

İLLER BANKASI ANONİM ŞİRKETİ

**ŞİŞME POTANSİYELİ YÜKSEK KİLLERİN
KİMYASAL YÖNTEMLERLE İYİLEŞTİRİLMESİ**

Cihangir ŞAFAK

UZMANLIK TEZİ

HAZİRAN 2018



İL BANK
TÜRKİYE'NİN YAPICI GÜCÜ

İLLER BANKASI ANONİM ŞİRKETİ

**ŞİŞME POTANSİYELİ YÜKSEK KİLLERİN
KİMYASAL YÖNTEMLERLE İYİLEŞTİRİLMESİ**

Cihangir ŞAFAK

UZMANLIK TEZİ

Tez Danışmanı (Kurum)

Doğan TEZCAN

Tez Danışmanı (Ankara Üniversitesi)

Prof. Dr. Recep KILIÇ

Cihangir ŞAFAK tarafından hazırlanan “Şişme Potansiyeli Yüksek Killerin Kimyasal Yöntemlerle İyileştirilmesi” adlı tez çalışması aşağıdaki Yeterlik Sınav Kurulu tarafından OY BİRLİĞİ / OY ÇOKLUĞU ile UZMANLIK TEZİ olarak kabul edilmiştir.

	Unvanı	Adı ve Soyadı	İmzası
Başkan	Genel Müdür Yardımcısı	Salih YILMAZ	
Üye	Daire Başkanı	Hüseyin TÖREN	
Üye	Daire Başkanı	Hakkı ÇIRAK	
Üye	Daire Başkanı	Orhan IŞIK	
Üye	Daire Başkanı	DOÇ. DR. Birol KAYRANLI	

Tez Savunma Tarihi: 20.06.2018

ETİK BEYAN

"İLLER BANKASI ANONİM ŞİRKETİ Uzmanlık Tezi Yazım Kurallarına" uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Cihangir ŞAFAK
20 Haziran 2018

Şişme Potansiyeli Yüksek Killerin Kimyasal Yöntemlerle İyileştirilmesi

(Uzmanlık Tezi)

Cihangir ŞAFAK

İLLER BANKASI ANONİM ŞİRKETİ

Haziran 2018

ÖZET

Şişme ve büzülme potansiyeli yüksek killer su içeriğine bağlı olarak taşıma gücü, oturma, işlenebilme ve şev problemlerine neden olabilmektedir. Zeminlerin jeoteknik özellikleri ve karşılaşılabilecek problemler önceden belirlenerek gerekli iyileştirmelerin yapılması yapılarda meydana gelebilecek hasarların azaltılması bakımından önem taşımaktadır. Muhtemel problemlerin önceden belirlenmesi hasar kaynaklı ekonomik kayıpların azalmasını sağlayacaktır. Bu tez kapsamında şişen killerde meydana gelen hasarlar ve iyileştirme yöntemleri hakkında literatür araştırması yapılmış, farklı iyileştirme yöntemleri hakkında bilgi verilmiştir. Kimyasal yöntemle zemin iyileştirmeleri açıklanmış olup, özellikle kirecin farklı oranlarda katkı malzemesi olarak kullanımı ile yapılan iyileştirme uygulamalarının aşamaları, bulguları ve sağladığı faydalar açıklanmıştır. Araştırmalarda CH grubu killerde en uygun sonucun ağırlıkça yüzde 6 kireç katkısı ile elde edilebileceği belirtilmiştir.

Anahtar Kelimeler : Şişen kil, oturma, kimyasal iyileştirme, kireç
Sayfa Adedi : 63
Tez Danışmanı : Doğan TEZCAN (Kurum)
Prof. Dr. Recep KILIÇ (Ankara Üniversitesi)

Stabilization of Highly Potentially Expansive Clays by Chemical Methods
(ILBANK Expertise Thesis)

Cihangir SAFAK

ILLER BANKASI ANONIM SIRKETI

June 2018

ABSTRACT

Clays having high potential of volume expansion and shrinkage may create problems of bearing capacity, ground subsidence, workability and slope, depending on water content. Making necessary stabilization by predetermining geotechnical properties of soil and problems those would be encountered is of the essence in regard to decreasing structural damages. Prediction of possible problems will provide reduction in damage related economical lost. Within the scope of this thesis, literature research had been done with regard to damages take place on expansive clays and stabilization methods, various stabilization methods have been enlightened. Soil stabilization with chemical methods have been explained; stages, findings and rendered benefits of stabilization applications, specifically done with lime usage as an additive with varied proportions, have been explicated. In studies it is evidenced that the optimum results might have been received by six percent by weight lime addition within CH grouped clays.

Key Words : Swelling clay, settlement, chemical stabilization, lime
Page Number : 63
Supervisor : Dogan TEZCAN (Corporate)
: Prof. Recep KILIC (Ankara University)

TEŞEKKÜR

Uzmanlık tezi olarak hazırlanan bu çalışmada, yönlendirmeleriyle destek olan "Ankara Üniversitesi" Öğretim Üyesi Danışman Hocam Sayın Prof. Dr. Recep KILIÇ'a; çalışmam sırasında cesaretlendiren ve desteğini benden esirgemeyen "İller Bankası Anonim Şirketi"nden Danışmanım Teknik Uzman Sayın Doğan TEZCAN'a; tez hazırlama sürecinde destek olan Sayın Özkan AKPINAR'a ve diğer mesai arkadaşlarıma, anlayışı ve manevi desteği için eşim Yeliz ŞAFAK'a; varlığıyla bana güç veren oğlum Miraç Kağan ve kızım Miray İpek ile ömrüm boyunca beni hep destekleyen anne ve babama teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	vii
RESİMLERİN LİSTESİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
GİRİŞ	1
1. ZEMİN VE ÖZELLİKLERİ	3
1.1. Zemin ve Türleri.....	3
1.2. Şişen Zeminler Ve Özellikleri.....	5
1.2.1. Şişen kil minerallerinin kristal yapısı ve kil minerallerinin özellikleri	8
1.3. Şişme Mekanizması Ve Etkileyen Faktörler	12
1.3.1. Şişme mekanizması	12
1.3.2. Şişmeye etki eden faktörler	14
1.4. Kompaksiyon ve Konsolidasyon.....	18
1.5. İçsel Sürtünme Açısı	19
2. ZEMİNDE İYİLEŞTİRME KAVRAMI	21
2.1. Zemin İyileştirmenin Amacı ve Geçmişi	21
2.2. İyileştirme İle İlgili Önceki Çalışmalar.....	23
3. ŞİŞEN ZEMİNLERİ İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ.....	27
3.1. Mekanik İyileştirme	27
3.1.1. Kompaksiyonun kontrol edilmesi.....	27
3.1.2. Şişen zemini kaldırma ve yer değiştirme	28
3.2. Hidrolik İyileştirme	28
3.1.1. Ön ıslatma.....	28
3.1.2. Su muhtevası kontrolü	29
3.3. Donatı İle İyileştirme	29
3.4. Kimyasal Yöntemler (Katkı Maddeleri) İle İyileştirme	29
3.4.1. Çimento ile iyileştirme	31
3.4.2. Tuz ile iyileştirme	31
3.4.3. Uçucu kül ile iyileştirme.....	31
3.4.4. Bitüm ile iyileştirme	32
3.4.5. Organik bileşiklerle zemin ıslahı.....	32
3.5 Diğer Yöntemler.....	32
4. KİREÇ İLE ZEMİN İYİLEŞTİRMESİ.....	35
4.1. Kireç Hammaddesi ve Üretimi.....	36
4.2. Kil - Kireç Birleşiminde Meydana Gelen Fiziksel Olaylar	37
4.3. Kil - Kireç Birleşiminde Meydana Gelen Kimyasal Olaylar	38
4.4. Kireç İle İyileştirme - Uygulama Esasları.....	40
4.5. Kireç İle İyileştirme - Uygulama Bulguları	44

SONUÇ VE ÖNERİLER.....	55
KAYNAKLAR.....	57
ÖZGEÇMİŞ.....	63

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. USCS Birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemi	4
Çizelge 1.2. Bazı kil minerallerinin karşılaştırmalı genel özellikleri	12
Çizelge 1.3. Zeminlerin LL özelliğine göre sınıflaması	16
Çizelge 1.4. Şişme potansiyeli ve plastisite indisi	16
Çizelge 1.5. Şişmeye etki eden faktörler	17

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Silis tetraeder ve Silisyum tabakası	8
Şekil 1.2. Alüminyum oktaeder ve Alüminyum tabakası	8
Şekil 1.3. Kaolinit mineralinin yapısı	9
Şekil 1.4. İllit mineralinin yapısı	10
Şekil 1.5. Montmorillonit mineralinin yapısı	11
Şekil 1.6. Şişme mekanizması	13
Şekil 1.7. Zeminlerde su içeriği - hacim ilişkisi	15
Şekil 1.8. Şişme yüzdesi - sürşarj yük ilişkisi.....	17
Şekil 4.1. %5 kireçli karışımda, yaş CBR değerlerinin kür süresi ile değişimi	45
Şekil 4.2. %5 kireçli karışımda, kuru CBR değerlerinin kür süresi ile değişimi	45
Şekil 4.3. Arazi CBR değerleri	46
Şekil 4.4. Karşılaştırmalı plaka yükleme deneyi sonuçları	47
Şekil 4.5. Karşılaştırmalı yatak katsayısı değerleri	47
Şekil 4.6. Karşılaştırmalı maksimum ve kalıcı oturma değerleri	48
Şekil 4.7. Stabilize dolgu üretimi ve sönmüş toz kireç karışımı.....	50
Şekil 4.8. Şişme Yüzdesinin Değişen Kireç Oranlarında Zamana Bağlı Değişimi	52
Şekil 4.9. Şişme Basıncının Değişen Kireç Oranlarında Zamana Bağlı Değişimi	52
Şekil 4.10. Tek Eksenli Basınç Dayanımının Kireç ve Zamana Bağlı Değişimi	53

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 1.1. Tek ve çift katlı yapılarda şişmeye bağlı olarak oluşan çatlamlar	6
Resim 1.2. Zeminde şişme ve oturmanın yollarda oluşturduğu zararlar	7
Resim 4.1. Rotil ile karıştırılan zemin	41
Resim 4.2. Zemine torbalardan ve kireç serme makinesiyle kireç serilmesi	42
Resim 4.3. Greyder ile karıştırma	43
Resim 4.4. Kireçli karışımın sulanması	43
Resim 4.5. Silindir ile sıkıştırma	44

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
Å	Angstrom
Al	Alüminyum
Ca	Kalsiyum
CaCl	Kalsiyum klorür
CaCO₃	Kalsiyum karbonat
CaO	Kalsiyum oksit
Ca(OH)₂	Kalsiyum hidroksit
CBR	Kaliforniya Taşıma Kapasitesi
CH	Yüksek plastisiteli kil
CL	Düşük plastisiteli kil
cm.	Santimetre
gr	Gram
K	Potasyum
Kpa	Kilo paskal
LL	Likit limit
lt	Litre
meq	Miliekivalen
Mg	Magnezyum
MgCO₃	Magnezyum karbonat
MH	Yüksek plastisiteli inorganik silt
ML	Düşük plastisiteli inorganik silt
mm.	Milimetre
Mpa	Mega paskal
mt.	Metre
Na	Sodyum
NaCl	Sodyum Klorür
O	Oksijen
OH	Hidroksit

P_c	Prekonsolidasyon basıncı
PI	Plastisite indisi
PL	Plastik limit
P_o	Efektif örtü yükü
Si	Silisyum
SI	Büzülme indisi
SL	Büzülme limiti
sn	Saniye
\$	Amerikan doları
V	Hacim
%	Yüzde
°C	Santigrat derece
µm	Mikron (mikrometre)
@P	Zemine aktarılan ek yükün toplamı
Δσ'	İlave gerilmeler
ΔH	Oturma

Kısaltmalar

A.Ş.

KDK

TL

USCS

Açıklamalar

Anonim Şirketi

Katyon değişim kapasitesi

Türk Lirası

Birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemi

GİRİŞ

Şişen killeri bünyesinde barındıran zeminler, şişme potansiyeli olan zeminler grubuna girmekte olup su içeriğine bağlı olarak büzülme ve şişme ile hacimsel değişimler göstererek yapılarda hasarlara neden olmaktadır. Bu hasarlara engel olunabilmesi için, yapının inşa edileceği zemin türünün doğru tespit edilmesi ve şişme özelliği gösteren kil muhteva edip etmediğinin tespiti büyük önem taşımaktadır. Bu tür zeminlerin ihtiva ettiği kil grupları, kendini oluşturan minerallerin karakteristik davranışlarını taşımakta olduğundan ilk olarak mineral tiplerinin tespit edilerek zeminin kıvam özellikleri, diğer fiziksel ve kimyasal özellikleri incelenmeli ve davranışları önceden belirlenmelidir. Zemin iyileştirme yöntemlerinden doğru olanı, tasarım ve planlama aşamalarında zeminin özellik ve davranışlarına göre seçilmelidir.

Bu tez çalışması İller Bankası A.Ş. (Anonim Şirketi) kurumunda ilgili yönetmelik gereğince, Teknik Uzman Yardımcılığından Teknik Uzmanlığa yükselebilmek kapsamında hazırlanmış olup, bu tez konusunun amacı şişen killere içeren zeminlerin farklı katkı maddeleri ile iyileştirilmesi hakkında bilgi vermektir. Bu tezin hazırlanmasında ulusal ve uluslararası yayınlardan yararlanılmıştır.

İlk bölümde teorik bilgiler verilmiş; zeminlerin sınıflandırılması, şişen zeminlerin özellikleri, şişmeye sebep olan kil minerallerinin yapısı ve özellikleri, şişmenin nasıl meydana geldiği, şişmeye neden olan faktörler, şişme ve oturma ilişkisi hakkında genel bilgi verilmiştir.

İkinci bölümde ise, iyileştirme kavramı irdelenmiş, şişen zeminlerle ilgili hem ülkemizde hem de uluslararası literatürde daha önce yapılan teorik ve uygulamalı çalışma ve yayınlar incelenerek, elde edilmiş bulgular özet olarak ortaya konmuştur.

Üçüncü bölümde; mekanik iyileştirme, hidrolik iyileştirme, donatı ile iyileştirme ve katkı maddeleri ile iyileştirme yöntemleri ve çeşitleri hakkında bilgi verilmiştir.

Son bölümde ise kireç ile iyileştirme üzerinde durulmuştur. Kireç hammaddesi ve üretimi kısaca açıklanmış, kile kireç katılması durumunda meydana gelen fiziksel ve kimyasal değişim anlatılmıştır. Kireç ile iyileştirmenin uygulama esasları verildikten sonra daha önce yapılan çalışmaların sonuçları ışığında kireç uygulamasının hangi oranlarda

hangi olumlu etkileri olduğu ve diğer iyileştirme yöntemlerine göre avantajları açıklanmıştır.

Kireç ile killi zeminlerin iyileştirme uygulaması gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde geçmişten beri başvuru olan bir yöntem olmasına rağmen, ülkemizde sınırlı sayıda uygulama görölmektedir. Sonuçları itibariyle başarılı olan bu çalışmaların bulguları derlenip bir araya getirilmiştir. Böylelikle, şişen zeminlere ilgili şantiyelerde karşılaşılabilecek sorunların pratik ve ekonomik çözüm yolları tanıtılmış olacaktır.

1. ZEMİN VE ÖZELLİKLERİ

1.1. Zemin ve Türleri

Zemin, çakıl, kum, silt ve kilden oluşan çimentosuz tortul kayadır. Kayaçların ayrışması, aşınarak parçalanması, taşınması ve depolanması ile oluşur. Oluşumlarına göre yapay (dolgu), rezidüel (kalıntı) ve taşınmış zeminler olarak üç gruba ayrılır. Taşınmış zeminler en yaygın olarak yapı temelinde bulunan ve yapı malzemesi olarak kullanılan gruptur. İnşaat ve Jeoloji mühendisliğinin araştırma konusunu oluşturur (Kılıç, 2017:8).

Çakıl ve kum gibi iri daneli zeminler ile kil gibi ince daneli zeminlerin biçimlerinin birbirinden farklı oldukları gözlenmektedir. Dolayısıyla, zeminler tane boyunun esas alındığı USCS (Birleşik Zemin Sınıflandırma Sistemi)'ne göre sınıflandırılır. Dane boyu 0,074 mm. (milimetre) ile 4,75 mm. arasındaki kum ile 4,75 mm. ile 75,4 mm. arasındaki çakıl kohezyonsuz zeminler olup iri daneli olarak tanımlanır. USCS'ye göre 200 Nolu (<0,075 mm.) eleğin altına geçen zemin kısmı ince taneli zeminler olarak tanımlanmaktadır. Boyut olarak çok küçüktürler ve ancak mikroskop altında incelenebilmektedir. Kalınlıkları, diğer boyutlarına göre çok azdır. Görünüm olarak ince bir plakayı benzemektedir. İnce taneli zeminler silt ve kil birimlerinden oluşmaktadır.

0,074 mm.'den küçük tane dane çapına sahip kohezyonlu zeminlerin sınıflaması plastisite kartına göre belirlenir. Atterberg limitlerine göre sınıflandırma yapıldığında killer jeoteknik özellik olarak ve CL (plastisitesi düşük kil) ve CH (plastisitesi yüksek kil) olarak sınıflandırılır (Çizelge 1.1). Bu tür killer şişme potansiyeline sahiptir.

Killer, alüminyum silis ve diğer bazı elementlerden oluşur, kohezif ve plastik özelliklere sahiptir. Kuruma - ıslanma ile büzülüp şişer. Kil mineralleri elektrokimyasal olarak çok aktiftirler.

Kil mineralinin zemin kütlesi içinde az miktarda dahi bulunması, zeminin mühendislik özelliklerini etkilemektedir. Zemin içerisinde kil miktarı arttıkça, zemin davranışında kilin özellikleri baskın hale gelmeye başlar.

Çizelge 1.1. USCS (Birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemi) (ASTM, 1992)

Ana Bölümler		Grup Simgeleri	Tipik Adlama	Laboratuvar Sınıflama Ölçütleri			
İri Taneli Zeminler	Çakıllar (İri taneli malzemenin yarıdan fazlası 4 nolu elek açıklığından daha büyük)	İri malzemeli çakıl	GW	İyi derecelenmiş çakıl, çakıl kum karışımı, ince malzeme çok az ya da hiç yok	Cu > 4 ve Cz 1 ve 3 arasında		
			GP	Kötü derecelenmiş çakıl, çakıl kum karışımı, ince malzeme çok az ya da hiç yok	GW için gerekli olan derecelenme / granülometri koşullarının hiçbirini karşılamaz.		
		İri malzemeli çakıl	GM	Siltli çakıl, Çakıl-kum-silt karışımı	Atterberg limitleri "A" çizgisinin altında veya PI < 4	"A" çizgisinin üstünde ve PI 4 'le 7 arasında sınır zonunu oluşturur. Her iki simge (GM ve GC) birlikte kullanılır.	
			GC	Killi çakıl, çakıl-kum-silt karışımı	Atterberg limitleri "A" çizgisinin üstünde ve PI > 7		
	Kumlar (İri taneli malzemenin yarıdan fazlası 4 nolu elek açıklığından daha büyük)	İri malzemeli kum	SW	İyi derecelenmiş kum, çakıllı kum, ince malzeme çok az ya da hiç yok	Cu > 6 ve Cz 1 ve 3 arasında		
			SP	Kötü derecelenmiş kum, çakıllı kum, ince malzeme çok az ya da hiç yok	SW için gerekli olan derecelenme / granülometri koşullarının hiçbirini karşılamaz.		
		İri malzemeli kum	SM	Siltli kum, kum-silt karışımı	Atterberg limitleri "A" çizgisinin altında veya PI < 4	Taraflı zon içinde ve PI 4 ile 7 arasında sınır zon oluşturur.	
			SC	Killi kum, kum-kil karışımı	Atterberg limitleri "A" çizgisinin üstünde ve PI > 7		
İnce Taneli Zeminler	Siltler ve Killler (Likit Limit 50'nin altında)	ML	İnorganik silt ve çok ince kum, kayaç unu, siltli veya killi ince kum veya plastisitesi düşük killi silt				
		CL	Plastisitesi düşük veya orta İnorganik kil, çakıllı kil, kumlu kil, siltli kil, zayıf kil				
		OL	Organik silt ve plastisitesi düşük organik siltli kil,				
	Siltler ve Killler (Likit Limit 50'nin üstünde)	MH	İnorganik silt mikali veya diyetemelli, ince kumlu veya siltli toprak, elastik silt				
		CH	Plastisitesi yüksek inorganik kil, şişen kil				
		OH	Plastisitesi orta veya yüksek organik kil, organik silt				
	Organik Zeminler	Pt	Turba ve oldukça organik diğer zeminler				

1.2. Şişen Zeminler ve Özellikleri

Genel bir ifade ile bünyesine su aldığında hacminde artış, bünyesinden su uzaklaştırıldığında ise hacminde azalma gözlenen zeminler şişen zeminler olarak tanımlanır. Zemin bünyesinde başlıca yer alan kil minerali, kilin şişme-büzülme ve mühendislik davranışını etkiler.

Killer diğer minerallerin değişim geçirmesi ile oluşur. Mika, feldispat ve kalker gibi malzemelerin kimyasal olarak aşınması ile kil mineralleri oluşabilmektedir. Mineral oluşumu ana kaya yapısı, topografya, iklim, bitki örtüsü, aşınma ve diğer faktörlere bağlıdır.

Killer doğada kaya veya toprak formunda bulunurlar. Kaya benzeri davranış sergileyen killer, birkaç aydan 70 yıla kadar uzanan bir süreçte toprak benzeri şekle geçebilirler. Çok katlı silikatlar, metal iyonlarını, su moleküllerini ve diğer maddeleri içine çekme ve değiştirme yetenekleri sayesinde, aşınmaları, toprak kimyasını ve biyolojik mineralizasyon döngülerini etkilemektedir (Atalar ve Kılıç, 2006:2).

Şişen zeminlerin su muhteviyatı mevsimlere bağlı olarak yağışın etkisi ile artıp, azalır. Şişmenin etkisi ile hacim değişikliği, hacim değişikliğinin de sonucu olarak hem üstyapı hem de altyapı tesislerinde yapısal zararlar oluşmaktadır (Resim 1.1 ve 1.2).

Şişen killerin yarattığı problemlerinin çoğu, kışın genişleyen ve yaz aylarında büzülen toprak nedeniyle kurak ve yarı kurak bölgelerde sürekli olarak görülür. Hacim değiştiren kil mevcudiyeti dünya geneline yayılmış olmakla beraber, doğal afet nedenli oluşan zararların maliyeti en yüksek olanlarından sorumludurlar.



(a)



(b)

Resim 1.1. Tek (a) (Demir ve Kılıç, 2010:96) ve çift katlı (b) (Milligan, 2014) yapılarda şişmeye bağlı olarak oluşan çatlamlar



(a)

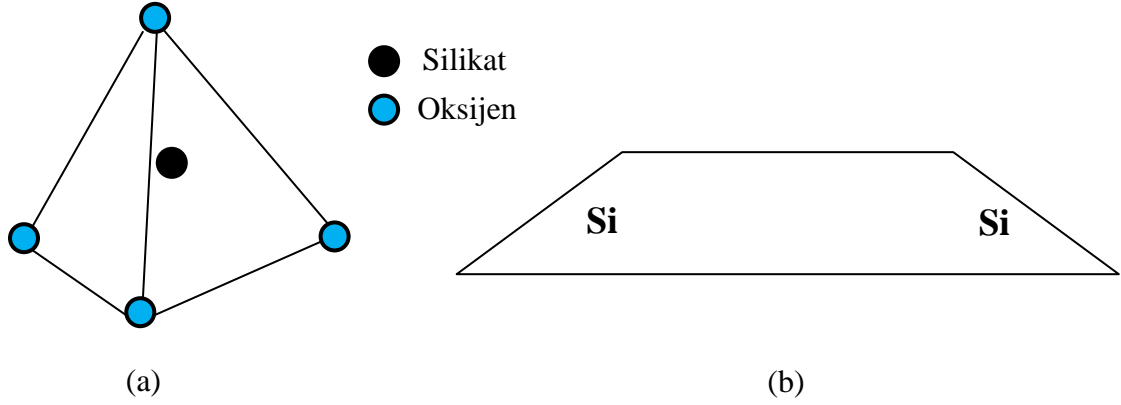


(b)

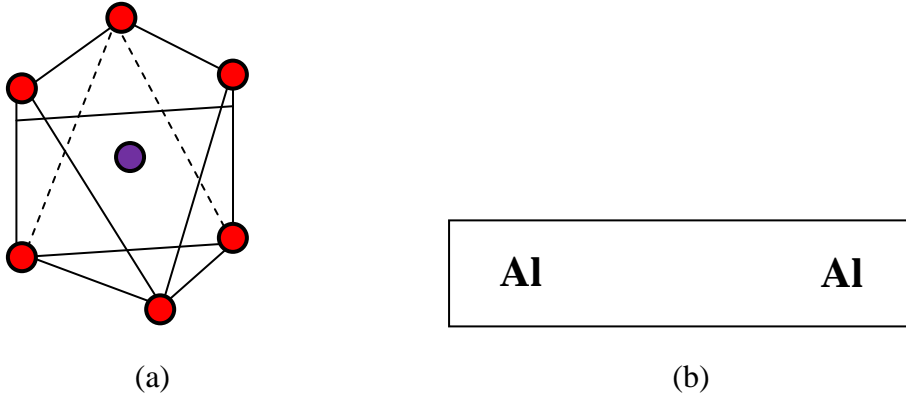
Resim 1.2. Zemindeki şişme ve oturma'nın yollarda oluşturduğu zararlar (a) (Demir ve Kılıç, 2010:96), (b) (Bozkurt, 2014: 33)

1.2.1. Şişen kil minerallerinin kristal yapısı ve kil minerallerinin özellikleri

Killerin bileşimi sulu alüminyum silikattır. Kil bileşimindeki SiO_2 tetraeder ve Al_2O_3 oktaeder halindedir. Bunların çeşitli şekillerde birleşerek meydana getirdiği kil mineralleri Şekil 1.1 ve Şekil 1.2'de gösterilmiştir (Kılıç, 2017:9).



Şekil 1.1. (a) Silis tetraeder (b) Silisyum tabakası (Kılıç, 2017:10)



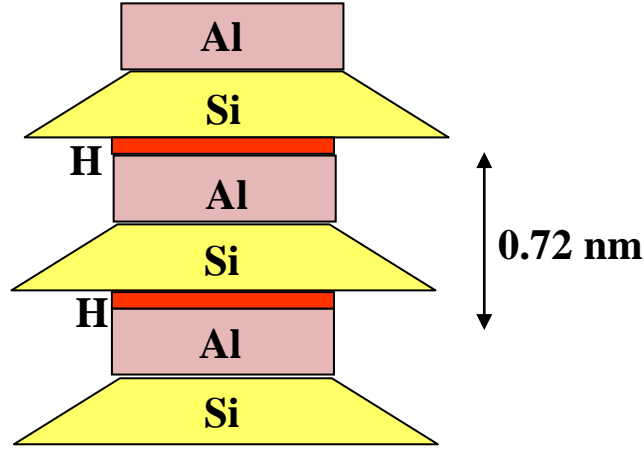
Şekil 1.2. (a) Alüminyum oktaeder, (b) Alüminyum tabakası (Kılıç, 2017:10)

Başlıca kil grupları kaolinit, illit, ve montorillonitdir.

Kaolinit grubu kil minerallerinin yapısı

Kaolinit kil mineralleri tropik ve astropik alanlarda granit, gnays, diyorit gibi bileşimi Al_2O_3 , 2SiO_2 $2\text{H}_2\text{O}$ olan feldispatça zengin magmatik kayaların aşınması neticesinde oluşur (Genç, 2009:24). Ayrıca hidrotermal çözeltilerin etkisiyle uygun koşullarda kendiliğinden de oluşabilirler (Öztürk, 2012:6). Seramik porselen sanayisinin hammaddesidir. Kaolinit kristalleri levha şeklinde olup birbirini takip eden ve kalınlığı 72 Å (Angstrom) olan Si ve Al (Alüminyum) tabakaları şeklindedir ve tabakalar arasında

hidrojen bağları ile Van Der Waals bağları bulunur (Şekil 1.3). Bu kuvvetli bağlardan dolayı tabakalar arasına su kolayca giremez ve şişme ve büzülme gibi hacim değişikliklerini az miktarda gösterir.



Şekil 1.3. Kaolinit mineralinin yapısı (Kılıç, 2017:10)

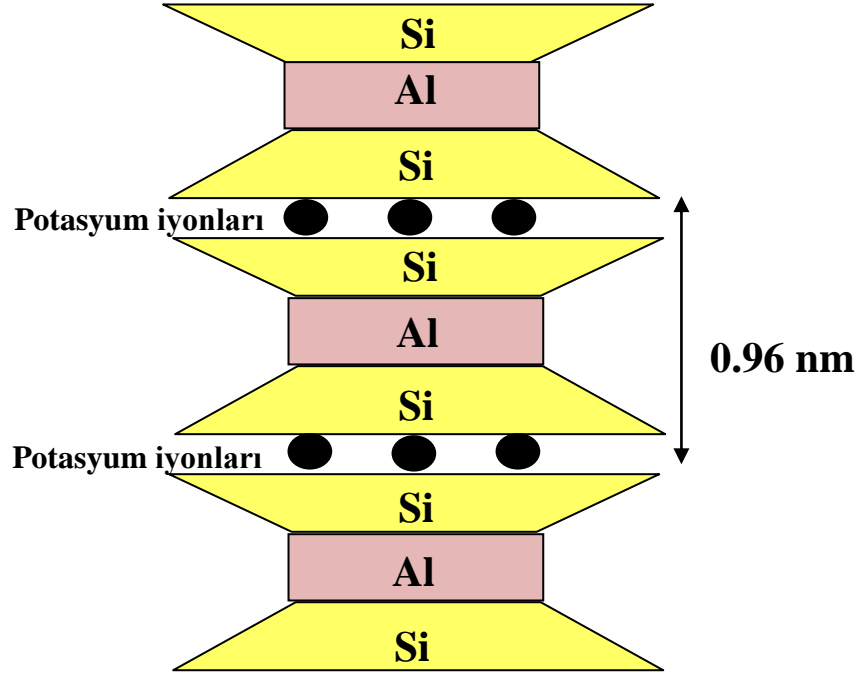
Kaolinitlerin, diğer kil minerallerine göre kohezyon, plastiklik özellikleri de oldukça zayıftır. Bir katman iki tabakanın bir tanesinden oluştuğundan 1:1 kil minerali olarak gösterilir. Kalınlığı da 100 - 1000 Å, yanal boyutları ise 1000 - 20000 Å arasında değişmektedir. Katyon değişim kapasitesi diğer kil minerallerine göre düşük olmaktadır (3-15 meq/100gr).

İllit grubu kil minerallerinin yapısı

Yapısal olarak mikaya benzer bir kil mineralidir. İki tetrahedral tabakasının arasında sıkışan oktahedral tabaka şeklindedir. Kristal yapısı 2:1 olarak gösterilir. Sıcak ve kuraklık yaşayan alanlarda çökelti kayaların aşınması ile oluşur (Genç, 2009). Bazı çözeltilerde çökelti olarak oluşabilir ya da Feldispat veya mikanın ayrışması ile oluşur.

Yapısı montmorillonit ile çok yakındır ancak tane boyutu daha büyüktür. Yapı blokları arasına giren K (potasyum) iyonları hem köprü vazifesi görür hem de aradaki bağın daha da kuvvet kazanmasına olanak verir. Böylelikle su moleküllerinin bloklar arasına penetre etmesi önlenmiş olup, mineralin su ile karşılaşması durumunda Montmorillonit gibi şişme yerine genişleme gösterir.

İllit'lerin mineralojik yapısı Şekil 1.4'te gösterilmektedir. İllit mineralleri, moleküler düzeyde ise zayıf bağlarla bağlanmıştır (Başer, 2009:7).

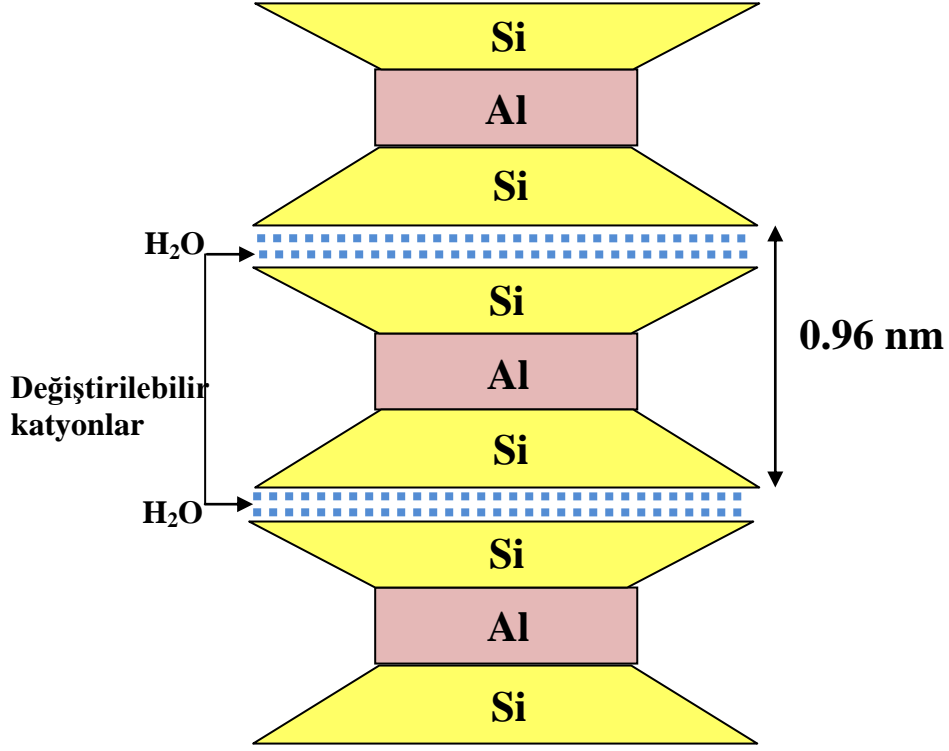


Şekil 1.4. İllit mineralinin yapısı (Kılıç, 2017:10)

Montmorillonit grubu kil minerallerinin yapısı

Montmorillonit magmatik kayalarda ve volkan küllerinde ferromagnezyum minerallerinin ve kireçli feldispatların ayrışma ve aşınması sonucu oluşur. Kalsiyum montmorillonit ve sodyum montmorillonit (bentonit olarak da bilinir) olmak üzere iki çeşidi vardır. Bentonit daha fazla şişme özelliği gösterir ama daha az yaygındır (Atalar ve Kılıç, 2006:3).

Genellikle kuru ve gün içi sıcaklık farkının çok olduğu çöl iklimlerinde illit ile beraber bulunur. Montmorillonitin tabakaları, K iyonu dışında illitle oldukça benzerdir. Esas olarak smektit grubu olarak da adlandırılır ve 2 tetrahedral tabaka arasına sıkışan 1 oktahedral tabakadan oluşmaktadır. Doğada plaka formunda bulunur. Özgül yüzeyi diğer kil minerallerinkine göre oldukça büyüktür. Boşluklar arasındaki zayıf Van der Waals bağlarıyla bağlanmış tabakalar değişebilir katyonlar ve su molekülleri tarafından doldurulmuş olup absorbe edilen ilave su içeriğine bağlı olarak şişme meydana gelir (Başer, 2009:7). Montmorillonit'lerin mineralojik yapısı Şekil 1.5'te gösterilmektedir (Angın 2005:5).



Şekil 1.5. Montmorillonit mineralinin yapısı (Kılıç, 2017:10)

En yüksek hacim değişimi montmorillonit grubu killerde görülmektedir (Atalar ve Kılıç, 2006:3). Montmorillonitler, kendi yapısal büyüklüğünün onlarca katı kadar suyu tabakalarında ev sahipliği yapabildiğinden yüksek plastiklik ve kohezyon özelliği barındırır (Z. Angın, A. Angın, 2005:10). Örneğin bentonit % 500'e kadar su alabilmekte ve yüksek hacimsel değişim ortaya koyabildiğinden suya geçirimsiz zemin ihtiyaçlarına çözüm olarak; bent baraj gibi su tutucu mühendislik yapılarında sızdırmazlık malzemesi olarak, kuyu çökmelerini engellediğinden sondaj çamuru olarak kullanılabilir. Öte yandan, yol ve tünel inşaatlarında bu mineraller ile karşılaşılması problem oluşturmakta ve tedbir alınması gerekmektedir.

Montmorillonit su ile karşılaşması durumunda düşük içsel sürtünme ve yüksek plastisite gösterir. Diğer yandan kuruması durumunda ise çok fazla çatlama büzülme meydana gelir.

Montmorillonit, illit ve kaolinit killерinin genel özellikleri Çizelge 1.2'de özetlenmiştir.

Çizelge 1.2. Bazı kil minerallerinin karşılaştırmalı genel 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 /gr)	70 - 120	70 - 100	10 - 30
İç Yüzey Alanı (m ² /gr)	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 Yükü	0,5 - 0,9	1,0 - 1,5	0
KDK	80 - 150	10 - 40	3- 15
Özgül Gravite	2,35 - 2,70	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 Waals bağlarıyla (zayıf çekim kuvveti)	Potasyum İyonları	Hidrojen
Net Negatif Yük	80 - 120	15 - 40	2- 5

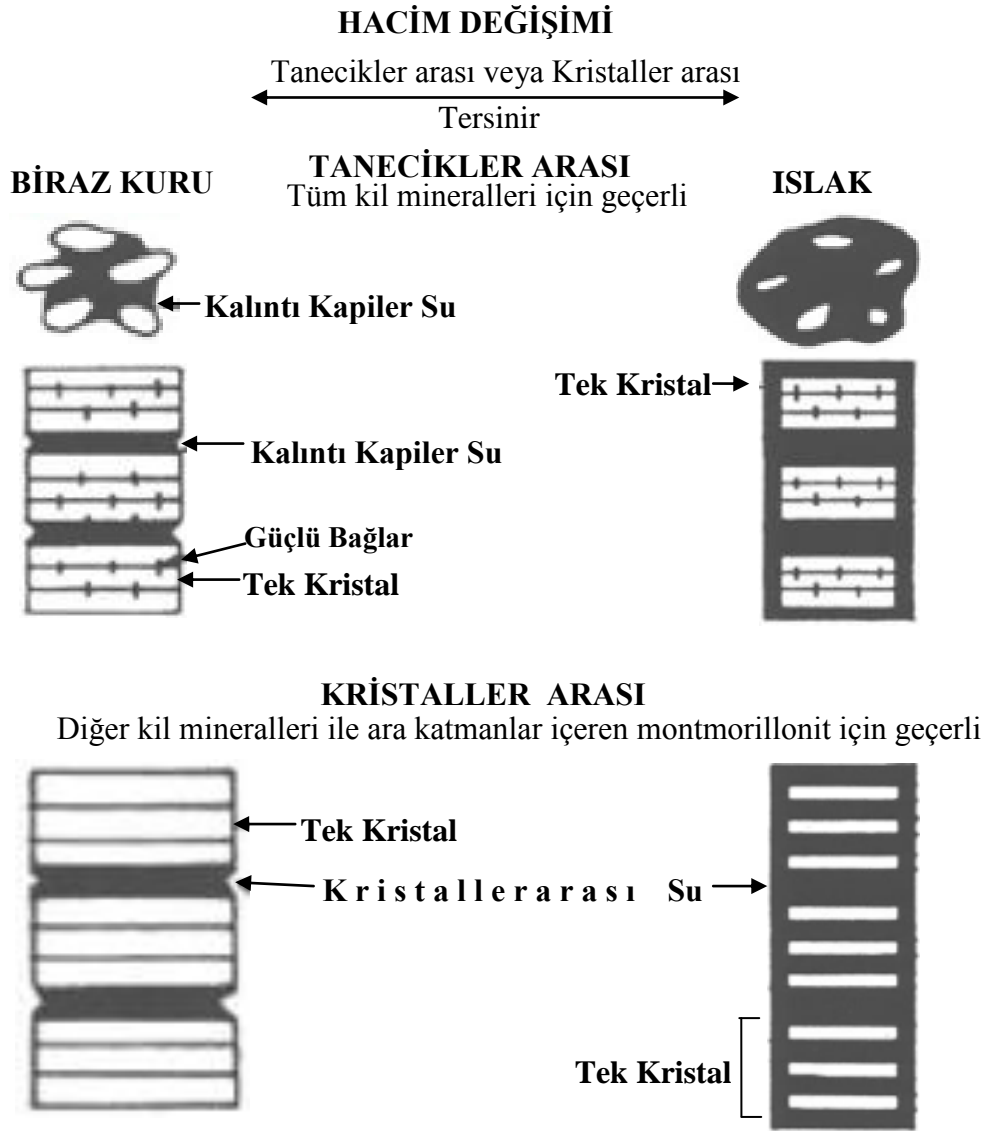
Çizelge 1.2'den görüleceği üzere kil mineralleri özgül yüzeyleri fazla olan minerallerdir. Ayrıca, su tutma kapasiteleri de oldukça büyüktür.

Şişme, esas olarak kil mineralinin tipi ve miktarına, kil parçacıklarının yüzey alanlarına ve partiküller etrafında bulunan zemin suyunun özelliklerine bağlıdır. Montmorillonit'i fazla miktarlarda bünyesinde barındıran zeminlerde hacimsel değişimler kaçınılmaz olup, montmorillonitli mineralleri barındıran zeminlerin inşaat malzemesi olarak tercih edilmemesi gerekmektedir (Angın, 2005:15).

1.3. Şişme Mekanizması ve Etkileyen Faktörler

1.3.1. Şişme mekanizması

Kum zemin içinde su, boşlukları doldururken önemli bir hacim değişikliği olmamakta ama kil zeminlerde bu durum genellikle hacim artışı ile sonuçlanmakta ve şişme görülmektedir. Şişme, tanecikler arası ve kristaller arası şişme olarak basitçe iki ayrı mekanizmaya ayrılır (Grim, 1962:422). Şekil 1.6'da her iki durum da gösterilmiştir.



Şekil 1.6. Şişme mekanizması (Başer, 2009:12)

Kristaller arası şişme:

Genelde Montmorillonit grubu killerde görülür. Bu kil grubuna ait tek kristallerinden teşekkül olan tabakalar, değişebilir katyonları beraber tutan su ile zayıf bağlarla bağlanmıştır. Su ile karşılaştığında, kristallerin oluşturduğu tek tabakaların arası ve aynı zamanda da tek kristallerin arası da su ile dolar (Şekil 1.6).

Tanecikler arası şişme:

Tüm kil minerallerinde görülebilir. Su tanecikleri kil yataklarındaki kalıntılar tarafından kılcal gerilim vasıtası ile bir arada tutulmakta iken, daha fazla ıslanma

neticesinde bu kılcal gerilimler azalmakta ve sonuç olarak kilde şişme meydana gelmektedir (Başer 2009:10).

1.3.2. Şişmeye etki eden faktörler

İç kuvvetlerin etkisi altında zemin su muhtevasında oluşan değişiklikler ile şişme meydana gelir. Zeminin şişme göstermeden evvel içerdiği su miktarı ve gerilim değeri çok fazla değişiklik göstermesi durumunda kayda değer bir şekilde şişme veya büzülme görülür. Bir zeminin şişme davranışını etkileyen ve hacim artışına sebep olan birçok faktör mevcuttur ve bunlardan en önemlileri aşağıda sıralanmıştır:

Mineralojik yapı

Killerin hacimsel değişikliğine sebebiyet veren en önemli faktör kilin mineralojik içyapısı ve özellikleridir. Moleküler yapı ve yüzeysel aktivitelerden dolayı, killer, yüzeylerindeki su moleküllerini ve katyonları çekme kabiliyetine sahiptir. Kil mineralleri, yapılarındaki ve tabakalar arası bağlanmalarındaki değişiklikler nedeniyle farklı farklı şişme eğilim ve potansiyellerine sahiptirler.

Montmorillonitler, vermikülitler ve halloysitler hacim değişikliğine neden olan kil gruplarından. Daneler arası şişme özelliği gösterir. Montmorillonit kristali ayrı ayrı zayıf molekül tabakalarından oluşur ve su ile karşılaşma durumunda kristallerin arasına nüfuz eden su ayrıca kristalleri kapsayan birim tabakaların arasına da girer. Montmorillonit, esas hacminin 20 katına kadar genişleme gösterebilir ve jel kıvamına gelebilir. Tane boyutlarının çok küçük olması durumunda kaolinit ve illit grubu mineraller de şişebilirler. Kristal yapı açısından illitler, montmorillonitler'e benzerdir ama o kadar çok şişme göstermezler. Bunun nedeni, birim yüzey alanındaki elektron yükünün montmorillonit grubuna nazaran illit grubunda daha fazla olması olup, bu durum illitteki katmanlar arası bağın daha da kuvvetli olmasını sağlar. Bu güçlü bağları su tanecikleri koparmakta zorlandığından, katmanlar arasına nüfuz edemez (Kasapoğlu, 1989:3-29).

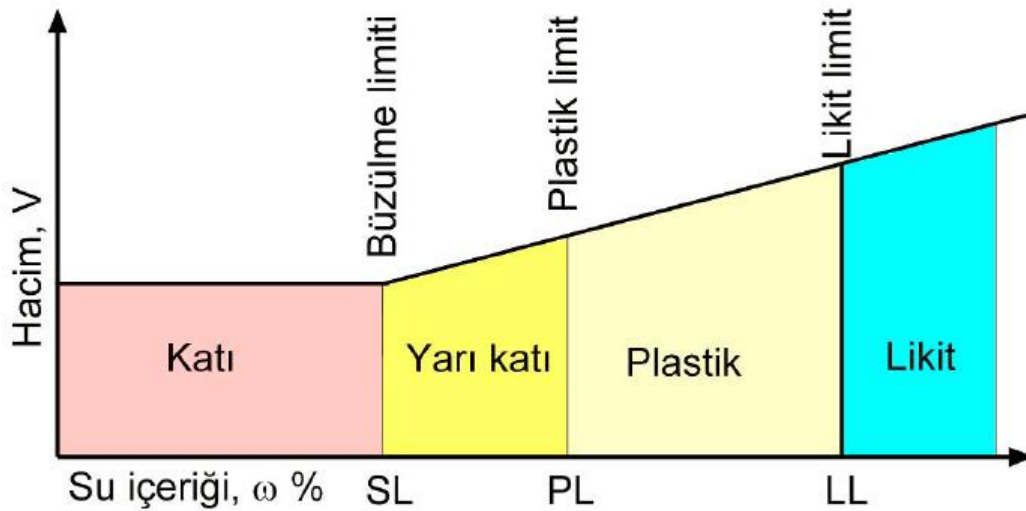
Kaolinit grubu minerallerde tabakalar arasındaki Van der Waals ve Hidrojen bağları şişme meydana gelmeyecek kadar kuvvetlidir. İllit mineralinde ise potasyum ile sağlanan tabakalar arası bağ, şişmenin engellenmesine yetecek kadar kuvvetlidir (Mitchell, 1976). İllit % 15, İllit–montmorillonit karışımı ise % 60 - % 100 oranında şişme gösterebilmektedir.

Plastisite ve su içeriği

Killer üzerindeki mühendislik uygulamalarının çoğu kildeki doğal su içeriğini değiştirir. Plastisite, gerilmelerin etkisi altında kalan malzemenin, kırılma ve hacimsel değişiklik olmadan kalıcı deformasyon göstermesidir. Killi zeminlerde görölmektedir.

İnce taneli zeminin etrafını saran su filmine absorbe su denir. Taneler küçöldükçe, yüzey alanı büyöyür ve absorbe suyun miktarı da artar. Taneler arasındaki su, kayma dayanımını azalması gibi zemin özelliklerini doğrudan etkiler (Kılıç, 2017:25).

Zemin taneleri ve su arasındaki ilişkiler ve su içeriğine göre oluşan zemin durumu, en iyi Atterberg limitleri ile tanımlanır (Şekil 1.7).



Şekil 1.7. Zeminlerde su içeriği - hacim ilişkisi (Kılıç, 2017:26)

Akıcı (likit) kıvamdan plastik kıvama geçiş anındaki su içeriği Likit Limit (LL = WL) olarak bilinir. Zeminin kendi ağırlığında akabildiği asgari su içeriğidir. LL'den daha fazla su içeriğinde zemin, viskozitesi yüksek bir sıvı gibi akışkanlığa sahip olarak plastik duruma geçiş yapar.

Plastik kıvamdan yarı katı hale geçiş anındaki su içeriği Plastik Limit (PL) olarak tanımlanır. Yoğrulma esnasında zeminin yüzeyinde çatlakların belirdiği andır.

Zeminin yarı katı halden katı hale geçiş anındaki su içeriğine ise Büzölme Limiti (SL) denir.

Likit limit ile plastik limit farkı Plastisite İndisini (PI) verirken, plastik limit ile büzülme limiti farkı ise Büzülme İndisini (SI) verir (Kılıç, 2017). Zeminlerin likit limit değerine göre gruplandırılması Çizelge 1.3'de verilmiştir.

Çizelge 1.3. Zeminlerin LL özelliğine göre sınıflaması (Kılıç, 2017:30)

LL	Zemin Tipi
20 >	Kohezyonsuz (non plastik)
20 - 30	Düşük Plastisite
30 - 50	Orta Plastisite
> 50	Yüksek Plastisite

Killerin plastisitesi, şişme potansiyelleriyle doğrudan ilişkilidir. Plastisite indisi ince taneli zeminlerin şişme potansiyeli hakkında bize bilgi verebilmektedir (Çizelge 1.4).

Çizelge 1.4. Şişme potansiyeli ve plastisite indisi (Kılıç, 2017:32)

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

Buharlaştırma veya bitki terlemesi gibi etmenler altında zemin su kaybına uğramaktadır. Öte yandan, sulama veya yağışlar ile su içeriği tekrar artabilmektedir. Bu kuruma - ıslanma döngüsüne ilave olarak yapılaşma sonucu artan sızıntı suyu ve drenaj gibi faktörler eklenince, döngü sayısında artış olur.

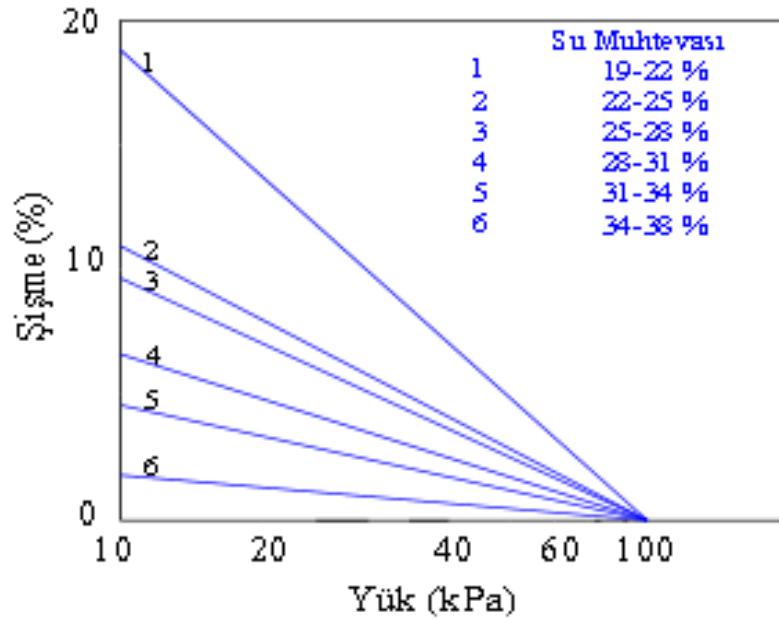
Bazı araştırmacılar kontrollü olarak tekrarlayan ıslanma – kuruma etkisi altında kil davranışlarını incelemiştir. Tekrar sayısı belli bir mertebeye ulaşıncaya değin, şişme yüzdesinin önce azalmaya sonra da sabit bir seviyede kalmaya başladığını ortaya çıkarmışlardır (Chen, 1965).

Örtü yükü (sürşarj)

Zemindeki sürşarj yükünün değişimi ile şişme miktarı ters orantılıdır (Rengmark ve Erikson, 1953).

Başlangıç su muhtevası ve boşluk oranının sabit kalması şartıyla, şişme ile uygulanan basıncın logaritması arasında doğrusal bir ilişki olduğu gözlenmiştir (Gilchrist, 1963:215) ve (Noble, 1966:36). Bu doğrusal ilişki diğer araştırmacılar tarafından genel bir zemin özelliği olarak kabul edilmeye başlanmıştır.

Şekil 1.8’te farklı su muhtevaları etkisi altında şişme yüzdesi ile sürşarj yük arasındaki ilişki görülmektedir (Brackley, 1975:103). Hafif yapıların ağır yapılara göre şişmeden kaynaklı hasar görmesi bu orantıdan dolayıdır (Genç, 2009:24).



Şekil 1.11. Şişme yüzdesi - sürşarj yük ilişkisi (Brackley,1975:103)

Şişmeye etki eden diğer faktörler

Dhowian, Ruwaih, Youssef ve Erol (1984:88) şişen zeminlerdeki hacim değişikliklerine sebep olan etkenleri Çizelge 1.5’te görüldüğü gibi ifade edilmiştir.

Çizelge 1.5. Şişmeye etki eden faktörler (Dhowian ve diğerleri, 1984:88)

Zemin Özellikleri	Tanımlama
Katı Madde İçeriği	Montmorillonit barındıran karışık tabakalı killer ve aktif killer.
Boşluk Suyu Tuz Yoğunluğu	Yüksek kation yoğunluklu boşluk suyunda şişme özelliği azalır. Ozmotik şişme uzun vadeli etkilidir.
Boşluk Suyu İçeriği	Tek değerlikli kasyonlar ne kadar fazla ise, rötre ve şişme artar. İki ve üç değerlikli kasyonlar rötre ve şişme özelliğini azaltır.

Çizelge 1.5. (devam) Şişmeye etki eden faktörler (Dhowian ve diğerleri, 1984:88)

Kuru Yoğunluk	Kuru yoğunlukta artış, şişme özelliğinde artışa yol açar.
Yapı	Foleküler tanecikler, dağınık haldeki taneciklere göre fazla şişerler, semantasyonlu tanecikler daha az şişerler. Ayrılmış dokular şişmeye yok açar.
İklim	Kurak iklimlerde zeminde kuruma artarken, nemli iklimlerde, zemin görünüşü de ıslak olur.
Yer Altı Suyu	Yer altı suyundaki değişimler şişme ve kabarmaya yol açar.
Drenaj	Yetersiz yüzey drenajı nem birikimine sebep olur.
Bitki Örtüsü	Ağaç, çalı ve otlar zemindeki suyu bünyelerine alarak zemin neminin azaltırlar. Bitki örtüsünün az olduğu yerlerde nem birikimi oluşur.
Yanal Etkiler	Yüksek yanal basınç, şişmeyi azaltır. Kazı boşluklarında zemin daha fazla şişme eğilimindedir.
Arazi Geçirgenliği	Figürler, geçirgenliği arttırdığından daha hızlı şişmeye sebep olurlar.

1.4. Kompaksiyon ve Konsolidasyon

Her malzeme yük etkisi altında deformasyon gösterir. Zeminin, yük etkisi altında hava çıkışıyla boşluk hacmi azalıyor ise kompaksiyon etkisi altındadır. Genelde, iri taneli kum ve çakıl konsolidasyona maruz kalmaktadır.

Düşük su muhtevası ile sıkıştırılmış kuru zeminlerin şişme potansiyeli yüksektir. Öte yandan, sabit su içeriği ve aynı hacimlere sahip zeminlerden örselenmiş olanın şişme potansiyeli ve basıncının yüksek olması beklenir (Genç, 2009:39). Sıkıştırma ve sıkıştırma metodu ise şişme değerinin değişmesine sebep olur. Statik kompaksiyon sonucu ortaya çıkan basıncın, dinamik kompaksiyona göre daha yüksek sonuçlar verdiği bazı araştırmacılar tarafından ortaya konmuştur (Seed, 1962) ve (Yıldırım, 2009).

Zemin kohezyonlu ise, gerilme - deformasyon ilişkisi zamana bağlı olarak değişim göstermektedir. Kohezyonlu zeminlerde, suyun dışarı çıkışı zamanla olacağından, oturmalar da büyük ölçüde zamana bağlı olarak gerçekleşecektir. Zamana bağlı oturmalar onlarca yıl sürebilmektedir. Sabit yük altında, düşük permeabiliteli ve suya doymuş zeminlerde, boşluk suyunun dışarı çıkması ile oluşan hacimsel şekil değişikliği konsolidasyon olarak tanımlanmaktadır ve şişmenin tam tersi bir olaydır.

Yeni bir yapının inşa edilmesiyle zemine yük uygulanır ve/veya yer altı su seviyesinde düşüş gerçekleşirse, ilave gerilmeler ($\Delta\sigma'$) oluşur. Bu gerilmeler, oturma ($s, \Delta H$) olarak adlandırılan toprak zemin seviyesinin sıkışması ile sonuçlanır. Sıkışma ise, zemin boşluklarında bulunan su ve havanın dışarı çıkması sonucu boşluk oranının azalması ile gerçekleşen hacimsel değişimdir. Oturmalar uniform olursa, kullanım problemleri ortaya çıkabilir. Oturmalar farklı olursa yapıda taşıma gücüne bağlı sorunlar ortaya çıkar.

Zeminlerde, yük etkisi altında sıkışma sebepli oturmalar ani oturma ve konsolidasyon oturmaları olarak gruplandırılır (Çanga, 2005:33). Ani oturma, su içeriğinde herhangi bir değişikliğin olmadığı zeminlerdeki elastik deformasyona bağlı olarak kısa sürede gerçekleşen oturmalarlardır. Kohezyonsuz zeminlerde oturma, ani oturmadan ibarettir.

Suya doymun kohezyonlu ve killi zeminlerde esas oturma, konsolidasyon oturmasıdır ve kendi arasında iki çeşittir:

Primer (Birincil) Konsolidasyon Oturması: Kohezyonlu ve doymun zeminlerde boşluk suyunun uzaklaşması sonucu meydana gelen hacimsel değişime bağlı olarak oluşan oturmalarlardır.

Secunder (İkincil) Konsolidasyon Oturması: Sıkışmaya ek olarak sabit efektif gerilmelerin oluşturduğu, kohezyonlu ve doymun zeminlerde zeminin plastik özelliğine bağlı olarak oluşan oturmalarlardır.

Zeminlerin örtü basıncı, geçmişte etkisi altında kaldığı basınçtan daha düşük ise bu tarz zeminler aşırı konsolide zemin olarak tanımlanmaktadır. Zeminin maruz kaldığı geçmişteki efektif basınca ise prekonsolidasyon basıncı denilmektedir. Zeminlerde oturma hesabı yapılırken, efektif örtü yükü (P_o) ile yapıların zemine aktardığı ek yükün ($@P$) toplamı, prekonsolidasyon basıncı (P_c) ile mukayese edilir. Bulunan toplam, prekonsolidasyon basıncı geçmediği sürece, yapılarda doldurma - boşaltma işlemlerinin konsolidasyon oturmasını geçmeyeceği düşünülür ve oturma hesabı şişme indeksine göre yapılır.

1.5. İçsel Sürtünme Açısı

İçsel sürtünme açısı, kayma gerilmesine karşı, kaya veya toprak gibi bir malzemenin, taneleri arasındaki kenetlenmeden kaynaklı direnç dayanımıdır.

Çakıl ve kum gibi iri taneli zeminlerin kohezyon (tanelerin birbirini çekme) özellikleri yoktur. İçsel sürtünme açısına sahiptir. Silt ve kil boyutundaki ince taneli zeminlerin kohezyon özellikleri mevcuttur. Kil suya doymuş ise içsel sürtünme açısı sıfır kabul edilir. Kumun içsel sürtünme açısı 28 - 50 (gevşek-sıkı), kilin ise 3 - 20 arasında değiştiği bildirilmektedir (Bowles, 1996).

Zemin içinde kil miktarı arttıkça karışıma ait kohezyon değeri artmakta, içsel sürtünme açısı değeri azalmaktadır.

2. ZEMİNDE İYİLEŞTİRME KAVRAMI

Yapı temellerini oluşturan zeminler farklı geoteknik problemlere sebep olabilirler. Şişme potansiyeli taşıyan zeminlere inşa edilecek yapılarda şişmeden kaynaklı oluşacak kuvvetler yapı elemanlarında çatlama ve kırılmalara yol açabilir. İnşaat yerinin değiştirilmesi istenilmezse, zeminin uygun bir zeminle yer değiştirilmesi ekonomik olmayabilir. Böylesi durumlarda zemin özelliklerinin iyileştirilmesi tek çıkar yoldur. Zemini inşaatı uygun hale getirme çabaları iyileştirme kavramının doğmasına ve gelişmesine olanak vermiştir.

İyileştirme, değiştirilmesi istenilen zemin parametresinde uygulanan işlemler sonrası elde edilen olumlu gelişme olarak tanımlanabilir. Bu gelişme fiziksel, kimyasal ve hatta biyolojik yöntemlerin uygulanması ile gerçekleşebilir.

Zeminlerde en çok hasara sebep olan problemler şu ana başlıklar altında sıralanabilir:

- Taşıma gücü
- Şişme ve oturma
- Şev duraylılığı

Bu problemlerin önüne geçmek için, iyileştirilen zemin parametreleri ile dayanıklılığın ve kayma direncinin artması, geçirimsizliğin ve hacim değişikliklerin azaltılması hedeflenir.

2.1. Zemin İyileştirmenin Amacı ve Geçmişi

Zeminlerin iyileştirmesinde başlıca amaçlar şu şekilde sıralanabilir (Özaydın 2012):

- Mukavemet taşıma gücü artırılması.
- Şev duraylılığının artırılması.
- Erozyon gibi yüzeysel bozulmalara karşı direncin artırılması.
- Yük etkisi altında oturma oluşumlarının azaltılması.

- Yük altında şekil değiştirmenin azaltılması.
- Şişme ve rötre ihtimalinin azaltılması.
- Deprem ve tekrarlayan gerilmeler etkisinde sıvılaşıma, dayanım ve rijitlik kaybının azaltılması.
- Donma - çözülme, ıslanma - kuruma gibi olumsuzluk yaratabilecek fiziksel ve kimyasal değişimlerin azaltılması.
- Su geçirgenliği ve sızıntı kontrolünün sağlanması.

Mühendislik yapısının sağlam zemine inşa etme olanağı olmadığı durumlarda, zeminin kötü koşulunu giderebilmek için 3 temel yol vardır:

1. Yapısal elemanları zemin durumuna göre boyutlandırarak ve yapıyı altta bulunan sağlam tabakaya taşıttırarak, yapıyı zemine uydurmak.
2. Sorunlu zeminin kazılarak ortamdan uzaklaştırılmasının ardından, özellikleri arzu edilen nitelikte başka zeminle tekniğine uygun halde değiştirmek.
3. Zeminin özelliklerini arzu edilen yönde yerinde değiştirmek.

Osmanlı döneminden kalan Yeni Camii ve Haydarpaşa Tren İstasyonunun temelleri, zayıf zemine yerleştirilen tomruk şeklindeki kazıklar üzerine oturmakta olup birinci tarz çözüme uygun tarihsel örneklerdir. Yapıyı kazıklar ile sağlam zemine taşıttırma veya zeminin tamamen yer değiştirilmesi çözümlerinin ekonomiklikten uzaklaştığı durumlarda zemini yerinde iyileştirme en ucuz ve rasyonel çözüm olabilmektedir. İnsanlar geçmişte zemine saman vb. (ve benzeri) karıştırarak, günümüzde ise kimyasal maddeler karıştırarak zemini ıslah etmeye çalışmaktadırlar (Tüdeş, 1996). Roma İmparatorluğu, karayolu zemin iyileştirme yöntemlerinin çokça kullandığı bir medeniyet olup, killi zeminlerin puzzolan ve kireçle stabilize edilmesi yöntemini kullanmışlardır (Tüdeş, 1996).

Zemin özelliklerinin daha nitelikli duruma getirilmesi çabaları iyileştirme konusunda ciddi ilerlemeler kayıt edilmesine yol açmıştır.

2.2. İyileştirme İle İlgili Önceki Çalışmalar

Şişen zeminlerle ve kimyasal olarak iyileştirilmesi ile ilgili olarak birçok kuramsal ve uygulamalı çalışmalar mevcut olup bazıları aşağıda özetlenmiştir:

Wise ve Hudson (1971), Teksas'ta şişmeye bağlı olarak zeminlerde görülen problemleri tespit etmişler, şişmeyi önleyebilmek için metotlar araştırmışlar ve gelecekte iyileştirme yöntemlerinin daha da gelişip yaygınlaşacağını öngörmüşlerdir.

Karabüyük (2001), kil barındıran kumun farklı miktarlarda bentonit ile karıştırılması neticesinde zeminde meydana gelen sıkışma ve likit limit değişimlerini serbest basınç deneyleri yaparak gözlemlemiştir.

Zorluer ve Usta (2003), meşelik kilinde iyileştirme malzemesi olarak atık mermer tozunu belli oranlarda kullanmış ve numunelerini standart proktor testine tabii tutmuştur. Şişme yüzdesini, odyometre deneyleri ile tespit ettikten sonra atık mermer tozunun zemin iyileştirmesinde kullanılabilir bir malzemedir olduğu sonucuna ulaşmıştır.

Başer (2009), ise atık mermer tozunun şişen zemin üzerindeki şişme hızının artmasına ve şişme yüzdesinin düşmesine pozitif katkıları olduğunu belirlemiştir. Arkadaşları ile yaptığı sonraki çalışmasında ise, kaolin ve bentonit kullanılarak hazırlanan numunelerde mermer tozu ve kireçtaşı tozu atıklarını belli farklı oranlarda kullanmış olup katkı arttıkça şişme yüzdesinin düştüğünü öte yandan şişme hızının arttığını kayda almıştır. Numunelerini kürleyerek, kür uygulamasının şişme yüzdesinin düşmesine ve şişme hızının artmasına etki ettiğini ortaya koymuştur.

Çimen, Keskin, Şimşek ve Kalay (2010), mermer tozu ve pomza tozunun yüksek plastisiteli bir kile belirli oranlarda karıştırılması sonucu kile olan etkilerini; kıvam limitleri, serbest basınç ve standart kompaksiyon deneyleri yaparak karşılaştırmalı olarak araştırmış olup her iki malzemenin ayrı ayrı en uygun değerdeki katkı miktarlarını tespit etmeye çalışmışlardır.

Ali, Khan ve Shah (2012), mermer tozu ve atık kül'den her birinin, kile yaklaşık % 10 civarında kile eklenmesi sonucunda, Likit Limit, Plastik Limit, Plastisite İndisi ve Şişme İndisi değerlerinde azalma olduğunu yaptıkları deneyler ile gözlemlemiştir.

Yılmaz ve Çelik (2012), Erzurum'un Oltu yerleşimindeki killi zeminlere % 50 oranında öğütülmüş kum katılması ile hacimsel sıkışma katsayısının 2,5 kata kadar ve şişme basıncının 3 kata kadar azaldığını tespit etmişler,

Yılmaz (2014), çimento fırını tozu kullanımı ile killi zeminlerin şişme hızının yavaşlatılabileceğini belirtmiştir.

Ünver (2015), değişik uçucu külü katkılarını farklı oranlar ile yapılan karışımları karşılaştırırken; uçucu külün, zeminin dayanım ve şişme özelliklerinde iyileşme meydana geldiğini gözlemlemiştir.

İyileştirmenin kireç ile gerçekleşmesi çalışmasına yönelik olarak ise, yine birçok çalışma ve teknik mevcut olup, literatür araştırılmış olup tez konusu içeriği ile doğrudan ilişkili olanlardan bazıları aşağıda özetle değinilmiştir:

Handy ve Williams (1967), sönmemiş kireç kazıklarını şev duyarlılığın artırılmasına yönelik olarak kullanmış olup kayma dayanımı parametrelerin artış meydana geldiğini kaydetmiştir.

Abduljawad (1991), yüksek şişme potansiyeline sahip killerde ağırlıkça % 2 – 8 oranlarında kullanılacak kirecin, inşaat öncesi zemin iyileştirilmesinde kullanılmasını çalışmasında önermiştir.

Güler ve Edinçliler (1993), kireç ile tepkimeye giren killerin kayma mukavemetinde artış gözlemlemiştir. Kirecin kil yüzeyine serpilmesi sonucunda da ki üst yüzeyinde taşıyıcı bir kabuk tabaka oluştuğunu, bunun da taşıma gücünü arttırdığı tespit etmişlerdir. Ayrıca, zeminin gösterdiği kayma mukavemetinin kildeki su içeriğine, kireç miktarına ve zamana göre değişim gösterdiği belirlemişlerdir.

Güler ve Avcı (1993), kile % 6 oranında kireç katılması ile geçirimsizlik değerinin 1000 kata arttığını, bu orandan sonra ise geçirimsizliğin tekrar düştüğünü ortaya koymuştur. Benzer şekilde, aynı oranda kireç katkısının, zeminin şişme basıncı değerinin 0,4 MPa'dan sıfıra indirildiğini ve bu değer kireç miktarını için sınır değer olduğunu da belirten araştırmacılar da olmuştur (Basma ve Al-Sharif, 1994). Bell (1996) ise en uygun kireç yüzdesinin % 4 – 6 aralığı olarak tespit ederken likit limit ve plastisite indeksinin

azaldığını öte yandan plastik limitin ise arttırdığını göstermiştir. Kilin tek eksenli sıkışma dayanımının ise % 4 kireç içeriği ve 28 gün kür süresinde en yüksek olduğunu saptamıştır.

Bell (1996), zeminde elde edilebilecek en yüksek dayanım için kireç katkısının zemin kuru ağırlığının % 1'i ile % 3'ü arasında olması gerektiğini tespit etmiştir. Bu seviyeden daha fazla kireç kullanılması durumunda, plastik limit sabit kalırken, dayanım hala artmaktadır.

Basma, Al-Rawas, Al-Saadi ve Al-Zadjalı (1998), yüksek oranda şişme potansiyeline sahip killi zeminlerde değişik oranlarda kum, kireç, çimento ve tuzu, doğal su muhtevası altındaki zemin numunesine ayrı ayrı karıştırmış ve kalıplayıp sıkıştırdıktan sonra şişme davranışını en çok azaltan katkının kireç olduğu tespit etmiştir. Tosun ve Türköz (2000) de, kireç, çimento ve tuzun yanı sıra, bazı organik bileşikleri ve uçucu külü katkı maddeleri olarak kullanmış olup, kirecin yaygın kullanılabilirliğini vurgulamıştır. Ayrıca sönmüş kirecin % 3 seviyesinden sonra şişme potansiyelinin kontrolü üzerinde etkili olduğu belirtilmiştir (Türköz, 2006:87).

Rajasekaran ve Rao (2002), zeminin konsolidasyon, permeabilite, ve dayanım değerlerindeki değişimleri incelemişlerdir. Kireç katkısı ile permeabilite katsayısındaki artışın 18 kata kadar çıkabildiğini görmüşlerdir. Dayanım ise 45 günü bulan kürlenme sonunda 10 kata kadar yükselmiştir. Zeminin sıkışma özelliğinde ise % 50 ye varan iyileşmeler tespit etmişlerdir.

Kavak ve Keskin (2003), yol projesinde zemini oluşturan yüksek miktarda su ve kilin kireç ile iyileştirilmesini araştırmış, killer yüksek su içerse de kirecin yine iyi sonuç vereceğini göstermiştir.

Tonoz, Ulusay ve Gökçeoglu (2004), yüksek şişme potansiyeline sahip Ankara kilinin farklı oranlarda kireç katkısı içeren karışımlarının 3, 7, 14 ve 28 günlük kürlenme süresi sonunda elde edilen serbest basınç dayanımları üzerinde çalışmışlardır. Optimum kireç katkısının % 4 olması gerektiğini tespit etmiş olup, % 84'e varan dayanım artışı için de asgari 28 gün kürü tavsiye etmişlerdir.

Huat, Maail ve Mohamed (2005), bataklıkların kireç ve çimento ile iyileştirilmesini araştırmış olup, kireç katkı oranının arttırıldıkça likit limit ve optimum su içeriğinde azalma, maksimum kuru yoğunlukta ve serbest basınç dayanımında artma gözlemlemiştir.

Küçükali (2011), Ankara Batıkent'te bulunan yüksek plastisiteli killerin şişme ve dayanım özelliklerini, farklı oranlarda kullandığı kireç, jips ve kireç-jips ile katkıları ile oluşan karışımlarda incelemiş, en yüksek basınç dayanımını, % 12 oranında kireç katılan karışımın 90 gün kürlenmesi sonucu elde etmiştir. .

Öztürk, Ünsal ve Akbaş (2015), Ankara'nın Gölbaşı ilçesi civarındaki killerin kireç ile iyileştirme yöntemlerine çalışmış yaptıkları deneyler neticesine % 5'ten fazla kireç katkısı ile şişme basıncı ve şişme yüzdesinin % 85 oranında azaltılabileceğini tespit etmişlerdir.

Kılıç, Küçükali ve Ulaş (2015), Ankara'da bulunan yüksek plastisiteli killere ağılıkta farklı oranlarda kireç (ve jips ile kireç - jips karışımı) katarak iyileştirme sonuçlarını gözlemlemiş ve en uygun karışım oranını araştırmışlardır. Kilin doğal halde ve % 3, % 6, % 9, % 12 ve % 15 oranlarında katkı maddeleri içeren karışımli halleri sıkıştırma sonucu elde edilen şişme yüzdesi, şişme basıncı ve tek eksenli değerleri karşılaştırılmış olup elde edilen bulgular detaylı olarak 4. Bölümde aktarılmıştır.

3. ŞİŞEN ZEMİNLERİ İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ

Zemin iyileştirme yöntemlerini aşağıdaki gibi gruplandırabiliriz:

- Mekanik Yöntemler
- Hidrolik Yöntemler
- Donatılı Zemin
- Fiziksel ve Kimyasal Yöntemler

Doğru yöntemin belirlenebilmesi için; ortamın kil, organik ve tortul içeriği olarak türünün belirlenmesi, iyileştirmeye konu alanın büyüklüğü, yapı biçimi ve yapıya etki eden yüklerin dağılımı, kayma direnci, geçirimsizlik ve sıkışabilirlik gibi zemin özellikleri, izin verilebilir toplam ve farklı oturmalar, iyileştirme kullanılacak malzemenin niceliği, konusunda uzman ekip ve ekipman mevcudiyeti vb. bilinmelidir (Önalp, 1982).

3.1. Mekanik İyileştirme

Mekanik iyileştirme, mekanik kuvvetlerin etkisini kısa süreli olarak kullanarak, zemin yoğunluğunun artırılmasıdır. Uygulamadaki örnekleri olarak; patlatmalı, titreşimli, darbeli silindirli, derinde titreşimle ve titreşimli tablalarla sıkıştırma veya sıkıştırma kazıkları uygulaması verilebilir (Yıldırım, 2004:439).

3.1.1. Kompaksiyonun kontrol edilmesi

Şişen zeminlerde kompaksiyon yani sıkıştırma kontrolü uygulaması oldukça pratik ve ekonomik bir yöntemdir (Holtz ve Gibbs, 1956:81). Bu yöntem ile zemin taneleri, aralarındaki hava boşlukları azaltılması ile birbirlerine yaklaşmaktadır. Böylelikle daha sıkı ve daha yüksek birim hacim ağırlığında bir zemin iyileştirme sonucu meydana gelmektedir. Zeminin taşıma gücünün artması, hacim değişikliklerine direnç konması, geçirimsizliğin artması diğer faydaları arasındadır (Küçükali, 2011).

Şişme eğilimindeki zeminler düşük yoğunlukta iken yüksek su barındırıyor ise sıkıştırıldıklarında pek az şişme ortaya koyarlar (Holtz ve Gibbs, 1956:81). Dolayısıyla su muhtevası, yoğunluktan çok daha önemlidir. Mesela, sıkıştırma eğer optimum su içeriğinin % 3' ünün altında yapılırsa şişme aşırı derecede meydana gelir. Öte yandan, zeminler

yüksek su içeriğinde (% 3'ten fazla) tutulur ve düşük birim hacim ağırlığında sıkıştırılırsa çok az şişme meydana gelir bu da arzu edilen sonuçtur (Yılmaz ve Karacan 1998:26). Sıkıştırmanın uniform olması farklı deplasmanların oluşmasını engeller.

Kompaksiyon ile hedeflenen dayanım değerleri elde edildiğinden itibaren etki koşulları aynen korunmalıdır. Koşulları en çok değiştirecek etken olan yağmur ve don olaylarıdır ve bunlara karşı tedbir alınmalıdır.

3.1.2. Şişen zemini kaldırma ve yer değiştirme

Temel altında şişme özelliği gösteren killi zemini, şişme özelliği bulunmayan zemin ile değiştirilmesidir. Mevcut şişme özelliği gösteren zemin kalın bir tabaka değil ise, tamamı kaldırılabilir; aksi durumda hesap sonucunda ortaya çıkan kalınlıkta tabakanın yer değişimi yapılması ekonomik olacaktır. Taşıma gücü yüksek bir tabaka ortaya çıkabilsin diye dolgu yapılacak kısım yüksek yoğunlukta sıkışma etkisi altında tutulur. Bu yöntemi ekonomik kılan yönü, özel ekipman gereksiniminin az olması ve zamanlama olarak kısa sürede gerçekleştirilmesidir (Çetin, 2003:38).

3.2. Hidrolik İyileştirme

Hidrolik iyileştirme yöntemi kuyu ve drenler vasıtası ile boşluk suyu basıncının azaltılması ve dolayısıyla kayma dayanımını artırma esasına dayanır.

İnce daneli zeminlerde dikey drenler ile ön yükleme yapılması, kaba daneli zeminlerde ise yer altı su seviyesinin indirilmesi gibi iyileştirmeler hidrolik iyileştirme yöntemleridir (Yıldırım, 2004:453).

3.2.1. Ön ıslatma

Bu uygulamada esas hedef temel zemininin şişmesini inşaat başlamadan önce sağlamaktır. Zeminin su içeriğini önceden kontrollü olarak artırarak, şişme miktarını azaltma metodu takip edilir. Söz konusu bölge, su içinde bırakılır ya da havuz oluşturulur. Suyun derinlere nüfuz etmesi için kil yapısının ince çatlaklı olması önemlidir. Aksi halde suyun emilim hızı azalacak olup bunu aşmak için drenaj kuyuların yerleştirilmesi önemlidir.

İslatma işlemini müteakip kil tabakasının üst kısmına en az % 4 oranında sönmüş kireç ilave edilerek veya alternatif olarak 15 cm (santimetre) kalınlıkta kum çakıl karışımı serilerek zeminin katılığı arttırmak ve plastisiteyi azaltılmak suretiyle uygun çalışma koşulu sağlanır. Bu ilave tabaka buharlaştırmayı azaltacağı gibi iyi bir temel altı zemini oluşturmaya da faydalıdır (Genç, 2009:40).

3.2.2. Su muhtevası kontrolü

İnşaat temeline etraftan sızabilecek suya hem düşey hem de yatay geçirimsizliği olmayan duvarlar ile engel olmak ve böylelikle temel zeminini kuru tutma prensibine dayanır. Geçirimsizlik, yapı ile tretuar arasında elastik bir mafsal ile veya naylon, polietilen gibi suya dayanıklı geçirimsiz malzemeden oluşan membranlar ile sağlanmaya çalışılmalıdır. Geçirimsizlik amacıyla kullanılan engeller bina dışına doğru binanın uzağından dışarıya şevli olarak teşkil edilir. Ayrıca drenaj sistemi ile suyun zemin ile buluşmadan uzaklaştırılması ve temel etrafında su göllenmesini bertaraf etmek gerekmektedir (Bilir, Sülür ve Çıtıroğlu, 2016:164). Yapı etrafındaki yüzey suları da düşey kum drenleri veya drenaj hendekleri ile altlarda bulunan siltli kum tabakasına iletilmelidir. Karayolları uygulamalarında ise, geçirimsizliği sağlayan membran üzerine şişme özelliği bulunmayan temel altı malzemesi kullanılmakta ve su içeriğinde artış olmasını engellemek amacıyla drenaj sistemleri yoğunlukla kullanılmaktadır.

Proje çevresindeki çim, bitki ve ağaçlar gibi bitki örtüsü elemanlarını kontrol etmek de önemlidir, nitekim bitki ve ağaçlar zemin suyunu kökleri vasıtasıyla bünyelerine alırken zeminde önemli derece su değişmesinde rol oynarlar (Genç, 2009:42).

3.3. Donatı İle İyileştirme

Donatı ile iyileştirme, şişme özelliği gösteren zemin içerisine muhtelif yerlere geogrid, şerit vb. donatılar yerleştirilerek sağlanan iyileştirme yöntemidir.

3.4. Kimyasal Yöntemler (Katkı Maddeleri) İle İyileştirme

Zeminin yüzeye yakın tabakalarına veya zemin derinliklerinde kolonlar oluşacak şekilde zeminle veya endüstriyel artıklar ile veyahut da birbiriyle reaksiyona giren çimento gibi kimyasal maddeler ve doğal zeminler gibi katkıların karıştırılmasıdır. Katkı, zemin içerisindeki boşluklara basın yardımıyla verilir ise buna enjeksiyon denilir. Dondurma ve

ısıtma veya jet grout uygulamaları da bu grup içerisinde bulunur (Yıldırım, 2004:439-453).

Katkı maddeleri ile iyileştirme genelde aşağıdaki hedeflere ulaşmak için tatbik edilir:

- İşlenebilirliği kolaylaştırmak
- Dayanımı artırmak
- Oturma ve şişmeyi azaltmak
- Geçirimsizliği sağlamak

Katkı malzemesinin kolay temin edilebilir ve ucuz olması çok önemlidir. Kum, kireç, çimento, kireç - çimento karışımı, uçucu kül, kireç - uçucu kül karışımı, bitüm, tuz ve bazı kimyasal bileşikler katkı maddesi olarak sayılabilir ve uzun zamandır kullanılmaktadır. Katkı madde kullanımı ile mukavemette artma, permeabilitede ve şişmede büzülme potansiyelini azalma olması beklenir.

Zeminler, bünyesinde barındırdığı kil mineraline bağlı olarak karmaşık yapıda olduklarından dolayı, elde bulunan mevcut malzemeler ile hemen iyileştirme işlemine başlanılmamalı, doğru olan katkı malzemesi tespit edilmeye çalışılmalıdır. Göz önünde tutulması gereken seçim faktörleri şu şekildedir (Molenaar. 2007);

- Katkı maddesi, zemin içlerine kolaylıkla nüfuz edebilmelidir.
- Katkı maddesi, zemine düzgün bir şekilde ve homojen olarak katılmalıdır.
- Katkı maddesinin kendisi, kullanılacak miktarı ve uygulamaları ekonomik olmalıdır.
- Katkı maddesi, kürlenme süresi göz önünde tutularak, inşaat programında gecikmeye sebep olmamalıdır.
- Katkı maddesi, iş ve işçi güvenliğini tehlikeye düşürmemelidir.

Kireç ile iyileştirme yönteminin detayları 4. bölümde verilmiş olup, diğer kimyasal iyileştirme yöntemleri aşağıda bulunmaktadır:

3.4.1. Çimento ile iyileştirme

Çimento kullanımı ile iyileştirme çokça kullanılan bir yöntemdir. Kireç ile iyileştirmeyle alınan sonuçlara benzer zemin tepkimeleri meydana getirir. Kireçle iyileştirmenin başarılı olamayacağı zeminlerde daha etkili olabilir (Ünver, 2015:56); ama yüksek plastiklikli killerin iyileştirilmesinde kireç kadar başarılı değildir.

Çimento ile iyileştirmeye, 200 nolu elekten geçen kısım % 10 - 35, 4 nolu elekten geçen % 55 ve yukarısı, 10 nolu elekten geçen % 37 ve 2,5 cm den daha büyük danesi olmayan zeminler uygun olmaktadır. Çimento zemine karıştırıldıktan sonra ilk yarım saatte yerine taşıma yapılmalı, sonraki bir saat içinde sıkıştırma işlemi başlamalı ve iki saatin sonunda sıkıştırma işlemi tamamlanmalıdır (Aytekin, 2004).

Çimentonun iyileştirme etkisini sağlayan sertleşmesi, kalsiyum silikat, alüminyum hidratasyon ürünleri ve zemin daneleri ile çimentonun bağ oluşturması sonucunda kristalleşen yeni minerallerin ve pelte yapıların kurumasıyla meydana gelir.

Çimento katkısı ile zeminin plastisite indeksinde, likit limitinde, zemin geçirgenliğinde ve hacim değiştirme potansiyelinde azalma beklenirken, kayma mukavemeti ve rötre limitinde ise artış olmasıdır.

3.4.2. Tuz ile iyileştirme

NaCl (sodyum klorür) ve CaCl (kalsiyum klorür)'lü tuzlar, limit değerleri yüksek olan killi ve şişen zeminlerin iyileştirilmesinde genellikle tercih edilmektedir. Tuz kullanımı ile büzülme limiti ve kayma dayanımı artarken, su içeriği sabit kalır. Tuz, bilindiği üzere suyun donma sıcaklığını düşürmekte ve donma sebepli şişmelerin önüne geçmektedir. Tuz kullanımının en büyük handikabı ilerleyen zaman boyunca zeminden ayrılmaya başlaması olup, iyileştirmenin tekrar edilmesine ve bunun sonucu olarak da maliyetin artmasına sebep olmasıdır (Çetin, 2003:37).

3.4.3. Uçucu kül ile iyileştirme

Uçucu kül; silika, alümina, değişik alkali ve oksitlerden müteşekkil ince daneli veya toz yapıya sahip bir malzeme olup, taş kömürü veya linyit kömürünün yüksek sıcaklıklarda yanması sonucu oluşan fabrika atığıdır. Birbirinden farklı kimyasal ve mekanik özellikler gösterebildiğinden dolayı tasarımın deneyler ile desteklenmesi ve

kontrol edilmesi gerekir (Çetin, 2003:37-38). Uçucu küller, Alüminyum, Silisyum, Alkaliler ve çeşitli Oksitler içeren yapıya sahip ve kendi başına bağlayıcılığı az iken kireç veya su ile birleştiğinde çimentolaşma etkisi göstermektedir. Bu nedenle karayollarında yol alt temellerinde kullanılır (Yıldırım, 2004). Zeminlere de tane çapını artırarak zemin yapısı değiştirmek için katılır (Ünver, 2015:57).

Bazı uçucu küller bünyesinde kireç de içermekte olup, ilave kireç ihtiyacını azalttığından katkı malzemesi olarak tercih edilebilir. Bu sayede inşaat maliyetleri kayda değer miktarda azalır (Erdoğan, 1993:1-8).

3.4.4. Bitüm ile iyileştirme

Bitüm, siyah, yapışkan, yüksek sıcaklıklarda sıvı halde olan bir petrolden ürünü olup oldukça pahalıdır. Zemin iyileştirmesi, mevsim ve zemin şartlarına göre asfalt, katran gibi maddelerden birisi kullanılarak yapılır. Nemli bölgelerde sıkça tercih edilir çünkü kullanılan malzemenin su yalıtımı özeliği yüksektir (Küçükali, 2011: 30).

Taneler arası bağlayıcılık özelliği olan bitümlü katkı malzemesi, kırma taş, çakıl ve kum gibi daneli zeminler ile yaklaşık % 5 - 10 oranında karıştırılıp, sıkıştırılır ve geçirimsizliği yüksek bir karışım elde edilir. Bitüm ile iyileştirme, özellikle kara yollarında, yüzey kaplamasında kullanılır (Küçükali, 2011:31).

3.4.5. Organik bileşiklerle zemin ıslahı

Na (sodyum) silikat, Ca (kalsiyum) hidroksit, sodyum klorit ve kalsiyum klorit gibi organik bileşiklerin diğer katkı maddeleri ile birlikte kullanılması sonucu suyun geçişini önlenmek veya reçine ile sertleştirme yapılmasıdır. Sodyum klorit, yüksek likit limite sahip zeminlerde kayda değer etkiye sahiptir ve donma kaynaklı şişmeyi de önler. İçine bir miktar da kalsiyim klorit kullanılması zeminin iyileştirilmesi açısından önemlidir. Organik bileşiklerle iyileştirme; çimento, kireç gibi katkılarla iyileştirme yöntemine göre hem pahalı olmakta hem de onlarınki kadar etkili olamamaktadır.

3.5. Diğer Yöntemler

Zemin iyileştirme ve ıslahı için literatürde yer alan bazı yöntemler özetle şu şekildedir (Das, 1995; Yılmaz, 1998; Genç, 2009; Demir ve Kılıç, 2010):

- Şişme potansiyeli olan zeminin 200 °C (santigrat derece) 'lere kadar ısıtılması ve şişme özelliğini yitirmemesinin sağlanması.
- Elektro ozmos yöntemi ile şişme meydana gelen killi zemindeki suyun zeminden uzaklaştırılması ve böylelikle sert bir zeminin elde edilmesi.
- Yapı temelinin, zemindeki su muhtevasının mevsimsel olarak farklılık gösterdiği azami 4 metre derinlik içinde kalan zonun altındaki bir derinlikte tasarlanması ve inşa edilmesi.
- Yapı temel tipinin kazık tip veya pabuç tip seçilmesi ve zemin altında meydana gelebilecek bir şişme karşısında temelin şişme karşısında etkilenmemesi için şişmeye karşı alt kısımlarda boşluk bırakılması.
- Şişme basıncını karşılayabilmek için dar sömeler yapılarak tabandaki basıncın artırılması.

4. KİREÇ İLE ZEMİN İYİLEŞTİRMESİ

Şişen zeminlerin iyileştirilmesinde kireç kullanılması, killerin kimyasal ve fiziksel özelliklerini iyileştirmek amacıyla kullanılan oldukça yaygın ve eski çağlardan beri uygulana gelen bir metottur. Bell (1996:223), eski Mısır, Mezopotamya ve Roma'da toprak yolların kireç katkısı ile iyileştirildiğini bildirmektedir.

Modern anlamdaki ilk uygulamaya ise 1924 yılında Amerika'da bir otoyolun zemin iyileştirme işinde rastlanılmaktadır. 1930'lu yıllar ile birlikte, araç sayısının artması ile birlikte yolların iyileştirilmesine yönelik olarak kireç kullanımında artış yaşanmaya başlamıştır. 2. Dünya savaşı esnasında yapılan kara ve demiryollarında kireç çok fazla miktarda kullanılmıştır.

Türkiye karayollarında 1960'lı ve 1980'li yıllarda kireç ile iyileştirme uygulamaları yapılmış olmasında rağmen yaklaşık son 25 yıldır bu konuda yeterli sayıda pratik uygulamalı çalışma yapılamamıştır (Akyarlı, Kavak, Atay ve Alkaya, 2004). Dünyada; otoyol, demiryolu, havaalanı gibi yapıların dolgu temel ıslahında, zemin taşıma kapasitesi ve dayanımını artırmak, diğer yandan şişmeyi azaltmak amacıyla kireç günümüzde sıklıkla kullanılmaktadır.

Kireç ile iyileştirmede zemin sertleşerek katı kıvama geçer. Bu sayede zeminde görülen değişiklikler şöyledir (Küçükali, 2011):

- Likit limit azalır.
- Plastisite indisi azalır.
- Zemin deformasyonu azalır.
- Plastik limit artar.
- Çalışabilirlik artar.
- Zeminin dayanımı artar.

Uygulama ise kireç enjeksiyonu, kireç kolonları, kireç kazıkları ve belirli oranlarda kirecin zemine karıştırılması şeklinde çeşitlendirilebilir.

Kireçle iyileştirmede kullanılacak kireç türü hidrate kireç'tir (sönmüş kireç, Ca(OH)_2 (kalsiyum hidroksit)). Sönmemiş kireç (CaO) (Kalsiyum oksit), yakıcı özelliği nedeniyle tehlikedir ve gerekmedikçe kullanılmamalıdır (Özaydın, 1989).

4.1. Kireç Hammaddesi ve Üretimi

Kireç üretiminde hammadde olarak kireç taşı olarak bilinen kalker (CaCO_3) (kalsiyum karbonat) ve dolomit ($\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$) (Kalsiyum karbonat + Magnezyum karbonat) kullanılmakta olup kalker ve dolomitin saflık derecesi ve boyutları, üretimde kullanılan yakıt ve fırın tipi, kireç üretimi üzerinde etkilere sahiptir (Tüdeş, 1996:40-46).

Kalker ve dolomitin, özel olarak tasarlanmış fırınlarda $900 - 1000 \text{ C}^\circ$ 'ye kadar ısıtılması sonucu sönmemiş kireç elde edilir. Granüler yapıdaki bu sönmemiş kirece, su ilave edilirse hacim büyümesi ile birlikte ısı veren bir reaksiyon oluşur ve ince daneli toz kıvamında sönmüş kireç meydana gelir (Tüdeş, 1996:44-50).

Kalker ve dolomitten elde edilebilen kireç çeşitleri şu şekildedir (Tüdeş 1996:50):

- Sönmemiş Kalsitik Kireç CaO
- Sönmüş Kalsitik Kireç CaO (OH)_2
- Dolomatik Sönmemiş Kireç $\text{CaO} + \text{MgO}$
- Monohidratlı Dolomatik Kireç $\text{CaO (OH)}_2 + \text{MgO}$
- Dihidratlı Dolomitik Kireç $\text{CaO (OH)}_2 + \text{Mg (OH)}_2$

Genellikle ince daneli zeminlerin iyileştirilmesinde; yüksek kalsiyumlu kireçler [Ca(OH)_2], kalsitik sönmemiş kireçler [CaO], monohidrat dolomatik kireç taşları [$\text{Ca(OH)}_2.\text{MgO}$], ve dolomatik sönmemiş kireçler, kullanılmaktadır (Das 1995:828).

Kireç kullanımı ile zeminlerin iyileştirilmesinde gözlemlenen olaylar fiziksel ve kimyasal olaylar iki ana başlık altında toplanabilir. Plastisite indisi, hacimde, boşluk suyu basıncı, don, rutubet ve mukavemet ile ilgili özelliklerde değişimler, topaklanma oluşumu, maksimum kuru birim hacim ağırlıkta düşme, optimum su muhtevasında artma fiziksel olaylara örnek olurken; iyon değişimi, çimentolaşma ve karbonatlaşma ise kimyasal olaylardandır (Tüdeş, 1996:52-86).

4.2. Kil - Kireç Birleşiminde Meydana Gelen Fiziksel Olaylar

Kireç katkısı, zeminlerin sertleşmesine ve plastik ve likit limitlerinde etki gösterir. Bu etki, plastik limiti arttırarak katı kıvama geçme yönünde iken, montmorillonit ve illit gibi şişen killere sahip zeminlerde ise likit limiti azaltma yönünde olup, plastisite indisinde azalma ortaya çıkar. Sonuçta daha az deformasyon gözlemlenir (Küçükali, 2011:28).

Potasyum ve Sodyum iyonları ile kalsiyum iyonlarının değişimleri neticesinde plastisite % 50 – 80 oranlarında azaltarak zemindeki çalışma olanaklarını daha kolay hala getirmektedir. Hacim değişimlerindeki azalma da, plastisite indisinin azalması sonucu gözlenir. Sonuç olarak, büzülme limiti artış gösterirken büzülme oranının arttığı tespit edilir.

- Kireç katkısı, zeminin pH'nın yükselmesine, bu da zemindeki katyon değiştirme kapasitesinin artmasına neden olur.
- Kireç katkısı, zeminlerin daha düşük yoğunlukta olmasına öte yandan daha fazla optimum su içeriğinde sıkışmasına sebep olur. Kireç katkısı ne kadar artarsa, maksimum kuru birim hacim ağırlık da düşme gösterir.
- Kireç katkısı, zemin boşluklarındaki oranın azalmasına ve boşluklardaki su basıncının azalmasına neden olur.

Özelikle yol inşaatlarında kullanılacak malzemelerin ıslanma ve kuruma, donma ve çözünme gibi doğal etkilere karşı mukavim olması elzemdir. Kireç katkısının temel altı malzemede kullanılması ile bu mukavemetin arttırılabileceği yapılan çalışmalarda karşımıza çıkmaktadır. Bu nedenle kireç katkısı, killi zemin ile dolgu yapılacağı zaman kullanılır.

Kireç katkısı, ince daneli zeminlerde kullanılacak olursa, puzolonik reaksiyonlar neticesinde oluşan çimentolaşma ile zemin mukavemeti değerlerinde artış göstermesine neden olur. İnce daneli zeminlerde, ayrıca topaklanma (flokülasyon) da meydana gelmektedir.

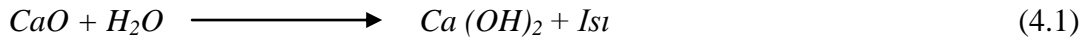
4.3. Kil - Kireç Birleşiminde Meydana Gelen Kimyasal Olaylar

Kireç döngüsünü meydana getiren olaylar şöyledir:

- Hidratasyon
- Karbonasyon
- Kalsinasyon (Yanma)

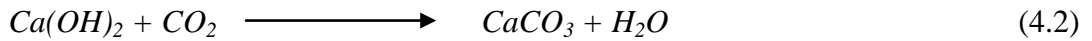
Hidratasyon:

Sönmemiş kireç (kalsiyum oksit), su ile reaksiyona girmesi sonucunda sönmüş kireç (kalsiyum hidroksitin) meydana gelir ve yüksek miktarda ısı açığa çıkar.



Karbonasyon:

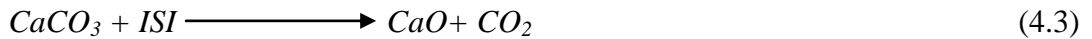
Kalsiyum hidroksit ($Ca(OH)_2$), havada mevcut olan Karbondioksit (CO_2) ile reaksiyona girebilmekte ve Kalsiyum karbonat ($CaCO_3$) oluşturabilmektedir (Erkan, 2007:20). Bu tepkime sonucunda, çimentolaşmada zayıflamaya, puzolonik reaksiyonda azalmaya ve karışımın mukavemet kaybına sebebiyet verir. Kireçler depoda ve sevk halinde iken etkisi altında kaldıkları hava akımı sebebiyle karbonasyon oluşabildiğinden, bu durumu engellemek için kirecin hava ile teması azaltılmalıdır (Tüdeş, 1996).



Karbonasyonu engellenmek için kireç kuru ve rutubetsiz yerlerde muhafaza altında olmalı, iyileştirme esnasına hızla tatbik edilmelidir.

Kalsinasyon:

Kireçtaşının yanma işlemine tabii tutulup toz formuna dönüştürülmesi olup, işlem sonucunda kalsiyum oksit meydana gelir ve karbondioksit açığa çıkar.



Kireç katkısı ile karışım yapıldıktan hemen sonra, kireçte bulunan kalsiyum katyonu (Ca^{+2}), kil partiküllerindeki Na^+ veya K^+ katyonları ile iyon değişimi sırasında katyon değişimi olarak adlandırılan yer değişimini gerçekleştirir (Tüdeş, 1996).



Yükü yüksek olan katyonlar, daha düşük yüklü katyonlarla yer değiştirirlerken; aynı yüklü daha büyük katyonlar ise daha küçük katyonlarla yer değiştirirler. Ca^{++} katyonları, diğer katyonlarla kolaylıkla yer değiştirebilmektedir.

Zemine kireç katkısı sonucunda, serbest halde bulunan Ca^{++} katyonları, kil dane yüzeylerinde bulunan zayıf mekanik katyonlar ile yer değiştirmektedir. Katyon değişimi ile, kili kaplamış halde bulunan su tabakasının boyutunda küçülme olur ve kil daneleri birbirlerine yaklaşır. Flokülasyon-aglomerasyon olarak adlandırılan bu süreçte kil taneleri arasındaki artan boşluktan dolayı, kil taneleri silt veya kum yapısını andırmaktadır.

Katyon değişimi ve flokülasyon ile zeminde oluşan modifikasyonlar şu şekildedir:

- Adsorbe edilmiş su tabakasının boyutu önemli miktarda azalır.
- Danecikler arası içsel sürtünme ve kayma direnimi artar.
- Kil plastikleşerek, işlenebilirliği artar.

Sonuçta, kil parçacıkları toplanarak zemindeki boşluk oranında artışa bu aşamada sebep olur.

Daha sonra, kireçte yer alan kalsiyum katyonları, kil bünyesindeki silisyum ve alüminyum alüminat ile bir zaman sonra birleşerek kalsiyum silikat jelini meydana getirir (Tüdeş, 1996:46-70).



Çimento türü malzemelerin oluşumunu sağlayan bu tepkimeler, puzolanik reaksiyonlar olarak adlandırılmaktadır. Kirece doymun boşluk suyunun pH değeri, kireç

ilavesi ile, yaklaşık 12.4'e kadar yükselir ve bunun sonucunda silis ile alüminyum çözünürlüğü git gide artar.

Kil danelerinden ayrılan silis ve alümin, kireç bünyesindeki kalsiyum katyonlarıyla tepkimeye girerek jel oluşturur ve bu jel zamanla hacimsel büyüme göstererek boşluklara set olmaya başlar. Bu olay çimentolaşma olarak adlandırılmakta olup karışım ile seneler boyu süren bir direnimsel kazanma sürecine girilir.

Puzzolonik reaksiyonlar ile kil minerallerinde meydana gelen yapısal değişiklikler ile kil mineralleri bir araya gelmeye çalışırlar ve daha büyük daneler oluşturmaya başlarlar. Bu aşamada zeminin Likit limit ve Plastisite indisi düşerken; Plastik limiti, Büzülme limiti ve işlenebilirliği artar.

Zeminin kireç ile tepkimesini etkileyen zemin özellikleri aşağıda yer almaktadır (Amer, 1998:327-350):

- 7 civarında pH değeri olan zeminlerde, kireç tepkimesi fazladır.
- Organik karbon, kireç ile zeminin tepkime hızını azaltır.
- Daha az drene edilen zeminler, fazla drene edilen zeminlerden daha fazla tepkimeye girme eğilimindedir.
- Kalkerli zeminlerin tepkime ilgisi de yüksektir.
- Bazı demir bileşikleri ve sülfatlar ve kireç tepkimesini ortadan kaldırır.
- Alçı taşı bulduran zeminlerin, kireç ihtiyacı daha çoktur.

4.4. Kireç İle İyileştirme - Uygulama Esasları

Zeminin iyileştirilmesi ya zemin içerisinde kireç kolonları oluşturularak ya da kireç ile arazideki zeminin karıştırılması sonucu oluşur (Tüdeş, 1996). İlk yöntemde, zeminin 4 - 5 mt. (metre) derinliklerine kireç barındıran yüksek basınçlı karışım veya kireç ve uçucu külden oluşan karışım, saha şartlarına bağlı olarak tekli veya çoklu olarak enjekte edilir.

Diğer yöntemde ise kireç şişme özelliği gösteren ve uygulama öncesi gevşetilmiş olan zeminin (Resim 4.1) yüzeye yakın üst tabakasına serilir (Resim 4.2) ve karışım

uygun bir ekipman ile harmanlanır (Resim 4.3). Daha sonra, kireçli zemin sulanır (Resim 4.4) ve silindir vasıtası ile sıkıştırılır (Resim 4.5).



Resim 4.1. Rotil ile karıştırılan zemin (Kavak ve diğerleri, 2008:4)

Karışımın daha önce laboratuvar deneyleri ile belirlenmiş olan optimum su içeriği ve maksimum kuru birim ağırlıkta sıkıştırılması gerekir. Sıkıştırmanın tabakalar halinde yapılması gerekir. Toplam dolgu kalınlık miktarının belirlenebilmesi için de, CBR (Kaliforniya Taşıma Kapasitesi) ve plaka yükleme deneyleri vasıtasıyla yükleme ve deformasyon ilişkisi ortaya çıkarılmalıdır.

Kireç katkısında, su eklentisinden sonra kirecin karıştırılması ve sıkıştırma işleminin yapılması, zemin iyileştirmede dikkat edilmesi gereken en önemli husustur. Seed, Woodward ve Lundgren (1962:83), zeminlere açılmış kuyularda, karışım yapmadan kireci su ile çözme girişimlerinin sonuçsuz kaldığını tespit etmişlerdir. Bir diğer husus, kum ve silt ağırlıklı zeminlerde kireç katkısının yeterince iyi sonuç vermeyebileceği olup, bu tarz zeminlerde kirece ek olarak uçucu kül gibi puzolonik özellikler barındıran malzemelerin ilave edilmesi gerekir (Çetin, 2003:58).



(a)



(b)

Resim 4.2. Zemine (a) torbalardan (Güven Zirai) ve kireç serme makinesiyle (b) kireç serilmesi (Kavak ve diğerleri, 2008:11)



Resim 4.3. Greyder ile karıştırma (Kavak ve diğlerleri, 2008:12)



Resim 4.4. Kireçli karışımın sulanması (Kavak ve diğlerleri, 2008:12)



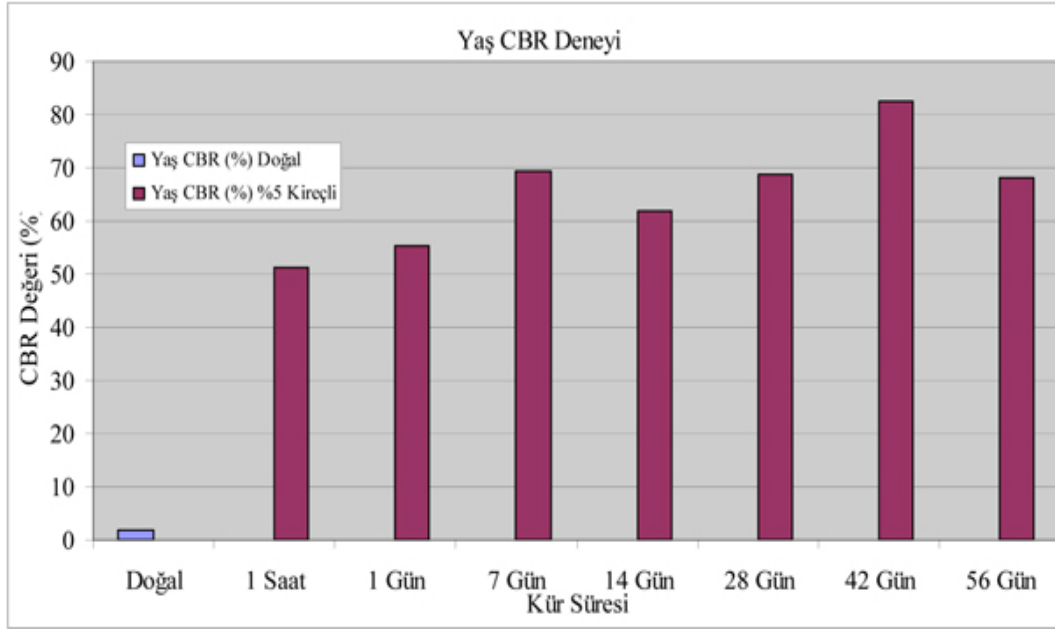
Resim 4.5. Silindir ile sıkıştırma (Kavak ve diğerleri, 2008:13)

4.5. Kireç İle İyileştirme - Uygulama Bulguları

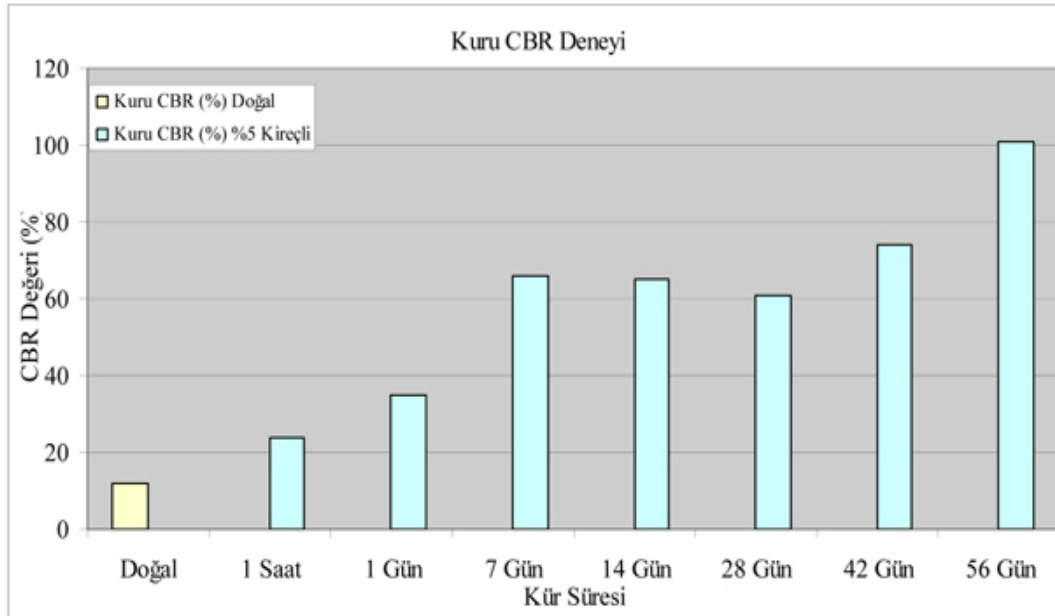
Şişen zeminlerin iyileştirilmesi için % 2 ile % 8 arasındaki oranlarda kireç katkısı içeren karışımların, şişme, likit limit, plastisite indisi, optimum kuru yoğunluk değerlerini azaltmaya ek olarak; şişen zeminin dayanım, optimum su içeriği ve çalışabilirliği artırma gibi önemli faydalar da sağlamaktadır (Genç, 2009:42).

Kavak ve diğerleri (2008), Ankara Bala ayrımı ile Kulu ayrımı arasında kalan bölünmüş yolun 14 mt. genişliğinde ve 360 metrelik yeni yapılmakta olan bir kısmında Karayolları Genel Müdürlüğü ile yapılan ortak uygulama çalışmasında yüksek plastisiteli kil (CH) kireç ile iyileştirilerek 20'şer cm'lik 2 tabaka şeklinde uygulamaya konmuştur. %5 kireç katkısı sonucunda, %11 olan kuru CBR değerlerinde % 48 ila % 56 değerlerine ulaşmış, 28 günün sonunda ise % 117 olarak bulunmuştur. Plaka yükleme deney sonuçlarından ise kalıcı oturma değerlerinin 22,2 mm. den 1,6 mm.' ye kadar düştüğünü tespit etmişlerdir. Şu halde, kuru CBR değerlerinde 8 kat, yaş CBR değerlerinde 34 kata varan artışların kaydedildiği, kalıcı şekil değiştirmelerde de 8 kat civarında azalma tespit edildiği ve bu sonuçların yol yapımı için istenen gerekli değerlerde olduğunu belirtmişlerdir.

Optimum su muhtevalarında sıkıştırılan malzemelerin değişik kürlenme süreleri sonunda yapılan laboratuvar ortamındaki yaş ve kuru CBR deneyleri sonuçları Şekil 4.1 ve 4.2'deki gibi olmuştur:

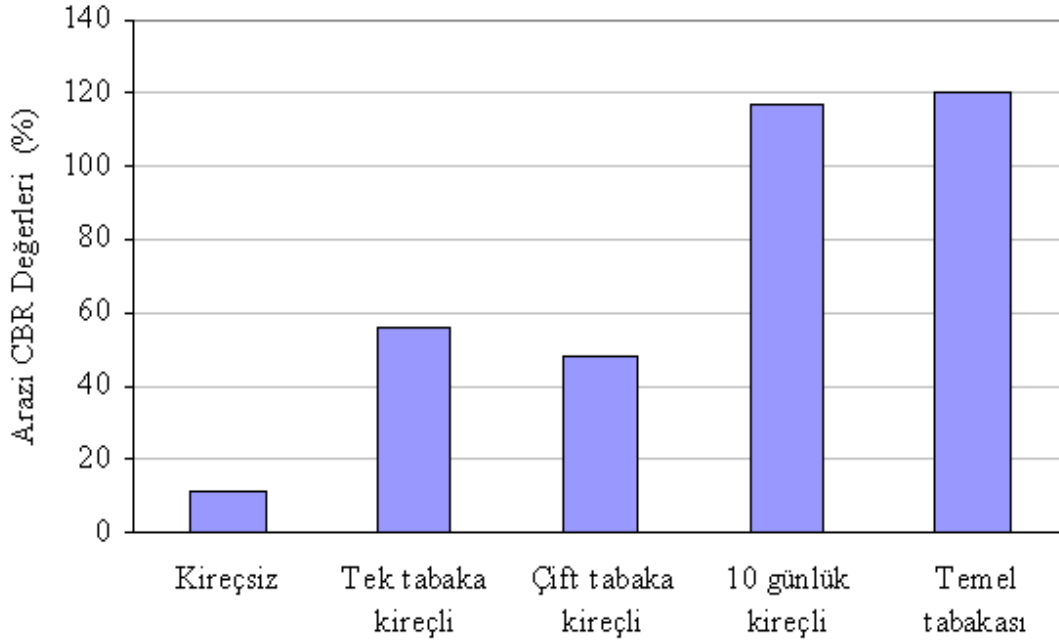


Şekil 4.1. % 5 kireçli karışımda, yaş CBR değerlerinin kür süresi ile değişimi (Kavak ve diğerleri, 2008:21)



Şekil 4.2. % 5 kireçli karışımda, kuru CBR değerlerinin kür süresi ile değişimi (Kavak ve diğerleri, 2008:21)

Doğal malzemenin arazi CBR değeri 11 iken, tek tabaka kireçle sıkıştırılan kısımda CBR değeri 56'ya, çift tabaka kireçle sıkıştırılan kısımda CBR değeri 48'e yükselmiştir. 10 günün sonunda ise kireçli kısmın CBR değeri % 117'ye çıkmıştır (Şekil 4.3).

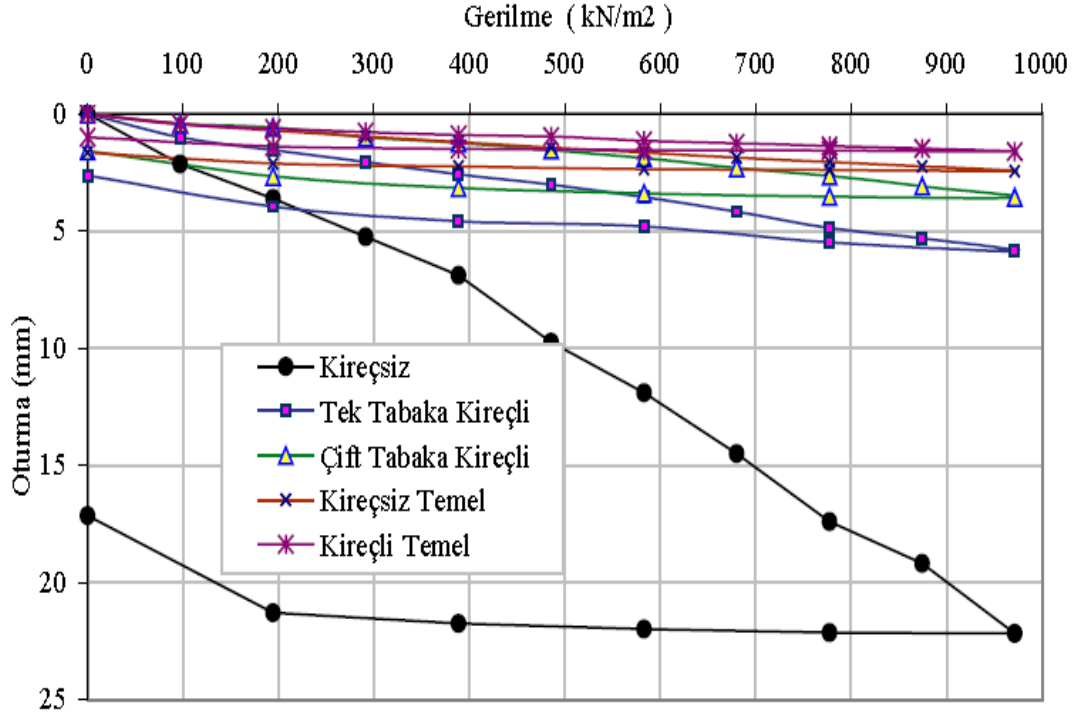


Şekil 4.3. Arazi CBR değerleri (Kavak ve diğerleri, 2008:24)

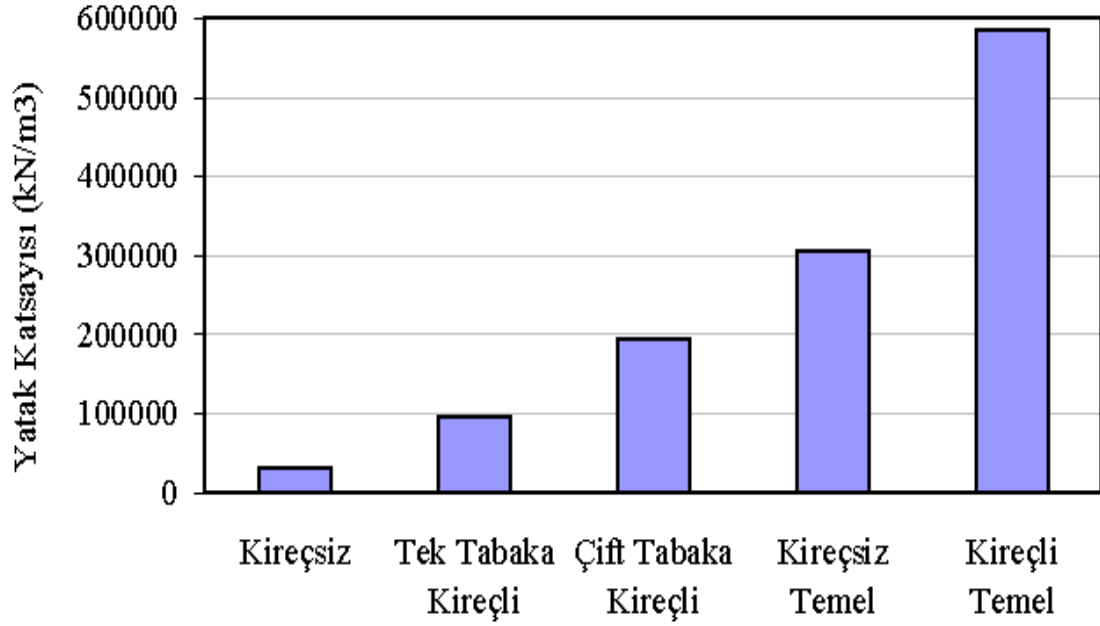
Araştırmacılar, laboratuarda yaptıkları bir dizi deneyler sonucunda; likit ve plastik limit deneylerinde, numunelere % 5 kireç katıldığında, numunelerin non-plastik özelliğe geçtiğini tespit etmişlerdir. Proctor deneyleri sonucunda ise optimum su muhtevası doğal halde % 30,5 iken % 4 kireç ile karıştırıldığında % 30,8, % 5 kireç ile karıştırıldığında ise 31,4'e çıkmıştır. Optimum su muhtevasında artış olması, iş mahallinde daha da yüksek su muhtevasında çalışabilme olanağı sunmaktadır. Ayrıca, 1000 kN/m²'lik gerilmeye kadar uygulanmış yüklemeler ile arazide yaptıkları plaka yükleme deneyleri sonucunda zeminde oluşan yatak katsayıları, maksimum ve kalıcı oturmaları, kireçli ve kireçsiz temel tabakalarına ait gerilme-oturma grafiklerini karşılaştırmalı olarak kaydedilmiştir.

Doğal durumda uygulanan maksimum gerilmeye oluşan oturmalar kireçli temel tabakası altında 3 mm.'lere kadar düşmektedir. Bir başka karşılaştırmada (Şekil 4.4) ise, ilk olarak iki tabaka kireç iyileştirmesi üzerine Karayolu Teknik Şartnamesine (2006) uygun olarak serilen temel malzemesi ile ikinci olarak aynı şartnameye uygun dolgu ile olan temel malzemesi plaka yükleme deneylerine tabi tutulmuş olup kireç kullanıldığından

6 kata varan daha fazla yatak katsayıları (Şekil 4.5), daha az maksimum ve daha az kalıcı oturmalar (Şekil 4.6) tespit edilmiştir.

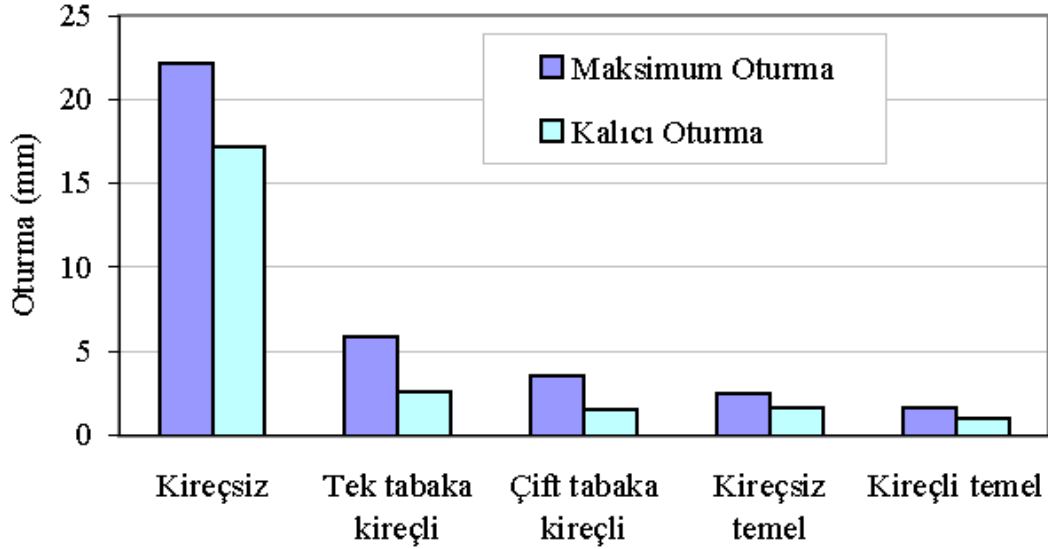


Şekil 4.4. Karşılaştırmalı plaka yükleme deneyi sonuçları (Kavak ve diğerleri, 2008:25)



Şekil 4.5. Karşılaştırmalı yatak katsayısı değerleri (Kavak ve diğerleri, 2008:25)

Şekil 4.5'te ayrıca kireç kullanılarak sıkıştırılmış kısımdaki temel tabakasının yatak katsayısının, kireç kullanılmadan sıkıştırılan kısımdaki temel tabakasının katsayısından yaklaşık 2 katı fazla olduğu da görülmüştür.



Şekil 4.6. Karşılaştırmalı maksimum ve kalıcı oturma değerleri (Kavak ve diğerleri, 2008:26,27)

Yazarlar, çalışmalarında elde ettikleri bulgular ışığında Karayolu Teknik Şartnamesi (2006) içerisinde yer alan Kireç Stabilizasyonu şartnamesini hazırlamışlardır. Elde edilen yüksek CBR değerlerinden yola çıkarak, kireç kullanımının yol yapım maliyetlerini önemli ölçüde düşüreceğini öngörmüşlerdir. Öngörülen bir başka unsur ise kireç kullanımı neticesinde elde edilen düşük kalıcı oturma değerleri ve yüksek yatak katsayısının trafik yükleri altında da olumlu sonuç vereceği olup, yolun trafiğe açılması ile yol durumunun başarılı performansı da bu öngörüü doğrulamıştır (Kavak ve diğerleri, 2008:29).

İslah öncesi temel atma çabasının başarısızlıkla sonuçlandığı 8 kat ve 3 bloktan oluşan Manisa Öğretmen Evinin zemininde, Ünsal (1993), sönmüş kireç kullanımının Türkiye'de zemin iyileştirmesinde ilk kez uygulama şansı yakalanmış olup, çalışma neticesinde yeraltı suyunun tamamen kaybolduğu ve sağlam bir dolgu üretimi gerçekleştiği belirtilmiştir (Ünsal, 1993:84),

Bu çalışmada; daha önce çöplük olarak kullanılan inşaat sahasının naylon, kiremit, çöp, kağıt vs. gibi maddeler içeren suni yığma dolgu zemin ile doldurulduğu, bu yığma

zeminin kazı ile kaldırılıp doğal zemine 3,45 metre derinlikte ulaşıldığı, bu sefer de 4 gözeden çıkan 2,2 lt/sn debiye sahip -1 metre kotunda yeraltı suyuna rastlandığı belirtilmiştir. Zemin bu hali ile ve de CL simgeli düşük plastisiteli killere sahip olduğundan, bina yükünü taşıyamayacak durumdadır ve zemin özelliklerini değiştirmek gerekmiştir.

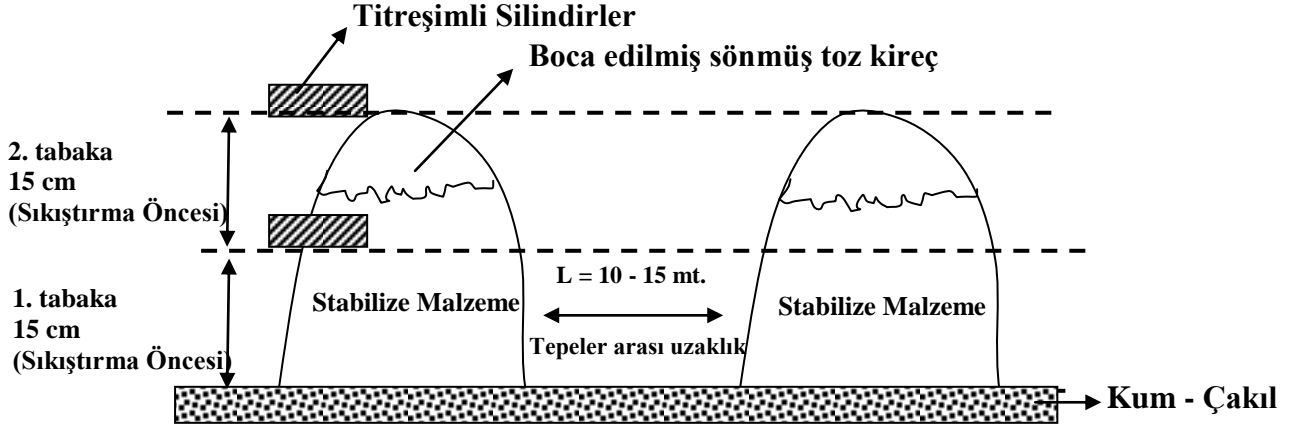
Gerekli zemin dayanımının; üst yapının tekrar projelendirilmesi, sağlam tabakaya inene kadar derin kazı yapılması veya kazık temel kullanılması gibi yöntemlerden ziyade kimyasal yöntemle zemin iyileştirilmesi ile kazanılması yoluna gidilmiştir. Böylece daha ekonomik ve kolay yöntem bulunmuş oldu ki 1992 yılının fiyatları ile; kireç ile iyileştirme 7,5 Milyon TL (Türk Lirası) tutarken, kazık temel uygulamasının maliyeti 4 Milyar TL'ye yaklaşmakta ve arada maliyet farkı 500 kat olarak tahmin edilmekteydi (Yapının toplam keşif bedelinin 9 Milyar TL olduğu da göz önünde tutulmalıdır) (Ünsal, 1993:82).

Kireç ile iyileştirilmiş stabilize malzemeli dolgu üretiminde; kazı sonrası ilk olarak, en altta 60 cm'lik bir moloz + ocak artığı malzeme serilmiş ve üzerine 25 cm'lik kum-çakıl döşenmiş olup bu tabaka zeminde nispeten homojenlik ve duyarlılık sağlamış aynı zamanda kirecin yeraltı suyu tarafından eritilmesini engellemiştir. Temel dolgusunda kullanılacak malzemenin % 2,5'i kadar kireç katkısı kullanılması gerektiği hesaplanmış olup hafriyat kamyonları ile gelen stabilize malzeme birbirlerine 10 - 15 metre mesafeler arasına döküldükten sonra kireç bu tepecikler halindeki malzemeye boca edilip harmanlanmış ve 15 cm.lik katmanlar haline getirilerek yayıldıktan sonra titreşimli ve vibrasyonlu silindirler ile sıkıştırılmıştır (Ünsal, 1993:83).

İyileştirme sırasında, sönmüş kireç tozu zemindeki killer ile reaksiyona girerek zemin mukavemetini artırır ve;

- Şişme basıncı, kabarma potansiyeli, şekil değiştirme ve plastisite indisi azalır.
- Taşıma gücü kapasitesi kayda değer şekilde artar,
- Serbest basınç dayanımı 60 katına kadar arttırılabilir,
- Bataklık niteliğindeki zeminlerde ve optimum su muhtevası üzerinde suya sahip olan zeminlerde zeminin suyunu azaltır,

- İyileştirilen zemindeki kil artık yağışa bağlı sular ve yüzey sularını emmeyeceğinden inşa hızını artırır. Plastisite de azalacağından, arazideki çalışma koşulları da iyileştirilmiş olur (Ünsal, 1993:84).



Şekil 4.7. Stabilize dolgu üretimi ve sönmüş toz kireç karışımı (Ünsal, 1993)

Sönmüş kireç tozu, kil minerallerinden silisi sökerek puzzolanik reaksiyona girer ve çimentolaşma neticesinde zemine yüksek dayanım kazandırır. Suda erimeyen ve sert nitelikteki kalsiyum silikat jeli oluşumundan sonra bu jel kil topraklarını çevreleyip boşlukları tıkama görevi oluşturur sonrasında da hidratlı silise dönüşür. Bütün bu birleşimler suyun mevcudiyeti altında meydana gelir ve reaksiyon hızı yüksek olmamasından dolayı, inşaat aşamasında soruna sebebiyet vermez.

Ortamda pH değeri azalma eğilimindedir ve killerin plastisitesi de azalmaktadır. Doygunluktan fazla su içeren zeminlerde, kireç katkısı zemindeki suda gözle görülür azalmaya neden olduğundan, su için ilave bir önlem tabakasına gerek duyulmamaktadır. Zemin iyileştirme neticesinde geçirimsizlik katkılı grobeton ile inşaatın diğer safhalarına devam edilebilmektedir (Ünsal, 1993:84).

Küçükali (2011:2-61) ve Kılıç, Küçükali ve Ulaş (2015:47-50), Ankara Batıkent'te bulunan yüksek plastisiteli killerin az katlı binalarda şişmeye bağlı çatlamalara, diğer yandan çok katlı yapılarda ise yüke bağlı oturmalara neden olduğunun bilindiğini; optimum su içeriği ve maksimum kuru birim ağırlığı modifiye proktör testi ile belirlenmiş olan bu killerde, şişme yüzdesi, şişme basıncı ve tek eksenli basınç dayanımlarında farklı oranlarda kireç katkısının 7, 28 ve 90 gündeki etkisini incelemiş ve iyileştirmede en uygun karışım oranını bulmayı amaç edinmişlerdir.

Kütlece, % 3, % 6, % 9, % 12 ve % 15 oranlarında kireç içeren karışımlar hazırlanmış olup, ayrı ayrı her bir oranda karışım için maksimum birim ağırlığı ve optimum su içeriği tespit edilmiştir (Kılıç ve diğerleri, 2015:48).

Sonrasında, su içeriği muhafaza ettirilen 7 gün, 28 gün ve 90 günlük numuneler üzerinde şişme yüzdesi ve şişme basıncı tespit edilmiştir.

Yüksek plastisiteli kilin şişme yüzdesi ortalama % 17,67'dir. Şişme basıncı 165,2 kPa (kilopaskal) dır. Tek eksenli basınç dayanımı 437,4 kPa'dır.

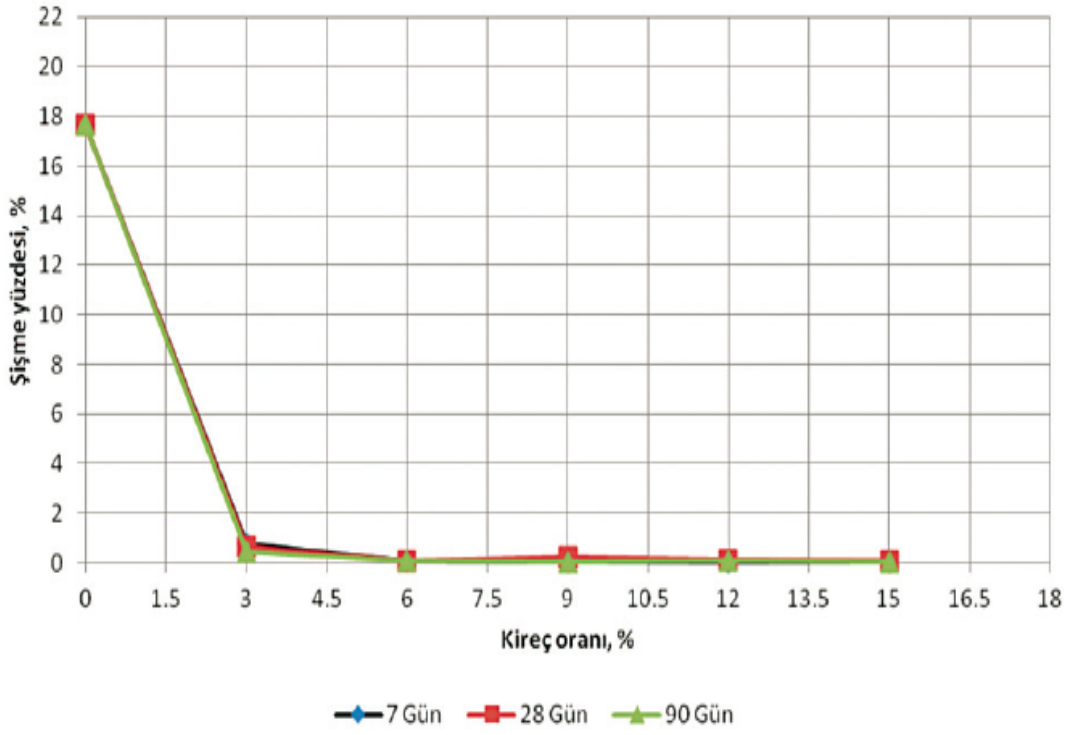
Kile % 3 kireç katıldığı zaman; şişme yüzdesi 7 günde % 0,78; 28 günde % 3,29 ve 90 günde, % 0,46'ya düşmektedir (% 97,40 azaltılmıştır). Şişme basıncı 7 günde 13,5 kPa, 28 günde 38,8 kPa ve 90 günde 15,2 kPa'a düşmektedir (% 92,71 azaltılmıştır). Tek eksenli basınç dayanımı 7 günde 331,9 kPa, 28 günde 209,3 kPa ve 90 günde 287,0 kPa'a düşmektedir.

Kile % 6 kireç katıldığı zaman; şişme yüzdesi 90 günde % 99,55 azaltılmıştır. Şişme basıncı 7 günde 2,0 kPa, 28 günde 1,5 kPa ve 90 günde 1,6 kPa'a düşmektedir (% 99,12 azaltılmıştır). Tek eksenli basınç dayanımı 7 günde 681,6 kPa, 28 günde 972,2 kPa ve 90 günde 835,8 kPa'a artmaktadır.

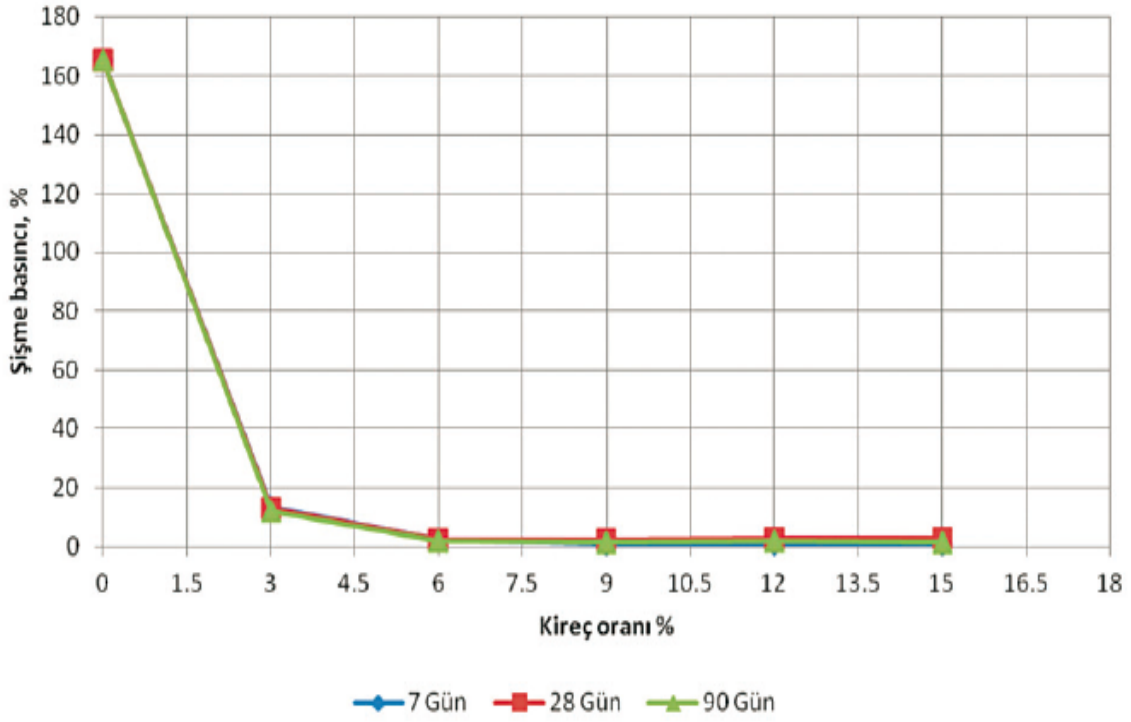
Kile % 9 kireç katıldığı zaman; şişme yüzdesi sıfıra yaklaşmaktadır. Şişme basıncı 7 günde 1,1 kPa ve 90 günde 0,8 kPa'a düşmektedir. Tek eksenli basınç dayanımı 7 günde 1085,1 kPa, 28 günde 920,7 kPa ve 90 günde 1633,9 kPa'a artmaktadır.

Kile % 12 kireç katıldığı zaman; tek eksenli basınç dayanımı 7 günde 991,0 kPa, (% 248 arttırılmıştır), 28 günde 1521,7 kPa (% 313 arttırılmıştır) ve 90 günde 3360,0 kPa'a (% 765 arttırılmıştır) artmaktadır.

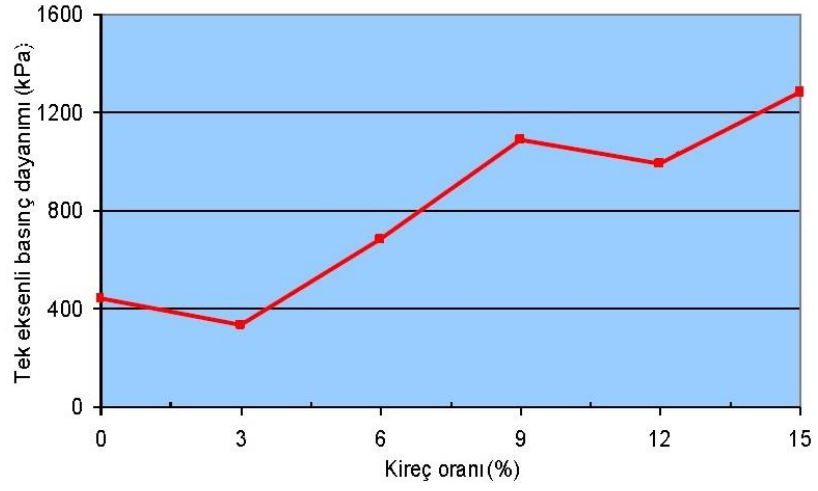
Kile % 15 kireç katıldığı zaman; şişme basıncı 90 günde % 99,18 azaltmıştır. Tek eksenli basınç dayanımı 7 günde 1279,0 kPa ve 28 günde 1372,2 kPa'a artmaktadır. 90 günde şişme basıncı % 99,18 azaltmıştır (Küçükali, 2011:37-41).



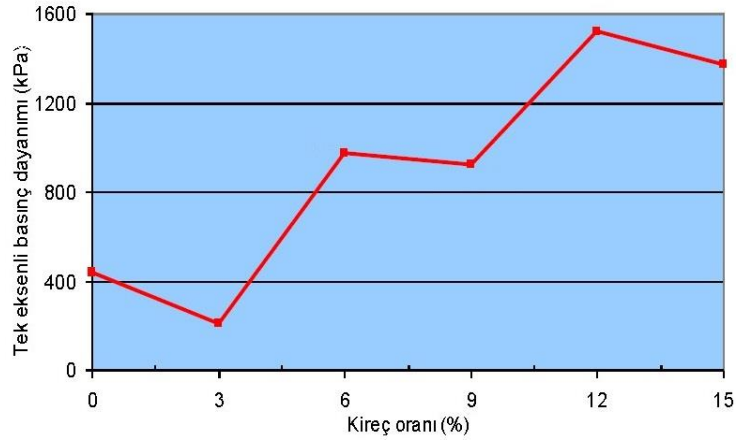
Şekil 4.8. Şişme Yüzdesinin Değişen Kireç Oranlarında Zamana Bağlı Değişimi (Kılıç ve diğerleri, 2015:48)



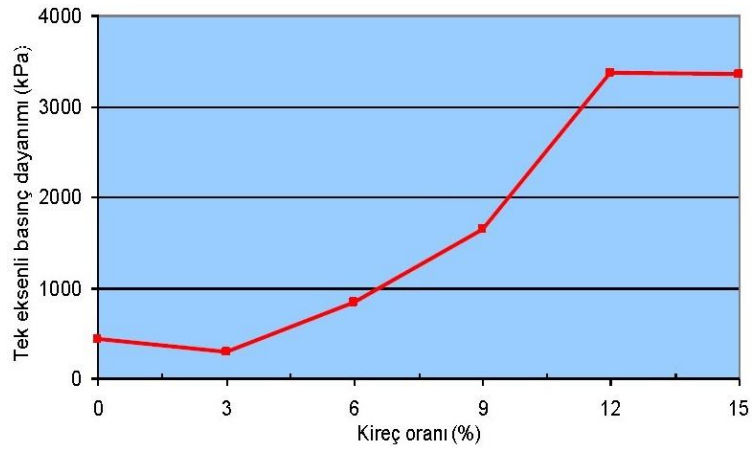
Şekil 4.9. Şişme Basıncının Değişen Kireç Oranlarında Zamana Bağlı Değişimi (Kılıç ve diğerleri, 2015:48)



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.10. Tek Eksenli Basınç Dayanımının Değişen Kireç Oranlarında (a) 7 günlük, (b) 28 günlük, (c) 90 günlük Zamana Bağlı Değişimi (Küçükali, 2011:42-43)

Kilin yüzde olarak karışım içinde oranı arttıkça, şişme basıncı ile şişme yüzdesinin azaldığı tespit edilmiştir. Numunelerin (karışımın) bekleme süresi de artıkça, aynı şekilde şişme basıncı ve şişme yüzdesinin daha da azaldığı, diğer yandan tek eksenli basınç dayanımının arttığı tespit edilmiş olup zamanın, olumlu etkisi açıkça görülmektedir.

En uygun (optimum) karışımın, % 6 oranında kireç içeren karışımda olduğu belirtilmiş olup;

- Karışımın 90 gündeki şişme yüzdesinde % 99,55 azalma,
- Şişme basıncında % 98,98 azalma,
- Tek eksenli basınç dayanımında % 191,87 artma tespit edilmiştir (Kılıç ve diğerleri, 2015:48-50).

SONUÇ VE ÖNERİLER

Şişen zeminler su içeriğine bağlı olarak hacim artışı ve azalmasına maruz kalırken şişme, oturma ve taşıma gücü problemlerine yol açar. Bu problemler de kara ve demir yolları, hava alanları, bina inşaatları ve İller Bankasının temel faaliyet alanı olan altyapı tesislerinde yapısal hasarlara ve dolayısıyla milli servetin kaybına neden olabilmektedir. Bunun önüne geçebilmek için yüksek şişme potansiyeline sahip killi zeminin ve şişmeye neden olan kilin genel özellikleri bilinmeli, şişme davranışı, mekanizması ve mekanizmayı tetikleyen faktörler ortaya konabilmelidir. Şişme özelliği kilin mineralojik yapısı ve kimyasal bileşimi ile doğrudan ilişkilidir. Montmorillonit killeri en fazla şişme potansiyeline sahip kil grubudur. Su içeriği, örtü yükü ve bu tezin ilk bölümde anlatılan diğer faktörler de şişme olgusunu etkilemektedir.

Çeşitli iyileştirme yöntemlerinin uygulanmasıyla zemin parametreleri istenilen yönde ve miktarda değiştirilebilir. Sıkışma kontrolü, şişen zeminin kaldırılması, ön ıslatma ve zemin su içeriğinin kontrolü gibi mekanik ve hidrolik bir çok iyileştirme yöntemi vardır. Yanı sıra, kolay temin edilebilir ve ucuz olmasının avantajı ile katkı maddelerin kullanımı ile de iyileştirme yapılabilir. Kireç, çimento, tuz, uçucu kül ve bitüm gibi malzemeler kimyasal katkı olarak kullanılabilir.

Bu tez çalışmasında, kirecin kimyasal katkı olarak kullanılmasının zemin özellikleri üzerine etkisi açıklanmıştır:

- Likit limit azalırken plastik limit artış göstermekte, plastisite indisindeki azalmalar neticesinde ise zeminin plastiklik özellikleri azalmaktadır.
- Zeminin dayanımı, sıkışabilirlik ve çalışabilirlik özellikleri artmaktadır.
- Şişme değerleri düşmektedir. Maksimum kuru birim hacim ağırlık azalmakta, optimum su muhtevası artmaktadır.

Ayrıca, kirecin ağırlıkça belirli oranlarda katkı malzemesi olarak kullanımı ile yapılan iyileştirme uygulamalarının aşamaları, bulguları ve sağladığı faydalar şu şekildedir:

- Yüksek plastisiteli bir kilin (CH), %5 kireç katkısı ile kuru CBR değerlerinde 8 kat, yaş CBR değerlerinde 34 kata varan artış elde etmek, böylelikle yol yapım maliyetlerinde

önemli ölçüde düşüş elde etmek mümkündür. Kalıcı şekil değiştirmeler ise 8 kata kadar azaltılabilir.

- Düşük plastisiteli bir kilin (CL) serbest basınç dayanımı % 2,5 kireç katkısı kullanılması ile 60 katına kadar arttırılabilir. Bataklık niteliğindeki zeminlerde, zemin suyunun azaltılması ile plastisite de azalır, arazideki çalışma koşulları böylelikle iyileştirilmiş olur ve inşaat hızında artış elde edilir. Kireç kullanımı, zemin üstlerinde sağlam bir tabaka oluşumunu sağladığı gibi, kilin kimyasal yapısında deformasyon oluşturduğundan dolayı tersinir bir reaksiyon olamamakta, kilin olumsuz özellikleri kaybolmakta ve sağlam tabaka muhafaza edilmektedir. Yağmur sebebiyle ıslanmalar neticesinde malzemenin optimum su içeriğinin yüksek olduğu kış aylarında kireç ile iyileştirmenin yapılabilmesi, bu uygulamanın sağladığı bir başka avantajdır.
- Kireç katkısı arttıkça iyileşme de devam etmekte, şişme yüzdesi ve şişme basıncı azalmaktadır. Ancak belirli bir süre sonunda iyileşme asimptotik denebilecek bir değerde sabit kalmaktadır. Bu değere ulaşmak için geçen süre de kireç yüzdesi ile ayrıca ilişkilidir. Yüksek plastisiteli bir kilde (CH), %3 kireç katkısı ile şişme yüzdesi ve şişme basıncı oldukça azalmakta, ancak 90 günlük tek eksenli basınç dayanımı dahi istenilen mertebeye yükseltilememektedir. %6 ve üstünde kireç katkısında şişme yüzdesi ve şişme basıncı sifira yaklaşmakta, tek eksenli basınç dayanımında ise %191 oranında artış sağlanabilmektedir. Bu durumda, en uygun (optimum) iyileştirme %6 kireç katkısı elde edilebilmektedir.

Kireç, diğer bilinen katkı maddelerine göre daha ucuz olması ve bulunabilirliğinin fazla olması avantajıyla bundan sonra daha da yaygın uygulama alanı bulabilecektir. Kireç katkısının şişme yüzdesi, şişme basıncı ve tek eksenli basınç dayanımına olan olumlu etkileri bilinmekte iken, zeminin kayma mukavemeti parametrelerine, hidrolik geçirimsizliğine ve taşıma gücü gibi mühendislik özelliklerine yaptığı etkiler üzerine çalışmalar henüz yeteri kadar olmadığından, konu üzerine daha kapsamlı araştırmalar yapılması kireç ile iyileştirme esaslarının tam olarak ortaya konulması açısından önemli olacaktır.

KAYNAKLAR

- Abduljawwad, S. N. (1991). Characteristics and Chemical Treatment of Expansive Clay in Al-Qatif Saudi Arabia. *Engineering Geology*, 30, 143-158.
- Akyarlı, A., Kavak, A., Atay, S., Alkaya, S. (2004). *Killi Zeminlerin Kireç İle İyileştirilmesi*. İzmir: Kimtaş A.Ş. Yayınları.
- Ali, R., Khan, H., Shah, A. A. (2012). Expansive Soil Stabilization Using Marble Dust and Bagasse Ash. *International Journal of Science and Research*, 3, 2812-2816.
- Amer A. Al-Rawas. (1998). The Factors Controlling The Expansive Nature of The Soils and Rocks of Northern Oman. *Engineering Geology*, 53, 327–350.
- Angın, Z. ve Angın, A. (2005). *Şişen Killerin Geoteknik Özelliklerinin İyileştirilmesi*. Geoteknik Sempozyumunda sunuldu, Adana.
- ASTM (1992). *Classification Of Soils For Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*, ASTM D2487-11, 325-335.
- Atalar, C., Kılıç, R. (2006). Geotechnical Properties Of Cyprus Clays. *Engineering Geology For Tomorrow's Cities*, The 10th IAEG Congress, Nottingham, UK, 6-10 September 2006, paper no: 419, In DVD.
- Avşar, E., Ulusay, R., Sönmez, H. (2009). Assessments of Swelling Anisotropy of Ankara Clay. *Engineering Geology*, 105, 24-31.
- Aytekin, M. (2004). *DeneySEL Zemin Mekaniği*. Ankara: Teknik Yayınevi.
- Basma, A. A., and Al-Sharif, M. A. (1994). Treatment of Expansive Soils to Control Swelling. *Geotechnical Engineering Journal*, 25, 3-19.
- Basma, A.A., Al-Rawas, A., Al-Saadi, S. N., and Al-Zadjalı, T. F. (1998). Stabilization of Expansive Clay in Oman. *Environmental and Engineering Geoscience*, 503-510.
- Bilir, M. E, Sürül, S., Çıtıroğlu, H. K. (2016). Gökçetepe Formasyonu (Zonguldak) Kilitaşlarının Eksenel Şişme Gerilmelerinin Belirlenmesi. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi* 6 (1), 152-167.
- Başer, O. (2009). *Stabilization of Expansive Soils Using Waste Marble Dust*, Master Thesis, Middle East Technical University, Ankara: 12.
- Bell, F. G. (1996). Lime Stabilization of Clay Minerals and Soils. *Engineering Geology*, 42, 223-237.
- Bowles, J. E. (1996). *Foundation Design and Analysis* (5th Edition). New York: McGraw-Hill.
- Brackley, I. J. A. (1975). *Swell Under Load*. Paper presented at the 6th Regional Conference for Africa on Soil Mechanics and Found. Eng. 2, 102-124.

- Çetin, M. (2003). *Değişik Çevresel Koşullar Altında, Şişen Zeminlerin Özelliklerinin Belirlenmesi*, Yüksek lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, 58.
- Chen, F. H. (1965). *Engineering Effects of Moisture Change in Soils*. Paper presented at the Concluding Proceedings International Research and Engineering Conference on Expansive Clay Soils, A & M Press, Texas.
- Çanga, M. (2005). *Kırıkkale, Hacılar Civarındaki Üst Pliyosen Kilinin Jeoteknik Özellikleri Ve Yükleme - Boşaltma Altında Davranışlarının İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji . Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara: 1, 33, 34.
- Çimen, Ö., Keskin, S., N., Şimşek, S., Kalay, E. (2010). *Yüksek Plastisiteli Bir Kilin Mühendislik Özelliklerine Pomza ve Mermer Tozunun Etkisi*, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği On Üçüncü Ulusal Kongresinde sunuldu, İstanbul: 855-862.
- Das, B. M. (1995). *Principles of Foundation Engineering*. Boston, USA: PWS Publishing Company, A Division Of International Thomson Publishing Inc., 828.
- Demir, S., Kılıç, M. (2010) *Şişen Zeminlerin Tanımlanması ve Zemin İyileştirme Yöntemleri*. *Gaziosmanpaşa Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi* 27(1), 95-104.
- Dhowian, A. W., Ruwaih, I. E., Youssef A., and Erol, A. O. (1984) Evaluation of Expansive Soils and Foundation Methodology in Kingdom of Saudi Arabia. *Research Report SANCST: AT-5-88*.
- Erkan, İ. H. (2007). *Konya ili 2. ve 3. Organize Sanayi Bölgesi'nin Jips İçerikli Killi Zeminin Kireç Kolonları Tekniği ile İyileştirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Konya: 1-2.
- Erdoğan, T.Y. (1993). *Atık Hammaddelerin İnşaat Endüstrisinde kullanımı Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu*, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanımı Sempozyumunda sunuldu, Ankara: 1-8.
- Genç, S. (2009). *Şişen Zeminler Ve Bentonit – Kaolin Karışımlarının Şişme Özellikleri*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Anabilim Dalı, İstanbul: 24-25, 39, 40, 42.
- Gilchrist, H.G. (1963). *A Study Of Volume Change Of A Highly Plastic Clay*, M.SC. Thesis, Department Of Civil Engineering, University Of Saskatchewan, Saskatoon, Canada: 215.
- Grim, R.E. (1962). *Applied Clay Mineralogy*. New York: McGraw Hill Book Co., 422.
- Güler, E., Edinçliler, A. (1993). *Kireç Difüzyonunun Killerin Kayma Mukavemetine Etkisi*. Altıncı Ulusal Kil Sempozyumunda sunuldu, İstanbul: 411-418.
- Güler, E., Avcı, C. (1993). *Kil Tabakalarının Permeabilitesine Kireç Stabilizasyonunun Etkisi*. Altıncı Ulusal Kil Sempozyumunda sunuldu, İstanbul: 209-216.

Handy, R. L., and Williams, N. W. (1967). Chemical Stabilization of an Active Landslide. *Civil Engineering*, 37 (8), 62-65.

Holtz, W. G., Gibbs, H.J. (1956). *Engineering Properties Of Expansive Clays*, Transactions, ASCE, 121, 641-677. 81

Huat, B., B., K., Maail, S. and Mohamed, T., A. (2005). Effect of Chemical Admixtures on the Engineering Properties of Tropical Peat Soils, *American Journal of Applied Sciences*, 2, 7, 1113-1120.

İnternet: Bozkurt, S. Zemin Mühendisliğine Giriş. URL:
<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.slideshare.net%2FseyfettinBozkurt%2Fzemin-mhendisliine-giri&date=2018-01-07>, Son Erişim Tarihi: 07.01.2018

İnternet: Milligan, C. (2014). Building A Home in Colorado's Expandable Soil. URL:
<http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fwww.staufferandsons.com%2Fblog%2Funderstanding-expandable-soils-building-new-home-colorado%2F&date=2018-01-29>, Son Erişim Tarihi: 29.01.2018

İnternet: Killi Zeminlerde Oluşan Yapısal Hasarlar. URL:
<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fdocplayer.biz.tr%2Fdocs-images%2F60%2F45174790%2Fimages%2F2-1.png&date=2018-01-07>, Son Erişim Tarihi: 07.01.2018

İnternet: Killi Zeminlerde Oluşan Yapısal Hasarlar. URL:
<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fdocplayer.biz.tr%2Fdocs-images%2F60%2F45174790%2Fimages%2F2-4.png&date=2018-01-07>, Son Erişim Tarihi: 07.01.2018

İnternet: Swelling Soils. URL:
<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fcoloradogeologicalsurvey.org%2Fgeologic-hazards%2Fswelling-soils%2Fdefinition%2F&date=2018-01-07>, Son Erişim Tarihi: 07.01.2018

İnternet: Yol Stabilizasyonu. URL:
http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.guvenzirai.com.tr%2Fcontent-283-yol_stabilizasyonu.html&date=2018-01-09, Son Erişim Tarihi: 09.01.2018

Karabüyük, E. (2001). *Kumlu Zeminlerin Stabilizasyonunda Bentonitin Kullanılmasının Geoteknik Özelliklere Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen ilimleri Enstitüsü, Erzurum.

Kasapoğlu, K. E. (1989). *Killerin Jeomühendislik Özellikleri*. IV. Ulusal Kil Sempozyumu Bildiriler Kitapçığı, 3-29.

Kavak, A., Keskin E. (2003). *Yüksek Su Muhtevasında Killi Bir Zeminin Kireç Stabilizasyonu İle İyileştirilmesi ve Yol Kesitine Etkileri*. XI. Kil Sempozyumunda sunuldu, İzmir.

- Kavak, A., Güngör, A. K., Avşar, C., Atbaş, B., Akyarlı, A. (2008). *Bölünmüş Yol Çalışmalarında Bir Kireç Stabilizasyonu Uygulaması*, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onikinci Ulusal Kongresinde sunuldu, Konya.
- Kavak, A., Akyarlı, A., Atay, S., Alkaya S., (2008). *Killi Zeminlerin Kireç İle İyileştirilmesi*, İzmir, 4.
- Keskin, İ. (2005), *INM 308 Zemin Mekaniği Kil Mineralleri ve Zemin Yapısı*. 22
- Kılıç, R., Küçükali, ., Ula mış, K. (2015). Ankara Kilinin Kireç ve Jips ile İyileştirilmesi. *Yapı Dünyası Dergisi*, 230-231-232, 47-50.
- Kılıç, R. (2017). *Zemin Mekaniği Notları*, İller Bankası Genel Müdürlüğü, Zemin Mekaniği Ve Temel Mühendisliği Eğitim Semineri, Ankara, 8
- Kılıç, R., Küçükali, ., Ula mış, K. (2015). Stabilization of high plasticity clay with lime and gypsum. Ankara, Turkey: *Bull Eng Geol Environ* DOI 10.1007/s10064-015-0757-2
- Küçükali, . (2011). *Kireç ve Jipsin, st Pliyosen Yaşlı Yüksek Plastisiteli Killerin (Ankara) şişme ve Dayanım zelliklerine Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Ankara.
- Mitchell, J. K. (1976). *Fundamentals of Soil Behavior*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 422.
- Mitchell, J. K. (1993). *Fundamentals of Soil Behavior* (Second Edition). New York: John Wiley & Sons.
- Noble, C. A. (1966). Swelling Measurements And Prediction Of Heave For Lacustrine Clay, *Canadian Geotechnical Journal*, 3(1), 32-41.
- nalp, A. (1982). *İnşaat Mühendislerine Geoteknik Bilgisi*, Cilt II, Trabzon: K.T. Yayını, Yayın no: 187.
- zaydın, K. (1989). *Zemin Mekaniği*. İstanbul: Yıldız Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü.
- zaydın, K. (2012). *Zeminlerin İyileştirilmesi*. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Ondördüncü Ulusal Kongresinde sunuldu.
- Öztürk, Y. E. (2012). *Kil Mineralleri Açışından İnce Daneli Zeminlerin Fiziko-Kimyasal zellikleri ile Kıvam Limitleri Arasındaki İlişkiler*, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Niğde: 26.
- Öztürk, Y. Z., nsal, N., Akbaş, S. O. (2015). Glbaş (Ankara) Yerleşim Alanı Killerinin şişme ve Kireç ile İyileştirilme Potansiyellerinin Belirlenmesi. Ankara: *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 30(2), 309-318.
- Rajasekaran, G. and Rao, S., N. (2002). Permeability Characteristics Of Lime Treated Marine Clay, *Ocean Engineering*, 29, 113-127.

- Rengmark, F. and Erikson, R. (1953). *Apparatus of Soil Suction in Expansive Soil Compression and Elastic Properties of Soils*. Proceedings, 3rd ICSMFE. Vol.1.
- Seed, H. B., Woodward, R. J., and Lundgren, R. (1962). Prediction of Swelling Potential of Compacted Clays. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, American Society of Civil Engineers. 88(3), 53-87, 83.
- Tonoç, M., C., Ulusay, R. ve Gökçeoglu, C. (2004). Effect of Lime Stabilization on Engineering Properties of Expansive Ankara Clay, *Earth and Environmental Science*, 104, 466-474.
- Tosun, H., Türköz, M. (2000). *Şişen Killerin Sönmüş Kireç Katkısı ile Stabilizasyonu*, İstanbul: İTÜ Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Sekizinci Ulusal Kongresinde sunuldu.
- Tüdeş, E. (1996). *Zeminlerin Kireç ve Çimento Katkısı İle Stabilizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü.. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Türköz, M. (2006). Şişen Killerin Kireç Katkısı İle Stabilizasyonu ve Eskişehir - Meşelik Killerine Uygulanması. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 19(2), 75-87.
- Ünsal, N. (1993). Sekiz Katlı 3 Üniteli Manisa Öğretmenevi İnşaatında Uygulanan Sönmüş Kireç tozu İle Zemin Islahı. Manisa: *Jeoloji Mühendisliği*, 43,82-84.
- Ünver, E. (2015). *Problemlili Kil Zeminlerin Uçucu Kül ile İyileştirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Geoteknik Bilim Dalı, 5-20.
- Wise, J. R., Hudson W. R. (1971). *An Examination of Expansive Clay Problems in Texas; Study of Expansive Clays in Roadway Structural Systems Research Project*. Austin: U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration The Texas Highway Department, 55.
- Yıldırım, S. (2004). *Zemin İncelemesi ve Temel Tasarımı*. İstanbul: Birsen Yayınevi, 439, 453.
- Yıldırım, Ü. E. (2009). *Şişen Killer ve Tünel Tasarımına Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Anabilim Dalı, İstanbul: 24-25.
- Yılmaz, I., Karacan E. (1998). Zeminlerin Şişme Özellikleri. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayını 52, 17-26.
- Yılmaz, M. K., Çelik, S. (2012). Kil Zeminin Şişme Basıncı ve Konsolidasyon Özelliklerine Öğütülmüş Kumun Etkisinin Araştırılması. *KSU Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 15(2), 32-36.
- Yılmaz, M. K. (2014). *Improvement of Expansive Soils by Using Cement Kiln Dust*, Master Thesis, Middle East Technical University Civil Engineering Department, Ankara.

Zorluer, İ., Usta M. (2003). *Zeminlerin Atık Mermer Tozu ile İyileştirilmesi*. Türkiye IV. Mermer Sempozyumu 2003 Bildiriler Kitabı.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ŞAFAK, Cihangir
Doğum yılı ve yeri : 1983 Konya
Telefon (İş) : 0 (332) 238 82 00
e-mail : csafak@ilbank.gov.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Selçuk Üniversitesi – İşletme	Haziran 2013
Lisans	Orta Doğu Teknik Üniversitesi – İnşaat Mühendisliği	Ocak 2006
Lise	Konya Meram Anadolu Lisesi	Haziran 2000

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2012- devam	İller Bankası A.Ş. Konya Bölge Müd.	Teknik Uzman Yrd.
2010-2012	Nod Yapı Tic. Ve San. Ltd. Şti.	Fabrika Müdürü
2006-2010	İlk İnşaat Taah. San. Ve Tic. Ltd. Şti.	Proje Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce – Rusça

Hobiler

Bilgisayar ve konsol oyunları, seyahat



İL BANK
TÜRKİYE'NİN YAPICI GÜCÜ