



Teknik Not

Uçucu Kül Bölüm I: Oluşumu, Sınıflandırılması ve Kullanım Alanları

Gökhan GÖRHAN, Erhan KAHRAMAN, M. Serhat BAŞPINAR, İsmail DEMİR*

Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, ANS Kampüsü Afyonkarahisar, Türkiye

ÖZET

Uçucu kül (UK), termik santrallerde pulverize kömürün yanması sonucu meydana gelen ve baca gazları ile taşınarak siklon veya elektrofiltrelerde toplanan önemli bir yan üründür. Türkiye’de halen yılda 16 milyon tondan fazla uçucu kül açığa çıkmaktadır. Endüstriyel bir atık olan uçucu kül miktarının artması çevre sorunlarını da beraberinde getirmektedir. Türkiye’de ve dünyada uçucu kül geri dönüşümü ve kullanım alanları konusunda çok sayıda çalışma yapılmaktadır.

Bu çalışmada uçucu külün sınıflandırılması ve kullanım alanları araştırılmıştır. Buna göre uçucu kül yaygın olarak inşaat sektöründe kullanılmaktadır. Çimento ve beton üretimi, gazbeton ve tuğla üretimi, zemin ve yol stabilizasyonu uygulamaları, hafif agrega üretimi vb. alanlarda yaygın kullanıma sahiptir.

Anahtar Kelimeler: Uçucu Kül, Termik Santral, Atık, Atıkların Değerlendirilmesi.

1. GİRİŞ

Ülkelerin ekonomik ölçekte büyüme eğilimi göstermesi enerji tüketimlerinin de artmasına sebep olmaktadır. Enerji tüketimindeki artışlar ve endüstriyel gelişim beraberinde atıkların sebep olduğu çevre kirliliğini meydana getirmektedir. Bunun yanında küresel ısınma ile ilgili problemlerin çözümü için fosil kaynaklı enerjiler yerine yenilenebilir kaynakların kullanılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Gelişmiş ülkelerde geri dönüşüm konusu büyük önem kazanmış ve bu hammaddelerin kullanımına ilişkin araştırma çalışmaları giderek artan bir ivme kazanmıştır. Türkiye’de de güncelliğini koruyan en önemli konulardan biri enerjiden ve kullanılan hammaddeden tasarruftur.

Türkiye’nin orta ve uzun vadeli enerji üretim politikalarının başında Termik Santrallerden enerji üretimi gelmektedir. Katı fosil yakıtların (linyit gibi) yakıldığı bu ünitelerden ortaya çıkan cüruf ve uçucu kül beraberinde önemli bir çevre problemi oluşturmaktadır. Özellikle teknolojik ve ekonomik değeri olan uçucu külün değerlendirilmesi maalesef çok düşük seviyede kalmaktadır. Uyum süreci ve Çevre Ajansına olan üyeliğimiz gereği enerji alanında da geri dönüşüm stratejilerini uygulamak ve hayata geçirmek Türkiye’nin önemli görevlerinden biridir.

Ülkemizde elektrik enerjisinin halen önemli bir bölümü termik santraller yolu ile üretilmektedir. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu’na (EPDK) göre, Türkiye’de 2007 yılı sonu itibarıyla 40.777,3 MW’a ulaşan toplam kurulu güç kapasitesinin % 31,6’sı doğal gaz, % 25’i kömüre ve % 32,8’i hidrolik kaynaklara dayalıdır. 2007 yılında Türkiye’de toplam elektrik enerjisi üretimi, bir önceki yıla göre % 8,4 oranında artarak 191,2 milyar kWh olarak gerçekleşmiştir. 2007 yılı elektrik üretiminde doğal gaz yakıtlı

* İletişim, E-mail: idemir@aku.edu.tr

santrallerin payı % 48,6, hidroelektrik santrallerin payı % 18,7 ve linyit yakıtlı termik santrallerin payı % 20 olarak gerçekleşmiştir [1].

Termik santrallerde enerji üretmek amacıyla yakıt olarak düşük kalorili linyit kömürleri ince tane boyutunda öğütülerek yakılmaktadır. Toz kömürün yakılması sırasında baca gazları ile sürüklenen ve elektro filtreler yardımıyla bacalarda tutulan ve boyutu 1-150 µm arasında değişen kül tanecikleri ortaya çıkmaktadır. Artan enerji ihtiyacına bağlı olarak artan kömür tüketimi, kömürün yanması sırasında atık olarak elde edilen kül miktarının da artmasına neden olmaktadır. Endüstriyel bir atık olan ve termik santrallerden elde edilen bu küllere uçucu kül adı verilmektedir [2-5].

Türkiye İstatistik Kurumu'na (TÜİK) göre, Türkiye'de termik santrallerde 2003 yılında 11,84 milyon ton, 2004 yılında 13,34 milyon ton ve 2006 yılında 16,01 milyon ton uçucu kül açığa çıkmıştır. 2003-2006 yılları arasında oluşan atığın ortalama % 10'u tesis dışında geri kazanılmış, % 90'ı ise bertaraf edilmiştir. Bertaraf edilen atığın ortalama % 79'u kül dağı/barajında depolanmıştır. Termik santrallerin atık bileşimi içindeki en büyük pay, mineral atıklardan (kül, cüruf, uçucu kül ve alçıtaşı) meydana gelmiştir [6]. Türkiye'de 2020 yılına kadar yıllık uçucu kül miktarının 50 milyon tonu geçmesi beklenmektedir [7].

Günümüzde uçucu külün kullanım alanları üzerine çok sayıda çalışma yapılmakta ve endüstriyel atıkların inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanılmasına daha fazla önem verilmektedir [8-12].

Bu çalışmada termik santrallerin yan ürünü ve atığı olan uçucu küllerin özellikleri, sınıflandırılması ve yapı sektöründe yapı malzemelerine kazandırdığı özellikler ve kullanım alanları araştırılmıştır.

2. UÇUCU KÜLÜN ÖZELLİKLERİ ve SINIFLANDIRILMASI

2.1 Uçucu Külün Özellikleri

Uçucu kül, termik santrallerde pulverize kömürün yanması sonucu meydana gelen baca gazları ile taşınarak siklon veya elektrofiltrelerde toplanan önemli bir yan üründür. Kömürün yüksek sıcaklıklarda yanması sonucu meydana gelen ergimiş malzeme soğuyarak, gaz akışı ile kısmen veya tamamen küresel şekilli kül taneciklerine dönüşmektedir. Bu kül tanecikleri çok ince olup, baca gazları ile sürüklenmeleri nedeniyle, uçucu kül olarak adlandırılmaktadır.

Uçucu külden bulunan başlıca bileşenler; SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ve CaO olup bunların miktarları uçucu külün tipine göre değişmektedir. Ayrıca MgO , SO_3 alkali oksitler de minör bileşen olarak bulunmaktadır. Uçucu küldenki temel oksitlerden; SiO_2 %25-60, Al_2O_3 %10-30, Fe_2O_3 %1-15 ve CaO , %1-40 oranlarında bulunmaktadır. Bu farklı aralıklardaki değerler uçucu külün tipini karakterize etmektedir [13]. Uçucu külün kimyasal yapısı kömürün farklı yerlerden elde edilmesinden dolayı farklılıklar göstermektedir. Buna rağmen uçucu külün temel bileşikleri silis ve alüminadır [14-15].

Uçucu külün morfolojisi ve yapısı değişken ve kompleks, tane şekli ise yüzey geriliminden dolayı küreseldir. Tane yapısı ve boyutu soğutma hızından etkilenir. Uçucu küllerin ortak tipi genellikle; kuvars, mullit ve hematit gibi kristal bileşiklerden; silika camı gibi camsı bileşiklerden ve diğer oksitlerden meydana gelmiştir [15].

Düşük kireçli uçucu küllerin ana aktif bileşeni, silis ve alüminadan oluşan amorf ya da camsı fazdır. Bu tip uçucu küller, rutubetli ortamda sönmüş kireç (CaOH_2) ile reaksiyona girdikleri için puzolanik özelliğe sahiptirler. Yüksek kireçli uçucu küller ise, hem puzolanik özellik gösterirler hem de sahip oldukları serbest kireç, trikalsiyum alüminat, amorf silis ve alümina sebebiyle kendi başlarına bir miktar bağlayıcı özelliğe sahip olabilirler. Düşük kireçli uçucu küllerdeki camsı faz miktarı, yüksek kireçli uçucu küllerden daha fazladır. Düşük kireçli uçucu küllerde mineral faz olarak; camsı faz, mullit ($\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$), hematit (Fe_2O_3), manyetit (Fe_2O_4), kuvars (SiO_2) vb. var iken, yüksek kireçli uçucu küllerde sayılanlara

ek olarak serbest kireç (CaO), anhidrit (CaSO₄), trikalsiyum alüminat (Ca₃Al₂O₆), plajiyoklaz, gehlenit, feldspat gibi kalsiyum silikatlar bulunmaktadır [2].

2.2 Uçucu Küllerin Sınıflandırılması

Uçucu küllerin sınıflandırılmasında, kimyasal bileşen yüzdesine göre esas olarak ASTM C 618 ve TS EN 197-1 standartları baz alınmaktadır.

ASTM C 618 standardına göre uçucu küller, F ve C sınıflarına ayrılırlar. F sınıfı uçucu küller, bitümlü kömürden üretilen SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ yüzdesi % 70'den fazla olan ve CaO yüzdesi % 10'un altında olduğu için düşük kireçli olarak da adlandırılan küllerdir. Puzolanik özelliğe sahiptirler. C sınıfı uçucu küller ise, linyit veya yarı-bitümlü kömürden üretilen ve toplam SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ miktarı % 50'den fazladır. CaO > %10 olduğu için de yüksek kireçli uçucu kül olarak adlandırılırlar. C sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğin yanı sıra bağlayıcı özelliğe de sahiptirler [16].

TS EN 197-1'e göre sınıflandırmada ise uçucu küller silissi (V) ve kalkersi (W) olmak üzere iki gruba ayrılırlar. (V) sınıfı uçucu küller, çoğunluğu puzolanik özelliklere sahip küresel taneciklerden meydana gelen esas olarak reaktif SiO₂ ve Al₂O₃ oluşan; geri kalanı demir oksit ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde, reaktif CaO oranının % 10'dan az, reaktif silis miktarının % 25'den fazla olması gerekmektedir. (W) sınıfı uçucu küller ise, hidrolik ve/veya puzolanik özellikleri olan esas olarak reaktif CaO, reaktif SiO₂ ve Al₂O₃'den oluşan; geri kalanı Fe₂O₃ ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde, reaktif CaO oranının % 10'dan fazla, reaktif silis miktarının da % 25'den fazla olması gerekmektedir [17].

3. UÇUCU KÜLÜN YAPI MALZEMELERİNDE KULLANILMASI

Her endüstriyel atık gibi uçucu külden de yararlanma imkanları araştırılmıştır. Bunların başında çimento ve betonda katkı maddesi olarak kullanılması gelir. Silindirle sıkıştırılmış betonlarda, beton blok ve boruların yapımında kullanım bulur. Çimento hammaddesi olarak kullanılabilir. Özel işlemlerle uçucu külden dayanıklı hafif agrega elde edilebilir.

3.1 Uçucu Külün Çimento ve Betonda Kullanılması

Beton özelliklerini geliştirmek ve çimentodan tasarruf etmek amacıyla çimentoya ikame edilen birçok malzeme türü bulunmaktadır. Mineral malzemeler elde edildikleri kaynaklara göre; doğal, yapay ve ısı işlem görmüş malzemeler olmak üzere üç gruba ayrılmaktadırlar [3]. Çimento ve beton üretiminde kullanılan yapay puzolanlardan biri de uçucu küllerdir.

Betonda ve çimentoda mineral katkı olarak kullanılan puzolanik malzemelerin puzolanik aktiviteleri temelde puzolandaki reaktif silis içeriğine bağlıdır. Bu yüzden puzolanlarda silisli ve alüminli minerallerin türü ve miktarı puzolanik aktivite üzerinde çok önemlidir [18]. Puzolanik aktivite, çimentolu üretimlerde kalsiyum hidroksit ve puzolandaki alüminosilikatlar arasındaki reaksiyonun hızı ve kapasitesi olarak tanımlanır. Puzolanlar için aktivite kısa dönemde yüzey alanlarına, uzun dönemde ise puzolanların kimyasal ve mineralojik bileşimine bağlıdır [19]. Aynı zamanda mineraller, aynı kompozisyonla farklı aktivite gösterebildikleri için puzolanik aktivite sadece kimyasal bileşim ile ilgili değildir [20].

Uçucu kül gibi puzolanik malzemelerin yeterli puzolanik aktiviteyi gösterebilmesi için, yeterince ince taneli olması, amorf yapıya sahip olması ve yeterli miktarda "silis+alümin+demir oksit" içermesi gerekmektedir [3].

Betonlarda genellikle düşük kireçli uçucu kül kullanılmaktadır. Yüksek kireçli uçucu küllerin betonlarda kullanılması durumunda yüksek CaO oranı betonların durabilitesini ve betonun stabilitesini

bozabilmektedir [21]. Uçucu küller içerisinde bulundukları karbon ve sülfürden dolayı çimentoyla reaksiyona girdiklerinde beton içerisinde alkali oranını arttırmakta ve bunun neticesinde korozyonu hızlandırmaktadır. Ayrıca uçucu kül içerisinde bulunan yanmamış karbonların miktarına göre betonun elektrik iletkenliği artar ve beton siyah bir renk alır. Uçucu kül içerisinde bulunan karbon miktarının artması betonun su ihtiyacını da arttırmaktadır [22]. Bunun yanında yapılan bir dizi çalışma sonunda ise, % 20-30 oranında uçucu kül kullanımının korozyon direnci ve beton dayanımı açısından olumlu sonuçlar verdiği belirtilmiştir [23].

Çimentoya, ince öğütülmüş uçucu kül ikamesi ile üretilen betonların olumlu kimyasal reaksiyon gerçekleştirerek geçirimsizliklerinin arttığı ve klor geçirimsizliğinin önemli oranda azaldığı saptanmıştır [24]. Uçucu küllü betonların kısa süreli dayanımları olumsuz etkilenmektedir. Bunun yanında düşük oranlarda uçucu kül kullanılması durumunda ise uçucu kül bulunmayan şahit betonlara göre uzun süreli dayanımları artış göstermekte ve betonlarda kılcal su geçirimsizliği azaltmaktadır [25].

Uçucu küllü puzolanik çimentoların öğütülme süreleri, normal çimentolara göre daha kısa sürmekte ve bu çimentoların 28 gün sonundaki dayanım değerleri, uçucu kül ikameli çimento harçlarına göre daha yüksek olmaktadır [26].

Portland çimentosuna uçucu külün ikame edilmesiyle çimentonun hidratasyonu geçikmekte böylelikle çimentonun priz başlama süresi artarak betonun erken dayanımı düşmektedir. Bu olumsuzluğu ortadan kaldırmak amacıyla Na_2SO_4 ve CaCl_2 gibi kimyasal aktivatörler kullanılabilir ve bu kimyasallar puzolanik reaksiyonu hızlandırarak uçucu kül ile serbest kirecin arasındaki reaksiyonu değiştirmektedir [27-29]. Yapılan bir çalışmada, % 40-60'a kadar değişen oranlarda uçucu kül içeren çimentoya, % 3'lük Na_2SO_4 katkısı yapılarak hidratasyonun hızlandırıldığı belirtilmiştir [30].

Kendiliğinden yerleşen betonlarda % 30 – 40 oranlarında, F sınıfı uçucu kül ikameli çimentoların kullanılması ile daha iyi dayanım özellikleri elde edilmektedir [31]. Yüksek miktarda (% 50) uçucu kül kullanılarak ekonomik ve aynı zamanda 35 MPa'dan daha yüksek dayanıma sahip kendiliğinden yerleşen betonlar da üretilmiştir [32].

3.2 Uçucu Külün Agregada Olarak Kullanılması

Uçucu külden üretilen hafif agregalar kullanılarak, hafif beton tasarımı ve üretimiyle daha ekonomik ve daha çevre dostu beton üretmek mümkündür [33]. Hafif uçucu kül agregaları, uçucu küllerin değişik bileşimlere sahip olmasından dolayı farklı davranışlar gösterebilmektedir [34].

Beton üretiminde ince agregada yerine F sınıfı uçucu kül kullanılabilir. Uçucu küllü betonların kontrol betonlarına göre işlenebilirlikleri, basınç dayanımları, elastisite modülü değerleri ve rötre değerleri olumlu yönde gelişmiştir [35-36]. Betonda ince agregada olarak % 40'a kadar değişen oranlarda uçucu kül kullanıldığında betonların aşınma direnci kontrol betonlarına göre de artmaktadır [37].

3.3 Uçucu Külün Tuğla Üretiminde Kullanılması

Uçucu kül beton ve çimentoda kullanıldığı gibi tuğla sektöründe çok yaygın kullanım imkanı bulamamıştır. Bunun yanında sınırlı da olsa bazı çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalardan birinde Cultrone ve Sebastian (2009), tuğla üretiminde uçucu kül kullanmış ve üretilen uçucu kül katkılı örneklerle referans tuğla örneklerinin tekstürünün birbirine çok benzediği belirtilmiştir. Küresel ve tane boyutu 0.1 ile 10 mikron arasında değişen uçucu kül bulunan örneklerin durabiliteleri önemli oranlarda gelişmiştir. Bu taneleri içeren örneklerin mikro gözenekleri azalmış ve bu sayede tuz kristalleşmesinden kaynaklanan bozulmaları azalmıştır [8].

Seyitömer termik santrali uçucu külü ile yapılan tuğlalarda, referans tuğlaya göre uçucu kül ilavesi birim hacim ağırlığını çok az miktarda artırırken, kuruma, pişme ve toplam küçülmede belirgin bir değişime

neden olmamıştır. Uçucu kül ilavesi ile üretilen tüm tuğlalarda su emme miktarı referans tuğlaya göre azalmış, buna karşılık tuğlaların hiçbirinde referans tuğlada elde edilen dayanım değerine ulaşılamamıştır [4]. Seyitömer uçucu külünün kullanıldığı bir çalışmada tuğla için en iyi kompozisyonun; uçucu kül (% 65), kum (% 20) ve hidrat kireç (% 12) kullanılarak yapılacağı belirtilmiştir [38].

Demir vd. (2008) tuğla üretiminde Seyitömer ve Tunçbilek uçucu külü ana hammadde olarak kullanmış ve bünyede % 70-100 oranlarda uçucu kül kullanılarak tuğla örnekler üretilmiştir. Çalışmada uçucu kül kullanılarak üretilen tuğla örneklerin kilden üretilen tuğlalara göre daha düşük birim ağırlık ve ısı iletkenlik değerlerine sahip oldukları belirlenmiştir. Deney örneklerinin ısı iletim katsayısı değerlerinin gazbeton sınıflarına yakın değerlerde olduğu belirlenmiştir [39].

3.4 Uçucu Külün Gazbeton Üretiminde Kullanılması

Gazbetonda, uçucu kül çimentodan çok, ince kum ikamesi olarak kullanılır. Amerikan Gazbeton Üreticileri Birliği uçucu külün gazbetonda %75 oranına kadar kullanılmasını önermektedir [40]. Uçucu kül agrega olarak yeterli ince tane boyutuna sahip olduğundan ilave bir öğütme işlemi gerektirmez. Uçucu kül ile üretilen gazbetonun kuvars kumu ile üretilen gazbetona göre daha iyi ısı yalıtım ve mukavemet özelliklerine sahip olduğu savunulmaktadır [41]. Burada muhtemelen uçucu kül puzolanik özelliğe sahip olması nedeniyle kireç ile reaksiyona girerek mikro yapıyı güçlendirici yeni bağlar üretir. Koyu gri veya siyaha yakın atığın gazbeton üretimine katılması nihai ürün rengini koyulaştırır ya da gri renge çevirir [42].

Narayanan vd. (2000) hidrasyon ürünlerinin yapısı, uçucu kül katkının gözenek oluşumuna etkisi ve boşluk ve matris arayüzeyindeki geçiş zonunu araştırdıkları çalışmada; karışım oranlarındaki farklılıklar (kum/uçucu kül oranı) ve uygulanan kür yöntemleri (buhar kürü/ otoklav kürü) gazbetonun mikroyapı özelliklerini önemli derecede etkilediğini belirtmiştir. Yapıları itibari ile kum ve uçucu kül malzemeli gazbetonlar zamanla gelişen hidrasyon derecelerine bağlı olarak dikkate değer farklılıklar göstermektedir. Başlangıçta sadece çimento hidrata olurken, arkasından nispeten daha yavaş biçimde uçucu külde hidrata olmaktadır [43].

Gazbetonda, belirli bir yoğunluk için kumun uçucu kül ile yer değiştirmesi (uçucu kül ikamesi) mukavemette artış sağlamaktadır. Çimento-kum karışımına göre, çimento- uçucu kül karışımı örnekler nispeten daha yüksek su emme oranına sahiptirler [44].

Köpük beton karışımında çimento yerine %75'e kadar uçucu kül ikamesi ile bir çalışma yapılmıştır. Buna göre porozite, kullanılan uçucu kül tipine veya miktarına bağlı olmayıp, büyük oranda örneğin kuru yoğunluğuna bağlı olmaktadır. Su emme değerinin kütlelerin yüzdesi olarak (ağırlıkça) verilmesi yanıltıcı olmaktadır. Çünkü köpük betonun birim ağırlığı karışım oranlarına bağlı olarak büyük farklılıklar gösterebilmektedir [45]. Köpük betona, ince kum yerine uçucu külün filler malzeme olarak katılması ile daha homojen bir gözenek dağılımı sağlanır [46]. Daha ince taneli olması nedeniyle uçucu kül her bir kabarcığı bir duvarla kaplayarak, kabarcıkların birleşmelerini ve üst üste gelmelerini engelleyerek uniform bir gözenek dağılımı sağlar. Gözenek dağılımında gözeneğin tane boyutu küçüldükçe köpük betonun mukavemetinde artış gerçekleşmiştir. Gözeneklerin birleşmesi ile gözenek hacminin büyümesi sonucu daha büyük boşluklar oluşup daha büyük gözenek dağılımı meydana gelerek mukavemette düşme gerçekleşir. Gözeneğin şekli köpük betonun özelliklerini etkilemez [47-50].

Araştırmalar göstermiştir ki çimentonun %60'a kadar uçucu kül ile ikamesi çimento pastasının özelliklerini geliştirmektedir. Uçucu külün çimento ile yüksek oranlarda (%75'e kadar) yer değiştirmesi sonucu köpük betonun basınç mukavemetinde dikkate değer artış elde edilmiştir [51].

3.5 Uçucu Külün Zemin Uygulamalarında Kullanılması

Uçucu Küller, zemin problemlerini iyileştirmek için doğal zemine ve uçucu küle bağlı olarak ürün verimliliğini geliştirmek için kullanılabilir. Uçucu kül özellikle hava ile temas etmeyen topraklarda; Bor (B), Molibden (Mo), Selenyum (Se) ve Alüminyum (Al) gibi elementleri toplama eğilimi göstermektedir. Bu elementlerin toplanması ürün alanlarında zehir seviyesinde önemli oranda azalmalar gerçekleştirerek insan ve hayvan sağlığına önemli katkı yaparlar [52].

Killi bir zemin, Tunçbilek uçucu külü ile stabilize edilmiştir. Killi zemine % 0, % 3, % 5 ve % 10 oranlarında uçucu kül katılarak uçucu kül ilavesi ile, zeminin plastisitesinin etkilenmediği, optimum su muhtevası ve serbest basınç mukavemetinin ise artan uçucu kül oranı ile arttığı belirtilmiştir [5].

Uçucu külün yolda tatbiki ile ilgili yapılan bir çalışmada ise farklı kimyasal katkılar kullanılmış ve bunun sonunda yolda kullanılan uçucu kül-kireç karışımına % 1,5-2,5 oranındaki katkıların olumlu etkiler yaptığı ve erken yaşlardaki dayanımları oldukça yükselttiği saptanmıştır [53].

3.6 Uçucu Külün Diğer Uygulamalarında Kullanılması

Diğer kullanım alanları arasında: beton ve asfalt yollarda, yol temel tabakalarında filler olarak, zemin stabilizasyonunda, kireç-kumtaşı blokların, endüstriyel seramik ve refrakterlerin, boyaların üretiminde, katı atıkların stabilizasyonunda ve bitki yetiştirilmesinde kullanımları sayılabilir [13].

Yapılan bir çalışmada; kompozitlerin mekanik özelliklerine kullanılan bağlayıcının davranışı etkisinin incelenmesi amacıyla, kloroplen kauçuk ve uçucu kül kullanılarak test edilmiş ve %1'lik bağlayıcı olarak uçucu kül kullanılarak kompozit bir malzeme üretilebilmiştir [54]. Başka bir kompozit malzeme üretiminde ise; farklı uçucu kül ağırlık yüzdelere sahip epoksi reçine kompoziti yoğunluk, sertlik ve elektriksel özellikleri santrifüj kuvveti altında hazırlanarak elde edilmiş ve uçucu külün ağırlık yüzdesi artırılarak, malzemenin alternatif iletkenliğini ve izolatör sabitliği artırılmıştır [55].

Lateks harçları basınç dayanımlarının uçucu kül oranının artmasıyla azalma göstermektedir [56]. F ve C sınıfı uçucu kül ile çimento kullanılarak kompozit malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgulara göre C sınıfı uçucu kül kullanılan kompozitler F sınıfına göre daha düşük elastisite modülü değerleri vermiştir [27]. F tipi uçucu kül ve çimento kompozitinin akışkanlığının, uçucu külün tane dağılımıyla yakından ilişkili olduğu da belirtilmiştir [57].

4. SONUÇ

Türkiye'de ve Dünyada büyük miktarlarda ortaya çıkan uçucu küllerin bertarafı hem çevresel ve hem de ekonomik bakımdan sorunlar teşkil etmektedir. Uçucu külün geri dönüşümünün sağlanması doğal hammadde kaynaklarının ve çevrenin korunması bakımından büyük önem taşımaktadır.

Uçucu kül yapay bir puzolan olması sebebiyle inşaat sektöründe özellikle çimento ve beton uygulamalarında diğer yapı malzemelerine oranla daha fazla kullanım imkânı bulmuştur. Bunun yanında hafif agrega üretimi, tuğla ve beton blok üretimi, zemin stabilizasyonu, yol yapımı uygulamaları vb. alanlarda kullanılabilir. Uçucu kül tüketiminin artırılması, yeni kullanım alanları ve uygulamaların geliştirilmesi için yeni araştırmaların yapılması uygun olacaktır.

Yapılacak Ar-Ge çalışmalarının uçucu külün kullanım miktarının artırılması, yeni kullanım alanları ve yöntemlerin geliştirilmesine ilişkin çalışmalara ağırlık verilmesinin uygun olacağı düşünölmektedir.

KAYNAKLAR

1. T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK), 2007 Yılı Faaliyet Raporu, s.20-21, (www.epdk.gov.tr/yayin_rapor/yillik/2007/2007.pdf).
2. Aruntaş, H. Y., 2006, Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyelleri, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. 21 (1)*, 193-203.
3. Erdoğan, T. Y., 2007, Beton, Metu Press, 1. Baskı.
4. Bentli, İ., Uyanık, A.O., Demir, U., Şahbaz, O. ve Çelik, M.S., 2005, Seyitömer Termik Santrali Uçucu Küllerinin Tuğla Katkı Hammaddesi Olarak Kullanımı, Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı, s.385-389, İzmir.
5. Aksoy, H. S., Yılmaz, M., Akarsu, E. E., 2007, Killi Zeminin Tunçbilek Uçucu Külü Kullanılarak Stabilizasyonu, 2. Geoteknik Sempozyumu, Artı ofset, 466-472.
6. Termik Santral Su ve Atık İstatistikleri (2002-2006), 2008, TÜİK HABER BÜLTENİ, *Sayı:30*, (www.tuik.gov.tr).
7. Tütünlü, F., Atalay, Ü., 2001, Utilization Of Fly Ash In Manufacturing Of Building Bricks, International Ash Utilization Symposium. (<http://whocares.caer.uky.edu/wasp/AshSymposium/AshLibraryAgenda.asp>).
8. Cultrone, G., Sebastián, E., 2009, Fly Ash Addition in Clayey Materials to Improve The Quality Of Solid Bricks, *Construction and Building Materials 23*, 1178–1184.
9. Xue, Y., Hou, H., Zhu S., Zha, J., 2009, Utilization Of Municipal Solid Waste Incineration Ash In Stone Mastic Asphalt Mixture: Pavement Performance And Environmental Impact, *Construction and Building Materials 23*, 989–996.
10. Odlare, M., Pell, M., 2009, Effect Of Wood Fly Ash And Compost On Nitrification And Denitrification In Agricultural Soil, *Applied Energy 86*, 74–80.
11. Rao, V. V. B., Rao S. R. M., 2006, Adsoption Studies on Treatment of Textile Dyeing Industrial Effluent by Flyash, *Chemical Engineering Journal 116 (1)*, 77-84.
12. Karahan, O., Atiş, C. D., 2007, Sugözü Uçucu külünün beton katkısı olarak kullanılabilirliği, 7. Ulusal Beton Kongresi, 405-415, İstanbul.
13. Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F., Yeğınobalı, A., 2003, Türkiye’de Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, TÇMB, Ankara.
14. Satapathy, L.N., 2000, A Study On The Mechanical, Abrasion And Microstructural Properties Of Zirconia-Flyash Material, *Ceramics International 26*, 39-45.
15. Matsunaga, T., Kim, J.K., Hardcastle, S., Rohatgi, P.K., 2001, Crystallinity and Selected Properties of Fly Ash Particles, *Materials science & Engineering*, 333-343.
16. ASTM C 618, 2000, Standart Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete, Annual Book of ASTM Standart, No. 04.02

17. TS EN 197-1, 2002, Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
18. Türkmenoğlu, A.G., Tankut, A., 2002, Use of Tuffs From Central Turkey as Admixture in Pozzolanic Cements, *Cement and Concrete Research* 32 (4), 629-637.
19. Meral Ç., 2004, Use of Perlite as A Pozzolanic Addition in Blended Cement Production, M.E.T.U., Thesis Of Master Of Science.
20. Mary S.J.G., 1997, *Cement and Concrete*, ISBN: 0412790505, Spon Press UK.
21. Papadakis, V.G., 2000, Effect of fly ash on Portland cement systems Part II. High-calcium fly ash, *Cement and Concrete Research* 30 (10), 1647-1654.
22. Ha, T. H., Muralidharan, S., Bae, J. H., Ha, Y. C., Lee, H. G., Park, K. W., Kim, D. K., 2005, Effect Of Unburnt Carbon On The Corrosion Performance Of Fly Ash Cement Mortar, *Construction And Building Materials* 19 (7), 509-515.
23. Saraswathy, V., Muralidharan, S., Thangavel, K., Srinivasan, S., 2003, Influence Of Activated Fly Ash On Corrosion-Resistance And Strength Of Concrete, *Cement & Concrete Composites* 25 (7), 673-680.
24. şengül, Ö. Taşdemir, M.A. ve Sönmez, R., 2003, Yüksek Oranda Uçucu Kül İçeren Normal ve Yüksek Dayanımlı Betonların Klor Geçirirliği, Beşinci Ulusal Beton Kongresi Bildiriler Kitabı, İMO İstanbul şubesi, İstanbul, 75-85.
25. Sümer, M., 1995, F Tipi Uçucu Külün Betonun Basınç Dayanımına Ve Kılcal Su Emmesine Etkileri, *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu*, 27-31.
26. Kılınçkale, F. M., 1995, Uçucu Küllü Çimento Üretiminde Uçucu Külün Öğütme şeklinin Çimento Özelliklerine Etkisi, *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu*, 33-44.
27. Mishra, S. R., Kumar, S., Park, A., Rho, J., Losby, J., Hoffmeister, B.K., 2003, Ultrasonic Characterization Of The Curing Process Of Pcc Fly Ash-Cement Composites, *Materials Characterization* 50 (4-5), 317-323.
28. Gesoğlu, M., Güneyisi, E., Özbay, E., 2007, Mineral Katkıları Kullanılarak Elde edilen Kendiliğinden Yerleşen Betonların Özellikleri, 7. Ulusal beton kongresi, Maya basın yayın, 87-98.
29. Shi, C., Qian, J., 2003, Increasing Coal Fly Ash Use İn Cement And Concrete Through Chemical Activation Of Reactivity Of Fly Ash, *Energy Sources* 25 (6), 617-628.
30. Zhang, Y. M., Sun, W., Yan, H. D., 2000, Hydration Of High-Volume Fly Ash Cement Pastes, *Cement & Concrete Composites* 22 (6), 445-452.
31. Türk, K., Karataş, M. ve Ulucan, Z. Ç., 2006, Farklı Oranlarda F Sınıfı Uçucu Kül İçeren, Kendiliğinden Sıkışan Betonun Dayanım Özellikleri, *Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Dergisi*, 18 (4), 513-520.

32. Bouzoubaa, N., Lachemi, M., 2001, Self-Compacting Concrete Incorporating High Volumes Of Class F Fly Ash Preliminary Results, *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, No. 3, 413–420.
33. Koçkal, N. U., Özturan, T., 2007, Sinterleme Sıcaklığının Uçucu Kül Hafif Agregaların Özelliklerine Etkisi, 7. Ulusal beton kongresi, Maya basın yayını, 133-143.
34. Wasserman, R. and Bentur, A., 1997, Effect Of Lightweight Fly Ash Aggregate Microstructure On The Strength Of Concretes, *Cement and Concrete Research*, Vol. 27, No. 4, 525-537.
35. Ravina, D., 1997, Properties Of Fresh Concrete Incorporating A High Volume Of Fly Ash As Partial Fine Sand Replacement, *Materials and Structures* 30 (202), 473-479.
36. Ravina, D., 1998, Mechanical Properties Of Structural Concrete Incorporating A High Volume Of Class F Fly Ash As Partial Fine Sand Replacement, *Materials and Structures* 31 (206), 84-90.
37. Siddique, R., 2003, Effect Of Fine Aggregate Replacement With Class F Fly Ash On The Abrasion Resistance Of Concrete, *Cement and Concrete Research*, 33 (11), Pages 1877-1881.
38. Çiçek, T., Tanrıverdi, M., 2007, Lime Based Steam Autoclaved Fly Ash Bricks, *Construction and Building Materials*, 21 (6), 1295-1300.
39. Demir İ., Başpınar, M. S., Orhan, M., Evcin. A., Kumlutaş, D., Görhan, G., Kahraman, E., 2008, Uçucu Külün Yapı Tuğlası Üretiminde Kullanımının Araştırılması, Proje No: 106M002, TÜBİTAK Projesi.
40. Autoclaved Aerated Concrete, AAC Products Association, 1999, <http://netgain.babb.com/aacpa/autoclav.htm>
41. PFA Utilization, Central Electricity Generating Board, Gibbons, Wolverhampton, 1972.
42. Holta, E., Raivio, P., 2005, Use Of Gasification Residues In Aerated Autoclaved Concrete, *Cement and Concrete Research* 3, 796– 802.
43. Narayanan, N., Ramamurthy, K., 2000, Micro Structural Investigations On Aerated Concrete, *Cement and Concrete Research* 30, 457- 464.
44. E. K. Kunhanandan Nambiar, K. Ramamurthy, 2006, Influence Of Filler Type On The Properties Of Foam Concrete, *Cement & Concrete Composites* 28, 475–480.
45. Kearsley, E. P., Wainwright, P.J., 2001, Porosity And Permeability Of Foamed Concrete, *Cement and Concrete Research* 31, 805–12.
46. E. K. Kunhanandan Nambiar, K. Ramamurthy, 2007, Air-Void Characterization Of Foam Concrete, *Cement and Concrete Research* 37, 221–230.
47. Visagie, M., Kearsely, E.P., 2002, Properties Of Foamed Concrete As Influenced By Air Void Parameters, *Concrete* 101, 8–14.
48. Nambiar, E. K. K., Ramamurthy, K., 2006, Models Relating Mixture Composition To The Density And Strength Of Foam Concrete Using Response Surface Methodology, *Cement and Concrete Composites* 28 (9), 752–760.

49. Zhang, Z., Ansari, F., Vitillo, N., 2005, Automated Determination Of Entrained Air Void Parameters In Hardened Concrete, *ACI Materials Journal* 102 (1), 42–48.
50. Cabrillac, R., Fiorio, B., Beaucour, A., Dumontet, H., Ortola, S., 2006, Experimental Study Of The Mechanical Anisotropy Of Aerated Concrete And Of The Adjustment Parameters On The Induced Porosity, *Construction and Building Materials* 20, 286–295.
51. Kearsleya, E. P., Wainwright, P. J., 2001, The Effect Of High Fly Ash Content On The Compressive Strength Of Foamed Concrete, *Cement and Concrete Research* 31, 105-112.
52. Sharma, S., K., Kalra, N., 2006, Effect of Fly ash Incorporation on Soil Properties and Productivity of Crops: A Review, *Journal of Scientific & Industrial Research* 65 (5), 383-390.
53. Jiang, Z. G., Zhao, Y., 2005, Mechanism And Optimal Application Of Chemical Additives For Accelerating Early Strength Of Lime-Fly ash Stabilized Soils, *Journal Of Wuhan University Of Technology-Materials Science Edition* 20 (3), 110-112.
54. Alkadasi, N. A. N., Hundiwale, D. G., Kapadi, U. R., 2006, Effect Of Titanate Coupling Agent On The Mechanical Properties Of Flyash Filled Chloroprene Rubber, *Polymer-Plastics Technology And Engineering* 45 (3), 415-420.
55. Chand, N., Jain, D., 2006, Effect of Temperature on Electrical Behavior of Fly ash-Filled Epoxy Gradient Composites, *Journal of Applied Polymer Science* 100 (2), 1269-1276.
56. Özturan, T., 1995, Uçucu Küllü Lateks Harçlarının Mekanik Özellikleri, Endüstriyel atıkların inşaat sektöründe kullanılması Sempozyumu.
57. Lee, S. H., Kim, H. J., Sakai, E., Daimon, M., 2003, Effect Of Particle Size Distribution Of Fly Ash-Cement System On The Fluidity Of Cement Pastes, *Cement and Concrete Research* 33 (5), 763-768.