



Yol Altındaki Killi Bir Zeminin Uçucu Kül ile İyileştirilmesinin Karayolu Üstyapısına ve Maliyetine Etkileri

Tacettin GEÇKİL*, M. Mahmut TANYILDIZI** ve E. Serdar YILDIRAN***

Öz

Bu çalışmada, F sınıfı uçucu kül (UK) ile iyileştirilen killi bir yol taban zemininin karayolu üstyapı kalınlığına ve maliyetine etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla, kil zemine ağırlıkça %5, %10, %15, %20 oranlarında UK ilave edilerek karışım numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanmış olan numuneler homojen bir şekilde karıştırıldıktan sonra sıkıştırma, serbest basınç ve Kaliforniya Taşıma Oranı deneylerine tabi tutularak en yüksek dayanımı veren UK oranı belirlenmiştir. Bu oran esas alınarak, karayolu üstyapı projelendirilmesinde kullanılan American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO 1986) yöntemi ile UK katkılı kil zeminin esnek ve rijit kaplamalarda sırasıyla Esneklik Modülü (M_R) ile Yatak Katsayısı (k) parametreleri, her iki üstyapı için tabaka kalınlıkları ve maliyet hesaplamaları araştırılmıştır. Deneysel çalışma sonucunda; uçucu kül katkısı ile kil zeminin serbest basınç dayanımında iyileşme olduğu ve maksimum dayanıma %10 UK oranında ulaşıldığı görülmüştür. Araştırma sonucunda, yol taban zemininin %10 UK ile iyileştirilmesi durumunda zemin M_R değerinin %367,47; k değerinin ise %140,68 oranında artış gösterdiği belirlenmiştir. Sonuç olarak, saf killi zemine kıyasla, %10 UK ile iyileştirilen killi bir zemin üzerine inşa edilecek 1 km uzunluğundaki bir yolda, esnek ve rijit üstyapı maliyetlerinin sırasıyla %37,45 ve %28,92 gibi önemli oranlarda azaldığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Killi Zemin, Uçucu Kül, Zemin Dayanımı, Esnek Üstyapı, Rijit Üstyapı, Maliyet Hesabı.

* Doç.Dr., İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, tacettin.geckil@inonu.edu.tr, ORCID: 0000-0001-8070-6836

** İ.s.Yzb., 2'nci Or.K.lığı, mmmtanyildizi@hotmail.com, ORCID: 0000-0001-5992-2665

*** İnş.Yük.Müh., Togi Metal İnş.San.Tic.Ltd.Şti., serdaryildiran44@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8678-5544

The Effects of The Improvement of a Clay Soil under The Road With Fly Ash on The Road Superstructure and Cost

Abstract

In this study, the effects of a Clay Road base soil improved by Class F fly ash (FA) on highway pavement thickness and costs were investigated. For this purpose, mixture samples were prepared by adding 5%, 10%, 15%, 20% by weight of FA to clay soil. After homogenously mixing the prepared samples, compaction, unconfined compression and California Bearing Ratio (CBR) tests were performed to determine the FA rate which gives the highest strength. Based on this ratio, the American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO 1986) method used in the design of highway pavement was investigated in terms of Elasticity Module (M_R) and Bed Coefficient (k) parameters, layer thicknesses and cost calculations for both pavements in flexible and rigid pavements, respectively. As a result of the experimental study; it has been observed that the unconfined compression strength of the clay soil has improved and the maximum strength has been reached at a rate of 10% FA with the addition of fly ash. As a result of the research, if the road base soil is improved by 10% FA, the soil M_R value is 367.47% and the k value increased by 140.68%. As a result, it was found that, compared to the pure clay soil, on a 1 km long road to be constructed on a clay soil that was improved by 10% FA, the costs of flexible and rigid pavements decreased significantly by 37.45% and 28.92% respectively.

Keywords: Clay Soil, Fly Ash, Soil Strength, Flexible Pavement, Rigid Pavement, Cost Calculation.

Giriş

Son zamanlarda, karayolu mühendisliğinde, taşıma gücü zayıf olan yol taban zeminlerini güçlendirmek amacıyla zemin içerisine çeşitli katkıları ilave edilerek zeminler stabilize edilmekte ve yol tabanının üstyapıya hazır hale getirilmesi sağlanmaktadır.

Taşıma gücü zayıf zeminlerin stabilize edilmesi, muhtelif iyileştirme yöntemleri (kimyasal, fiziksel ve mekanik) kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu iyileştirmeler, zemin içerisindeki boşluk oranının en aza indirilmesi, zemine katkı maddesi ilave edilmesi, zeminde bulunan suyun drene edilmesi veya zemin içerisine

donatılar yerleştirilmesi ile yapılabilmektedir (Çakılcıoğlu, 2007; Hausman, 1990; Kılıç, 2008). Bunlardan en çok tercih edilen yöntem, zemine çeşitli katkı maddeleri ilave ederek, zeminin dayanımında iyileşme sağlamaktır. Bu amaçla, kireç, çimento, UK gibi katkıları zeminin dayanımının artırılmasında sıklıkla kullanılmaktadır. Bu katkı maddelerinin kolaylıkla temin edilmesi ve maliyetlerinin uygun olması zemin iyileştirmesinde kullanılmasını tercih sebebi haline getirmektedir. Ayrıca, bu katkıları ile zemini stabilize etmek, ekonomik olarak da çok daha fazla kazanç elde edilmesini sağlamaktadır (Çakılcıoğlu, 2007; Mitchell, 1981; Van Impe, 1989).

Bu çalışmada, taşıma gücü zayıf olan killi bir yol taban zemininin dayanımı üzerinde UK'nin etkisi araştırılmış ve bu durum yol üstyapısı maliyeti bakımından değerlendirilmiştir.

Zemin dayanımının artırılmasında iyileştirici bir katkı olarak kullanılan UK'ler, öğütülmüş veya toz olarak linyit veya taş kömürünün yüksek ısı altında yanması ile meydana gelen atık kalıntıları olup, tek başlarına bağlayıcılık özelliği bulunmayan ancak suya doygun ortamda kireçle birleştiklerinde bağlayıcılık özelliğine haiz olan puzolanik malzemelerdir (Erşan, 1996; Kavak, 1996; Taşçı, 2011). American Society for Testing Materials (ASTM) tarafından yapılan sınıflandırmada, UK'ler F ve C olmak üzere iki sınıfa ayrılırlar. F sınıfı UK'ler, taş kömürünün yanması sonucunda ortaya çıkan atık malzemelerdir. Bu küllerin içeriğinde az miktarda (%10 ve daha az) serbest kireç (CaO) bulunması sebebiyle bu maddeler düşük kireç külü olarak da adlandırılırlar. Bunlar, tek başlarına sertleşme özelliği gösteremezler. Ancak, suya doygun bir ortamda kireç ile reaksiyon sonucunda sertleşme özelliği kazanırlar (ASTM C 618). Kimyasal ve fiziksel özelliklerinin sağladığı bu avantajlardan dolayı UK'ler, dünyanın birçok ülkesinde, zemin dayanımının artırılmasında, beton ve çimento üretiminde, baraj inşaatlarında, yol dolgu malzemesi olarak alt temel ve temel malzemelerinde yaygın bir kullanım alanına sahiptirler (Erdoğan, 1993; Savran, 1988).

UK'ler, zeminler üzerindeki güçlendirme potansiyeli sebebiyle, zayıf dayanıma sahip zeminlerin iyileştirilmesi amacıyla araştırmacılar tarafından sıkça kullanılmıştır (Aksoy, Yılmaz ve Akarsu, 2007; Silitonga, Levacher ve Mezazigh, 2009; Brooks, 2009; Öntürk, 2011).

Öntürk (2011), mevcut taşıma gücü zayıf zeminlerin dayanımlarının iyileştirmesi için katkı maddesi olarak Seyitömer UK'sini ve bağlayıcı malzeme olarak da kireci kullanarak bir araştırma yapmıştır. Çalışmada, zemin numunesi

olarak kullanılan kaolin kiline UK, polisaj malzemesi ve belirli oranlarda kireç eklenerek homojen karışımli numuneler elde edilmiştir. Hazırlanan numunelerde UK ve kireç miktarı %15 oranında sabit tutularak, %10, %15 ve %20 oranlarında polisaj ilave edilerek deneyler yapılmıştır. Kompaksiyon deney sonuçlarına göre belirlenen en iyi zemin numunesi üzerinde CBR deneyi yapılmış ve elde edilen yeni zemin numunesinin taşıma kapasitesi belirlenmiştir. Çalışmalar neticesinde, kaolin kiline ilave edilen katkı maddeleri ile hazırlanan zemin numunesinin mevcut durumdaki zeminin dayanım değerlerini artırdığı tespit edilmiştir. Ferguson (1993), altı farklı zemin üzerinde yaptığı çalışmada, %16 UK ilavesi ile zeminlerin şişme probleminin önemli oranda azaldığı sonucuna varmıştır. Jiang ve Zhao (2015), yaptıkları çalışmada, yol dolgu yapımında kullanılan %1,5 ve %2,5 oranındaki UK-kireç karışımının, taban zemini dayanımı üzerinde olumlu sonuçlar verdiğini tespit etmişlerdir. Aksoy vd. (2007), Tunçbilek UK'sini kullanarak killi bir zemini stabilize etmişlerdir. Çalışmada, killi zeminin içerisine %3, %5, %10 oranlarında UK ilave edilerek dört farklı numune oluşturulmuştur. Optimum su muhtevasında hazırlanan her bir numune üzerinde 1, 7 ve 30 günlük kür süreleri sonunda serbest basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, UK katkısı ile zeminin plastisite değerinde önemli bir artış gözlenmemiş, artan UK oranı ile optimum su muhtevası ve serbest basınç dayanımının ise artış gösterdiği tespit edilmiştir. Tan ve İyisan (1996), yaptıkları bir çalışmada, kilin dayanım özellikleri üzerinde UK katkısının etkilerini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda, UK ilavesiyle kilin kayma direncinde ciddi oranda artış meydana geldiğini ve %80 kil - %20 UK karışımının en yüksek dayanımı gösterdiğini tespit etmişlerdir. Wasti (1990), zemin iyileştirme çalışmalarda UK'lerin kullanılabilirliğini araştırmak üzere, Çatalağzı ve Soma Termik santrallerinden elde edilen UK'lerin zeminlerin geoteknik özelliklerine etkisini araştırmıştır. Çalışmada, UK'lerin yüksek plastisiteli killerin dayanımının iyileştirilmesinde kullanılmasının uygun olacağı sonucuna varılmıştır. Gomez, Bastidas ve Ruge (2019), taşıma gücü zayıf killi bir zemine, kil ağırlığının %2, %4, %6, %8 oranlarında UK ilave ederek serbest basınç, sıkıştırma ve CBR deneyleri yapmışlardır. Çalışma sonucunda, UK katkısı ile kil zeminin dayanımında iyileşme olduğu ve maksimum dayanıma %8 UK oranında ulaşıldığı tespit edilmiştir. Taş, Fidan ve Yılmaz (2018), düşük plastisiteli killi bir zeminin stabilizasyonunda kullanılan %25 UK'ye, %0, %5, %10, %15, %20 oranlarında Bayburt taşı ilave ettikleri karışım numunelerinin bazı geoteknik özelliklerini araştırmışlardır. Tek eksenli serbest basınç dayanımı değerlerine göre Bayburt

taşının %10 oranında katıldığı %25 UK içeren karışımların en yüksek dayanım değerini verdiğini tespit etmişlerdir. İnan, Sezer, Ramyar ve Yılmaz (2005), İzmir Çiğli Jet Üssü'nden temin edilen bir tip yumuşak kilin, iki farklı UK ile stabilizasyonu üzerine bir deneysel araştırma yapmışlardır. Bu amaçla, kuru kil ağırlığının %5, %10, %15 ve %20 oranlarında UK içeren farklı UK-kil karışımları hazırlanmıştır. Katkısız zemine ek olarak, kireç içeriği farklı iki UK'den yukarıda verilen oranlarda kül eklenerek hazırlanan dörder numunenin optimum su muhtevaları, maksimum kuru birim hacim ağırlıkları ve serbest basınç dayanımları belirlenmiştir. Çalışmada, ağırlıkça %15'e kadar UK ilave edilmesinin, karışımların serbest basınç dayanımlarını önemli oranda artırdığı tespit edilmiştir.

Bu çalışmada, önceki çalışmalardan farklı olarak, UK ile dayanımı artırılmış olan taşıma gücü zayıf killi bir yol taban zemininin, karayolu üstyapısının kalınlıklarına ve maliyetlerine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, güçlendirilmiş zemin numuneleri sıkıştırma, serbest basınç ve CBR deneylerine tabi tutulmuş ve AASHTO 1986 tasarım yöntemi yardımıyla esnek ve rijit yol üstyapı kalınlıkları belirlenerek güncel maliyetleri hesaplanmıştır.

Materyal ve Deneysel Çalışmalar

Çalışmada, yol taban zemini olarak kullanılan killi malzeme Malatya Kiltape bölgesinden temin edilmiştir. Kil malzemesinin mühendislik özellikleri TS 1900-1 standardına göre belirlenmiş ve Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Kil Zemininin Özellikleri

Parametreler	Simgesi	Birimi	Değeri
Dane birim hacim ağırlığı	γ_s	g/cm ³	2,680
Maksimum kuru birim hacim ağırlığı	g_{kmax}	g/cm ³	1,450
Optimum su içeriği	w_{opt}	%	27
Likit limit	-	%	61
Plastik limit	-	%	29
Plastisite indeksi	PI	-	32
Sınıflandırma	-	-	CH

Kil zeminin güçlendirilmesi amacıyla kullanılan F sınıfı uçucu kül (UK) ise İSKEN-İskenderun Enerji Üretim ve Tic.A.Ş. termik santralinden temin edilmiş ve kimyasal özellikleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Uçucu Külün Kimyasal Kompozisyonu

Kimyasal İçerik	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	Na ₂ O	CaO	Cl ⁻
Değer (%)	63,04	21,63	6,77	1,07	0,10	2,79	0,02	0,01

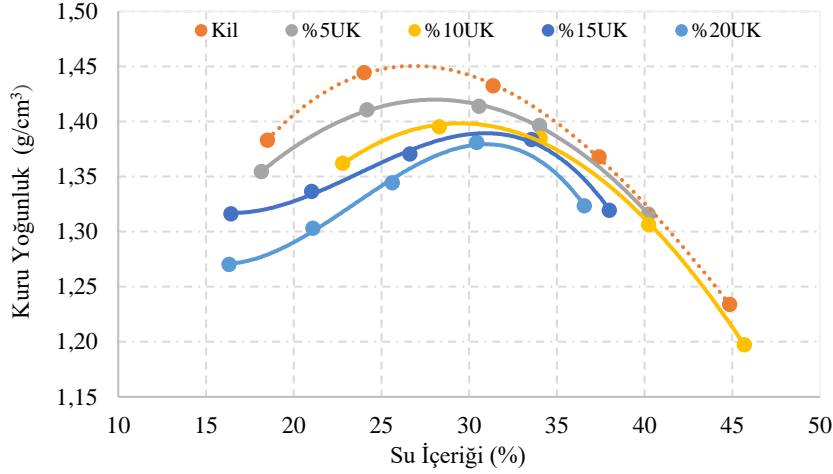
Çalışmada, kil-UK karışım numuneleri hazırlanmadan önce her iki malzeme 24 saat boyunca 105±5 °C’lik etüvde kurutulmuştur. Daha sonra, kil zemin içerisine literatürde yapılmış olan önceki çalışmalar (Mollamahmutoğlu, Yılmaz ve Güngör, 2009; Yılmaz, 2016) dikkate alınarak ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 oranlarında UK ilave edilerek stabilize karışımlar hazırlanmıştır.

Çalışmanın bütününde, saf kil ve stabilize karışımlar sırasıyla kil, %5 UK, %10 UK, %15 UK ve %20 UK olarak isimlendirilmiştir.

Hazırlanmış olan saf kil ve stabilize karışım numunelerinden üçer adet hazırlanarak, numuneler TS 1900-1’e uygun olarak Standart Proktor deneyine tabi tutulmuştur. Stabilize numuneler optimum su oranı tayini için deneye tabi tutulurken, UK’nin karışımdaki puzolanik reaktivitesini artırmak ve zemin ile arasında iyi bir etkileşim kurmak amacıyla su yerine sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi eklenmiştir.

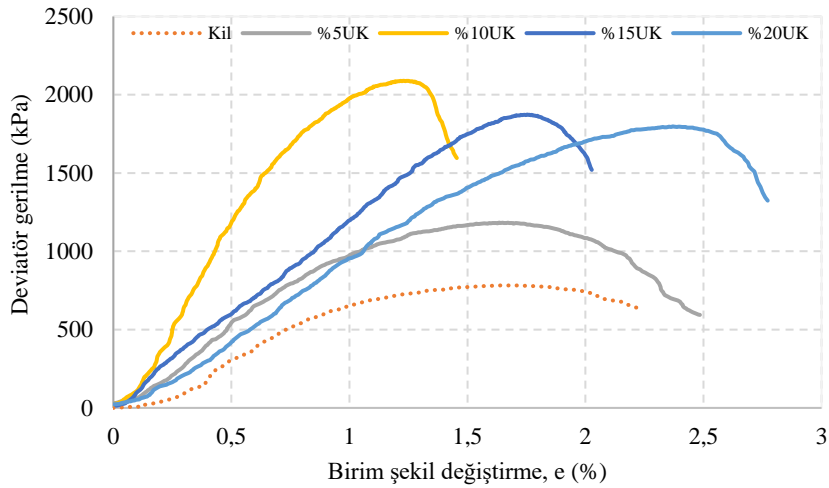
Numunelerin, Standart Proktor deneyleri sonucunda elde edilen Kuru Yoğunluk-Su İçeriği Grafikleri Şekil 1’de gösterilmiştir.

Şekil 1 dikkate alındığında, UK miktarındaki artışa bağlı olarak numunelerin optimum su muhtevasında artış, maksimum kuru yoğunluklarında ise azalma meydana geldiği görülmektedir. Su muhtevasındaki artışın ve kuru yoğunlukta meydana gelen azalmanın, Arulrajah (2016) tarafından yapılan benzer bir çalışmada belirtildiği gibi, UK’nin yüksek su emme potansiyeli ve ince taneli yapıya sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

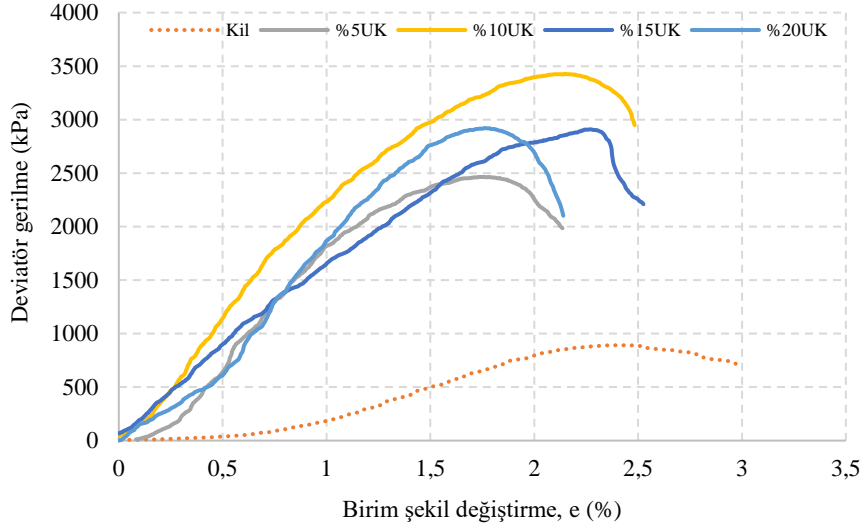


Şekil 1. Numunelere Ait Kuru Yoğunluk (gk) - Su İçeriği (%) Grafikleri

Standart Proktor deneyi sonucunda elde edilen optimum su içerikleri dikkate alınarak, serbest basınç ve CBR deneylerine tabi tutmak amacıyla karışım numuneleri hazırlanmıştır. Öncelikle, hazırlanmış olan bütün numuneler 7 ve 28 günlük kür sürelerine tabi tutularak, kür süresi sonunda numuneler üzerinde serbest basınç deneyi gerçekleştirilmiştir. Karışım numunelerinin 7 ve 28 günlük kür süresi sonucunda elde edilen Gerilme-Şekil Değişirme Grafikleri sırasıyla Şekil 2 ve Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 2. Numunelere Ait Serbest Basınç Deneyi Sonuçları (7 günlük kür)



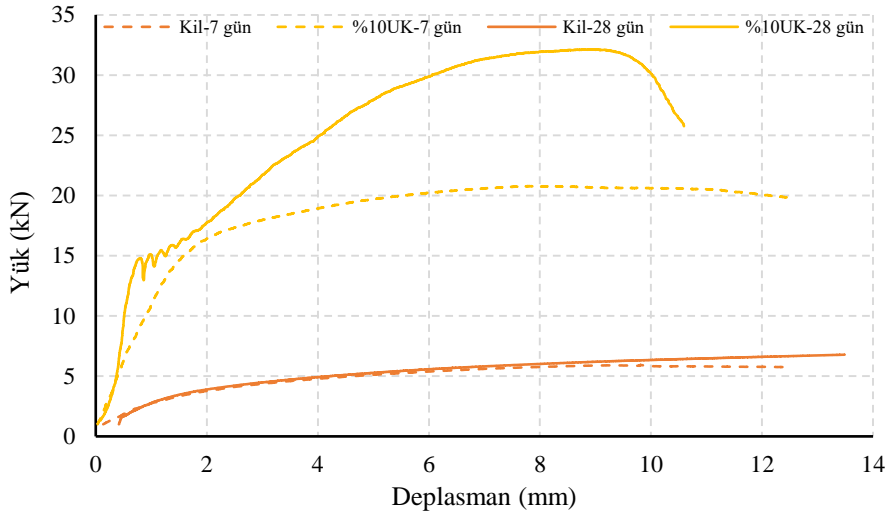
Şekil 3. Numunelere Ait Serbest Basınç Deneyi Sonuçları (28 günlük kür)

Şekil 2 ve Şekil 3'te görüldüğü üzere, karışımların maksimum serbest basınç dayanımının %10 UK katkısıyla hazırlanmış kil numunelere ait olduğu belirlenmiştir. 7 ve 28 günlük kür süreleri sonunda %10 UK katkısı ile stabilize kilin serbest basınç dayanımlarının, saf kil zemine kıyasla sırasıyla 2,67 ve 3,84 kat arttığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte, karışımların kür süreleri dikkate alındığında, 28 günlük kür süresine tabi tutulan numunelerin kayma dirençleri 7 günlük kür süresine kıyasla daha büyük elde edilmiştir. Bunun, karışımda kullanılan NaOH çözeltisi sebebiyle devam eden puzolanik reaktiviteden kaynaklandığı düşünülmektedir. Sonuç olarak, UK'nin kil zeminin kayma direnci ve kohezyon yeteneği üzerinde oldukça olumlu bir etkiye sahip olduğunu ifade etmek mümkündür.

Ancak, UK kullanılarak yapılan önceki çalışmalar dikkate alındığında maksimum dayanımı veren oranların birbirinden farklılık gösterdiği görülmektedir (İnan vd., 2005; Taş vd., 2018; Gomez vd., 2019). Yapılan incelemeler sonucunda bu farklılığın kullanılan UK ve killerin yapısal farklılıklarından ve kullanılan çözeltilerin cins ve miktarından kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

Serbest Basınç deneyleri sonucunda, en uygun katkı oranı %10 olarak tespit edildikten sonra, saf ve stabilize karışım numuneleri CBR deneyine tabi tutulmuştur.

Bu amaçla, saf kil ve %10 UK içeren karışım numuneleri hazırlanarak bu numuneler 7 ve 28 günlük kür sürelerine tabi tutulmuştur. Çalışmada, her bir deney için ikişer adet numune hazırlanmıştır. CBR deneyine tabi tutulan saf kil ve %10 UK katkılı karışım numunelerine ait yük-deplasman grafikleri Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. CBR Deneyi İle Elde Edilen Yük-Deplasman Grafikleri

Şekil 4'te görüldüğü üzere, 7 günlük küre tabi tutulmuş saf kil zemine ait 2,5 ve 5 mm'lik deplasmanlara ait düzeltilmiş CBR değerleri %31,2 ve %25,6; %10 UK ilave edilmiş kil zemininin aynı deplasmanlara ait düzeltilmiş CBR değerleri %131,23 ve %98,46 olarak elde edilmiştir. 7 günlük kür sonunda, %10 UK katkılı kilin 2,5 ve 5 mm'lik deplasman için CBR değerlerinde sırasıyla 4,20 ve 3,85 kat artış meydana gelmiştir. Benzer şekilde, 28 günlük küre tabi tutulmuş saf kilin 2,5 ve 5 mm'lik deplasmanlarına ait düzeltilmiş CBR değerleri sırasıyla %32 ve %26,4; %10 UK katkılı kil zemininin aynı deplasmanlara karşılık gelen düzeltilmiş CBR değerleri sırasıyla %149,59 ve %139,95 olarak elde edilmiştir. 28 günlük kür sonunda, %10 UK katkılı kilin 2,5 ve 5 mm'lik deplasman için CBR değerlerinde sırasıyla 4,67 ve 5,30 kat artış meydana gelmiştir.

Bu sonuçlar, UK'nin kil zeminin kalıcı deformasyonlara karşı direnci üzerinde çok olumlu bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

AASHTO Yöntemi ile Esnek ve Rijit Üstyapıda Taşıma Gücünün Analitik İncelenmesi

Karayolu esnek üstyapı tasarımında hedef, projelendirilen tasarım ömrü süresince, tekerrür edecek olan trafiği, çatlamalara ve şekil değiştirmelere maruz bırakmadan emniyetli bir şekilde taşıyabilecek üstyapı tabaka kalınlıklarının belirlenmesi ve üstyapı tabakalarını oluşturacak malzemelerin özelliklerinin saptanmasıdır. Bu kapsamda, üstyapı kalınlıklarının hesabında üstyapıya etkileyen faktörleri kapsayan AASHTO 1986 yönteminde deney yolu denklemi Eşitlik 1 ile verilmiştir. Yöntemde, yol esnek üstyapı sayısı (SN) Eşitlik 1'de verilen formüle göre hesaplanmaktadır (AASHTO).

$$\begin{aligned} \text{Log}W_{8,2t} = & Z_R \times S_0 + 9,36 \times \log_{10}(SN+1) - 0,20 + \frac{\log(\Delta PSI / (4,2-1,5))}{1 + [1,624 \times 10^7 / (D+1)^{8,46}]} \\ & 0,40 + [1094 / (SN+1)^{5,19}] \\ & + 2,32 \times \text{Log}(M_R) - 8,07 \end{aligned} \quad (1)$$

Burada;

- $W_{8,2t}$: 8,2 ton tek dingil yükünün üstyapının son servis yeteneğine düşmesi için gerekli toplam tekerrür sayısı
 M_R : Taban zemini esneklik modülü, psi ($6,8950 \times 10^3$ Pa)
 S_0 : Standart sapma
 Z_R : Güvenilirliğin yüzdesine bağlı olarak tespit edilen standart normal sapma değeri
 SN : Üstyapı sayısı
 ΔPSI : Servis kabiliyeti indeksi

Karayolu rijit (beton) üstyapı performansı için $W_{8,2t}$ 'nin, kaplamanın performansı üzerine etkisi göz önünde bulundurularak elde edilen AASHTO 1986 denklemi Eşitlik 2'de verilmiştir. Yöntemde beton kaplama kalınlığı (D) Eşitlik 2'de verilen formüle göre hesaplanmaktadır.

$$\begin{aligned} \text{Log}_{10}W_{8,2} = & Z_R \times S_0 + 7,35 \times \log_{10}(D+1) - 0,06 + \frac{\log_{10}[\Delta PSI / (4,5-1,5)]}{1 + [1,624 \times 10^7 / (D+1)^{8,46}]} \\ & + (4,22 - 0,32 \times P_t) \times \text{Log}_{10} \frac{S'_c \times C_d \times [D^{0,75} - 1,132]}{215,63 \times J \times [D^{0,75} - [18,42 / (E_c / k^{0,25})]]} \end{aligned} \quad (2)$$

Burada;

- $W_{8.2}$: 8,2 ton eşdeğer tek-dingil yükü tekerrür sayısı
 Z_R : Standart normal sapma
 S_0 : Trafik tahmini ve performans tahmininin bileşik standart hatası
 D : Rijit üstyapı beton kaplama kalınlığı, inç (0,0254 m)
 ΔPSI : P_0-P_t (Servis kabiliyetinde azalma miktarı)
 P_0 : Başlangıç servis kabiliyeti indeksi
 P_t : Nihai servis kabiliyeti indeksi
 S'_c : Betonun kopma modülü (Eğilmede çekme dayanımı), psi ($6,8950 \times 10^3$ Pa)
 J : Yük transfer katsayısı
 C_d : Drenaj katsayısı
 E_c : Betonun elastisite modülü, psi ($6,8950 \times 10^3$ Pa)
 k : Yatak katsayısı, psi/inç veya $kg/cm^2/cm$ 'ni göstermektedir.

Çalışmada, UK'nin esnek ve rijit yol üstyapısı üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla en uygun dayanımı veren karışım oranı ve kür süresi dikkate alınarak AASHTO yöntemi ile üstyapı tasarımı yapılmıştır.

a. AASHTO Yöntemi ile Esnek Üstyapı için Taban Zemini Taşıma Gücünün Analitik İncelenmesi

Esnek üstyapı tasarımı için, %10 UK katkılı kil zemininin 28 günlük kür süresi sonundaki CBR değerleri esas alınmıştır. Bu sebeple, saf ve %10 UK katkılı kil zeminlerin 28 günlük kür sonunda elde edilen CBR değerleri olan %32 ve %149,59 oranları sırasıyla kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Bunun için, öncelikle AASHTO yöntemi ile üstyapısı dizayn edilecek yolun taban zemininin esneklik modülü (M_R) değerinin hesaplanması gerekir.

Zemine ait M_R ve CBR değerleri arasında $M_R=1500 \times CBR$ bağıntısı mevcut olup, zemine ait CBR değerinin bilinmesi durumunda M_R değeri yaklaşık olarak hesaplanabilmektedir (Kök, Yılmaz ve Geçkil, 2012).

Buna göre, saf ve %10 UK katkılı kil zeminler için M_R değerleri sırasıyla 48.000 psi (330948350,07 Pa) ve 224.385 psi (1547080115,2 Pa) olarak bulunmuştur. Esnek kaplamaların hesaplamalarında kullanılan diğer ortak değerler ise Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Esnek Kaplama Hesaplamalarında Kullanılan Parametreler

Kullanılan Parametreler	Seçilen Değer
8,2 ton tek dingil yükünün üstyapının son servis yeteneğine düşmesi için gerekli toplam tekerrür sayısı, $W_{8,2}$	10.000.000
Standart sapma, S_0	0,60
Güvenilirliğin yüzdesine bağlı olarak tespit edilen standart normal sapma değeri, Z_R	-3,090
Servis kabiliyeti indeksi, ΔPSI	2,20

$M_R=48.000$ psi için;

$$-3,090 \times 0,60 + 9,36 \times \log_{10}(SN+1) - 0,20 + \frac{\log(2,20/(4,2-1,5))}{0,40 + [1094/(SN+1)^{5,19}]} + 2,32 \times \text{Log}(48.000) - 8,07 - \text{Log}_{10}(10.000.000) = 0$$

Bağıntı yardımı ile saf ve %10 UK katkılı kil zeminler için SN değerleri sırasıyla 6,934 inç (17,61 cm) ve 4,337 inç (11,01 cm) olarak belirlenmiştir.

Bu sonuca göre, esnek üstyapı tasarımında yol taban zemini olarak saf kil yerine %10 UK katkılı kil zemin kullanılması durumunda üstyapı sayısında %37,45 oranında büyük bir azalma meydana geldiği görülmektedir. Bu durum, aynı trafik etkilerine maruz bir yolda daha az kalınlığa sahip üstyapı tabakalarının inşa edilmesine, dolayısıyla daha düşük maliyet anlamına gelmektedir.

b. AASHTO Yöntemi ile Rijit Üstyapı için Taban Zemini Taşıma Gücünün Analitik İncelenmesi

Rijit (beton) kaplamalarda zemin taşıma gücü (yatak katsayısı) 'k', esnek kaplamalarda ise zemin esneklik modülü ' M_R ' ile tanımlanmaktadır. 'k' ile ' M_R ' arasında Eşitlik 3'teki gibi bir bağıntı mevcuttur (Kök vd., 2012).

$$k = M_R/19,4 \quad (3)$$

Eşitlik (3) yardımı ile saf ve %10 UK katkılı kil zeminler için k değerleri sırasıyla 2.475 ve 11.566,24 olarak belirlenmiştir.

Rijit kaplamaların hesaplamalarında kullanılan diğer parametreler ise Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Rijit Kaplama Hesaplamalarında Kullanılan Parametreler

Kullanılan Parametreler	Seçilen Değer
8,2 ton eşdeğer tek-dingil yükü tekerrür sayısı, $W_{8,2}$	45.000.000
Yük transfer katsayısı, J	3,2
Drenaj katsayısı, C_d	1
Trafik tahmini ve performans tahmininin bileşik standart hatası, S_0	0,35
Standart normal sapma, Z_R	-1,645
Betonun elastisite modülü, E_C	5.000.000
Nihai servis kabiliyeti indeksi, P_t	2,5
Betonun kopma modülü (Eğilmede çekme dayanımı) (psi), S'_c	645
Servis yeteneği kaybı, ΔPSI	2

$k=2.475$ pci için;

$$\begin{aligned} & (-1,645) \times (0,35) + 7,35 \times \log_{10}(D+1) - 0,06 + \frac{\log_{10}[2/(4,5-1,5)]}{1 + [1,624 \times 10^7 / (D+1)^{8,46}]} \\ & + (4,22 - 0,32 \times 2,5) \times \log_{10} \frac{645 \times 1 \times [D^{0,75} - 1,132]}{215,63 \times 3,2 \times [D^{0,75} - [18,42 / (5.000.000 / 2.475^{0,25})]]} \\ & - \log_{10}(45.000.000) = 0 \end{aligned}$$

Bağıntı yardımı ile saf ve %10 UK katkılı kil zeminler için D değerleri sırasıyla 12,215 inç (31,02 cm) ve 8,683 inç (22,05 cm) olarak hesaplanmıştır.

Bu sonuçlara göre, rijit üstyapı tasarımında yol taban zemini olarak saf kil yerine %10 UK katkılı kil zemin kullanılması durumunda üstyapı kalınlığında %28,92 oranında önemli bir azalmanın meydana geldiği görülmektedir. Bu durumda, benzer ağır trafik etkilerine maruz bir yolda, yol zemininin UK ile stabilize

edilmesiyle rijit üstyapı kalınlığının ciddi oranda azalacağını ve bunun yol maliyetini önemli ölçüde düşüreceğini ifade etmek mümkündür.

c. Maliyet Hesabı Sonuçları

Çalışmada, UK ile iyileştirilmiş kil zeminin karayolu esnek ve rijit üstyapı maliyetleri üzerindeki etkisi, Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM)'nün verileri esas alınarak değerlendirilmiştir.

KGM tarafından yayınlanmış olan birim fiyat cetvellerinde, alt temel ve temel tabakaları için birim ağırlık (ton) ve birim hacim (m^3) maliyetleri; bitümlü temel, binder ve aşınma tabakaları için birim alan (m^2) maliyetleri yayınlanmıştır.

Çalışmada, karayolu üstyapılarının ekonomik analizi için 2018 yılı KGM birim fiyatları kullanılmıştır. Tablo 5'te esnek üstyapı için analiz kapsamında kullanılacak birim maliyetler verilmiştir (<http://www.birimfiyat.net>, 2018).

Tablo 5. Esnek Üstyapı için Tabaka Cinslerine Göre Birim Maliyetler

Poz No.	Tanımı	Birimi	Birim Fiyatı (TL)	m^2/cm Maliyeti (TL)
KGM/6405/S	5 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m^2 asfalt betonu aşınma tabakası yapılması	m^2	9,27	1,85
KGM/6308	8 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m^2 asfalt betonu binder tabakası yapılması	m^2	13,11	1,64
KGM/6212-A	12 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m^2 asfalt betonu bitümlü sıcak temel tabakası yapılması	m^2	18,21	1,52
KGM/6100/3	Plentmix temel yapılması (kırılmış ve elenmiş ocak taşı ile), (Yoğunluk, 2,40 g/cm^3)	ton	37,63	0,90
KGM/6010	Elenmiş çakıllı malzeme ile alt temel yapılması (kum-çakıl alt temel)	m^3	11,32	0,11

Çalışmada saf kil zemin üzerine inşa edilecek olan tabaka cinslerine göre birim maliyet hesabında, alt temel tabakası 20 cm, granüler temel tabakası 20 cm, bitümlü temel tabakası 12 cm, binder tabakası (asfalt betonu) 8 cm ve aşınma tabakası (asfalt betonu) 5 cm olarak alınmıştır.

Esnek yol kaplamasının maliyet hesabında; her bir tabakanın maliyeti, Tablo 5'te verilen birim fiyatların, tabakanın kendi kalınlığına bölünerek "m²/cm" cinsinden hesaplanarak elde edilmiş ve bunların toplamı ile üstyapı birim maliyeti belirlenmiştir. Bu hesaplamalara göre, esnek yol üstyapı kalınlığının m²/cm cinsinden birim maliyeti toplam 6,02 TL olarak elde edilmiştir.

Ancak, daha önce hesaplandığı üzere, %10 UK katkılı kil zeminin üstyapı sayısında saf kil zemine kıyasla %37,45 oranında bir azalma meydana geldiğinden, bu durumda; %10 UK katkılı kil zeminin üstyapı birim maliyeti 3,77 TL olacaktır.

Bu hesaplamalara göre, 1000 m uzunluğunda ve 20 m genişliğindeki bölünmüş bir yolda yol taban zemininin %10 UK ile iyileştirilmesi durumunda 45.000,00 TL tasarruf sağlanmış olacaktır.

Rijit üstyapı hesabı için analiz kapsamında kullanılacak birim maliyetler Tablo 6'da verilmiştir (<http://www.birimfiyat.net>, 2018).

Tablo 6. Rijit Üstyapı için C25 Betonun Birim Maliyeti

Poz No	Tanım	Birimi	Birim Fiyat (TL)	m ² /cm Maliyeti (TL)
Y.16.050/05	Beton santralinde üretilen veya satın alınan ve beton pompasıyla basılan, C 25/30 basınç dayanım sınıfında beton dökülmesi (beton nakli dahil)	m ³	165,03	1,65

Yukarıdaki hesaplama benzer şekilde, saf kil zeminin rijit yol üstyapı kalınlığının m²/cm cinsinden birim maliyeti 1,65 TL olarak elde edilmiştir. Daha önce hesaplandığı üzere; yol taban zemininin %10 UK ile iyileştirilmesi durumunda, saf kil zemine kıyasla, kaplama kalınlığında %28,92 oranında bir azalma meydana geldiğinden, %10 UK katkılı zemin için üstyapı maliyeti 1,17 TL olacaktır. Bu hesaplamalara göre, aynı uzunluktaki bir yolda yol taban zemininin %10 UK ile iyileştirilmesi durumunda 9.600,00 TL tasarruf sağlanmış olacaktır.

Bir ülkenin binlerce km'den oluşan yol ağı dikkate alındığında, esnek ve rijit üstyapı inşaatlarında yapılacak zemin iyileştirmeleri yardımıyla, tabaka kalınlıkları ve kullanılacak malzeme miktarları azalacak; işçilik, taşıma ve enerji giderleri düşecek ve önemli ekonomik tasarruf sağlanmış olacaktır. Sonuç olarak, bu tasarrufların ülke ekonomisine ciddi katkılar sağlayacağı değerlendirilmektedir.

Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, F sınıfı UK ilave edilerek dayanımı arttırılan killi bir yol taban zemininin, karayolu esnek ve rijit üstyapı kalınlıklarına ve maliyetlerine etkileri araştırılmıştır. Yapılan çalışmalar neticesinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. Kil zeminin içeriğindeki UK miktarının artmasına bağlı olarak, karışımların optimum su muhtevalarında artış, maksimum kuru yoğunluk değerlerinde ise azalma görülmüştür. Bu durumun, UK'nin yüksek su emme potansiyeli ve ince taneli yapıya sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

2. Saf kil ve UK ile stabilize edilmiş numunelerin 7 ve 28 günlük kür süresi sonunda elde edilen serbest basınç deney sonuçlarına göre, her iki kür süresi için en yüksek serbest basınç dayanımları %10 UK içeren karışımlardan elde edilmiştir. Bu kür sürelerinde, %10 UK içeren karışımların serbest basınç dayanımları saf kile kıyasla sırasıyla 2,67 ve 3,84 kat artış göstermiştir. Bu sonuç, kil zeminin kayma direnci ve kohezyon yeteneği üzerinde UK'nin iyileştirici bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

3. CBR deney sonuçlarına göre, 7 günlük küre tabi tutulmuş %10 UK içeren karışımların 2,5 ve 5 mm'lik deplasmanlara karşılık gelen CBR değerleri, aynı kür süresine tabi saf kil numunelere kıyasla sırasıyla 4,20 ve 3,85 kat artış göstermiştir. Benzer şekilde, 28 günlük kür süresi için bu değerler sırasıyla 4,67 ve 5,30 kat elde edilmiştir. Bu önemli artışlar, kil zeminin kalıcı deformasyon direnci üzerinde UK'nin çok olumlu bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

4. Esnek üstyapı tasarımı için, %10 UK içeren killi karışımların CBR oranlarına göre belirlenen M_R değerleri yardımıyla hesaplanan üstyapı sayısı, saf kil zemine kıyasla %37,45 oranında azalma göstermiştir. Benzer şekilde, rijit üstyapı için belirlenen k değerleri yardımıyla hesaplanan üstyapı kalınlığında ise %28,92 oranında azalma meydana gelmiştir. Bu azalmalar, üstyapıyı oluşturan tabaka kalınlıklarının da azalacağı anlamına geldiğinden, yol yapım maliyeti de buna bağlı olarak azalacaktır.

5. Karayolu üstyapı tabakaları için birim maliyetler dikkate alındığında; 1000 m uzunluğunda ve 20 m genişliğindeki bölünmüş bir yolun taban zemini %10 UK ile iyileştirildiğinde, saf zemine kıyasla esnek kaplama için 45.000,00 TL, rijit kaplama için 9.600,00 TL tasarruf edilmiş olacaktır.

Sonuç olarak, killi bir zemine UK ilave edilmesiyle zeminin dayanımının önemli ölçüde arttığı, yol üstyapı tabaka kalınlıklarının ve yapım maliyetlerinin azaldığı tespit edilmiştir. Bunun yanında, esnek ve rijit yol ile sivil ve askerî havaalanı zeminlerinin UK ile iyileştirilmesi durumunda, UK'nin çevreye verdiği zararı önlemek ve ülke ekonomisine kazanç sağlamak bakımından olumlu olacağı düşünülmektedir.

Extended Summary

Introduction

In highway engineering, depending on the soil of road infrastructure, many deterioration occurs in road pavement such as slump, sliding, swelling, cracking. Recently, the road pavement has been strengthened by adding various contributions to the soil in order to strengthen the soil, which has poor bearing capacity, before the road pavement is built. Many methods, including physical, chemical and mechanical, are used for the improvement of soils. The most preferred method of these is to improve the strength of the soil by adding various additives into the soil. Various additives such as cement, lime, Fly Ash (FA) are used for this purpose.

Material and Experimental Studies

In this study, it was aimed to improve a clay soil with poor bearing capacity by using Class F fly ash. In addition, the effect of this improved soil on the thickness and costs of the highway flexible and rigid superstructure was investigated. For this purpose, clay soil obtained from Malatya Kıltepe region was taken and tried to be improved. ISKEN-İskenderun Energy Production and Trade Inc. the F Class FA, supplied from the thermal power plant, was used. Mixture samples were prepared by adding 5%, 10%, 15% and 20% FA into the soil by weight. The samples were carried out to a Standard Proctor Test and The Optimum Water Content of the samples were determined. Samples prepared at the Optimum water rate were carried out Compaction, Unconfined Compression and California Bearing Ratio (CBR) experiments after homogenous mixing. With the help of these experiments, the FA

rate which gives the highest resistance was determined. Based on this ratio, flexible and rigid pavement thicknesses and costs were calculated with the help of AASHTO 1986 method. As a result of the experimental studies, an increase in the optimum water content of the mixtures and a decrease in the maximum dry density were observed due to the increase in the FA content of the clay soil. Furthermore, the highest compressive strength was obtained from mixtures containing 10% FA according to the Unconfined Compression Test results at the end of the cure period of 7 and 28 days of pure and FA doped samples. The unconfined compression test resistances at these curing times increased by 2.67 and 3.84 times, respectively, compared to pure clay. According to the CBR test results, the CBR values of the mixtures containing 10% FA at the end of the 7 day cure period showed a 4.20 and 3.85 times increase, respectively, compared to pure clay for displacement of 2.5 and 5 mm. Similarly, for the cure period of 28 days, these values were 4.67 and 5.30 times respectively. According to the AASHTO 1986 method, the number of flexible pavement showed a 37.45% reduction for clayey soil containing 10% FA compared to Pure Clay soils. Similarly, the thickness of the rigid pavement decreased by 28.92%. In addition, when unit costs for road pavement layers are taken into account, when the base soil of a 1000 m long and 20 m wide road is improved by 10% FA, a saving of 45.000,00 TL for flexible pavement and 9.600,00 TL for rigid pavement will be reinforcement.

Results and Recommendations

As a result, it was found that the strength of the soil increased significantly with the addition of FA to a clayey soil, reducing the layer thicknesses and construction costs of the road pavement. In addition, if the flexible and rigid road and civil and military airport soils are improved with the FA, it is thought that the FA will be positive in terms of preventing damage to the environment and providing benefits to the country's economy.

Kaynakça

Makaleler

- Arulrajah, A., Mohammadinia, A., Horpibulsuk, S., Samingthong, W. (2016). Influence of class F fly ash and curing temperature on strength development of fly ash-recycled concrete aggregate blends. *Construction and Building Materials*, 127, 743-750.

- Brooks, R.M. (2009). Soil Stabilization with Fly Ash and Rice Husk Ash. *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences*, 209-217.
- Ferguson, G. (1993). Use of Self-Cementing Fly Ashes As A Soil Stabilization Agent, Fly Ash for Soil Improvement. *Geotehcnical Special Publication*, 1-15.
- Hausman, M.R. (1990). Engineering Principles of Ground Modification. *International Edition*, 321-335.
- İnan, G., Sezer A., Ramyar, K., Yılmaz, H.R. (2005). Değişik Uçucu Küllerin Yüksek Plastisiteli Kilin Serbest Basınç Dayanımına Etkisi. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 1-4.
- Jiang, Z.G., Zhao, Y. (2015). 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*, 110-112.
- Kök, B.V., Yılmaz, M. ve Geçkil, A. (2012). Çimento Stabilizasyonlu Zeminin Esnek Üstyapı Maliyetine Etkisi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 165-172.
- Mollamahmutoğlu, M., Yılmaz, Y. ve Güngör, A.G. (2009). Effect of a Class C Fly Ash on the Geotechnical Properties of an Expansive Soil. *International Journal of Engineering Research-Development*, 1-6.
- Silitonga, E., Levacher, D. ve Mezazigh, S. (2009). Effects of the Use of Fly Ash as a Binder on the Mechanical Behaviour of Treated Dredged Sediments. *Environmental Technology*, 799-807.
- Taş, M., Fidan, D., ve Yılmaz, F. (2018). Uçucu Kül ve Bayburt Taşı ile Zemin Stabilizasyonu. *Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9-14.
- Wasti, Y. (1990). Uçucu Küllerin Geoteknik Özellikleri ve Kullanım Olanakları. *İMO Teknik Dergi*, 177-188.

Tezler

- Çakılcıoğlu, İ. (2007). *Yüksek Plastisiteli Killerin Stabilizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

- Erşan, H. (1996). *Uçucu Küllerin Siltli Zeminlerin Kayma Mukavemeti Üzerine Etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kılıç, G. (2008). *Çimento ile Zemin Stabilizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kavak, A. (1996). *The Behavior of Lime Stabilized Clays under Cyclic Loading*. Doktora Tezi, Boğaziçi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Öntürk, K. (2011). *Zemin İyileştirmesinde Polisaaj, Kireç ve Uçucu Külün Kullanımı*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Savran, K.Z. (1988). *Stabilization of Cohesive Soils with Fly Ash*. Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Taşçı, G. (2011). *Problemlili Kil Zeminin Geoteknik Özelliklerine Silis Dumanı ve Kireç Katkısının Etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

Kongre ve Sempozyum

- Aksoy, H.S., Yılmaz, M., Akarsu, E.E. (2007). Killi Zeminin Tunçbilek Uçucu Külü Kullanılarak Stabilizasyonu, *2'nci Geoteknik Sempozyumu*.
- Erdoğan, T.Y. (1993). Atık Hammaddelerin İnşaat Endüstrisinde Kullanımı, *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanımı Sempozyumu*.
- Gomez G.P., Bastida M.J.G., and Ruge C.J.C. (2019). Soil stabilization with lime and fly ash, *Colombia Congreso Internacional*.
- Mitchell, J.K. (1981). Soil Improvement-State of the Art Report. In Proc., *11th Int. Conf.*
- Tan, O., İyisan R. (1996). Uçucu Kül ile Zemin Stabilizasyonu, *ZMTM 6'nci Ulusal Kongresi*.
- Van Impe, W.F. (1989). Soil Improvement Techniques and Their Evolution. *Aa Balkema Rotterdam Conf.*
- Yılmaz, F. (2016). Zemin Stabilizasyonunda Uçucu Kül Kullanımı, *3rd Alanya International Symposium*.

Web Siteleri

<http://www.birimfiyat.net>, 2018.

Standartlar

American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO
Guide for Design of Pavement Structures. Washington, D.C.:1986.

ASTM C 618, (1991). Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural
Pozzolan for use as a mineral admixture in Portland Cement Concrete,
ASTM.