

Araştırma Makalesi

Trakya Bölgesi Atık Taban Küllerinin Beton Üretimi için Karakterizasyonu

Mehmet Timur Cihan¹ , Elçin Güneş^{2,*} , Gülbahar Günay² 

¹ İnşaat Mühendisliği Bölümü, Çorlu Mühendislik Fakültesi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ, Türkiye

² Çevre Mühendisliği Bölümü, Çorlu Mühendislik Fakültesi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ, Türkiye

Geliş: 07.12.2021

Kabul: 18.12.2021

Özet: Kömürün yanması ile kazan diplerinde biriken taban külleri hem bertarafı sırasında depolama alanı ihtiyaçları dolayısıyla hem de depolandıkları bölgede kirleticilerin yeraltı sularına sızma olasılıkları nedeniyle çevreye zarar vermektedirler. Bundan dolayı birçok çalışmada taban küllerinin inşaat sektöründe çimento veya kum yerine harç/beton yapımında kullanımı konusunda çalışmalar yapılmaktadır. Atık taban külleri, çimento yerine bağlayıcı olarak ve kum yerine agrega olarak veya çok ince malzeme yerine dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada Trakya Bölgesi taban küllerinin bertaraf edildiği Tekirdağ-Çorlu'da bulunan bir düzenli depolama tesisinden temin edilen taban küllerinin kimyasal bileşimi, tane biçim özellikleri ve dayanım aktivite indeksi belirlenmiş ve bu özellikler dikkate alınarak CEM I 42,5 R Portland çimentosu ile karşılaştırma yapılmıştır. Çalışma sonuçlarında 75 µm elek altı atık taban küllerinin 28 günlük dayanım aktivite indeksi %79.8 olarak elde edilmiştir. Bu değer uçucu küller için verilen %75 sınırını sağlamaktadır. Buna göre çalışmada kullanılan 75 µm elek altı atık taban külleri puzolanik özellik gösterdiği için çimento yerine belirli düzeylerde kullanılabilir olarak değerlendirilmiştir. 2 mm elek altı taban külünün CEN standard kuma göre oldukça ince olduğu ve CEN standard kum yerine kullanımının taze beton/harç numunelerinin işlenebilirliğini azaltabileceği belirtilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Taban külü, kimyasal özellik, puzolanik aktivite, portland çimentosu.

Characterization of Waste Bottom Ashes of Thrace Region for Concrete Production

Abstract: The coal bottom ash accumulated at the bottom of the boilers due to the burning of coal harm the environment both due to the need for storage space during their disposal and the possibility of leakage of pollutants into the groundwater in the area where they are stored. Therefore, in many studies, studies are carried out on the use of coal bottom ashes in the construction industry instead of cement or sand in the production of mortar/concrete. Bottom ash is used as a binder instead of cement, as aggregate instead of sand, or as a filling material instead of very fine material. In this study, the chemical composition, grain shape characteristics and strength activity index of the bottom ash obtained from a landfill facility in Tekirdağ-Çorlu, where the bottom ash of the Thrace Region was disposed of, were determined and a comparison with CEM I 42.5 R Portland cement was made considering these features. As a result of the study, the 28-day strength activity index of 75 µm under-sieve waste bottom ashes was obtained as 79.8%. This value provides the 75% limit given for fly ash. Accordingly, 75 µm under-sieve waste bottom ashes used in the study were considered to be usable at certain levels instead of cement, since they showed pozzolanic properties. It has been stated that the 2 mm sieve bottom ash is quite fine compared to CEN standard sand and its use instead of CEN standard sand may reduce the workability of fresh concrete/mortar samples.

Keywords: Waste bottom ash, chemical property, pozzolanic activity, portland cement.

* Sorumlu yazar

E-mail adresi: egunes@nku.edu.tr (Elçin Güneş)

1. Giriş

Dünyada enerji santrallerinde ve endüstrilerdeki fırınlarda/kazanlarda ısı eldesi için kömür kullanımı oldukça yaygındır. 2020'de dünyanın en büyük iki kömür kullanan ülkesi, aynı zamanda dünyanın en kalabalık iki ülkesi olan Çin ve Hindistan olmuştur. Dünya kömür tüketiminin %54,3'ünü Çin ve %11,6'sını Hindistan gerçekleştirmiştir [1]. Türkiye'de elektrik/enerji üretimi için doğal gaz, fuel oil, yenilenebilir enerji kaynakları (hidroelektrik, rüzgar, güneş, jeotermal vb.), gibi alternatifler yanında kömür de yaygın olarak kullanılmaktadır. Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketinin (TEİAŞ) verilerine göre 2020 yılında elektrik üretiminde linyit-taş kömürü-asfaltit kullanımı % 15 ve ithal kömür kullanımı % 21,3 olmuştur [2].

Kömür, içerisinde eser miktarlarda baryum, berilyum, arsenik, bor, krom, kadmiyum, talyum, molibden, selenyum ve cıva gibi insan sağlığına ve çevreye toksik etkisi olan birçok metali içermektedir [3]. Kömürün yanması ile yan ürün/atık olarak kömür külü oluşur ve tipik olarak bu külün % 10-20'si taban külü ve % 70-80'i uçucu külden oluşmaktadır [5, 6]. Yılda üretilen milyonlarca ton kömür külü atığından, 100 milyon metrik ton (Mt) taban külü, kalanı ise uçucu küldür [7]. Taban külleri kömür kazanlarında ağır ve büyük taneli yapıya sahip olduğundan kazan tabanlarına çökelen malzemelerin bütünüdür. [8, 9]. Taban külü temel olarak alümina, silika ve demir ile birlikte eser miktarda magnezyum, sülfat ve kalsiyumdan oluşur [10]. Bunun yanında taban külü içerisinde kömür bileşimine bağlı olarak ağır metaller de bulunmaktadır [7]. Taban külü, gözenekli bir yapıya ve köşeli parçacıklara sahiptir; boyutu genellikle kum ve çakıl parçacıkları ile az miktarda yarık-kil parçacıkları arasında değişir [11]. Taban külünün özgül ağırlığı, kimyasal özelliklerine bağlıdır ve 1.39 ile 2.41 arasında değişir [7].

Dünyadaki en önemli çevre sorunları endüstriyel atıklar, inşaat atıkları, evsel atıklar gibi atıkların bertaraf problemlerinden kaynaklanmaktadır. Taban küllerinin bertarafı genellikle düzenli depolama sahalarında gerçekleştirilmektedir. Bu durum hem atıkların taşınması hem de depolanması dikkate alındığında çevreye büyük yükler getirmektedir. En önemli çevresel sorunlar; taban külü bertarafı için alan ihtiyacı ve depolama sonrasında taban külünün içeriğine bağlı olarak kirleticilerin yeraltı suyuna sızma ihtimalinden kaynaklanmaktadır. Son yıllarda, birçok çalışma, düşük maliyeti, düşük yoğunluklu dolgusu ve aynı zamanda çimento ve kum gibi inşaat malzemelerinin yerine kullanılmaya uygunluğu nedeniyle taban külünün çeşitli amaçlarla kullanımı üzerine yoğunlaşmıştır [12]. Üretim yan ürünleri olarak da bilinen bu küller, çimentoya sürdürülebilir alternatifler olarak kapsamlı bir şekilde araştırılmaktadır [13]. Abubakar ve diğ. [14] yaptıkları çalışmada, taban külünün kaba, gözenekli, hafif, camsı, granül olduğunu ve çimento ile benzer özelliklere sahip olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca, kömür taban külünün SiO_2 ve Al_2O_3 içeriğinden dolayı pozolanik aktiviteye sahip olduğu da belirtilmiştir [15]. Buna göre, taban külü gibi atık malzemelerin harçlarda/betonda mineral katkı maddesi olarak kullanımı atıkların depolanması ile oluşabilecek çevresel etkilerinin en aza indirgenmesi açısından oldukça önemlidir. [16].

Başka bir çevresel sorun ise çimento üretimi sırasında oluşan sera gazlarıdır. Bir ton çimento üretimi yaklaşık bir ton sera gazı üretmekte olup yüksek karbon dioksit (CO_2) emisyonlarına neden olmaktadır. Taban külü, uçucu kül, cüruf gibi atıkların çimento veya önemli bir mineral kaynak olan kum yerine kullanımı bu nedenlerden dolayı da oldukça önemlidir. Taban külü özelliklerine bağlı olarak, çimento hidratasyonu sonucu oluşan kireçle reaksiyona girerek ilave bağlayıcı jel oluşturabilmekte, çimento hamurundaki boşlukları doldurarak betona dayanıklılık kazandırabilmektedir [17]. Köse ve diğ. [18] çalışmalarında kömür taban külünü çimento ile ağırlıkça %0, %5, %10, %15, %20, %25, %30, %40 ve %50 oranında yer değiştirerek beton/harç üretiminde kullanmıştır. Numunelerin beton kalitesine ait özelliklerini ve çevresel etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada taban külü içeriği arttıkça harç numunelerinin dayanımlarının, yüksek organik içeriği sebebiyle düştüğü ve dayanımın kür süresiyle arttığı belirlenmiştir. Çalışmada %20 çimento katkılı numune, 30 MPa basınç dayanım seviyesine ulaşmıştır. Çalışma sonucunda %20 oranına kadar taban külü katkısı ile Portland çimentosu kullanılarak katılaştırmanın hem sızma hem de dayanım açısından uygulanabilir olduğu ve yapı malzemesi olarak kullanılabilmesi ortaya konmuştur. Singh ve diğ. [19] çalışmalarında kömür taban külünün kumun kısmi ikamesi olarak betonun dayanım özellikleri üzerindeki etkisini belirleyebilmeyi amaçlamışlardır. Çalışmada beton üretiminde basınç dayanımını incelemek için iki tip beton karışımı hazırlanmıştır. Beton karışımında kumun yerine %0, % 20, 30, 40, 50, 75 ve % 100 seviyelerinde taban külü kullanılmıştır. 90 günlük kürlenme yaşından sonra taban külü beton karışımlarının, sıkıştırma ve çekme dayanımının referans numunelere göre neredeyse aynı düzeylerde sonuç verdiği görülmüştür. Çalışmada taban külünün, belli oranlarla beton karışımlarında kullanılmaya uygun bir malzeme olduğu ortaya konmuştur. Beton üretiminde kumun ikamesi süperplastikleştirici olmadan %30'a kadar kömür taban külü kullanımının uygun olduğu ve yapısal betonda süperplastikleştirici ile %50'ye kadar uygun olacağı ortaya konulmuştur. Ayrıca işlenebilirliğin sorun olmadığı diğer beton uygulamalarında %100 taban külünün kullanılabilmesi de belirtilmiştir (kaldırım blokları, oyuk bloklar vb.) [19]

Taban külünün uygun maliyetli bir malzeme olduğu, düşük sıkıştırılabilirliğe ve yüksek kesme mukavemetine sahip olduğu çeşitli çalışmalarda belirtilmiştir [10]. Bu davranışların bir sonucu olarak taban külünün, baraj bentleri, otoyollar ve diğer inşaat projeleri için uygun bir yapı malzemesi olarak kabul edilebileceği belirtilmiştir.[20]

Basirun ve diğ.[21], bir çalışmada taban külü boyutunun kömür yakıtlı kazanların dibinden toplanan kaba ve ince taneli, kum benzeri malzemeye benzer olduğu belirtilmiştir. Ayrıca taban külünün fiziksel ve kimyasal özelliklerinin, inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanımı için uygun özelliklere sahip olduğu birçok araştırmacı tarafından rapor edilmiştir.

Sonuç olarak, taban külünün beton üretiminde ince agrega ikamesi olarak [22], yapısal dolgu malzemeleri, yol temel malzemesi, toprak modifikasyonu vb. [23] yerlerde

kullanıldığı birçok çalışmada belirtilmiştir [12]. Bununla birlikte, literatürde taban külünün temel özellikleri hakkında araştırma eksikliği bulunmaktadır. Bu nedenle, bu çalışma Trakya Bölgesi taban küllerinin bertaraf edildiği Tekirdağ-Çorlu'da bulunan bir düzenli depolama tesisinden temin edilen taban küllerinin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada kullanılan taban külünün kimyasal bileşimi, tane biçim özellikleri ve dayanım aktivite indeksi belirlenmiş, CEM I 42,5 R Portland çimentosu ile karşılaştırma yapılarak taban küllerinin harç/betondaki potansiyel uygulamaları için uygunluğu değerlendirilmiştir.

2. Materyal ve Metot

Genel olarak atık taban külleri, çimento yerine bağlayıcı olarak ve kum yerine agrega olarak veya çok ince malzeme yerine dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle çalışma kapsamında Trakya bölgesinde oluşan atık taban külünün kimyasal oksit bileşenleri, fiziksel özellikleri, tane biçim ve yüzey dokusu özellikleri belirlenerek çimento ve CEN standard kum ile karşılaştırılması yapılmıştır. Ayrıca atık taban külünün çimento yerine kullanılabilirliği açısından önemli olan 75 µm elek altı atık taban külünün dayanım aktivite indeksi belirlenmiştir.

2.1. Materyal

2.1.1. Portland çimentosu (PÇ)

Çalışmada atık taban külünün karşılaştırılması için TS EN 197-1'e [24] uygun olarak üretilmiş CEM I 42,5 R Portland çimentosu kullanılmıştır.

2.1.2. Atık Taban Külü (TK)

Çalışmada kullanılan taban külleri Trakya bölgesi Tekirdağ ili Çorlu ilçesinde bulunan bir düzenli atık depolama sahasından temin edilmiştir. Taban külleri tesisten alındıktan sonra laboratuvar koşulları için yaklaşık 48 saat serilmiştir. Atık taban külünün çimento ile karşılaştırılması, 75 µm elek göz açıklığına sahip elekten elenen ve elek altına geçen malzemeyle, CEN standard kum ile karşılaştırılması ise 2 mm elek göz açıklığına sahip elekten elenen ve elek altına geçen malzeme ile yapılmıştır. Karakterizasyonu yapılan 75 µm elek altı ve 2 mm elek altı atık taban külü Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1. 75 µm elek altı (a) ve 2 mm elek altı (b) taban külü

2.1.3. Kum

2 mm elek altı atık taban külü ile TS EN 196-1 [25] standardına uygun CEN standart kum karşılaştırılmıştır. CEN Standart kum, en ince taneleri olan silisli bir kumdur.

2.2. Metot

Taban külünün özellikleri kömürün özelliklerine ve yakılma

yöntemine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Bu nedenle çalışma kapsamında öncelikle kullanılacak külün, kimyasal analizi ve biçimsel (tane dağılımı, incelik ve tane biçim özellikleri) karakterizasyonu yapılmıştır. Daha sonra çimentonun kimyasal analizi ve biçimsel karakterizasyonu yapılmıştır. Biçimsel karakterizasyon SEM görüntüleme tekniği ile gerçekleştirilmiştir (FEİ marka, QUANTA FEG 250). 2 mm elek altı atık taban külünün CEN standard kum ile karşılaştırılması sadece tane dağılımı, incelik modülü ve biçimsel yönden yapılmıştır. Ayrıca çimento yerine atık taban külünün kullanılabilirliğinin belirlenmesi için 75 µm elek altı atık taban külünün dayanım aktivite indeksi TS EN 450-1 [26] standardına göre gerçekleştirilmiştir.

3. Deneysel Sonuçlar

3.1. Kimyasal Analiz

75 µm elek altı atık taban külü ve çimento için gerçekleştirilen kimyasal analiz sonuçları Tablo 1'de görülmektedir.

Tablo 1. Çimento ve 75 µm elek altı atık taban külü kimyasal analiz sonuçları

Kimyasal Bileşen	Metot	Miktar (ağırlıkça, %)			
		Çimento	Standard değer (TS EN 197-1)	Atık taban külü	Standard değer (TS EN 450-1*)
Silis (SiO ₂)	TS EN 196-2	19,535	-	41,05	> 25.0
Kalsiyum oksit (CaO)		64,342	-	8,80	-
Alüminyum oksit (Al ₂ O ₃)		4,605	-	17,21	-
Demir oksit (Fe ₂ O ₃)		3,091	-	12,48	-
S+A+F (SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃)		-	-	70,74	> 70.0
Magnezyum oksit (MgO)		0,895	-	5,32	≤ 4.0
Alkali (Na ₂ O + 0,658 K ₂ O)		1,022	-	5,13	≤ 5.0
Klorür (Cl)		0,013	≤ 0.10	0,008	≤ 0.10
Sülfat (SO ₃)		3,365	≤ 4.00	1,96	≤ 3.00
Kızdırma kaybı		2,548	≤ 5.00	7,59	≤ 5.00
Çözünmeyen kalıntı		0,285	≤ 5.00	45,77	-

*Atık taban külünün standard değerlendirmesi uçucu küllerin sınır değerlerine göre verilmiştir.

Tablo 1 incelendiğinde çimento kimyasal oksit bileşen miktarlarının TS EN 197-1 [24] standardına uygun olduğu görülmektedir. 75 µm elek altı atık taban külüne ait kimyasal oksit bileşenleri incelendiğinde beklendiği gibi CaO miktarının azaldığı, SiO₂ miktarının arttığı görülmektedir. Ayrıca Al₂O₃ ve Fe₂O₃ miktarı artmaktadır. Atık taban küllerinin standard sınır değerleri olmadığı için benzer içeriğe sahip uçucu küllere ait TS EN 450-1'e [26] uygun standard değerler dikkate alınmıştır. TS EN 450-1 [26] standardına göre en önemli özelliklerden SiO₂ miktarının %25'den büyük olması ve toplam SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ miktarının % 70'den büyük olması istenmektedir. 75 µm elek altı atık taban külü bu iki değeri de sağlamaktadır.

Taban küllerinin fiziksel/kimyasal özellikleri, yalnızca

proseste kullanılan kömürün tipine değil, aynı zamanda kömürü yakmak için kullanılan tekniklere de bağlıdır. Spesifik olarak, taban küllerinin özellikleri şunlara bağlıdır: (i) kullanılan kazan konfigürasyonu, (ii) kazanın yanma durumu ve sıcaklığı, (iii) kullanılan kömürün özellikleri. Çeşitli çalışmalarda elde edilen taban küllerinin kimyasal analizi Tablo 2’de verilmektedir. Tablo 2’den de görüldüğü gibi taban küllerinin kimyasal özellikleri birbirlerinden oldukça farklıdır.

Tablo 2 Çeşitli çalışmalarda elde edilen kimyasal analiz sonuçları

Kimyasal Bileşen	Miktar (ağırlıkça, %)			
	[27]	[12]	[28]	[29]
SiO ₂	23-73	33,7	37,9-57	56,0
CaO	0,1-0,8	6,98	0,2-27,9	0,8
Al ₂ O ₃	13-27	12,9	20,5-24,3	26,7
Fe ₂ O ₃	3-11	0,32	4,1-10,6	5,8
MgO	0,1-0,7	0,65	1-3,2	0,6
Na ₂ O + 0,658 K ₂ O	0,66	1,37	0,3-2,9	4,6
SO ₃	-	0,9	0,6-4,8	0,1
Kızdırma kaybı	0,61-12,8	-	0,4-2,7	4,6

3.2. Tane Biçim Özellikleri

Çalışma kapsamında öncelikle 75 µm elek altı atık taban külü ve çimentonun fiziksel özellikleri karşılaştırılmıştır. Bu amaçla yoğunluk, özgül yüzey, 45 µm ve 90 µm elek kalıntıları ve SEM görüntüleri elde edildi. Çimento ve 75 µm elek altı atık taban külüne ait fiziksel özellikler Tablo 3’te görülmektedir.

Tablo 3 Çimento ve 75 µm elek altı atık taban külünün fiziksel özellikleri

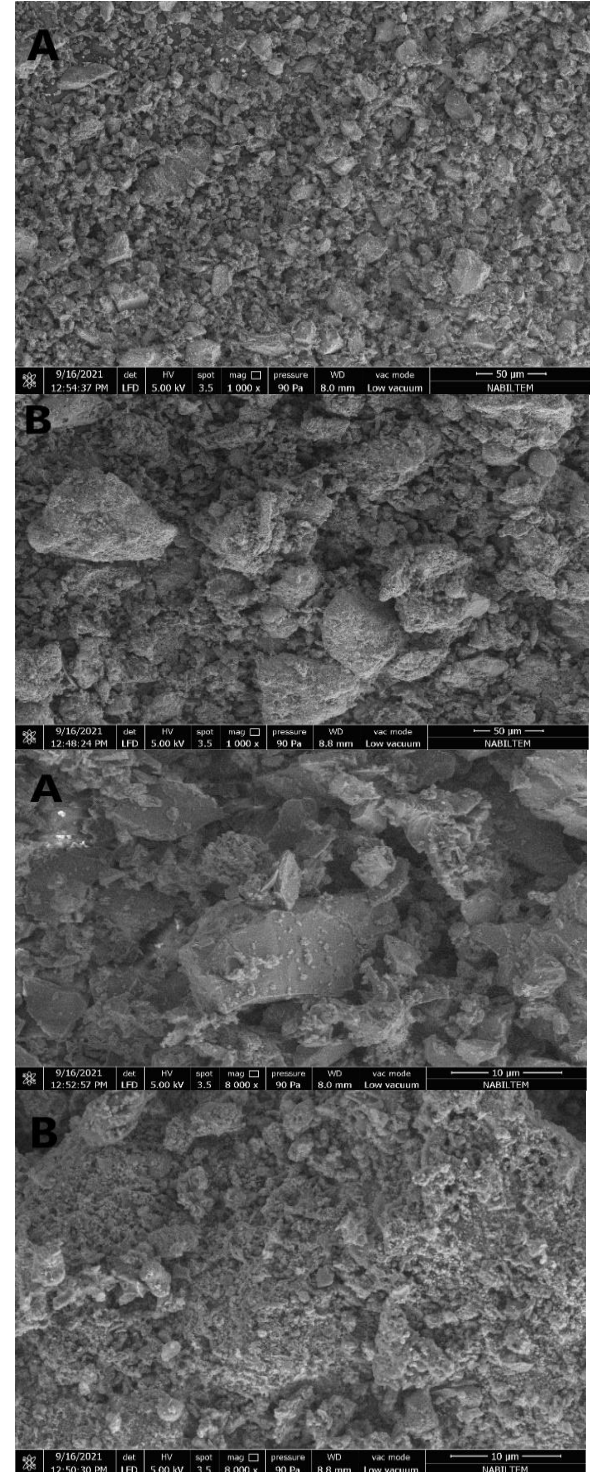
Özellik	Metot	Çimento	Atık taban külü
Yoğunluk (g/cm ³)	ASTM C 188 [30]	3.11	2.37
Özgül yüzey (cm ² /g)	TS EN 196-6 [31]	4530	2740
45 µm elek kalıntısı (%)		1.6	16.8
90 µm elek kalıntısı (%)		0.2	0.4

Çimentoya kıyasla atık taban külünün düşük yoğunluklu yani boşluklu bir yapıya sahip olduğu söylenebilir. Çimentonun özgül yüzeyi yaklaşık olarak atık taban külünden %60 oranında daha yüksektir. Bu nedenle atık taban külleri çimentoya göre daha iri tanelidir. Bu durum 45 µm elek kalıntısındaki yaklaşık %15.2 farkı açıklamaktadır.

Tane biçim ve tane yüzey dokusu özellikleri SEM görüntüleri ile belirlenmiştir. Çimento ve 75 µm elek altı atık taban külüne ait farklı çözünürlükteki SEM görüntüleri Şekil 2’de görülmektedir.

1000x ve 8000x olmak üzere iki farklı çözünürlükte SEM görüntüleri alınmıştır. 1000x çözünürlüğe sahip görseller, çimento ve 75 µm elek altı atık taban külünün inceliğinin

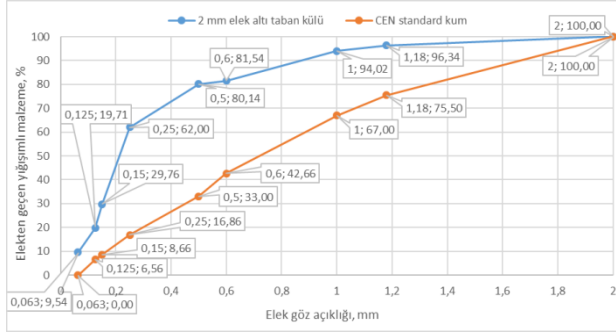
hem özgül yüzey hem de 45 µm elek kalıntısından elde edilen değerlerle benzer olduğunu göstermektedir. Ayrıca her iki malzemeye ait tane biçiminin köşeli olduğu görülmektedir. 8000x çözünürlüğe sahip görseller incelendiğinde çimento tane yüzey dokusunun pürüzsüz fakat 75 µm elek altı atık taban külü tane yüzey dokusunun ise oldukça pürüzlü olduğu görülmektedir. Ayrıca 75 µm elek altı atık taban külünün oldukça gözenekli bir yapıya sahip olduğu söylenebilir. 75 µm elek altı atık taban külünün pürüzlü ve gözenekli yapısı nedeniyle oluşabilecek işlenebilirlik kaybından dolayı bu tarz malzemelerin beton endüstrisinde kullanılabilirliği konusunda dikkat edilmelidir.



Şekil 2. Çimento (A) ve 75 µm elek altı atık taban külü (B)

SEM görüntüleri

Atık taban külünün kum yerine ve dolgu malzemesi olarak beton endüstrisinde kullanılması, 2 mm elek altı atık taban külünün tane dağılımının kum ile karşılaştırılmasını gerekli kılmaktadır. Bu amaçla 2 mm elek altı atık taban külü ile CEN standard kuma ait tane dağılımı ve incelik modülü karşılaştırıldı. 2 mm elek altı taban külü ve CEN standard kuma ait granülometri eğrileri Şekil 3'de görülmektedir.



Şekil 3. 2 mm elek altı atık taban külü ve CEN standard kuma ait granülometri eğrileri

Şekil 3 incelendiğinde 2 mm elek altı malzemenin tane dağılım eğrisinin, CEN standard kuma göre ordinata daha çok yaklaştığı görülmektedir. Bu durum 2 mm elek altı atık taban külünün CEN referans kuma göre inceliğinin oldukça yüksek olduğunu göstermektedir. Elek analizi sonucunda elde edilen granülometri eğrileri (Şekil 3) dikkate alınarak 2 mm elek altı taban külüne ve CEN standard kuma ait incelik modülü değerleri sırasıyla $k_{ATK} = 3.27$ ve $k_{SK} = 5.5$ olarak hesaplanmıştır. İncelik modülünün düşük olması malzemenin daha ince bir tane dağılımına sahip olduğunu göstermektedir.

CEN standard kuma göre 2 mm elek altı atık taban külünün oldukça ince olması, tane yüzey dokusunun pürüzlü ve gözenekli olması nedeniyle beton endüstrisinde 2 mm elek altı atık taban külünün CEN standard kum yerine kullanılmasında öncelikle işlenebilme için gerekli su miktarının deneysel olarak elde edilmesi gerekmektedir.

3.3. Dayanım Aktivite İndeksi

Mineral katkı malzemelerinin çimento yerine kullanılabilirliği için puzolanik özelliklerin belirlenmesi gerekmektedir. Bu nedenle bu çalışmada da atık taban külünün puzolanik özelliklerinin de belirlenmesi gerekmektedir. Çalışma kapsamında puzolanik özelliği ifade eden dayanım aktivite indeksi 75 µm elek altı atık taban külü için belirlenmiştir. 75 µm elek altı atık taban külüne ait 28 günlük dayanım aktivite indeksi Tablo 4'te görülmektedir.

Tablo 4. 28 günlük dayanım aktivite indeksi

Numune	Karışım oranı	PÇ* (g)	ATK* (g)	f_c (MPa)	Dayanım aktivite indeksi (%)	Sınır değer** (%)
Referans	% 100 PÇ	900	-	48.7	-	-
ATK	%25 ATK+ %75 PÇ	675	225	38.9	79.8	75

*PÇ: Portland çimentosu, ATK: 75 µm elek altı atık taban külü

**TS EN 450-1

75 µm elek altı atık taban külünün TS EN 450-1 [26] standardına göre gerçekleştirilen 28 günlük dayanım aktivite indeksi %79.8 olarak elde edilmiştir. Bu değer mineral katkı olarak kullanılan uçucu kül için verilen sınır değeri (79.8 > 75) sağlamaktadır.

4. Sonuçlar ve Öneriler

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen atık taban külü karakterizasyonundan elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

- Çimento yerine kullanılacak olan 75 µm elek altı atık taban külünün kimyasal oksit içeriği çimento ile farklılıklar göstermektedir. Fakat beton endüstrisinde mineral katkı maddesi olarak kullanılan uçucu kül için verilen sınır değerleri sağlamaktadır.
- 75 µm elek altı atık taban külü çimento göre daha yüksek tane boyutuna sahiptir.
- 75 µm elek altı atık taban külünün tane biçimi (köşeli) çimento tane biçimi (köşeli) ile benzerlik göstermektedir.
- Atık taban külünün tane yüzey dokusu çimento tanelerine göre oldukça yüksek pürüzlülüğe ve gözenekli bir yapıya sahiptir. Bu nedenle çimento yerine 75 µm elek altı atık taban külü kullanımı atık taban külü ilave oranının artması ile taze beton/harç malzemelerinin işlenebilmesini azaltmaktadır. Atık taban külünün çimento yerine kullanımı açısından ön deneme çalışmalarının yapılarak istenilen işlenebilme düzeyi için gerekli su ve/veya kimyasal katkı maddesinin belirlenmesi gerekmektedir.
- 75 µm elek altı atık taban külünün 28 günlük dayanım aktivite indeksi %79.8 olarak elde edilmiştir. Bu değer uçucu kül için verilen %75 sınırını sağlamaktadır. Bu nedenle 75 µm elek altı atık taban külü puzolanik özellik gösterdiği için çimento yerine belirli düzeylerde kullanılabilirliği düşünülmektedir. Ayrıca Ca(OH)₂'i bağlama yeteneğinin bir göstergesi olan ve doğal puzolanlar için TS 25 [32] standardında tanımlanan puzolanik aktivite değerinin de belirlenmesi önerilir.
- 2 mm elek altı taban külünün CEN standard kuma göre oldukça ince olduğu görülmektedir. Bu incelik tane yüzeyini ıslatmak için gerekli su miktarını artırmaktadır. Bu nedenle CEN standard kum yerine 2 mm elek altı atık taban külü kullanımı taze beton/harç numunelerinin işlenebilirliğini azaltmaktadır. İstenilen işlenebilme düzeyinde bir taze beton/harç numune üretimi için ön deneyler gerçekleştirerek gerekli su ve/veya kimyasal katkı maddesi miktarının belirlenmesi gerekmektedir.

Genel olarak atık taban külü çimento göre iri, CEN standard kuma göre ince tane boyutuna sahiptir. Ayrıca atık taban külünün pürüzlü yüzey dokusu ve gözenekli yapısı nedeniyle beton/harç üretiminde işlenebilme sorunları oluşturacaktır. Bu nedenle atık taban külünün kullanımı için öncelikle ön deneme üretimleri ile istenilen işlenebilme değeri için gerekli su ve/veya kimyasal katkı miktarının

belirlenmesi gerekmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından NKUBAP.06.YL.20.250 nolu proje ile desteklenmiştir.

Kaynaklar

[1] Statista, 2020. Leading countries by coal consumption worldwide in 2020, <https://www.statista.com/statistics/265510/countries-with-the-largest-coal-consumption/>

[2] TEİAŞ, 2020. Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi, <https://www.teias.gov.tr/tr-TR/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri>

[3] Tatiana, S. (2017). 2 Tennessee Cases Bring Coal's Hidden Hazard to Light. *The New York Times*. <https://www.nytimes.com/2017/04/15/climate/tennessee-coal-ash-disposal-lawsuits.html>

[4] Cwirzen, A. (2020). *Self-Compacting: Materials Properties and Applications*. Woodhead Publishing. Copyright © 2020 Elsevier Inc. All.

[5] Yao, Z.T., Ji, X.S., Sarker, P.K., Tang, J.H., Ge, L.Q., Xia, M.S., Xi, Y.Q. (2015). A comprehensive review on the applications of coal fly ash. *Earth-Science Reviews*, 141, 105–121.

[6] Singh, N. (2020) Shehnazdeep, Bhardwaj, A. (2020). Reviewing the role of coal bottom ash as an alternative of cement. *Construction and Building Materials*, 233, 117276.

[7] Mohammed, S.A., Koting, S., Katman, H.Y.B., Babalghaith, A.M., Pata, M.F.A., Ibrahim, R.M., and Karim, M.R. (2021). A Review of the Utilization of Coal Bottom Ash (CBA) in the Construction Industry. *Sustainability*, 13(14), 8031. <https://doi.org/10.3390/su13148031>

[8] Maliki A. I. F., Shahidan S., Ali N., Ramzi Hannan N. I. R., Zuki S. S., Ibrahim M. W., Azmi M. A and Rahim M. A. (2017). Compressive and tensile strength for concrete containing coal bottom ash. *Materials Science and Engineering Conference Series*, 271, 012055. doi:10.1088/1757-899X/271/1/012055

[9] Singh M. and Siddique R. (2013). Effect of coal bottom ash as partial replacement of sand on properties of concrete. *Resources, conservation and recycling*. 72, 20-32

[10] Lynn C. J, Ghataora G. S. and Obe R. K. D. (2017). Municipal incinerated bottom ash (MIBA) characteristics and potential for use in road pavements. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 10, 185-201.

[11] El Alami, S.M.E., Moussaoui, R. Monkade, M., Lahlou, K., Hasheminejad, N., Margaritis, A., Bergh, W. Van den Bergh, Vuye, C. (2019). Lime Treatment of Coal Bottom Ash for Use in Road Pavements: Application to EL Jadida Zone in Morocco. *Materials*, 12, 1–15.

[12] Ramzi N. I. R., Shahiron Shahidan, Maarof, M. Z., Ali, N. (2016). Physical and Chemical Properties of Coal Bottom Ash (CBA) from Tanjung Bin Power Plant. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 160, 012056 doi:10.1088/1757-899X/160/1/012056

[13] Klangvijit W. ve K. Sookramoon, K. (2018). Study of the Mix Cement Properties of Mortar Cement Used in Masonry and Plaster from the Waste Biscuit Firing of Ceramic. *MATEC Web of Conferences* 187, 02005. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201818702005>, ICCMP 2018.

[14] Abubakar A.U., Baharudin K.S., (2012). Potential Use of Malaysian Thermal Power Plants Coal Bottom Ash in Construction, *International Journal of Sustainable Construction Engineering Technology*, 3(2), 25–37.

[15] Basirun, N.F., Wan Ibrahim, M.H., Jamaludin N. ve Jaya, R.P. (2017). A Review: The Effect of Grinded Coal Bottom Ash on Concrete. *MATEC Web of Conferences* 103, 01007. DOI: 10.1051/mateconf/20171030100, ISCEE 2016

[16] Koçak, Y. (2011). Termik Santral Atığı Uçucu Külün Portland Çimentosu Özelliklerine Etkisi. *Politeknik Dergisi*, 14(2),135-140, 2011.

[17] Konak, S., Granüle Yüksek Fırın Cürufu ve Taban Külü İnce Agregaları ile Üretilmiş Betonun Gerilme Şekil Değişirme Davranışının İncelenmesi (2018), Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Zonguldak.

[18] Tınmaz Köse E., Akyıldız A., Yıldız A. (2013). Recycling of Coal Ash as a Building Material via a Stabilization/Solidification Method. *Global Nest Journal*, 15 (4), 485-493.

[19] Singh M., Siddique R. (2016). Effect Of Coal Bottom Ash As Partial Replacement Of Sand On Workability And Strength Properties Of Concrete. *Journal of Cleaner Production*, 112, 620-630.

[20] Ullah, A., Kassim, A., Abbil, A., Matusin, S., Rashid, A. S. A., Yunus, N. Z. M., Abuelgasim, R. (2020). Evaluation of Coal Bottom Ash Properties and Its Applicability as Engineering Material, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 498, 012044.

[21] Basirun, N.F., Wan Ibrahim, M.H., Jamaludin N. ve Jaya, R.P. (2017). A Review: The Effect of Grinded Coal Bottom Ash on Concrete. *MATEC Web of Conferences*, 103, 01007. DOI: 10.1051/mateconf/20171030100, ISCEE 2016.

[22] Ibrahim, M. H. W., Hamzah, A. F., Jamaluddin, N., Ramadhansyah, P. J., Fadzil, A. M. (2015). Split Tensile Strength on Self-compacting Concrete Containing Coal Bottom Ash. *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, 195, 2280–2289.

[23] Syahrul, M., Sani, M., Muftah, F., Muda, Z. (2010). The Properties of Special Concrete Using Washed Bottom Ash (WBA) as Partial Sand Replacement. *International Journal*

of Sustainable Construction Engineering and Technology, 1(2), 65–76.

[24] TS EN 197-1. Çimento- Bölüm 1: Genel çimentolar- Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri

[25] TS EN 196-1. Çimento deney metotları- Bölüm 1: Dayanım

[26] TS EN 450-1. Uçucu Kül - Betonda kullanılan - Bölüm 1: Tarif, özellikler ve uygunluk kriterleri

[27] Prakash, K. ve Sridharan, A. (2009). Beneficial Properties of Coal Ashes and Effective Solid Waste Management. *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management*, 13(4), 239-248.

[28] Bhatt, A., Priyadarshini, S., Mohanakrishnan, A. A., Abri, A., Sattler, M., Techapaphawit, S. (2019). Physical,

chemical, and geotechnical properties of coal fly ash: A global review. *Case Studies in Construction Materials*, 11, e00263.

[29] Singh, M., Siddique, R. (2013). Effect of coal bottom ash as partial replacement of sand on properties of concrete. *Resources, Conservation and Recycling, Resources*, 72, 20-32.

[30] ASTM C 188. Standard Test Method For Density Of Hydraulic Cement

[31] TS EN 196-6. Çimento deney yöntemleri - Bölüm 6: İncelik tayini

[32] TS 25. Doğal puzolan (tras)-Çimento ve betonda kullanılan-Tarifler, gerekler ve uygunluk kriterleri.