sonra farklı pH değerlerinin susuzlandırma üzerindeki etkisi incelenmiştir.

6.5.3.1 Reaktif miktarının saptanması

Doğal pH'ta 25, 50, 100, 200 ve 500 g/t reaktif ilavesi ile deneyler yapılmış olup, elde edilen nem değerleri Çizelge 6.23'te ve nem miktarlarının değişimi Şekil 6.27'de gösterilmiştir.

Sabit tutulan şartlar;

Besleme Hızı	: 20 l/dk.	Elek Açıklığı	: 0,100 mm
Elek Eğimi	: 3°	Açısal Motor Eğimi	: 90°
Yatay Motor Kuvveti	: 7,48 kN	Yatay Motor Frekansı	: 50 Hz
Açısal Motor Kuvveti	: 1,18 kN	Açısal Motor Frekansı	: 50 Hz
Karıştırma Süresi	: 15 dk.	Karıştırma Devri	: 250 d/d
pH	: 7,25		

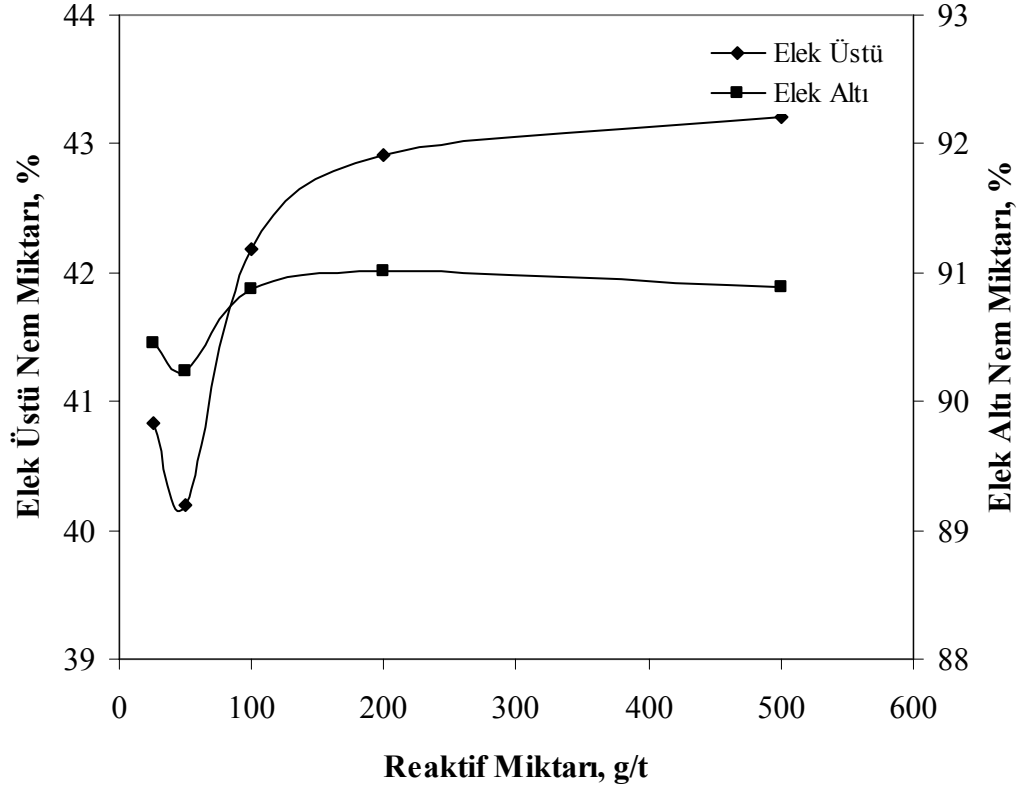
Çizelge 6.23 : Farklı miktarlarda TTAB ilavesi ile elde edilen nem değerleri.

Reaktif Miktarı, g/t	Nem Değerleri, %	
	Elek Üstü Ürün	Elek Altı Ürün
25	40,83	90,46
50	40,24	90,24
100	42,18	90,87
200	42,92	91,01
500	43,21	90,89

En uygun reaktif miktarının araştırıldığı bu deneylerde doğal pH'ta çeşitli reaktif miktarlarında deneyler yapılmıştır. Çizelge 6.23'te görüldüğü üzere reaktif miktarının 50 g/t olarak seçildiği durumda en düşük nem değeri olan %40,24'e ulaşılmıştır. Daha yüksek reaktif miktarlarında nem oranlarında artış görülmektedir. Bu miktar sonraki deneylerde sabit tutulmuştur.

6.5.3.2 Karıştırma süresinin saptanması

Bir önceki deneyde bulunan 50 g/t reaktif miktarı sabit tutularak 10, 15 ve 20 dakika karıştırma sürelerinde deneyler yapılmış ve elde edilen nem değerleri Çizelge 6.24'te, nem miktarlarının değişimi ise Şekil 6.28'de verilmiştir.



Şekil 6.27 : TTAB miktarının nem değişimi üzerindeki etkisi.

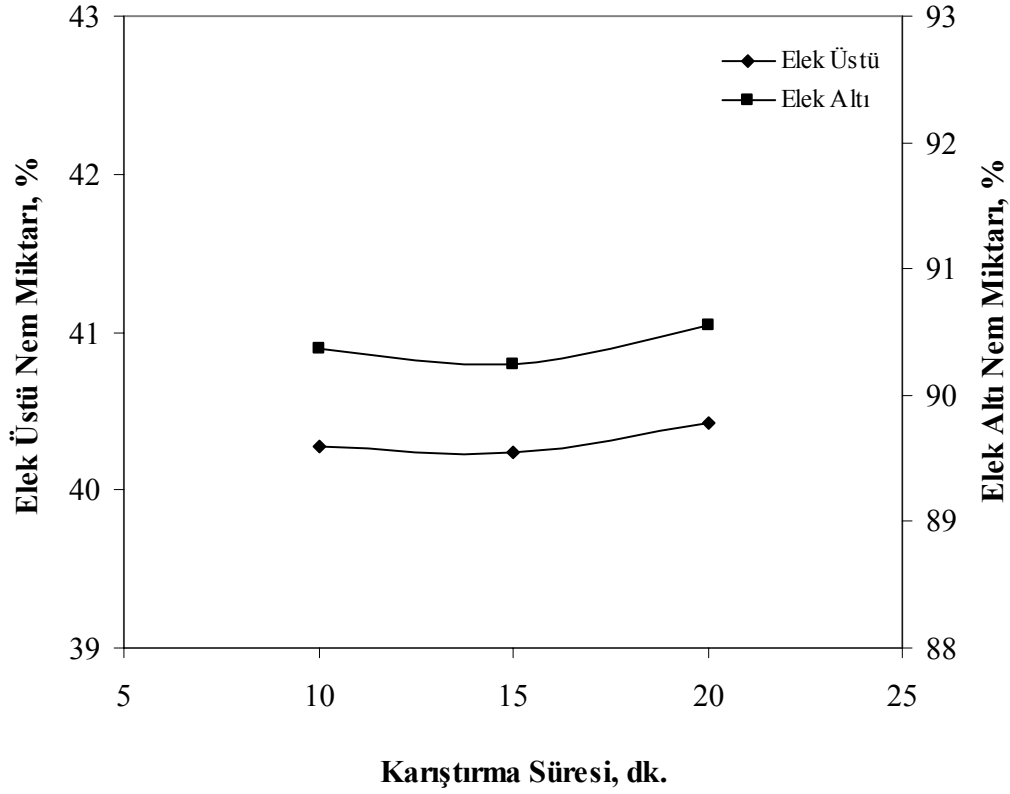
Sabit tutulan şartlar;

Besleme Hızı	: 20 lt/dk.	Elek Açıklığı	: 0,100 mm
Elek Eğimi	: 3°	Açısal Motor Eğimi	: 90°
Yatay Motor Kuvveti	: 7,48 kN	Yatay Motor Frekansı	: 50 Hz
Açısal Motor Kuvveti	: 1,18 kN	Açısal Motor Frekansı	: 50 Hz
Reaktif Miktarı	: 50 g/t	Karıştırma Devri	: 250 d/d
pH	: 7,25		

Çizelge 6.24 : Farklı karıştırma sürelerinde elde edilen nem değerleri.

Karıştırma Süresi, dakika	Nem Değerleri, %	
	Elek Üstü Ürün	Elek Altı Ürün
10	40,27	90,37
15	40,24	90,24
20	40,42	90,55

Farklı karıştırma sürelerinde yapılan susuzlandırma deneylerinden elde edilen sonuçlar incelendiğinde nem oranları açısından belirgin bir fark görülmemektedir. Bu sebeple daha sonra yapılan deneylerde karıştırma süresi 10 dakika seçilmiştir.



Şekil 6.28 : Karıştırma süresinin nem değişimi üzerindeki etkisi.

6.5.3.3 pH'ın saptanması

Daha önce yapılan deneylerde bulunan en uygun reaktif miktarı ve karıştırma süresi sabit tutularak 3,5; 5,5; 7,25; 9,5 ve 11,5 pH değerlerinde susuzlandırma deneyleri yapılmış ve elde edilen nem değerleri Çizelge 6.25'te, nem miktarlarının değişimi ise Şekil 6.29'da gösterilmiştir.

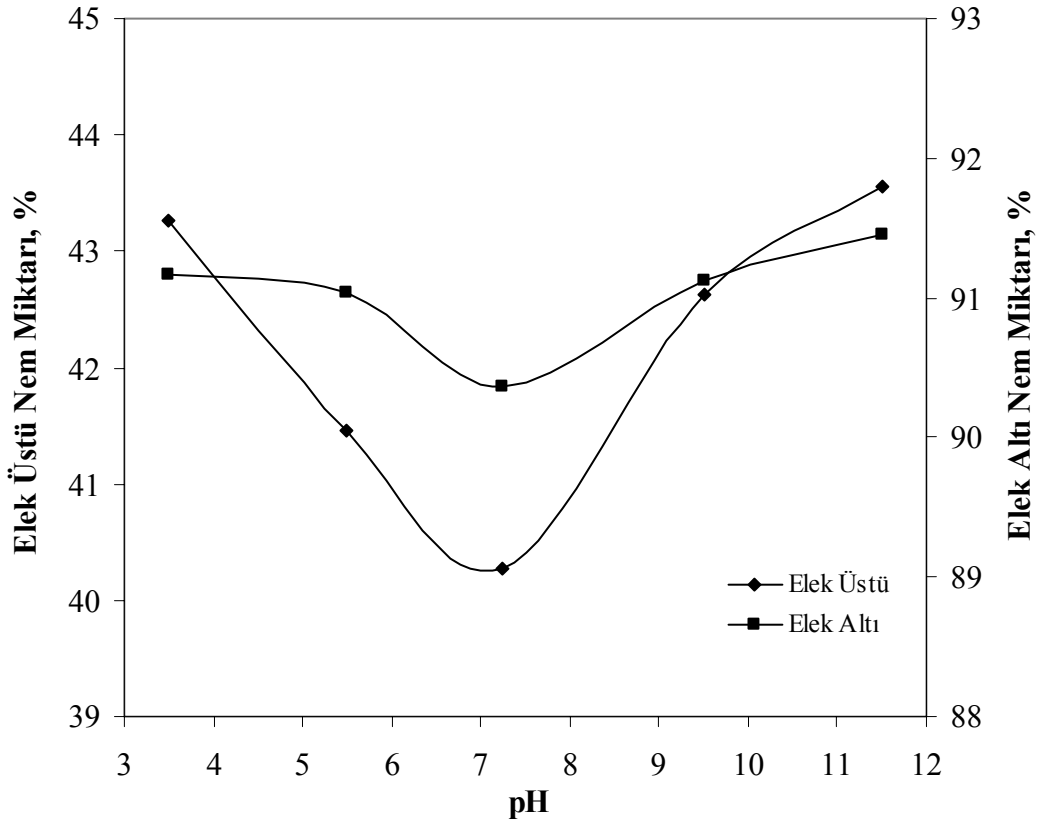
Sabit tutulan şartlar;

Besleme Hızı	: 20 l/dk.	Elek Açıklığı	: 0,100 mm
Elek Eğimi	: 3°	Açısal Motor Eğimi	: 90°
Yatay Motor Kuvveti	: 7,48 kN	Yatay Motor Frekansı	: 50 Hz
Açısal Motor Kuvveti	: 1,18 kN	Açısal Motor Frekansı	: 50 Hz
Reaktif Miktarı	: 50 g/t	Karıştırma Süresi	: 10 dakika
Karıştırma Devri	: 250 d/d		

TTAB miktarı 50 g/t seçilerek değişik pH değerlerinde deneyler yapılmış ve nem oranları tespit edilmiştir. Çizelge 6.25'te görüldüğü üzere bu deneylerdeki en düşük nem değeri olan %40,27'ye pül'ün doğal pH değeri olan 7,25'te ulaşılmıştır. Bu pH değeri sonraki çalışmalarda sabit tutulmuştur.

Çizelge 6.25 : Farklı pH değerlerinde TTAB ilavesi ile elde edilen nem değerleri.

pH	Nem Değerleri, %	
	Elek Üstü Ürün	Elek Altı Ürün
3,5	43,26	91,17
5,5	41,45	91,04
7,25	40,27	90,37
9,5	42,63	91,13
11,5	43,56	91,45



Şekil 6.29 : TTAB ilavesi ile yapılan deneylerde pH'ın nem değişimi üzerindeki etkisi.

6.5.4 PEGM ilavesi ile yapılan susuzlandırma deneyleri

Kömürün susuzlandırılmasında PEGM ilavesinin etkisinin araştırıldığı deneylerin ilk aşamasında doğal pH'ta değişik miktarlarda reaktif ilavesinin etkisi araştırılmıştır. Optimum reaktif miktarı bulunduktan sonra, bu değer sabit tutularak karıştırma süresinin etkisi araştırılmıştır. Daha sonra farklı pH değerlerinin susuzlandırma üzerindeki etkisi incelenmiştir.

6.5.4.1 Reaktif miktarının saptanması

Doğal pH'ta 25, 50, 100, 200 ve 500 g/t reaktif ilavesi ile deneyler yapılmış olup, elde edilen nem değerleri Çizelge 6.26 ve nem miktarlarının değişimi Şekil 6.30'da gösterilmiştir.

Sabit tutulan şartlar;

Besleme Hızı	: 20 l/dk.	Elek Açıklığı	: 0,100 mm
Elek Eğimi	: 3°	Açısal Motor Eğimi	: 90°
Yatay Motor Kuvveti	: 7,48 kN	Yatay Motor Frekansı	: 50 Hz
Açısal Motor Kuvveti	: 1,18 kN	Açısal Motor Frekansı	: 50 Hz
Karıştırma Süresi	: 15 dk.	Karıştırma Devri	: 250 d/d
pH	: 7,25		

Çizelge 6.26 : Farklı miktarlarda PEGM ilavesi ile elde edilen nem değerleri.

Reaktif Miktarı, g/t	Nem Değerleri, %	
	Elek Üstü Ürün	Elek Altı Ürün
25	41,29	91,37
50	40,56	91,18
100	39,67	90,77
200	39,41	89,95
500	40,11	90,30

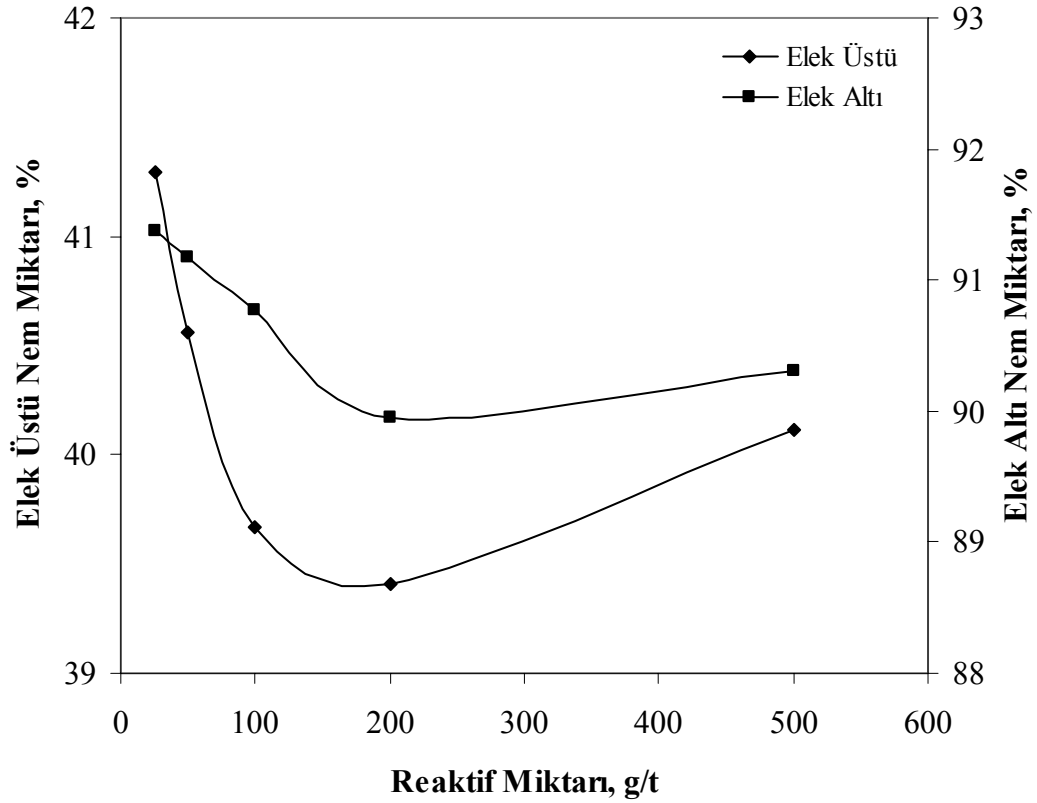
En uygun reaktif miktarının araştırıldığı bu deneylerde doğal pH'ta çeşitli reaktif miktarlarında deneyler yapılmıştır. Çizelge 6.26'da görüldüğü üzere reaktif miktarının 200 g/t olarak seçildiği durumda en düşük nem değeri olan %39,41'e ulaşılmıştır. Reaktif miktarı yükseltildiği takdirde nem oranında artış gözlenmiştir. Bu miktar sonraki deneylerde sabit tutulmuştur.

6.5.4.2 Karıştırma süresinin saptanması

Bir önceki deneyde bulunan 200 g/t reaktif miktarı sabit tutularak 10, 15 ve 20 dakika karıştırma sürelerinde deneyler yapılmış ve elde edilen nem değerleri Çizelge 6.27'de, nem miktarlarının değişimi ise Şekil 6.31'de verilmiştir.

Sabit tutulan şartlar;

Besleme Hızı	: 20 l/dk.	Elek Açıklığı	: 0,100 mm
Elek Eğimi	: 3°	Açısal Motor Eğimi	: 90°
Yatay Motor Kuvveti	: 7,48 kN	Yatay Motor Frekansı	: 50 Hz
Açısal Motor Kuvveti	: 1,18 kN	Açısal Motor Frekansı	: 50 Hz
Reaktif Miktarı	: 200 g/t	Karıştırma Devri	: 250 d/d
pH	: 7,25		

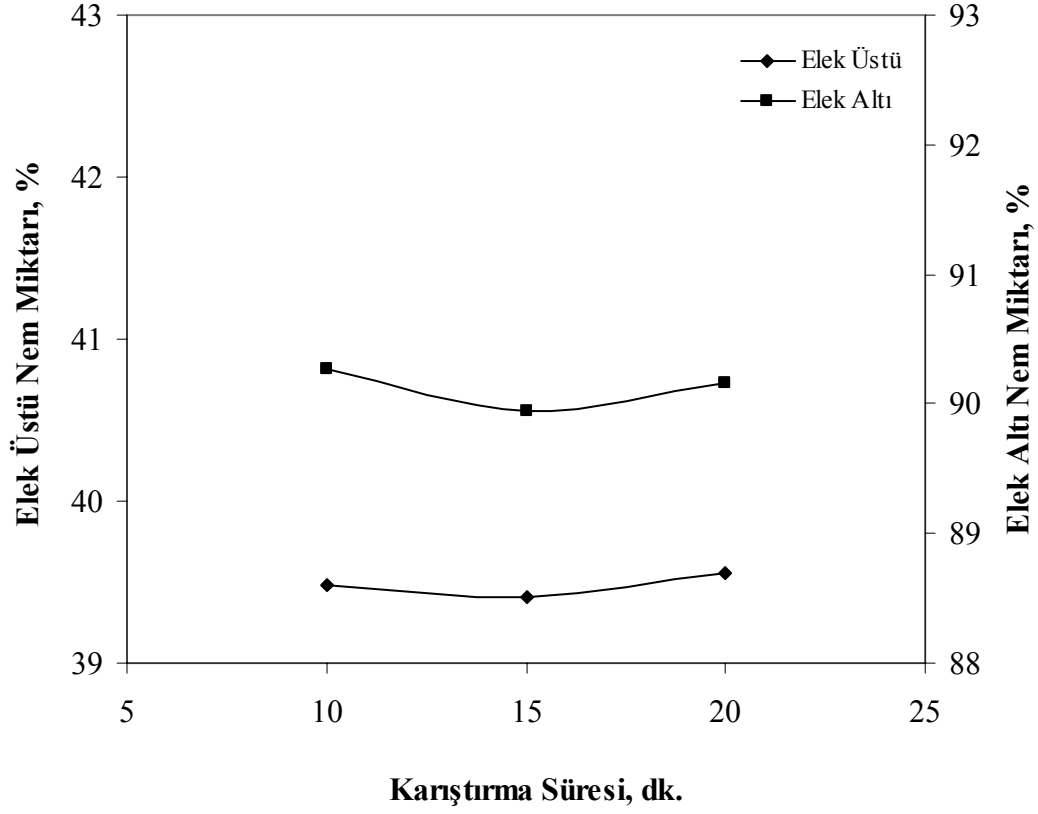


Şekil 6.30 : PEGM miktarının nem değişimi üzerindeki etkisi.

Çizelge 6.27 : Farklı karıştırma sürelerinde elde edilen nem değerleri.

Karıştırma Süresi, dakika	Nem Değerleri, %	
	Elek Üstü Ürün	Elek Altı Ürün
10	39,48	90,27
15	39,41	89,95
20	39,56	90,16

Farklı karıştırma sürelerinde yapılan susuzlandırma deneylerinden elde edilen sonuçlar incelendiğinde nem oranları açısından belirgin bir fark görülmemektedir. Bu sebeple daha sonra yapılan deneylerde karıştırma süresi 10 dakika olarak seçilmiştir.



Şekil 6.31 : Karıştırma süresinin nem değişimi üzerindeki etkisi.

6.5.4.3 pH'ın saptanması

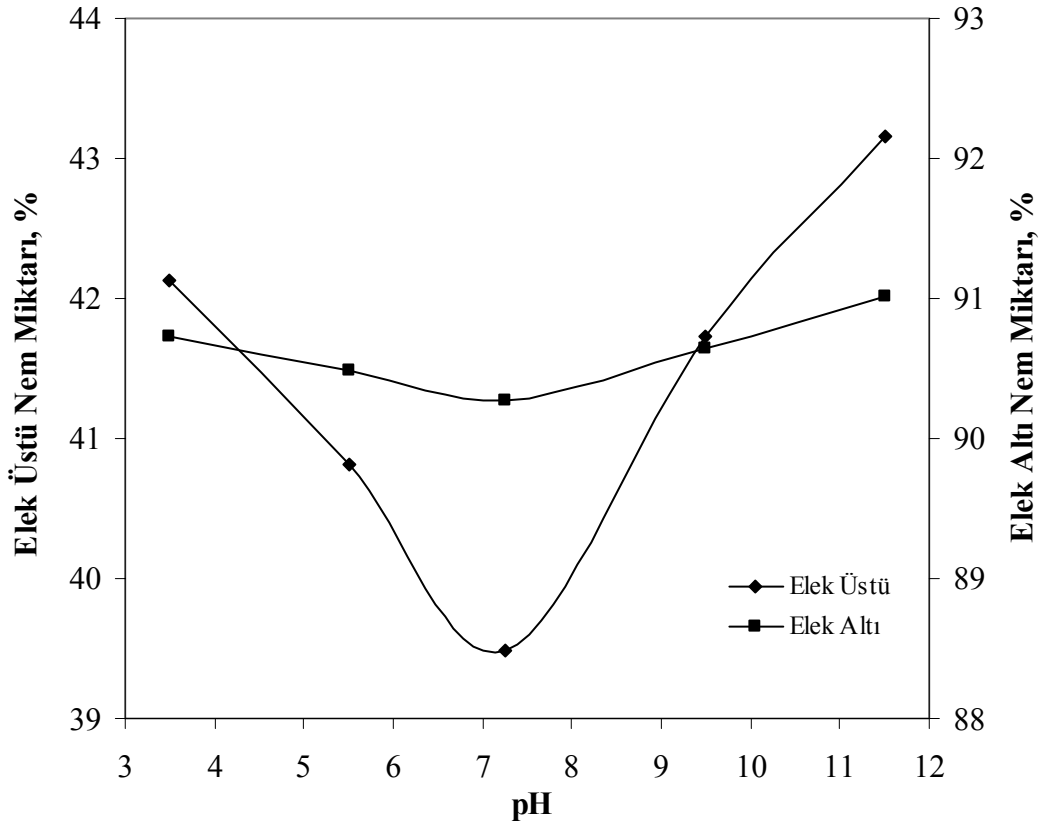
Daha önce yapılan deneylerde bulunan en uygun reaktif miktarı ve karıştırma süresi sabit tutularak 3,5; 5,5; 7,25; 9,5 ve 11,5 pH değerlerinde susuzlandırma deneyleri yapılmış ve elde edilen nem değerleri Çizelge 6.28'de, nem miktarlarının değişimi ise Şekil 6.32'de gösterilmiştir.

Sabit tutulan şartlar;

Besleme Hızı	: 20 l/dk.	Elek Açıklığı	: 0,100 mm
Elek Eğimi	: 3°	Açısal Motor Eğimi	: 90°
Yatay Motor Kuvveti	: 7,48 kN	Yatay Motor Frekansı	: 50 Hz
Açısal Motor Kuvveti	: 1,18 kN	Açısal Motor Frekansı	: 50 Hz
Reaktif Miktarı	: 200 g/t	Karıştırma Süresi	: 10 dakika
Karıştırma Devri	: 250 d/d		

Çizelge 6.28 : Farklı pH değerlerinde PEGM ilavesi ile elde edilen nem değerleri.

pH	Nem Değerleri, %	
	Elek Üstü Ürün	Elek Altı Ürün
3,5	42,13	90,73
5,5	40,81	90,49
7,25	39,48	90,27
9,5	41,73	90,64
11,5	43,16	91,01



Şekil 6.32 : PEGM ilavesi ile yapılan deneylerde pH'nın nem değişimi üzerindeki etkisi.

PEGM miktarı 200 g/t seçilerek değişik pH değerlerinde deneyler yapılmış ve nem oranları tespit edilmiştir. Çizelge 6.28'de görüldüğü gibi pülp'ün doğal pH değeri olan 7,25'te bu deneylerdeki en düşük nem değeri olan %39,48'e ulaşılmıştır. Bu pH değeri sonraki çalışmalarda sabit tutulmuştur.

6.5.5 Fusifloc 5922 ilavesi ile yapılan susuzlandırma deneyleri

Kömürün susuzlandırılmasında yüksek molekül ağırlıklı flokülant ilavesinin susuzlandırma üzerindeki etkisinin araştırılması amacıyla bulunan en uygun şartlarda Fusifloc 5922 marka anyonik tip flokülant kullanarak deneyler gerçekleştirilmiştir.

6.5.5.1 Reaktif miktarının saptanması

Doğal pH'ta 25, 50, 75, 100 ve 125 g/t reaktif ilavesi ile deneyler yapılmış olup, elde edilen nem değerleri Çizelge 6.29'da ve nem miktarlarının değişimi Şekil 6.33'te gösterilmiştir.

Sabit tutulan şartlar;

Besleme Hızı	: 20 l/dk.	Elek Açıklığı	: 0,100 mm
Elek Eğimi	: 3°	Açısal Motor Eğimi	: 90°
Yatay Motor Kuvveti	: 7,48 kN	Yatay Motor Frekansı	: 50 Hz
Açısal Motor Kuvveti	: 1,18 kN	Açısal Motor Frekansı	: 50 Hz
Karıştırma Süresi	: 15 dk.	Karıştırma Devri	: 250 d/d
pH	: 7,25		

Çizelge 6.29 : Farklı miktarlarda flokülant ilavesi ile elde edilen nem değerleri.

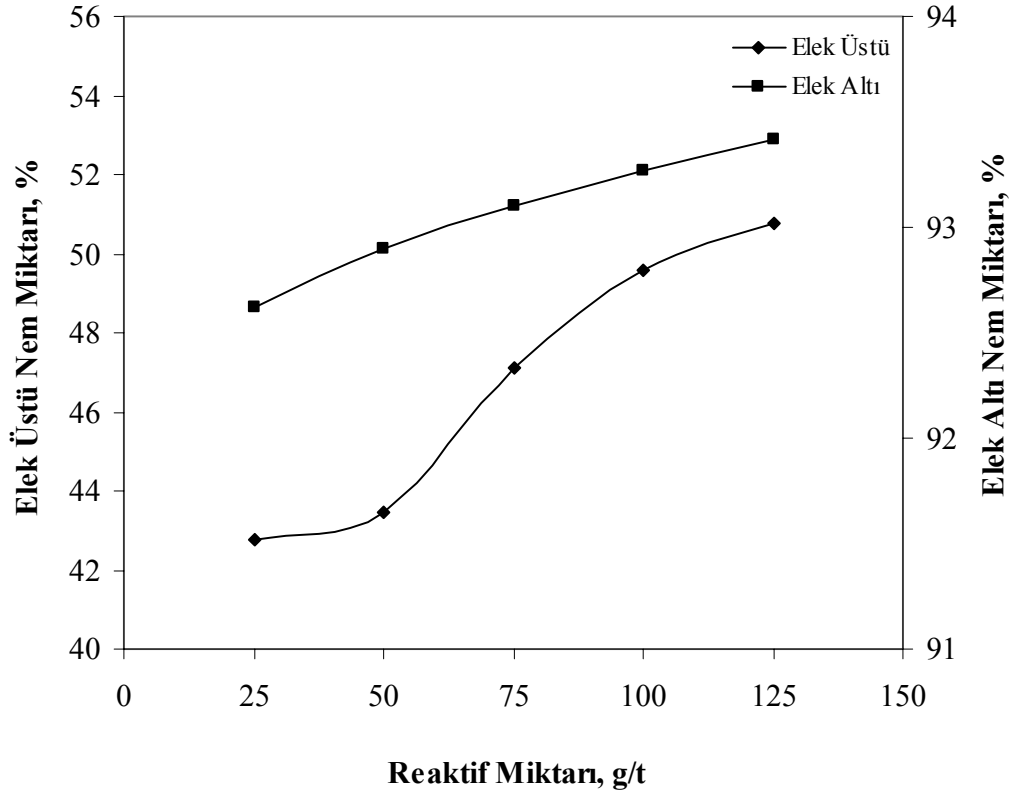
Reaktif Miktarı, g/t	Nem Değerleri, %	
	Elek Üstü Ürün	Elek Altı Ürün
25	42,77	92,62
50	43,47	92,90
75	47,10	93,10
100	49,59	93,27
125	50,77	93,42

Sonuçlar incelendiğinde flokülant ilavesinin susuzlandırmayı olumsuz yönde etkilediği görülmektedir. Flokülant miktarının artırılması nem oranının yükselmesine neden olmuştur. Bunun nedeni taneler arası çekim kuvvetlerinin artması, flokların büyümesi ve suyun bu floklar arasında hapsolmesidir. Sonraki çalışmalarda bu reaktif kullanılmamıştır.

6.6 Elek Yüzey Alanının Arttırılmasının Susuzlandırma Üzerindeki Etkisinin İncelendiği Deneyler

Küçük boyutlu kömür numunesinin laboratuvar ölçekli titreşimli elek mekanizması ile susuzlandırılmasında elek yüzey alanının etkisini araştırmak amacıyla, yapılacak bu deneylerin, tesis çapında kullanılan ve yüzey alanı susuzlandırma deneylerinde kullanılan titreşimli eleğin alanının (2800 cm²) yaklaşık 9 katı olan eleğin elek alanına yakınlaştırılacağı dikkate alınarak, daha önce belirlenen en uygun koşullar sabit tutularak, reaktifsiz ve reaktif ilavesi ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu

deneylere ait nem sonuçları Çizelge 6.30’da, elde edilen nem miktarlarının değişimi ise Şekil 6.34’te gösterilmiştir.



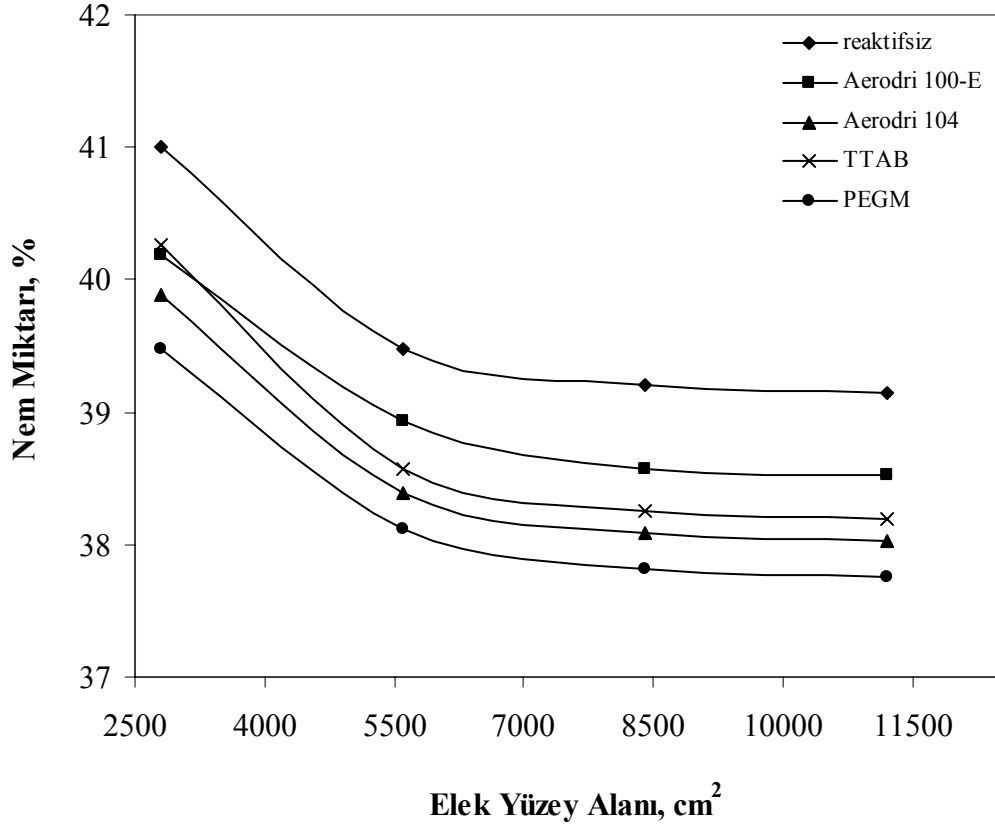
Şekil 6.33 : Flokülant miktarının nem değişimi üzerindeki etkisi.

Sabit tutulan şartlar;

Besleme Hızı	: 20 l/dk.	Elek Açıklığı	: 0,100 mm
Elek Eğimi	: 3°	Açısal Motor Eğimi	: 90°
Yatay Motor Kuvveti	: 7,48 kN	Yatay Motor Frekansı	: 50 Hz
Açısal Motor Kuvveti	: 1,18 kN	Açısal Motor Frekansı	: 50 Hz
Karıştırma Süresi	: 10 dk.	Karıştırma Devri	: 250 d/d
pH	: 7,25		

Çizelge 6.30 : Elek yüzey alanının artırılmasının incelendiği deneylerde elde edilen nem değerleri.

Elek Yüzey Alanı, cm ²	Nem Değerleri, %				
	Reaktifsiz	Aerodri 100-E	Aerodri 104	TTAB	PEGM
2800	41,00	40,19	39,89	40,27	39,48
5600	39,47	38,93	38,39	38,57	38,12
8400	39,21	38,57	38,09	38,25	37,82
11200	39,15	38,53	38,02	38,19	37,75



Şekil 6.34 : Elek yüzey alanının arttırılmasının incelendiği deneylerde elde edilen nem miktarlarının değişiminin ortak gösterimi.

Titreşimli elek üzerinden ilk kademede alınan malzemenin eleğe tekrar beslenmesi esas alınarak yapılan bu susuzlandırma deneylerinde, 4. kademedan sonra elek üzerinden alınan malzemenin sabit nem değerine ulaştığı görülmüştür. Bu düşüşün sebebi, elek yüzey alanının artmasına paralel olarak malzemenin elek yüzeyinde kalma ve elek yüzeyi ile temas süresinin artması olarak açıklanabilir. Bu sonuçlar endüstriyel uygulamada kömür neminin ineceği seviyeler hakkında bir fikir vermektedir.

6.7 Ultrasonik Titreşimin Susuzlandırma Üzerindeki Etkisi

Ultrasonik titreşim kullanılması, geleneksel susuzlandırma metotlarının kapasitelerini ve verimini arttıran bir unsurdur. Katı-sıvı ayırımında ultrasonik titreşim filtrelerin tıkanmalarını önlemenin dışında, emici bir etki yaratarak nemin uzaklaştırılmasını kolaylaştırıcı bir etki yaratır. Bu deneylerde süspansiyon içerisindeki kömür tanelerinin yüzey özelliklerini değiştirerek susuzlandırma işleminin verimini arttırması düşünülen ultrasonik titreşimin etkisi araştırılmıştır.

Bu amaçla ilk olarak maksimum 26,5 kHz frekans'a ulaşabilen korna tipi ultrasonik transdüser, kova içerisinde bulunan pülp'ün içerisine daldırılarak değişik frekans değerlerinde çalıştırılmıştır. Ultrasonik kondüsyonlama sonrasında malzeme titreşimli eleğe beslenerek susuzlandırma deneyleri yapılmıştır.

Benzer olarak 25 kHz frekans değerine çıkabilen tambur tipli ultrasonik transdüser üzerine yerleştirilen kova içerisindeki kömür pülp'üne değişik frekans değerlerinde kondüsyonlama yapılmıştır. Daha sonra, ultrasonik titreşim ile ön kondüsyonlanması yapılan bu malzeme titreşimli eleğe beslenerek susuzlandırma deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Korna ve tambur tipi transdüser ile yapılan susuzlandırma deneylerinden elde edilen nem değerleri sırasıyla Çizelge 6.31 ve Çizelge 6.32'de verilirken, nem değerlerinin değişimi ise Şekil 6.35 ve Şekil 6.36'da gösterilmiştir.

Sabit tutulan şartlar;

Besleme Hızı	: 20 l/dk.	Elek Açıklığı	: 0,100 mm
Elek Eğimi	: 3°	Açısal Motor Eğimi	: 90°
Yatay Motor Kuvveti	: 7,48 kN	Yatay Motor Frekansı	: 50 Hz
Açısal Motor Kuvveti	: 1,18 kN	Açısal Motor Frekansı	: 50 Hz
Karıştırma Süresi	: 15 dk.	Karıştırma Devri	: 250 d/d
Kondüsyon Süresi	: 15 dk.	pH	: 7,25

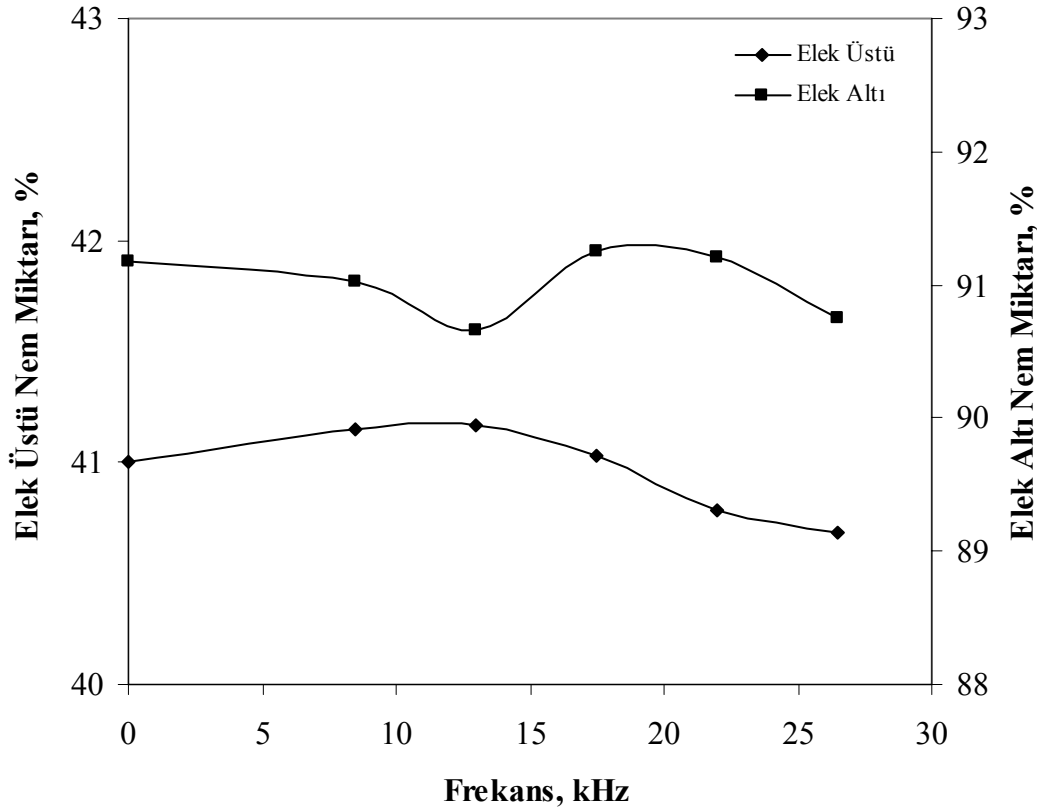
Çizelge 6.31 : Korna tipi ultrasonik titreşim cihazıyla yapılan deneyler sonucunda elde edilen nem değerleri.

Frekans, kHz	Nem Değerleri, %	
	Elek Üstü Ürün	Elek Altı Ürün
0	41,00	91,17
8,5	41,15	91,02
13	41,17	90,66
17,5	41,03	91,25
22	40,78	91,21
26,5	40,68	90,75

Her iki deneyde elde edilen veriler karşılaştırıldığında tambur tipi ultrasonik titreşim veren transdüser'in korna tipi transdüser'e göre susuzlandırmada daha etkili olduğu görülmüştür. Korna tipi transdüser ile 26,5 kHz frekans değerinde yapılan deneylerde nem oranlarında yaklaşık %0,3'lük bir düşüş sağlanırken, tambur tipi transdüser ile 25 kHz frekans değerinde yapılan deneylerde %1,5 düşüş olmuştur.

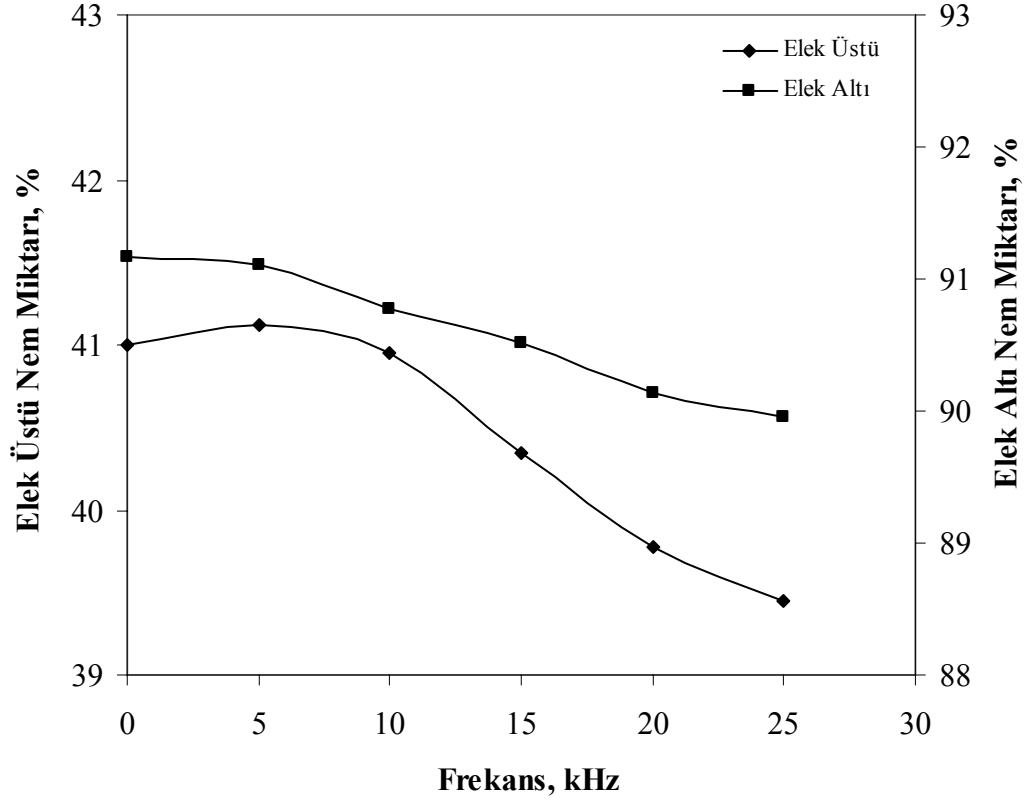
Çizelge 6.32 : Tambur tipi ultrasonik titreşim cihazıyla yapılan deneyler sonucunda elde edilen nem değerleri.

Frekans, kHz	Nem Değerleri, %	
	Elek Üstü Ürün	Elek Altı Ürün
0	41,00	91,17
5	41,12	91,11
10	40,88	90,77
15	40,35	90,38
20	39,99	90,13
25	39,45	89,96



Şekil 6.35 : Frekans'ın nem değişimi üzerindeki etkisi (Korna tipi).

Bu düşüşün sebebi olarak, katı-sıvı karışımından oluşan kömür süspansiyonuna verilen ultrasonik enerjinin kavitasyon etkisi yaratarak taneciklerin özelliklerini ve yapılarını değiştirdiği düşünülmektedir. Bu etki ile yüzeyleri temizlenen ve disperse edilen kömür taneleri titreşimli elek ile yapılan susuzlandırma işlemi sırasında yüzeyindeki harici gözeneklere hapsolmuş sudan daha rahat olarak ayrılmakta ve verimli olarak susuzlaştırılabilmektedir.



Şekil 6.36 : Frekans'ın nem değişimi üzerindeki etkisi (Tambur tipi).

Ayrıca, ultrasonik enerji kömür tanelerinin temas açısını arttırarak, yüzey gerilimini düşürmektedir. Bu nedenlerden dolayı reaktif ilavesi ile birlikte gerçekleştirilecek ultrasonik titreşim uygulamalarında tambur tipi ultrasonik transdüser'in kullanılmasına karar verilmiştir.

Bu amaçla, en uygun ultrasonik kondüsyon süresinin tespiti amacıyla tambur tipli transdüser kullanılarak değişik sürelerde deneyler yapılmıştır. Bu deneylere ait sonuçlar Çizelge 6.33'te verilirken nem değerlerinin değişimi ise Şekil 6.37'de gösterilmiştir.

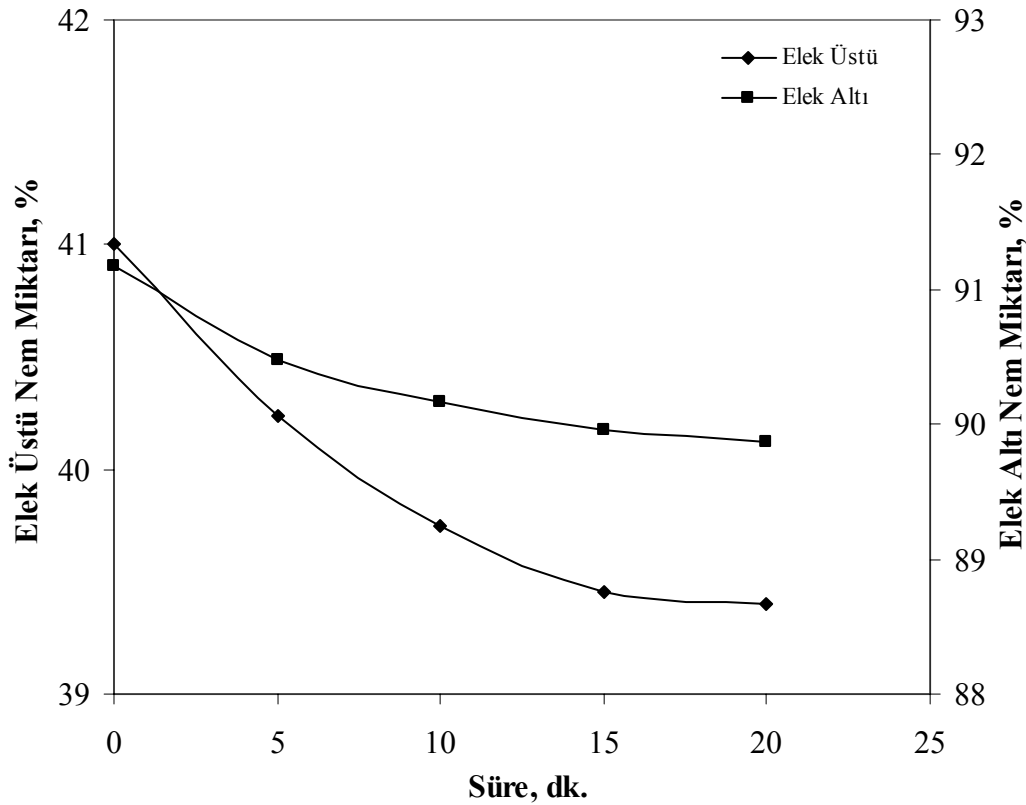
Sabit tutulan şartlar;

Besleme Hızı	: 20 l/dk.	Elek Açıklığı	: 0,100 mm
Elek Eğimi	: 3°	Açısal Motor Eğimi	: 90°
Yatay Motor Kuvveti	: 7,48 kN	Yatay Motor Frekansı	: 50 Hz
Açısal Motor Kuvveti	: 1,18 kN	Açısal Motor Frekansı	: 50 Hz
Ultrasonik Titreşim Frekans	: 25 kHz	Karıştırma Devri	: 250 d/d
pH	: 7,25		

Çizelge 6.33 : Farklı kondüsyon sürelerinde elde edilen nem değerleri.

Ultrasonik Titreşim Kondüsyon Süresi, dakika	Nem Değerleri, %	
	Elek Üstü Ürün	Elek Altı Ürün
0	41,00	91,17
5	40,24	90,48
10	39,75	90,17
15	39,45	89,96
20	39,40	89,87

Ultrasonik titreşim kondüsyon süresinin susuzlandırma üzerindeki etkisinin araştırılması amacıyla yapılan bu deneylerde, en düşük nem değeri olan %39,40'a sürenin 20 dakika olarak seçildiği durumda ulaşılmıştır. Fakat 15 ve 20 dakika kondüsyon sürelerinde elde edilen nem oranları karşılaştırıldığında bu değerlerin birbirlerine çok yakın olduğu görülmektedir. Bu sebeple en uygun ultrasonik kondüsyon süresi 15 dakika olarak seçilmiş ve daha sonraki deneylerde sabit tutulmuştur.



Şekil 6.37 : Kondüsyon süresinin nem değişimi üzerindeki etkisi.

6.7.1 Reaktif ilavesi ve ultrasonik titreşimin susuzlandırma üzerindeki etkisinin incelendiği deneyler

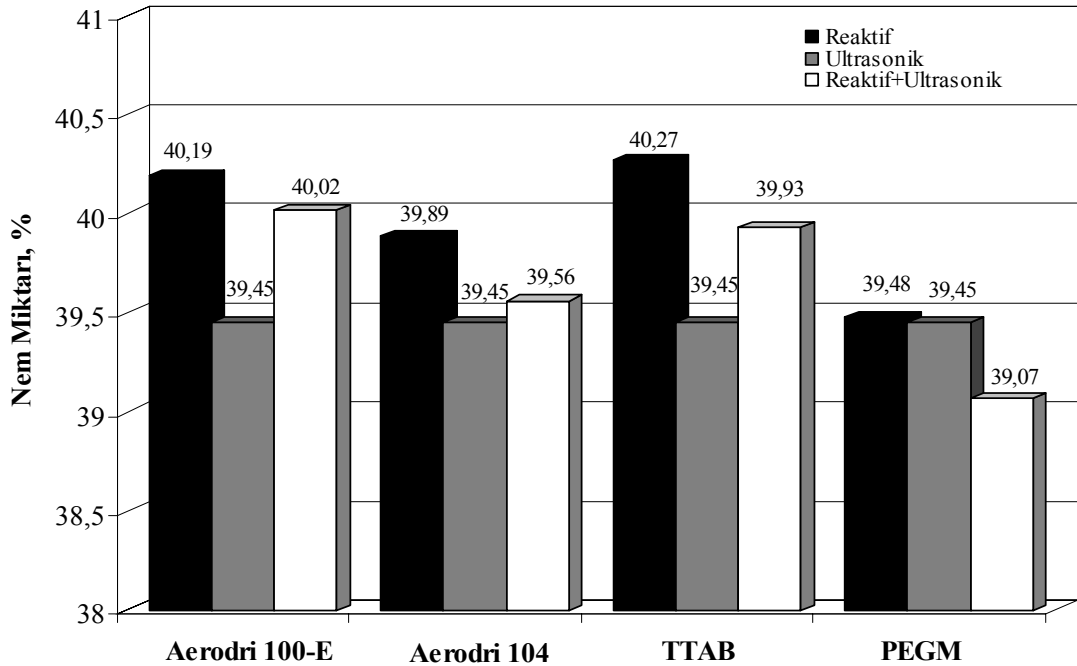
Reaktif ilavesi ve ultrasonik titreşimin küçük boyutlu kömür içeren pülp'lerin susuzlandırmasındaki etkisinin araştırılması amacıyla, daha önceki deneylerde tespit edilen titreşimli elek, reaktif ve ultrasonik titreşime ait en uygun koşullar sabit tutularak değişik kombinasyonlarda deneyler gerçekleştirilmiştir.

Sabit tutulan şartlar;

Besleme Hızı	: 20 l/dk.	Elek Açıklığı	: 0,100 mm
Elek Eğimi	: 3°	Açısal Motor Eğimi	: 90°
Yatay Motor Kuvveti	: 7,48 kN	Yatay Motor Frekansı	: 50 Hz
Açısal Motor Kuvveti	: 1,18 kN	Açısal Motor Frekansı	: 50 Hz
Ultrasonik Titreşim Frekans	: 25 kHz	Karıştırma Devri	: 250 d/d
Kondüsyon Süresi	: 15 dk.	pH	: 7,25

6.7.1.1 Reaktif+ultrasonik titreşimin susuzlandırmadaki etkisi

Bu deneylerde daha önceki deneylerde tespit edilen en uygun koşullar sabit tutularak ilk olarak süspansiyon reaktif ile muamele edilmiş daha sonra ise ultrasonik titreşim uygulanmıştır. Bu işlemleri takiben yapılan susuzlandırma deneyleri sonucunda her bir reaktif için elde edilen nem miktarları Şekil 6.38'de gösterilmiştir.

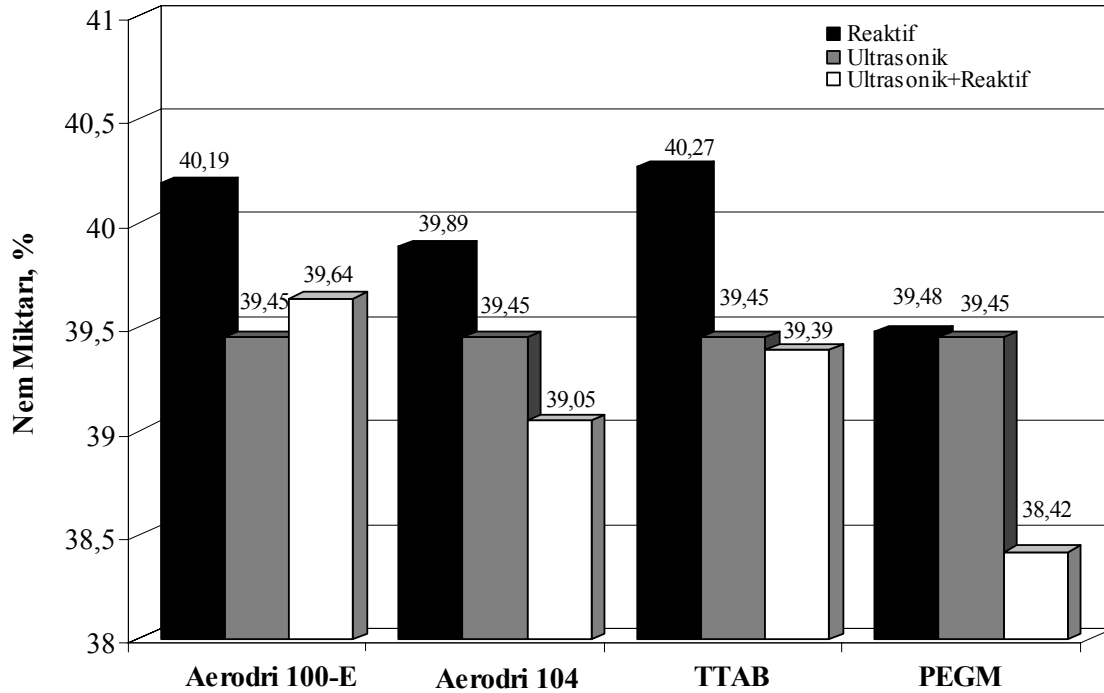


Şekil 6.38 : Reaktif+ultrasonik titreşimin nem değişimi üzerindeki etkisi.

Şekil 6.38’de görüldüğü üzere reaktif ilavesinin ardından ultrasonik titreşim ile şartlandırılan pül’ün susuzlandırılması sonucunda malzemenin nem içeriğinde azalma olmuştur. En iyi sonuç PEGM ilavesinin yapıldığı deneyde elde edilmiştir. Sadece reaktif ilavesi ile yapılan susuzlandırma deneylerinde elde edilen en düşük nem değeri olan %39,48 ultrasonik titreşimin verilmesi halinde %39,07’ye gerilemiştir.

6.7.1.2 Ultrasonik titreşim+reaktif ilavesinin susuzlandırmadaki etkisi

Bu deneylerde daha önceki deneylerde tespit edilen titreşimli eleğe ve reaktiflere ait en uygun koşullar sabit tutularak ilk olarak süspansiyona ultrasonik titreşim verilmiş, daha sonra reaktif ilave edilmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen nem miktarlarının değişimi Şekil 6.39’da gösterilmiştir.



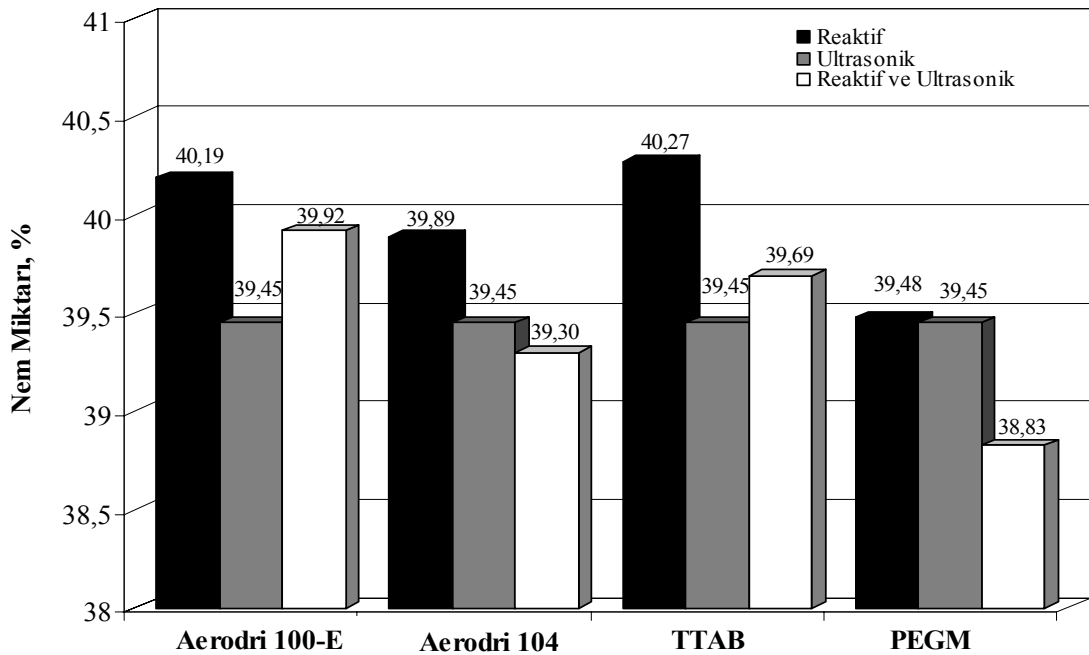
Şekil 6.39 : Ultrasonik titreşim+reaktif ilavesinin nem değişimi üzerindeki etkisi.

Şekil 6.39’da görüldüğü gibi ultrasonik titreşim ile şartlandırma ve ardından reaktif ilavesi ile yapılan susuzlandırma sonucunda malzemenin nem içeriğinde azalma gerçekleşmiştir. Sadece reaktif ilavesi ile yapılan deneylerde ulaşılan en düşük nem değeri olan %39,48, ultrasonik şartlandırma ve reaktif ilavesi ile %38,42’ye inmiştir.

6.7.1.3 Reaktif ve ultrasonik titreşimin susuzlandırmadaki etkisi

Titreşimli eleğe ve reaktiflere ait en uygun koşullar sabit tutularak diğer deneylerden farklı olarak süspansiyona ultrasonik titreşim ve reaktif ilavesi aynı anda uygulanmıştır. Buradaki amaç ultrasonik titreşim uygulanan süspansiyona ilave edilen reaktif'in kömür tanelerinin yüzeylerine hızlı ve etkili olarak adsorpsiyonunu sağlamak ve sonrasında yapılan susuzlandırma işlemleri sonucunda daha düşük nem içerikli malzeme üretmek olmuştur. Bu deneyler sonucunda elde edilen nem miktarlarının değişimi Şekil 6.40'da gösterilmiştir.

Ultrasonik titreşim ile şartlandırmanın ve reaktif ilavesinin aynı anda uygulanması sonucunda susuzlandırılan malzemenin nem içeriklerinde düşüş görülmektedir. Bu deneylerdeki en düşük nem değeri olan %38,83'e PEGM'in ilave edildiği deneylerde ulaşılmıştır.



Şekil 6.40 : Reaktif ve ultrasonik titreşimin nem değişimi üzerindeki etkisi.

Ultrasonik titreşimin ve reaktif ilavesinin etkisinin araştırıldığı deneylerde elde edilen sonuçlar incelendiğinde en düşük nem değerlerine ultrasonik titreşim+reaktif ilavesi ile yapılan deneylerde ulaşıldığı görülmektedir. İlk olarak ultrasonik titreşim ile şartlandırılan ve yüzeyleri temizlenen kömür, sonradan ilave edilen reaktifi daha etkin bir şekilde adsorplamakta, böylece hidrofobisite ve susuzlandırma verimi artmaktadır.

6.7.2 Farklı elek açıklıklarında reaktif ilavesi ve ultrasonik titreşim ile kademeli olarak yapılan susuzlandırma deneyleri

Titreşimli elek üzerine yerleştirilen farklı elek açıklıklarına sahip elek yüzeylerinin susuzlandırma üzerindeki etkilerinin araştırılması amacıyla 0,100 ve 0,150 mm'lik elek yüzeyleri kullanılarak reaktif ilaveli ve reaktif ilavesi olmadan kademeli olarak susuzlandırma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Reaktif ilavesi ile yapılan deneylerde ilk olarak pülp tambur tipi ultrasonik transdüser kullanılarak şartlandırılmış daha sonra yüzey aktif madde (PEGM) ilave edilmiştir. Reaktif ilavesi olmadan yapılan deneylerde ise pülp tambur tipi ultrasonik transdüser kullanılarak şartlandırılmış, daha sonra susuzlandırma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çizelge 6.34'te deneylere ait nem sonuçları, Şekil 6.41'de ise nem miktarlarının değişimi gösterilmiştir.

Sabit tutulan şartlar;

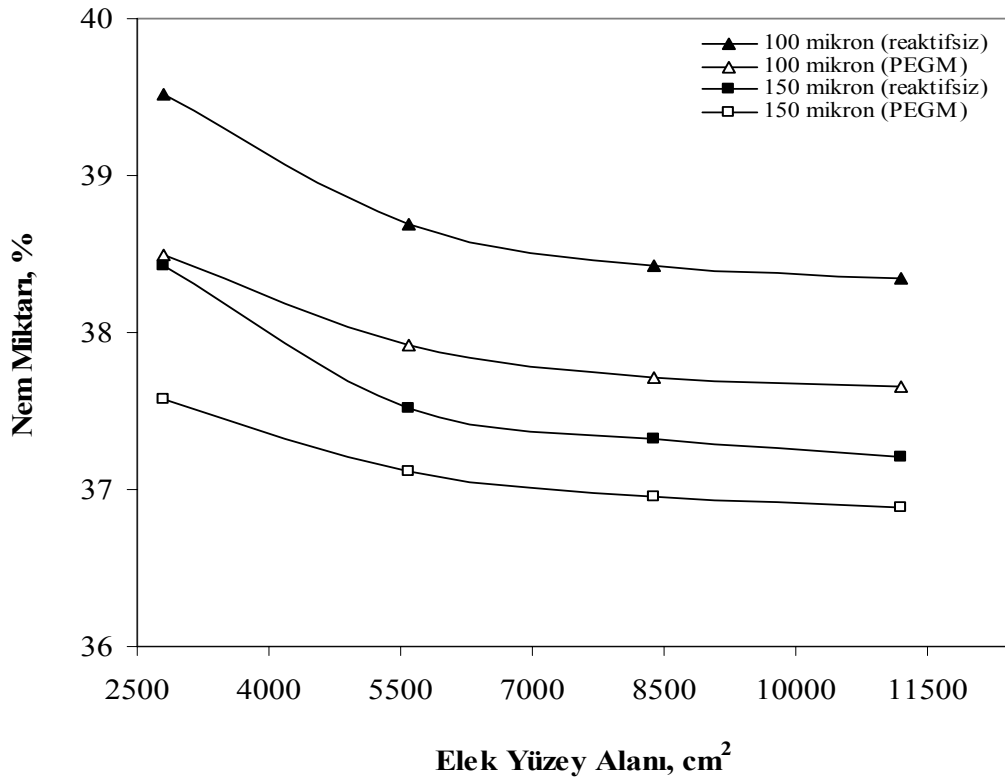
Besleme Hızı	: 20 l/dk.	Elek Açıklığı	: 0,100 mm
Elek Eğimi	: 3°	Açısal Motor Eğimi	: 90°
Yatay Motor Kuvveti	: 7,48 kN	Yatay Motor Frekansı	: 50 Hz
Açısal Motor Kuvveti	: 1,18 kN	Açısal Motor Frekansı	: 50 Hz
Reaktif Cinsi	: PEGM	Reaktif Miktarı	: 200 g/t
pH	: 7,25	Karıştırma Devri	: 250 d/d
Ultrasonik Titreşim Frekans	: 25 kHz	Şartlandırma Süresi	: 15 dk.

Çizelge 6.34 : Farklı elek açıklıkları kullanılarak yapılan kademeli susuzlandırma deneylerinde elde edilen nem değerleri.

Elek Yüzey Alanı, cm ²	Nem Değerleri, %			
	0,100 mm		0,150 mm	
	Reaktifsiz	PEGM	Reaktifsiz	PEGM
2800	39,52	38,49	38,43	37,58
5600	38,69	37,92	37,52	37,11
8400	38,43	37,71	37,32	36,95
11200	38,34	37,66	37,21	36,89

Çizelge 6.34'te görüldüğü üzere ilk olarak ultrasonik titreşim uygulanan ve ardından reaktif ilave edilen süspansiyonun 150 mikron elek açıklığına sahip yüksek frekanslı titreşimli elek ile susuzlandırılması sonucunda %36,89 nem içeriğine sahip malzeme üretilmiştir. Aynı şartlar altında, 100 mikron elek açıklığına sahip elek yüzeyi

kullanılarak yapılan susuzlandırma deneylerinin sonucunda ise malzemenin nem içeriği %37,66 olarak bulunmuştur.



Şekil 6.41 : Farklı elek açıklıklarında yapılan kademeli susuzlandırmanın nem değişimi üzerindeki etkisi.

Reaktif ilavesi olamadan 150 ve 100 mikron elek açıklığına sahip elek yüzeyleri kullanılarak yapılan susuzlandırma deneylerinde ise sırasıyla; %37,21 ve %38,34 nem içeriklerine sahip malzeme elde edilmiştir. Elek açıklığının artmasıyla elek altına geçen ince boyutlu malzeme miktarı artmakta ve elek üzerinde kalan malzemenin nem içeriği düşmektedir.

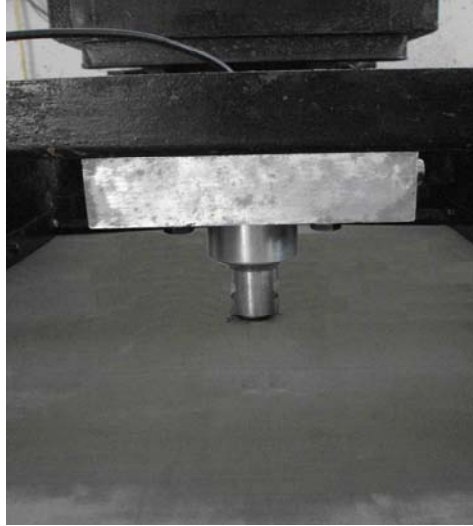
6.7.3 Titreşimli elek yüzeyine yerleştirilen ultrasonik transdüser'in susuzlandırma üzerindeki etkisinin incelendiği deneyler

Yüksek frekanslı titreşimli eleğin elek yüzeyine temas edecek şekilde yerleştirilen ve maksimum 26,5 kHz frekansa ulaşabilen korna tipi ultrasonik transdüser kullanılarak susuzlandırma deneyleri yapılmıştır (Şekil 6.42). Bu deneylerdeki amaç üretilen ultrasonik titreşimin elek yüzeylerinde tıkanan boşlukları açması ve eleme verimini arttırarak susuzlandırmaya katkı sağlamasıdır.

Reaktif ilaveli ve reaktif ilavesi olmadan kademeli olarak gerçekleştirilen bu deneylerde sadece yatay titreşim motoru kullanılmış ve yüzey aktif madde olarak PEGM seçilmiştir. Bu deneylere ait nem sonuçları Çizelge 6.35’te, elde edilen nem miktarlarının değişimi ise Şekil 6.43’te gösterilmiştir.

Sabit tutulan şartlar;

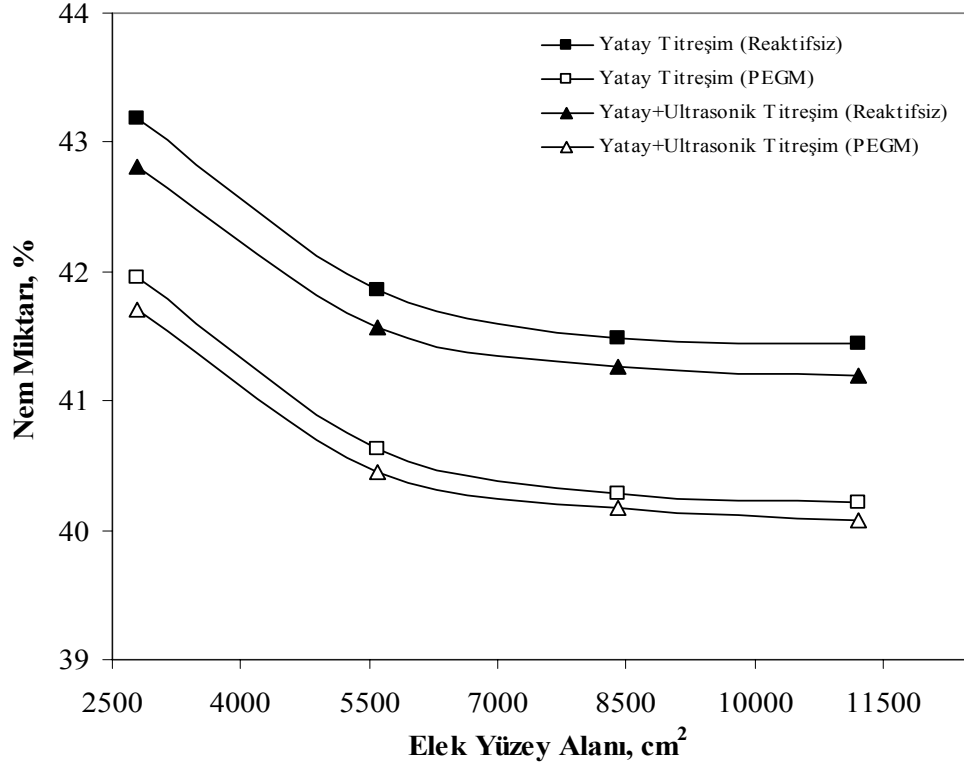
Besleme Hızı	: 20 l/dk.	Elek Açıklığı	: 0,100 mm
Elek Eğimi	: 3°	pH	: 7,25
Yatay Motor Kuvveti	: 7,48 kN	Yatay Motor Frekansı	: 50 Hz
Reaktif Miktarı	: 200 g/ton	Karıştırma Süresi	: 10 dk.
Ultrasonik Titreşim Frekans	: 26,5 kHz	Karıştırma Devri	: 250 d/d



Şekil 6.42 : Titreşimli elek üzerine yerleştirilmiş korna tip ultrasonik transdüser.

Çizelge 6.35 : Elek yüzeyi üzerine yerleştirilmiş ultrasonik transdüser ile yapılan susuzlandırma deneylerinde elde edilen nem değerleri.

Elek Yüzey Alanı, cm ²	Nem Değerleri, %			
	Yatay Titreşim		Yatay Titreşim+Ultrasonik Titreşim	
	Reaktifsiz	PEGM	Reaktifsiz	PEGM
2800	43,19	41,95	42,81	41,71
5600	41,86	40,63	41,57	40,45
8400	41,49	40,29	41,26	40,18
11200	41,44	40,22	41,19	40,08



Şekil 6.43 : Elek yüzeyi üzerine yerleştirilmiş ultrasonik transdüser'in nem değışimi üzerindeki etkisi.

Çizelge 6.35'teki sonuçlar incelendiğinde yüksek frekanslı titreşimli elekün elek yüzeyine temas edecek şekilde yerleştirilen korna tipi ultrasonik transdüser kullanılarak yapılan susuzlandırma deneylerinde elde edilen ürünlerin nem miktarlarının, ultrasonik titreşim kullanılmadan yapılan susuzlandırma deneylerinde elde edilen ürünlerin nem miktarlarından ortalama olarak %0,3 daha düşük olduğu görülmektedir.

Bu düşüşün sebebi elek yüzeylerindeki tıkanmaların ultrasonik titreşim kullanılarak azaltılmasıdır. Daha yüksek güce sahip ultrasonik transdüser kullanılarak elek yüzeylerindeki tıkanmalar azaltılabilir, eleme verimi artırılabilir ve nem içeriği daha düşük miktarlara indirilebilir.

6.8 Buchner Vakum Filtresi Kullanılarak Yapılan Susuzlandırma Deneyleri

Aşağıda verilen en iyi şartlar altında, yüksek frekanslı titreşimli elek ile yapılan kademeli susuzlandırma deneyleri sonucunda elde edilen %37,66 nem içeriğine sahip malzeme Buchner vakum filtresi kullanılarak filtrasyon işlemine tabi tutulmuştur (Şekil 6.44).

Bu deneydeki amaç filtrasyon sonucunda ulaşabilecek en son nem değerini saptamak ve susuzlandırma deneylerinde elde edilen nem içerikleri ile karşılaştırmaktır. Filtrasyon işleminin suresi kek'deki son damlanın suzlmesine kadar devam etmiştir. Bu suresinin bitiminde filtre edilen kek üzerinden alınan numene 105 C'deki etüve konulmuş, denge ağırlığına gelene kadar bekletilmiş ve toplam nem içeriği %34,14 olarak bulunmuştur.

Sabit tutulan şartlar;

Besleme Hızı	: 20 l/dk.	Elek Eğimi	: 3°
Elek Açıklığı	: 0,100 mm	pH	: 7,25
Yatay Motor Kuvveti	: 7,48 kN	Yatay Motor Frekansı	: 50 Hz
Açısal Motor Kuvveti	: 1,18 kN	Açısal Motor Frekansı	: 50 Hz
Açısal Motor Eğimi	: 90°	Reaktif Cinsi	: PEGM
Reaktif Miktarı	: 200 g/t	Karıştırma Devri	: 250 d/d
Ultrasonik Titreşim Frekans	: 25 kHz	şartlandırma Suresi	: 15 dk.



şekil 6.44 : Filtrasyon işlemlerinin yapıldığı deney düzeneği.

Titreşimli elek ile yapılan susuzlandırma deneylerinde elde edilen %37,66 nem miktarından %18,9 olarak bulunan bünye nemi miktarının çıkarılmasıyla fiziksel nem miktarı %18,76 olarak bulunmaktadır. Bu fark filtrasyon sonucunda elde edilen kek için %15,24 olmaktadır. Elek st susuzlandırma ile filtrasyon arasındaki fark sadece %3,52'dir. Bu durum 0,5 mm altındaki kömürün susuzlandırılmasında

kullanılan mekanik ve ultrasonik titreşim mekanizmalarının susuzlandırma performanslarının başarılı olduğunu göstermiştir.

Ayrıca, yukarıda verilen şartlarda yapılan susuzlandırma deneyleri sonucunda elde edilen elek üstü ve elek altı malzemelerinin kül, kükürt ve üst ısıl değer analizleri yapılmıştır. Bu analizlere ait veriler Çizelge 6.36'da verilmiştir.

Çizelge 6.36 : En uygun şartlarda yapılan susuzlandırma deneyleri sonucunda elde edilen ürünlerin kimyasal analiz değerleri (kuru esasa göre).

Eleman	İçerik	
	Elek Üstü	Elek Altı
Kül, %	29,41	65,56
Kükürt, %	0,885	0,098
Üst Isıl Değer, Kcal/kg	4097	1067

Yapılan deneyler sonucunda beslenen malzemenin (katı olarak) %73,2'si elek üzerinden, geri kalan %26,8'i ise elek altından alınmıştır. Çizelge 6.36'da da görüldüğü üzere titreşimli elek ile yapılan susuzlandırma işlemi sonucunda elek üzerinden düşük kül içeriğine ve yüksek ısıl değere sahip ürün, elek altından ise yüksek kül ve düşük ısıl değere sahip malzeme alınmıştır. Bu sonuçlar susuzlandırılan malzemenin aynı zamanda zenginleştirildiğini de ortaya koymuştur. Beslenen malzemenin kül içeriğinin %41,07 ve üst ısıl değerinin 2760 Kcal/kg olduğu bilindiğine göre yapılan susuzlandırma işlemi sonucunda kül içeriğinde yaklaşık %11,66 düşüş, üst ısıl değerde ise yaklaşık olarak 1337 Kcal/kg artış sağlanmıştır. Elek üstü ve elek altı ürünlerinin yanabilir verimleri ise sırasıyla, %84,8 ve %15,6 olarak hesaplanmıştır. Kükürt içerikleri bakımından durum farklıdır. Elek üstünden alınan ürünün kükürt içeriği beslenen malzemenin kükürt içeriğine yakındır. Fakat elek altına geçen malzemenin kükürt içeriği ise yaklaşık %0,1 olarak bulunmuştur. Bu sonuç, düşük kükürt içerikli ince boyutlu kil ve şistlerin çoğunlukla organik kükürt içerdiği düşünülen kömürden eleme ile yapılan susuzlandırma işlemleri sırasında ayrıldığını göstermektedir.

7. DENEYSEL VERİLERİN MODELLENMESİ

Tez kapsamında, küçük boyutlu kömür içeren katı-sıvı karışımının mekanik titreşim ve ultrasonik titreşim kullanılarak, yüksek frekanslı titreşimli elek mekanizması ile susuzlandırılması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, titreşimli eleğin en uygun parametrelerinin (eğim, frekans, besleme hızı ve elek açıklığı) bulunması amacıyla 0,5 mm boyutundaki temiz kömür numunesi ile deneyler yapılmıştır.

Titreşimli elek ile yapılan susuzlandırma deneylerinden elde edilen değerler kullanılarak Mathematica 6.0 programı ile besleme hızı-eğim, elek açıklığı-frekans, motor kuvveti-eğim değerlerine karşı gelen nem değerlerinin üç boyutlu olarak gösterildiği modeller geliştirilmiştir. Oluşturulan modellere ait fonksiyonlarda x ve y koordinatlarına eğim, frekans, besleme hızı ve motor kuvveti değerlerinin konulmasıyla, deneyin yapıldığı şartlar altında z ekseninde yer alan nem değeri hesap yoluyla bulunabilmektedir.

Daha önceki deneylerde bulunan en uygun parametreler sabit tutularak değişik yüzey aktif maddelerin susuzlandırma üzerindeki etkileri incelenmiş ve her bir reaktif için ayrı ayrı model fonksiyonları oluşturulmuş ve 3 boyutlu eğriler çizilmiştir. Model fonksiyonunda x yerine pH ve y yerine de reaktif miktarının konulması durumunda, deneyin yapıldığı şartlar altında z ekseninde yer alan nem değeri hesaplanabilmektedir.

Aynı şekilde, titreşimli elek ve reaktiflerle ilgili bulunan en uygun parametreler sabit tutularak eleme yüzey alanının arttırıldığı deneyler gerçekleştirilmiş, elde edilen veriler kullanılarak model fonksiyonları ve grafikler oluşturulmuştur. Model fonksiyonunda x yerine reaktif miktarı ve y yerine de yüzey alanı değerlerinin konulması durumunda z ekseninde yer alan nem değeri hesap yoluyla bulunabilmektedir.

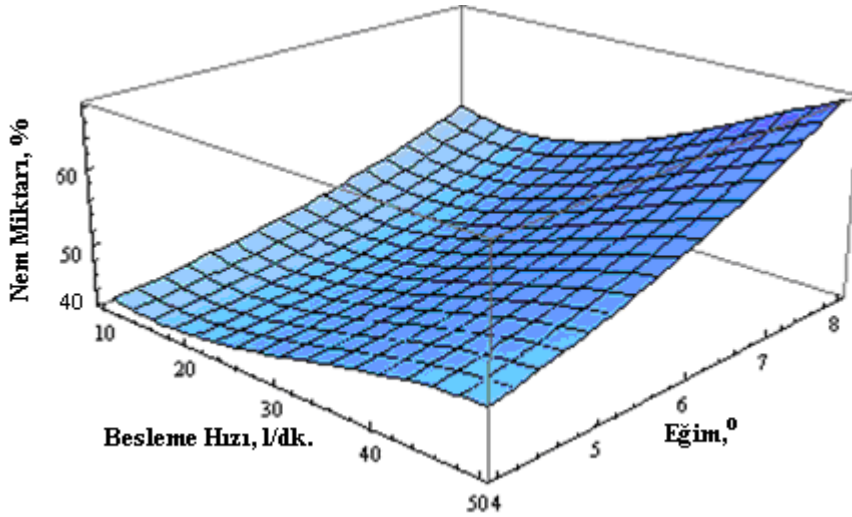
7.1 Titreşimli Elek ile Yapılan Deneyler

Titreşimli eleğe ait parametrelerin birbirleri ve elde edilen nem değerleri arasındaki bağlantılarının araştırılması amacıyla; besleme hızı-eğim, elek açıklığı-frekans, motor kuvveti-eğim olmak üzere 3 adet sistemden oluşan modeller geliştirilmiştir.

Oluşturulan modellere ait fonksiyonlarda incelenmesi düşünülen besleme hızı, eğim, frekans ve motor kuvveti değerlerinin x ve y'ye girilmesi durumunda, elde edilecek nem değeri z olarak bulunmaktadır.

7.1.1 Besleme hızı-eğim değerlerinin modellenmesi

Eğim ve besleme hızının nem miktarı üzerindeki etkisinin daha belirgin görülmesi amacıyla Mathematica 6.0 programı kullanılarak; besleme hızı, eğim, nem değişimini içeren üç boyutlu modeller geliştirilmiştir. Oluşturulan modelin fonksiyonunda x yerine besleme hızı değeri ve y yerine de eğim değerlerinin konulması durumunda, deneyin yapıldığı şartlar altında z ekseninde yer alan nem miktarının değeri hesap yoluyla bulunabilmektedir. 0,150 mm elek açıklığında ve 50 Hz yatay motor frekansı kullanılarak yapılan bu deneylere ait grafik ve model fonksiyonu Şekil 7.1'de gösterilmiştir.

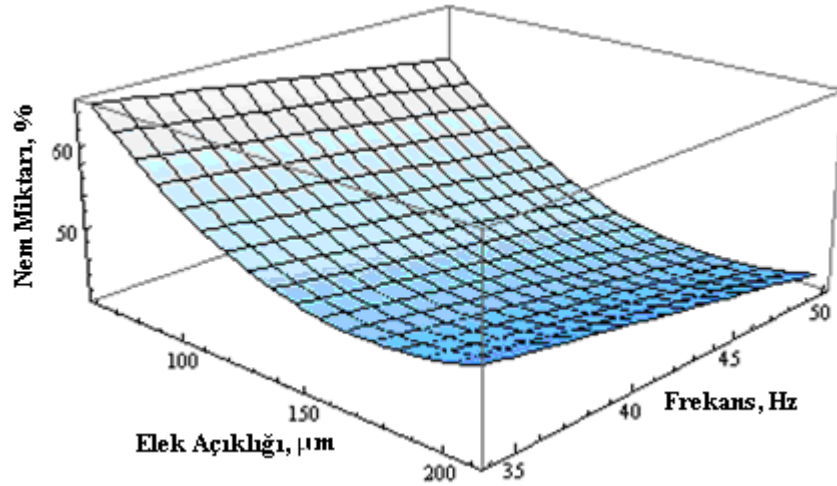


$$41.5224-0.257994x+0.0229165x^2-0.000336667x^3+1.38217y-0.14271xy+0.00258337x^2y+0.0662431y^2+0.0028125xy^2+0.026826y^3=z$$

Şekil 7.1 : Yatay titreşim ile yapılan deneylerde besleme hızının ve eğimin nem değişimi üzerindeki etkisi.

7.1.2 Elek açıklığı-frekans değerlerinin modellenmesi

Elek açıklığı ve frekans'ın nem miktarı üzerindeki etkisinin araştırılması amacıyla, fonksiyonda bulunan deneysel veriler yardımıyla elek açıklığı, frekans ve nem değişimini içeren üç boyutlu modeller geliştirilmiştir. Oluşturulan modelin fonksiyonunda x yerine elek açıklığı ve y yerine de frekans değerlerinin konulması durumunda, deneyin yapıldığı şartlar altında z ekseninde yer alan nem miktarının değeri hesap yoluyla bulunabilmektedir. Besleme hızının 20 l/dk., eğim'in 4° seçildiği bu deneylere ait grafik ve model fonksiyonu Şekil 7.2'de gösterilmiştir.



$$88.5384-0.841451x+0.00808398x^2-0.0000192679x^3+0.90276y-0.0188988xy+0.0000251761x^2y+0.00245665y^2+0.000126124xy^2-0.000170232y^3=z$$

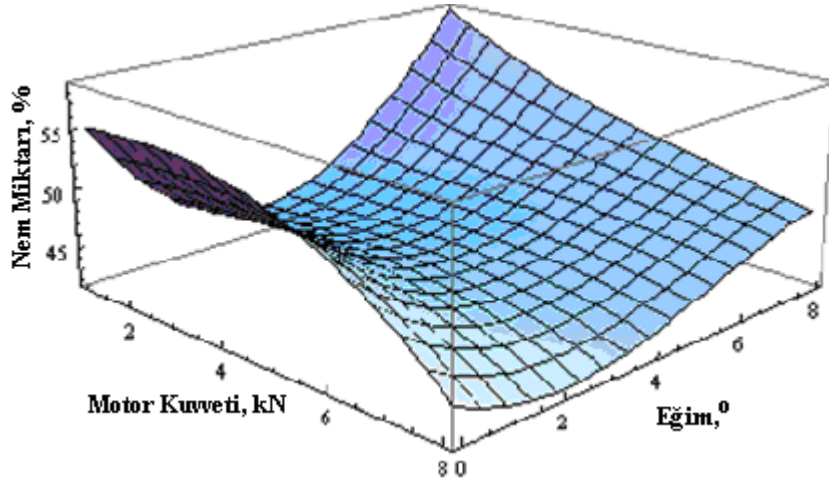
Şekil 7.2 : Yatay titreşim ile yapılan deneylerde elek açıklığı ve frekansın nem değişimi üzerindeki etkisi.

7.1.3 Motor kuvveti-eğim değerlerinin modellenmesi

Motor kuvveti ve eğim'in nem miktarı üzerindeki etkisinin araştırılması amacıyla, fonksiyonda bulunan deneysel veriler yardımıyla motor kuvveti, eğim ve nem değişimini içeren üç boyutlu modeller geliştirilmiştir. Oluşturulan modelin fonksiyonunda x yerine motor kuvveti ve y yerine de eğim değerlerinin konulması durumunda, deneyin yapıldığı şartlar altında z ekseninde yer alan nem miktarının değeri hesap yoluyla bulunabilmektedir. Yatay motor frekansının 50 Hz, elek açıklığının 0,100 mm ve besleme hızının 20 l/dk. seçildiği durumlarda yapılan deneylere ait grafik ve model fonksiyonu Şekil 7.3'te gösterilmiştir.

7.2 Reaktif İlavesi ile Yapılan Deneylerin Modellenmesi

Reaktiflerle yapılan susuzlandırma deneylerinde yüzey aktif reaktiflerin (Aerodri 100-E, Aerodri 104, Tetradesil Trimetil Amonyum Bromür (TTAB) ve Polietilen Glikol Monooleat (PEGM)) miktarlarının ve ortam pH'nın susuzlandırma üzerindeki etkisinin modellenmesi amacıyla elek ile ilgili en uygun koşullar sabit tutularak deneyler gerçekleştirilmiş ve elde edilen veriler ışığında her bir reaktif için ayrı ayrı model fonksiyonları oluşturulmuş ve 3 boyutlu eğriler çizilmiştir. Model fonksiyonunda x yerine pH ve y yerine de reaktif miktarının konulması durumunda ise, z ekseninde yer alan nem değeri hesap yoluyla bulunabilmektedir.

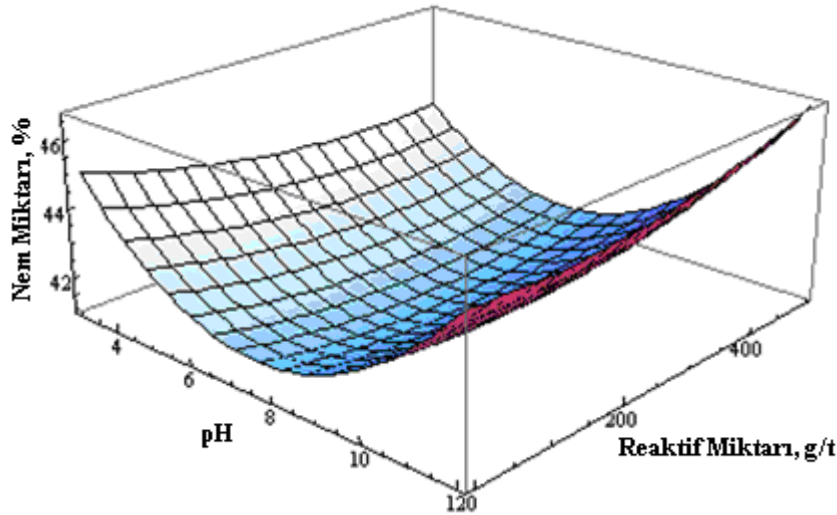


$$4.6272+0.728538x-0.106039x^2-0.0184931x^3-7.14653y+0.131172xy+0.0588509x^2y+1.32624y^2+0.0813874xy^2-0.0403587y^3=z$$

Şekil 7.3 : Yatay titreşim ile yapılan deneylerde motor kuvveti ve eğimin nem değişimi üzerindeki etkisi.

7.2.1 Aerodri 100-E ilavesi ile yapılan deneylerin modellenmesi

Aerodri 100-E miktarının ve ortam pH'nın nem miktarı üzerindeki etkisini görmek amacıyla elde edilen deneysel veriler yardımıyla fonksiyon oluşturulmuş ve reaktif miktarı, pH ve nem değişimini içeren üç boyutlu model geliştirilmiştir. Yatay ve açıl motor frekanslarının 50 Hz, elek açıklığının 0,100 mm, besleme hızının 20 l/dk. ve eğimin 3° seçildiği durumlarda gerçekleştirilen deneylere ait grafik ve model fonksiyonu Şekil 7.4'te gösterilmiştir.

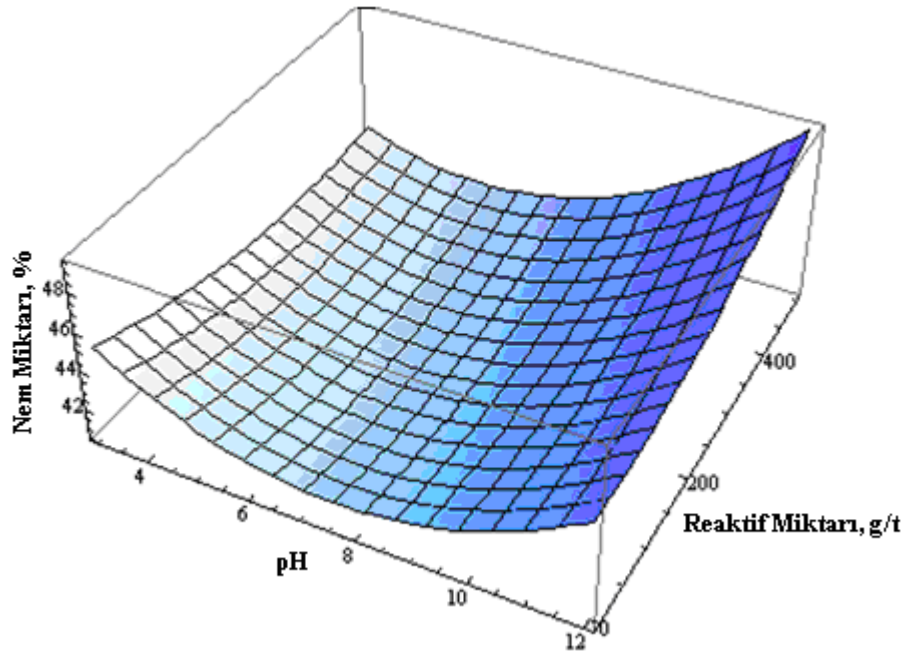


$$51.176-2.54443x+0.171594x^2-0.00943304y+0.000601983xy+9.75677 \times 10^{-6}y^2=z$$

Şekil 7.4 : Aerodri 100-E ilavesi ile yapılan deneylerde reaktif miktarı ve pH'nın nem değişimi üzerindeki etkisi.

7.2.2 Aerodri 104 ilavesi ile yapılan deneylerin modellenmesi

Aerodri 104 miktarının ve ortam pH'nın nem miktarı üzerindeki etkisini görmek amacıyla elde edilen deneysel veriler yardımıyla fonksiyon oluşturulmuş ve reaktif miktarı, pH ve nem değişimini içeren üç boyutlu model geliştirilmiştir. Yatay ve açıl motor frekanslarının 50 Hz, elek açıklığının 0,100 mm, besleme hızının 20 l/dk. ve eğimin 3° seçildiği durumlarda gerçekleştirilen deneylere ait grafik ve model fonksiyonu Şekil 7.5'te gösterilmiştir.

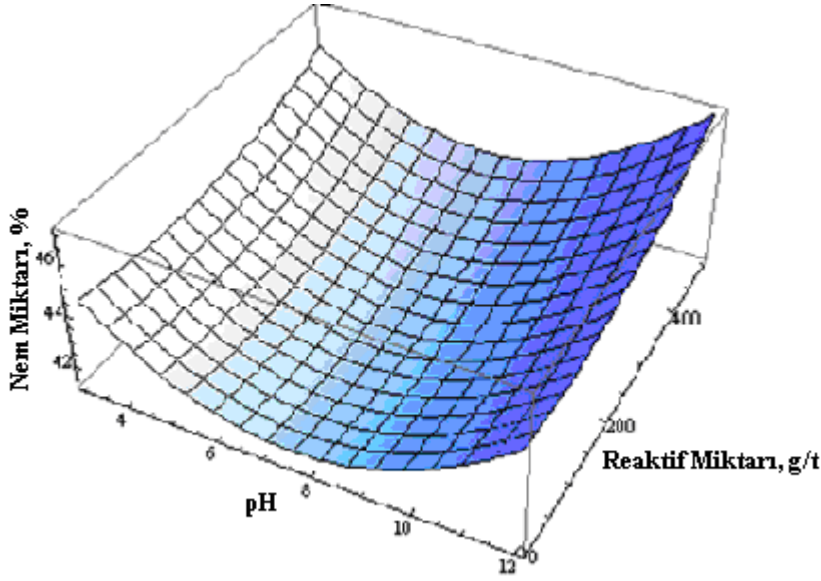


$$51.9054-2.81843x+0.190034x^2-0.0175202y+0.00132468xy+0.0000192398y^2=z$$

Şekil 7.5 : Aerodri 104 ilavesi ile yapılan deneylerde reaktif miktarı ve pH'nın nem değişimi üzerindeki etkisi.

7.2.3 TTAB ilavesi ile yapılan deneylerin modellenmesi

TTAB miktarının ve ortam pH'nın nem miktarı üzerindeki etkisini görmek amacıyla elde edilen deneysel veriler yardımıyla fonksiyon oluşturulmuş ve reaktif miktarı, pH ve nem değişimini içeren üç boyutlu model geliştirilmiştir. Yatay ve açıl motor frekanslarının 50 Hz, elek açıklığının 0,100 mm, besleme hızının 20 l/dk. ve eğimin 3° seçildiği durumlarda gerçekleştirilen deneylere ait grafik ve model fonksiyonu Şekil 7.6'da gösterilmiştir.

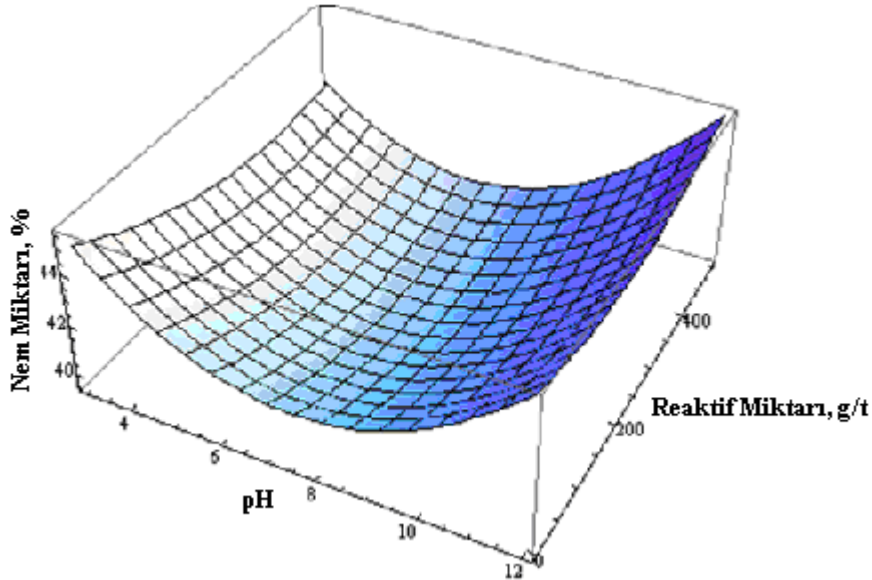


$$49.9625-2.28872x+0.155185x^2-0.00581886y+0.000232228xy+0.000015065y^2=z$$

Şekil 7.6 : TTAB ilavesi ile yapılan deneylerde reaktif miktarı ve pH'ın nem değişimi üzerindeki etkisi.

7.2.4 PEGM ilavesi ile yapılan deneylerin modellenmesi

PEGM miktarının ve ortam pH'ının nem miktarı üzerindeki etkisini görmek amacıyla elde edilen deneysel veriler yardımıyla fonksiyon oluşturulmuş ve reaktif miktarı, pH ve nem değişimini içeren üç boyutlu model geliştirilmiştir. Yatay ve açılmalı motor frekanslarının 50 Hz, elek açıklığının 0,100 mm, besleme hızının 20 lt/dakika ve eğimin 3° seçildiği durumlarda gerçekleştirilen deneylere ait grafik ve model fonksiyonu Şekil 7.7'de gösterilmiştir.



$$51.7645-2.80383x+0.189205x^2-0.0164801y+0.000610978xy+0.0000192307y^2=z$$

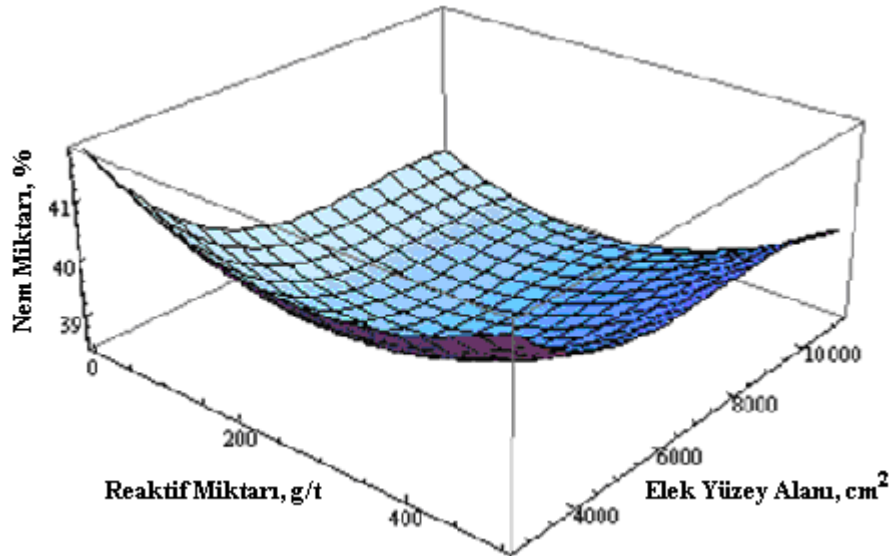
Şekil 7.7 : PEGM ilavesi ile yapılan deneylerde reaktif miktarı ve pH'ın nem değişimi üzerindeki etkisi.

7.3 Elek Yüzey Alanının Arttırılmasıyla Yapılan Susuzlandırma Deneylerinin Modellenmesi

Elek yüzey alanının arttırılmasıyla yapılan deneylerde elde edilen nem değerlerinin değişiminin modellenmesi amacıyla elek ve reaktifler ile ilgili bulunan en iyi koşullar (yatay ve açıl motor frekansı: 50 Hz, elek açıklığı: 0,100 mm, besleme hızı: 20 l/dk., eğim: 3°, pH: 7,25) sabit tutularak her bir reaktif için ayrı ayrı model fonksiyonları oluşturulmuş ve 3 boyutlu eğriler çizilmiştir. Model fonksiyonunda x yerine reaktif miktarı ve y yerine de yüzey alanı değerlerinin konulması durumunda z ekseninde yer alan nem değeri hesap yoluyla bulunabilmektedir.

7.3.1 Aerodri 100-E ilavesi ile yapılan elek yüzey alanının arttırıldığı deneylere ait verilerin modellenmesi

Aerodri 100-E miktarının ve elek yüzey alanının nem miktarı üzerindeki etkisini görmek amacıyla elde edilen deneysel veriler yardımıyla fonksiyon oluşturulmuş ve reaktif miktarı, eleme yüzey alanı ve nem değişimini içeren üç boyutlu model geliştirilmiştir. Yatay ve açıl motor frekanslarının 50 Hz, elek açıklığının 0,100 mm, besleme hızının 20 l/dk. ve eğimin 3° seçildiği durumlarda gerçekleştirilen deneylere ait grafik ve model fonksiyonu Şekil 7.8'de gösterilmiştir.

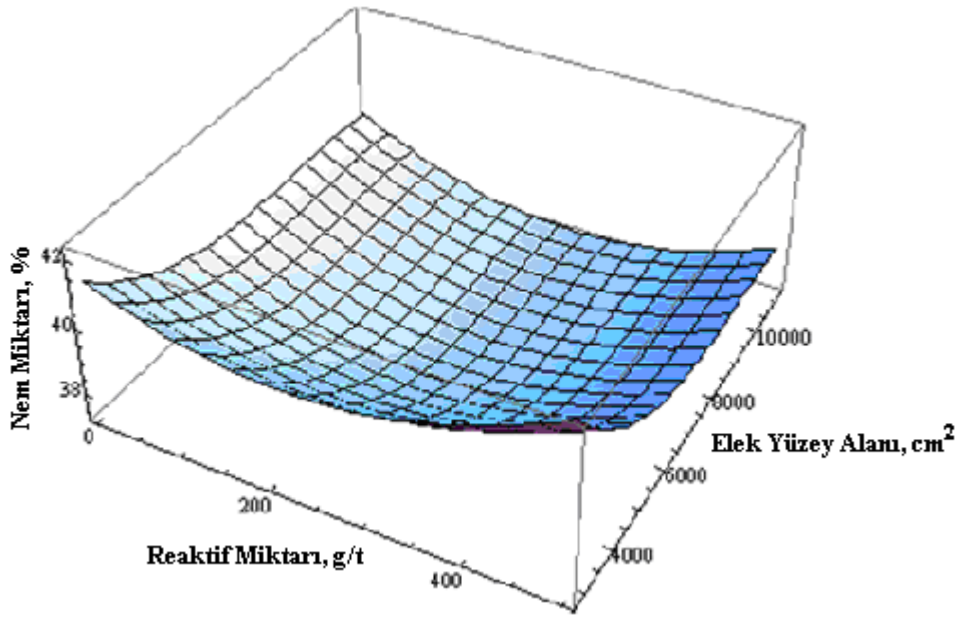


$$47.746-0.0126327x+0.0000168964x^2-0.00290835y+1.58695\times 10^{-6}xy+3.23554\times 10^{-7}y^2-9.42945\times 10^{-11}xy^2-1.18073\times 10^{-11}y^3=z$$

Şekil 7.8 : Elek yüzey alanının arttırıldığı deneylerde yüzey alanının ve Aerodri 100-E miktarının nem değişimi üzerindeki etkisi.

7.3.2 Aerodri 104 ilavesi ile yapılan elek yüzey alanının arttırıldığı deneylere ait verilerin modellenmesi

Aerodri 104 miktarının ve elek yüzey alanının nem miktarı üzerindeki etkisini görmek amacıyla elde edilen deneysel veriler yardımıyla fonksiyon oluşturulmuş ve reaktif miktarı, elek yüzey alanı ve nem değişimini içeren üç boyutlu model geliştirilmiştir. Yatay titreşim ve açıl motor frekanslarının 50 Hz, elek açıklığının 0,100 mm, besleme hızının 20 l/dk. ve eğimin 3° seçildiği durumlarda gerçekleştirilen deneylere ait grafik ve model fonksiyonu Şekil 7.9'da gösterilmiştir.

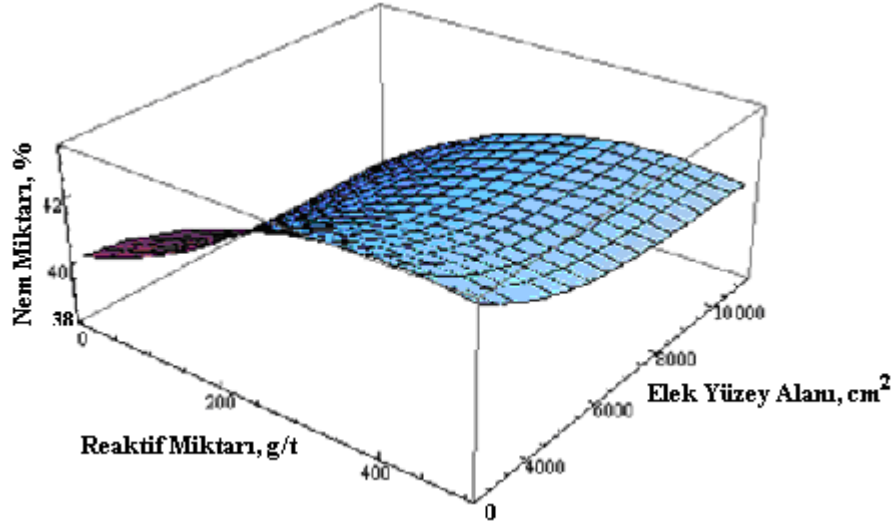


$$46.3586-0.0074568x+0.000025702x^2-0.00253299y-1.44734\times 10^{-6}xy+2.95765\times 10^{-7}y^2+7.88464\times 10^{-11}xy^2-1.13491\times 10^{-11}y^3=z$$

Şekil 7.9 : Elek yüzey alanının arttırıldığı deneylerde yüzey alanının ve Aerodri 104 miktarının nem değişimi üzerindeki etkisi.

7.3.3 TTAB ilavesi ile yapılan elek yüzey alanının arttırıldığı deneylere ait verilerin modellenmesi

TTAB miktarının ve elek yüzey alanının nem miktarı üzerindeki etkisini görmek amacıyla elde edilen deneysel veriler yardımıyla fonksiyon oluşturulmuş ve reaktif miktarı, elek yüzey alanı ve nem değişimini içeren üç boyutlu model geliştirilmiştir. Yatay ve açıl motor frekanslarının 50 Hz, elek açıklığının 0,100 mm, besleme hızının 20 lt/dakika ve eğimin 3° seçildiği durumlarda gerçekleştirilen deneylere ait grafik ve model fonksiyonu Şekil 7.10'da gösterilmiştir.

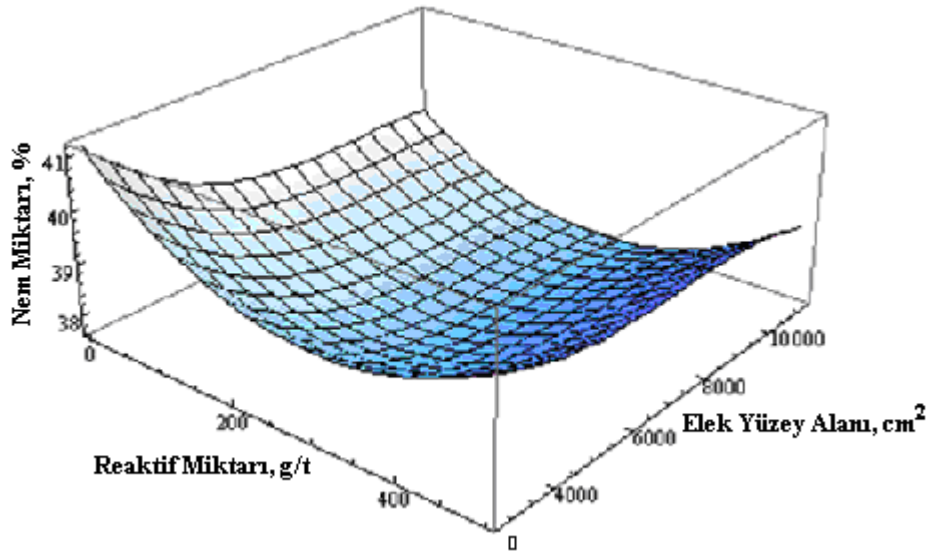


$$42.2979+0.0163764x-0.0000204282x^2-0.000881596y-1.95855\times 10^{-8}xy+4.70117\times 10^{-8}y^2=z$$

Şekil 7.10 : Elek yüzey alanının arttırıldığı deneylerde yüzey alanının ve TTAB miktarının nem değişimi üzerindeki etkisi.

7.3.4 PEGM ilavesi ile yapılan elek yüzey alanının arttırıldığı deneylere ait verilerin modellenmesi

PEGM miktarının ve elek yüzey alanının nem miktarı üzerindeki etkisini görmek amacıyla elde edilen deneysel veriler yardımıyla fonksiyon oluşturulmuş ve reaktif miktarı, elek yüzey alanı ve nem değişimini içeren üç boyutlu model geliştirilmiştir. Yatay titreşim ve açıl motor frekanslarının 50 Hz, elek açıklığının 0,100 mm, besleme hızının 20 lt/dakika ve eğimin 3° seçildiği durumlarda gerçekleştirilen deneylere ait grafik ve model fonksiyonu Şekil 7.11’de gösterilmiştir.



$$45.1928-0.0175081x+0.0000237919x^2-0.00195578y+1.47989\times 10^{-6}xy+2.09859\times 10^{-7}y^2-8.751\times 10^{-11}xy^2-7.43635\times 10^{-12}y^3=z$$

Şekil 7.11 : Elek yüzey alanının arttırıldığı deneylerde yüzey alanının ve PEGM miktarının nem değişimi üzerindeki etkisi.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Küçük boyutlu kömürlerin susuzlandırılmasında ultrasonik ve mekanik titreşim mekanizmalarının etkilerinin araştırıldığı bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir;

- Deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere 0,5 mm altındaki kömür numunesi ve iri parçalı zenginleştirilmiş kömür numunesi Manisa-Soma'da bulunan ve Gürmin Madencilik tarafından işletilen kömür zenginleştirme tesisi ziyaret edilerek temin edilmiştir.

- 0,5 mm altındaki malzemenin nem içeriği ortalama %82,5 olarak bulunmuştur.
- Kömürün içerdiği bünye nemi %18,9 olarak bulunmuştur.
- Temsili numunelerin, d_{80} ve d_{50} boyutları, yaklaşık olarak sırasıyla 0,35 ve 0,18 mm olarak bulunmuştur.

- 0,5 mm altındaki kömür numunesinin kimyasal özelliklerinin belirlenmesi amacıyla, kül, kükürt, sabit karbon, uçucu madde, ısı değer analizleri ile boyut aralıklarında kül analizleri yapılmış ve yanabilir verimleri hesaplanmıştır.

- Yüksek titreşim frekanslı susuzlandırma eleğinin en uygun eğim, frekans, besleme hızı ve elek açıklığı parametrelerinin tespiti amacıyla yapılan deneyler sonucunda, yaklaşık %82,5 nem oranından %44,77 nem oranına; elek eğiminin 4° , frekans değerinin 50 Hz, besleme hızınının 20 l/dk. ve elek açıklığının 0,100 mm olduğu durumlarda ulaşılmıştır.

- Titreşimli elek üzerine yerleştirilen ve dik titreşim uygulayan titreşim motorunun yatay titreşim motoru ile birlikte kullanılması sonucu, nem oranı %44,77'den %43,08 nem değerine indirilmiştir.

- Motor kuvvetinin 1,18 kN besleme hızınının 20 l/dk., elek açıklığının 0,100 mm ve eğimin 4° olduğu deneyde elde edilen %44,77 nem oranı, motor kuvvetinin 7,48 kN'ye yükseltilmesi ile %43,61'e kadar gerilemiştir.

- Yatay titreşim motoru ile birlikte kullanılan açısız titreşim motorunun susuzlandırma üzerindeki etkisinin araştırılması amacıyla en uygun koşullarda deneyler gerçekleştirilmiş ve %41,00 nem değerine ulaşılmıştır.

- %62,5 ve %82,5 nem oranları arasındaki değişik nem içeriklerindeki malzemelerle yapılan susuzlandırma deneylerinde elde edilen sonuçların birbirlerine çok yakın olduğu gözlenmiş, beslenen malzemenin nem içeriğinin susuzlandırma açısından etkili olmadığı saptanmıştır.

- Reaktif ilavesi olmadan daha önce bulunan en iyi koşullarda değişik pH değerlerinde susuzlandırma deneyleri yapılmış, en iyi sonuç literatüre uyumlu olarak pülp'ün doğal pH (7,25) değerinde elde edilmiştir.

- Reaktif olarak Aerodri 100-E kullanılarak yapılan susuzlandırma deneyleri sonucunda en düşük nem değeri olan %40,19'a reaktif miktarının 200 g/t, pH'ın 7,25 ve karıştırma süresinin 10 dakika seçildiği durumlarda ulaşılmıştır.

- Reaktif olarak Aerodri 104 kullanılarak yapılan susuzlandırma deneyleri sonucunda en düşük nem değeri olan %39,98'e reaktif miktarının 100 g/t, pH'ın 7,25 ve karıştırma süresinin 10 dakika seçildiği durumlarda ulaşılmıştır.

- Reaktif olarak PEGM kullanılarak yapılan susuzlandırma deneyleri sonucunda en düşük nem değeri olan %39,48'e reaktif miktarının 200 g/t, pH'ın 7,25 ve karıştırma süresinin 10 dakika seçildiği durumlarda ulaşılmıştır.

- Elek yüzey alanının artırılmasının nem değişimi üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla titreşimli elek üzerinden ilk kademede alınan malzeme eleğe tekrar beslenerek susuzlandırma deneyleri gerçekleştirilmiştir. 4. kademe beslemeden sonra elek üzerinden alınan malzemenin sabit nem değerine ulaştığı görülmüştür. PEGM ilavesi ile yapılan kademeli susuzlandırma deneylerinde en düşük nem değeri olan, %37,75'e ulaşılmıştır. Bu düşüşün sebebi, elek yüzey alanının artması ile malzemenin elek yüzeyinde kalma ve elek yüzeyi ile temas süresinin artmasıdır.

- Değişik reaktif konsantrasyonlarında yüzey gerilimi ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Reaktif miktarının artmasıyla sıvının yüzey gerilimi düşmüş ve her bir reaktif için belli konsantrasyonda sabitlenmiştir. En fazla düşüş PEGM'in kullanıldığı durumda gerçekleşmiştir. Reaktif ilavesi ile yapılan susuzlandırma deneylerinde en düşük nem değerinin PEGM kullanarak elde edildiği bilindiğine göre, sıvının yüzey geriliminin

yüzey aktif maddeler kullanılarak düşürülmesinin susuzlandırma işlemlerinin başarısını olumlu olarak etkilediği ortaya çıkmaktadır.

- Farklı pH değerlerinde temas açısı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. En yüksek temas açısı değeri pH 7 civarında elde edilmiş, daha düşük ve yüksek pH değerlerinde ise, temas açısında düşüş saptanmıştır. Temas açısının artması ile hidrofobisite artmakta ve elde edilen ürünün nem içeriği azalmaktadır.

- Reaktif ilavesinin temas açısı üzerindeki etkisinin araştırılması amacıyla doğal pH'ta farklı reaktif miktarlarında temas açısı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Reaktif miktarının artmasıyla temas açısı değerlerinde artış gözlenmiştir. Bu artışın sebebi kullanılan yüzey aktif maddelerin kömür yüzeylerinde adsorplanması ve kömür yüzeylerinin hidrofobikliğini arttırmasıdır. 2,5 mg/l'den yüksek reaktif miktarlarında ise, temas açısı değerlerinde azalma görülmektedir. Bu düşüşün sebebi ise, yüzeyleri tamamen kaplanan kömürün daha fazla yüzey aktif maddenin adsorplanmasına olanak vermemesi, çözelti içerisindeki reaktif miktarının artması sonucunda yüzeyde ikinci bir tabakanın oluşmasıdır.

- Değişik kül içeriklerine sahip malzemelerin zeta potansiyel değerlerinin tespiti amacıyla farklı pH değerlerinde ölçümler gerçekleştirilmiştir. Literatür'e uyumlu olarak, ölçümleri yapılan düşük kömürleşme derecesine sahip kömür numunelerinin yüzey yükleri negatif olarak bulunmuştur. Yüksek ve düşük pH değerlerinde zeta potansiyel değerlerinde düşüş gözlenmiş, pH 7'de her bir grup için en yüksek zeta potansiyel değerine ulaşılmıştır.

- Reaktif ilavesinin zeta potansiyel üzerindeki etkisini incelemek amacıyla doğal pH'ta karışım numunesi üzerinde ölçümler yapılmıştır. Gerek anyonik gerekse katyonik tip reaktiflerde düşük konsantrasyonlarda yüzey yükünün değişimi beklentilerin tersi yönde gelişmektedir. Örneğin anyonik tip reaktiflerde yüzey yükü 5 mg/l değerine kadar pozitif olarak gelişmekte, bu değer üstünde negatif olmaktadır. Katyonik ve noniyonik tip reaktiflerde ise, bu durumun tersi görülmektedir. Bu durumun reaktifin yüzeye olan adsorpsiyonu ile açıklanması mümkün görülmemektedir. Bu davranış temas açısı ölçümleri ile paralellik göstermekte olup, benzer şekilde belli bir reaktif konsantrasyonuna kadar temas açısı artmakta daha sonra azalmaya başlamaktadır.

- Süspansiyon içerisindeki kömür tanelerinin yüzey özelliklerini değiştirerek susuzlandırma işleminin verimini arttırması amacıyla korna ve tambur tipi ultrasonik

transdüserler kullanılarak reaktif ilavesi olmadan deneyler yapılmıştır. En iyi sonuç 25 kHz frekans ve yaklaşık 500 watt güce sahip tambur tipi ultrasonik transdüser'in kullanıldığı deneylerde bulunmuş, nem oranı %41,00'dan %39,45'e düşürülmüştür.

- Yapılan çok sayıda deneyin sonucunda en düşük nem değerlerine, ultrasonik titreşim+reaktif ilavesi ile ulaşıldığı görülmektedir. İlk olarak ultrasonik titreşim ile şartlandırılan ve yüzeyleri temizlenen kömür, sonradan ilave edilen reaktifi daha etkin bir şekilde adsorplamakta, böylece hidrofobisite ve susuzlandırma verimi artmaktadır.

- 0,100 ve 0,150 mm'lik elek yüzeyleri kullanılarak, ultrasonik titreşim ile şartlandırma sonrasında yapılan kademeli susuzlandırma deneylerinin sonucunda, sırasıyla %38,34 ve %37,21 nem içeriklerinde ürünler elde edilmiştir. PEGM ilave edilmesi durumunda ise, nem içerikleri, %37,66 ve %36,89'a gerilemiştir. Elek açıklığının artmasına paralel olarak elek altına geçen yüksek nem içerikli ince boyutlu malzeme miktarı artmakta ve elek üzerinde kalan malzemenin nem içeriği azalmaktadır.

- Elek yüzeylerinde tıkanan boşlukları açması ve eleme verimini arttırarak susuzlandırmaya katkı sağlaması düşünülen korna tipi ultrasonik transdüser'in, yüksek frekanslı titreşimli eleğin elek yüzeyine temas edecek şekilde yerleştirilmesi ile yapılan susuzlandırma deneyleri sonucunda, nem oranında yaklaşık olarak %0,3'lük bir düşüş sağlanmıştır. Daha yüksek güce sahip ultrasonik transdüser kullanılması durumunda elek yüzeylerindeki tıkanmaların azalarak eleme veriminin artacağı ve nem içeriğinin daha düşük oranlara indirilebileceği ortaya çıkmaktadır.

- Reaktif ilavesi ve ultrasonik titreşim ile kademeli olarak yapılan susuzlandırma deneyleri sonucunda elde edilen %37,66 nem içeriğine sahip ürün Buncher vakum filtresi kullanarak filtrasyon işlemine tabi tutulmuştur. Filtrasyon süresinin bitiminde filtre edilen kek üzerinden alınan numuneler 105 °C'deki etüve konulmuş, denge ağırlığına gelene kadar bekletilmiş ve toplam nem içeriği ortalama %34,14 olarak bulunmuştur. Kömür tanelerinin yüzeylerindeki gözeneklerin geometrisi ve bu kömür taneleri ile su molekülleri arasındaki kuvvetli fiziksel bağlar (van der Waals bağları) dolayısıyla susuzlandırma işlemlerinde daha fazla bir nem düşüşünün mümkün olmayacağı görülmektedir.

- Titreşimli elek ile yapılan susuzlandırma deneylerinde elde edilen %37,66 nem miktarından %18,9 olarak bulunan bünye nemi miktarının çıkarılmasıyla fiziksel nem miktarı %18,76 olarak bulunmaktadır. Bu fark filtrasyon sonucunda elde edilen kek için

%15,24 olmaktadır. Elek üstü susuzlandırma ile filtrasyon arasındaki fark sadece %3,52'dir. Bu durum 0,5 mm altındaki kömürün susuzlandırılmasında kullanılan mekanik ve ultrasonik titreşim mekanizmalarının susuzlandırma performanslarının başarılı olduğunu göstermiştir.

- İnce boyutlu artık karakterindeki kil ve şistlerin, eleme ile yapılan susuzlandırma işlemleri sırasında kömürden ayrıldığı ve susuzlandırılan malzemenin aynı zamanda zenginleştirildiği görülmektedir. Elek üstü ürününün kül içeriğinde yaklaşık %11,66 düşüş, üst ısıl değerde ise, yaklaşık olarak 1337 Kcal/kg artış sağlanmıştır. Elek üstü ve elek altı ürünlerinin yanabilir verimleri ise sırasıyla, %84,8 ve %15,6 olarak hesaplanmıştır.

- Laboratuvar bünyesinde bulunan 0,28 m² elek yüzey alanına sahip titreşimli elek ile çok kademeli olarak yapılan susuzlandırma deneylerinin sonucunda, yüzey alanı susuzlandırma deneylerinde kullanılan titreşimli elek alanının yaklaşık 9 katı olan endüstriyel elek kullanarak yapılacak susuzlandırma ile %35 nem miktarına indirilebileceği görülmektedir.

- Bu çalışmada ilk defa denenen, yatay titreşim ile birlikte değişik açılarda verilen titreşimin ve elek üzerine yerleştirilen ultrasonik titreşimin taneler arasındaki yüzey nemini serbest bırakarak susuzlandırma işlemlerinin performansını arttırdığı gözlenmiştir. Susuzlandırma deneylerinden önce uygulanan ve süspansiyon içerisindeki kömür tanelerinin yüzeylerini temizleyerek özelliklerini değiştiren ultrasonik titreşim+reaktif ilavesinin etkin olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

- Aldrich, C. and Feng, D.**, 1999. Effect of ultrasonic preconditioning of pulp on the flotation of sulphide ores, *Minerals Engineering*, **12**, 701-707.
- Alp, İ.**, 1998. Yüksek frekanslı ses dalgalarının cevher zenginleştirmede kullanılabilirliğinin araştırılması, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- Alp, İ. ve Özdam, H.**, 2000. Investigation of the processing of colemanite tailings by ultrasonic sound waves, Mineral Processing on the Verge of the 21st Century, *Proceedings of the 8th International Mineral Processing Symposium*, 693-696.
- Aplan, F.F.**, 1988. How the nature of coal influences its cleaning, *Industrial Practice of Fine Coal Processing*, SME.
- Asai, K. and Sasaki, N.**, 1958. Ultrasonic treatment of slurry, *III. International Coal Preparation Congress*, Brussels-Liege.
- Asmatülü, R.**, 2002. İnce boyutlu tanelerdeki suyun buchner vakum filtresi kullanarak uzaklaştırılması, *Madencilik*, 35-44.
- Asmatülü, R.**, 2001. İnce boyutlu tanelerdeki nemin yüksek santrifüj kuvvetler kullanılarak uzaklaştırılması, *Yerbilimleri*, **38**, 195-205.
- Asmatülü, R.**, 2008. Improving the dewetability characteristics of hydrophobic fine particles by air bubble entrapments, *Powder Technology*, **186**, 184-188.
- Atak, S.**, 1982. *Flotasyon İlkeleri ve Uygulaması*, İstanbul.
- Atak, S. ve Ateşok, G.**, 1991. Kömürün susuzlandırılması, *Kömür Teknolojisi ve Kullanım Semineri*, İzmir, 92-115.
- Ateşok, G.**, 1986. Kömürlerde rutubet miktarının azaltılması, *Kömür Hazırlama*, 297-315.
- Ateşok, G.**, 2004. Kömür hazırlama ve teknolojisi, *Yurt Madenciliğini Geliştirme Vakfı Yayınları*, İstanbul.
- Baugh, R.A.**, 1977. *Signal Sources*.
- Beker, Ü.G. ve Kural, O.**, 1998. Kömürün Briketlenmesi, *Kömür*, **26**, 453-477.
- Bien, J.B., Kempa, E.S. and Bien, J.D.**, 1997. Influence of ultrasonic field on structure and parameters of sewage sludge for dewatering process, *Water Science Technology*, **36**, 287-291.
- Blake, J.**, 1988. Mathematical theory of cavitation bubble dynamics, *Australian Journal of Statistics*, **30**, 69-89
- Blitz J.**, 1963. *Fundamentals of Ultrasonics*, Butterworth, London.
- Brookes, G.F and Miles, N.J.**, 1987. Coal preparation-some thoughts for the future, *Mining Magazine*, 52-57.

- Brown, D.J.**, 1962. Coal flotation, froth flotation, *50th. Anniversary Volume, AIME*, New York, 518-538.
- Carlin, B.**, 1960. Ultrasonics, *McGraw-Hill Book Company*, New York, 309.
- Coal Information Report**, 1983. OECD/IEA, Paris
- Cowper, N.T., Thompson, T.L., Aude, T.C. and Wasp, E.J.**, 1972. Processing steps: keys to successful slurry pipeline systems, *Chemical Engineering*, 58-62.
- Çelik, M.S.**, 1988. Effect of ultrasonic treatment on the floatability of coal and galena, *II. Int. Mineral Processing Symposium*, İzmir, Turkey.
- Çelik, M.S., Elma, İ., Hançer, M. and Miller, J.D.**, 1998. Effect of in-situ ultrasonic on the floatability of slime coated colemanite, *Innovations in Mineral and Processing*, 153-157.
- Davidson, R.S., Safdar, A. and Robinson, B.**, 1987. Ultrasonics, 25-35.
- Dentel, S.K., Allen, H.E., Srinivasarao, C. and Divincenzo, J.**, 1993. Effects of surfactants on sludge dewatering and pollutant fate, *Third Year Completion Report*, 1-12.
- Deurbrouck, A.W. and Hucko, R.E.**, 1981. Coal preparation, *Chemistry Of Coal Utilization*, Johnwiley and Sons Inc., **10**.
- Djendova, S., Mehandjiski, V., Parlapanski, M. and Valova, R.**, 1990. Improvement of the flotation of copper ore by using a hydrodynamical sonic influence, *Proceeding of the III. Int. Min. Process. Sym.*, İstanbul, 145-153.
- Dora, Ö.**, 1975, Mineraloji: Genel Mineraloji, **1**, Ege Ü. Fen. Fak., İzmir, 238.
- Edwards, C.A. and Bremmer, J.M.**, 1967. Microaggregates in soils: *J. Soil Sci.* **18**, 64.
- Elevli S.**, 2003. Termik santrallerde kömür fiyatlarının analizi ve fiyatlandırma modellerinin geliştirilmesi, C.Ü. Doktora Tezi, Sivas.
- Farmer, A.D., Collings, A.F. and Jameson, G.J.**, 2000. Effect of ultrasound on surface cleaning of silica particles, *Int. Journal of Mineral Processing*, **60**, 101-113.
- Feng, D. and Aldrich, C.**, 2005, Effect of preconditioning on the flotation of coal, *Chemical Engineering Communications*, **192**, 972-983.
- Field, D.J. and Minasny, B.**, 1999. A description of aggregate liberation and dispersion in a horizons of Australian Vertisols by ultrasonic agitation, *Geoderma*, **91**, 11-26.
- Fuchs, F.J.**, 2002, Ultrasonic cleaning: fundamental theory and application, www.blackstone-ney.com/pdfs/T_Fundamentals.pdf , 15.
- Gaete-Garretton, L.F., Vargas-Hernandez, Y. P. and Velasques-Lampert, C.**, 2000, Application of ultrasound in comminution, *Ultrasonics*, **38**, 345-352.

- Gallego-Juarez, J.A., Rodriguez, G., Willemse, S. and Warmoeskerken, M.,** 1994. Sistema Ultrasonico Para Lavado de Textiles, *Spanish Patent*, No: 9401960.
- Gallego-Juarez, J.A.,** 1996. High power ultrasonic technologies in multiphase media, *Forum Acusticum*, Antwerpen, Belgium.
- Gitmez, A.,** 2005. Seyitömer ve soma linyit kömürleri için zenginleştirme tesis tasarımı, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Goshin, R.J. and Smith, M.R.,** 1983. Dense Medium Separation Part L: An Introduction To The Theory And Practice, *Mining Magazine*, 453-460.
- Grosso, J.G., Tao. D. and Parekh, B.K.,** 1999. Pop-Scale testing of an advanced fine coal dewatering equipment/technique final report.
- Gürpınar, G.,** 2007. Ses ötesi dalgaların cevher zenginleştirmede kullanılabilirliğinin araştırılması, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- Gürpınar, G., Sönmez, E. and Bozkurt, V.,** 2004. Effect of ultrasonic treatment on flotation of calcite, barite and quartz, *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, **113**, C91-C95.
- Hamza, H.A., Mo, A.W. and Frenette, R.,** 1988. Chemical reagents for mechanical dewatering, *Industrial Practice of Fine Coal Processing*, **21**, 231-237.
- Hogg, R.,** 2000. Flocculation and dewatering, *International Journal of Mineral Processing*, **58**, 223-236.
- İpekoğlu, Ü.,** 1994. Susuzlaştırma, *Cevher Hazırlama El Kitabı*, **15**, 389-423.
- Jordan, T.L. and Ounaies, Z.,** 2001. Piezoelectric ceramics characterization, ICASERept, 22..
- Juarez, J.A.G., Elvira-Segura, L. and Rodriguez-Corral, G.,** 2003. A power ultrasonic technology for deliquoring, *Ultrasonics*, **41**, 255–259.
- Keller, K. and Stahl, W.,** 1997. Vibration screens for dewatering-theory and practice, *Minerals and Metallurgical Processing*, 27-34.
- Kobayashi, T., Kobayashi, T., Hosaka, Y. and Fujii, N.,** 2003. Ultrasound-enhanced membrane-cleaning processes applied water treatments: influence of sonic frequency on filtration treatments, *Ultrasonics*, **41**, 185–190.
- Kowalska, E., Chmura, K. and Bien, J.,** 1978. Ultrasonic in the dehydration process of sludge, *Ultrasonics*, 183-185.
- Kowalski, W. and Kowalska, E.,** 1978. The ultrasonic activation of non-polar collectors in the flotation of hydrophobic minerals, *Ultrasonics*, 84-86.
- Kömür Sektör Raporu,** 2010. Türkiye Kömür İşletmeleri Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Krasilnikov, V.A.,** 1963. Sound and ultrasound waves in air, water and solid bodies, *Israel Program for Scientific Translations*, Jerusalem.

- Kural, O.**, 1998. Kömürün susuzlaştırılması ve kurutulması, *Kömür Özellikleri, Teknolojisi ve Çevre İlişkileri*, 142-149.
- Le Roux, M., Campbell, Q.P., Watermeyer, M.S. and de Oliveira, S.**, 2005. The optimization of an improved method of fine coal dewatering, *Minerals Engineering*, **18**, 931-934.
- Leonard, W.J. and Mitchell, D.R.**, 1968. *Coal Preparation*. New York.
- Leonard, J. W. and Byron, C.H.**, 1991. *Coal Preparation*, 5.Th Edition, AIME, New York.
- Leucker, R.**, 1998, www.rwth-aachen.de/English/Forchung/Kavitation.html.
- Leung, W., Yarnell, R. and Quinn, T.**, 2000, In-Situ reslurrying and dewatering in screen bowl centrifuge, *Filtration and Separation*, 43-49.
- Mason, W.P.**, 1964. Physical acoustics, *Academic Press*, NewYork, 376.
- Mason, T.J.**, 1990, Chemistry with ultrasound, *Society of Chemical Industry*, London, 195.
- Meenan, G.F.**, 1988. Fine coal dewatering equipment, *Industrial Practice of Fine Coal Processing*, **20**, 223-229.
- Mervit, R.D.**, 1981. Coal Exploration, Mine Planning and Development. *US Patent* No: 4243554.
- Misra, M., Raichur, A.M. and Lan, A.P.**, 2003. Improved flotation of arsenopyrite by ultrasonic pretreatment, *Minerals and Metallurgical Processing*, **20**, 93-97.
- Mishra, S.K.**, 1988. Principles of dewatering, *Industrial Practice of Fine Coal Processing*, **19**, 213-222.
- Muralidhara, H., Parekh, B. and Senapati, N.**, 1985. Solid-liquid separation process for fine particle suspension by an electric and ultrasonic field, *US Patent*, No: 4.561.953.
- Osborne, D.G.**, 1988. Coal preparation technology, *Graham & Trotman Limited*, London
- Osborne, D.G.**, 1990. Screening, *Solid-Liquid Separation*, Third Edition, Butterworths, Londra.
- Önal, G., Doğan Z., Atak, S. ve Ateşok, G.**, 1986. Kömürün Zenginleştirilmesi ve Lavvar Tesislerinin Çalıştırılması, *Teknoloji ve Uygulama Geliştirme Projesi*.
- Önal, G. and Ateşok, G.**, 1994. *Cevher Hazırlama El Kitabı*.
- Önal, G., Özer, M. and Arslan, F.**, 2003. Sedimentation of clay in ultrasonic medium, *Mineral Engineering*, **16**, 129-134.
- Özbayoğlu, G.**, 1987. Coal flotation, mineral processing desing, *Nato Series*, Martinus Nijhoff Publishers.
- Özden, N.**, 1981. Sesötesi (Ultrasonik) ile muayene, *SEGEM*, **48**, Ankara, 142.
- Özdoğan, S., Polat, M. ve Çelik, M.S.**, 1998. Kömürün susuzlaştırılması ve kurutulması, *Kömür*, **18**, 297-315.

- Özer, H.**, 1986. Ultrasonik dalgaların özellikleri, *Ultrasonografi Seminerleri, Tıbbi Ultrasonografi Derneği Yayın Organı*, İzmir.
- Özer, M., Kangal, M.O., Benkli, Y.E., Arslan, F. and Önal, G.**, 2001. Effect of ultrasonic treatment on the sedimentation of clays, *New Developments In Mineral Processing, Proceedings of the 9 th Balkan Mineral Processing Symposium*, 63-68.
- Özkan, S.G. and Veasey, T.J.**, 1994, The effect of slime coatings on colemanite flotation, *Process in Mineral Processing Technology, Proceedings of 5th International Mineral Processing Symposium*, 205-210.
- Özkan, S.G.**, 2002. Benefication of magnesite slimes with ultrasonic treatment, *Minerals Engineering*, **15**, 99-101.
- Özkan, S.G. and Kuyumcu, H. Z.**, 2005. Application of ultrasonics for coal flotation, 4.Kolloquium Sortieren, *Innovationen und Anwendungen*, Technische Universität Berlin, 220-228.
- Parekh B.K.**, 1996. An innovative approach for in-situ dewatering/hardening of fine clean coal slurry, *Final Technical Report, Center for Applied Energy Research*, University of Kentucky.
- Parekh, B.K., and Groppo, J.G.**, 1997. Dewatering of fine clean coal using a high pressure filter-a pilot plant study, *Fluid/Particle Separation Journal*, **10**, 57-61.
- Parekh, B.K.**, 2009. Dewatering of fine coal and refuse slurries-problems and possibilities, *Procedia Earth and Planetary Science*, **1**, 621–626.
- Patwardhan, A., Mondal K., Chugh, Y.P. and Singh, N.**, 2002. Enhanced dewatering of fine coal using mechanical techniques, *Proceedings, Nineteenth Annual International Pittsburgh Coal Conference*, Pittsburgh, 23-27.
- Prasad, P., Vasudevan, R., and Seshadri, S.K.**, 1993. Wear characteristics of nickel elektro deposition in ultrasonically agitated bath, *Journal of Material Science Letters*, **12**, 902-903.
- Quast, K.B. and Readett, D.J.**, 1987. The surface chemistry of low-rank coals, *Advances in Colloid and Interface Science*, **27**, 169-187.
- Revnintzev, V.I. and Dimitriev, Y.G.**, 1965. Ultrasonic cleaning of minerals, *Mining and Minerals Engineering*, 229.
- Riera-Franco de Sarabia E., Gallego-Juarez, G., Rodriguez-Corral G., Elvira-Segura, L. and Gonzalez-Gomez I.**, 2000. Application of high power ultrasonics to enhance fluid/solid particle separation processes, *Ultrasonics*, **38**, 642-646.
- Rodriguez, G., Gallego-Juarez, J.A., Ramos, A., Andres, E., San Emeterio, J.L. and Montoya, F.**, 1985. High power ultrasonic equipment for industrial defoaming, *Proc. Ultrasonics International*, 506-511.
- Rong, R.X. and Hitchins, J.**, 1995. Preliminary study of correlations between fine coal characteristics and properties and their dewatering behaviour, *Minerals Engineering*, **8**, 293-309.

- Sabah, E., Yüzer, H. and Çelik, M.S.**, 2004. Characterization and dewatering of fine coal tailings by dual-flocculant systems, *International Journal of Mineral Processing*, **74**, 303-315.
- Sabah, E. and Erkan, Z.E.**, 2006. Interaction mechanism of flocculants with coal waste slurry, *Fuel*, **85**, 350-359.
- Schick, M.J. and Villa, J.L.**, 1983. Surfactants in coal technology, *JAOCS*, **60**, 1349-1359.
- Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Raporu**, 2001. Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Enerji Hammaddeler Alt Komisyonu Kömür Çalışma Grubu, Ankara.
- Selomuly, C., Liao, J.Y.H., Bickert, G. and Amal, R.**, 2006. Micro-properties of coal aggregates: Implications on hyperbaric filtration performance for coal dewatering, *International Journal of Mineral Processing*, **80**, 189-197.
- Singh, B.P.**, 1997. The influence of surface phenomena of the dewatering of fine coal, *Filtration and Separation*, March, 159-163.
- Singh, B.P.**, 1999. The role of surfactant adsorption in the improved dewatering of fine coal, *Fuel*, **78**, 501-506.
- Singh, B.P.**, 1999. Technical note: ultrasonically assisted rapid solid-liquid separation of fine clean coal particles, *Mineral Engineering*, **12**, 437-443.
- Singh B.P. and Singh R.**, 1997. Investigation on the effect of ultrasonic pretreatment on selective separation of iron values from iron ore tailings by flocculation, *Separation Science and Technology*, **32**, 993-1002.
- Singh, B.P., Besra, L., Reddy, P.S.R. and Sengupta, D.K.**, 1998. Use of surfactants to aid the dewatering of fine clean coal, *Fuel*, **77**, 1349-1356.
- Slaczka, A.**, 1986. Effects of ultrasound on ammonium leaching of zinc from Galmei ore, *Ultrasonics*, January, 53-55.
- Slaczka, A.**, 1987. Effect of ultrasonic field on the flotation selectivity of barite from a barite-florite-quartz ore. *Int. J. Miner. Process.*, **20**, 193-210.
- Smythe M.C. and Wakeman R.J.**, 2000. The use of acoustic fields as a filtration and dewatering aid, *Ultrasonics*, **38**, 657-661.
- Stepniak, L., Wolny, L. and Kowalczyk, M.**, 2003. Ultrasound-aided processes of water treatment and sludge dewatering.
- Stoev, S. and Kuzuev, L.**, 1966. Flotation with sound carrying bubbles, *Coke Chem.*, USSR, 7-12.
- Stoev, S., Martin, P.D. and Bonney, C.F.**, 1992. Technical Review, the application of vibration and sound in the minerals and metals industries, *Mineral Industry Research Organisation*, **8**, England.

- Stoev, S., Kuzev, L., Metodiev, M. and Djendova, S.H.T.**, 1992. Vibroacoustic improvements of froth flotation, *Innovations in Flotation Technology*, NATO ASI Series, **208**, Netherlands, 383-407.
- Stroh, G. and Stahl, W.**, 1990. Effect of surfactants on the filtration properties of fine particles, *Filtration and Separation*, May/June, 197-199.
- Subrahmanyam, T.U., Prestidge, C.A. and Ralston, J.**, 1996. Contact angle and surface analysis studies of sphalerite particles, *Minerals Engineering*, **9**, 7, 727-741.
- Suslick, K.S.**, 1998. Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology; 4th Ed. J. Wiley&Sons: New York, **26**, 517-541.
- Svarovsky, L.**, 1990. Pressure Filtration, *Solid-Liquid Separation*, Butterworths, Londra.
- Swamy, K.M., Sukla, L.B., Narayana, K.L., Kar, R.N. and Panchanadikar, V.V.**, 1995, *Ultrasonics Sonochemistry*, 5-9.
- Tao, D., Groppo, J.G., and Parekh B.K.**, 2000. Enhanced ultrafine coal dewatering using flocculation filtration processes, *Minerals Engineering*, **13**, 163-171.
- Tao, D., Parekh, B.K., Liu, J.T. and Chen, S.**, 2003. An investigation on dewatering kinetics of ultrafine coal, *International Journal of Mineral Processing*, 1628, 1-15.
- Tsai S.C.**, 1982. *Fundamentals of coal beneficiation and utilization*, Elsevier, New York.
- Url-1** <http://www/7.BYKP/ekutup96/o496/komur_ozet.htm>, 23.11.2010.
- Url-2** <<http://www.bizimcografya.com/showthread.php?t=4207>>, 25.11.2010.
- Url-3** <<http://www.miningweekly.com/article/batac-jigs-celebrate-ten-years-in-iron-ore-applications>>, 26.11.2010.
- Url-4** <<http://www.hielscher.com>>, 24.11.2010.
- Vargas-Hernandez, Y., Gaete-Garreton, L., Magne Ortega, L. and Vergara Belmar, R.**, 2003, World Congress on Ultrasonics (WCU), 7-10.
- Veneta G.**, 1988. *Instruction Book for Ultrasonic Generator*, Ecotece, Via Roma, 12
- Weiss, N.L.**, 1985. SME Mineral Processing Handbook, Published By SME AIME, New York, 17-25.
- Wills, B.A.**, 1979. *Mineral Processing Technology*, Pergamon Press
- Yerkovic, C., Menacho, J. and Gaete, L.**, 1993, Exploring the ultrasonic comminution of copper ores, *Minerals Engineering*, **6**, 607-617.
- Yoon, R.-H., Zhang, J., Eryadin, M.K. and Luttrell, G.H.**, 2004. Development of advanced fine coal dewatering technologies, *Proceedings 21st Annual International Pittsburgh Coal Conference-Coal, Energy and the Environment*, Osaka, Japan, 9.
- Zubkov, A. A. and Belov, B.G.**, 1982. Beneficiating ores of rare metals with the aid of ultrasound, **9**, 102-106.



ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Fırat Burat

Doğum Yeri ve Tarihi: Üsküdar/İstanbul, 23.01.1980

Adres: İstanbul Teknik Üniversitesi, Cevher Hazırlama Mühendisliği Bölümü, Maslak/İstanbul

Lisans Üniversitesi: İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü

Yayın Listesi:

- Ateşok G., Özer, **Burat F.**, Gülen J., Önal G., 2005: Briquetting of Fine Sizes Asphaltite Without Binder. *Mineral Processing&Extractive Metallurgy Review*, **26**, 187-201.
- **Burat F.**, Kangal O., Önal G., 2006. An Alternative Mineral in the Glass and Ceramic Industry: Nepheline Syenite. *Minerals Engineering*, **19**, 370-371.
- **Burat F.**, Kökkılıç O., Kangal O., Gürkan V., Çelik M.S., 2007. Quartz-Feldspar Separation for Glass and Ceramic Industry. *Minerals & Metallurgical Processing*, **24**, 75-80.
- Önal G., **Burat F.**, 2008. Boron Mining and Processing in Turkey. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi-Mineral Resources Management*, **24**, 49-60.
- **Burat F.**, Güney A, Kangal M.O., 2009. Selective Separation of Virgin and Post-Consumer Polymers (PET and PVC) by Flotation Method. *Waste Management*, **29**, 1807-1813.
- Kangal O., Kökkılıç O, **Burat F.**, 2009. Production of Huntite and Hydromagnesite with Flame Retardant Featured by Flotation. *Minerals & Metallurgical Processing*. **26**, 109-113.
- Ateşok G., Özer M, **Burat F.**, 2005. Toz Özelliğindeki Şırnak Asfaltitlerinin Katkı Maddesiz Olarak Briketlenmesi. *Çukurova Üniversitesi, Geosound/Yerbilimleri Dergisi*, **46**, 245-256.
- Kangal, O., Yenial, Ü., Güney, A., Yüce, A. E., **Burat, F.**, 2010. PET ve PVC artıklarının kolon flotasyonu ile geri kazanılması, *PAGEV Plastik Dergisi*, **108**, 112-118

