

KİREÇ İLE STABİLİZE EDİLMİŞ BİR ZEMİNİN HİDROLİK GEÇİRGENLİĞİNİN ARAZİ BOYUTLARINDA BELİRLENMESİ

İlknur BOZBEY

ÖZET : Bu çalışma kapsamında, kireç ile stabilize edilmiş zeminlerin deponi sahalarında kaplama imalatında kullanılabilirliğini incelemek üzere, laboratuvar ve arazide hidrolik geçirgenlik deneyleri yapılmıştır. Arazide saf ve kireç ilave edilmiş zemin kullanılarak özel bir kaplama imal edilmiştir. Kireç ilavesi ile artan boşluk oranının azaltılması amacıyla kaplamanın imalatında iki farklı sıkıştırma enerjisi kullanılmıştır. Arazi infiltrasyon deneyleri Kapalı Çift Halkalı İnfiltrometre Aletleri ile yapılmıştır. Deney sonuçları, kireç ilavesinin arazi hidrolik geçirgenlik değerlerini artırdığını ve sıkıştırma enerjisinin hidrolik geçirgenlik değerini etkileyen tek parametre olmadığını göstermiştir. Çalışma kapsamında yapılan deneyler hidrolik geçirgenliğin belirlenmesinde numune boyutunun önemini ortaya koymaktadır.

ANAHTAR KELİMELELER: Kireç Stabilizasyonu, Hidrolik Geçirgenlik, Kapalı Çift Halkalı İnfiltrometre, Kaplama, Kompaksiyon Enerjisi

ASSESSMENT OF HYDRAULIC CONDUCTIVITY OF A LIME STABILIZED SOIL IN FIELD SCALES

ABSTRACT: The context of this study is utilization of lime stabilized materials in liner construction and therefore includes hydraulic conductivity testing in the laboratory and on a liner specially constructed. Three different soil compositions; including pure and lime stabilized soils were compacted with two different compaction energies in order to eliminate the adverse effects of increased void ratios due to flocculation by lime addition. Sealed Double Ring Infiltrometers were used for field hydraulic conductivity testing. Experiments revealed that lime increased hydraulic conductivity values and percent compaction was a poor indicator of hydraulic conductivity. This study revealed the importance of specimen size on hydraulic conductivity assessment.

KEYWORDS: Lime Stabilization, Hydraulic Conductivity, Sealed Double Ring Infiltrometer, Liner, Compaction Energy

I. GİRİŞ

Gelişen teknoloji ve artan nüfus ile birlikte, ülkelerin karşı karşıya kaldığı katı atık problemi giderek artmıştır. Buna paralel olarak çevre kirliliği ortaya çıkmış ve bunun önlenmesi için çeşitli önlemler alınmaya başlanmıştır. Düzenli katı atık sahaları buna örnek teşkil etmektedir. Katı atık depolama sahalarında en önemli yapılardan biri, çöp sızıntı sularının zemine ve yeraltı suyuna sızmasını önlemek amacıyla inşa edilen geçirimsiz kaplamalardır. Bu kaplamaların sahip olması gereken en önemli özellik, düşük hidrolik geçirimsizliktir. Bu kaplamalar aynı zamanda kısa ve uzun dönemde yapısını ve düşük hidrolik geçirgenliğini koruyabilmeli ve imalat safhasında kolay işlenebilirliğine sahip olmalıdır. Bu kaplamaların imalatında karşılaşılan en önemli sorunlardan biri, uygun zeminin teminidir. Başka bölgelerden uygun zeminin temini ekonomik açıdan her zaman uygun olmayabilmekte ve bu durumda yerel olarak temin edilebilen bir zeminin stabilize edilerek kullanılabilmesi gündeme gelmektedir. Zeminin stabilizasyonu, aynı zamanda kısa ve uzun dönemde duraylı bir yapı oluşmasını sağlamaktadır.

Geoteknik mühendisliğinde en çok kullanılan stabilizasyon malzemelerinden birisi kireçtir. Kirecin killerin mukavemet, hacim stabilitesi, durabilite gibi özelliklerini iyileştirdiği bilinmektedir, ancak zeminlerin hidrolik geçirgenliklerine olan etkileri konusunda çeşitli karşıt görüşler mevcuttur. Bu görüşlerden birisi, kireç ilavesi ile oluşan flokülasyon sebebiyle zeminin boşluk oranının ve hidrolik geçirgenlik değerinin artacağıdır. Bir diğer görüş ise, zemine yeteri kadar kireç ilave edilmesi durumunda oluşacak olan pozolanik reaksiyonlar sebebiyle, zemindeki boşlukların tıkanacağı ve bu nedenle hidrolik geçirgenliğin düşeceği yönündedir. Literatürde, kireç ilavesinin hidrolik geçirgenliği nasıl etkilediği konusunda yapılmış kapsamlı çalışmalar çok fazla sayıda değildir ve bu konuda arazide yapılmış çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu makalede, kireç ile stabilize edilmiş ve farklı sıkıştırma enerjileri ile sıkıştırılmış bir siltli zemin üzerinde arazide yapılmış hidrolik geçirgenlik deney sonuçları verilmektedir. Bu çalışma kapsamında ülkemizde ilk kez bir kaplama imal edilerek arazide geçirgenlik deneyleri yapılmıştır.

II. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Literatürde, kirecin zeminlerin mukavemet, işlenebilirlik, vb.. gibi özelliklerine olan etkileri konusunda yapılmış pek çok çalışma olmasına rağmen, hidrolik geçirgenliğine olan etkileri konusunda yapılmış olan çalışmalar sayılıdır.

Kireç stabilizasyonu ile yapılan bazı çalışmalar, kireç ilavesi ile killi ve siltli zeminlerde flokülasyon nedeniyle boşluk hacminin, dolayısıyla da hidrolik geçirgenliği artıracakını göstermektedir [1-2]. Ancak, bazı araştırmacılar, yüksek kireç yüzdeleri kullanılarak yapılan stabilizasyonun hidrolik geçirgenliğini azaltabileceğini göstermiştir [3]. Kireç stabilizasyonunun killi bir zeminin mekanik ve hidrolik geçirgenliğine olan etkilerini incelemek üzere yapılan kapsamlı diğer bir çalışmada [4], zeminin kuru ağırlığının yüzde ikisinden daha fazla kireç kullanılması durumunda, zeminin hidrolik geçirgenliğinde azalma ölçülmüştür. Yazarlar, yerel olarak bulunabilen ancak düşük hidrolik geçirgenlik şartını sağlayamayan zeminlerin, kireç stabilizasyonu ile düşük hidrolik geçirgenliğin gerekli olduğu yerlerde kullanılabileceğini ve böylelikle başka bölgelerden zemin getirilmesine gerek olmayacağını belirtmektedir [4]. Bu konu ile ilgili olarak yapılan diğer bir çalışmada kireç ilavesi ile kohezyonlu zeminlerin hidrolik geçirgenliğinin arttığı gösterilmiş ve bu zeminlerde, maksimum hidrolik geçirgenlik değerlerine optimum su muhtevalarında sıkıştırma neticesinde ulaşıldığı vurgulanmıştır [5]. Bu çalışmada etkisi incelenen diğer bir parametre de kür süresi olmuştur. Artan kür süresi, sıkıştırma su muhtevalarına bağlı olmaksızın hidrolik geçirgenlik değerlerini düşürmüştür [5].

Kireç stabilizasyonun önemli bir getirisi zeminde duraylı bir yapı oluşturmasıdır (uzun dönemde hacim stabilitesinin korunması, kimyasal içerikli sıvılar ile temas durumunda yapının değişmesine engel olması, vb..). Bu konu ile ilgili olarak yapılmış araştırmalar[6-7], kimyasal madde içeren sıvıların, stabilize edilmemiş zeminlerin hidrolik geçirgenlik değerlerinde birkaç mertebe artışa neden olduğunu göstermiştir. Aynı deney şartlarında kireç ile stabilize edilen zeminlerin düşük hidrolik geçirgenlik değerleri ise korunmuştur [6-7].

Hidrolik geçirgenlik değerinin zemine ait değişmez bir özellik olmadığı iyi bilinen bir gerçektir. Bu değer, aynı zemin için deney şartlarına ve ekipmana göre bile değişebilen bir parametredir. Kaplamalar üzerinde yapılmış olan çalışmalar, özellikle hidrolik geçirgenlik bakımından arazide yapılan deneylerin önemini ve gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu konuda literatürde de örnekler mevcuttur. Arazi şartlarında ölçülen hidrolik geçirgenlik değerlerinin, laboratuvarda ölçülenlerden birkaç mertebe daha yüksek olabileceği bazı araştırmacılar tarafından gösterilmiştir [8-9]. Arazide deney yapılamaması durumunda, laboratuvarda teste tabii tutulacak olan numune çapı büyük önem kazanmaktadır. Arazi şartlarını temsil kabiliyetine sahip olan numune çapı [10] nolu çalışmada 20-60 cm, [11-12] nolu çalışmalarda da en az 30 cm olarak bulunmuştur. Başka bir çalışmada ise numune alanının en az 0.1 m² olması gerektiği belirtilmektedir [13]. Bazı araştırmacılar ise, iyi ve kalite kontrol çalışmaları yapılarak imal edilmiş olan kil kaplamalarda arazi hidrolik geçirgenliğinin, laboratuvar değerlerine çok yakın olduğunu göstermişlerdir [14].

Arazi ve laboratuvarda elde edilen hidrolik geçirgenlik değerlerinin farklı olmasının en önemli sebeplerinden biri, laboratuvarda arazi durumunu temsil eden numunelerin alınamamış olmasıdır. Arazide sıkıştırılmış kaplamada bulunan tüm boşluklar, ağaç kökleri, vb. farklı malzemelerin etkisi ancak büyük boyutlu numuneler sayesinde anlaşılabilir. Arazi ve laboratuvarda sıkıştırma enerjilerinin farklılığı, sıkıştırma metodlarının değişik olması yapıyı etkilediği için laboratuvarda ve arazide farklı hidrolik geçirgenlik sonuçları alınabilmektedir. Arazideki gerçek durumu temsil etmeyen sıvılarla deney yapılması da önemli bir farklılık nedenidir. Diğer bir faktör, laboratuvar deneylerinde temsil edilemeyen arazideki yatay geçirgenliktir. Killi zeminlerde yapılan deneylerde makul srelerde akım elde etmek için yüksek hidrolik eğimler kullanılması gerekebilmektedir. Laboratuvar deneylerinde, arazidekinden çok farklı hidrolik eğimler kullanılması, hidrolik geçirgenlik değerlerini değiştirebilir. Bu ise, ya boşlukları tıkayarak hidrolik geçirgenliği artırmakta, ya da ilave boşluklar yaratabilmektedir. Laboratuvar deneylerinde kullanılan ve beşyze kadar ulaşabilen hidrolik eğim, arazi şartlarında oluşabilecek hidrolik eğimden (1-1.5) ok fazladır. Hidrolik geçirgenlik, uygulanan efektif gerilmeye de bağlıdır. Bu nedenle arazideki

şartları temsil edebilecek efektif gerilmeler kullanmak, laboratuvar ve arazi hidrolik geçirgenliğini birbirine değer olarak yakınlaştırır.

Yapılmış olan literatür çalışması, kireç ile stabilize edilmiş zeminlerin hidrolik geçirgenliğinin farklı parametrelere bağlı olduğunu göstermektedir. En önemli parametrelerin zeminin içeriği, kireç yüzdesi, kür süresi ve kür şartları olduğu görülmektedir. Yine literatür çalışması sonucunda, kireç ile stabilize edilmiş zeminlerin hidrolik geçirgenliklerinin arazide ölçülmesinin laboratuvar çalışmalarına kıyasla daha gerçekçi sonuçlar vereceği düşünülmektedir.

III. LABORATUVAR DENEYLERİ VE KAPLAMA İMALİ

Bu çalışma kapsamında imal edilen kaplama, Karayolları Genel Müdürlüğü'nce sağlanan bir şantiyede imal edilmiştir. Kaplama imalatında kullanılacak olan malzeme, aynı bölgeden sağlanmıştır. Ancak arazi deneylerinden önce laboratuvarında çok kapsamlı deneyler yapılarak zeminin geoteknik özellikleri belirlenmiştir. Kullanılan zeminin genel geoteknik özellikleri Çizelge 1'de verilmektedir.

Çizelge 1. Kaplama zemininin özellikleri

Geoteknik Özellikler	Değer	İlgili Standart*
Doğal su muhtevası, %	16-23	ASTM D 2216
No. 200 elekten geçen, %	>95	ASTM D 421, 422
Spesifik gravite	2.72	ASTM D 854
Likit Limit, %	53	ASTM D 4318
Plastik Limit, %	32	ASTM D 4318
Zemin sınıfı	MH	Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi
Kil içeriği, %	40	ASTM D 421, 422

*Bu standartlar [15] nolu referans kapsamındadır.

Laboratuvarında zeminin genel özellikleri belirlendikten sonra, optimum kireç muhtevasının bulunmasına yönelik deneyler yapılmıştır. Literatürde MH tipi zeminlerin

kireç stabilizasyonu için uygun olduğu belirtilmektedir [16]. Ayrıca, Eades ve Grim deneyi [17] sonucunda yüzde iki kireç ilavesi ile bile zemin-kireç solüsyonunun pH değerinin 12.4'ün üzerine çıktığı görülmüştür. Kireç ilavesi ile birlikte zeminde önemli bir doku değişimi olmuş ve plastik bir zemin yapısından, kum, silt benzeri bir yapıya dönüşüm olmuş. Buna paralel olarak zeminin işlenebilirliğinde de önemli bir artış meydana gelmiştir.

Detayları [18]'de verilen deneyler sonucunda kireç ilavesi ile gerek hidrolik geçirgenlik, gerekse mukavemet değerlerindeki değişiklikler de belirlenmiştir.

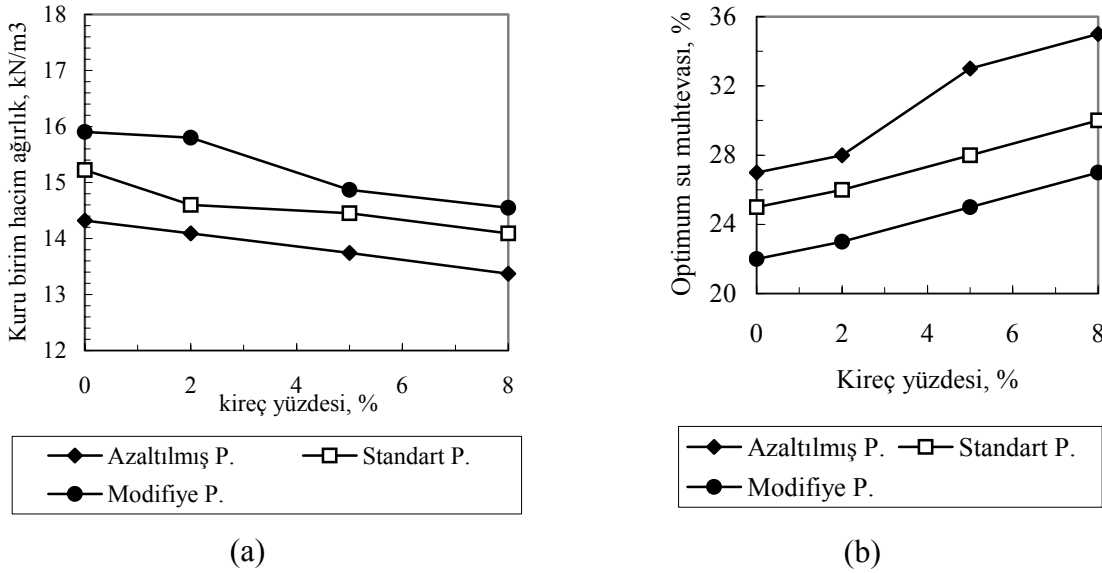
Hidrolik geçirgenlik deneylerinde kireç yüzdesi ve sıkıştırma enerjisinin hidrolik geçirgenliğe etkisi incelenmiştir. Bu nedenle üç farklı sıkıştırma enerjisi kullanılarak kompaksiyon eğrileri çizilmiş ve kireç ilavesinin kuru birim hacim ağırlığını ve optimum su muhtevasını nasıl etkilediği bulunmuştur. Kullanılan enerjiler Standart Proktor; ASTM D 698[15], Modifiye Proktor; ASTM D 1557[15] ve Azaltılmış Proktor enerjileridir. Azaltılmış Proktor enerjisinin Standart Proktor enerjisinden farkı her tabakaya 25 yerine 15 vuruş uygulanmasıdır. Standart Proktor enerjisi 594 kJ/m^3 , Modifiye Proktor enerjisi 2710 kJ/m^3 ve Azaltılmış Proktor enerjisi ise 356 kJ/m^3 'tür. Şekil 1a ve Şekil 1b'de görüldüğü gibi kireç ilavesi ile optimum su muhtevası artmakta, kuru birim hacim ağırlıklar ise azalmaktadır.

Üç farklı sıkıştırma enerjisi kullanılarak hazırlanan numuneler üzerinde kompaksiyon kalıplarında yapılan hidrolik geçirgenlik deneyleri ASTM D5856-95[15]'in tanımlandığı şekilde yapılmıştır. Bu deneyler sonucunda, yüzde beş kireç ilavesinin hidrolik geçirgenliği iki katına çıkardığı görülmüştür. Yüzde sekiz kireç ilavesinde ise yüzde beş kireç ilavesine kıyasla hidrolik geçirgenlik değerinde önemli bir değişiklik olmamıştır. Uygulanan enerjilerin artması ile hidrolik geçirgenlik değerlerinde düşüş ölçülmüştür. Ölçülmüş hidrolik geçirgenlik değerleri $1\text{E}-07$ ve $5\text{E}-07 \text{ cm/s}$ değerleri arasındadır.

Hidrolik geçirgenlik deneyi yapılan numunelere ait veriler kullanılarak her numune için boşluk oranı(e) hesaplanmış ve Şekil 2'de sunulmuştur. Kireç ilavesi boşluk oranını

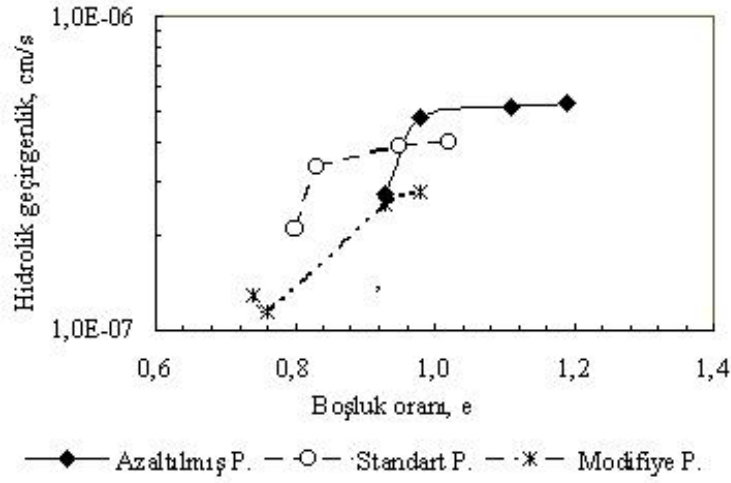
artırmaktadır, zaten kireç ilavesi ile kuru birim ağırlıkların düşmesi de, boşluklu bir yapı elde edilmesinin bir sonucudur. Yüzde iki ve yüzde beş kireç ilavesi ile hidrolik geçirgenlik değerlerinde meydana gelen artışın, boşluk oranının artmasına bağlı olduğu düşünülmektedir. Yüzde sekiz kireç ile stabilize edilen zeminlerde, boşluk oranındaki artışa rağmen hidrolik geçirgenliğin artmaması, bu boşlukların bir kısmının çimentolaşma nedeniyle tıkanması ile açıklanabilir. Bilindiği gibi yeterli miktarda kireç, su ve zemin biraraya geldiğinde pozolanik reaksiyon sonucunda farklı çimentolalar oluşturmaktadır [16].

Saf malzeme ile hazırlanan numunelerin drenajsız kayma mukavemetleri ASTM D 2166[15]'ya göre ölçülmüş ve 80 kN/m^2 olarak bulunmuştur. Yüzde iki kireç ilavesi ile birlikte bu değer 135 kN/m^2 ye yükselmiştir. Yüzde beş kireç ilavesi ile drenajsız kayma mukavemeti 120 kN/m^2 olarak ölçülmüş ve kireç miktarının yüzde sekize çıkarılması ile bu değerde belirli bir farklılık olmamıştır.



Şekil 1. Kireç ilavesinin (a) kuru birim hacim ağırlığa (b) Kireç ilavesinin optimum su muhtevasına etkisi.

Gerek hidrolik geçirgenlik deneyleri gerekse mukavemet deneyleri sonucunda arazi deneylerine yüzde iki ve yüzde beş kireç ile devam edilmesine karar verilmiştir.



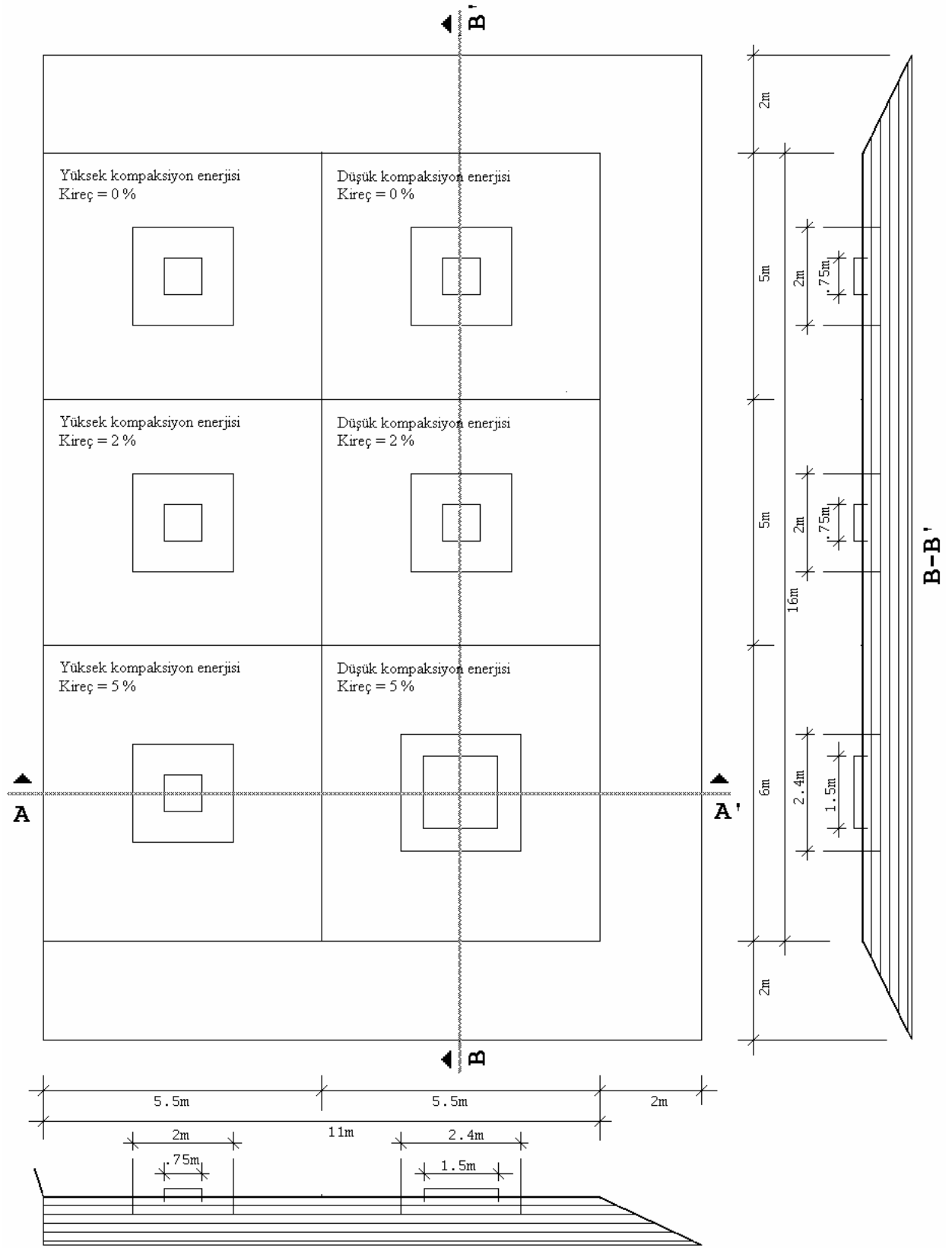
Şekil 2. Boşluk oranı ve hidrolik geçirgenlik arasındaki ilişki.

Laboratuvar deneyleri sonucunda kireç yüzdeleri belirlendikten sonra, arazide kaplama imaline başlanmıştır. Şekil 3'te kaplamanın plan görünümü verilmektedir. Kaplama 16 x 11 metre ebadında, bir metre yüksekliğinde olup, kireç yüzdesi ve kompaksiyon enerji seviyeleri bakımından altı farklı bölümden oluşmuştur. Bu bölümlerle ilgili bilgiler, Çizelge 2'de verilmektedir.

Çizelge 2. Bölümlerde uygulanan kireç yüzdeleri ve sıkıştırma enerjileri

Kireç yüzdesi	Sıkıştırma enerjisi	Kısaltma	Kireç yüzdesi	Sıkıştırma enerjisi	Kısaltma
0	Düşük enerji	LE, 0	0	Yüksek enerji	HE, 0
2	Düşük enerji	LE, 2	2	Yüksek enerji	HE, 2
5	Düşük enerji	LE, 5	5	Yüksek enerji	HE, 5

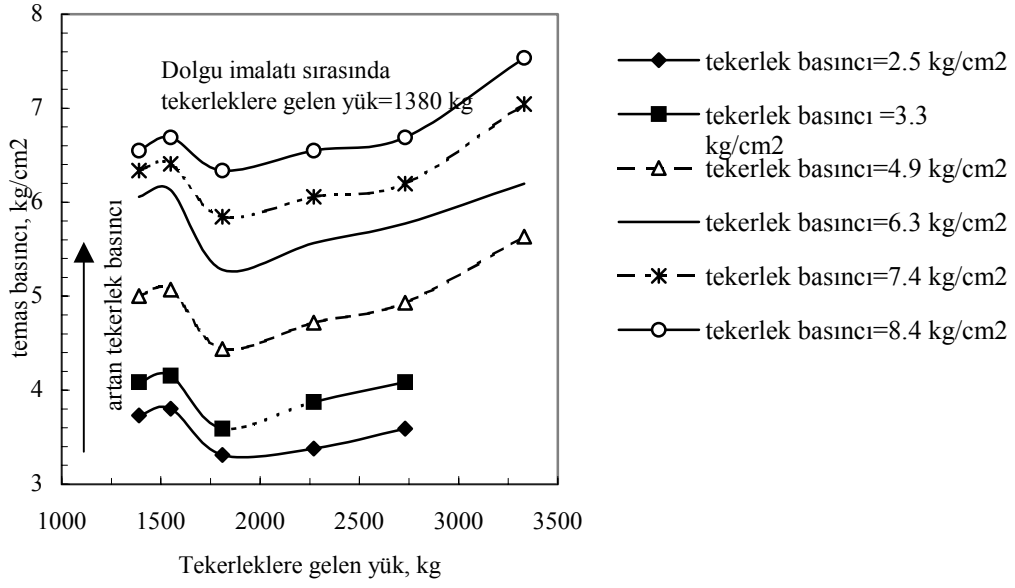
Kaplama imalatı, dolgu yapılacak olan bölgenin ve dolgu malzemesinin hazırlanması ve kompaksiyon safhalarından oluşmuştur. Kaplama beş adet kontrollü dolgu tabakasıyla tamamlanmıştır. Kaplama imalatında kullanılacak olan zemin şantiyede mevcut olduğu için gereken malzemenin imalat öncesi hafredilmesi gerekmiştir. Bunun için şantiyede yaklaşık bir metre derinliğinde bir kazı yapılmıştır. İlk olarak yüzey toprağının ve bitki köklerinin bulunmadığı seviyeye ulaşıncaya kadar zemin temizlenmiştir. Hafriyat işlemi tamamlandıktan sonra kaplama alanının sınırları belirlenmiş ve kaplama tabanına drenaj



A-A'
Şekil 3. Kaplama plan görünüşü.

vazifesi görecek bir çakıl tabakası oluşturulmuştur. Dolgu malzemesinin hazırlanması; malzeme homojenitesi sağlamak için organik ve yabancı malzemelerin ayıklanıp uzaklaştırılması ve toprakların ufalanmasını içermektedir. Zemin işlendikten sonra, gerekli olan miktardaki kireç kuru halde zeminle karıştırılmıştır. Kireç ve su ilave edildikten sonra zemin karıştırılarak yeniden işlenmiş ve sıkıştırılmak üzere dolgu alanına götürülmüştür.

Sıkıştırma işlemi için lastiklerin basıncını ve zemin ile temas alanını değiştirerek zemin üzerinde farklı kompaksiyon basınçları uygulamayı mümkün kılan pnömatik lastikli silindir kullanılmıştır. Şekil 4'te zemin temas basıncının tekerlek yüküne bağlı olarak değişimini görülmektedir. Görülebileceği gibi zemine gelen sıkıştırma basıncını artırmak için en etkili yöntem, tekerleğe gelen yükün değil, tekerlek basınçlarını artırmaktır. Bu nedenle, dolgu imal edilirken, kaplama imalatı için gerekli olan düşük ve yüksek kompaksiyon enerjileri silindirin lastik basınçlarının değiştirilmesi yoluyla elde edilmiştir. Lastik basınçları, iki farklı sıkıştırma enerjisi seviyesi uygulayacak biçimde ayarlanmıştır. Düşük sıkıştırma enerjili bölümler için 4.5, yüksek sıkıştırma enerjili bölümler için ise 6.5 kg/cm^2 zemin temas basıncı kullanılmış, geçiş sayısı; düşük sıkıştırma enerjili bölüm için üç, yüksek enerji ile sıkıştırılan bölüm için ise altı olarak seçilmiştir. Şekil 5 sıkıştırılan bir tabakayı göstermektedir. Yayma öncesi bir önceki tabakanın yüzeyi dozerle 5-7 cm derinliğinde ripelenmiş ve tabakalar arasında bağ sağlanması amaçlanmıştır. Tabakalar sıkıştırıldıktan sonra kum konisi testi yapılmış, su muhtevası ve kuru birim ağırlıklar kontrol edilmiştir. Her bir tabaka için rölatif kompaksiyon değerleri, Şekil 6'da verilmektedir. Rölatif kompaksiyon değerleri hesaplanırken, arazide ölçülen kuru birim hacim ağırlık değerleri ile laboratuvarda aynı kireç yüzdesi için, Standart Proktor Enerjisi ile elde edilen kuru birim hacim ağırlık değerleri kullanılmıştır. Düşük sıkıştırma enerjisi uygulanan bölümlerde ortalama kuru birim hacim ağırlığın 13.9 kN/m^3 ve standart sapmanın ise 0.96 kN/m^3 olduğu bulunmuştur. Yüksek sıkıştırma enerjili bölümlerde ise bu değerler sırasıyla 14.4 kN/m^3 ve 0.99 kN/m^3 'tür. Her bir enerji için ortalama 12 adet ölçüm değeri kullanılmıştır. Uygulanmış olan yüksek sıkıştırma enerji neticesinde, düşük enerji ile sıkıştırılmış olan bölgelere kıyasla daha yüksek birim hacim ağırlıklarına ulaşılmıştır.



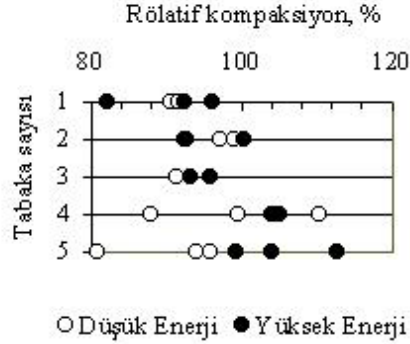
Şekil 4. Tekerleklere gelen yük-tekerlek basıncı-temas basıncı değişimi.



Şekil 5. Sıkıştırılan bir tabaka.

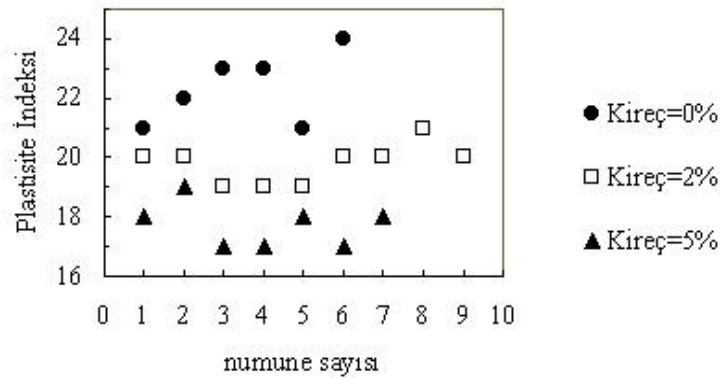
Kompaksiyon sırasında yapılan en önemli ölçümlerden birisi, su muhtevası ölçümleridir. Bu ölçümler sonucunda su muhtevalarının %21 ile %25 arasında, doygunluk oranlarının ise %60 ve %82 değerleri arasında değiştiği görülmektedir. Zeminin tabii su muhtevasının çok fazla değişken olması sebebiyle daha yüksek su muhtevalarına ulaşamamıştır. Tüm bu işlemler esnasında zeminin yeterince karıştırılmış olduğu, zemin toprakların maksimum 5 cm ebadında olacak şekilde

ufalandığı ve kompaktörün geçiş sayısı, yönü ve lastik basınçları sürekli olarak gözlenmiş ve kontrol edilmiştir.



Şekil 6. Kaplamada elde edilen rölatif kompaksiyon değerleri.

İmalat sırasında her bölümden numune alınmış ve elek analizi ve kıvam limit deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler sonucunda 200 nolu elekten geçen zemin yüzdesi, minimum %92 olarak bulunmuştur. Kireç ilavesi ile birlikte laboratuvar ortamında olduğu gibi, likit limitlerde düşüş, plastik limitlerinde ise artış meydana gelmiştir. Bunun sonucu olarak plastisite indekslerinde düşüş olmuş ve işlenebilirlik de artmıştır. Farklı kireç muhtevası içeren bölümlerden alınan numunelerin plastisite indeks değerleri, Şekil 7’de sunulmaktadır.



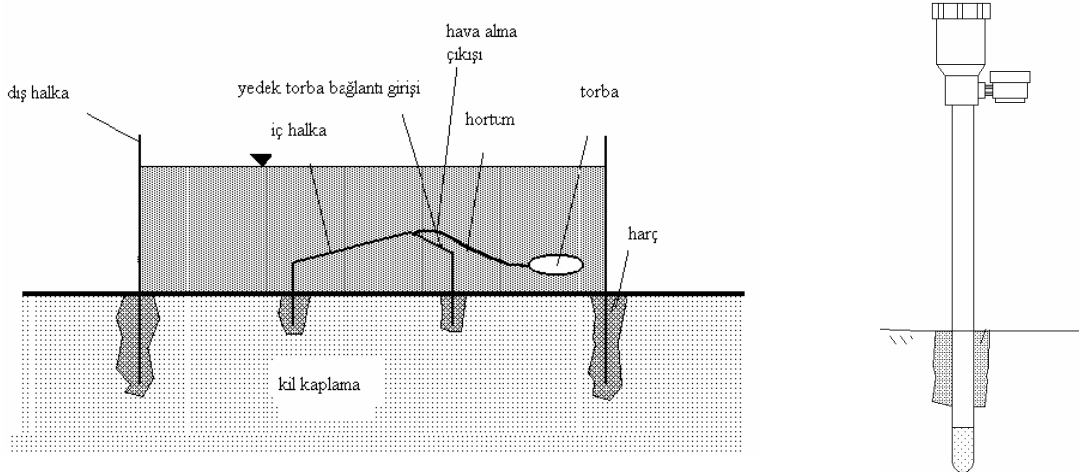
Şekil 7. Araziden alınan numunelerin plastisite indeksleri.

İmalat işlemi tamamlandıktan sonra kaplama üzeri plastik bir tabakayla kaplanmış, kür olması için bir ay süreyle beklenmiştir.

IV. ARAZİ HİDROLİK GEÇİRGENLİK DENEYLERİ

IV.1. Kapalı Çift Halkalı İnfiltrometre Deney Aleti ve Verinin Değerlendirilmesi

Arazide hidrolik geçirgenlik deneyleri Kapalı Çift Halkalı İnfiltrometreler (KÇHİ) ile yapılmıştır. Bu deney ile ilgili bir standart mevcut olup ASTM D5093-90[15]'da yer almaktadır. Şekil 8'de bir Kapalı Çift Halkalı İnfiltrometre deney düzeneği görülmektedir. Kapalı Çift Halkalı İnfiltrometreler, zeminde meydana gelen dikey akımı ölçmekte kullanılmakta olup, akımın düşük olduğu zeminler için kullanımı çok uygundur. Bu tür infiltrometreler ile infiltrasyon hızı, su seviyesine değil, akım hacmine bağlı olarak ölçülmektedir. İnfiltrometre iç ve dış olmak üzere iki halkadan oluşur. Dış halka 36-45 cm arasında, iç halka ise 10-15 cm arasında olmak üzere zemine gömülür. Dış halkanın üstü açıktır ve belirli bir seviyeye kadar su ile doldurulur. İç halka ise daha kısa olup, üstü kapalıdır. İç halkaya içi su dolu esnek bir torba bağlanır. Bu halkanın içindeki su zemine sızdıkça, aynı miktarda sıvı halka içine girer. Belli bir zaman sonra, torba çıkarılır ve tartılır. Ağırlıkta meydana gelen düşüş, o zaman aralığı içerisinde iç halkadan zemine sızmış olan su miktarını gösterir. Genel olarak infiltrasyon hızı cm/s cinsinden ifade edilerek, sızmış olan su miktarı, iç halka alanı ve geçen süre kullanılarak bulunur. Deneye sabit infiltrasyon değerleri bulunana kadar devam edilir. İnfiltasyon hızı, dış halkadaki su seviyesine de bağlıdır. Bu yüzden dış halka içerisindeki su



Şekil 8. Kapalı Çift Halkalı İnfiltrometre Aleti ve tensiyometre.

seviyesi genellikle 30 cm seviyesinde tutulur.

Bu veriler ile hidrolik geçirgenlik değerlerine ulaşmak için hidrolik eğimin de bilinmesi gereklidir. Bu amaçla kaplamada ıslanma yüzeyinin yani doygun olan kısmın hangi seviyeye kadar indiği bilinmelidir. Zemindeki ıslanma yüzeyini takip etmek için Şekil 8’de verilen tensiyometreler kullanılmaktadır. Tensiyometrelerin bir ucunda poroz taş, diğer ucunda ise manometre bulunur. Tüp su ile doldurulur ve kapatılır, daha sonra zeminde açılmış olan deliğe yerleştirilir. Zeminin doygun olmadığı durumlarda, su tüpten çıkar ve manometrede vakum değeri okunur. Islanma yüzeyi poroz uca ulaştığında, bu noktadaki vakum azalır, su tekrar tensiyometreye girer ve vakum değeri sıfıra kadar düşer. Böylelikle farklı derinliklere yerleştirilen tensiyometreler yardımı ile ıslanma yüzeyinin zamana bağlı olarak hangi derinliğe indiği belirlenir ve o anda hidrolik eğim hesaplanabilir. Hidrolik geçirgenlik değeri; (k) infiltrasyon hızının hidrolik eğime bölünmesi ile bulunur. Verilen değerlendirilmesinde kullanılan formülasyonlar denklem 1 ve 2’de sunulmaktadır.

$$I = \frac{Q}{A * t} \quad (1)$$

$$k = \frac{I}{i} \quad (2)$$

burada; (I) infiltrasyon hızı, (Q) toplam akım, (A) akım alanı, (t) geçen süre ve (i) hidrolik eğimdir.

IV. 2. Kaplamada Yapılan İnfiltrasyon Deneyleri ve Deney Sonuçları

Test dolgusunda her bölüm için birer adet olmak üzere toplam altı adet Kapalı Çift Halkalı İnfiltrometre kullanılmıştır. Çizelge 3’te iç ve dış halkaların ebatları verilmektedir.

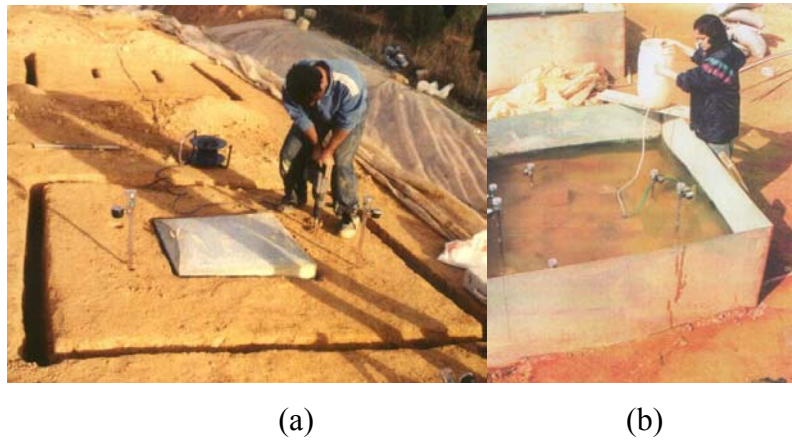
Kür işlemi tamamlandıktan sonra iç ve dış halkaların yerlerine gömülebilmesi için kanallar açılmıştır. Kanallar tamamlandıktan sonra iç ve dış halkalar kanallara

yerleştirilmiştir. Şekil 9a'da kanallar ve iç halka, Şekil 9b'de ise infiltrasyon deneyine başlanmadan önce iç halkanın su ile doldurulması aşaması görülmektedir. Tensiyometreler 15, 33 ve 43 cm derinliğe yerleştirilmiştir. Her bir infiltrometre için altı ya da yedi adet tensiyometre olmak üzere deneylerde toplam 40 adet tensiyometre kullanılmıştır. İnfiltrasyon deneyleri, Kasım 1999-Nisan 2000 tarihleri arasında sürdürülmüştür

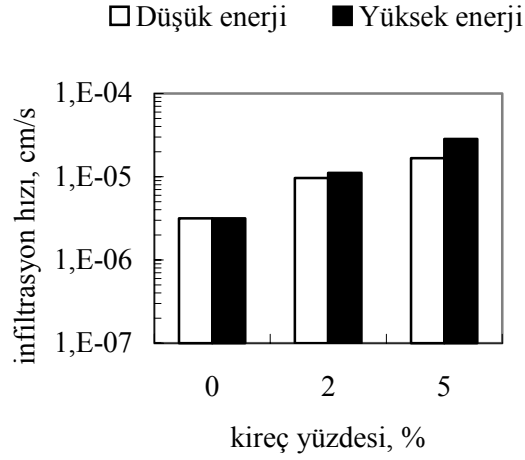
Çizelge 3. İç ve dış halka boyutları

Tip	İç halka	Dış halka
A	1.50 m×1.50 m	2.40 m x 2.40 m
B	0.75 m × 0.75 m	2.00 m x 2.00 m

Arazide yapılan Kapalı Çift Halkalı İnfiltrometre deneyleri sonucunda elde edilmiş olan infiltrasyon hızları, Şekil 10'da verilmiştir. Kireç ilavesi ile infiltrasyon hızı artmıştır. Kuru ağırlığın yüzde ikisi kadar kireç ilavesi ile, her iki sıkıştırma enerjisi için de infiltrasyon hızı üç katına çıkmıştır. Yüzde beş kireç ilave edilmesi durumunda ise, infiltrasyon hızlarında düşük enerji ve yüksek enerji ile sıkıştırılan bölümlerde sırasıyla beş ila dokuz kat oranında artış ölçülmüştür. Yüksek enerji ile sıkıştırılan ve böylece daha az boşluk oranı elde edilen bölümlerde, düşük enerji ile sıkıştırılan bölümlere kıyasla daha düşük infiltrasyon hızları ölçülmemiştir.

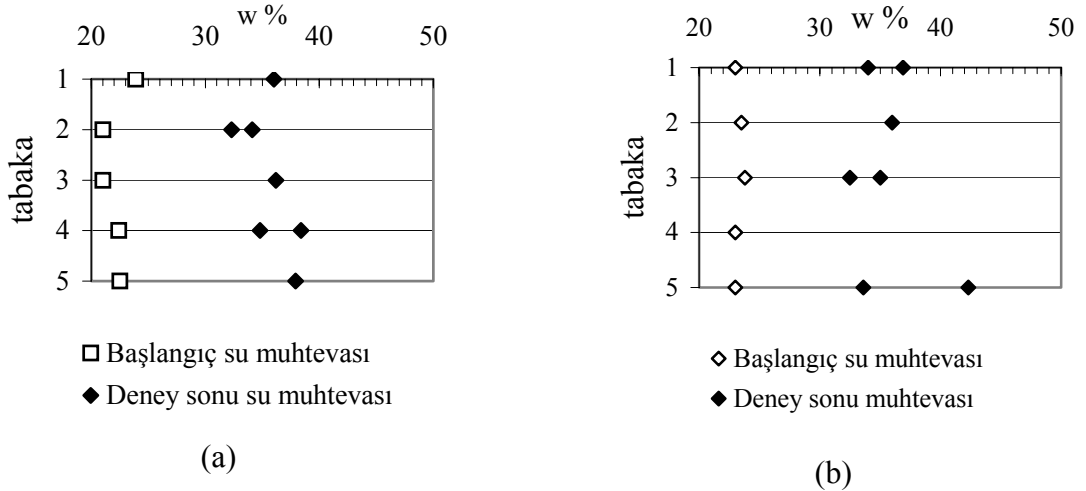


Şekil 9. (a) Kanallar ve iç halka (b) Deney yapılırken.



Şekil 10. Kireç ilavesinin infiltrasyon hızlarına etkisi.

Kaplama üzerinde yapılan deneylerden sonra, kaplamadan çeşitli derinliklerde numune alınarak su muhtevaları ölçülmüş ve ıslanma yüzeyinin belirlenmesi için tensiyometre verileri ile birlikte bu veriler de değerlendirilmiştir. Şekil 11’de kaplamadan örnek olarak seçilen iki bölümdeki su muhtevaları verilmektedir. Deney sonunda ölçülen su muhtevalarına göre hesaplanan doygunluk oranlarının %100 civarında olduğunu göstermektedir. Gerek su muhtevası verileri, gerekse tensiyometre verileri kullanılarak ıslanma yüzeyinin kaplama tabanına kadar ulaştığı yorumu yapılabilmektedir. Bu yoruma bağlı olarak her bölüm için hidrolik eğim değerleri hesaplanmış ve denklem (2) ile bu bölümlere ait hidrolik geçirgenlik bulunmuştur. Hesaplanmış olan arazi hidrolik

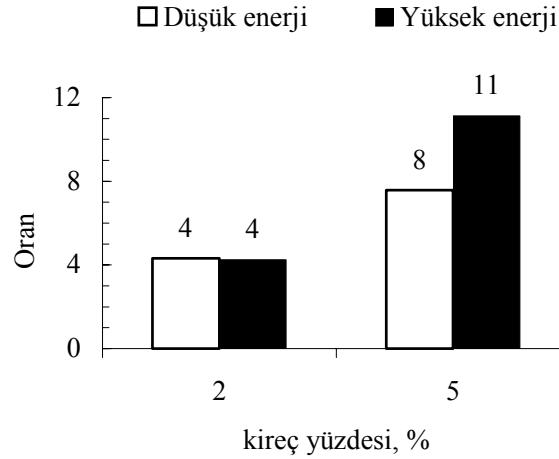


Şekil 11. Kaplamada ölçülen su muhtevası değişimi (a) HE, 0 bölümü (b) LE, 5 bölümü.

geçirgenlik değerleri Çizelge 4’te verilmektedir. Çizelge 4’te görüldüğü gibi hidrolik geçirgenlik değerleri $1.7E-06$ ve $2.2E-05$ cm/s arasındadır. Şekil 12’de ise kireç yüzdesine bağlı olarak, hidrolik geçirgenlikte meydana gelen artışlar sunulmaktadır. Yüzde iki kireç ilavesi ile her iki sıkıştırma enerjisi ile hazırlanan bölümlerde dört kata varan artışlar olmuştur. Kireç ilavesi yüzde beşe çıktığında ise, bu oran sekiz-onbir kat arasında değişmiştir.

Çizelge 4. Hidrolik geçirgenlik değerleri

Bölüm	Hidrolik geçirgenlik, cm/s	Bölüm	Hidrolik geçirgenlik, cm/s
LE,0	$1.77E-06$	HE,0	$1.95E-06$
LE,2	$7.63E-06$	HE,2	$8.29E-06$
LE,5	$1.34E-05$	HE,5	$2.17E-05$



Şekil 12. Kireç ilavesinin hidrolik geçirgenliğe etkisi, $(Oran = k_{kireç}/k_{saf})$.

Arazide ölçülen hidrolik geçirgenlik değerleri, laboratuvarında ölçülen hidrolik geçirgenlik değerlerinden yüksektir. Bunun nedenlerinden birisi arazide kompaksiyon su muhtevalarının daha düşük olması olabilir. Ayrıca laboratuvarında uygulanan sıkıştırma tipi ile arazide uygulanan sıkıştırma tipi farklıdır. Laboratuvarında kullanılan ve darbeye dayanan sıkıştırma tipi ile arazide uygulanan ve ağırlığa ve basınca dayanan sıkıştırma tipinin farklı mikroyapıya neden olduğu ve mikroyapının da hidrolik geçirgenlik değerlerini önemli ölçüde etkilediği bilinmektedir. Yüksek geçirgenliğin

Şekil 13. Laboratuvar ve arazide ölçülen hidrolik geçirgenlik değerleri

Deney sonuçları, arazide büyük ölçekli deney yapılmasının önemini ortaya koymaktadır. Arazideki gerçek hidrolik geçirgenlik değerleri laboratuvarda ölçülen hidrolik geçirgenlik değerleri ile çok sağlıklı olarak modellenememektedir. Laboratuvarda deneye tabii tutulan küçük numunelerin arazi hidrolik geçirgenlik değerlerini tanımlamak için kullanılmasının yanıltıcı olacağı açıktır.

VI. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında, kireç ile stabilize edilmiş zeminlerin kaplama imalatında kullanılabilirliğini incelemek üzere laboratuvar ve arazide hidrolik geçirgenlik deneyleri yapılmıştır. Arazide özel olarak bir kaplama imal edilmiş ve kireç ile stabilize edilmiş zeminlerin düşük hidrolik geçirgenlik kriterini sağlanıp sağlanmadığı incelenmiştir. Türkiye’de ilk kez bir araştırma projesi kapsamında özel kaplama imal edilerek, Kapalı Çift Halkalı İnfiltrometre deneyleri yapılmıştır.

Kireç ilavesi ile deneylerde kullanılan siltli zeminin mukavemetinde ve işlenilebilirliğinde artış meydana gelmiştir. Laboratuvarda yapılan hidrolik geçirgenlik deneylerinde, zemin kuru ağırlığının yüzde ikisi, beşi ve sekizi kadar kireç ilave edilmiş olan numunelerde, hidrolik geçirgenliğin arttığı görülmüş ve uygulanan enerjilerin artması ile hidrolik geçirgenlik değerlerinde düşüş ölçülmüştür. Ölçülmüş hidrolik geçirgenlik değerleri $1E-07$ ve $5E-07$ cm/s değerleri arasındadır. Arazide yapılan infiltrasyon deneyleri, kireç ilavesinin infiltrasyon hızını, dolayısıyla da hidrolik geçirgenliği artırdığını göstermiştir. Bu durum, laboratuvarda elde edilen sonuçlarla uyumludur. Arazi hidrolik geçirgenlik değerleri $1.7E-06$ ve $2.2E-05$ cm/s arasındadır. Arazi hidrolik geçirgenlikleri laboratuvarda ölçülenlerden daha yüksektir. Bu; arazide kompaksiyon su muhtevalarının daha düşük olması, farklı sıkıştırma tipi uygulanması ve test edilen zemin hacimlerin çok farklı olması ile açıklanabilir.

Bu çalışma kapsamında yapılan arazi deneylerinde farklı sıkıştırma enerjisi ile sıkıştırılan bölümlerde belirgin bir hidrolik geçirgenlik farklılığı olmamıştır. Rölatif kompaksiyon değerlerinin yüksek olmasının düşük infiltrasyon hızları ve hidrolik geçirgenliklerinin elde edilmesi için gerekli olan tek parametre olmadığı görülmüştür. Bu; hidrolik geçirgenliğin sadece yoğun bir yapıya bağlı olmadığını ve etkili pek çok farklı parametrenin varlığını göstermektedir.

Arazide yapılan Kapalı Çift Halkalı İnfiltrometre deneyleri sonucunda bulunan hidrolik geçirgenlik değerleri, araziden alınan örselenmemiş numunelerin laboratuvarında ölçülen hidrolik geçirgenlik değerlerinden daha yüksektir. Laboratuvarında yapılan deneylerin özellikle küçük numunelerde yapılanların temsil edici olmayabileceği görülmüştür.

Düşük hidrolik geçirgenliğin çok önemli bir kriter olduğu depolama sahalarındaki kaplamalarda arazi geçirgenlik deneyleri yapılmasının, hem çok sayıda hem de araziyi temsil edebilecek büyüklükte numune kullanılması gerekliliğinin ilgili teknik şartnameye girmesi uygun olur.

VII. TEŞEKKÜR

Bu proje, Boğaziçi Üniversitesi Araştırma Fonu “99A0402” Nolu ve TÜBİTAK İNTAG 718 Nolu projelerle maddi olarak desteklenmiştir. Yazar, Karayolları Genel Müdürlüğü’ne arazi çalışmalarındaki destekleri için teşekkür eder.

VIII. KAYNAKLAR

- [1] Townsend, D.L. ve T. W. Klym, “Durability of lime stabilized soils”, *Highway Research Board*, No. 139, Washington, D.C., pp. 25-41, 1966.
- [2] Ranganathan, B. V., “Soil structure and consolidation characteristics of black cotton clay”, *Geotechnique*, Vol. II, pp. 331, 1961.
- [3] Stocker, P. T. “*Diffusion and Diffuse Cementation in Lime and Cement Stabilized Clayey Soils*”, Special Report No. 8, Australian Road Research Board, Vermont South, Victoria, Australia., 1972.
- [4] Locat, J.,H Tremblay , S Leroueil, “Mechanical and hydraulic behavior of a soft inorganic clay treated with lime”, *Canadian Geotechnical Journal*, 33, pp. 654-669, 1996.

- [5] El-Rawi, M. N. ve A. A. Awad, "Permeability of lime stabilized soils", *Journal of the Transportation Engineering Division*, Vol. 107(TEL), pp. 25-35, 1981.
- [6] Broderick, G. P. ve D. E. Daniel, "Stabilizing compacted clay against chemical attack", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE 116(10), pp. 1549-1567, 1990.
- [7] Bowders, J. J. ve M. A. Usmen, "Earth Material Liners for Waste Disposal Facilities", Bildiri Kitabı, 3rd Symposium on Environmental Management for Developing Countries, Boğaziçi Üniversitesi, 1986, İstanbul, Türkiye, Vol. 1, pp. 1-27.
- [8] Daniel, D. E., "Predicting hydraulic conductivity of clay liners", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 110, No. 2, pp. 285-300, 1984.
- [9] Day, S. R. ve D. E. Daniel, "Hydraulic conductivity of two prototype clay liners", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 111, No. 8, pp. 957-970, 1985.
- [10] Trautwein, S. J. ve G. P. Boutwell, "In Situ Hydraulic Conductivity Tests for Compacted Soil Liners and Caps", Daniel D.E. ve S. Trautwein (Eds.), *Hydraulic Conductivity and Waste Contaminant Transport in Soil*, ASTM STP 1142, Philadelphia, pp. 184-226, 1994.
- [11] Williams, C. E., "Facts About the Design and Construction of Earthen Containment Structures", ASCE Güz Toplantısı, Texas, Austin, College Station, TX, 1988.
- [12] Trautwein, S. J. ve C. E. Williams, "Performance evaluation of earthen liners", *Waste Containment Systems, Geotechnical Special Publication*, No. 26, ASCE, pp. 30-49, 1990.
- [13] Benson, C. H., H. Zhai, H. ve X. Wang, "Estimating hydraulic conductivity of compacted clay liners", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE 120(2), pp. 366-387, 1994.
- [14] Lahti, L. R., K. S. King, D. W. Reades, ve A Bacopulos, "Quality Assurance Monitoring of a Large Clay Liner", R.D. Woods (Eds.), *Geotechnical Practice for Waste Disposal'87*, GSP No. 13, ASCE, pp.640-655, 1987.
- [15] ASTM, "*American Society of Testing Materials*", Philadelphia,
- [17] Little, D. N. "*Handbook for Stabilization of Pavement Subgrades and Base Courses with Lime*", Kendall/Hunt Publishing Company, Iowa, 1995.
- [17] Eades, J. L. Ve R. E. Grim, "A quick test to determine lime requirements for lime stabilization", *Highway Research Record*, No. 139, pp. 61-72, 1966.
- [18] Bozbey, I., "Effect of Lime and Compaction Effort on Hydraulic Conductivity of Clay Liners in Laboratory and in Situ Scales". Doktora Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, İngilizce, İstanbul, 2002.
- [19] Benson, C. H., D. E. Daniel ve G. Boutwell, "Field performance of compacted clay liners," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 125, No. 5., 1999.