



**T.C.
BİLECİK ÜNİVERSİTESİ
BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJESİ SONUÇ RAPORU**

**KARAYOLLARINDA UYGUN ALT TEMEL VE TEMEL
MALZEMESİNİN SEÇİLMESİ**

PROJE YÜRÜTÜCÜSÜ: Yrd. Doç. Dr. Nazile URAL

ARAŞTIRMACILAR: Arş. Gör. Burak GÖRGÜN

BAŞLAMA TARİHİ: 01.02.2012

BİTİŞ TARİHİ:01.08.2013

BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ

BİLECİK, 2013

İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER	i
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	iii
TABLolar LİSTESİ.....	v
ÖZET.....	vi
ABSTRACT.....	vii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	5
3. ZEMİNLERİN STABİLİZASYONU.....	14
4. KULLANILAN MALZEMELER VE YÖNTEM.....	16
4.1.KULLANILAN MALZEME.....	16
4.2.GEOTEKNİK DENEY ÇALIŞMA PLANI.....	18
4.2.1.DANE ÇAPI DAĞILIMI.....	19
4.2.2.KIVAM LİMİTLERİ.....	19
4.2.3.STANDAR PROKTOR DENEYİ.....	20
4.2.4.SERBEST BASMA DENEYİ.....	21
4.3.FİZİKO-KİMYSA L DENEY ÇALIŞMA PLANI.....	22
4.3.1. X-IŞINI KİRİNİM (XRD)	22
4.3.2. AZOT ADSORPSİYON İLE YÜZEY ALANI ÖLÇÜM ANALİZİ (BET).....	22
4.3.3. CİVA POROZİMETRESİ ANALİZİ.....	22
4.3.4.SEM İLE MİKROYAPI ANALİZİ.....	23
5.DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME.....	23
5.1.DANE ÇAPI DAĞILIMI.....	25

5.2.KIVAM LİMİTLERİ.....	25
5.3.STANDAR PROKTOR DENEYİ.....	25
5.4.SERBEST BASMA DENEYİ.....	27
5.5. X-IŞINI KIRINIM (XRD).....	28
5.6. AZOT ADSORPSİYON İLE YÜZEY ALANI ÖLÇÜM ANALİZİ (BET)	28
5.7. CİVA POROZİMETRESİ ANALİZİ.....	28
5.8. SEM İLE MİKROYAPI ANALİZİ.....	28
6.SONUÇLAR VE ÖNERLER.....	35
7. KAYNAKLAR.....	36
8. EKLER.....	38
8.1. MALİ ETKİNLİKLER.....	38
8.2.YAYIMLANMIŞ BİLDİRİLER.....	38
8.3.ANALİZ SONUÇLARI.....	39

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Kil-kum karışımı Proktor deney sonuçları (Kumar vd., 2006).....	9
Şekil 2.2. Kum oranının serbest basınç mukavemeti üzerine etkisi (Kumar vd., 2006).....	9
Şekil 2.3. Çimento ve kireç eklenmesiyle dayanımın artması arasındaki ilişki.....	11
Şekil 2.4. Zeminin plastisitesine kirecin etkisi.....	12
Şekil 2.5. Düşük plastisiteli kilin kompaksiyon eğrisine kirecin etkisi.....	13
Şekil 4.1. a.Kaolin kili b.Bentonit kili c.Kum d.Silis kumu.....	17
Şekil 4.2. a.Kireç b.Çimento c.Mermer parçaları.....	17
Şekil 4.3 Kompaksiyon deney seti.....	20
Şekil 4.4 Tek eksenli basınç deneyi.....	21
Şekil 4.5 Serbest basma deneyi sonrası numuneler.....	21
Şekil 5.1 Dane dağılımı eğrisi.....	24
Şekil 5.4 Silt XRD sonuçları.....	29
Şekil 5.5 Bentonit ve Kaolin kili XRD sonuçları.....	29
Şekil 5.6.a. Silt ve Kaolin ilaveli karışımın XRD sonuçları b. Silt ve Bentonit ilaveli karışımın XRD sonuçları.....	30
Şekil 5.7 Siltin civa porozimetresi sonuçları.....	31
Şekil 5.8 Siltli kaolin karışımlarının civa porozimetresi sonuçları.....	31
Şekil 5.9 Siltli bentonit karışımlarının civa porozimetresi sonuçları.....	31
Şekil 5.10 Siltin BET izotermi.....	32
Şekil 5.11 Siltli kaolinin BET izotermi.....	32
Şekil 5.12 Siltli bentonitin BET izotermi.....	33
Şekil 5.13 Siltli SEM görüntüleri a. 1000x b.5000x c.10000x.....	33

- Şekil 5.14 SEM görüntüleri (5000x)a.10% Kaolin.20% Kaolin c.40% Kaoli.....34
- Şekil 5.15 SEM görüntüleri (5000x)a.10% Bentonit 20% Bentonit c.40% Bentonit..34

TABLÖLAR LİSTESİ

Çizelge 5.1 Kullanılan malzemelerin fiziksel özellikleri.....	24
Çizelge 5.2. Optimum su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık değerleri.....	26
Çizelge 5.3. Optimum su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık değerleri.....	27

KARAYOLLARINDA UYGUN ALT TEMEL VE TEMEL MALZEMESİNİN SEÇİLMESİ

ÖZET

Karayolu ulaşımının, ekonomik faaliyet ve yatırım alanındaki yeri çok önemlidir. Farklı ulaşım sistemleri ile karşılaştırıldığı zaman, gelişen dünyada karayolu ulaşımının önemi açıkça görülür. Bu nedenle karayolu bakımı ve gelişimi tüm ekonomik ve sosyal yaşam için önemlidir. Karayolunda meydana gelen problemlerin kısa sürede ve uzun vadede çözülmesi istenmektedir. Çünkü küreselleşen dünyada karayolu ulaşımı diğer ulaşım yollarından çok daha fazla tercih edilmektedir. Özellikle Türkiye’de ağır taşıtlar, karayolunu maksimum ağırlıkta taşıdıkları ticari malzemelerle, kilometrelerce yol kat etmektedirler. Sosyal yaşamın kolay bir şekilde devam etmesi ve insan güvenliğinin sağlanması açısından karayolu inşa aşamasında gerekli tüm incelemelerin yapıp uzun vadede sorun çıkarmayan karayollarının yapılması tercih edilmektedir. Özellikle yol temelinde kullanılacak malzemenin dayanım özelliklerinin çok iyi test edilmesi ve boyutlandırmasının yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada, karayolu yapımında kullanılan alt temel malzeme ve temel malzemesinin mekanik deneyleri yapılarak fiziko-kimyasal analizlerin sonuçlarıyla ilişkilendirilecektir.

Kaynaklar: Temel malzemesi, Alt temel malzemesi, Fiziko-kimyasal özellikler, Geoteknik özellikler

SELECTION OF SUBBASE AND BASE MATERIALS IN HIGHWAYS

ABSTRACT

Road transport is very important in the field of economic activity and investment. When compared with the different transport systems, it is clear the importance of road transport in the developing world. Therefore, road maintenance and development is important for all economic and social life. To problems that occur on highways is required long-term solution as soon as possible. Because, road transport is far preferable in the globalized world more. Especially in turkey, heavy goods vehicles for miles and miles are traveled. Especially, for strength properties of soil used in road construction required very good test. In this study, the road sub-base material and the base material will carry out mechanical test.

Keywords: Base materials, Subbase materials, Physico-chemical properties, Geotechnical properties

1. GİRİŞ

Karayolu ulaşımının yeri yaşamımızda oldukça önemlidir. Karayolları, belirlenen geometrik standartlara uygun güzergah boyunca, uygun doğal zemin yüksekliğinde ve taşıtların istenilen hız, güvenlik ve konfor koşullarında hareket edebilmeleri için inşa edilen yapıların tümü olarak tanımlanabilir. Karayolu üstyapısı, taşıtlardan kaynaklanan yükleri altyapının taşıyabileceği değere indirmek, altyapıyı korumak ve düzgün bir yuvarlanma yüzeyi sağlamak amacıyla altyapı üzerine yerleştirilen çoğunlukla alt temel, temel ve kaplamadan oluşan tabakalı yol yapısı olarak tanımlanmaktadır. Temel malzemesi, standartlarda belirtilen gradasyon, dane yapısı, dayanımı, donma direnci ve esneklik modülü gibi özellikleri sağlamalıdır. Kaplama altındaki temel agrega tabakası, bağlayıcısız ya da bir bağlayıcı malzeme ile işlem görmüş olan belirli dane dağılımına sahip malzemedir. Ana görevi, üstyapının yük taşıma yeteneğini artırmaktır.

Karayolunda uzun üstyapı ömrünü sağlayan ana unsur, üstyapıda oluşan bozulmalara ve bu bozulmalar sonucunda gereken pahalı yeniden yapımlara engel olacak, stabil temel üzerine oturtulmuş uygun kalınlıkta üstyapı tabakalarıdır. Yolun trafik yüklerini taşıyan ve gerilmeleri dağıtmak üzere, yolun taban yüzeyi üzerine yerleştirilen tabakalı sisteme üstyapı adı verilir. Yol üstyapısını esnek ve rijit üstyapılar olarak iki ana gruba ayırmak mümkündür. Ülkemizde çok büyük ölçüde esnek üstyapılar kullanılmaktadır. Esnek üstyapılar, aşınma tabakası, binder tabakası, temel tabakası ve alt temel tabakalarından oluşmaktadır. Taban zemini üzerine oturan esnek yol üstyapısının başarısı, tabakaların ve taban zeminin şartnamelere uygun şekilde

projelendirilip, inşa edilmesine bağlıdır. Aşınma ve binder tabakaları bitümlü karışımlardan oluşmaktadır. Ancak, yoldaki ağır taşıt trafiğine ve trafik hacmine bağlı olarak temel tabakası da bitümlü karışımlardan oluşabilir.

Ülkemizde granüler malzeme kaynağının fazla olmasından dolayı temel ve alt temel tabakalarında granüler malzeme yaygın olarak kullanılmaktadır. Fakat hammaddelerinin günümüzde yeterinden fazla kullanılması doğal kaynakların tüketimini arttırmıştır. Yol kaplama tabakasının altında temel tabakası bulunur. Temel tabakası bir veya birden fazla tabakadan oluşabilir. Temel tabakasının esas görevi taşıtların geçişlerinden dolayı oluşan gerilmeleri alt temele taşıma gücü sınırları içerisinde yaymaktır. Temel tabakası duruma göre çimentolu veya bitüm bağlayıcı karışım, stabilize edilmiş zemin veya dikkatle seçilmiş granüler malzeme olabilir. Temel tabakasının altında alt temel tabakası bulunur. Alt temelin esas görevi, bitümlü tabakaların inşası için çalışma platformu oluşturmaktır. Bu tabakada kullanılan malzemeler genel olarak temel tabakasına göre daha düşük kalitelidir ve granüler malzemedir. Mümkün mertebe yerel malzemeler ve yol inşaatında kullanılmaya elverişli atık malzemeler (molozlar, cürufklar, inşaat artıkları gibi) kullanılmaya çalışılır. Taban zemini, sıkıştırılmış doğal zemin ya da dolgu malzemesinden oluşur. Bu tabaka, üstyapıya temel görevi yapar. Yapısal olarak en önemli tabakadır. Trafik yükü son olarak bu tabakaya iletilir. Bu tabakanın görevini iyi yapabilmesi için iyi bir drenaja ihtiyacı vardır.

Yapısal olarak üstyapı, temel malzemelerinde veya taban zemininde deformasyonlara izin vermeyecek yeterli kalınlık ve sertliğe sahip olmalıdır. Üstyapı

tabanı, uzun ömürlü üstyapıların yapımı ve performansı açısından çok önemlidir. Taban, yapım süresince kullanılan iş makinelerinin çalışacağı düzgün bir yüzey oluşturan, kullanılacak malzemeleri taşıyan, bunun yanında üst bitüm tabakalarının yeterli oranda sıkışmasını sağlayan silindirlerin etkilerine karşı deformasyon direnci sağlayan kısımdır. Taban, performans periyodu boyunca trafik yüklerine karşı dayanım sağlama ile mevsimsel donma/çözülme ve nem oranındaki değişikliklerden kaynaklanan dayanımdaki değişikliklerin azaltılması açısından önemlidir. Tabanın uygun şekilde dizayn ve yapımıyla, killi zeminlerde ıslanma/kuruma dönemlerinde, dona karşı hassas zeminlerde donma/çözülme dönemlerinde meydana gelen hacim değişikliklerini önlemek mümkündür. Üstyapı tabanı, sıkıştırılmış taban zemininden, kimyasal maddelerle stabilizasyon yapılmış taban zemini veya granüler malzemeden, kırma taş veya çakıl gibi doğal granüler malzemelerden oluşabilmektedir. Kullanılan malzeme çeşidi ne olursa olsun, kaplama ömrü boyunca olduğu gibi yapım sırasında da taban yeterli sertliğe sahip olmalıdır. Bölge şartlarına ve üstyapı tasarımına bağlı olan bu durum, taban zemini veya temel malzemelerinde kimyasal veya mekanik stabilizasyon yapılarak giderilebilmektedir. Zemin stabilizasyonu, trafik değerine göre üstyapı projelendirilmesinde temel veya alt temel olarak değerlendirilebilir. Hafif trafikli yollarda geçici olarak kaplama vazifesi de görebilirler. Çimento ile stabilizasyon hafif trafikli yollarda kaplama olarak, orta ve yoğun trafikli yollarda temel tabakası olarak kullanılabilir.

Teknolojik gelişmelere paralel olarak yaşam standartlarının yükselmesi ile insanların güvenli ve konforlu sürüş talebi artmıştır. Günümüz Türkiye'sinde ekonomik kalkınmanın ve refahın gelişmesinde büyük önemi olan karayolu taşımacılığının,

ulaştırma sekt6r6 içindeki payı giderek artan bir eğilim g6stermektedir. Devlet İstatistik Enstit6s6 verilerine g6re T6rkiye’de karayolu taşımacılığının payı 1970’de y6k taşımacılığında %61, yolcu taşımacılığında %91 iken, 2003 yılında y6k taşımacılığında %92, yolcu taşımacılığında %95 olup g6n6m6zde ise bu oran daha da y6kselmiştir. Bu y6zden yapılan 6styapı projelerinde genel amaç yapının uzun 6m6rl6 olmasındır. Bir yol yapılacağında, yolun geçeceği zemin yumuşak kil, gevşek kum, çakıl, vb. ise bu zemini uygun hale getirmek için uygun olmayan zemini uzaklaştırıp, yerine uygun zemin koymak, derin temel yapmak veya mevcut zemini stabilizasyon y6ntemleri uygulanmaktadır. Stabilizasyon zeminin 6zelliklerinin, çeşitli y6ntemlerle iyileştirilmesine verilen isimdir. Stabilizasyon yapılarak zeminin taşıma g6c6n6 artırmak, oturmaları ve deformasyonları azaltmak, geirirnililiği azaltmaktır. Zemin iyileştirme y6ntemlerinde temel amaç mekanik araçlarla zeminin boşluk oranının azaltılması veya zemin boşluklarının çeşitli bileşimdeki karışımlarla doldurulması işlemidir. 6zellikle yol g6zerg6hlarında plastikliği y6ksek kil zeminler karışımıza problem olarak çıkmaktadır. Bu sebeple kille zeminlerde, kimyasal stabilizasyon yaygın olarak kullanılmaktadır. Kimyasal stabilizasyonda katkı maddesi ile zemin arasındaki reaksiyon sonucu mekanik 6zelliklerde değişiklikler g6zlenmektedir. Bu nedenle mikroyapısal 6zellikler dikkate alınmadan zemin davranışı 6zerine yapılan laboratuvar çalışmalar yetersiz kalmaktadır. Bu çalışmada, karayolu yapımında kullanılan alt temel malzeme ve temel malzemesi olarak kullanılacak katkı malzemeli killerin fiziksel ve mekanik deneyleri yapılarak fiziko-kimyasal analizlerin sonuçlarıyla ilişkilendirilecektir.

ten

gid

ora

Bö

olu

kat

otu

ile

ola

koy

sag

pro

mal

esne

ilgil

basn

sürt

grar

öne

daha stabil bir malzeme olduğunu gözlemlemişlerdir. Temel malzemesinde kullanılan sıkı daneli agreganın performansını değerlendirmek için Amerika'da Ulusal taş derneğinin yaptığı (Aggregate Handbook, 1996) laboratuvar ölçümlerinde, arazideki temel malzemesinin ince yüzdesinin uygun aralığı %5-12 olarak verilmiştir. Cheung ve Dawson (2002), temel agrega gradasyonunun yol performansına ve diğer mühendislik özelliklerini nasıl etkilediğini incelemişlerdir. Ezilmiş dolomit kireçtaşı %0 ila %16.5 ince yüzdesi aralığında, üst limit, alt limit ve orta dane çapı dağılımlarına sahip malzemelerin dayanım özellikleri test edilmiştir. Sonuçlardan, düşük limit dane çapı dağılımına doğru (gevşek daneli) eksenel deformasyonun arttığı ve rijitliğin önemli derecede azaldığı gözlenmiştir. Tekrarlı yükleme altında orta gradasyonlu malzemenin direnci artarken, eksenel deformasyonun azaldığı belirtilmiştir. Farklı agregalar arasında değişen esneklik modülünün (M_r) fazla önemli olmadığı ve temel agregasının direnç özelliklerini belirlemede iyi bir ölçüm olmadığını öne sürmüşlerdir.

Ismail ve Raymond (2002), geniş bir aralıkta dane çaplarına sahip malzemelerin direnç ve performans özelliklerini incelemek için yapılan deney sonuçlarından sıkı daneli malzemenin konsolidasyonu gevşek malzemeye göre daha az olduğu gözlenmiştir. Sıkı daneli malzemedeki (No.50 den geçen) daha küçük danelerin kullanılmasından dolayı 200 nolu elekten geçen incelerin etkisi belirgin değildir. Farklı gradasyonlara sahip zeminlerin M_r değeri fazla değişmemiştir fakat artan deviyatör gerilmeyle M_r 'nin arttığı gözlenmiştir. Kolisoja vd. (2002), Finlandiya da 3 temel malzemesini donma çözünmenin yola verdiği zararı incelemek için, ince içeriği fonksiyonunu esneklik modülü ve kalıcı deformasyonun davranışını incelemişlerdir. İnce içeriğindeki yaklaşık %5 artışın donma kabarmasını önemli derecede artmasına

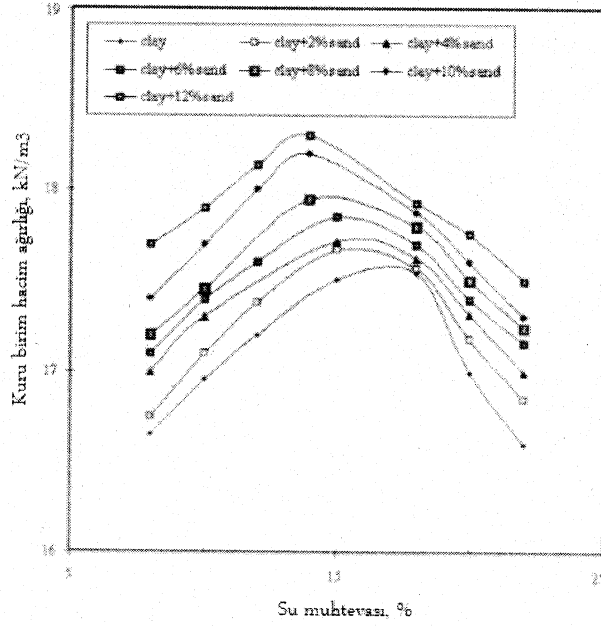
sebebi olduğu, deneylerde kullanılan kuru numunelerin %2.7-10 artması Mr' yi arttırdığını, donma çözülme tabii tutulan numunelerin Mr değerlerinde saçılma olduğu ve ince yüzdesi %3.9'dan %10.7'ye artınca kalıcı deformasyonların arttığı söylenmiştir. Yol temel malzemesinin en önemli araştırma konusunun hidrolik iletkenlik olduğu ve bu nedenle birçok araştırmacı tarafından çalışıldığı Tablo 1.'de verilen eşitliklerden anlaşılmaktadır. Killi-kum ve killi-çakıl karışımların oluşturduğu zeminler üzerinde yapılmış olan çalışmalara literatürde rastlamak mümkündür (Kumar vd. 2006, Tunç, 2002). Karayolu, taban zemininin CBR değerinin 6'dan az olması durumunda çeşitli işlemlerle dayanımın artırılması sağlanmaktadır. Bu sayede yapım işlemleri boyunca gerekli çalışma platformu sağlanmakta, taban yüzeyinin altındaki malzeme aşırı gerilmelerden korunmakta ayrıca yapım trafiği nedeniyle yüzeyde tekerlek izi miktarının minimum seviyede tutulması sağlanmaktadır.

Taban zeminini güçlendirmek amacıyla en sık kullanılan yöntem zeminin kireçle modifiye edilmesidir. Kireç ile zemin stabilizasyonu dolgu malzemesi kriterlerini sağlamayan ve Kaliforniya taşıma oranı (CBR) değeri düşük, şişme potansiyeli yüksek, dolgu tabanı, dolgu malzemesi veya üst yapı tabanı malzemelerinin kullanılabilirlik özelliklerini arttırmak ayrıca alt temel kriterlerine yakın özellikler taşıyan malzemelerin alt temel olarak kullanılabilmesi amacıyla bu malzemelere kireç katılıp karıştırılması ile yapılan işlemi kapsar. AASHTO sınıflandırma sistemine göre A5, A6, A7, A-2-6 VE A-2-7 sınıflarına giren plastisite indisi 10'dan büyük ve CBR değeri %10'dan küçük olan zeminler için stabilizasyon yapılması uygundur (Karayolları Teknik Şartnamesi, 2006). Kimyasal stabilizasyonun sıklıkla uygulandığı killi zeminlerde kireç ve çimento yaygın olarak katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Kil, hidratlı alüminyum ve magnezyum

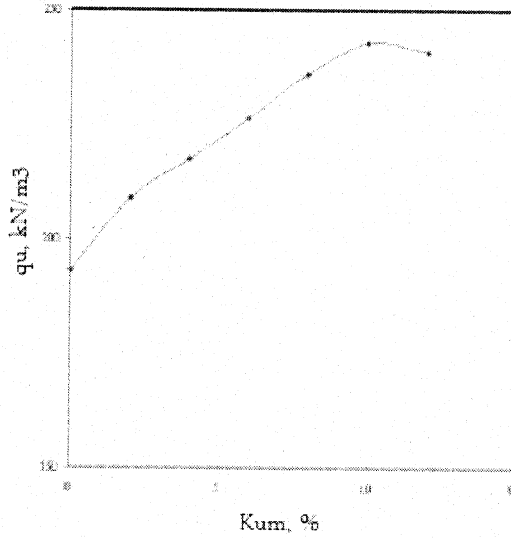
silikatlardan oluşan doğal bir ikincil mineraldir. Dane boyutu 2 mikron ve küçüküdür ve aynı boyuttaki başka minerallerden farklı olarak su ile karıştırıldığında çamur halini almaktadır. Islatıldığında genellikle hacim artışı gösterir. Kurtulduğunda ise hacmi azalır ve çoğun çatlar. Su ile etkileşime geçmesinden dolayı zamanla farklı oturma göstermektedir. Hidrolik iletkenliği çok küçüküdür. Kristal yapı ve kimyasal bileşim esasları üzerinde bir düzineden daha fazla kil minerali tanımlanmış ve Klorit, Montmorillonit, İllit ve Klorit grubu olarak 4 grupta toplanmıştır. Yol alt temel ve diğer yapı malzemesi olarak kullanılacak bentonit kili ile montmorillonit grubuna giren bentonit doğal haliyle yumuşak, suda hemen dağılan, el ile temas ettiğinde yarıyoğunlaşma veren özelliktedir. Partiküllerin çok ince ve temas yüzeyinin büyük alanı nedeniyle oldukça yüksek su alma gücüne sahiptir. Dolayısıyla, kendi hacimle karşılaştırıldığında veya 30 katı kadar şişebilmektedir. Bentonit gibi plastikliği yüksek zeminlere, ağır yükler ve iklim koşullarına dayanıklılık kazandırmak için kireç veya çimento ilavesiyle birlikte kullanıldığında plastiklik indeksleri düşürülür. Zemin iyileştirme konusunda bentonitlere % 8 ve daha fazla kireç karıştırmak gerekmektedir (Esener, 2005).

Kumar vd. (2006) kil içerisindeki kum oranının serbest basınç mukavemeti, optimum su muhtevasına ve maksimum kuru birim hacim ağırlığına olan etkisini incelemiştir. Çalışmalarında, birleştirilmiş zemin sınıflama sistemine göre yüksek plastisiteli kil (CH) içerisine %0 ile %12 arasında değişen oranlarda kötü dereceli kumu (SP) karıştırmışlar. Proktor deneyleri sonucunda, kum miktarının artmasıyla optimum su muhtevasının azaldığını ve maksimum kuru birim hacim ağırlığının arttığını gözlemlemişlerdir (Şekil 1). Şekil 2.2' de serbest basınç dayanım deneyleri sonuçları ise kum oranının %10 değerine kadar mukavemetin arttığı bu değerden sonra

azaldığını gözlemişler. Tunç (2002) aktardığı bir çalışmada çakıl miktarının optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı üzerine etkisinden bahsederken kil içerisindeki çakıl miktarının artmasıyla optimum su muhtevasının azaldığını ve maksimum kuru birim hacim ağırlığın ise arttığını söylemektedir.



Şekil 2.1. Kil-kum karışımı Proktor deney sonuçları (Kumar vd., 2006).



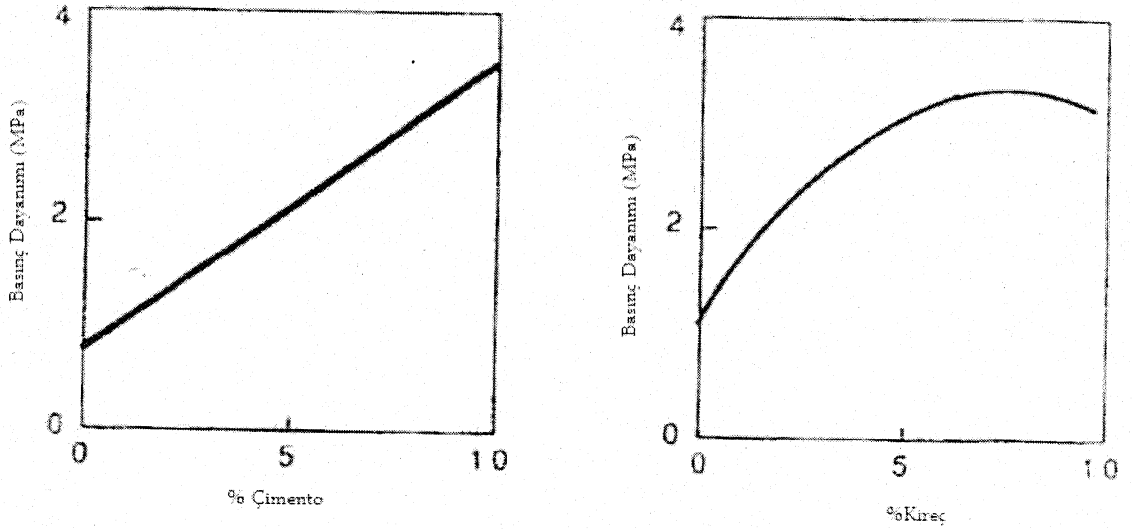
Şekil 2.2. Kum oranının serbest basınç mukavemeti üzerine etkisi (Kumar vd., 2006).

Mekanik stabilizasyonun yeterli olmadığı yada kullanılmadığı durumlarda kimyasal stabilizasyon bir alternatif olarak kullanılabilir. Kimyasal

stabilizasyonda zemine çeşitli katkı maddeleri karıştırılarak özelliklerinin amaca uygun hale gelmesine çalışılır. Kimyasal stabilizasyonun uygulandığı projelerin %90'ından fazlasında kullanılan katkı maddeleri çimento, kireç, uçucu kül, ve bitümlü malzemelerdir. Bu karışımların zemine eklenmesinde, dayanımı artırmak, deformasyonu azaltmak, hacim duraylılığını sağlamak (büzülme ve şişmeyi kontrol etmek), geçirimsizliği azaltmak ve kayma göçmeyi önlemek başlıca nedenlerdir. Kimyasal stabilizasyonun başlıca kullanım alanları otoyollar olmakla birlikte önemli kullanım alanları şunlardır; Zeminin dayanım parametrelerini artırarak toplam asfalt kalınlığını azaltmak, Zeminin sıg temeller için uygun hale dönüştürmek, Zeminin kesme direncini ve kırık geometrisini değiştirerek şevlerin iyileştirilmesini sağlamak, Madencilik alanlarındaki kirliliği rehabilite etmek, Zehirli atıkları etkisizleştirmek, Trafiğin yaratacağı tozunu yok etmek veya en aza indirmek, Yük taşıma kolonları oluşturmak ve Stabilizasyon malzemesinin işlenebilirliğini artırmak. Kimyasal stabilizasyonun kullanımının başlıca sebepleri çok geniş bir alana, ekonomik olarak fazla gider olmadan doğaya zarar vermeden, çok geniş alanları etkileyebilmesidir. Başlıca katkı maddeleri şunlardır; Portland çimentosu (çimento ve uçucu kül), Kireç (kireç ve uçucu kül) ve Bitümlü malzeme ve katran' dır.

Çimento stabilizasyonu ile taşıma gücünün stabilizasyonla artırılması ile yerel olarak mevcut olan zeminler temel zemini olarak kullanılabilirler. Böylece doğal hali zayıf olan zeminin yerinden taşınarak, yerine daha sağlam zeminin taşınması ile yapılacak stabilizasyon önlenmiş ve ekonomik olması sağlanmış olmaktadır. Çimento ile yapılan stabilizasyonda, stabilizasyona tabi tutulmuş zeminin dayanımını, genellikle serbest basınç deneyi ile belirlenir. Çimento stabilizasyonu ile zeminin dayanımı

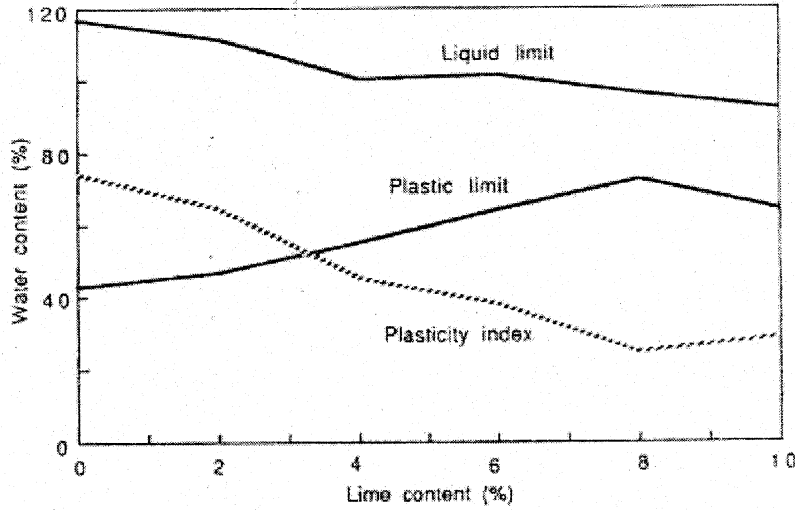
artmakta, daha iyi hacim duraylılığına ulaşmakta ve duraylılığı artmaktadır (Şekil 2.3). Çimentonun az olması durumunda, yeterli karışımın yapılamaması fazla olması durumunda ise büzülme ve çatlakların oluşması söz konusudur. Kireçle stabilizasyon öncelikle killi zeminlerde kullanılır.



Şekil 2.3. Çimento ve kireç eklenmesiyle dayanımın artması arasındaki ilişki

Dunlop'a göre (1977) tepkin zeminler kireç ile iyileştirildikten sonra 100'ün üstünde CBR oranı ve 0,86 MPa'n üzerinde serbest basınç dayanımı vermektedirler. En çok tepkin kil gurubu montmorillonit kil gurubudur. Bu grup killer, yüksek oranda hacim değiştirme potansiyeline sahiptirler. Daha az etkin kil gurubu ise illit, kaolinit gurubudur. Kireçle iyileştirmenin etkinliğini açıklayan bir diğer faktör ise sudur. Orjinal zemin, aynı miktarda ve sürede suyla parçalanırken kireçle iyileştirilmiş zemin daha güçlükle parçalanmaktadır. Pratik kireç katkı maddesi ekleme oranı %2den % 8'e kadardır. Bu miktarlarda, zeminin gösterdiği performans, labaratuvarında CBR ve üç eksenli testlerle değerlendirilmekte veya ortaya konmaktadır. Bu testlerden önce numunenin 28 gün suda bekletilmesi ve daha sonra teste tabi tutulması arzu edilmektedir. Kireçle stabilizasyonla işlenebilirliği artmakta, dayanımı artmakta ve

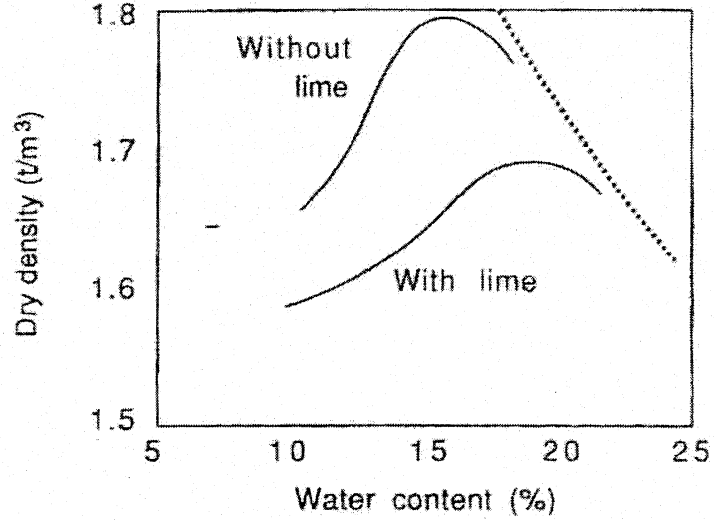
hacim duraylılığı artmaktadır. Kireç zeminin likit limit oranını azaltarak plastikliği azaltmaktadır (Şekil 2.4). Ayrıca kireç zemini daha sert ve suya karşı daha dirençli hale dönüştürmektedir.



Şekil 2.4. Zeminin plastisitesine kirecin etkisi

Kireç optimum su içeriğini artırmakta ve bu da nem oranı yüksek zeminlerde çalışılmasını kolaylaştırmaktadır. Ayrıca çimentolanma sayesinde de maksimum yoğunluğa ulaşılması için gerekli enerjiyi azaltarak iş ve zamandan tasarruf edilmiş olmaktadır (Şekil 2.5). Karışımın birkaç saat sonrasında, kireç katkı maddesi dayanımı, çimentoya oranla daha az oranda artırmaktadır. Dolayısıyla kireçte karışımın ardından hemen kompaksiyon yapılması, çimentoya oranla daha az kritiktir. CBR ve serbest basınç testlerinden elde edilen verilere göre kireç eklenmesi killi zeminin dayanımını artırmaktadır. Okyay ve Dias 2010 iyileştirmesi yapılan zeminlerin mekanik özelliklerini araştırmak için laboratuvar deneyleri yapmışlardır. Kireç ile yapılan iyileştirmelerde kür süresinin önemli olduğunu ve iyileştirme etkisinin uzun süreli olduğunu tespit etmişlerdir. Bununla beraber çimento iyileştirmelerinin reaksiyon süresinin çok daha kısa olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca atık katkı oranlarının

iyileştirmesi yapılan zeminlerin mekanik özellikleri üzerine büyük oranda etkili olduğunu tespit etmişlerdir.



Şekil 2.5. Düşük plastisiteli kilin kompaksiyon eğrisine kirecin etkisi

Burland, 1990 ve Liu ve Carter, 1999 çalışmalarında zeminlerdeki mikro yapısal farklılıkların daneler arasındaki bağlanmadan dolayı olduğunu söylemişlerdir. Mikro yapısal özellikleri zemin danelerinin birbirlerine göre pozisyonları ve daneler arasındaki çekim kuvveti olarak bilinmektedir (Mitchell, 1976). Mikro yapısal özellikler dikkate alınmadan zemin davranışı üzerine yapılan yorumlarda eksik olmaktadır. Zeminlerin minerolojisi, boşluk çapı dağılımı, spesifik yüzey alanı ve mikroyapısı fiziksel ve mekanik özellikleri doğrudan etkilemektedir. Özellikle yol alt malzemesi olarak kullanılacak zeminlerdeki sıkıştırma sonucu içyapının bilinmesi oldukça önemlidir.

Dumbleton ve West 1966, Grabowska ve Olszewska 1970, Robinson and Allam 1998, Tanaka ve Locat 1999 çalışmalarında mikro yapı ve geoteknik özellikleri arasındaki ilişkileri incelemişlerdir. Dananaj vd 2005 farklı mikro yapıya sahip zeminlerin geoteknik özellikleri ile XRD ve SEM analizlerini karşılaştırılmıştır.

Ninjarav vd 2007 çalışmalarında boşluk çapı dağılımı ve konsolidasyon özellikleri arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Horpibulsuk vd 2011 çalışmalarında Bangkok kili üzerinde farklı iyon konsantrasyonuna sahip kaolinit ve montmorillonitin fiziko-kimyasal ve geoteknik özelliklerini incelemişlerdir. Bu amaçla mineroloji, boşluk çap dağılımı, spesifik yüzey alan ve SEM görüntüleri ile geoteknik özellikleri karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmada, killi zemine bilirlri oranlarda kum ilavesi yapılarak mekanik stabilizasyon, kireç ve çimento gibi katkı malzemeleri katılarak kimyasal stabilizasyon uygulanmıştır. Katkı malzemesi ile karıştırılan karışımların 0, 7, 14 ve 28 günlük kür sonrası dayanım deneyleri yapılmıştır. Buna ilave olarak geoteknik özellikleri ile minerolojisi, boşluk çapı dağılımı, spesifik yüzey alan ve iç yapısı arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Ayrıca atık mermer parçaları laboratuarda agrega boyutlarına getirilerek agregayla yerdeğiştirilmek suretiyle kompaksiyon deneyine tabi tutulmuşlardır.

3.ZEMİNLERİN STABİLİZASYONU

Nüfusun artışı ile hızla artan yapılaşma sebebiyle, inşaat mühendisliği yapılarının yapılacağı sağlam temel zemini azalmıştır. Özellikle ulaşım yapıları güzergâhı ile ilgili çok fazla alternatif olmadığından zayıf zeminlerin stabilizasyonu gerekmektedir. Yol tabanı, alt temel ve temel malzemelerini iyileştirmek için genellikle kireç, çimento, uçucu kül, mermer tozu vb. gibi malzemeler kullanılmaktadır. Zemin

stabilizasyonunda kimyasal karışımlar, zeminlerin dayanım ve deformasyon özelliklerini iyileştirmek yüzeysel stabilizasyonda oldukça yaygın kullanılmaktadır.

Özellikle, ince daneli zeminlerde kireç katkı maddeleri içinde en çok tercih edilenler arasındadır. Kireç taşının çeşitli derecelerde pişirilmesiyle elde edilen, suyla bir araya geldiğinde katılaşma özelliği gösteren, beyaz renkli, inorganik esaslı bağlayıcı maddeye kireç denilmektedir. İnce daneli zeminlerin iyileştirilmesinde yüksek kalsiyumlu kireçler $[Ca(OH)_2]$, kalsitik sönmemiş kireçler $[CaO]$, monohidratdolomitik kireç taşları $[Ca(OH)_2.MgO]$ ve dolomitik sönmemiş kireç taşları kullanılmaktadır. Kireç, killi zemine eklendiğinde, kation değişimi kapasitesi, pH, elektriksel iletkenlik özellikleri ile flokülasyon/dispersiyon özellikleri tartışılmaya başlanır. Flokülasyon olayının gerçekleştiği bu reaksiyonların tümüne puzzolonik reaksiyonlar denilmektedir. Puzzolonik reaksiyonlar kil minarelleri üzerinde yapısal değişikliklere sebep olur ve kil minarelleri bir araya gelme eğilim gösterir ve daha büyük daneler oluşturur. Bu reaksiyon sonucunda zeminin geoteknik özellikleri etkilenir. Likit limit azalmakta, plastik limit artmakta ve buna bağlı olarak işlenebilirlik ve dayanımı artmaktadır. Yüzeysel zemin stabilizasyonunda (özellikle yol inşaatlarında) kireç dışında ikinci yaygın olarak kullanılan katkı malzemesi ise çimentodur. Çimento, özellikle havaalanı pistleri gibi hareketli yüklerin büyük değerler alabildiği yollarda tercih edilmektedir. Çimentonun suyla karışmasından sonra hızla hidrasyon reaksiyonu başlamaktadır ve hidrate kalsiyum silika (C_2SH_x , $C_3S_2H_x$), hidrate kalsiyum alümin (C_3AH_x , C_4AH_x) ve hidrate kireç ($Ca(OH)_2$) oluşur. Oluşan reaksiyon sonucu çimento parçacıkları oluşur ve diğer parçacıklara bağlanarak matriks yapı oluştururlar. Böylelikle oluşan yapı zemin danelerini içine alarak tüm daneleri birbirine bağlamaktadır. Zemin stabilizasyonunda,

kür zamanında zeminin kimyasal yapısı bozulmakta ve sertleşmeye başlamaktadır. Diğer bir aşama ise puzzolonik reaksiyondur. Puzzolonik reaksiyonu sonlanana kadar zemin dayanımı artmaya devam etmektedir (Bergado ve Anderson,1996). Katkı malzemesi olarak kullanılan çimento, zeminin plastikliğini düşürürken, dayanımını arttırmaktadır.

Bu çalışmada killi zeminlere kum, kireç ve çimento ilavesi yapılarak, siltli zeminlere kil ilavesi yapılarak en uygun alt temel, temel ve taban zeminin elde edilip edilemeyeceği ve buna ilave olarak atık mermer parçalarının alttemel malzemesi olarak kullanılıp kullanılmayacağı incelenmiştir. Elde edilen karışımların fiziksel, mekanik ve içyapı deney ve testleri yapılarak karışımlardan en uygun olanları belirlenmiştir.

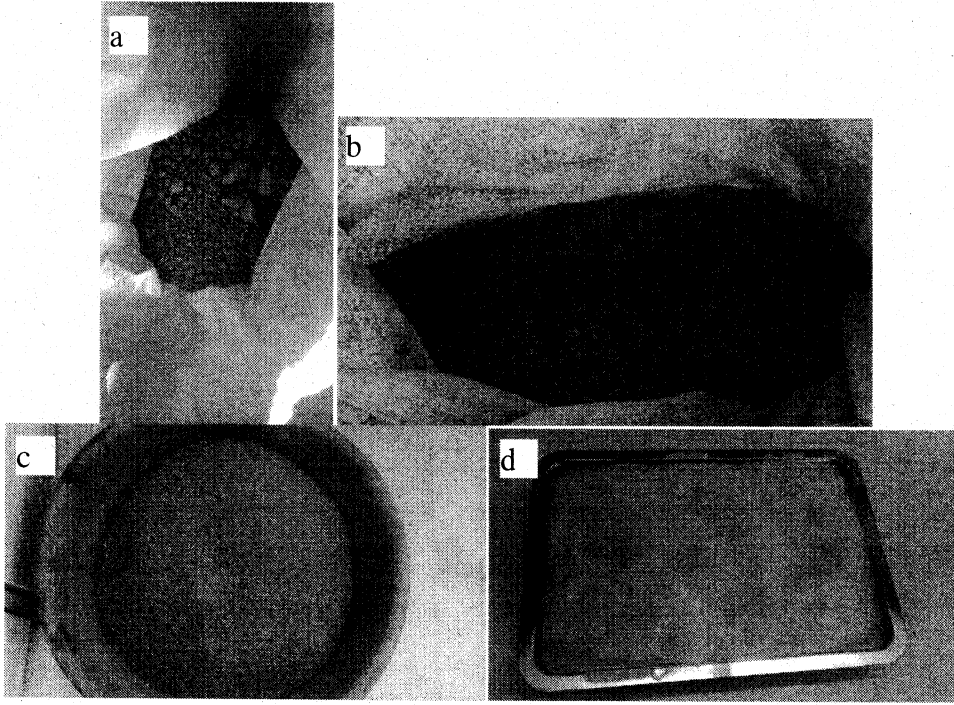
4. KULLANILAN MALZEMELER VE YÖNTEM

4.1.Kullanılan Malzemeler

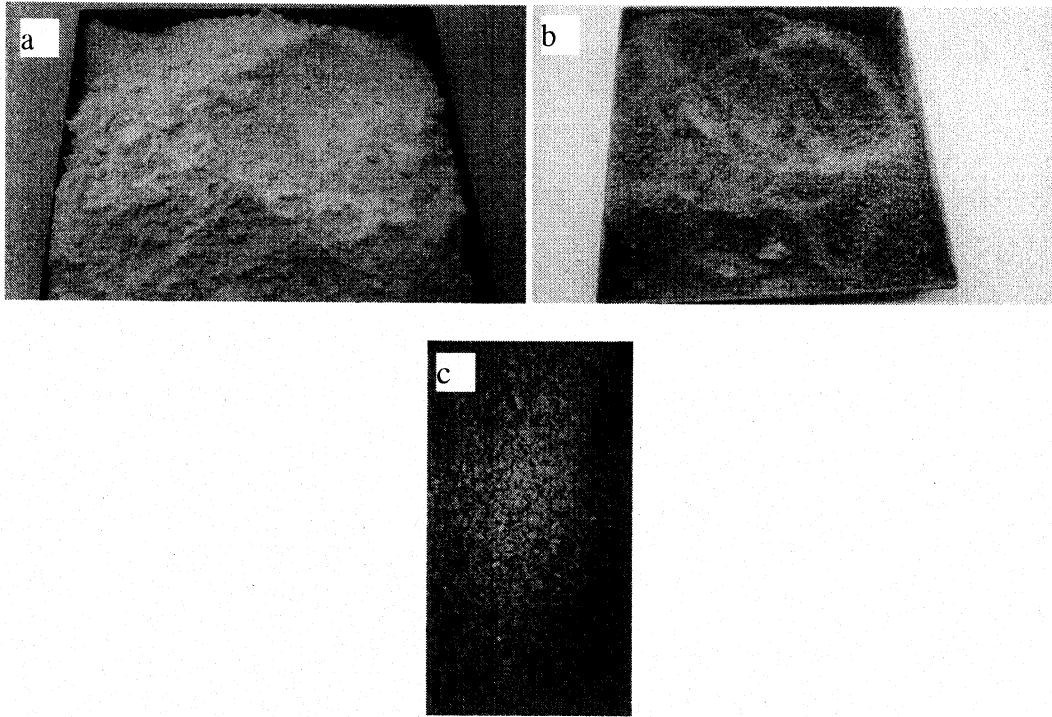
Kaolin kili, Bilecik Organize sanayinde bulunan Matel Hammadde ve Sanayi Tic. Firmasından temin edilmiştir (Şekil 4.1.a). Kil çuvallarda, topak halinde temin edilmektedir. Bu sebeple kil öncelikle ezilmekte ve elenmekte daha sonra deneye hazır hale getirilmektedir. Bentonit kili, Minersan Aş. Eskişehir, Firmasından temin edilmiştir (Şekil 4.1.b). Kil çuvallarda, toz halinde temin edilmektedir. Bu sebeple kil hiçbir fiziksel işleme maruz bırakılmadan etüve kullanılarak kullanılmıştır. Kullanılan kum, Bilecik Mühendislik laboratuvarı bahçesinde bulunan zeminin 2mm-1mm arasında elenmek suretiyle elde edilmiştir (Şekil 4.1.c). Silis kumu, Bilecik Organize sanayinde

bulunan Matel Hammadde ve Sanayi Tic. Firmasından temin edilmiştir (Şekil 4.1.d).

Silis kumu çuvallarda homojen bir şekilde temin edilmektedir.



Şekil 4.1. a.Kaolin kili b.Bentonit kili c.Kum d.Silis kumu



Şekil 4.2. a.Kireç b.Çimento c.Mermer parçaları

Kullanılan silt Adapazarı merkezden temin edilmiştir. Çuvalla getirilen silt 100 nolu elekten elenerek kullanılmıştır. Kireç ve çimento ticari amaçla satılan çimento alınarak kullanılmıştır. Atık mermer parçaları, Bilecik mermer ocaklarının doğaya terk ettiği parçaların laboratuarda kırıcılarla istenen boyutlara getirilmesinden sonra deneylerde kullanılabilir hale getirilmiştir.

4.2. Geoteknik Deney Çalışma Planı

Stabilizasyon işlemi için laboratuarda önceden belirlenmiş oranlarda karışımlar hazırlanmıştır. Numune hazırlamak için kullanılacak malzemeler 24 saat $105\pm 5^{\circ}\text{C}$ 'lik ettüvide kurutulmuştur. Kurutulan malzemeler hassas terazide ağırlıkça yüzdelerinde tartılmıştır. Deneyler farklı karışımlar üzerinde yapılmıştır. Proje kapsamında 5 seri numune hazırlanmıştır. Birincisi kaolin kiline %10, %20, %40, %60 ve %80 oranlarında kum ilave edilmesiyle, ikinci seri ise A (19-9.5mm aralığındaki mermer parçasının %15, 9.5-4.75mm aralığındaki mermer parçasının %20 ve 4.75-2mm aralığındaki mermer parçasının %25, %30 Kum ve %10 Kil) malzemesine %5, 10 ve 20 kireç ilavesiyle, üçüncü seri silte bentonit ve kaolin kilinin %10, 20 ve 40 oranlarında karıştırılmasıyla, dördüncü ve beşinci seride bentonite %2, 4, 6 ve 8 oranlarında kireç ve çimento karıştırılmasıyla elde edilmiştir. Karışımların fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için elek analizi ve hidrometre deneyi yapılmıştır. Fiziksel deneyler TSE 1900-1/2007 'ye göre yapılmıştır.

4.2.1. Dane ap dağılımlı

Elek deneyi TSE 1900-1/2007 de yer alan “5.1.6.4 Deney 6 (A): Dane apı dağılımlının bulunması için yıkamalı eleme metodu” ve “5.1.6.4 Deney 6 (D): İnce daneli zeminlerin dane çapı dağılımlının bulunması için hidrometre metodu” yöntemiyle yapılmıştır. Yıkamalı eleme, akan bir su kaynağının altında zeminin ince malzemelerinin yıkanmasıyla yapılmaktadır. Yıkama sonunda 200 no’lu elek üzerinde kalan malzeme miktarı belirlenerek hesap yapılmaktadır. İnce daneli zeminlerin dane çapı dağılımlı hidrometre deneyi ile belirlenmektedir. 50 g zemin karıştırılarak suda bir süspansiyon haline getirilir, farklı zamanlarda süspansiyonun yoğunluğu bir hidrometre ile ölçülmekte, süspansiyonda kalan danelerin çapı hesaplanmaktadır.

4.2.2.Kvam limitleri (Likit Limit ve Plastik Limit Deneyi)

Yapılan likit limit ve plastik limit deneyleri TS 1900-1/2007’e uygun olarak yapılmıştır. Likit limit deneyinde her bir karışım için 200 g numune hazırlanmıştır. Her karışımda, numuneler ıslatılıp 24 saat boyunca homojen hale gelmesi için bekletilmiştir. Bir gün önceden hazırlanan numunelere likit limit deneyi uygulanmıştır. Her bir karışım için 2. ve 3. okumalara geçerken 20 g su ilave edilerek deney tekrarlanmıştır. Deney sonunda elde edilen su muhtevalarından 20mm ye tekabül eden su muhtevası likit limit değerı olarak belirlenmiştir. Plastik limit deneyi, zeminin henüz plastik kıvamda bulunduğu en düşük su içeriğinin ölçülmesi ile ilgilidir. Plastik limitte zemin için 3mm çapında çubukta kopma olduğunda, silindirik bir makarna şeklini aldığı andaki su içeriğidir. Elde edilen su muhtevası plastik limit değerı olarak belirlenmiştir. Likit limit ve plastik limitin su

muhtevasının farkı plastisite indisi (I_p) olarak adlandırılmaktadır ($I_p = w_L - w_p$). Hazırlanan karışımların sınıflandırılması için TS 1500/2000'de önerilen birleşik zemin sınıflandırma metodu kullanılmıştır.

4.2.3. Standart Proktor deneyi

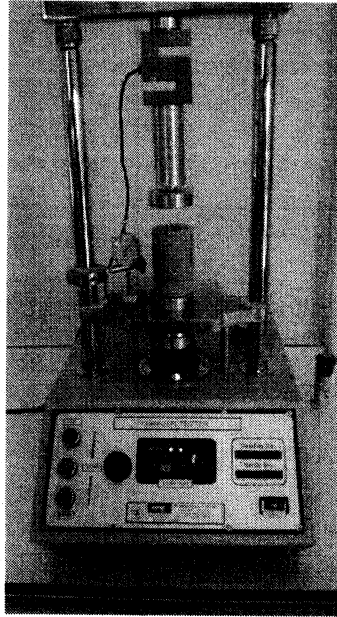
Kompaksiyon deneyleri, TSE 1900-1/2007 de yer alan "5.2.1 Deney 7: Zeminde kuru birim hacim kütle - su muhtevası bağıntısının 2,5 kilogramlık tokmakla elde edilmesi (standart enerji)" yöntemiyle yapılmıştır. Deney sonucu her bir karışımın maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası değerleri numunelerin hazırlanmasında kullanılmıştır. Bu deney, belirli bir metotla sıkıştırılmış bir zeminde, en büyük kuru birim hacim kütleli veren su muhtevasının bulunması ile ilgilidir. Bu deneyde 305 mm'den serbestçe düşen 2,5 kg'lık tokmağın sağladığı mekanik iş kullanılmaktadır. Kompaksiyon deneyinde her bir karışım için 2000 g numune hazırlanmıştır. Deneylerde su miktarı artacak şekilde en az 4 numune olacak şekilde başlanmıştır ve Şekil 4.3'de kompaksiyon deney seti verilmiştir. Yapılan kompaksiyon deneyleri TS 1900-1'e uygun olarak yapılmıştır.



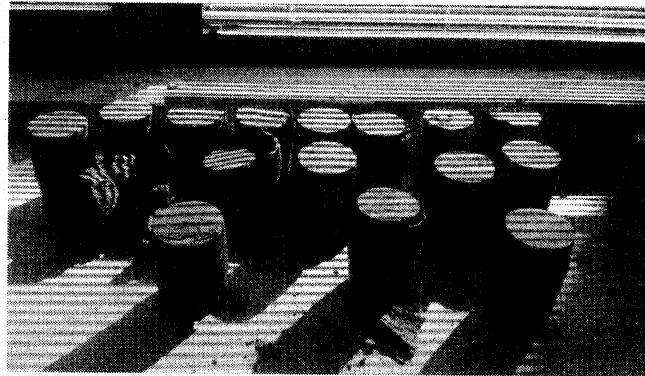
Şekil 4.3 Kompaksiyon deney seti

4.2.4.Serbest Basma Deneyi

Bu deney zeminlerin kayma mukavemetini belirlemek için yapılmaktadır. Deney TS 1900-2/2007'da önerildiği şekilde uygulanmıştır. Zeminlerin kayma mukavemetini belirlemek için yapılmaktadır. Genellikle suya doymun killi zeminlerde ($\Phi=0$) kayma direncinin belirlenmesinde kullanılan bir deney olup, deney sonucunda elde edilen Mohr dairesinden zemine ait kayma direnci hesaplanır. Her bir karışım için günlük, 7 günlük, 14 günlük ve 28 günlük küre bırakılmış numuneler hazırlanmıştır. Laboratuarda, her bir karışım için mukavemetleri belirlenmiştir. Şekil 4.4'de tek eksenli basınç aleti, Şekil 4.5'da serbest basma deneyi uygulandıktan sonra numunelerin durumu verilmiştir.



Şekil 4.4 Tek eksenli basınç deneyi



Şekil 4.5 Serbest basma deneyi sonrası numuneler

4.3.Fiziko-kimyasal deney çalıma planı

4.3.1.X-Işını Kırınım (XRD)

XRD, katı ve toz haldeki malzemelerin faz analizinde kullanılan temel tekniklerden birisidir. X-ışını difraktometresi ile malzemedeki fazlar, fazların miktarı, kristal boyutu, yapıdaki değişimler, kristal yönlenmesi ve atom pozisyonları hakkında bilgi alınmaktadır.

4.3.2.Civa Porozimetresi Analizi

Civa porozimetresi, toz ve bulk gözenek boyut ve boyut dağılımının belirlenmesi için yaygın olarak kullanılan tekniklerden birisidir. Bu yöntemde, civanın ıslatıcı olmayan özelliği kullanılmaktadır. Civa birçok sıvının aksine katı yüzeylerin bir kısmı ile 90° den büyük temas açısı (θ) yapar. Civa bu özelliğinden dolayı belli büyüklüğün altındaki gözeneklere kendiliğinden ulaşamaz. Dolayısıyla civanın gözeneklere girmesi gerçekleştirilir. Bundan dolayı düşük basınç veya yüksek basınç altında deney gerçekleştirilebilir.

4.3.3.Azot Adsorpsiyon ile Yüzey Alanı Ölçüm Analizi (BET)

BET cihazı katı veya toz numunelerde fiziksel adsorpsiyon yöntemiyle yüzey alanı ölçümleri, mikro, mezo ve makro gözenek boyutunu ve gözenek boyut dağılımını düşük basınçlarda ve yüksek çözünürlükte tespit edebilmektedir. Cihaz numune yüzeyini tek bir moleküler tabaka ile kaplamak için gerekli gaz miktarını tayin etmekte ve Brunauer Emmett ve Teller teorisini kullanarak yüzey alanını hesaplamaktadır. İnşaat mühendisliğinde çoğunlukla spesifik yüzey alanını bulmak için tercih edilen bir

deneydir. Bu çalışmada hem spesifik yüzey alanı hemde gözenek çapı belirlenmiştir. Kullanılan cihazda ölçülebilir gözenek çapı aralığı, 3.5 – 5000(Å) arasındadır.

4.3.4.SEM ile Mikroyapı Analizi

SEM görüntüsü, yüksek çözünürlüklü resim oluşturmak için vakum ortamında oluşturulan ve aynı ortamda elektromagnetik lenslerle inceltelen elektron demeti ile incelenecek malzemeyi analiz etme imkânı sunmaktadır. Oluşturulan resimler, elektron demetinin malzeme ile olan etkileşiminden ortaya çıkan ışınlar veya geri yansıyan elektronlar sayılarak oluşturulmaktadır. Günümüzde, İnşaat mühendisliğindeki özellikle geoteknik ve yapı malzemesi anabilim dalında malzemelerin dayanımı ve özellikleri hakkında karar verirken iç yapıya bakılması gerektiği bilinmektedir. Bundan dolayı, bu çalışma kapsamında mekanik ve kimyasal olarak iyileştirilen malzemelerin kompaksiyon ve kür sonrası iç yapıları SEM görüntüleri yardımıyla incelenmiştir.

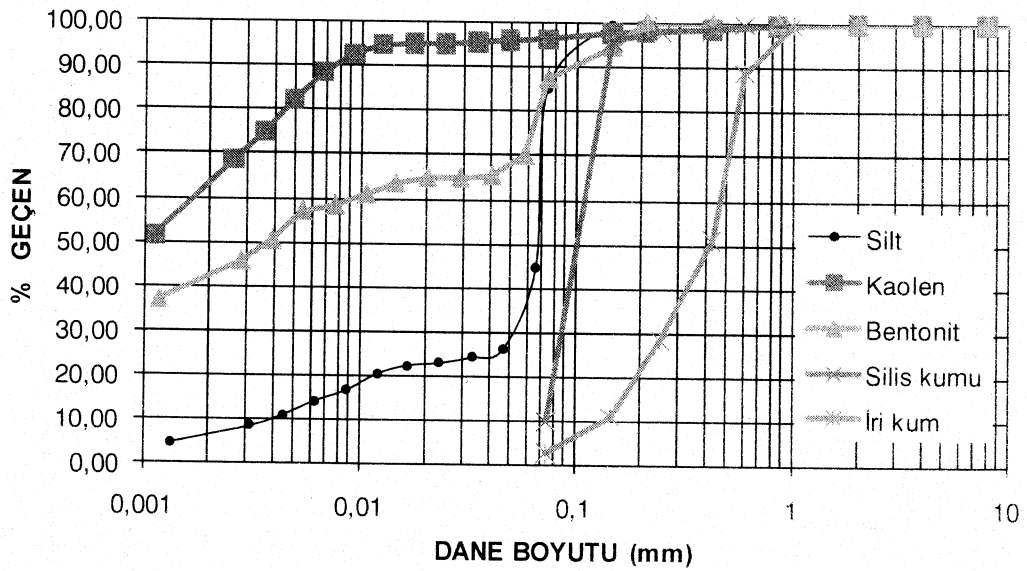
5. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

Stabilizasyon işlemi için laboratuvarında önceden belirlenmiş oranlarda karışımlar hazırlanmıştır. Numune hazırlamak için kullanılacak malzemeler 24 saat $105\pm 5^{\circ}\text{C}$ 'lik etüvde kurutulmuştur. Kurutulan malzemeler hassas terazide ağırlıkça yüzdelerinde tartılmıştır. Deneyler farklı karışımlar üzerinde yapılmıştır. Proje kapsamında 5 seri numune hazırlanmıştır. Birincisi kaolin kiline %10, %20, %40, %60 ve %80 oranlarında kum ilave edilmesiyle, ikinci seri bentonit kiline %10, %20, %40, %60 ve %80 oranlarında kum ilave edilmesiyle, üçüncü seri A (19-9.5mm aralığındaki mermer

parçasının %15, 9.5-4.75mm aralığındaki mermer parçasının %20 ve 4.75-2mm aralığındaki mermer parçasının %25, %30 Kum ve %10 Kil) malzemesine %5, 10 ve 20 kireç ilavesiyle, dördüncü seri silte bentonit ve kaolin kilinin %10, 20 ve 40 oranlarında karıştırılmasıyla, beşinci ve altıncı seride bentonite %2, 4, 6 ve 8 oranlarında kireç ve çimento karıştırılmasıyla elde edilmiştir. Karışımlarda kullanılan malzemelerin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için elek analizi ve hidrometre analizi yapılmıştır. Fiziksel deneyler TSE 1900-1/2007 'ye göre yapılmıştır. Çizelge 5.1.'de karışımların fiziksel özellikleri verilmiştir.

Çizelge 5.1 Kullanılan malzemelerin fiziksel özellikleri

Malzeme	LL	PL	GS
Kaolin kili	50	25	2.67
Bentonit kili	103	38	2.66
İri Kum	-	-	2.66
Silis kumu	-	-	2.67
Silt	32	38	2.66



Şekil 5.1 Dane dağılımı eğrisi

5.1.Dane ap dağılımlı

Bu alışma kapsamında kullanılan malzemelerin dane çapı dağılımlı Şekil 5.1'de verilmiştir.

5.2.Kvam limitleri

Bu alışma kapsamında kullanılan malzemelerin dane çapı dağılımlı izelge 5.1'de verilmiştir.

6.3. Karışımların Zemin Sınıflandırmaları

Bentonit kilin zemin sınıfı TS 1500/2000'ne göre CH yüksek plastisiteli kil zemin olduğu, Kaolin kili zemin sınıfı TS 1500/2000'ne göre CI ORTA plastisiteli kil zemin olduğu belirlenmiştir.

5.3.Standart Proktor deneyi

Kompaksiyon deneyleri, sonucu elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası değerleri izelge 5.2'de verilmiştir. Bentonit ve kaolin kiline kum ilave edildikçe genel olarak optimum su muhtevalarında azalma, kuru birim hacim ağırlığında ise artma grlmştir. A karışımına kireç ilave edildikçe max. kuru birim hacim ağırlık düşmüş, optimum su muhtevalarında artmıştır. Bentonite kireç edildikçe max. kuru birim hacim ağırlık %10 kireç ilavesine kadar azalmış bu değerde max. kuru birim hacim ağırlık artmıştır. Optimum su muhtevası ise kireç ilavesiyle artmıştır. Bentonite imento ilave edildikçe max. kuru birim hacim ağırlık artmış, optimum su muhtevası ise azalmıştır. Bentonite silis kumu ilavesiyle max. kuru birim hacim ağırlık artmış, optimum su muhtevası ise azalmıştır. Bu karışıma %4 kireç ilavesiyle max. kuru birim hacim ağırlık artmış, optimum su muhtevası ise azalmıştır. Silte bentonit ve kaolin ilavesiyle max. kuru birim hacim ağırlık azalmış, optimum su muhtevalası ise artmıştır. Fakat optimum su muhtevalası bentonit ilavesinde daha fazla artmıştır. Sonuç

olarak ince daneli zeminlerde, kireç ve çimento ilavesiyle optimum su muhtevasını arttırmış ve buda bu tip zeminlerde işlenebilirliği arttırmıştır.

Çizelge 5.2. Optimum su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık değerleri

Karışımlar	$\rho_{max}, kN/m^3$	$w_{opt}, \%$
%100Kaolin kili	16.00	21
%90 Kaolin +%10 iri kum	16.1	21
%80 Kaolin +%20kum	16.1	19
%60 Kaolin +%40kum	16.3	18.4
%40 Kaolin +%60kum	16.90	12.12
%20 Kaolin +%80kum	16.50	20
%10 Kaolin +%90kum	15.70	18.50
%100bentonit	14.30	27
%90 bentonit +%10 iri kum	14.50	25
%80 bentonit +%20kum	14.70	24
%60 bentonit +%40kum	14.75	20
%40 bentonit +%60kum	14.80	10
A	19.90	7.5
A+%5kireç	18,89	12
A+%10kireç	18,00	14.5
A+%20kireç	16.80	18
Bentonit	14.30	27
Bentonit+2kireç	13.86	28
Bentonit+4kireç	13.23	30
Bentonit+6kireç	12.85	32
Bentonit+8kireç	12.05	35
Bentonit+10kireç	13.58	37
Bentonit+2 çimento	13.70	25
Bentonit+4 çimento	13.80	23
Bentonit+6 çimento	13.98	21
Bentonit+8 çimento	14.38	18
Bentonit+10 çimento	14.85	16

Karışımlar	$\rho_{max}, kN/m^3$	$w_{opt}, \%$
80Bentonit+ 20Silis kumu	15.70	20
60Bentonit+ 40Silis kumu	16.50	16
40Bentonit+ 60Silis kumu	16.55	13
20Bentonit+ 80Silis kumu	16.70	10
80Bentonit+ 20Silis kumu+4kireç	12.82	27
60Bentonit+ 40Silis kumu+4kireç	13.71	22
40Bentonit+ 60Silis kumu+4kireç	15.58	20
20Bentonit+ 80Silis kumu+4kireç	15.80	17
Silt	16.63	12.25
90Silt+10Bentonit	16.55	13.5
80Silt+20Bentonit	16.45	18.5
60Silt+40Bentonit	16.35	23
90Silt+10Kaolin	16.50	13
80Silt+20 Kaolin	16.15	16
60Silt+40 Kaolin	16.00	19

Not: ρ_{max} :Kuru birim hacim ağırlık, w_{opt} :Su muhtevası

5.4.Serbest Basma Deneyi

Serbest basma deneyi için karışımlar optimum su içeriği değerlerinde hazırlanmış ve kürde bekletilmiştir. Kürde bekletilen numuneler 0,7, 14 ve 28. günde deneye tabi tutulmuştur. Serbest basma deneyi sonunda yapılan hesaplar ve Çizelge 5.3'deki grafikten görünen en yüksek mukavemeti 28 günlük kürde bekleyen numuneler göstermiştir. Bentonite kireç ve çimento ilavesi ile dayanım artmıştır. Kür ile birlikte dayanım artmıştır.

Çizelge 5.3. Optimum su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık değerleri

Karışımlar/Kür süresi	0	7	14	28
Bentonit	672	-	-	-

Bentonit+2kireç	718	874	945	1025
Bentonit+4kireç	719	890	-	-
Bentonit+6kireç	792	-	958	-
Bentonit+8kireç	795	895	945	1050
Bentonit+2 çimento	700	1015	-	1480
Bentonit+4 çimento	732	1014	1043	1324
Bentonit+6 çimento	750	1020	-	-
Bentonit+8 çimento	757	1042	-	1400

5.5. X-Işını Kırınım (XRD)

Silt ve siltli kaolin ve bentonit karışımlarının yapılan XRD deneyi sonuçları Şekil 5.4-5.6 verilmiştir. Diğer karışımların XRD analzi sonuçları ekte verilmiştir.

5.6.Civa porozimetresi

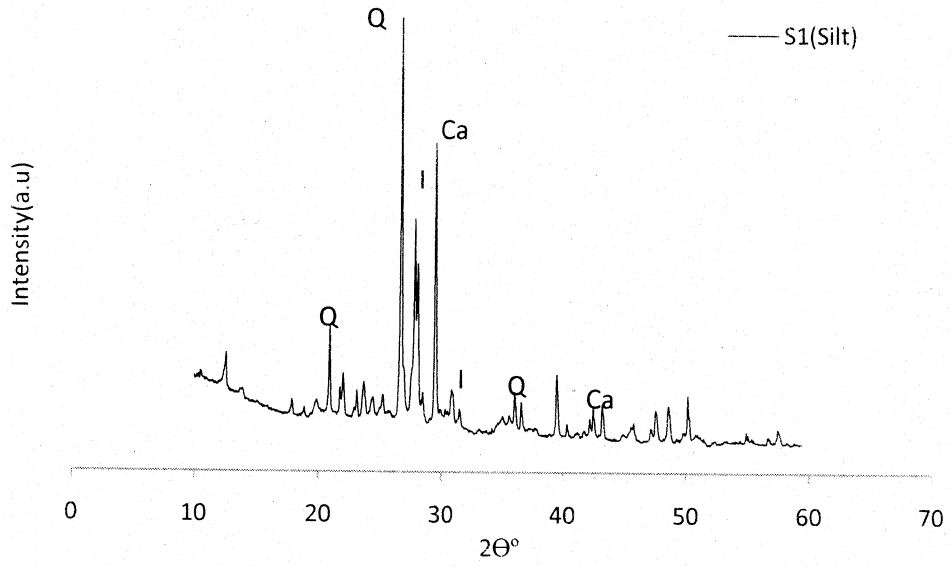
Silt ve siltli kaolin ve bentonit karışımlarının yapılan Civa porozimetresi deneyi sonuçları Şekil 5.7-5.9 verilmiştir. Diğer karışımların civa porozimetre analizi ekte verilmiştir.

5.7.Azot Adsorpsiyon ile Yüzey Alanı Ölçüm Analizi (BET)

Silt ve siltli kaolin ve bentonit karışımlarının yapılan BET analizi sonuçları Şekil 5.10-5.12 verilmiştir. Diğer karışımların BET analizi ekte verilmiştir.

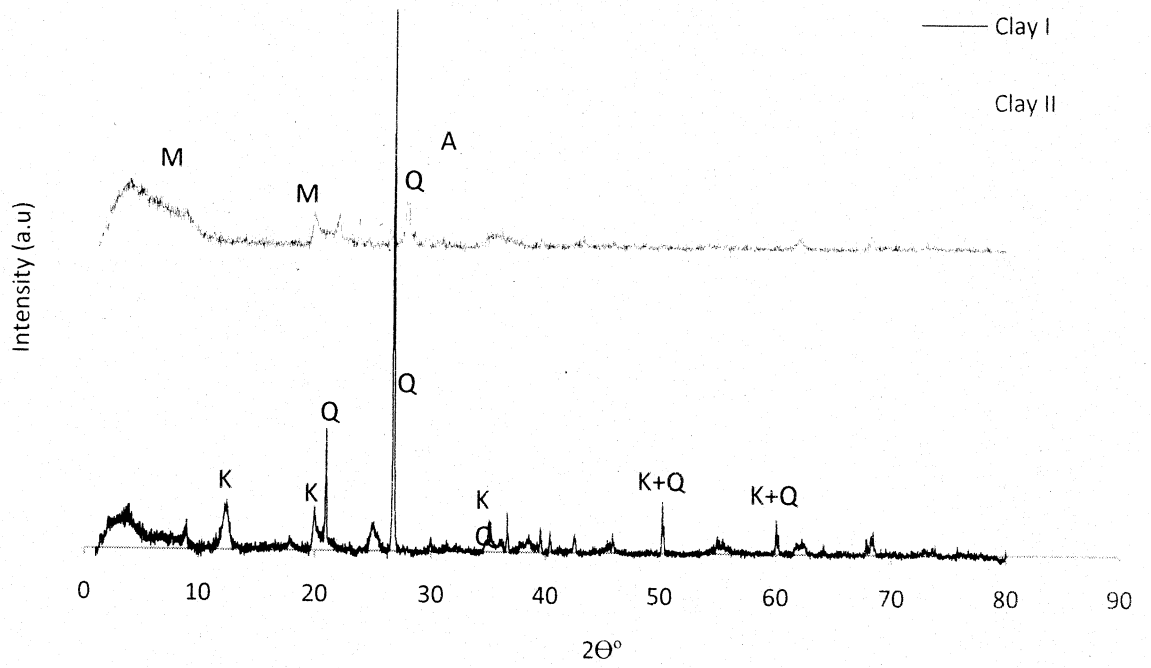
5.8.SEM ile Mikroyapı Analizi

Silt ve siltli kaolin ve bentonit karışımlarının yapılan SEM analizi sonuçları Şekil 5.13-5. 15 verilmiştir. Diğer karışımların SEM görüntüleri ekte verilmiştir.



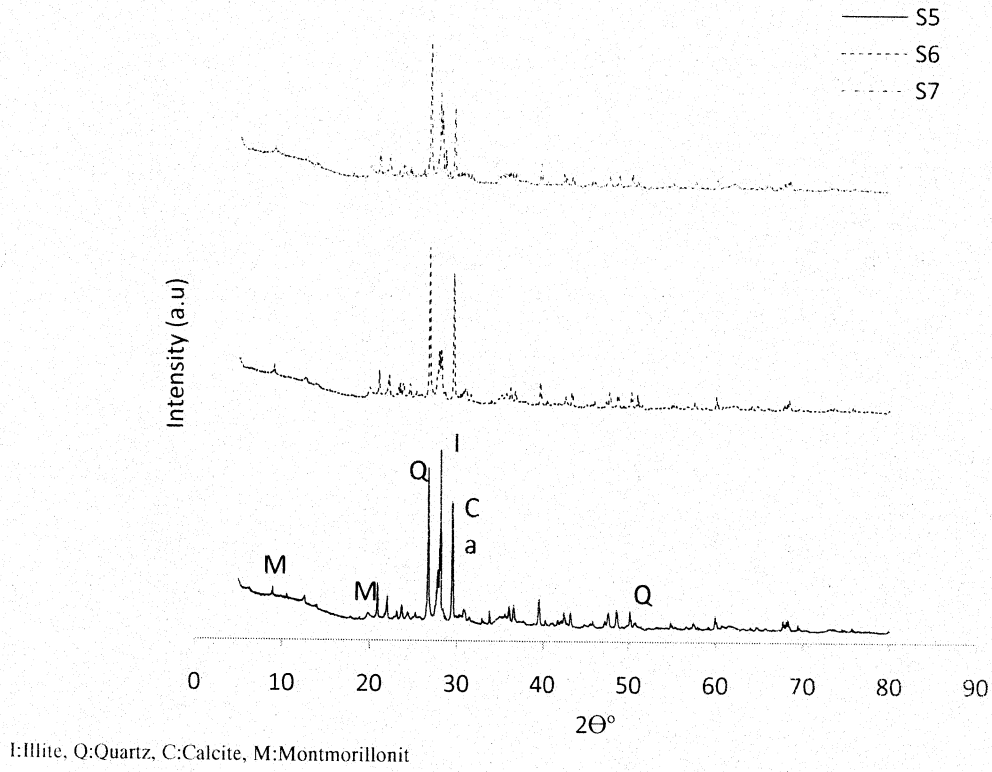
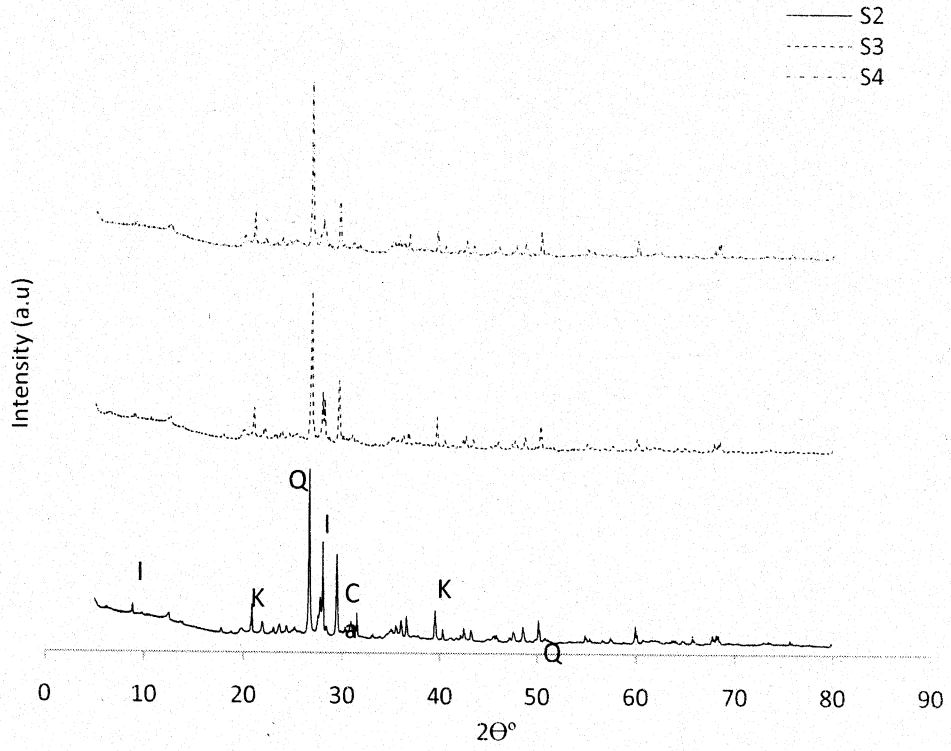
I:Illite, Q:Quartz, Ca:Calcite,

Şekil 5.4 Silt XRD sonuçları

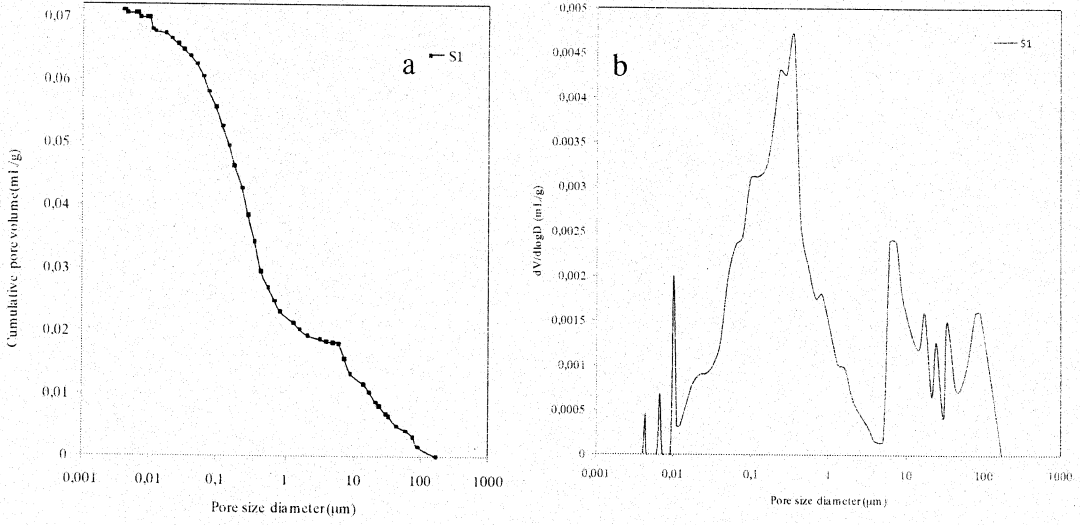


K:Kaolinite, Q:Quartz, M:Montmorillonite, A:Anorthite

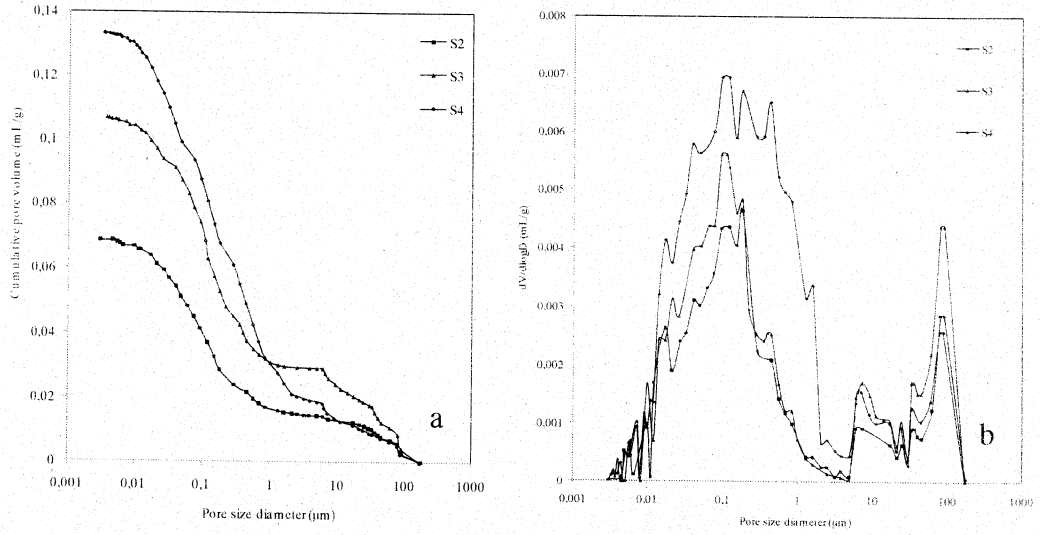
Şekil 5.5 Bentonit ve Kaolin kili XRD sonuçları



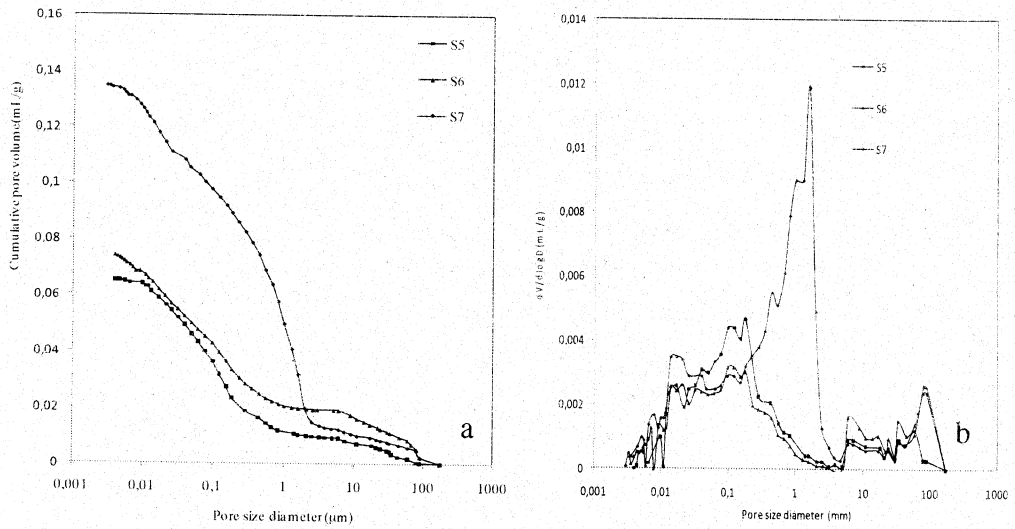
Şekil 5.6.a. Silt ve Kaolin ilaveli karışımın XRD sonuçları b. Silt ve Bentonit ilaveli karışımın XRD sonuçları



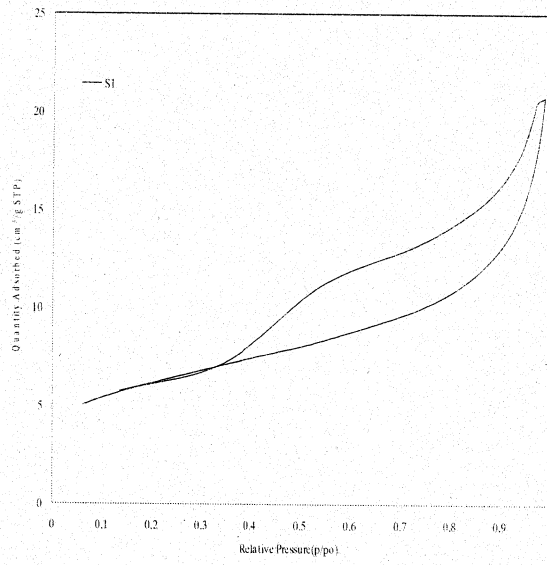
Şekil 5.7 Siltin civa porozimetresi sonuçları



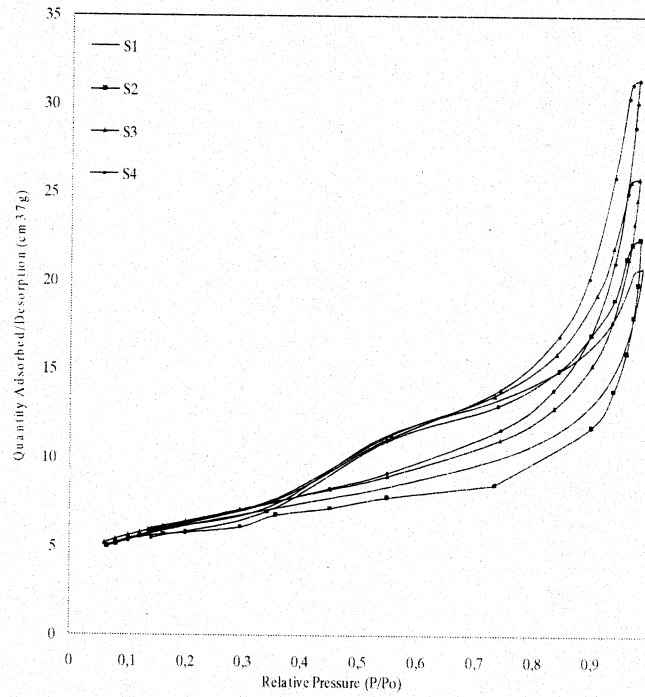
Şekil 5.8 Siltli kaolin karışımlarının civa porozimetresi sonuçları



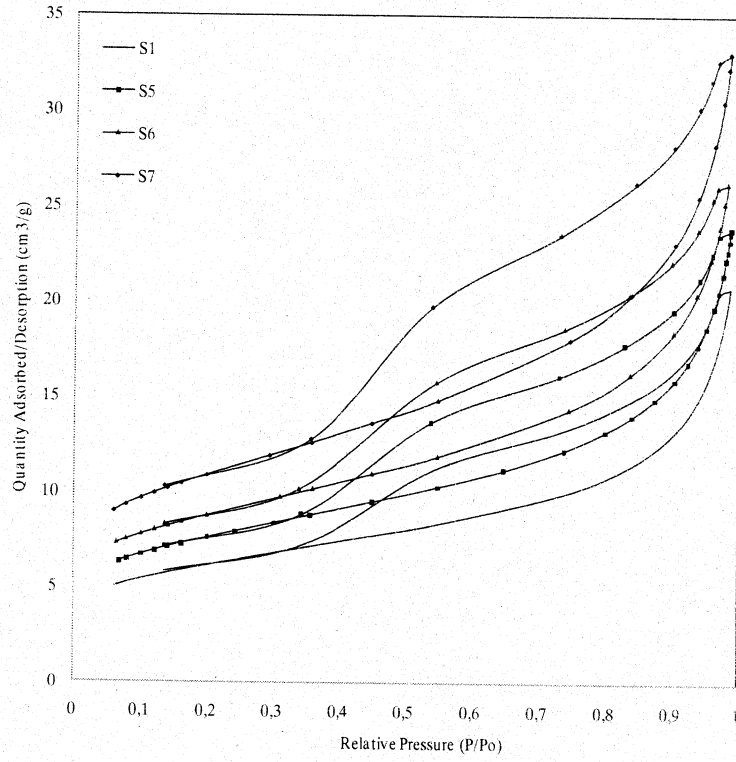
Şekil 5.9 Siltli bentonit karışımlarının civa porozimetresi sonuçları



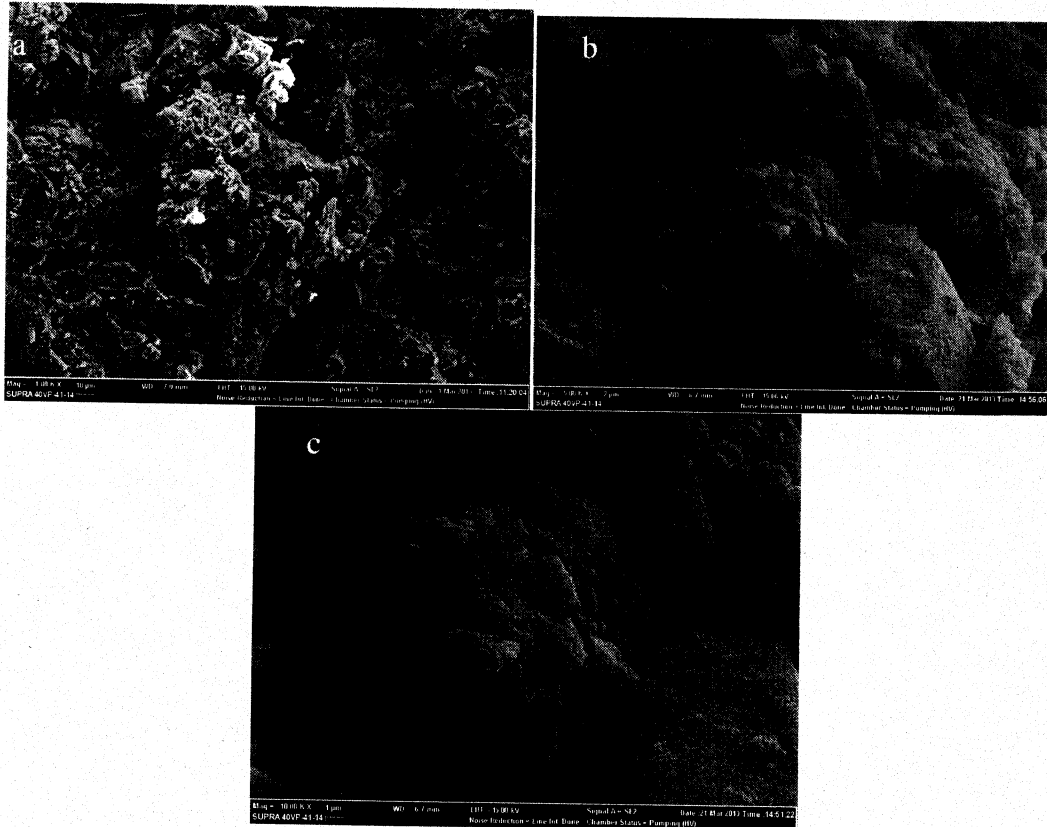
Şekil 5.10 Siltin BET izoterminin



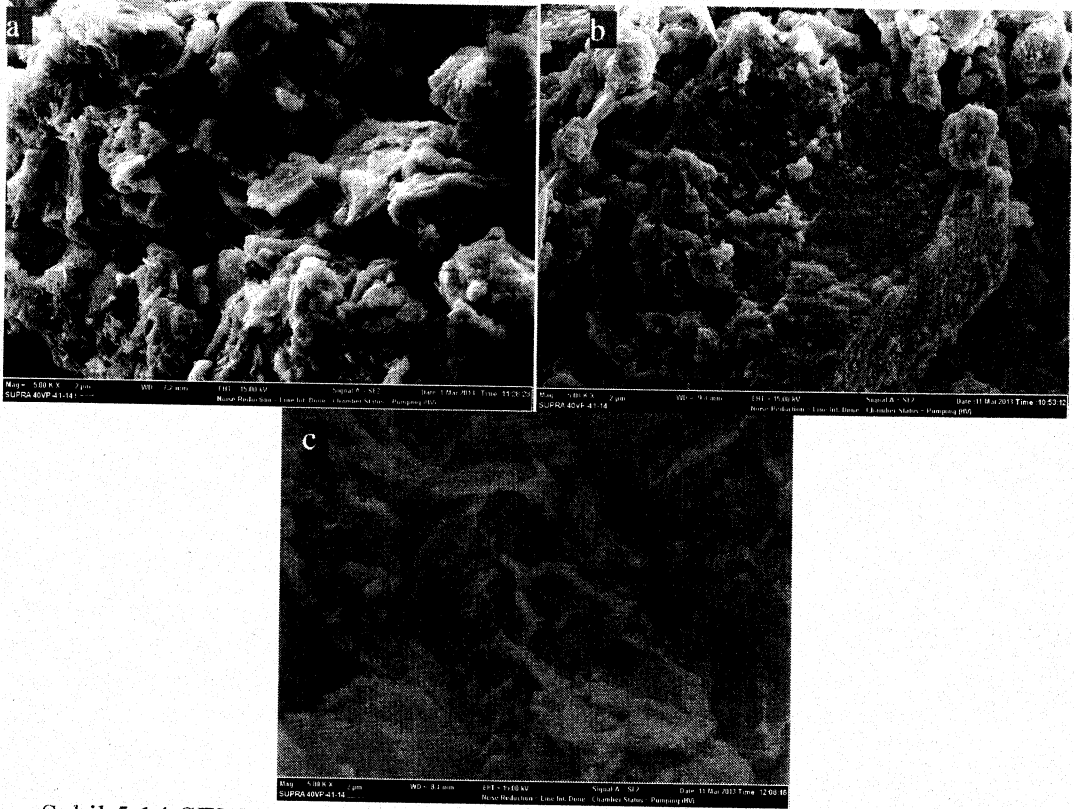
Şekil 5.11 Siltli kaolinin BET izotermi



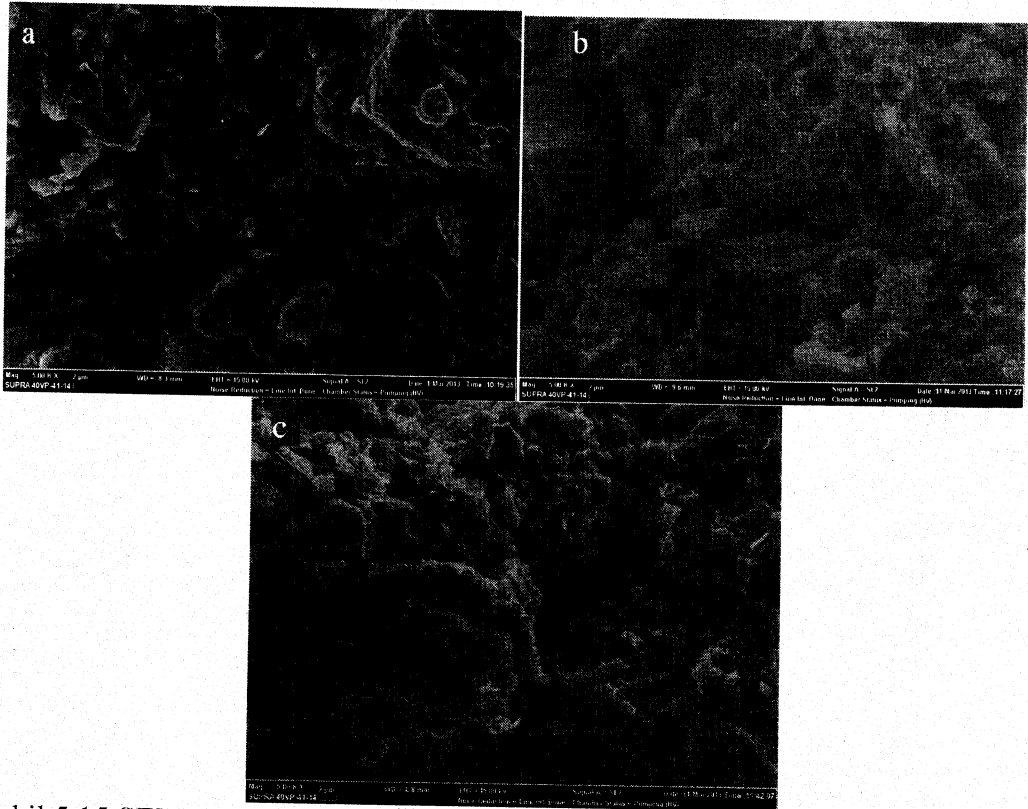
Şekil 5.12 Siltli bentonitin BET izotermleri



Şekil 5.13 Siltli SEM görüntüleri a. 1000x b.5000x c.10000x



Şekil 5.14 SEM görüntüleri (5000x)a.10% Kaolin.20% Kaolin c.40% Kaolin



Şekil 5.15 SEM görüntüleri (5000x)a.10% Bentonit 20% Bentonit c.40% Bentonit

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada zemin olarak bentonit, kaolin kili ana malzeme olarak kullanılmıştır. Karışımlar üzerinde kompaksiyon ve serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Bu kil içerisine farklı oranlarda kireç ve çimento katılmış ve bu karışımlara 0, 7, 14 ve 28 günlük kür süreleri uygulanmıştır. Bu stabilizasyondan sonra karışımlar üzerinde deneyler yapılmış ve zemin stabilizasyonu üzerine etkileri belirlenmiştir. Serbest basma deneyinde en yüksek mukavemet değeri 28 günlük kürde bekleyen numunelerde görülmüştür. Çalışmanın daha fazla sayıda deneyler, kür süresi ve katkı oranlarının değiştirilerek detaylı araştırılması önerilmektedir. Bu çalışmada sonuç olarak, kumun mekanik iyileştirme olarak kullanılabilmesi ve, kireç ve çimentonun yüksek plastisiteli zeminlerin kimyasal stabilizasyonunda kullanılabilmesi görülmüştür.

7.KAYNAKLAR

Kumar, A. Walia, B.S. Mohan, J. (2006). Compressive strength of fiber reinforced highly compressible clay. *Construction and Building Materials* 20, pp. 1063–1068.

Tunç, E., (2002). Yol mühendisliğinde geoteknik ve uygulamaları. Atlas yayın dağıtım, İstanbul. pp. 192-193.

Dunlop, RJ Lime stabilisation for New Zealand Roads National Roads Board, Wellington NZ, 1977

Okyay, U.S. and Dias, D., “Use of lime and cement treated soils as pile supported load transfer platform”, *Engineering Geology*, 114, 34–44, 2010.

Aggregate Handbook, National Stone Association, Washington, D.C. (1996).

Cheung, L.W., Dawson, R.A., “Effects of Particle and Mix Characteristics on Performance of Some Granular Materials”, *Transportation Research Record*, n. 1787, 90–98, (2002).

Ismail, I., Raymond, G., “Investigation into the Behavior of Crushed Aggregate when Loaded Repeatedly”, *Ground and Water: Theory and Practice, Proceedings of 55th Canadian Geotechnical and 3rd Joint IAH-CNC Groundwater Specialty Conference, Niagara Falls, Ontario*, (2002).

Kolisoja, P., Saarenketo, T., Peltoniemi, H., Vuorimies, N., “Laboratory Testing of Suction and Deformation Properties of Base Course Aggregates”, *Transportation Research Record*, n. 1787, 83–89, (2002).

AASHTO, “Guide for Design of Pavement Structures”, Vol 2; American Association of State Highway and Transportation Officials, (1986).

TS 1900-1, İnşaat Mühendisliğinde Zemin Deneyleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2007.

TS 1500, İnşaat Mühendisliğinde Zeminlerin Sınıflandırılması, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2000.

Yılmaz, A., Antalya Ferrokrom İşletmesinin Elektrik-Ark Fırını Cürufurlarının ve Baca Tozu Atıklarının Asfalt Betonunda Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, 2002.

Esener, A. B., Toprak Dolgu Yapıların Projelendirilmesinde Geoteknik Çalışmalar, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, (2005).

Bergado, D.T., Anderson, L.R., Miura, N., Balasubramaniam, A.S., 1996. Soft Ground Improvement, in Lowland and other Environments. ASCE Press, pp. 427.

- Thompson, M.R., and Smith K.L., 1990. "Repeated Triaxial Characterization of Granular Bases," Transportation Research Record 1278; TBR, Washington, DC.
- Burland, J. B. (1990). On the compressibility and shear strength of natural clays. *Géotechnique*, Vol. 40, No. 3, 329-378.
- Liu, M.D. and Carter, J.P. (1999). Virgin compression of structured soils. *Géotechnique*, Vol.49, No. 1, 43-57.
- Mitchell, J.K. (1976). *Fundamentals of Soil Behaviour*. John Wiley & Sons, Inc. Printed in the United States of America.
- Dumbleton M. J. and West G., Some Factors Affecting the Relation Between the Clay Minerals in Soils, and their Plasticity, *Clay Minerals* (1966) 6, 179.
- Grabowska and Olszewska 1970 Physical Properties of Clay Soils as a Function of Their Specific Surface. Proceedings of the 1st International Congress of the International Association of Engineering Geology. No. 1, 405-410.
- Robinson R. G. and Allam, M. M., Effect of Clay Minerology on Coefficient of Consolidation, *Clays and Clay Minerals*, Vol. 46, No. 5, 596-600, 1998.
- Tanaka, H., and Locat, J. 1999. A microstructural investigation of Osaka Bay clay: the impact of microfossils on its mechanical behaviour. *Canadian Geotechnical Journal*, 36: 493-508
- Horpibulsuk, S., Yangsukkaseam, N., Chinkulkijniwat, A., Du, Y.J., Compressibility and permeability of Bangkok clay compared with kaolinite and bentonite, *Applied Clay Science*, 52 (2011) 150-159.
- Dananaj, I. Frankovska, J. and Janotk I., The influence of smectite content on microstructure and geotechnical properties of calcium and sodium bentonites, *Applied Clay Science* 28 (2005) 223- 232
- Ninjarav, E. Chung S-G, Jang, W-Y and Ryu C-K, Pore Size Distribution of Pusan Clay Measured by Mercury Intrusion Porosimetry, *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 11, No. 3 / May 2007 pp. 133~139

8.EKLER

8.1. MALİ ETKİNLİKLER

Projenin bütçesi bentonit kili alımı ve analiz bedellerine kullanılmıştır. İlk 6 ayda literatür taraması yapılmıştır. 2. altı aylık dönemde, ilk altı aylık dönemde temin edilen kaolin kili ile hazırlanan karışımların deneylerine devam edilmiş ve bentonit alımı yapılmıştır. Ayrıca silt malzemesine Kaolin ve Bentonit kili ilave edilerek oluşturulan karışımların deneyleri yapılmıştır. Araştırmacının ayrılmasından dolayı ek süre alınmış ve alınan ek sürede deneyler yapılmış ve hazırlanan karışımların analizleri Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında yapılmıştır.

8.2. YAYIMLANMIŞ BİLDİRİLER

Ural, N. 2013. The Relationship Between Microstructure and Geotechnical Properties of Silty Soils, International Porous and Powder Materials Symposium and Exhibition, Çeşme, İzmir, Turkey.