

KİREÇ İLE STABİLİZE EDİLEN KİLLİ BİR ZEMİNİN ESNEKLİK MODÜLÜ DEĞERLERİ

RESILIENT MODULUS VALUES OF A LIME STABILIZED SOIL

Ilknur BOZBEY¹, Birol DEMİR², Muhammet KOMUT², Ahmet SAĞLIK², Senol ÇÖMEZ², Aykan MERT², M. Kubilay KELEŞOĞLU³, Akın GÖKGÖZ⁴

ABSTRACT

Resilient modulus is one of the most important inputs in mechanical-empirical methods in pavement design. This modulus is capable of representing the soil behavior under traffic loading. In this paper, a project which was carried out by Istanbul University and Turkish General Directorate of Highways is briefly presented and the resilient modulus values after seven days curing are given. The purpose of the project was to investigate the effects of lime on resilient modulus of clayey soils. Lime stabilization is a frequently used soil stabilization method in pavement construction and the aim of this project is to increase the use of lime stabilization in pavement construction in Turkey. This is important due to both economic and environmental issues. In the project, effects of lime, soil pulverization level and curing duration on resilient modulus and strength were investigated through extensive laboratory testing. A design guide was prepared based on the findings of the project that can be used in mechanistic-empirical design of lime stabilized pavements. Several correlations were obtained. This paper presents the results of the resilient modulus tests carried out on seven days cured samples. The soil was pulverized in two different pulverization levels and the soil was stabilized with three different percentages of hydrated lime. The results revealed that resilient modulus values and dependence on stress state was affected by lime percent as well as soil pulverization levels.

Keywords: Lime stabilization, soil pulverization level, resilient modulus, curing duration.

ÖZET

Yol üstyapı tasarımlarında kullanılan mekanistik-ampirik yöntemlerin en önemli girdilerinden birisi esneklik modülüdür. Bu modül zeminlerin gerçek trafik yükleri altındaki davranışını temsil edebilen bir parametredir. Bu çalışma kapsamında, İstanbul Üniversitesi ve Karayolları Genel Müdürlüğü ortaklığında gerçekleştirilmiş ve kireç ile stabilize edilmiş

¹ Doç. Dr., İstanbul Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, ibozbey@istanbul.edu.tr (Sorumlu yazar)

² Karayolları Genel Müdürlüğü, Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı, aykanmert@yahoo.com

³ Doç. Dr., İstanbul Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, kelesoglu@istanbul.edu.tr

⁴ Yüksek Mühendis, İstanbul Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, akingokgoz34@gmail.com

zeminlerin esneklik modülü davranışını inceleyen bir proje tanıtılmakta ve yedi günlük kür süresi sonunda elde edilen esneklik modülü değerleri sunulmaktadır. Kireç stabilizasyonu yol üstyapısı için çok uygun ve çağdaş bir yöntemdir. Bu proje ile kireç stabilizasyonunun ülkemizde de diğer ülkelerde olduğu gibi daha çok kullanılmasını hedeflenmektedir. Gerek ekonomik, gerekse çevreye verilen zararların engellenmesi bakımından bu konu büyük önem taşımaktadır. İlgili projede kireç ile stabilize edilmiş zeminlerin esneklik modülü ve mukavemet davranışı kireç yüzdesi, zemin ufalama seviyesi, kür süresi bakımından detaylı olarak incelenmiştir. Elde edilen veriler kullanılarak çeşitli korelasyonlar elde edilmiştir. Kireç ile stabilize zeminler ile ilgili olarak yol haritası olması hedeflenen bir döküman hazırlanmıştır. Bu bildiride bu proje kapsamında yapılmış olan esneklik modülü deneylerinin yedi günlük kür süresi sonunda yapılanlar sunulmaktadır. Zemin iki farklı ufalama seviyesinde hazırlanmıştır. Üç farklı sönmüş kireç yüzdesi kullanılmıştır. Killi ve kireç ile stabilize edilen killi numuneler üzerinde yedi kür günü sonunda esneklik modülü deneyleri yapılmıştır. Kireç ilavesi ile bu kür süresi sonunda esneklik modülü değerlerinde önemli artışlar olmuştur. Sonuçlar, esneklik modülü değerlerinin kireç yüzdesi kadar zemin ufalama seviyesine de önemli ölçüde bağlı olduğunu göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Kireç stabilizasyonu, zemin ufalama seviyesi, esneklik modülü, kür süresi

1. GİRİŞ

Kireç ile iyileştirilmiş zeminlerin dünyada sık olarak kullanıldıkları yerlerden birisi karayolu üstyapısıdır. 2003 yılında, ABD’de 1,6 milyon tondan daha fazla kireç zemin stabilizasyonu işlerinde kullanılmıştır. Yine ABD’deki yapılmış olan bir proje kapsamında AASHTO tasarım prensiplerine göre tasarlanmış kireçli karayolu üstyapısı işlerinde %25 gibi bir tasarruf yapıldığı belirtilmektedir. Uzun vadeli performans bakımından da, kireç stabilizasyonunun bakım maliyetlerini azalttığı bilinmektedir. ABD’de yapılan çalışmalarda 20 cm’lik bir üstyapı taban zemin tabakasının kireç ile iyileştirilmesinin 30 yıl için bakım maliyetlerini her metrekare için yaklaşık olarak \$24.49 dan \$22.47 düşürdüğü gösterilmiştir (www.lime.gov).

Stabilize edilmiş zeminlerin mukavemet ve modül özelliklerinin doğru olarak belirlenmiş olması üstyapı elemanlarının kalınlıklarının ve kaplamanın performansının tanımlanması açısından büyük önem taşır. Zeminlerin trafik yükleri altındaki rijitlik davranışı en doğru şekli ile Esneklik Modülü ile tanımlanır. Karayolu Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi (Sağlık ve Güngör, 2008) esneklik modülünün esas alındığı AASHTO 199’a göre düzenlenerek uygulamaya konulmuştur. Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) tarafından hazırlanmış olan kireç şartnamesinde ise kireç stabilizasyonunun etki seviyesi, CBR ve serbest basınç mukavemeti kriterleri bakımından değerlendirilmektedir. Diğer taraftan KGM diğer uygulamalarında Esneklik Modülü uygulamasına girmiştir. Bu nedenle kireç şartnamesine esneklik modülüne ilişkin ilaveler yapılması ve bir tasarım prosedürü geliştirilmesi önem kazanmıştır. Bu kapsamda, İstanbul Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü tarafından kireç ile stabilize edilmiş zeminlerin esneklik modülü değerlerini inceleyen bir proje Karayolları Genel Araştırma Gelişme Dairesi Başkanlığı tarafından desteklenmiştir. Projede kireç ile stabilize edilmiş zeminlerde esneklik modülü ve mukavemet davranışının kireç yüzdesi, zemin ufalama seviyesi ve kür süresinden ne seviyede etkilendiği incelenmiştir (Bozbey ve Keleşoğlu, 2016). Durabilite özelliklerinin belirlenmesine yönelik deneyler yapılmıştır. Elde edilen veriler kullanılarak çeşitli korelasyonlar elde edilmiştir. Kireç ile stabilize zeminlerin mekanistik ampirik yaklaşımlarda kullanılması ile ilgili olarak yol haritası olması hedeflenen bir döküman

hazırlanmıştır. Proje tamamlanma aşamasındadır. Bu bildiride bu proje kısaca tanıtılmaktadır. Kireç stabilizasyonuna yönelik kapsamlı bir veri sağlayan bu projenin ülkemizde duyurulması ve tanıtılması amaçlanmaktadır. Bildiride ayrıca yedi gün kür süresi sonunda ölçülen esneklik modülü değerleri verilmektedir.

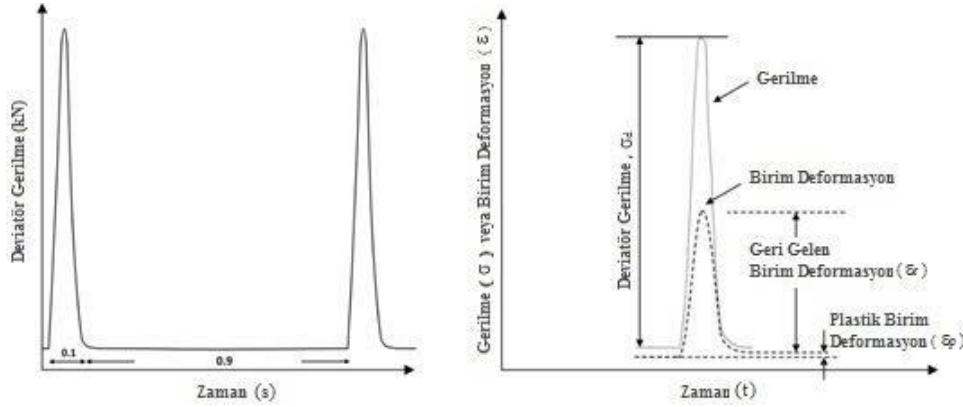
2. LİTERATÜR TARAMASI

Temel ve alt temel zeminlerin trafik yükleri altında doğrusal olmayan bir davranış sergilediği bilinmektedir. Bu tür malzemelerin elastik özelliklerinin tanımlanmasında gerilme seviyesine göre oluşan doğrusal olmayan davranışı açıklamak amacıyla esneklik modülü tanımı getirilmiştir. Esneklik modülü değeri çok tabakalı zeminlerin analizinde girdi olarak kullanılır. İlk olarak 1986 yılında AASHTO'nun önerisi ile esnek kaplamaların tasarımında esneklik modülü kullanılmaya başlanmıştır. Esneklik modülü deneyinde dinamik tekerlek yükleri tekrarlı haversine eksenel yükü kullanılarak modellenmektedir. Bir araç yol üzerinde belirlenen bir noktaya yaklaşırken gerilme, sıfırdan maksimum değerine doğru artış gösterir. Maksimum yük seviyesine, araç tekerinin kenarı tam belirlenen noktanın üzerinde olduğu anda ulaşılır. Bundan dolayı haversine yük formu, hareketli tekerlek yükleri altında, yolda oluşacak gerilme durumlarını en uygun modelleyen yükleme şekli olarak kabul edilmektedir. Deneyde, numune arazide olduğu gibi üç eksenli olarak yüklenir. Malzemenin tekrarlı yükler altındaki gerçek esneklik davranışı, belirli sayıda tekrarlı yük uygulaması gerçekleştirildikten sonra belirlenebilir. Yükleme durumunun başlarında, numunede dikkate değer miktarda kalıcı deformasyon meydana gelir. Uygulanan yükleme sayısı arttıkça, yük tekrarlarından dolayı oluşan plastik deformasyonlar azalır (Şekil 1). Bundan dolayı herhangi bir yükleme serisine ait Esneklik Modülü değeri, her yüz yüklemenin son beş tanesi göz önüne alınarak belirlenir (Özey ve Güngör, 2008). Esneklik Modülü, uygulanan deviator gerilmenin oluşan düşey elastik deformasyona oranı olarak tarif edilir (Denklem 1). Böylelikle deneyde farklı çevre ve deviator gerilmelerine karşılık olarak farklı esneklik modülleri ölçülür.

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (1)$$

İri ve ince daneli zeminler, esneklik modülü deneyinde farklı davranış sergiler. İnce daneli zeminlerin esneklik modülü değerleri deviator gerilme, sıkıştırma metodu, sıkıştırma su muhtevası, tiksotropi, doygunluk yüzdesi ve donma çözülme döngülerinden önemli ölçüde etkilenmektedir. İnce daneli zeminlerde, artan deviator gerilme ile esneklik modülü değerlerinde azalma görülür ve genellikle çevre basıncının esneklik modülü değerine etkisi daha az önem taşır. İri daneli zeminlerde ise esneklik modülü değerleri uygulanan çevre basıncı ve deviator gerilme ile birlikte artmaktadır. Kireç stabilizasyonu zeminler için en çok kullanılan iyileştirme yöntemlerinden birisidir. Stabilize edilmiş zeminlerin mukavemet, deformasyon ve modül özelliklerinin doğru olarak tanımlanmış olması üstyapı elemanlarının kalınlıklarının ve kaplamanın performansının doğru tanımlanması açısından büyük önem taşır. Bunun için laboratuvar deneylerinde uygulanmış olan prosedürlerle, arazi uygulamalarının uyumlu olması gerekir. Arazi ve laboratuvar arasındaki önemli farklardan birisi zeminin ufalama seviyesidir. Yüksek plastiseli killerle laboratuvar ortamında yapılan deneylerde genellikle topaklarından arındırılmış ve iyi ufalanmış zemin kullanılır, ancak

arazi uygulamalarında zemin ufalama kalitesi bu seviyede olmayabilir. Arazide kireç ve diğer stabilizatörlerle yapılan iyileştirmelerde kullanılan ekipman çeşitlik göstermekte ve bu da hem homojen dağılmayı hem de ufalama derecesini etkilemektedir. Arazide imal edilen kireç ile stabilize edilmiş yol üstyapılarında ufalama seviyesinin laboratuvar da test edilenden farklı olması elde edilecek zemin özelliklerini (serbest basınç mukavemeti, CBR esneklik modülü, durabilite) etkileyecektir. Bu konudaki literatürde de çeşitli çalışmalar mevcuttur. Tang ve diğ. (2011) kireç stabilizasyonunda ufalama seviyesi yükseldikçe artan kayma modülü değerleri ölçüldüğünü ifade etmektedir. Bu durumda, laboratuvar ufalama seviyesi ile elde edilen kayma modülü değerlerinin araziye göre daha büyük olacağını belirtmişlerdir. Toohey ve Mooney (2011) de benzer sonuçlar elde etmişlerdir. Beetham ve diğ. (2014), arazide zemin ufalaması sonucunda 50 mm çapında topaklar kalabildiğini ve bunun da stabilizasyonun etkisini azaltacağını belirtmektedir. Di Sante ve diğ. (2015) de benzer sonuçlar elde etmiştir. İstanbul Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde kireç ile stabilize edilen zeminlerin ufalama seviyelerinin esneklik modülü ve serbest basınç değerlerini nasıl etkilediği konusunda bir yüksek lisans tezi yapılmıştır (Muhammed Ali, 2012, Bozbey ve Muhammed Ali, 2013). Sonuçlar kireç ve ufalama seviyesinin kireç ile stabilize edilen zeminlerin esneklik modülü ve mukavemet davranışına olan etkisi hakkında literatüre yeni katkılar yapmıştır.



Şekil 1. Bir çevrim süresinde uygulanan deviator gerilmenin büyüklüğü ve süresi (Titi ve diğ., 2006)

3. PROJENİN İÇERİĞİ

Bu proje kapsamında saf ve kireç ile stabilize edilmiş zeminlerin esneklik modülü ve serbest basınç mukavemeti, zemin ufalama seviyesi ve kür süresi de dikkate alınarak incelenmiştir. Yüksek plastiseli killi bir zemin şartnamelere uygun olacak şekilde iki farklı ufalama seviyesinde ufalanmıştır. Saf ve %4, %6 ve %9 sönmüş kireç ile stabilize edilen zeminler üzerinde önce esneklik modülü ve daha sonra serbest basınç mukavemet deneyleri yapılmıştır. Ayrıca küçük çaplı numuneler (5 cm) üzerinde de serbest basınç mukavemeti deneyleri yapılmıştır. CBR deneyleri de gerçekleştirilmiştir. Tüm numunelerde kür süreleri 7 gün, 28 gün ve 56 gün olarak seçilmiştir. Durabiliteye yönelik olarak 12 döngülük donma çözülme deneyleri ve 10 günlük kapiler ıslanma deneyleri yapılmıştır. Bu süreler sonunda mukavemet ve modül değerlerindeki değişimler ölçülmüştür. Bu projede elde edilen veriler kullanılarak serbest basınç mukavemeti, elastisite modülü değerleri ve esneklik modülü arasına çeşitli korelasyonlar kurulmuştur. Bunların ihtiyatlı bir şekilde kullanılması ve kilin özellikleri ile birlikte değişeceği vurgulanmıştır. Proje kapsamında yol üstyapı tasarımına yönelik analizler de yapılmıştır. Bu tür yazılımlar ile farklı tabakalardaki gerilme, birim deformasyon durumlarının belirlenebileceğini gösterilmiştir. Bu değerler kullanılarak

üstyapı servis ömrüne yönelik tahminler yapılmıştır. Sonuçlar, yol üstyapısı için uygun kireç yüzdesinin ancak serbest basınç mukavemeti ve esneklik modülü davranışının bir arada değerlendirilmesi ile birlikte bulunması gerektiğini göstermiştir. Bu konuda bütüncül bir bakış açısı kullanılması gerektiği vurgulanmıştır. Ne sadece serbest basınç mukavemeti değerlerinin, ne de esneklik modülü değerlerinin tek başına gerçek performansı belirlemeyeceği gösterilmiştir. Elde edilen bilgiler ışığında “Kireç ile stabilize edilmiş tabaka kullanılan yol üstyapılarında mekanistik-ampirik yaklaşım” başlıklı ve bu konuda bir yol haritası olması hedeflenen bir döküman hazırlanmıştır. Bu konuda literatüre önemli katkılar getirilmiştir. Bu proje ile kireç stabilizasyonunun ülkemizde de diğer ülkelerde olduğu gibi daha çok kullanılmasını hedeflenmektedir. Gerek ekonomik, gerekse çevreye verilen zararların engellenmesi bakımından bu konu büyük önem taşımaktadır.

4. MATERYAL VE YÖNTEM

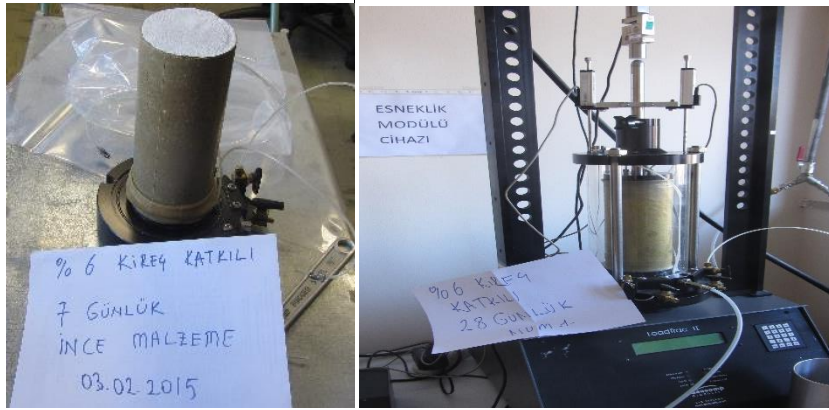
Bu bildiride, tarif edilen proje kapsamında yapılmış olan esneklik modülü deneylerinin bir kısmı sunulmaktadır. Çalışmada kullanılan zemin CH sınıfındadır. Numune araziden çuvalar içerisinde getirilmiş ve laboratuvarda ufalama işlemine tabii tutulmuştur. İnce ufalama için 4 Nolu eleğin altına geçen zemin yüzdesi %90 seviyelerinde iken, iri ufalama için %65 seviyelerine düşmektedir. Her iki gradasyon da kireç şartnamelerine göre uygun aralıkta kalmaktadır. İnce ufalama, laboratuvar şartlarında elde edilen bir seviyedir. İri ufalama ise arazi şartlarını temsil eden bir ufalamayı temsil etmekte olup, gerçekte arazide daha da iri bir ufalama elde edilebilir. Hazırlanan zemine zeminin kuru ağırlığının %4, %6, %9’u olacak şekilde sönmüş kireç ilavesi yapılmıştır. Numuneler optimum su muhtevasını sağlayacak şekilde hazırlanmıştır. Karışıma yeterli su ilave edilmiş ve nemli bir örtü ile sıkıca örtülerek bir saat süre ile beklenmiştir. Bir saat sonunda Standart Proktor Enerjisi ile sıkıştırılarak esneklik modülü için numuneler hazır hale gelmiştir. Numuneler çapı 100 mm, yüksekliği 210 mm olan ve ortadan ayrılabilen silindirik kalıplarda hazırlanmıştır. Numunelerin sıkıştırılmasında Standart Proktor enerjisi kullanılmıştır. Laboratuvarda her karışım için iki adet numune hazırlanmış ve test edilmiştir. Kür süresi sonunda numuneler esneklik modülü deneylerine tabi tutulmuştur. Şekil 2’de esneklik modülü numuneleri deney öncesinde görülmektedir. Projede 7 gün, 28 gün ve 56 gün kür süreleri uygulanmış olmakla birlikte bu bildiride yer kısıtı sebebi ile sadece 7 günlük sonuçlara yer verilecektir. Esneklik modülü deneyleri üstyapı tabanı için tavsiye edilen gerilmeler altında gerçekleştirilmiştir. Deviatör gerilmeler 14 kPa, 28 kPa, 42 kPa, 55 kPa ve 69 kPa olarak, çevre gerilmeleri ise sırası ile 14, 28 and 42 kPa olarak uygulanmıştır. Yükleme ile ilgili detaylı bilgiler Tablo 1’de verilmektedir. Böylece farklı tekerek yükleri altında ve gerilmeler altındaki esneklik modülü değerleri elde edilmiştir.

5. BULGULAR

Stabilize edilmemiş numunelerden elde edilen değerler Şekil 3’de görülmektedir. Yedi gün kür süresi sonunda modül değerleri bakımından ince ve iri ufalama arasında önemli farklar ölçülmüştür. İri ufalama ile hazırlanan numunelerde esneklik modülleri 10-25 MPa bandındadır. İnce ufalama için ise değerler 50-80 MPa bandında ölçülmüştür. İnce daneli zeminler için kullanılan esneklik modülü korelasyonlarında zemin indeks özellikleri yanında, arazide gradasyonun da kullanılması gerektiği görülmektedir.

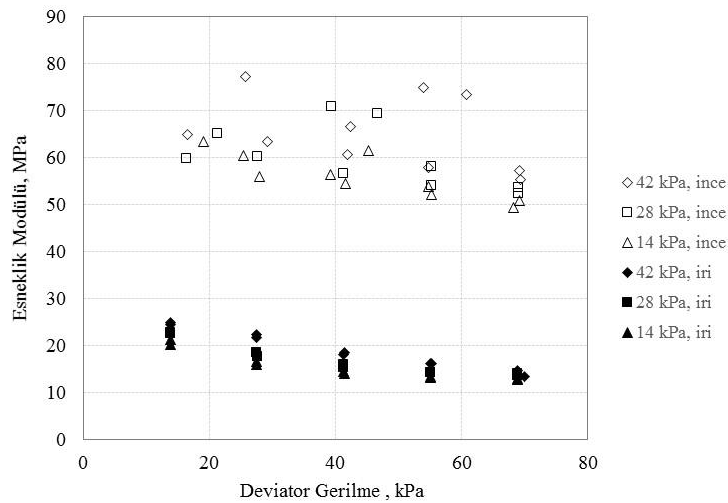
Tablo 1. Esneklik modülü deneyi yükleme tablosu

Yükleme seri numarası	Çevre basıncı, kPa	Deviaör gerilme, kPa	Yükleme sayısı	Yükleme seri numarası	Çevre basıncı, kPa	Deviaör gerilme, kPa	Yükleme sayısı
0	42	28	500-1000	8	28	42	100
1	42	14	100	9	28	55	100
2	42	28	100	10	28	69	100
3	42	42	100	11	14	14	100
4	42	55	100	12	14	28	100
5	42	69	100	13	14	42	100
6	28	14	100	14	14	55	100
7	28	28	100	15	14	69	100



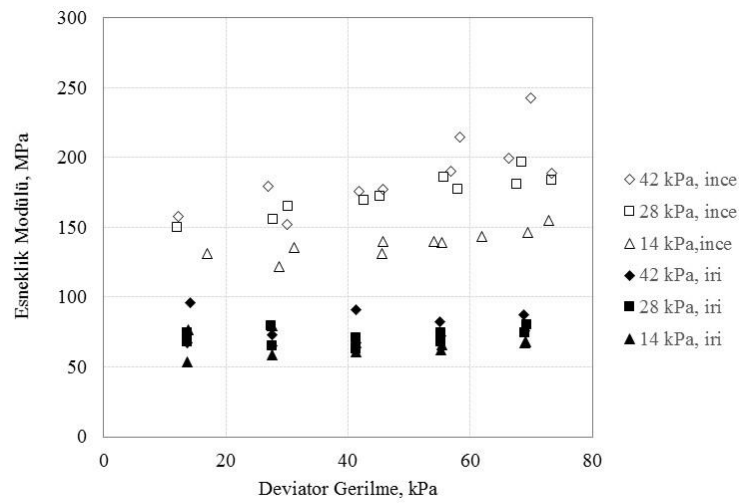
Şekil 2. Deney öncesinde esneklik modülü numuneleri

Her iki ufalama seviyesinde esneklik modülü değerleri gerilme durumundan etkilenmiştir. Davranış gerilme yumuşaması olarak gözlenmiştir, yani deviatör gerilme ile birlikte esneklik modülü değerleri azalmaktadır. Bu davranış ince daneli zeminler için beklenen bir davranıştır. Yüksek çevre gerilmelerinde biraz daha yüksek esneklik modülü değerleri ölçülmüştür, ancak esneklik modülü değerlerini asıl etkileyen gerilmenin deviatör gerilme olduğu görülmektedir. Özellikle iri ufalamada yüksek deviatör gerilmelerinde esneklik modülü değerleri 10 MPa kadar küçük değerlere inmektedir.



Şekil 3. Kireç katkısız ince ve iri ufalanmış numunelere ait deney sonuçları

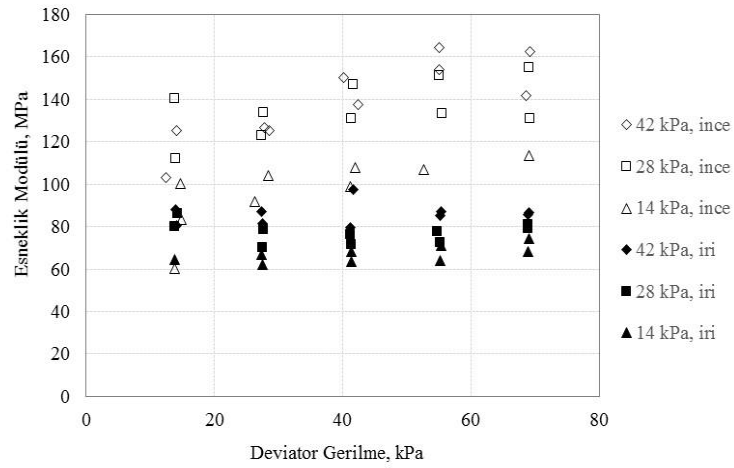
Yedi gün sonunda %4 kireç ile stabilize edilmiş zeminlerden elde edilen sonuçlar Şekil 4'te görülmektedir. Kireç ilavesi esneklik modülü değerlerini artırmıştır. Bu kür süresi sonunda kireçli numunelerde de iri ve ince ufalama bakımından önemli farklar oluşmuştur. İnce ufalama ile hazırlanan numunelerde esneklik modülü değerleri 130-250 MPa arasında, iri ufalama ile hazırlanan numunelerde ise 50-100 MPa arasında değişmektedir. İnce ve iri ufalama için esneklik modülü-deviatör gerilme davranışı farklılaşmıştır. İnce ufalama için deviatör ve çevre gerilmelerin artışı ile birlikte modül değerlerinde artış meydana gelmiştir. İri ufalama için ise özellikle deviatör gerilmelere bağlı olarak çok büyük farklılık görülmemiştir. Zemin ufalama seviyesi hem modül değerlerini, hem de modülün gerilme durumuna bağlı değişimini etkilemektedir.



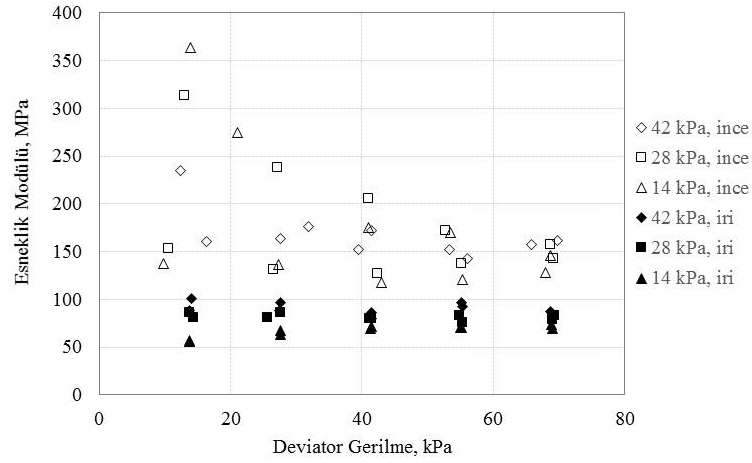
Şekil 4. %4 kireç katkılı ince ve iri ufalanmış numunelere ait deney sonuçları

Yedi gün kür süresi sonunda %6 kireç ile stabilize edilmiş zeminler için elde edilen sonuçlar Şekil 5'te görülmektedir. İnce ufalama ile modül değerleri 100-160 MPa arasında değişmektedir. İri ufalama ile modül değerleri 60-100 MPa aralığına inmektedir. İnce ve iri ufalama için esneklik modülü-deviatör gerilme davranışı da farklılaşmıştır. İnce ufalama için deviatör gerilme ile sertleşen davranış görülmüştür. İri ufalama için ise gerilme durumuna bağlı olarak çok büyük farklılık görülmemiştir. Bu bakımdan %4 kireç ilavesi ile benzerlik göstermektedir. İri ve ince ufalama ile modüle meydana gelen bu farklılıkların mikroyapı ile bağdaştırılması çalışmalarına devam edilmektedir.

Şekil 6'da %9 kireç ile stabilize edilmiş zeminlerde elde edilen sonuçlar görülmektedir. İri ve ince ufalama bakımından bu kireç yüzdesinde de farklılıklar oluşmuştur. İnce ufalama her durumda daha büyük modül değerleri vermektedir ve değerler deviatör gerilme değerlerinden etkilenmektedir. İri ufalama ile hazırlanan numunelerde deviatör gerilmesine bağlı bir farklılık oluşmamıştır. Yedi gün sonunda % 9 kireç ve iri ufalama ile modül değerleri 50-100 MPa arasında değişmektedir. İnce ufalama ile hazırlanan numunelerde farklı deviatör gerilmelerde farklı modül değerleri elde edilmektedir. Bazı gerilme durumlarında değerler 350 MPa'a kadar çıkmaktadır.

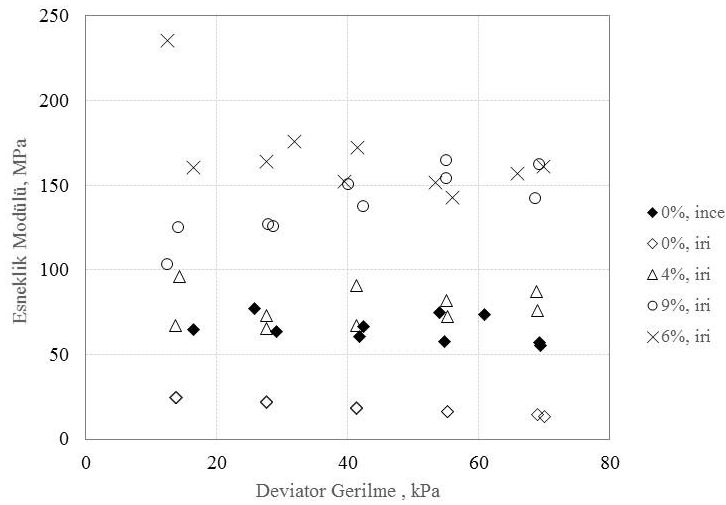


Şekil 5. %6 kireç katkılı ince ve iri ufalanmış numunelere ait deney sonuçları



Şekil 6. %9 kireç katkılı ince ve iri ufalanmış numunelere ait deney sonuçları

Şekil 7 ise iri ufalama ile hazırlanmış olan ve saf ve farklı kireç yüzdeleri için elde edilmiş esneklik modülü değerlerini karşılaştırmaktadır. Çevre gerilmesi olarak 42 kPa seçilmiştir. %4 kireç ilavesi ile modül değerlerinde stabilize edilmeyen numunelere göre artış elde edilmiştir. Ancak stabilize edilmemiş zeminde ince ufalama ile elde edilmiş değerler de seviyededir. Yani kireç yüzdesi kadar ufalama seviyesi de stabilizasyonun etkinliğinde büyük önem taşımaktadır. Diğer taraftan %6 ve %9 kireç stabilizasyonu için büyük deviatör gerilmelerde esneklik modülü değerleri 150 MPa seviyelerindedir. Küçük deviatör gerilmelerde ise %9 kireç ilavesi daha yüksek modül değerleri vermektedir. Kireç stabilizasyonundan elde edilen verimin, kireç yüzdesi kadar, ufalama seviyesi ve deviatör gerilmeye de son derece bağlı olduğu görülmektedir.



Şekil 7. İri ufalama ile hazırlanmış numunelerin esneklik modülü değerlerinin karşılaştırılması

Aynı içerikteki numuneler üzerinde yapılan yaş CBR deneyleri ise, 7 gün sonunda %4, %6, %9 kireç ilavesi için iri ufalamada sırası ile 18, 28, 35 ve ince ufalamada 38, 37, 37 değerlerini vermiş olup, gerilme durumuna bağlı herhangi bir farklılığın ölçülmesi mümkün olmamıştır. Bu durum özellikle CBR değerine bağlı olarak yapılan değerlendirmelerin gerçek yükler altında doğru olmayabileceğini göstermektedir.

6. SONUÇLAR

Bu bildiride üniversite-kamu işbirliği çerçevesinde gerçekleştirilmiş olan bir projede tanıtılmakta ve elde edilen sonuçların bir kısmı sunulmaktadır. Kireç stabilizasyonu yol üstyapısı için çok uygun ve çağdaş bir yöntemdir. Yürütülmüş proje ile kireç stabilizasyonunun ülkemizde de diğer ülkelerde olduğu gibi daha çok kullanılmasını hedeflenmektedir. Gerek ekonomik, gerekse çevreye verilen zararların engellenmesi bakımından bu konu büyük önem taşımaktadır. Kireç ile stabilize edilen killi zeminlerdeki esneklik modülü davranışını, kireç yüzdesi, zemin ufalama seviyesi, kür süresi bakımından incelemiş olan bu proje literatüre çok önemli katkılar da yapmıştır. Proje tamamlanma aşamasındadır. Proje sonuçları yol üstyapısında uygun kireç yüzdesinin serbest basınç mukavemeti ve esneklik modülü değerlerinin bir arada değerlendirilmesi ile birlikte bulunması gerektiğini göstermiştir. Bu konuda bütüncül bir bakış açısı kullanılmalıdır. Ne sadece serbest basınç mukavemeti değerlerinin, ne de esneklik modülü değerlerinin tek başına gerçek performansı belirleyemediği gösterilmiştir. Ufalama seviyesinin kireç stabilizasyonunu çok önemli seviyede etkilemiş olduğu görülmüştür. Laboratuvar deneylerinin bu bakımdan da araziye temsil etmesi gerektiği önemle vurgulanmıştır.

Bu bildiride ilgili projede yapılmış olan esneklik modülü deneylerinin yedi gün kür süresi sonunda yapılanlar da sunulmakta ve değerlendirmeler yapılmaktadır. Yüksek plastiseli kilin, sönmüş kireç ile stabilize edilmesi sonucunda esneklik modülü değerlerinde önemli artışlar meydana gelmiştir. Esneklik modülü bakımından, ufalama seviyesinin kireç yüzdesi kadar önemli olduğu gösterilmiştir. İnce ufalama, iri ufalamaya göre daha yüksek modül

değerleri vermektedir. Kireç stabilizasyonundan elde edilen verimin kireç yüzdesi kadar, ufalama seviyesi ve gerilme durumuna son derece bağlı olduğu görülmektedir. Bu durum özellikle CBR değerine bağlı olarak yapılan değerlendirmelerin gerçek yükler altında doğru olmayabileceğini göstermektedir.

TEŞEKKÜR

İlk yazar bu proje kapsamında Karayolları Genel Müdürlüğü Araştırma ve Geliştirme Laboratuvarında gerçekleştirilen deneyler için laboratuvar teknisyenlerine teşekkür eder.

KAYNAKLAR

- AASHTO T 294-94 (1994). Resilient modulus of unbound granular base/subbase materials and subgrade soils.
- AASHTO 199 (1993), AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, American Association of State Highway and Transportation Officials, - 640 p.
- Beetham, P., Dijkstra, T., Dixon, N., Fleming, P., Hutchison, R., & Bateman, J., (2014). Lime stabilisation for earthworks: A UK perspective. ICE Proceedings, Ground Improvement. DOI: 10.1680/grim.13.00030.
- Bozbey, İ., Garaisayev, S. (2010). "Effect of soil pulverization quality on lime stabilization of an expansive clay. Environmental Earth Sciences, 60-6, s. 1137-1151
- Bozbey, İ., Keleşoğlu, M. K. (2016), "Kireç ile stabilize edilen zeminlerin karayolu üst yapısında kullanımlarında zeminin arazideki ufalama seviyesinin etkisinin araştırılması ve kireç stabilizasyonu için esneklik modülüne dayanan bir tasarım prosedürü hazırlanması" projesi sonuç raporu, Karayolları Genel Müdürlüğü, Araştırma – Geliştirme Projeleri, KGM-ARGE/2012-25., teslim edildi.
- Bozbey, İ., Muhammed, M. A., (2013), "Kireç ile Stabilize Edilmiş Killi Bir Zeminin Esneklik Modülü Değerleri-Zemin Ufalama Seviyesi ve Kür Süresi Etkisi", 5. Geoteknik Sempozyumu Bildiri Kitabı
- Di Sante, M., Fratalocchi, E., Mazziere, F., Brianzoni, V. (2015). Influence of delayed compaction on the compressibility and hydraulic conductivity of soil–lime mixtures, Engineering Geology 185 (2015) 131–138.
- Garaisayev, S., 2008, "Şişen Zeminlerin Kimyasal Yöntemlerle Stabilizasyonu", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
- Kireç Stabilizasyonu Teknik Şartnamesi, (2008), Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Şartnamesi
- Muhammed, Muhammed Ali (2012). Kireç ile stabilize edilmiş zeminlerin esneklik modülü değerleri, İstanbul Üniversitesi, FBE, Yüksek Lisans Tezi.
- Nashat Ali (2012). Kireç ve uçucu kül ile stabilize edilen zeminlerin yol üst yapısında kullanılabilirliğinin araştırılması, İstanbul Üniversitesi, FBE, Yüksek Lisans Tezi
- Özey, O., Güngör, A. G., (2008). "Esneklik modülü deneyi" T.C Ulaştırma Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü, Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Üstyapı Şubesi Müdürlüğü, Ankara.
- Sağlık, A., Güngör, A. G. (2008). Karayolu Esnek Projelendirme Rehberi, Karayolları Genel Müdürlüğü, Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı.
- Tang, A. M., Vu, M. N., Cui, Y. J., (2011). Effects of maximum soil aggregates size and cyclic wetting-drying on the stiffness of a lime treated clay. Geotechnique. 61, 5: 421-429. DOI: 10.1680/Geot.SIP11.005.
- Titi, H. N., Elias, M. B., Helwany, (2006). Determination of typical resilient modulus values for selected soils in Wisconsin SPR# 0092-03-11 SPR# 0092-03-11, Department of Civil Engineering and Mechanics, May 2006.
- Thooney, N. M., Mooney, M. A., (2011). Seismic modulus growth of lime stabilized soil during curing, Geotechnique. 62:2, 161-170. DOI: 10.1680/geot.9.P.122
- www.lime.org'da bulunan çeşitli dökümanlar (2012-2016 yılı içerisinde)