

DEĞİŞİK UÇUCU KÜLLERİN YÜKSEK PLASTİSİTELİ KİLİN SERBEST BASINÇ DAYANIMINA ETKİSİ

Gözde İNAN, Alper SEZER, Kambiz RAMYAR, H. Recep YILMAZ

Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, 35100, Bornova, İZMİR

ginan@mail.ege.edu.tr, asezer@mail.ege.edu.tr, kramyar@bornova.ege.edu.tr, yilmazrecep@yahoo.com

Makalenin Geliş Tarihi: 18.11.2004

ÖZET: Bu çalışmada, İzmir Çiğli Jet Üssünden temin edilen bir tip yumuşak kilin, iki farklı uçucu kül ile stabilizasyonu üzerine bir deneysel araştırma sunulmaktadır. Bu amaçla, kuru kil ağırlığının % 5, 10, 15 ve 20'si oranlarında uçucu kül içeren farklı uçucu kül-kil karışımları hazırlanmıştır. Katkısız zemine ek olarak, kireç içeriği farklı iki uçucu külden yukarıda verilen oranlarda kül eklenerek hazırlanan dörder numunenin Standart Proktor deneyi ile optimum su muhtevaları ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları belirlenmiştir. Optimum su muhtevasında sıkıştırılarak hazırlanan uçucu kül-zemin numunelerinin, 1, 7, 28 ve 90 günlük serbest basınç dayanımları ölçülmüştür. Deneysel çalışma sonunda, eklenen uçucu külün zeminin serbest basınç mukavemetini artırdığı görülmüştür. Bu artışın uçucu kül tipine bağlı olarak değişimler gösterdiği tespit edilmiştir. Artan kül içeriği ve külün kireç içeriğine bağlı olan bu artışlar, puzolanik reaksiyon, uçucu külün boşlukları doldurma etkisi ve uçucu külün serbest kireç içeriğinin etkisi ile açıklanabilir.

Anahtar kelimeler: Stabilizasyon, uçucu kül, yumuşak kil, serbest basınç dayanımı.

Effect of Different Fly Ashes on Unconfined Compressive Strength of Highly Plastic Clay

ABSTRACT: This paper presents an experimental investigation into the stabilization of a soft clay obtained from a military zone in Izmir with two different fly ashes. 5, 10, 15 and 20 % by weight of the soil was replaced with fly ash. In addition to the neat soil sample, the optimum moisture contents and maximum dry unit weights of four soil-fly ash mixtures prepared from each fly ash were determined by Standard Proctor Tests. The unconfined compressive strengths of the samples prepared at optimum moisture contents were determined at 1, 7, 28 and 90 days. It was found that, inclusion of fly ash improved the properties of the soil. The improvements were more pronounced with increasing fly ash content of the mixture and lime content of the fly ash. The fact was attributed to the pozzolanic reaction and pore refinement effect of fly ash as well as its free lime content.

Key words: Stabilization, fly ash, soft clay, unconfined compressive strength.

GİRİŞ

Zeminlerin mühendislik özelliğinin iyileştirilmesi, dayanımının artırılması ve değişken yük-iklim koşullarının zararlı etkilerine uzun süre dayanacak hale getirilmesi amacıyla zeminler bazı katkı maddeleriyle karıştırılarak kararlı hale getirilebilir. Bu amaçla en sık kullanılan katkı türleri portland çimentosu,

kireç, uçucu kül ve bitümdür (İnan ve Sezer, 2003; Umar ve Açar, 1991; Joint Dept. of the Army and Air Force, 1994). Bu malzemelerin zemin iyileştirilmesinde sık kullanılmasının başlıca nedenleri, birçok zemin tipine uygulanabilir olması, maliyetinin diğer yöntemlere kıyasla daha düşük olması, santral atığı olan uçucu külün değerlendirilmesi ve uygulamasında daha az tecrübeye ihtiyaç

duyulması vb. gibi sıralanabilir. Kimyasal stabilizasyon, duvar arkası dolgusu, karayolu dolgusu, havaalanı, şev kaplaması, dolgu korunumu, hendek kaplaması gibi birçok uygulama alanına sahip bir stabilizasyon yöntemidir (Al-Abdul Wahhab ve Asi, 1997).

Ülkemizde bol miktarda bulunabilen atık ve reaktif bir malzeme olan uçucu külün, çimento ve beton üretiminde kullanılmasının yanı sıra, geoteknik mühendisliğindeki uygulamaları da giderek yaygınlaşmaktadır. Dünyada artan enerji ihtiyacına paralel olarak uçucu kül üretimi giderek büyük miktarlara ulaşmaktadır. Yıllık yaklaşık 55 milyon ton kömür ile linyitin yanmasıyla Türkiye’de yaklaşık olarak 15 milyon ton uçucu kül elde edilmektedir (TEAŞ, 2000). Giderek artan uçucu kül üretimi beraberinde istenmeyen bazı çevresel ve ekonomik sorunları da gündeme getirmektedir. Bu olumsuz etkilerin bir ölçüde giderilmesi, uçucu küllerin kullanımının artırılması ile mümkün olabilmektedir (Hausmann, 1990).

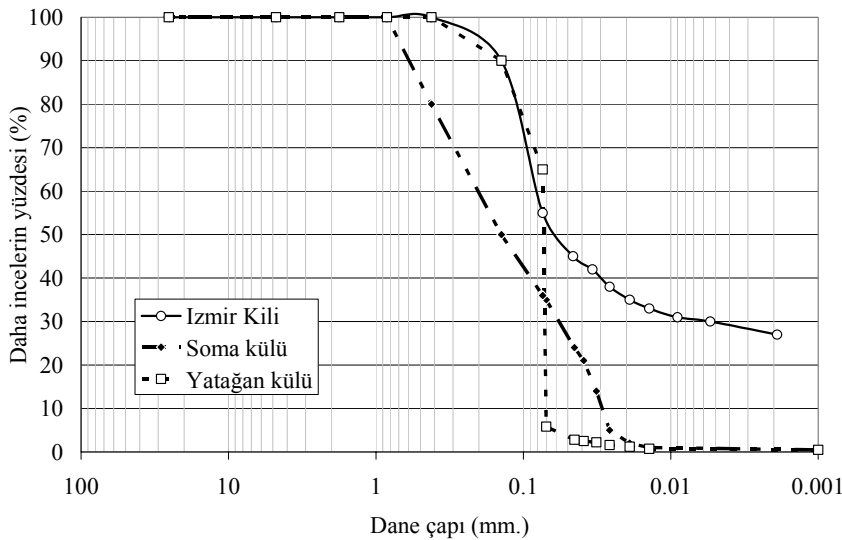
Son yıllarda uçucu külün zeminlerde kullanımı üzerine yapılan çalışmalarda (Koliş ve diğ., 2004; Prabakar ve diğ., 2004; Kaniraj ve Havanagi, 1999; Turner, 1997), bu katkının zeminin mühendislik özelliklerini, özellikle de dayanımını iyileştirdiği görülmüştür. Savran (1988) tarafından yapılan bir çalışma, yüksek kireç içerikli uçucu külün CH türü zeminlerin serbest basınç dayanımını önemli ölçüde iyileştirdiğini ortaya koymaktadır. Benzer

şekilde, Kaniraj ve Havanagi (1999) tarafından yapılan çalışmada da, artan uçucu kül içeriği ile birlikte zeminin dayanım özelliklerinin de önemli ölçüde etkilendiği belirtilmiştir. Turner (1997), uçucu kül dışında dokuz farklı stabilizasyon tekniğinin de denendiği çalışmada, uçucu külün diğer tüm stabilizasyon alternatiflerine eşit hatta daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuştur.

Bu çalışmada, kullanılan uçucu külün kimyasal kompozisyonundaki değişimin, yumuşak kilin dayanım özelliklerine olan etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Bu amaçla, Soma ve Yatağan Termik Santrallerinden temin edilen iki farklı uçucu kül ile İzmir Çiğli Jet Üssünden temin edilen bir tip yumuşak kil kullanılmıştır. Elde edilen sekiz adet farklı stabilize uçucu kül-zemin karışımının serbest basınç dayanımı incelenmiştir.

DENEYSEL ÇALIŞMA

Çalışmada, Yatağan ve Soma Termik Santrallerinden temin edilen iki farklı uçucu kül ile İzmir Jet üssünden temin edilen bir tip kil zemin kullanılmıştır. Yatağan uçucu külü ASTM C sınıfına uygun bir küldür. Ancak Soma uçucu külü $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ oranı % 50’nin altında olduğundan ASTM’nin C ve F sınıfına dahil olmamaktadır. Zemin ve uçucu küllerin dane boyu dağılımları Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Deneysel çalışmada kullanılan uçucu küller ve zeminin granülometri eğrileri.

Figure 1. Grain size distributions of the soil and fly ashes used in the study.

İyileştirilmesi düşünülen zemin, yüksek plastisiteli bir kildir ve Gediz nehri deltasındaki alüvyonel araziden elde edilmiştir. Bu tür zeminler üzerinde yapılacak olan binalarda önemli oturma problemleri ortaya çıkabilir. Bahsedilen problemler bölgedeki yetkililer tarafından kişisel görüşme esnasında tarafımıza rapor edilmiştir. Zeminin (CH) ve uçucu küllerin (UK) özellikleri sırasıyla Tablo 1 ve 2'de verilmiştir. Tablo 1'de sonuçları verilen endeks deneyleri araziden getirilen doğal numuneler üzerinde yapılmıştır. Zeminin likit limiti düşen koni deneyi ile (ASTM D4318-00), plastik limit

ASTM D4318-00 ve rötre limiti de D427-04 standardı dahilinde yapılmıştır.

Tablo 1'de görüldüğü gibi, çalışmada kullanılan kil, No.200 elekten geçen kısmı % 55.2 olan, plastisite indisi % 41.3 olan; dolayısı ile aktivitesi orta derecede, Birleşik Zemin Sınıflandırma Sistemine göre CH tipi bir kildir. Ayrıca, Mitchell (1976) tarafından verilen plastisite kartında bu zemin "montmorillonit" bölgesine yakındır. Bu da kilin problemleri ve şişme potansiyeline sahip bir malzeme olduğunu göstermektedir.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan kilin kimyasal ve endeks özellikleri.

Table 1. Chemical and index properties of the clay.

Kimyasal içerik	(%)	Endeks özellikleri	
SiO ₂	63.24	Doğal su muhtevası, w _n , (%)	25.1
Al ₂ O ₃	8.18	Likit Limit, w _L , (%)	71.0
Fe ₂ O ₃	3.56	Plastik Limit, w _p , (%)	29.7
CaO	9.03	Plastisite indisi, PI, (%)	41.3
MgO	1.04	Rötre Limiti, w _s , (%)	17.6
Na ₂ O	1.27	Doğal birim hacim ağırlık, γ_n (kN/m ³)	18.54
K ₂ O	1.37	Özgül ağırlık, G _s	2.76
SO ₃	0.00	No.200'den ince kısım (%)	55.2
Kızdırma kaybı	9.25		

Tablo 2. Uçucu küllerin kimyasal kompozisyonu ve bazı fiziksel özellikleri.

Table 2. Chemical composition and some physical properties of the fly ashes.

Kimyasal bileşen	Yatağan külü	Soma külü
SiO ₂	42.91	24.23
Al ₂ O ₃	21.51	15.27
Fe ₂ O ₃	6.29	3.89
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	70.71	43.39
CaO	16.91	42.25
MgO	2.70	0.74
Na ₂ O	0.69	0.36
K ₂ O	2.15	0.51
SO ₃	3.77	6.77
Kızdırma Kaybı	0.63	1.20
Serbest CaO	1.11	9.32
Özgül ağırlık	2.15	2.46
Puzolanik Aktivite İndeksi		
PÇ ile (%)	66	84
Kireç ile (MPa)	3.6	5.2

Yukarıda özellikleri belirtilen iki tip uçucu kül ve bir tip zemin kullanılarak, kuru zemin ağırlığının % 5, 10, 15, 20 oranlarında uçucu kül içeren zemin-üçucu kül karışımları hazırlanmıştır. Bu numuneler üzerinde ASTM D698 "Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort" standardında belirtilen Standart Proktor deneyi yapılarak, optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri ($\gamma_{k,max}$) elde edilmiştir. Elde edilen kompaksiyon deney sonuçları Tablo 3'de verilmiştir. Zemin-üçucu kül karışımları sırasıyla CH-UK0, CH-UK05, CH-UK10, CH-UK15 ve CH-UK20 olarak gösterilmiştir.

Tablo 3'de görüldüğü gibi uçucu kül tipinden bağımsız olarak, uçucu kül içeriği arttıkça, zeminin kuru birim hacim ağırlık değerleri azalmaktadır. Bu azalım yüksek kül içeriklerinde daha belirgindir. Kuru birim hacim ağırlıklardaki azalma, uçucu külün zemine göre daha düşük özgül ağırlığa sahip olması ve zeminin stabilize olması sonucu su emme isteğindeki artış ile açıklanabilir. Hazırlanan her karışımdan, ASTM D2166 "Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil" a göre serbest basınç dayanımının (q_u) belirlenmesi için 6'şar adet 50x100 mm. silindirik numuneler hazırlanmıştır. Numuneler deney gününe (1, 7, 28, 90 gün) kadar streç film ile sarılı olarak $23 \pm 1.7^\circ\text{C}$ ve $\% 60 \pm 10$ bağıl

nemde laboratuvar koşullarında bekletilmiştir. Deneyler, 1 mm/dk yükleme hızında yapılmıştır.

DENEY SONUÇLARI ve TARTIŞMA

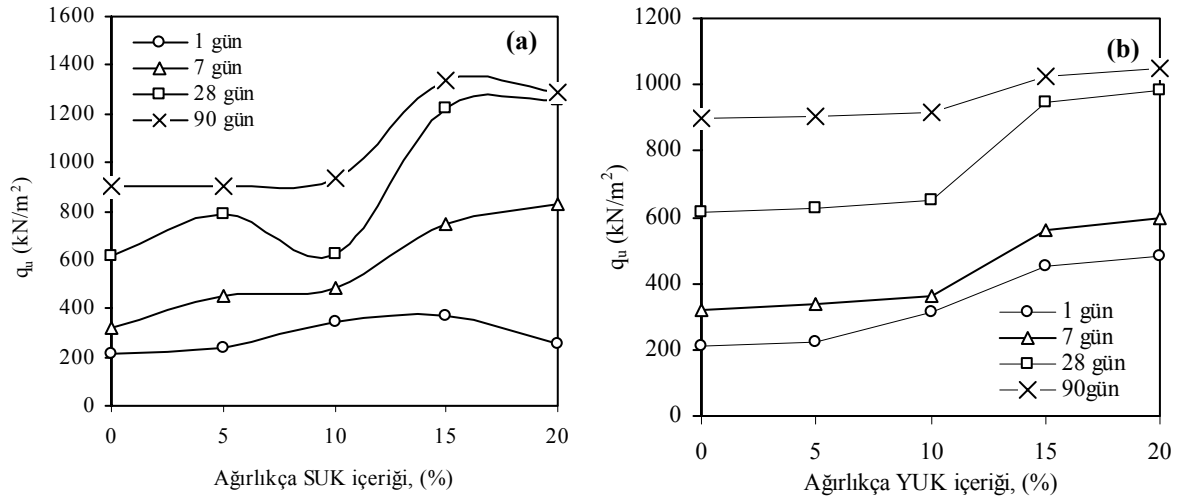
Serbest basınç dayanımı-üçucu kül içeriği grafiklerinden (Şekil 2a ve b) görüldüğü gibi uçucu külün tipinden bağımsız olarak ağırlıkça % 15'e kadar UK ilâvesi karışımların q_u değerlerini arttırmaktadır. UK içeriğinin % 20'ye yükseltilmesi % 15 UK içeren karışımlarla karşılaştırıldığında serbest basınç dayanımında ihmal edilebilir etkilere yol açmıştır.

Uçucu kül ilâvesinin, 90 günlük bir süreç dahilinde serbest basınç dayanımı üzerindeki etkisi fazladır. Eklenen uçucu kül içeriğinden bağımsız olarak, 28. güne kadar dayanımdaki artış daha hızlı olmaktadır. Bu yaştan sonra, q_u değerlerinde hissedilir bir artış gözlemlenmemiştir. Tablo 2'de görüldüğü gibi, Soma külünün kireç içeriği 42.25 iken, Yatağan külünün kireç içeriği 16.91'dir. Beklendiği gibi, deneysel çalışma sonunda kireç içeriği daha fazla olan Soma külü katkılı kilerin serbest basınç dayanımları daha büyük bulunmuştur. Örneğin, % 20 kül içeriğinde 90. günde Soma külü 1291 kN/m² dayanım gösterirken, Yatağan külü 1049 kN/m² serbest basınç dayanımı göstermiştir. Benzer değer katkısız kilde 900 kN/m² olarak tespit edilmiştir.

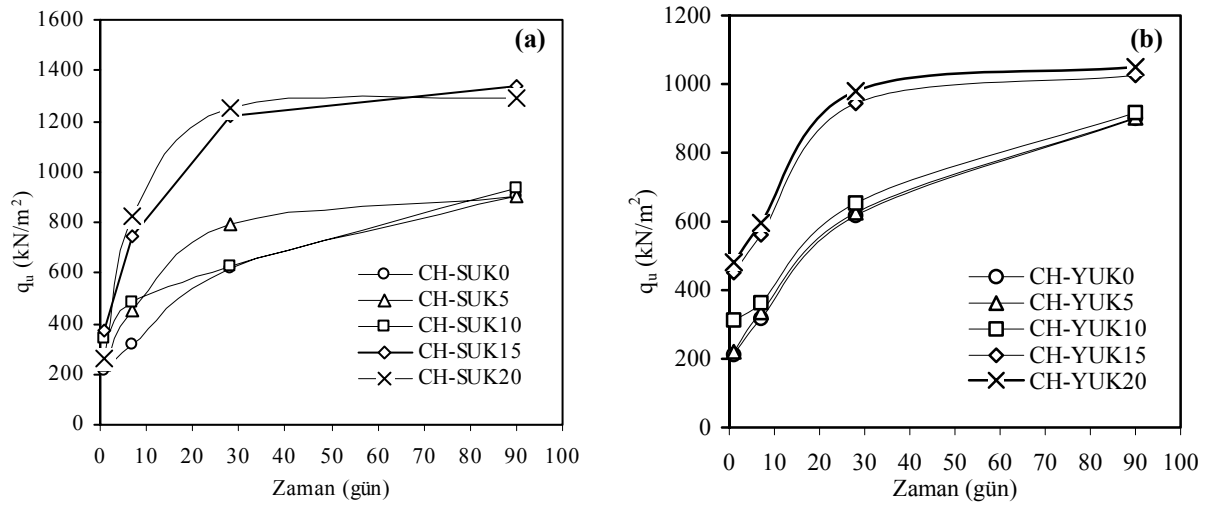
Tablo 3. Standart Proktor Deneyi sonuçları.

Table 3. The results of Standart Proctor Tests.

Karışım	UK (%)	CH (%)	Yatağan külü (YUK)		Soma külü (SUK)	
			Maks. kuru br.hac.ağırlık, $\gamma_{k,max}$ (kN/m ³)	Optimum su muhtevası, W_{opt} (%)	Maks. kuru br.hac.ağırlık, $\gamma_{k,max}$ (kN/m ³)	Optimum su muhtevası, W_{opt} (%)
CH-UK0	0	100	16.15	17.3	16.15	17.3
CH-UK5	5	95	15.93	18.3	14.23	22.5
CH-UK10	10	90	15.22	19.2	14.13	22.9
CH-UK15	15	85	14.80	20.1	13.83	23.0
CH-UK20	20	80	13.95	21.8	13.64	24.0



Şekil 2. Uçucu kül içeriği ile Serbest Basınç Dayanımının Değişimi (a: Soma b: Yatağan Uçucu Külü).
Figure 2. Variation of unconfined compressive strength with fly ash inclusion.



Şekil 3. Kür zamanı ile serbest basınç dayanımının değişimi (a: Soma b: Yatağan uçucu külü).
Figure 3. Variation of unconfined compressive strength with curing period (a: Soma b: Yatağan fly ash).

Tablo 4'te ilk enkesit alanı 19.63 cm^2 olan serbest basınç deneyine tabi tutulan numunelerin kırılma anındaki enkesit alanları görülmektedir. Kür süresi veya uçucu kül yüzdesi arttıkça numunelerde sünekten gevreğe bir davranış değişimi gözlemlenmiştir (Şekil 3).

Numunelerin kırılma anında su muhtevaları alınmış, kür süresi başındaki optimum su muhtevalarına dikkate alındığında % 40-45'e varan azalmalar gözlemlenmiştir. Numunelerdeki su kaybı da, uçucu külün etkisine ek olarak, dayanımdaki artışın bir nedeni olarak sayılabilir.

Tablo 4. Serbest basınç deneyinde hesaplanan kırılma anındaki enkesit alanları ($D_0=5$ cm, $H=10$ cm).**Table 4.** Cross-sectional areas at failure in the unconfined compression tests ($D_0=5$ cm, $H=10$ cm).

Süre (gün)	Kil		Soma Külü			Yatağan Külü			
	CH- UK0	CH- SUK5	CH- SUK10	CH- SUK15	CH- SUK20	CH- YUK5	CH- YUK10	CH- YUK15	CH- YUK20
1	21.33	20.27	20.19	20.15	20.44	20.19	20.75	20.49	20.97
7	20.75	20.32	20.27	20.11	19.98	20.61	20.88	20.49	20.27
28	20.40	20.11	20.40	19.90	20.03	20.61	20.49	20.19	20.15
90	20.32	20.03	20.03	19.90	19.94	20.03	20.03	19.90	19.94

SONUÇLAR

Kullanılan malzeme ve uygulanan deney yöntemleri ile aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

1. Uçucu kül tipinden bağımsız olarak, uçucu kül içeriği arttıkça, zeminin kuru birim hacim ağırlık değerleri azalmaktadır. Bu azalım yüksek kül içeriklerinde daha belirgindir.
2. Uçucu kül ilavesi, zeminin serbest basınç değerlerinde artışa sebep olmuştur. 28. günden sonra, serbest basınç dayanımlarında hissedilir bir artış gözlemlenmemiştir.
3. Uçucu külün tipinden bağımsız olarak ağırlıkça % 15'e kadar uçucu kül ilâvesi, karışımların serbest basınç dayanımlarını arttırmaktadır. Uçucu kül içeriğinin % 20'ye

yükseltilmesi serbest basınç dayanımında ihmal edilebilir etkilere yol açmıştır.

4. Kireç içeriği daha fazla olan uçucu kül, düşük kireç içerikli uçucu küle göre dayanımlarda daha büyük artışlara sebep olmuştur.
5. Deney sırasında, yüksek kül içeren numunelerin (%15-20), uçucu külün etkisi ile plastisitesini kaybettiği, kül içeriği az olan karışımlara göre daha gevrek davranış gösterdiği gözlemlenmiştir.
6. Yukarıdaki anlatılanların ışığında, İzmir kilinin basınç dayanımını arttırmak için ağırlıkça %15 Soma veya Yatağan külü kullanımının uygun olduğu söylenebilir. Daha yüksek dayanım istenmesi durumunda kireç içeriği yüksek olan Soma külü tercih edilmelidir.

KAYNAKLAR

- Alkaya, D., 2002, Uçucu Kül Katkısının Dolgu Zeminlerin Stabilitésine Etkisi, Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi, 242 s.
- Al-Abdul Wahhab, H.I., Asi, I.M., 1997, "Improvement of marl and dune sand for highway construction in arid areas, Build. Environ., **32**, 3: 271-279.
- Hausmann, M.R., 1990, Engineering Principles of Ground Modification, McGraw-Hill, Singapore, 632 s.
- İnan, G., Sezer, A., 2003, "Zemin iyileştirme yöntemleri ve kullanılan malzemeler üzerine bir inceleme", MBGAK 2003, İstanbul, 369-376.
- Joint Departments of the Army and Air Force, TM 5-822-14/AFMAN 32-8010, 1994, Soil Stabilization for Pavements, USA, 57 s.
- Kaniraj, S., Havanagi, V.G., 1999, "Compressive strength of cement stabilized fly ash-soil mixtures", Cement Concrete Res., **29**, 5: 673-677.
- Kolias, S., Kasselouri-Rigopoulou, V., Karahalios, A., 2005, "Stabilization of clayey soils with high calcium fly ash and cement", Cement Concrete Comp. (Article in Press).

- Mitchell, J.K., 1976, *Fundamentals of Soil Behavior*, John Wiley and Sons, New York, 422 s.
- Prabakar, J., Dendorkar, N., Morchhale, R.K., 2004, "Influence of fly ash on strength behavior of typical soils", *Constr. Build. Mater.* **18**, 4: 263-267.
- Savran, K.Z., 1988, *Stabilization of Cohesive Soils with Fly Ash*, Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ, 62 s.
- Turner, J.P., 1997, *Evaluation of Western Coal Fly Ashes for Stabilization of Low-Volume Roads*, Wasemiller, M.A., Hoddinott, K.B. (editörler), *Testing Soils Mixed with Waste or Recycled Materials*, ASTM STP 1275, Pennsylvania, 340 s.
- Umar, F., Açar E., 1991, *Yol Üst Yapısı*, İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul, 339 s.

