

Problemlil Kil Zeminin Geoteknik zelliklerine
Silis Dumanı ve Kireç Katkısının Etkisi

Görkem Taşcı

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak 2011

The Effect of Silica Fume and Lime on
Geotechnical Parameters of a Problematic Clay Soil

Görkem Taşcı

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Civil Engineering

January 2011

Problemlili Kil Zeminin Geoteknik Özelliklerine
Silis Dumanı ve Kireç Katkısının Etkisi

Görkem Taşcı

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliğı Uyarınca
İnşaat Mühendisliğı Anabilim Dalı
Geoteknik Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Prof. Dr. Hasan Tosun

Ocak 2011

ONAY

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Görkem Taşcı'nın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Problemlili Kil Zeminin Geoteknik Özelliklerine Silis Dumanı ve Kireç Katkısının Etkisi" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğın ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Hasan Tosun

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye : Prof. Dr. Hasan Tosun (Danışman)

Üye : Yrd. Doç. Dr. İsmail ZORLUER

Üye : Yrd. Doç. Dr. Volkan OKUR

Üye : Yrd. Doç. Dr. Murat TÜRKÖZ

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ahmet ORHAN

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Nimetullah BURNAK

Enstitü Müdürü

ÖZET

Problemlili zeminler olarak tanımlanan dispersif ve şişen zeminler inşaat mühendisliği uygulamalarında önemli problemlere neden olmaktadır. Su muhtevastaki artışa bağılı olarak hacimsel genişleme gösteren zeminler, şişen zeminler olarak bilinir. Suyu doygun olmayan bu tip zeminlerin suya bağılı olarak hacim değışimi şişme basıncının oluşmasına neden olur. Gelişen bu basınç kanal kaplaması, borulu sulama veya içme suyu şebekesi gibi hafif yapılarda aşırı derecede hasara neden olmaktadır. Dispersif zeminler ise su ile temas ettiğinde kolloidal parçalar süspansiyon haline geçmekte ve akan suyun varlığında zemin kütlesinden uzaklaşarak erozyona uğramaktadırlar. Bu olay özellikle toprak dolgu barajlarda içsel erozyonun önemli bir nedeni olarak gösterilmektedir.

Bu çalışmada; Afyon İli'nden alınan dispersif ve şişme özelliğine sahip kil zeminin geoteknik özelliklerinin silis dumanı ve sönmüş kireç katkısıyla iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla öncelikle alınan zemin örneğinin tanımlanması ve sınıflanması amacıyla elek analizi, özgül gravite, kıvam limitleri ve kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. Şişme ve dispersif özelliklerinin belirlenmesi amacıyla şişme yüzdesi, şişme basıncı, dağılma ve iğne deliğı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Mühendislik özelliklerin iyileştirilmesi amacıyla her bir katkı seviyesinde belirlenen kompaksiyon karakteristiklerinde % 3 kireç ve değışen oranlarda (%1, %3, %5, %10, %15, %20) silis dumanı katılarak hazırlanmış numuneler üzerinde şişme, dispersiyon ve farklı kür sürelerinde dayanım deneyleri yapılarak katkının etkisi incelenmiştir. Son olarak katkının mikro yapıdaki değışimini incelemek amacıyla XRD ve SEM analizleri yapılmıştır.

Deneyisel çalışmalar sonucunda, özellikle %3 kireç ve %10 silis dumanı katkılı serilerin zeminin mühendislik özelliklerine önemli seviyede iyileştirme sağladığı görülmüştür.

Anatar Kelimeler : Şişen Zemin, Dispersiyon, Zemin İyileştirme, Silis Dumanı, Kireç, Kil

SUMMARY

The dispersive and swelling soils which are defined as problematic soils bring about significant problems in the civil engineering applications. The soils, which shows volumetrical expansion due to the increase in the water content, known as swelling soils. These soils are not saturated by water and the volume change due to the water creates a change in the swelling pressure. This pressure causes excessive damages on the light-structures such as channel coverings, irrigation and potable water networks. On the other hand, when the dispersive soils contact with the water, the colloidal subjects convert into suspension phase and these parts separates from the ground mass at the time of water flow happens. This event is shown one of the major causes of the internal erosions of particularly in the earth-filled dams.

In this study, the aim is to improve the geotechnical properties of clay soil taken from Afyon Province by the contribution of silica-fume and hydrated lime. The soil taken from Afyon Province has dispersive and swelling properties. For this purpose, at first, the sieve analysis, specific gravity, consistency limits and compaction tests were carried out for the identification and the classification of the soil samples. In order to designate the dispersive and the swelling properties, the swelling percentage, the swelling pressure, the dispersion and the pinhole tests were carried out. To improve the engineering properties, at every contribution level, the samples tested, according to determined complication characteristics and with 3% of lime and with the varying proportions of (1%, 3%, 5%, 10%, 15%, 20%) silica-fume. For this purpose the swelling tests, the dispersion tests and the unconsolidated undrained triaxial test to different curing periods were carried out. Finally, in order to examine the transformation of the contribution in the micro-structure, the XRD and the SEM analysis were carried out. As a result of experimental studies, it is observed that especially the 3% lime and 10% silica fume contributed series cause significant level of improvement in the engineering properties of the soil.

Keywords: Swelling Soils, Dispersion, Stabilization of Soil, Silica-Fume, Lime, Clay

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanması sırasında bana yol gösteren ve tecrübeleri ile çalışmalarımı yönlendiren danışman hocam Prof. Dr. Hasan TOSUN'a ve yapmış oldukları yardımlardan dolayı Yrd. Doç. Dr. Murat TÜRKÖZ ve Dr. Hasan SAVAŞ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca yüksek lisans çalışmamın her aşamasında vermiş oldukları destekten dolayı aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1 Genel	1
1.2 Amaç	2
1.3 Kapsam	3
2. KİL MİNERALLARININ OLUŞUMU VE TANIMLANMASI	3
2.1 Kil Minerallerinin Oluşumu	3
2.1.1 Kaolinit	5
2.1.2 Montmorillonit	5
2.1.3 İllit	6
2.2 Kil Minerallerinin Tanımlanması	7
3. ŞİŞEN VE DİSPERSİF ZEMİNLERİN TANIMLANMASI VE SINIFLANDIRILMASI	10
3.1 Şişen Zeminler	10
3.1.1 Şişme mekanizması	11
3.1.2 Şişme yüzdesi ve şişme basıncı	14
3.1.3 Şişen zeminlerin tanımlanması ve sınıflanması	15
3.1.3.1 Tanımlama deneyleri	15
3.1.3.2 Sınıflama deneyleri	18
3.1.3.3 Doğrudan ölçümler	19
3.2 Dispersif Zeminler	24
3.2.1 Dispersiyon mekanizması	25

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
3.2.2 Dispersif zeminlerin tanımlanması ve sınıflanması	27
3.2.2.1 Dağılma deneyi	28
3.2.2.2 Çifte hidrometri	29
3.2.2.3 İğne deliği deneyi	32
3.2.2.4 Kimyasal deneyler	35
4. PROBLEMLİ ZEMİNLERİN STABİLİZASYONU	38
4.1 Sıkıştırma	38
4.2 Dinamik Sıkıştırma	39
4.3 Ön Yükleme	40
4.4 Ön Islatma	40
4.5 Katkı Malzemeleri Yardımı ile ZeminStabilizasyonu	41
4.5.1 Kireç stabilizasyonu	41
4.5.2 Çimento stabilizasyonu	43
4.5.3 Uçucu kül ile stabilizasyon	44
4.5.4 Diğer katkılarla stabilizasyon	44
4.6 Dispersif Killerin Stabilizasyonu	45
5. MALZEME VE YÖNTEM	46
5.1 Malzeme	46
5.1.1 Zemin	46
5.1.2 Kireç	48
5.1.3 Silis Dumanı	49
5.1.3.1 Sils dumanı ile daha önce yapılan çalışmalar	52
5.2 Deneysel Çalışma Programı	53
5.2.1 Kıvam limiti deneyleri	54
5.2.2 Kompaksiyon deneyleri	55
5.2.3 Elek analizi deneyleri	55

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
5.2.4 Özgül ağırlık deneyleri	56
5.2.5 Eades ve Grim pH deneyi	57
5.2.6 Şişme deneyleri	58
5.2.6.1 Şişme basıncı deneyleri	58
5.2.6.2 Şişme yüzdesi deneyleri	58
5.2.7 Dispersiyon deneyleri	59
5.2.8 Üç Eksenli Basınç deneyleri	60
5.2.9 XRD ve SEM analizleri	61
6. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA	63
6.1 Eades ve Grim pH Deneyi Sonuçları	63
6.2 Kıvam Limiti Deneylerinin Sonuçları	64
6.3 Kompaksiyon Deneylerinin Sonuçları	65
6.4 Elek Analizi Deneylerinin Sonuçları	66
6.5 Özgül Gravite Deneylerinin Sonuçları	67
6.6 Şişme Deneylerinin Sonuçları	68
6.6.1 Şişme basıncı deneylerinin sonuçları	68
6.6.2 Şişme yüzdesi deneylerinin sonuçları.....	70
6.7 Dispersiyon Deneylerinin Sonuçları	72
6.7.1 Dağılma deneylerinin sonuçları	72
6.7.2 İğne deliği deneylerinin sonuçları	72
6.8 Üç Eksenli Basınç Deneyi Sonuçları	76
6.9 Taramalı Elektron Mikroskop Analizleri (SEM)	78
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	83
8. KAYNAKLAR DİZİNİ	86

İÇİNDEKİLER (devam)**EKLER**

- Ek A. Kıvam Limiti Eğrileri
- Ek B. Kompaksiyon Eğrileri
- Ek C. Tane Dağılımı Eğrileri
- Ek D. Göçme Zarfları
- Ek E. XRD Analizleri

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 (a) Tek silika tetrahedronu	4
2.1 (b) Tek alüminyum (veya magnezyum) oktahedronu	4
2.2 Kaolinit yapısının şematik diyagramı	5
2.3 Montmorillonit yapısının şematik diyagramı	6
2.4 İllit yapısının şematik diyagramı	7
3.1 Kil yüzeyi ve absorbe edilen su mekanizması	13
3.2 Numunelerin kuru yoğunluk-likit limit ilişkisi	17
3.3 Şişme potansiyeli tahmini	20
3.4 Ödometre serbest şişme deney sonucu	23
3.5 Ödometre sabit hacimde şişme deney sonucu	24
3.6 Kil-su sisteminde fiziko-kimyasal kuvvetler	26
3.7 Bir kil-su sisteminde fiziko-kimyasal kuvvetler	28
3.8 Çifte hidrometre deney sonuçlarına bağlı dispersiyon yüzdesi	30
3.9 Dağılıma deneyi değerlendirme kriterleri	31
3.10 Numune içinde delik açılması	32
3.11 İğne deliği deney ekipmanı	34
3.12 İğne deliği deney sonuçlarına bağlı nicel değerlendirme yöntemi	34
4.1 Kirecin kompaksiyon karakteristiklerine etkisi	42
5.1 Zemine ait çifte hidrometri analizi sonucu	47
5.2 Zemine ait kompaksiyon eğrisi	47
5.3 Zeminin plastisite kartındaki yeri	48
5.4 Elektrik-ark fırınında silis dumanı oluşumu	50
5.5 Silis dumanı	51
5.6 Ferrosilisyum üretim şeması ve baca tozlarının toplanması	52
5.7 Standat Proktor çekici ile kompaksiyon kalıbına sıkıştırılmış bir numue	56
5.8 Vakum pompası yardımı ile havanın alınması	57
5.9 Şişme basıncı deney ekipmanı	59
5.10 Şişme yüzdesi deney ekipmanı	60

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.11 Üç eksenli basınç deneyi için hazırlanan numuneler	61
5.12 Üç eksenli basınç deneyi ekipmanı	61
6.1 Eades ve Grim pH deneyinden elde edilen sonuçlar	63
6.2 Katkılı ve katkısız numunelerin kompaksiyon eğrileri	66
6.3 Kireç ve SD katkılı numunelerin karşılaştırmalı şişme basıncı-zaman eğrileri	69
6.4 Kireç ve silis dumanı katkısının malzemenin şişme basıncı değerine etkisi	69
6.5 Kireç ve SD katkılı numunelerin karşılaştırmalı şişme yüzdesi-zaman eğrileri	71
6.6 Kireç ve silis dumanı katkısının malzemenin şişme yüzdesi değerine etkisi	71
6.7 İğne deliği deneylerinin toplu sonuçları	73
6.8 Dağılıma deneyi sonuçları	74
6.9 Kür süresinin kohezyona (c) etkisi	77
6.10 Kür süresinin içsel sürtünme açısına (ϕ) etkisi	77
6.11 Katkısız numunenin SEM analizi sonuçları	79
6.12 %3 kireç katkılı numunenin farklı noktalardan elde edilen 5000 büyütme SEM analiz sonuçları	80
6.13 %3 kireç ve %10 Silis katkılı numunenin farklı noktalarından elde edilen SEM analiz sonuçları	81
6.14 %3 kireç ve %10 Silis katkılı numunenin farklı noktalarından elde edilen ve farklı büyütme oranlarındaki SEM analiz sonuçları	82

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Yaygın kil mineral tiplerinin kimyasal oluşumu	8
2.2 Kil minerallerinin karşılaştırmalı özellikleri	9
3.1 Kil minerallerinin aktivitesi	16
3.2 Üç ana kil minerali için tipik KDK değerleri	17
3.3 Yüksek plastisiteli killer için zemin indis özelliklerine bağlı muhtemel hacim değişikliği ilişkisi	18
3.4 Zeminin fiziksel özellikleri ve SPT verilerine bağlı şişen zemin sınıflaması ...	19
3.5 Plastisite İndisine bağlı şişen zemin sınıflaması	19
3.6 Şişme-büzülme potansiyelinin PVC deneyi sonuçlarına bağlı olarak sınıflandırılması	21
3.7 Genleşme indisine bağlı olarak şişme potansiyelinin tahmini	22
3.8 Dispersiyon yüzdesine bağlı nitel sınıflama	29
3.9 Değişebilir sodyum yüzdesi değerine bağlı sınıflama	35
3.10 Dispersif zeminlerin tanımlanması için sınıflandırma sistemi	37
4.1 Zemin iyileştirme yöntemlerinin sınıflandırılması	38
5.1 Malzemenin geoteknik parametreleri	46
5.2 Zeminin kimyasal analiz sonuçları	48
5.3 Sönmüş kirecin kimyasal ve fiziksel analizi	50
5.4 Silis dumanının kimyasal analizi	51
5.5 Deneysel çalışma programı	54
6.1 Silis dumanı katkısının, kilin kıvam limitine olan etkisi	64
6.2 Elde edilen kompaksiyon parametreleri	65
6.3 Kireç ve silis dumanı katkısının malzeme tane boyutuna olan etkisi	67
6.4 Kireç ve silis dumanı katkısının malzemenin özgül gravitesine olan etkisi	67
6.5 Kireç ve silis dumanı katkısının malzemenin şişme basıncı değerlerine etkisi	68
6.6 Kireç ve silis dumanı katkısının malzemenin şişme yüzdesi değerine etkisi	70
6.7 Katkı miktarı ve kür süresinin kayma parametrelerine olan etkisi	76

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1. 1 Genel

Problemlili zeminler olarak tanımlanan, dispersif ve şişme potansiyeline sahip kil zeminler bu özellikleri nedeni ile mühendislik yapılarında önemli problemlere neden olmaktadır.

Suya doygun olmayan bir zeminin su muhtevsındaki artışla paralel olarak artan hacim değişimi zeminin şişmesi olarak tanımlanmaktadır. Şişen bir zeminin ıslanmasıyla birlikte yapı temelinin tabanında büyük kuvvetler meydana gelir. Bu durum yapılarda büyük hasarlara neden olmaktadır. Şişen zemin problemi ilk defa; 1938 yılında ABD Su İşleri Teşkilatı tarafından tanımlanmıştır. Oregon Eyaleti'ndeki Owyhee projesinde inşa edilen bir çelik sifon temelinde ters yönde çalışan yer değiştirmelerin oluştuğu gözlenmiştir (Chen, 1988).

Bir diğer zemin problemi ise zeminin dispersif davranışıdır. Dispersiyon, zeminlerin yavaş hareket eden su içinde hızla erezyona uğradığı bir olay olarak bilinir. Bu durumda koloidal kil mineralleri, diğer normal killerden farklı olarak, su içinde solüsyona dönüşür. Su içinde bulunan kil parçacıkları arasındaki elektriksel yüzey kuvvetleri çekim kuvvetlerini aşıyorsa, bağımsız kil parçacıkları zemin yüzeyinden ayrılır ve su içinde süspansiyon haline geçer. Eğer su akış halinde ise, kil parçacıkları uzaklara taşınarak kil kütlelerinin ayrışmasına ve dağılmasına neden olur (Tosun, 1994). Bu olay, özellikle toprak yapılarda içsel erezyonun nedeni olarak gösterilmektedir.

Zeminin dispersif veya şişme özelliğine sahip olduğu durumlarda, proje sahasının değiştirilme imkanı yoksa, zemininin mühendislik davranışının iyileştirilmesine gidilmelidir. Bu yöntemlerden bazıları sıkıştırma, sürşarj uygulaması, kimyasal katkıların kullanılması, şişen zemin tabakasının kaldırılıp stabil zemin tabakasıyla değiştirilmesi, kireç ve çimento ile zemin stabilizasyonudur.

1.2 Amaç

Kil zeminlerin dispersibilite ve şişme gibi istenmeyen özelliklerinin iyileştirilmesi mühendislik uygulamalarında önemli bir yere sahiptir. Daha önce problemlili zeminlerin kireç, çimento, uçucu kül ve diğer bazı katkılarına iyileştirilmesine yönelik değişik araştırmalar yapılmıştır. Bu çalışmada da, silis dumanını ve sönmüş kirecin, Afyon ilinden alınan, yüksek şişme potansiyeline sahip ve dispersif bir kilin mühendislik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Silis dumanının, sönmüş kireç ile birlikte kullanılmasının nedeni, silis dumanının bir puzolan malzeme olmasıdır.

1.3 Kapsam

Bu çalışma kapsamında, Afyon'dan alınan yüksek şişme potansiyeline ve dispersif özelliğe sahip kilin kireç ve silis dumanı kullanılarak stabilizasyonu amacıyla, numunelere önce elek analizi, özgül gravite, kıvam limiti, kompaksiyon deneyleri daha sonra malzemelerin şişme, dispersiyon ve mukavemete olan etkilerini göstermek amacıyla şişme yüzdesi ve şişme basıncı deneyleri, dağılma ve iğne deliği deneyleri ve üç eksenli basınç deneyleri uygulanmıştır.

Çalışmanın amacı ve kapsamı birinci bölümde sunulmaktadır. Kil minerallerinin oluşumu ve tanımlanması ikinci bölümde, şişen ve dispersif zeminlerin tanımlanması ise üçüncü bölümde anlatılmaktadır. Dördüncü bölümde zemin stabilizasyonu hakkında genel bir bilgi verilmiştir. Kullanılan malzemeler ve izlenen yöntem beşinci bölümde ele alınmıştır. Altıncı bölümde deneylerden elde edilen sonuçlar, yedinci bölümde ise öneriler kısmı yer almaktadır.

BÖLÜM 2

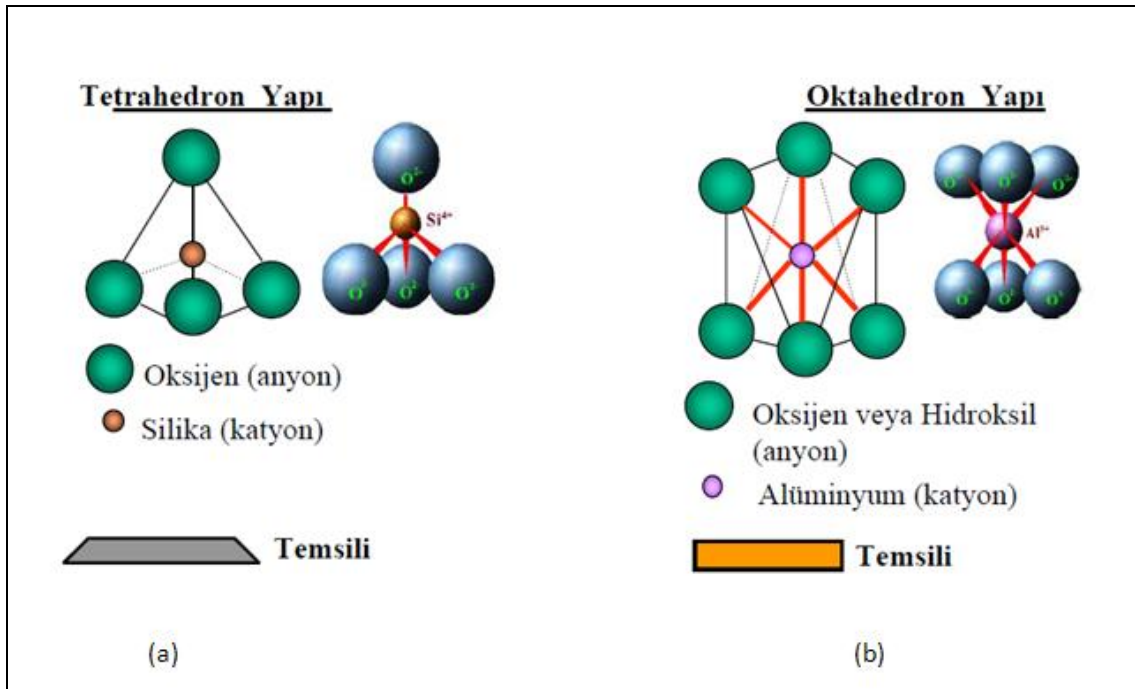
KİL MİNERALLERİNİN OLUŞUMU VE TANIMLANMASI

Kil terimi, kaolinit, illit vb. spesifik minerallere işaret eder. Ancak mühendislikte kil denildiği zaman killi zeminler kastedilmektedir. Killi zeminden anlaşılan ise bileşenleri kil mineralleri ile bir kısım diğer minerallerden oluşan plastisitesi olan kohezyonlu bir zemindir. Kil mineralleri çok küçük partiküller olup elektrokimyasal olarak çok aktiftirler. Bir zemin kütlesi içinde az miktarda dahi kil minerallerinin varlığı o kütlenin mühendislik özelliklerini önemli ölçüde etkileyebilir. Kil mineralleri arttıkça zeminin davranışı kilin özellikleri tarafından kontrol edilir. Kil içeriği yaklaşık % 50 olduğu zaman kum ve silt taneleri aslında bir hamur içinde yüzen taneler gibidirler ve mühendislik davranışları üzerinde etkileri çok düşüktür (Holtz and Kovacs, 1981).

Genellikle 0,002 mm'den daha küçük taneli malzemeye kil denilmektedir. Ancak tek başına tane boyutu, kil partiküllerinin davranışını yeterli bilgiyi sağlamaz. İnce taneli zeminlerin tane boyutuna ilaveten belki de en önemli özelliği mineralojik oluşumlarıdır (Chen, 1988).

2.1 Kil Minerallerinin Oluşumu

Kil mineralleri bazı kaya yapıcı minerallerin kimyasal bozuşmaları sonucunda oluşan çok küçük, kristalsi maddelerdir. Kimyasal anlamda sulu alüminasilikatlar ile diğer metalik iyonlardan oluşmuşlardır. Tüm kil mineralleri çok küçük olup sadece (çapları 1µm'den küçük) elektron mikroskobu ile görülebilirler. Münferit kristaller küçük katmanlardan oluşmaktadır. X ışını kırınım (XRD) çalışmaları bu levhacıkların, atomik yapısı tekrarlanan çok sayıda kristal levhalarından meydana geldiğini göstermiştir. Aslında, tetrahedral veya silika ile oktahedral veya alümina olmak üzere sadece iki çeşit kristal levhası bulunmaktadır. Bu levhaların değişik bağlarla ve farklı metalik iyonlarla birbirine bağlanmasıyla değişik kil mineralleri oluşmaktadır (Holtz and Kovacs, 1981).



Şekil 2.1. (a) Tek silika tetrahedronu, (b) Tek alüminyum (veya magnezyum) oktahedronu (Grim, 1959)

Tetrahedral levha tek silis atomunu kuşatan dört oksijen atomundan oluşan silika tetrahedral birimlerinin birleşiminden oluşmaktadır. Her tetrahedronun tabanındaki oksijenler aynı düzlem üzerindedirler ve düzleme katılmayan oksijen köşelerinin hepsi aynı yönü işaret eder. Tetrahedral levhanın yaygın olarak kullanılan şematik şekli Şekil 2.1. (a)' da gösterilmektedir.

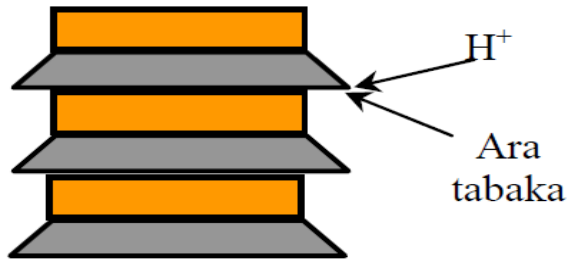
Oktahedral levhalar alüminyum, magnezyum, demir veya diğer atomları kuşatan altı oksijen veya hidroksilden oluşan oktahedral birimlerinin birleşmesinden oluşmaktadır. Oksijen veya hidroksillerin levhadaki dizileri iki düzlem üzerindedir. Şekil 2.1. (b)' de oktahedral levhanın şematik temsili gösterilmektedir (Holtz and Kovacs, 1981).

Oktahedral ve tetrahedral yapılar, oktahedral ve tetrahedral levha şekillerini alarak birlikte polimer yapı oluşturur. Oluşan levhaların birleşimi ve düzenlenmesi, farklı yapıların oluşmasına sebep olur. Temel yapıdaki değişimler neticesindeki bilinen

kil mineralleri oluşur. Sonuç olarak bütün kil mineralleri, iki temel levha yapısının değişik şekillerde biraraya gelmesiyle oluşur (Türköz, 2007).

2.1.1 Kaolinit

Kaolinit bir tetrahedral ve bir oktahedral levhanın sürekli tekrarlanan katmanlarından oluşmuştur. Bir katmanda bir oktahedral ve bir tetrahedral levha olmasından dolayı 1:1 kil minerali şeklinde anılır. Kalınlığı yaklaşık olarak 0,72 nm olup diğer iki yöndeki uzanımı belirsiz ve birbirini izleyen bu katmanlar oktahedral levhanın hidroksilleri ile tetrahedral levhanın oksijenleri arasındaki hidrojen bağı ile birbirlerine bağlanır. Kaolinit kil mineralleri arasında en düşük şişme potansiyeline sahip kildir.



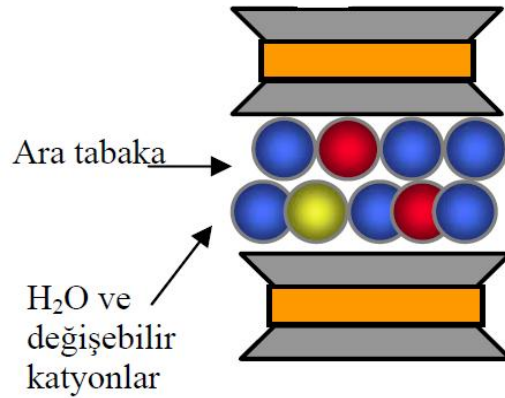
Şekil 2.2. Kaolinit yapısının şematik diyagramı.

Kaolinit, porselen kilinin ana bileşenidir. Ayrıca, kağıt, boya ilaç sanayisinde de kullanılmaktadır.

2.1.2 Montmorillonit

Bazen smektit olarak da adlandırılan montmorillonit iki silika levhası ile bir alümina (gibsit) levhasından oluşan önemli bir mineraldir. Bu yüzden 2:1 minerali olarak adlandırılır. Şekil 2.3’de görüldüğü üzere, oktahedral levhası iki silika levhası arasına gelerek bir katmanı oluşturmaktadır. Burada silika levhasındaki

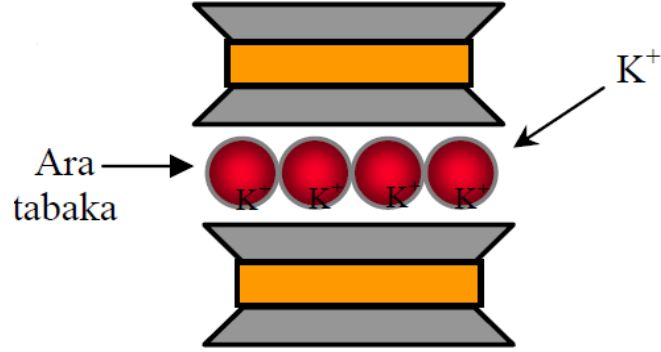
tetrahedronların uçları oktahedral levhanın hidroksilleri ile birleşmektedir. 2:1 katmanının kalınlığı yaklaşık olarak 0,96 nm olup, kaolinitte olduğu gibi diğer iki yöndeki uzanımı belirsizdir. Silika levhalarının tepesini bağlayan van der Waals kuvvetlerinin zayıf olması ve oktahedral levhada da net bir negatif yük boşluğu olmasından dolayı, su ve değişebilir iyonlar katmanlar arasına girerek bunları ayırabilir. Bu nedenle, bir montmorilonit kristali çok küçük olabilir. Fakat, aynı zamanda çok yüksek su çekim gücüne sahiptir. Montmorilonit içeren zeminler (özellikle artan su içeriklerinde) şişmeye karşı son derece duyarlı olup gelişen şişme basıncı hafif yapılara ve yol kaplamalarına zarar verebilmektedir. Montmorilonitin sanayi ve eczacılıkta pek çok alanda kullanımı söz konusudur. Montmorilonit, evcil hayvan altlığı olarak da kullanılmaktadır. Çikolata imlatında bile kullanılmaktadır.



Şekil 2.3. Montmorillonit yapısının şematik diyagramı.

3.1.3 İllit

Illionis Üniversitesi profesörlerinden R. E. Grim tarafından keşfedilen illit kil zeminlerdeki bir diğer önemli bileşendir. Montmorillonit gibi illit de 2:1 mineraldir. Ancak, katmanlar arasındaki bağ potasyum iyonu ile sağlanmaktadır. İllitin Kristal yapısı mikaya benzese de, daha az potasyum ve daha az izomorf yer değiştirme söz konusudur. Bu nedenle, kimyasal olarak diğer mikalardan daha aktiftirler (Holtz and Kovacs, 1981).



Şekil 2.4. İllit yapısının şematik diyagramı.

2.2 Kil Minerallerinin Tanımlanması

Kil mineralleri çok küçük olduklarından jeolojide kullanılan optik mineroloji teknikleri ile teşhisleri imkansız olup, bunların tanınmasında başka yöntemlere başvurulmaktadır. Bilindiği gibi, kristal yapısı düzenli ve tekrarlı malzemeler X ışını kırarlar. Farklı kristal yapısına sahip minerallerin X ışını kırınımı (X-ray diffraction; XRD) paternleri de farklıdır ve bu mineraller ilk olarak paternler sayesinde tanımlanmaktadır. Yaygın minerallerin paternlerini literatürde bulmak mümkündür. Bu sayede bilmediğiniz bir minerale ait paterni, yayınlanmış olanlarla karşılaştırmak mümkündür. Kil minerallerinin karışımından oluşan zeminler, organik madde içeren zeminler, kilden başka mineral içeren zeminler ve karışık tabakalı kil minerali içeren zeminlerde bu açıdan bir takım sorunlar bulunmaktadır. Genellikle ayrıntılı bir nicel analiz imkansızdır. Bu konuda söylenebilecek tek şey, zeminde hangi minerallerin kabaca hangi oranlarda bulunduğu.

Kil minerallerinin teşhisinde kullanılan bir diğer teknik de diferansiyel termal analizdir. Bileşimi bilinmeyen bir zemin örneği bir asal kontrol maddesi ile birlikte etüv içerisinde birkaç yüz dereceye kadar ısıtılır ve kil minerallerinin özel yapılarından dolayı ısılarda belirli değişiklikler meydana gelir. Bu değişiklikler belirli mineraller

için belirli ısılarda meydana gelir ve bu değişikliklere ait kayıtlar bilinen mineraller ile karşılaştırılabilir.

Taramalı (scanning) ve yaymalı (transmission) elektron mikroskopisi de bir zemindeki kil minerallerinin tanınmasında kullanılmaktadır. Bu süreç kolay ve nicel değildir (Holtz ve Kovacs, 1981). Değişik kil mineralleri kimyasal analiz yapılarak da tanımlanabilmektedir (Çizelge 2.1). Ancak kimyasal analiz sonuçlarına bağlı olarak yapılan kil minerallerinin tanımlanması, X-ray difraktometre veya diferansiyel termal analizlere oranla daha zordur (Türköz, 2007).

Çizelge 2.1. Yaygın kil mineral tiplerinin kimyasal oluşumu(Mitchel, 1993).

Kil Mineral Tipi	Kimyasal Formülü
Montmorillonit	$Al_2(OH)_2Si_4O_{10}$
İllit	$K_{0.2}Al_4(Si_{8-6}Al_{0.2})O_{20}(OH)_4$
Kaolinit	$Al_2(OH)_4Si_2O_5$

Killerin çok nadir olarak saf halde bulunmaları, bir başka ifadeyle farklı minerallerle karışık halde olmaları tanımlanma aşamasını daha da karmaşıktırır. Kil mineralleri yapısal oluşum açısından değerlendirildiğinde, her grup benzer mühendislik özelliği gösterdiğinden dolayı yapısal gruplamalar daha uyumlu olmaktadır (Nelson and Miller, 1992). Mühendislik amaçlı sınıflamalarda, kil mineralleri genellikle üç grup içinde değerlendirilir: Kaolinit grubu; genellikle genişmez; Mika grubu; illit ve vermikulit tipi killer içerir, fakat genişmeleri önemli problemlere neden olmaz; Smektit grubu; montmorillonitleri kapsar. Yüksek şişme poansiyeline sahiptir ve en problemlili kil tipidir.

Çizelge 2.2. Kil minerallerinin karşılaştırmalı özellikleri (Mitchell, 1993).

Özellik	Montmorillonit	İllit	Kaolinit
Tane Boyutu (μm)	0.01-1.0	0.02-2.0	0.5-5.0
Tane Şekli	Eş boyutlu yaprak	Pul	6 köşeli pul
Dış Yüzey Alanı (m^2/g)	70-120	70-100	10-30
İç Yüzey Alanı (m^2/g)	550-650	-	-
Plastisite	Yüksek	Orta	Düşük
Likit Limit	110-710	60-120	29-70
Plastisite İndisi	51-100	34-60	26-38
Kohezyon	Yüksek	Orta	Düşük
Şişme Kapasitesi	Yüksek	Orta	Düşük
Elektrik Yüğü	0,5-0,9	1,0-1,5	0
KDK ($\text{meq}/100\text{g}$)	80-150	10-40	3-15
Özgöl Gravite	2,35-2,7	2,6-3,0	2,6-2,8
Tabakalar arası mesafe (nm)	1.0-2.0	1.0	0.7
Tabakalar arası bağ	Van der Waal's bağları	Potasyum iyonları	Hidrojen
Net negatif yük (cmolc/kg)	80-120	15-40	2-5

BÖLÜM 3

ŞİŞEN VE DİSPERSİF ZEMİNLERİN TANIMLANMASI VE SINIFLANDIRILMASI

Problemlili zeminler olarak tanımlanan dispersif ve şişen zeminler bu özellikleri nedeni ile birçok mühendislik yapısında ciddi problemlere neden olmaktadır. Toprak yapılarında meydana gelen içsel erozyonun nedeni olarak dispersif zeminler gösterilirken, hafif yapılarda oluşan problemlerin ana kaynağı olarak da şişen zeminler gösterilmektedir. Zeminlerde oluşan şişme sonucunda kil partikülleri arasındaki bağın zayıflamasına bağlı olarak eğer net çekim kuvvetleri tanelerin birbirinden ayrılmasına engel olacak düzeyde ise zeminde şişme, değilse dispersiyon mekanizması hakim olacaktır (Türköz vd., 2010).

3.1 Şişen Zeminler

Şişen zeminler yapı temellerinde farklı hareketlere neden olabilirler. Temel altında şişen zemin olması durumunda, imalatı takip eden birkaç ay içerisinde sorun yaratabileceği gibi, beş yıl gibi uzun bir süre içerisinde de sorun yaratabilir. Eğer zeminin su muhtevasında değişiklikler olarsa, bu durum şişmeyi harekete geçirebilir. Şişen zeminlerden etkilenen yapılar, genelde hafif yapılara ait temeller ve duvarlar, kaldırımlar, karayolları ve kanallar gibi yapılardır (Garaisayev, 2008).

Yol kaplaması veya yapılar genellikle zemin üst toprak tabakası oldukça kuru iken inşaa edilmektedir. Yapının zemini bu şekilde örtmesiyle, zeminden daha fazla buharlaşma meydana gelmez ve kılcallığa bağlı olarak zeminin su içeriği giderek artar. Bunun sonucunda da şişme meydana gelir. Kaplama veya yapı tarafından zemine iletilen basınç, şişme basıncından daha az ise, kabarma meydana gelir. Her yerde eşit olmayan kabarma, kaplama veya bina içinde yapısal hasara neden olur.

3.1.1 Şişme mekanizması

Şişme basıncının miktarı zemin içindeki kil minerallerine, zeminin yapı ve dokusuna, katyon değeri, tuz konsantrasyonu, çimentolanma ve organik madde varlığı gibi birkaç fiziko-kimyasal faktöre bağlıdır. Başka tüm diğer faktörler aynı olmak şartıyla montmorillonit illitten; illitte kaolinitten büyük şişme potansiyeline sahiptir. Gelişigüzel dokuya sahip zeminler, yönlendirilmiş dokulu zeminlerden daha fazla şişme eğilimindedirler. Bir kildeki tek değerli katyonlar (mesela sodyum montmorillonit), iki değerli katyonlardan (mesela kalsiyum montmorillonit) daha fazla şişerler. Organik katyonlardaki çimentolanma şişme potansiyelini azaltmaktadır (Holtz and Kovacs, 1981).

Bir zeminde zarar verici anlamda bir şişmenin meydana gelmesi şu üç şarta bağlıdır; zeminde montmorillonitin varlığı, zeminin doğal su muhtevasının PL civarında olması, bir su kaynağının bulunması (Gromko, 1974).

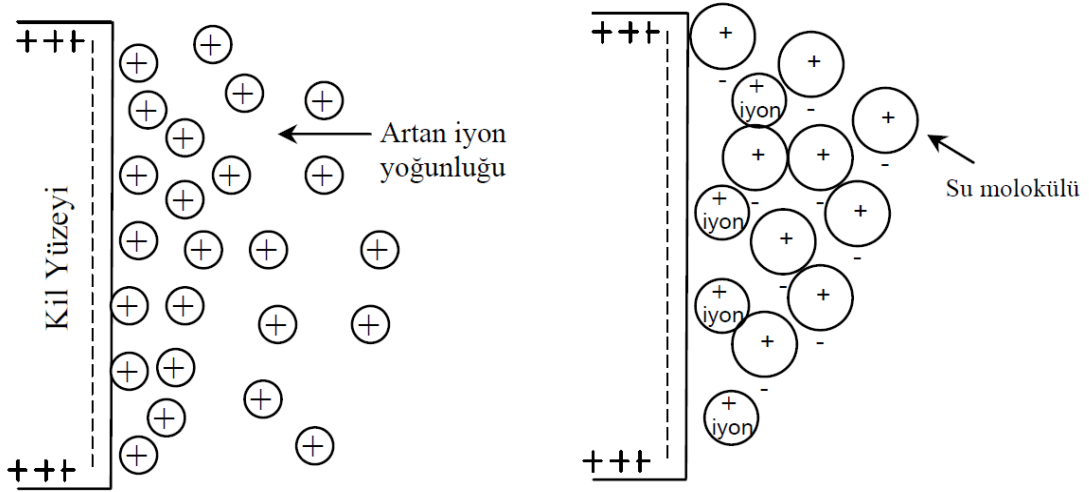
Kilin şişmesi esas olarak; kil yüzeyi, iyonlar ve su arasındaki etkileşim kuvvetlerinin dengelenmesi olayıdır (Mc Bride, 1989). Kil taneleri; yüzeylerinde negatif elektrik yükü olan, pozitif yüklü köşelere sahip plakacıklardır. Negatif yükler elektriksel kuvvetler ve plakaların yüzeyine bağlı olan zemin suyundaki katyonlar ile dengededir. Sıvı miktarının veya kimyasal bileşimin değişmesi sonucunda, zemin su kimyası değişmekte ve bu durum iç kuvvetleri etkilemektedir. İç elektro-kimyasal kuvvet sistemi, zemin suyundaki kapiler gerilme (matris emme) ve dışarıdan uygulanan gerilmeler arasındaki denge bozulduğunda; denge yeniden sağlanıncaya kadar, zeminde hacim değişikliği (şişme – büzülme) meydana gelmektedir (Nelson and Miller, 1992).

Katyon değişimi, zeminlerin temel elektro-kimyasal özelliklerinden biridir ve katyonların davranışı üzerinde önemli etkilere sahiptir. Temel nedenleri izomorf değişim ve kil mineral mineralinin köşesindeki alümin gruplarının çözülmesidir (Amman, 2003; Dontsova et al., 2004).

Mineralin kristal strüktürü değişmeksizin, tetrahedral veya oktahedral levhadaki katyonların, ortamda bulunan aynı veya farklı değerliğe sahip başka katyonlarla yer değişmesine izomorf değişim adı verilmektedir. İzomorf değişim (örneğin magnezyum ile alüminyumun veya alümiyum ile silkanın yer değişmesi) sonucunda, kil kristallerinde bir yük eksikliği veya diğer bir deyişle net negatif yük durumu ortaya çıkar. Negatif yükün dengelenerek, elektriksel nötrlüğün sağlanabilmesi için ortamda bulunan katyonlar kil tanesine çekilir. Kil tanesinin köşe ve yüzeylerine bağlanan bu katyonlar, değişebilir katyonlar olarak isimlendirilirler. Killerde yaygın değişebilir katyon türleri; H, K, NH₄, Na, Ca ve Mg olarak sıralanabilir. Bir kilin yük eksikliğini dengelemek için gereken değişebilir katyonların miktarına ise katyon değiştirme kapasitesi (CEC) adı verilir. Diğer bir deyişle katyon değiştirme kapasitesi zeminlerin katyon tutma yeteneğini gösteren bir değerdir (Amman, 2003; Sharma, 1998; Ingles, 1968; Uzundurukan, 2006). Yüksek katyon değiştirme kapasitesine sahip zemin aynı zamanda yüksek şişme potansiyeline de sahiptir.

Zemin suyu kimyası, şişme potansiyeli miktarı açısından önemlidir. Sodyum, kalsiyum, magnezyum ve potasyum gibi tuz katyonları, zemin suyu içerisinde çözünür. Bu katyonlar, negatif elektriksel yüzey yüklerini dengelemek için kil yüzeyleri tarafından absorbe edilebilen yer değiştirebilir katyonlardır. Bu katyonların hidrasyonu sonucunda, emici kuvvetler kil kristalleri tarafından kullanılır ve kil partikülleri arasında büyük miktarda su toplanmasına sebep olur. Killer için absorbe su tabakasının kalınlığı; yapısal gelişim, permeabilite ve kıvam limitlerine ilaveten, şişme basıncı ve dayanım gibi fiziksel ve mekanik özellikleri kontrol eden en önemli faktörlerden biridir (Türköz, 2007). Şekil 3.1'de kil yüzeyi ve absorbe edilen su mekanizması görülmektedir.

Zeminin suyu emme ya da dışarı atma potansiyeli, başlangıçtaki su muhtevasıyla ilişkilidir. Başlangıç nem içeriği, bazı sınırlamalara bağlı olarak büzülme-şişme potansiyelini etkiler. Şişen zeminlerin davranışı üzerinde başlangıç su muhtevasının etkisi oldukça büyüktür. Doğal su muhtevasının %15 altında su muhtevasına sahip olan kil zeminler şişmeye aşırı duyarlıdır (Seed et al., 1962).



Şekil 3.1. Kil yüzeyi ve absorbe edilen su mekanizması (Mitchel, 1993)

Sherif ve Ishibashi (1982), sıcaklık değişimlerinin zeminlerin şişme özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Likit limit değeri 35'ten küçük olan zeminlerin şişme özeliği açısından önem arz etmediğini belirtmişlerdir. Aynı yazarlar, 24°C'den başlayarak 66 °C ye kadar olan sıcaklık artışlarında meydana gelen şişme miktarının % 17 ila % 28 arasında arttığını ortaya koymaktadırlar.

Gerilme koşulları da şişme üzerinde etkiye sahiptir. Gerilme tarihçesi zeminin hafızasında daima vardır ve zemin daha önceki büzülme ve kuruma devrelerinin etkilerini yansıtır (Holtz and Kovacs, 1981). Gerilme koşullarının şişme potansiyeli üzerindeki etkisini Nelson ve Miller (1992)' de şu şekilde açıklamıştır; gerilme tarihçesi (aşırı konsolidasyon oranı, tekrarlı ıslanma kuruma ve yaşlanma), arazi şartları ve zemin profili (bir zemindeki başlangıç gerilme durumu, şişme potansiyeline sahip tabakaların yeri ve kalınlığı) ve yüklemenin (sürşarj yükü taneler arası itki kuvvetlerini dengelemeye çalışır ve şişmeyi azaltır) şişme potansiyeli üzerinde etkisi vardır.

Taneler arasındaki çimentolaşma, şişme eğilimindeki killerin hacim artışını sınırlayan ana faktördür. Demir hidroksitler, karbonatlar ve çeşitli organik moleküller çimentolaşma meknizmasını tetikleyen maddelerdir. Zeminin içinde Fe_2O_3 ve CaO

bulunması, şişme ve büzülme engelleyen kil taneleri arasında çimento bağlarının gelişmesine neden olur (Shi et al., 2002).

3.1.2 Şişme yüzdesi ve şişme basıncı

Şişme yüzdesi, bir zemin numunesinin su altında bırakılması sonucu hacminde meydana gelen değişikliğin, numunenin ilk hacmine oranı olarak tanımlanır (Uzundurukan, 2006).

Keskin vd. (1992)' de şişme yüzdesini şu şekilde tanımlamıştır. Zemin numunesinin ıslanması (su altında bırakılması) sonrasında, yanal deformasyonların engellenmesi durumunda (bir boyutlu ödometre koşullarında) meydana gelen düşey boy değişimi veya eksenel deformasyonların engellenmesi durumunda (üç eksenli koşullarında) meydana gelen yanal çap değişimi şeklinde belirlenebilmektedir.

Yanal deformasyonların engellenmesi koşulunda S şişme yüzdesi olmak üzere, şişme yüzdesinin hesaplanması şu şekildedir.

$$S = (H_1 - H_0) / H_0 \times \% 100$$

Üç eksenli koşullarında ise D numunenin çapı olmak üzere şişme yüzdesi şu şekilde hesaplanır.

$$S = (D_1^2 - D_0^2) / D_0^2 \times \% 100$$

Şişen zeminlerin, suyla temasa geçmeleri sonucunda, matris emmedeki azalma nedeniyle ortaya çıkan hacim artışları engellenmeye çalışıldığında, bir basınç meydana gelmekte ve bu basınç şişme basıncı olarak isimlendirilmektedir. Şişme basıncının ölçülmesi için farklı birçok yöntem geliştirilmiştir. Ölçülen şişme basınçları ve tahmin edilen kabarma miktarı, zeminlerin şişme özelliklerini ölçmek için kullanılan yöntemden önemli ölçüde etkilenmektedir (Uzundurukan, 2006). Sridharan et al. (1986), esas kil mineral tipi montmorillonit olan black cotton zeminlerinde, şişme basınçları üzerine etki eden faktörleri incelemişlerdir. Araştırmacılar, şişme basınçlarını

üç farklı yöntemle (I – Serbest şişme ödometre deneyi, II – yüklü şişme deneyi, III – sabit hacim deneyi) belirlemişler ve sonuçları karşılaştırmışlardır. Buna göre, I. metot şişme basıncı için en büyük değeri II. metot ise en düşük değeri vermektedir. III. metodun ise iki metottan elde edilenler arasında bir değer verdiği gözlenmiştir.

3.1.3 Şişen zeminlerin tanımlanması ve sınıflanması

Bir zeminin sahip olduğu hacim değiştirme potansiyelini önceden tahmin etmek; şişen zeminin yapıda neden olacağı problemlerin planlama aşamasında bilinmesini ve yapının tasarımı için gerekli olan ön bilgiyi sağlar. Bunun için şişen zeminin önceden tanımlanması ve özelliklerinin bilinmesi gerekir.

Dolaylı olarak, şişen zeminlerin sınıflama ve tanımlamasında kıvam limitleri, büzülme limiti, kil muhtevası, su muhtevası gibi zeminlerin içsel özellikleriyle ilgili parametrelerden yararlanır. Dolaylı tanımlama yöntemleri laboratuvar deneyimi, pahalı ve özel ekipmanlar gerektirdiğinden inşaat mühendisliği uygulamalarında nadir olarak kullanılır. Şişme potansiyeli açısından zemin şişmesinin tahmininde kullanılan bu yöntemler, indis özellikleri arasındaki ampirik ilişkilerden yararlanır (Türköz, 2007).

3.1.3.1 Tanımlama deneyleri

Şişen killerin tanımlanmasında; genellikle tane boyu dağılımı, kil muhtevası ve plastisite gibi zemin özellikleri kullanılır. Plastisite indisi ($PI = LL - PL$) ile kıvam limitleri ve doğal su muhtevasına bağlı olarak belirtilen likidite indisi ($LI = \frac{w_n - LL}{LL - PL}$); iki önemli kriter olarak dikkate alınır. Özellikle plastisite indisi şişen killerin sınıflandırılmasında sıkça kullanılmaktadır. Zeminlerin plastisite karakteristikleri ve hacimsel değişme davranışı; direk olarak zemin içindeki kolloidal boyuttaki tanelerin miktarı ile ilişkilidir. Hareketi, yerçekimi kuvvetlerinden daha çok yüzey kuvvetleri ile kontrol edilen ve genellikle 0.002 mm'den küçük taneler için "kolloidal" terimi kullanılır. Çoğu kil taneleri, düzensiz şekilleri ve büyük yüzey alanlarına sahip olması nedeniyle "kolloidal tane" olarak dikkate alınabilir. Bu tanelerin zemin içindeki ağırlıkça yüzdesi, genellikle "kil muhtevası" olarak bilinir .

Plastisite indisinin kil muhtevasına oranı olarak tanımlanan aktivite değeri ($A_c=PI/C\%$) killerin şişme potansiyelleri hakkında şu şekilde bir fikir verir; Aktivite değeri 1.25'ten büyük killer “aktif kil” olarak değerlendirilir ve şişme potansiyelleri oldukça yüksektir. Nelson and Miller (1992); aktivite değerine bağlı şu sınıflamayı önermiştir;

$A_c < 0,75$ ise düşük aktiviteli

$0,75 < A_c < 1,25$ ise normal aktiviteli

$A_c > 1,25$ ise yüksek aktiviteli

Nelson ve Miller'e (1992) göre kil mineral tipine bağlı aktivite sınıflaması Çizelge 3.1'de verilmiştir.

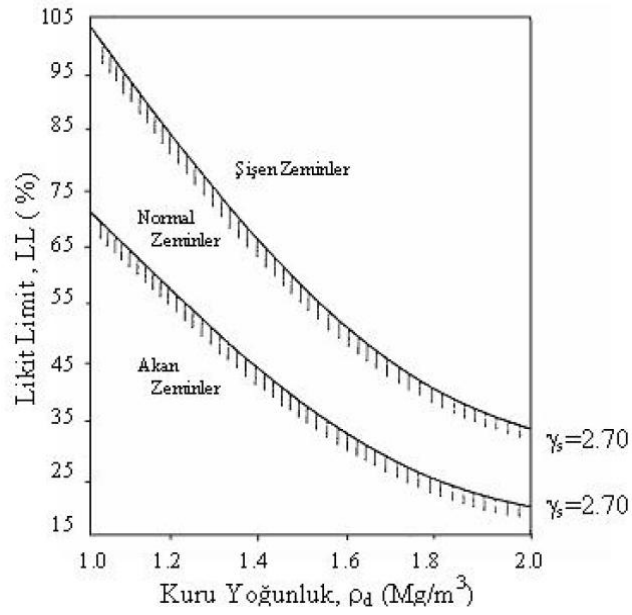
Çizelge 3.1. Kil minerallerinin aktivitesi (Nelson and Miller, 1992)

Mineraller	Aktivite
Kaolinit	0,33-0,46
İllit	0,9
Montmorillonit(Ca)	1,5
Montmorillonit(Na)	7,2

Da Nilov Kartı (Şekil 3.2) olarak bilinen sınıflama zeminlerin kuru yoğunluğu ile likit limit arasındaki ilişkiye bağlı olarak şişme potansiyeline yaklaşımda bulunmuştur.

Mineralojik Tanımlamalar

Zeminin şişme davranışına etki eden en önemli etmen kil mineralojisidir. Kil minerallerini tanımlamak için en yaygın kullanılan yöntem X-Ray difraksiyon (XRD) yöntemidir. Şişme potansiyelinin belirlenmesinde kullanılan diğer mineralojik yöntemler diferansiyel termal analiz, boya absorpsiyonu (MBV), kimyasal analiz ve elektron mikroskobu yöntemleridir.



Şekil 3.2. Numunelerin kuru yoğunluk-likit limit ilişkisi (Chen, 1988)

Kasyon Değişim Kapasitesi

Yüksek kasyon değiştirme kapasitesine sahip zemin aynı zaman da yüksek şişme potansiyeline de sahiptir. Kasyon değiştirme kapasitesi kilin mineral yapısıyla ilgilidir. Üç ana kil minerali için kasyon değiştirme kapasitesi (KDK) değerleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Üç ana kil minerali için tipik KDK değerleri (Mitchel, 1993)

Mineraller	KDK(meq/100g)
Kaolinit	3 – 15
İllit	10 – 40
Montmorillonit	80 – 150

3.1.3.2 Sınıflama deneyleri

Zeminin şişme potansiyelinin değerlendirilmesinde standart bir ölçüm yöntemi bulunmamaktadır. Bu yüzden şişme potansiyelinin belirlenmesi için bulunan zemin özelliklerinin karşılaştırmalı analizi yapılır.

Bu sınıflamaların zeminin çevresel koşulları ve gerilme durumunu dikkate almaması ve tanımlamalarda kullanılan terminolojik karmaşada bir eksiklik olarak değerlendirilmektedir (Chen, 1988).

Birleştirilmiş Zemin Sınıflama Sistemine göre, “CL” veya “CH” grup sembolleriyle tanımlanan zeminler, “şişme potansiyeline sahip zemin” olarak değerlendirilmektedir. Yerindeki zemin numuneleri için plastisite indisi, rötrelimiti ve koloidal yüzdeye bağlı olarak önerilen bir sınıflama Çizelge 3.3’de sunulmaktadır.

Zeminin 200 no’lu elekten geçen yüzdesi, likit limiti ve SPT darbe direnci değerlerini içeren bir sınıflama ise Çizelge 3.4’de verilmektedir. Chen (1988), sonraki yıllarda Çizelge 3.5’de verilen ve yalnızca plastisite indisine bağlı basit ilişkiyi sunmuştur.

Çizelge 3.3. Yüksek plastisiteli killer için zemin indis özelliklerine bağlı muhtemel hacim değişikliği ilişkisi (Holtz and Gibbs, 1956)

İndis Deney Sonuçları			Muhtemel şişme(Toplam hacim değişikliğinin yüzdesi) %	Şişme Derecesi
Koloidal Yüzde	Plastisite İndisi	Rötrelimiti		
> 28	> 35	< 11	> 30	Çok Yüksek
20 - 31	25 - 41	7 – 12	20 – 30	Yüksek
13 - 23	15 - 28	10 – 16	10 – 20	Orta
< 15	< 18	> 15	< 20	Düşük

Çizelge 3.4. Zeminin fiziksel özellikleri ve SPT verilerine bağlı şişen zemin sınıflaması (Chen,1988)

Laboratuvar Arazi Verileri			Muhtemel şişme(Toplam hacim değişikliğinin yüzdesi) %	Şişme Derecesi
200 nolu Elekden geçen (%)	Likit Limit(%)	N-Darbe Direnci		
> 28	> 35	< 11	> 10	Çok Yüksek
20 - 31	25 - 41	7 – 12	3 – 10	Yüksek
13 - 23	15 - 28	10 – 16	1 – 5	Orta
< 15	< 18	> 15	< 1	Düşük

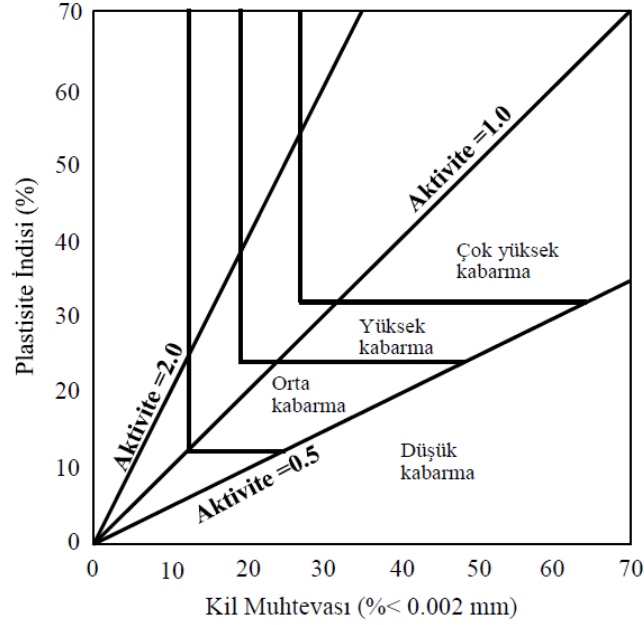
Çizelge 3.5. Plastisite İndisine bağlı şişen zemin sınıflaması (Chen,1988)

Şişme Potansiyeli	Plastisite İndisi
Düşük	0 - 15
Orta	10 – 35
Yüksek	20 – 55
Çok Yüksek	≥ 35

Zemin şişme potansiyeli üzerinde kil muhtevasının etkisi kil minerallerindeki yoğun pozitif yük eksikliği ile dolaylı olarak ilişkilendirilir. Şekil 3.3'de şişme potansiyelinin değerlendirilmesinde kil muhtevasının kullanımı örneklenmektedir. Şekillerdeki aktivite ifadesi yüzde olarak, plastisite indisinin koloidal muhtevasına oranı olup boyutsuz bir büyüklüktür .

3.1.3.3 Doğrudan ölçümler

Zeminde oluşacak şişmeyi doğrudan tahmin edebilmek için birkaç deney yöntemi vardır. Bu yöntemler serbest şişme, genleşme indisi, Kaliforniya taşıma oranı, potansiyel hacim değişimi (PVC), ödometre deney yöntemleridir.



Şekil 3.3. Şişme potansiyeli tahmini (Van Der Merve, 1964).

Serbest Şişme Deneyi

Serbest şişme deneyleri yaygın olarak şişen killerin tanımlaması ve şişme potansiyelinin değerlendirilmesinde kullanılır. Holtz ve Gibbs (1956), tarafından belirlenen serbest şişme deneyi geoteknik mühendislerinin arazide şişme potansiyeli tahmininde en yaygın kullandıkları basit deneylerden biridir. Serbest şişme deneyinde; 40 no'lu elek altında kalan 10 cm^3 kuru zemin, 100 cm^3 'lük derecelendirilmiş bir silindirik mezür içine boşaltılır ve silindirik mezür tamamen su ile doldurulur. Bu şekilde hazırlanan deney düzeneğinde şişen hacim gözlenmediği anda deney sonlandırılır. Serbest şişme, zemin hacmindeki değişimin başlangıçtaki zemin hacmine oranı olarak yüzde cinsinden ifade edilir (Türköz, 2007).

$$FS = \frac{V - V_0}{V_0} \times 100$$

FS : Serbest şişme

V : Şişmeden sonraki zemin hacmi

V_0 : Kuru zemin hacmi

Potansiyel Hacim Değişimi (PVC)

PVCmetre zeminin potansiyel hacim değişikliğini tespit etmek amacıyla geliştirilmiştir. PVCmetre hem arazide hem de laboratuvarında kullanılabilir. Deneyde modifiye proktor enerjisinde (2700 kJ/m^3), bir ödometre kabı içinde sıkıştırılmış numuneler kullanılarak zeminin şişme basıncı ölçülür. Ödometre kabında sıkıştırılmış numune ekipmana yerleştirildikten sonra suya boğulur ve oluşan şişmenin ölçme halkasında oluşturduğu basınç zamana bağlı olarak ölçülür.

Çizelge 3.6. Şişme-büzülme potansiyelinin PVC deneyi sonuçlarına bağlı olarak sınıflandırılması

Şişme Basıncı (kPa)	Şişme - Büzülme Potansiyeli
< 81	Düşük
81 - 153	Orta
153 - 225	Yüksek
> 225	Çok Yüksek

Genleşme İndisi Deneyi

Genleşme indisi deneyi, 1960'lı yılların sonlarında Amerika'da geliştirilmiştir. ASTM (ASTM D4829-88) ve Üniform Yapı Şartnamesi (UBC) tarafından standart (Standart No 29-2 UBC, 1991) olarak kabul edilmiştir. Deney, zeminin No 4. eleğinden geçen kısmı üzerinde yapılmaktadır. Zemin, yaklaşık olarak optimum su muhtevasına sahip olana kadar, saf su ile karıştırılır ve hava geçirmeyen bir kaptan en az 16 saat bekletilir. Daha sonra, 10,19 cm çapındaki ve 5,1 cm yüksekliğindeki standart kalıp içine iki tabaka halinde sıkıştırılır. Kalıp alt ve üst olmak üzere iki parçadan oluşmaktadır ve alt kısmında çıkarılabilen çelik bir ring bulunmaktadır. Her bir zemin tabakası, 2,5 kg ağırlığındaki tokmağın 30,5 cm'den 15 defa düşürülmesi ile sıkıştırılır. Kalıp söküldükten sonra, ringin alt ve üstünde kalan zemin traşlanır. Ring, ödometre veya benzer bir yükleme aletine yerleştirilir. 6,9 kPa lık sürşarj yükü uygulanır,

numune su altında bırakılarak, hacim değişimi 24 saate kadar gözlenir (Uzundurukan, 2006).

Genleşme indisi aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanarak en yakın tam sayı olarak kaydedilir (Nelson ve Miller, 1992, Sikh, 1993).

$$EI = 100 \times S \times F$$

EI: Genleşme İndisi

S : Şişme yüzdesi

F : 4 no'lu elekten geçen zemin yüzdesi

Zeminin şişme potansiyeline Çizelge 3.7'deki gibi yaklaşımda bulunulur.

Çizelge 3.7. Genleşme indisine bağlı olarak şişme potansiyelinin tahmini (Nelson and Miller, 1992)

Genleşme İndisi(EI)	Şişme Potansiyeli
0 - 20	Çok Düşük
21 - 50	Düşük
51 - 90	Orta
91 - 130	Yüksek
> 130	Çok Yüksek

Kaliforniya Taşıma Oranı

CBR deneyi, karayolu ve hava alanı kaplamalarının projelendirilmesinde yoğun olarak kullanılan bir penetrasyon direnci deneyidir. Zemin, 6 inç (152 cm) çapındaki CBR deney silindirene farklı su muhtevaları ve yoğunluklarda sıkıştırılır, sonra bir sürşarj yükü altında 4 gün süreyle suda bırakılır. Sürşarj yükü zeminin arazide maruz kalacağı statik gerilmeye uygun olarak seçilir. Şişme okumaları 4 günlük ıslatma

periyodundan önce ve sonra bir ölçüm saatiyle alınır (Uzundurukan, 2006). Şişme yüzdesinin hesaplanması için AASHTO T 193, 1993 önerdiği eşitlik kullanılır.

$$S = \frac{\Delta H}{116,43} \times 100$$

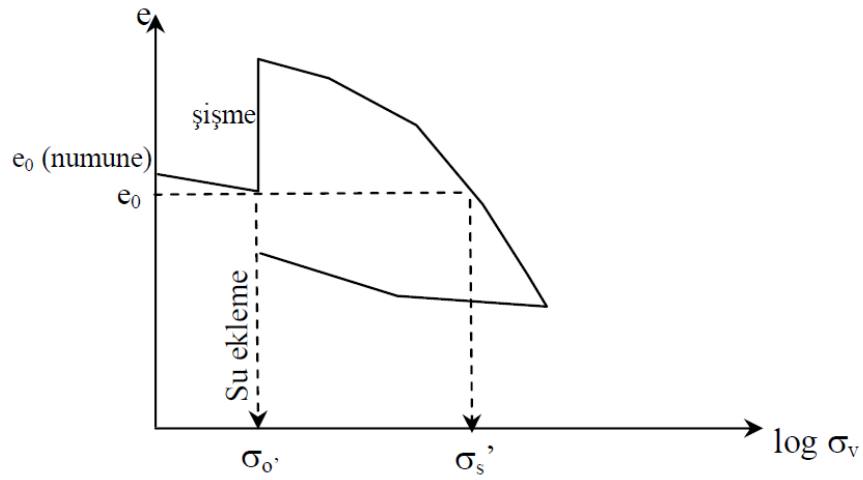
S : Şişme Yüzdesi

ΔH : Yükseklik Değişimi (mm)

Şişme Potansiyelinin Ölçümünde Ödometre Deney Yöntemleri

Şişme miktarının belirlenmesinde en yaygın kullanılan ekipmanlar bir boyutlu konsolidasyon ekipmanı ve ödometre deney ekipmanıdır. Üç tipte deney yöntemini kapsar; serbest şişme deneyi, sabit hacimde şişme deneyi ve mevcut örtü yükü altında şişme deneyi (Nelson and Miller, 1992).

Serbest şişme deneyinde örselenmemiş zemin numunesi ödometre halkasına yerleştirilir ve 7 kPa'lık ön yüklemeye maruz bırakılır. Bu yük altında numunedeki oturma sabit bir değere ulaştıktan sonra suya boğularak birincil şişme deformasyonunun tamamlanması beklenir. Deney, şişme tamamlandıktan sonra klasik ödometre esasına bağlı olarak ilave yükleme ve boşaltma kademeleriyle sonlandırılır (Şekil 3.4). Numunenin başlangıç hacmine dönmesi için gereken basınç şişme basıncı olarak tanımlanır.



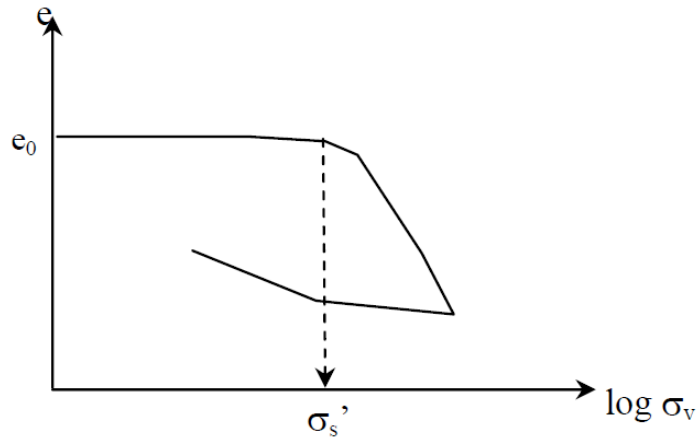
Şekil 3.4. Ödometre serbest şişme deney sonucu

σ_0' : Numunenin ıslatıldığı andaki gerilme

σ_s' : Tanımlandığı şekliyle şişme basıncı

e_0 : Başlangıç boşluk oranı

Sabit hacimde şişme deneyinde, ödometre içinde suya boğulan numunenin oluşturacağı şişmenin engellenmesi esasına dayanılır. Şişme basıncı; suya boğulan numuneyi sabit hacimde tutmak için gerekli maksimum basınç olarak tanımlanır (Türköz, 2007). Şekil 3.5'de ödometre sabit hacimde şişme deney sonucu verilmiştir.



Şekil 3.5. Ödometre sabit hacimde şişme deney sonucu

Mevcut örtü yükü altında ödometre deneyinde ise deney numunesi mevcut arazi şartlarındaki düşey örtü yükü altında yüklenir. Ödometre halkasına yerleştirilen numune suya boğularak birincil şişmenin tamamlanması için beklenir. En az üç değişik düşey basınç altında deney tekrarlanır. Şişme gerilmesine karşılık çizilen birim deformasyon eğrisinde şişme deformasyonun sıfır olmasına karşılık gelen nokta şişme basıncı olarak tanımlanır.

3.2 Dispersif Zeminler

Dispersiyon, zeminlerin yavaş hareket eden su içinde hızla erezyona uğradığı bir olay olarak bilinir. Bu durumda koloidal kil mineralleri, diğer normal killerden farklı olarak, su içinde solüsyona dönüşür. Su içinde bulunan kil parçacıkları arasındaki elektriksel yüzey kuvvetleri çekim kuvvetlerini aşıyorsa, bağımsız kil parçacıkları zemin yüzeyinden ayrılır ve su içinde süspansiyon haline geçer. Eğer su akış halinde ise, kil parçacıkları uzaklara taşınarak kil kütlelerinin ayrışmasına ve dağılmasına neden olur (Tosun, 1994).

Dispersif killerin sedde ve dolgu barajlar gibi yapılarda geçirimsiz malzeme olarak kullanımı ciddi borulanma problemlerine ve buna bağlı göçmelere neden olmaktadır (Aydın ve Aydın, 2006).

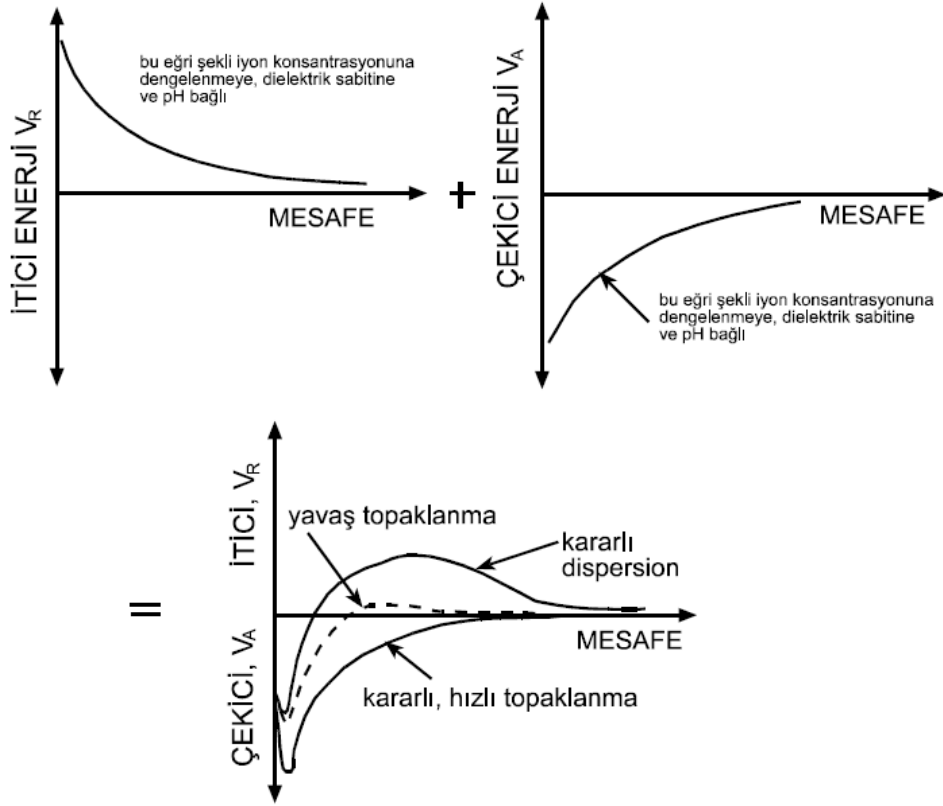
Dispersif killerden inşa edilen bir dolgu içinde kaçak su olduğu zaman, iki ayrı aksiyon meydana gelir. Bunlardan birincisi eğer sızım hızı düşük ise, akış kanalını çevreleyen kil şişebilir ve zamanla kaçak önlenir. İkincisi eğer suyun başlangıçtaki hızı yeterince yüksek ise, ayrılan kil parçacıkları uzaklara taşınır. Kilin şişme hızından daha yüksek bir hızdaki akım, kanalı genişletir ve sonuç olarak borulanma yenilmesine neden olur. Herhangi bir sismik aktiviteye maruz kalmış dolguda meydana gelen çatlakların davranışı için de bu iki aksiyon geçerlidir (Tosun, 1994).

3.2.1 Dispersiyon mekanizması

Dispersiyon, fiziko-kimyasal bir olaydır ve esas olarak kil mineralojisi ile boşluklardaki ve erozyona neden olan suyun kimyasından etkilenir (Sherard et al., 1976; Yong and Warkentin, 1996; Penner and Lagaly, 2001). İki kil partikülü birbirine yaklaştığında potansiyel çekim alanlarının çatışması gerçekleşir. Eğer partiküller oldukça yakınsa, bu itici kuvvetlerin oluşmasına neden olacaktır. Bu itici kuvvetlere Vander Walls çekici kuvvetleri tarafından karşı konulacaktır. Eğer itici kuvvetler çekici kuvvetlerden büyükse zemin dispersif olacaktır (Şekil 3.6). Bu durumda bağımsız kil parçacıkları zemin yüzeyinden ayrılır ve su içinde süspansiyon haline geçer. Eğer su akış halinde ise, kil parçacıkları uzaklara taşınarak kil kütesinin ayrışmasına ve dağılmasına neden olur (Tosun, 1994).

Killerin dispersibilite karakteristiklerini etkileyen değişik faktörler vardır. Bu faktörlerin etki derecesi değişik zamanlarda farklı şekilde değerlendirilmiştir. Ancak killerin dispersif özellikleri üzerinde kilin kimyası ve mineralojik yapısı, fiziksel özellikleri, aşındırıcı su ve boşluk suyundaki çözünmüş tuzlar ile dolgu barajlarda kullanılan kilin sıklığı ve dolgu içindeki suyun miktarı, önemli etkiler olarak tanımlanmıştır (Savaş, 2008).

Yapılan daha önceki çalışmalarda (Sheard, 1972; Tosun, 1997) kıvam limitlerinin ve kil içeriğinin dispersif karakterin belirlenmesinde etkili olmadığı görülmüştür. Ancak % 10'dan daha az kil ihtiva eden zeminlerin dispersif borulanmanın oluşması için yeterli koloidal yapıya sahip olmadıkları belirtilmiştir (Ryker, 1977).



Şekil 3.6. Kıl-su sisteminde fiziko-kimyasal kuvvetler (Mitchel, 1976)

Avustralyalı bilim adamları; “dispersiyon göçmesine, montmorillonit tipi kilin varlığının önemli ölçüde etkili olduğunu“ belirtmişlerdir (Stapledon and Casinader, 1972). Sherard et al. (1976); deneye tabi tutulan ve dispersif bulunan çoğu numunenin önemli ölçüde montmorillonit ihtiva ettiğini belirtmişlerdir. Bazı illitler, yüksek dispersif kil özeliği taşımaktadır. Çok miktarda kaolinit içeren kil zeminlerde, dispersif davranış yaygın değildir. Ancak kaolinit içeren granit kökenli zeminlerde dispersif davranış gözlenmiştir (Bell and Walker, 2000).

Suda bulunan çözülmüş tuzların miktarı da dispersibilitiyi etkileyen faktörlerden biridir. Sudaki düşük iyon konsantrasyonunun, erezyona karşı küçük bir direncin oluşmasına neden olduğu gözlenmiştir. Çünkü itici kuvvetlerin büyüklüğü boşluk suyundaki iyon konsantrasyonuna bağlıdır. İtici kuvvetler, iyon konsantrasyonun artmasıyla azalmaktadır (Şekil 3.6). Halbuki Vander Walls çekme kuvvetleri iyonların

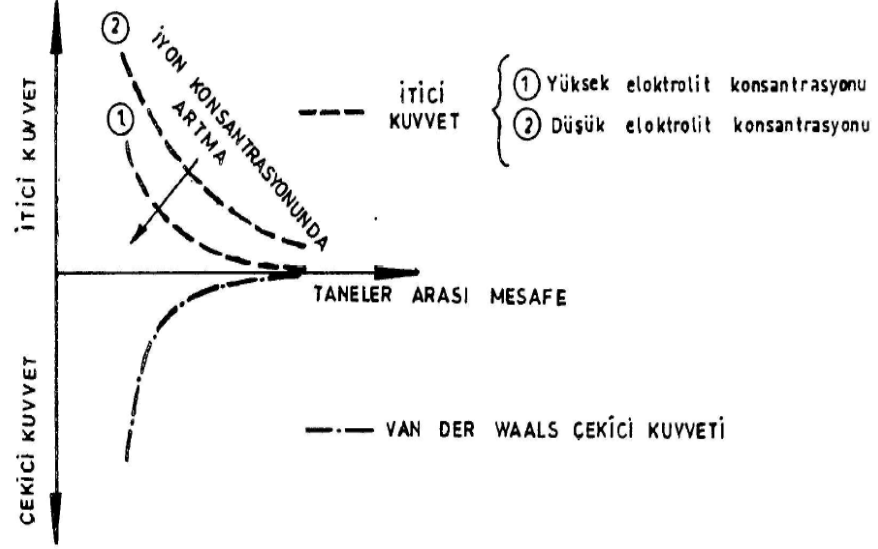
konsantrasyonundan bağımsızdır (Resendiz, 1977). Erozyona neden olan suyun içindeki iyonların konsantrasyonu, boşluk suyu konsantrasyonuna eşit veya büyük olduğunda erozyon beklenmemektedir.

Sıkıştırma ve su muhtevası kontrolü de tek başına yeterli olmamasına rağmen dispersif davranışı etkilemektedir. Tosun vd., 2002, yapılan çalışmada sıklık derecesinin erezyonun hızı üzerinde önemli etkisinin olduğu görülmüştür. Ancak dispersif zeminler uygun koşullarda sıkıştırılmış olsalar bile, yine de benzer içsel erezyona maruz kalmaktadırlar.

3.2.2 Dispersif zeminlerin tanımlanması ve sınıflanması

Yapılan gözlemsel ve deneysel çalışmaların sonucunda dispersif kil özelliklerinin tanımlanması için gözlemsel sınıflamalar, tane dağılımı, özgül ağırlık veya kıvam limitleri gibi klasik laboratuvar deneyleri yeterli olmadığı anlaşılmıştır. Aynı malzeme sahasından alınan iki farklı numunenin farklı dispersibiliteye sahip olduğu görülmüştür (Savaş, 2008).

Dispersif killerin tanımlanması için dağılma, çifte hidrometri, iğne deliği, boşluk suyundaki çözünmüş tuzlar deneyi ve değişebilir sodyum yüzdesi deneyi kullanılmaktadır. Bunlardan dağılma, iğne deliği ve çifte hidrometri fiziksel deneyler; boşluk suyundaki çözünmüş tuzlar deneyi ve değişebilir sodyum yüzdesi deneyi ise kimyasal deneylerdir.



Şekil 3.7. Bir kil-su sisteminde fiziko-kimyasal kuvvetler.

3.2.2.1 Dağılma Deneyi

Dağılma deneyi, Emerson tarafından dispersif killerin arazideki davranışını belirlemek amacıyla geliştirilmiştir. Sonradan bu deney laboratuvarlarda da kullanılır hale gelmiştir. Deney için ya tabi su muhtevasında 15 mm kenar uzunluklarına sahip küp numuneler hazırlanır veya eşit hacme sahip tabi su muhtevasındaki zemin parçaları seçilir. Numune dikkatli olarak 250 ml hacmindeki içi saf suyla dolu porselen kap içerisine yerleştirilir. Zeminin su ile reaksiyona girmesi ile, koloidal boyuttaki parçacıklar ayrılmaya başlar ve su içinde süspansiyona döner. Belirli zaman aralıklarında gözlemler yapılır. Zeminin su içindeki reaksiyonu dört ayrı şekilde yorumlanabilir (Savaş, 2000).

Reaksiyon yok – Zemin numunesi eriyebilir ve deney kabının tabanına doğru hareket eder. Ancak süspansiyon içindeki koloidlerin neden olduğu bulanıklık görülmez.

Az-Orta derecede reaksiyon – Süspansiyon içindeki koloidlerin bulunması ile ilgili belirgin ipuçları vardır. Koloidler, numunenin tam yüzeyinde olabilir veya deney kabının tabanında çok ince bir iz şeklinde bulunabilir.

Kuvvetli reaksiyon – Koloidal bulut, deney kabının tabanını, genellikle ince bir tabaka halinde kaplar. Aşırı durumlarda deney kabındaki su bütünüyle bulanık hale gelir (Savaş, 2000). Şekil 3.9’da dağılma deneyi değerlendirme kriterleri verilmiştir.

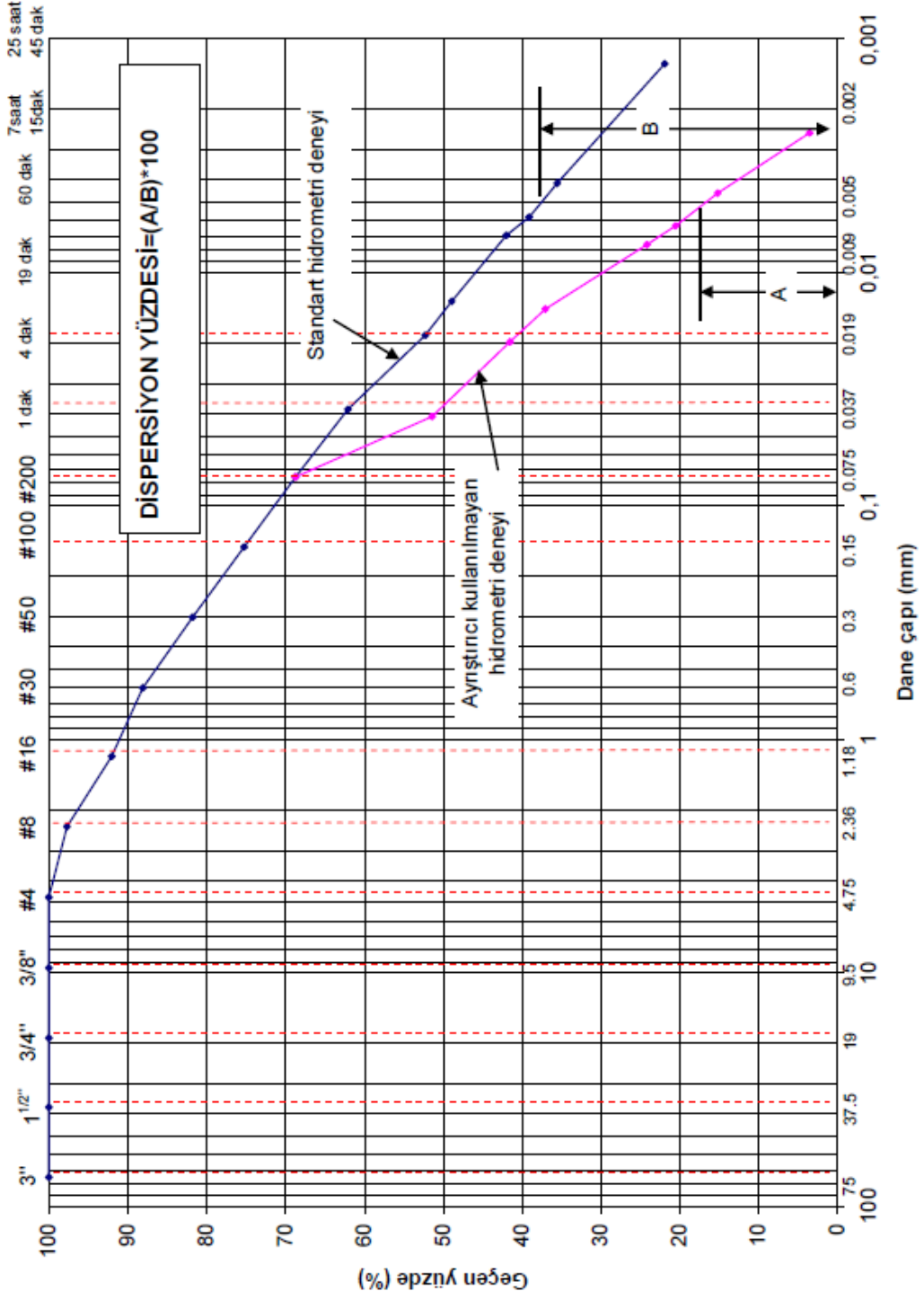
Dağılma deneyi killi zeminlerin potansiyel erezyona uğrayabilme özelliğinin belirlenmesi amacıyla nitel sonuçlara dayalı iyi sonuçlar vermektedir. Bazen bir dispersif zemin, bu deney sonuçlarına göre “dispersif olmayan zemin” olarak sınıflandırılabilir. Ancak eğer bir zemin numunesi üzerinde yapılan dağılma deneyi sonuçları, zemini dispersif olarak belirtmişse, zemin büyük olasılıkla dispersiftir (USBR 5400, 1989).

3.2.2.2 Çifte Hidrometri

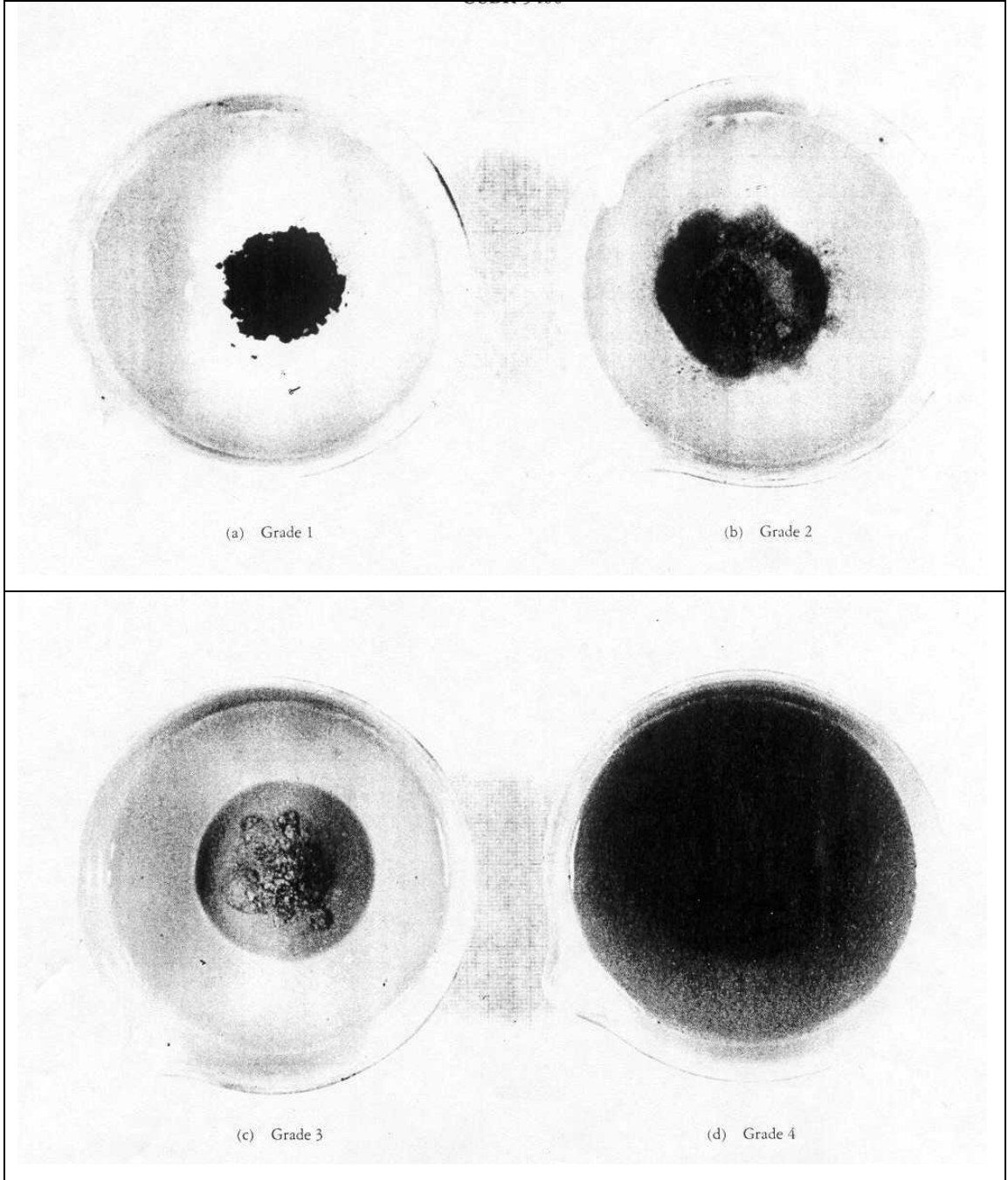
Kil zeminlerin dispersiyonunu belirlemek için kullanılan ilk yöntemlerden birisidir. Deneyde tane büyüklüğü dağılımı, başlangıçta standart hidrometre deneyi kullanılarak belirlenir. Bunun için kuvvetli bir mekanik karıştırıcı ile bir kimyasal ayrıştırıcı kullanılmalıdır. Aynı zeminden hazırlanmış bir başka numune üzerinde de, mekanik karıştırıcı olmaksızın ve kimyasal ayrıştırıcı kullanmaksızın aynı deney yapılır ve her iki numunenin de tane dağılım eğrileri çizilerek (Şekil 3.8) deney tamamlanır (Savaş, 2008). Bu deney sonuçlarına bağlı olarak “dispersiyon yüzdesi” tanımı getirilmiştir (Çizelge 3.8). Bu yüzde; ikinci deneye ait 0.005 mm’den küçük tanelerin kuru ağırlık yüzdesinin, birinci deneyde bulunan aynı değere oranı olarak tanımlanmıştır (USBR 5405,1989).

Çizelge 3.8. Dispersiyon yüzdesine bağlı nitel sınıflama

Dispersiyon Yüzdesi	Dispersiyon Derecesi
< 30	Dispersif Değil
30 - 50	Geçiş Zemini (Orta)
> 50	Dispersif



Şekil 3.8 Çifte hidrometre deney sonuçlarına bağlı dispersiyon yüzdesi



Şekil 3.9 Dağılma deneyi değerlendirme kriterleri (USBR 5400, 1989)

3.2.2.3 İğne Deliği Deneyi

İğne deliği deneyi, ince taneli sıkıştırılmış zeminlerin, dispersibilite özelliğini direk olarak ölçmek için geliştirilmiş bir deneydir. Deneyde numune içinde açılan küçük delik (Şekil 3.10), bir baraj veya diğer bir su yapısının geçirimsiz çekirdek malzemesinde oluşabilecek bir çatlağı veya su kaçak kanalını temsil etmektedir (Savaş, 2000). Dispersif kil için ölçülen debi değeri, açılan delik çapının genişlemesine bağlı olarak artar ise, bu artış ekipmanın hidrolik kapasitesine ulaşıncaya kadar devam eder. Dispersif olmayan zeminler için ölçülen akım oranı, her bir yük için sabit kalır. Çünkü deney boyunca iğne deliği çapı değişmeyecektir (Acciardi, 1982).



Şekil 3.10. Numune içinde delik açılması.

Saf su, 50 mm, 180 mm ve 380 mm (hidrolik eğimleri yaklaşık 2, 7 ve 15) yük altında bu delikten geçirilir. 50 mm, 180 mm ve 380 mm'lik yükler, 30-60 cm/s arasında değişen akış hızlarını sağlar. Suyun akış hızı ve bulanıklık derecesi kaydedilir. Deney Sheard ve arkadaşları tarafından geliştirilmiştir ve bu yıllardan itibaren başarılı bir şekilde kullanılmıştır (Savaş, 2000).

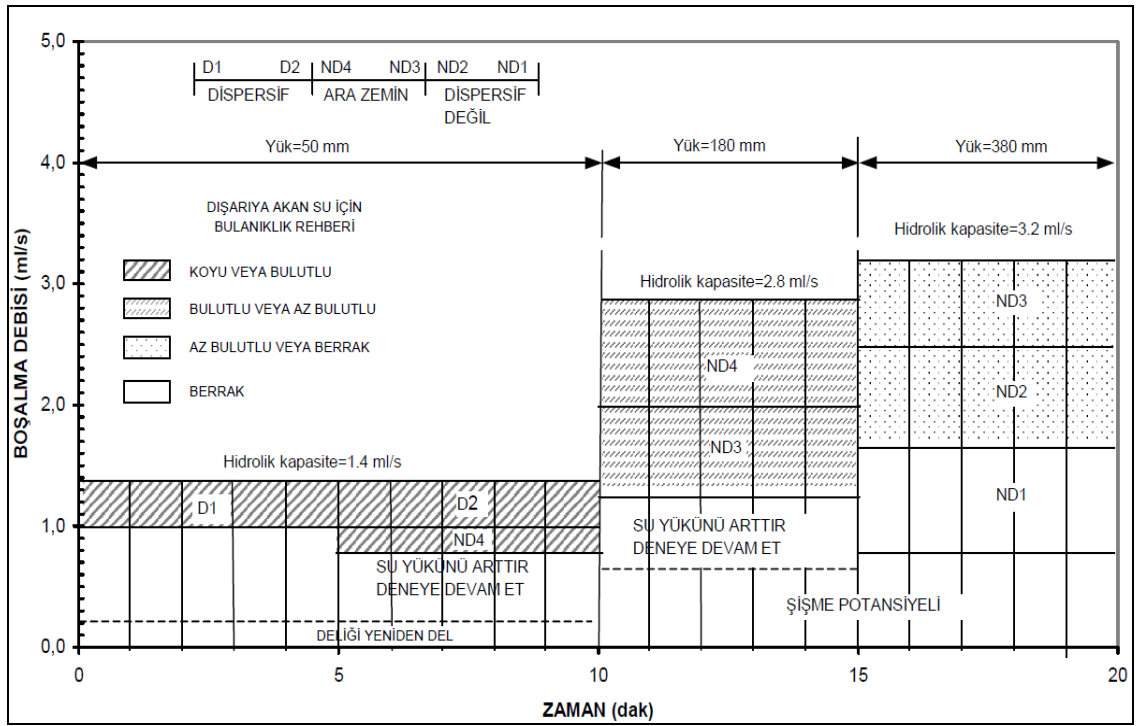
Eğer 50 mm'lik yük altında oluşan akım; koyu, bulanık, az bulanık veya temiz ve debi de 1.0 mL/s'nin altında ise, deneye aynı yük altında (50 mm) ikinci bir beş

dakika için devam edilir ve elde edilen sonuçlar kaydedilir. Eğer bu ikinci beş dakika içinde oluşan akım bulanık veya çok bulanık ve akım oranı 0.80-1.0 mL/s aralığında bulunuyorsa, deney bitmiştir. Deney sistemi sökülür ve deney numunesi için yukarıda belirtilen incelemeler yapılır ve edilen bilgiler kaydedilir. Bu durumda zemin, debi değeri büyüklüğüne göre sınıflandırılır. Eğer akım oranı 1.0-1.4 mL/s aralığında ise "D2" ve 0.8-1.0 mL/s aralığında ise "ND4" olarak sınıflandırılır. 50 mm'lik yük altında 10 dakikalık ölçüm sonunda akım temiz veya çok az bulanık ve akım oranı 0.2-0.8 mL/s arasında bulunuyorsa, yük 180 mm'ye yükseltilir ve deneye ilave bir beş dakika için devam edilir. Bu yük altında ve ilave beş dakika sonunda akım bulanık veya çok az bulanık ve akım oranı 1.2- 2.8 mL/s arasında ise, deney bütünüyle bitmiştir, deney sistemi sökülür ve deney numunesiyle ilgili inceleme ve gözlemler yapılarak kaydedilir. Bu durumda akım oranı 2.0-2.8 mL/s aralığında ise, zemin numunesi "ND4" ve 1.2-2.0 mL/s aralığında ise, "ND3" olarak tanımlanır. Eğer 180 mm'lik yük altında ve ikinci beş dakikalık ilave zaman sonunda ve akım oranı 0.6 ile 1.2 mL/s arasında ise, yük 380 mm'ye yükseltilir ve bir beş dakikalık süre için deneye devam edilir. Deneye ilgili tüm veriler kaydedildikten sonra, deney bütünüyle bitmiştir. Deney sistemi sökülür ve deney numunesi ilgili inceleme ve gözlemler yapılarak kaydedilir. Bu durumda zemin, bütünüyle dispersif değildir. Eğer akım oranı 0.80-1.60 mL/s aralığında ise zemin "ND1", 1.60-2.4 mL/s aralığında ise "ND2" ve 2.2-3.2 mL/s aralığında ise "ND3" (ancak dispersif değil) olarak sınıflandırılır (Savaş, 2008).

Her 60 saniyelik akım ölçme aralığı için, oluşan akımın bulanıklık derecesi tahmin edilir ve toplanan suyun hacmi (mL) belirlenerek akımın debisi hesaplanır ve Şekil 3.12'da verilen karta zamana bağlı olarak akım oranları kaydedilir. Deliğin deney sonundaki durumu çizilir veya fotoğraflanır. Deney sonunda, tüm hesaplar ve çizimler kontrol edildikten sonra, bilgilerin tamamı rapor edilir. (Savaş, 2008). Bu verilere göre zeminler, dispersibilite yönünden üç ana ve altı alt gruba ayrılır.



Şekil 3.11. İğne deliği deney ekipmanı



Şekil 3.12. İğne deliği deney sonuçlarına bağlı nicel değerlendirme yöntemi

3.2.2.4 Kimyasal Deneyler

Dispersif killerin davranışına etki eden kimyasal faktörlerden biri değişebilir sodyumun varlığıdır. Bu etkiyi nicel olarak tanımlamak için Değişebilir Sodyum Parametresi (ESP) önerilmiştir.

$$ESP = \frac{\text{Değişebilir Sodyum}}{\text{Kasyon Değiştirme Kapasitesi}} \times 100$$

ESP değeri 10'dan daha büyük veya eşitse zemin dispersif zemin olarak sınıflandırılır. ESP değerine bağlı sınıflama Çizelge 3.9'da gösterilmiştir.

Çizelge 3.9. Değişebilir sodyum yüzdesi değerine bağlı sınıflama (Savaş, 2008)

ESP	Dispersiyon Derecesi
< 7	Dispersif Değil
7 – 10	Geçiş Zemini
> 10	Dispersif

Boşluk suyunda bulunan sodyum miktarı, sodyum katyonu etkisini tanımlamak için diğer bir parametredir. Parametrenin tanımı sodyum katyonunun diğer katyonlara oranıdır.

$$SAR = \frac{Na}{\sqrt{(Ca+Mg)/2}} \text{ (Meq/L)}$$

SAR değerinin ikiden büyük olması halinde, zemin dispersif olacağı belirtilmektedir. Bu, toplam çözünmüş tuz (TDS) değerinin 0.5 – 3.0 meq/L arasında olduğu zeminler için uyumludur. SAR yöntemi, eğer zemin içinde serbest tuz yok ise, uygulanabilir değildir.

Boşluk suyu; kalsiyum, magnezyum, sodyum ve potasyum gibi temel metalik katyonları, “meq/L” büyüklüğünde belirlemek için rutin kimyasal yöntemler

kullanılarak analiz edilir. Çözünmüş toplam tuz miktarına (TDS) bağlı sodyum yüzdesi aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\text{Sodyum Yüzdesi} = \frac{\text{Na}}{\text{TDS}} \times 100$$

TDS : Toplam çözünen tuz miktarı (Na + Ca + Mg + K)

ESP değeri, zeminde bulunan değişebilir katyonlardan hesaplanırken, SAR değeri boşluk suyunda bulunan katyonlardan hesaplandığı belirtilmelidir (Savaş, 2008).

Gerber ve Harms (1987), zeminde serbest tuzların olması durumunda fiziksel (dağılma, çifte hidrometre ve iğne deliği deneyi) deneylerin kullanılabilir olmadığını belirtmişlerdir. Zeminde yüksek tuz konsantrasyonu, dağınık çift tabaka kalınlığını azaltmakta ve bu durumda dispersiyon oluşmamaktadır. Bu durumun, sodyuma doymun zeminlerde olabileceğini ifade etmişlerdir.

Dispersif zeminleri bütünüyle tanımlayabilen güvenilir tek bir deney geliştirilememiştir. Bundan dolayı değişik deneyler yapılarak, bu deney sonuçlarına göre dispersibilitenin değerlendirilmesi gerekir. Bell and Maud (1994) önerdiği sınıflama sisteminde, numunelere deney sonuçlarına göre puanlar verilir. Bu puanların toplanması ile elde edilen toplam puanla da zeminin dispersibilite grubu belirlenir (Savaş, 2008). Bu sınıflama sisteminde önerilen deneyler ve deney sonuçlarına göre verilen puanlar Çizelge 3.10'da verilmektedir.

Çizelge 3. 10. Dispersif zeminlerin tanımlanması için sınıflandırma sistemi (Savaş, 2008)

Fiziksel deneyler	İğne deliği Deneyi	Sınıf Puan	DI 5	D2 3	ND3-ND4 1	ND1-ND2 0
	Dağılma Deneyi	Sınıf Puan	Güçlü reaksiyon 3	Orta reaksiyon 2	Az reaksiyon 1	Reaksiyon yok 0
Kimyasal Deneyler	CEC-ESP	Sınıf Puan	Yüksek dispersif 4	Dispersif 3	Marjinal 1	Dispersif değil 0
	SAR	Sınıf Puan	2< 2	1.5-2 1		>1.5 0
	TDS-Na	Sınıf Puan	Dispersif 2	Geçiş 1		Dispersif Değil 0
Değerlendirme toplam puanı			≥12 Yüksek Dispersif	8-11 Orta Dispersif	5-7 Az Dispersif	≤ 4 Dispersif Değil

* İğne deliği deneyi sonucunda elde edilen dispersibilite sınıfları

D1 : Dispersif

D2 : Dispersif

ND3 : Ara Zemin

ND4 : Ara Zemin

ND2 : Dispersif Değil

ND1 : Dispersif Değil

BÖLÜM 4

PROBLEMLİ ZEMİNLERİN STABİLİZASYONU

İnşaat mühendisliği uygulamalarında zeminler bazen istenilen niteliklerde değildirler. Zayıf, şişen, dağılan özellikte olabilirler. Bu ve benzeri durumlarda, proje sahasının değiştirilme imkanı yoksa, zeminin mühendislik davranışının iyileştirilmesine gidilmelidir.

Bu yöntemlerle iyileştirilmek istenen mühendislik özellikler başlıca şunlardır; zeminin taşıma kapasitesini artırmak, sıvılaşma potansiyelini azaltmak, kayma mukavemetini artırmak, geçirimsizliği azaltmak, toplam konsolidasyon oturmasını hızlandırmak veya azaltmak, şişme potansiyelini azaltmak, yoğunluk artırmaktır.

Zeminlerin mühendislik özelliklerini artırmak için kullanılan yöntemler aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir (Çizelge 4.1).

Çizelge 4.1. Zemin stabilizasyon yöntemlerinin sınıflandırılması (Yıldırım, 2002)

Zemin İyileştirme Yöntemleri			
Mekanik	Hidrolik	Fiziksel ve Kimyasal	Ekleme ve Sınırlama
Titreşimli Sıkıştırma	Ön Yükleme	Enjeksiyon	Şerit
Darbeli Silindir	Geosentetik	Isıtma-Dondurma	Donatı
Titreşimli Tabla	Diyafram Duv.	Jet Grout	Hasır
Derinde Titreşim	Palplanş Duvar	Çimento- Uçucu kül Vb. Katkılar	Zemin Çivisi
Statik sıkıştırma	Geomembran		Ankraj
Sıkıştırma Kazıkları	Basınçlı Hava		Kafes Duvar
Patlatma	Pompalama		Taşkolon

4.1. Sıkıştırma

Maksimum kuru birim hacim ağırlığa ulaşmak için optimum su muhtevasında zeminin sıkıştırılması gerekir. Optimum su muhtevasından daha fazla veya daha az su eklenmesi, zeminin kuru birim hacim ağırlığını daima düşürür. Optimum su muhtevası standart proktor veya modifiye proktor deneyleri ile elde edilir.

Laboratuvarda yapılan kompaksiyon deneyi sonuçları, saha uygulaması için bir ölçü olarak alınır. Sahadaki iklim şartları altında zeminin su muhtevasının hassas şekilde kontrol edilmesi çok zordur. Bu nedenle kompaksiyonun arazideki uygulamasında sıkışma durumu relatif sıkışma veya kompaksiyon oranı (I_r) ile ölçülür.

$$I_r = \frac{(\text{Arazideki } \gamma_k)}{(\gamma_{kmaks})}$$

Genellikle, projenin özelliklerine de bağlı olarak % 90 ila % 95 sıkışma oranı istenir. Uygulamada zemin 0,20 ila 0,30 m kalınlığında tabakalar halinde sıkıştırılır ve kompaksiyon oranı yerinde ölçülen birim hacim ağırlığı ile sürekli olarak kontrol edilir (Özüdoğru vd., 2001).

Arazideki sıkıştırma işlemi silindirler yardımı ile yapılır. Bu işlem için kullanılan silindirler şu şekilde sıralanabilir; dolu gövdeli silindirler (Sıkıştırma enerjisi 300~400kN/m²), pnömatik silindirler (Sıkıştırma enerjisi 600~700kN/m²), keçi ayaklı silindirler (Sıkıştırma enerjisi 1500~7500kN/m²), vibratörlü silindirler. Arazideki kompaksiyon silindir tipi, silindirin geçiş hızı, su muhtevası ve tabaka kalınlığı parametreleriyle birlikte değişiklik gösterir.

4.2. Dinamik Sıkıştırma

Belirli ağırlıktaki bir çekiç (yaklaşık 100-200 kg), yaklaşık 40 m yükseklikten zemine düşürülerek yapılan zemin iyileştirme metodudur. Bu metodun uygulanabilmesi

için proje sahasının yakınlarında yapı bulunmamalıdır. Çünkü büyük titreşimler mevcut yapılara zarar verebilir.

4.3. Ön Yükleme

Belli derinlikteki su içeren yüksek sıkışabilirlikli normal konsolide killerde, inşaat yapımından sonra meydana gelebilecek büyük çaplı oturmaları engellemek için sürşarj yükü yardımıyla kil zeminin imalattan önce konsolide olması sağlanabilir. Bu uygulama, genellikle düşük ve orta şişme basınçlarına sebep olan zeminler için geçerlidir.

4.4. Ön Islatma

Şişen killerin iyileştirilmesi ile ilgili bilinen en basit ve en etkili yöntem; ön ıslatmadır. Kapiler etkilerden dolayı zemin içindeki su, orta derinlikteki su tablasından üst seviyelere doğru hareket eder. Aynı zamanda su hareketi; termo-osmos ve diğer mekanizmalarla yüksek sıcaklıklı alanlardan düşük sıcaklıklı alanlara doğru olur. Normal olarak hareket eden su, yüzeyde buharlaşır ve bu şekilde zeminin nem dengesi sağlanır (Chen,1988). Bir döşeme, kanal kaplaması, kaldırım veya benzeri yapılar ile örtülmüş alanlarda zemin içinde oluşması gereken bu terleme gerçekleşmeyeceğinden, sonuçta temel altındaki zeminin su muhtevası artar ve böylece temel zemininde şişme meydana gelir. Ön ıslatma teorisi zemini ıslatmak suretiyle imalatın öncesinde şişmenin meydana gelmesi esasına dayanır (Gündüz, 2008). Böylece temel tabanında kaldırma kuvvetleri oluşmayacak ve yapılarda hasar meydana gelmeyecektir.

Bu yöntem; çalışma alanında ya direk bir taşkın yaratma veya su depolama şeklinde yapılır. Su muhtevası değişimi üzerinde taşkın yaratma ve su depolama etkisini ortaya koymak amacıyla çalışmalar yapılmıştır. ABD' nin Teksas Eyaleti'nde yapılan bir çalışmada, su muhtevası 24 saatlik bir süre sonunda yalnızca 1,2 m'lik bir derinlik içinde yeterince artırılabilinmiştir. Daha alt mesafede ise istenen su muhtevası dağılımına yaklaşık 30 gün sonunda ulaşılmıştır. Bir başka çalışmada ise ön ıslatmanın orta seviyede şişme potansiyeline sahip zeminlerde ancak 70-80 cm'ye kadar etkili

olduğu görülmüştür. Ancak şişme potansiyeline sahip zeminlerde ön ıslatma; tek başına 90 cm'den daha derin seviyelerde kesinlikle başarılı değildir (Chen,1988).

4.5. Katkı Malzemeleri Yardımı ile Zemin Stabilizasyonu

Problemlili zeminler kireç, çimento, uçucu kül gibi katkı malzemeleri kullanılarak da stabilize edilirler. Bu malzemeler su ile birlikte kile karıştırıldığında zeminlerin birçok mühendislik özelliğine pozitif yönde etkide bulunur. Zemin stabilizasyonu için en çok kullanılan katkı malzemesi kireçtir.

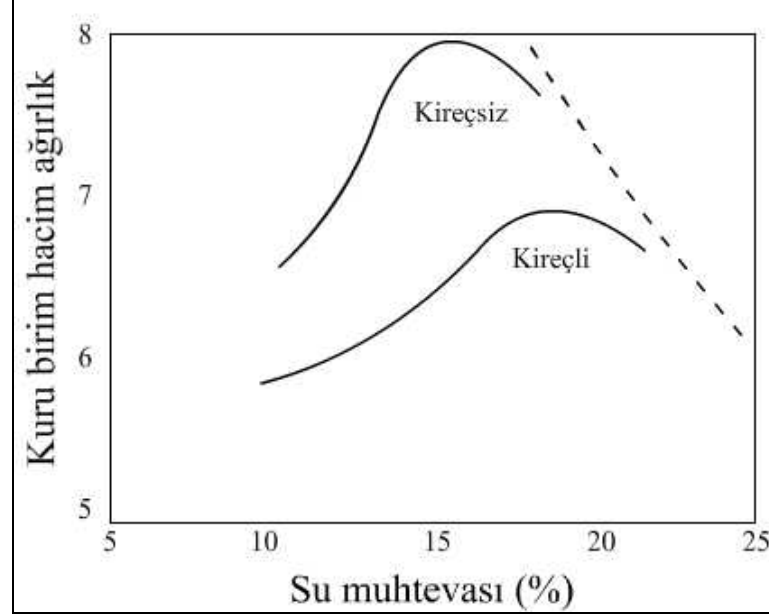
4.5.1. Kireç stabilizasyonu

Kireç insanoğlunun kullandığı ilk kimyasal yapı malzemelerinden biridir ve birçok zemin içinde stabilizasyon amacıyla kullanılabilir. Kil zeminlere kireç katılması kilin plastisitesinin ve şişme potansiyelinin azalmasını sağlar. Kireç stabilizasyonu, zeminde oluşacak olan şişmeyi azaltmak ve işlenebilirliği artırmak için çoğu projede kullanılmıştır. Özellikle karayolu projelerinde başarıyla uygulanmaktadır. Kireç katkısı aynı zamanda malzemenin kompaksiyon karakteristiklerini de etkiler. Maksimum kuru birim hacim ağırlık azalırken, optimum su muhtevası artar (Şekil 4.1).

Şişen killerin stabilizasyonu için kullanılan farklı kireç tipleri bulunmaktadır. Bu kireçler arasında kalsiyum yönünden zengin sönmüş kireç ve sönmemiş kireç pratikte yaygın olarak kullanılmaktadır. Şişen killerin stabilizasyonu için gereken kireç miktarının; ağırlıkça %2-8 arasında olduğu ifade edilmektedir (Chen, 1988). Sönmemiş kireç (CaO), kireç taşının yüksek sıcaklıkta işlenmesiyle elde edilen bir malzemedir. Sönmüş kireç (Ca(OH)₂) ise sönmemiş kirecin suyla kimyasal reaksiyona girmesi sonucunda oluşur.

Zemine kireç ilave edildiğinde kil ve kireç arasında kimyasal bir reaksiyon gerçekleşir. Kirecin killi zeminlerle olan ilişkisi şu başlıklar altında incelenebilir; kation değişimi ve flokülasyon, puzolanik reaksiyon, karbonatlaşma.

Kasyon Değişimi ve Flokülasyon: Kireç, su ve killi bir zemin biraraya geldiğinde, pozitif iki yüklü Ca^{++} kationları kil yüzeyine absorplanmış kationlarla yer değiştirir. Aşağıdaki her kasyon soldakinin yerini alabilir (Little, 1995).



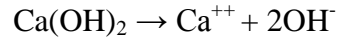
Şekil 4.1. Kirecin kompaksiyon karakteristiklerine etkisi (Hausmann, 1990).

Flokülasyon sonucunda partiküller arasındaki sürtünme ve kesme kuvveti artar. Yapıda meydana gelen bu değişiklikler sebebiyle silt-kum benzeri bir malzeme oluşur ve plastisite azalır (Garaisayev, 2008).

Puzolanik Reaksiyon: Kireç, su ve zemin biraraya geldiğinde farklı çimentolaşmalar oluşturur. Zemin içerisindeki kil mineralleri, farklı puzolan maddeleri içerir. Sönmüş kirecin suya eklenmesiyle suyun pH değeri hemen yükselir. Bu değer yeterli kirecin eklenmesiyle 25°C 'de zirveye ulaşarak 12,4 olur. Bu karışımın pH değeri çok önemlidir. Çünkü ancak yüksek pH değerine ulaşıldığında kireç ile reaksiyona giren ve puzolan maddeyi oluşturan silika ve alümina mineralleri çözeltiye geçer. Silika ve alümina, kireç içerisindeki kalsiyum ile birleşerek çimentolaşma etkisini yaratır. Bu süreç doğal olarak yavaştır, çünkü kirecin kilin yapısına nüfuz etmesi zaman almaktadır

(Garaisayev, 2008). Bundan dolayıdır ki kireçle zemin stabilizasyonunda kür süresi dikkat edilmesi gereken bir husustur.

Eades ve Grim (1996) X ışını analizi sonuçlarıyla, uygun koşullar sağlandığında, kireç ve silikanın reaksiyona girerek kompleks bir kalsiyum silikat yapısı oluşturduğunu söylemiştir. Bu yapı, sistemde silika ve kalsiyum bulunduğu süre boyunca devam eder. Bu reaksiyonlar şunlardır.



Karbonatlaşma: Kireç açıkta kalıp hava ile temas ettiğinde, karbonatlaşma ve zayıf çimentolaşma meydana gelir (Garaisayev, 2008).

4.5.2. Çimento stabilizasyonu

Portland çimentosunun hidratasyonu, değişik bileşik ve jeller oluşturan karmaşık bir puzolanik reaksiyondur. Kil ile çimento karışımının sonuçları, kireç stabilizasyonu sonuçları ile benzerlik göstermektedir. Bu uygulama ile likit limit, plastisite indisi, zeminin hacim değişikliği potansiyeli azalır ve rötre limiti ile kayma dayanımı artar (Chen, 1988). Ancak yüksek plastisiteli killer için portland çimentosu kireç kadar etkili değildir. Kireç ile iyileştirilemeyen zeminlerde, çimento kullanımı genellikle başarılı olmaktadır. Portland çimentosunun etkili olduğu killer için karıştırma, kireç uygulamasında yapıldığı gibi yapılmaktadır. Ancak bu teknikte çimento ilavesi ile son karıştırma arasında geçen zaman, kireç uygulamasında dikkate alınandan daha kısa olmalıdır. Çünkü portland çimentosu daha kısa hidratasyon ve priz süresine sahiptir.

% 2-6 oranında portland çimentosu muhtevası, zeminin yarı rijit bir kaplama gibi davranmasına yol açar. Ancak çimento ile stabilize edilen bir malzemenin çatlama eğilimi vardır. Kullanımdan önce ve sonra bu etkisi göz önünde bulundurulmalıdır (Gündüz, 2008).

4.5.3. Uçucu kül ile zemin stabilizasyonu

Uçucu kül; alüminyum, silisyum, çeşitli oksitler ve alkaliler içeren puzolanik bir malzemedir. Kendi kendine bağlayıcı özelliği ya hiç olmayan ya da çok az olan, ancak su ve kireçle birlikte kimyasal reaksiyona girdiklerinde bağlayıcılık kazanan malzemelere puzolan malzeme denir. Uçucu kül bu özelliği ile kireç ve kil arasındaki puzolanik reaksiyonu artırmak ve böylece zeminin tane çapını büyütmek için zemine ilave edilir. Bunun yanında yapısında kireç içeren uçucu küller de vardır ve bunlar normal uçucu küllerle karıştırılarak daha etkili sonuçlar elde edilebilir.

4.5.4. Diğer katkılarla stabilizasyon

Zemin stabilizasyonunda tuz ve organik bileşikler gibi diğer bazı katkılarda kullanılmaktadır. Bu amaçla en çok kullanılan tuzlar sodyum klorit ve kalsiyum klorittir. Zemin özellikleri üzerinde sodyum kloritin etkisi değişkenlik göstermektedir. Bu uygulama genellikle yüksek likit limite sahip zeminlerde büyük bir etkiye sahiptir. Zemin tipine bağlı olarak sodyum klorit, büzülme limitini ve kayma dayanımını artırır. Sodyum kloritle reaksiyona giren zeminlerde, aynı zamanda don kabarmasında kontrolü sağlanmaktadır. Kuru zemin ağırlığının %1'i oranında kalsiyum klorit kullanımı, çoğu zemin stabilizasyonu için yeterlidir. Kalsiyum klorit kullanımının bir de dezavantajı mevcuttur. Bu kalsiyum kloritin zemin içinden kolayca yıkanmasıdır. Bu uygulama yapılmadan önce nispi nem miktarının, en az %30 oranında olması da, uygulamanın diğer bir dezavantajını oluşturmaktadır (Nelson and Miller, 1992).

Zeminlerin stabilizasyonu için değişik organik bileşikler kullanılmaktadır. Piyasada farklı uygulamalarda kullanılabilen farklı bileşikler mevcuttur. Bu sebepten dolayı, uygulamaya geçilmeden önce arazide eneyler yapılmak suretiyle kullanılacak bileşik tercih edilmelidir. Unutulmaması gereken ise organik bileşiklerin başarısının sınırlı seviyede olduğudur (Gündüz, 2008).

4.6 Dispersif Killerin Stabilizasyonu

Pratikte çok kullanılan yollardan biri kimyasal katkı malzemeleri kullanarak dispersif zemin özelliklerini değiştirmektir. Özellikle en geçerli tedbir, zeminin Na⁺ katyonu muhtevasını düşürmektir. Bunun için sönmüş kireç (Ca(OH)₂) kullanılması durumunda Ca⁺⁺ katyonu, Na⁺ katyonunun yerine geçerek zemindeki Na⁺ katyonu muhtevasının azalmasına ve dispersif karakterin değişmesine neden olmaktadır (Forbes et al., 1980). Zeminin kuru ağırlığına göre %1,0–2,0 oranında sönmüş kireç ilavesinin dispersif zeminleri tamamen değiştirerek dispersif olmayan karaktere dönüştürdüğü görülmüştür (Aydın ve Aydın, 2006).

Dispersif killerin erozyonunu önleyen diğer bir kimyasal katkı malzemesi ise alüminyum sülfattır (Al₂(SO₄)₃). Zeminin kuru ağırlığına göre %0,5–2,0 oranında alüminyum sülfat ilavesi, dispersif karakteri bertaraf etmektedir (Landau and Altschaeffl, 1977). Alüminyum sülfatın zemine tatbiki, kolay eriyebilir olması nedeniyle, kireçten daha ucuz ve daha az tehlikelidir. Bu tür katkıların kile ilavesi; baraj gövdesi üzerinde olabileceği gibi, kilin temin edildiği ocakta da gerçekleştirilebilir. Ancak bu tür uygulamaların bir dezavantajı, işleme tabi tutulacak malzeme hacminin çok büyük olması durumunda ekonomik olmamasıdır (Aydın ve Aydın, 2006). Bu durumda zeminle etkileşime geçen rezervuar suyuna kimyasal madde katılması daha ekonomik olmaktadır. Kimyasal işlemin, su veya zeminden hangisine yapılması gerektiğine karar vermek için mutlaka ekonomik mukayese yapılmalıdır. Bu yöneme dayalı uygulamalarda başarılı sonuçlar alınamadığını rapor eden araştırmacılar olduğu gibi (Ingles, 1972), Avustralya'da rezervuar suyunun alçı (CaSO₄) ile muamelesi sonucu başarılı olmuş uygulamalara ait raporlar da mevcuttur (Grant et al., 1977).

BÖLÜM 5

MALZEME VE YÖNTEM

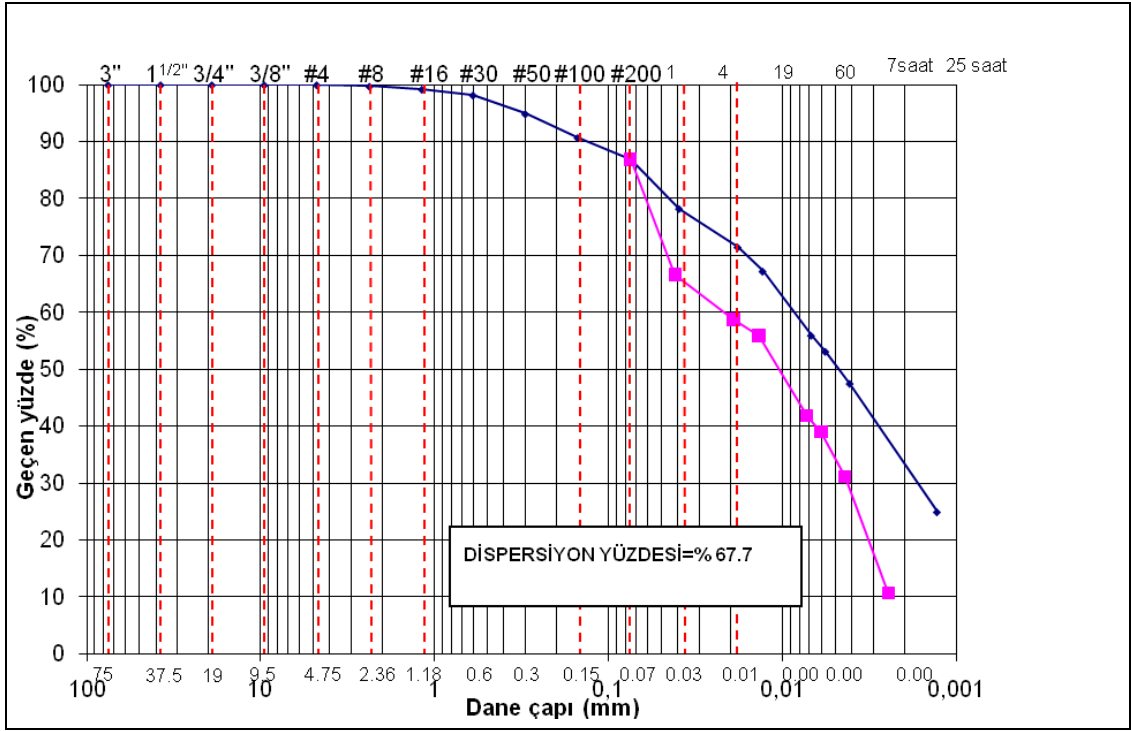
5.1. Malzeme

5.1.1. Zemin

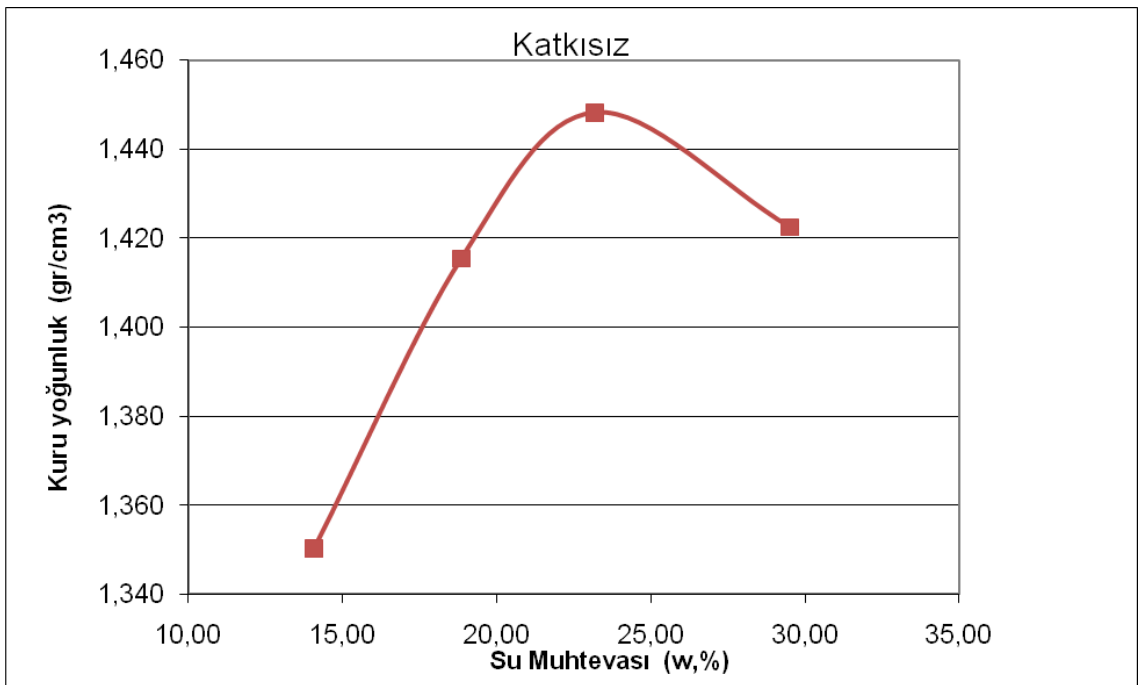
Bu çalışma kapsamında kullanılan zemin, Afyon İli'nden alınmıştır. Malzeme laboratuvara çuvallar içerisinde getirilmiş ve deneylerde kullanılmak üzere uygun şekilde hazırlanmıştır. Tanımlama deney sonuçlarına bağlı olarak malzeme Birleştirilmiş Zemin Sınıflama Sistemi'ne (USCS) göre yüksek plastisiteli kil olarak sınıflandırılmıştır. Malzemenin geoteknik parametreleri Çizelge 5.1'de verilmiştir. Zemine ait elek analizi kompaksiyon eğrisi ve zeminin plastisite kartındaki yeri, sırasıyla Şekil 5.1, Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'de verilmiştir. Zeminin kimyasal analizi Çizelge 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Malzemenin geoteknik parametreleri

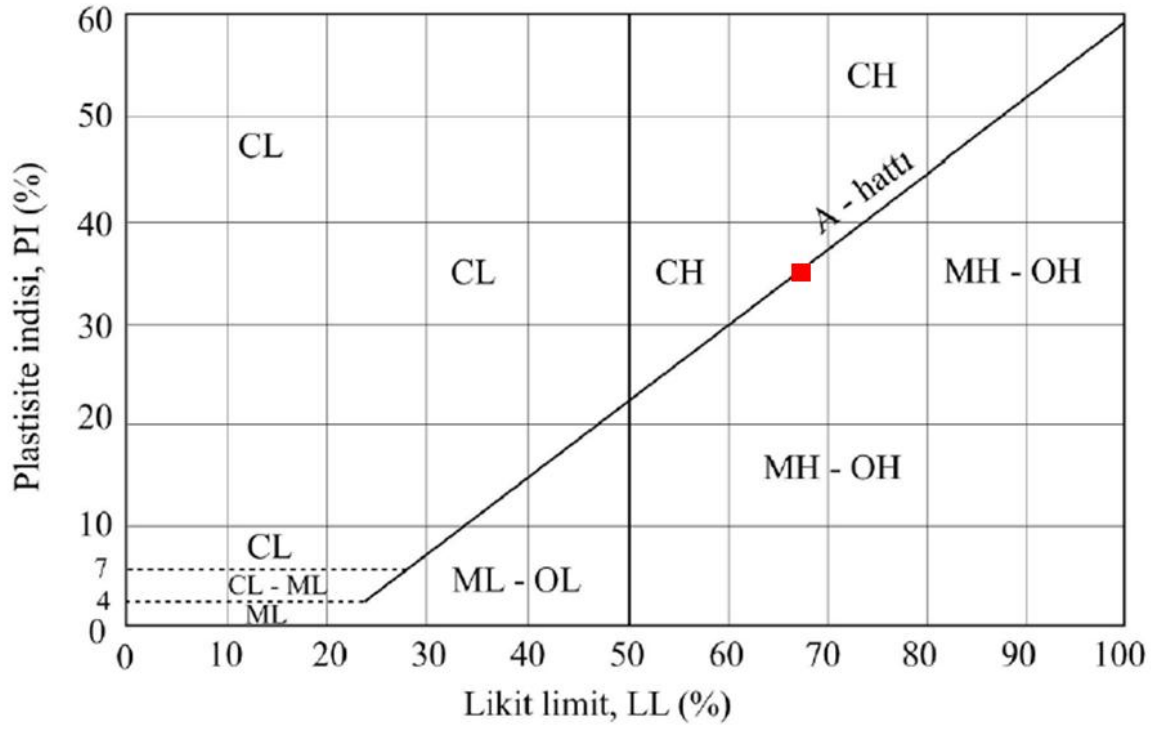
Parametre	Değer
İnce malzeme(%)	92
Kum(%)	8
Çakıl(%)	0
Kil(%)	33
LL(%)	68
PL(%)	33
PI(%)	35
Gs	2,73
pH	8,55
Grup sembolü	CH



Şekil 5.1. Zemine ait çifte hidrometri analizi sonucu



Şekil 5.2. Zemine ait kompaksiyon eğrisi



Şekil 5. 3. Zeminin plastisite kartındaki yeri

Çizelge 5.2 Zeminin kimyasal analiz sonuçları

İletkenlik (mmhos/cm)	pH	TDS(*) (meg/L)	Na (%)	SAR	ESP (%)
20.600	8.55	143.19	92.30	56.36	33.85

TDS: Toplam Çözünen tuz,

Na (%): Sodyum yüzdesi,

SAR: Sodyom absorbsiyon oranı,

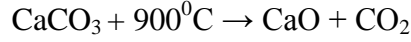
ESP: Değişebilir sodyum yüzdesi

5.1.2. Kireç

Bağlayıcı olarak kullanılan en eski yapı malzemelerinden biri olan kireç; havada veya suda bağlayıcılık özelliği gösterebilen kimyasal bir malzemedir. Kireç,

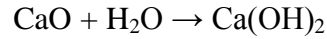
kireçtaşının 900⁰C ila 1400⁰C’de pişirilmesi sonucu elde edilir. Bu işleme kalsinasyon adı verilir. Kalsinasyonun kimyasal ifadesi şu şekildedir.

Kireç Taşı+ Isı → Sönmemiş Kireç + Karbondioksit



Bu şekilde elde edilen sönmemiş kireç, su ile reaksiyona sokularak, toz halindeki sönmüş kireç elde edilir. Bu olayın kimyasal ifadesi şu şekildedir.

Sönmemiş kireç + Su → Sönmüş Kireç + Isı



Bu çalışma kapsamında Adaçal TS EN 459.1 CL 80.S marka sönmüş kireç kullanılmıştır.

5.1.3. Silis dumanı

Elektrometalurji sanayisinde silisyum ve ferrosilisyum alaşımlarının üretiminde bir yan ürün olarak elde edilen silis dumanı, çok küçük küresel taneli olup, yaklaşık % 90 oranında amorf silis içermesinden dolayı puzolanik değeri yüksek bir maddedir. Silis dumanı açık elektirik ark fırınında kuvarsın 2000 ⁰C’de indirgenmesi ile ortaya çıkmaktadır. Yüksek sıcaklıkta gaz haline geçen SiO soğutma sırasında yükseltgenerek SiO₂ taneleri halinde birirmektedir. Ani soğutma nedeniyle kristalleşmeyen SiO₂ amorf yapıda çok küçük taneler halinde oluşmaktadır (Yılmaz, 2008).

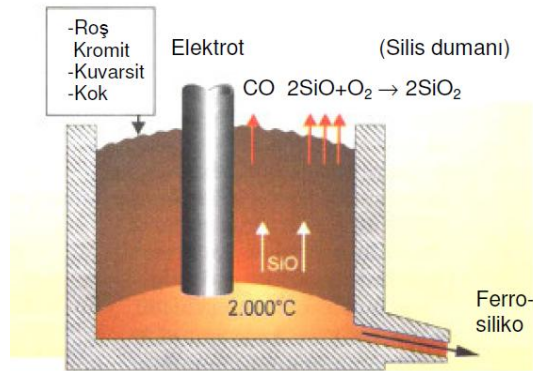
Dünyadaki toplam yıllık silis dumanı üretimi yaklaşık bir milyon tondur. Bunun 130.000 tonu ABD’de, 120.000 tonu Norveç’te üretilmektedir. Kuzey Amerika’da 13 adet silikon, sils dumanı ve ferrosilikon üreten santral bulunmaktadır. Silis dumanı, ferrokrom (FeCr), ferromanganez (FeMn), ferromagnezyum (FeMg), kalsiyum silikon

gibi silikon açığa çıkaran diğer üretim şekillerinden de temin edilmektedir (Papworth, 1997).

Çizelge 5.3. Sönmüş kirecin kimyasal ve fiziksel analizi

Kimyasal Analiz Değerleri	%
Ca(OH) ₂	80-85
Toplam CaO+MgO	83-91
MgO	1-2
Çözünmeyen Madde + SiO ₂	maks. 1
Bağlı H ₂ O	19,7-20,12
S	maks. 0,5
Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	maks. 1
Fiziksel Analiz Değerleri	%
Yoğunluk (gr/lt)	381-492
63µ elek üstü	7-10
90µ elek üstü	3-6

Silis dumanı çok küçük taneli olduğu ve yapısında % 93 yakın SiO₂'den dolayı çok güçlü puzolanik bir malzemedir. Bu özelliğinden dolayı çimento sanayisinde çok fazla kullanılmaktadır.



Şekil 5.4. Elektrik-ark fırınında silis dumanı oluşumu (Azevedo, 2001)



Şekil 5.5. Silis Dumanı

Yüksek oranda amorf SiO_2 içeren silis dumanı gri renkli bir tozdur. Ortalama tane çapı itibari ile çimento taneciklerinden 100 kat daha ince bir malzemedir. Özgül yüzeyi $20.000 \text{ m}^2/\text{kg}$ civarındadır. Yığın birim ağırlığı ise $150\text{-}250 \text{ kg/m}^3$ 'dür (Yeğınobalı, 1933).

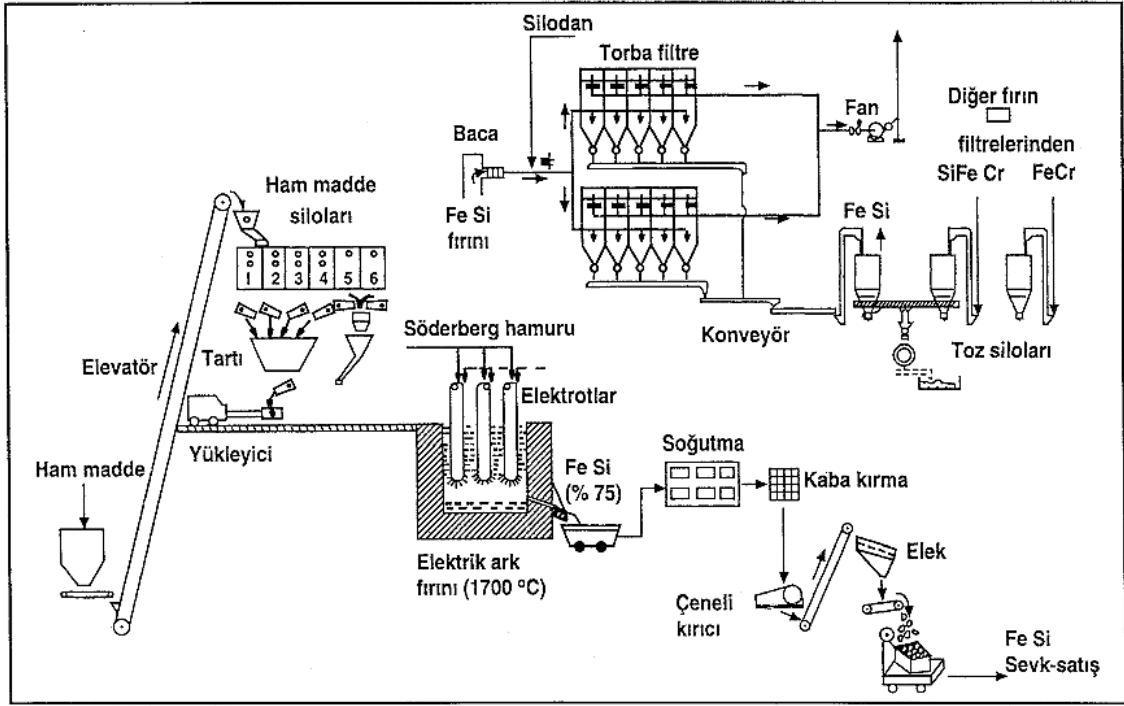
Çizelge 5.4. Silis dumanının kimyasal analizi

Kimyasal Bileşim	%
SiO_2	85-95
Fe_2O_3	0,5-1,0
Al_2O_3	1,0-3,0
MgO	1,0-2,0
CaO	0,8-1,2
C	0,5-1,0
S	0,1-0,3
Kızdırma Kaybı	0,5-1,0

Ülkemizde silis dumanı Antalya Elektrometalurji A.Ş.'de bir yan ürün olarak elde edilmektedir. Silis dumanı fabrikanın ferrosilisyum (FeSi) ve silikoferrokrom (SiFeCr) fırınlarında özel filtreli toz tutucularla elde edilmektedir. Bu çalışmada da Antalya Elektrometalurji A.Ş.'den alınan silis dumanı kullanılmıştır.

Silis dumanının kullanıldığı alanlar şunlardır; çimento ve beton uygulamalarında; araç park yerlerinde, köprü döşemelerinde, tünellerde, liman

yapılarında, yol kaplamalarında, yüksek katlı yapılarda, refraktör olarak, suni gübre olarak, filler olarak, petrol endüstrisinde, petrol kuyularının dolgusunda kullanılmaktadır (Papworth, 1997; Türker, 2001).



Şekil 5.6. Ferrosilisyum üretim şeması ve baca tozlarının toplanması (Yeğınobalı, 2002)

5.1.3.1. Silis dumanı ile daha önce yapılan çalışmalar

Daha önce yapılan bir çalışmada, klasik yöntemlerle üretilen kerpiçlerin, silis dumanı katkısı ile fiziksel özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Çalışmanın sonunda silis dumanı oranının karışımda artmasıyla birlikte, kerpiçlerin basınç dayanımının arttığı görülmüştür. Özellikle % 10 oranında silis dumanı ilave edilmiş numunelerde basınç dayanımının en yüksek seviyeye geldiği gözlemlenmiştir. Silis dumanı ilaveli numunelerin suya dayanıklılığının arttığı görülmüştür. Üretilen kerpiçlerin birim hacim kütlelerinin, ilave edilen silis dumanı oranları ile orantılı olarak düştüğü görülmüştür (Kıvrak, 2007).

Bir başka çalışmada, ülkemizde elde edilen silis dumanının betonunun basınç dayanımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonunda, silis dumanının taze ve katı betonun birim ağırlıklarını azalttığını, katkı oranına göre basınç dayanımını % 20 ila % 50 arasında artırdığını ve karma suyu ihtiyacını artırdığı görülmüştür (Demir, 2005).

Diğer bir çalışmada, Antalya Ferrokrom Fabrikası atıklarının (FeCr curufu, SiFeCr curufu, silis dumanı) yol üstyapısındaki kullanım potansiyeli araştırılmıştır. Sonuç olarak, FeCr ve SiFeCr curufunun fiziksel ve mekanik özellikleri bakımından yol üst yapısının granüler tabakalarında doğal agregaya alternatif olarak kullanılabileceği belirlenmiştir. Ayrıca “FeCr curufu + % 6 ve daha fazla silis dumanı” karışımları basınç dayanımları açısından standartlara uygun değerleri yakalamıştır. Serbest basınç dayanımı deneylerinde silis dumanı da çimento gibi bağlayıcı özellik göstermiştir. Ancak silis dumanı yüksek oranda kullanıldığı takdirde (> %10) işlenebilirlik azalmakta ve karışımın su ihtiyacı artmaktadır (Yılmaz, 2008).

5.2. Deneysel Çalışma Programı

Bu çalışmayı yürütmek amacıyla Afyon'dan alınan kil numunelerine, önce tanımlama deneyleri(kıvam limiti, kompaksiyon, elek analizi, özgül ağırlık deneyleri), daha sonra belirli oranlarda silis dumanı ve kireç katılarak; sırasıyla Eades ve Grim pH deneyi, şişme yüzdesi ve şişme basıncı, dağılma deneyi, iğne deliği deneyi, üç eksenli basınç deneyleri ve son olarak da XRD ve SEM analizleri yapılmıştır. Elek analizi, özgül ağırlık, şişme yüzdesi ve şişme basıncı, dağılma deneyi, iğne deliği deneyi ve üç eksenli basınç deneylerinde kompaksiyon deneylerinden elde edilen w_{opt} ve ρ_{dmaks} parametreleri göz önünde bulundurulmuştur. Deneyler yapılırken ilgili standartlara uyulmuştur (TS1500, TS1900, USBR 5400,-89, USBR 5410-89, ASTM D 2850). Çizelge 5.5'de deneysel çalışma program tablo halinde verilmiştir.

Çizelge 5.5. Deneysel çalışma programı

	Deney	Numune sayısı		
Tanımlama ve Sınıflama Deneyleri	Tane dağılımı			
	-Elek analizi	8		
	Kıvam limitleri			
	-Likit limit	8		
	-Plastik limit	8		
	Özgül gravite	8		
	Kompaksiyon karakteristikleri			
	-Standart proctor	8		
Şişme Deneyleri	Şişme yüzdesi	8		
	Şişme basıncı	8		
Dispersibilite Deneyleri	Dağılma deneyi	8		
	İğne deliği deneyi	8		
Dayanım Deneyleri	Konsolidasyonsuz-drenajsız üç eksenli deneyi (UU)	Kür süresi		
		1 gün	7 gün	28 gün
		8*3=24	7*3=21	7*3=21
SEM Analizleri	Taramalı elektron mikroskop analizleri	3		
XRD	X ışınımı kırınımı deneyi	3		
	Toplam	144		

5.2.1. Kıvam limiti deneyleri

Belirli oranlarda silis dumanı ile karıştırılan numuneler 1 gün süreyle küre bırakıldıktan sonra, likit limit ve plastik limit deneyleri yapılmıştır. Likit limit değeri Casagrande deney aleti kullanılarak belirlenmiştir. Casagrande deney aletinin çanak kısmına sıvanmış zemin içinde açılan yarığın yaklaşık 1 cm yükseklikten 25 kez

düşmesi durumunda yarığın kapanmasına tekabül eden su muhtevası bulunmuştur. Plastik limit, bir cam levha üzerinde malzemenin avuç içi ile yuvarlanarak 3 mm çapına getirildiğine, kopmaların ve çatlamların başladığı su muhtevası hesaplanarak bulunmuştur. Likit limit ve plastik limit değerlerinin bulunmasından sonra “ $PI = LL - PL$ ” bağıntısı kullanılarak plastisite indisine geçilmiştir. Katkısız numunenin likit limiti $LL = 68$, plastik limiti $PL = 33$ ve plastisite indisi $PI = 35$ bulunmuştur.

5.2.2. Kompaksiyon deneyleri

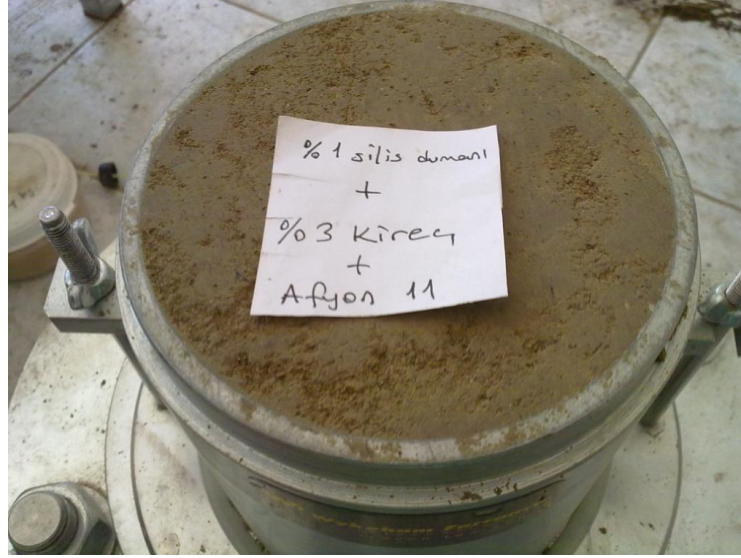
Değişik oranlarda kireç ve silis dumanı ilave edilerek hazırlanan numuneler 1 gün süreyle küre bırakıldıktan sonra, kompaksiyon deneyi yapılmıştır. Kompaksiyon enerjisi olarak Standart Proktor kompaksiyon enerjisi kullanılmıştır. Zemin Standart Proktor çekici ile 944 cm^3 lük bir kalıp içerisine, 3 tabaka halinde ve her tabakaya 25 vuruş yapılarak sıkıştırılmıştır. Sıkıştırılmış bir numune Şekil 5.7 ‘de gösterilmiştir. Deney sonunda her bir karışım için ayrı ayrı w_{opt} ve ρ_{dmaks} değerleri bulunmuştur.

Karışımlar ilk önce kuru olarak hazırlanıp, iyice karıştırılarak malzemenin homojen dağılması sağlandıktan sonra su ilave edilmiştir. Deneye yaklaşık % 20 su içeriğiyle başlanıp, her seferinde yaklaşık % 3 artırılarak devam edilmiştir. Proktor kabı ve sıkıştırılmış zeminin toplam ağırlığı azalana kadar deneye devam edilmiştir. Katkısız numunenin optimum su muhtevası $w_{opt} = 23,2$ ve maksimum kuru yoğunluğu $\rho_{dmaks} = 1,448 \text{ g / cm}^3$ olarak bulunmuştur.

5.2.3. Elek Analizi deneyleri

Daha önceden her karışım oranında hazırlanmış numulardan belirli bir miktar alınarak $110 \text{ }^\circ\text{C}$ ’deki etüvde bir süreyle kurulum, ertesi gün kuru malzeme miktarı bulunmuştur. Bu numune bir kaba konulup bir süre çözünmesi beklendikten sonra, $0,075 \text{ mm}$ ’lik elekten yıkanarak elenmiştir. Bu işlem elek altından berrak su akana kadar devam ettirilmiştir. Yıkama işleminin sonunda elek üzerinde kalan malzeme bir kaba boşaltılarak $110 \text{ }^\circ\text{C}$ ’deki etüve koyulmuştur. Daha sonra etüvden çıkarılan malzeme, sırasıyla $4,75 \text{ mm}$, $2,36 \text{ mm}$, $1,18 \text{ mm}$, $0,6 \text{ mm}$, $0,3 \text{ mm}$, $0,15 \text{ mm}$, $0,075$

mm'lik eleklerden elenip elek üstünde kalan malzemeler tartılıp, kaydedilmek suretiyle tane çapı dağılımı belirlenmiştir. Katkısız numunede ince malzeme yüzdesi (kil + silt) % 92 olarak bulunmuştur.



Şekil 5.7. Standart Proktor çekici ile kompaksiyon kalıbına sıkıştırılmış bir numune.

5.2.4. Özgül ağırlık deneyleri

Özgül ağırlık (G_s), tane birim hacim ağırlığının suyun birim hacim ağırlığına oranı olarak tanımlanmaktadır. Özgül ağırlığın tayininde piknometre denen cam şişe kullanılmıştır. Sırasıyla şu işlemler yapılmıştır. Piknometre boş olarak tartılır, piknometre ağzına kadar damıtılmış su ile doldurulup tartılır, daha önceden hazırlanan karışımdan 50 gr alınarak piknometreye koyulur ve bu şekilde tartılır, piknometre boğum yerine kadar damıtılmış su ile doldurulur ve vakum pompası ile havası alınan numune, tekrar ağzına kadar damıtılmış su ile doldurulur ve tartılır (Şekil 5.8). Katkısız numunenin özgül ağırlığı $G_s = 2,73$ bulunmuştur.

$$G_s = \frac{(W_2 - W_1)}{(W_4 - W_1) - (W_3 - W_2)}$$

- W1: Piknometrenin boş ağırlığı (gr)
W2: Piknometre + zemin ağırlığı (gr)
W3: Piknometre + zemin + su ağırlığı (gr)
W4: Su dolu piknometre ağırlığı (gr)



Şekil 5.8. Vakum pompası yardımı ile havanın alınması

5.2.5. Eades ve Grim pH deneyi

Zeminin stabilizasyonu için gerekli minimum kireç ihtiyacının belirlenmesi için Eades ve Grim tarafından önerilen bir deneydir. Bu deneyde, her bir kireç kil karışım oranı için 40 nolu elekten geçen 20 gr kil alınıp, içine belli oranda kireç katılarak karışım cam kavanozlara koyulmuştur. Zemin ve kireç karışımı cam kavanozlara koyulduktan sonra her birinin üzerine 100 ml damıtılmış su ilave edilmiştir. Karışımlar iyice karıştırıldıktan sonra bir saat beklenip pH değerleri ölçülmüştür. Sönmüş kirecin suya eklenmesiyle suyun pH değeri hemen yükselir. pH' ın 12.4 olduğu karışım oranı, minimum kireç oranıdır. Çünkü ancak 12.4 pH değerine ulaşıldığında kireç ile reaksiyona giren ve puzolan maddeyi oluşturan silika ve alümina mineralleri çözeltiye geçer. Silika ve alümina, kireç içerisindeki kalsiyum ile birleşerek çimentolaşma etkisini yaratır. Deney standardı ASTM D 6276'da verilmektedir.

5.2.6. Şişme deneyleri

5.2.6.1. Şişme basıncı deneyleri

Kil zeminlerde karşılaşılan ve tehlike oluşturacak seviyede gelişen şişme veya büzülme durumlarını değerlendirmek için kullanılan potansiyel hacim değişikliği ölçme ünitesi, sıkıştırılmış numunelerin şişme basıncının ölçümü için standart hale gelmiş bir ekipman olup, genelde yoğurulmuş numuneler kullanılarak yapılır (Türköz, 2007).

Deneyin esası sıkıştırılmış zemin numunesinin ıslatılmasından sonra gelişen şişmenin engellenmesiyle oluşan ve “şişme indisi” olarak tanımlandığı şekliyle kullanılan şişme basıncının belirlenmesidir. Su muhtevastaki değişime bağılı olarak belirlenen şişme indisi değeri; en büyük olası hacim değişimini ifade eden PVC değerine dönüştürülerek değerlendirilir .

Bu deney için hazırlanan numuneler öncelikle kompaksiyon deneyi sonucunda bulunan w_{opt} ve ρ_{dmaks} değerlerine getirilmiştir. Şekil 5.9’ da gösterilen sisteme yerleştirilen numune üzerine yük halkası kolu numune üzerine gelecek şekilde yerleştirilir. Numune suya boğulur ve en az 2 saat sonunda yük halkasından değeri okunur. Yük halkasından okunan değeri, kalibrasyon eğrisi kullanılarak veya yük halka faktörüyle çarpılarak birimi bilinen yüke çevrilir. Yüknün numune alanına bölünmesiyle basınç değeri elde edilir (Türköz, 2007).

5.2.6.2. Şişme yüzdesi deneyleri

Bu deney, PVC deneyi ile aynı esaslara sahiptir. Ancak deneyde sabit bir sürşarj yükü altında direk şişmeye müsade edilmektedir. Genleşme indisi (EI), karakteristik bir tanımlama olması nedeniyle, LL, PL, PI gibi zeminin diğeri indis özellikleriyle karşılaştırmalı analiz sunar. Deney yöntemi 1960’lı yılların ortalarında geliştirilmiş ve Kaliforniya’da standart bir yöntem olmuştur. 1988 yılında da genel standart haline dönüşmüştür (ASTM D 4829, 1988).



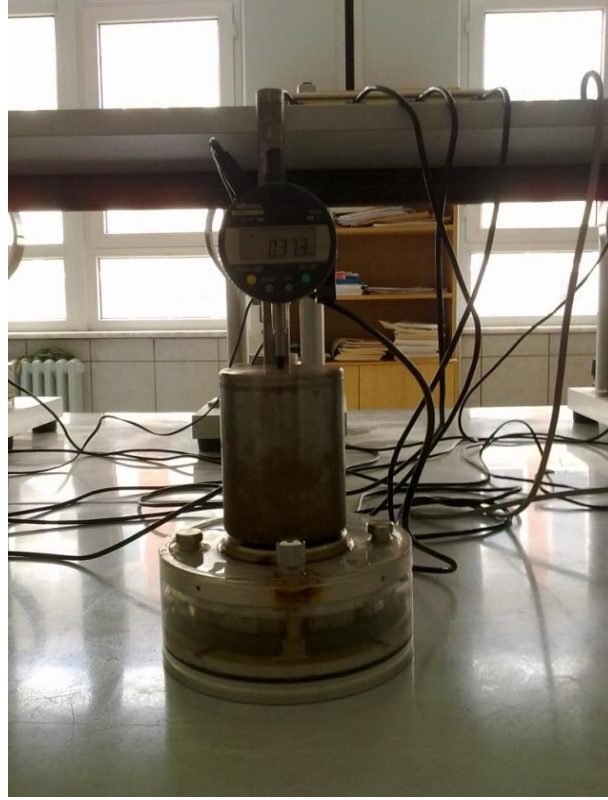
Şekil 5.9. Şişme basıncı deney ekipmanı

Standart deneyde, önce 4 no'lu elek altına geçen numunelerin su muhtevası, standart kompaksiyon deneyinde bulunan optimum su muhtevası değerine getirilir. Bu amaçla 6 ila 30 saat arasında bir süre kür koşulları sağlanır. Numune doygunluk derecesi % 40-60 arasında olacak şekilde halka içine sıkıştırılır ve sisteme bağlanır. 7 kPa'lık sürşarj yükü altında suya boğulur. Deformasyonlar belirli aralıklarla okunur (ASTM D 4829, 1988). Deney sistemi Şekil 5.10'da gösterilmiştir.

5.2.7. Dispersiyon deneyleri

Bu çalışmada kireç ve silis dumanının birlikte kullanımının dispersibiliteye etkisini göstermek amacıyla dağılma ve iğne deliği deneyleri yapılmıştır. Her iki deney için her katkı oranında, ρ_{dmaks} ve w_{opt} değerlerinde numuneler hazırlanmıştır. Dağılma deneyinde oluşan bulanıklık derecesine göre numuneler “dispersif değil”, “ara zemin”, “dispersif”, “çok yüksek dispersif” olarak tanımlanmıştır. İğne deliği deneyinde ise

numuneler dispersif (D1, D2), ara zemin (ND3, ND4), dispersif değil (ND1, ND2) olarak sınıflandırılmıştır. Katkısız numune her iki deneyde de dispersif çıkmıştır. Katkısız numunenin iğne deliği deneyi sınıfı “D2” olarak bulunmuştur.



Şekil 5.10. Şişme yüzdesi deney ekipmanı

5.2.8. Üç eksenli basınç deneyi

Üç eksenli basınç deneyi için 38*81 mm boyutlarında, her katkı oranı için silindirik numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler standart Proktor deneyinde elde edilen w_{opt} ve ρ_{dmaks} parametrelerine uygun olarak hazırlanmıştır (Şekil 5.11). 38 mm çapında 81 mm yüksekliğindeki kalıba hacim kontrollü olarak sıkıştırılan numuneler 1 gün, 7 gün ve 28 gün süreyle, su muhtevasını kaybetmeyecek şekilde sarılarak ve su içine batırılarak, küre bırakılmıştır. Numuneler sırasıyla 100, 200, 300 kPa çevre basıncıyla kırılmıştır. Böylece deney sonunda katkı oranının ve kür süresinin malzemenin kayma dayanımına etkisi araştırılmıştır.



Şekil 5.11. Üç eksenli basınç deneyi için hazırlanan numuneler

Deneyler konsolidasyonsuz-drenajsız üç eksenli basınç deneyi (UU) esasına göre yapılmıştır. Deneyde kesme hızı olarak 0,381 mm/dak belirlenmiştir. Şekil 5.12’de üç eksenli basınç deneyi ekipmanı gösterilmiştir.



Şekil 5.12. Üç eksenli basınç deneyi ekipmanı

5.2.9 XRD ve SEM analizleri

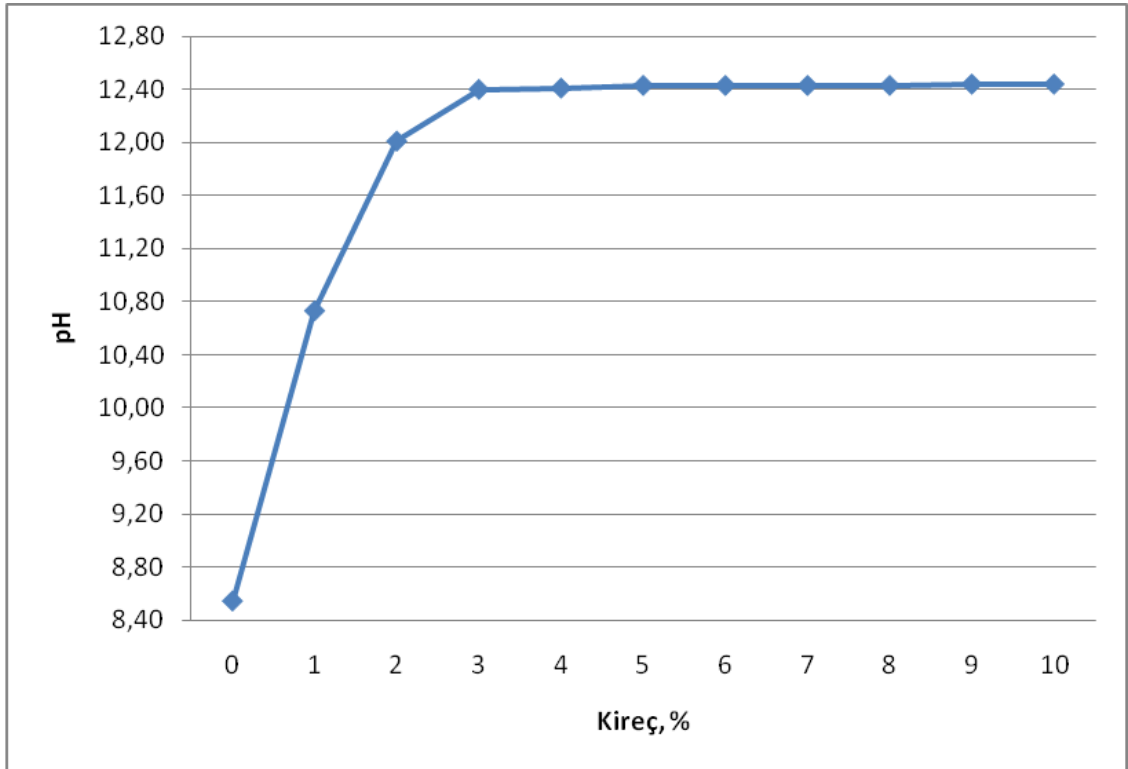
Silis dumanı ve kirecin mikroyapıya etkisini görmek amacıyla numunelere X ışını kırınımı (X-ray diffraction; XRD) ve SEM analizleri yapılmıştır. X ışını kırınımı (XRD) kil kristaline zarar vermeden zeminin mineralojik karakterizasyonunu yapan bir methodur. SEM analizinde elektron mikroskopuyla 100 Å' den daha küçük boyutları görmek mümkündür. SEM aleti ışık mikroskobuna nazaran 20 ila 150000 kez daha fazla büyütür.

BÖLÜM 6

DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

6.1. Eades ve Grim pH Deneyi Sonuçları

Zeminde uzun dönemde mukavemet artışının sağlanması için gereken minimum kireç miktarının bulunması için Eades ve Grim pH Deneyi yapılmıştır. Deney sonucunda elde edilen veriler Şekil 6.1’de verilmiştir. Deney sonucuna göre; kil içerisine % 3 oranında kireç katıldığında pH 12.4 olmaktadır. % 3 ‘den sonra pH değerinde küçük bir miktar daha artış olmaktadır. Ancak pH’ın 12.4 olduğu katkı oranı bizim için yeterlidir. Bundan sonraki deneylerde kireç için % 3 oranı sabit tutularak silis dumanı oranı % 1, % 3, % 5, % 10, % 15, % 20 olarak değiştirilecektir.



Şekil 6.1. Eades ve Grim pH deneyinden elde edilen sonuçlar.

6.2. Kıvam Limiti Deneylerinin Sonuçları

Çalışma kapsamında kil içerisine % 1, % 3, % 5, % 10, % 15, % 20 oranlarında silis dumanı katılarak, silis dumanının, likit limit, plastik limit ve plastisite indisi üzerindeki etkisi gözlenmiştir. Çizelge 6.1’de gösterildiği gibi silis dumanı katkı oranının artmasıyla birlikte likit limit ve plastisite indisinde bir miktar azalma, plastik limitte ise artma meydana gelmiştir. Her bir katkı seviyesi için vuruş sayıları ve su muhtevaları arasındaki ilişki yarı logaritmik bir diyagramdaki doğru şeklinde ekler kısmında verilmiştir.

Çizelge 6.1. Silis dumanı katkısının, kilin kıvam limitine olan etkisi

Katkı Oranı	LL	PL	PI
Katkısız	68,0	33,0	35,0
% 1 SD Katkılı	66,0	34,0	32,0
% 3 SD Katkılı	65,0	34,0	31,0
% 5 SD Katkılı	64,0	35,0	29,0
% 10 SD Katkılı	62,3	36,0	26,3
% 15 SD Katkılı	58,2	36,0	22,2
% 20 SD Katkılı	56,5	36,0	20,5

Bu katkı oranlarına % 3 kireç katılarak da kıvam limitleri deneyi yapılmıştır. Ancak % 3 kireç ilavesi ile zemin işlenebilirliğini kaybetmiştir ve kıvam limiti deneyi yapılmasına imkan vermemiştir. Bundan dolayı kıvam limiti deneylerinde % 3 kireç ilavesi yapılmaksızın deneyler tamamlanmıştır. Ancak bundan sonra yapılan bütün deneylerde her katkı seviyesinde (katkısız numuneler hariç) % 3 kireç ilavesi yapılarak deneyler tamamlanmıştır.

Kil zemine silis dumanı ilavesi ile likit limit ve plastisite indisinde azalma, plastik limitte ise artma meydana gelmektedir. Plastisite indisinde azalma işlenebilirliği artırmaktadır.

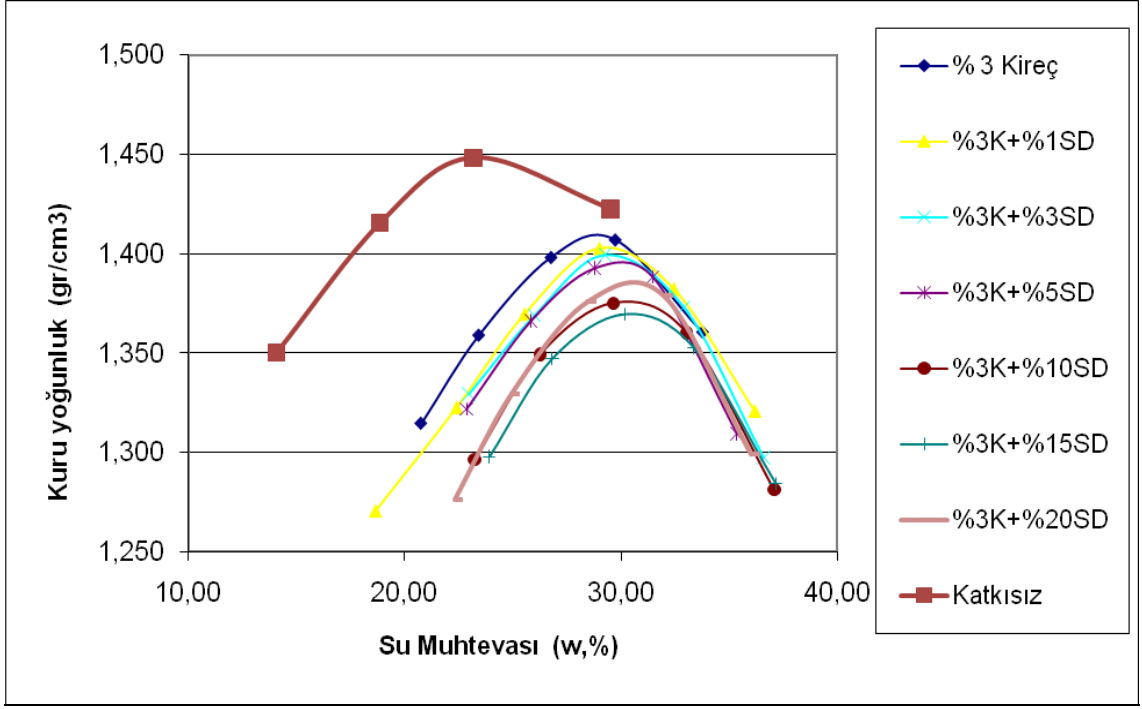
6.3. Kompaksiyon Deneylerinin Sonuçları

Bir gün süreyle kürde bırakılan numunelere standart proktor enerjisi ile yapılan kompaksiyon deneylerinden elde edilen optimum su muhtevası (w_{opt}) ve maksimum kuru yoğunluk değerleri (ρ_{dmaks}) Çizelge 6.2’de gösterilmiştir. Çizelgeden de anlaşıldığı gibi kireç ve silis dumanı ilavesiyle birlikte optimum su muhtevası (w_{opt}) değerleri artış göstermektedir. Maksimum kuru yoğunluk değeri (ρ_{dmaks}) ise düşüş göstermektedir. Ancak kuru yoğunluk artan kompaksiyon enerjisi ile artırılabilir. Şekil 6.2’de katkılı ve katkısız numunelerin kompaksiyon eğrileri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Her katkı oranı için kompaksiyon eğrileri ekler kısmında verilmiştir.

Çizelge 6.2. Elde edilen kompaksiyon parametreleri

Katkı Oranı	$w_{opt}(\%)$	$\rho_{dmaks}(Mg/m^3)$
Katkısız	23,2	1,448
% 3 Kireç Katkılı	28,9	1,410
% 1 SD + % 3 Kireç Katkılı	29,3	1,405
% 3 SD + % 3 Kireç Katkılı	29,5	1,400
% 5 SD + % 3 Kireç Katkılı	30,0	1,397
% 10 SD + % 3 Kireç Katkılı	30,1	1,376
% 15 SD + % 3 Kireç Katkılı	30,6	1,370
% 20 SD + % 3 Kireç Katkılı	30,7	1,386

% 3 kireç oranı sabit tutularak silis dumanı miktarının artmasıyla birlikte optimum su muhtevası (w_{opt}) değerleri artış göstermektedir. Maksimum kuru yoğunluk değeri (ρ_{dmaks}) ise düşüş göstermektedir. Kil numunesine %20 SD + %3 kireç ilavesiyle optimum su muhtevası (w_{opt}) 23,2’den 30,7’ye kadar çıkmıştır. Maksimum kuru yoğunluk değeri (ρ_{dmaks}) ise 1,448’den 1,386’ya düşmüştür.



Şekil 6.2. Katkılı ve katkısız numunelerin kompaksiyon eğrileri

6.4. Elek Analizi Deneylerinin Sonuçları

Daha önceden hazırlanan ve olgunlaşmaya bırakılan malzemelere yapılan elek analizi deneylerinin sonuçları Çizelge 6.3’de verilmiştir.

Çizelge 6.3’den de anlaşıldığı gibi, malzemeye silis dumanı ve kireç ilave edilmesiyle birlikte, karışımdaki kum oranı artmış yani tane boyu büyümüştür. Ancak % 15 ve % 20 silis dumanı ilavesiyle birlikte karışımdaki ince malzeme oranının artmasından dolayı, tane boyunda bir miktar düşüş gözlenmektedir. Fakat % 15 ve % 20 silis dumanı ilavesi ile de katkısız durumdaki tane boyundan daha büyük tane boyu elde edilmiştir.

Malzemeye silis dumanı ve % 3 kireç ilave edilmesiyle ve silis dumanı oranının aşamalı olarak artırılmasıyla birlikte, karışımdaki kum oranı artmış yani tane boyu büyümüştür. Ancak % 15 SD + % 3 kireç ve % 20 + % 3 kireç oranlarında tane boyutunda, % 10 SD + % 3 kireç oranına göre bir düşme gözlenmiştir. Bu durumun

nedeni fazla silis dumanının artık kireç ve kille reaksiyona girememesidir. Bu sonuçtan yola çıkılarak, tane boyu açısından optimum silis dumanı + kireç oranının; % 10 SD + % 3 kireç olduğu görülmüştür.

Çizelge 6.3. Kireç ve silis dumanı katkısının malzeme tane boyutuna olan etkisi

Katkı Oranı	Çakıl (%)	Kum (%)	İnce (%)
Katkısız	0	8	92
% 3 Kireç	0	16	84
% 1 SD + % 3 Kireç Katkılı	0	19	81
% 3 SD + % 3 Kireç Katkılı	0	21	79
% 5 SD + % 3 Kireç Katkılı	0	21	79
% 10 SD + % 3 Kireç Katkılı	0	21	79
% 15 SD + % 3 Kireç Katkılı	0	15	85
% 20 SD + % 3 Kireç Katkılı	0	11	89

6.5. Özgül Gravite Deneilerinin Sonuçları

Daha önceden hazırlanan ve olgunlaşmaya bırakılan malzemelere yapılan özgül gravite deneylerinin sonuçları Çizelge 6.4'de verilmiştir. Çizelge 6.4'den de anlaşılacağı gibi, kireç ve silis dumanı ilavesi malzemenin özgül gravitesini düşürmektedir.

Çizelge 6.4. Kireç ve silis dumanı katkısının malzemenin özgül gravitesine olan etkisi

Katkı Oranı	G_s
Katkısız	2,73
% 3 Kireç	2,68
% 1 SD + % 3 Kireç Katkılı	2,67
% 3 SD + % 3 Kireç Katkılı	2,67
% 5 SD + % 3 Kireç Katkılı	2,67
% 10 SD + % 3 Kireç Katkılı	2,63
% 15 SD + % 3 Kireç Katkılı	2,63
% 20 SD + % 3 Kireç Katkılı	2,63

6.6. Şişme Deneylerinin Sonuçları

6.6.1. Şişme basıncı deneylerinin sonuçları

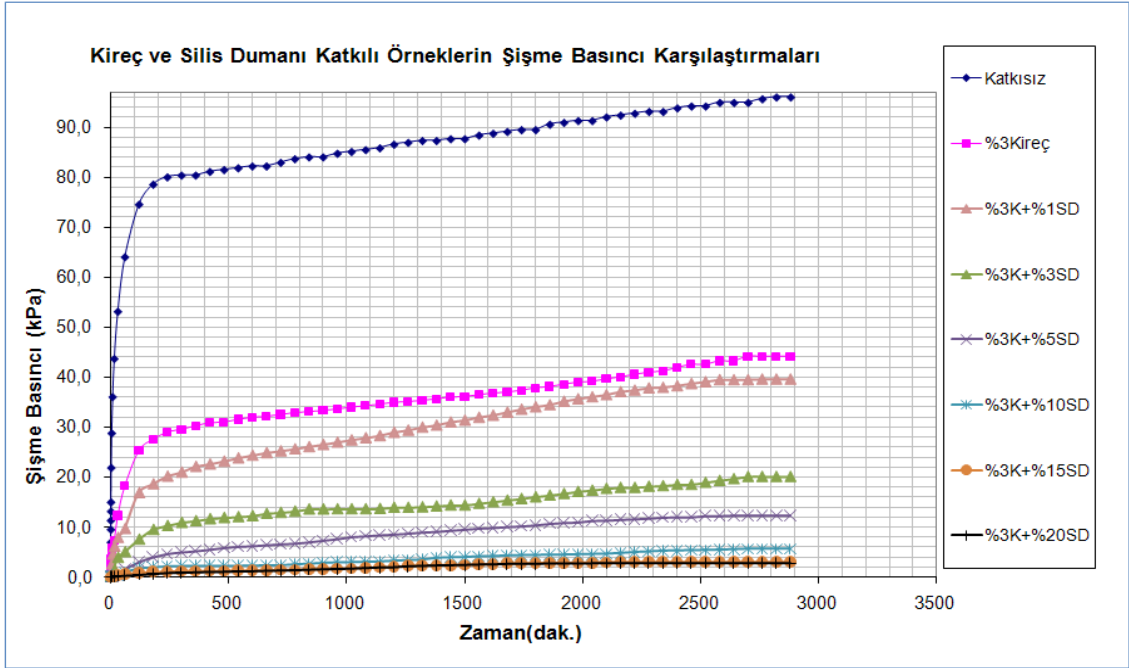
Şişme basıncı deneylerinden elde edilen sonuçlar Çizelge 6.5’de verilmiştir. Çizelge 6.5’den de anlaşıldığı gibi katkı miktarının artışı ile birlikte şişme basıncı değerlerinde belirgin bir düşme görülmektedir. Bu da silis dumanı ve kirecin birlikte kullanımının kil zeminlerin şişme basıncı üzerindeki iyileştirme etkisini göstermektedir.

Şekil 6. 3’de kireç ve silis dumanı katkılı numunelerin karşılaştırmalı şişme basıncı – zaman eğrileri, Şekil 6. 4’de kireç ve silis dumanı katkısının malzemenin şişme basıncı değerine etkisi gösterilmektedir.

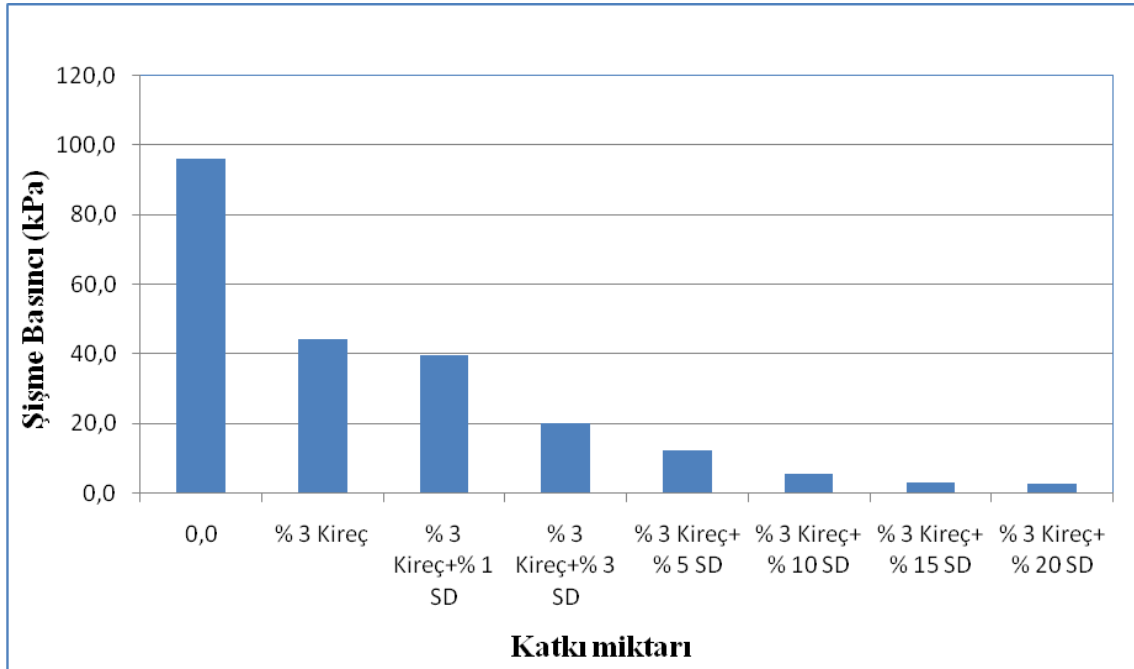
Silis dumanı miktarının artışıyla birlikte şişme basıncı değerlerinde belirgin bir düşme görülmektedir. Bu düşüş silis dumanı oranının artmasıyla birlikte sürekli olarak devam etmektedir. Ancak % 15 SD + % 3 kireç ve % 20 SD + % 3 kireç katkı oranlarındaki şişme basıncında belirlenen düşüş ihmal edilebilecek bir düzeye gelmiştir. % 10 silis dumanı + % 3 kireç katkı oranında şişme basıncı değeri katkısız nazarın yaklaşık olarak % 95 azalmıştır. Buna göre şişme basıncı açısından % 10 silis dumanı + % 3 kireç ilavesi yeterlidir.

Çizelge 6.5. Kireç ve silis dumanı katkısının malzemenin şişme basıncı değerlerine etkisi

Katkı Yüzdesi (%)	Şişme Basıncı (kPa)
Katkısız	96,039
% 3 Kireç	44,174
% 3 Kireç+% 1 SD	39,652
% 3 Kireç+% 3 SD	20,050
% 3 Kireç+ % 5 SD	12,395
% 3 Kireç+ % 10 SD	5,652
% 3 Kireç+ % 15 SD	3,015
% 3 Kireç+ % 20 SD	2,752



Şekil 6.3. Kireç ve SD katkıli numunelerin karşılaştırmalı şişme basıncı-zaman eğrileri.



Şekil 6. 4. Kireç ve silis dumanı katkısının malzemenin şişme basıncı değerine etkisi

6.6.2. Şişme yüzdesi deneylerinin sonuçları

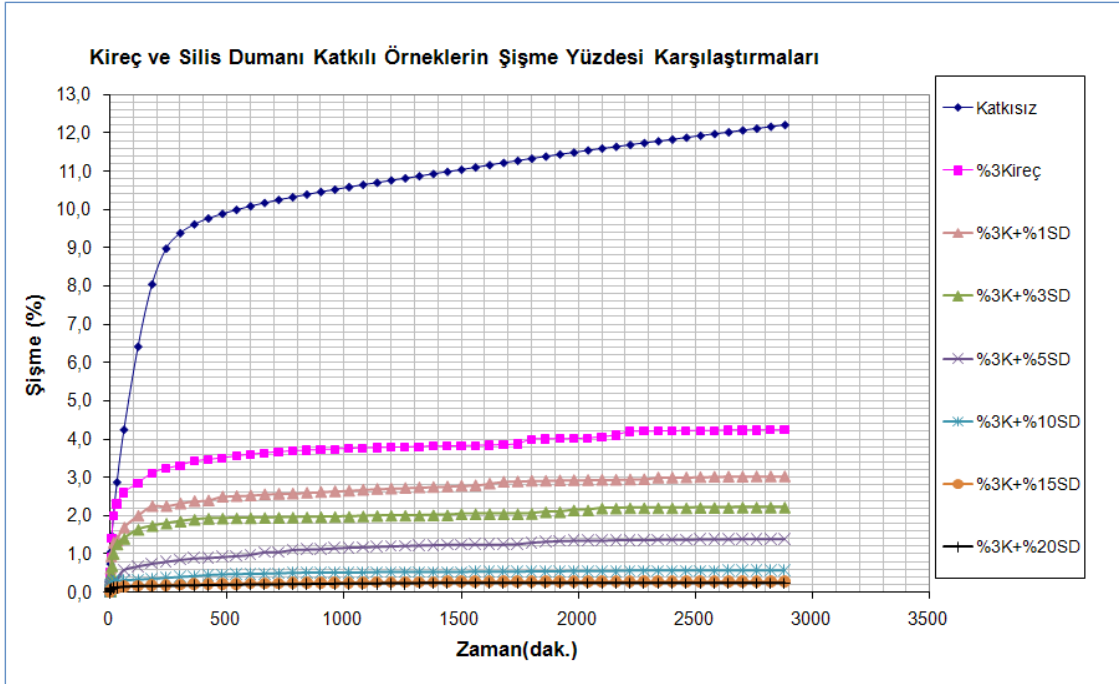
Şişme yüzdesi deneylerinden elde edilen sonuçlar Çizelge 5.6'da verilmiştir. Çizelge 6.6'dan da anlaşıldığı gibi katkı miktarının artışı ile birlikte şişme yüzdesi değerlerinde belirgin bir düşme görülmektedir. Bu da silis dumanı ve kirecin birlikte kullanımının kil zeminlerin şişme yüzdesi üzerindeki iyileştirme etkisini göstermektedir.

Şekil 6. 5'de kireç ve silis dumanı katkılı numunelerin karşılaştırmalı şişme yüzdesi – zaman eğrileri, Şekil 6. 6'da kireç ve silis dumanı katkısının malzemenin şişme yüzdesi değerine etkisi gösterilmektedir.

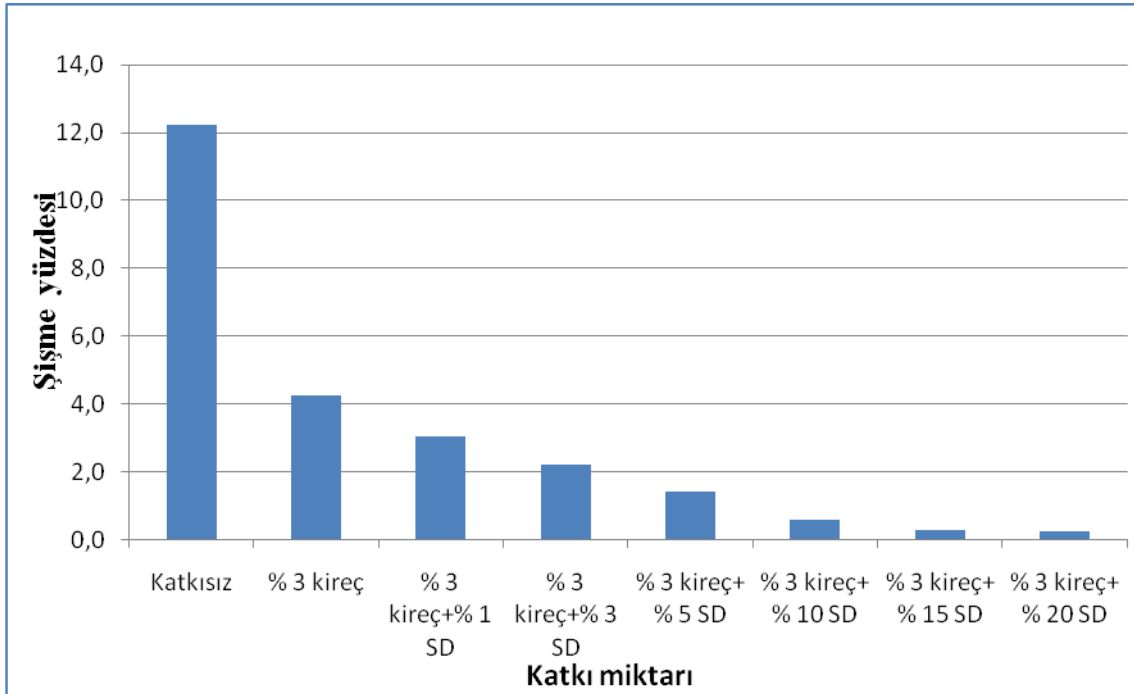
Silis dumanı miktarının artışıyla birlikte şişme yüzdesi değerlerinde belirgin bir düşme görülmektedir. Şişme yüzdesi deneylerinden elde edilen veriler de şişme basıncı deneylerinden elde edilen verilerle paralellik göstermektedir. Yine % 10 SD + % 3 kireç ilavesinde şişme yüzdesi değeri yaklaşık % 95 civarında azalmaktadır. Buna göre şişme yüzdesi açısından % 10 silis dumanı + % 3 kireç ilavesi yeterlidir.

Çizelge 6.6. Kireç ve silis dumanı katkısının malzemenin şişme yüzdesi değerlerine etkisi

Katkı Yüzdesi (%)	Şişme Yüzdesi (%)
Katkısız	12,220
% 3 kireç	4,235
% 3 kireç+% 1 SD	3,030
% 3 kireç+% 3 SD	2,225
% 3 kireç+ % 5 SD	1,395
% 3 kireç+ % 10 SD	0,565
% 3 kireç+ % 15 SD	0,275
% 3 kireç+ % 20 SD	0,235



Şekil 6.5. Kireç ve SD katkıli numunelerin karşılaştırmalı şişme yüzdesi-zaman eğrileri.



Şekil 6. 6. Kireç ve silis dumanı katkısının malzemenin şişme yüzdesi değerine etkisi

6.7. Dispersiyon Deneilerinin Sonuçları

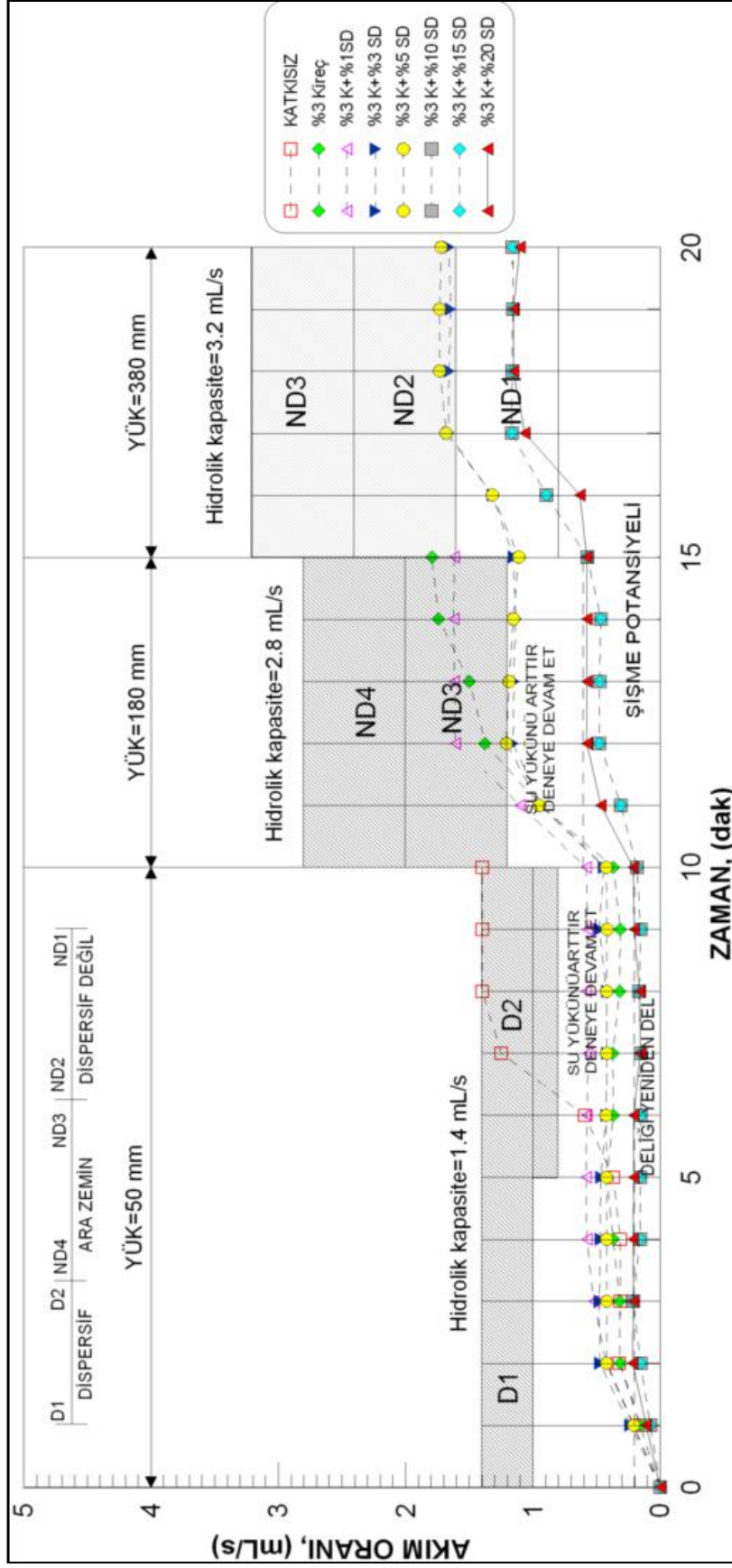
6.7.1. Dağılma deneyi sonuçları

Dağılma deneyi sonuçları Şekil 6. 8’de toplu olarak verilmiştir. Resimlerden de anlaşılacağı gibi silis dumanı ve kireç katkısının bulutlanmayı azalttığı görülmektedir, yani dispersibilite azalmaktadır. Katkısız zemin numunesinde koloidal bulutlanma gözükmemektedir, yani dispersiftir. % 3 kireç ilavesiyle birlikte koloidal bulutlanma azalmaktadır. Zemin ara zemin sınıfına geçmiştir. % 3 kireçle birlikte artan oranlarda silis dumanı ilavesiyle birlikte koloidal bulutlanma neredeyse tamamen yok olmaktadır. Ancak %15 SD + %3 kireç ve %20 SD + %3 kireç katkısı oranlarında silis dumanının suya rengini vermesi % 10 oranından daha fazla silis dumanı katkısının zeminle bağlanamadığını göstermektedir. Bu da dağılma deneyleri açısından değerlendirildiğinde % 10 SD + % 3 kireç katkısı oranının dispersiyonu azaltma açısından yeterli olduğunu göstermektedir.

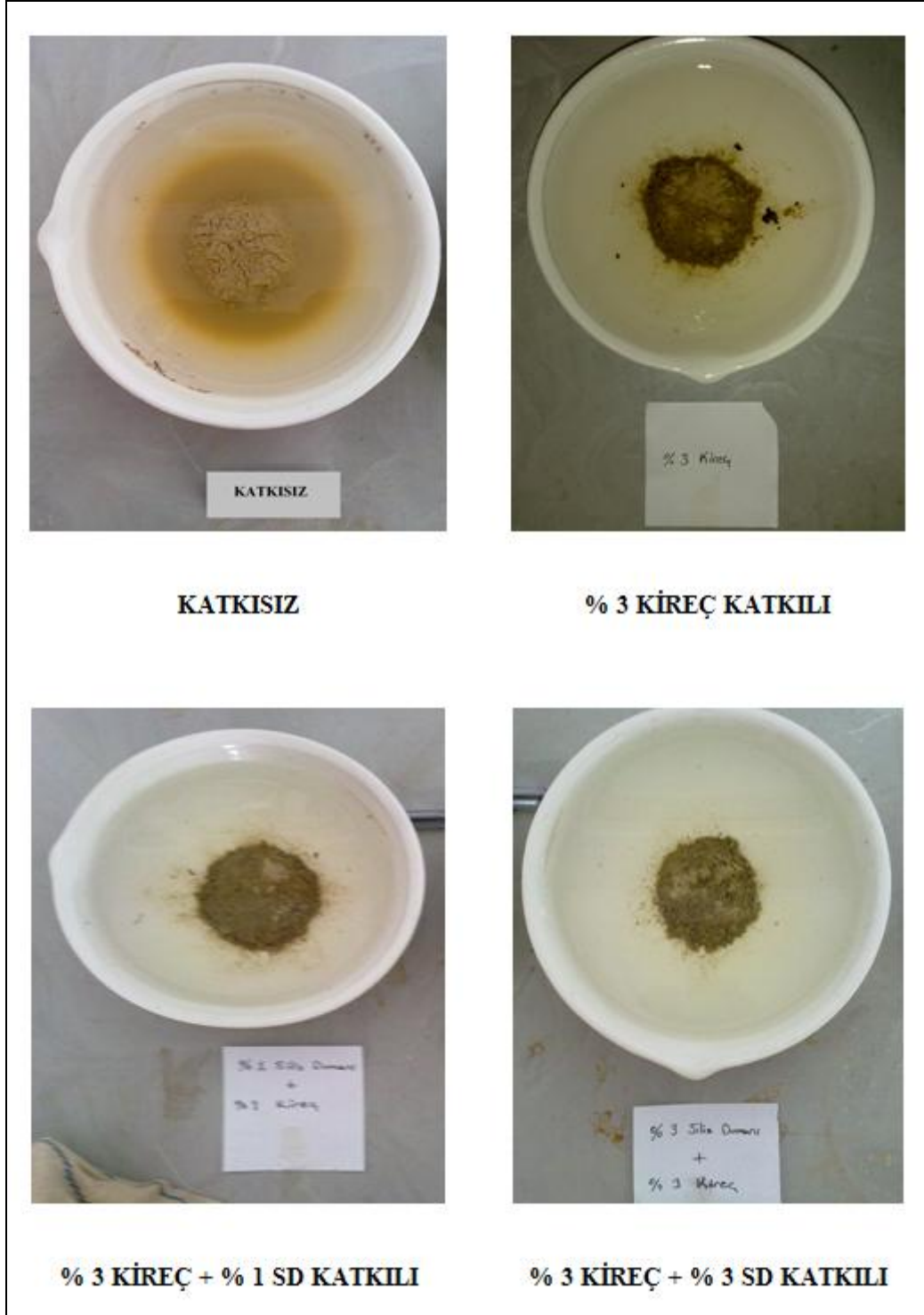
6.7.2. İğne deliği deneyi sonuçları

İğne deliği deneyi sonuçları Şekil 6.7’ da verilmiştir. Buna göre katkısız zemin D2 (dispersif), % 3 kireç katkılı ve % 3 Kireç + % 1 silis dumanı katkılı zemin ND3 (ara zemin), % 3 kireç + % 3 silis dumanı katkılı ve % 3 Kireç + % 5 silis dumanı katkılı zemin ND2 (dispersif değil), % 3 kireç + % 10 silis dumanı katkılı, % 3 kireç + % 15 silis dumanı katkılı ve % 3 Kireç + % 20 silis dumanı katkılı zemin ise ND1 (dispersif değil) sınıfına girmiştir. Yani %3 kireç ilavesiyle birlikte silis dumanı katkısı dispersibiliteyi azaltmaktadır. Ayrıca iğne deliği ve dağılma deneylerinin sonuçları birbirini doğrulamaktadır.

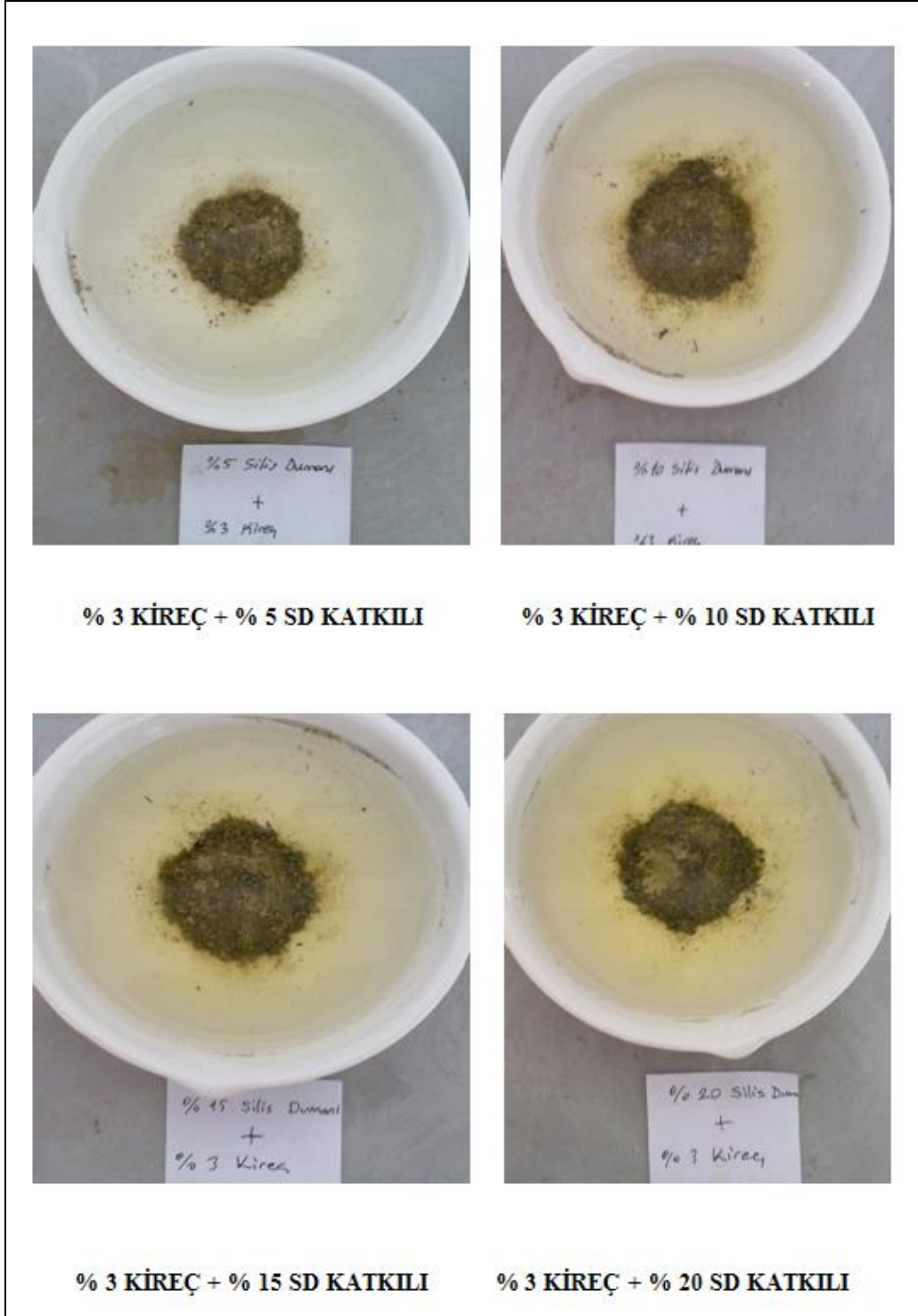
Dağılma ve iğne deliği deneyleri sonuçları ortak olarak yorumlanırsa kireç ve silis dumanı ilavesi dispersibiliteyi düşürmektedir. % 10 silis dumanı + % 3 kireç ilavesi dispersibiliteyi azaltma açısından bakıldığında yeterlidir.



Şekil 6.7 İğne deliği deneylerinin toplu sonuçları



Şekil 6. 8. Dağılma deneyi sonuçları



Şekil 6. 8'in devamı

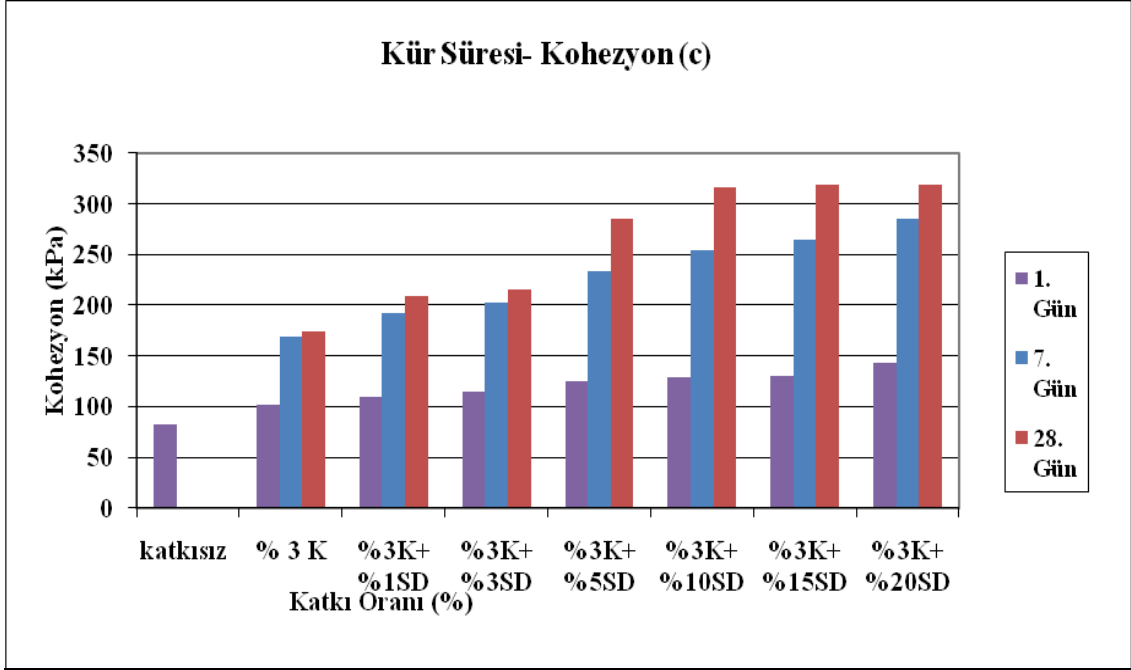
6.8. Üç Eksenli Basınç Deneyi Sonuçları

Katkısız ve katkılı, 1 gün, 7gün ve 28 gün kürde bekletilen numunelere sırasıyla 100 kPa, 200 kPa, 300 kPa çevre basınçları altında yapılan üç eksenli basınç deneyinden elde edilen kayma parametreleri Çizelge 6.7.'de verilmiştir. Çizelge 6.7'den de anlaşılacağı gibi kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısı (\emptyset) değerleri katkı oranı ve kür süresi arttıkça artmaktadır. Bu da artan katkı miktarı ve kür süresinin mukavemet üzerindeki pozitif etkisini göstermektedir. Kür süresinin kohezyona ve içsel sürtünme açısına etkisi Şekil 6.9 ve Şekil 6.10'da verilmiştir. Deneylerden elde edilen kırılma zarfları ekler kısmında verilmiştir.

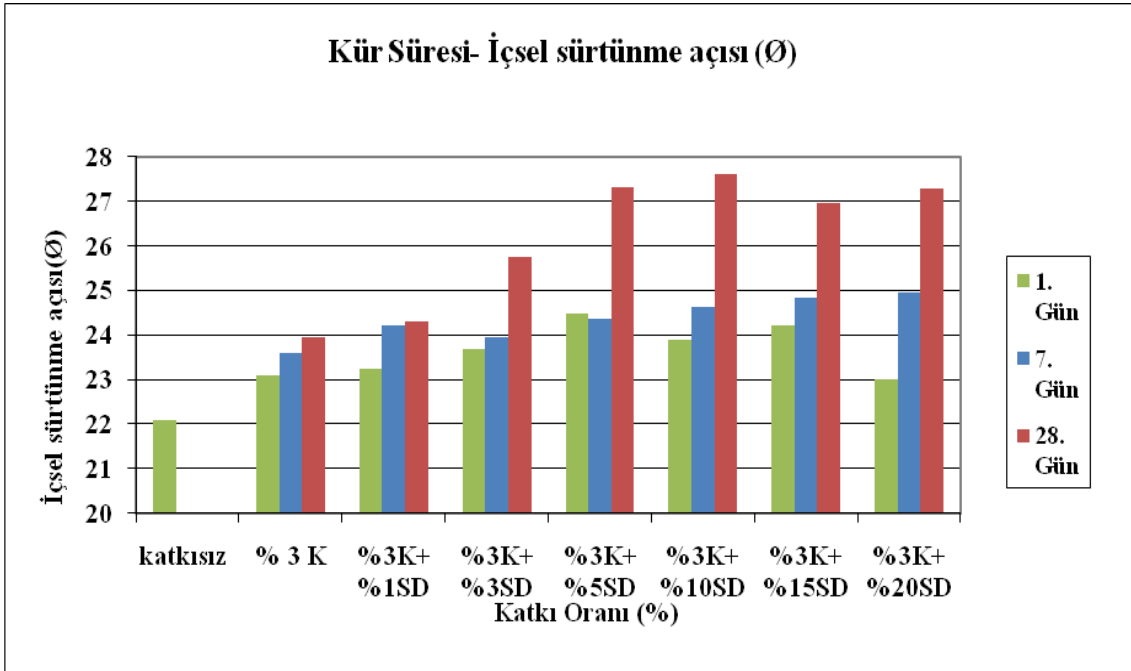
Yapılan üç eksenli basınç deneylerinden elde edilen veriler, kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısı (\emptyset) değerlerinin %3 kireçle birlikte artan silis dumanı oranı ve kür süresi ile birlikte arttığını göstermektedir. % 10 silis dumanı + % 3 kireç ilavesi dayanım açısından bakıldığında yeterlidir.

Çizelge 6.7. Katkı miktarı ve kür süresinin kayma parametrelerine olan etkisi

Katkı Oranı	1 gün		7 gün		28 gün	
	c(kPa)	\emptyset (°)	c(kPa)	\emptyset (°)	c(kPa)	\emptyset (°)
Katkısız zemin	81,67	22,10	-	-	-	-
% 3 Kireç	101,36	23,10	169,24	23,60	183,35	23,95
% 3 Kireç+ %1 Silis dumanı	110,00	23,23	191,40	24,20	209,39	24,29
% 3 Kireç+ %3 Silis dumanı	114,95	23,68	202,16	23,95	214,80	25,76
% 3 Kireç+ %5 Silis dumanı	125,30	24,49	233,94	24,37	285,32	27,31
% 3 Kireç+ %10 Silis dumanı	128,20	23,89	253,89	24,64	315,99	27,61
% 3 Kireç+ %15 Silis dumanı	129,77	24,21	264,37	24,82	318,56	26,95
% 3 Kireç+ %20 Silis dumanı	142,58	22,99	285,57	24,96	319,05	27,27



Şekil 6.9. Kür süresinin kohezyona (c) etkisi

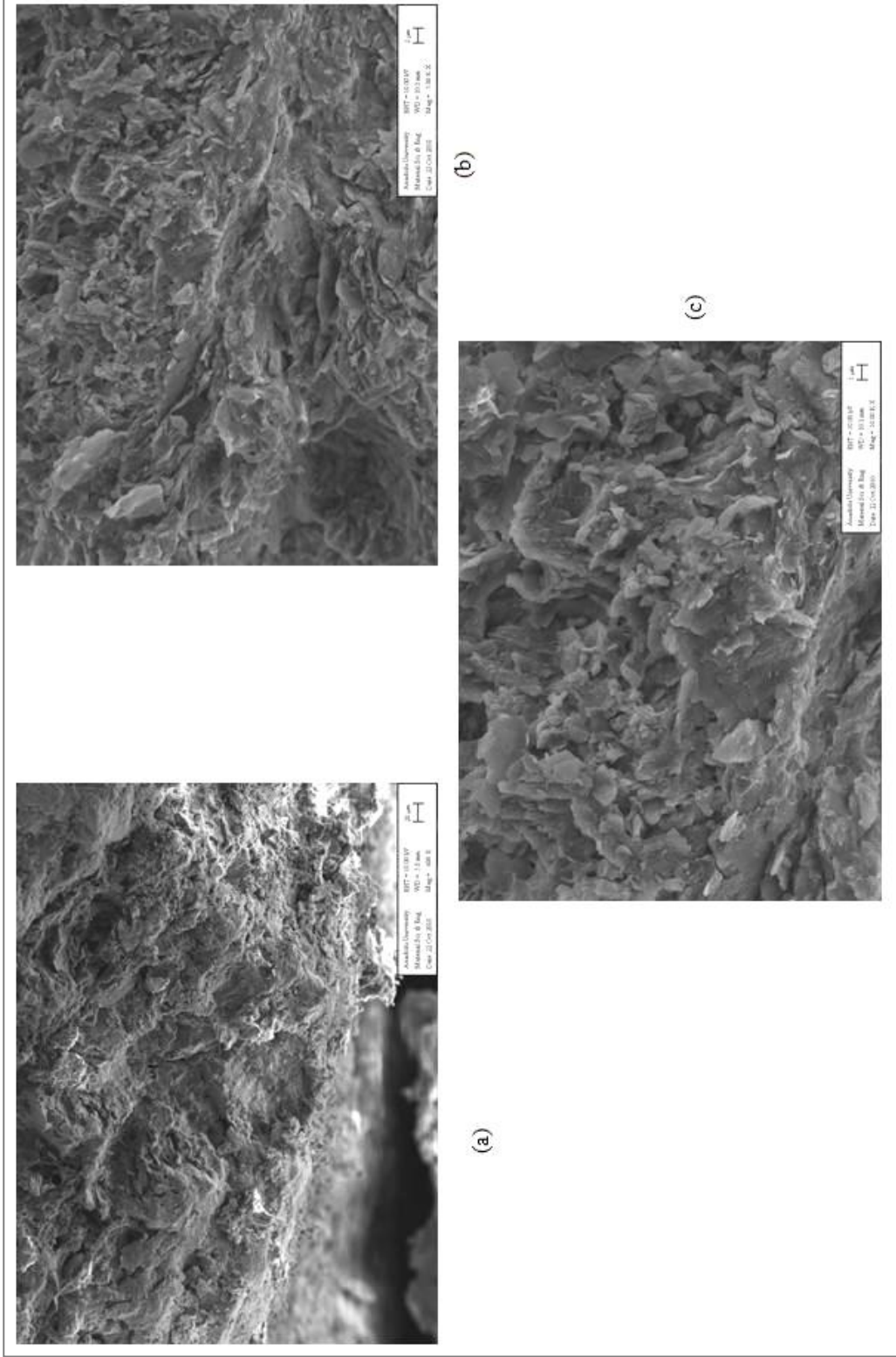
Şekil 6.10. Kür süresinin içsel sürtünme açısına (ϕ) etkisi

6.9 Taramalı Elektron Mikroskop Analizleri (SEM)

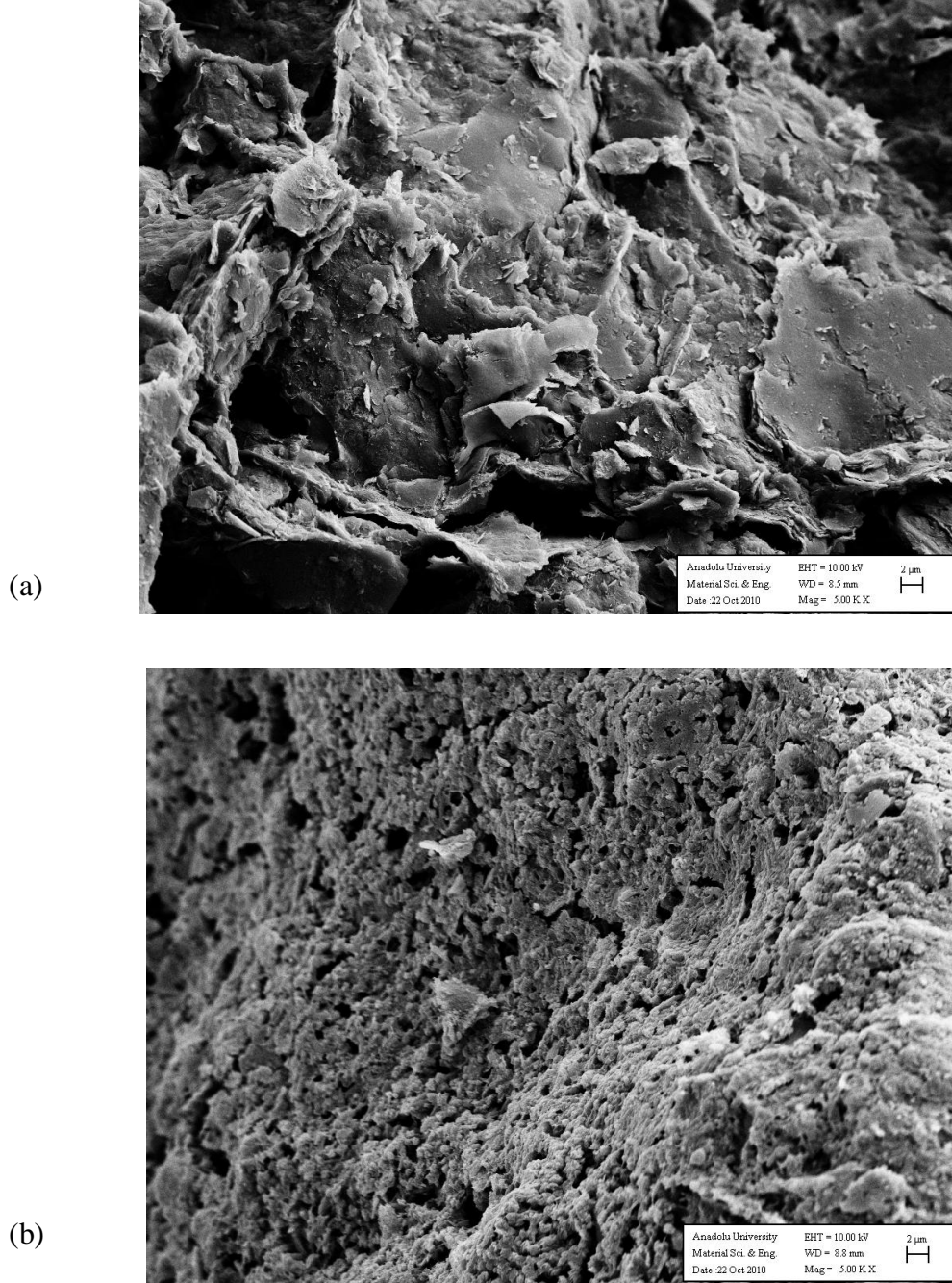
Çalışmada kullanılan dispersif ve şişme özelliği gösteren problemlili zemin numunesi farklı yüzdelerde eklenen kireç ve silis dumanı ile iyileştirilmeye çalışılmış ve katkılarının şişme, dispersibilite ve dayanım üzerindeki etkileri ayrı ayrı mühendislik parametreleri esasında değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmelere ilaveten, bu katkıların yapıda oluşturduğu değişikliği değerlendirmek için katkısız, katkısız numunenin kuru ağırlığınca eklenen %3 kireç ve optimum stabilizasyonun sağlandığı %3 kireç+ %10 silis dumanı katkılı numunelerin SEM analizleri yapılmıştır. Analizlerde Anadolu Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümünde bulunan ZEISS marka SUPRA 50 VP model Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılmıştır

Analizlerden elde edilen görüntüler; katkısız, %3 kireç katkılı ve %3 kireç+%10 silis dumanı katkıları için sırasıyla Şekil 6.11, Şekil 6.12, Şekil 6.13 ve Şekil 6. 14'de verilmektedir. Şekil katkısız numune açısından değerlendirildiğinde daha dağınık ve yoğun bir yapı gözükmektedir. %3 kireç katkı seviyesinde elde edilen Şekil 6.12 değerlendirildiğinde daha kümeleşmiş ve boşluklu bir yapı gözükmektedir. Kireç ile karıştırılan zeminin mühendislik özelliklerinde oluşacak değişimlerde etkili mekanizmalar; kation değişimi, kilin flokülasyonu ve puzolanik reaksiyonlar neticesinde daha gevrek bir yapı görünümü gözlemlenmiştir. Ayrıca Şekil 6.12.a ve 6.12.b ye dikkatli bakıldığında iki resim aynı büyütme oranlarından elde edilmiş olmasına rağmen farklılık göstermektedir. Bunun nedeni SEM analizlerinin iğne deliği deneylerinden arta kalan numunelerden yapılmasıdır. Şekil 6.12.b'de numunenin delik kısmına yakın bölgeden SEM analizi alınmıştır ve dispersif yapı gözlenmektedir.

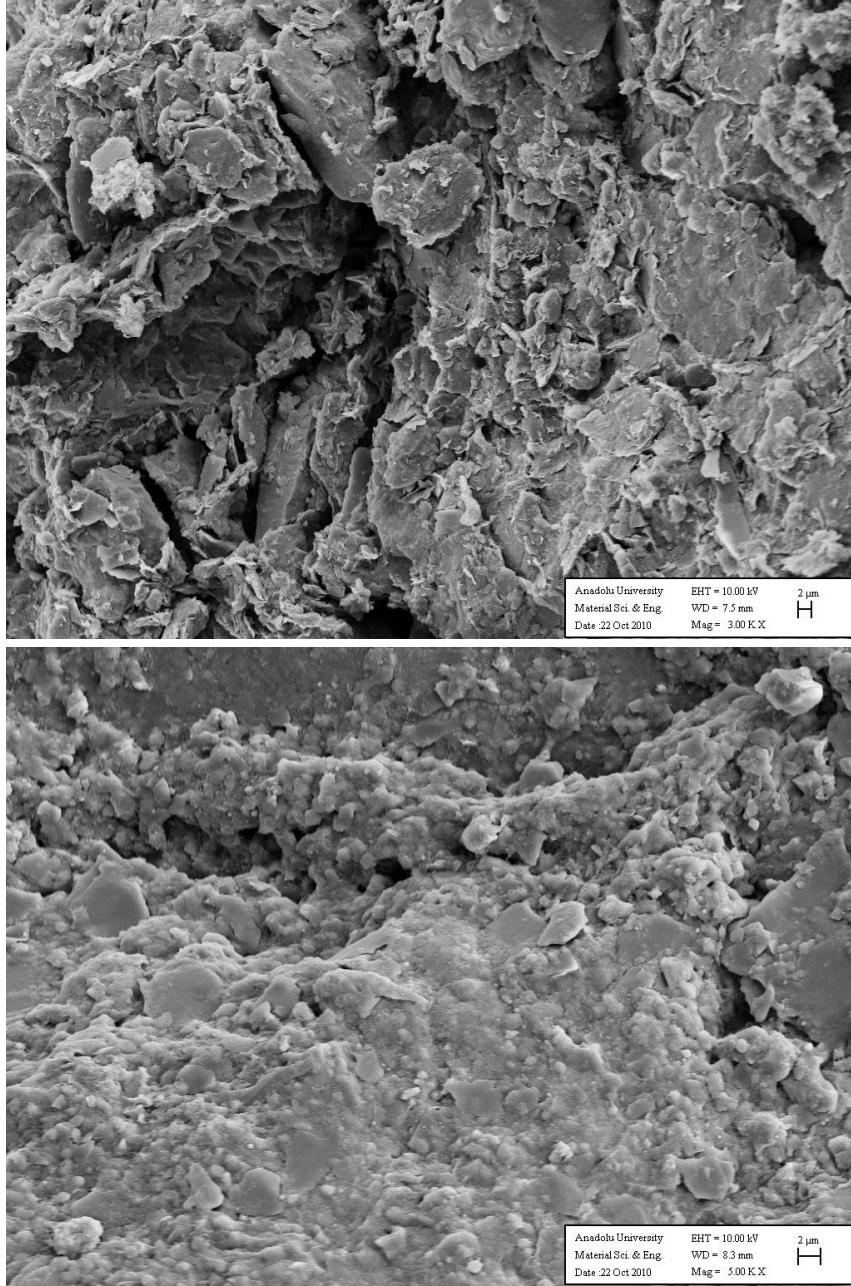
%3 kireç katkısına ilaveten kullanılan ve optimum stabilizasyonun sağlandığı %10 silis dumanı katkılı numunenin SEM analiz sonuçları incelendiğinde (Şekil 6.14) zemin yapısının irileşerek topaklanma (aglomerasyon) neticesinde tane boyutunun arttığı ve buna bağlı olarak daha boşluklu bir yapı oluştuğu görülmüştür. Artan yapı bütünlüğüne ve boyutuna bağlı olarak da dayanım deneylerinde %3 kireç katkısına oranla %3kireç+%10 silis dumanı katkılı serilerde daha yüksek değerler ortaya çıkmıştır.



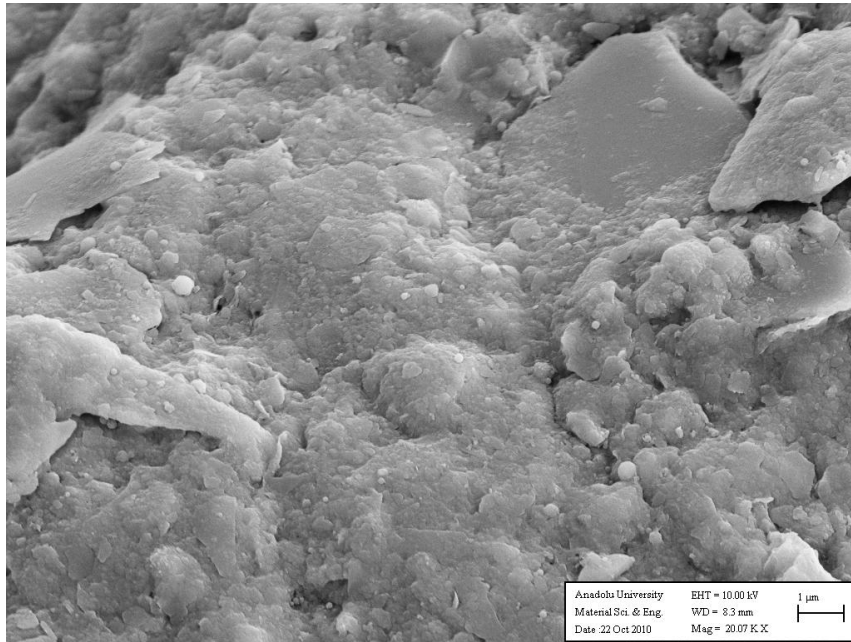
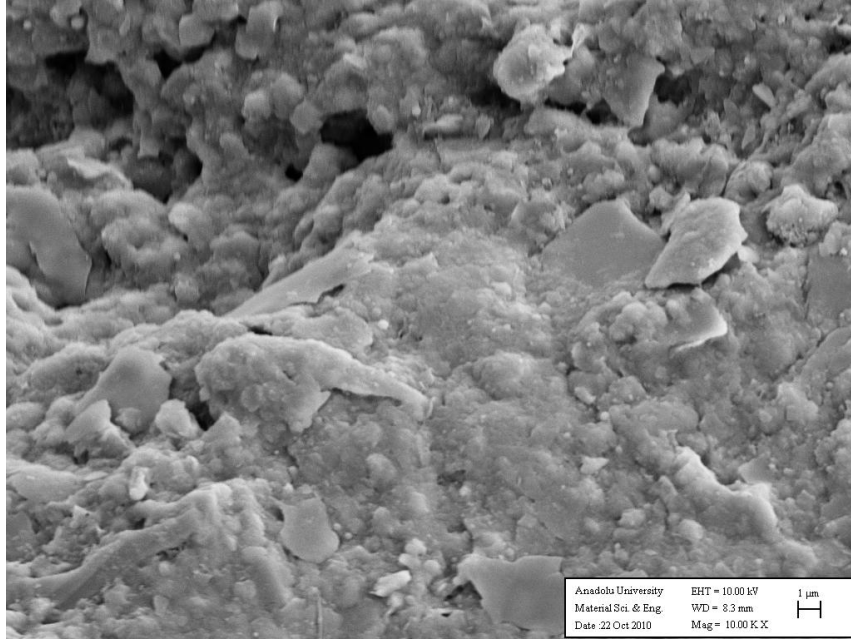
Şekil 6.11 11 Katkısız numunenin SEM analizi sonuçları a) 600 kat, b) 5000 kat, c) 10000 kat



Şekil 6.12. %3 kireç katkılı numunenin farklı noktalardan elde edilen 5000 büyütmeli SEM analiz sonuçları



Şekil 6.13. %3 kireç ve %10 Silis katkılı numunenin farklı noktalarından elde edilen SEM analiz sonuçları



Şekil 6.14. %3 kireç ve %10 Silis katkılı numunenin farklı noktalarından elde edilen ve farklı büyütme oranlarındaki SEM analiz sonuçları

BÖLÜM 7

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Kil zeminlerin iyileştirilmesinde en çok kullanılan yöntemlerden birisi kimyasal katkıları kullanılarak yapılan stabilizasyondur. Problemlili kile uygun oranlarda ilave edilen kireç, çimento, uçucu kül vs. ile şişme basınçlarında düşüş ve mukavemet değerlerinde artış sağlanmaktadır.

Bu tez kapsamında da Afyon'dan alınan, yüksek şişme potansiyeline ve dispersif özelliğe sahip bir kil üzerinde % 3 kireç ve çeşitli silis dumanı katkı seviyelerinde, sırasıyla Eades ve Grim pH deneyi, kıvam limiti, kompaksiyon, elek analizi, özgül gravite, şişme basıncı ve şişme yüzdesi, dağılıma deneyi, iğne deliği deneyi, üç eksenli basınç deneyi ve son olarakda XRD ve SEM deneyleri tatbik edilmiştir. Bu araştırma sonucunda aşağıda özetlenen sonuçlara ulaşılmıştır.

- i. Kil zemine silis dumanı ilavesi ile likit limit ve plastisite indisinde azalma, plastik limitte ise artma meydana gelmektedir. Plastisite indisinde azalma işlenebilirliği artırmaktadır.
- ii. % 3 kireç oranı sabit tutularak silis dumanı miktarının artmasıyla birlikte optimum su muhtevası (w_{opt}) değerleri artış göstermektedir. Maksimum kuru yoğunluk değeri (ρ_{dmaks}) ise düşüş göstermektedir.
- iii. Malzemeye silis dumanı ve % 3 kireç ilave edilmesiyle ve silis dumanı oranının aşamalı olarak artırılmasıyla birlikte, karışımdaki ince malzeme muhtevasında azalma görülmüştür. Ancak % 15 SD + % 3 kireç ve % 20 SD + % 3 kireç oranlarında tane boyutunda, % 10 SD + % 3 kireç oranına göre bir düşme gözlenmiştir. Bu durumun nedeni fazla silis dumanının artık kireç ve kille reaksiyona girememesidir. Bu sonuçtan yola çıkılarak, tane boyu açısından optimum silis dumanı + kireç oranının; % 10 SD + % 3 kireç olduğu görülmüştür.

- iv. Silis dumanı miktarının artışıyla birlikte şişme basıncı değerlerinde belirgin bir düşme görülmektedir. Bu düşüş silis dumanı oranının artmasıyla birlikte sürekli olarak devam etmektedir. Ancak % 15 SD + % 3 kireç ve % 20 SD + % 3 kireç katkı oranlarındaki şişme basıncında katkı miktarının artışıyla orantılı beklenen azalma gözlenmemiştir. % 10 silis dumanı + % 3 kireç katkı oranında şişme basıncı değeri katkısız nazaran yaklaşık olarak % 95 azalmıştır. Buna göre şişme basıncı açısından % 10 silis dumanı + % 3 kireç ilavesinde optimum stabilizasyon gözlenmiştir.
- v. Silis dumanı miktarının artışıyla birlikte şişme yüzdesi değerlerinde belirgin bir düşme görülmektedir. Şişme yüzdesi deneylerinden elde edilen veriler de şişme basıncı deneylerinden elde edilen verilerle paralellik göstermektedir. Yine % 10 SD + % 3 kireç katkı seviyesinde şişme yüzdesi değeri yaklaşık % 95 oranında düşüş göstermektedir.
- vi. Dispersif özelliğin belirlenmesinde kullanılan dağılma ve iğne deliği deneyleri sonuçlarından anlaşıldığı gibi kireç ve silis dumanı ilavesi dispersif özelliği iyileştirmektedir. Özellikle % 10 silis dumanı + % 3 kireç ilavesinde zemin dispersif olmayan özellik sergilemiştir.
- vii. Yapılan üç eksenli basınç deneylerinden elde edilen veriler, kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısı (ϕ) değerlerinin %3 kireç ve artan silis dumanı oranı ve kür süresi ile birlikte arttığını göstermektedir. Bu da artan katkı miktarı ve kür süresinin dayanım üzerindeki pozitif etkisini göstermektedir. % 10 SD + % 3 kireç katkısı dayanım açısından bakıldığında optimum seviyedir.
- viii. %3 kireç katkısına ilaveten kullanılan ve optimum stabilizasyonun sağlandığı %10 silis dumanı katkılı numunenin SEM analiz sonuçları incelendiğinde zemin yapısının irileşerek topaklanma (aglomerasyon) neticesinde tane boyutunun arttığı ve buna bağlı olarak daha boşluklu bir

yapı oluştuğu grlmştir. Artan yapı bütünlüğüne ve boyutuna bağlı olarak da dayanım deneylerinde %3 kireç katkısına oranla %3kire+%10 SD katkılı serilerde daha yüksek değerler ortaya çıkmıştır.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- AASHTO T193, 1993. The California Bearing Ratio. AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- Amman, L., 2003, Cation Exchange and Adsorption on Clays and Clay Minerals, Submitted for the Degree Dr. rer. Nat. of Faculty Mathematics and Natural Sciences, Cristian-Albrechts, Universitat Kiel, Germany.
- ASTM C 618, 1991, specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete, ASTM.
- ASTM D 2850 - 03a(2007) Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils, ASTM
- ASTM D 4829, 1988, Standard Test Method For Expansion Index Of Soils, Annual Book of ASTM Standards, 04.08.
- ASTM D6276 - 99a(2006)e1 Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization, ASTM
- Aydın, M. C., Aydın, S., 2006, Dispersif Killerin Dolgu Baraj Yapımı Açısından Önemi, Kil Bilimi ve Teknolojisi Dergisi, s. 49-54.
- Bell, F. G. and Walker, D.J., 2000, A further examination of the nature of dispersive soils in Natal, South Africa, Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, V.33, p.187-1999.
- Chen, F.H., 1988, Foundation of expansive soils, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- Demir, A., 2005, Silis dumanı içeren betonların hızlandırılmış kür ile dayanım tahmini, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, s. 105
- Dontsova K.M., Norton, L.D., Johnston, C.T., Bigham, J.M., 2004. Influence of Exchangeable Cations on Water Adsorption by Soil Clays, Soil Sci. Soc. Am. J., 68, p. 1218-1227.
- Forbes, P.J., Chase, A.S. and Birrell, J. (1980) Control of dispersion in the Mnjoli Dam, Water Power Dam Construction, 32(12), p.23- 28.
- Garaisayev, S., 2008, Şişen zeminlerin kimyasal yöntemlerle stabilizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, s. 188

- Grant, K., Ingles, O.G., Lawrence, I.A. and Sommerville, P. J. 1977 Protecting a dispersive soil storage by water treatment, *Dispersive Clays, Related Piping and Erosion in Geotechnical Projects*, ASTM, STP 623, p.202-217.
- Grim, R.E., 1959, Physico-Chemical Properties of Soils: Clay Minerals, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol.85, No. SM2, p. 1-17.
- Gromko, G. J., 1974, Review of Expansive Soils, *Journal of The Geotechnical engineering Division, ASCE*, Vol.10, p. 667-687
- Gündüz, O., 2008, Şişen Zeminlerin Tinkal Atığı ile Stabilizasyonu ve Meşelik killerine uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, s.73.
- Hausmann, M.R., 1990, *Engineering Principles of Ground Modification*, McGraw- Hill Publishing Company.
- Holtz, R. D. and Kovacs, W. D., 1981, *An introduction too geotechnical engineering*, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., p. 67-78.
- Ingles, O.G., 1968, *Soil Chemistry Relevant to the Engineering Behaviour of Soils. Soil Mechanics Selected Topics*, Elsevier, NewYork , p. 1-57.
- Ingles, O.G., 1972, Discussion of dispersive clay papers, *Proceedings, Speciality Conference on the Performance of Earth and Earth Supported Structures, ASCE*, p.111-117.
- Keskin, S.N., Yıldırım, H., Ansal, M.A., 1992. Killi zeminlerde yanal şişme davranışları, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 4. Ulusal Kongresi*, İstanbul, s. 14-30.
- Landau, H.G., and Altschaeffl, A.G., 1977, Conditions Causing Piping in Compacted Clay, *Dispersive Clays, Related Piping and Erosion in Geotechnical Projets*, ASTM, STP 623, p. 240-259.
- Little, D.N., 1995, *Handbook for Stabilization Pavement Subgrades and Base Courses with Lime*, Kendall/Hunt Publishing Company.
- Logani, K.L. (1979) Dispersive Soil Chosen for Ullum Core, *World Water*, 2(8), p. 21-32.
- McBride, M.B. 1989. Surface chemistry of soil minerals, *Minerals in soil environments*, 2nd ed, Soil Sci. Soc. Am. Book Ser, No. 1, Madison, p. 35- 88.
- Nelson, J. D. and Miller, J.D., 1992, *Expansive Soils Problems and Practice in foundation and Pavement Engineering*, J. Willey and Sons, New York, p. 259

- Özüdoğru, K., Tan, O., Aksoy, İ.H., 2001, Çözümlü Problemlerle Zemin Mekaniği, Birsen Yayinevi, İstanbul, s. 20-21.
- Papworth, H.F., 1997, Production of Silica Fume, M.I.E. (Australia) Civil Engineering.
- Penner, D. and Lagaly, G., 2001, Influence of anions on the rheological properties of clay mineral dispersions, Applied Clay Science, V.19, p.131-142.
- Ryker, N.L., 1977, Encountering dispersive clays on soil conservation service projects in Oklohoma, ASTM STP 625, p.370-389.
- Savaş, H., 2000, Toprak Dolgu Barajlarda Kullanılan Yüksek Plastisiteli Killerin Dispersibilite Özelliğinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 97s.
- Savaş, H., 2008, Dolgu Barajlar İçin Dispersif Killerin Tanımlanmasında Kullanılan İğne Deliği Deneyindeki Gelişmeler ve Karşılaştırmalı Analiz, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 212s.
- Seed, H.B., Woodward, R.J., and Lundgren, R., 1962, Prediction of swelling potential for compacted clays, Journal of Soil Mechanics and Foundation Dis., ASCE, Vol.88, No.3, p.53-87.
- Sharma, R.S., 1998. Mechanical behaviour of unsaturated highly expansive clays, PhD Disertation, University of Oxford, UK.
- Sherard, J.L., Decker, R.S. and Ryker, N.L., 1972, Piping in earth dams of dispersive clay, Proceeding Specialty Conference on Performance of Earth and Earth Supported Structures, ASCE, V.1, p. 589-626.
- Sherard, J.L., Dunnigan, L.P. and Decker, R.S., 1976, Identification and nature of dispersive soils, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol:102, n.GT2, p. 287-301.
- Shi, B., Jianh, H., Liu, Z., Fang, H. Y., 2002, Engineering Geological Characteristics of Expansive Soils in China, Engineering Geology 67, p. 63-71.
- Sridharan, A., Rao, A. S., Sivapullaiah, P. V., 1986. Swelling pressure of clays, Geotechnical Testing Journal, 9 (1), s. 24-33.
- Stapledon, D.H. and Casinader, R.J., 1972, Dispersive soils at Sugarloaf Dam Site, near Melbourne, Australia, ASTM STP 623, p. 432-466.
- Tosun, H., 1994, Dispersif Killer ve Toprak Dolgu Barajlar Açısından Önemi, DSİ Teknik Bülteni, sayı 80, s. 51-60

- Tosun, H., 1994, Dolgu Barajlar Yönünden Dispersif Killer ve DSİ Çalışmaları, 5. Ulusal Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Kongresi, 20-21 Ekim, Ankara, s. 98-110
- Tosun, H., 1997, Comparative study on physical tests of dispersibility of soils used for earthfill dams in Turkey, ASTM Geotechnical Testing Journal, GTSODS, Vol.20, 2, p. 242-251.
- Tosun H., Savaş H. ve Bitkova, N., 2002, Dispersif ve ara zemin örneklerinde sıkıştırma enerjisinin zeminin borulanma davranışı üzerine etkisi, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Dokuzuncu Ulusal Kongresi, Eskişehir, s. 34-44.
- TS 1500, 1987, İnşaat Mühendisliğinde Zeminlerin Sınıflandırılması: Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 1900, 1987, İnşaat Mühendisliğinde Zemin Deneyleri: Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Türker, F., 2001, Endüstriyel, Eysel Atıklar ve Beton, Ders Notları, Akdeniz Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Antalya.
- Türköz, M., 2007, Yüksek Plastisiteli Killerin Şişme Potansiyelinin Direkt Deneylerle Belirlenmesi ve Karşılaştırmalı Analiz, Doktora tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 180s.
- Türköz, M., Savaş, H., Tosun, H., 2010, Dispersif ve Şişme Özelliğine Sahip Kil zeminlerin Magnezyum Klorür Solüsyonu İle İyileştirilmesi, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Ulusal Kongresi, 30 Eylül – 1 Ekim 2010, İstanbul Kültür Üniversitesi, İstanbul.
- USBR 5400-89, 1989, Determining Dispersibility of Clayey Soils by the Crumb Test Method, Earth Manual II, United States Department of the Interior Bureau of Reclamation, p. 414-418.
- USBR 5405, 1989, Determining dispersibility of clayey soils by the double hydrometer test method: Earth Manual II, United States Department of the Interior Bureau of Reclamation, p. 425-437.
- USBR 5410-89, 1989, Determining Dispersibility of Clayey Soils by the Pinhole Test Method, Earth Manual II, United States Department of the Interior Bureau of Reclamation, p. 425-437.
- Uzundurukan, S., 2006, Zeminlerin Şişme Özelliklerine Etkiyen Temel Parametrelerin Belirlenmesi ve Modellenmesi, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 202s.
- Yılmaz, A., 2008, Ferrokrom ve Silikoferrokrom Curufları ile Silis Dumanının Yol Üstyapısında Kullanımının İncelenmesi.

- Yeğinobalı, A., 1993, Silis Dumanının Beton Katkı Maddesi Olarak Değerlendirilmesi, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, Ankara, s. 149-167
- Yong and Warkentin, B.P., 1996, Introduction to soil behavior, Chapter 7, Macmillan, New York, p.151-175.

EKLER

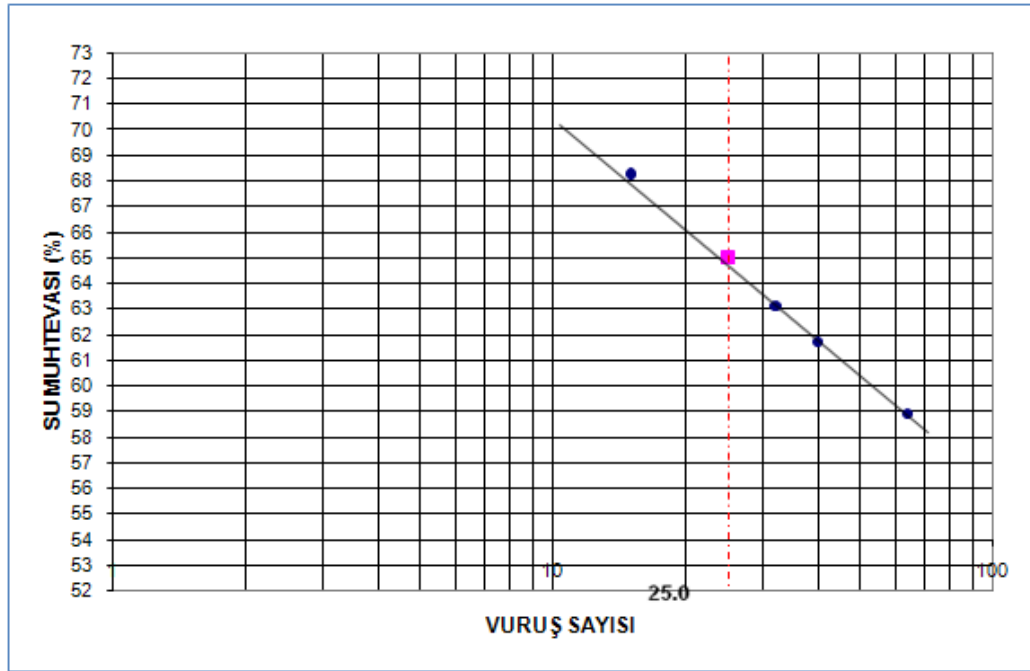
EK A:

KIVAM LİMİTİ EĞRİLERİ

OSMANGAZI UNIVERSİTESİ MUH.MİM.FAKULTESİ		KIVAM LİMİTLERİ DENEYİ				İNŞAAT MUHENDİSLİĞİ ZEMİN MEKANİĞİ LABORATUVARI	
% 1 silis dumanı katkı numunenin kıvam limitleri							
		Plastik Limit (PL)		Likit Limit (LL)			
Deney no		1	2	1	2	3	4
Kap no		10	11	31	18	9	
Vuruş sayısı				70	33	18	
Kap+yaş zemin (g)		11,95	12,7	27,32	22,28	27,78	
Kap+kuru zemin (g)		11,32	11,9	22,47	18,97	22,24	
Kap ağırlığı (g)		9,44	9,5	14,43	13,77	14,08	
Sukütlesi (g)		0,63	0,83	4,85	3,31	5,54	
Kuru zemin kütlesi (g)		1,88	2,37	8,04	5,20	8,16	
Su muhtevası (%)		33,51	35,02	60	64	68	
Ortalama plastik limit		34					
Likit Limit (LL)	66	Plastik Limit (PL)	34	Plastisite İndisi (PI=LL-PL)	32		

% 3 katkılı numunenin kıvam limitleri

Deney no	Plastik Limit (PL)		Likit Limit (LL)			
	1	2	1	2	3	4
Kap no	10	29	34	24	18	17
Vuruş sayısı			64	40	32	15
Kap+yaş zemin (g)	12,00	11,9	24,79	25,08	23,33	26,55
Kap+kuru zemin (g)	11,30	11,3	20,95	20,82	19,63	21,64
Kap ağırlığı (g)	9,44	9,3	14,43	13,92	13,77	14,45
Sukütlesi (g)	0,70	0,60	3,84	4,26	3,70	4,91
Kuru zemin kütlesi (g)	1,86	1,99	6,52	6,90	5,86	7,19
Sumuhtevası (%)	37,63	30,15	59	62	63	68
Ortalama plastik limit	34					



Likit Limit (LL)

65

Plastik Limit (PL)

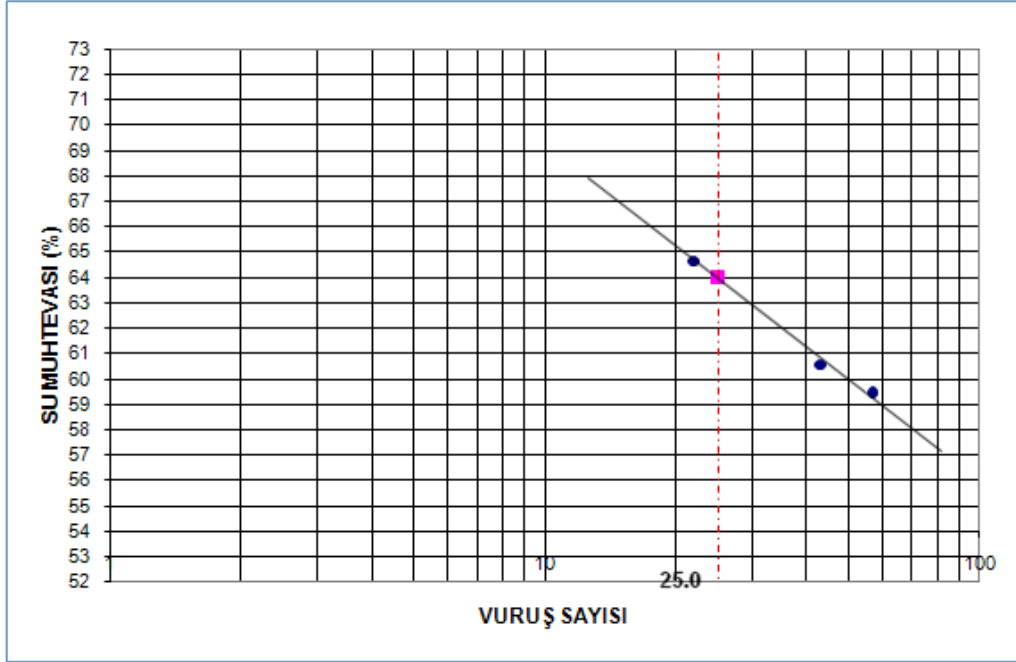
34

Plastisite İndisi (PI=LL-PL)

31

%5 silis dumanı katkı numunenin kıvam limitleri

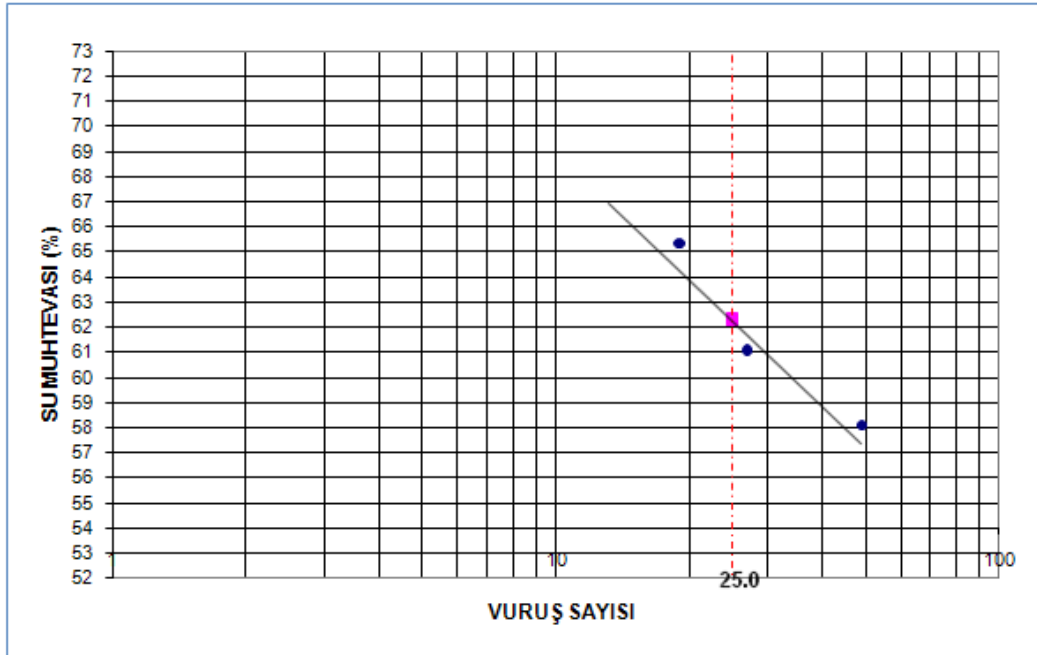
	Plastik Limit (PL)		Likit Limit (LL)			
	1	2	1	2	3	4
Deney no	1	2	1	2	3	4
Kap no	48	49	2	22	21	
Vuruş sayısı			57	43	22	
Kap+yaş zemin (g)	8,70	8,2	24,89	24,84	26,96	
Kap+kuru zemin (g)	8,16	7,7	20,87	21,00	22,08	
Kap ağırlığı (g)	6,54	6,6	14,11	14,66	14,53	
Su kütlesi (g)	0,54	0,42	4,02	3,84	4,88	
Kuru zemin kütlesi (g)	1,62	1,15	6,76	6,34	7,55	
Su muhtevası (%)	33,33	36,52	59	61	65	
Ortalama plastik limit	35					



Likit Limit (LL)	64	Plastik Limit (PL)	35	Plastisite İndisi (PI=LL-PL)	29
------------------	----	--------------------	----	------------------------------	----

%10 silis dumana katkı numunenin kıvam limitleri

Deney no	Plastik Limit (PL)		Likit Limit (LL)			
	1	2	1	2	3	4
Kap no	18	1	16	2	11	
Vuruş sayısı			49	27	19	
Kap+yaş zemin (g)	11,50	12,8	29,65	22,66	32,45	
Kap+kuru zemin (g)	10,95	12,0	23,94	19,30	25,28	
Kap ağırlığı (g)	9,49	9,8	14,11	13,80	14,31	
Sukütlesi (g)	0,55	0,77	5,71	3,36	7,17	
Kuru zemin kütlesi (g)	1,46	2,22	9,83	5,50	10,97	
Sumuhtevası (%)	37,67	34,68	58	61	65	
Ortalama plastik limit	36					



Likit Limit (LL)

62,3

Plastik Limit (PL)

36

Plastisite İndisi (PI=LL-PL)

26,3

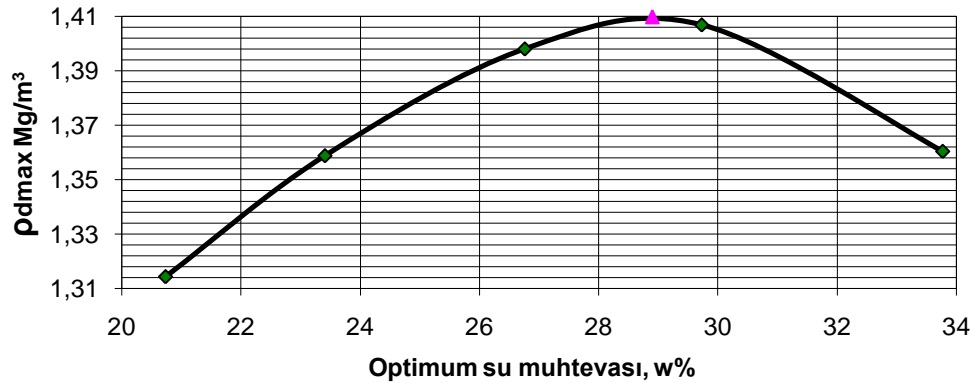
OSMANGAZI UNIVERSITESI MUH.MIM.FAKULTESI		KIVAM LİMİTLERİ DENEYİ				İNŞAAT MUHENDİSLİĞİ ZEMİN MEKANİĞİ LABORATUVARI	
%15 silis dumana katkı numunenin kıvam limitleri							
		Plastik Limit (PL)		Likit Limit (LL)			
Deneş no		1	2	1	2	3	4
Kap no		11	19	40	9	31	29
Vuruş sayısı				67	54	27	17
Kap+yaş zemin (g)		12,01	12,7	23,91	24,56	24,36	25,22
Kap+kuru zemin (g)		11,34	11,9	20,68	20,90	20,74	21,05
Kap ağırlığı (g)		9,50	9,9	14,63	14,10	14,43	14,12
Su kütlesi (g)		0,67	0,72	3,23	3,66	3,62	4,17
Kuru zemin kütlesi (g)		1,84	2,07	6,05	6,80	6,31	6,93
Su muhtevası (%)		36,41	34,78	53	54	57	60
Ortalama plastik limit		36					
Likit Limit (LL)		58,2	Plastik Limit (PL)	36	Plastisite İndisi (PI=LL-PL)	22,2	

OSMANGAZI ÜNİVERSİTESİ MÜH.MİM.FAKÜLTESİ		KIVAM LİMITLERİ DENEYİ				İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ZEMİN MEKANİĞİ LABORATUVARI	
%20 silis dumanı katkı numunenin kıvam limitleri							
		Plastik Limit (PL)		Likit Limit (LL)			
Deney no		1	2	1	2	3	4
Kap no		43	56	24	37	30	
Vuruş sayısı				70	46	22	
Kap+yaş zemin (g)		11,70	12,8	22,44	23,34	22,36	
Kap+kuru zemin (g)		11,10	12,0	19,63	20,20	19,28	
Kap ağırlığı (g)		9,49	9,8	14,32	14,45	13,84	
Su kütlesi (g)		0,60	0,80	2,81	3,14	3,08	
Kuru zemin kütlesi (g)		1,61	2,20	5,31	5,75	5,44	
Su muhtevası (%)		37,27	36,36	53	55	57	
Ortalama plastik limit		37					
Likit Limit (LL)	56,5	Plastik Limit (PL)	36	Plastisite İndisi (PI=LL-PL)	20,5		

EK B:

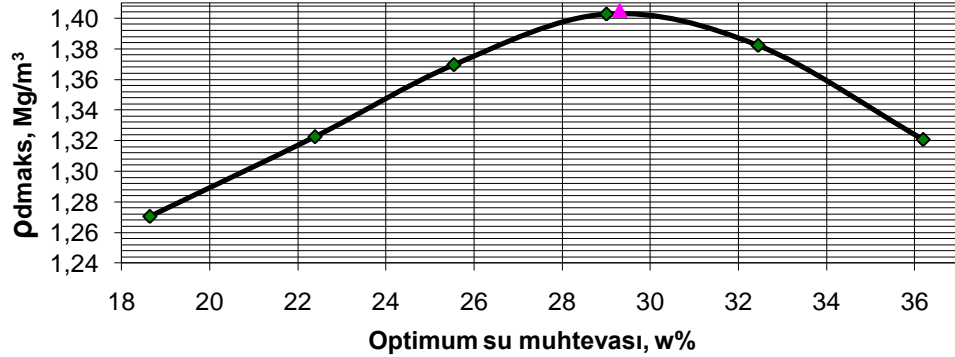
KOMPAKSİYON EĞRİLERİ

Osmangazi Üniversitesi		LABORATUVAR KOMPAKSİYON TESTİ					
NUMUNE NO.		% 3 Kireç Katkılı					
Numune No.		1	2	3	4	5	6
Islak yoğunluk hesaplamaları							
Eklenen su (g veya ml)							
Mold + ıslak numune (g)		6670	6755	6845	6895	6890	
Mold (g)		5172	5172	5172	5172	5172	
Islak numune (g)		1498	1583	1673	1723	1718	
Islak yoğunluk (g)		1,587	1,68	1,77	1,83	1,82	
Su muhtevası hesaplamaları							
Kap No.		1	1	2	2	3	3
Kap + ıslak numune (g)		74,96	83,60	85,56	89,49	92,50	83,48
Kap + kuru numune (g)		63,14	70,43	70,67	73,70	74,39	67,23
Kap (g)		6,55	6,44	6,63	6,70	6,60	6,62
Su (g)		11,82	13,17	14,89	15,79	18,11	16,25
Kuru numune (g)		56,59	63,99	64,04	67,00	67,79	60,61
Su muhtevası (%)		20,89	20,58	23,25	23,57	26,71	26,81
ort		20,73		23,41		26,76	
Kap No.		4	4	5	5	6	6
Kap + ıslak numune (g)		346,75	413,41	415,86	417,23		
Kap + kuru numune (g)		314,41	363,58	379,83	385,75		
Kap (g)		206,24	195,04	273,08	292,61		
Su (g)		32,34	49,83	36,03	31,48		
Kuru numune (g)		108,17	168,54	106,75	93,14		
Su muhtevası (%)		29,90	29,57	33,75	33,80		
ort		29,73		33,78		0,00	
Kuru yoğunluk hesaplamaları							
Kuru yoğunluk (g/cm ³)		1,314	1,359	1,398	1,407	1,360	
Su muhtevası (%)		20,73	23,41	26,76	29,73	33,78	



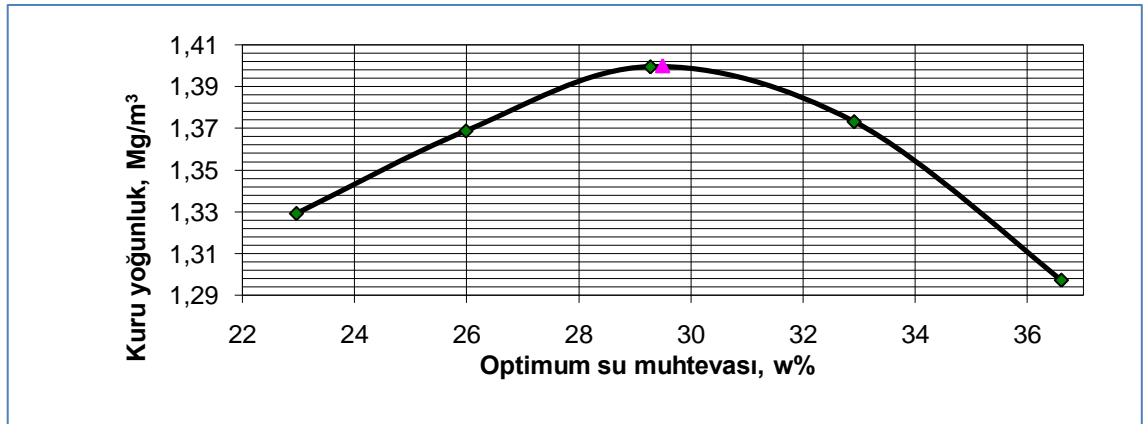
Maksimum kuru yoğunluk = **1,410** Mg/m³ Optimum su muhtevası = **28,9**

Osmangazi Üniversitesi		LABORATUVAR KOMPAKSİYON TESTİ					
NUMUNE NO.		%1 SD + %3 Kireç Katkılı					
Numune No.		1	2	3	4	5	6
Islak yoğunluk hesaplamaları							
Eklenenen su (g veya ml)							
Mold + ıslak numune (g)		6595	6700	6795	6880	6900	6870
Mold (g)		5172	5172	5172	5172	5172	5172
Islak numune (g)		1423	1528	1623	1708	1728	1698
Islak yoğunluk (g)		1,507	1,62	1,72	1,81	1,83	1,80
Su muhtevası hesaplamaları							
Kap No.		1	1	2	2	3	3
Kap + ıslak numune (g)		138,07	86,90	101,00	67,04	104,22	97,13
Kap + kuru numune (g)		117,72	74,37	83,78	55,90	84,43	78,65
Kap (g)		9,43	6,58	6,42	6,42	6,65	6,56
Su (g)		20,35	12,53	17,22	11,14	19,79	18,48
Kuru numune (g)		108,29	67,79	77,36	49,48	77,78	72,09
Su muhtevası (%)		18,79	18,48	22,26	22,51	25,44	25,63
ort		18,64		22,39		25,54	
Kap No.		4	4	5	5	6	6
Kap + ıslak numune (g)		75,35	84,03	226,70	195,40	308,38	304,80
Kap + kuru numune (g)		59,80	66,67	194,98	170,44	266,10	263,18
Kap (g)		6,40	6,57	97,14	93,57	149,47	147,97
Su (g)		15,55	17,36	31,72	24,96	42,28	41,62
Kuru numune (g)		53,40	60,10	97,84	76,87	116,63	115,21
Su muhtevası (%)		29,12	28,89	32,42	32,47	36,25	36,13
ort		29,00		32,45		36,19	
Kuru yoğunluk hesaplamaları							
Kuru yoğunluk (g/cm ³)		1,271	1,323	1,370	1,403	1,382	1,321
Su muhtevası (%)		18,64	22,39	25,54	29,00	32,45	36,19



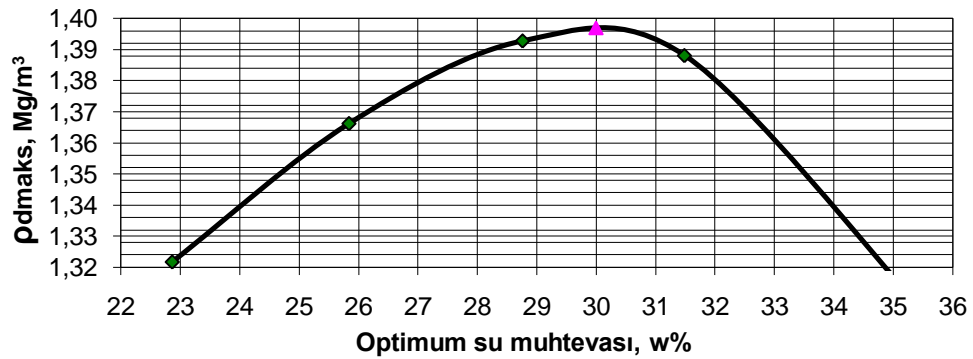
Maksimum kuru yoğunluk = **1,405** Mg/m³ Optimum su muhtevası = **29,3**

Osmangazi Üniversitesi		LABORATUVAR KOMPAKSİYON TESTİ				
NUMUNE NO.	%3 SD + %3 Kireç Katkılı					
Numune No.	1	2	3	4	5	6
Islak yoğunluk hesaplamaları						
Eklenen su (g veya ml)						
Mold + ıslak numune (g)	6715	6800	6880	6895	6845	
Mold (g)	5172	5172	5172	5172	5172	
Islak numune (g)	1543	1628	1708	1723	1673	
Islak yoğunluk (g)	1,635	1,72	1,81	1,83	1,77	
Su muhtevası hesaplamaları						
Kap No.	1	1	2	2	3	3
Kap + ıslak numune (g)	293,70	230,25	254,80	245,32	73,46	96,06
Kap + kuru numune (g)	267,31	214,75	232,33	223,87	58,36	75,73
Kap (g)	152,59	147,16	145,77	141,45	6,63	6,52
Su (g)	26,39	15,50	22,47	21,45	15,10	20,33
Kuru numune (g)	114,72	67,59	86,56	82,42	51,73	69,21
Su muhtevası (%)	23,00	22,93	25,96	26,03	29,19	29,37
ort	22,97		25,99		29,28	
Kap No.	4	4	5	5	6	6
Kap + ıslak numune (g)	311,12	317,44	816,90	529,11		
Kap + kuru numune (g)	282,55	289,71	739,81	460,53		
Kap (g)	194,97	206,21	529,76	272,76		
Su (g)	28,57	27,73	77,09	68,58		
Kuru numune (g)	87,58	83,50	210,05	187,77		
Su muhtevası (%)	32,62	33,21	36,70	36,52		
ort	32,92		36,61			
Kuru yoğunluk hesaplamaları						
Kuru yoğunluk (g/cm ³)	1,329	1,369	1,400	1,373	1,297	
Su muhtevası (%)	22,97	25,99	29,28	32,92	36,61	



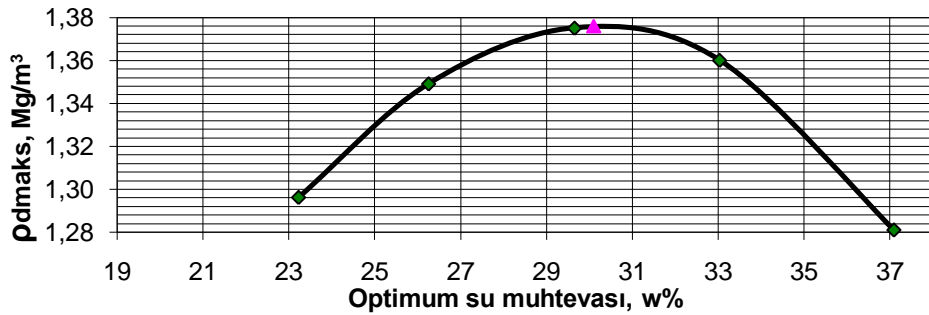
Maksimum kuru yoğunluk = **1,400** Mg/m³ Optimum su muhtevası = **29,5**

Osmangazi Üniversitesi		LABORATUVAR KOMPAKSİYON TESTİ					
NUMUNE NO.	%5 SD + % 3 Kireç Katkılı						
Numune No.		1	2	3	4	5	6
Islak yoğunluk hesaplamaları							
Eklenenen su (g veya ml)							
Mold + ıslak numune (g)		6705	6795	6865	6895	6845	
Mold (g)		5172	5172	5172	5172	5172	
Islak numune (g)		1533	1623	1693	1723	1673	
Islak yoğunluk (g)		1,624	1,72	1,79	1,83	1,77	
Su muhtevası hesaplamaları							
Kap No.		1	1	2	2	3	3
Kap + ıslak numune (g)		100,62	87,26	82,29	99,59	88,11	101,12
Kap + kuru numune (g)		83,70	72,79	67,32	81,15	70,42	80,77
Kap (g)		9,92	9,30	9,30	9,89	9,50	9,34
Su (g)		16,92	14,47	14,97	18,44	17,69	20,35
Kuru numune (g)		73,78	63,49	58,02	71,26	60,92	71,43
Su muhtevası (%)		22,93	22,79	25,80	25,88	29,04	28,49
ort		22,86		25,84		28,76	
Kap No.		4	4	5	5	6	6
Kap + ıslak numune (g)		108,82	97,70	93,95	102,12		
Kap + kuru numune (g)		85,10	76,55	71,88	77,87		
Kap (g)		9,87	9,30	9,42	9,30		
Su (g)		23,72	21,15	22,07	24,25		
Kuru numune (g)		75,23	67,25	62,46	68,57		
Su muhtevası (%)		31,53	31,45	35,33	35,37		
ort		31,49		35,35			
Kuru yoğunluk hesaplamaları							
Kuru yoğunluk (g/cm ³)		1,322	1,366	1,393	1,388	1,309	
Su muhtevası (%)		22,86	25,84	28,76	31,49	35,35	



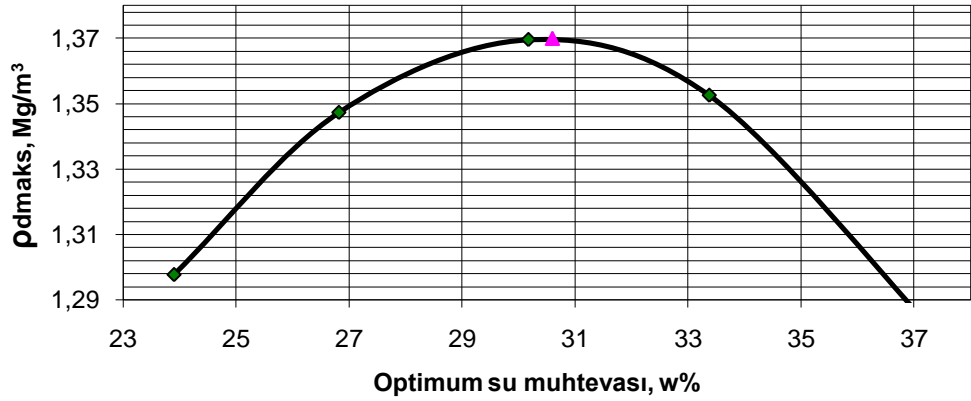
Maksimum kuru yoğunluk = **1,397** Mg/m³ Optimum su muhtevası = **30,0**

Osmangazi Üniversitesi		LABORATUVAR KOMPAKSİYON TESTİ					
NUMUNE NO.	%10 SD + %3 Kireç Katkılı						
Numune No.		1	2	3	4	5	6
Islak yoğunluk hesaplamaları							
Eklenen su (g veya ml)							
Mold + ıslak numune (g)		6680	6780	6855	6880	6830	
Mold (g)		5172	5172	5172	5172	5172	
Islak numune (g)		1508	1608	1683	1708	1658	
Islak yoğunluk (g)		1,597	1,70	1,78	1,81	1,76	
Su muhtevası hesaplamaları							
Kap No.		1	1	2	2	3	3
Kap + ıslak numune (g)		269,60	280,81	99,69	104,48	113,26	83,62
Kap + kuru numune (g)		247,50	255,97	81,04	84,67	89,52	66,64
Kap (g)		152,51	148,87	9,93	9,31	9,49	9,36
Su (g)		22,10	24,84	18,65	19,81	23,74	16,98
Kuru numune (g)		94,99	107,10	71,11	75,36	80,03	57,28
Su muhtevası (%)		23,27	23,19	26,23	26,29	29,66	29,64
ort		23,23		26,26		29,65	
Kap No.		4	4	5	5	6	6
Kap + ıslak numune (g)		100,19	84,72	81,83	60,48		
Kap + kuru numune (g)		77,79	65,94	61,39	45,93		
Kap (g)		9,59	9,40	6,64	6,44		
Su (g)		22,40	18,78	20,44	14,55		
Kuru numune (g)		68,20	56,54	54,75	39,49		
Su muhtevası (%)		32,84	33,22	37,33	36,84		
ort		33,03		37,09			
Kuru yoğunluk hesaplamaları							
Kuru yoğunluk (g/cm ³)		1,296	1,349	1,375	1,360	1,281	
Su muhtevası (%)		23,23	26,26	29,65	33,03	37,09	



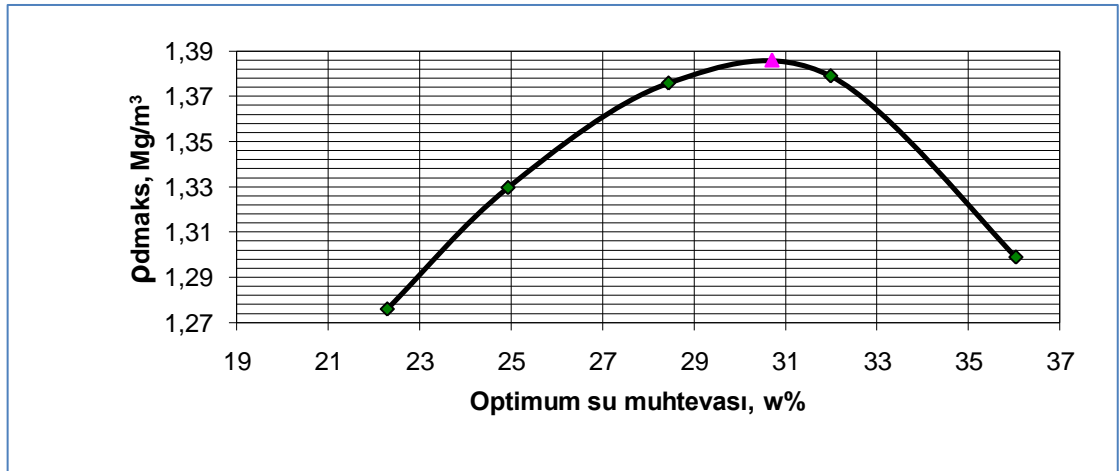
Maksimum kuru yoğunluk = **1,376** Mg/m³ Optimum su muhtevası = **30,1**

Osmangazi Üniversitesi		LABORATUVAR KOMPAKSİYON TESTİ				
NUMUNE NO.	%15 SD + % 3 Kireç Katkılı					
Numue No.	1	2	3	4	5	6
Islak yoğunluk hesaplamaları						
Eklenen su (g veya ml)						
Mold + ıslak numune (g)	6690	6785	6855	6875	6835	
Mold (g)	5172	5172	5172	5172	5172	
Islak numune (g)	1518	1613	1683	1703	1663	
Islak yoğunluk (g)	1,608	1,71	1,78	1,80	1,76	
Su muhtevası hesaplamaları						
Kap No.	1	1	2	2	3	3
Kap + ıslak numune (g)	344,72	242,14	259,42	207,26	83,20	81,27
Kap + kuru numune (g)	306,98	224,00	236,00	192,83	66,14	64,66
Kap (g)	149,46	147,95	147,97	139,47	9,34	9,88
Su (g)	37,74	18,14	23,42	14,43	17,06	16,61
Kuru numune (g)	157,52	76,05	88,03	53,36	56,80	54,78
Su muhtevası (%)	23,96	23,85	26,60	27,04	30,04	30,32
ort	23,91		26,82		30,18	
Kap No.	4	4	5	5	6	6
Kap + ıslak numune (g)	69,71	84,28	88,89	103,71		
Kap + kuru numune (g)	54,77	65,47	67,37	78,12		
Kap (g)	9,86	9,31	9,38	9,32		
Su (g)	14,94	18,81	21,52	25,59		
Kuru numune (g)	44,91	56,16	57,99	68,80		
Su muhtevası (%)	33,27	33,49	37,11	37,19		
ort	33,38		37,15		0,00	
Kuru yoğunluk hesaplamaları						
Kuru yoğunluk (g/cm ³)	1,298	1,347	1,370	1,353	1,284	
Su muhtevası (%)	23,91	26,82	30,18	33,38	37,15	



Maksimum kuru yoğunluk = .. **1,370** Mg/m³ Optimum su muhtevası = **30,6**

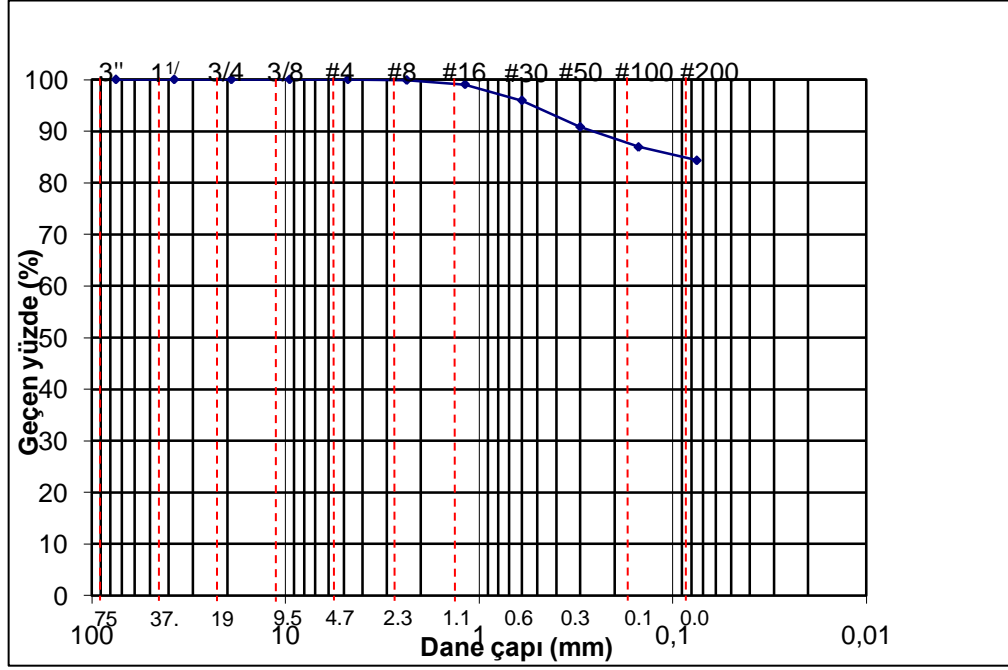
Osmangazi Üniversitesi		LABORATUVAR KOMPAKSİYON TESTİ					
NUMUNE NO.	%20 SD + %3 Kireç Katkılı						
Numune No.		1	2	3	4	5	6
Islak yoğunluk hesaplamaları							
Eklenen su (g veya ml)							
Mold + ıslak numune (g)		6645	6740	6840	6890	6840	
Mold (g)		5172	5172	5172	5172	5172	
Islak numune (g)		1473	1568	1668	1718	1668	
Islak yoğunluk (g)		1,560	1,66	1,77	1,82	1,77	
Su muhtevası hesaplamaları							
Kap No.		1	1	2	2	3	3
Kap + ıslak numune (g)		236,40	260,27	93,81	66,03	114,30	80,36
Kap + kuru numune (g)		220,03	240,64	76,92	54,22	90,48	63,98
Kap (g)		146,75	152,37	9,43	6,66	6,68	6,41
Su (g)		16,37	19,63	16,89	11,81	23,82	16,38
Kuru numune (g)		73,28	88,27	67,49	47,56	83,80	57,57
Su muhtevası (%)		22,34	22,24	25,03	24,83	28,42	28,45
ort		22,29		24,93		28,44	
Kap No.		4	4	5	5	6	6
Kap + ıslak numune (g)		202,65	181,44	100,09	81,79		
Kap + kuru numune (g)		177,02	160,19	75,32	61,89		
Kap (g)		97,13	93,55	6,64	6,62		
Su (g)		25,63	21,25	24,77	19,90		
Kuru numune (g)		79,89	66,64	68,68	55,27		
Su muhtevası (%)		32,08	31,89	36,07	36,01		
ort		31,98		36,04			
Kuru yoğunluk hesaplamaları							
Kuru yoğunluk (g/cm ³)		1,276	1,330	1,376	1,379	1,299	
Su muhtevası (%)		22,29	24,93	28,44	31,98	36,04	



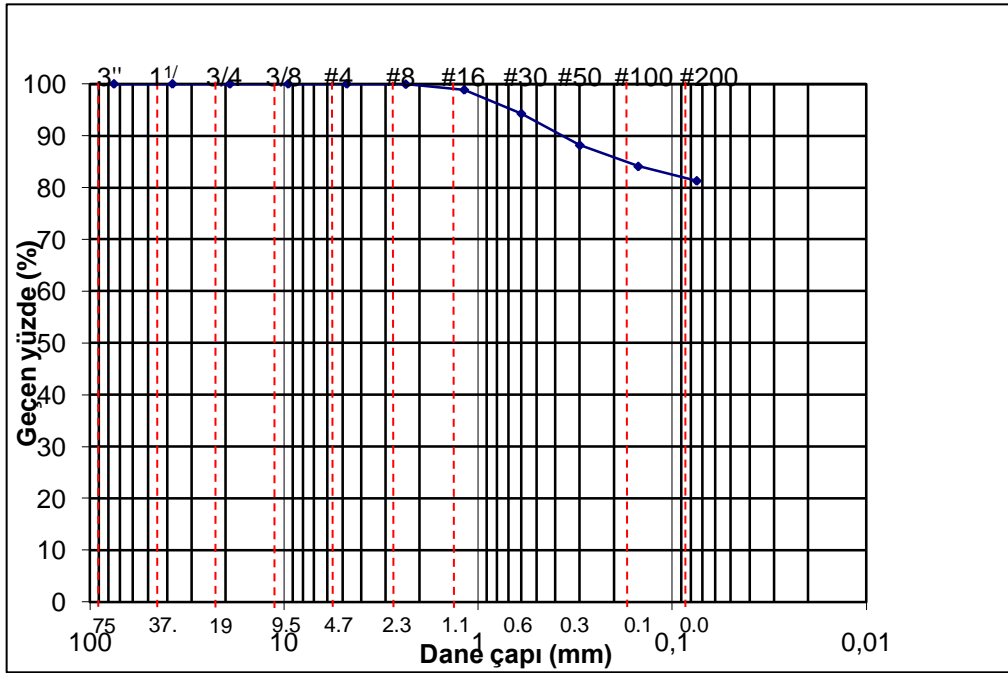
Maksimum kuru yoğunluk = **1,386** Mg/m³ Optimum su muhtevası = **30,7**

EK C :

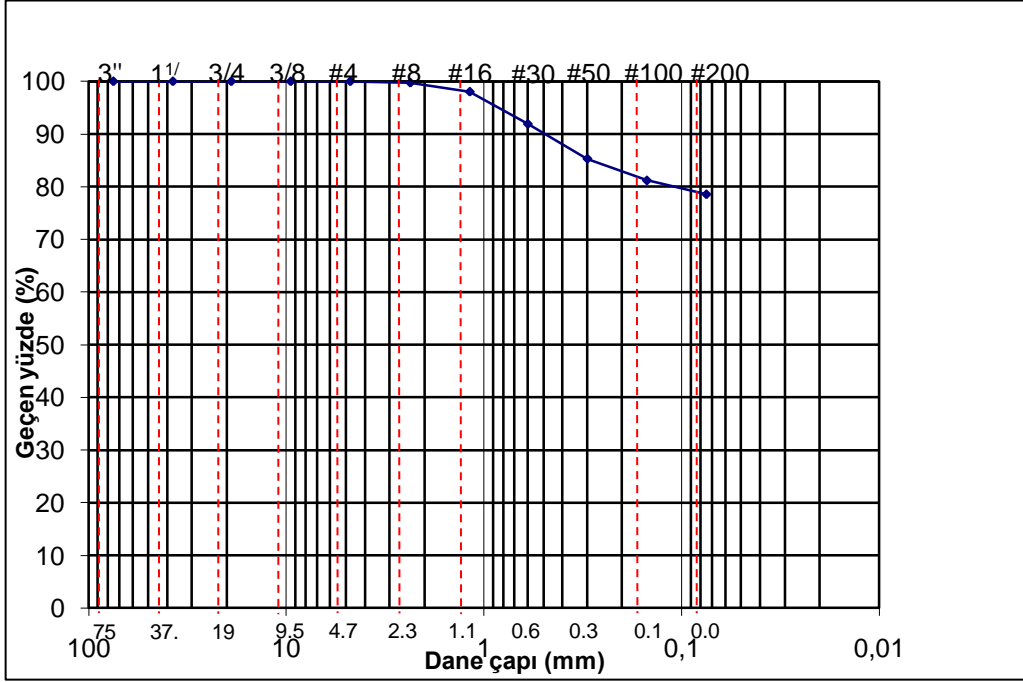
TANE DAĞILIMI EĞRİLERİ



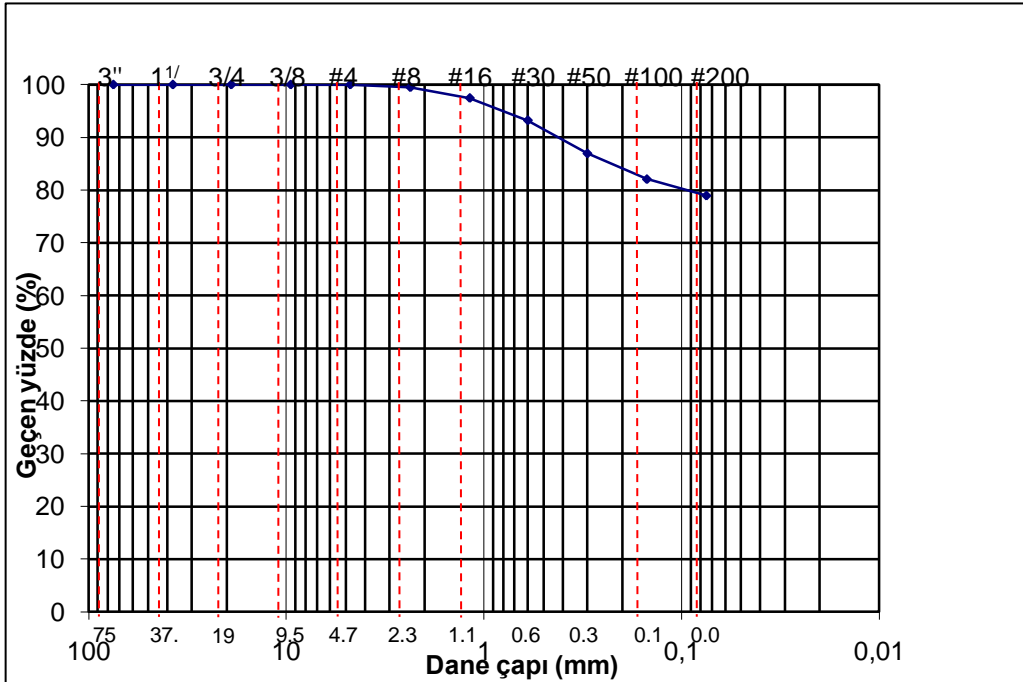
Şekil C.1. %3 kireç katkılı numunenin tane dağılımı



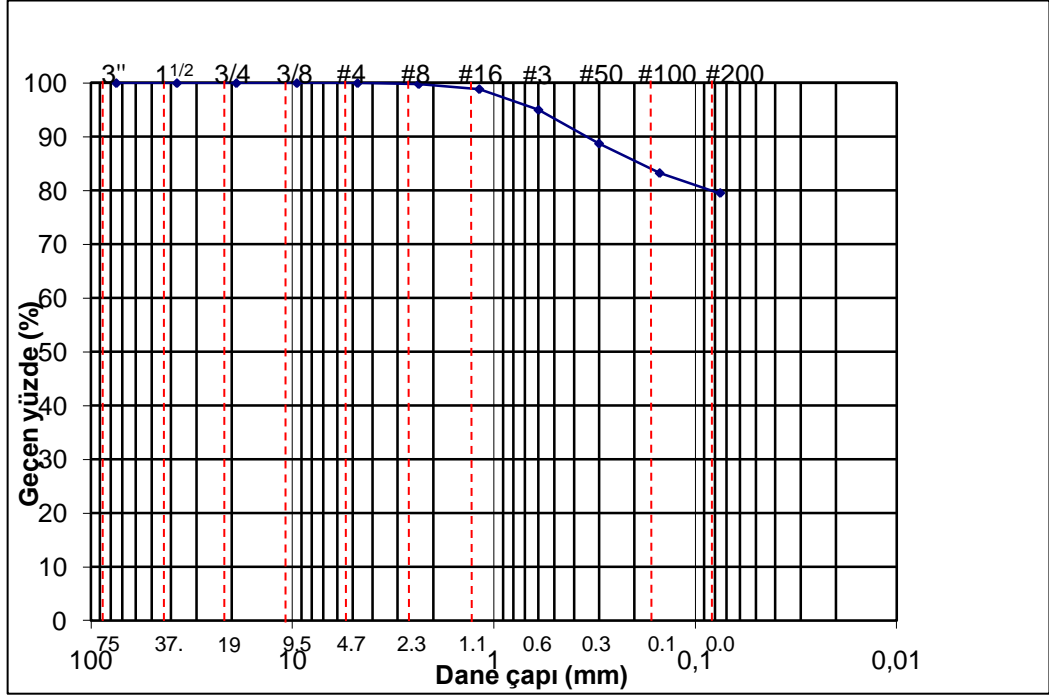
Şekil C.2. %1 SD + % 3 kireç katkılı numunenin tane dağılımı



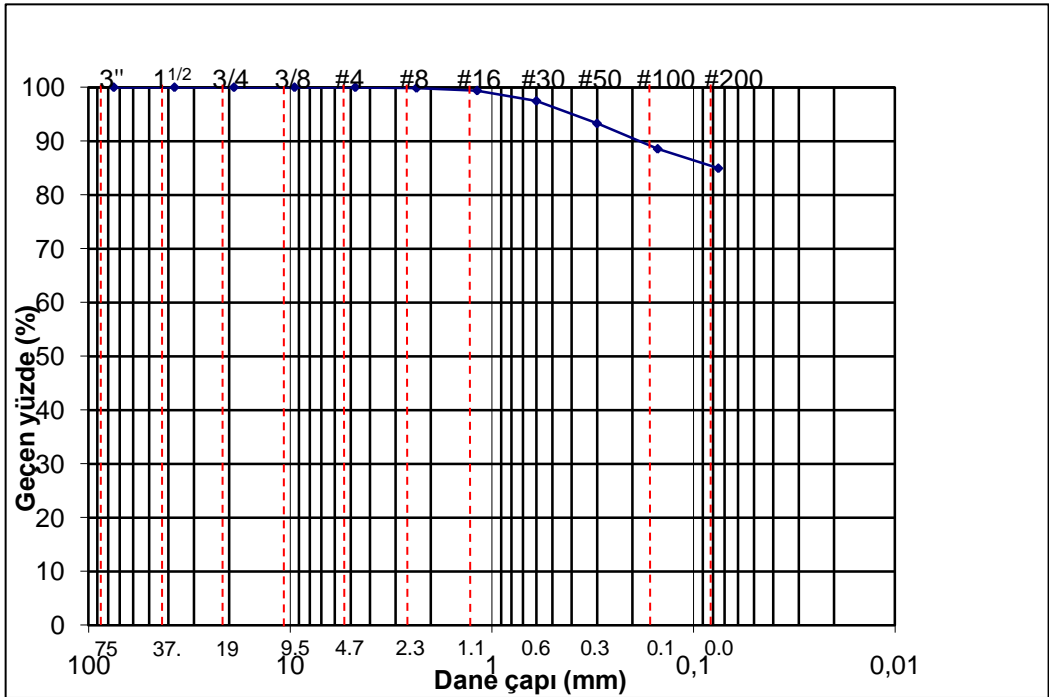
Şekil C.3. %3 SD + % 3 kireç katkılı numunenin tane dağılımı



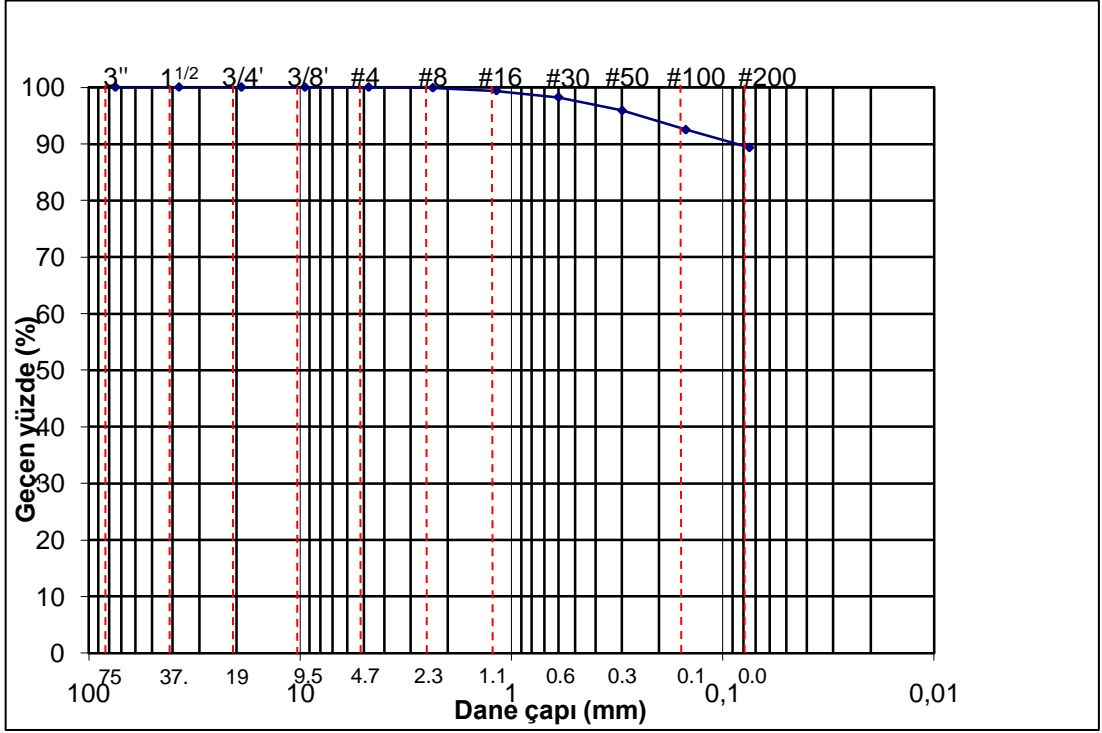
Şekil C.4. %5 SD + % 3 kireç katkılı numunenin tane dağılımı



Şekil C.5. %10 SD + % 3 kireç katkılı numunenin tane dağılımı



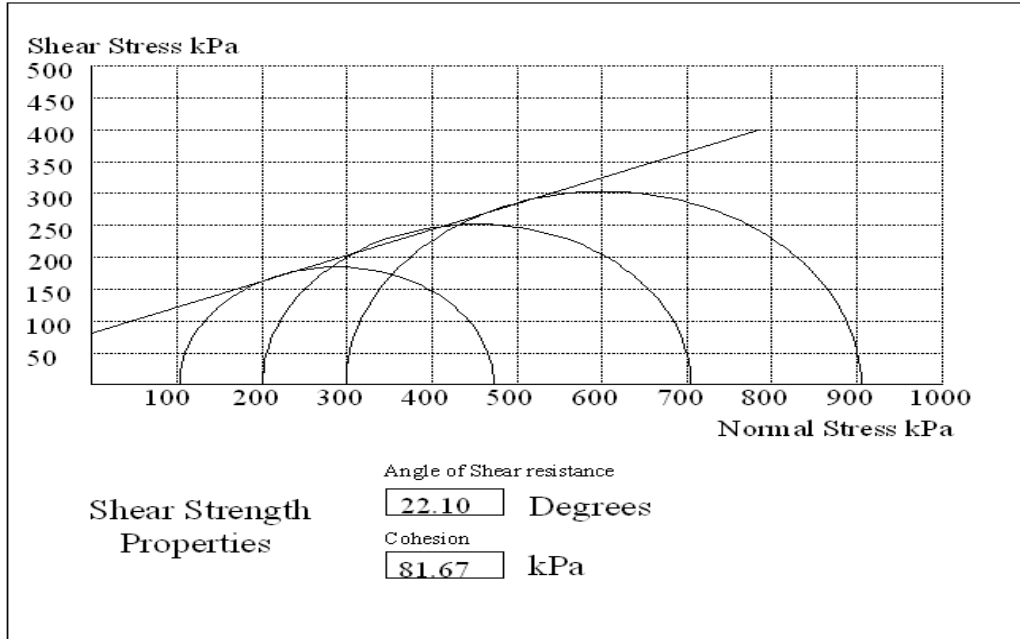
Şekil C.6. %15 SD + % 3 kireç katkılı numunenin tane dağılımı



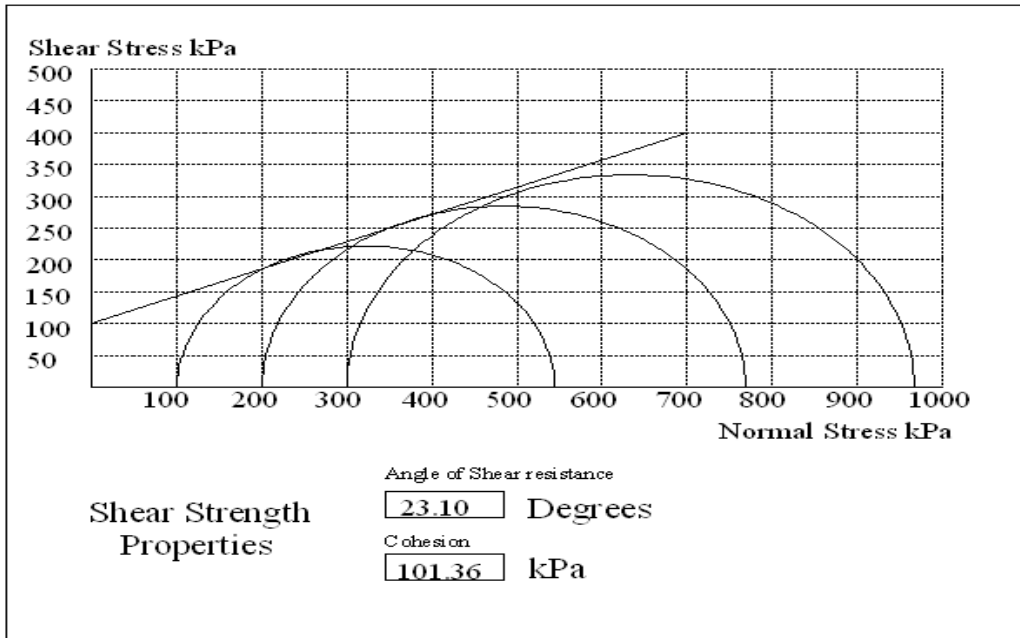
Şekil C.7. %20 SD + % 3 kireç katkılı numunenin tane dağılımı

EK D :

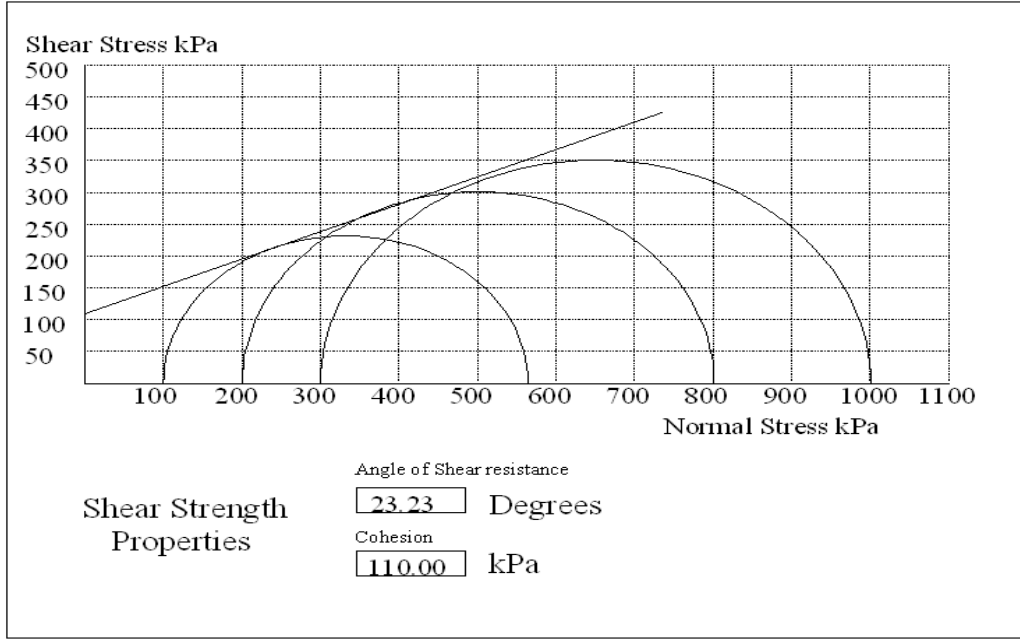
GÖÇME ZARFLARI



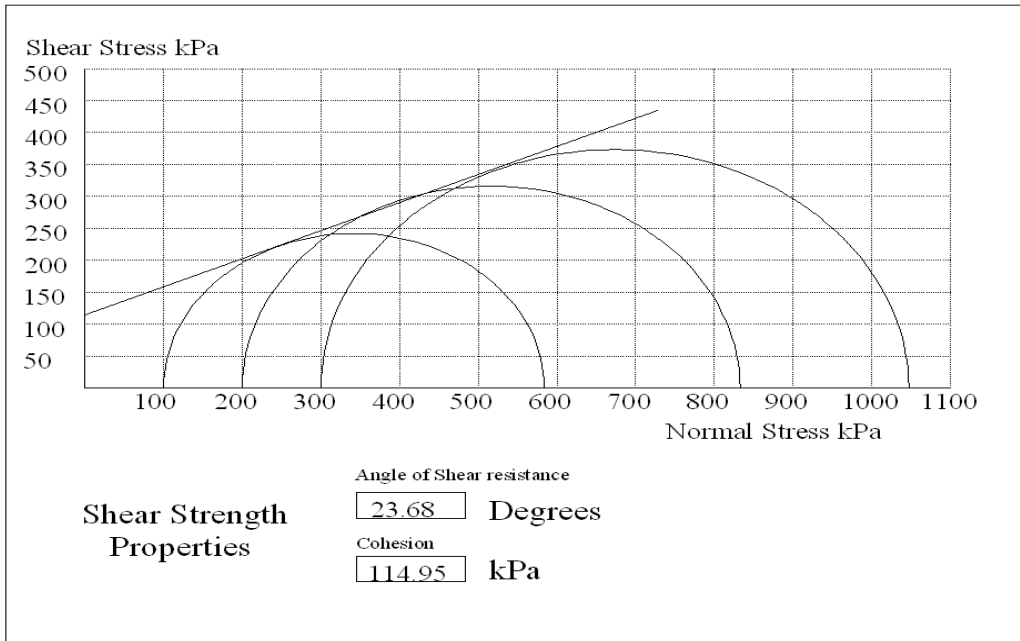
Şekil D.1. Katkısız zeminin 1 günlük kürle elde edilen göçme zarfı.



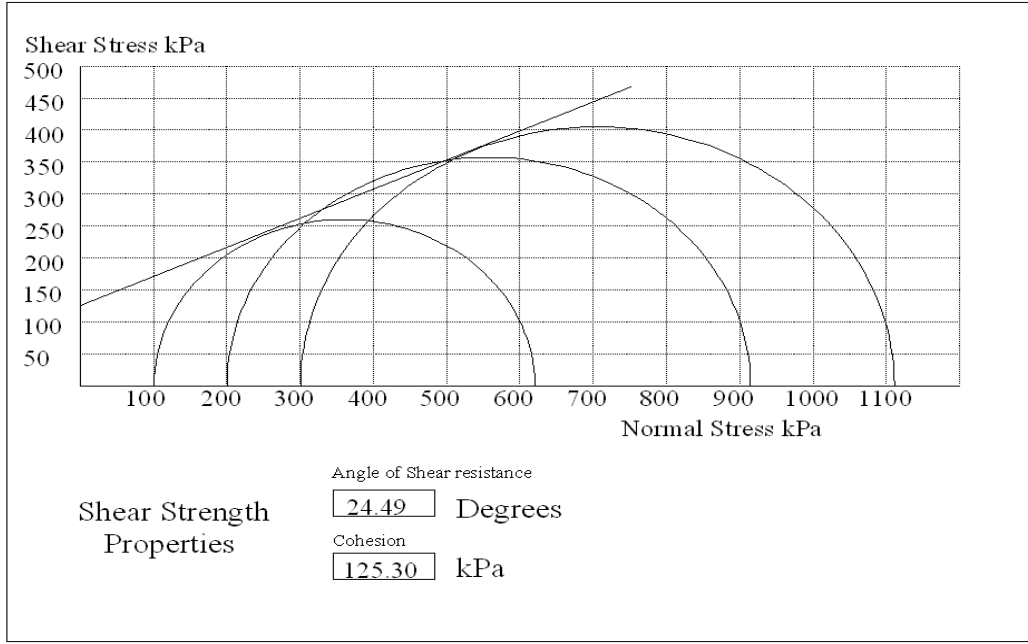
Şekil D.2. % 3 kireç katkılı zeminin 1 günlük kürle elde edilen göçme zarfı.



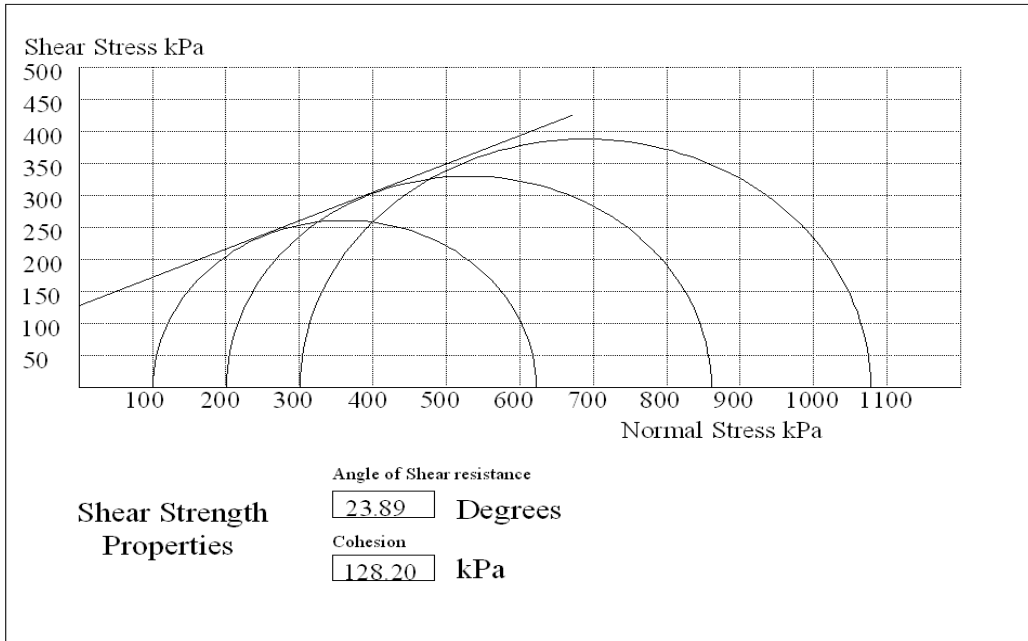
Şekil D.3. %1 SD ve % 3 kireç katkılı zeminin 1 günlük kürle elde edilen göçme zarfı.



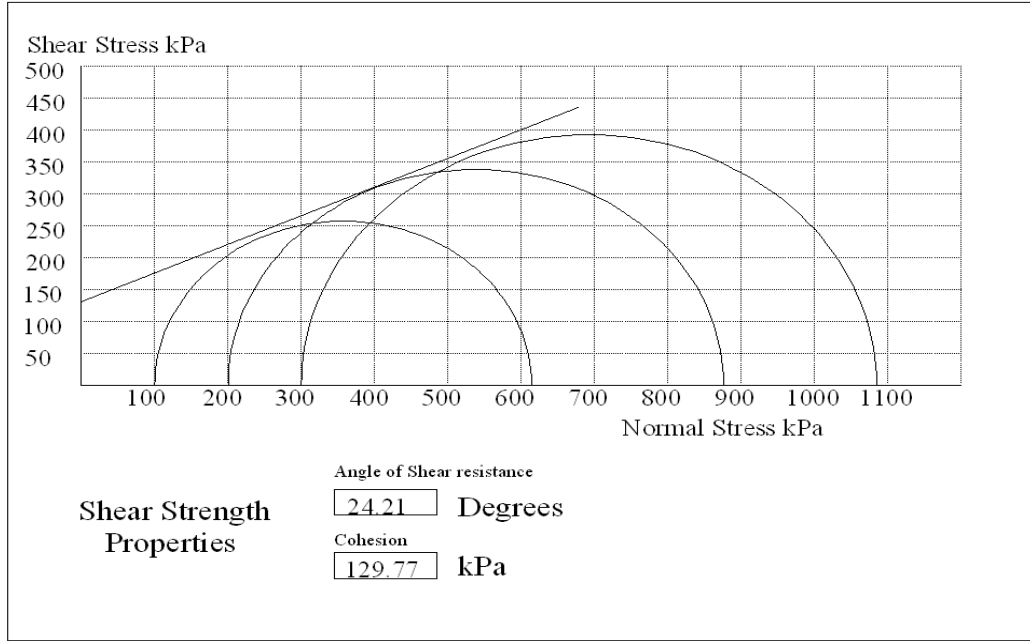
Şekil D.4. %3 SD ve % 3 kireç katkılı zeminin 1 günlük kürle elde edilen göçme zarfı.



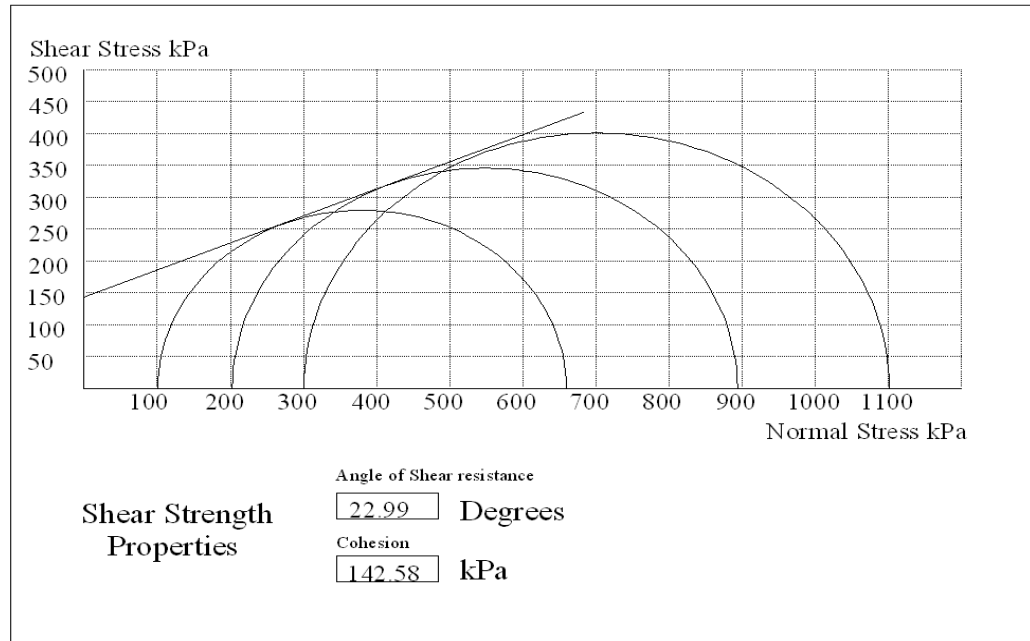
Şekil D.5. %5 SD ve % 3 kireç katkılı zeminin 1 günlük kürle elde edilen göçme zarfı.



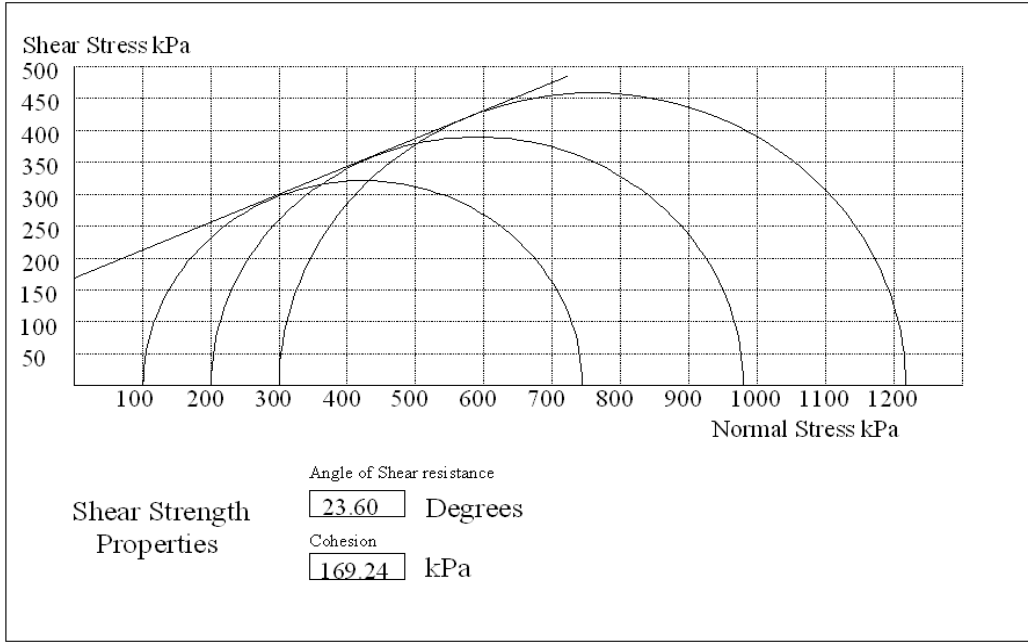
Şekil D.6. %10 SD ve % 3 kireç katkılı zeminin 1 günlük kürle elde edilen göçme zarfı.



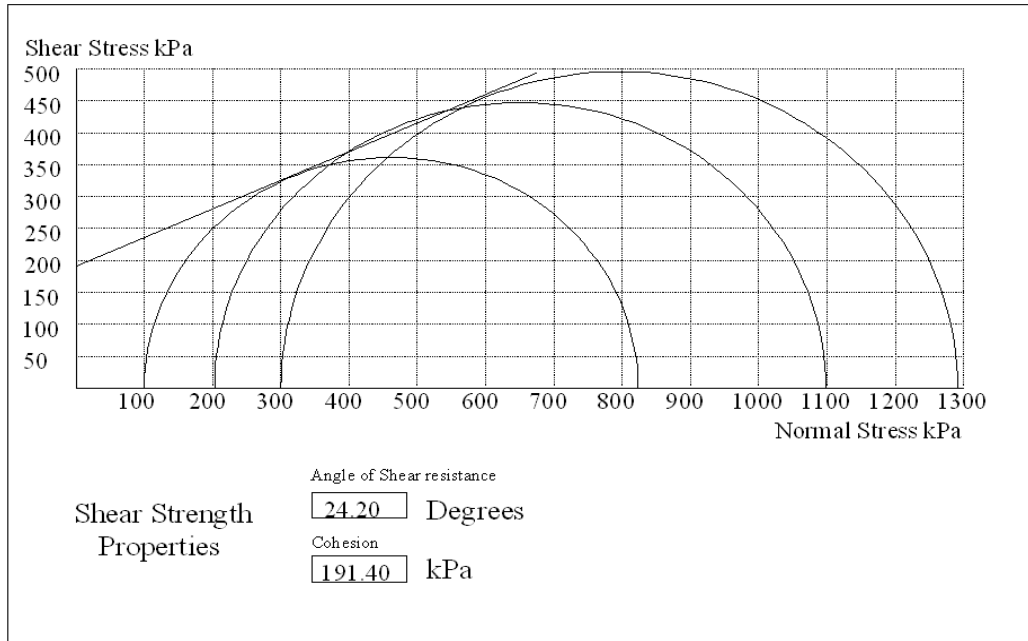
Şekil D.7. %15 SD ve % 3 kireç katkılı zeminin 1 günlük kürle elde edilen göçme zarfı.



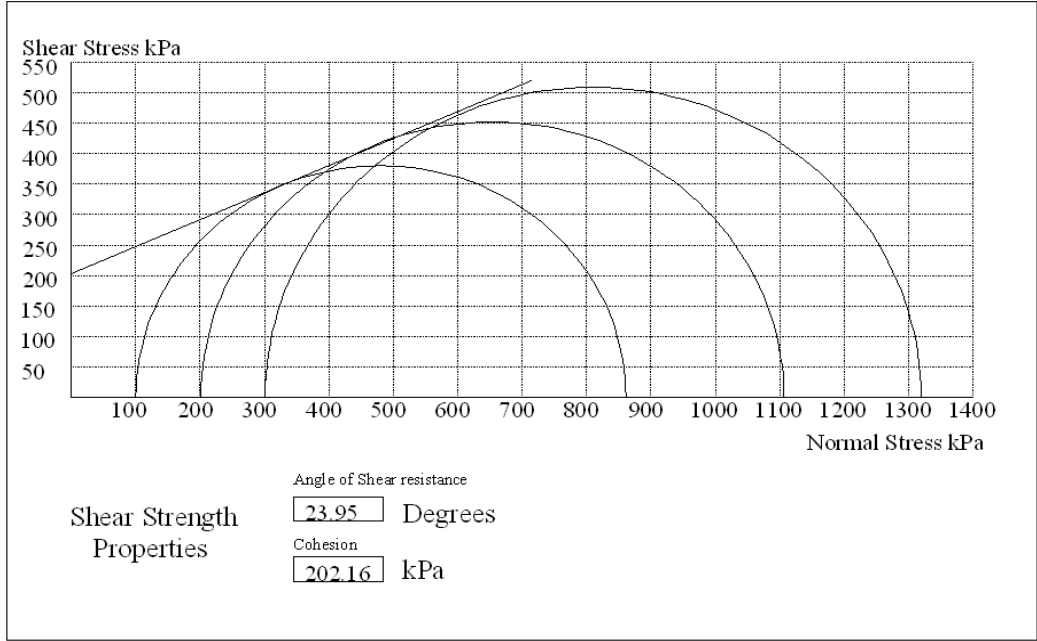
Şekil D.8. %20 SD ve % 3 kireç katkılı zeminin 1 günlük kürle elde edilen göçme zarfı.



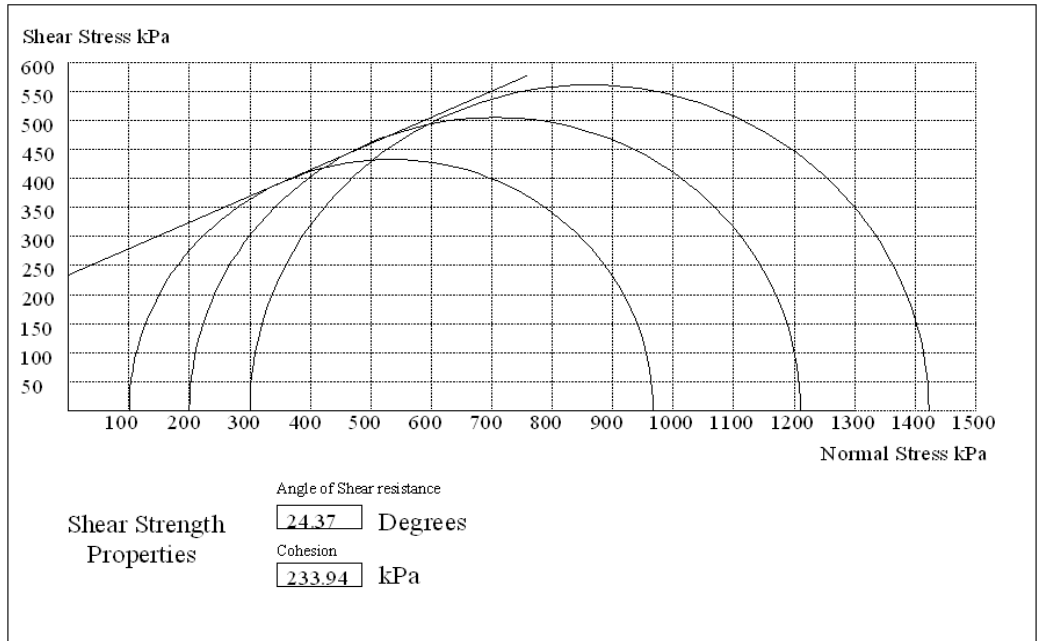
Şekil D.9. % 3 kireç katkılı zeminin 7 günlük kütle elde edilen göçme zarfı.



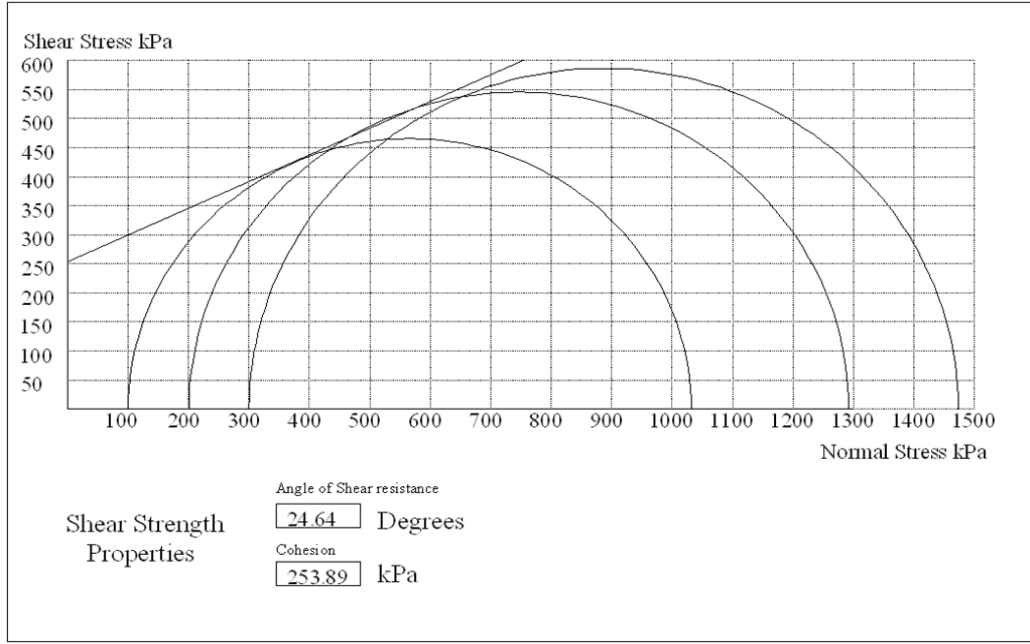
Şekil D10. % 1 SD ve % 3 kireç katkılı zeminin 7 günlük kütle elde edilen göçme zarfı.



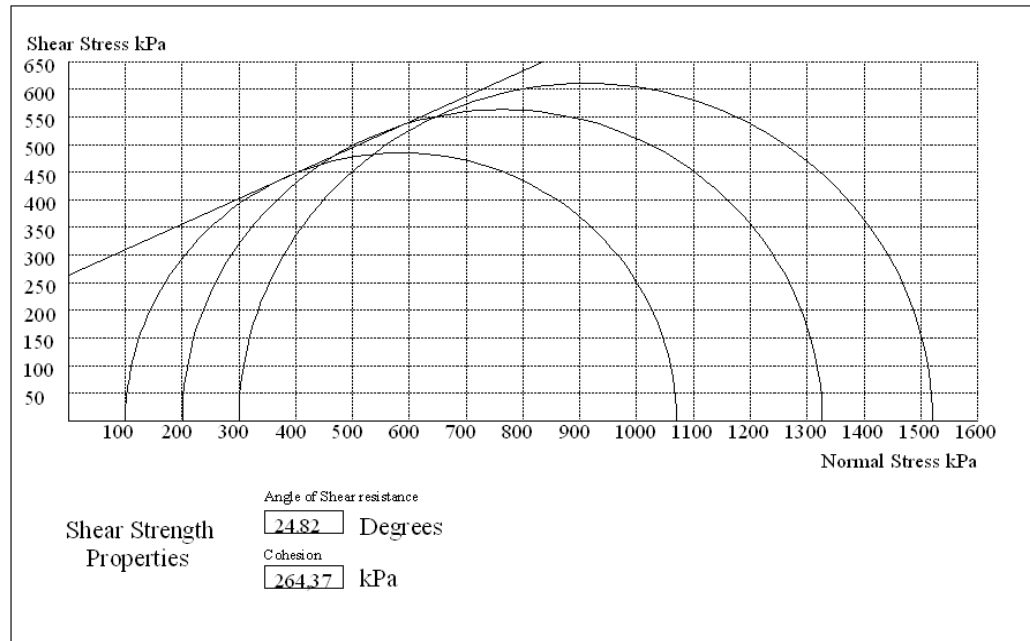
Şekil D.11. % 3 SD ve % 3K katkılı zeminin 7 günlük kürle elde edilen göçme zarfı.



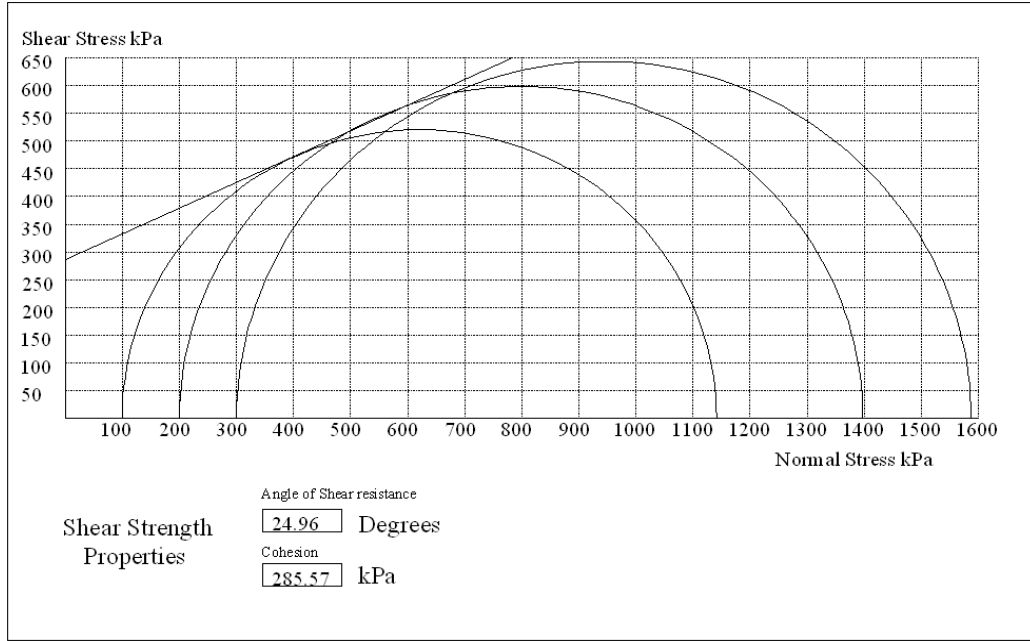
Şekil D.12. % 5 SD ve % 3K katkılı zeminin 7 günlük kürle elde edilen göçme zarfı.



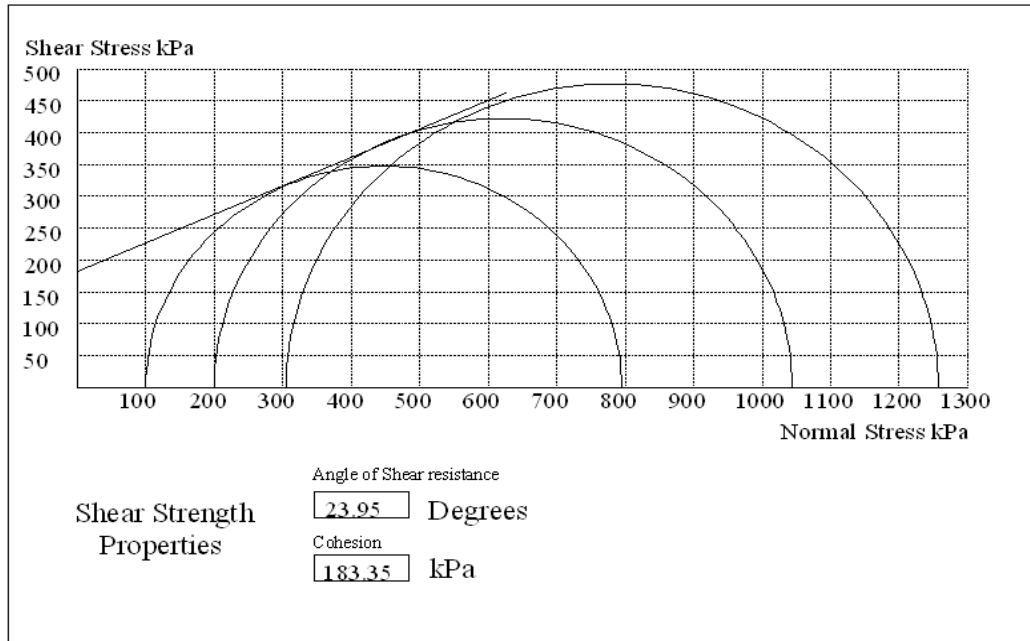
Şekil D.13. % 10 SD ve % 3K katkılı zeminin 7 günlük kürle elde edilen göçme zarfı.



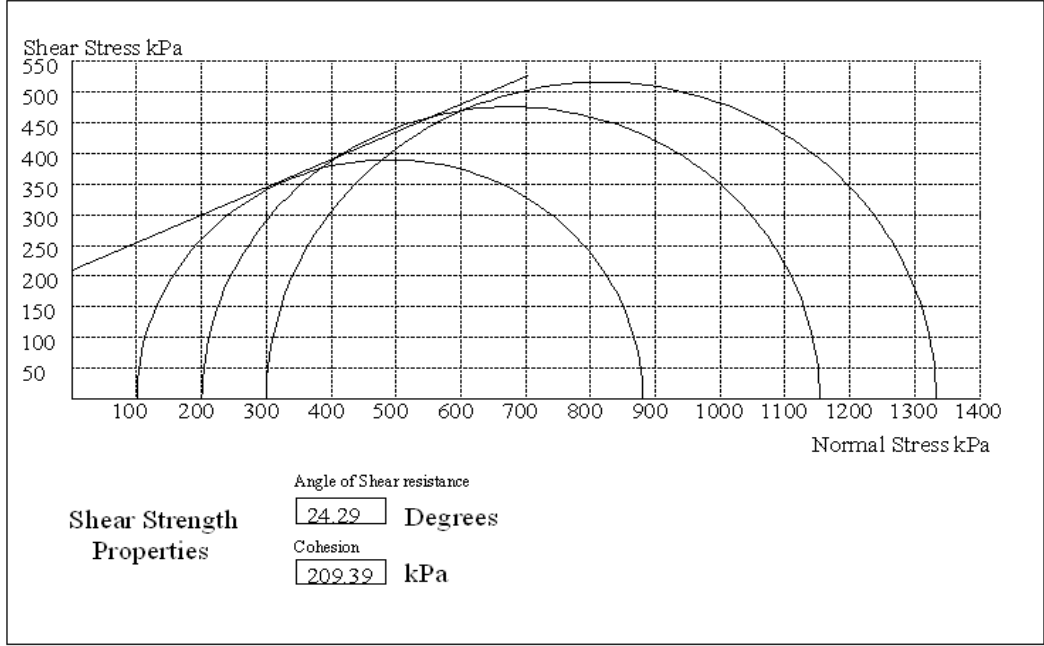
Şekil D.14. % 15 SD ve % 3K katkılı zeminin 7 günlük kürle elde edilen göçme zarfı.



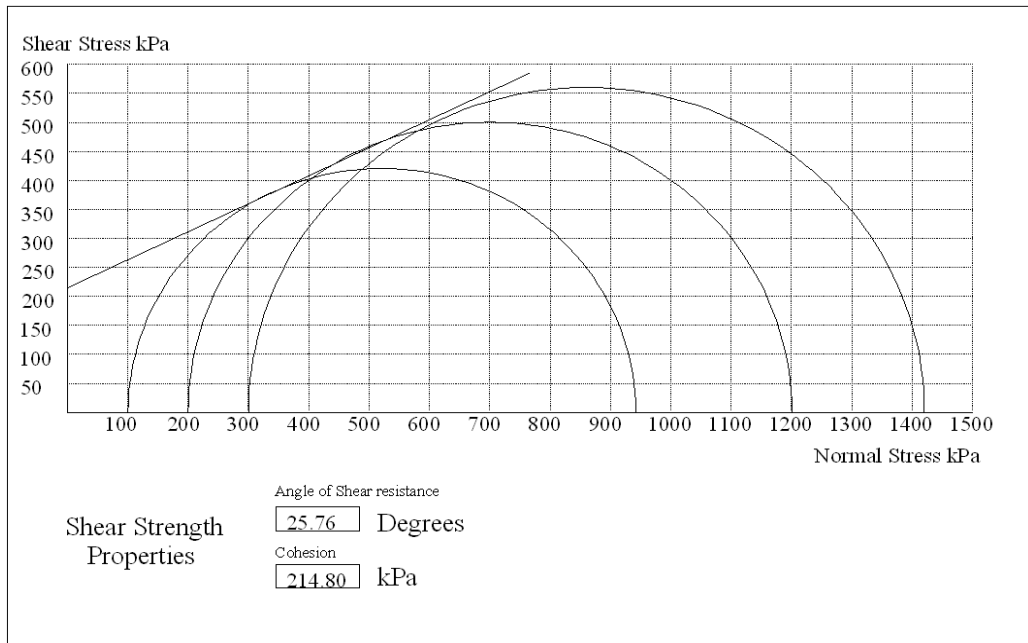
Şekil D.15. % 20 SD ve % 3K katkıli zeminin 7 günlük kürlle elde edilen göçme zarfi.



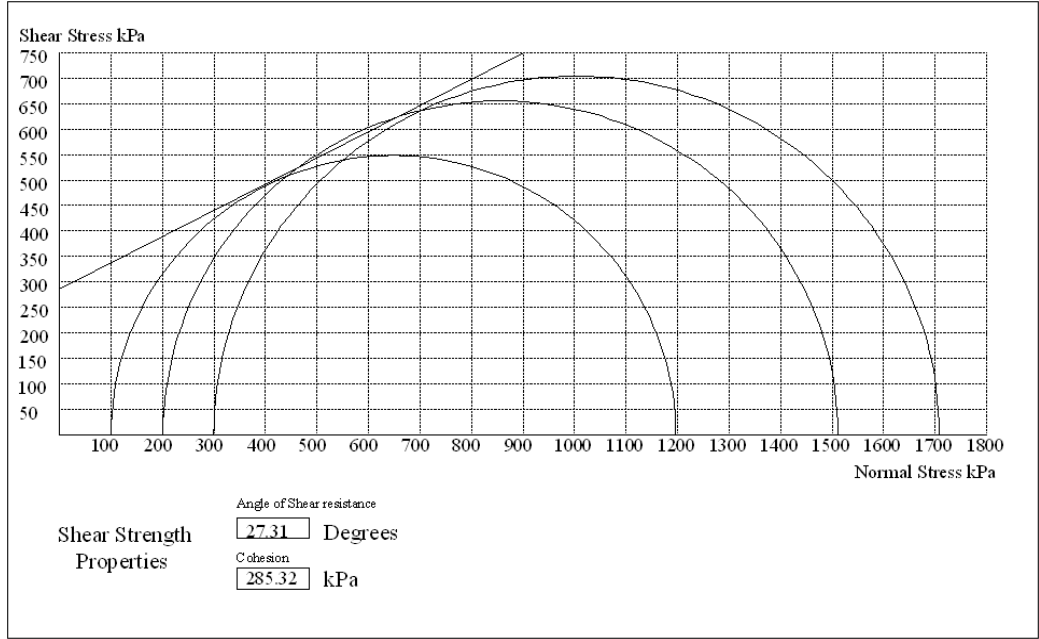
Şekil D.16. % 3 kireç katkıli zeminin 28 günlük kürlle elde edilen göçme zarfi.



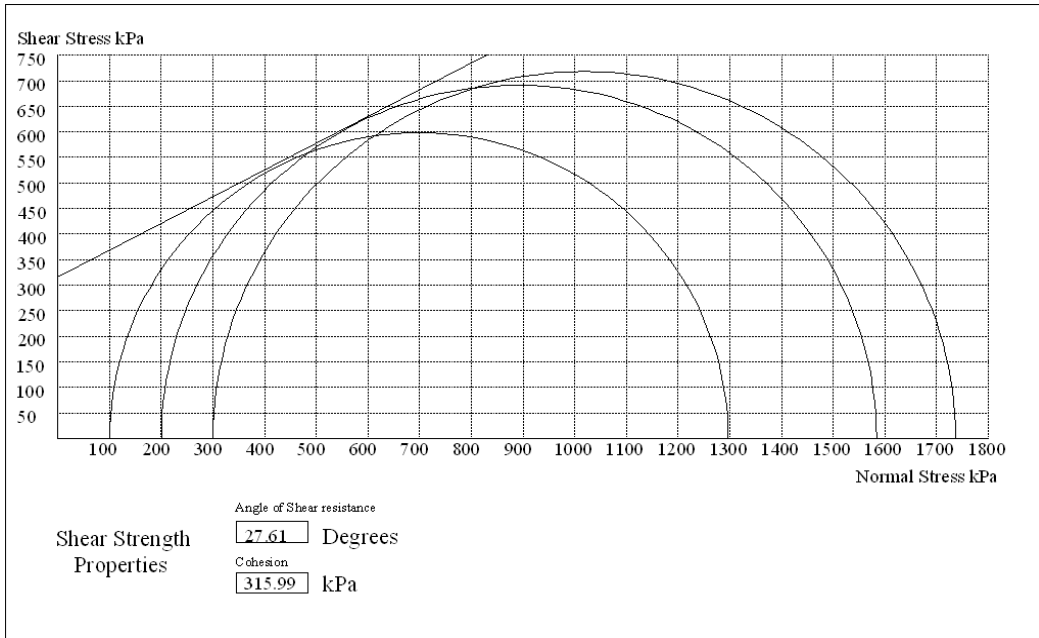
Şekil D.17. % 1 SD ve % 3K katkılı zeminin 28 günlük kütle elde edilen göçme zarfı.



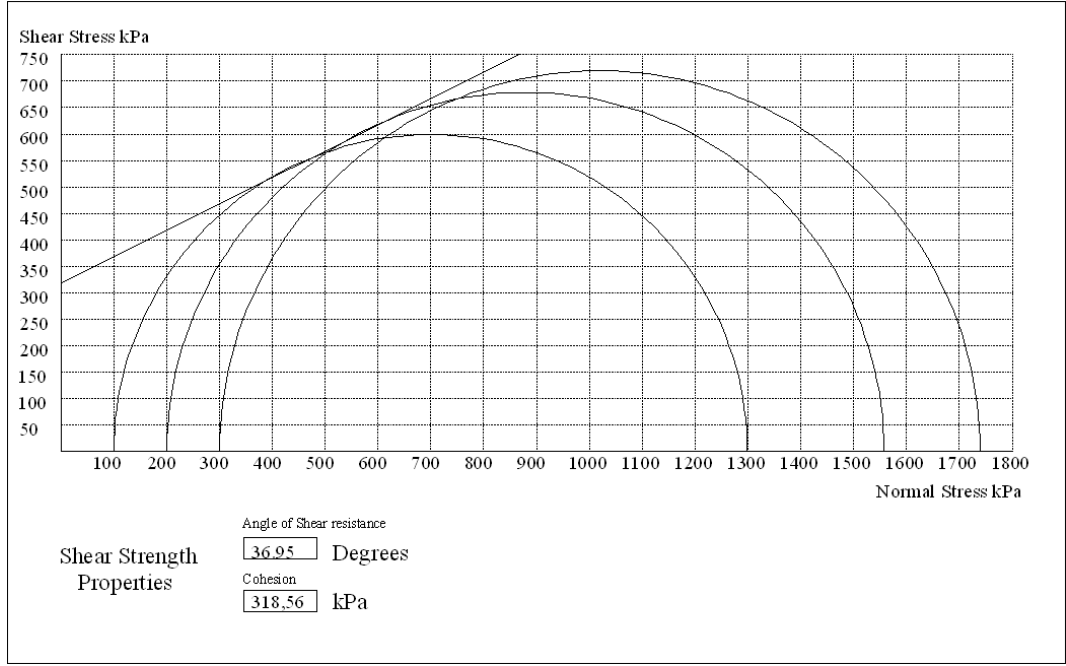
Şekil D.18. % 3 SD ve % 3K katkılı zeminin 28 günlük kütle elde edilen göçme zarfı.



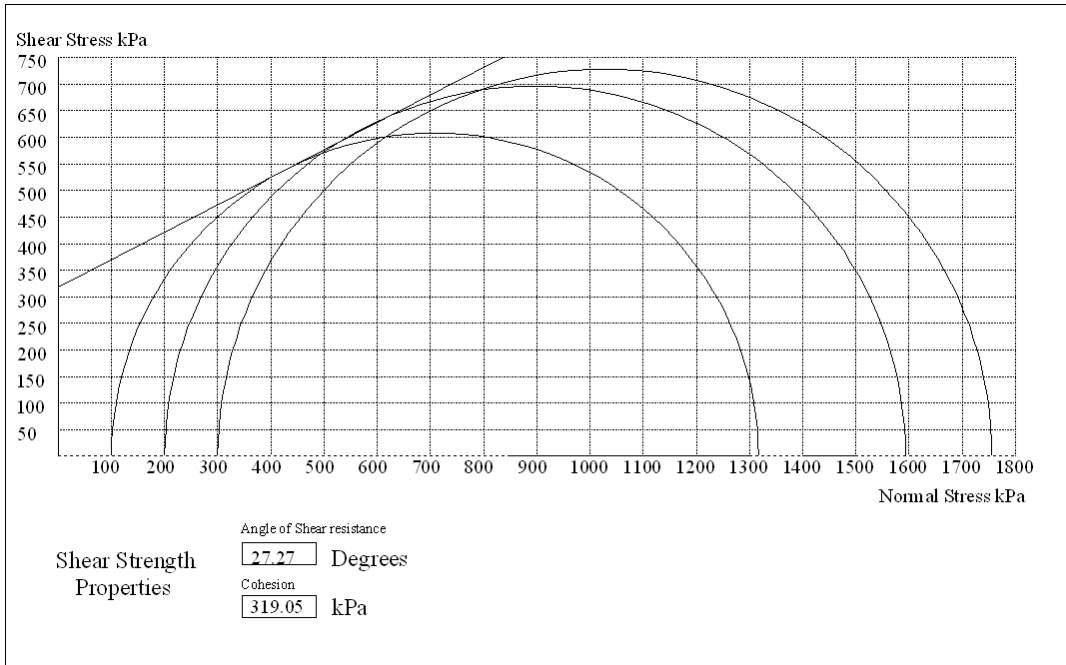
Şekil D.19. % 5 SD ve % 3K katkıli zeminin 28 günlük kürlle elde edilen göçme zarfi.



Şekil D.20. % 10 SD ve % 3K katkıli zeminin 28 günlük kürlle elde edilen göçme zarfi.



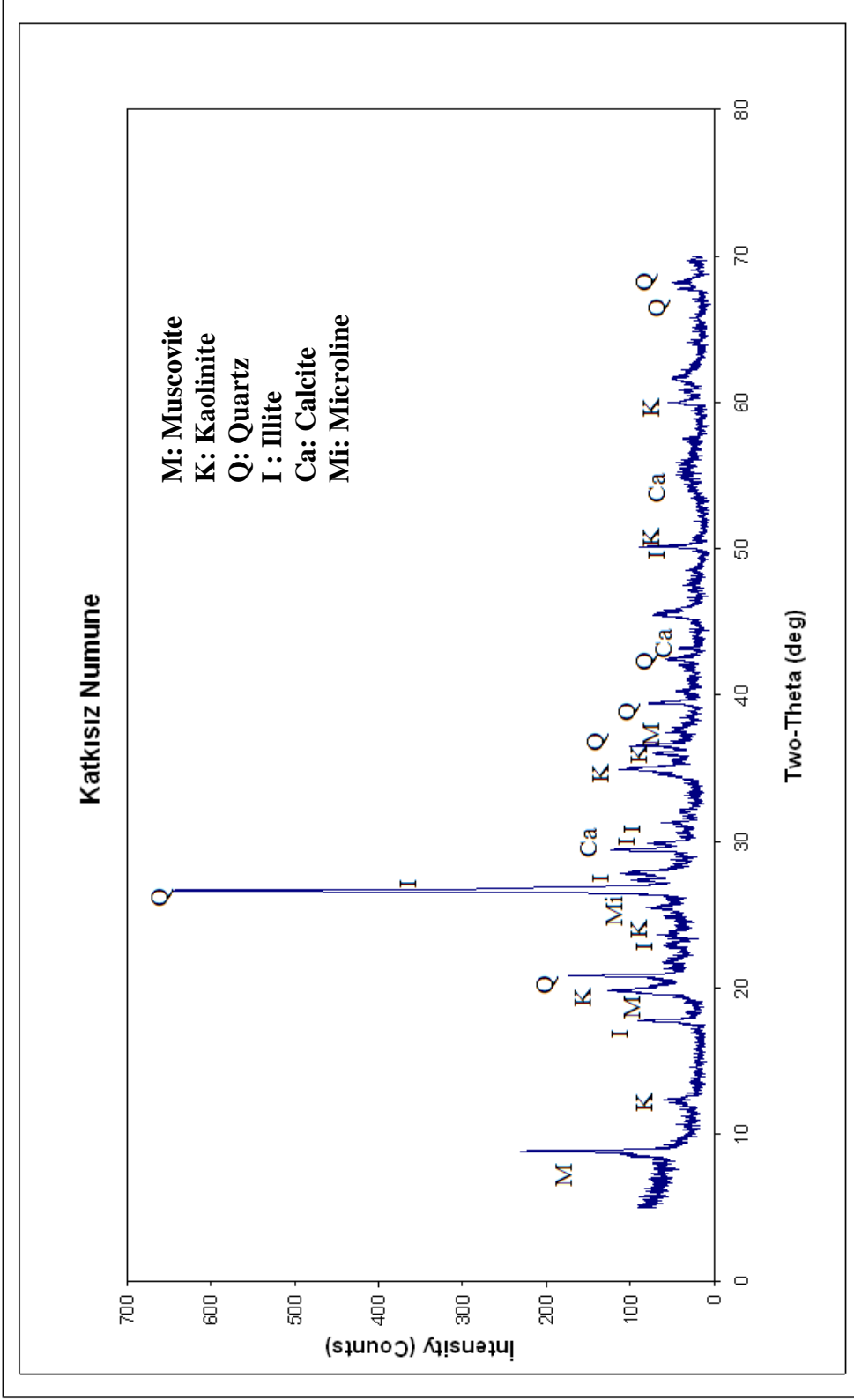
Şekil D.21. % 15 SD ve % 3K katkılı zeminin 28 günlük kürle elde edilen göçme zarfı.



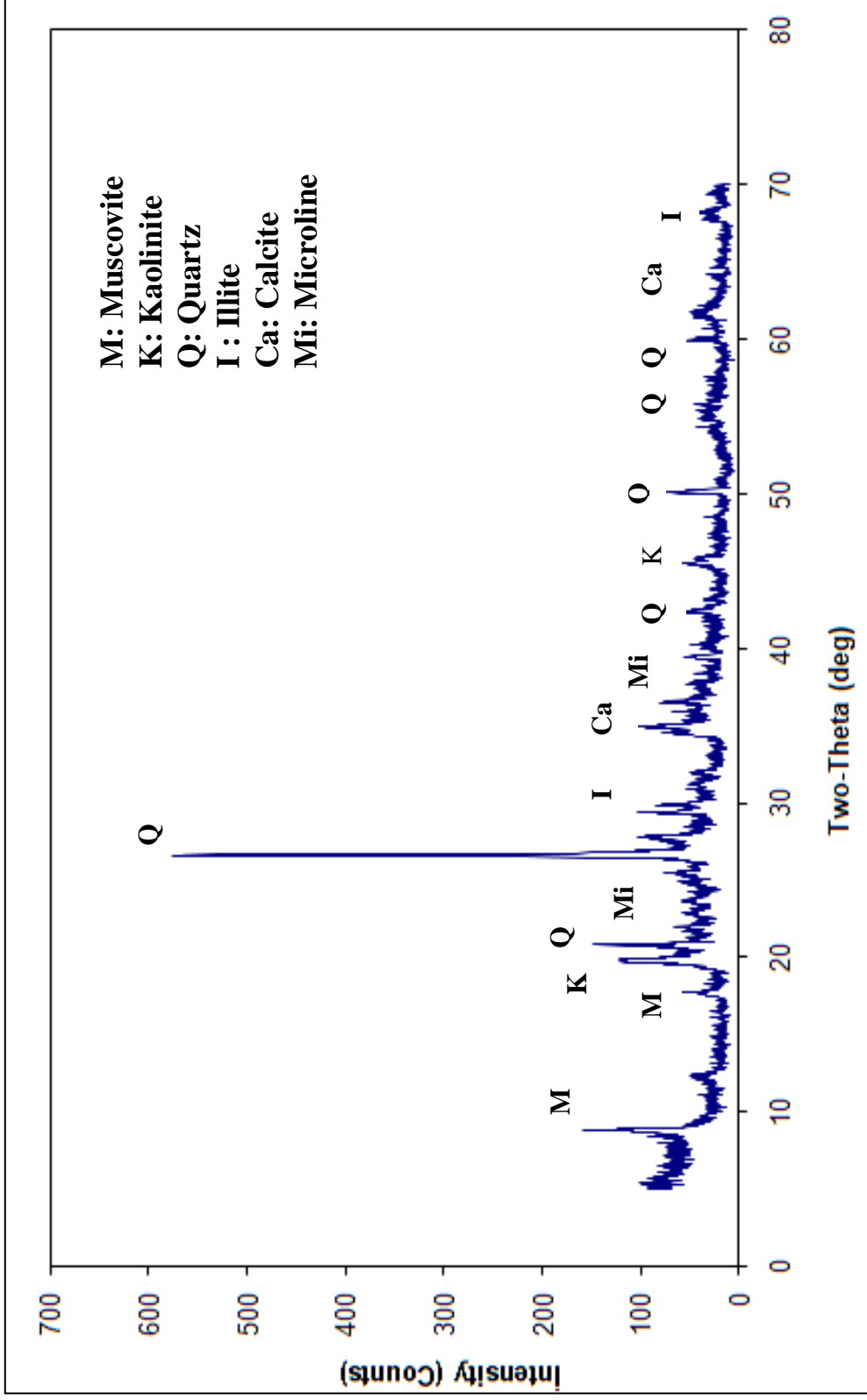
Şekil D.22 % 20 SD ve % 3K katkılı zeminin 28 günlük kürle elde edilen göçme zarfı.

EK E :

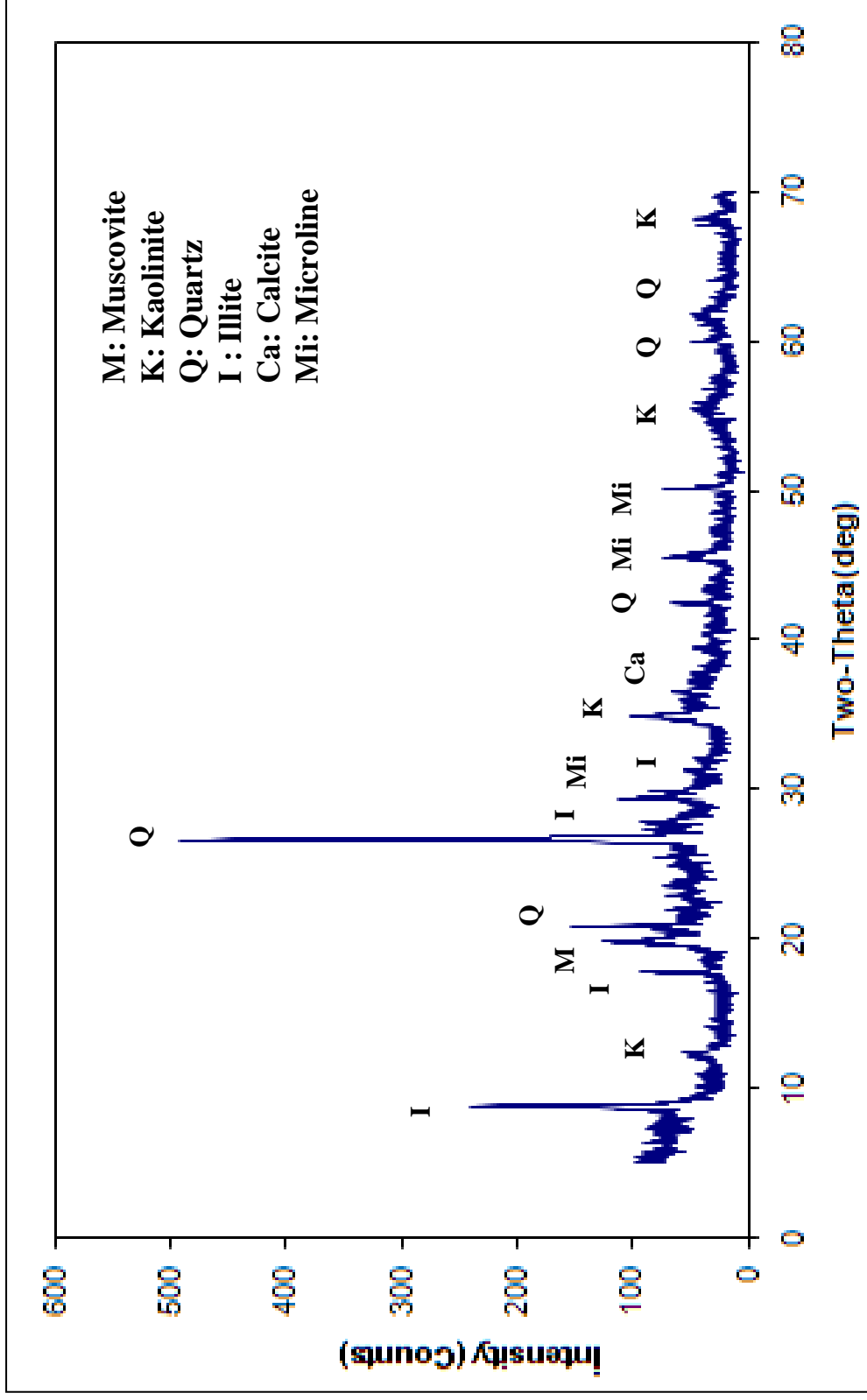
XRD ANALİZLERİ



Şekil E.1 Katkısız numunenin XRD analizi



Şekil E.2 %3 Kireç katkılı numunenin XRD analizi



Şekil E.3 %10 silis dumanı ve % 3 kireç katkılı numunenin XRD analizi