

KİREÇ İLE STABİLİZE EDİLEN ZEMİNLERİN KARAYOLU ÜSTYAPISINDA KULLANIMLARINDA ZEMİNİN ARAZİDEKİ UFALAMA SEVİYESİNİN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

İlknur BOZBEY¹ M. Kubilay KELEŞOĞLU¹ Şenol ÇÖMEZ² Aykan MERT³
Tuğba ÖZTÜRK⁴ Kıvılcım ÖCAL⁵

ÖZET

Kireç ile stabilize edilmiş ince daneli zeminlerin arazideki ufalama seviyesinin, esneklik modülü, mukavemeti nasıl etkilediği konusunda geniş kapsamlı bir araştırma çalışması yürütülmüştür. Bu amaçla yüksek plastiseli bir kil zemin şartnamelere uygun olacak şekilde iki farklı ufalama seviyesinde ufalanmıştır. Saf ve sönmüş kireç ile stabilize edilen zeminler üzerinde CBR, esneklik modülü, serbest basınç mukavemet deneyleri yapılmıştır. Kür süreleri 7 gün, 28 gün ve 56 gün olarak seçilmiştir. Kireç ilavesi ile CBR, mukavemet ve modül değerlerinde önemli artışlar olmuştur. Deneyler, zemin ufalama seviyesinin kireç yüzdesi kadar önemli olduğu göstermiştir. Kalite kontrol deneylerinin arazideki zeminin en iyi şekilde ufalanmasını sağlayacak şekilde oluşturulması gerektiği sonucuna varılmıştır.

GİRİŞ

Kirecin zemin iyileştirme ve stabilizasyon işlerinde en çok kullanıldığı yerler karayolu ve havaalanlarıdır. ABD’de çok sayıda eyaletin karayolu ve havaalanlarındaki üstyapı işlerinde kireç kullandığı belirtilmektedir. Bu ülkede 2003 yılında 1,6 milyon tondan daha fazla kireç zemin stabilizasyonu işlerinde kullanıldığı belirtilmektedir. Yine ABD’deki yapılmış olan bir proje kapsamında AASHTO tasarım prensiplerine göre tasarlanmış olan kireçli karayolu üstyapısı işlerinde %25 gibi bir tasarruf yapılabildiği belirtilmektedir. Uzun vadeli performans bakımından da, kireç stabilizasyonunun bakım maliyetlerini azalttığı bilinmektedir (www.lime.gov, Little 1995, Little, 1999). Kireç, ülkemizde karayolu uygulamalarında henüz yoğun bir kullanım alanı bulamamıştır.

Temel, alttemel ve üstyapı taban malzemelerinin davranışları karayolu üstyapılarının performansını etkiler. Yol üstyapısı tasarımı günümüzde mekanistik-ampirik yöntemlerle yapılmaktadır ve malzemenin rijitliğini tanımlamak için Esneklik Modülü kullanılmaktadır.

- 1.Doç. Dr., İstanbul Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul
- 2.Jeoloji Yüksek Mühendisi, KGM, ARGE Dairesi Başkanlığı, Ankara
- 3.Doktor, Jeoloji Yüksek Mühendisi, KGM, ARGE Dairesi Başkanlığı, Ankara
- 4.İnşaat Mühendisi, KGM, ARGE Dairesi Başkanlığı, Ankara
- 5.Çevre Mühendisi, KGM, ARGE Dairesi Başkanlığı, Ankara

Esneklik modülü farklı deviatör gerilmeler altındaki gerçek davranışı temsil etme yeteneğine sahiptir ve bu davranış şekli kireç ile stabilize edilmiş zeminlerde de çok önemlidir. Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürlüğü, dünyadaki gelişmeleri ülkemizde de hayata geçirmek amacıyla TÜBİTAK tarafından desteklenen “Mekanistik ampirik yol üstyapı tasarımında esneklik modülünün şartnamelere uyarlanması” konulu bir projeyi yürütmüş ve Karayolu Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi esneklik modülünün esas alındığı AASHTO 1993’e göre düzenlenerek 2008 yılında uygulamaya konmuştur (Sağlık ve Güngör, 2008). Esneklik modülüne dayanan rehberle beraber üstyapı tabaka kalınlıkları yenilenerek, tüm karayolu uygulamalarında kullanımı sağlanmış, üstyapıların daha gerçekçi modellenmesi ile büyük bir ekonomi de sağlanmıştır. KGM tarafından hazırlanmış olan kireç şartnamesinde, kireç stabilizasyonunun etki seviyesi CBR ve serbest basınç mukavemeti kriterleri bakımından değerlendirmektedir. Bu nedenle kireç şartnamesine de esneklik modülüne ilişkin ilaveler yapılması ve bu konuda bir tasarım prosedürü geliştirilmesi önem kazanmıştır.

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 topraklarından arındırılmış ve iyi ufalanmış zemin kullanılır, ancak arazi uygulamalarında zemin ufalama kalitesi bu seviyede olmayabilir. Arazide kireç ve diğer stabilizatörlerle yapılan iyileştirmelerde kullanılan ekipmanlar çeşitlik göstermekte ve bu da hem homojen dağılmayı, hem de ufalanma derecesini etkilemektedir. KGM’nin arazide imal edeceği 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. **Christopher ve diğ. (2010)** tarafından yapılmış olan bir çalışmaya göre üstyapı tabanına ait esneklik modülü değerlerinde oluşan farklılıklar doğrudan servis ömrünü etkilemektedir. Bu etki seviyesi %75’lere kadar çıkmaktadır. Bu nedenle bu değerlerin doğru olarak belirlenmesi büyük önem taşır.

Bu kapsamda, İstanbul Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Anabilim Dalı Öğretim Üyeleri Doç. Dr. İlknur Bozbey ve Doç. Dr. Kubilay Keleşoğlu tarafından yürütülen bir proje Karayolları Genel Müdürlüğü Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı tarafından Ar-Ge projesi olarak desteklenmiştir. Proje başlığı “Kireç ile stabilize edilen zeminlerin karayolu üstyapısında kullanımlarında zeminin arazideki ufalama seviyesinin etkisinin araştırılması ve kireç stabilizasyonu için esneklik modülüne dayanan bir tasarım prosedürü hazırlanması”dır. Proje 2013-2016 yılları arasında yürütülmüştür. Kireç stabilizasyonuna yönelik kapsamlı deneyler içeren bu proje ile ülkemizde karayolu üstyapısında kireç kullanımının gündeme getirilmesi amaçlanmıştır. Projede sönmüş kireç ile stabilize edilmiş killi bir zeminin esneklik modülü, mukavemet değerlerinin ve durabilitesinin kireç yüzdesi, zemin ufalama seviyesi ve kür süresinden ne seviyede etkilendiği incelenmiştir (**Bozbey ve Keleşoğlu, 2016**). Bu amaçla yüksek plastiseli bir kil zemin, ilgili şartnamelere uygun olacak şekilde iki farklı ufalama seviyesinde ufalanmıştır. Saf ve %4, %6 ve %9 sönmüş kireç

ile stabilize edilen zeminler üzerinde esneklik modülü ve serbest basınç mukavemet deneyleri yapılmıştır. Kür süreleri 7 gün, 28 gün ve 56 gün olarak seçilmiştir. Ayrıca donma çözülme ve kapiler ıslanmanın mekanik özelliklere olan etkisi incelenmiştir. Küçük çaplı (5 cm) numuneler üzerinde serbest basınç mukavemeti deneyleri yapılmıştır. Durabiliteye yönelik olarak yapılan donma çözülme ve kapiler ıslanma deneyleri ile kireç stabilizasyonun ve ince ve iri ufalama seviyelerinin etkileri incelenmiştir. Esneklik modülü, serbest basınç mukavemet değeri, başlangıç modülü arasında korelasyonlar elde edilmiş ve mikro yapıya yönelik cıvalı porozimetre analizleri yaptırılmıştır. Mekanistik analize yönelik olarak KENLAYER programı ile yapılmış örnekler üzerinden ince ve iri ufalamanın tasarıma olan etkileri incelenmiştir. İlave olarak “*Kireç ile stabilize edilmiş tabaka kullanılan yol üstyapılarında mekanistik-ampirik yaklaşım*” başlıklı ve bu konuda bir yol haritası olması hedeflenen bir döküman hazırlanmıştır. Son olarak mevcut kireç şartnamesine eklenmesi önerilen konular sunulmuştur. Bu bildiride yer kısıtı sebebiyle proje ana hatlarıyla tanıtılacak ve CBR, esneklik modülü ve mukavemet deney sonuçlarından bazı örnekler sunulacaktır.

LİTERATÜR ÖZETİ

Kireç stabilizasyonu zeminler için en çok kullanılan iyileştirme yöntemlerinden birisidir ve kireç ile iyileştirilmiş zeminlerin dünyada sık olarak kullanıldıkları yerlerden birisi de karayolu üstyapısıdır. Kireç insanoğlunun kullandığı ilk kimyasallardan biridir ve çok farklı zeminlerde stabilizasyon amacıyla kullanılabilir (Garaisayev, 2008). Sönmemiş kireç (kalsiyum oksit, CaO) kireçtaşını yüksek sıcaklıkta işleyerek elde edilir. Sönmüş kireç ise (kalsiyum hidroksit, Ca(OH)₂) sönmemiş kirecin suyla reaksiyona girmesiyle oluşur. Kirecin killi zeminlere etkisinde dört ana başlık vardır. Bunlar; kation değişimi ve flokülasyon, puzolanik reaksiyon ve kabronatlaşmadır. Kireç, su ve zemin bir araya geldiğinde farklı çimentolaşma kristalleri oluşur. Zemin içerisindeki potansiyel puzolan maddeler, kil minerallerini içerir. Ca(OH)₂ nin suya eklenmesiyle suyun pH değeri hemen yükselir. Bu değer yeterli kirecin eklenmesiyle 25°C ‘de zirveye ulaşarak 12,4 olur. Bu karışımın pH değeri çok önemlidir, çünkü ancak yüksek pH değerlerine ulaşıldığında kireç ile reaksiyona giren ve puzolan maddeyi oluşturan silika ve alümina mineralleri çözeltiye geçer. Silika ve alümina, kireç içerisindeki kalsiyum ile birleşerek çimentolaşma etkisini yaratır. Bu süreç doğal olarak yavaştır, çünkü kirecin kilin yapısına nüfuz etmesi zaman almaktadır.

Stabilize edilmiş zeminlerin mukavemet, deformasyon ve modül özelliklerinin doğru olarak tanımlanmış olması üstyapı elemanlarının kalınlıklarının ve kaplamanın performansının doğru tanımlanması açısından büyük önem taşır. Esneklik Modülü mekanistik-ampirik karayolu üstyapı tasarımlarında kullanılan en önemli parametrelerden birisidir ve laboratuvarla ölçülebilir. Laboratuvarla ölçülen esneklik modülü değerlerinin araziye temsil edebilmesi için arazideki imalat şartlarının (zemin gradasyonu, sıkıştırma tekniklerinin farklılığı, kür şartları, ıslanma kuruma, donma çözülme döngüleri, vb.) mümkün olduğunca temsil edilebilmesi gerekir, aksi taktirde laboratuvarla elde edilen sonuçlara arazide ulaşılamaz.

Zemin ufalama seviyesinin mekanik özelliklere etkisi çeşitli araştırmacılar tarafından incelenmiştir (Petry ve Little, 2002, Felt, 1964, Grimer ve Ross, 1957, Petry ve Wohlegemuth, 1988, Garaisayev, 2008, Bozbey ve Garaisayev, 2010).

Sonuçlar, arazide çok ince ufalama elde edilemeyeceği durumlarda, laboratuvar deneylerinin arazi gradasyonu ile yapılması gerektiğini göstermektedir. Bozbey ve diğ. (2016) kapsamında yapılan çalışmalar sadece kireç değil, uçucu kül stabilizasyonu bakımından da zemin ufalama seviyesinin çok önemli olduğu gösterilmiştir. Aksi taktirde laboratuvarda ölçülmüş olan iyileştirme seviyelerine ulaşamayacaktır. Beetham ve diğ. (2014), arazide zemin ufalaması sonucunda 50 mm çapında topraklar kalabildiğini ve bunun da stabilizasyonunun etkisini azaltacağını belirtmektedir.

MATERYAL VE YÖNTEM

Bu proje kapsamında kullanılmış olan malzeme ve izlenilen yöntem aşağıda sunulmaktadır. Uygun zemin malzemesi KGM tarafından temin edilmiştir. Ufalama işlemi İstanbul Üniversitesi'nde yapılmıştır. Zeminin indeks özelliklerinin, sülfat içeriğinin ve Standart Proktor Enerjisi ile kompaksiyon özelliklerinin tayinine ilişkin deneyler yapılmıştır. Uygun kireç yüzdesini bulmaya yönelik olarak kireç şartnamesinde yer alan deneyler yapılmıştır. Bu aşamalar sonucunda proje kapsamındaki deneylere başlanmıştır. Deneyler üç farklı kireç yüzdesi için yapılmıştır. Bunlar %4, %6 ve %9 olarak seçilmiştir. Deneylerde her ikisi de şartname sınırları içerisinde kalan iki farklı zemin ufalama seviyesi kullanılmıştır. Deneyler 7, 28 ve 56 gün kür süresi sonunda yapılmıştır. İstanbul Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Geoteknik Laboratuvarında 5 cm çaplı numuneler üzerinde serbest basınç mukavemeti deneyleri ve ayrıca yaş CBR deneyleri yapılmıştır. Tüm bu deneyler sonucunda elastisite modülü değerleri (başlangıç ve sekant) ve serbest basınç mukavemet değerleri elde edilmiştir.

KGM laboratuvarında ise esneklik modülü deneyi için numuneler hazırlanmıştır. Numuneler kür sonunda esneklik modülü deneylerine tabi tutulmuştur. Esneklik modülü deneyinden hemen sonra aynı numuneler üzerinde gerilme-şekil değiştirme değerleri okunarak serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Bu çalışmalara paralel olarak, yine KGM laboratuvarında donma çözülme uygulanmış numuneler üzerinde esneklik modülü deneyleri yapılmıştır. Donma çözülme için ASTM D560-03'de tarif edilen yöntem izlenmiştir. Uzun dönem kapiler ıslanmanın etkilerinin bulunması amacıyla İstanbul Üniversitesi'nde hazırlanan numuneler üzerinde 10 günlük kapiler ıslanma deneyleri yapılmış ve bu süre sonunda mukavemet değerleri ölçülmüştür. Numunelerin fotoğrafları çekilerek gözlemler yapılmıştır.

Elde edilen tüm bu sonuçlar bir arada değerlendirilmiştir. Farklı ufalama seviyeleri için esneklik modülü, elastisite modülleri ve serbest basınç mukavemet değerleri arasında korelasyonlar kurulmuştur. Bunların ihtiyatlı bir şekilde kullanılması gerektiği ve kilin özellikleri ile birlikte değişebileceği vurgulanmıştır. Ufalama seviyesi bu korelasyonlar içerisinde ilk kez yer alarak literatüre özgün bir katkı getirilmiştir. Dokuz adet numuneden örselenmemiş parçalar alınarak cıvalı porozimetre analizi yaptırılmış ve boşluk çapı dağılımı incelenmiştir. Ayrıca numuneler üzerinde P dalgası ölçümü de yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar (serbest basınç mukavemeti, elastisite modülü, esneklik modülü) değerlendirilerek KENPAVE programı ile mekanistik analiz yapılmıştır. Programdaki hasar modelleri baz alınarak, üst yapının servis ömrü belirlenmiştir. Kireç stabilizasyonun etkisi hem kireç yüzdesi, hem de ufalama seviyesi bakımından değerlendirilmiştir. Bu veriler ışığında karayolunun uzun dönem performansına yönelik değerlendirmeler yapılmıştır. Elde edilen bilgiler ışığında

KGM'nin kireç stabilizasyonu kullandığı işler için esneklik modülünü baz alan bir tasarım prosedürü önerilmiştir. Kireç şartnamesine ek yapılabilecek konular listelenmiştir. Bu bildiride yer kısıtı sebebiyle projede elde edilen sonuçların küçük bir bölümü sunulmaktadır. Tüm bilgiler ilgili proje sonuç raporunda detaylı olarak yer almaktadır (Bozbey ve Keleşoğlu, 2016).

Malzeme

Deneyler sırasında kullanılan numune Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından temin edilmiştir. Yaklaşık 700-800 kg malzeme laboratuvarımıza çuvallar içerisinde getirilmiştir. Zemin öncelikle laboratuvar ortamında yere serilerek kurutulmuştur ve ufalama işlemleri yapılmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Ufalamaya yönelik çalışmalar

Laboratuvara geldiği hali ile zeminde bulunan topraklar özel olarak yaptırılmış olan bir tokmak yardımı ile ufalanmıştır. Daha sonra zeminin tümü 20 mm'den geçecek şekilde elenmiştir. İnce ufalama olarak tanımlanan grup için tüm numunenin yarısı (yaklaşık 400 kg) 4 nolu elekten geçecek şekilde elenmiştir. Böylelikle ince ufalama grubu için tümü 4,75 mm'den daha ince olan zemin elde edilmiştir. İri ufalama için şartname gereklilikleri göz önüne alınmıştır. Kireç şartnamesinde zeminin en az %60'ının 4 nolu elekten geçmesi gerektiği yer almaktadır. Bu amaçla iri olarak ufalama yapılan numune bu şartı sağlayacak şekilde elenmiştir. 4 nolu eleğin üstünde kalan %40'lık zeminin ise 20 mm'den daha küçük olması sağlanmıştır. Böylelikle %60'ı 4,75 mm'den daha küçük, %40'ı ise 4,75 mm-20 mm arasında kalan numune tipi elde edilmiştir. Aşağıda Tablo 1'de zemin özellikleri verilmektedir. Temin edilen numunenin zemin sınıfı kireç stabilizasyonu için uygun olarak bulunmuştur. Organik madde miktarının %0,14'den daha az olduğu belirlenmiştir. İstanbul Üniversitesi İleri Analizler Laboratuvarında yaptırılan analizler neticesinde sülfat miktarı (SO_4) %0.01 civarında olup, kritik değer olan %3'ten küçüktür. Temin edilen numune, zemin sınıfı bakımından KGM'nin Kireç Şartnamesi (2013)'ne uygundur. Sönmüş kireç torbalar halinde satın alınmıştır. Kullanılan kireç CL 80-S tipi olup şartnamedeki kimyasal değerleri sağlamaktadır.

Tablo 1. Zeminin özellikleri

Ölçülen özellik	Değer	Ölçülen özellik	Değer
Çakıl boyutu, ASTM göre, %	9	Plastisite İndisi	41
Kum boyutu, ASTM göre %	20	Zemin Sınıflandırması, USCS	CH
Silt ve kil boyutu, ASTM göre %	71	Yaş CBR, %	3
Likit Limit, %	69	CBR, şişme, %	6,6
Plastik Limit, %	28		

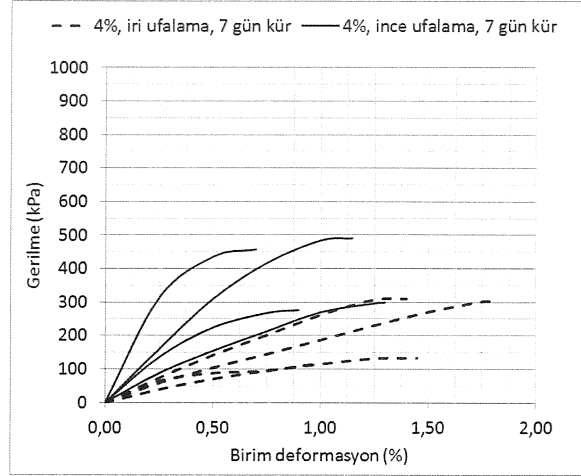
Zeminin kireç stabilizasyonu için uygunluğunun belirlenmesine yönelik olarak pH ve kıvam limitleri deneyleri yapılmıştır. Zemin kurutulmuş ve ağırlıkça %4, %6 ve %9 kireç ile karıştırılmıştır. Her bir karışım için Standart Proktor enerjisi ile kompaksiyon deneyi yapılmış ve optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri bulunmuştur. Daha sonra her karışımı optimum su muhtevasına getirecek şekilde su ilave edilmiş ve karışım bir saat süre ile bekletilmiştir. Bu süre sonunda numuneler sıkıştırılmıştır. Serbest basınç mukavemeti için hazırlanan numuneler 5 cm çapında ve 10 cm yüksekliğindedir. Her karışımdan dört adet numune üretilmiştir. Böylelikle deney sonuçlarının daha güvenilir olması sağlanmıştır. Numuneler kür ortamında 7 gün, 28 gün ve 56 gün süre ile bekletilmiştir. Bu süre sonucunda serbest basınç mukavemet deneyleri yapılmıştır. İstanbul Üniversitesi'nde test edilen CBR numuneleri de optimum su muhtevasında ve Standart Proktor sıkıştırma enerjisi kullanılarak hazırlanmıştır. Deneyler 7 gün ve 28 gün için ve ayrıca kuru ve yaş CBR olarak yapılmıştır. Yaş CBR sırasında şişme ölçülmüştür. Esneklik modülü deneyleri Karayolları Genel Müdürlüğü Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı Toprak ve Stabilizasyon Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Esneklik modülü deneyleri sırasında Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Üstyapı Şubesi Müdürlüğü tarafından hazırlanan "Esneklik Modülü Deneyi" kitabındaki (Özay ve Güngör, 2008) prosedürler uygulanmıştır. Laboratuvarında her karışım için iki adet numune hazırlanmıştır. Numuneler 7, 28 ve 56 gün sonunda esneklik modülü deneylerine tabi tutulmuştur. Yapılan tüm deneylere ait detaylar Bozbey ve Keleşoğlu (2016)'da sunulmaktadır.

BULGULAR VE TARTIŞMA

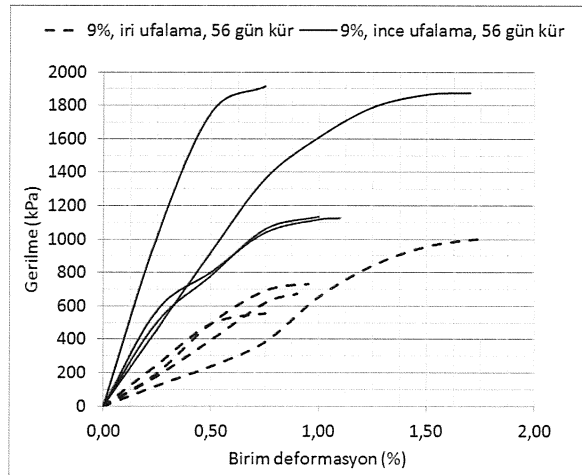
Serbest basınç mukavemeti deney sonuçları

Şekil 2.a ve Şekil 2.b'de farklı kompozisyonlar ve kür süreleri sonunda ölçülen serbest basınç mukavemet sonuçlarından örnek grafikler gösterilmektedir. Görüldüğü gibi kireç mukavemeti önemli miktarda artırmıştır. Little (1995)'e göre bir zeminin reaktif kabul edilebilmesi için serbest basınç mukavemeti değerinin 700 kPa'dan daha büyük olması, ya da stabilize edilmemiş durumuna göre bu değerde 350 kPa'lık artış olması gerekmektedir. Yer kısıtı sebebiyle burada sunulamamış olmakla birlikte, bu kriter %6 ve %9 kireç için sağlanmaktadır. %4 kireçte de kısmen sağlanmaktadır. Kireç ile stabilize edilmiş zeminlerde, her ikisi de şartname sınırları içinde kalan ufalama seviyelerinde çok farklı mukavemet değerlerine ulaşıldığını göstermektedir. Tüm kür

günleri sonunda iri ve ince ufalama ile hazırlanan numuneler arasında arasında çok önemli farklılıklar ölçülmüştür. 56 gün sonunda bile serbest basınç mukavemet değerlerinde farklılıklar devam etmektedir. İri ufalamadan elde edilen mukavemet değerleri ince ufalamaya göre çok daha düşüktür. Görüldüğü gibi kireç yüzdesi, kür süresi ve ufalama seviyesi kireç stabilizasyonunda çok önemli etkenlerdir. Kireç yüzdesi ve kür süresi aynı olsa bile, ufalama seviyesi mukavemet değerlerini büyük ölçüde etkilemektedir. Bu sonuçlar arazide ince ufalama yerine daha iri ufalama elde edilmesi durumunda mukavemet bakımından laboratuvar şartlarında yapılan deneylere kıyasla daha düşük performans elde edileceğini göstermektedir.



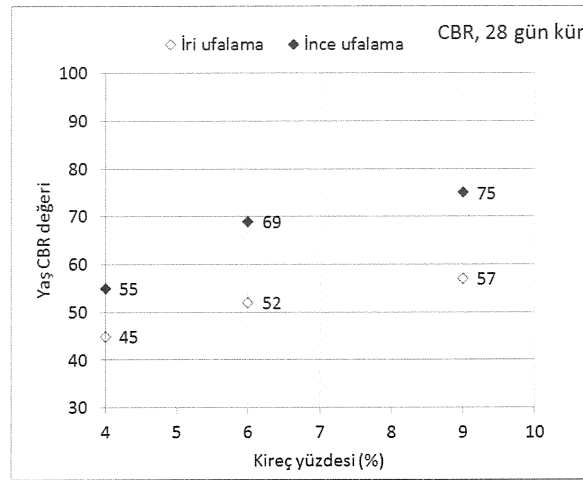
Şekil 2.a. Serbest basınç mukavemet deney sonuçları



Şekil 2.b. Serbest basınç mukavemet deney sonuçları

CBR deney sonuçları

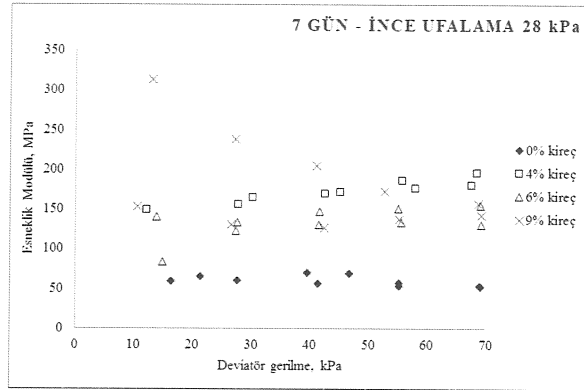
28 gün sonunda kireç ilavesi ile yaş CBR değerlerinde büyük artışlar olmuştur. Ancak ince ufalama durumunda iri ufalamaya göre daha büyük CBR değerleri elde edilmiştir.



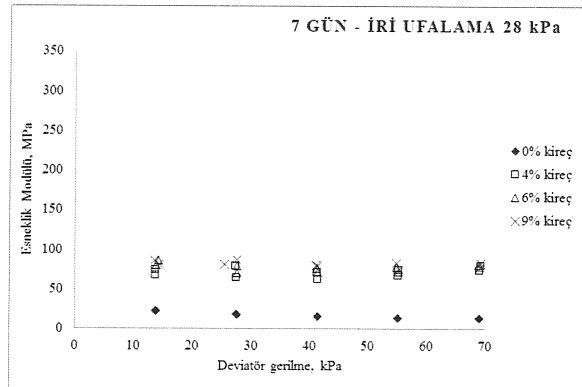
Şekil 3. 28 gün sonunda ölçülen yaş CBR deneyleri

Esneklik modülü deney sonuçları

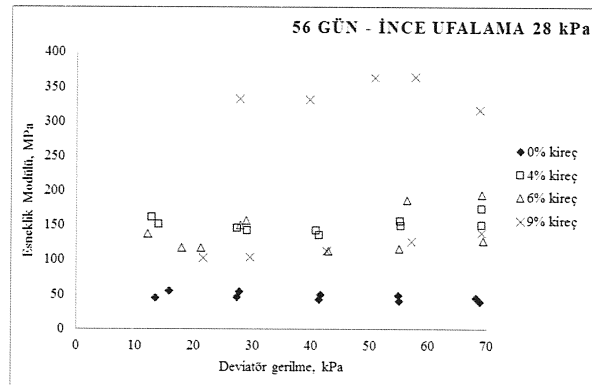
Esneklik deneyi sonuçlarına göre tüm kür süreleri sonunda ince ve iri ufalama arasında önemli farklar ölçülmüştür. Bu bildiride 7 gün kür süresi ve 28 kPa çevre gerilmesi için elde edilen değerler örnek olarak Şekil 4'te verilmektedir. Görüldüğü gibi 7 gün sonunda 28 kPa'da ince ufalama için değerlerin 120-350 MPa bandında değiştiği söylenebilir. İri ufalama için ise tüm kireç yüzdeleri benzer değerler vermekte ve değerler 80-100 MPa arasında değişmektedir. Stabilize edilmemiş numunelerde ince ufalama için elde edilen modül değerleri 50-60 MPa seviyesinde, iri ufalama için ise 10-30 MPa seviyesindedir.



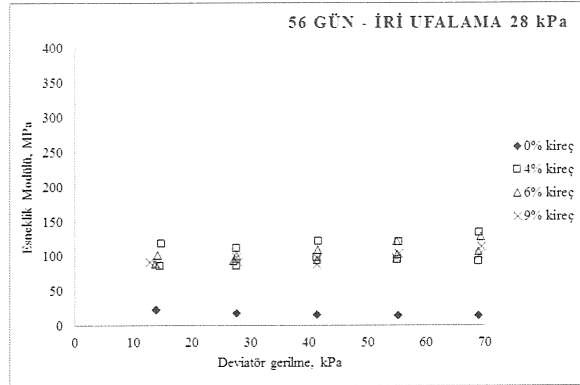
Şekil 4.a. 7 gün kür ve 28 kPa çevre gerilmesi altında ölçülen esneklik modül değerleri (ince ufalama)



Şekil 4.b. 7 gün kür ve 28 kPa çevre gerilmesi altında ölçülen esneklik modül değerleri (iri ufalama)



Şekil 5.a. 56 gün kür ve 28 kPa çevre gerilmesi altında ölçülen esneklik modül değerleri (ince ufalama)



Şekil 5.b. 56 gün kür ve 28 kPa çevre gerilmesi altında ölçülen esneklik modül değerleri (iri ufalama)

56 gün sonunda ve 28 kPa çevre gerilmesi için ince ufalamada değerlerin 100-370 MPa bandında değiştiği söylenebilir. %9 kireçli numunelerden bir tanesinde daha yüksek değerler ölçülmüştür. İki numune arasında farklılık ölçülebildiği görüldüğünden, üç numune ile çalışılması tavsiye edilmektedir. İri ufalama için değerler 80-140 MPa arasında değişmektedir. Stabilize edilmemiş zeminlerde modül değerleri ince ufalama için 50 MPa civarındadır. İri ufalama için ise daha düşük olup 25MPa civarındadır.

Sonuç olarak; kireç ilavesi ile esneklik modülü değerlerinde önemli artışlar olmaktadır. İnce ufalama, iri ufalamaya göre daha yüksek modül değerleri vermektedir. Kür süresinin artması ile birlikte modül değerleri artmaktadır.

SONUÇLAR

Bu çalışmada tanıtılan ve bazı örnekler verilen projede kireç ile stabilize edilmiş zeminlerdeki iyileşme seviyesi zemin ufalama seviyesi, kireç yüzdesi ve kür günlerine bağlı olarak esneklik modülü, mukavemet, ıslanma dayanımı, donma çözülme dayanımı üzerinden detaylı olarak incelenmiştir. Tüm bu bulgular ışığında aşağıda kireç ile stabilize edilen tabakaların yol üstü yapısında kullanılması için bir yol haritası oluşturulmuş ve kireç şartnamesi için çeşitli önerilerde bulunulmuştur.

Kireç ile stabilize edilmiş zeminlerde, her ikisi de şartnamede tanımlanan zemin ufalama seviyelerinde çok farklı CBR ve mukavemet değerlerine ulaşıldığını göstermektedir. Tüm kür günleri için iri ve ince ufalama arasında çok önemli farklılıklar ölçülmüştür. İri ufalamadan elde edilen mukavemet ve modül değerleri ince ufalamaya göre çok daha küçüktür. Kireç yüzdesi, kür süresi ve ufalama seviyesinin kireç stabilizasyonunun etkinliğinde çok önemli olduğu görülmektedir.

Kireç ilavesi ile esneklik modülü değerlerinde önemli artışlar olmaktadır. Esneklik modülü bakımından ufalama seviyesinin kireç yüzdesi kadar önemli olduğu görülmüştür. İnce ufalama, iri ufalamaya göre daha yüksek modül değerleri vermektedir. İri ve ince ufalamalar arasında 56 günlük kür sonunda da farklar

oluşmaktadır. Bu fark daha küçük kür sürelerinde daha da büyüktür. Esneklik modülü deneylerinde test edilen iki numune arasında farklılık ölçülebilmektedir. Bu bakımdan üç numune ile çalışılması tavsiye edilir.

Projede ayrıca donma çözülme ve uzun dönem kapiler ıslanmanın etkisi detaylı olarak incelenmiştir. Esneklik modülü değerleri ile birlikte önerilen bünye modelleri incelenmiştir. Civalı porozimetre analizleri ile boşluk çapı dağılımlarının değişimi incelenmiştir. Serbest basınç mukavemeti, modül değerleri ve esneklik modülü arasında çeşitli korelasyonlar kurulmuş, dünya literatürüne katkı sağlanmıştır. Proje kapsamında KENLAYER analizleri yapılmıştır. Zemin ufalama seviyesinin ve kireç yüzdesinin yol üstyapısının servis ömrünü etkilediği gösterilmiştir.

Proje sonuçlarına göre uygun kireç yüzdesi ancak serbest basınç mukavemeti ve esneklik modülü davranışının bir arada değerlendirilmesi ile tespit edilmelidir. Bu konuda bütüncül bir bakış açısı kullanılmalıdır. Ne sadece serbest basınç mukavemeti değerleri, ne de esneklik modülü değerleri tek başına gerçek performansı belirleyemez. CBR değeri yol üstyapılarında oluşan farklı gerilme durumlarını deneysel olarak temsil edememesi bakımından dikkatle kullanılmalıdır.

Genel kireç uygulamalarında, arazideki zemin ufalama seviyesinin hangi mertebede olduğuna dair veriye ihtiyaç bulunmaktadır. Bunun ekipman geçiş sayısı, ekipman bilgileri, zemin özellikleri ile birlikte oluşturulması kireç stabilizasyon konularında önemli bir adım olacaktır. Bu konuda ilave çalışmalar yapılması faydalı olacaktır. Arazi ve laboratuvar imalat şartları birbirinden farklıdır. Kalite kontrol deneyleri bunları kapsayacak, gözden kaçırmayacak şekilde oluşturulmalıdır. Laboratuvar deneyleri araziye temsil etmelidir. Laboratuvarda arazide oluşması beklenen ufalama seviyesi ile deneyler yapılmalıdır.

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.

TEŞEKKÜR

Proje yürütücüsü bu proje kapsamında Karayolları Genel Müdürlüğü Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürlüğü Toprak ve Stabilizasyon Laboratuvarında görevli değerli laboratuvar teknisyenlerine ve İstanbul Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Zemin Mekaniği Laboratuvarı teknisyeni Sayın Oğuz Firidin'e teşekkür eder. Bu bildiride yer alan görüşler Karayolları Genel Müdürlüğü'nin resmi görüşü olmayıp, araştırma projesinin sonuçlarıdır.

KAYNAKLAR

1. AASHTO 1993 (1993) AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, American Association of State Highway and Transportation Officials, - 640 sayfa.
2. 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.

3. BOZBEY, İ.- GARASAYEV, S. (2010) Effect of soil pulverization quality on lime stabilization of an expansive clay. *Environmental Earth Sciences*, 60-66, s. 1137-1151
4. BOZBEY, İ.- KELEŞOĞLU, M. Kubilay. (2016), "Kireç ile stabilize edilen zeminlerin karayolu üstyapısında 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.
5. BOZBEY, İ.-KAMAL N.-ABUT Y. (2016), "Effects of soil pulverisation level and freeze and thaw cycles on fly-ash- and lime-stabilised high plasticity clay: implications on pavement design and performance", *Road Materials And Pavement Design*, vol.1, s1-19.
6. CHRISTOPHER ve diğ., (2010). MEPDG Software Version 0.9-Technical Assistance to NCHRP and the NCHRP 1-40D(01)
7. FELT, E. J. (1964) "Factors influencing physical properties of soil cement mixtures", *Bulletin 108*, National Research Council, Washington.
8. GARASAYEV, S. (2008) Şişen Zeminlerin Kimyasal Yöntemlerle Stabilizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
9. GRIMER, F. J.- ROSS, N. F. (1957) The effects of pulverization on the quality of clay cement, *Proc. 4th Int. Conf. SMFE*, Cilt 2, s 109-113.
10. KİREÇ STABİLİZASYONU TEKNİK ŞARTNAMESİ, (2013) Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Şartnamesi.
11. LITTLE, D. N. (1995) Handbook for stabilization of pavement subgrades and base courses with lime: prepared for APG Lime Company. sponsored by the National Lime Association, 0840396325.
12. LITTLE, D. N. (1999) Evaluation of structural properties of lime stabilized soils and aggregates. Volume 1: Summary of findings. <http://www.lime.org/soil.pdf>.
13. ÖZAY, O.- GÜNGÖR, A. G. (2008) Esneklik modülü deneyi, T.C Ulaştırma Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü, Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Üstyapı Şubesi Müdürlüğü, Ankara.
14. PETRY, T. M.- LITTLE, D. N., (2002) Review of stabilization of clays and expansive soils in pavements and lightly loaded structures-History, Practice and Future. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 14:6, 447-460. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2002)14:6(447)).
15. PETRY, T. M.- WOHLEGEMUTH, S. K. (1988) Effects of pulverization on the strength and durability of highly reactive clay soil stabilized with lime and portland cement. *Transportation Research Record*; 1190.
16. SAĞLIK, A.- GÜNGÖR, A. G. (2008) Karayolu Esnek Projelendirme Rehberi, Karayolları Genel Müdürlüğü, Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı.
17. www.lime.org'da bulunan çeşitli dokümanlar (2012-2016 yılı içerisinde)