

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TUNÇBİLEK TERMİK SANTRALİ UÇUCU
KÜLLERİNİN KAREKTERİZASYONU VE YAN
ÜRÜNLERİNİN ELDESİ**

**Y.Ü. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mad. Müh. Orhan ÖZDEMİR
(505981018)**

104088

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 22 Ocak 2001
Tezin Savunulduğu Tarih : 13 Şubat 2001**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Mehmet Sabri ÇELİK
Diğer Jüri Üyeleri Prof. Dr. Güven ÖNAL (İ.T.Ü.)
Doç. Dr. Özgül ÖZCAN (İ.T.Ü.)**

M. Sabri Çelik
Güven Önal
Özgül Özcan

ŞUBAT 2001

104088

ÖNSÖZ

Türkiye’de termik santrallerden yıllık 13 milyon ton gibi büyük miktarda uçucu kül atık olarak ortaya çıkmasına rağmen, böyle atıl olan bir ürünün faydalı bir ürüne çevrilmemesi çok üzücüdür. Bu amaçla yapılan çalışmaların mutlaka desteklenmesi gerekir.

Bu çalışmada uçucu külün karakterizasyonu yapılmış ve yan ürünlerinin eldesine çalışılmıştır. Çalışmalarım süresince bilgi ve deneyimlerinden çok faydalandığım sayın hocam ve danışmanım Prof. Dr. Mehmet Sabri ÇELİK’ e, değerli katkılarından dolayı Dr. Vecihi Gürkan’a, bana her türlü yardımı esirgemeyen başta Mustafa ÖZER ve Feridun BOYLU olmak üzere tüm Cevher ve Kömür Hazırlama Anabilim Dalı araştırma görevlileri ve hocalarına, bu çalışmalarına imkan sağlayan Sayın hocam Prof. Dr. Suna Atak’a teşekkürlerimi sunarım.

Eğitimim boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme sonsuz teşekkürler.

Ocak 2001

Orhan ÖZDEMİR

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	viii
ÖZET	x
SUMMARY	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Giriş ve Amaç	1
2. UÇUCU KÜL	3
2.1. Uçucu Küllerin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	4
2.1.1. Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri	4
2.1.1.1. Mineralojisi	4
2.1.1.2. Morfolojisi	5
2.1.1.3. Görünüş	5
2.1.1.4. Tane Boyutu	6
2.1.1.5. Yoğunluk Dağılımı	6
2.1.1.6. pH Gelişimi	7
2.1.1.7. Element Bileşimi	8
2.1.1.8. Çözünürlüğü	9
2.1.2. Uçucu Küllerin Kimyasal Özellikleri	9
2.1.3. Uçucu Küllerin Bağlayıcılık Özellikleri	12
2.2. Küllerin Değerlendirilmesinin Sağladığı Yararlar ve Kullanım Alanları	13
2.2.1. Ayırmanın Sağladığı Yararlar	13
2.2.2. Kullanım Alanları	13
2.2.2.1. Tuğla Üretimi	13
2.2.2.2. Çimento ve Beton Üretiminde	14
2.2.2.3. Hafif Agrega Üretiminde	15
2.2.2.4. Yol Yapımında ve Geoteknik Uygulamalarda	15
2.2.2.5. Gaz Beton Üretiminde	16
2.2.2.6. Seramik ve Cam Üretiminde	16
2.2.2.7. Uçucu Küllerin Kullanıldıkları Diğer Alanlar	16
2.3. Dünya'da ve Türkiye'de Kül Değerlendirme Durumları	17
2.3.1. A.B.D.	17
2.3.2. Japonya	18
2.3.3. Avrupa Birliği	19

2.3.4. Türkiye	19
2.4. Kömür Yanma Ürünlerinin Oluşumu ve Tanımı	20
2.4.1. Kömür Yakma Şekilleri	20
2.4.2. Küllerin Oluşumu	22
2.4.3. Kül Depolama Yöntemleri	23
2.4.4. Yeryüzüne Depolanan Küllerin Etkileri	24
2.4.5. Termik Santrallerde Atık Uçucu Küllerin Toplanması	25
2.4.6. Uçucu Külün Yan Ürünlerinin Zenginleştirilme Yöntemleri	28
2.4.7. Uçucu Küllerde Radyoaktivite	29
2.5. Puzolanların Tanımı ve Sınıflandırılması	30
2.6. Senosferleir Tanımı ve Sınıflandırılması	32
2.6.1. Fiziksel Özellikleri	32
2.6.2. Kimyasal Özellikleri	33
2.6.3. Kullanım Alanları	33
2.6.4. Avantajları	34
2.6.5. Emniyetliliği	34
3. MALZEME VE YÖNTEM	35
3.1. Uçucu Külün Karakterizasyon Çalışmaları	35
3.1.1. Kimyasal Analiz	35
3.1.2. Mineralojik Analiz	36
3.1.3. Fotoğrafik etüdler	37
3.2. Elektrokinetik Özelliklerin Tespiti için Yapılan Deneyler	40
3.2.1. pH Profili Ölçümleri	40
3.2.2. Zeta Potansiyel Ölçümleri	40
3.3. Manyetik Zenginleştirme Yöntemleri	42
3.3.1. Döner Diskli Manyetik Ayırıcı	42
3.3.2. CARPCO Manyetik Ayırıcısı	43
3.3.3. Bantlı Yaş Manyetik Ayırıcısı (Crockett)	43
3.4. Graviteye Bağlı Zenginleştirme Yöntemleri	44
3.4.1. Ağır Ortam Ayırması ile Zenginleştirme	44
3.4.2. Tabaka Halinde Akan Akışkan Ortamda Zenginleştirme	44
3.4.3. Hidrosiklon	45
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	47
4.1. Malzeme	47
4.2. Boyut Dağılımı	47
4.3. pH Profilleri ve Elektrokinetik Özellikleri	51
4.3.1. pH Profili	51
4.3.2. Zeta Potansiyel Ölçümler	57

4.4. Kızdırma Kaybı (KK) Değerinin Saptanması	61
4.5. Uçucu Külün Karbon İçeriği	63
4.6. Bulk Yoğunluğunun Tespiti	64
4.7. Uçucu Küldeki Senosfer Tespiti	66
4.8. Zenginleştirme Deneyleri	67
4.8.1. Gravite Deneyleri	67
4.8.1.1. Yüzdürme-Batırma Deneyleri	67
4.8.1.2. Mozley Masası Deneyi	72
4.8.1.3. Hidrosiklon Deneyleri	74
4.8.2. Manyetik Zenginleştirme Deneyleri	78
4.8.2.1. 106 mikron Üstü Uçucu Külün Kuru Manyetik Ayırma ile Zenginleştirilmesi	79
4.8.2.2. 106 mikron altı Uçucu Külün Yaş Manyetik Ayırma ile Zenginleştirilmesi	80
4.8.3. 106 mikron Üstü Manyetik İşlem Görmüş Numuneye Uygulanan Mozley Masası Deneyi	83
4.8.4. 106 mikron Altı Manyetik İşlem Görmüş Numuneye Uygulanan Mozley Masası Deneyi	84
4.9. Optimum akım Şemasının Oluşturulduğu Deneyler	87
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	92
KAYNAKLAR	96
ÖZGEÇMİŞ	

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Türk uçucu küllerinin yoğunluk dağılımı	7
Tablo 2.2. Türk uçucu küllerinin Özgül yüzey alanları	7
Tablo 2.3. Türkiye’de ki bazı termik santrallerde oluşan uçucu küllerin kimyasal içerikleri	11
Tablo 2.4. TSE uçucu kül kompozisyonu	12
Tablo 2.5. A.B.D.’ deki kül üretim ve değerlendirme alanları	18
Tablo 2.6. Japonya’da ki kül üretim ve değerlendirme durumu	19
Tablo 2.7. Türkiye’de ki Termik santrallerde oluşan kül miktarı	19
Tablo 2.8. Uçucu kül kullanım oranlarının ülkelere göre kıyaslanması	20
Tablo 2.9. Bina türüne bağlı olarak alınan yıllık radyasyon dozları	30
Tablo 2.10. Puzolanların sınıflandırılması ve türleri	31
Tablo 2.11. Senosferin kimyasal bileşimi	33
Tablo 3.1. Tunçbilek Termik Santrali küllerinin kimyasal analizi	36
Tablo 4.1. Uçucu kül elek analizi sonuçları.....	47
Tablo 4.2. Izgara üstü külü elek analizi sonuçları.....	48
Tablo 4.3. Nemlendirilmiş kül elek analizi sonuçları.....	48
Tablo 4.4. Curuf elek analizi sonuçları.....	49
Tablo 4.5. Uçucu külün süreye bağlı pH profili.....	51
Tablo 4.6. Izgara üstü külün pH profili.....	52
Tablo 4.7. Nemlendirilmiş külün pH profili.....	53
Tablo 4.8. Curufun pH profili.....	54
Tablo 4.9. Uçucu külün boyuta göre KK değerleri.....	62
Tablo 4.10. Tüvenan malzemenin karbon analizi sonuçları.....	63
Tablo 4.11. Uçucu külün boyuta göre bulk yoğunluğu değişimi.....	65
Tablo 4.12. +212 mikron boyut numunenin yüzdürme-batırma deneyi sonuçları.....	69
Tablo 4.13. -212+150 mikron boyut numunenin yüzdürme-batırma deneyi sonuçları.....	69
Tablo 4.14. -150+106 mikron boyut numunenin yüzdürme-batırma deneyi sonuçları.....	70
Tablo 4.15. -106+53 mikron boyut numunenin yüzdürme-batırma deneyi sonuçları.....	70
Tablo 4.16. -53 mikron boyut numunenin yüzdürme-batırma deneyi sonuçları.....	71
Tablo 4.17. Yüzdürme-batırma deneylerinin birleştirilmiş olarak sonuçları.....	71
Tablo 4.18. Mozley deneyi ürünlerinin sonuçları.....	73
Tablo 4.19. Mozley deneyi ürünlerin demir analizi sonuçları.....	74
Tablo 4.20. I. Grup deneyleri.....	75
Tablo 4.21. II. Grup deneyleri.....	76

Tablo 4.22.	III. Grup deneyleri.....	77
Tablo 4.23.	Tüvenan malzemenin boyuta bağlı demir analizi sonuçları.....	78
Tablo 4.24.	+ 106 mikron uçucu küle uygulanan kuru manyetik zenginleştirme işleminin sonuçları.....	80
Tablo 4.25.	- 106 mikron uçucu küle uygulanan yaş manyetik zenginleştirme işleminin sonuçları.....	81
Tablo 4.26.	- 106 mikron uçucu küle uygulanan kuru manyetik zenginleştirme işleminin sonuçları.....	82
Tablo 4.27.	+106 mikron ve –106 mikron manyetik zenginleştirme sonuçlarının birleştirilmesi.....	83
Tablo 4.28.	106 mikron üstü non manyetik ürüne yapılan mozley masası deneyi sonuçları.....	84
Tablo 4.29.	106 mikron altı non manyetik ürüne yapılan mozley masası deneyi sonuçları.....	85
Tablo 4.30.	Tüvenan uçucu külün eleme işleminin sonuçları.....	88
Tablo 4.31.	212 üstü malzemeye uygulanan dekantasyon işleminin sonuçları..	88
Tablo 4.32.	212 altı malzemeye uygulanan dekantasyon işleminin sonuçları...	88
Tablo 4.33.	212 altı malzemeye uygulanan yaş manyetik zenginleştirme işleminin sonuçları.....	89
Tablo 4.34.	Non manyetik malzemeye uygulanan siklon işleminin sonuçları...	89
Tablo 4.35.	Şlama uygulanan siklon işleminin sonuçları.....	90
Tablo 4.36.	Tüvenan malzemeye göre ürün sonuçları.....	90

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Türk küllerinin pH değişimi	8
Şekil 2.2 : Uçucu küllerin elektrofiltre yöntemi ile tutulması	27
Şekil 2.3 : Siklon ile uçucu küllerin tutulması	27
Şekil 2.4 : Uçucu küllerin nemlendirme yöntemi ile tutulması	28
Şekil 2.5 : Uçucu külden yanmamış karbonun elektrostatik yöntem ile kazanılmasının şematik gösterimi	29
Şekil 3.1 : Uçucu külün mineralojik bileşimini belirleyen XRD sonuçları ...	36
Şekil 3.2 : Uçucu külün ince kesiti	37
Şekil 3.3 : Uçucu Külün başka bir ince kesiti	38
Şekil 3.4 : Uçucu külün yan ürünlerinden biri olan senosferin resmi	38
Şekil 3.5 : Uçucu Külün başka bir ince kesiti	39
Şekil 3.6 : Uçucu Külün başka bir ince kesiti	39
Şekil 3.7 : Zeta Potansiyel ölçümlerinin yapıldığı Zeta-Meter cihazı	41
Şekil 3.8 : Döner diskli manyetik ayırıcı	42
Şekil 3.9 : Carpco yüksek alan şiddetli yaş manyetik ayırıcı	43
Şekil 3.10 : Düşük alan şiddetli bantlı Crockett yaş manyetik ayırıcısı.....	44
Şekil 3.11 : Mozley Tablası	45
Şekil 3.12 : Hidrosiklonun düşey kesiti ve çalışma mekanizması	46
Şekil 3.13 : Deneyde kullanılan hidrosiklon	46
Şekil 4.1 : Uçucu külün kümülatif elek altı eğrisi	49
Şekil 4.2 : Termik santral ürünlerinin elek altı eğrileri	50
Şekil 4.3 : Uçucu külün pH profili eğrisi.....	55
Şekil 4.4 : Izgara üstü külün pH profili eğrisi.....	55
Şekil 4.5 : Nemlendirilmiş külün pH profili eğrisi.....	56
Şekil 4.6 : Curufun pH profili eğrisi.....	56
Şekil 4.7 : Uçucu külün zeta potansiyel eğrisi.....	58
Şekil 4.8 : Izgara üstü külün zeta potansiyel eğrisi.....	59
Şekil 4.9 : Nemlendirilmiş külün zeta potansiyel eğrisi.....	59
Şekil 4.10 : Curufun zeta potansiyel eğrisi.....	60
Şekil 4.11 : Termik santral ürünlerinin zeta potansiyel eğrisi.....	60
Şekil 4.12 : Uçucu külün boyuta göre KK değerlerinin histogram gösterimi.....	62
Şekil 4.13 : Uçucu külün boyuta göre KK değeri ve karbon içeriklerinin histogram şekli gösterimi.....	64
Şekil 4.14 : Uçucu kül ve ızgara üstü külün boyuta göre bulk yoğunluğunun histogram şekli.....	66
Şekil 4.15 : Yüzdürme-batırma deneylerinde kullanılan yüzdürme-batırma hücresi.....	68
Şekil 4.16 : Yüzdürme-batırma sonuçlarının kümülatif olarak gösterimi.....	68

Şekil 4.17	: Tüvenan malzemeye uygulanan Mozley Masası deneyinin akım şeması.....	72
Şekil 4.18	: +106 mikron uçucu küle uygulanan kuru manyetik zenginleştirme işleminin akım şeması.....	79
Şekil 4.19	: -106 mikron uçucu küle uygulanan yaş manyetik zenginleştirme işleminin akım şeması	81
Şekil 4.20	: Manyetik zenginleştirme ve mozley masası deneylerinin basitleştirilmiş akım şeması.....	86
Şekil 4.21	: Tüm deneylerin gösterildiği basitleştirilmiş akım şeması.....	91



ÖZET

Uçucu kül, termik santrallerde kömürün yanması sonucu baca filtrelerinde tutulan atık malzeme olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışmanın amacı, Tunçbilek termik santrali baca filtresinde tutulan uçucu külün yan ürünlerinin her birini tanımlamak ve özellikle en değerli yan-ürünlerinden biri olan senosferin kuru ve yaş işlemlerle ayırma ve zenginleştirmesini gerçekleştirerek bir akım şeması geliştirmektir. Uçucu küller yan ürün olarak yanmamış karbon, demir, puzolan ve senosfer denilen mikro kürecikler ihtiva etmektedirler.

Bu çalışmada, ilk önce uçucu külün karakterizasyonu için kimyasal, mineralojik ve fotografik etüdüleri yapılmıştır. Yapılan boyut analizleri sonucunda uçucu kül için $D_{80}=180$ mikron ve D_{50} boyutu ise 90 mikron olarak bulunmuştur. Uçucu kül numunelerinin, pH=10,5'da tampon pH oluşturduğu gözlenmiştir. Yapılan zeta potansiyel ölçümleri sonucunda yüzey yükün daima negatif olduğu bulunmuştur. Uçucu kül hafif ürün olarak senosfer ve karbon, ağır ürün olarak da puzolan ve demir içermektedir. Boyuta bağlı olarak yapılan kimyasal analizlerde 212 mikron altı uçucu külün karbon içeriğinin boyuta bağlı olarak azaldığı görülmüştür. Uçucu külün bulk yoğunluğunun ise boyutun azalmasıyla arttığı tesbit edilmiştir. Uçucu kül ile yapılan yüzdürme-batırma deneyleri sonucunda %30,98 Fe içerikli bir batan ürün elde edilmiştir. Mozley Masası deneyi ile külün %1,41 olan karbon içeriği, hafif üründe %2,16'ya çıkarılmıştır, ağır üründe ise %30,02 Fe içerikli bir manyetik ürün kazanılmıştır. En değerli hafif ürünlerden biri olan senosferin, tüvenan küldeki içeriği $\%0,89\pm0,1$ olarak bulunmuştur. Siklon deneyleri en iyi vorteks çapının 11,1 mm, apeks çapının ise 6,4 mm olduğunu göstermiştir. Bu şartlarda üst akımda karbonca zengin % 4,56 C içerikli bir ürün alınmıştır. İki boyutta yapılan manyetik zenginleştirme sonucunda %35,16 Fe içerikli bir manyetik ürün ve %6,37 Fe içerikli non manyetik ürün elde edilmiştir. Non manyetik ürünlerin Mozley Masasına beslenmesiyle de ağır üründe %1,14 C içerikli puzolan ve hafif üründe %2,29 C içerikli bir ürün alınmıştır. Yapılan deneylerin sonuçlarına bağlı olarak, uygun bir akım şeması geliştirilmiş ve bu akım şeması sonucunda +212 boyutunda %22,16 C içerikli veya yaklaşık %78 içerikli senosfer içeren bir ürün ve -212 boyutunda da %1,03 C içerikli veya yaklaşık %99 senosfer içerikli ikinci bir ürün kazanılmıştır. Yine %30,49 Fe içerikli bir manyetik ürün kazanılmıştır. Non manyetik ve şlam ürünlerinin siklonla zenginleştirilmesiyle düşük karbon içerikli puzolan ve yüksek karbon içerikli ikinci bir ürün elde edilmiştir.

SUMMARY

CHARACTERIZATION AND RECOVERY OF TUNÇBİLEK POWER STATION FLY ASH BY-PRODUCTS

The objective of this study is the characterization of fly ash by-products, and the development of a flowsheet through which these products can be efficiently separated. Fly ash is composed of unburned carbon, iron compounds typically of magnetite, pozzolanic material and cenospheres called micro spheres.

In this study, chemical, physical and mineralogical properties of fly ash are determined in order to characterize fly ash samples from Tuncbilek power station. The screen analyses made on fly ash samples show that D80 and D50 sizes of fly ash are 180 micron and 90 micron, respectively. Fly ash in water undergoes acid-base reactions around pH=10,5 and always exhibits negative surface charges at all pH values. While fly ash contains cenosphere and carbon as light products, iron and pozzolanic material are heavy products. The chemical analysis show that the carbon content of fly ash decreases with decreasing the size. The bulk density of fly ash also

increases with a decrease in size. The float-sink tests carried out with fly ash reveal that a sink product with the content of %30,98 Fe is obtained. Mozley Table experiments show that the carbon content of %1,41 C in the feed is increased to %2,16 in the light product. In addition to this, the magnetic product with Fe content of %30,02 is obtained in the heavy product. The proportion of cenosphere in fly ash is found to be %0,89±0,1. Cyclone experiments show that the best vortex radius is 11,1 mm and the best apex radius is 6,4 mm for the separation of light products from fly ash. Under these conditions, a product with the content of %4,56 C is obtained in the overflow. Magnetic recovery made in the two sizes reveal that a magnetic product with Fe content of %35,16 and a non-magnetic product with Fe content of %6,37 Fe are obtained. When non-magnetic product is fed to cyclone, a pozzolanic material with the carbon content of %1,14 C in the heavy product and another product with %2,29 C in the light product are obtained. An optimum flowsheet is developed by which the recovery of by-products of fly ash is possible. A set of experiments was made using this flowsheet at two size fractions. In the plus 212 microns, a product with %22,16 C containing %78 cenosphere and a second product with %1,03 C containing about %99 cenosphere were obtained. Furthermore, a magnetic product with the iron content of %30,49 Fe is obtained. Finally, non- magnetic and slime products are feed to cyclone, and it is obtained a pozzolonic material with low content of carbon and second product with high carbon content.

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Uçucu küller, enerji üretmek amacıyla termik santrallerde kullanılan kömürlerin yanmasıyla oluşan bir yanma ürünüdür. Türkiye’de termik santrallerde yakıt olarak genellikle endüstride kullanılamayan düşük kaliteli kömürler kullanılmaktadır. Termik santrallerde üretilen elektriğin yanında yüksek miktarda yan ürün olarak elde edilen uçucu küllerin atılması, taşınması ve depolanması her zaman sorunlara neden olmakta ve daha da önemlisi çevre kirliliği oluşturmaktadır.

Çevre kirliliğini önlemek ve aynı zamanda ucuz bir malzeme kaynağı olarak kullanmak amacıyla termik santral uçucu küllerinin çeşitli alanlarda değerlendirilmesine çalışılmaktadır. Yapılan çalışmalar bu küllerin tuğla, çimento, beton, hafif agrega yapımında ve geoteknik uygulamalarda kullanılabileceğini ortaya koymuştur.

Yanma ürünü olarak elde edilen uçucu küllerin fiziksel ve kimyasal özellikleri incelendiğinde, zenginleştirilme işlemine tabii tutulduğunda uçucu küllerin çeşitli endüstrilerde kullanılabilecek yan ürünlere sahip olduğu anlaşılmaktadır.

Ülkemizde enerji üretiminin yarısından fazlası, kömür veya linyit ile çalışan termik santrallerden karşılanmaktadır. Türkiye’deki santrallerde yıllık toplam kömür ve linyit tüketimi yaklaşık 55 milyon ton olup yaklaşık 13 milyon ton civarında da uçucu kül elde edilmektedir. Belçika, Danimarka, Hong Kong, İtalya, Meksika ve Hollanda gibi ülkelerde üretilen uçucu külün yaklaşık %80’inin başta çimento üretimi olmak üzere diğer endüstrilerde kullanıldığı bilinirken ülkemizde %1 gibi bir oranda yararlanılması, hem çevre sorunlarına yol açması hem de ülke ekonomisine katkı sağlamaması bakımından üzüntü verici olaydır.

Kullanımın bu kadar az olması Türkiye uçucu küllerinin özellikleri ve kullanımı hakkında yeterli bilginin eksikliğine ve aynı santrallerde üretilen uçucu külün homojenliğinin sağlanamamasına bağlanabilir.

Bu kapsamda, bu çalışma ile Kütahya Tunçbilek termik santrali küllerinin tanımı yapılmış olup, yan ürünlerinin elde edilmesini sağlayacak bir akım şeması geliştirilmeye çalışılmıştır. Aynı zamanda bu çalışma ile yıllık 13 milyon ton gibi yüksek bir kül potansiyeline sahip olan Türkiye uçucu küllerinin ticari olarak değerlendirilmesine yönelik ilk ciddi adım atılmıştır.



2. UÇUCU KÜL

Tüm Dünyada, elektrik enerjisi üretimi için katı fosil yakıtların yakıldığı termik santraller kullanılmaktadır. Artan enerji ihtiyacı ve buna bağlı olarak artan kömür tüketimi, kömürün yanması esnasında atık olarak elde edilen malzeme miktarının da artmasına neden olmaktadır [1]. Kömürün içinde bulunan inorganik malzemeler fırında erimekte ve bacadan atılma esnasında soğuyarak küresel tanecikler oluşturmaktadır. Bu tanecikler hava kirliliğini önlemek amacıyla çeşitli yöntemlerle toplanmaktadır. Uçucu kül adı verilen bu çok ince tanecikler, kömürle çalışan termik santrallerin baca çıkışlarındaki elektrofiltrelerde tutulur ve puzolonik niteliğe sahiptir [2]. Yakılan pülverize kömür üç ana atık malzemesi üretir. Bunlardan birincisi Taban Külü, ikincisi bacadan çıkan duman içindeki çok ince zerrecikler halinde bulunan ve atık malzemelerin % 75-80 kadarını oluşturan Uçucu Kül (fly ash) ve üçüncüsü ise kazanın dibinde oluşan ve kazan külü olarak da adlandırılan Curuf'dur [3]. TS 639'a göre ise uçucu kül, toz halinde veya öğütülmüş taşkömürünün yüksek sıcaklıklarda yanması sonucunda oluşan ve baca gazları ile sürüklenen, silis ve alümino-silisli toz halinde bir yanma kalıntısı olarak tanımlanır [4]. Kül tanelerinin büyük bir kısmı silisli ve alüminalı cam bileşiminde dolu veya boş küreciklerden meydana gelmiş olup kısmen de şekilsiz karbon ve demir terkiptindeki zerrecikleri ihtiva ederler.

Türkiye'de üretilen elektriğin büyük bir kısmı termik santrallerden sağlanmaktadır. 1998 yılı itibariyle ülkemizde halen faaliyette olan 11 termik elektrik santralinden yaklaşık 13 milyon ton uçucu kül açığa çıkmaktadır. Büyük değerlere ulaşan bu atık malzemenin kullanımına yönelik ilk çalışmalar, 1960'lı yılların sonlarında başlamıştır [5]. 1966-1980 yılları arasında temel olarak çimento ve tuğla sanayinde kullanılan uçucu külün değerlendirme oranı yaklaşık % 7'lere ulaşmışken, günümüzde bu oran % 0,4'e kadar gerilemiştir [6]. Tunçbilek termik santrali 5 güç ünitesinden oluşmaktadır. İlk üç ünite yılda 329.000 ton kömür kullanarak 453 milyon kw/s elektrik üretmektedir. Bu ünitelerde 3900 kcal/kg ısı değere sahip kömür kullanılmakta ve üretim esnasında kullanılan kömür miktarının yaklaşık

%20'si uçucu kül olarak atık sahasına gönderilmektedir. Sonradan eklenen 4. ve 5. ünitelerde ise, 2250 kcal/kg düşük ısı değerli ve yanma sonrası %40 civarında uçucu kül bırakma özelliğine sahip, yaklaşık 2 milyon ton kömür kullanımı ile yılda 1780 milyon kw/s elektrik enerjisi üretilmektedir. Toplam olarak bakıldığında da, yılda 2.350.000 ton kömür elektrik üretmek amacıyla yakılmakta ve yanma sonrası atık olarak kalan 854.670 ton uçucu külün yaklaşık %63'ü elektrostatik filtrelerde baca gazından tutulmaktadır. Yakma esnasında elde edilen bu atık malzemenin yalnız %1.4'ü satılmakta, geri kalan kısım ise stok sahasına gönderilmektedir [7]. Bu uygulama artan kömür tüketim oranlarına bağlı olarak hem çevre kirliliğinin hem de stoklama için daha fazla alan gereksinimi nedeniyle stoklama maliyetinin artmasına neden olmaktadır [7].

2.1. Uçucu Küllerin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Uçucu külleri, termik santralde kullanılan kömür türüne bağlı olarak 2 gruba ayırmak mümkündür: linyit uçucu külü ve taş kömürü uçucu külü. Kimyasal özellikleri bakımından linyit uçucu külü, taş kömürü uçucu külüne göre özellikle toprak alkali metallerin fazla oluşu bakımından farklıdır. Bu özellik, linyit uçucu küllerinin kullanılmasında büyük önem taşır. Taş kömürü uçucu külü tamamen kuru olarak elde edilmekte olup, taneciklerin büyük bir kısmı camsı minerallerden meydana gelmektedir [8]

2.1.1. Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri

2.1.1.1. Mineralojisi

Uçucu küllerin mineralojik kompozisyonunu belirleyen en önemli faktör külün elde edildiği kömürün mineral karakterisasyonudur. Yanma esnasında kömür içerisinde bulunan kuvars ve hematit orijinal hallerini korurlarken, pirit oksidasyon sonrası manyetit ve SO₂ gazına dönüşür [6]. XRD vasıtasıyla tespit edilmiş olan uçucu küllerdeki egemen mineral madde; anhidrit, kireç, kuvars ve hematit + spinel'dir [9]. Türk küllerindeki anhidritin varlığı, sadece kalsitteki yüksek kalsiyum aktiviteli sülfatların formunu değiştirmekle kalmayıp, aynı zamanda 400-500 °C'den yüksek sıcaklıklarda meydana gelen yanma ve sonrasında alçının dehidrasyonunu da sağlar [9]. Düşük kalsiyumlu uçucu küllerden olan Soma, Seyitömer ve Çatalağzı külleri tipik, fakat oldukça basit Q, M, H ve FS kristallere sahiptir [9]. Yüksek kalsiyum

küllerden olan Yeniköy ve Afşin-Elbistan külleri ise en karışık birleşmiş kristal evrelerine sahiptir. Bu örneklerde kalsiyum konsantrasyonunun artması kireç formasyonun, melilitin ve mervenin oluşmasına sebep olur. Büyük miktarlarda amorf malzemenin varlığı uçucu külün çoğunlukla bir cam olduğuna işaret etmektedir. Düşük kalsiyum ve magnezyum içeren küller çoğunlukla camsı fazda kuvars ve mullit içerirler [10,11].

2.1.1.2. Morfolojisi

Cevher mikroskobuyla yapılan araştırmalar sonucu, mikro küreciklerin çoğunun çatlak, düzensiz şekilli dantela parçaları şeklinde olduğu saptanmıştır. Çatalağzı ve Tunçbilek külleri hariç, diğer uçucu küllerde, senosfer formasyonu gözlenmemiştir. Senosfer formasyonu için optimal sıcaklığın, kül yoğunluğuna bağlı olarak, 1230 °C olacağı belirtilmiştir [12]. Yüksek sıcaklıklarda gaz gelişimi çok hızlı olup gazın erimiş külden kaçma eğilimi vardır. Düşük sıcaklıklarda ise mikro kürecik formasyonu fırınlardaki erimiş durumun periyoduna bağlı olarak da çok yavaştır. Küre şekilli uçucu kül parçalarının önemli sonuçlarından biri ise partikül yüzeyine iz metallerinin bağlanması için uygun olan büyük yüzey alanıdır. Bu nedenle birçok iz elementlerinin konsantrasyonları Yatağan, Yeniköy, Soma, Afşin-Elbistan ve Seyitömer uçucu küller için düşüktür. Tunçbilek uçucu külünün küre yüzeyindeki mullit formasyonu gözlemlenmiş olup bu davranış başka bir çalışma ile de uyumludur [9]. Soma ve Yeniköy uçucu küllerinin parçaları ya büyük ya da düzensiz şekildedir. Kristal oluşumu, Yatağan, Seyitömer ve Afşin-Elbistan uçucu küllerinde çoğunlukla gözlenmiştir. Bu küllerde kalsit ve kuvars yanmamış karbonla gözlenmiştir [9].

2.1.1.3. Görünüş

Uçucu küllerin renkleri, açık ve koyu gri ile siyah arasında değişmekte olup renginin açıklığı ve koyuluğu elde edildiği kömüre ve yanış özelliklerine bağlıdır. Linyit kömürlerinden elde edilen uçucu küllerin rengi daha koyudur. Ayrıca iyi yanmış bir uçucu kül, iyi yanmamış uçucu külden daha açık renktedir. Uçucu küle siyah rengi veren içindeki yanmamış karbondur [8].

2.1.1.4. Tane Boyutu

Uçucu küller, çeşitli şekil ve büyüklüklere sahiptir. Genellikle, gözenekli veya dolu camsı küresel taneler ile süngerimsi ve köşeli aglomera tanelerden oluşmuştur. Tane boyutu ise kullanılan kömürün cinsine ve öğütülme derecesine bağlı olarak değişmektedir. Taş kömürü uçucu küllerinin tane boyutu, linyit kömürü uçucu küllerinin boyutundan küçüktür. Tane boyutuna etki eden diğer faktör, bacadan kaçan boyutu küçük uçucu küllerin elektrofiltrelerde veya siklonlarda tutulma hassasiyetidir. Elektrofiltrelerde tutulan uçucu küllerin tane boyutu daha küçüktür. Genel olarak uçucu küllerin tane boyutları 1-100 mikron, özgül yüzeyleri ise 0,1-0,1 m²/g' dir [8]. Uçucu külün ince dokusu, uçucu külün su geçirgenliği ve sızma oranları gibi önemli fiziksel parametrelerini yansıtır. Örneğin uçucu külün su geçirgenliği çok düşüktür ve uçucu kül tortularındaki yan su iletkenliği, düşey yan iletkenliğinden çok yüksektir. Sonuç olarak, uçucu kül inceliği, kül katkı malzemesi olarak kullanıldığı zaman beton performasyonunu etkiler. ASTM F Class uçucu kül kütleindeki artış betonun gücündeki artışın sonucudur [13]. Uçucu küllerin çoğu yaklaşık olarak 0,15 m²/g kesin bir yüzey alanına sahiptir. Kömür uçucu külü önemli iç yüzey alanına sahiptir. Bu muhtemelen çatlak, gözenekli yapı içindedir [14].

2.1.1.5. Yoğunluk Dağılımı

Türk uçucu küllerinin bulk yoğunluğu 0,88 den 1,44 e, özgül ağırlığı ise 1,83 den 2,99 g/cm³'e kadar değişim gösterir. Aynı zamanda tane boyutunun azalması ile birlikte, bulk ve özgül ağırlık da artmaktadır. Önemli yoğunluk farkları ise, muhtemelen duvar kalınlıklarına, boşluk hızına ve parça çapının dağılımlarını etkilemektedir. Düşük bulk yoğunluğu, bu uçucu külleri hafif ağırlıklı bina blokları için iyi bir malzeme yapmaktadır. Ama kuru uçucu külün depolanmasında ve nakliyesinde her zaman potansiyel bir sorun olan toz sorunu da hesaba katılmalıdır [9]. Uçucu küllerin özgül ağırlığı, bünyelerindeki kuvars, alümina, demir ve karbon miktarı ile değişmektedir. Küldeki demir miktarı arttıkça özgül ağırlık artmaktadır. Ayrıca özgül ağırlık külün mineralojik yapısına göre de değişmektedir. Örneğin, içi dolu küresel tanelerden oluşan uçucu küllerin özgül ağırlıkları yüksek iken, süngerimsi tanelerden oluşanların daha düşüktür. Uçucu küllerin ortalama özgül ağırlıkları 2,15 g/cm³'tür [8]. Çizelge 2.1. ve 2.2.'de çeşitli uçucu küllerin bulk yoğunlukları ve özgül yüzey alanları görülmektedir.

Tablo 2.1. Türk uçucu küllerinin yoğunluk dağılımı [9]

Uçucu kül	Bulk yoğunluğu (g/cm ³)	Özgül ağırlık (g/cm ³)
Yatağan	1,07	1,99
Soma	0,95	2,12
Seyitömer	0,88	1,58
Yeniköy	1,44	2,99
Çatalağzı	1,07	1,95
Afşin-Elbistan	1,05	2,70
Tunçbilek	1,11	1,83

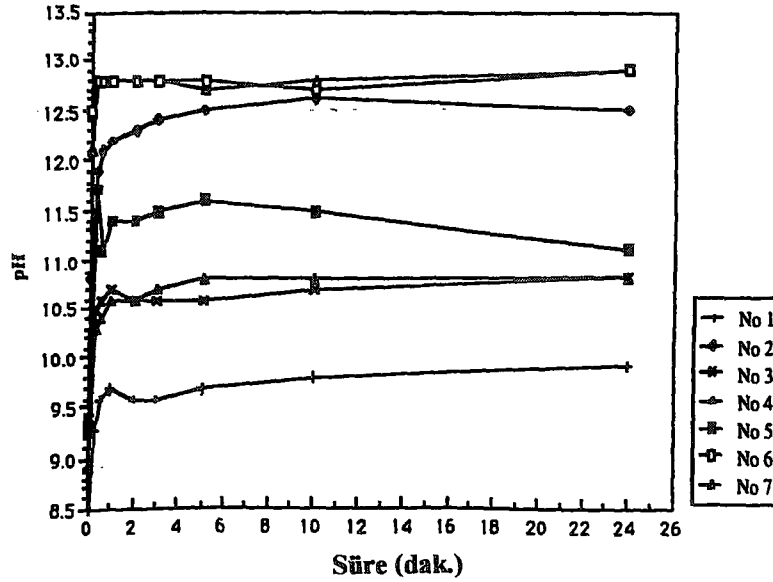
Tablo 2.2. Türk uçucu küllerinin Özgül yüzey alanları [9]

Uçucu kül	Özgül yüzey alanı (m ² /g)
Yatağan	0,334
Soma	0,207
Seyitömer	0,115
Yeniköy	0,168
Çatalağzı	0,139
Afşin-Elbistan	0,342
Tunçbilek	0,094

2.1.1.6. pH Gelişimi

Bütün uçucu küller 24 saat sonra değişik değerlerde bazik çözeltiler meydana getirirler. Uçucu külün pH'sı 8'in altına düşmez. pH gelişimi genellikle külün karakteristiği olarak dikkate alınmaz. Uçucu küller çimento yapımında kullanıldıkları zaman, uçucu küllerin karışım suyunun pH'sına etkisi, çimento tanelerinin birbirleriyle olan reaksiyonları sonucu pH'yı artırmalarından dolayı anlaşılamamıştır. Ancak buna rağmen uçucu küllerin tek başlarına pH'yı nasıl etkiledikleri,

araştırılmaya değer ilginç bir konudur [9]. Şekil 2.1’de uçucu küllerin pH değişimleri görülmektedir.



Şekil 2.1. Türk küllerinin pH değişimi [9]

2.1.1.7. Element Bileşimi

Uçucu küldeki kimyasal elementlerin ana kaynağı tabi ki kömürün kendisidir. Kömürün orijinal etkisi yanında, kömür hemen hemen pek çok doğal elementi içerir. Kömürdeki elementlerin mevcut dağılımı proses boyunca kaybolur. % 70' e kadar çıkan arsenik, kurşun, manganez, civa ve selenin, kömür prosesi sırasında uzaklaşma ihtimali vardır [15]. Yanmamış karbon ise tüm küllerde ağırlıkça %1,33-6,47 aralığındadır [9]. NH_4OAC analizlerinde açığa çıktığı gibi gerçekte uçucu küldeki bütün sülfür çözülebilir formdadır [16]. Uçucu külden türemiş sülfürlerin toprak ve bitki örtüsü zenginleştirilmesinde kullanılabilir olması Türk uçucu külleri için çok önemlidir. Bilindiği gibi Doğu Karadeniz sahili toprağı çoğunlukla kalker ve alkalın içerdiğinden dolayı, demir klorür genel ve ciddi bir problemdir. Pratikte, toprağı demir klorürden korumak ve böylece toprağı verimli kılmak için alçı ve elementel kükürt kullanılır. Ama, bu amaçla uçucu kül kullanımı daha da ekonomik olabilir. İşte bu sebepten dolayı Türk uçucu küllerinin bu amaçla kullanılabilecek bir potansiyele sahip olması onlar için yeni bir kullanım sahasının doğması anlamına gelir. Aynı zamanda bu uçucu küller, havadar ortamda kolayca çürüyen bitkiler için de bir çinko kaynağı olabilirler. Yüksek kalsiyumlu Türk uçucu küllerinin kimyasal ve mineralojik bileşimleri klinker iyileşmesinde curuf, pozzolon ve alçı için iyi bir

katkı ve bağlayıcı maddesi olduğunu göstermektedir. Afşin-Elbistan ve Soma uçucu külleri betonda Portland çimentosunun %30 u oranında kullanıldığında aynı basınç gücü değerlerine 28 günde ulaşılmıştır [17]. Ağır metal kirliliği oldukça zararlıdır. Araştırılan uçucu küllerin önemli bileşimleri alümina, silika, ferrik oksit ve kalsiyum oksittir. Bu oksit bileşimlerinin her biri ideal bir metal adsorbantı olabilir ve bu uçucu küllerin alkali doğası onları iyi bir nötralize edici bir reaktif yapar. Son yıllarda Türkiye’de elektrik üretimi için bir nükleer tesis kurulması planlanmaktadır. Türkiye’de de birkaç uranyum yatağı bulunmaktadır. Bunlardan biri Salihli-Manisa (ağırlıkça %0,03-0,04 U_3O_8) ve diğeri de Güre-Uşak (ağırlıkça 0,044 U_3O_8)’ dır. Yapılan bir çalışma Yatağan uçucu küllerinin 270 ppm U_3O_8 içerdiğini göstermiştir. Bu yataktan liç prosesi ile uranyum üretim (sarı kek) potansiyeli mevcuttur [18].

2.1.1.8. Çözünürlüğü

Uçucu kül-su sistemlerinin bileşimi, uçucu külün toprak ve yüzey suyu ile arasındaki potansiyel ilişkinin saptanmasında yardımcı olabilir. Bazı iz elementlerin düşük çözünürlüğü, küllerin yüksek alkaliliklerine ve aşırı OH iyonundan kaynaklanmaktadır. Genellikle yüzeyde bulunan molibden, flor, selenyum, arsenik, kadmiyum gibi bazı elementler asitler içinde kolay çözülürler. Bor, molibden, flor, selenyum, krom ve vanadyum gibi anyonlar ise metal katyonlar çöktürülürken alkali ortamda çözünürler [19]. Uçucu külün toprağa eklenmesi toprağın pH’sını, Ca, Mg, Na, S ve borun çözünürlüğünü artırır ve aynı zamanda fosfor konsantrasyonunu düşürür [20]. Bu özellik, Türkiye’nin Karadeniz sahili gibi nemli, düşük pH’lı toprakların pH’sını yükseltmek amacı ile kullanılmasını sağlar ve önemli bir etki sağlar [21,22]. Uçucu kül asidik topraktaki demirin, manganın, nikelin, kobaltın, ve kurşunun ortaya çıkmasını engeller [20]. Çoğu metallerin yükselen pH ile az çözünür olma eğilimlerinden dolayı , uçucu kül asidik toprağın pH’sını artırır [9].

2.1.2. Uçucu Küllerin Kimyasal Özellikleri

Atık malzeme olarak elde edilen küllerin yaklaşık %75-80’ini uçucu külleri oluşturmaktadır. Uçucu küller kimyasal yapıları bakımından 4 ana sınıfa ayrılabilir [8].

- **Silikat-alümina esaslı uçucu küller:** Kimyasal yapılarının büyük kısmın SiO_2 ve bir miktar Al_2O_3 meydana getirmektedir. Bu uçucu küller, içerdikleri alkali ve toprak alkali element oksitleri nedeniyle çok ince taneli ve camsı yapıya sahiptir.
- **Silikat-kalsit esaslı uçucu küller:** Kimyasal yapılarındaki temel oksitler, SiO_2 ve CaO 'dir.
- **Sülfür-kalsit esaslı uçucu küller:** Kimyasal yapılarının büyük miktarını SO_4 esaslı bileşikler ve CaO oluşturur.
- **Sınıflandırılmayan uçucu küller:** Termik santraldeki yakma sisteminin homojen olmamasından kaynaklanan ve kimyasal bileşimi, sürekli değişme gösteren küllerdir.

Uçucu küllerin kimyasal yapıları, fiziksel ve kimyasal özellikleri büyük ölçüde kullanılan kömürün özelliklerine ve yakma sistemine bağlı olarak değişiklikler göstermektedir.

Uçucu küllerin kimyasal özellikleri, suda çözünürlük ve asitlerin etkisi olarak ikiye ayrılabilir [8].

- **Suda çözünürlük:** Uçucu küller %2-3 oranında suda çözünürler. Çözelti kalsiyum ve sülfat nedeniyle reaksiyon vermektedir. MgO , Na_2O , K_2O , SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 'ün suda çözünürlükleri minimum seviyede olup, sıcaklık arttıkça uçucu küllerin suda çözünürlükleri artmaktadır.
- **Asitlerin etkisi:** Uçucu küllere asitlere etkisi çok azdır. Seyreltik asit içerisinde uçucu küllerin çözünürlüğü en fazla %15'dir. Ancak bu miktar küllerin kimyasal ve mineralojik yapısına bağlı olarak daha düşük olabilmektedir.

Türkiye'de ki termik santral atık uçucu küllerinin kimyasal kompozisyonları Tablo 2.3' de verilmiştir.

Tablo 2.3. Türkiye’de ki bazı termik santrallerde oluşan uçucu küllerin kimyasal içerikleri [9]

Oksit	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9	No.10	No.11
SiO ₂	45,18	49,50	53,50	15,35	47,60	15,14	52,10	47,50	52,00	23-30	13-25
Al ₂ O ₃	20,94	26,70	15,71	5,54	24,31	7,54	19,06	15,95	26,00	12,00	3-22
Fe ₂ O ₃	7,99	5,42	8,81	3,52	4,48	3,30	10,10	16,30	12,00	4,7-7,0	3-13
CaO	1,22	0,84	0,29	25,62	0,20	23,66	0,10	6,60	6,00	35,00	21-60
MgO	2,79	2,92	2,94	2,61	1,00	4,50	6,11	4,65	1,60	6,00	2,00
K ₂ O	2,24	2,42	1,19	0,41	3,50	0,28	1,32	3,70	1,50	0,80	1,00
Na ₂ O	0,57	0,81	0,77	0,27	0,58	0,57	0,49		3,00		1,00
TiO ₂	1,04	0,99	0,12	0,63	1,50	1,03	1,07		0,60		
SO ₃	5,63	1,59	1,11	20,86	0,57	13,22	0,83			18,50	13-31,5
Cd*	9,6	8,0	-	8,0	4,0	8,0	-				
Pb*	57,7	79,7	79,0	39,8	118,5	79,6	99,3				
Zn*	404,1	195,2	112,6	71,6	138,3	79,6	137,0				
Cu*	136,7	59,8	98,8	39,8	98,8	39,8	99,3				
Cr*	134,7	119,5	454,5	79,6	138,3	298,4	695,1				
Ni*	134,7	79,7	1975,9	79,6	118,5	119,4	1986,1				
Mn*	384,8	358,6	790,4	457,4	790,0	218,8	1589,0				
LOI	1,87	6,47	3,78	1,33	1,87	2,31	4,62				
LOI: Kızdırma kaybı											
*: İçerikler ppm											
Uçucu kül No		Kömür tipi		Kaynak		Uçucu kül No		Kaynak			
1		Linyit		Yatağan		8		Çayırhan			
2		Linyit		Soma		9		Orhaneli			
3		Linyit		Seyitömer		10		Kangal			
4		Linyit		Yeniköy		11		Kemerköy			
5		Bitümlü		Çatalağzı							
6		Linyit		Afşin-Elbistan							
7		Linyit		Tunçbilek							

Oksit analizleri sonuçlarında uçucu külün % 95’in den fazlasının silisyum (SiO₂), alüminyum (Al₂O₃), demir (Fe₂O₃), kalsiyum (CaO) ve magnezyum (MgO) elementlerinden oluşan kimyasal bileşikler ve camsı formları içerdiği görülmektedir. Uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları çeşitli değişkenlere bağlı olup, bunlar arasında; özellikle termik santralde yakılan kömürün kalitesi ve içerdiği safsızlıklar, toplama yöntemi, yanma süresi ve sıcaklığı sayılabilir.

Uçucu küller içerdikleri $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarına bağlı olarak C618 sayılı ASTM standardına göre “F” ve “C” olarak iki genel sınıfa ayrılmaktadır. “F” sınıfı küller bitümlü kömürlerden, “C” sınıfı küller ise linyit kömürlerinden elde edilmektedir. Ayrıca içerisinde %10’dan fazla miktarda CaO bulunduran küller, “yüksek kireçli uçucu kül” olarak tanımlanmaktadır. Birçok ülke standardında ve Türkiye’de bu tür sınıflandırma mevcut değildir [23].

Uçucu küllerde en fazla bulunan mineral fazlar, kuvars (SiO_2), mullit ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), hematit (Fe_2O_3), manyetit (Fe_3O_4) ve gipsittir (anhidrit (CaSO_4)). Uçucu küllerin bir kısmı SiO_2 ve Al_2O_3 ’den meydana gelirken diğer bir kısmı alkali ve toprak alkali elementlerin özellikle SiO_2 ve Al_2O_3 ile yaptıkları camı fazlardan oluşur [24].

Termik santrallerde kullanılan yakıta ve yanma şartlarına bağlı olarak uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları değişiklikler göstermektedir. Türk Standartları Enstitüsü’ne göre uçucu külün kimyasal kompozisyonları Tablo 2.4’de verilmiştir.

Tablo 2.4. TSE uçucu kül kompozisyonu [25]

Kimyasal Bileşik	Ağırlıkça (%)
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	70 (min.)
MgO	5 (max.)
SO_3	5 (max.)
Nem	3(max.)
Kızdırma Kaybı	10 (max.)

2.1.3. Uçucu Küllerin Bağlayıcılık Özellikleri

Uçucu kül, kendi başına bağlayıcı özelliği olmayan ancak sulu ortamda kireç ile birleştiğinde bağlayıcılık özelliği kazanabilen bir malzemedir. Kireç ve su ile karıştırıldıktan sonra artan süre ile birlikte uçucu küllerin bağlayıcılık özellikleri artmaktadır. Ayrıca CaO içeriği yüksek olan uçucu küller, daha iyi bağlayıcı özellik göstermektedir. Uçucu küllerin kireçteki kalsiyum iyonu ile birleşerek, hidrasyon sonucunda kalsiyum-silikat-hidrat jelini üreten bağlayıcılık özelliğini kazanabilmesi içerisindeki $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (S+A+F) miktarına ve inceliğine bağlıdır [26].

2.2. Küllerin Değerlendirilmesinin Sağladığı Yararlar ve Küllerin Kullanım Alanları

2.2.1. Ayırmanın Sağladığı Yararlar

1. Külün taşınması, stoklanması masraflarını azaltır.
2. Arazinin daha verimli kullanılmasına olanak sağlar.
3. Çevreye; toprağa, havaya ve sulara zararlı iz elementlerin etkilerinin kontrol altına alınması.
4. Yeniden kazanılan karbonun yakılması ile enerji ve hammadde tasarrufunun sağlanması.
5. Ayrıca aşağıda verildiği gibi birçok kullanım alanı vardır.

2.2.2. Kullanım Alanları

2.2.2.1. Tuğla Üretimi

Tuğla üretiminde kullanılan killeri, SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , CaO , K_2O , Na_2O ve TiO_2 gibi minerallerden meydana gelmektedir [27].

Uçucu küllerde aynı oksitleri içerdikleri için tuğla üretiminde kullanılabilir. Uçucu küllerin tuğlalarda kullanılması ile, tuğlaların kuruma ve pişme küçülmesi azalmaktadır. Aynı zamanda uçucu küllerin içerdikleri karbon, tuğlaların pişirilmesinde enerji tasarrufu sağlamaktadır [28]. Uçucu küllü tuğlaların üretiminde dikkat edilecek ilk nokta, konunun genelleştirilemeyeceğidir. Tablo 2.4’de verilen değişim sınırları göz önüne alındığında, bütün uçucu küllerin ve killerin aynı özelliklere sahip olamayacağı ortaya çıkmaktadır. Aynı kül, bir çeşit kil ile avantajlar sağlarken, değişik özellikteki başka bir kil ile iyi sonuçlar vermeyebilir [8].

Kil tuğlaların üretimi aşağıdaki sıraya göre yapılmaktadır.

1. Öğütme
2. Çamur haline getirme
3. Dinlendirme
4. Kalıplama
5. Kurutma
6. Pişirme

7. Ambalajlama

Uçucu küllü tuğla üretiminde, külün miktarına göre iki durum ortaya çıkmaktadır. Birincisinde, kil ana malzemedir. Kül, kilin özelliklerini geliştirmek ve bünyesindeki karbonun yanma değerinden faydalanmak için kullanılır. İkincisinde ise uçucu kül esas malzemedir. Kil, uçucu küllerin plastik özelliği olmadığı için bağlayıcı olarak kullanılır [8].

Uçucu kül ile kilin uygun karışımı bulunduğu zaman aşağıdaki avantajlar elde edilebilmektedir.

1. Öğütme değirmeninin kolay beslenmesi (bu sadece yaş veya yapışkan kilerde çalışıldığı zaman mümkündür)
2. Kalıplama için daha az kuvvet gerekmektedir
3. Daha kolay kuruma
4. Yakıt tasarrufu ve daha kolay pişirme

Tuğla üretiminde uçucu küllerin tane boyutu, tuğlaların özelliklerinin etkilemektedir. Küçük taneli küllerin kullanıldığı tuğlalar, tane boyutu daha iri olan uçucu küllü tuğlalara göre daha fazla basma mukavemetine ve bulk yoğunluğuna sahiptirler. Ayrıca daha düşük oranlarda pişme küçülmesi ve su emme özelliği gösterirler [29]. İnce taneli uçucu küllerin tuğlalarda daha iyi özellikleri göstermesi, maksimum noktada teması sağlayarak yoğunlaşmayı arttırmasından ileri gelmektedir.

Uçucu kül içeren tuğlaların pişirilmesinde sıkıştırılmalı fırınların kullanımı, kil tuğlaların pişirilmesinde kullanılan geleneksel fırınlardan daha iyi sonuçlar vermektedir. Uçucu küllerde karbonun yanma enerjisini daha iyi değerlendirebildikleri için, sıkıştırılmalı fırınların termal verimlilikleri yüksektir. Ayrıca, bu fırınların yatırım maliyeti daha düşüktür.

2.2.2.2. Çimento ve Beton Üretiminde

Çimento yapımında kullanılan hammaddeler CaO , SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 olmak üzere başlıca dört bileşiği içerirler. Uçucu küllerde de değişik oranlarda aynı bileşikler bulunduğu için çimento üretiminde kullanılabilir [8].

Bağlayıcı özelliği gösteren uçucu küller çimento ile birlikte kullanıldıklarında, çimentonun hidratasyonu sırasında ortaya çıkan kalsiyum hidroksit ile bu küllerle, kimyasal reaksiyona girecek bağlayıcı özellikleri daha da artar [30].

Uçucu küller beton yapımında kullanıldıkları zaman, betonun yüzey temizliği ve işlenebilirlik özelliğini iyileştirmektedir. Aynı zamanda betonun su geçirgenliği, büzülmesi azalmakta olup, dayanımı artmaktadır [31].

Ancak, uçucu küllerin çimento yapımında kullanılmasında dikkat edilecek husus ise yanmamış karbon oranının %6'nın altında olmasıdır, aksi halde kızdırma kaybının fazla olması nedeniyle su/çimento oranı, kabarcık yüzdesi, bekletme süresi gibi parametrelerin kontrolü zorlaşmakta, mekanik dayanım özellikleri ise olumsuz etkilenmektedir [32].

2.2.2.3. Hafif Agregaların Üretiminde

Uçucu kül, hafif öğütülmüş katı yakıt ve su karışımının 1000-1200 °C'de sinterleştirilmesi ile pelet veya nodüller üretilir. İyi bir mekanik mukavemete sahip bu agregalar betonda kullanılarak, dayanımlı hafif betonlar ve boksit elde edilir. Ayrıca hafif olmaları sebebiyle binaların işçilik, temel masrafları, ısı ve ses iletkenliği azalır [31].

2.2.2.4. Yol Yapımında ve Geoteknik Uygulamalarda

Uçucu kül, yol yapımında ve geoteknik uygulamalarda genellikle iki şekilde kullanılmaktadır; dolgu malzemesi olarak ve toprak stabilizasyonu sağlamak amacıyla temel malzemesi olarak. Uçucu küller sıkıştırıldıkları zaman diğer dolgu malzemelerine nazaran daha düşük bir yoğunluğa sahip olurlar. Bu durum, özellikle sıkıştırılabilirlik özelliği yüksek uçucu küllerin yüksek zeminler üzerine daha uygun bir dolgu malzemesi olarak kullanılabileceğini gösterir. Böylece, yerleşme nedeniyle oluşan deformasyonlar daha küçük olacak, özellikle yerleşme hareketinin büyük sorunlar oluşturduğu köprü ayaklarında kullanılması çeşitli yararlar sağlayacaktır [23,31,33].

Son zamanlarda uçucu külün çevre geoteknolojisi uygulamalarında kullanım olanakları araştırılmaktadır. Örneğin, zararlı atık veya çöp depolanan sahalarda sızdırmazlık sağlamak amacıyla, sıkıştırılmış uçucu kül veya kül+kum karışımının kullanılması düşünülmektedir [33].

2.2.2.5. Gaz Beton Üretiminde

Gaz beton: çimento, kireç, kum ve alüminyum tozları ile uçucu küllerin karıştırılması sonucu elde edilir. Karışıma ilave edilen sıcak su, alüminyum tozları ve kireç arasında bir reaksiyona yol açar. Böylece, istenilen boyutlarda elde edilen bloklarda oluşan çok sayıda kabarcıkdaki hidrojen yerine havanın girmesi ile dayanıklı ve hafif bir yapı malzemesi elde edilir. Daha sonra otoklavlarda buhar kuru uygulaması ile fiziksel ve kimyasal özellikleri iyileştirilen blokları, kullanıldıkları binalarda ısı yalıtımının yanı sıra, hafif olmaları nedeniyle taşımada da kolaylık sağlarlar [31].

2.2.2.6. Seramik ve Cam Üretiminde

Uçucu küller, kil ve feldspat ilavesi ile geleneksel (tabak, fincan vs.) ve sanatsal (vazo, küllük, süs eşyaları) seramiklerin üretiminde kullanılmaktadır. Uçucu küller seramik sanayiinde kullanıldığında bir takım avantajları beraberinde getirmektedir. Bunlar, tane boyutunun küçüklüğü sebebiyle, öğütme masraflarının olmayışı dolayısıyla maliyetinin çok düşük olması ve içerdiği karbonun pişirme işlemleri sırasında sağladığı enerji şeklinde sıralanabilir. Uçucu küller ayrıca son zamanlarda üzerinde çok çalışılan ve geniş kullanım alanı bulan cam seramiklerinin üretiminde de kullanılmaktadır [34].

2.2.2.7. Uçucu Küllerin Kullanıldıkları Diğer Alanlar

Uçucu küllerin yukarıda verilen kullanım alanları dışında, kullanıldıkları diğer yerler aşağıda verilmiştir [34].

1. İçerisinde bulunan Au, Ni, Ti, Al gibi bazı elementlerin eldesinde.
2. Aktif karbon yerine kullanımı (deneme aşamasında)

Burada, iodonin çözeltiden adsorplanmasında standart aktif karbon 900-1200 mg/g kadar adsorbe ederken, uçucu külden elde edilen karbon ise 150 mg/g kadar adsorplamıştır. Bu, cesaret verici bir sonuç olup ağırlıkça %90'ların üstünde karbon içeren konsantrelerin eldesi için çabalar arttırılmaktadır [35].

3. Döküm kumu olarak
4. Duvar harçlarında
5. Metal yüzeylerinin püskürtme ile temizlenmesinde

6. Asfalt yol yüzeylerinde kaymayı önleyici olarak
7. Petrol kuyuları sondajlarında
8. Sentetik zeolit üretiminde [35]
9. Maden ocaklarında filtre olarak
10. Grit olarak tersanelerde gemi yüzeylerinin boyadan temizlenmesinde
11. Yalıtım malzemesi olarak

2.3. Dünyada ve Türkiye’de Kül Değerlendirme Durumları

Günümüzde, kömür yanma ürünleri, gerek sahip oldukları teknik özellikleri, gerek ucuz hammadde olmaları nedeniyle, ayrıca çevresel sorunların önüne geçilmesi bakımından ve de depolama masraflarının da artması ile giderek artan oranlarda değerlendirilmektedir. Aşağıda ise, A.B.D., Japonya, Avrupa Birliği ve Türkiye’de kül değerlendirme durumları hakkında bilgi verilmiştir.

2.3.1. A.B.D.

A.B.D.’ deki kül üretim ve değerlendirme alanları ile ilgili bilgiler Tablo 2.5’de verilmektedir.

Tablo 2.5. A.B.D.’ deki kül üretim ve değerlendirme alanları [36]

	Uçucu Kül	Dip Külü	Kazan Curufu	Sülfürsüzleştirme Ürünü
Toplam Üretim (short ton)	60.264.791	16.904.663	2.741.614	25.163.394
Kullanım Alanları				
Çimento/Beton	9.421.903	604.705	10.755	202.423
Akışkan Yatak	386.158	15.260	0	0
Yapı Dolgusu	2.877.535	1.384.327	84.669	91
Yol Dolgusu	1.417.600	1.286.585	792	17.797
Mineral Dolgusu	285.580	130.888	108.796	0
Buzlanma Kontrolü	0	723.615	56.057	0
P.M. Dolgusu	0	159.749	2.288.581	0
Madencilik	1.413.567	162.638	0	104.690
Wallboard	0	0	0	1.603.762
Artık Stabilizasyonu	3.117.947	206.368	0	15.428
Ziraat	34.571	8.197	0	56.644
Diğer	362.501	414.572	29.200	183.527
Toplam	19.317.362	5.096.905	2.578.851	2.183.363
Kendi İçlerinde Değerlendirme Oranları, (%)	32,1	30,2	94,1	8,7
Toplam Değerlendirme	$29.176.482 \cdot 100 / 105.074.462 = \%27,77$			

2.3.2. Japonya

Günümüzde Japonya’da üretilen yaklaşık 2.2 milyon ton külün %70 kadarı değerlendirilebilmektedir. 2006 yılına kadar kül üretiminin senede 13.00.000 tonu bulacağı düşünülüyor [37]. Bu da toprak bakımından fakir olan Japonya için çevresel sorunlara neden olabilir. Dolayısıyla, yeni değerlendirme şekillerinin geliştirilmesi için büyük çabalar sarf edilmektedir. Tablo 2.6’da Japonya’da ki kül üretim ve değerlendirme durumu verilmiştir.

Tablo 2.6. Japonya’da ki kül üretim ve değerlendirme durumu [37]

	1994		1995		1996	
	Milyon ton	%	Milyon ton	%	Milyon ton	%
Üretim	6.526	100,0	7.123	100,0	7.208	100,0
Değerlendirme	4.215	64,6	4.782	67,1	5.058	70,2
Depolama	2.311	35,4	2.341	32,9	2.150	29,8

2.3.3. Avrupa Birliği

1997 senesinde Avrupa Birliği’nde yaklaşık 63 milyon ton kömür yanma ürünleri elde edilmiştir. Uçucu kül ve dip külünde değerlendirme oranı %60 kadar iken, sülfürsüzleştirme ürünü ve kazan curufu için bu oran % 100’leri bulmaktadır [38].

2.3.4. Türkiye

Yıllara göre Türkiye’de üretilen kül miktarları ve değerlendirme durumları ile ilgili bilgi Tablo 2.7’de verilmiştir.

Tablo 2.7. Türkiye’de ki Termik santrallerde oluşan kül miktarı (ton) [39].

Santral Adı	1992		1994		1996	
	Üretim (ton)	Satış (%)	Üretim (ton)	Satış (%)	Üretim (ton)	Satış (%)
Yatağan	1259	0	754.3	0	1030.7	0
Soma	2686.2	0	3531.2	0	4000.0	0,5
Seyitömer	1604.8	0	1717.9	0	1881.3	0
Yeniköy	820.0	8,5	620.0	0	1000	0,4
Çatalağzı	559.4	0	602.2	0	497.9	0
Afşin-Elbistan	1883	0	2050.8	0	1801.5	0,1
Tunçbilek	402.6	0,4	539.8	0	818.7	1,8
Çayırhan	350.8	0	340.0	0	311.3	2,6
Kangal	400.0	0	400.0	0	638.4	0
Orhaneli	635.5	57,7	138.0	0	50.3	0
Kemerköy	0	0	0	0	728.0	0
Toplam	10601.3	4,1	10694,2	0	12758,1	0,4

Tablo 2.8.'de de uçucu kül kullanım oranlarının ülkelere göre kıyaslanması yapılmıştır. Tablodan da görüldüğü gibi Türkiye'de ki kül kullanım oranı ile diğer ülkelerin oranları arasında çok büyük bir fark vardır. Uçucu kül kullanım oranının bu ve bunun gibi çalışmalar ile yükseltilmesi hedeflenmektedir.

Tablo 2.8. Uçucu kül kullanım oranlarının ülkelere göre kıyaslanması

Ülke	Üretim (ton)	Değerlendirme oranı (%)
ABD	60.264.791(short ton)	27,77
Japonya	7.280.000	70,2
Avrupa Birliği	63.000.000	60
Türkiye	13.000.000	0,4

2.4. Kömür Yanma Ürünlerinin Oluşumu ve Tanımı

2.4.1. Kömür Yakma Şekilleri

Kömür yakma sistemlerinin en yaygın kullanım alanları buhar kazanları ve fırınlardır. Buhar kazanları, ısıtma proses gereksinimlerini karşılama veya güç üretimi amacıyla sıcak su ve buhar üretmek için kullanılmaktadır. Fırınlara ise çeşitli maddelerin ısıtılması için kullanılmaktadır. Endüstride değişik yapı ve işlevlere sahip çok sayıda fırın çeşidi bulunmaktadır.

Bir yakma sistemi temel olarak 2 bölümden oluşmaktadır. Bunların birincisi yakıcı bölüm, ikincisi ise yanma odasıdır. Yakıcı bölümün işlevi yakıt ve havayı istenilen oranlarda karıştırmak, tutuşturmak ve kararlı yanmayı devam ettirmektedir. Yanma odasının işlevi ise alevi içermek, ısı geçişini en üst seviyede tutmak ve yanma ürünlerinin uygun koşullarda ısıtma yüzeylerine sevkini sağlamaktır.

Katı yakıtları yakmak için başlıca üç çeşit yöntem kullanılmaktadır. Bunlar; pülverize yakma, sabit ve akışkan yatakta yakma yöntemleridir [40].

1. Pülverize yakma sistemlerinde, öğütülerek mikron boyutundaki tanecik haline getirilen kömür, yakma odasına sıvı bir yakıt şeklinde püskürtülerek yakılmaktadır. Tanecikler küçük olduğu için özgül yüzey alanları büyüktür. Bu nedenle tam bir yanma sağlamak için bol hava ortamına gerek olmamaktadır.

Taneciklerin küçük boyutlara düşürülmüş olması, uçucu madde, sabit karbon ve yanma süresi açısından önemli üstünlükler sağlamakta ve bu şekilde çok değişik özelliklere sahip kömürleri bu sistemde yakmak mümkün olmaktadır. Ancak bu sistemlerde kömürlere uygun boyuta getirmek kömür hazırlama maliyetini artırmaktadır. Hava kirliliği açısından yanma sıcaklığının yüksek olması NO_x 'lerin yayılımını artırıcı bir unsur olmaktadır. SO_2 yayılımını kontrol etmek için de ek proseslere gereksinim vardır. Siklon tipi yakıcıların geliştirilmesi ile yanma çok daha etkin bir hale getirilmiş ve böylece yanmamış hidrokarbonların yayılımını azaltılmıştır.

2. Sabit yataklı yakıcılarda kömür bir ızgara üzerine yığılarak hava ile değişik şekillerde temas ettirilerek yanma sağlanmaktadır. Yanma sırasında özellikle yakıt ilavesi sırasındaki kararsız yanma periyodunda yanmamış hidrokarbon, CO ve azotlu bileşikler gibi kirlletici yayılımı artmaktadır. Bu durumda sisteme ikinci bir hava beslemesi yapılarak normal yanma koşullarına geçilmektedir.
3. Akışkan yataklı (AY) yakma sistemlerinde yanma, yakıt/kömür taneciklerinin hava ile akışkanlaştırılmış inert katı tanecikler ortamında akışkan bir yakıt şeklinde yakılması ile gerçekleştirilmektedir.

AY'da kömürün yanma mekanizması, gerek AY'nın karmaşık hidrodinamik davranımı, gerekse kömür taneciğinin yanma sürecindeki geçirdiği aşamalar nedeniyle tam olarak aydınlatılamamıştır [40]. Piilayi, bir çok araştırmacının görüşlerinin değerlendirerek, tutuşma sıcaklığına kadar ısıtılmış bir AY ortamına atılan herhangi bir kömür taneciğinin yanma sürecindeki geçirdiği aşamaları şu şekilde özetlemiştir [40]:

1. Tanecik bir ön ısınma sürecinden geçer (Yaklaşık 3 saniye)
2. Uçucu maddeler çıkar ve yanma başlar. Uçucu madde yanması süresince kömür daha çok yüzeye yakın üst bölgelerde kalma eğilimi gösterir.
3. Uçucu madde çıkışı biten ve yarı kok haline gelen tanecik yatak içinde yanmaya devam eder. Bu aşamada taneciğin sıcaklığı ortam sıcaklığına göre daha yüksektir.

4. Kömürün özelliklerine göre yarı kok tanecik çeşitli şekillerde yanmaya devam eder.

4.a. Yanmaya paralel olarak taneciğin boyutu küçülür.

4.b. Taneciğin boyutu önemli ölçüde değişmez. Ancak geriye kalan kül tanecikleri çeşitli nedenler ile parçalanabilir.

4.c. Taneciğin boyutunun yanma süresince pek değişmemesine karşın, zaman zaman daha küçük taneciklere bölünür. Bu süreç tanecik tükeninceye kadar devam eder.

2.4.2. Küllerin Oluşumu [41]

4 tip kömür yanma ürünü vardır.

1. Konvansiyonel uçucu kül
2. Scrubber (yıkayıcı kule) şlamı
3. Akışkan yataklı sistemlerin uçucu külü
4. Curuf (spent-bed)

1. Konvansiyonel uçucu kül (conventional fly ash (CFA)): Pülvarize kömürün yakıldığı fırınlarda oluşmaktadır. Uçucu kül çok küçük küresel şekilli partiküllerden oluşur ve tipik olarak partiküllerin % 65'inin boyutu 0,01 mm'den küçüktür. Bu sebeple taşıma ve işleme aşamasında toz oluşumuna, dikkat edilmelidir.

2. Yıkama kulesi şlamı: Ağırlıklı olarak kalsiyum sülfat(jips) ve sülfat ve sülfitten oluşmaktadır. Kuleden çıkan malzeme %15-20 arasında katı kısım içerirken, kuru depolama amacıyla ilk etapta katı konsantrasyonu, tüklerinde %40-50'ye yükseltilirken, daha sonra bu oran vakum filtrelerde, santrifujde veya siklonlarda %65-75 oranına kadar yükseltilmektedir.

3. Yeni bir yakma tekniği olan akışkan yataklı yakma sistemleri (fluidized bed combustion (FBC)) sonucu oluşan kül ise değişik yakıtların, kireçtaşı gibi akışkan, adsorplayıcı yataklarda, SO_2 'yi uzaklaştırmak amacıyla yakılması sonucu oluşmaktadır. Yanma esnasında temel olarak iki tip ürün; uçucu kül ve curuf oluşmaktadır.

Tipik olarak FBC- uçucu kül, daha çok homojen bir şekil dağılımı olmayan, boyutu 0,045 mm'den küçük partiküllerdir. Curufun boyutu ise 0,075 mm'den daha büyüktür. FBC ürünleri, genellikle serbest nem içermez, ancak su ile birleşme eğilimi gösterirler. Nem ile temas sonucu, kalsiyum oksit ve sülfatla hidrotasyon reaksiyonuna sebep olur. Bu reaksiyon yan ürünü sertleştirilebilir ve buna bağlı olarak yüksek hidrotasyon ısısı meydana gelebilir. Ayrıca bu yan ürünler, solunum yoluyla alındığında veya deri ile direk temasında tahriş edici olabilen yüksek derecede yakıcı (kostik), sönmemiş kireç içermektedir. Bu nedenle; taşıma, kapalı araçlarda veya kapatılmış olarak yapılmalıdır ki, kaçak toz oluşumu ve su ile teması engellenebilsin.

2.4.3. Kül Depolama Yöntemleri

Termik santrallerde kullanılan kömürün yüksek kül miktarı (%17-%46) ve düşük ısı değeri nedeniyle elektrik üretiminde çok fazla kül ve curuf oluşmaktadır. 1996 yılı itibari ile 11 termik santralden yaklaşık 12,750 milyon ton kül ve curuf açığa çıkmıştır. Kül ve curufun depolanması için genellikle şu yöntemler kullanılmaktadır.

1. Kuru olarak depolama
2. Hidrolik olarak taşıma ve depolama
3. Sulu yayma yöntemi

Bu yöntemlerin Türkiye'deki örneklerine bakacak olursak, Seyitömer ve Tunçbilek Termik santrallerinde kuru depolama yöntemi uygulanmaktadır. Silolardan alınan kül, bantla kül depo sahasına taşınması sırasında toz oluşumunun engellenmesi amacı ile hafif nemlendirilmektedir. Bantla depoya gelen ve stakerler vasıtasıyla dökülen kuru kül dozerlerle yayılmakta, gerekli olduğu takdirde döküm sahasında da tozlanmanın önlenmesi amacıyla kül, spreyleyler vasıtasıyla ıslatılmaktadır. Kül dökme işleminin bittiği, aktif olmayan alanların üzeri toprakla kapatılarak bitkilendirilmektedir.

İkinci yöntemde ise; 1/8 veya 1/9 oranında su ile karıştırılan kül, hidrolik olarak borularla kül barajına pompalanmaktadır. Barajda toplanan temiz su, tekrar külün hidrolik olarak taşınmasında kullanılmak üzere sisteme geri döndürülmektedir. İlk

hidrolik sistem Soma Termik santraline uygulanmıştır (Orhaneli’ de aynı sistem uygulanmaktadır).

Çayırhan ve Yatağan termik santrallerinde sulu kül yayma yöntemi uygulanmaktadır. Bantla hafif nemlendirilmiş olarak depoya gönderilen kül ve curuf, boşaltma noktasında $\frac{1}{2}$ veya $\frac{1}{3}$ oranında su ile karıştırılarak, bir kanal vasıtasıyla depolama alanına gönderilmektedir. Böylece külün su ile yayılması sağlanırken; kül de belirli bir su filmi altında tutulmakta ve toz probleminin önüne geçilmiş olmaktadır.

Afşin-Elbistan termik santralinde ise kül, kömürü alınmış maden sahalarına dekapajla birlikte depolanmakta, üzeri toprakla kapatılıp bitkilendirilmektedir. Çatalağzı termik santralinde ise kül ve curuf denize atılmaktadır. Şu anda kül ve curufun bertaraf yöntemleri ile ilgili etüt çalışmaları tamamlanmıştır. Fizibilite çalışmalarından sonra külün hangi sistemle atılacağına karar verilecektir [39].

2.4.4. Yeryüzüne Depolanan Küllerin Etkileri [39]

Yugoslavya’da yapılan bir çalışmada, burada yaşayan canlıların yıllık ortalama 450 gram kül aldığı hesaplanmıştır. Yugoslavya’da kül yığınları veya “yapay kül dağları” şeklinde depolanan küllerin çevreye olan negatif etkileri şu şekilde özetlenebilir.

- Kül ile kaplanan alan tamamen kaybolmuştur, geri kazanılması söz konusu değildir.
- Civarında bulunan alanlar, bu kül hacimlerinin kayma olasılığı ile tehdit altındadır.
- Civar alanlarda, su veya hava kirliliği tehlikesi her zaman mevcuttur.
- Yer altı veya yüzey suları çözünmüş tuzlar, ağır metal iyonları ile kirlenmektedir.

Yugoslavya’da düşük kaliteli “brown coal” %20 oranında, linyit ise %80 oranında enerji sektöründe kullanılmaktadır. Kömür yatağına ve temel karakteristiklere bağlı olarak silisli (temel bileşen %50 oranındaki SiO_2), kalsiyumlu (CaO % 50 oranında) ve silis-kalsiyumlu olmak üzere üç tip kül elde edilmektedir.

CaO aktif iken SiO_2 hareketsiz bileşendir. Suyla temaslarında silisli küller hidrofobik olduklarından her zaman sudan uzak kalırlar. Bu tip küllerin geçirgenlik değerleri

(10^{-5} - 10^{-6} m/sn) yüksektir, kohezyon değerleri düşüktür. Kalsiyum külleri suyla çabuk reaksiyona girer ve karbonizasyon sırasında kireç taşına dönüşürler, geçirgenlik değerleri düşüktür. Silis-kalsiyumlu küllerin suyla reaksiyonu yavaş ve sakindir, oluşan durağan yapı, karalı bir kaya oluşturur ve geçirgenlik değerleri düşüktür.

Üç tip kül de su kirliliğine neden olmaktadır. Temel olarak kirleticiler silisli külden kaynaklanan ağır metaller ve kalsiyumlu küllerin neden olduğu yüksek alkaliliktir. Ağır metaller ve iz elementlerin iyon miktarları kömürde çok az iken; bu iyonlar yanma sırasında konsantre haline gelmektedir. Yüksek sıcaklıklara (1000-1100 °C) çıkılması sabit sülfid formlarının oksitlere dönüşmesine neden olmaktadır. Oksitler suda çözünmez, böylece kül depolarından gelen üst akış suyunda, kurşun ve arseniğin periyodik iyon konsantrasyon değerlerinin izin verilenin üstünde olduğu belirlenmiştir. Drenaj sularının incelenmesi sonucunda ağır metaller rastlanılmamıştır, bu da depolanan küllerin içinden geçen bu liçteki iyonları absorpladığı olasılığı ile açıklanmaktadır. Kalsiyumlu küller veya silis-kalsiyum külleri için, yüksek alkalilikleri nedeni ile korunma önlemleri farklılık göstermektedir.

Havayı, rüzgar ve hava akımları ile depolardan taşınan ince kül parçacıkları kirletir. Termik santraller genellikle nehir kıyılarına kurulmaktadır, bu bölgelerde hava akımları kuvvetli ve sık oluşmaktadır. Hava kirliliğine neden olabilecek yeterli hava hızı 5 m/sn' dir. Rüzgar erozyonundan korunmanın en iyi yöntemi, kül depolarının veya yığınlarının üzerini jeotekstil malzemeye kaplamak veya kül üzerinde film oluşturacak şekilde emülsiyonlar uygulamaktır.

Kül ve curuf depoları çözülmesi gerekli birçok ekolojik sorunlara neden olmaktadır. Yugoslavya'da temel fikir, kül miktarının azaltılması ve kirliliğinin önlenmesi için kömürün, termik santrallerde yakılmadan önce temizlenmesidir.

2.4.5. Termik Santrallerde Atık Uçucu Küllerin Toplanması

Termik santral ile elektrik üretiminde yanma işlemi sonucunda oluşan atık küller; kömürün cinsine, kül oranına, kimyasal yapısına, kazanlara yükleme programına ve kül temizleme işlemleri ile kazan tipine bağlı olarak farklı özellikler göstermektedir.

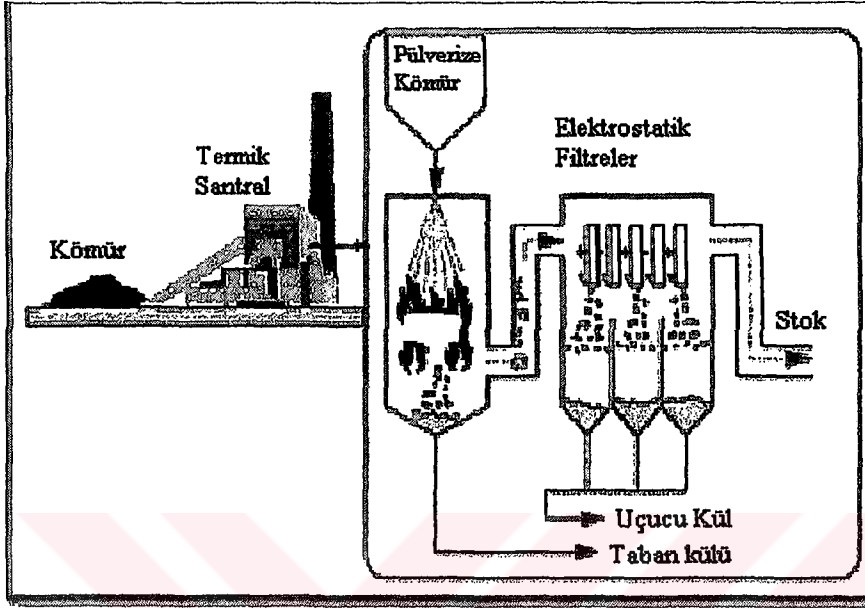
Termik santrallerde toz ve parça kömürler kullanılmaktadır. Toz kömür yakan termik santrallerde 0,09 mm tane boyutuna öğütülmüş kömürler kullanılır. Parça kömürler ızgaralı kazanlarda yakılmakta olup, oluşan küllerin %1-5'i uçucu küllerdir. Toz kömürlerin kullanılmasında ise bu oran %80'lere ulaşmaktadır. Uçucu küllerin toplanmasında aşağıdaki yöntemler kullanılır:

1. Elektrofiltreler
2. Siklonlar
3. Nemlendirme
4. Filtreler
5. Ultrasonik çöktürme
6. Kontrol prosesleri

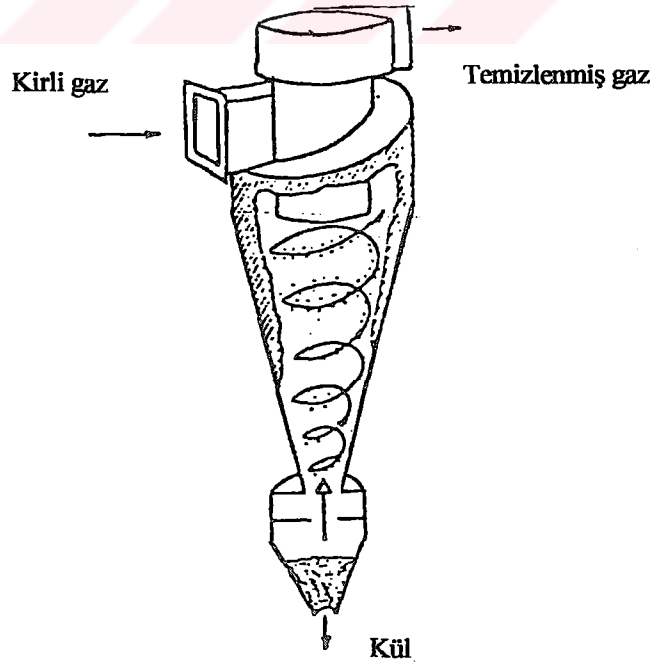
Termik santrallerde en çok kullanılan kül tutma yöntemleri elektrofiltreler ve siklonlardır. Şekil 2.2'de elektrofiltre yöntemi görülmektedir. Kazan külünün tane boyutunun büyük olduğu durumlarda mekanik tutucular, yani siklon ve benzeri üniteler, tane boyutunun küçük olduğu durumlarda ise en verimli ve ekonomik yöntem olan elektrofiltreler kullanılmaktadır [8]. Şekil 2.3'de siklon ile uçucu küllerin tutulması görülmektedir. Uçucu küllerin su ile ıslatılarak çöktürülmesi esasına dayanan nemlendirme yöntemi çok su tüketmekte olup, toplanan küllerin değerlendirilememesi ve yüksek maliyet sebebiyle pek tercih edilmemektedir. Şekil 2.4'de uçucu küllerin nemlendirilme yöntemi ile tutulması görülmektedir. Filtreler, ultrasonik çöktürme ve kontrol prosesleri ile 1 mikron boyutuna kadar olan uçucu küller yakalanabilmektedir. Bacadan çıkan kül miktarı azaldığı için çevre kirliliğini azaltan bu yöntemlerin yatırım ve işletme maliyetleri çok yüksektir [42].

Termik santrallerde üretilen külün santral dışına, genellikle santralden oldukça uzak bir yere taşınması veya atılması gerekmektedir. Uçucu küllerin santral içinde taşınmasında bantlar, helezonlar, curuf kırıcılar, silolar, pnömatik ve hidrolik sistemler ve kül tutma havuzları kullanılır. Curuf ve kazan altı külleri iri tanelidir ve kazan dışına alınırken yanmayı durdurma ve sıcaklığı düşürme amacıyla ıslatılırlar. Küllerin hidrolik sistemde taşınmaları ve santral dışına atılmaları büyük sorunlar yaratmaktadır. Uçucu külün düşük kütle yoğunluğu silolarda toplanmalarında güçlük çıkarmaktadır. Uçucu küllerin santral dışına bantla taşınması işleminin tam olarak

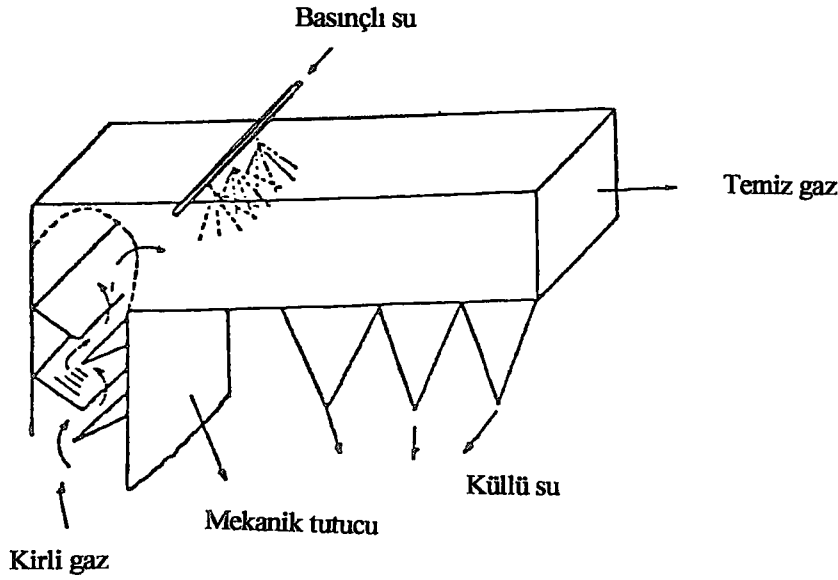
yapılamadığı durumlarda, ortaya çıkan çevre kirliliğine ek olarak santralin düşük yükte çalışması ve hatta tamamen durması söz konusu olmaktadır. Sonuçta, elde edilen enerji miktarı düşmektedir [8].



Şekil 2.2. Uçucu küllerin elektrofiltre yöntemi ile tutulması



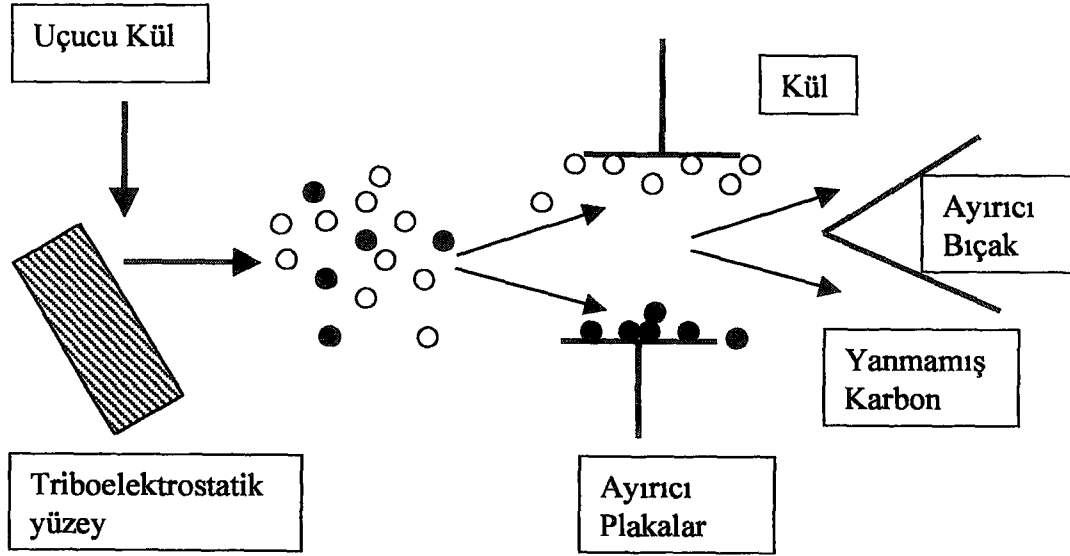
Şekil 2.3. Siklon ile uçucu küllerin tutulması



Şekil 2.4. Uçucu küllerin nemlendirme yöntemi ile tutulması

2.4.6. Uçucu Külün Yan Ürünlerinin Zenginleştirilme Yöntemleri

Uçucu külün küresel şeklinin betonun dayanımını artırmasından dolayı en fazla çimento sanayiinde kullanılır [43]. Ama buna ilave olarak betonda kullanılacak uçucu külün yanmamış karbon içeriği de oldukça önemlidir Genel olarak kabul gören limit değer % 3'C'dur. Bu değerın üzerine çıkıldığında, donma-erimeye karşı gösterdiği düşük direnç nedeni ile kullanıma uygun değildir [44]. Uçucu külün katkı malzemesi olarak kullanıldığı seramik sanayi için de malzemenin düşük Fe_2O_3 içeriği kadar yanmamış karbon oranı da önemli bir faktördür. Seramik bünye içersinde yüksek karbon miktarı, ürünün pişmesi esnasında istenmeyen gaz çıkışı nedeni ile fiziksel hatalara (yüksek su emme oranı, yüksek porozite ve düşük mukavemet vs.) neden olmaktadır. Uçucu külün yan ürünlerinden biri olan yanmamış karbon yakıt olarak tekrar kullanılma potansiyeline sahiptir. Bu alanda çeşitli uygulamalar vardır [45]. Uçucu kül içersinden yanmamış karbonun geri kazanımı bir çok araştırmacı tarafından çalışılmıştır. Yapılan bu çalışmalarda flotasyon yöntemi kullanılarak uçucu külden yanmamış karbon partiküllerini başarılı bir şekilde ayrılarak bu ürünün yakıt olarak yeniden kullanılabileceği gösterilmiştir [45]. Böyle bir çalışma Türkiye'de Soma termik santralleri için uygulanmıştır [46]. Yapılan başka çalışmalarda da yanmamış karbonun kazanımı için elektrostatik ayırma yöntemi kullanılmıştır [45,47].



Şekil 2.5. Uçucu külden yanmamış karbonun elektrostatik yöntem ile kazanılmasının şematik gösterimi [45,47].

Bu zenginleştirme yöntemlerine ek olarak gravite ayrımı da bir çok araştırmacı tarafından başarı ile uygulanan bir yöntemdir [45,48]. Yanmamış karbonun geri kazanımı kadar uçucu külün farklı kullanım alanları için hammadde veya katkı malzemesi olarak kullanılabilirliğinin belirlenmesine yönelik bir çok araştırma mevcuttur. Gerçekleştirilen bir çalışmada uçucu külün inorganik pelet bağlayıcı olarak kullanılabilirliği belirlenmiştir [49]. Yine başka bir çalışmada ise manyetik ayırma, akışkan yatak gravite ayırması ve siklon kullanımı ile yanmamış karbon, manyetit ve senosferler (mikro baloncuklar) farklı ürünler olarak elde edilmiştir [50].

2.4.7. Uçucu Küllerde Radyoaktivite

Özellikle Batı Anadolu küllerinde söz konusu edilen radyoaktivite jeolojik nedenlere dayanmaktadır. Radyoaktivite atom çekirdeğinin kendiliğinden parçalanması veya bozulması sonucu bir ya da daha fazla iyon radyasyonunu açığa çıkaran bir süreçtir.

Nasıl ki yağış yağmur, dolu, kar gibi şekillerde iniyor ise insan bu yağış türüne bağlı olarak farklı düzeyde ıslanıyorsa radyasyondan etkilenmede de durum aynıdır. Farklı radyasyon türlerinin vücut dokularındaki biyolojik zararları birbirinden farklıdır.

Yaşadığımız gezegende radyasyondan kaçınmak mümkün değildir. Uzaydan gelir, yerkabuğundan fişkirır, denizde vardır, vücudumuza yerleşmiştir [51].

Endüstri toplumunda insan yılda 160 milirem civarında radyasyon dozu alır. Bunun 2/3'ü doğadan, 1/3 insan yapısı kaynaklardan gelir. Coğrafi konuma, yüksekliğe göre değişmekle beraber insanın doğadan aldığı ortalama doz 100 milirem dolayındadır. Uranyum ve toryum cevherinin zengin olduğu bölgelerde bu doz artar. Doğadan alınan radyasyonun 1/3'ü yerkabuğundan gelir. Bütün jeolojik tabakalarda değişik oranlarda radyoizotop elementler bulunur. Binaların yapısında kullanılan malzemeler de yerkabuğundan alındığına göre belirli oranlarda radyoaktivite içerirler. Örneğin Tablo 2.9'da üç tür bina içinde yaşayanların aldıkları yıllık radyasyon dozları verilmiştir [52]

Tablo 2.9. Bina türüne bağlı olarak alınan yıllık radyasyon dozları [52]

	Milirem/yıl
Ahşap bina	30-50
Tuğla bina	50-100
Beton bina	70-100

Kömürdeki radyoaktif elementler hiçbir zaman bir alarm kaynağı olmamalıdır. Diğer toprak ve taşlara nazaran, uçucu küller önemli derecede radyoaktif elementlere sahip değildir. Yapılan bir çalışmada su içersinde uçucu külden çözünen uranyum ve radyum değerlerinin limitler içersinde olduğu ve bununla beraber uçucu kül atık sitelerinden yer altı suyuna geçen radyoaktif elementlerin konsantrasyonlarının insan sağlığını tehlikeye sokacak limit değerlerin altında olduğu tespit edilmiştir [53].

Bu bakımdan uçucu küllerin radyoaktif elementler içermesi tabiatın gereğidir. Bilimsel bir inceleme olmadan uçucu küller radyoaktif atık olarak değerlendirilmemelidir [51].

2.5. Puzolonların Tanımı Ve Sınıflandırılması

Puzolanik özelliklere sahip bir çok doğal ve yapay madde çok eski zamanlardan günümüze değin yapım alanında ve beton üretiminde çeşitli amaçlarla kullanılmışlardır. Betonun temel bileşimlerinden olmayan bu maddeler, gelişen beton teknolojisinde betonun çeşitli fiziksel, mekanik ve durabilite özelliklerini değiştirmek ve de üretimde ekonomi sağlamak amacıyla kullanılan katkı maddeleridir. Bu

nedenle bu tür puzolanik maddeler mineral katkı maddeleri olarak da adlandırılmaktadır [2].

Betonda kullanılan mineral katkı maddeleri Portland çimentosuna benzer mineralojik ve kimyasal bileşimler ile fiziksel özelliklere sahip olmalarına rağmen büyük çoğunluğunun kendi başlarına bağlayıcılık yetenekleri yoktur. Bu maddeler puzolanik aktiviteleri nedeniyle hidrasyon ürünlerinin oluşumunda etkinlik göstererek bağlayıcı hamur yapısını değiştirirler. Böylece betonun çeşitli özellikleri iyileştirilirken daha yoğun bir bağlayıcı hamurun oluşmasını, agrega-hamur ara yüzeyindeki aderansın artmasını ve yüksek mukavemetlere erişilmesi mümkün olabilmektedir [54].

ASTM C618'e göre puzolanlar, kendi başlarına bağlayıcılık özelliği çok az olan veya hiç olamayan fakat (doğal yapıları gereği veya öğütülme sonucu) çok ince taneli olduklarında ve rutubetli ortamda kireç (kalsiyum hidroksit) ile kimyasal reaksiyona girdiklerinde, bağlayıcı özelliklere sahip bileşenlerin oluşmasını sağlayan silisli veya silis ve alüminli malzemelerdir [55]. Bu tanıma uyan bir çok doğal malzeme bulunduğu gibi, bir çok endüstri atığı mineral madde de puzolanik özellikler göstermektedir.

Puzolanların sınıflandırılması ve türleri Tablo 2.10'da gösterilmiştir

Tablo 2.10. Puzolanların sınıflandırılması ve türleri [54].

Puzolanlar	
Doğal puzolanlar	Yapay puzolanlar
Volkanik curuflar	Uçucu küller
Volkanik tüfler	Yüksek fırın curufu
Opalin silika	Silika dumanı
Pomza taşları	Pirinç kapçığı külü
Pişmiş (Kalsine) kil veya şeyl	Demirli olmayan curuflar
Çert	Öğütülmüş pişmiş kil

Doğal puzolanlar dünyanın belirli bölgelerinde bulunmakta olup özgül ağırlıkları 2000 ile 2200 kg/m³ arasındadır ve çoğunlukla Katkılı Portland çimentosu

üretiminde kullanılmaktadırlar. Bu tür çimentoların kullanılmasıyla betonda önceden belirlenmiş oranlarda puzolan kullanılmış olmaktadır.

Yapay puzolanlar, kili şist gibi doğal maddelerin kalsinasyonu sonucu oluşan puzolanlardır. Bunlar da doğal puzolanlarda olduğu gibi SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO v.b. oksit bileşenleri içerir. Ancak bu oksitler, reaksiyon sonucu oluştuğu için bunlara yapay puzolan denir. Bileşimdeki SiO_2 'nin oranı ve aktifliği puzolanın aktifliğini belirler. Endüstri atığı puzolanları diğer maddelerin üretim artıklarından elde edilirler. Örneğin demir çelik endüstrisindeki font üretiminden atık olarak curuf, termal elektrik güç santrallerindeki öğütülmüş ocak kömürü ve fosil yakıtların yakılmasından uçucu kül, metal silis ve silis alaşımlarının üretiminden silis dumanı elde edilir. Ayrıca çok yaygın olmamakla birlikte pirinç kapçığı, buğday sapı, fındık yeşil kabuğu gibi tarım artığı maddelerin yakılması ile de puzolan malzeme elde edilir [56].

2.6. Senosferlerin Tanımı ve Sınıflandırılması [57,58]

Uçucu kül, senosfer diye bilinen mikro baloncukları içerir. Senosfer, büyük oranda silis ve alümina ihtiva eden ve hava veya gazlarla dolu hafif, etkisiz içi boş bir küredir ve senosferler sentetik içi boş kürelerle aynı özelliklere sahiptirler. Senosferler cam boncuk, oyuk seramik küre ve mikro küreler diye adlandırılırlar. Eşsiz küresel şekil kombinasyonu, kontrollü boyut dağılımı, sıkıştırmadaki göreceli yüksek güç, iyi termal ve yalıtım ve dielektrik özelliklerinden dolayı birçok uygulamalarda ideal malzemelerdir.

2.6.1. Fiziksel Özellikleri

- 10-350 mikron çapında
- Silis cam kabuğun kalınlığı, çapın %10' u kadardır
- Bireysel kürenin yoğunlukları 0,6-0,8 gr/cc ve bulk yoğunlukları 0,25-0,4 gr/cc
- Sudaki pH değeri 6-8 arasındır
- Rengi gri, açık gri ve kirli beyazdır
- Yüzen küreler genellikle sıg yerlerde toplanırlar
- Senosferler 300 °C'ye ısıtıldığında bozulmaları camsı malzeme içindeki erimiş suyun açığa çıktığını gösterir

- Oyuk küreler 1200 °C'de sinterleşmeye başlar ve genellikle 1300 °C'de bozulurlar.
- Senosfer içindeki gaz başlıca CO₂ ve N₂ içerir,
- Oda sıcaklığında iç basıncı yaklaşık 0,2 Atmosferdir
- Senosfer 1400 °C'de şekillenmiştir ve formasyonu ve boyutu silis camın yüzey geriliminden ve viskozitesinden, parça sıcaklığındaki değişimlerden, ve silisdeki gazların yayılma oranları ile denetlenir.
- Erimiş küre 1000 °C'de sertleşir.

2.6.2. Kimyasal Özellikleri

Senosferin bileşimi az çok değişir, ama başlıca bileşenleri alüminyum, silis ve oksijendir. Tablo 2.11'de senosferin kimyasal bileşimi görülmektedir.

Tablo 2.11. Senosferin kimyasal bileşimi

Silikat (SiO ₂)	% 55 - 65
Aliminyum(Al ₂ O ₃)	% 25-35
Demir oksit(Fe ₂ O ₃)	% 1 -5
Titan (TiO ₂)	% 0,5 -1,5

2.6.3. Kullanım Alanları

- 1. Seramik sanayiinde:** Refrakter malzemesi, kiremit, ateş tuğlası, alüminyum çimentosu, yalıtım malzemesi ve kaplama alanında
- 2. Plastik sanayiinde:** Kalıp, PVC tavan kaplamasında, naylon, yüksek yoğunluklu polietilen, düşük yoğunluklu polietilen, ve polipropilen imalinde.
- 3. İnşaat sanayiinde:** Özel çimento, harç, sulu harç, duvar kaplaması, çatı malzemesi, ses panelleri, kaplama alanında.
- 4. Eğlence Sanayiinde:** Yatlarda, flotasyon araçları, bowling topları, sörf tahtaları, kayak, golf aletleri, çimen ve bahçe dekorları ve ayakkabı alanında.
- 5. Otomotive sanayiinde:** Astar boya, lastikler, motor parçaları, fren pedalları, aksesuar, kaporta alanında.
- 6. Enerji ve Teknoloji sanayiinde :** Petrol kuyu çimentosu, sondaj çamuru, öğütme malzemesi, patlayıcılar, endüstriyel kaplamalar ve pervâne yapımı alanında.

2.6.4. Avantajları

Senosferin boşluklu olması ve diğer dolduruculardan hafif olması ona her konuda avantaj sağlamaktadır. Senosfer ağırlığı düşürdüğü gibi esnekliği, yoğunluğu, kuvveti, dayanıklılığı artırır. Ayrıca su üzerinde durabilmeyi, iyi yalıtım özellikleri temin eder, büzülmeyi önler ve sıcaktan zarar görmeyi önler. Küresel şekli ürünün sağlamlılığını ve darbeye karşı dayanımını artırır. Yalıtım malzemesi olarak kullanıldıklarında, ses değerini ve ısı iletimini kontrol eder. Fiyatları, diğer sentetik kürelerden ucuzdur. Senosferler sentetik kürelerden % 50-200 daha az pahalıdır. Küre şekli birçok uygulamalarda akıcılığı geliştirir, hatta doldurucu malzemenin dağılımını temin eder. Onun doğal özellikleri, onu ya kuru ya da yaş çamur şeklinde kullanılmasını mümkün kılar. Çoğu organik solventlerden, sudan, asitten, ve alkalilerden etkilenmezler. Doldurucu veya dağıtıcı olarak kullanılan minerallerden % 75 daha az hafiftirler ve çoğu reçinelerden % 30 daha hafiftirler. Yüksek sıcaklıklarda şekillendikleri için, 1800 °C'yi aşan sıcaklıklara dayanıklıdır. Bu avantajlar senosferlerin piyasa stratejilerini artırmaktadır. Buna ilave senosferlerin çevreye zarar vermemesi, üreticilerin de işine gelmektedir. Senosferin asıl kimyasal özellikleri onu % 100 tekrar kullanılabilir yapmaktadır.

2.6.5. Emniyetliliği

Asil özelliklerinden dolayı senosferler tehlikeli atık sınıfına girmezler. İşlenmiş Senosferler kimyasal olarak etkisiz ve United States Environmental Agency tarafından tespit edilen tehlikeli atıktan muaf tutulmuştur. Buna ek olarak, The Resource Conservation and Recovery Act. tarafından taşımaya elverişli olarak hesaba katılır ve tekrar kullanımları çevresel sağlık açısından belirlenmiştir. Combustion Product Management, senosfer uygulamalarını geliştirme ve satışı ile ilgili birçok hizmet vermektedir. Geçen 10 yıl boyunca hızlı bir şekilde senosferin reklamı gelişmiştir. Onun gelecekteki kullanımı ise ancak hayal gücümüz ile sınırlıdır ve onlar hakkında sayılı üniversitelerde ve araştırma merkezlerinde çalışmalar devam etmektedir. Küresel ekonomi ve çevre sorumluluğun artan bu günlerde üreticiler için senosfer kullanımı çekici hale gelmiştir.

3. MALZEME VE YÖNTEM

Bu çalışma kapsamında kullanılan numuneler Kütahya- Tunçbilek Termik Santralinden temin edilmiştir. Bu araştırmanın amacı ise; Kütahya-Tunçbilek termik santrali baca gazı filtrelerinden temin edilen uçucu külün yan ürünlerini; yani karbonu, puzolonik ve manyetik malzemeleri ve senosferi ayırmaya yönelik en uygun ayırma stratejileri ve akım şeması geliştirmektir. Uçucu Külün zenginleştirilmesi sonucu 4 ürün elde edilmesi hedeflenmektedir. Bunlar;

- Manyetik ürün
- Puzolan
- Yanmamış karbon ve
- Senosfer

Bu amaç doğrultusunda uçucu külün yan ürünlerini elde etmek için çeşitli yöntemler denenecektir. Zenginleştirme işlemleri sonucu bu ürünlerden;

- Manyetik ürün, kömür hazırlama tesislerinde ağır ortam malzemesi olarak doğal manyetite eşdeğer olarak,
- Puzolan, çimento sanayiinde,
- Yanmamış karbon, termik santrallerde,
- Senosfer de plastik ve boya sanayiinde kullanılabilir.

3.1. Uçucu külün karakterizasyon çalışmaları

Kütahya- Tunçbilek termik santrali küllerinin kimyasal ve mineralojik yapısı incelenmiş ince kesitleri hazırlanarak fotoğrafları çekilmiştir.

3.1.1. Kimyasal Analiz

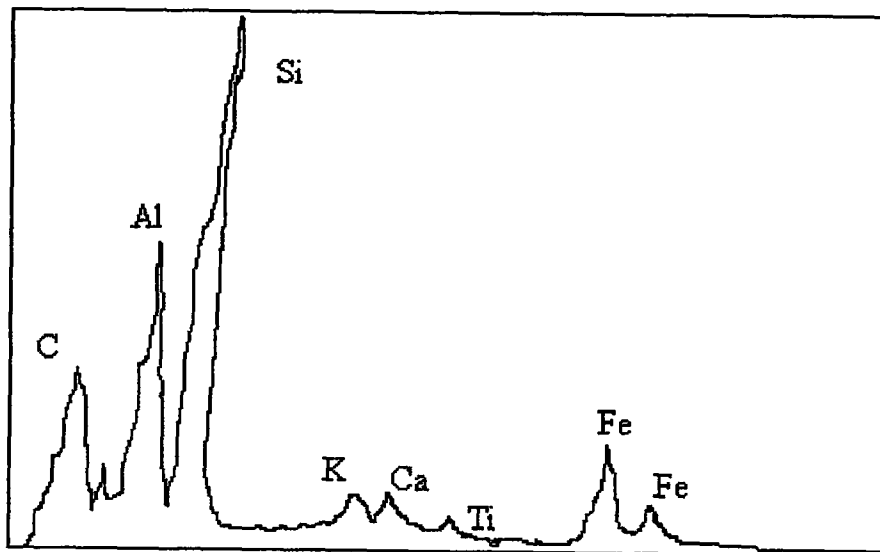
Tablo 3.1’de uçucu kül ve diğer ürünlerin Kanada’ da ki ACME laboratuvarlarında yapılan kimyasal analizleri verilmiştir. Analiz sonuçları uçucu külün diğer ürünlerden marjinal olarak farklılıklar arzettiğini göstermektedir.

Tablo 3.1. Tunçbilek Termik Santrali küllerinin kimyasal analizi

Oksit (%)	Uçucu Kül	Izgara Üstü kül	Nemlendirilmiş kül	Curuf
SiO ₂	55,38	57,51	58,3	58,87
Al ₂ O ₃	18,76	17,79	16,77	14,64
Fe ₂ O ₃	9,94	9,4	9,13	9,93
CaO	2,95	2,44	2,77	3,5
MgO	5,38	4,83	5,15	5,33
K ₂ O	1,47	1,57	1,49	1,28
Na ₂ O	0,12	0,16	0,19	0,24
TiO ₂	0,72	0,67	0,7	0,58
SO ₃	0,28	0,63	0,5	0,63
Cu*	84	93	84	73
Pb*	35	68	50	18
Zn*	107	144	114	56
Cr*	579	686	630	519
Ni*	1455	1528	1429	1116
Co*	68	77	73	57
Mn*	1362	1298	1258	1352
Zr*	208	203	195	147
Sr*	396	341	310	272
Kömür tipi Linyit		* ppm		

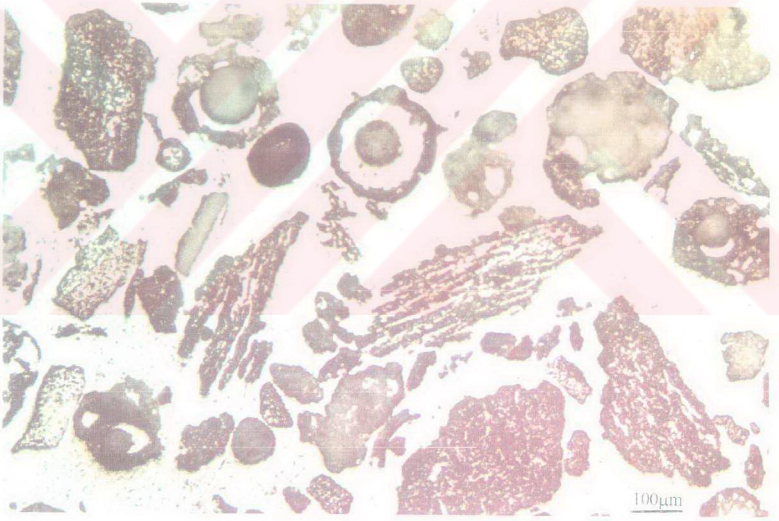
3.1.2. Mineralojik Analiz

Uçucu külün mineralojik bileşimini belirlemek için XRD (X-Ray Difrraction) sistemine bağlı XRF cihazı kullanılarak belirli bir noktanın kimyasal kompozisyonu bulunmuştur. Şekil 3.1’de sergilenen elementel kompozisyonun kimyasal analizi sonuçları ile uyumlu olduğu anlaşılmaktadır.

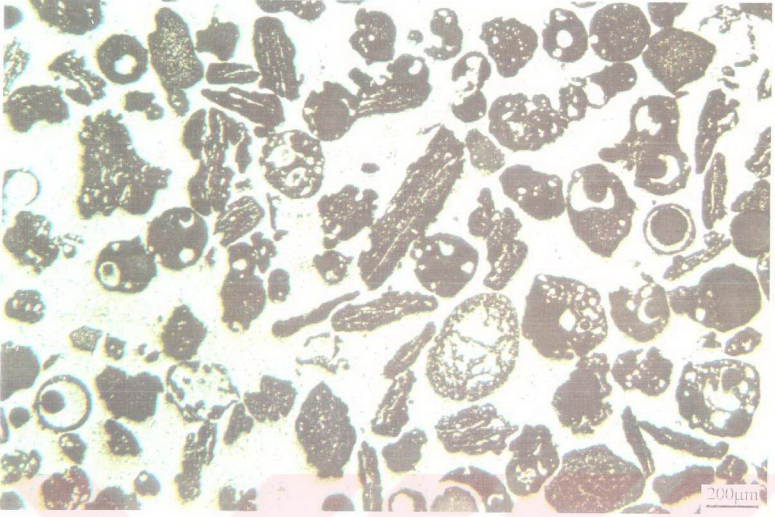
**Şekil 3.1. Uçucu külün mineralojik bileşimini belirleyen XRD sonuçları**

3.1.3. Fotoğrafik Etüdler

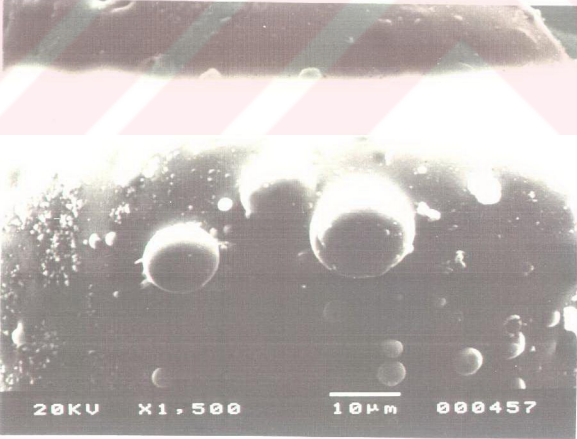
Uçucu külün yan ürünlerinin daha iyi belirlenmesi amacıyla uçucu kül numunelerinin boyuta bağlı olarak ince kesitleri çıkarılmış ve fotoğrafları çekilmiştir. Aşağıdaki resimlerde uçucu kül numunelerinin boyuta göre ince kesitleri görülmektedir. Şekil 3.2 ve Şekil 3.3.'de uçucu külü oluşturan ürünler görülmektedir. Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'de görüldüğü gibi uzun ve lifsi yapıya sahip olanlar yanmamış karbonu; siyah metalik parlaklığa sahip ve nispeten küre biçiminde olanlar demir mineralini; belirgin bir şekle sahip olmayan gri renge sahip ve nispeten çimentoya benzeyen parçacıklar puzolanı ve nihayet küresel yapıya sahip ve renk olarak krem renginde olanlar da senosfer dediğimiz mikro baloncukları temsil etmektedir. Şekil 3.4'de de tek başına senosfer görülmektedir, Şekil 3.5 ve 3.6'da da uçucu külün bir başka ince kesitleri görülmektedir.



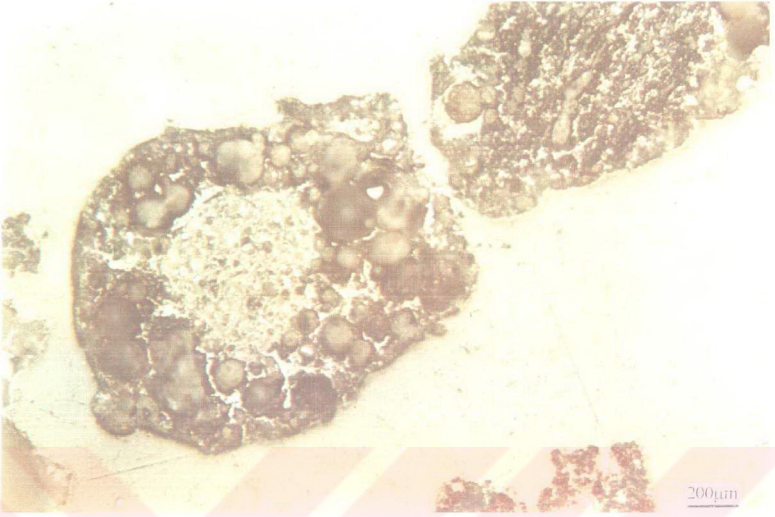
Şekil 3.2. Uçucu külün ince kesiti



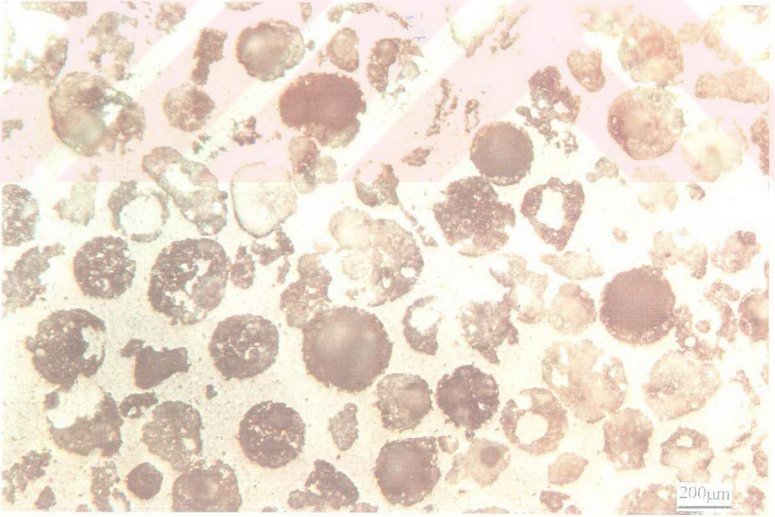
Şekil 3.3. Uçucu Külün başka bir ince kesiti



Şekil 3.4. Uçucu külün yan ürünlerinden biri olan senosferin resmi



Şekil 3.5. Uçucu Külün başka bir ince kesiti



Şekil 3.6. Uçucu Külün başka bir ince kesiti

3.2. Elektrokinetik Özelliklerin Tespiti İçin Yapılan Deneyler

Bu amaca yönelik olarak yapılan deneyler; uçucu kül süspansiyonlarının pH-profilinin çıkarılması ve zeta potansiyel ölçümleri çalışmalarını kapsamaktadır.

3.2.1. pH Profili Ölçümleri

Uçucu kül süspansiyonlarının pH-profilini çıkartmak amacıyla %1 katı oranında süspansiyon hazırlanmıştır. Bunun için 1 g kül, pH'sı belirlenmiş 100 g saf su ile bir beher içerisinde manyetik karıştırıcı ile karıştırılmış ve bu işlem esnasında belirli periyotlarla süspansiyonun pH değerleri okunmuştur. Bunu izleyen diğer iki deneyde de aynı işlem kademeleri takip edilerek asidik ve bazik ortamlarda kül süspansiyonunun zamana bağlı pH değişimleri incelenmiştir. Bu amaçla; ilk olarak saf suyun pH'sı 3'e ayarlanmış ve %1 katı oranındaki süspansiyonun kıvamlandırma süresi boyunca, farklı zaman aralıklarında pH değerleri okunmuştur. Daha sonra saf suyun pH'sı 11'den başlatılarak aynı işlemler tekrarlanarak sureye bağlı pH değişimleri kaydedilmiştir.

3.2.2. Zeta Potansiyel Ölçümleri

Katı bir madde kırılıp su içine konulduğu zaman, su içinde başka iyonlar bulunmasa bile, katı maddeden suya geçen iyonlar ve suyu meydana getiren H^+ ve OH^- iyonları nedeniyle katı madde yüzeyi pozitif veya negatif işaretli bir elektrik yükü 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 [59].

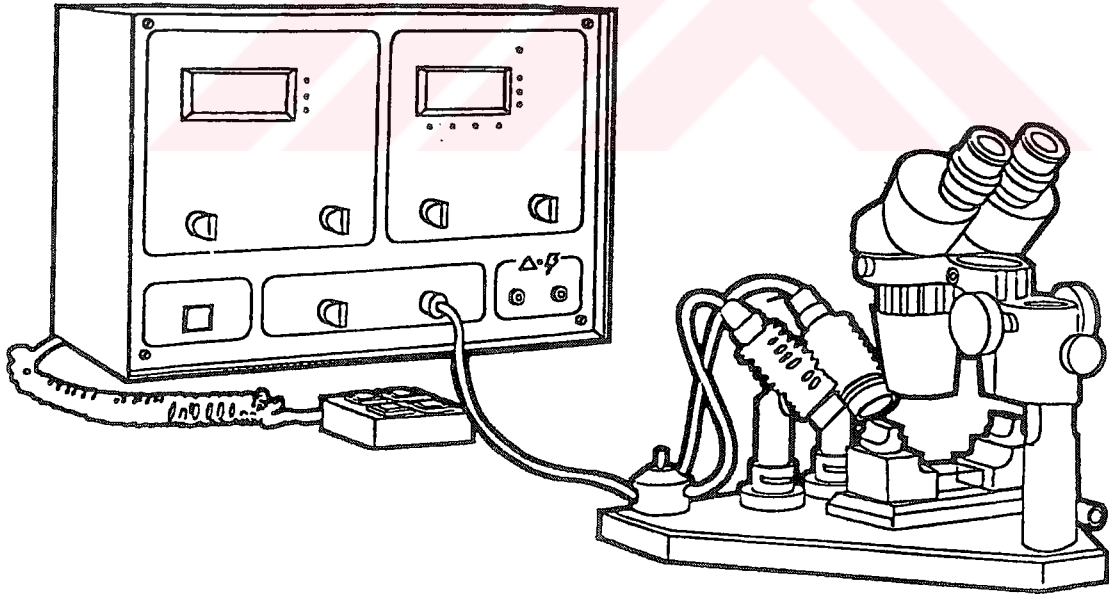
Zeta potansiyel, partiküller arası itme-çekme kuvvetlerini ve dolayısıyla mineral süspansiyonlarının dengesini etkileyen bir göstergedir.

Zeta potansiyel değerini ölçmek için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler şunlardır:

- Mikro elektroforetik yöntem,
- Elektroosmoz yöntemi,
- Akma potansiyeli (streaming potential) yöntemi,
- Çökme potansiyeli (sedimentation potential) yöntemi.

Zeta potansiyel ölçümleri, mikro işlem donanımlı (mikroelektroforezis tekniği ile çalışan) Zeta Meter 3.0 cihazı ve PALS (Phase Analysis Light Scattered Technique) zeta metresi ile yapılmıştır. Zeta Meter 3.0, voltaj ve tane hızını dikkate alarak, zeta potansiyel değerini otomatik olarak hesaplayabilmektedir. Cihazın numune konulan hücresi plexiglasstan imal edilmiştir. Şekil 3.5’de zeta potansiyeli ölçümlerinin yapıldığı zeta potansiyeli cihazı şematik olarak gösterilmektedir.

PALS ise klasik zeta metrelerin ölçüm yapamadığı yüksek iyonik kuvvetlerde ölçüm yapmak geliştirilmiştir. PALS ile yapılan ölçümler Utah Üniversitesi’nde yapılmıştır. Ölçüm ise, makinede oluşturulan bir elektrik alan içinde hareket eden taneciklere değişik frekanslarda ışık demeti yollarır. Bu ışık demeti hareket eden taneciklere çarpıp geri dönerken yine makinenin ürettiği referans ışık demeti ile karşılaşır. Böylece hıza ve frekansa bağlı olarak tanenin iletkenlik değer grafiği ortaya çıkar. Bu grafiğin ortalaması numunenin ortalama iletkenlik değerini bize verir.



Şekil 3.7. Zeta Potansiyel ölçümlerinin yapıldığı Zeta-Meter cihazı

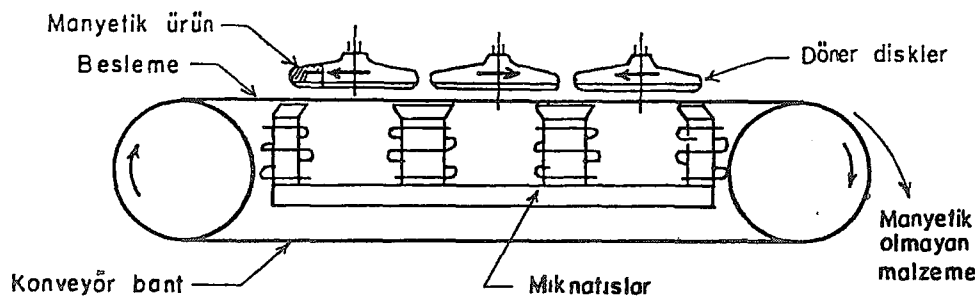
Zeta potansiyel ölçümleri için; 1 g kül numunesi, 100 ml saf su içinde 10 dakika manyetik karıştırıcı ile karıştırıldıktan sonra, iri parçaların çökmesi için 5 dakika dinlendirilmiştir. Daha sonra süspansiyonun berrak kısmından alınan alikot (berrak çözelti) ile ölçümler yapılmıştır. Tüm deneylerde, kıvamlandırma işleminin başlangıcı ve sonunda pH ölçümleri yapılmış ve pH ayarlayıcı olarak da 1 N HCl ile 1 N NaOH kullanılmıştır. Deneylerin 20 ± 2 °C sıcaklıkta gerçekleştirilmesine özen gösterilmiştir. Berrak kısımdan alınan numunelerle 6-10 arası ölçüm yapılmıştır.

3.3. Manyetik Zenginleştirme Yöntemleri

Bu yöntem ile uçucu kül içersinde bulunan manyetik mineraller külden uzaklaştırılmaktadır. Kuru manyetik ayırıcı olarak, yüksek alan şiddetli Döner Diskli manyetik ayırıcı, yaş manyetik ayırıcı olarak da yüksek alan şiddetli Carpco-Amax Yaş manyetik ayırıcısı ve yine düşük alan şiddetli Crockett Manyetik ayırıcısı kullanılacaktır.

3.3.1. Döner Diskli Manyetik Ayırıcı

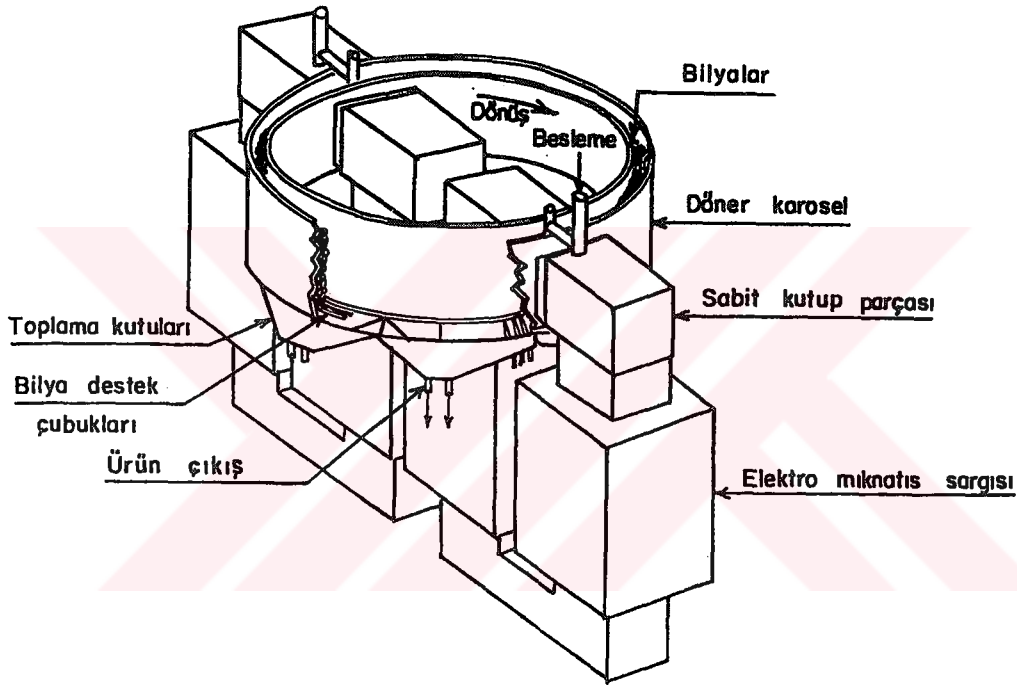
Döner Diskli Manyetik Ayırıcıda, bir besleme bantı ve bantın üzerinde dönen disk bulunmaktadır. Disk, karşısında bulunan elektromıknatısların etkisi ile mıknatıs özelliği kazanır. Mineraller, diskin altından geçerken manyetiklik derecelerine bağlı olarak ya disk tarafından ya da disk tarafından çekilmeden bant üzerinde hareketlerine devam ederler. Bu manyetik ayırıcının alan şiddeti en çok 18000 gauss olabilmekte ve enerji sarfı 0,7-1,3 kWsaat olarak belirlenmektedir. Cevher besleme üst boyutu 3 mm, alt boyutu ise 0,1 mm'dir [60].



Şekil 3.8. Döner diskli manyetik ayırıcı

3.3.2. Carpco Manyetik Ayırıcı

Carpco, yüksek alan şiddetli yaş manyetik ayırıcıdır. Sabit manyetik kutupların oluşturduğu yüksek şiddetli manyetik alanın etkisiyle manyetik özellik kazanan bilyaların üzerine pülplü halde beslenen cevherde manyetik taneler bilyalar üzerinde toplanırken, manyetik olmayan taneler yerçekimi ve hidrolik kuvvelerin etkisi ile pülple birlikte ayrılırlar. Endüstrideki örnekleri ise en çok 25000 gauss manyetik alan şiddetine kadar çıkarken, beslenen cevherde üst boyut 3 mm, alt boyut ise 1-2 mikrona inebilmektedir [60].

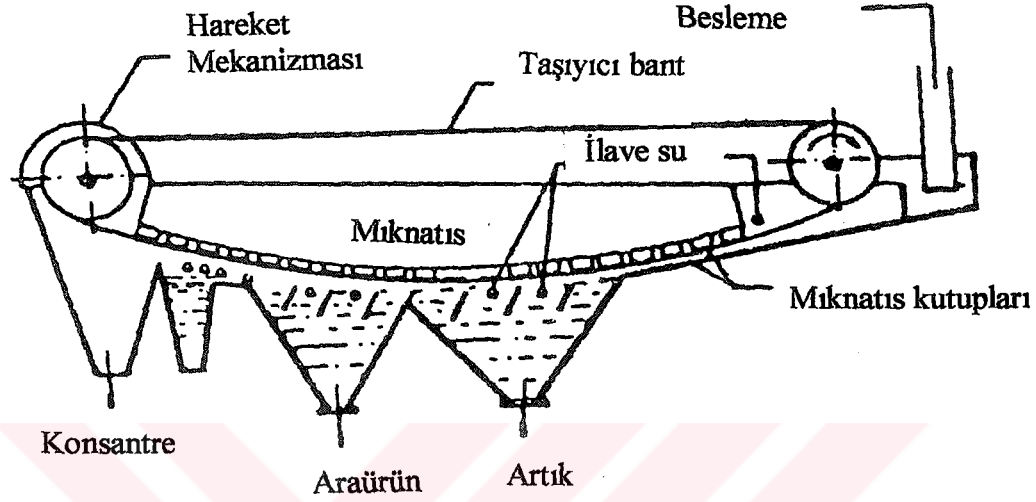


Şekil 3.9. Carpco yüksek alan şiddetli yaş manyetik ayırıcı

3.3.3. Bantlı Yaş Manyetik Ayırıcısı (Crockett)

Crockett manyetik ayırıcısı bir kauçuk bant ile yay şeklinde kavisli olan bir sabit veya elektromıknatısın birkaç bölümlü bir tank içine yerleştirilmesiyle oluşmaktadır. Yan yana dizilmiş olan farklı kutuplu mıknatıslar su geçirmeyen bakır bir kılıf içinde bulunurlar. Giriş kısmındaki manyetik alan çıkış kısmından daha şiddetli olacak şekilde düzenlenmiştir. Kauçuk bant gerildiği zaman, iç kısımda bulunan mıknatısa sürtünerek hareket eder. Kauçuk bant değişik noktalarda fiskeye suyu ile yıkanır. 10-15° eğimli bir besleme oluğu vardır.

Cevher besleme oluğundan pülp halinde beslenir. Manyetik alana giren cevher tanelerinden manyetik olanlar banta yapışarak bantla birlikte devamlı hareket ederler. Bu hareket sırasında malzeme fiskiyeler ile devamlı yıkanır. İlk bölmeden manyetik olmayan ürün, son bölmeden ise temiz konsantre alınır. Aradaki bölmelerden ara ürün niteliğinde cevher alınır. Şekil 3.10'da Crockett yaş manyetik ayırıcısı görülmektedir [61].



Şekil 3.10. Düşük alan şiddetli bantlı Crockett yaş manyetik ayırıcısı

3.4. Graviteye Bağlı Zenginleştirme Yöntemleri

3.4.1. Ağır-Ortam Ayırması ile Zenginleştirme

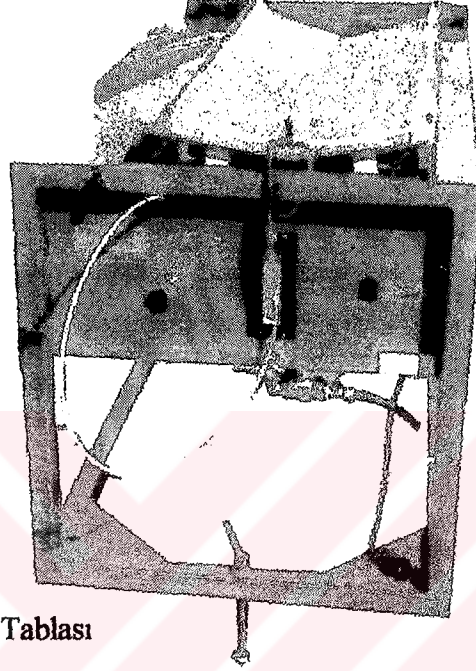
İri boyutlu mineral tanelerinin, aralarındaki özgül ağırlık farklılığına dayanılarak, ağır bir akışkan ortam içersinde, yüzme ve batma yoluyla birbirinden ayrılması ile yapılan zenginleştirme işlemine denir. Ağır -ortam ayırması, belirli özgül ağırlıkta akışkan içeren bir banyoya atılan mineral tanelerinden, özgül ağırlığı akışkan ağırlığından büyük olanların batması, küçük olanların da yüzmesi esasına dayanmaktadır. Bu yöntem ile uçucu küllerin yan ürünlerinin ağır olanları, hafiflerinden ayrılacaktır.

3.4.2. Tabaka Halinde Akan Akışkan Ortamda Zenginleştirme

Küçük boyutlu mineral tanelerinin, yataya yakın eğimdeki bir yüzey üzerinde, ince bir tabaka halinde akan akışkan ortam içinde, özgül ağırlık farklarına göre ayrılmaları yoluyla yapılan zenginleştirmeye, tabaka halinde akan akışkan ortamda

zenginleştirme denir. Bu yöntem ile de uçucu küllerin yan ürünlerinin küçük boyutlu olanları, irilerinden ayrılmaktadır. Bu yöntem için, Mozley Tablası uygundur.

Mozley Tablası, üzerinde oluk veya eşikler bulunmadığı için özellikle çok ince malzemelerin zenginleştirilebilirliğini incelemek amacıyla kullanılan, tabaka halinde akan akışkan ortamda ayırma yapan bir basit gravite aygıtı olup, ayırma etkisini artırmak için ise akışkan ortama dik yönde salınım hareketleri verilir.

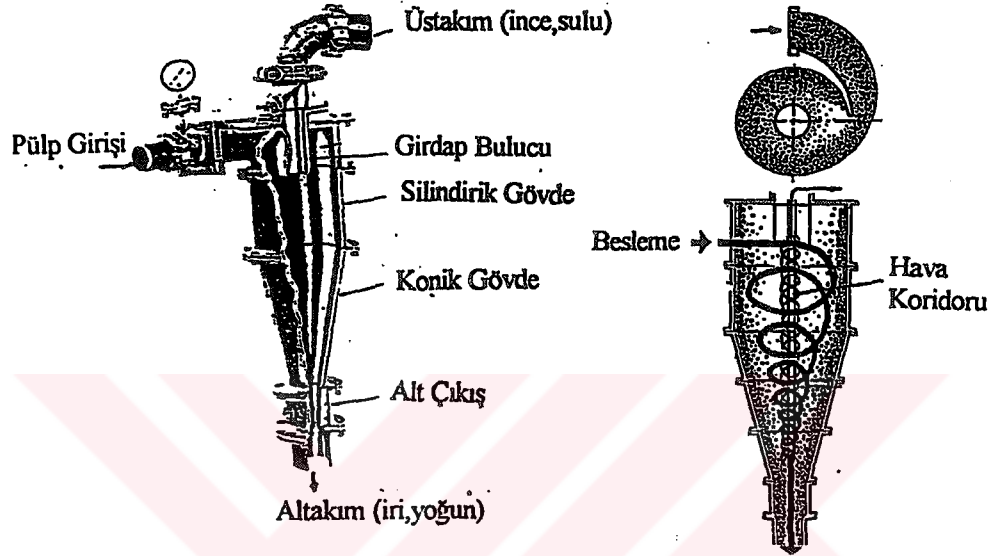


Şekil 3.11. Mozley Tablası

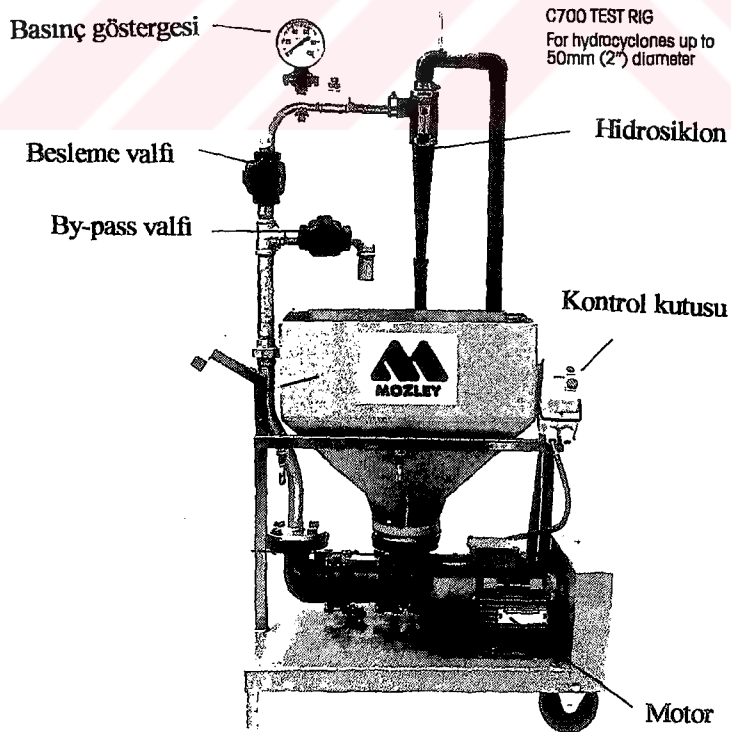
3.4.3. Hidrosiklon

Hidrosiklon sürekli olarak çalışan ve tanelerin çökme hızını artıran santrifuj kuvvetin de kullanıldığı bir klasifikasyon cihazıdır. Cevher hazırlamada en çok klasifikatör olarak kullanılmakta olup ince tane ayırmalarında son derece elverişli olduğu ispatlanmıştır. Tipik bir hidrosiklon teğet besleme girişi olan silindirik bölüme ilave edilmiş, doruk (alt akım çıkışı) noktasında açıklığı olan konik şekilli bir cihazdır. Silindirik bölümün üst kısmı içinden düşey olarak monte edilmiş üst akım borusu geçen bir plaka ile kapatılmıştır. Bu boru kısa mesafe olarak, siklon giriş seviyesinden biraz aşağıya sarkacak şekilde siklon gövdesi içine uzanmakta olup beslenen pülpün doğrudan üst akıma karışmasını önler. Pülp, kendisine girdap hareketini kazandıracak teğetsel giriş içinden basınç altında cihaza beslenir. Bu, düşey eksen boyunca düşük basınç zonu ile birlikte siklon içinde girdap oluşturur. Eksen boyunca alt çıkış açıklığından dışarı ile irtibatlı hava sütunu oluşur.

Hidrosiklon hareketinin klasik olan teorisi, akım modeli içindeki tanelerin merkezkaç ve merkezci kuvvetlere maruz bırakıldığıdır. Geliştirilmiş santrifuj kuvvet, tane büyüklüğü ve özgül ağırlığına göre ayrılan tanelerin çökme hızını artırır. Hızlı çöken taneler, hızın en düşük olduğu siklon duvarına hareket ederler ve oradan da alt çıkışa giderler. Merkezci kuvvetin tesiriyle daha yavaş çöken taneler eksen boyunca uzanan düşük basınç zonuna doğru hareket eder ve üst akım olarak ayrılmak üzere yukarı çıkış borusuna taşınırlar [62].



Şekil 3.12. Hidrosiklonun düşey kesiti ve çalışma mekanizması



Şekil 3.13. Deneyde kullanılan hidrosiklon

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Malzeme

Deneysel çalışmalarda kullanılan uçucu kül, ızgara üstü kül, nemlendirilmiş kül ve curuf Kütahya Tunçbilek Termik Santralinden alınarak İ.T.Ü. Maden Fakültesi Cevher ve Kömür Hazırlama Anabilim Dalı'na getirilmiştir.

4.2. Boyut Dağılımı

Deneyslerde kullanılan uçucu kül ve curuf numunelerinin boyut dağılımını saptamak amacıyla yaş elek analizi yapılmıştır. Tablo 4.1-4.4.'de elek analizi sonuçları görülmektedir.

Tablo 4.1. Uçucu kül elek analizi sonuçları.

Uçucu Kül			
Boyut (mm)	Miktar (%)	Kümülatif Elekaltı (%)	Kümülatif Eleküstü (%)
+ 0,212	11,28	100,00	11,28
-0,212+0,150	15,53	88,72	26,81
-0,150+0,106	16,24	73,19	43,05
-0,106+0,075	14,53	56,95	57,58
-0,075+0,053	10,76	42,42	68,34
-0,053+0,038	6,75	31,66	75,09
-0,038	24,91	24,91	100,00
TOPLAM	100,00		

Tablo 4.2. Izgara üstü külü elek analizi sonuçları

Izgara üstü			
Boyut (mm)	Miktar (%)	Kümülatif Elekaltı (%)	Kümülatif Eleküstü (%)
+ 0,212	5,77	100,00	5,77
-0,212+0,150	6,75	94,23	12,52
-0,150+0,106	7,84	87,48	20,36
-0,106+0,075	8,91	79,64	29,27
-0,075+0,053	6,16	70,73	35,43
-0,053+0,038	7,74	64,57	43,17
-0,038	56,83	56,83	100,00
TOPLAM	100,00		

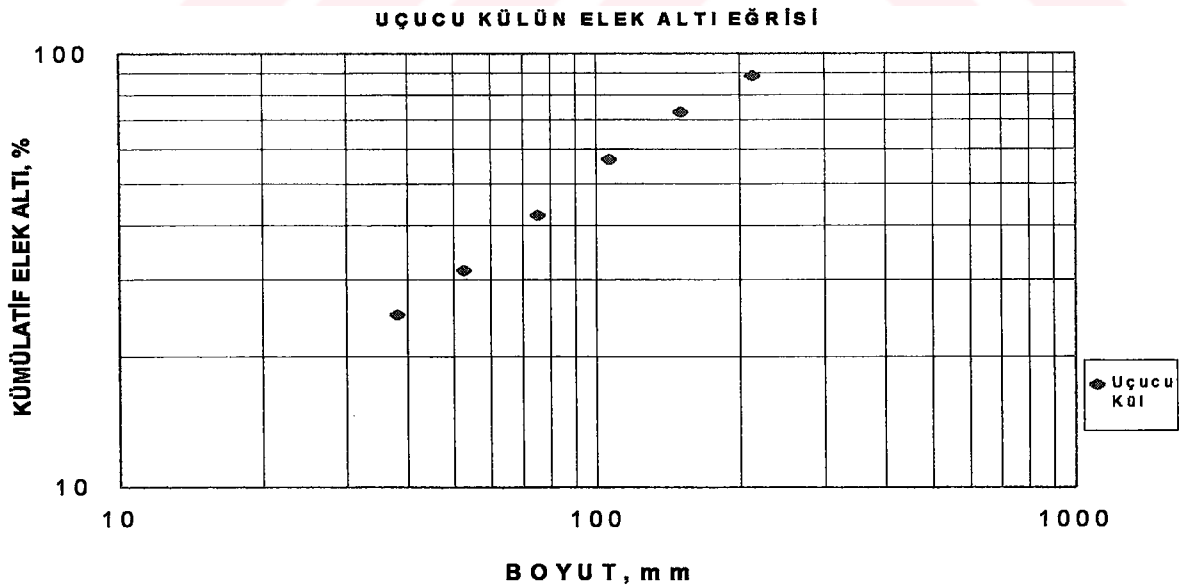
Tablo 4.3. Nemlendirilmiş kül elek analizi sonuçları

Nemlendirilmiş kül			
Boyut (mm)	Miktar (%)	Kümülatif Elekaltı (%)	Kümülatif Eleküstü (%)
+ 0,212	12,98	100,00	12,98
-0,212+0,150	11,13	87,02	24,11
-0,150+0,106	13,27	75,89	37,38
-0,106+0,075	10,19	62,62	47,57
-0,075+0,053	10,37	52,43	57,94
-0,053+0,038	6,61	42,06	64,55
-0,038	35,45	35,45	100,00
TOPLAM	100,00		

Tablo 4.4. Curuf elek analizi sonuçları

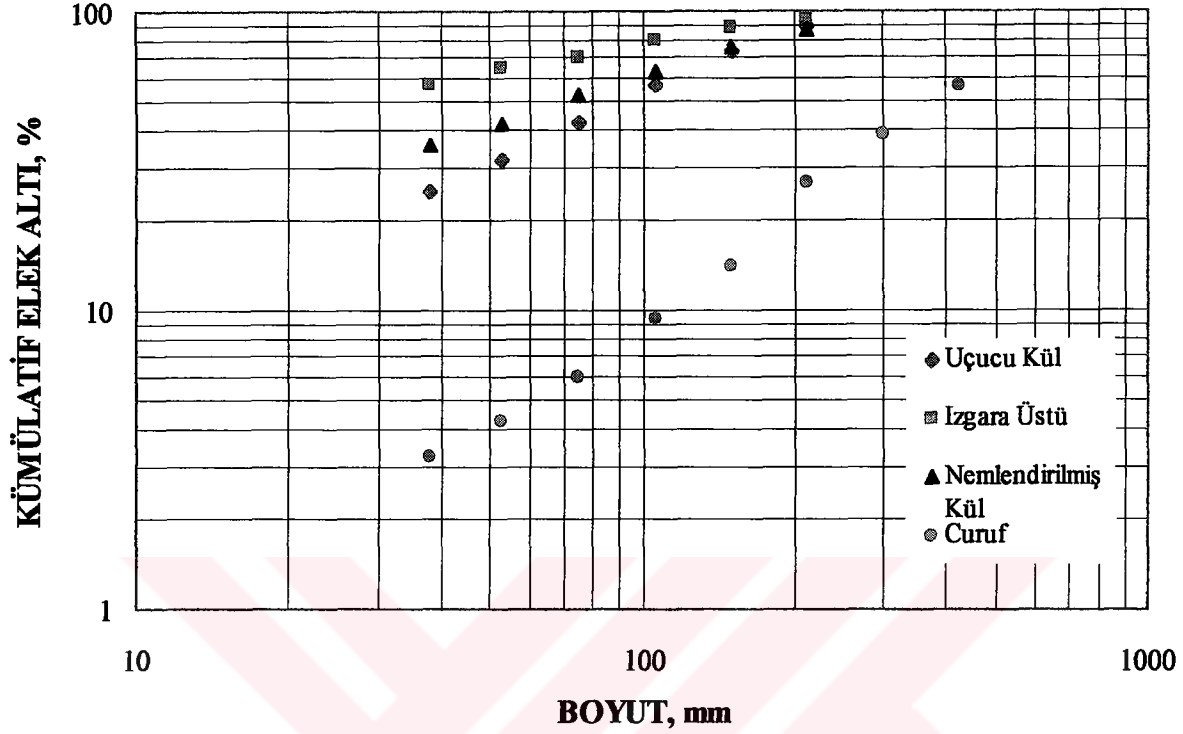
Curuf			
Boyut (mm)	Miktar (%)	Kümülatif Elekaltı (%)	Kümülatif Eleküstü (%)
+ 0,425	43,55	100,00	43,55
-0,425+0,300	18,03	56,45	61,58
-0,300+ 0,212	11,54	38,42	73,12
-0,212+0,150	12,76	26,88	85,88
-0,150+0,106	4,70	14,12	90,58
-0,106+0,075	3,49	9,42	94,07
-0,075+0,053	1,67	5,93	95,74
-0,053+0,038	1,01	4,26	96,75
-0,038	3,25	3,25	100,00
TOPLAM	100,00		

Şekil 4.1.'de uçucu külün elekaltı eğrisi, Şekil 4.2.'de de her dört numunenin parça boyutuna bağlı olarak çizilen kümülatif elekaltı eğrileri görülmektedir.



Şekil 4.1. Uçucu külün kümülatif elek altı eğrisi

Uçucu Kül / Elek Altı Eğrisi



Şekil 4.2. Termik santral ürünlerinin elek altı eğrileri

Parça boyutuna bağlı kümülatif elekaltı miktar değerleri kullanılarak çizilen kümülatif elek altı eğrilerinden, eğri eğimlerinin 45° den az olduğu görülmektedir. Gaudin Schuman denklemine göre m olarak tanımlanan bu değer, eğrinin eğimi olan dağılım faktörünü verir. Bu değer 45° den büyük olması malzemenin az kırılğan olduğunu gösterir, küçük olması ise malzemenin fazla kırılğan olduğunu gösterir. Buna göre uçucu kül ve diğer ürünlerin eğrilerinin eğimlerinin 45° den az olması bu ürünlerin kırılğan olduklarını göstermektedir. Uçucu küle ait eğriden, Gaudin Schumann fonksiyonuna göre $D_{80}=180$ mikron D_{50} boyutu ise 90 mikron bulunmuştur. Bu daha önce uçucu kül ile yapılan çalışmalarda bildirilen değerlere yakındır [7].

4.3. pH Profilleri ve Elektrokinetik Özellikleri

4.3.1 pH Profili

Uçucu kül numunelerinin elektrokinetik özelliklerinin tespiti amacı ile ilk önce her bir numunenin su içerisindeki pH profili çıkarılmıştır. Buna göre her numunenin süreye bağlı olarak ulaşacağı tampon pH bulunmaya çalışılmıştır. Tablo 4.5-4.8'de her bir numunenin pH profilleri değerleri ve eğrileri görülmektedir.

Tablo 4.5. Uçucu külün süreye bağlı pH profili

UÇUCU KÜL

Doğal pH		pH=3		pH=11	
Süre	pH	Süre	pH	Süre	pH
0	7,24	0	2,96	0	11,07
0,25	9,17	0,5	3,36	0,5	11,06
1	10,08	1	3,75	1	11,07
2	10,37	1,5	4,21	2	11,1
3	10,48	2	5,27	4	11,15
4	10,55	3	7,75	5	11,15
5	10,59	4	8,79	10	11,19
6	10,62	5	9,16	15	11,2
7	10,64	6	9,37	20	11,21
8	10,66	7	9,51	30	11,22
9	10,67	8	9,61	60	11,18
10	10,68	9	9,68	120	11,14
15	10,72	10	9,74	180	11,06
20	10,74	15	9,9	240	10,98
30	10,75	20	9,99		
45	10,75	30	10,07		
60	10,74	60	10,13		
90	10,72	120	10,08		
120	10,7	180	10,04		
200	10,61	240	9,96		
240	10,57				

Tablo 4.6. Izgara üstü külün pH profili

IZGARA ÜSTÜ

Doğal pH		pH=3		pH=11	
Süre	PH	Süre	pH	Süre	PH
0	7,5	0	3	0	11
0,5	8	0,5	3,5	0,5	10,88
1	9,25	1	4,24	1	10,87
1,5	9,64	1,5	5,18	2	10,88
2	9,83	2	6,12	3	10,91
4	10,15	2,5	7,05	4	10,92
5	10,21	3	7,76	5	10,94
10	10,33	3,5	8,2	10	10,98
20	10,36	4	8,46	15	11
30	10,35	5	8,76	20	11
60	10,29	6	8,93	30	11,01
130	10,03	7	9,07	60	10,97
180	9,84	8	9,16	120	10,86
240	9,63	9	9,24	180	10,76
		10	9,3	225	10,68
		18	9,5	240	10,67
		20	9,54		
		25	9,58		
		30	9,6		
		60	9,62		
		120	9,55		
		200	9,43		

Tablo 4.7. Nemlendirilmiş külün pH profili**NEMLENDİRİLMİŞ KÜL**

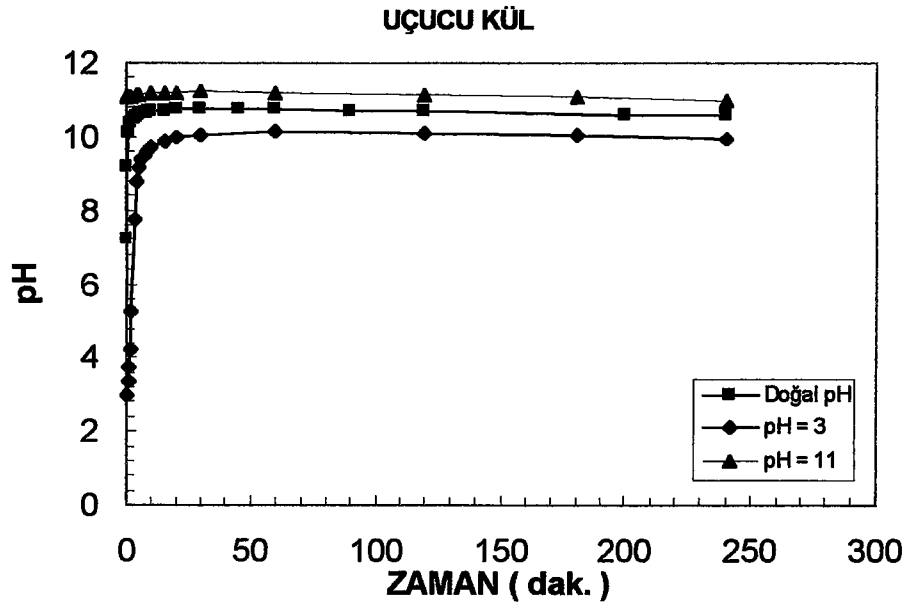
Doğal pH		pH=3		pH=11	
Süre	PH	Süre	PH	Süre	pH
0	6,7	0	2,98	0	11,02
0,25	8,89	0,25	4,28	0,5	11,03
0,5	9,28	0,5	4,98	1	11,03
1	9,48	0,75	5,3	2	11,04
1,5	9,57	1	5,5	4	11,05
2	9,61	1,5	5,75	5	11,05
4	9,68	2	5,91	10	11,06
5	9,7	2,5	6,05	20	11,05
10	9,72	3	6,15	30	11,04
20	9,74	4	6,33	60	10,99
30	9,73	5	6,49	120	10,86
60	9,7	10	7,13	180	10,74
120	9,61	15	7,71	240	10,61
150	9,59	20	8,09		
240	9,46	30	8,4		
		60	8,71		
		120	8,88		
		180	8,91		
		200	8,93		
		240	8,93		

Tablo 4.7’de görüldüğü gibi deneyler doğal pH, pH=3 ve pH=11’de yapılmıştır. Yapılan pH profilleri sonucu her üç pH’da da nemlendirilmiş külün pH’sının bazik bölgede tampon bir pH’ya ulaştığı görülmüştür.

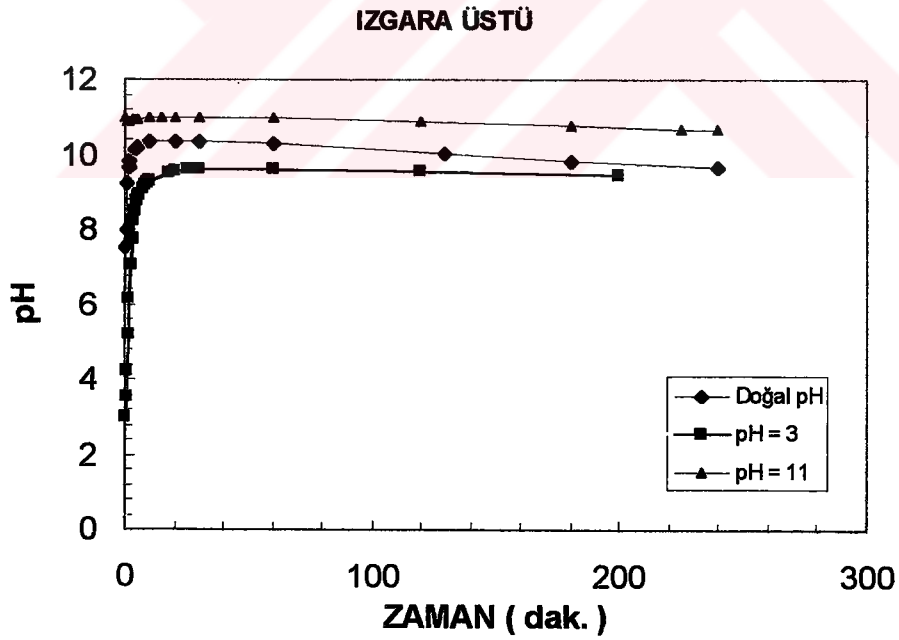
Tablo 4.8. Curufun pH profili**CURUF**

Doğal pH		pH=3		pH=11	
Süre	PH	Süre	PH	Süre	pH
0	6,93	0	2,92	0	11
0,5	9,69	0,25	5,49	0,5	11
1	9,76	0,5	6,02	1	11,01
2	9,8	0,75	6,31	2	11,01
4	9,82	1	6,51	4	11,01
5	9,83	1,5	6,82	5	11,01
10	9,84	2	7,03	10	11,01
20	9,81	2,5	7,22	15	10,99
30	9,77	3	7,41	20	10,97
60	9,66	4	7,76	30	10,94
120	9,41	5	7,96	60	10,83
180	9,22	6	8,07	130	10,3
240	9,06	7	8,13	180	9,97
		8	8,18	255	9,53
		9	8,21		
		10	8,24		
		15	8,33		
		20	8,39		
		30	8,48		
		60	8,61		
		130	8,66		
		180	8,75		
		230	8,79		

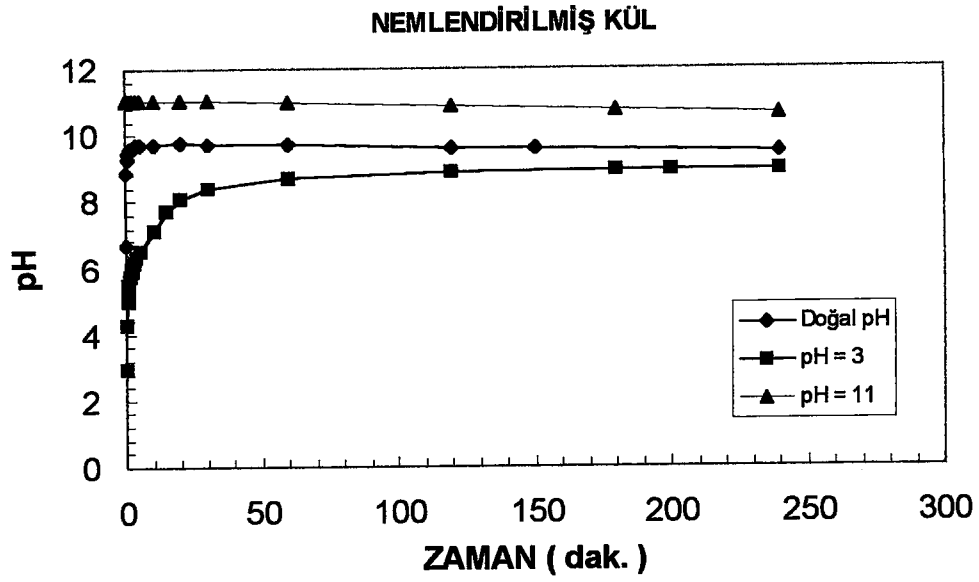
Şekil 4.3.-4.6.'da uçucu kül numunelerinin pH profili eğrileri görülmektedir.



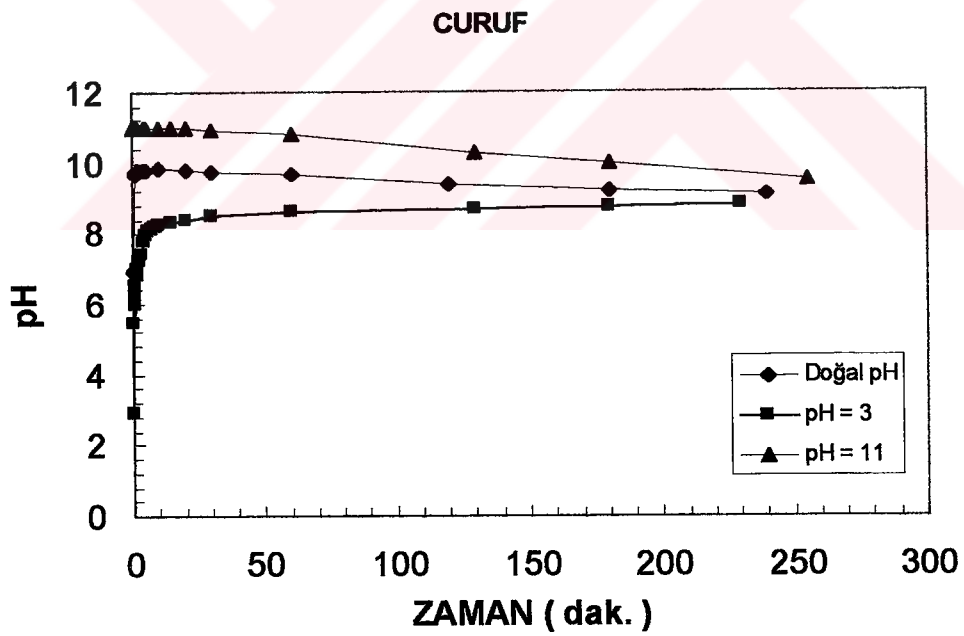
Şekil 4.3. Uçucu külün pH profili eğrisi



Şekil 4.4. Izgara üstü külün pH profili eğrisi



Şekil 4.5. Nemlendirilmiş külün pH profili eğrisi

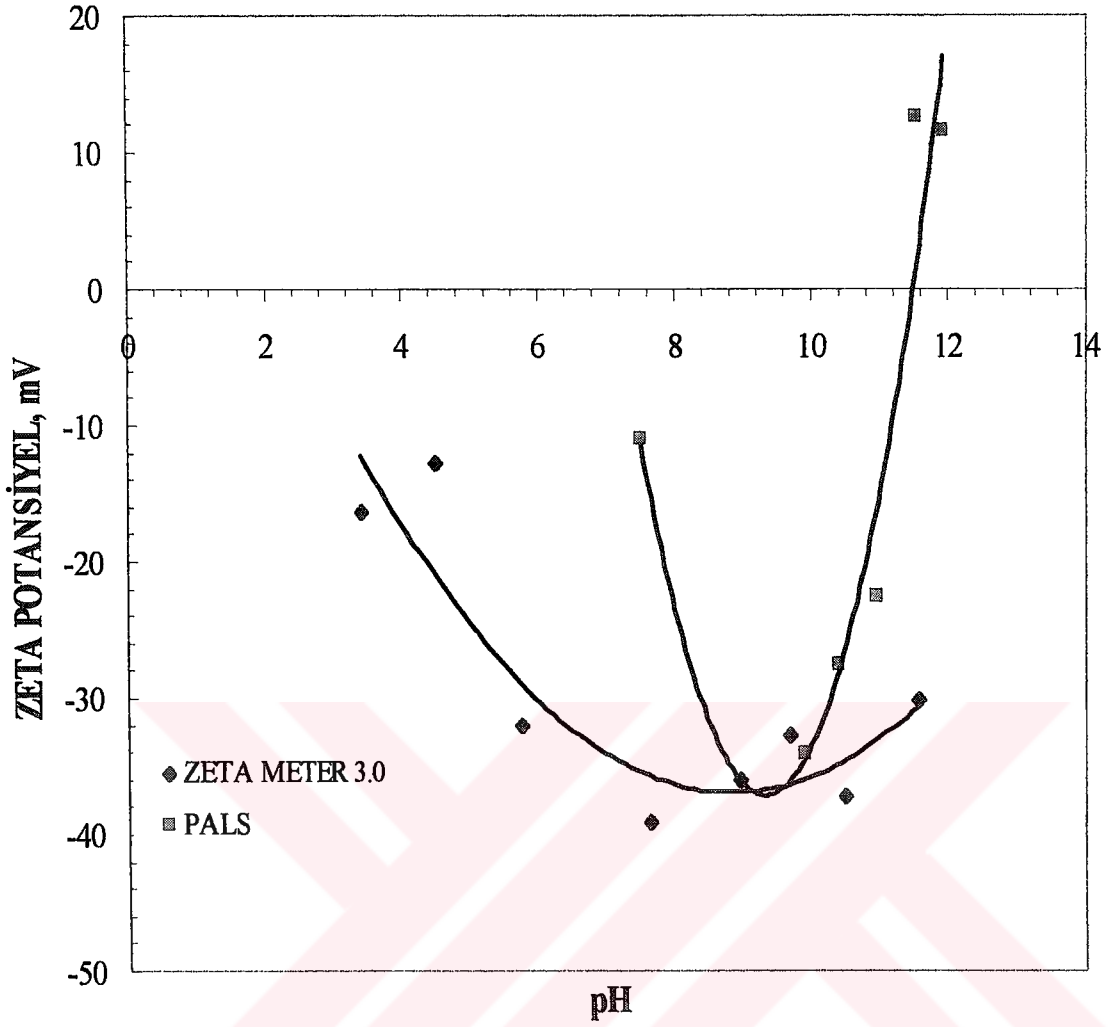


Şekil 4.6. Curufun pH profili eğrisi

Süreye bağılı olarak elde edilen uçucu kül numunelerinin su içerisindeki pH değerlerinin bazik olduğu görülmektedir. Bu bilgi daha önce yapılan Türk köllerinin pH değişimi ile ilgili çalışmalardaki veriler ile örtüşmektedir. Ama Türk uçucu köllerinin pH değişimi, kömürlerin ayırt edilmesi açısından karakteristik bir parametre değildir. Genelde uçucu köllerin pH'sı 8'in altına düşmez. Uçucu köller %2-3 oranında suda çözünürler. Oluşan çözelti, kalsiyum sülfat içerdiği için alkali tepkime vermektedir [63]. Külün MgO , Na_2O , K_2O , SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 bileşenlerinin suda çözünürlükleri çok düşüktür ve külün çözünürlüğü sıcaklıkla doğru orantılı olarak değişmektedir. Bununla beraber asitlerin uçucu köllere etkisi çok azdır. Seyreltik asit içerisinde uçucu köllerin çözünürlüğünün en fazla %15 olduğu gözlenmiştir. Ancak bu miktar, uçucu köllerin kimyasal ve mineralojik yapısına bağılı olarak daha da düşük olabilmektedir [8]. Süreye bağılı olarak yapılan pH ölçümlerinde, uçucu kölden SiO_2 ve Al_2O_3 'ün büyük bir kısmının çözündüğü ve çözünme olayı durduktan sonra da pH'nın dengeye ulaştığı bulunmuştur. Deneylerde kullanılan tane boyutunun da pH profiline önemli bir etkisi vardır; tane boyutu küçüldükçe, uçucu külün SiO_2 içeriği ve yüzey alanı artmakta ve bu nedenle, SiO_2 'nin çözünürlüğü daha hızlı olmakta ve büyük çoğunluğunun da çözünmesiyle daha aktif yapılı sorbentler elde edilmektedir [64]. Bazik pH'da elde edilen pH profilleri, NaOH miktarına bağılı olarak ortama geçen SiO_2 miktarının arttığını göstermiştir. Uçucu külün çözünmesinde camsı bir yapıya sahip olmasının da bir etkisi olduğu bulunmuştur [65-66]. Bundan dolayı NaOH bu camsı yapıyı aşındırıcı bir etki göstererek pH'nın daima bazik kalmasını sağlamıştır. Tabii ki bu camsı yapının çözünürlüğü de ortamın alkalinitisine ve istenilen alkaliniteyi sağlamak için kullanılan katkı maddesinin cinsine bağılı olarak önemli derecede değişmektedir. Bu amaçla kullanılan katkı maddeleri içerisinde en iyi sonucu veren maddenin NaOH olduğu birçok araştırmacı tarafından saptanmıştır [63].

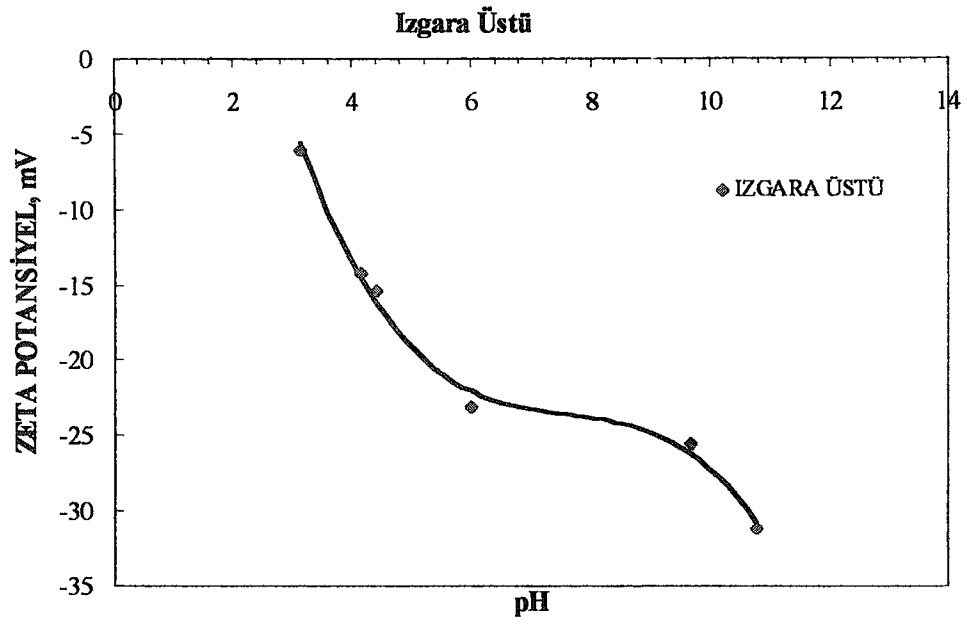
4.3.2. Zeta Potansiyel Ölçümler

Her bir numunenin sıfır yük noktalarının (syn) bulunması için, her bir numunenin zeta potansiyel ölçümleri pH'ya göre yapılmıştır. Şekil 4.7.-4.10'da her bir numunenin zeta potansiyel eğrileri görülmektedir. Şekil 4.7.' de aynı numunenin farklı yöntemler ile ölçülmüş zeta potansiyel eğrileri görülmektedir.

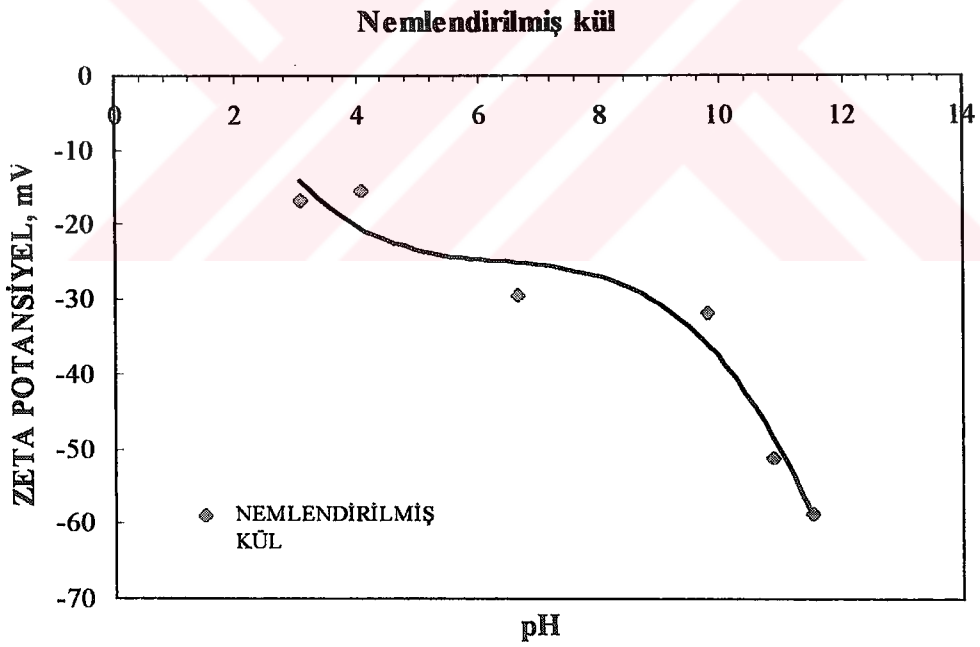


Şekil 4.7. Uçucu külün zeta potansiyel eğrisi

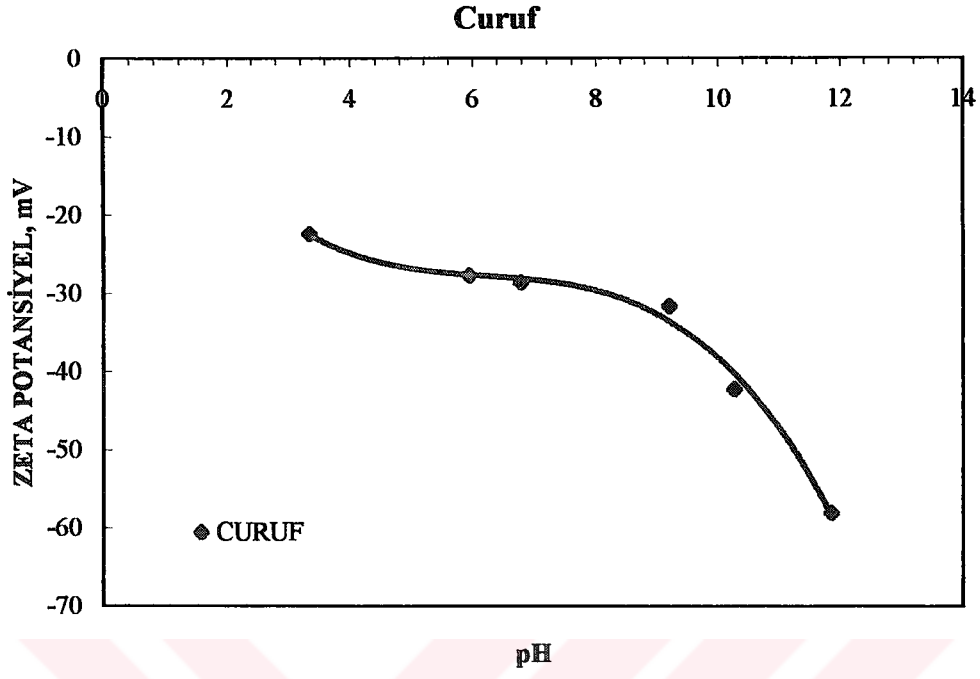
Zeta potansiyel eğrilerinden görüldüğü gibi uçucu külün kesin bir syn noktasına ulaşamamıştır. Şekil 4.7’de Utah Üniversitesi’nde PALS cihazı kullanılarak ve burada ölçülen zeta potansiyel ölçümleri görülmektedir. Utah’da yapılan ölçümde yaklaşık pH=11’de syn noktasına ulaşılmıştır. Bu iki ölçüm arasında bazı aralıklarda çok belirgin fark görülmektedir. Bu ise iki ölçümün farklı yöntemlerle yapılmasından kaynaklanmaktadır. Burada ki ölçümler uçucu kül tanelerinin sadece bir yönde hareket edenleri dikkate alınarak ölçümler öyle yapılmıştır. Halbuki Utah’da yapılan ölçümler ise tüm tanelerin yüzey yükü ortalaması ölçülerek, net değer bilgisayar tarafında bulunmaktadır. Bu iki ölçüm arasındaki farkın belirli aralıklarda aynı olması yaptığımız ölçümün doğruluğunu göstermektedir.



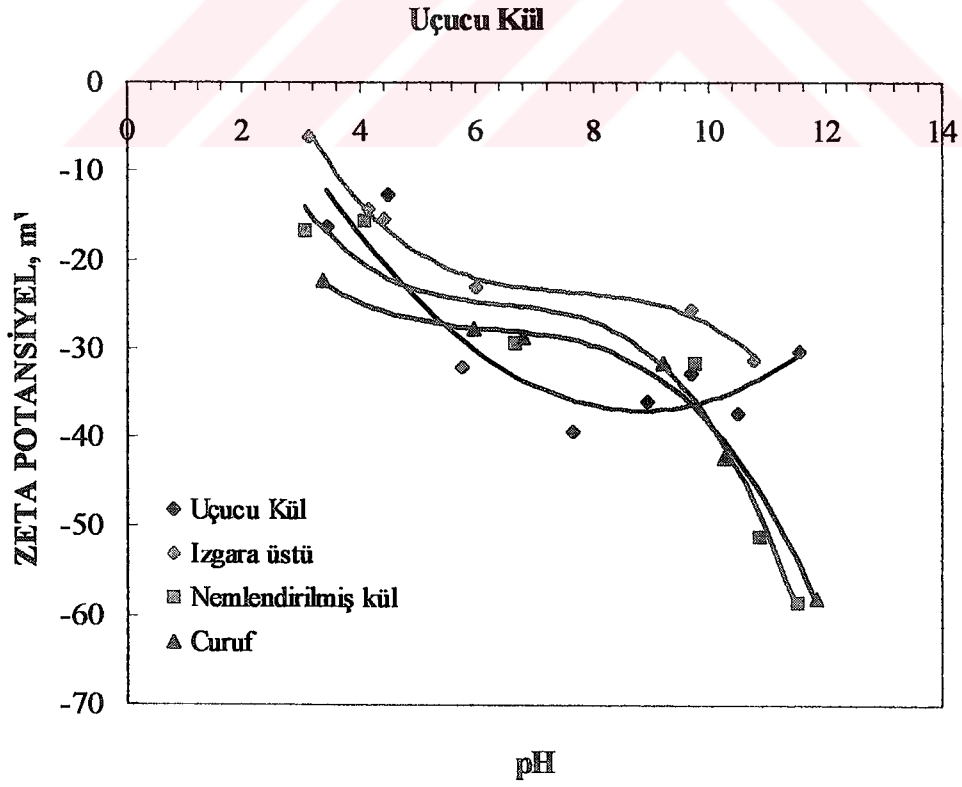
Şekil 4.8. Izgara üstü külün zeta potansiyel eğrisi



Şekil4.9. Nemlendirilmiş külün zeta potansiyel eğrisi



Şekil 4.10 Curufun zeta potansiyel eğrisi



Şekil 4.11. Termik santral ürünlerinin zeta potansiyel eğrileri

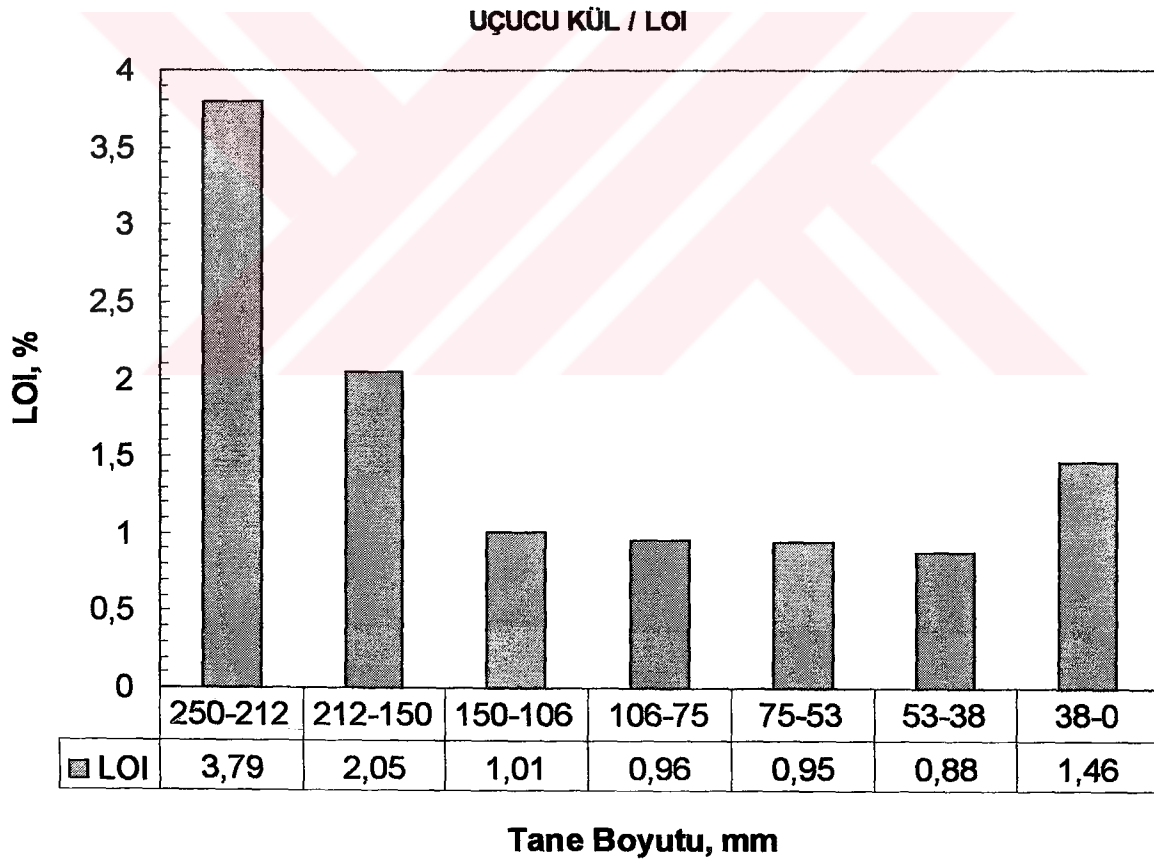
Eğrilerden de görüldüğü gibi uçucu kül ve diğer kül numunelerinin yüzey yükü negatiftir. Bunun sebebi ise camsı yapıdan ortama geçen Si^{+4} ve Al^{+3} veya Ca^{+2} gibi iyonların etkisidir. Sıfır yük noktası (syn) ortamda bulunan iyonlara bağlı olarak da değişmektedir. Bilindiği gibi ortamda Al^{+3} , Ca^{+2} ve Mg^{+2} gibi iyonların varlığıyla bu değer yukarılara pH=10 gibi değerlere ulaşırken ortamda Si^{+4} gibi iyonların olması ile bu değer aşağılara çekilmektedir. Eğriyi iki uçtan uzattığımız zaman iki syn noktasına ulaşmaktayız. Bu da gösteriyor ki Ca^{+2} , Mg^{+2} ve Al^{+3} gibi iyonların etkisinde pH=11 de bir syn noktasına ulaşılırken, Si iyonu etkisiyle de pH=2 civarında bir ikinci syn noktasına ulaşılmaktadır. Burada önemli olan ortama geçen Ca^{+2} ve Si^{+4} iyonlarının ortamda bulunan miktarlarıdır. Bunun yanında çeşitli tipteki uçucu küllerin camsı yapılarının reaktivitelerinin de farklı olmasından dolayı, aynı alkalinite ve sıcaklıkta uçucu küllerden çözeltiye geçen Ca^{+2} ve Si^{+4} , Al^{+3} iyon derişimlerinin önemli ölçüde değiştiği saptanmıştır [64]. Buradan da anlaşıldığı gibi zeta potansiyel değerlerini doğrudan etkileyen en önemli faktör uçucu külün kimyasal özellikleridir. Şekil 4.11' de de tüm numunelerin zeta potansiyel eğrileri görülmektedir.

4.4. Kızdırma Kaybı (KK) Değerinin saptanması:

Kızdırma kaybı (KK) tanım olarak uçucu küldeki karbon içeriği olarak bilinir. Bu değer kızdırma kaybı deneyi ile saptanır. KK uçucu külün kullanım özelliklerini etkileyen faktörlerden biridir. Bu değer % 3'den fazla olması uçucu külün çimento sanayiinde kullanılmasını imkansız kılar. Bu amaçla da uçucu külün boyuta göre KK değerleri saptanmıştır. Tablo 4.9.'da uçucu külün boyuta göre KK değerleri, Şekil 4.12'de de bu değerler histogram olarak görülmektedir.

Tablo 4.9. Uçucu külün boyuta göre KK değerleri

Tane boyutu (mm)	Miktar (%)	KK (%)
+212	11,28	3,79
-212+150	15,53	2,05
-150+106	16,24	1,01
-106+75	14,53	0,96
-75+53	10,76	0,95
-53+38	6,75	0,88
-38	24,91	1,46
Toplam	100,00	1,57



Şekil 4.12. Uçucu külün boyuta göre KK değerlerinin histogram gösterimi

K.K değerlerinden de anlaşıldığı gibi sadece 212 mikron üstü malzeme hariç uçucu külün çimento sanayiinde kullanılma imkanı vardır.

4.5. Uçucu külün karbon içeriği

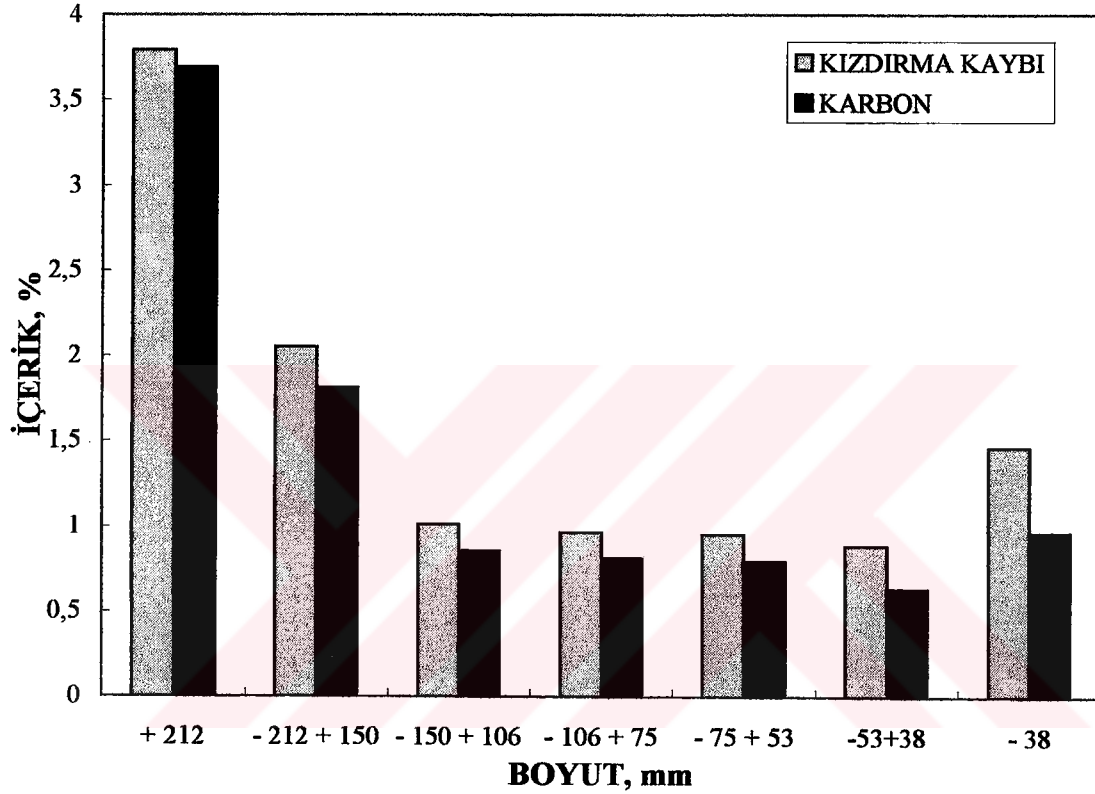
Karbon uçucu külü oluşturan en önemli elemanlardan biri olup, kazanılması ekonomik bir katkıdır. Uçucu küldeki karbon miktarını saptamak amacı ile tüvenan malzemenin karbon analizi yapılmıştır. Sonuçlar Tablo 4.10.'da görülmektedir.

Tablo 4.10. Tüvenan Malzemenin Karbon Analizi Sonuçları

Boyut (mm)	Miktar (%)	C İçerik (%)	KK (%)
+ 212	11,28	3,69	3,79
- 212 + 150	15,53	1,81	2,05
- 150 + 106	16,24	0,85	1,01
- 106 + 75	14,53	0,81	0,96
- 75 + 53	10,76	0,79	0,95
-53+38	6,75	0,63	0,88
- 38	24,91	0,96	1,46
Tüvenan	100,0	1,32	1,57

Tüvenan uçucu külün % karbon içeriği 1,32 olarak bulunmuştur. Boyuta göre incelendiğinde, karbon değerinin genel olarak boyutla ters orantılı olarak azaldığı görülmektedir. Sadece boyuta göre ayırma ile yani malzeme 150 mikrondan elenerek çimento sanayiinde kullanımı açısından karbon içeriğinin istenen değere indirilmesi mümkündür.

K.K. değerleri uçucu küldeki karbon içeriğinden bir miktar fazla bulunmuştur. Pratik maksatlarla K.K'nın % C içeriğine yakın olduğu ancak aradaki farkın uçucu külün yapısındaki karbonat türü uçucu maddelerden kaynaklanmaktadır. Yapılan çalışmalar bu farkın % 10 kadar olduğunu göstermektedir. Bu sebepten dolayı bundan sonraki deneylerde her bir ürünün KK değeri bulunmuş, bu değerin 0,9 ile çarpımı ile de her bir numunenin karbon içeriği hesaplanmıştır. Şekil 4.13'de her iki değer birlikte gösterildiğinde bu tanımın az bir hata ile doğruluğu görülmektedir.



Şekil 4.13. Uçucu külün boyuta göre KK değeri ve karbon içeriklerinin histogram şekli

4.6. Bulk Yoğunluğunun Tespiti:

Değişik tanelerden oluşmuş bir sisteminin yoğunluğuna “Bulk Yoğunluğu” denir. Bulk yoğunluğu, yığını oluşturan tanelerin parça cinsi ve boşluk oranı ile ilgilidir.

$$\text{Bulk Yoğunluğu} = \frac{\text{Yığını oluşturan parçaların ağırlığı}}{\text{Yığının hacmi}}$$

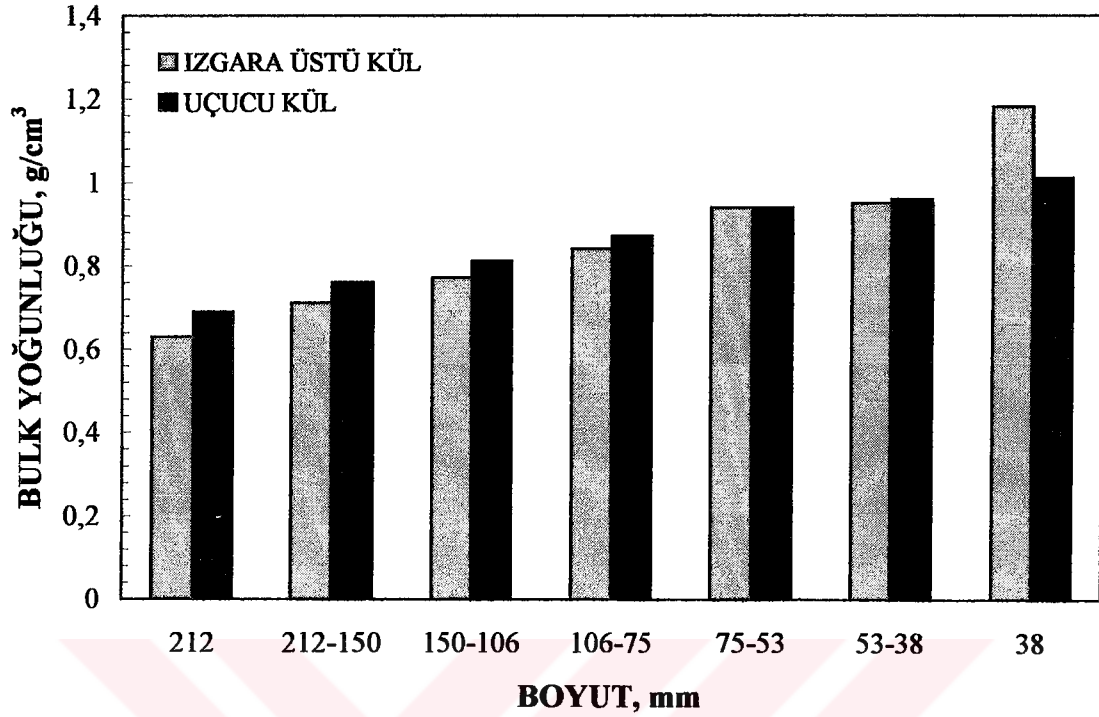
Bulk yoğunluğunun yüksek olması, bireysel parçaların yüksek yoğunluklu olmaları ve daha çok bunların birbirlerine yakın olarak yığın yapmalarından kaynaklanmaktadır. Yığındaki parça boyutu küçüldükçe bulk yoğunluğu artar, büyüldükçe azalır. Bu durum parça boyutundaki artışın parçalar arasındaki boşluk hacmini artırması ve dolayısıyla bulk yoğunluğunun azalması şeklinde açıklanır.

Bulk yoğunluğu uçucu kül için önemli bir özelliktir. Çünkü uçucu kül bu özelliğinden dolayı inşaat sanayiinde hafif yapı malzemesinde kullanılmaktadır. Bulk yoğunluğu yığın ağırlığının yığın hacmine oranıdır. Önceden yapılan çalışmalara göre uçucu külün bulk yoğunluğunun boyuta göre arttığı bilinmektedir. Bu amaçla uçucu külün ve ızgara üstü külün boyuta göre bulk yoğunlukları tayin edilmiştir. Tablo 4.11.ve 4.12’de uçucu kül ve ızgara üstü külün bulk yoğunlukları görülmektedir.

Tablo 4.11. Uçucu külün boyuta göre bulk yoğunluğu değişimi

Boyut (mikron)	Miktar (%)	Izgara Üstü Bulk Yoğunluk (g/cm³)	Uçucu Kül Bulk Yoğunluk (g/cm³)
+212	11,28	0,63	0,69
-212+150	15,53	0,71	0,76
-150+106	16,24	0,77	0,81
-106+75	14,53	0,84	0,87
-75+53	10,76	0,94	0,94
-53+38	6,75	0,95	0,96
-38	24,91	1,18	1,01
Toplam	100,0	0,89	0,87

Uçucu Kül / Bulk Yoğunluk



Şekil 4.14. Uçucu kül ve ızgara üstü külün boyuta göre bulk yoğunluğunun histogram gösterimi

Bu sonuçlara göre uçucu külün ve ızgara üstü külün bulk yoğunlukları boyutun azalmasına bağlı olarak artmaktadır. Bunun sebebi ise, iri boyutta senosferin ve karbonun hacimce daha fazla yer kaplamasına karşın ağırlıkça etkisiz olmalarındandır. Bu sonuca göre senosferin ve karbonun iri boyutlarda daha fazla olduğunu söylemek mümkündür.

4.7. Uçucu küldeki senosfer tespiti

Senosfer, uçucu külden elde edilecek en değerli yan ürünlerden biridir. Uçucu küldeki senosferi belirlemek amacıyla aşağıdaki yöntem geliştirilmeye çalışılmıştır.

Bir beher içerisinde % 15 pülpte katı oranında hazırlanan malzeme manyetik karıştırıcı vasıtasıyla 10 dakika karıştırılıp, senosferlerin yüzeyde toplanması ve diğer istenmeyen karbon ve puzolanların çökmesi için 10 dakika bekletilmiştir. Yüzen kısım başka bir behere aktarılarak, bu işlem yüzeyde senosfer kalmayana kadar tekrar edilmiştir. Yüzen kısımda karbon miktarının fazla olması sebebi ile ve ince boyutta puzolanların olacağı umularak beherdeki malzeme bir gece

bekletilmiştir. Ertesi gün karbonun çoğunun çöktüğü ve dipte bir puzolan ve karbon tortusu olduğu görülmüştür. Daha sonra tortu ve yüzen kısım birbirinden ayrılarak, yüzen kısım filtre edildikten sonra kek etüvde kurutulup tartılmıştır. Sonunda % 5 hata ile uçucu küldeki senosfer miktarı % 0,89 olarak bulunmuştur.

4.8. Zenginleştirme Deneyleri

Bu çalışmada, uçucu külün zenginleştirilmesi için çeşitli yöntemler denenmiştir. Bu yöntemler ve kullanılan zenginleştirme cihazları şunlardır.

Graviteye Bağlı Zenginleştirme Yöntemleri

- Ağır-Ortam Ayırması ile Zenginleştirme
- Tabaka Halinde Akan Akışkan Ortamda Zenginleştirme (Mozley Masası)
- Hidrosiklon

Manyetik Zenginleştirme Yöntemleri

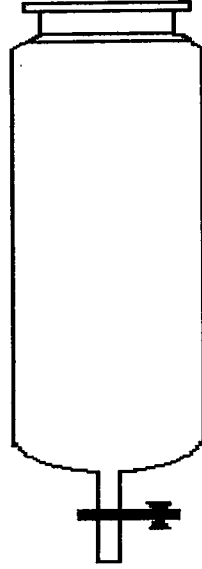
- Döner Diskli Manyetik Ayırıcı
- Carpco Manyetik Ayırıcı
- Bantlı Yaş Manyetik Ayırıcısı (Crockett)

4.8.1. Gravite Deneyleri

4.8.1.1. Yüzdürme- Batırma Deneyleri

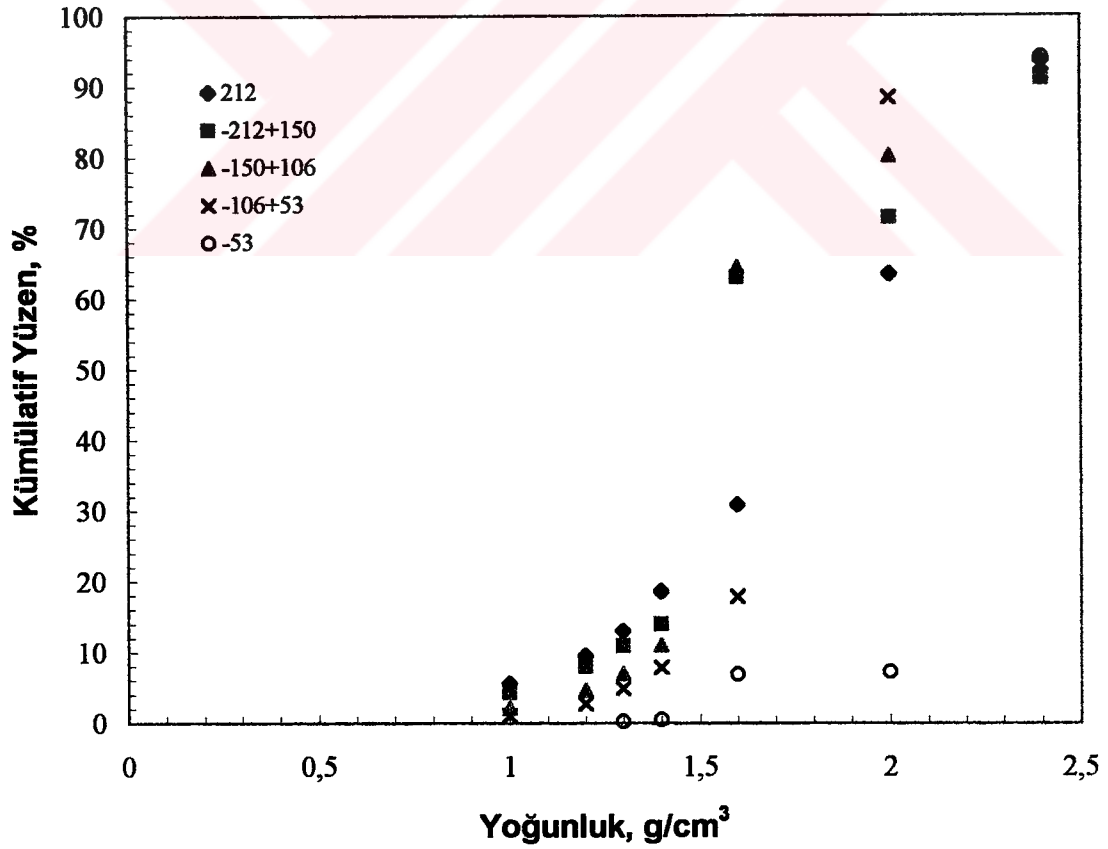
Uçucu küle çeşitli yoğunluklarda yüzdürme-batırma deneyleri uygulanarak değişik yoğunluklarda yüzen ve batan ürünler ağırlıkça ve mineralojik olarak tespit edilmeye çalışılmıştır. Yüzdürme-batırma deneyleri bir yüzdürme-batırma hücresi ile yapılmış olup deneyler $2,4 \text{ g/cm}^3$ ile 1 g/cm^3 arasında yapılmıştır. Yoğunluk ayarlamada bromoform, karbon tetra kalorür ve aseton kullanılmıştır. Şekil 4.15.'de yüzdürme-batırma testleri için kullanılan hücre görülmektedir.

Şekil 4.16'da da tüm boyutlarda yapılmış olan yüzdürme-batırma deneyi sonuçları görülmektedir. Grafikte görüldüğü gibi, 1,4 yoğunluğa kadar +212 boyutu ağırlıkça diğerlerinden üstte iken, 1,4'den sonra bu trend değişmekte ve +212 boyutu ağırlıkça diğerlerine göre azalmaktadır. Bu bulgular, +212 boyutunda yoğunlukça düşük olan senosfer ve karbonun yığıldığını göstermektedir.



Şekil 4.15. Yüzdürme-batırma deneylerinde kullanılan yüzdürme-batırma hücresi

Yüzdürme-batırma deneylerinde Şekil 4.15’de görülen yüzdürme-batırma hücresi kullanılmıştır. Hücrenin yüksekliği 15 cm olup, hacmi ise 100 ml’dir.



Şekil 4.16. Yüzdürme-batırma sonuçlarının kümülatif olarak gösterimi

Tablo 4.12. + 212 mikron boyut numunenin yüzdürme-batırma deneyi sonuçları

Yoğunluk (g/cm ³)	Deneye Göre Miktar (%)	Beslenene Göre Miktar (%)	Kümülatif Yüzen (%)	Fe (%)	C (%)
+ 2,4	6,44	0,73	100,00	12,17	2,13
-2,4 + 2,0	30,08	3,39	93,56		
- 2,0 + 1,6	32,57	3,67	63,48	9,11	4,11
- 1,6 + 1,4	12,24	1,38	30,91	9,76	3,52
- 1,4 + 1,3	5,60	0,63	18,67	9,41	4,39
- 1,3 + 1,2	3,53	0,41	13,07		
- 1,2 + 1,0	3,94	0,44	9,54		
- 1,0	5,60	0,63	5,60	7,33	10,63
Toplam	100,00	11,28		10,24	3,72

Tablo 4.13. – 212 + 150 mikron boyut numunenin yüzdürme-batırma deneyi sonuçları

Yoğunluk (g/cm ³)	Deneye Göre Miktar (%)	Beslenene Göre Miktar (%)	Kümülatif Yüzen (%)	Fe (%)	C (%)
+ 2,4	8,88	1,37	100,00	15,18	1,82
-2,4 + 2,0	19,63	3,05	91,12		
- 2,0 + 1,6	8,47	1,32	71,49	7,23	1,85
- 1,6 + 1,4	48,97	7,61	63,02	8,41	2,12
- 1,4 + 1,3	3,10	0,48	14,05	8,84	1,59
- 1,3 + 1,2	2,89	0,45	10,95		
- 1,2 + 1,0	3,72	0,58	8,06		
- 1,0	4,34	0,67	4,34	6,09	0,47
Toplam	100,00	15,53		10,18	1,89

Tablo 4.14. – 150 + 106 mikron boyut numunenin yüzdürme-batırma deneyi sonuçları

Yoğunluk (g/cm ³)	Deneye Göre Miktar (%)	Beslenene Göre Miktar (%)	Kümülatif Yüzen (%)	Fe (%)	C (%)
+ 2,4	8,29	1,35	100,00	17,87	1,02
-2,4 + 2,0	11,46	1,86	91,71		
- 2,0 + 1,6	15,71	2,55	80,25	9,98	1,40
- 1,6 + 1,4	53,50	8,69	64,54	8,53	0,81
- 1,4 + 1,3	4,03	0,66	11,04	6,58	0,52
- 1,3 + 1,2	2,34	0,38	7,01		
- 1,2 + 1,0	2,55	0,41	4,67		
- 1,0	2,12	0,34	2,12	1,72	0,11
Toplam	100,00	16,24		10,29	0,90

Tablo 4.15. – 106 + 53 mikron boyut numunenin yüzdürme-batırma deneyi sonuçları

Yoğunluk (g/cm ³)	Deneye Göre Miktar (%)	Beslenene Göre Miktar (%)	Kümülatif Yüzen (%)	Fe (%)	C (%)
+ 2,4	8,84	2,24	100,00	31,24	0,24
-2,4 + 2,0	10,70	2,71	93,16		
- 2,0 + 1,6	62,51	15,8	88,46	7,16	0,95
- 1,6 + 1,4	10,04	2,54	17,95	6,28	0,66
- 1,4 + 1,3	2,99	0,76	7,91	4,72	0,39
- 1,3 + 1,2	2,14	0,54	4,92		
- 1,2 + 1,0	1,71	0,43	2,78		
- 1,0	1,07	0,27	1,07	0	0,32
Toplam	100,00	25,29		11,52	0,79

Tablo 4.16. – 53 mikron boyut numunenin yüzdürme-batırma deneyi sonuçları

Yoğunluk (g/cm ³)	Deneye Göre Miktar (%)	Beslenene Göre Miktar (%)	Kümülatif Yüzen (%)	Fe (%)	C (%)
+ 2,4	9,87	3,12	100,00	29,24	0,00
-2,4 + 2,0	82,87	26,24	94,13	10,69	1,29
- 2,0 + 1,6	0,28	0,09	7,26	6,22	1,13
- 1,6 + 1,4	6,42	2,03	6,98		
- 1,4 + 1,3	0,28	0,09	0,56		
- 1,3 + 1,2	0,28	0,09	0,28		
- 1,2 + 1,0	-		-		
- 1,0	-		-		
Toplam	100,00	31,66		12,36	1,14

Tablo 4.17. Deneylerin birleştirilmiş olarak yüzdürme-batırma deneyi sonuçları

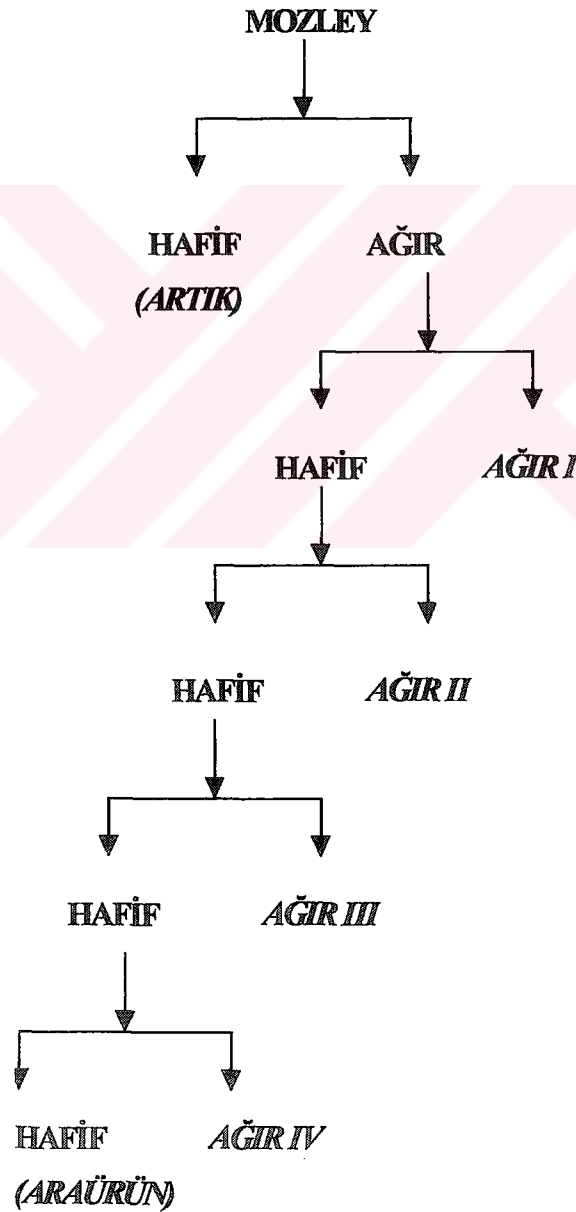
Yoğunluk (g/cm ³)	Miktar (%)	Kümülatif Yüzen (%)	Kümülatif Batan (%)
+ 2,4	8,81	100,00	8,81
-2,4 + 2,0	37,25	92,96	46,06
- 2,0 + 1,6	23,43	55,97	69,49
- 1,6 + 1,4	22,25	30,51	91,74
- 1,4 + 1,3	2,62	8,26	94,36
- 1,3 + 1,2	1,87	5,64	96,23
- 1,2 + 1,0	1,86	3,77	98,09
- 1,0	1,91	1,91	100,00
Toplam	100,00		

Bu sonuçlara göre –106 mikron boyut grubundaki malzemenin 2,4 g/cm³ yoğunluklu bir ağır sıvıdan ayrılması ile miktarca %8,07 olan %31,39 Fe içerikli ve %0,15 C içerikli bir ürünün elde edilebileceği anlaşılmaktadır.

4.8.1.2. Mozley Masası Deneyi

Uçucu külü oluşturan partiküller arasında belirgin yoğunluk farkları olduğu için gravite yöntemi denenmiştir. Bu amaçla son yıllarda geliştirilen gravite cihazlarından Mozley Masası kullanılmıştır. Bu deney ile, dört ürünün en az ikiye düşürülmesi hedeflenmiştir.

Deneylerde verimin optimizasyonu için farklı eğimlerde besleme yapılmıştır. En ağır malzeme alınırken akış yönünün tersine eğim artırılmış ve böylece en ağırın alınması sağlanmıştır. Daha sonra eğim yavaş yavaş düşürülerek diğer ürünler alınmıştır. Deneyin basitleştirilmiş akım şeması Şekil 4.17’de görülmektedir. Deney sonuçları ve karbon içerikleri Tablo 4.18’de görülmektedir.



Şekil 4.17 Tüvenan malzemeye uygulanan Mozley Masası deneyinin akım şeması

Tablo 4.18. Mozley Masası deneyi ürünlerinin sonuçları

Ürün	Miktar (%)	C İçeriği (%)	C Verim (%)
Ağır I	6,52	0,31	24,6
Ağır II	8,13	0,58	
Ağır III	10,76	0,77	
Ağır IV	18,74	1,05	
Ara ürün	22,47	1,49	75,4
Hafif	33,38	2,16	
Tüvenan	100,0	1,41	100,0

Deney sonuçlarından da görüldüğü gibi, tüvenan malzemenin %1.41 olan karbon içeriği deney sonucunda 2,16'ya çıkarılmış ve aynı zamanda 1,49 içerikli bir araürün elde edilmiştir. Araürün ve hafif ürün birleştirildiğinde, karbon içeriği % 1,89 olan bir ürün %75,4 verimle alınmıştır.

Mozley ağır ürünlerinin demir analizleri de Tablo 4.19'da görülmektedir. Sonuçlardan da görüldüğü gibi, ağır ürünlerin demir kazanma verimi yaklaşık olarak % 60'dır. Yani bu yöntem ile hafif ürün olarak senosfer ve karbon kazanılırken demir de aynı zamanda ağır üründe kazanılmıştır. Bu ağır ürünlere bundan sonra manyetik ayırma uygulanırsa daha yüksek demir içerikli ürünlerin elde edilmesi mümkündür. Bu işlem sonucunda non manyetik olarak puzolan kazanılmış olacaktır.

Tablo 4.19. Mozley deneyi ürünlerin demir analizi sonuçları

Ürün	Miktar (%)	Fe İçeriği (%)	Dağılım (%)	Verim (%)
Ağır I	6,52	30,02	195,73	57,99
Ağır II	8,13	17,74	144,22	
Ağır III	10,76	11,90	128,04	
Ağır IV	18,74	9,14	171,28	
Ara ürün	22,47	8,16	183,36	42,01
Hafif	33,38	8,39	280,06	
Tüvenan	100,0	11,03	1103,00	100,00

4.8.1.3. Hidrosiklon Deneyleri

Uçucu kül hafif ürün olarak senosfer ve karbon, ağır ürün olarak da puzolan ve demir içermektedir. Bu bilgiden yola çıkılarak siklon ile uçucu külden üst akımdan hafif olanları ve alt akımdan da ağır ürünlerin alınmaya çalışılmıştır. Normalde boyuta göre ayırma yapan bir cihaz olan siklon ile bir anlamda graviteye bağlı bir zenginleştirme yapılmaya çalışılmıştır. Deney şartları ve sonuçları Tablo 4.20.-4.22.'de görülmektedir.

Tüm deneylerde sabit olan değişkenler:

Besleme Basıncı: 0,5 bar

P.K.O. : % 10

Tablo 4.20. I. Grup deneyler

I. Grup Deneyler:			
Vorteks çapı : 8 mm (sabit)			
Apeks çapı: 9,4 mm	Miktar (%)	Fe İçeriği (%)	C İçeriği (%)
Üst akım	1,58	9,82	3,6
Alt akım	98,42	11,34	1,36
Toplam	100,00	11,32	1,40
Apeks çapı: 6,4 mm			
Üst akım	3,98	10,07	4,97
Alt akım	96,02	11,43	1,27
Toplam	100,00	11,38	1,41
Apeks çapı: 3,2 mm			
Üst akım	15,23	10,36	3,44
Alt akım	84,77	11,58	1,08
Toplam	100,00	11,39	1,43

Tablo 4.20’de görüldüğü gibi deneyler, 8 mm çaplı vorteks sabit tutulup, 9.4, 6.4 ve 3.2 mm çaplı apeksler değişken olarak kullanılmıştır.

Tablo 4.21. II. Grup deneyler

II. Grup Deneyler: Vorteks çapı : 11,1 mm (sabit)			
Apeks çapı: 9,4 mm	Miktar (%)	Fe İçeriği (%)	C İçeriği (%)
Üst akım	5,41	10,31	5,06
Alt akım	94,59	11,41	1,16
Toplam	100,00	11,35	1,37
Apeks çapı: 6,4 mm			
Üst akım	8,85	10,45	4,56
Alt akım	91,15	11,46	1,10
Toplam	100,00	11,37	1,4
Apeks çapı: 3,2 mm			
Üst akım	13,96	10,48	3,98
Alt akım	86,04	11,54	1,01
Toplam	100,00	11,39	1,41

Tablo 4.21’de görüldüğü gibi deneyler, 11 mm çaplı vorteks sabit tutulup, 9.4, 6.4 ve 3.2 mm çaplı apeksler değişken olarak kullanılmıştır.

Tablo 4.22. III. Grup deneyler

III. Grup Deneyler: Vorteks çapı : 14,3 mm (sabit)			
Apeks çapı: 9,4 mm	Miktar (%)	Fe İçeriği (%)	C İçeriği (%)
Üst akım	10,13	10,44	4,24
Alt akım	89,87	11,41	1,08
Toplam	100,00	11,31	1,4
Apeks çapı: 6,4 mm			
Üst akım	12,31	10,50	3,84
Alt akım	87,69	11,47	1,07
Toplam	100	11,35	1,41
Apeks çapı: 3,2 mm			
Üst akım	19,76	10,54	3,65
Alt akım	80,24	11,52	0,87
Toplam	100,00	11,32	1,42

Deney sonucu, üst akım değerleri karbon içeriği açısından yüksek çıkmasına rağmen, demir içeriği açısından bir değişim görülmemektedir. Üst akım sonuçlarına göre en iyi vorteks çapının 11,1 mm olduğu apeks çapı olarak da 6,4 mm olduğu saptanmıştır. Bu şartlarda % 8,85 miktarda % 4,56 karbon içerikli ürün alınmıştır. İçerik olarak bu değerden fazla olan ürünler alınmasına karşın miktar olarak yetersiz olmaları seçim yapmamız açısından etkili olmuştur. Demir içeriğinin de pek değişmemesi ince olan demirlerin üst akıma kaçması, üst akımın demir içeriğini artırmaktadır. Bu sonuçlara bağlı olarak ilk önce ağır ve manyetik olan demirin manyetik zenginleştirme ile alınması ve daha sonra bu non manyetik ürünün siklona beslenmesi ile sokulması bu üst akımdan daha iyi karbon içerikli ürün alınması mümkündür.

4.8.2. Manyetik Zenginleştirme Deneyleri

Uçucu külü oluşturan ürünlerden biri de manyetik malzemedir. Manyetik malzeme Tunçbilek uçucu külünde genellikle hematittir. Tüvenan malzemedan manyetik ürünü en iyi verimle kazanabilmek için uçucu kül numunesi 106 mikron üstü ve 106 mikron altı olmak üzere iki boyuta ayrılmıştır. Bunun sebebi ise boyut aralığını daraltmak ve böylece zenginleştirme verimini artırmaktır. Çünkü zenginleştirme sırasında iri ve ince malzemenin bir arada bulunması manyetik flokların oluşma şansını artırmakta ve bu da verimi düşürmektedir. Bu amaçla uçucu kül numunesi iki boyut grubuna ayrılıp iki boyutta da ayrı ayrı zenginleştirme deneyleri yapılmıştır. Tablo 4.23’de tüvenan malzemenin boyuta göre demir analiz sonuçları görülmektedir.

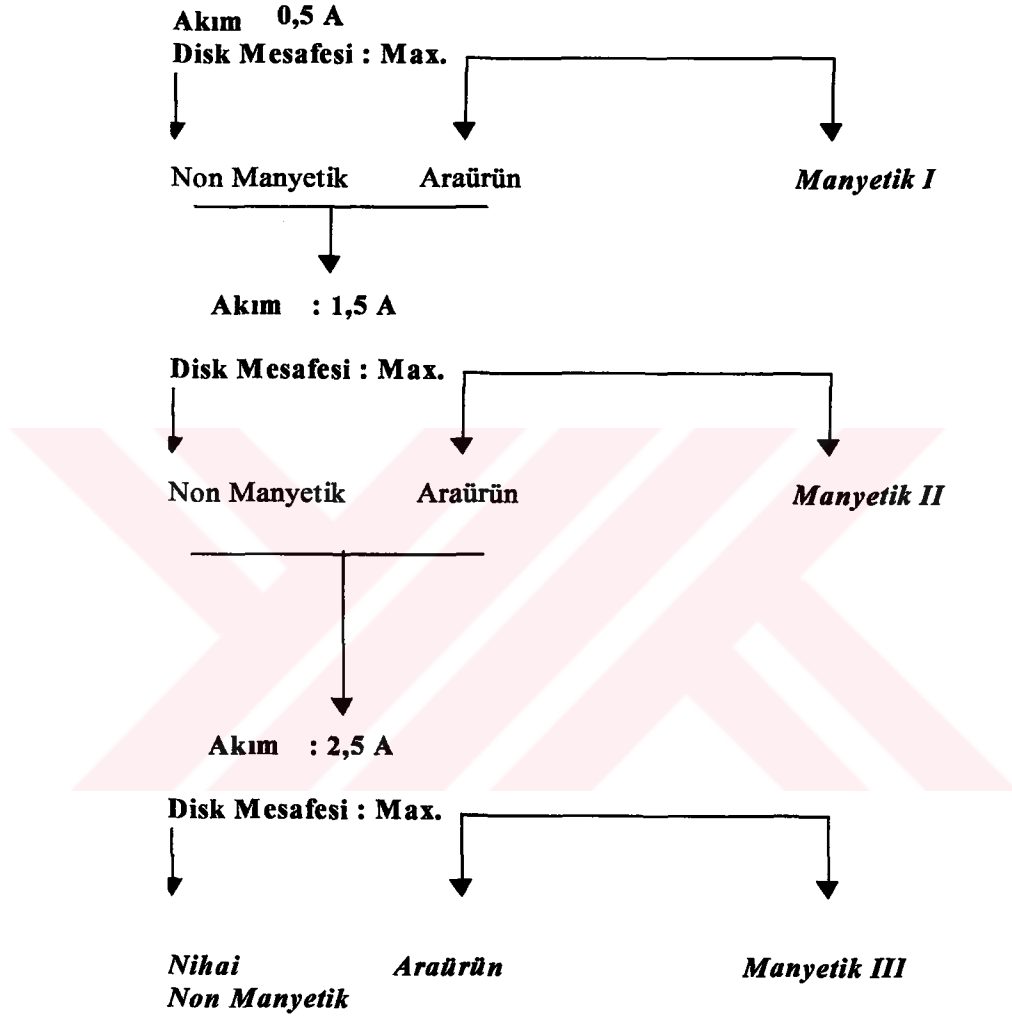
Tablo 4.23. Tüvenan malzemenin boyuta bağlı demir analizi sonuçları

Boyut (mm)	Miktar (%)	Fe İçerik (%)
+212	11,28	10,25
-212+150	15,53	10,29
-150+106	16,24	10,46
-106+75	14,53	11,09
-75+53	10,76	11,66
-53+38	6,75	12,60
-38	24,91	12,42
Tüvenan	100,00	11,26

Tablo 4.20’de görüldüğü gibi parça boyutu azaldıkça manyetik içerik artmaktadır. Boyutu 106 mikrondan kestiğimiz zaman tüvenan malzemeye göre manyetik ürünün yaklaşık %40’ı 106 mikron üstünde kalmaktadır. %60’ı ise 106 mikron altında kalmaktadır. Ancak Fe içeriği bakımından belirgin bir fark olmamasına rağmen, boyutun önemli olduğu dikkate alınarak bu iki boyut grubunda bir dizi manyetik ayırma deneyi yapılmıştır.

4.8.2.1. 106 mikron üstü uçucu külün kuru manyetik ayırma ile zenginleştirilmesi

İki boyuta ayrılan uçucu külden 106 mikron üstü kuru manyetik zenginleştirme esasına göre çalışan döner diskli manyetik ayırma cihazı ile ürün alınmaya çalışılmıştır. Deneyin akım şeması Şekil 4.18’de görülmektedir.



Şekil 4.18 + 106 mikron kuru manyetik zenginleştirme akım şeması

Akım şemasından da görüldüğü gibi, akım şiddeti ve disk mesafesi değişken alınarak deneyler yapılmıştır. Deney sonucunda üç farklı manyetik ürün alınmış buna ilave olarak da araürün ve nonmanyetik ürün alınmıştır. Deney sonuçları da Tablo 4.24’de görülmektedir. Buna göre %35,71 içerikli temiz bir manyetik konsantre ve bunun yanında %15,79 ve %12,57 Fe içerikli iki manyetik ürün, %11,14 Fe içerikli bir araürün elde edilmiştir ve % 6 Fe içeren bir non manyetik ürün alınmıştır.

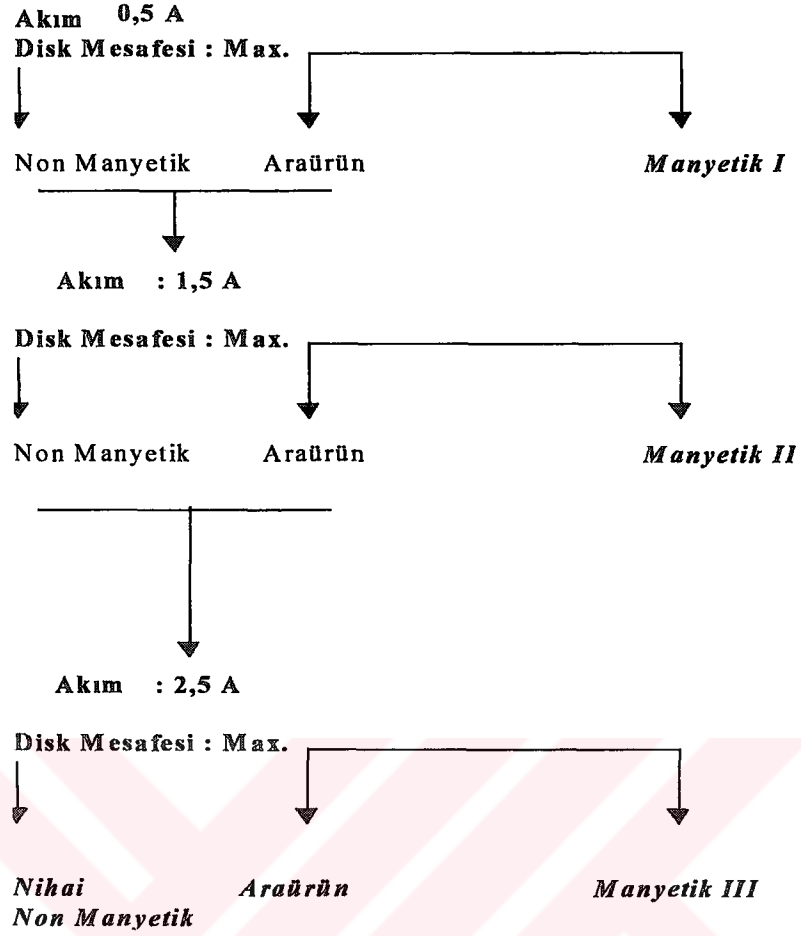
Tablo 4.24. + 106 mikron uçucu küle uygulanan kuru manyetik zenginleştirme işleminin sonuçları

Ürün	Miktar (%)	Fe İçerik (%)	C İçeriği (%)	Fe Verim (%)	C Verim (%)
Manyetik I	10,70	35,71	0,1	57,2	11,3
Manyetik II	9,75	15,79	1,06		
Manyetik III	6,47	12,57	1,6		
Ara ürün	3,41	11,14	1,79	3,6	3,6
Non Manyetik	69,67	6,00	2,3	39,2	85,1
Toplam	100,00	10,66	1,89	100,0	100,0

4.8.2.2. 106 mikron altı uçucu külün yaş manyetik ayırma ile zenginleştirilmesi

Uçucu külün 106 mikron altı kısmı ince olduğundan yaş manyetik zenginleştirme uygulanmıştır. Zenginleştirme deneyi Carpco yaş zenginleştirme cihazı ile yapılmıştır. Deneyin akım şeması Şekil 4.19’da görülmektedir. Akım şemasından da görüldüğü gibi deney sonucu üç manyetik ürün ve bir nonmanyetik ürün elde edilmiştir. Deney sonuçları ise Tablo 4.25’de görülmektedir.

Elde edilen demir içeriklerinin istenilen düzeyde olmamasından dolayı 106 mikron altında kuru manyetik olarak zenginleştirilmesine karar verilmiştir. Tablo 4.26’da da deney sonuçları görülmektedir.



Şekil 4.19 - 106 mikron uçucu küle uygulanan yaş manyetik zenginleştirme işleminin akım şeması

Tablo 4.25. - 106 mikron uçucu küle uygulanan yaş manyetik zenginleştirme işleminin sonuçları

Ürün	Miktar (%)	Fe İçerik (%)	Fe Dağılım (%)	Fe Verim (%)
Manyetik	46,25	19,93	921,76	76,05
Araürün	14,59	6,74	98,34	8,11
Non Manyetik	39,16	4,93	193,06	14,84
Toplam	100,00	12,12	1212,00	100,00

Tablo 4.26. - 106 mikron uçucu küle uygulanan kuru manyetik zenginleştirme işleminin sonuçları

Ürün	Miktar (%)	Fe İçerik (%)	C İçerik (%)	C verim (%)	Fe Verim (%)
Manyetik I	7,98	39,69	0,04	5,7	52,0
Manyetik II	8,05	30,13	0,34		
Manyetik III	4,40	19,91	0,66		
Ara ürün	5,69	13,91	1,13	6,2	6,6
Non Manyetik	73,88	6,63	1,25	88,1	41,4
Toplam	100,0	12,15	1,04	100,0	100,0

Zenginleştirme sonucu %39,69 ve %30,13 Fe içerikli iyi bir manyetik konsantre alınmıştır Bunun yanında %19,91 Fe içerikli bir manyetik, %13,91 Fe içerikli bir araürün ve %6,63 Fe içerikli non manyetik ürün elde edilmiştir. Bu iki manyetik zenginleştirmenin birleştirilmiş hali Tablo 4.27’de görülmektedir. +106 mikron Manyetik I, -106 mikron Manyetik I ve II ürünlerini birleştirdiğimizde miktarca %13,75 oranında, %35,16 Fe içerikli % 41,86 verimle bir manyetik ürün, bunun yanı sıra diğer Manyetik ürünler ve araürünler birleştirildiğinde miktarca %14,21 olan %14,99 Fe içerikli araürün ve miktarca %72,04 olan %6,37 Fe içerikli non manyetik ürün elde edilmiştir.

Tablo 4.27. +106 mikron ve –106 mikron manyetik zenginleştirme sonuçlarının birleştirilmiş hali

Boyut (mikron)	Miktar (%)	Ürünler	Miktar (%)	Fe (%)
+ 106	43,05	Manyetik I	4,61	35,71
		Manyetik II	4,2	15,79
		Manyetik III	2,79	12,57
		Araürün	1,47	11,14
		Non manyetik	29,98	6,00
- 106	56,95	Manyetik I	4,55	39,69
		Manyetik II	4,59	30,13
		Manyetik III	2,51	19,91
		Araürün	3,24	13,98
		Non manyetik	42,06	6,63
Toplam	100,00		100,00	11,55

4.8.3. +106 mikron Nonmanyetik numuneye uygulanan Mozley Masası deneyi

+106 mikron numuneye uygulanan manyetik zenginleştirme işleminden sonra nonmanyetik ürün Mozley Masasına beslenmiştir. Bu işlem ile manyetik ürünü alınmış üründen ağır olarak puzolan ve hafif olarak da karbon ve senosfer alınmaya çalışılmıştır. Tablo 4.28’de de deney sonuçları görülmektedir. Deney sonucunda 4 ağır ürün, 2 hafif ve bir de araürün alınmıştır. Ağır ürün olarak beslenene göre %63,65 oranında %1,44 C içerikli puzolan kazanılmıştır. Karbon içeriğinin %3’den düşük olması bu ürünün doğrudan çimento sanayiinde kullanılma imkanı vermektedir. Diğer üç ürünü birleştirdiğimizde, beslenene göre % 60,1 verimle %36,35 oranında %3,82 C içerikli ürün alınmaktadır. ✓

Tablo 4.28. 106 mikron üstü nonmanyetik ürüne yapılan mozley masası deneyi sonuçları

Ürün	Miktar (%)	C İçeriği (%)	C verim (%)
Ağır I	15,57	1,29	39,8
Ağır II	14,13	1,43	
Ağır III	18,47	1,58	
Ağır IV	15,48	1,45	
Araürün	19,65	2,27	19,4
Hafif I	5,22	7,93	17,9
Hafif II	11,48	4,60	22,9
Toplam	100,00	2,31	100,0

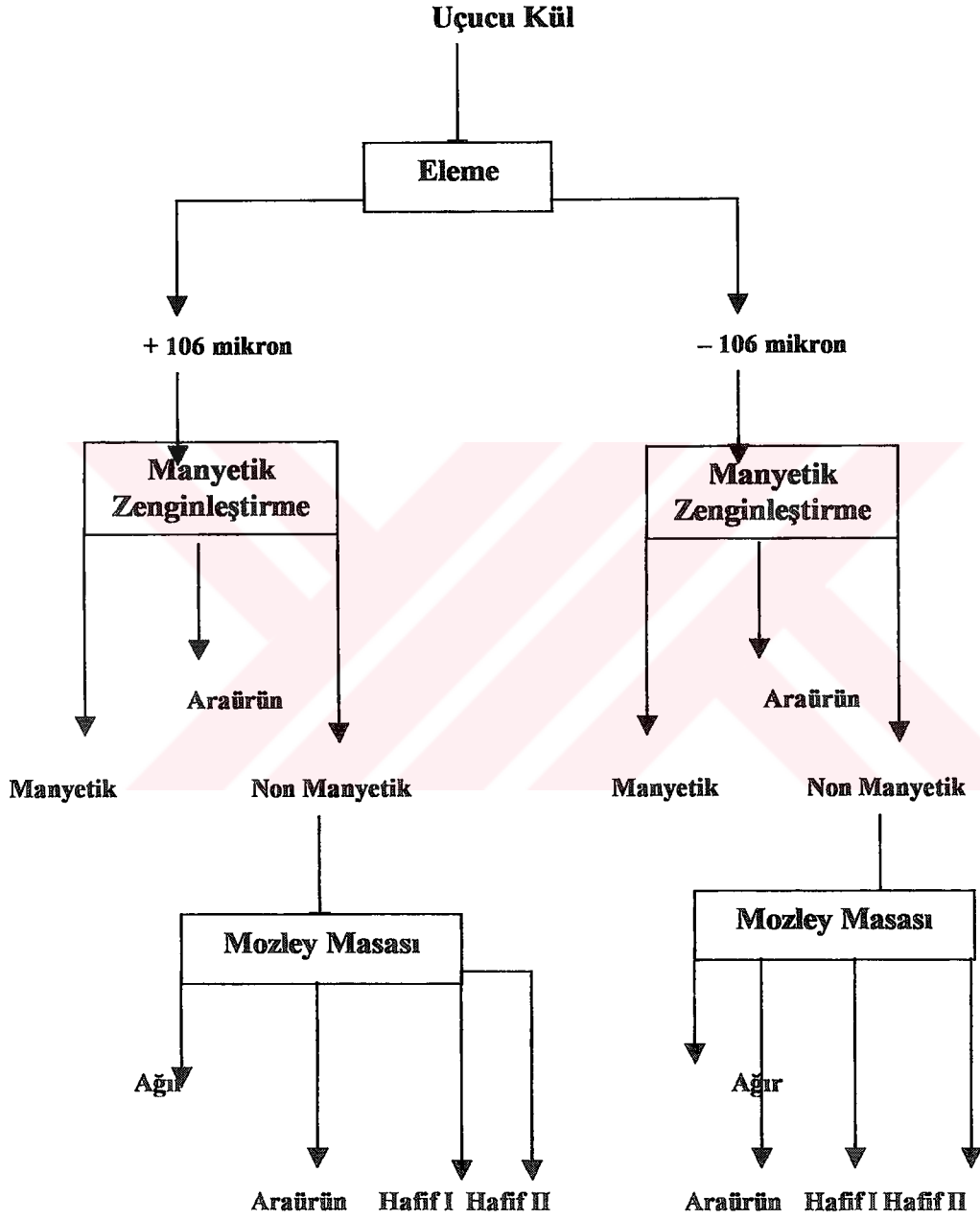
4.8.4. -106 mikron Manyetik işlem görmüş numuneye uygulanan Mozley Masası deneyi

-106 mikron numuneye uygulanan manyetik zenginleştirme işleminden sonra nonmanyetik ürün mozley masasına beslenmiştir. Bu işlem ile manyetik ürünü alınmış üründen ağır olarak puzolan ve hafif olarak da karbon ve senosfer alınmaya çalışılmıştır. Tablo 4.29’da da deney sonuçları görülmektedir. Deney sonucunda 4 ağır ürün, 2 hafif ve bir de araürün alınmıştır. Ağır ürün olarak beslenene göre %40,39 oranında %0,78 C içerikli puzolan kazanılmıştır. Karbon içeriğinin %3’den düşük olması bu ürünün doğrudan çimento sanayiinde kullanılma imkanı vermektedir. Diğer üç ürünü birleştirdiğimizde, beslenene göre % 75,4 verimle %59,61 oranında %1,59 C içerikli ürün alınmaktadır.

Tablo 4.29. -106 mikron nonmanyetik ürüne yapılan Mozley Masası deney sonuçları

Ürün	Miktar (%)	C (%)	C Verim (%)
Ağır I	3,51	0,54	24,6
Ağır II	8,01	0,74	
Ağır III	11,83	0,73	
Ağır IV	17,04	0,88	
Araürün	29,11	0,76	17,6
Hafif I	14,38	2,58	29,5
Hafif II	16,12	2,19	28,3
Toplam	100,00	1,26	100,0

Şekil 4.20’de de tüm bu deneylerin basitleştirilmiş akım şeması görülmektedir.



Şekil 4.20. Manyetik zenginleştirme ve mozley masası deneylerinin basitleştirilmiş akım şeması

4.9. Optimum Akım Şemasının Oluşturulması

Yapılan tüm zenginleştirilme deneyleri sonucunda, alınan verilere bağlı olarak en uygun akım şeması oluşturulmaya çalışılmıştır. Bu akım şemasının çalışabilirliğini saptamak amacıyla da tek tek bu deneyler yapılmıştır.

Yapılan analizler sonucu uçucu küldeki karbon değerinin ve senosfer miktarının 212 mikron üzerinde arttığı bilinmektedir. Bu veriye dayanarak, tüvenan malzemenin 212 mikrondan elenmesiyle 212 mikron üstü malzeme içerik olarak karbonca ve senosferce zenginleştirilmiştir. Buna ek olarak bu malzemelerin yoğunluklarının düşük olması sebebiyle, bir dekantasyon işlemi ile bu içerik daha da artırılmıştır. Bu işlemle yüksek içerikli karbon ve senosfer kazanılmıştır. Daha sonra 212 mikron altı malzeme de dekantasyon işlemine tabi tutularak, bu boyutta bulunabilecek olan senosfer ve karbon kazanılmaya çalışılmıştır. Dekantasyon işlemine tabi tutulan 212 altı malzemenin batan kısmı için yaş manyetik zenginleştirilme yapılmış ve böylece manyetik, araürün, şlam ve non manyetik ürün kazanılmıştır. Manyetik zenginleştirilme işlemi ile de demir kazanılmıştır. Non manyetik ve şlam ürünler ile de puzolan kazanılmıştır. Hem puzolanın karbon içeriğinin düşürülmesi hem de puzolandaki karbonu kazanmak amacıyla bu iki ürüne siklon işlemi uygulanmış ve böylece karbon içeriği düşürülmüş puzolan ve karbon içeriği artırılmış başka bir ürün elde edilmiştir. Bu akım şeması ile de uçucu külde bulunan yan ürünler teker teker elde edilmeye çalışılmıştır. Tablo 4.30-4.35.'de bu işlemlerin sonuçları görülmektedir. Tablo 4.36'da da tüm deneyin tüvenan malzemeye göre sonuçları görülmektedir. Manyetik zenginleştirme sonucunda, beslenene göre miktarca %14,56 ve %40,25 verimle %30,49 Fe içerikli bir demir konsantresi elde edilmiştir. Tablo 4.33'de manyetik işlemin sonuçları görülmektedir. Şekil 4.21'de de tüm deneyleri gösteren basitleştirilmiş akım şeması görülmektedir.

Tablo 4.30. Tüvenan uçucu külün Eleme işleminin sonuçları

Ürünler	Miktar (%)	C (%)
+ 212 mikron	15,60	3,15
- 212 mikron	84,40	1,09
Toplam	100,00	1,41

Tablo 4.31. 212 mikron üstü malzemeye uygulanan dekantasyon işleminin sonuçları

Ürünler	Miktar (%)	C (%)
Yüzen I	7,00	22,16
Batan I	93,00	2,01
Toplam	100,00	3,15

Tablo 4.32. 212 mikron altı malzemeye uygulanan dekantasyon işleminin sonuçları

Ürünler	Miktar (%)	C (%)
Yüzen II	0,70	1,03
Batan II	99,30	1,09
Toplam	100,00	1,10

Dekantasyon sonucu elde edilen yüzen ürünlerin karbon ve senosfer içerikleri mikroskop ile tane sayımı yöntemi ile yapılmıştır. Taneler ayrıldıktan sonra hem senosfer hem de karbon taneleri tartılıp, her bir numunenin içerikleri ağırlıkça bulunmuştur.

Tablo 4.33. 212 mikron altı malzemeye uygulanan yaş manyetik zenginleştirme işleminin sonuçları

Ürünler	Deneye göre Miktar (%)	Beslenene göre Miktar (%)	Fe (%)	C (%)
Manyetik	17,4	14,56	30,49	0,05
Araürün	9,60	8,04	10,33	0,90
Şlam	35,10	29,38	7,81	1,66
Non Manyetik	37,9	31,72	6,73	1,08
Toplam	100,00	83,70	11,59	1,09

Tablo 4.34 Non manyetik malzemeye uygulanan siklon işleminin sonuçları

Ürünler	Miktar (%)	C (%)
Üst Akım I	6,70	4,09
Alt Akım I	93,30	0,87
Toplam	100,00	1,08

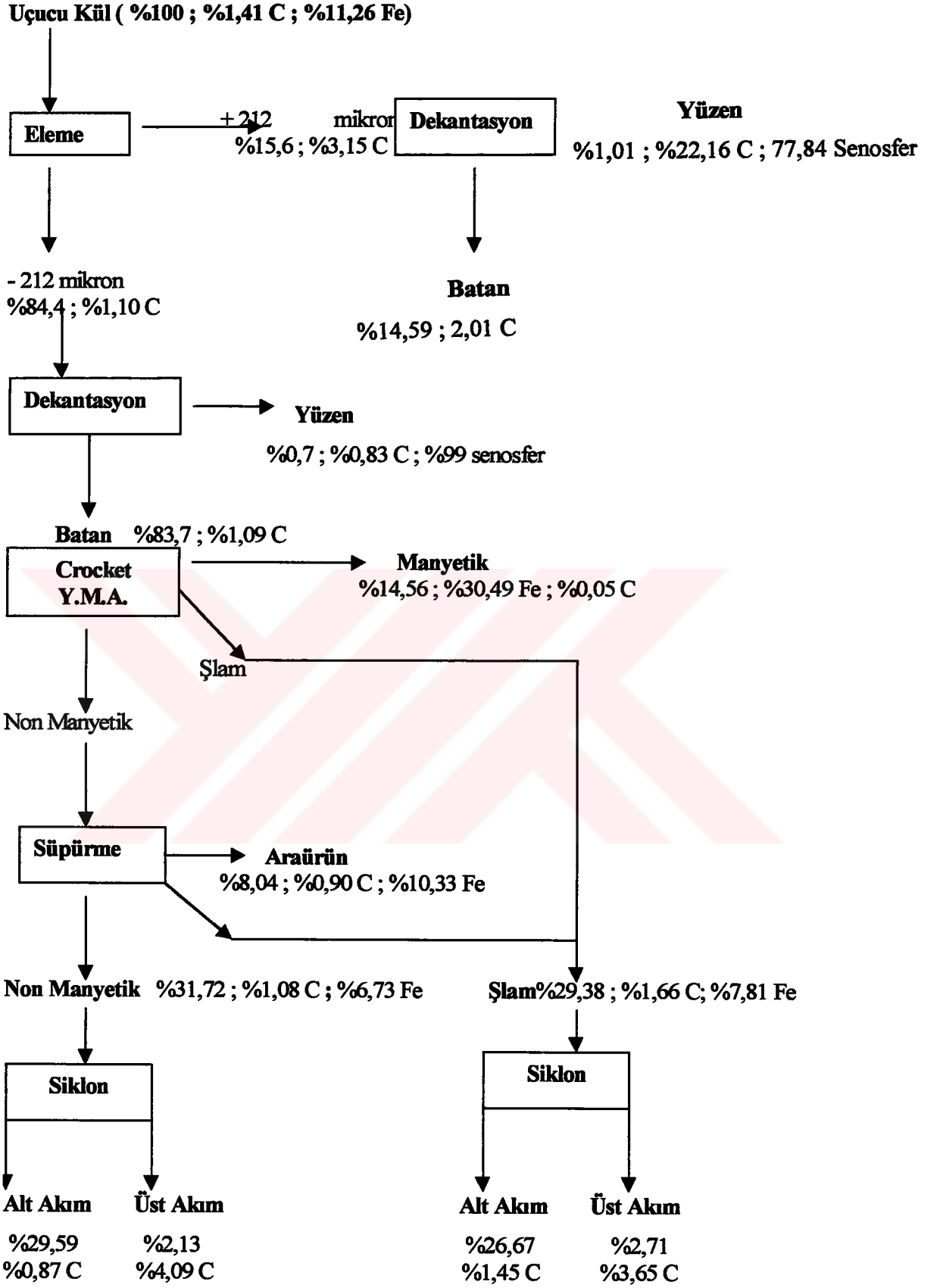
Manyetik zenginleştirme sonucunda, beslenene göre miktarca %14,56 ve %40,25 verimle %30,49 Fe içerikli bir demir konsantresi elde edilmiştir. Tablo 4.33’de manyetik işlemin sonuçları görülmektedir.

Tablo 4.35 Şlama uygulanan siklon işleminin sonuçları

Ürünler	Miktar (%)	C (%)
Üst Akım II	9,20	3,65
Alt Akım II	90,80	1,45
Toplam	100,00	1,66

Tablo 4.36. Tüvenan malzemeye göre ürün sonuçları

Ürünler	Miktar (%)	C (%)
Yüzen I	1,09	14,18
Batan I	14,51	2,32
Yüzen II	0,70	0,83
Manyetik	14,56	0,05
Araürün	8,04	0,90
Üst Akım I	2,13	4,09
Alt Akım I	29,59	0,87
Üst Akım II	2,71	3,65
Alt Akım II	26,67	1,45
Toplam	100,00	1,41



Şekil 4.21. Tüm deneylerin gösterildiği basitleştirilmiş akım şeması

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Kütahya Tunçbilek termik santrali küllerinin karakterizasyonu ve yan ürünlerinin eldesi adlı bu tez kapsamında yapılan çalışmaların sonuçları ve önerileri aşağıda sunulmaktadır.

1. Tunçbilek Termik santral küllerinin elek analizleri yapılmış ve bu analizler sonucu, uçucu kül için $D_{80}=180$ mikron ve D_{50} boyutu ise 90 mikron bulunmuştur.
2. Uçucu kül numunelerinin asit-baz özelliklerinin tespiti amacı ile yapılmış olan pH profillerinden, uçucu kül numunelerinin buffer özelliği gösterdiği ve kısa bir süre içerisinde yaklaşık $pH=10,5$ 'da tampon pH oluşturduğu gözlemlenmiştir. Yine elektrokinetik özelliklerin tespiti amacı ile yapılan zeta potansiyel ölçümleri sonucunda, hiçbir numunede sıfır yük noktası (syn) elde edilememiştir. Yüzey yükün daima negatif olduğu bulunmuştur. Bunun, kül numunelerinin camsı bir yapıya sahip olması ve bu camsı yapının çözünmesi ile ortama geçen Si^{+4} ve Al^{+3} gibi iyonların hidroksil formlarının yüzey yükünü değiştirdikleri düşünülmektedir.
3. Uçucu külün boyuta göre kızdırma kaybı ve karbon içerikleri elde edilmiştir. Bu değerler tüvenana göre hesaplandığında kızdırma kayıpları ve karbon içerikleri arasında yaklaşık %10 gibi bir fark gözlemlenmiştir. Bu bulguya dayanarak uçucu külünün kızdırma kaybı değeri 0,9 ile çarpılarak uçucu küldeki karbon miktarı yaklaşık olarak bulunmuştur.
4. Tunçbilek termik santrali uçucu külünün tüvenan karbon içeriği 1,32 olarak bulunmuştur. Boyuta göre incelendiğinde, karbon değerinin genel olarak boyutla ters orantılı olarak azaldığı görülmüştür. 212 mikron üzeri uçucu külün yaklaşık %3,5 karbon içeriğine sahip olduğu tespit edilmiştir. Buradan sadece boyuta göre ayırma ile yani malzemenin 212 mikrondan elenmesiyle, uçucu külün karbon içeriğinin daha da aşağıya çekilebildiği ve bu sayede uçucu külün çimento

sanayiinde kullanılma şartı olan maksimum %3 C içeriği olma sağlanmış olmaktadır.

5. Uçucu külün hafif yapı malzemesi olarak inşaat sanayiinde kullanılmasını sağlayan özelliklerden biri olan bulk yoğunluğu boyuta göre hesaplanmıştır. Bu hesaplara göre, uçucu külün bulk yoğunluğunun, boyutun azalmasıyla arttığı bulunmuştur. Buna sebep olarak da boyutun azalmasıyla, iri boyutta senosfer ve karbonun hacimce daha fazla yer kaplamalarına karşın ağırlıkça etkisiz olmalarından kaynaklanmaktadır. İnce boyutta ise demir ve puzolan gibi ağır minerallerin etkili olduklarını yani senosfer ve karbonun iri boyutlarda daha fazla olduğunu söylemek mümkündür.
6. Uçucu külden elde edilebilecek en değerli yan ürünlerden biri olan senosferin, uçucu küldeki içeriği $0,89 \pm 0,1$ bulunmuştur.
7. Uçucu külü oluşturan partiküller arasında belirgin yoğunluk farkları olması sebebiyle gravite yöntemi denenmiştir. Bu amaçla son yıllarda geliştirilen gravite cihazlarından Mozley Masası kullanılmıştır. Deney sonuçlarına göre tüvenan malzemenin %1,41 olan karbon içeriği deney sonucunda %2,16'ya çıkarılmış ve aynı zamanda %1,49 C içerikli bir araürün elde edilmiştir. Araürün ve hafif ürün birleştirildiğinde miktarca % 55,85 ve karbon içeriği % 1,89 olan bir ürün, %75,4 verimle kazanılmıştır. Aynı zamanda 1.Ağır üründe miktarca %6,52 olan %30,02 Fe içerikli bir ürün de kazanılmıştır. Yani bu yöntem ile hafif ürün olarak senosfer ve karbon kazanılırken, demir aynı anda ağır üründe kazanılmıştır. Bu ağır ürünler, manyetik ayırma ile temizlenerek daha yüksek demir içerikli ürünlerin elde edilmesi mümkündür. Bu işlem sonucunda da non manyetik olarak puzolan kazanılmış olacaktır.
8. Uçucu küle $2,4 \text{ gr/cm}^3$ ile 1 gr/cm^3 yoğunlukları arasında yüzdürme-batırma deneyleri uygulanarak, değişik yoğunluklarda yüzen ve batan ürünler ağırlıkça ve mineralojik olarak tespit edilmeye çalışılmıştır. Yüzdürme-batırma deneyleri sonucu beslenene göre miktarca %7,24 olan %30,98 Fe ve %0,13 C içerikli bir ürün elde edilmiştir.
9. Uçucu külün hafif ürün olarak senosfer ve karbon, ağır ürün olarak da puzolan ve demir içermesinden dolayı, aslında boyuta göre ayırma yapan siklon cihazı ile

uçucu külden üst akımdan hafif ve alt akımdan da ağır ürünler alınmaya çalışılmıştır. Deney sonucu, üst akım değerleri karbon içeriği açısından yüksek çıkmasına rağmen, demir içeriği açısından bir değişim görülmemektedir. Üst akım sonuçlarına göre en iyi vorteks çapının 11,1 mm, apeks çapının ise 6,4 mm olduğu saptanmıştır. Bu şartlarda % 8,85 oranında % 4,56 C içerikli ürün alınmıştır. İçerik olarak bu değerden fazla olan ürünler olmasına karşın miktar olarak yetersiz olmaları seçim yapmamız açısından etkili olmuştur. Demir içeriğinin de pek değişmemesi ince olan demirlerin üst akıma kaçtığını teyid etmektedir. Bu sonuçlara bağlı olarak ilk önce ağır ve manyetik olan demirin manyetik zenginleştirme ile alınması ve daha sonra bu non manyetiğin siklona sokulması ile üst akımdan daha iyi karbon içerikli ürün alınması mümkündür.

10. Uçucu küllü oluşturan ürünlerden biri olan manyetik ürünün, tüvenan malzemedan yüksek verimle kazanılabilmesi için zenginleştirme boyut aralığı daraltılmış ve uçucu kül numunesi 106 mikron üstü ve 106 mikron altı olmak üzere iki boyuta ayrılmıştır. Ancak öncelikle boyuta göre uçucu külün demir içerikleri bulunmuş, bu sonuçlara göre de uçucu külün boyuta bağlı olarak içeriğinin pek değişmediği gözlemlenmiştir. Tüvenan külün manyetik içeriği ise 11,26 bulunmuştur. 106 mikron üzeri küle uygulanan zenginleştirme işlemi sonucunda, deneye göre miktarca %10,70 olan %35,71 Fe içerikli temiz bir demir konsantresi alınmıştır. 106 mikron altı küle uygulanan zenginleştirme işlemi sonucunda, deneye göre miktarca %7,98 olan %39,69 Fe içerikli ve miktarca %8,05 olan %30,13 Fe içerikli iki temiz konsantre alınmıştır. Bu üç ürünü beslenene göre hesapladığımızda beslenene göre miktarca %13,75 oranında %35,16 Fe içerikli bir ürün % 41,86 verimle alınmıştır. Yine diğer Manyetik ürünler ve araürünler birleştirildiğinde miktarca %14,21 oranında %14,99 Fe içerikli araürün ve miktarca %72,04 olan %6,37 Fe içerikli non manyetik ürünler elde edilmiştir. Bu sonuçlar ışığında, eğer zenginleştirmede yüksek alan şiddetli bir manyetik ayırıcısı kullanılır ve zenginleştirme değişkenleri optimize edilirse, bu kazanılan demir ürünün Fe içeriği %40'ı aşabilir.

11. 106 mikron üstü ve 106 mikron altı uçucu küle uygulanan manyetik zenginleştirme işleminin ardından nonmanyetik ürün mozley masasına beslenmiş

ve bu işlem ile ağır olarak puzolan ve hafif olarak da karbon ve senosfer alınmıştır. 106 mikron üzerine yapılan zenginleştirme sonucunda, ağır ürünleri birleştirdiğimizde, beslenene göre %63,65 oranında %1,44 C içerikli puzolan kazanılmıştır. Diğer araürün ve Hafif I ve Hafif II'yi birleştirdiğimizde, beslenene göre %36,35 oranında %3,82 C içerikli ürün, % 60,1 verimle alınmaktadır. 106 mikron altına yapılan zenginleştirme sonucunda ise, Ağır ürünleri birleştirdiğimizde, beslenene göre %40,39 oranında %0,78 C içerikli puzolan kazanılmıştır. Diğer üç ürünü, araürünü, Hafif I ve Hafif II'yi birleştirdiğimizde, beslenene göre %59,61 oranında %1,59 C içerikli ürün, % 75,4 verimle alınmaktadır. Deney sonuçlarının birleştirilmesiyle, %50,4 oranında %1,14 C içerikli puzolan ve %49,6 oranında %2,29 C içerikli bir ürün yaklaşık %80 verimle alınmıştır. Ağır ürünlerin karbon içeriklerinin %3'den düşük olması bu ürünlerin doğrudan çimento sanayiinde kullanılma imkanı vermektedir.

12. Yapılan tüm zenginleştirme deneyleri sonucunda, alınan verilere bağlı olarak en uygun akım şeması oluşturulmaya çalışılmış ve bu akım şemasının çalışabilirliğini saptamak amacıyla da tek tek deneyler yapılmıştır. Tüvenan malzemenin 212 mikrondan elenmesi ve ardından dekantasyon işlemi ile yüzende, miktarca % 1,01 olan %22,16 C içerikli, yaklaşık %78 içerikli senosfer kazanılmıştır. Bu iki ürünün yoğunluklara yakın olması ayrılmasını güçleştirmektedir. Ama bu iki ürün hava ile akışkan bir düşey bir yatakda, bu iki ürünün ayrılabilirdiği bir nokta bulunabilir. 212 mikron altı malzemenin de dekantasyon işlemine tabii tutularak, bu boyutta miktarca % 0,7 oranında %1,03 C içerikli veya yaklaşık %99 senosfer içerikli bir ürün kazanılmıştır. Dekantasyon işlemine tabii tutulan 212 altı malzemenin batan kısmına uygulanan manyetik zenginleştirme ile manyetik, araürün, şlam ve non manyetik ürünler kazanılmıştır. Bu işlemde, beslenene göre miktarca %14,50 olan %30,49 Fe içerikli bir manyetik ürün kazanılmıştır. Non manyetik ve şlam ürünler ile de puzolan kazanılmıştır. Hem puzolanın karbon içeriğinin düşürülmesi hem de puzolandaki karbonu kazanmak amacıyla bu iki ürüne siklon uygulanmış ve böylece karbon içeriği düşürülmüş puzolan ve karbon içeriği artırılmış ikinci ürün elde edilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] **Van der Vaart, R.**, 1996. Recycling Residual Fly Ash from Coal Burning Electric Generating Facilities, www adress [http:// pprc.pnl.gov/ pprc](http://pprc.pnl.gov/pprc).
- [2] **Özcan, M.**, 1997. Tunçbilek ve Seyitömer uçucu küllerinin beton özelliklerine etkisi ve etkinlik katsayılarının belirlenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [3] **Günel, G.**, 1996. Uçucu Külün Zemin Stabilizasyonunda Kullanılması, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [4] **TS- 639**, 1975. Uçucu Küller, TSE, Nisan.
- [5] **Yalçın, H. & Alaydın. S.**, 1967. Uçucu Külün Beton Katkı Malzemesi Olarak Kullanılması, D.S.İ. Rapor No: KR-386, Ankara.
- [6] **Tokyay, M. & Erdoğan. K.**, 1998. Türkiye Termik Santrallerinden Elde Edilen Uçucu Küllerin Karakterizasyonu, TCMB / ARGE Y. 98.3, Ağustos, Ankara 7-21.
- [7] **Kurama, H., Bilgiç, C. & Kaya, M.**, 1999. Tunçbilek Termik Santral Uçucu Külünün Endüstriyel Kullanım için Değerlendirilmesi, *Cevher Hazırlama Dergisi*, Sayı: 2.
- [8] **E.İ.E.**, 1979. Türkiye Uçucu küllerinin özellikleri ve kullanım olanakları, Genel yayın direktörlüğü, Yayın No.81-45, Ankara.
- [9] **Bayat, O.**, 1998. Characterisation of Turkish Fly Ashes, *Fuel*, Vol. 77, No. 9/10, pp. 1059-1066.
- [10] **Shcherban, S., Rayzman, V., and Pevzner, L.**, 1995. Technologies of Coal Fly Ash Processing into Metallurgical and Silicate Chemical Products, Paper Presented at 210th ACS National Meeting, August 20-25, Volume 40, No.4, pp.863-867, Chicago.

- [11] **Nurmagambetov Ch.N. and Scherban, S. A.**, 1970. About of Mechanism of the Ekibastuz ashes Benefication, Kazakh Polytechnical Institute. Proceedings of the Conference. Alma-Ata, pp.404-407.
- [12] **Raask, E.**, 1996. ASME Trans. J. Engng Power, 88, 40.
- [13] **Lane, R. O. and Best, J. F.**, 1982. Concrete Int.: Design and Construction, 4, 81.
- [14] **Fischer, G. L. and Natusch, D. F. S.**, 1979. Anal. Methods Coal Prod., 3, 489.
- [15] **Ford, C. T., Care, R. R., and Bosshart, R. E.**, 1976. Trace Element Removal Program, Report No. 3. Bituminous Coal Research Inc., Monroeville, PA.
- [16] **Bradsley, C. E., and Lancaster, J. D.**, 1960. Proceeding of Soil Sci. Soc. Amer., 24, 265.
- [17] **Bayat, O., and Toraman, O. Y.**, 1996. In Proc. 1st Int. Symp. On Mine, Environmental Engineering. Kütahya Dumlupınar and Brunell University, pp.222-229.
- [18] **Hepsen, T.**, 1976. *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [19] **Dreesen, D. R., Gladney, E. S., Owens, J. W., Perkins, B. L., Wienke, C. L., and Wangen, L. E.**, 1977. Environ. Sci. Technol., 11, 1017.
- [20] **Phung, H. T., Lung, L. J., and Page, A. L.**, 1976. in Proc. Symp. Augusta, GA; 1978. DOE Symposium Series 45, CONF-760429, pp. 504-515.
- [21] **Page, A. L., Elseewi, A. A. and Straughan, I. R.**, 1979. Residue Rev., 71, 83.
- [22] **Furr, A. K., Parkinsen, T. F., Hinrichs, R. A., Van Campen, D. R., Bache, C. A., Gutenmann, W. H., St John, L. E., Pakkala, I. S., and Lisk, D. J.**, 1977. Environ. Sci. Technol., 11, 1104.
- [23] **Erdoğan, T.Y.**, 1993. Atık Hammaddelerin İnşaat Endüstrisinde Kullanımı, Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Curufu, Endüstriyel Atıkların İnşaat

Sektöründeki Kullanılması Sempozyumu Bildiriler El Kitabı,
TMMOB İnş. Müh. Odası, pp.29-35,.Ankara.

- [24] **Gen. Board**, 1974. Sintered PFA as a light weight aggregate, PFA Data Book, Cent elec., England.
- [25] **TS- 639**, 1975. Uçucu küller standardı.
- [26] **He, J.Y., Scheetz, B.E., Roy, D.M.**, 1985. Comparison of tuff and fly ash, in blended cement, American Ceram. Soc., Vol 64, No.5, pp.707-711.
- [27] **Tanişan, H.H., Mete, Z.**, 1986. Seramik Teknolojisi ve Uygulaması, cilt1., Söğüt.
- [28] **Anderson, M.**, 1984. Processed high carbon PFA as a fuel additive in brickmaking, Inter. Con. On Ash Technology, pp563-566, 16-22 Sept., London.
- [29] **Anderson, M., Jackson, G.**, 1983. The beneficiation of power station coal and its use in heavy clay ceramics, Trans. J, Brit. Ceram. Soc., Vol 82, No.2, pp.50-55.
- [30] **Özkan, L.**, 1986. Isıl işlem uygulaması ile birlikte uçucu kül kullanımının beton özelliklerine etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [31] **E.İ.E.**, 1982. Türkiye uçucu külleri (üretim, kullanım alanları, sorunlar ve öneriler), Genel direktörlüğü Yayın No.82-19, Ankara.
- [32] **Willauer, C.S.**, Increasing carbon content of fly ash: consequences and recovery of lost value, The Proceedings of the 24. International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems, pp.195-200.
- [33] **Edil, B.T., Berthauex P.M.**, 1987. Fly ash as potential waste liner, geotechnical practice for waste disposal, 87, geotech. Spec. Publication No.13, Ed. R.D. Woods, ASCE NewYork, N.Y., pp.447-461.

- [34] **Ergüt, Ş.**, 1994. Seyitömer termik santrali atık uçucu küllerinin sinterleşme karakterizasyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [35] **Soong, Y., Gray, M.L.**, 1999. Beneficating value-added products from fly ash, 16. Annual International Pittsburgh Coal Conference, Pittsburgh.
- [36] **American Coal Ash Association**, www adress, <http://www.acaa-usa.org/>
- [37] **Ozasa, K., Kamjio, T., Owada, T.**, The physical and chemical characteristics of pulverized coal combustion ashes, The Proceedings of the 24. International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems, pp.171-181.
- [38] **ECOBA**, European association for use of the by-products of coal-fired power stations e.V.ECOBA e.V. Postfach 103932 D-45039 Essen.
- [39] **Algurkaplan, E.**, 1998. Atık depolanması ve endüstriyel atıklardan termik santral küllerinin maden ocaklarında depolanmasının incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [40] **Küçükbayrak, S., Kadoğlu, E., Kemal, M., Ekinci, E., Eskikaya, T., Atakül, H.**, 1990. Kömür, (Ed. O.Kural), Bölüm 3., 16., Güney Grafik, İstanbul.
- [41] **Kuular, E.**, 2000, Çayırhan Termik santrali küllerinin değerlendirilmesi, İ.T.Ü. Maden Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü Cevher Hazırlama Anabilim Dalı tez çalışması.
- [42] **Yılmaz, Ş.**, 1992. Seyitömer termik santrali atık uçucu küllerinin yapı malzemesi olarak değerlendirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [43] **Halverson, R.**, 1999. High-Performance Concrete Containin fly ash and natural puzolans, the magazine of American Concrete Institute.

- [44] **Gao, Y., Shim, H. S., Hurt, H. R., Sunberg, E. M., Yang, N. Y. C., 1997.**
Effect of Carbon on Air Entrainment in Fly Ash Concrete, The Role of
Soot And Carbon Black, Energy & Fuels, , Vol. II, 457-462.
- [45] **Honaker, R. Q., 1997.** Holistic Approach to Fly Ash: By-Products Recovery,
Final Technical Report, ICCI Project Number:96-1/3.1A-24
- [46] **Bayat, O. & Toraman, O. Y., 1996.** Separation of Coal Particle from Soma Fly
Ash by Flotation, Proceedings of The VI. IMPS-Changing Scopes in
Mineral Processing, Edited by Kemal, M., Arslan, & Canbazoglu, M.,
Turkey, 469-475.
- [47] **Ciccu, R. Ghiani, M. Peretti, R. Serici, A. & Zucca, A., 1997.** Electrostatic
Separation of Unburned Coal for Fly Ash Benefication, Proceedings
of XX. IMPC., Aachen Germany, 135-145.
- [48] **İbrahim, S. S., 1995.** Recovery of Soma Metallic Compounds from Fly Ashes
of Some Egyptian Power Stations, Treatment And Minimization of
Heavy Metal Containing Wastes, Edited by John P. Hager., February,
Las Vegas, 207-217.
- [49] **Eisele T.C., Kawatra, S. K., Banerje, D. D., 1997.** Utilization of Fly Ash as
An Inorganic Pellet Binder, Proceeding of XX IMPC, 21-26
September, Aachen Germany, 121-134.
- [50] **Honaker, R. Q., Mondal, K., Arnold, B., Shirey, G.,** Generation Products
from Coal Combustion Fly Ash Using Physical Separations,
Proceedings of The V. SWEMP Environmental Issues and Waste
Management in Energy and Mineral Production, Ed. By
Pasamehmetoğlu A.G., Özgenoğlu, A, Ankara, Turkey, 565-573.
- [51] **İlhan, T., 1995.** Sülfo-kalsik ve silika-kalsik uçucu külleri iyileştirme ve rolkrit
de kullanımları, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü,
İstanbul.
- [52] **Özden, N., 1983.** Nükleer çağın ilk 40 yılı, Cilt II, İ.T.Ü. Nükleer Enerji
Enstitüsü, İstanbul

- [53] **Swaine, D.J.**, 1990. Trace Elements in Coal, <http://energy.cr.usgs.gov>
- [54] **Özturan, T.**, 1991. Yüksek Mukavemetli Beton Üretiminde Mineral Katkı Maddelerinin Etkinliği, 2. Ulusal Beton Kongresi, s.280-290, İstanbul.
- [55] **ASTM C618-78**, 1978. Specification for fly ash & Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use As a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete.
- [56] **Biricik, H., Berktaş, İ., Aköz, F., Tulgar, A.N.**, 1996. Buğday Sapı Külünün Pozvolanik Özelliklerinin araştırması, 4.Ulusal Beton Kongresi, İstanbul.
- [57] **Wandell, T.**, 1996. Cenospheres: From Waste to Profits, The American Ceramic Society Bulletin, Volume 75, No.6, June.
- [58] **Combustion Products Manag**, <http://www.cpmash.com/Cenospheres.htm>
- [59] **Eyüp Sabah**, 1998. Çeşitli Amin türleri kullanılarak sepiyolit in adsorpsiyon mekanizmasının açıklanması, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [60] **Önal, G., ve Ateşok, G.**, 1994. Cevher Hazırlama El Kitabı, Yurt Madencilik Geliştirme Vakfı Yayınları, İstanbul.
- [61] **Önal, G.**, 1989. İ.T.Ü. Maden Fakültesi Maden Mühendisliği Cevher Hazırlama II Ders Kitabı.
- [62] **Emrullahoğlu, Ö.F.**, 1985. Cevher Hazırlamada Koyulaştırma, Klasifikasyon, Kömür Hazırlama ve Çözümlü Problemler, T.C. Anadolu Üniversitesi Yayınları, No:127, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Yayınları, No:28, Eskişehir.
- [63] **Gümüşkılıç, E.**, 1999. Alkali ortamda hidratlanarak aktiflenmiş uçucu kül- Ca(OH)_2 sorbentlerinin sülfatasyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [64] **Ho, C.S. and Shih, S.M.**, 1992. Ca(OH)_2 / Fly ash sorbents for SO_2 removal, Industrial Engineering Chemical Resources, 31, 1130-1135.

- [65] **Chu, P. And Rochelle, G.T.**, 1989. Removal of SO₂ and NO_x from stack gas by reaction with calcium hydroxide solids, JAPCA, 39, 175-179.
- [66] **Jozewicz, W. And Chang, J.C.S.**, 1988. Characterization of advanced sorbents for dry SO₂ control, Reactivity of solid, 6, 243-262.



ÖZGEÇMİŞ

Orhan ÖZDEMİR 1972 yılında İstanbul'da doğdu. 1989 yılında Gültepe Lisesinden mezun oldu. 1993 yılında İ.T.Ü. Maden Fakültesi Maden Mühendisliğini kazandı. 1998 yılında mezun olduktan sonra aynı yıl İ.T.Ü. Fen Bilimler Enstitüsünden Cevher ve Kömür Hazırlama Anabilim Dalında Yüksek Lisans Eğitimi almaya hak kazandı. 1998 yılında İ.T.Ü. Yabancı Diller Bölümünde İngilizce programa başladı. 1999 yılında İngilizce programını bitirdikten sonra yüksek lisans eğitimine başladı.

