

ÜÇ FARKLI TERMİK SANTRALDEN ALINAN UÇUCU KÜLÜN İNCE TANELİ ZEMİNİN KOMPAKSİYON VE DAYANIM ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ PERFORMANSI

Hakan BİLİCİ^{1*}, Murat TÜRKÖZ², Hasan SAVAŞ³

¹ Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 26480, Eskişehir, ORCID No: <http://orcid.org/0000-0003-4776-5513>

² Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 26480, Eskişehir, ORCID No: <http://orcid.org/0000-0003-0241-113X>

³ Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 26480, Eskişehir, ORCID No: <http://orcid.org/0000-0002-3138-5308>

Anahtar Kelimeler	Öz
Kunduzlar barajı, Uçucu Kül, Soma, Tunçbilek, Çatalağzı	<i>Bu çalışmada Soma, Çatalağzı ve Tunçbilek termik santrallerinden elde edilen uçucu küllerin, Kunduzlar toprak barajının çekirdek kısmının inşa edildiği ince taneli zeminin kompaksiyon ve dayanım özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Zemine %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında uçucu kül katkıları eklenerek optimum su muhtevaları belirlenmiştir. Optimum su muhtevalarında hazırlanan numuneler kesme kutusu ve serbest basınç deneylerine tabi tutulmuştur. Çalışmanın sonucunda; her üç termik santralden alınan uçucu küllerin katkı oranları arttıkça, zeminin optimum su muhtevasının arttığı ve maksimum kuru yoğunluğunun ise azaldığı belirlenmiştir. Serbest basınç dayanımları karşılaştırıldığında, Tunçbilek ve Çatalağzı uçucu küllerinin %10 katkı oranında, Soma uçucu külünün ise % 5 katkı oranında en yüksek dayanımlara ulaştığı belirlenmiştir. Kullanılan uçucu küller arasında ise en yüksek dayanım Soma uçucu külünün %5 katkısında oluşmuştur. Kayma dayanımları karşılaştırıldığında ise en yüksek dayanım Tunçbilek ve Çatalağzı uçucu küllerinde %10, Soma uçucu külünde ise %5 katkı oranında meydana gelmiştir.</i>

PERFORMANCE OF FLY ASH PROVIDED FROM THREE DIFFERENT THERMAL PLANTS ON THE COMPACTION AND STRENGTH PROPERTIES OF FINE-GRAIN SOIL

Keywords	Abstract
Kunduzlar dam, Fly Ash, Soma, Tunçbilek, Çatalağzı	In this study, the effects of fly ash obtained from Soma, Çatalağzı and Tunçbilek thermal power plants on the compaction and strength properties of the fine-grained soil on which the core part of the Kunduzlar soil dam is built were investigated. Optimum water contents were determined by adding 5%, 10%, 15%, 20%, 25% and 30% fly ash additives to the ground. Samples prepared at optimum water contents were subjected to shear box and unconfined pressure tests. As a result of the study; it was determined that the optimum water content of the soil increased and the maximum dry density decreased as the contribution rates of the fly ash taken from all three thermal power plants increased. When the unconfined compressive strengths were compared, it was determined that Tunçbilek and Çatalağzı fly ash reached the highest strengths at 10% and Soma fly ash at 5%. Among the fly ash used, the highest strength was obtained in the 5% contribution of Soma fly ash. When the shear strengths are compared, the highest strength was observed in Tunçbilek and Çatalağzı fly ash with an admixture of 10% and in Soma fly ash with an additive rate of 5%.

Araştırma Makalesi

Research Article

Başvuru Tarihi

: 18.06.2022

Submission Date

: 18.06.2022

Kabul Tarihi

: 08.09.2022

Accepted Date

: 08.09.2022

* Sorumlu yazar; e-posta : hbilici@ogu.edu.tr



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Giriş

Dünyada artan popülasyon beraberinde enerji gereksinimini de arttırmıştır. Bu enerji gereksinimi çeşitli yöntemler ile karşılanmaktadır. Bu gereksinimini karşılamak amacıyla kullanılan yöntemlerden biri de kömürün yakılmasıdır. Çağımızda kömür oldukça önemli bir yakıttır. Dünyada üretilen elektrik enerjisinin %30'u kömür kullanılan termik santrallerden karşılanmaktadır (Koç ve Kaya, 2015). Yakıt olarak kömür kullanılan termik santrallerde tercih edilen sistem çoğunlukla pulverize kömür yakma sistemidir (Türker, Erdoğan, Katnaş ve Yeğinobalı, 2009; Tokyay ve Erdoğan, 1998).

Ülkemizde 380 milyon ton taş kömürü, 12.5 milyar ton linyit rezervi bulunmaktadır. Termik santrallerde kullanılan linyit kömürün %20- % 50'si, taş kömürün ise %10 - % 15'i kül olarak üretilmektedir. Uçucu kül (UK), pulverize kömürün yakılmasıyla elde edilen baca gazları aracılığıyla taşınıp siklon ya da elektro filtrelerde bir araya getirilen bir malzemedir. Yüksek derecelerde kömürün yanması sonucu ortaya çıkan ergimiş madde gaz akışı ile soğuyarak küre biçimli kül tanelerine dönüşmektedir. Dönüşen taneler 0.5 - 150 mikron boyutundadır ve baca gazları aracılığıyla taşındıklarından uçucu kül olarak tanımlanırlar (Malhotra ve Ramezianpour, 1994). Uçucu küller genel olarak termik santrallerde elektrik enerjisi üretmek için yakılan kömürden elde edilmektedir. (Morrison, 1970). Olumsuz etkilerinden dolayı uçucu küllerin doğaya salınmaması için bacalardan çıkması önlenmektedir. Mekanik ve elektrostatik yollarla toplanan küller santral etrafında ya da elverişli mekânlarda depolanmaktadır. İlerleyen zamanlarda bir yığılma olacağından bu durum idare için önemli bir sorun teşkil etmektedir. Ülkemizde yakılan kömür miktarı yıllık 55 milyon tondur. Bunun sonucunda yan ürün olarak oluşan kül miktarı ise 15 milyon ton değerine ulaşabilmektedir (Kaplan ve Gültekin, 2010).

Uçucu küller genel olarak gri-kurşuni renklidir. Rengin koyuluğu ve açıklığı kömürün yanma biçimine bağlıdır. Kömürün öğütülme şekli uçucu külün inceliğini belirlemektedir. İnceliğe etki eden bir başka özellik ise bacadan küllerin kaçma oranıdır. Bacadan küllerin kaçmasını önleyip bacadan kaçan kısmı minimuma indirdiğimizde uçucu külün incelik seviyesi artmaktadır. Uçucu küllerin yoğunluğu, mineralojik yapısı ve inceliğine bağlı olarak 2.2 gr/cm³ ile 2.7gr/cm³ arasında değişmektedir. Uçucu küller, kimyasal olarak alüminyum oksit, silisyum oksit, demir oksit gibi bileşikler içermektedir (EİE, 1979; Kefelioglu, 1998).

Uçucu küllerin ortak özellikleri, bölgeden bölgeye ve hatta aynı bölgede bile değişkenlik gösterebilmesidir. Soma ve Tunçbilek termik santrallerinde linyit kömürü kullanılırken, Çatalağzı termik santralinde taş kömürü kullanılmaktadır. (Kefelioglu, 1998). Soma, Çatalağzı ve Tunçbilek uçucu küllerinin özgül yüzey değerleri (en az

2800 cm²/g), çimento standartlarında aranan şartları da sağlamaktadır (Tokyay ve Erdoğan, 1998).

Soma, Tunçbilek ve Çatalağzı termik santralinden çıkan uçucu küllerin farklı olmasının başlıca sebepleri; termik santralinde kullanılan kömürün farklılığı, kömürün pulvarizasyon (yakılmadan önceki kömürün öğütülme süresi) derecesi, kazan türü, kömürün yakılma sıcaklığı ve kül toplama sistemlerinin özellikleri olarak sayılabilmektedir (Hycnar,1983).

Termik santrallerden atık olarak çok ciddi miktarda uçucu kül çıkmaktadır. Sadece Tunçbilek termik santralinde, elektrik üretmek için yılda 2.350.000 ton kömür yakılmaktadır. Yanma sonrası 854.670 ton uçucu kül atık olarak kalmaktadır. Baca gazından elektronik filtreler yardımıyla bu atığın % 63'ü tutulmakta ve tutulabilen atığın sadece %1,4'ü satılmakta, geri kalanı ise stok sahasına gönderilmektedir (Kurama v.d. 1999). Bu şekilde uygulama ile stoklama maliyeti ve çevre kirliliği artmaktadır. Bu durum maliyetlere neden olmakta ve ülke ekonomisine zararlar vermektedir.

Uçucu küller geoteknik çalışmalarda dolgularda ve zemin stabilizasyonunda kullanılmaktadır (Mehta, 1986). Uçucu küller ayrıca donatılı zemin duvarlarda duvarın arkasındaki dolguda ve karayolu kaplamasının altındaki dolgu tabakası inşasında da kullanılmaktadır (Wasti, 1993). Hava ile etkileşimde olmayan zeminlerde bor, molibden, selenyum, alüminyum vb. maddeleri toplama özelliğinden dolayı atık biriktirme sahalarında tercih edilmektedir. Bu elementlerin ortadan kaldırılması üretim mekânlarında toksisiteyi azaltacağından dolayı canlı sağlığı açısından da uçucu küllerin kullanılması önemli kazanımlar getirmektedir. Uçucu küller, daha çok zemin enjeksiyon işlemlerinde çimento ve kireçle beraber tercih edilir. Bu durum az miktarda çimento ve katkı maddesi kullanımına sebep olacağından ülkemizin ekonomisini olumlu yönde etkilemektedir. Dolgu malzemesinin az kullanılması sonucu daha az tahripler olacağından dolayı uçucu kül kullanımı çevreye ait problemlerin çözümünde de kolaylıklar sağlayacaktır (Kaplan ve Gültekin, 2010).

Endüstriyel bir atık malzeme olan uçucu küllerin zemin stabilizasyonunda kullanılması da mümkündür. Zemin uçucu kül ile stabilize edildiğinde zeminin özelliklerinde üç farklı şekilde iyileşme olmaktadır. Bunlar; uçucu kül katkısının kullanımında hidrasyon nedeniyle oluşan çimentolanmadan dolayı, serbest bulunan kireçten (CaO) dolayı oluşan plastisite azalma ve alümina ve silika bileşiklerinin puzolanik tepkimeleri sonucunda oluşan iyileşmelerdir (Kurama, Bilgiç ve Kaya, 1999). SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ miktarı TS 639 "Uçucu Kül" standardında en az %70 verilmiştir. Uçucu külün içerisindeki CaO oranı %10'dan daha az ise düşük kireçli, daha fazla ise yüksek kireçli uçucu küller olarak adlandırılmaktadır. Düşük kireçli uçucu küller yalnızca puzolanik özelliğe sahipken yüksek kireçli uçucu küller puzolanik özelliğin yanı sıra amorf silis, trikalsiyum

aluminat, serbest kireç vb. malzemeleri bünyelerinde barındırdıklarından dolayı bir miktar bağlayıcılık özelliğine de sahip olabilmektedirler (Tokyay ve Erdoğan, 1998; Bilici, Okur, Türköz ve Savaş, 2020). Uçucu küllerin zemin stabilizasyonunda kullanımı çevre kirliliğinin azalmasına da neden olabilecektir (Aytekin, 2002).

2. Bilimsel Yazın Taraması

Uçucu kül katkısı ile zeminler stabilize edildiğinde zeminlerin şişme potansiyeli ve geçirgenliği azalmaktadır (Ferguson, 1993; Wasti, 1993). Şişme potansiyeli yüksek Hawaii Kiline, uçucu kül eklendiğinde sıkışma özelliklerinde iyileşme olmaktadır (Nicholson ve Kashyap, 1993). Uçucu kül ilavesinin kilin kayma direncinde önemli derecede artışlara neden olduğu belirlenmiştir (Tan ve İyisan, 1996). Zemine ilave edilen uçucu kül katkısında kür süresi arttıkça dayanımda da artışlar gözlemlenmiştir. Bu artışlar hem kohezyon hem de kayma direnci açısı değerlerinde olduğu belirlenmiştir. Kohezyonun artışı uçucu külün çimentolanma özelliğine, kayma direnci açısından meydana gelen artış ise uçucu kül taneciklerinin küresel yapısından dolayı olduğu belirlenmiştir (Çakır, 1999). Ayrıca, uçucu kül ilavesi yapılan zeminin plastik limit, likit limit, optimum su muhtevası, kohezyon, içsel sürtünme açısı değerinde artış, boşluk oranı ve maksimum kuru yoğunluk, plastisite indisinde ise azalma meydana gelmektedir (Aytekin, 2009).

Uçucu kül ve kireç oranı %15 sabit tutularak, granit atığının (polisaj) % 10, % 15 ve % 20 katkı oranlarında hazırlanan kaolen kili numunelerinin CBR ve mukavemet değerlerinde katkısız kaoline göre artış olduğu belirlenmiştir (Öntürk, 2011). Eskişehir meşelik zeminine % 5 ve %35 arasında farklı oranlarda eklenen uçucu kül ilavesi kuru yoğunluğu düşürürken, serbest basınç dayanımı ve optimum su muhtevası değerlerinin yükselmesine neden olmuştur (Bilici, Okur, Türköz ve Savaş, 2018).

Kil zemine C sınıfı uçucu külün katkısı ile hem düşük plastisiteli kilde hem de yüksek plastisiteli kilde plastik limitler artmaktadır. Uçucu kül katkısı ile likit limit değerlerindeki değişim kıyaslandığında ise düşük plastisiteli kilde artış gözlenirken yüksek plastisiteli kilde azalma meydana gelmiştir. Ancak her iki kilde de uçucu kül katkısı arttıkça ile plastisite indisi değerlerinde azalma olduğu belirlenmiştir (Nalbantoğlu, 2004).

Acosta, Edil ve Benson (2003) tarafından, optimum su muhtevasında hazırlanan yedi farklı zemin üzerinde % 0, %10, %18 ve % 30 oranlarında yüksek kireçli sınıfa giren uçucu kül katkı oranlarında CBR ve serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Katkısız numunelere kıyasla %18 uçucu kül içeren katkılı numunelerin 4 kat daha yüksek dayanıma ulaştığı belirlenmiştir.

Soma termik santralinden temin edilen uçucu külün yüksek plastisiteli ve dispersif özellik gösteren bir kilin geoteknik özelliklerine etkisinin incelendiği bir çalışmada, %7 oranında uçucu kül katkısında en yüksek serbest basınç dayanımına ulaşıldığı, %13 oranında ise optimum su muhtevasında artış ve kuru yoğunluk değerlerinde ise azalış olduğu belirlenmiştir (Çokça, 2001). Savaş, Türköz, Seyrek ve Ünver (2018), tarafından yapılan çalışmada da, dispersif özellik gösteren ve şişme potansiyeline sahip düşük plastisiteli killere Soma (C sınıfı) ve Çatalağzı (F sınıfı) uçucu külleri ilave edildiğinde her iki probleminde azaldığı belirlenmiştir. Çatalağzı uçucu külü katkısı Soma uçucu külüne oranla dayanım karakteristiklerine ve şişme potansiyeline daha fazla katkı sağlamıştır. Dispersif zeminlerde ideal uçucu kül katkı oranı %10 olduğu, C ve F sınıfı uçucu küllerin zemin iyileştirme için kullanılabileceği belirtilmiştir.

Bu çalışmada ise bilimsel araştırmalarda yaygın olarak kullanılan Soma, Tunçbilek ve Çatalağzı termik santrallerinden elde edilen uçucu küllerin ince taneli zeminin dayanım özelliklerine olan etkileri bir arada değerlendirilmiştir.

3. Yöntem

Bu çalışmada Kunduzlar toprak barajının çekirdek kısmının inşa edildiği zemin, Tunçbilek, Soma ve Çatalağzı termik santrallerinden alınan uçucu kül katkısıyla stabilize edilmiştir. Zemine %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında kül katkıları eklenmiş ve optimum su muhtevaları, serbest basınç ve kesme kutusu dayanımlarının değişimi belirlenmiştir. Bu çalışma yayın ve araştırma etiği kurallarına riayet edilerek hazırlanmıştır.

3.1. Materyal

Çalışmada kullanılan zemin ve uçucu kül örneklerini tanımlamak için, hidrometri analizi (ASTM D 422-63), elek analizi, özgül gravite (ASTM D 854-00) ve kıvam limitleri (ASTM D 4318-00) deneyleri yapılmıştır (Tablo 1).

Tablo 1

Deneylerde Kullanılan Zemine Ait Özellikler	
Özellik	Değeri
Özgül Gravite(Gs)	2.69
Optimum su muhtevası (w_{opt} , %)	21
Maksimum kuru yoğunluk (Mg /m^3)	1.54
Likit limit (LL, %)	49
Plastik limit (PL, %)	28
Plastisite indisi (PI, %)	21
Kil Yüzdesi (%)	22
Serbest Basınç Dayanımı (kN/m ²)	125.60

Deney aşaması ve numunelerin hazırlanması ilgili standart yöntemlere uyularak yapılmıştır (ASTM, 1994). Eskişehir Afyonkarahisar karayolunun 70. kilometresinde yer alan Kunduzlar barajından alınan zeminin geoteknik özellikleri laboratuvarında belirlenmiştir. Zeminin, Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine (USCS) göre ML (Düşük Plastisiteli Silt) olarak tanımlanmıştır (ASTM D 2487-00).

Uçucu küller kimyasal özelliklerine göre F ve C sınıfı olarak sınıflandırılırlar (TS EN 197-1; ASTM C 618).

- F sınıfı bitümlü kömürün yakılmasıyla elde edilir. Puzolanik özellik sergilerler. İçeriğindeki silika (SiO_2), alümina (Al_2O_3) ve demir oksit (Fe_2O_3) miktarı toplamı % 70'den fazladır. CaO miktarı %10'dan az olduğu için ise düşük kireçli olarak da nitelendirilirler.

- C sınıfı linyit ya da yarı-bitümlü kömürün yakılmasıyla elde edilir. Puzolanik özelliğinin yanında bağlayıcılık özelliği de sergilerler. İçeriğindeki (SiO_2), (Al_2O_3), (Fe_2O_3) bileşenleri toplamı %50'den fazladır. Bununla birlikte CaO miktarı % 10'dan daha fazla olduğundan yüksek kireçli uçucu kül olarak da nitelendirilirler.

Tunçbilek, Soma ve Çatalağzı uçucu küllerinin fiziksel özellikleri Tablo 2'de, kimyasal özellikleri ise Tablo 3'de sunulmuştur. Çalışmada kullanılan Tunçbilek ve Çatalağzı uçucu külleri F sınıfına ve Soma uçucu külü ise C sınıfına girmektedir.

Tablo 2

Tunçbilek, Soma ve Çatalağzı Uçucu Küllerinin Fiziksel Özellikleri

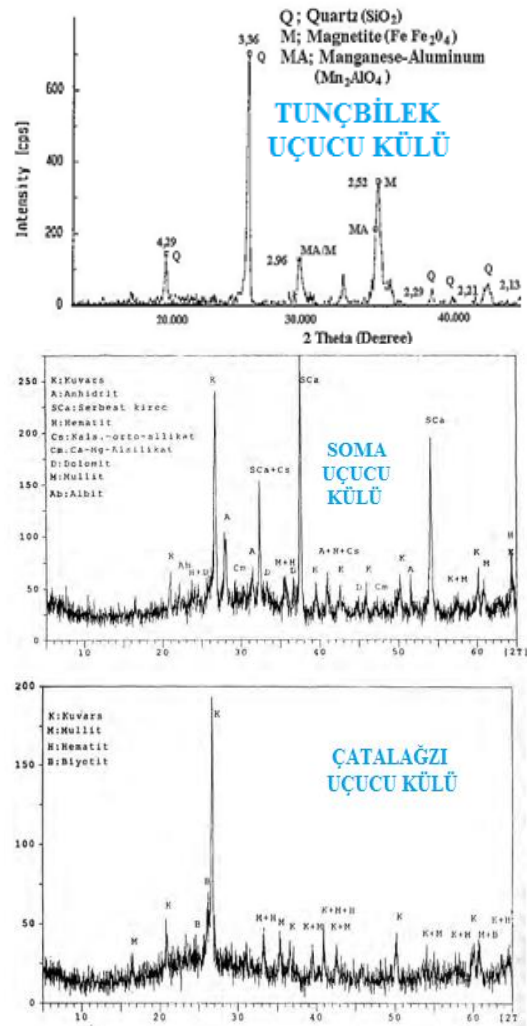
	Tunçbilek	Soma	Çatalağzı
Özgül Gravite (Gs)	2.08	2.20	2.00
Özgül Yüze	3812	3720	2165
Dane büyüklüğü analizi (%)	6/82/12	8/83/19	6/79/15
Likit limit (LL, %)	55	52	45
Plastik limit (PL, %)	29	24	21
Plastisite indisi (PI,	26	28	24
Optimum su muhtevası (w_{opt} , %)	36	38	34
Maksimum kuru yoğunluk (ρ_{dmax} , Mg/m^3)	1.35	1.42	1.28

Tablo 3

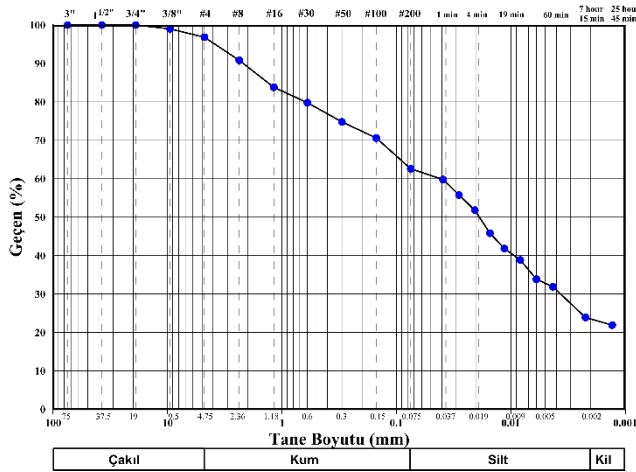
Tunçbilek, Soma ve Çatalağzı Uçucu Küllerinin Kimyasal Özellikleri (Yılmaz, 2004; Ünal ve Uygunoğlu,2004; Türker ve diğ.,2009)

	Tunçbilek	Soma	Çatalağzı
SiO_2 (%)	58.82	45.71	58.75
CaO (%)	2.18	17.16	1.46
Al_2O_3 (%)	19.65	23.67	25.24
Fe_2O_3 (%)	10.67	4.47	5.76
MgO (%)	3.92	1.58	2.22
SO_3 (%)	0.48	4.11	0.08
K_2O (%)	1.9	1.26	4.05

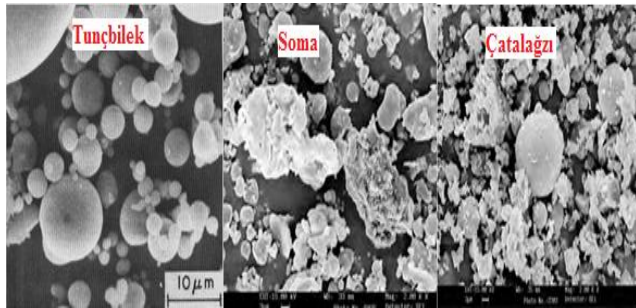
Uçucu küllerin X-Ray Difraktogramı Şekil 1'de, kullanılan zeminin granülometri eğrisi ise Şekil 2'de verilmektedir. Uçucu küllerin SEM'deki görüntüsü Şekil 3'de ve uçucu küllerin mineralojik kompozisyonları ise Tablo 4'de yer almaktadır.



Şekil 1. Uçucu küllerin X-Ray Difraktogramı (Kurama vd. 1999; Türker vd., 2009)



Şekil 2. Zemine Ait Granülometri Eğrisi



Şekil 3. Uçucu küllerin SEM'deki görüntüsü (Aruntaş, 2006; Türker ve diğ., 2009)

Tablo 4

Uçucu Küllerin Mineralojik Kompozisyonları (Aruntaş, 2006; Türker ve diğ., 2009).

Mineral Adı	Tunçbilek (%)	Soma (%)	Çatalağzı (%)
Mullit	8.8	4.3	18.1
Kuvartz	13.9	5.1	10.9
Manyetit	4.1	0.6	0.2
Hematit	3.0	2.0	0.1
Anhidrit	-	7.4	-
Serbest CaO	0.9	9.8	0.7
Plajiyoklaz	-	~20	-
Camsı ve amorf faz	~70	~50	~70

3.2. Numunelerin Hazırlanması

Tunçbilek, Soma ve Çatalağzı termik santrallerinden alınan uçucu kül katkılı zeminin dayanım özelliklerinin değerlendirilmesinde kesme kutusu ve serbest basınç dayanımı deneylerinin yapılması amaçlanmaktadır. Bu amaca yönelik zemin ile zemin ağırlığının %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında uçucu kül karıştırılarak numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan

numuneler standart proktor deneyine tabi tutulmuştur. Bu deney sonrasında maksimum kuru yoğunluk ve optimum su muhtevaları belirlenmiştir. Belirlenen kompaksiyon parametrelerinde hazırlanan numuneler kullanılarak kesme kutusu ve serbest basınç dayanım deneyleri yapılmıştır. Deney programı Tablo 5’de yer almaktadır.

Tablo 5

Deney programı

Uçucu Kül	Katkı (%)	Kompaksiyon Deneyleri	Serbest Basınç Deneyleri	Kesme Kutusu Deneyleri
Katkısız	0	X	X	X
	5	X	X	X
	10	X	X	X
	15	X	X	X
	20	X	X	X
	30	X	X	X
Soma	5	X	X	X
	10	X	X	X
	15	X	X	X
	20	X	X	X
	25	X	X	X
	30	X	X	X
Tunçbilek	5	X	X	X
	10	X	X	X
	15	X	X	X
	20	X	X	X
	25	X	X	X
	30	X	X	X
Çatalağzı	5	X	X	X
	10	X	X	X
	15	X	X	X
	20	X	X	X
	25	X	X	X
	30	X	X	X

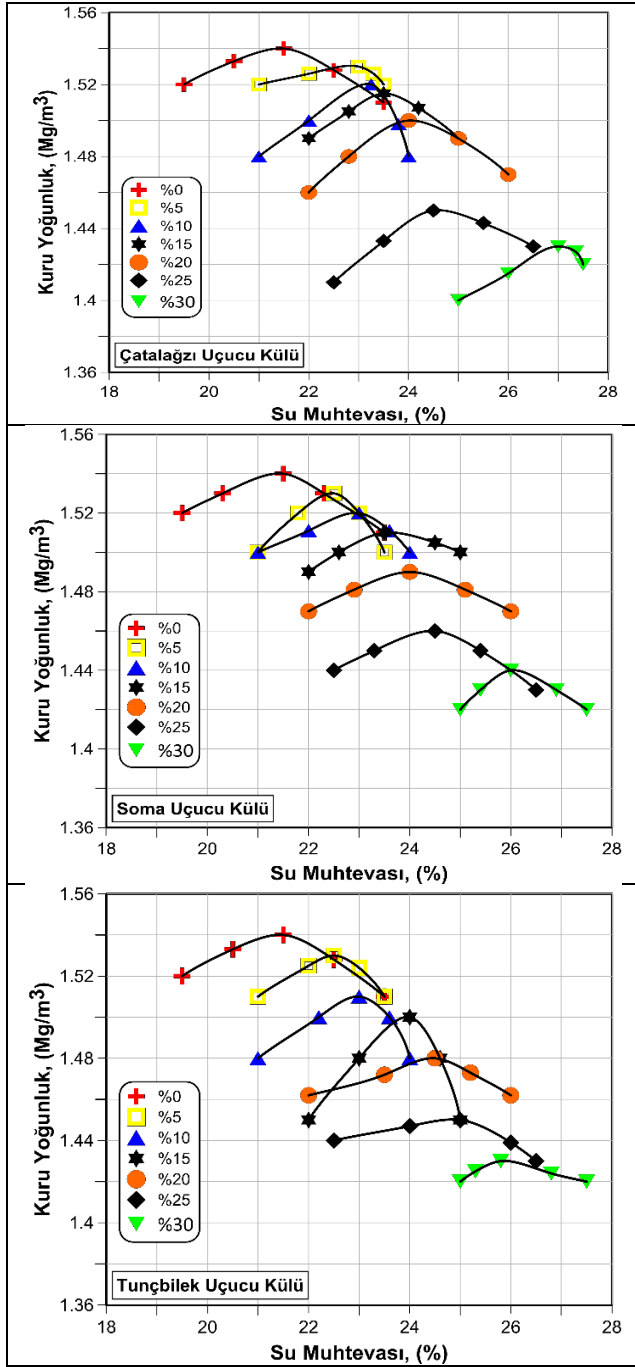
4. Bulgular

Tunçbilek, Soma ve Çatalağzı uçucu küllerinin katkısı ile hazırlanan numunelerin standart proktor enerjisinde kompaksiyon deneyi sonrasında elde edilen kompaksiyon karakteristikleri olan optimum su muhtevası (w_{opt}) ve maksimum kuru yoğunluk (ρ_{dmax}) değerleri Tablo 6’da, kompaksiyon eğrileri ise Şekil 4’de sunulmuştur.

Tablo 6

Deney Numunelerinin Kompaksiyon Karakteristikleri

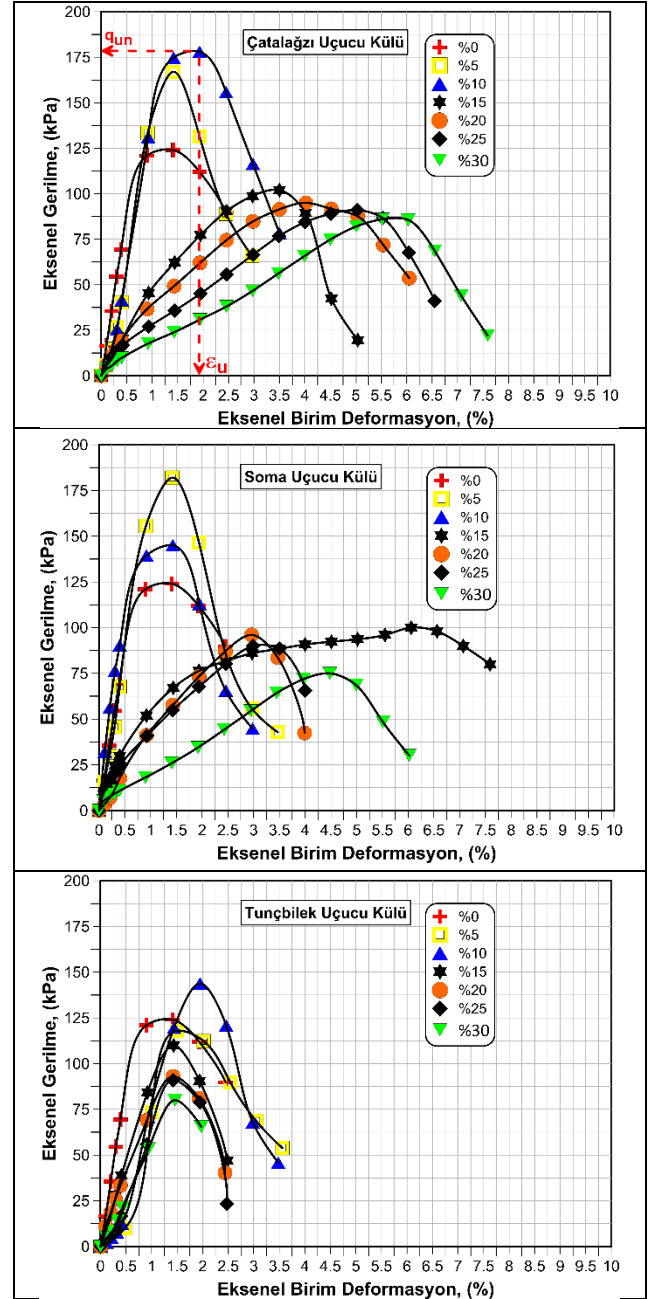
Katkı Oranları	Soma		Çatalağzı		Tunçbilek	
	ρ_{dmax}	w_{opt}	ρ_{dmax}	w_{opt}	ρ_{dmax}	w_{opt}
%0	1.540	21.50	1.540	21.50	1.540	21.50
%5	1.530	22.50	1.530	23.00	1.530	22.50
%10	1.520	23.00	1.520	23.25	1.510	23.00
%15	1.510	23.50	1.515	23.50	1.500	24.00
%20	1.490	24.00	1.500	24.00	1.480	24.50
%25	1.460	24.00	1.450	24.50	1.450	25.00
%30	1.440	26.00	1.430	27.00	1.430	25.80



Şekil 4. Deney Numunelerinin Proktor Deneyi Sonucu Elde Edilen Kompaksiyon Eğrileri

Genel olarak değerlendirildiğinde, her üç uçucu kül için katkı yüzdelerinin artışına bağlı olarak kuru yoğunlukların düştüğü ve optimum su muhtevalarının arttığı görülmüştür. Katkısız durumla karşılaştırıldığında kuru yoğunlukta %20 katkı oranına kadar dereceli bir azalma olurken artan katkı yüzdelerinde bu azalma daha da artmıştır. Zeminden daha ince tane boyutu ve düşük özgül ağırlığa sahip olan katkı nedeniyle su muhtevaları artışında da benzer durum olmuştur.

Katkısız ve üç farklı termik santralden (Tunçbilek, Soma, Çatalağzı) alınan %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında optimum şartlarda hazırlanmış katkı numunelerinin serbest basınç deneyi sonucunda eksenel birim deformasyona bağlı olarak eksenel gerilme değerlerinin değişimi belirlenmiştir (Şekil 5).



Şekil 5. Numunelerin Katkı Oranına Bağlı Olarak Serbest Basınç Deneyinde Elde Edilen Eksenel Gerilme ve Eksenel Birim Deformasyon Grafikleri

Serbest basınç deneyi sonucu belirlenen serbest basınç dayanımları (q_{un}) ve en yüksek dayanım değerine karşılık gelen eksenel birim deformasyon değerleri (ϵ_u) Tablo 7'de sunulmuştur. En yüksek dayanım F sınıfı

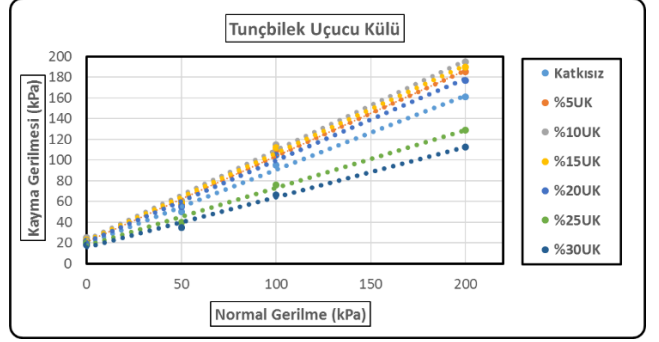
uçucu kül olan Tunçbilek ve Çatalağzı uçucu kül katkıli numunelerinde % 10 katkı oranında, C sınıfı olan Soma uçucu külü katkısında ise %5 oranında meydana gelmiştir. Katkısız numunenin serbest basınç dayanımına (125.60 kPa) oranla Soma uçucu külünde %5 katkı oranında serbest basınç dayanımı (SBD) 182 kPa'a ulaşmış olup yaklaşık % 47 daha yüksek dayanım olmuştur. Tunçbilek uçucu külünün %10 katkıli numunesinin serbest basınç dayanımında (143.80 kPa) yaklaşık %16 ve Çatalağzı uçucu külünün % 10 katkıli numunesinde de serbest basınç dayanımında (178 kPa) yaklaşık % 45 artış belirlenmiştir.

Tablo 7

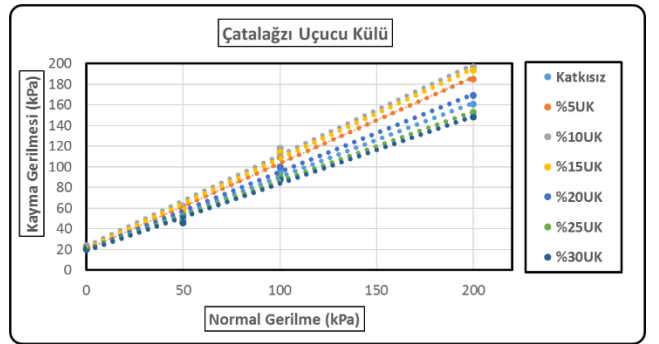
Zemin Numunelerinin SBD Deneyi Sonucu Gerilme-Deformasyon Değerleri

Uçucu Kül Türü	Katkı Oranı (%)	Eksenel Birim Deformasyon, ϵ_u (%)	Serbest Basınç Dayanımı, q_{un} (kPa)
Katkısız	0	1.41	124.00
Soma	5	1.42	182.00
	10	1.43	145.00
	15	6.06	100.00
	20	2.96	96.00
	25	2.99	90.00
	30	4.48	75.00
Tunçbilek	5	1.50	118.00
	10	1.95	143.80
	15	1.43	110.00
	20	1.42	93.00
Çatalağzı	25	1.42	91.00
	30	1.46	80.00
	5	1.42	167.00
	10	1.93	178.00
	15	3.50	102.00
	20	4.02	95.00
25	5.03	91.00	
30	5.52	86.00	

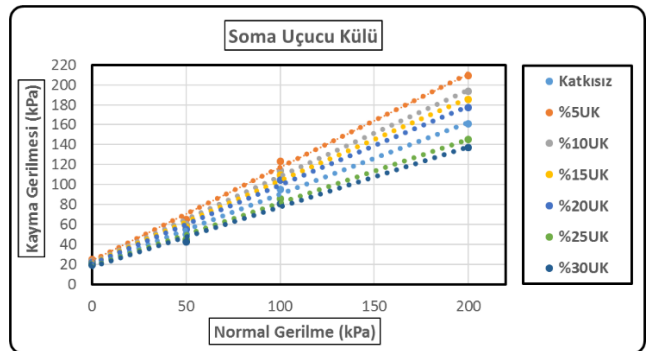
Kesme kutusu deneyinde, kesme esnasında boşluk suyu basıncı oluşmayacak şekilde numune bünyesinde bulunan boşluk suyunun drenaj hızından daha düşük bir hızda kesilmesi gerekliliğinden, kesme esnasında kesme hızı 0.01 mm/dk olacak şekilde düşük hızda deney yapılmıştır. Tunçbilek, Çatalağzı ve Soma uçucu külü katkıli ile hazırlanan numunelerin kesme kutusu deneyi sonucunda oluşan göçme zarflarına ait grafikler sırasıyla Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8'de sunulmuştur.



Şekil 6. Tunçbilek Uçucu Külü ile Hazırlanan Numunelerin Kesme Kutusu Dayanımı Grafikleri



Şekil 7. Çatalağzı Uçucu Külü ile Hazırlanan Numunelerin Kesme Kutusu Dayanımı Grafikleri



Şekil 8. Soma Uçucu Külü ile Hazırlanan Numunelerin Kesme Kutusu Dayanımı Grafikleri

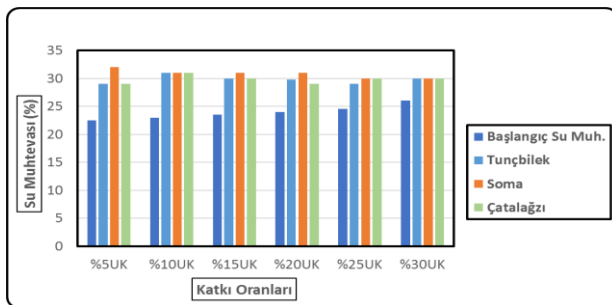
Zemin numunelerinin kesme kutusu deneyi sonucu elde edilen kayma dayanım parametreleri Tablo 8'de verilmiştir. Katkısız numunenin kesme kutusu deneyi sonucunda belirlenen kayma dayanımı parametreleri; kohezyon değeri 20 kPa ve içsel sürtünme açısı 35° olarak belirlenmiştir. Kesme kutusu deneyi sonucunda en yüksek dayanım Tunçbilek ve Çatalağzı uçucu külünde %10 katkı oranında Soma uçucu külünde ise %5 katkı oranında meydana gelmiştir. Bu katkı oranlarında Tunçbilek uçucu külü için %21, Çatalağzı uçucu külü için %24 ve Soma Uçucu külü için %30 oranında kayma dayanım değerlerinde artış olmuştur.

Tablo 8

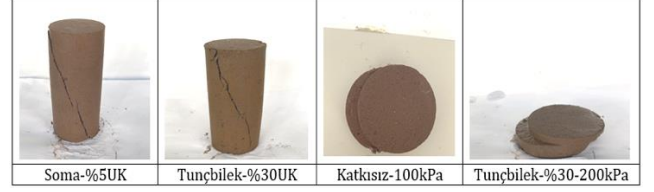
Zemin Numunelerinin Kesme Kutusu Deneyi Sonucu Kayma Dayanımı Parametreleri

Uçucu Kül	Katkı Oranı (%)	Kohezyon c' (kPa)	İçsel Sürtünme Açısı, ϕ' (°)
Katkısız	0	20.00	35.00
Soma	5	25.00	38.66
	10	23.00	36.50
	15	22.00	35.37
	20	22.00	33.42
	25	20.00	21.80
	30	19.00	20.81
Tunçbilek	5	22.00	35.37
	10	25.00	35.37
	15	23.00	34.99
	20	22.00	33.42
	25	20.00	21.80
	30	18.00	18.78
Çatalağzı	5	21.00	36.13
	10	24.00	37.23
	15	22.00	36.50
	20	21.50	31.80
	25	21.20	27.47
	30	20.63	27.02

Kesme kutusu deneyi sonrasında katkılı numunelerin deney sonu muhtevalarındaki değişim de değerlendirilmiştir (Şekil 9). Optimum şartlarda sıkıştırılmış katkısız numunenin başlangıç su muhtevası %21.50 ve kesme kutusu deney sonu su muhtevası ise %28.90 olarak belirlenmiştir. Uçucu kül katkılı hazırlanan numunelerin tamamında; katkı miktarı, uçucu kül sınıfı ve uçucu külün alındığı termik santral türü fark etmeksizin kesme sonrasında su muhtevasında artış meydana gelmiştir. Bu durum ise dolgu sonrası olası yağmur ve sel gibi su miktarının arttığı olumsuz durumlarda katkılı numunelerin bünyesinde daha fazla suyu hapsetme imkânına sahip olduğunu göstermektedir. Numunelerin serbest basınç ve kesme kutusu deney sonrası kırılma yüzeylerine ait fotoğraflar Şekil 10'da gösterilmektedir.



Şekil 9. Numunelerin Kesme Kutusu Deneyi Başlangıç Ve Deney Sonrası Su Muhtevaları Değişimi



Şekil 10. Numunelerin Deney Sonrası Göçme Yüzeylerine Ait Görseller

5. Tartışma

Çalışmada farklı termik santrallerden alınan uçucu külün zemine katkısı (%5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında) sonucunda zeminin kompaksiyon ve dayanım özelliklerine etkisi incelenmiştir. Uçucu kül ilavesi; kayma direnci açısından, zeminin kayma direncinde ve kohezyon değerinde artışa neden olmuştur. Elde edilen veriler Tan ve İyisan (1996), Çakır (1999) ve Aytekin (2009), tarafından yapılan çalışmaların sonuçları ile benzerlik göstermektedir.

Çokça (2001) ve Bilici ve diğ. (2018) tarafından yapılan çalışmanın sonuçlarında da görüldüğü gibi, uçucu kül ilavesi arttıkça maksimum kuru yoğunluk değerinde azalma meydana gelirken, optimum su muhtevası değerlerinde de artış olmuştur.

Soma uçucu külü katkısı kullanıldığında en yüksek serbest basınç dayanımı %5 katkı oranında gerçekleşmiştir. Çokça (2001) tarafından yapılan çalışmada ise %7 Soma uçucu külü katkısında en yüksek serbest basınç dayanımına ulaşılmıştır.

Savaş vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada da C ve F sınıfı uçucu külün zemin iyileştirilmesinde kullanılabileceği gösterilmiştir.

6. Sonuçlar

Bu çalışmada Tunçbilek ve Çatalağzı termik santrallerinin atığı olan F sınıfı ve Soma termik santralinin atığı olan C sınıfı uçucu külünün killi bir zeminin geoteknik özelliklerine etkisi incelenmiştir.

Tunçbilek, Soma ve Çatalağzı uçucu külünün santral türü fark etmeksizin aynı oranda katkı kullanıldığında kompaksiyon karakteristiklerinde benzer değişimler belirlenmiştir. Standart proktor enerjisinde yapılan kompaksiyon deneyi sonrasında katkı miktarı arttıkça elde edilen optimum su muhtevası değerinin arttığı ve maksimum yoğunluk değerlerinin ise azaldığı belirlenmiştir.

Tunçbilek ve Çatalağzı uçucu kül katkılı numunelerinde %10 katkı oranında, Soma uçucu külü katkısında ise %5 oranında serbest basınç dayanımı değerlerinde önemli seviyede artış olmuştur. Katkısız numunenin serbest basınç dayanımına oranla Soma uçucu külünün %5 katkı oranında serbest basınç dayanımı yaklaşık %47 daha

yüksek dayanıma sahip olmuştur. Bu oran Tunçbilek uçucu külünün %5 katkılı numunesinin serbest basınç dayanımında yaklaşık %16 iken, Çatalağzı uçucu külünün % 5 katkılı numunesinin serbest basınç dayanımında yaklaşık % 43.5 artış olduğu belirlenmiştir.

Katkısız numunenin kesme kutusu deneyi sonucunda belirlenen kayma dayanımı parametreleri; kohezyon değeri 20 kPa ve içsel sürtünme açısı 35° olarak belirlenmiştir. Kesme kutusu deneyi sonucunda en yüksek dayanım Tunçbilek ve Çatalağzı uçucu küllerinde %10 katkı oranında, Soma uçucu külünde ise %5 katkı oranında olmuştur. Bu katkı oranlarında Tunçbilek uçucu külü için %21, Çatalağzı uçucu külü için %24 ve Soma uçucu külü için %30 oranında kayma dayanım değerlerinde iyileşme olmuştur.

Araştırmacıların Katkısı

Bu araştırmada; Hakan BİLİCİ, deney programı ve deneylerin yapılması aşamasında; Murat TÜRKÖZ, bilimsel yayın araştırması, makalenin oluşturulması; Hasan SAVAŞ, analizler ve makalenin sonuçlarının değerlendirilmesi konularında katkı sağlamışlardır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

Acosta, H. A., Edil, T. B. ve Benson, C. H., (2003). *Soil Stabilization And Drying Using Fly Ash*. Geo Engineering Report No. 03-03, Madison, Wisconsin.

Aruntaş, H. Y. (2006). Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanımı. *G.Ü. Müh. Mim. Fak. Dergisi*, 21 (1), 193-203.

Aytekin, M. (2002). *Zeminlerin Değirmen Artığı Malzeme ile Stabilizasyonu*, Zemin Mekanigi ve Temel Mühendisligi Dokuzuncu Ulusal Kongresi, (21-22 Ekim 2002) Bildirileri, Eskisehir, 718-725.

Aytekin, S. (2009). *Uçucu Küllerin Zeminlerin Islahında Kullanımı* (Yüksek Lisans Tezi). Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.

Bilici, H., Okur, D. V., Türköz, M. ve Savaş, H. (2018). *Uçucu Kül Katkısının Meşelik Zemininin Kompaksiyon ve Dayanım Karakteristiklerine Etkisi*, International Euroasian Conference on Science, Engineering and Technology (euroasianSciEnTech 2018), Ankara.

Bilici, H., Okur, D. V., Türköz, M. ve Savaş, H. (2020). *Kil Zeminin Dayanımı Üzerinde Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu Katkılarının Etkisi ve Karşılaştırmalı Analizi*, Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 9(2), 910-919.
<https://doi.org/10.17798/bitlisfen.598525>

Çokça, E. (2001). *Use of Class C Fly Ashes for the Stabilization of an Expansive Soil*. ASCE J. of Geotechnical and Geoenvironmental Eng., 127, (7), 568-573.

EİE. (1979). *Türkiye Uçucu Küllerinin Özellikleri ve Kullanılma Olanakları*. Ankara.

Ferguson, G. (1993). *Use of Self-cementing Fly Ash as a Soil Stabilization Agent: Fly Ash for Soil Improvement*. Geotechnical Special Publication, 36: 1-15.

Hycnar, J. (1983). *Reducing harmful influence of power stations on the natural environmental by the utilization of fly ashes and slags*. UNEP/USSR, Donetok.

Kaplan, K. ve Gültekin A. B. (2010). *Yapı Sektöründe Uçucu Kül Kullanımının Çevresel Ve Toplumsal Etkiler Açısından İncelenmesi (The Investigation Of Fly Ash Usage In Terms Of Environmental And Social Effects In Construction Sector)*, International Sustainable Buildings Symposium - ISBS (Uluslararası Sürdürülebilir Yapılar Sempozyumu), Ankara.

Kefelioglu, S. (1998). *Türkiye Uçucu Küllerinin Özellikleri ve Kullanılma İmkanları*, Teknoloji.

Koç, E. ve Kaya, K. (2015). *Enerji Kaynakları-Yenilenebilir Enerji Durumu*, Mühendis ve Makina, cilt 56, sayı 668, s. 36-47.

Kurama, H., Bilgiç, C. ve Kaya, M. (1999). *Evaluation of Tunçbilek Coal Fired Power Plant Flyash for Industrial Usage*. J. of Ore Dressing, 1, (2), 55-62.

Malhotra, V. M. ve Ramezaniyanpour, A. A. (1994). *Fly Ash in Concrete, Canmet Report MSL 94-45 (IR)*, Canada Centre for Mineral and Energy Technology, Second Edition.

Mehta, P. K. (1986). *Concrete- Structure, Properties, and Materials*, Prentice-Hall, New Jersey.

Morrison. R. E. (1970). *A Review of Ash Specifications, Symposium on Fly Ash Utilization*, 24-31, Pittsburgh.

- Nalbantoğlu, Z. (2004). *Effectiveness Of Class C Fly Ash as an Expansive Soil Stabilizer*. Construction and Building Materials, 18, (6), 377-381.
- Nicholson P. O. ve Kashyap, V. (1993). *Fly ash Stabilization of Tropic Hawaiian Soils*. Fly Ash for Soil Improvement, Geotechnical Special Publication, 36: 15-30.
- Öntürk, K. (2011). *Zemin İyileştirmesinde Polisaaj, Kireç ve Uçucu Külün Kullanımı* (Yüksek Lisans Tezi). Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Savaş H., Türköz M., Seyrek E. ve Ünver, E. (2018). *Comparison of the Effect of Using Class C and F Fly Ash on the Stabilization of Dispersive soils*. Arabian Journal of Geosciences, 11: 612. Doi Numarası: 10.1007/s12517-018-3976-6.
- Tokyay, M. ve Erdoğan, K. (1998). *Türkiye Termik Santrallerinden Elde Edilen Uçucu Küllerin Karakterizasyonu*, TÇMB AR-GE Yayın No 98/3, Ankara.
- TS 639. (1975). *Uçucu Küller*, TSE, Ankara.
- Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F. ve Yeğınobalı, A. (2009). *Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri*, TÇMB AR-GE Y03.03, Fersa Matbaacılık, s.32- 37,s. 58-65.
- Ünal, O. ve Osmanoğlu, Y. (2004). *Soma Termik Santral Atığı Uçucu Külün İnşaat Sektöründe Değerlendirilmesi*. Türkiye 14. Kömür Kongresi Bildiriler Kitabı, (02-04 Haziran 2004) Zonguldak.
- Wasti, Y. (1993). *Uçucu Küllerin Geoteknik Uygulamalarda Kullanımı*, End. Atıkların İnşaat Sektöründe Kul. Semp., Ankara, 37-44.
- Yılmaz, A. (2004). Puzolan Katkılı Çimentoların Beton Olgunluğuna Etkisi. *Pamukkale Üniversitesi. Müh. Fak. Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10, (3), 381-387.