



**Derleme
(Review)**

Uçucu Küllerin Zemin İyileştirmesinde Kullanılmasının İncelenmesi

Devrim Alkaya

Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Denizli

Özet

Türkiye'deki termik santrallerde yıllık toplam kömür ve linyit tüketimi yaklaşık 55 milyon ton olup 15 milyon ton civarında uçucu kül ortaya çıkmaktadır. Pek çok ülkede üretilen uçucu külün % 80'inin başta çimento üretimi olmak üzere inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanıldığı bilinirken ülkemizde çok az bir kısımdan yararlanılması hem çevre sorunları açısından, hem de ekonomik kayıp olması açısından sorunun çözümüne yönelik çalışmaları zorunlu kılmaktadır. Farklı mühendislik dallarında uçucu kül ile ilgili araştırmalar halen sürdürülürken Geoteknik Mühendisliği alanında da uçucu külün kullanılabilirliği araştırmaları tüm dünyada ve ülkemizde sürdürülmektedir. Uçucu külün, çimento üretiminin yanında, inşaat mühendisliğinde yapı malzemesi olarak kullanılması ve zemin iyileştirme malzemesi olarak kullanılmasının sağlanması ile uçucu külün depolanması sonucu oluşan çevresel problemler azalacak ve uçucu külün doğal malzemenin yerini almasıyla doğaya verilen zarar azaltılacaktır. Çalışmada uçucu küllerin mühendislik özellikleri konusunda farklı araştırmacılar tarafından yapılan çalışmaların sonuçları sunulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Uçucu kül, Stabilizasyon, Pozolan

The Investigation of Fly Ash Use in Soil Improvement

Abstract

The total coal and lignite consumption of the thermic power plants in Turkey is approximately 55 million tons and nearly 15 million tons of fly ash is produced. Eighty percent of fly ash produced in many countries is utilized in civil engineering applications, mainly cement production whereas only little amounts are used various application in Turkey. Studies for the utilization of fly ash in Turkey are necessary to reduce environmental problems and avoid economical loss caused by the disposal of fly ash. Investigations on utilization usability of fly ash in geotechnical engineering and in several other engineering fields are being carried out in all over the world as well as in our country. Use of fly ash in civil engineering as structural material, and in cement production and enabling its use as soil stabilization material will reduce the fly ash storage, this combined with replacement of natural material by fly ash will reduce the harm given to nature. In this study, results from various researches on engineering properties of fly ash are presented.

Keywords: Fly ash, Stabilization, Pozzolan

1.GİRİŞ

Uçucu kül, yakıt olarak kömür ve linyit kullanılan termik santrallerde, kömür kullanarak demir, çelik ve diğer metal üretimi yapan ısı ve kazan tesislerinde atık veya yan ürün olarak ortaya çıkmaktadır. Yan ürün olarak kullanılabilen bu atıkların büyük miktarlara ulaşması ile ekonomik ve çevresel etkilerden dolayı büyük sorunlar oluşturmaktadır.

Bu makaleye atıf yapmak için

Alkaya D., "Uçucu Küllerin Zemin İyileştirmesinde Kullanılmasının İncelenmesi", Electronic Journal of Construction Technologies, 2009, 5 (1) 61-72

How to cite this article

Alkaya D., "The Investigation of Fly Ash Use in Soil Improvement", Electronic Journal of Construction Technologies, 2009, 5 (1) 61-72

Türkiye’deki katı yakıtlı termik santrallerde yıllık toplam kömür ve linyit tüketimi yaklaşık 55 milyon ton olup yanma sonucu 15 milyon ton civarında uçucu kül oluşmaktadır (Alkaya, 2002). Belçika, Danimarka, Hong Kong, İtalya, Meksika ve Hollanda gibi ülkelerde üretilen uçucu külün % 80’inin başta çimento üretimi olmak üzere diğer mühendislik uygulamalarında kullanıldığı bilinirken, ülkemizde çok az bir bölümünden yararlanılması hem çevre sorunları açısından, hem de ekonomik kayıp olması açısından bu konuya yönelik çalışmaları zorunlu kılmaktadır.

Atıkların yan ürün ve dolgu malzemesi olarak inşaat sektöründe kullanılması; kil ve diğer doğal malzemenin kullanımının azaltılması nedeniyle doğanın korunmasına yardımcı olmaktadır. Ayrıca, kullanılabilir atıkların değerlendirilmesi ile depolama ve diğer nedenlerden oluşan çevre kirliliğinin azaltılması, farklı mühendislik uygulamalarına ekonomik çözüm olanağı sağlaması ve hammadde olarak kullanılmasının getireceği ek ekonomik faydalar sağlayacaktır .

2. KONU İLE İLGİLİ ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Uçucu kül ile ilgili çalışmalar incelendiğinde konunun çok geniş bir bilim alanını ilgilendirdiği görülmüştür. Konu farklı araştırmacılar tarafından aşağıdaki alt başlıklarda incelenmiştir.

- Uçucu külün oluşturduğu çevresel etki,
- Uçucu külün fiziksel ve kimyasal yapısı,
- Uçucu külün çimento üretimi ve yapı malzemesi olarak kullanılması,
- Uçucu külün zemin iyileştirme malzemesi olarak kullanılması.

2.1. Uygulamaya Yönelik Çalışmalar

Türkiye’de uçucu külle ilgili ilk önemli çalışmalar 1964 yılında DSİ Genel Müdürlüğü bünyesinde yapılmıştır. Buradaki çalışmalarda uçucu külün çimento ve betonda katkı maddesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu verilerle uçucu kül Gökçekaya barajı inşaatında katkı maddesi olarak başarıyla kullanılmıştır (Alataş, 1996). 1968’de TSE uçucu külün çimento ve betonda katkı maddesi olarak kullanılmasına ilişkin standart yayınlamıştır (Anon., 1975).

Atanur (1971) tarafından “Uçucu Küllerin Kimyasal ve Fiziksel Vasıfları ve Yapı Malzemesi Olarak Kullanılması” konulu çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda; İzmir-Turgutlu Nif dere ocağı malzemesi, Kütahya-Çamlık malzemesi, Soma-Bergama dere ocağı malzemesi ve Bursa-Dede ocağı malzemesinin, stabilizasyonunda uçucu kül kullanılması ve yol yapımında kullanımı sağlanmıştır. 1982 yılında EİE’nin koordinatörlüğünde, DSİ, TCK, Çitosan ve üniversitelerin temsilcilerinden oluşan bir çalışma grubu, Türkiye uçucu küllerin üretimi, kullanım olanakları, karşılaşılan sorunlar ve çözüm önerileri hakkında kapsamlı rapor hazırlamışlardır. Rapor, “Türkiye Uçucu Küllerinin Özellikleri ve Kullanım Özellikleri, E.İ.E Genel Yayın Direktörlüğü, Ankara, 1979” adıyla sunulmuştur (Anon., 1979).

Erdoğan (1993), “Atık Hammaddelerin İnşaat Endüstrisinde kullanımı, Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu” konulu çalışmalarında konuya yapı malzemesi açısından yaklaşmışlardır.

2. 2. Bilimsel Çalışmalar

Ortadoğu Teknik Üniversitesinde “Uçucu Külün Yol Zemini Stabilizasyon Malzemesi Olarak Kullanılabilirliği”, (Elverici, 1966), “Uçucu Kül-Kireç Karışımlarının Yapı Malzemesi Olarak Kullanımı”, (Büyüköner, 1989), “Türkiye’de Üretilen Uçucu Küllerin Geoteknik Özellikleri”, (Uysal, 1987), “Kohezyonlu Zeminlerin Uçucu Kül ile Stabilizasyonu”, (Savran, 1988), “Uçucu Küllerin Geoteknik Uygulamalarda Kullanımı”, (Wasti, 1990), “Türkiye Termik Santrallerinden Çıkan Uçucu Küllerin Kimyasal ve Mineralojik Analizi ve Betonda Uçucu Kül Kullanımı”, (Tokyay, 1989; 1993) konulu çalışmalar yapılmıştır.

İstanbul Teknik Üniversitesinde, “Seyitömer Termik Santral Atık Uçucu Küllerinin Sinterleşme Karakterizasyonu”, (Ergüt, 1994), “Afşin Elbistan Termik Santrali Uçucu Küllerinin Yapı Malzemesi

olarak Kullanılması”, (Toros, 1987), “Seyitömer Termik Santral Atık Uçucu Küllerinin Yapı Malzemesi Olarak Değerlendirilmesi”, (Yılmaz, 1992), “Ağırlık Barajlarında Uçucu Küllü Rolkrit Kullanımı”, (Akman, 1993), “Sülfo Kalsik Uçucu Küller İyileştirme ve Rolkritte Kullanımları”, (İlhan, 1995), “Uçucu Külün Zemin Stabilizasyonunda Kullanılması”, (Günel, 1996), “Uçucu Külün Geoteknikte Kullanılması”, (Aksoy, 1992), “Uçucu Kül ile Zemin Stabilizasyonu”, (Tan ve İyisan, 1996), “Uçucu Küllerin Siltli Zeminlerin Kayma Mukavemetine Etkisi”, (Erşan, 1996), “Enjeksiyon ile Granüler Zeminlerin Geoteknik Özelliklerinin İyileştirilmesi”,(Akbulut, 1999), “Uçucu Kül-Çimento-Köpük Karışımının Hafif Dolgu Malzemesi Olarak Geoteknik Özellikleri”, (Haşal, 2000) konulu çalışmaları yapmışlardır.

Karadeniz Teknik Üniversitesinde, “Doğu Karadeniz Bölgesi Topraklarının Çimento ve Kireçle Stabilizasyonu”, (Balta, 1984), “Zeminlerin Kireç ve Çimento Katkısı ile Stabilizasyonu”, (Tüdeş, 1996), konulu çalışmasında Doğu Karadeniz zeminlerinin özelliklerini ve stabilizasyon olanaklarını incelemiştir.

Boğaziçi Üniversitesinde “Yol Kaplamalarının Özelliklerine Lastik, Karbon Karası ve Uçucu Kül Etkisi”, (Hamamcı, 1991), “Uçucu Külün İnşaat Mühendisliğinde Bazı Kullanım Olanakları”, (Baykal ve diğ.,1996), “Geçirimsiz Toprak Perde Uygulamasında Lastik Katkılı Uçucu Külün Permeabilite ve Mukavemeti”, (Köprülü, 1991), “Yol Güvenlik Bariyerlerinde Sıkıştırılmış Uçucu Kül Karışımlarının Kullanılması”, (Mehmetoğlu, 1994), “İnşaat Mühendisliğinde Akıcı Dolgu Uygulamaları”, (Fincan, 1996), konulu çalışmalarda yoğun olarak endüstriyel atık olarak uçucu külün inşaat sektöründe kullanımı incelenmiştir.

Fırat Üniversitesinde “Afşin- Elbistan Termik santrali Uçucu Külünün Yol Stabilizasyonunda Çeşitli Malzemelerle Birlikte Kullanılması”, (Alataş, 1996) konulu çalışma yapılmıştır.

3. AMAÇ VE KAPSAM

Bu çalışma ile mühendislik uygulamalarında, uçucu külün zemin iyileştirmesi, dolgular ve diğer zemin yapılarında kullanılmasında getireceği yenilikler ve mühendislik özellikleri incelenmiştir. Böylelikle daha az çimento veya diğer katkı maddeleri kullanılarak ülke ekonomisine fayda sağlanması amaçlanmaktadır. Doğal malzemelerin daha az kullanılması ile daha az doğa tahribi sağlanacak ve zaman zaman termik santralin durmasına kadar varan depolama sorunları ile atık olarak büyük çevre sorunu oluşturan uçucu külün kullanılmasıyla çevre açısından da büyük fayda sağlanacaktır.

Otoyollar, toprak dolgu barajlar gibi büyük hacimli dolgu gerektiren yapılarda dolgu malzemesi olarak kullanılan zemin, genellikle dolgu standart özelliklerini sağlayacak kalitede olmamaktadır. Bu nedenle zemin iyileştirme teknikleri kullanılarak dolgu malzemesi standartlara uygun hale getirilmektedir. Birçok durumda yapı temel zeminlerinde de iyileştirmeye ihtiyaç duyulmaktadır. Stabilizasyon, zemin iyileştirme yöntemleri içinde geniş bir şekilde kullanılmaktadır. Çalışmada; uçucu kül ile stabilizasyon çalışması yapmak için gerekli olan uçucu küllerin mühendislik özellikleri araştırılmıştır.

4. PUZOLANLAR

Puzolanlar çok yüksek sıcaklıkta ergime durumuna gelmiş silikatlar ve alimino silikatların ani soğumaları sonucu amorf bir yapıya dönüşmesi ve puzolanik aktivite kazanması sonucu oluşmuşlardır (Akman ve Esenli, 1992). ASTM C618’ e göre kendi kendine bağlayıcılık özelliği çok az olan veya hiç olmayan, ancak uygun su içeriğinde ve normal ortam sıcaklığında kireç ile kimyasal reaksiyona girip,

bağlayıcı özelliği olan ürünler açığa çıkaran, ince toz halindeki silisli ve/veya silisli ve alüminli maddelere puzolan denilmektedir. Puzolanlar doğal ve yapay olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır.

Doğal Puzolanlar :

1. Volkanik curuflar
2. Volkanik tüfler
3. Diatome toprağı
4. Riyolitik ponza taşı

Yapay Puzolanlar :

1. Uçucu kül
2. Yüksek fırın cürüfu
3. Öğütölmüş pişmiş kil
4. Silis dumanı
5. Pirinç kapçığı külü
6. Demirli olmayan cüruf

Puzolanik özelliklere sahip birçok doğal ve yapay madde; beton teknolojisinde betonun çeşitli fiziksel, mekanik ve durabilite özelliklerini iyileştirmek ve ekonomi sağlamak, zemin mühendisliğinde ise iyileştirme amaçlı katkı maddesi olarak kullanılmaktadır.

Puzolanlar, fiziksel, minerolojik ve kimyasal açıdan benzerlik gösterse de kimyasal bileşimleri açısından karşılaştırıldığında puzolanlar silikat (SiO_2) esaslı iken, portlant çimentosu CaO esaslıdır. Bu nedenle puzolanların büyük kısmı kendi başına bağlayıcı özelliğe sahip değildir. Bu nedenlerle ikincil bağlayıcı maddeler olarak anılırlar.

5. UÇUCU KÜLLER

Uçucu kül terimi 1930'lu yıllarda elektrik enerjisi kullanan sanayinin gelişmesi ile yaygınlaşmaya başlamıştır. Uçucu külün kullanılması ile ilk kapsamlı bilgi 1937' de Kuzey Amerika'da bulunmaktadır. 1970'li yıllarda enerji maliyetindeki hızlı artışa paralel olarak çimentonun da önemli derecede pahalalanmasıyla uçucu kül tüm dünya genelinde kabul görmeye başlamıştır (Gökçe, 1995).

Termik santrallerde elektrik enerjisi üretmek amacıyla yakıt olarak kullanılan öğütölmüş kömür, yanma sonucu atık olarak farklı tiplerde kül ve cüruf ortaya çıkarmaktadır. Uçucu küllerin yanı sıra, taban külü olarak adlandırılan, gazlarla birlikte yükselemeyen ve yanma sonucu fırın tabanında biriken küllerle birlikte bir miktar da cüruf oluşabilmektedir. Ortaya çıkan atık malzemenin yaklaşık %75-80'ini uçucu küller oluşturmaktadır.

Öğütölmüş kömür yakan termik santrallerde 0.09 mm inceliğe kadar öğütölen kömürler termik santralin tipine göre 1100-1600 °C'de yakılan kömürlerin % 10-20'si kazan altına düşerek su ile uzaklaştırılır. Buna kazan altı külü denir. Kazan altı külleri kazanın tipine bağlı olarak kuru ve ıslak kazan altı külü olarak iki grupta toplanır.

1. Kuru kazan altı külü: Genellikle 19-75 mm arasında değişen dane çapıyla iyi derecelenmiş bir agregadır. Gözenekli bir yapıya sahip olduğundan kompaksiyon ve yüklemeye maruz kaldıklarında dağılmaya elverişlidir. Bazı yoğun ergimiş daneler içermelerine rağmen, özgöl ağırlıkları $20.8 - 27.3 \text{ kN/m}^3$ arasında değişir. Kuru kazan altı küllerindeki ana bileşenler SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 tür. Bu bileşenlerin oranı yakılan kömürün cinsine bağlı olarak değişir.

2. Islak kazan altı külü: Maksimum dane çapı kuru olanlardan daha küçüktür. Daneler çok sert, kırılğan ve siyah renklidir. Özgöl ağırlıkları demiroksit (Fe_2O_3) içeriğine bağlı olarak 26-38,5 kN/m³ arasında değişir. Bileşimi kuru kazan altı külleri ile aynı olup, oranları kömüre bağlıdır.

İki şekilde bulunan kazan altı külünün her biri farklı fiziksel ve kimyasal dolayısı ile farklı mühendislik özelliklerine sahiptirler.

Ortaya çıkan bu atık malzemelerden en önemlisi, yanma sonucu ortaya çıkan gazlarla birlikte taşınan, çok ince kül parçacıklardır. Uçucu kül toz halinde veya öğütölmüş, taş kömürü veya linyit kömürünün yüksek sıcaklıklarda yanması sonucu oluşan ve baca gazları ile süröklenen silis ve alimünosilisli toz halindeki yanma kalıntısıdır.

Oluşan baca gazları ile birlikte taşınan çok hafif uçucu küller bacadan önce bulunan elektrofiltre veya siklon adı verilen toz tutucularında, elektrostatik veya mekanik yöntemlerle tutulurlar. Bu küller daha sonra toz tutucuların alt kısmında bulunan haznelerde biriktirilir ve düzenli olarak santral dışına alınırlar.

5.1. Uçucu Küllerin Sınıflandırılması

Uçucu küller termik santralde kullanılan yakıtta göre iki ana gruba ayrılırlar ;

1. Taş kömürü uçucu külleri
2. Linyit uçucu külleri

Kimyasal yapıları bakımından uçucu küller 4 ana gruba ayrılırlar (Toros, 1987)

1. Silikat Alüminat Esaslı Uçucu Küller: Bileşimlerinin büyük bir kısmını kuvars (SiO_2) ve bir miktar alüminat Al_2O_3 meydana getirmektedir. Genellikle taş kömürü uçucu külleri bu yapıdadır. İçerdikleri alkali ve toprak alkali element oksitleri nedeni ile çok ince taneli ve camsı yapıya sahiptirler.
2. Silikat-Kalsit Esaslı Uçucu Küller : Yapılarındaki ana oksitler silikat (SiO_2) ve kalsittir (CaO). Bazı durumlarda ek kireç kullanımına gerek kalmaksızın kendi kendilerine bir bağlayıcılık oluştururlar. Zayıf bir bağlayıcı özellikleri vardır.
3. Sülfö- Kalsit Esaslı Uçucu Küller: Yapılarının büyük bir bölümü kükört trioksit (SO_3) ve kalsitten (CaO) meydana gelmiştir. Sulu ortamda kendiliklerinden sertleşebilirler. Bu sınıfa genellikle linyit uçucu külleri girmektedir.
4. Sınıflandırılmayan Uçucu Küller: Termik santrallerdeki yakma sisteminin homojen olmamasından kaynaklanan ve belirli bir kimyasal yapıya sahip olmayan küllerdir.

Uçucu küllerin sınıflandırılmasında genel olarak ASTM sınıflandırılmasından faydalanılmaktadır. ASTM C618'e göre uçucu küller F ve C olarak iki genel sınıfa ayrılırlar. F sınıfı uçucu küller taşkömürünün yakılması ile elde edilirler. F tipi uçucu küller % 10'dan daha az CaO içerdikleri için düşük kireç külü olarak da isimlendirilirler. Bu küllerin yapılarında serbest kireç (CaO) bulunmaz. Kendi kendine sertleşme özelliğine sahip değildirler. Sulu ortamda kireçle reaksiyona girerek sertleşme gösterirler. Puzolanik reaksiyonları (çimentolaşma) normal koşullarda çok yavaş olur.

C sınıfı uçucu küller linyit kömürlerinden elde edilmektedir. Ayrıca içerisinde % 10'dan daha fazla CaO bulunduran küller yüksek kireçli uçucu kül olarak tanımlanmaktadır. Yapılarında % 1-3 arasında değişen serbest kireç bulunur. C sınıfı uçucu küller serbest kireç nedeniyle kendi kendine çimentolaşma özelliğine sahiptir.

Türk Standartları Enstitüsü tarafından uçucu küller ile ilgili olarak hazırlanmış iki ayrı standart mevcuttur. Bunlardan TS 639 uçucu küllerin tanımı, sınıflandırması, özellikleri, deney yöntemleri ve kalite kontrollerini tayin ederken, TS 640 ise uçucu küllü çimentoların fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri ve deney yöntemleri ile ilgilidir. Türkiye’de çok miktarda bulunan yüksek kireçli uçucu küller ile ilgili TS 639’da herhangi bir hüküm bulunmamaktadır. Tablo 1’de ASTM C618 ve TS 639 sınırları gösterilmiştir.

Tablo 1. ASTM C618 ve TS 639 Puzolan Olarak Kullanılabilirlik Sınırları

Kimyasal Bileşik	ASTM C618 (%)		TS 639 (%)
	F	C	
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	en az 70	en az 50	en az % 70
MgO	en çok 5	en çok 5	en çok % 5
(SO ₃)	en çok 5	en çok 5	en çok % 5
Na ₂ O+K ₂ O	en çok 1.5	en çok 1.5	-
Nem	en çok 3	en çok 3	en çok 3
Yanma Kaybı	en çok 12	en çok 6	en çok 10

5.2. Uçucu Küllerin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Uçucu külün fiziksel ve kimyasal özellikleri; kömür cinsi, yanma sistemi, filtre sistemi gibi birçok etkene bağlıdır. Kömür kaynağı, genel olarak, hem ortaya çıkacak olan uçucu kül miktarına etki etmekte hem de kömürün kimyasal bileşimi içerisinde yer alan inorganik maddeler ile oluşacak külün kimyasal bileşimini belirlemektedir.

Uçucu küller genel olarak gri olmalarına karşın, içinde yanmamış karbon miktarının fazla olması durumunda, daha koyu renkli olabilmektedirler. Tipik olarak küresel şekilde olan uçucu kül parçacıklarının çapları 1-150 µm arasında değişim göstermekle birlikte % 75’den fazlasının çapı 45 µm’den daha küçüktür. Bu küresel parçacıkların içi dolu veya boş olabilmektedir. İçeri boş olan kül parçacıkları toplam külün ağırlık olarak % 5’ini, hacim olarak ise yaklaşık % 20’sini oluşturmaktadır. Uçucu küllerin yoğunlukları 19.5-27.0 kN/m³ mertebesindedir. Uçucu küller, doğal zeminlerle karşılaştırıldığında daha düşük özgül ağırlık değerlerine sahip, silt boyutunda oldukça üniform malzemelerdir (Toros, 1987; Uysal,1987; Erşan, 1996).

5.3. Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri

5.3.1. Görünüş

Uçucu küllerin renkleri açık krem renginden koyu kahverengiye kadar değişiklik gösterir. Renk yanmamış kömür oranından, demirce zengin danelerden ve nemden etkilenir (Joshi ve Nagaraj,1987). Linyit uçucu külü taşkömürü uçucu külünden daha koyu renktedir. İyi yanmış bir uçucu kül, iyi yanmamış bir uçucu külden daha açık bir renge sahiptir. İyi yanmamış küle koyu rengi veren yanmamış karbon danecikleridir. Uçucu küller çok ince daneli, dokunulduğunda yumuşak bir malzemedir. Mikroskopta incelendiklerinde süngerimsi boşluklu ve boşluksuz küresel daneciklerden meydana geldiği görülür (Erşan, 1996).

5.3.2. Dane Boyutu

Uçucu küllerin dane boyutu kullanılan kömürün cinsine ve öğütülme derecesine bağlıdır. Taşkömürü uçucu külleri linyit küllerinden daha incedir. Dane inceliğine etki eden diğer bir faktör, küllerin bacada ileri tekniklerle tutulmasıdır. Bacadan toz olarak kaçan kısım azaldıkça dane inceliği artar. Elektrofiltrelerde tutulan uçucu küller siklonlarda tutulandan daha ince danelidir. Uçucu küller çimentoya göre daha ince ve özgül yüzeyleri daha büyüktür (Erşan, 1996; Toros, 1987).

5.3.3. Yoğunluk

Çimentodan daha düşük yoğunluğa sahiptirler. Uçucu külün yoğunluğu silikat, alüminat, demir ve yanmamış karbon miktarı ile değişmektedir. Yüksek demir içeriği uçucu külün yoğunluğunun daha yüksek olmasına, yüksek miktarlarda alüminat, silikat ve yanmamış karbon ise, daha düşük bir yoğunluğa neden olur. Yoğunluk külün mineralojik yapısına göre de değişmektedir. İçi dolu küresel tanelerden oluşan uçucu küllerin yoğunlukları yüksek iken, süngerimsi tanelerden oluşanlarda daha düşüktür (Anon., 1979; Toros, 1987; Ergüt, 1994).

5.3.4. Karbon Miktarı

İyi yanma olan termik santrallerde yanmamış karbon miktarı çok düşük olmaktadır. Yeni tip santrallerde % 3' ün altında kalmaktadır. Uçucu külün karbon miktarı yanma kaybından az olmalıdır. Yanma kaybı değeri amprik olarak 0.9 ile çarpılarak yaklaşık yanmamış karbon miktarı bulunabilmektedir (Yılmaz, 1992).

Uçucu küllerdeki karbon, yanıcı olan tanelerin üzerinde ince karbon tabakası veya ayrı taneler olarak bulunmaktadır. Uçucu küllerdeki karbon tanelerinin tane boyutu çoğu zaman diğer tanelerden daha büyüktür (Atanur, 1971).

5. 4. Uçucu Küllerin Kimyasal Özellikleri

Uçucu küllerin kimyasal özellikleri, suda çözünebilirlik ve asitlerin etkisi olarak ikiye ayrılmaktadır.

1. Suda Çözünebilirlik : Uçucu küller % 2-3 oranında suda çözünebilirler. Çözelti kalsiyum ve sülfat bileşenleri nedeni ile oluşmaktadır. Uçucu küller saf su içersine bırakıldıklarında birkaç saat içinde içlerindeki sülfatın tamamı çözünebilir. SiO_2 , Al_2O_3 , K_2O , MgO , Na_2O ve Fe_2O_3 suda çok az çözünebilirler. Sıcaklık arttıkça çözünebilirlik artar. Puzolanik özellik istenen karışımlarda ve iyi bir uçucu külde suda çözünebilir maddeler az olmalıdır (Toros, 1987).
2. Asitlerin Etkisi : Uçucu küllere asitlerin etkisi çok azdır. Seyreltik asit içersinde uçucu küllerin çözünebilirliği en fazla % 15' dir. Ancak bu miktar küllerin kimyasal ve mineralojik yapısına bağlı olarak değişebilmektedir.

5. 5. Uçucu Küllerin Kimyasal Yapıları

Uçucu külün kimyasal bileşimi incelendiğinde, % 85 veya daha fazla oranda SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ve MgO bileşiklerinden oluştuğu görülmektedir. Kullanılan kömüre ve yanma sıcaklığına bağlı olarak bileşikler değişiklik göstermektedir. Kullanılan kömüre bağlı olarak bazı tiplerinde yüksek miktarda CaO bulunabilmektedir. Tablo 2'de uçucu kül, taban külü ve çimentonun kimyasal bileşimleri karşılaştırılmalı olarak, Tablo 3'de sınıflandırılan uçucu küllerin kimyasal yapıları verilmiştir.

5.6. Uçucu Küllerin Mineralojik Özellikleri

Uçucu küllerin kimyasal ve mineralojik bileşimleri arasında doğrudan bir ilişki bulunmamasına karşın, mevcut ulusal ve uluslararası standartlarda yalnızca kimyasal oksit analizi kullanılarak bu malzemelerin kullanılabilirliği belirlenmektedir. Oysa uçucu küllerin reaktivitesi mineralojik yapılarıyla ilgilidir (Tokuy, 1993).

Uçucu küller gözenekli veya dolu camsı küresel daneler ile yanmamış mineralleri içeren süngerimsi ve köşeli aglomere danelerden meydana gelmektedir. Uçucu küllerde en fazla bulunan mineraller silikat

(SiO₂), mullit (3Al₂O₃.2SiO₂), hematit (Fe₂O₃), manyetit (Fe₃O₄), kalsit (CaCO₃) ve gibsitir (anhidrit(CaSO₄)). Uçucu küllerin bir kısmı SiO₂ ve Al₂O₃' den meydana gelirken, diğer bir kısmı alkali elementlerin özellikle SiO₂ ve Al₂O₃ ile yaptıkları camı bileşiklerden oluşmaktadır (Anon., 1979). Mineralojik analizlerde genellikle uçucu kül içerisindeki silisyumun bir kısmının kuvars kristalleri halinde diğer bir kısmının ise alüminat ile birleşerek mullit, geri kalanının ise camı yapıda olduğu saptanmıştır. Demirin kısmen manyetit ve hematit bileşiminde geri kalanının ise camı yapıda olduğu görülmüştür. Uçucu küllerin % 66-88'i camı yapıda, % 70-88' i SiO₂ ve Al₂O₃ geri kalan kısmı ise demir, kalsiyum, magnezyum, sodyum, potasyum ve titanyum'dan meydana gelmektedir (Anon., 1979; Joshi and Nagaraj, 1987).

Tablo 2. Uçucu Kül, Taban Külü ve Portland Çimentonun Kimyasal Kompozisyonları (Alataş, 1996)

Kimyasal Kompozisyon	Uçucu Kül (%)	Taban Külü (%)	Portl. Çimentosu(%)
Alüminyumoksit (Al ₂ O ₃)	20-40	10-37	4-7
Demirdioksit (Fe ₂ O ₃)	4-24	5-37	1-4
Kalsiyumoksit (CaO)	2-27	0-22	61-67
Magnezyumoksit (MgO)	1-6	0-4	0.5-3
Silisyumoksit (SiO ₂)	34-58	21-60	19-23
Sülfat (SO ₃)	0.5-4	-	1-4

Tablo 3. Sınıflandırılan Uçucu Küllerin Kimyasal Yapıları (Erşan, 1996; Haşal, 2000)

ASTM Sınıflandırması	F –tipi			C-tipi			Diğerleri
	F _f	F _c	F _a	C _{1a}	C _{2a}	C _{1f}	
Tanımlama	Siliko-alüminöz			Siliko-kalsik			Sülfo-kalsik
Kimyasal Yapı	Siliko-alüminöz			Siliko-kalsik			Sülfo-kalsik
SiO ₂	59.4	41.4	47.4	36.2	37.9	24.0	13.5
Al ₂ O ₃	22.4	24.8	21.3	17.4	18.9	18.5	5.5
Fe ₂ O ₃	8.9	18.6	6.2	6.4	6.5	17.0	3.5
CaO	2.6	2.5	16.6	26.5	24.9	24.0	59.0
Na ₂ O	2.2	1.5	0.4	2.2	0.8	0.8	-
MgO	1.3	0.7	4.7	6.6	6.6	1.0	1.8
SO ₃	2.4	1.2	1.5	2.8	3.0	8.0	15.1
Yanma kaybı	2.0	9.5	15.0	0.6	0.8	-	-
Serbest kireç (Cao)	-	-	-	2.8	2.2	-	28.0

5.7. Uçucu Küllerin Puzolanik Özellikleri

Uçucu küller kireç ve su ile karıştırıldığında belirli bir süre sonunda sertleşme ve dayanım kazanır. Uçucu küllerde puzolanik özelliğin esas olan bu dayanım kazanma özelliği oldukça yavaş olarak ortaya çıkar. Artan süreyle birlikte uçucu küllerin dayanımı artar.

Uçucu küller çoğunlukla kendi başlarına bağlayıcı özelliği olmayan ancak sulu ortamda kireçle birleştirildiklerinde bağlayıcılık özelliği kazanan puzolanik malzemelerdir. Kireç ve su ile karıştırıldıktan sonra artan süre ile birlikte uçucu küllerin puzolanik özellikleri artmaktadır. Ayrıca CaO miktarı yüksek uçucu küller daha iyi puzolanik özellik göstermektedir (Anon., 1979).

Oda sıcaklığında kül-kireç-kumdan oluşan harç numuneleri belirli bir süre sonunda mekanik dayanım kazanmaya başlarlar. Harçlar en yüksek mukavemetlerine 5-6 yıl sonunda ulaşmaktadır. Uçucu küldeki puzolanik etki külün bileşimine ve inceliğine bağlı olarak değişmektedir. Puzolanik özelliği etkileyen faktörleri şöyle sıralayabiliriz (Erdoğan, 1995).

- Uçucu kül içerisindeki SiO₂ ve Al₂O₃ miktarının artması ve bu bileşiklerin amorf yapıda olması puzolanik etkiyi artırır.
- Kül içinde bulunan CaO, SO₃ ve alkali oksitlerin, puzolanik özelliği ne şekilde etkilediği tam olarak bilinmemektedir.
- Külde yanmamış karbon miktarının artması puzolanik özelliğin azalmasına neden olur. Uçucu küldeki karbon boşluklu bir yapıya sahiptir. Dayanımı düşüktür ve karışım su ihtiyacını artırır.
- Uçucu küllerin puzolanik özelliği ve mekanik dayanım incelleme birlikte artmaktadır.

Uçucu külün puzolanik malzeme olarak kullanılabilirliği, fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlıdır (Tablo 4). Oluşan değişiklikler sadece uçucu külü meydana getiren mineral bileşimin değişen miktarından değil, kömürün yakıldığı kazanın çalışma durumundan, kömürün yanmadan önceki öğütölme inceliğinden ve hava kirliliği kontrolü için kömürle karıştırılan katkı maddelerinden de meydana gelir. Küldeki bu değişiklik puzolanik aktiviteyi etkiler (Joshi and Nagaraj, 1987).

Puzolanik aktiviteye ek olarak birçok linyit uçucu külleri kendi kendine sertleşme özelliğine de sahiptirler. Bu küller su ile karıştırılıp kompaksiyona tabi tutulduklarında çimentolaşmadan dolayı sertleşirler. Genel olarak bu etki, küldeki serbest kirece ve suda çözünebilen maddelere bağlıdır (Joshi and Nagaraj, 1987).

Su ile karıştırılan kül ve kireç karışımı belirli bir süre sonunda mukavemet kazanır. Küldeki bu mukavemet kazanma özelliği oldukça yavaş ortaya çıkar. Başka bir deyişle çimentolaşma özelliğinden tam yararlanmak için daha uzun bir kür süresine ihtiyaç vardır.

ASTM C618 puzolanların kimyasal bileşiminde $[(SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3) \geq 0.70]$ olmasını öngörmektedir. Büyük oranda amorf olan bu oksitler normal sıcaklıkta sönmüş kireç ($Ca(OH)_2$) ile kolayca kimyasal tepkimeye girip bağlayıcı bir yapı oluşturur.

5.8. Türkiye Uçucu Külleri

Türkiye’de kurulu bulunan termik santrallerde oluşan uçucu küller genel olarak C sınıfı uçucu küllerdir. (Tokyay, 1993) Ayrıca birçoğu da yüksek kireçli uçucu kül sınıfında yani $CaO > \% 10$ üzerinde yer almaktadır. Tablo 5’de bazı Türkiye uçucu küllerinin kimyasal bileşimleri, Tablo 6’da fiziksel özellikleri verilmiştir. Tablo 5’den anlaşılacağı üzere Afşin-Elbistan uçucu külü ASTM ve TS 639 sınırlarını sağlayamazken, Seyitömer, Soma-B ve Yatağan uçucu külleri yüksek kireçli uçucu kül özelliklerini sağlamaktadır.

6. SONUÇ

Termik santrallerde ortaya çıkan uçucu kül miktarının çok büyük boyutlara ulaşması ile uçucu külü, atık olarak nitelendirerek depolamak yerine, yan ürün olarak değerlendirebilmenin yollarını aramak zorunluluk haline gelmiştir. Uçucu külün özelliklerinin, zemin iyileştirme malzemesi olarak kullanımına olanak sağlanması ile nitelikleri yetersiz zeminin ekonomik olarak iyileştirmede kullanılması ve diğer kullanım alanları belirlenerek kullanımın arttırılması depolanma ile oluşan çevre sorunlarını azaltmanın yanında termik santralin etkinliğini arttıracaktır.

Dolgu olarak kullanılan zeminlerin iyileştirilmesinde uçucu kül kullanılması uzun yıllardır dünyada araştırma konusu olmuş, ölkemizde yerel bazı uygulamaların var olmasına rağmen yaygınlaşma sağlanamamıştır. Çalışmada, ölkemizdeki uçucu küllerin özellikleri; şimdiye kadar yapılan çalışmalardan derlenerek, zemin iyileştirme, dolgular ve diğer zemin yapılarında kullanımının artmasının sağlanması amaçlanmıştır. Böylelikle daha az çimento veya diğer katkı maddeleri kullanılarak ilk olarak ölk ekonomisine fayda sağlanacaktır. Doğal malzemelerin daha az kullanılması ile daha az doğa tahribi sağlanacak ve çevre sorunlarının çözümlüne katkı sağlayacaktır.

Tablo 4. F ve C tipi Uçucu küllerin Fiziksel, Kimyasal ve Puzolanik Özellikleri (Çakır, 1999; Haşal, 2000)

ASTM Sınıflandırması	F -tipi			C-tipi			Diğerleri
	F _f	F _c	F _a	C _{1a}	C _{2a}	C _{1f}	
Tanımlama	Siliko-alüminöz			Siliko-kalsik			Sülfo-kalsik
Kimyasal Yapı	SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃						
	90.7	84.8	74.9	60	63.9	59.5	22.5
Özgül Ağ. (kN/m ³)	21.8	24.2	24.6	26.9	26.8	27.5	31.1
Özgül Yüz. (cm ³ /gr)	3600	3750	2600	2900	3200	7200	3650
D50 µ m	15	12	18	11	11	16	16
Çimentolaşma özellikleri	Hidrolik ortamda tek başına katılaşmaz		Su ile çok zayıf bir katılaşma olur	Az miktarda su ile bağlayıcıdır		Tek başlarına su ile zayıf bağlayıcı	Su ile katılaşır
Puzolanik özellikleri	Puzolanik özellik kuvvetlidir		Puzolanik özellik vardır	Zayıf puzolanik özellik gösterir		Puzolanik değildir	Kendinden Puzolaniktir

Tablo 5. Bazı Türkiye Uçucu Küllerinin Kimyasal Bileşimleri (Tokay, 1993)

Uç. Kül Oksit (%)	Afşin Elbistan	Çatalağzı	Seyitömer	Soma-B	Tunçbilek	Orhaneli	Yatağan	TS 639 Limitleri	ASTM C618 Limitleri	
									F	C
SiO ₂	27.4	56.8	40.6	39.8	56.4	48.8	51.2	-	-	-
Al ₂ O ₃	12.8	24.1	9.1	22.3	23	19.6	22.9	-	-	-
Fe ₂ O ₃	5.5	6.8	7.7	4.4	10.1	6.5	7.8	-	-	-
Si+Al+F	39.7	87.7	57.4	66.5	89.5	68.4	81.9	> 70	> 70	> 50
CaO	47	1.4	19.9	25.4	2.1	10.1	13	-	-	-
MgO	2.5	2.4	8.1	1.9	3.3	4	2.8	< 5	< 5	< 5
SO ₃	6.2	2.9	10.6	4.8	0.4	4.2	0.3	< 5	< 5	< 5
Alkali	0.3	3	1.4	0.4	0.9	1.7	2.9	-	-	< 1.5
Ti	0.7	1.1	-	0.6	-	-	0.9	-	-	-
K.K.	2.4	0.6	1.4	0.4	1.1		0.4	< 10	< 12	< 6

Tablo 6. Bazı Türkiye Uçucu Küllerinin Fiziksel Özellikleri (Tokay, 1993)

Özellik	Af.-Elbistan	Çatalağzı	Seyitömer	Soma-B	Tunçbilek	Yatağan	
							İncelik
(%) Kalan	90 µm elek	14.9	11.5	3.0	19.0	13.5	12.8
Özgül (kN/m ³) Ağırılık		26.3	19.7	24.6	24.2	19.9	-
PAI	Kireçle (Kgf/cm ²)	49.7	45.1	43.8	52.5	34.0	36.0
	P.C ile (% kontrol)	86.4	77.2	79.8	94.5	72.5	67.3
Su İhtiyacı (% kontrol)		111.8	102.7	112.4	110.0	104.2	106.5
Özellik	Af.-Elbistan	Çatalağzı	Seyitömer	Soma-B	Tunçbilek	Yatağan	

KAYNAKLAR

- Ahmet, I. and Lovell, C. W. 1992. Use of Waste Products in Highway Constuction, Proceeding of the Mediteranean Conf. On Environmental Geotechnology, Çeşme, Turkey, Eds.: Usmen M.A., Acar Y.B., 429-435, Balkema, Rotterdam.
- Akbulut, S. 1999. Enjeksiyon ile Granüler Zeminlerin Geoteknik Özelliklerinin İyileştirilmesi, İTÜ Fen Bilimleri Enst. Dozeltilen uçuc küllere Tezi, İstanbul.
- Akman S., Esenli F. 1992. A Comparative Study of Natural Puzzolans Used in Blended Cement Produktion, IV. Canmet/ACI Int. Conf. Fly Ash., s 471-477, İstanbul.
- Akman, S. 1993. Ağırlık Barajlarında Uçucu Küllü Rolkrit Kullanımı, Endüstriyel Atıkların İnşaat Mühendisliğinde Kullanılması sempozyumu, TMMOB İnş. Müh. Odası. Ankara Şb., 9-22, Ankara.
- Aksoy, İ.H., 1992, "Uçucu Külün Geoteknikte Kullanımı", ZMTM 4. Ulusal kongresi, İTÜ, s.248-259, İstanbul
- Alataş, T. 1996, "Afşin Elbistan Termik santrali Uçucu Külünün Yol Stabilizasyonunda Çeşitli Maddelerle Birlikte Kullanımı Üzerine Bir Araştırma", Fırat Ün. Fen Bilimleri Enst., Doktora Tezi, 146 s., Elazığ.
- Anonim, 1975, TSE Uçucu Küller Standartı TSE 639, TSE 640.

8. Anonim, 1979, “Türkiye Uçucu Küllerinin Özellikleri ve Kullanım Özellikleri”, E.İ.E Genel yayın Direktörlüğü, Ankara.
9. Anonim, 2000, TEAŞ, “Faliyet Raporu”, Ankara.
10. Anonymous, 2001, “ASTM C 618-Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete”.
11. Atanur, A. 1971, “Uçucu Küllerin Kimyasal ve Fiziksel Vasıfları ve Yapı Malzemesi Olarak Kullanılması”, Bayındırlık Bak., KGM. Yayınları, 219 s., Ankara.
12. Balta, İ. 1984, “Doğu Karadeniz Bölgesi Topraklarının Çimento ve Kireçle Stabilizasyonu”, KTÜ Fen Bil. Enstitüsü Doktora Tezi, 97 s., Trabzon.
13. Baykal, G ve Döven, A.G. 1996, “Uçucu Külün Akıcı dolgu Olarak Geoteknik Uygulamaları”, ZMTM 6. Ulusal Kongresi Dokuz Eylül Ün., s. 453-464, İzmir.
14. Büyüköner, B. 1989, “Properties of Compacted and Steam Cured Fly Ash Lime Masonryunits”, Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ, 93 s., Ankara.
15. Çakır, M. 1999, “Uçucu Kül ile Zemin Stabilizasyonu”, İTÜ. Fen Bil. Enst., Yük. Lisans Tezi, 73 s., İstanbul
16. Elverici Ü. 1966, “Effect of Blast Furnace Slag and Flyash On The Stabilization of Base Materials”, Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ, 90 s., Ankara.
17. Erdinç, M. 1995, “Uçucu Küllü Betonlarda Dayanım ve Klor Geçirimsizliğı”, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 100 s., İstanbul.
18. Erdoğan, T.Y. 1993, “Atık Hammaddelerin İnşaat Endüstrisinde Kullanımı Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanımı Sempozyumu”, s. 1-8, Ankara.
19. Ergüt, Ş. 1994, “Seyitömer Termik Santral Atık Uçucu Küllerinin Sinterleşme Karakterizyonu,” İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Y. Lisans Tezi, 67 s., İstanbul.
20. Erşan, H. 1996, “Uçucu Küllerin Siltli Zeminlerin Kayma Mukavemeti Üzerine Etkis”, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Y. Lisans Tezi, 75 s., İstanbul.
21. Fincan, P. 1996, “Flowwable Fill Applications in Civil Engineering”, Boğaziçi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enst., Yüksek Lisans Tezi, 152 s., İstanbul.
22. Gökçe, A. 1995, “Farklı İnceliklerdeki Uçucu Küllerin Betondaki Performanslarının Karşılaştırılması”, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Y. Lisans Tezi, 68 s., İstanbul.
23. Günal, R. G., 1996, “Uçucu Külün Zemin Stabilizasyonunda Kullanılması”, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Y. Lisans Tezi, 76 s., İstanbul.
24. Hamamcı, R. B., 1991, “Effect of Rubber, Carbon Black and Fly Ash on Physical Properties of Pavements”, Boğaziçi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enst., Y. Lisans Tezi, 123., İstanbul.

25. Haşal, E., 2000. “Uçucu Kül-Çimento-Köpük Karışımın Hafif Dolgu Malzemesi Olarak Geoteknik Özellikleri”, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Y. Lisans Tezi, 228 s., İstanbul.
26. İlhan, T., 1995, “Sülfo Kalsik ve Siliko Kalsik Uçucu Küller İyileştirme ve Rolkritlerde Kullanımı”, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Y. Lisans tezi , İstanbul.
27. Joshi, R. C., Nagaraj, T. S., 1987, “Fly Ash Utilization for Soil Stabilization, Environmental Geotechnics and Problematic Soils and Rocks”, Eds. Balusubramaniam et al., 77-93 Balkema Rotterdam.
28. Köprülü, K., 1991, “Hydraulic Conductivity and Strength of Rubber Reinforced Fly Ash As Liner Material”, Boğaziçi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enst.,Yüksek Lisans Tezi, 94 s., İstanbul.
29. Mehmetoğlu, D., 1994, “Compacted Fly Ash Mixtures As Highway Safety Barriers”, Boğaziçi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enst.,Yüksek Lisans Tezi, 140 s., İstanbul.
30. Savran, K. Z., 1988, “Stabilization of Cohesive Soils With Fly Ash”, ODTÜ, Y. Lisans Tezi, 62 s., Ankara.
31. Tan, O., İyisan R., 1996., “Uçucu Kül ile Zemin Stabilizasyonu”, ZMTM 6. Ulusal Kongresi, Dokuz Eylül Ün., s. 417-426, İzmir.
32. Tokyay, M., 1989, “Uçucu Küllerin Minerolojik Kompozisyonlarının Hidratasyon ve Puzolonik Reaksiyona Etkileri”, İnş Müh. X. Teknik Kongre, Cilt 1., s. 389-401, Ankara.
33. Tokyay, M., 1993, “Betonda Uçucu Kül Kullanımı”, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanımı Sempozyumu, Ankara.
34. Toros, H., 1987, “Afşın Elbistan Termik Santrali Uçucu Küllerinin Yapı Malzemesi olarak Kullanılması”, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yük. Lisans Tezi, 117 s., İstanbul.
35. Tüdeş, E., 1996. “Zeminlerin Kireç ve Çimento Katkısı ile Stabilizasyonu”, KTÜ, Yüksek Lis. Tezi, Trabzon.
36. Uysal, F., 1987, “Geotechnical Properties of The Fly- Ashes Produced in To Thermal Plants in Turkey”, M.E.T.U. Inst. of Natural and Aplied Scienes, Ankara.
37. Wasti, Y., 1990, “Uçucu Küllerin Geoteknik Özellikleri ve Kullanım Olanakları”, İMO Teknik Dergi, Cilt: 1, Sayı: 4, s. 177-188 , Ankara.
38. Yılmaz, ř., 1992, “Seyitömer Termik Santral Atık Uçucu Küllerinin Yapı Malzemesi Olarak Değerlendirilmesi”, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Y. Lisans Tezi, İstanbul.