



Stabilize Edilmiş İzmir Körfez Bölgesi Doğu Kıyı Şeridi Delta Zeminlerinin XRD ve SEM Analizleri

SEM and XRD Analyses of Stabilized East Coastline Delta Soils of Izmir Bay Area

Okan Önal^{1*}, Çağrıhan Sarıavcı²

¹ Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, TÜRKİYE

² Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, TÜRKİYE

Sorumlu Yazar / Corresponding Author *: okan.onal@deu.edu.tr

Geliş Tarihi / Received: 20.02.2019

Araştırma Makalesi/Research Article

Kabul Tarihi / Accepted: 22.07.2019

DOI:10.21205/deufmd.2019216325

Atıf şekli/How to cite: ÖNAL, O., SARIAVCI, C., (2019). Stabilize Edilmiş İzmir Körfez Bölgesi Doğu Kıyı Şeridi Delta Zeminlerinin XRD ve SEM Analizleri, DEUFMD, 21(63), 967-978.

Öz

İzmir Körfezi'nin Batı sahilinde Meles çayı, Arap ve Manda dereleri tarafından taşınmış yaklaşık 3 milyon metreküp kirlenmiş alüvyonel zemin bulunmaktadır. Bu akarsular, 300.000 m²'lik bir deltayı paylaşmaktadır. Deltada bulunan alüvyonlar 10 ila 15 m kalınlığında yüksek su içeriği ve düşük taşıma kapasitesine sahip katmanlardan oluşmaktadır. Meles deltası zaman içerisinde, büyük ölçekli konut inşaat projelerinin yapımının başladığı şehrin doğu sahil şeridi içinde kalmıştır. Geniş bir alan işgal eden ve rekreasyon çalışmaları için bile uygun olmayan bu yumuşak birikintilerinin maliyet etkin bir şekilde stabilizasyonuna ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca, yolcu gemilerinin İzmir Limanı'na yaklaşma kanalını derinleştirmek için delta alanının deniz dibi kısmının da taranması planlanmaktadır. Tarama yolu ile toplanacak kirlenmiş deniz sedimentlerinin depolanması da ayrıca çevresel bir sorun oluşturmaktadır. Bu çalışmada, kireç, çimento ve bunların farklı oranlarda karışımları kullanılarak, Meles Deltası zeminlerinin stabilizasyonu hedeflenmiştir. Optimum katkı oranlarını belirlemek için tek eksenli basınç deneyleri yapılmıştır. Stabilizasyon ürünlerini ve mikro yapıdaki değişiklikleri gözlemek için stabilize edilmiş zemin numunelerinde X-ışını kırınım (XRD) testleri ve taramalı elektron mikroskobu görüntülemesi (SEM) yapılmıştır. X-ışını testlerinde değişik oranlarda stabilizasyon ürünleri tespit edilmiştir. Ayrıca, işlenmemiş ve stabilize edilmiş zemin örneklerinin SEM görüntülerinin karşılaştırılması, mikro yapıda kalsiyum alümina hidratlar ve kalsiyum silika hidratların varlığını ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: Zemin İyileştirme, Derin Karıştırma, Kireç-Çimento Karışımları, SEM, XRD

Abstract

The gulf of İzmir contains 3 million cubic meters of polluted sediments carried by Meles, Arap and Manda rivers. These rivers share the same delta with a surface area approximately 300.000 m², where 10 to 15 m thick sediment layers were deposited with high water content and low bearing capacity. The delta is now located along the east coastline of the city, where large scale residential building projects are under construction. These soil deposits that are unsuitable for the establishment of recreational facilities need to be stabilized in a cost-effective way. Besides, the sea bottom portion of the delta area will be dredged in order to deepen the approach channel of the cruise ships to the Izmir Port. The disposal of the contaminated sea sediments has also become an environmental concern. In this study, lime and cement and their mixtures with varying portions were considered as a

stabilization agent for soft and contaminated sediments. Unconfined compression tests were conducted in order to determine the optimum additive percentages. X-ray diffraction tests (XRD) and scan electron microscope (SEM) imaging were performed on the stabilized soil specimens in order to observe the cementitious products and changes in the micro structure. In X-ray tests, cementitious by-products were detected in varying ratios. Also, the comparison of SEM images of untreated and stabilized soil specimens reveals the presence of calcium alumina hydrates and calcium silica hydrates in the micro structure.

Keywords: Soil Improvement, Deep Mixing, Lime-Cement Mixtures, SEM, XRD

1. Giriş

Katkı maddeleri ile zemini yerinde karıştırarak iyileştirmek özellikle Kuzey ülkeleri olmak üzere birçok ülkede sık uygulanan bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Zemin karıştırma tekniği sığ ve derin karıştırma olarak iki şekilde uygulanabilir. Sığ karıştırma zeminin sınırlı bir derinliğe kadar olan üst kısmının katkı maddeleri katılarak karıştırılması olarak tanımlanabilir. Sığ karıştırma özellikle yol imalatları gibi aktarılan yüklerin sınırlı olduğu durumlarda tercih edilen ve genellikle bu işe özel olmayan ekipmanlarla inilebilecek derinlikle sınırlı kalan bir uygulamadır. Öte yandan derin karıştırma 30-40 m derinliğe kadar etkili olan ve işe özel ekipmanlarca yapılan bir tekniktir.

Derin karıştırma yöntemi 1986'da ABD'de gerçekleşen ilk uygulamasından bu yana İskandinavya, Japonya ve Kuzey Amerika'da yaygın bir şekilde uygulanmaktadır [1]. Derin karıştırma yönteminde bağlayıcılar zemine kuru ve ıslak olmak üzere iki farklı yöntem ile karıştırılmaktadır [2]. Islak karıştırma prosedürü genellikle yer altı su seviyesinin üzerinde yer alan zemin tabakaları için uygulanır. Bu şekilde katkı maddelerindeki bağlayıcıların gereksinim duyduğu su enjeksiyon yöntemi ile sağlanmış olur. Meles Deltası zeminlerinde olduğu gibi yeraltı su seviyesinin altında bulunan, doğal su içeriği yüksek zayıf zeminler için ise kuru karıştırma yöntemi tercih edilir. Kuru karıştırma yönteminde kuru bağlayıcıyı doğrudan zayıf zemin kütlelerinin içine enjekte edildiği için hidrasyon sırasında ısı açığa çıkaran sönmemiş kireç gibi bağlayıcıların kullanımına olanak sağlamaktadır. Bu sayede zayıf zeminin su içeriğini düşürerek katılaşmasını sağlamak mümkün olabilmektedir.

İzmir Körfezi Meles Deltasının, Arap ve Manda derelerinin taşıdığı atıklar ve rüsubatın da birikmesi ile 300.000 m²'lik bir alanda 10 ila 15 m arasında değişen kalınlıklarda yaklaşık 3 milyon m³ artık alüvyonel malzeme içerdiği

düşünülmektedir [3]. Yüksek su içeriği ve düşük taşıma gücüne sahip bu çökeller mühendislik özellikleri açısından son derece yetersizdir. Kentin önemli bir noktasında bulunan bu alanın kullanılabilir hale getirilmesi amacıyla İzmir Büyükşehir Belediyesi tarafından derin karıştırma yöntemi ile zemin iyileştirmesi yapılması öngörülmüştür.

Bu çalışmada yerinde derin karıştırma uygulamasının performansının öngörülmesi amacıyla X-ışını kırım (XRD) ve taramalı elektron mikroskopu (SEM) analizleri ile zeminin bünyesindeki değişimlerin izlenmesi amaçlanmıştır. Literatürdeki diğer çalışmalara benzer bir şekilde kireç, çimento ve bu malzemelerin karışımları kimyasal bağlayıcı olarak farklı oranlarda kullanılmıştır. Bu amaçla zemin örnekleri alınmış, sınıflandırma deneyleri gerçekleştirilmiş, derin karıştırma tekniğine uygun şekilde zemin örnekleri hazırlanmış ve farklı kireç ve çimento katkı oranları ile stabilizasyon gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, sahada iyileştirme uygulanacak bölgedeki ortam özelliklerini temsil edecek şekilde örnekler kür edilmiştir. Kür edilmiş örneklerin mühendislik parametreleri tek eksenli basınç deneyi ile belirlendikten sonra zemin bünyesinde oluşan değişimlerin X-ışını kırım (XRD) ve taramalı elektron mikroskopu (SEM) analizleri ile takibi hedeflenmiştir.

2. Literatür Taraması

Kireç, ekonomik olması ve uygulama kolaylığı bakımından alüvyonel birikimlerin stabilizasyonunda en çok tercih edilen katkı maddesi olmuştur. Birçok çalışmada kirecin ince daneli zeminlerin mühendislik özelliklerini iyileştirdiği kanıtlanmıştır [4, 5]. Daha sonraları, çimentonun da alüvyonel zeminlerin stabilizasyonunda kireç ile beraber kullanılabilceği ve bu sayede daha yüksek dayanımlar elde edilebileceği öne sürülmüştür [6-8].

Boardman vd. [9], kirecin sönmüş [kalsiyum hidroksit (Ca(OH)₂] veya sönmemiş [kalsiyum

oksit (CaO)] formda kil zeminlerin fiziksel özelliklerini iyileştirmede yüzyıllardır kullanıldığını bildirmiştir. Sönmemiş kireç, zemine karıştırıldığında zemin boşluklarındaki su ile temas etmesiyle beraber yüksek ekzotermik bir hidrasyon reaksiyonu başlar. Bu reaksiyon için harcanan su, zemin bünyesinden alındığı için zemin katılma sonucu daha iyi bir işlenebilirliğe ulaşır. Buna ek olarak zeminin pH'ında da bir artış olur. Hidrate olmuş kireç daha sonra zemindeki puzolanik malzemeler ve geriye kalan su ile reaksiyona girer ve uzun dönemde dayanım sağlayan kalsiyum silikat hidratın (CSH) oluşmasını sağlar [2].

Kireç gibi çimento da hidrolik tip bir stabilizasyon ajanıdır. Bergado vd. [10] çimento ile kil minerali arasında iki büyük kimyasal reaksiyon olduğunu söylemektedir. Bunlardan birincisi, çimento ve zemindeki suyun birincil hidrasyon reaksiyonu iken, diğeri çimento tarafından salınan kireç ile kil mineralleri arasındaki puzolanik reaksiyonlardır. Stabilizasyon işlemi sırasında zemin danelerinin bağlanması, hidrolik reaksiyonlar boyunca oluşan bağlayıcı jeller olan kalsiyum silikat hidrat (CSH) ve kalsiyum alüminat hidrat (CAH) bileşikler tarafından yönetilir.

Timotey vd. [2] organik madde içeriği yüksek zeminlerin katkı maddeleri ile stabilizasyonu konusunda çalışmışlardır. Çalışmalarında, organik zeminlerin stabilizasyonunda kalsiyum hidroksitin humik asit ile zemin danelerini kaplayan çözünmez ürünler oluşturduğunu belirlemişlerdir. Yüksek seviyede organik içeriğe sahip zeminlerin stabilizasyonu konusunda Hebib ve Farrell [11] ve Hernandez-Martinez ve Al-Tabbaa [12] çalışmalar yürütmüşlerdir. Bu araştırmacılar özellikle stabilizasyon sürecini ve iyileştirilmiş zemin parçalarını elektron mikroskop ile incelemişlerdir. Çalışmaları sonucunda hidrasyon sonucu ortaya çıkan bağlayıcı karakterdeki bileşikler ile turba türü zeminde bulunan organik maddeler arasında neredeyse hiç etkileşim olmadığını belirlemişlerdir.

Söz konusu araştırmaların sonuçları Axelsson vd.'nin [13] yaptığı çalışmalar ile beraber değerlendirildiğinde, eşik bir katkı oranının altında zeminde hiçbir iyileşme olmadığı görülmektedir. Zemine eklenen katkı, eşik seviyesine kadar organik zemindeki mevcut asitleri nötralize etmek için harcanmaktadır. Ancak bu eşik seviyesi aşıldıktan sonra kalan katkı maddesi zemin bünyesi ile reaksiyona

girebilmekte ve ortamın pH'ının artmasına neden olabilmektedir.

Dunkirk limanından çıkartılan tarama malzemelerinin kıvam limitlerinde çimento ve kireç katkısının etkisi Wang vd. [14] tarafından araştırılmıştır. Ayrıca Grubb vd. [15] tarafından iyileştirilmiş tarama malzemelerinin mukavemet özellikleri tek eksenli basınç deneyleri ile belirlenmiştir. Bu çalışma yüksek su içeriğine sahip tarama malzemelerin doğru karışım oranları ile stabilize edilebileceğini göstermiştir. Miura vd. [16] derin zemin karıştırma uygulamaları için laboratuvar deneyleri gerçekleştirmiştir. Araştırmalarında özellikle bağlayıcı oranı ve tek eksenli basınç dayanımlarına odaklanarak Ariake-Saga ve Hong Kong killeri üzerinde çalışmışlardır.

Sıkıştırılmış zemin kireç karışımlarında meydana gelen fiziksel ve kimyasal reaksiyonların, zeminlerin hidrolik ve mekanik özelliklerine etkisini araştırmak üzere Di Sante vd. [17] bir araştırma programı düzenlemiştir. Zemin kireç reaksiyonlarının etkileri SEM görüntüleri ile takip edilmiş ve ayrıca pH değerlerindeki değişimler izlenmiştir. Çalışmalarında doğal durumdaki zeminde, kil daneleri lamine bir halde olduğu görülmüştür. Öte yandan, kireç ile karıştırılan ve 24 saat kür edilen örneğin SEM grafikleri zemin yapısının oldukça gözenekli bir yapıya dönüştüğünü belirlemişlerdir. Ancak iyileştirilmiş zemin numunesinin iki farklı bölgesinde gerçekleştirilen XRD analizleri karşılaştırıldığında, benzer yapıların farklı oranlarda ortaya çıktığı görülmüştür. Bu da araştırmacıları kireç reaksiyonlarının karışımda uniform bir şekilde gerçekleşmediği sonucuna götürmüştür. Tepkime sonu ortaya çıkan bağlayıcı yapıların düzensiz dağılımı zemin kireç reaksiyonları için suyun gerekliliğini ortaya koymuştur. Bu çalışmada analiz edilen örneklerin %20 doygunluk durumuna tekabül eden yaklaşık %20 su içeriğine sahip örnekler olmasından dolayı kısmen suya doygun olan gözeneklerin düzensiz bir dağılımın oluşmasına yol açtığı düşünülmüştür ve zemin kireç reaksiyonlarının homojen dağılması için ortamdaki suyun varlığının önemi ortaya çıkmıştır.

Rajasekaran vd. [18] denizsel ortamda çökelmiş killerin iyileştirme sonrası minerolojik değişimleri üzerine çalışmışlardır. Açık deniz yapılarına gelen dalga etkilerine karşı temel sistemlerinin desteklemek üzere zemin

iyileştirme ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Hindistan'ın Doğu sahil bölgelerinden alınan zeminler kireç ve sodyum hidroksit kimyasalları kullanılarak iyileştirilmişlerdir. Kireç ile stabilize edilmiş tüm örneklerde farklı boyutlardaki agrega oluşumları SEM görüntüleri ile gözlenmiş ve ayrıca XRD analiz sonuçları ile kalsiyum silikat hidrat ve kalsiyum alümina hidrat gruplarının gelişimi ortaya konulmuştur.

Dash ve Hussain, [19] 2011'de yaptığı çalışmada kireç katkısının silika açısından zengin yüksek ve düşük plastisiteli killerde etkisini SEM ve XRD analizleri ile ortaya koymuştur. Her iki analizde de mikro yapıdaki çimentolanma ürünleri belirlenmiş ve bu tür zeminlerde optimum kireç oranından sonra oluşan jel matrislerin plastisiteyi arttırdığını belirlemiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Dip Tarama Malzemesi ve Numune Alımı

Derin karıştırma yöntemi ile stabilize edilmek istenen alan şehrin liman bölgesine yakın Halkapınar/Konak'ta bulunmaktadır. Tarama malzemesi Meles çayının içinden ekskavatörün kepçesi ile taranarak, su içerisinden çıkartılmış ve uygun bir alana serilmiş ve kapaklı bidonlar içerisine alınmıştır. Zemininin örneklenme şeklini dolaylı numunelerin doğal su içerikleri tespit edilememiştir.

Kurutma metodunun Atterberg limitlerine olan etkisini gözlemek için, biri oda sıcaklığı olmak üzere örnekler dört farklı sıcaklıkta kurutulmuştur. Bu şekilde örneklerin Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırmasına göre organik olarak nitelenip nitelenmeyeceği belirlenmiştir. Sonuçlardaki ihmal edilebilir farklardan dolayı tüm örnekler 105°C'da kurutulmuş ve çeneli kırıcı ile öğütülerek toz hale getirilmiş ve saklama kutularında muhafaza edilmiştir.

2.2. Bağlayıcılar

Hidrolik veya hidrolik olmayan bağlayıcılar zemin iyileştirme işlerinde kullanılabilir. Hidrolik bağlayıcılar su ile temas ettiğinde kür olurken, hidrolik olmayan bağlayıcılar kür olmak için bir katalizöre (çoğunlukla hava) ihtiyaç duyarlar. Jose [20], kireç ve çimentonun deniz çökelleri için son derece etkili bağlayıcılar olduklarını söylemiştir. Bu çalışmada katkı maddesi seçimi iyileştirilecek zeminin yerindeki durumu göz önünde bulundurularak hidrolik kireç ve çimento olarak seçilmiştir. Bu çalışmada kullanılan kireç yüksek kalsiyum içerikli

sönmemiş kireç (CaO) ve TS EN 197-1 (2012) standartlarına uygun CEM-I 42.5 R türü Portlant çimentosudur.

2.3. Atterberg Limitleri

Zeminlerin plastisitesi dört farklı kurutma koşulu için belirlenmiştir. Bu koşullar, havada kurutma (25°C), 60°C, 86°C ve 105°C'dır. Bu şekilde her kurutma sıcaklığı için likit limit değeri karşılaştırılarak kurutma sıcaklığının Atterberg limitlerine olan etkisi incelenmiştir. Likit limit belirlenmesinde düşen koni metodu kullanılırken plastik limit için elde yoğurma metodu kullanılmıştır.

2.4. Organik Madde İçeriği

Zemin iyileştirme çalışmalarında zeminin organik içeriği, kullanılacak bağlayıcının dozajının belirlenmesinde oldukça büyük önem taşımaktadır. Bağlayıcı maddeler, zemin içinde önce organik maddeler ile reaksiyona girdikleri için, zeminin stabilizasyonu için kalan bağlayıcı miktarı önemlidir. Yüksek organik içeriğe sahip zeminlerde pH'nın yükselebilmesi için yüksek miktarda kireç kullanılması gerekebilmektedir [21].

Bu sebeplerden ötürü, zeminin organik madde tayini için 440°C'de yakılarak ASTM D2974-07'a uygun olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.

2.5. Zemin Sınıflandırması

Zemin sınıflandırmasında Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi (ASTM D2487-11) kullanılmıştır. Atterberg limitlerindeki değişim incelendikten sonra, 105°C'da kurutulmuş örneklerin likit limit ve plastik limit değerleri kullanılarak sınıflandırma yapılmıştır.

2.6. Tek Eksenli Basınç Deneyleri

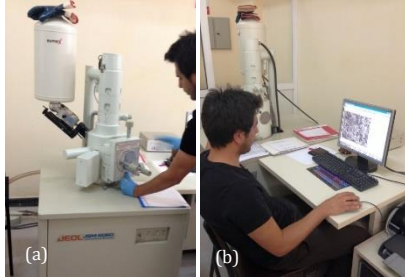
Örneklerin tek eksenli basınç dayanımları ASTM D2166-132'ye uygun olarak belirlenmiştir. Yüklemeler esnasında eksantrik yükleme yapılmamasına dikkat edilmiştir. Ayrıca örneklerin direnajsız yüklenmesi ve yükleme esnasında kurumamaları için göçme yüküne en fazla 15 dakika içinde ulaşacak yükleme hızı seçilmiştir.

2.7. Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM)

Analizleri

Bu çalışma kapsamında zemin bünyesinde meydana gelen değişimleri izlenebilmesi için SEM analizleri gerçekleştirilmiştir. Testler Dokuz Eylül Üniversitesi Metalürji ve Malzeme

Mühendisliği Bölümü Elektron Mikroskopi Laboratuvarında bulunan 10 kV gücündeki JEOL-JSM6060 Taramalı Elektron Mikroskopunda yapılmıştır (Şekil 1). Büyütme ilk inceleme için mümkün olan en düşük seviyeye ayarlanmıştır. Daha sonra 5000 kat ve 10000 kat yaklaştırma seviyeleri kullanılmıştır.



Şekil 1. SEM deney ekipmanı

SEM analizleri için katkı karıştırılmamış zemin ve mukavemet deneyleri için hazırlanan örneklerle aynı nitelikte ve kür süresinde ortalama 5 mm boyutlara sahip kübik şekilde örnekler kullanılmıştır (Şekil 2a). Hazırlanan örnekler üzerlerinde toz ve kalıntılardan arındırılarak vakumlanmışlardır. İletken çift taraflı karbon bant yardımıyla örnek tutucular üzerine yapıştırılmıştır (Şekil 2b ve 42).



Şekil 2. Hazırlanan örnekler (a) SEM deneyleri için örneklerin sabitlemesi (b, c)

SEM ile görüntülemeye geçmeden önce örnekler iletken ince bir tabaka altın ile kaplanmıştır. Kaplama işleminde Quorum Technologies-Sc7620 Mini kaplama aleti kullanılmıştır (Şekil 3).



Şekil 3. Altın kaplama ekipmanı (a), kaplama işlemi (b) ve kaplanmış örnekler (c)

2.8. X-Işını Kırınım (XRD) Deneyleri

X-Işını kırınım mikro-yapısal analizi (XRD) İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Merkez Malzeme Araştırma Laboratuvarında yapılmıştır. Bu analiz ile hem doğal zeminin hem de stabilize edilmiş zemin örneklerinin kimyasal içerikleri ve kristalografik yapılarının belirlenmesi amaçlanmıştır.

XRD deneyleri ile pozolonik reaksiyonlar sonucu ortaya çıkan bileşenlerin zaman içerisinde değişiminin tespit edilmesi amaçlanmıştır. Bu araştırmada Philips X'Pert Pro Diffractometer deney ekipmanı kullanılmıştır.

Mukavemet deneyleri ile aynı nitelikte hazırlanan örnekler toz hale getirilerek 200 numaralı elekten elenmiştir. XRD deneyi için gerekli numuneler ağzı kapalı hava geçirilmeyen plastik torbalarda muhafaza edilmiştir. XRD grafikleri 45 kV ve 40 mA ile Cu ışınımları ile alınmıştır. Tarama işlemi 5°'den 80°'ye kadar 0.033°'lik adımlarla yapılmıştır.

2.9. Örneklerin Hazırlanması ve Bağlayıcılık Oranları

Laboratuvar örnekleri bu çalışmada sahada uygulanacak derin karıştırma uygulaması ile uyumlu olacak şekilde hazırlanmıştır. Bu maksatla zemin bağlayıcı ile karıştırılırken yerindeki su içeriği ve birim hacim ağırlığı dikkate alınmış ve numuneler kalıplanırken sıkıştırma işlemi uygulanmamıştır. Örnekler PVC borudan oluşturulan kalıplara hafifçe vurma ve şişleme yoluyla yerleştirilmiştir. Hazırlanan örnekler suya batık konumda farklı zaman periyotları için kür edilmiştir. Uygulanan örnek hazırlama prosedürü ile homojen, boşluksuz ve tekrar edilebilir örnekler hazırlanabilmiştir. Bu çalışmada %2, %4, %8 kireç, %4, %8 çimento ve %2 kireç+%2 çimento, %4 kireç+%4 çimento ve %8 kireç+%8 çimento olmak üzere 8 değişik oranda bağlayıcı kullanılmıştır. Karışım oranları malzemelerin kuru ağırlıkça oranlarını içermektedir.

Örnekler hazırlanırken öncelikle öğütülmüş durumdaki zemin likit limitine getirilerek 2 saat bekletilmiştir. Filtre kağıtları şerit şeklinde kesilerek kalıp içine yerleştirilmiş ve kalıbın altı şeffaf film ile sarılmış ve film O-ringler ile sabitlenmiştir. Daha önce likit limit su içeriğine ulaştırılan örnekler bağlayıcı katılarak karıştırılmış ve kalıpların içerisine yerleştirilmiştir. Karışımlar üç katman olacak şekilde kalıplara yerleştirilmiştir. Her katman yerleştirildikten sonra karışım 30

kez hafif darbe ile yayma, 15 kez şişleme ve 30 kez tekrar darbe vurma işlemine tabii tutulmuştur. Her katman için aynı işlem tekrar edilmiştir. Tekrar edilebilir olması açısından darbe ile yayma Casagrande test düzeneğinin alt tablası kullanılarak yapılmıştır. Kalıplar tam olarak doldurulduktan sonra O-ringler ve şeffaf filmler çıkartılmış ve kalıp cidarları kullanılarak örneklerin üst ve alt kısımları spatula ile tesviye edilmiştir. Dairesel filtre kağıtları kesilerek tesviye edilen yüzeylere konulmuştur. Bu şekilde kalıp iç cidarındaki düşey filtre kağıtları ve üst ve alt daireli filtre kağıtları ile örneğin dışarıdan su alabilmesini sağlayacak bir sistem oluşturmuştur. Bu şekilde her karışım oranı ve kür süresi için 2 adet örnek hazırlanmıştır.

2.10. Kür Koşulları

Kür süresi hem kısa hem de uzun dönem stabilizasyon davranışını gözlemlemek için 7, 14, 28 ve 56 gün olarak belirlenmiştir. Numuneler kalıplara yerleştirildikten sonra 23°C sabit sıcaklıktaki kür banyosuna bırakılmışlardır. Örneklerin bünyelerine aldıkları su ile şişmelerini engellemek için kalıpların üst ve altına koyulan metal plakaların üstüne basınç ağırlık koyulmuştur. Kür süreleri tamamlanan örnekler banyodan alınmış, PVC kalıplardan çıkartılmış, boyutları ve ağırlıkları ölçülmüş, deneyleri tamamlandıktan sonra ise su içerikleri belirlenmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Tarama Malzemesinin Sınıflandırması

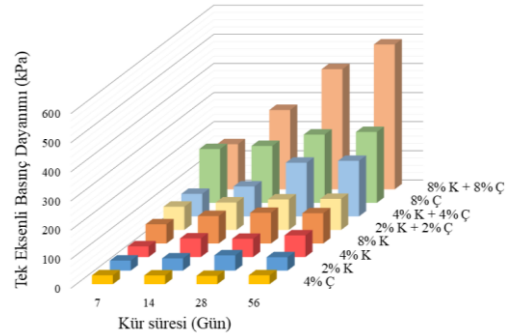
Alınan örnekler Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırmasına göre düşük plastisiteli kil (CL) olarak adlandırılmıştır. Görsel olarak örneklerin koyu renkli ve kokulu oldukları ve hava ile temas eden yüzeylerinin açık kahverengiye döndüğü izlenmiştir. Yapılan organik madde içeriği deneyinde organik madde içeriği %11 olarak bulunmuştur. Bu yüzden örneklerin kurutulma sıcaklığının Atterberg limitlerine etkisi incelenmiştir. 25°C'da ve 105°C'da kurutulmuş örneklerin likit limitleri sırasıyla %47.1 ve %45.2 olarak belirlenirken, plastik limitleri ise %26.4 ve %24.8 olarak tespit edilmiştir. Örnekleri kurutma sıcaklığının Atterberg limitleri üzerindeki etkisi ihmal edilebilir seviyelerde olduğu görülerek tüm örnekler etüvde 105°C'de kurutulmuş ve öğütülerek toz haline getirilmiştir.

3.2. Tek Eksenli Basınç Deneyleri

Bu çalışma için hazırlanan farklı karışım oranlarına sahip örneklerin farklı kür sürelerine karşılık gelen SBD sonuçları Şekil 4'de

gösterilmiştir. Toplamda 8 bağlayıcı oranına karşılık 4 farklı kür süresi ve her kür süresi için iki örnek olmak üzere 64 örnek deney tabii tutulmuştur. Deney sonuçları Şekil 7'de toplu olarak bar grafikler ile ifade edilmiştir. Şekil incelendiğinde artan bağlayıcı oranı ve artan kür süresi ile mukavemetin arttığı, en yüksek basınç dayanımının 500 kPa ile %8 kireç ve %8 çimento karışımı ile stabilize edilen örneğin 56 günlük dayanımı olduğu, çimento içeren örneklerin daha kısa sürede dayanım kazanırken kireç içeren örneklerin daha uzun bir sürede fakat artan bir şekilde dayanım kazandığı, düşük bağlayıcı oranlarında dayanımın zaman içerisinde gelişemediği görülmüştür.

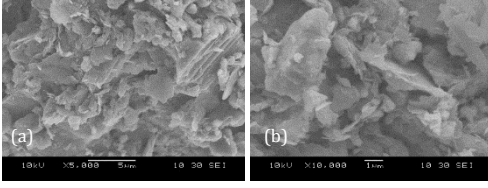
Ayrıca %4 kireç veya %4 çimento ya karşılık %2 çimento +%2 kireç gibi eşit toplam karışım oranına sahip örneklerde kireçli karışımların daha yüksek performansa sahip olduğu ve dayanım trendinin zaman içerisinde yükseliş gösterdiği görülmüştür. Bu çalışma kapsamında olmayan, katkı oranlarının tek eksenli basınç dayanımları üzerine etkisi Sarıavcı [22] tarafından değerlendirilmiştir.



Şekil 4. Tüm örneklere ait tek eksenli basınç deney sonuçları (K: Kireç, Ç: Çimento)

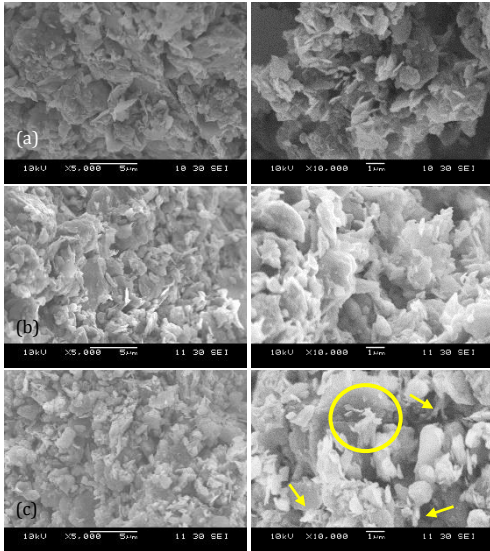
3.3. Taramalı Elektron Mikroskopi (SEM) Mikrografikleri

Katkı maddeleri ile reaksiyon sonucu zemin iskeletinde meydana gelen değişimler SEM görüntüleri ile izlenmiştir. Tek eksenli basınç deney sonuçları göz önüne alınarak, zemin iskeletindeki mikro değişimleri daha iyi takip edebilmek için SEM analizlerinde sadece kireç ve çimento-kireç karışımları ile stabilize edilmiş örnekler üzerinde çalışılmıştır. Katkı maddeleri ile işlenmemiş ham durumdaki zemin örneğinin görüntüleri referans teşkil etmesi amacıyla 5000 ve 10000 kat yaklaştırma ile görüntülenmiştir (Şekil 5a ve 5b).



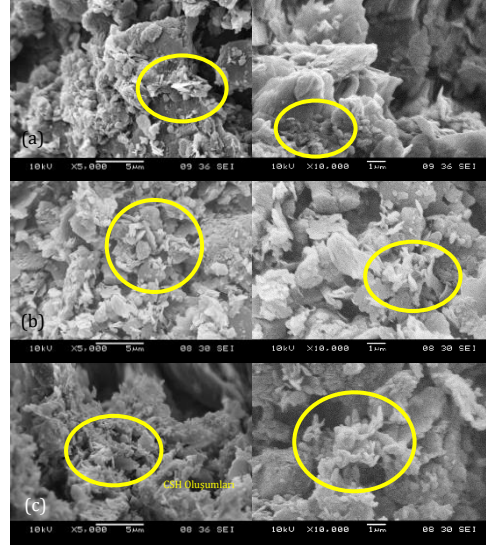
Şekil 5. Doğal zemin örneğinin farklı yaklaşımlardaki SEM görüntüsü

Görüntüler incelendiğinde ham durumdaki zeminin yapraklı birimlerden oluştuğu ve süresiz bir yapıya sahip olduğu ve daneler arası boşlukların açıkça görülebildiği gözlenebilir. Şekil 6'da %2, %4 ve %8 kireç katkısının 7 günlük kür süresindeki etkisi görülmektedir. Her katkı oranı için görüntüler 5000 ve 10000 yaklaştırma ile alınmıştır. Kireç katkılı örneklerde %2 kireç katkılı örnekler hariç zemin iskeletinin ayrık dane yapısından daha bütünleşmiş bir yapıya doğru geçtiği görülmektedir. Çimentolanma reaksiyonları mevcut daneleri daha bağlı bir yapıya taşımıştır. Bu durum Şekil 6b ve c'de görülebilmektedir. Çimentolanma ürünlerini 10000 yaklaştırma ile çekilmiş %8 kireç katkısına sahip zemin örneğinde izlemek mümkündür (Şekil 6c). Bu tür yapıların miktarı kür süresi arttıkça artmıştır. Bu da %8 kireç ile iyileştirilmiş örneklerdeki tek eksenli basınç dayanım artışlarını açıklamaktadır.



Şekil 6. 7 gün kür süresine sahip (a) 2%, (b) 4%, (c) 8% kireç ile iyileştirilmiş zeminin SEM görüntüleri

Öte yandan %2 kireç katkısına karşılık gelen karışım (Şekil 6a) işlenmemiş zemin (Şekil 5) ile kıyaslandığında zemin yapısında neredeyse hiçbir değişim gözlenmemiştir. Bu durum eklenen kireç miktarının stabilizasyonu başlatmak için gerekli eşik seviyesinin altında kaldığından dolayı gözlemediği düşünülmüştür. Bu olgu tek eksenli basınç dayanım sonuçları ile de paralellik göstermiştir. %2 kireç katkısının 7 günlük tek eksenli basınç dayanımı dikkate alındığında stabilizasyon reaksiyonlarının henüz gelişmediği görülebilir.



Şekil 7. 28 gün kür süresine sahip (a) 2%, (b) 4%, (c) 8% kireç ile iyileştirilmiş zeminin SEM görüntüleri

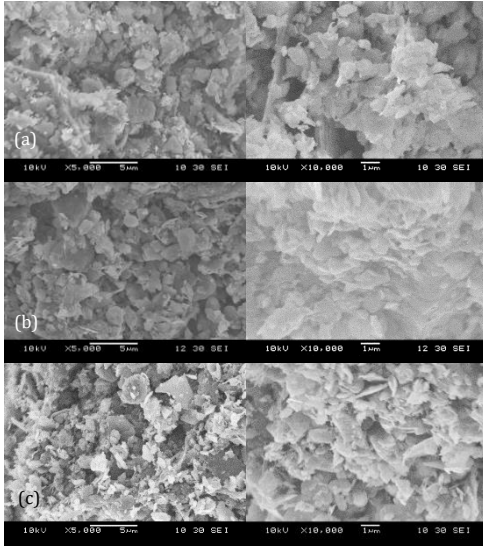
Şekil 7'da kireç stabilizasyonunun zemin yapısında meydana getirdiği değişimler çok daha iyi bir şekilde izlenebilmektedir. Bu şekilde aynı kireç oranlarına sahip örneklerin 28 günlük kür süresi sonundaki durumları gösterilmiştir.

28 günlük örneklerde ince danelerin etrafını kaplayan ve daha iri daneler şekline getiren jel formundaki Kalsiyum Silikat Hidrat (CSH)'ın yanında Kalsiyum Alüminat Hidrat (CAH) da açık bir şekilde görülmüştür. CSH kristallerine özellikle %8 kireç oranına sahip örneklerde daha sık rastlanmıştır.

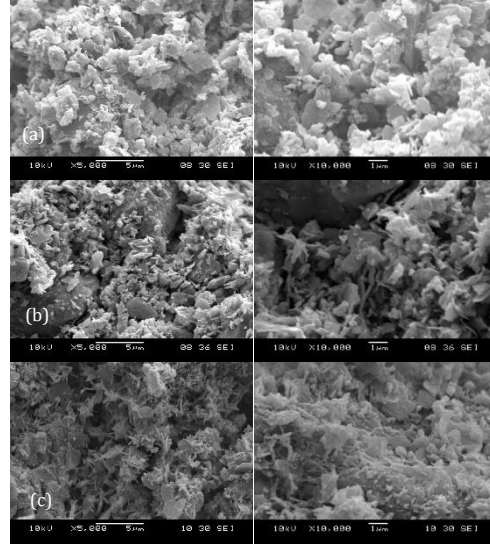
Şekil 8 ve 9'de kireç ve çimento ile stabilize edilmiş örneklerin 7 ve 28 günlük kür sürelerine karşılık gelen SEM görüntüleri görülebilir. Daha önce gözlenen sadece kireçli örneklerdeki yapıya ek olarak kristal oluşumlarının da özellikle 28 günlük kür süresine sahip %8 kireç

ve %8 çimentolu örneklerde izlenebildiği görülebilir.

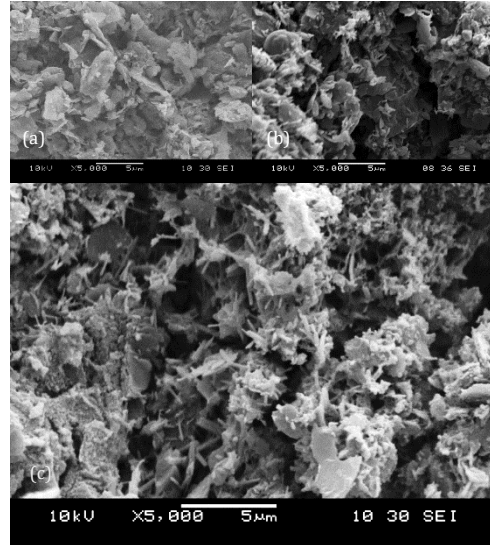
Şekil 10 incelendiğinde çimento katkısının zeminin boşluk yapısını azalttığı ve daha rijit bir kütleye dönüştürdüğü bunun da zeminin kayma dayanımına katkı sağladığı görülebilmektedir. Özellikle Şekil 10c'de görülen iğnemi formdaki çimentolanma ürünleri %8 kireç ve %8 çimento ile iyileştirilmiş zeminin yüksek tek eksenli basınç dayanımını açıklamaktadır.



Şekil 8. Kireç ve çimento karışımları ile iyileştirilmiş 7 gün kür süresine sahip zeminin ((a) 2%+2%, (b) 4%+4%, (c) 8%+8%) SEM görüntüleri



Şekil 9. Kireç ve çimento karışımları ile iyileştirilmiş 28 gün kür süresine sahip zeminin ((a) 2%+2%, (b) 4%+4%, (c) 8%+8%) SEM görüntüleri



Şekil 10. İyileştirilmemiş (a) ve kireç çimento karışımları ile iyileştirilmiş (b) 4%+4% ve (c) 8%+8% zeminin 28 gün kür sonucu SEM görüntüleri

Şekil 10'de gözlenebilen reaksiyon ürünleri dikkate alındığında boşluk yapısındaki azalmadan kaynaklanan stabilizasyon daha belirgin bir şekilde izlenmektedir. Çimentolanma ürünlerinin oluşumu işlenmemiş durum ile (Şekil 10a) kristal yapıların gözlemlendiği

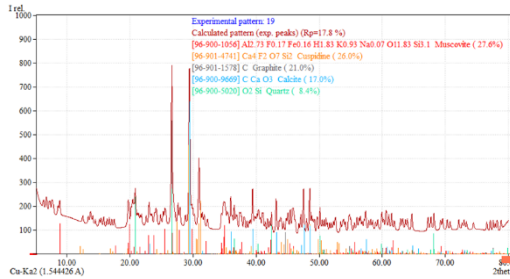
iyileştirilmiş durum (Şekil 10c) kıyaslandığında çok daha iyi görülmektedir.

Elde edilen SEM görüntülerine bakıldığında, iyileşmiş zeminlerin homojen bloklardan oluştuğu söylenebilir. Bu sonuca bakarak bu çalışmada kullanılan örnek oluşturma tekniğinin başarılı olduğu söylenebilir. Bir başka önemli nokta ise çimentolanma reaksiyonları için gerekli nemin örneklerin suya batık olarak kür edilmesi ile karşılandığı ve bu süreçte yerleştirilen filtre kağıtlarının önemli bir işlevi olduğudur.

Bu çalışmadaki bir başka sonuç ise SEM görüntüleri ile dayanım deneylerinden elde edilen sonuçların paralellik gösterdiğidir. Karışım oranı ve kür süresine bağlı olarak yüksek dayanıma sahip örneklerde hidrasyon reaksiyonları sonucu oluşan bileşenlere daha fazla rastlanmıştır.

3.4. X-Işını Kırınım (XRD) Deney Sonuçları

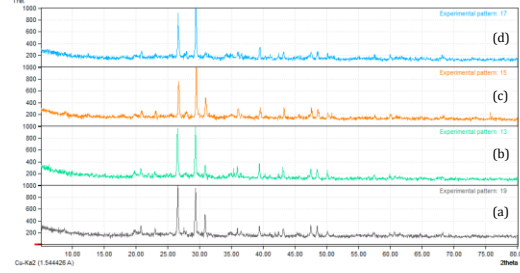
SEM analizlerinde olduğu gibi XRD analizlerinde de sadece kireç ve çimento-kireç karışımları ile stabilize edilmiş örnekler üzerinde çalışılmıştır. Buna ek olarak tarama malzemesinin doğal durumu da XRD deneyi ile incelenmiştir. Elde edilen kırınım verilerini işlemek için, "Match! - Phase Identification from Powder Diffraction" yazılımı kullanılmıştır. Şekil 11'da doğal durumdaki tarama malzemesinin X-ışını kırınım grafiği görülmektedir. Bu şekilde görüldüğü gibi tarama malzemesinin ana yapısının muscovite ve cuspidine'den oluştuğu söylenebilir. Üçüncü ve dördüncü ana mineral bileşenleri ise sırasıyla graphite ve calcite olarak belirlenmiştir. Diagrama bakıldığında hatırı sayılır bir oranda quartz'ında var olduğu görülmektedir. Adı geçen minerallerin formülasyonu ve oranları Şekil 11'da gösterilmiştir ve kırınım diyagramının altında renkli barlar ile pik noktalar ve bileşenler işaretlenmiştir. Kırınım grafiğinde bazı kirletici metallere de rastlanılmış fakat çok düşük oranlarda oldukları için dahil edilmemişlerdir.



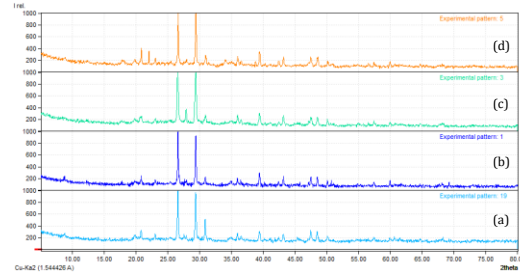
Şekil 11. Doğal tarama malzemesinin X-ışını kırınım grafiği

Şekil 12'den Şekil 15'e kadar katkı maddesi oranının 7 ve 28 gün kür süreleri için XRD grafiğindeki etkisini göstermektedir. Şekil 12'de düşük oranlardaki kirecin (%2) 7 gün için mineralojik açıdan önemli bir etkiye sahip olmadığını göstermektedir. Bunun yanında %4 ve %8 kireç oranları zeminin mineralojisinde az da olsa etkili olabilmıştır. Öte yandan, 28 gün kür süresine sahip örneklerin grafiklerinde özellikle %8 kireç içeriği için yeni kırınım gözlenmiştir. Bu sonuca göre tarama malzemesinde mineralojik açıdan değişimlerin 28 günden sonra başladığı söylenebilir.

Şekil 13 kireç içeriğindeki artışa bağlı olarak kırınımındaki artan şiddeti de göstermektedir. Yeni kırınım ve artan şiddetler göz önüne alındığında kireç ile tarama malzemesi arasında kireç içeriğine bağlı olarak artan bir oranda reaksiyonların gerçekleştiği söylenebilir. Aynı durum kür süresi içinde geçerlidir. Aynı oranda kireç içeriğine sahip örnekler karşılaştırıldığında (Şekil 12-13) kür süresi uzadığında kırınım ve kırınımın şiddetlerinde artışlar gözlenmektedir.



Şekil 12. İşlenmemiş (a), %2 kireç (b), %4 kireç (c) ve %8 kireç ile iyileştirilmiş zeminin 7 gün sonunda X-ışını kırınım grafikleri

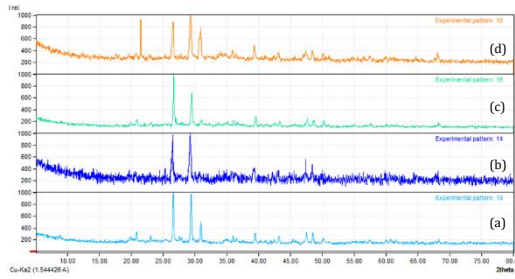


Şekil 13. İşlenmemiş (a), %2 kireç (b), %4 kireç (c) ve %8 kireç ile iyileştirilmiş zeminin 28 gün sonunda X-ışını kırınım grafikleri

Zayıf Meles Deltası zeminlerinin XRD deney sonuçları stabilizasyonun genel olarak mineralojik değişimlerden bağımsız olduğunu

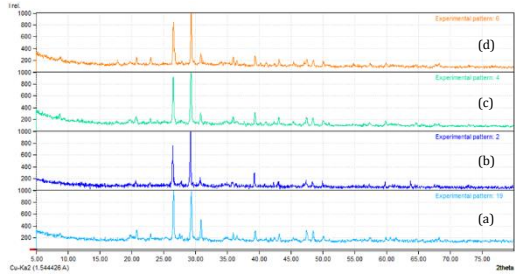
göstermektedir. Dayanımdaki artışın kirecin hidrate olurken zemin bünyesinden aldığı su ile katlaşması ve zemin danelerinin birlerine bağlanması neticesinde dane boyutunun artması neticesinde geliştiği kanaatine varılmıştır.

Şekil 14 ve 15 değişik kireç-çimento oranlarına karşılık tarama malzemesinin XRD grafiklerini göstermektedir. Sadece kireçli karışımlara ters bir şekilde çimento-kireç karışımları zemin mineralojik yapısında önemli değişikliklere neden olmuştur. Şekil 14'ye bakıldığında 7 gün kür süresine sahip örneklerde yeni kırınım pikleri görülebilir. Aynı durum Şekil 15'de 28 gün kür süresine sahip örnekler için aynı piklerde daha şiddetli olmuştur.



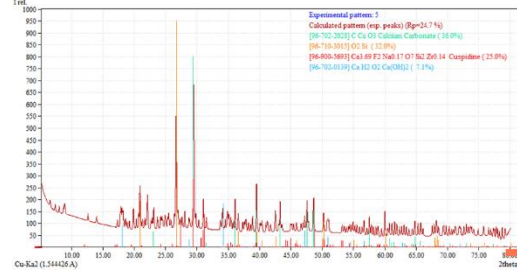
Şekil 14. İşlenmemiş (a), %2 kireç + %2 çimento (b), %4 kireç + %4 çimento (c) ve %8 kireç + %8 çimento ile iyileştirilmiş örneklerin 7 gün sonunda X-ışını kırınım grafikleri

Şekil 16 ve 17 kırınım örüntülerinden çok 28 gün kür süresine sahip örneklerde reaksiyon ürünlerinin tespiti için incelenmiştir. Şekil 16 %8 kireç ile iyileştirilmiş Meles Deltası zeminlerinin kırınım grafiğini göstermektedir.

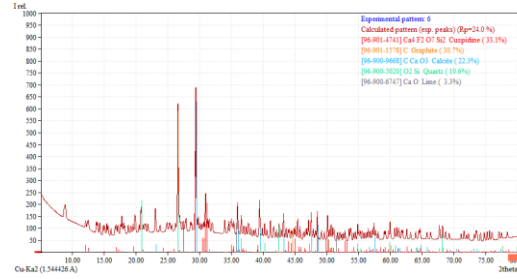


Şekil 15. İşlenmemiş (a), %2 kireç + %2 çimento (b), %4 kireç + %4 çimento (c) ve %8 kireç + %8 çimento ile iyileştirilmiş örneklerin 28 gün sonunda X-ışını kırınım grafikleri

Bu şekilde, dikkate değer bir şekilde kalsiyum karbonat kırınımı belirlenmiştir. Bu durumun büyük bir olasılıkla kirecin örneğin kalıplanması sırasında atmosfer ile teması sonucu karbonatlaşması ile oluştuğu düşünülmektedir.



Şekil 16. %8 kireç ile iyileştirilmiş zeminin 28 gün sonunda X-ışını kırınım grafikleri



Şekil 17. %8 kireç ve %8 çimento ile iyileştirilmiş zeminin 28 gün sonunda X-ışını kırınım grafikleri

Karbonatlaşma ürünleri %8 kireç ve %8 çimento kullanılarak iyileştirilen tarama malzemesinde de Şekil 17'de gösterildiği şekilde bulgulanmıştır. Çimentonun da eklenmesi ile CSH ve CAH oluşumlarının sadece kireç ile iyileştirilen tarama malzemesine göre daha belirgin olduğu görülmüştür. Ancak Şekil 17'de az miktar kireç kırınımı da belirlenmiştir. Bu durum çimento katkısı ile kireç ve tarama malzemesi arasındaki reaksiyonun hızının azalması olarak yorumlanmıştır. Bu gözlem Lasledj ve Al-Mukhtar'ın [23] gerçekleştirdiği çalışma ile benzerlik göstermektedir.

4. Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında İzmir Körfez bölgesi doğu kıyı şeridi delta zeminlerinden örnekler alınmış, laboratuvarında farklı kireç ve çimento oranları ile yerinde yapılacak derin karıştırma uygulaması ile uyumlu olacak şekilde örnekler hazırlanmış ve bu örnekler üzerinde tek eksenli basınç deneyleri ve XRD ve SEM analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu makalede farklı oranlarda kireç ve çimento katkısının zemin yapısını nasıl etkilediği XRD ve SEM analizleri ile ortaya koyulmaya çalışılmıştır. Çalışma neticesinde şu sonuçlara ulaşılmıştır:

- Elde edilen SEM görüntülerine bakıldığında, iyileşmiş zeminlerin homojen bloklardan

oluştugu görülmüştür. Bu da çalışmada kullanılan örnek oluşturma tekniğinin başarılı olduğunu göstermektedir. Bir başka önemli nokta ise çimentolanma reaksiyonları için gerekli nemin örneklerin suya batık olarak kür edilmesi ile karşılandığı ve bu süreçte yerleştirilen filtre kağıtlarının önemli bir işlevi olduğudur.

- Bu çalışmadaki bir başka sonuç ise SEM görüntüleri ile dayanım deneylerinden elde edilen sonuçların paralellik gösterdiği. Karışım oranı ve kür süresine bağlı olarak yüksek dayanıma sahip örneklerde hidrasyon reaksiyonları sonucu oluşan bileşenlere daha fazla rastlanmıştır.

- Yüksek %4 kireç + %4 çimento ve %8 kireç + %8 çimento gibi yüksek oranda katkı maddesi içeren numunelerde içnemsis formlarda çimentolanma ürünlerine rastlanmış ve bu bulgu tek eksenli basınç deney sonuçları ile desteklenmiştir.

- İyileştirilmiş zeminlerdeki jel formdaki CSH ve CAH oluşumları ve CSH kristalleri SEM görüntülerinde açıkça görülmüş ve bu oluşumların bağlayıcı oranı arttıkça artış gösterdiği belirlenmiştir.

- XRD deney sonuçlarına göre, tarama malzemesinde mineralojik açıdan değişimlerin 28 günden sonra başladığı belirlenmiştir.

- Zayıf Meles Deltası zeminlerinin XRD deney sonuçları stabilizasyonun genel olarak mineralojik değişimlerden bağımsız olduğunu göstermiştir. Dayanımdaki artışın kirecin hidrate olurken zemin bünyesinden aldığı su ile katlaşması ve zemin danelerinin birlerine bağlanması neticesinde agrega boyutunun artması neticesinde geliştiği kanaatine varılmıştır.

- Çalışma delta zeminlerinin kimyasal bağlayıcılar ile önemli oranda stabilize edilebileceğini kanıtlamıştır. Optimum bağlayıcı yüzdesi ve çeşiti, bölgede planlanan yapıların zemine aktaracağı gerilmelere bağlı olmakla beraber, tek eksenli basınç deneyleri, SEM ve XRD analizleri beraber değerlendirildiğinde %4 kireç ve %4 çimento katkısının önerilebileceği sonucuna varılmıştır.

Teşekkür

Bu çalışma Doç.Dr. Ali Hakan Ören yürütücülüğündeki 111M718 numaralı Tübitak projesi tarafından sağlanan ekipman ve finans desteği ile gerçekleştirilmiştir.

Kaynakça

- [1] Bruce, D.A., Bruce, M.E.C. and Dimillio, A.F., 1999. Dry mix methods: A brief overview of international practice. In Proceedings of International Conference on Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization, Balkema, Rotterdam (pp. 15-25).
- [2] Timoney, M.J. and McCabe, B., 2012. Experiences of dry soil mixing in organic soils. *Journal of Engineering Geology*, 19(1), pp.7-80.
- [3] Baran, T. ve Gülay, M. İzmir Meles Çayı Deltası İslah projesi, Türkiye İnşaat Mühendisliği XVII. Teknik Kongre ve Sergisi, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, 14 - 17 Nisan 2004, İstanbul.
- [4] Locat, J., Bérubé, M.A. and Choquette, M., 1990. Laboratory investigations on the lime stabilization of sensitive clays: shear strength development. *Canadian Geotechnical Journal*, 27(3), pp.294-304.
- [5] Bell, F.G., 1996. Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering geology*, 42(4), pp.223-237.
- [6] Prusinski, J. and Bhattacharja, S., 1999. Effectiveness of Portland cement and lime in stabilizing clay soils. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1652), pp.215-227.
- [7] Esrig, M.I., Mac Kenna, P.E. and Forte, E.P., 2003. Ground stabilization in the United States by the Scandinavian lime cement dry mix process. In *Grouting and Ground Treatment* (pp. 501-514).
- [8] Rajasekaran, G., 2005. Sulphate attack and ettringite formation in the lime and cement stabilized marine clays. *Ocean Engineering*, 32(8-9), pp.1133-1159.
- [9] Boardman, D.L., Glendinning, S. and Rogers, C.D.F., 2001. Development of stabilisation and solidification in lime-clay mixes. *Geotechnique*, 51(6), pp.533-543.
- [10] Bergado, D.T., Anderson, L.R., Miura, N. and Balasubramaniam, A.S., 1996, January. Soft ground improvement in lowland and other environments. ASCE.
- [11] Hebib, S. and Farrell, E.R., 2003. Some experiences on the stabilization of Irish peats. *Canadian geotechnical journal*, 40(1), pp.107-120.
- [12] Hernandez-Martinez, F.G., & Al Tabbaa, A. (2005). Strength properties of stabilised peat. *Proceedings of the International Conference on Deep Mixing - Best Practice and Recent Advances*. Swedish Deep Stabilisation Research Centre, Stockholm, Sweden, (1), 69-78.
- [13] Axelsson, K., Johansson, S.E. and Andersson, R., 2002. Stabilization of organic soils by cement and Pozzolanic reactions-feasibility study. *Swedish Deep Stabilization Research Centre, Report*, 3, pp.1-51.
- [14] Wang, D., Abriak, N.E., Zentar, R. and Chen, W., 2013. Effect of lime treatment on geotechnical properties of Dunkirk sediments in France. *Road Materials and Pavement Design*, 14(3), pp.485-503.
- [15] Grubb, D.G., Chrysochoou, M., Smith, C.J. and Malasavage, N.E., 2010. Stabilized dredged material. I: Parametric study. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(8), pp.1011-1024.

- [16] Miura, N., Horpibulsuk, S. and Nagaraj, T.S., 2001. Engineering behavior of cement stabilized clay at high water content. *Soils and Foundations*, 41(5), pp.33-45.
- [17] Di Sante, M., Fratalocchi, E., Mazziere, F. and Pasqualini, E., 2014. Time of reactions in a lime treated clayey soil and influence of curing conditions on its microstructure and behaviour. *Applied Clay Science*, 99, pp.100-109.
- [18] Rajasekaran, G., Murali, K. and Srinivasaraghavan, R., 1997. Fabric and mineralogical studies on lime treated marine clays. *Ocean engineering*, 24(3), pp.227-234.
- [19] Dash, S.K. and Hussain, M., 2011. Lime stabilization of soils: reappraisal. *Journal of materials in civil engineering*, 24(6), pp.707-714.
- [20] Jose, B.T. (1989). A study of the physical and engineering behaviour of Cochin marine clays. Ph.D. Thesis, Cochin University of Science and Technology, Cochin.
- [21] LADES, J. and GRIM, R., 1966. A quick test to determine lime requirements of lime stabilisation. *Highway Research Record*, 139, pp.61-72.
- [22] Sarıavcı, C., (2016). Stabilizing Meles Delta Soils and Monitoring the Bonding Structures Using SEM and XRD Analyses. Dokuz Eylül University Graduate School of Natural and Applied Sciences. Master Thesis.
- [23] Lasledj, A. and Al-Mukhtar, M., 2008, October. Effect of hydrated lime on the engineering behaviour and the microstructure of highly expansive clay. In *The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics*.