

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**PERLİTİN PUZOLANİK KATKI OLARAK KİREÇ İLE BİRLİKTE
ZEMİN STABİLİZASYONUNDA KULLANIMI**

DOKTORA TEZİ

İnş. Müh. Ümit ÇALIK

**OCAK 2012
TRABZON**

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**PERLİTİN PUZOLANİK KATKI OLARAK KİREÇ İLE BİRLİKTE
ZEMİN STABİLİZASYONUNDA KULLANIMI**

İnşaat Mühendisi Ümit ÇALIK

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"DOKTOR (İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 29.12.2011

Tezin Savunma Tarihi : 25.01.2012

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Erol ŞADOĞLU

Trabzon 2012

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında

Ümit ÇALIK Tarafından Hazırlanan

PERLİTİN PUZOLANİK KATKI OLARAK KİREÇ İLE BİRLİKTE
ZEMİN STABİLİZASYONUNDA KULLANIMI

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 10 / 01 / 2012 gün ve 1437 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda

DOKTORA TEZİ

olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

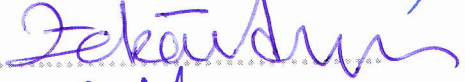
Başkan : Prof. Dr. Özcan TAN

Üye : Prof. Dr. Bayram Ali UZUNER

Üye : Prof. Dr. Fikri BULUT

Üye : Yrd. Doç. Dr. Zekai ANGIN

Üye : Yrd. Doç. Dr. Erol ŞADOĞLU



Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Doğal bir puzolan olan ve Mollaköy yöresinden (Erzincan) tedarik edilen perlitin, tek başına ve kireç ile birlikte, mühendislik açısından problemlili Gürbulak beldesi (Trabzon) doğal malzemesinin plastisite, geçirimsizlik, hacim değiştirme, dayanım ve durabilite gibi geoteknik özelliklerinde gerçekleştireceği değişimler göz önüne alınarak, başarılı bir stabilizasyon yapılabileceğini ve stabilizasyonda en uygun performansı hangi katkı oranı/oranlarında gösterdiğini ortaya çıkarmayı amaçlayan bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda doktora tezi olarak hazırlanmıştır.

Doktora tez danışmanlığımı üstlenerek tez konumun belirlenmesinde ve sonrasındaki çalışmalarım esnasında gerekli yardım, teşvik, destek ve ilgisini gördüğüm gerek insan olarak gerekse hoca olarak kendime örnek edindiğim Sayın Yrd. Doç. Dr. Erol ŞADOĞLU'na sonsuz minnet ve teşekkürlerimi öncelikle belirtmek isterim.

Tez izleme komitemde yer alarak çalışmamı başından itibaren takip eden ve doktora çalışmamın bu seviyelere gelmesinde emekleri olan Sayın Prof. Dr. Bayram Ali UZUNER, Sayın Prof. Dr. Fikri BULUT ve Sayın Prof. Dr. Mustafa AYTEKİN'e katkılarından dolayı çok teşekkür ederim.

Değerli vakitlerini ayırarak çalışmamı değerlendirme nezaketinde bulunan Selçuk Üniversitesi öğretim üyelerinden Sayın Prof. Dr. Özcan TAN'a minnettarlığımı sunarım.

Yaptığım deneysel çalışma süresince bana kesintisiz destekleri sebebiyle Geoteknik ve Ulaştırma Laboratuvarı yöneticisi Sayın Yrd. Doç. Dr. Zekai ANGIN ile laboratuvar çalışanları uzman Ali SEMERCİ ve teknisyen Fikret BÜLBÜL'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmayı Yurt İçi Doktora Burs Programı kapsamında destekleyen TÜBİTAK Bilim İnsanı Destekleme Daire Başkanlığı'na teşekkürlerimi arz ederim.

Tüm hayatım boyunca destek ve sevgileriyle yanımda olan aileme sonsuz sevgilerimi sunar, doktora çalışmamın bilim ve uygulama alanında çalışan inşaat mühendislerine faydalı olmasını dilerim.

Ümit ÇALIK
Trabzon 2012

TEZ BEYANNAMESİ

Doktora tezi olarak sunduğum “Perlitin Puzolanik Katkı Olarak Kireç ile Birlikte Zemin Stabilizasyonunda Kullanımı” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Yrd. Doç. Dr. Erol şADOĞLU’nun sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.25/01/2012

Ümit ÇALIK

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER DİZİNİ	XIV
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Amaçlar	2
1.3. Tezin Organizasyonu	3
1.4. Zemin Stabilizasyon Teknikleri	3
1.4.1. Giriş.....	3
1.4.2. Mekanik Stabilizasyon	14
1.4.3. Kimyasal Stabilizasyon.....	18
1.4.3.1. Kireç ile Zemin Stabilizasyonu.....	23
1.4.3.2. Puzolanlar ile Zemin Stabilizasyonu.....	38
1.4.3.2.1. Doğal Puzolanlar.....	41
1.4.3.2.2. Yapay Puzolanlar	45
1.5. Literatür Çalışması.....	55
2. DENEYSEL ÇALIŞMA	71
2.1. Metodoloji.....	71
2.1.1. Yapılan Deneyler ve Referans Alınan Deney Standartları	71
2.1.2. Deney Numunelerinin İsimlendirilmesi ve Hazırlanması.....	72
2.2. Materyaller	74
2.2.1. Doğal Malzeme	74
2.2.2. Perlit.....	85
2.2.2.1. Dünya’da Perlit	90

2.2.2.2.	Türkiye’de Perlit	90
2.2.2.3.	Perlit Üretim, Tüketim ve Stok Durumu.....	92
2.2.2.4.	Perlitin Satış Fiyatı.....	93
2.2.3.	Kireç.....	94
3.	BULGULAR.....	98
3.1.	Deney Verileri.....	98
3.1.1.	İndeks Özellikleri.....	99
3.1.1.1.	Kıvam Limitleri.....	99
3.1.1.2.	Kompaksiyon Parametreleri.....	107
3.1.1.3.	Geçirimlilik Katsayıları.....	113
3.1.1.4.	Şişme Parametreleri	115
3.1.2.	Sıkışma Parametreleri	119
3.1.3.	Dayanım Parametreleri	122
3.1.3.1.	Serbest Basınç Dayanımları	122
3.1.3.2.	Görünür Kohezyon ve İçsel Sürtünme Açılırları.....	125
3.1.4.	Durabilite Tetkikleri.....	129
3.1.4.1.	Hacimsel Stabilitayı Esas Alan Durabilite Tetkiki	129
3.1.4.2.	Serbest Basınç Dayanımını Esas Alan Durabilite Tetkiki	131
3.2.	Deney Verilerinin Regresyon Analizleri.....	133
3.2.1.	Likit Limit ve Plastisite İndislerinin Çoklu Doğrusal Regresyon Analizi.....	134
3.2.2.	Serbest Basınç Dayanımlarının Çoklu Doğrusal Regresyon Analizi.....	136
3.2.3.	Diğer Mühendislik Özelliklerinin Regresyon Analizleri.....	136
4.	İRDELEME	138
5.	SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	144
6.	KAYNAKLAR	147
ÖZGEÇMİŞ		

Doktora Tezi

ÖZET

PERLİTİN PUZOLANİK KATKI OLARAK KİREÇ İLE BİRLİKTE
ZEMİN STABİLİZASYONUNDA KULLANIMI

Ümit ÇALIK

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Erol ŞADOĞLU
2012, 159 Sayfa

Zayıf zeminlerin fiziksel, hidrolik, mekanik ve kimyasal özelliklerinin iyileştirilmesine zemin stabilizasyonu denilmektedir. Perlit amorf yapısı ve yüksek SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ içeriği sebebiyle doğal bir puzolandır. Diğer puzolanlar gibi stabilizasyon çalışmalarında kimyasal stabilizör olarak kullanılabilir. Ancak perlitin aktif CaO eksikliğinden dolayı puzolanik karakteristiği olmasına rağmen çimentolaşma yeteneği çok az veya hiç yoktur. Bu yüzden perlit zemin stabilizasyonunda çimentolaşma reaksiyonları için kalsiyum içeren ikinci bir bağlayıcıya ihtiyaç duymaktadır.

Bu çalışmada, montmorillonit ve nontronit gibi smektit grubu mineraller içeren yüksek plastisiteli killi bir zeminin perlit ve kireç katkılarıyla stabilizasyonu deneysel olarak araştırılmıştır. Bu amaç için, %0, 10, 20, 30, 40 ve 50 perlit oranları ile kirecsiz ve %8 (optimum kireç oranı) kireçli karışımlar hazırlanmıştır. Bu karışımların geoteknik özellikleri ile bu özelliklerin perlit oranı ve zamana bağlı değişimleri belirlenmiştir.

Deney sonuçları, perlit ve kirecin kombinasyonunun; zeminin işlenebilirlik, plastisite, geçirimsizlik, sıkışabilirlik, dayanım ve durabilite gibi geoteknik özelliklerini sadece perlite veya sadece kirece göre daha çok iyileştirdiğini göstermiştir. Bu deneysel çalışma, %30 perlit ve %8 kireç içeren SKP30 karışımının bu zeminin stabilizasyonunda en optimum çözüm olduğunu ortaya çıkarmıştır. Yapılan regresyon analizleriyle üretilen matematiksel denklemler, geoteknik özellikler ile perlit oranı ve zaman değişkenleri arasında güçlü ilişkilerin mevcut olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Zemin stabilizasyonu, Doğal puzolan, Perlit, Kireç, Puzolanik reaksiyon, Regresyon analizi

PhD. Thesis

SUMMARY

UTILIZATION OF PERLITE AS A POZZOLANIC ADDITIVE
IN SOIL STABILIZATION WITH LIME

Ümit ÇALIK

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Asst. Prof. Erol ŞADOĞLU
2012, 159 Pages

Improvement of physical, hydraulic, mechanical and chemical properties of weak soils is named as soil stabilization. Perlite is a natural pozzolan due to its amorphous structure and high SiO_2 , Al_2O_3 and Fe_2O_3 contents. Perlite can be used a chemical stabilizer as other pozzolans. But perlite has pozzolanic properties but it possesses little or no cementitious ability due to lack of active CaO. Therefore, perlite requires a second additive that contains calcium for pozzolanic reactions in soil stabilization.

In this study, stabilization with perlite and lime of a high plasticity clayey soil containing smectite group minerals such as montmorillonite and nontronite was investigated experimentally. For this purpose, test mixtures were prepared adding 0%, 10%, 20%, 30%, 40% and 50% of perlite and with 8% of lime (optimum lime ratio) and without lime. Geotechnical properties of the mixtures and change of these properties depending on perlite ratio and time were determined.

The test results show that stabilization of the soil with combination of perlite and lime improves the geotechnical properties such as workability, plasticity, permeability, compressibility, strength and durability higher than those of perlite or lime alone. This experimental study unveils that SKP30 mixture containing 30% perlite and 8% lime is the optimum solution in the stabilization of this soil. The mathematical equations generated from regression analysis indicated that there are strong relations between geotechnical properties and variables of perlite ratio and time.

Key Words: Soil stabilization, Natural pozzolan, Perlite, Lime, Pozzolanic reaction, Regression analysis

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Zemin türlerine göre muhtemel stabilizasyon yöntemleri.....	6
Şekil 1.2. Zemin ıslah yöntemlerinin sınıflandırılması	10
Şekil 1.3. 19. yüzyıl yollarının enkesit görüntüleri	14
Şekil 1.4. Zemindeki ince malzemenin durumları.....	16
Şekil 1.5. Zeminlerin ufalanmasını için kullanılan tırmıklar.....	17
Şekil 1.6. Zemin üçgen gradasyon nomogramı	20
Şekil 1.7. Su molekülünün dipolar karakteri ve hidratlaşma yapan katyon	29
Şekil 1.8. Kil tanesinin etrafındaki çift tabaka bölgesi.....	30
Şekil 1.9. Kil taneleri arasındaki mesafenin azalması	31
Şekil 1.10. Kil tanelerinin disper ve flok yapıları.....	32
Şekil 1.11. Çimentolaşma mekanizması.....	35
Şekil 1.12. Otojen onarım mekanizması.....	38
Şekil 1.13. Puzolanların sınıflandırılması	40
Şekil 1.14. Volkanik kökenli doğal puzolanlar (pomza taşı, volkanik cam ve tüf)	42
Şekil 1.15. Diatomlar ve diatomeli toprak tabakaları	43
Şekil 1.16. Yapay puzolanlar (silis dumanı, pirinç kabuğu külü, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül)	45
Şekil 2.17. Afşin-Elbistan termik santrali atık sahasındaki uçucu kül adası.....	51
Şekil 2.1. Serbest basınç deneyi için numunelerinin hazırlanması ve saklanması	74
Şekil 2.2. Doğal malzemenin alındığı Gürbulak beldesinin konumu.....	75
Şekil 2.3. Doğal malzemenin alındığı yer, heyelan sahası ve hasarlı köy evi.....	76
Şekil 2.4. RIGAKU D/MAX IIC marka difraktometre.....	77
Şekil 2.5. Doğal malzemenin X-ışını kırınım deseni (difraktogram)	78
Şekil 2.6. Smektit grubu killerin ana birimleri	78
Şekil 2.7. Doğal malzemenin tane boyutu dağılım eğrisi.....	80
Şekil 2.8. TS 1500’de yer alan Casagrande plastisite kartı ve doğal malzemenin plastisite kartındaki yeri.....	82
Şekil 2.9. Doğal malzemenin su içinde hacimsel bütünlüğünü kaybetmesi.....	83
Şekil 2.10. Erzincan Mollaköy’deki perlit ocağı ve agrega konkasörü.....	86

Şekil 2.11. Perlitin tane boyutu dağılım eğrisi	87
Şekil 2.12. Erzincan Mollaköy yöresi perlitin X-ışını kırınım deseni.....	88
Şekil 2.13. Çeşitli oranlarda katılan kirecin doğal malzemenin plastisitesine etkisi.....	95
Şekil 2.14. Optimum kireç oranının ASTM D 6276'ya göre tespiti	96
Şekil 2.15. %8 kireç oranındaki serbest basınç dayanımlarının zamana bağlı değişimi	97
Şekil 3.1. SP karışımlarının likit limitleri.....	102
Şekil 3.2. SP karışımlarının plastik limitleri.....	102
Şekil 3.3. SP karışımlarının rötre limitleri.....	103
Şekil 3.4. SP karışımlarının plastisite indisleri.....	103
Şekil 3.5. SP karışımlarının plastisite kartındaki yerleri	104
Şekil 3.6. SKP karışımlarının likit limitleri	104
Şekil 3.7. SKP karışımlarının plastik limitleri.....	105
Şekil 3.8. SKP karışımlarının rötre limitleri.....	105
Şekil 3.9. SKP karışımlarının plastisite indisleri	106
Şekil 3.10. SKP karışımlarının plastisite kartındaki yerleri.....	106
Şekil 3.11. Perlit ve kireç katkılarının tane boyutu dağılım eğrileri.....	107
Şekil 3.12. SP karışımlarının optimum su içerikleri.....	110
Şekil 3.13. SP karışımlarının maksimum kuru yoğunlukları	110
Şekil 3.14. SP karışımlarının boşluk oranları	111
Şekil 3.15. SKP karışımlarının optimum su içerikleri	111
Şekil 3.16. SKP karışımlarının maksimum kuru yoğunlukları	112
Şekil 3.17. SKP karışımlarının boşluk oranları	112
Şekil 3.18. SP karışımlarının geçirimsizlik katsayıları	114
Şekil 3.19. SKP karışımlarının geçirimsizlik katsayıları	115
Şekil 3.20. SP karışımlarının serbest şişme yüzdeleri	117
Şekil 3.21. SP karışımlarının şişme basınçları.....	118
Şekil 3.22. SKP karışımlarının serbest şişme yüzdeleri	118
Şekil 3.23. SKP karışımlarının şişme basınçları	119
Şekil 3.24. SP karışımlarının konsolidasyon parametreleri	121
Şekil 3.25. SKP karışımlarının konsolidasyon parametreleri	122
Şekil 3.26. SP karışımlarının serbest basınç dayanımları	124
Şekil 3.27. SKP karışımlarının serbest basınç dayanımları	124
Şekil 3.28. Karışımların görünür kohezyon değerlerinin değişim eğrileri	128

Şekil 3.29. Karışımlara ait içsel sürtünme açılarının değişim eğrileri.....	128
Şekil 3.30. 12 adet ıslanma-kurumu periyodundan birine ait görüntü.....	129
Şekil 3.31. 12 kez ıslanma-kurumaya maruz kalan deney numunelerinin görüntüleri...	130
Şekil 3.32. SKP karışımlarının ıslanma-kuruma periyodundaki kütle kaybı eğrileri.....	130
Şekil 3.33. Durabilite deneyi için deney numunelerinin su içinde bırakılması	131
Şekil 3.34. SKP karışımlarının durabilite tetkiki kapsamında yapılan serbest basınç deneyleri sonundaki kırılma biçimleri.....	132
Şekil 3.35. SKP karışımlarının değişen çevre koşullarında serbest basınç dayanımlarındaki kayba gösterdiği dayanıklılık.....	132

TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Zemin cinslerine göre zemin stabilizasyon yöntemleri.....	7
Tablo 1.2. Stabilizasyon amacına göre olası ıslah metotları	8
Tablo 1.3. Çeşitli zemin iyileştirme metotlarının yaklaşık maliyetleri	12
Tablo 1.4. Mekanik stabilizasyon için gerekli gradasyon sınırları.....	15
Tablo 1.5. İnce malzemenin zemin gradasyonundaki miktarına göre zemine etkileri ..	16
Tablo 1.6. Zemin stabilizasyonu için katkılarının seçimi.....	21
Tablo 1.7. Kireç, çimento, puzolan-kireç ve puzolan-çimento-kireç kombinasyonlarında sağlanması gereken asgari serbest basınç mukavemeti değerleri	22
Tablo 1.8. Kireç, çimento, puzolan-kireç ve puzolan-çimento-kireç kombinasyonlarında sağlanması gereken durabilite kriterleri	22
Tablo 1.9. Ticari kireçlerin özellikleri.....	24
Tablo 1.10. Optimum kireç oranı için kullanılabilir başlangıç değerleri	25
Tablo 1.11. Değişik zemin türleri için yaklaşık kireç miktarları.....	27
Tablo 1.12. Bazı katyonların kil tanelerini rölatif yumaklaştırma gücü.....	32
Tablo 1.13. Doğal puzolanların kimyasal bileşimindeki bazı oksitlerin miktarı.....	44
Tablo 1.14. Doğal puzolanların sağlanması gereken fiziksel değerler.....	44
Tablo 1.15. Doğal puzolanların sağlanması gereken kimyasal değerler	45
Tablo 1.16. Silis dumanının kimyasal kompozisyonu.....	46
Tablo 1.17. Yüksek fırın cüruflarının kompozisyonları	48
Tablo 1.18. ASTM'ye göre yüksek fırın cürufunda bulunması istenen özellikler	49
Tablo 1.19. Türkiye'deki termik santraller.....	50
Tablo 1.20. Uçucu kül ve taban külünün kimyasal kompozisyonları	53
Tablo 1.21. Uçucu küllerin puzolan olarak kullanılabilirlik sınırları	54
Tablo 1.22. Uçucu küllerin sağlanması gereken fiziksel değerler.....	54
Tablo 2.1. Deneylerde referans alınan standartlar	71
Tablo 2.2. Doktora çalışmasında üretilen karışımlara ait isimlendirmeler	72
Tablo 2.3. Doğal malzemenin mühendislik özellikleri	79
Tablo 2.4. Doğal malzemedeki zemin sınıflarının MIT ve USCS'ye göre yüzdeleri....	80
Tablo 2.5. Zeminlerin karakteristik özgül ağırlıkları.....	85

Tablo 2.6. Mollaköy perlitinin mühendislik özellikleri	86
Tablo 2.7. Mollaköy perlitinin kimyasal özellikleri	87
Tablo 8.8. Perlitteki zemin sınıflarının MIT ve USCS'ye göre yüzdeleri	88
Tablo 2.9. Puzolan olarak Mollaköy yöresi perlitinin durumu	89
Tablo 2.10. Önemli perlit yatakları ve rezerv miktarları	90
Tablo 2.11. Türkiye perlit rezervleri	91
Tablo 2.12. Türkiye'nin perlit ihracatı	92
Tablo 2.13. Yıllar itibariyle perlit satış fiyatları	94
Tablo 2.14. Deneyde kullanılan kirecin fiziksel özellikleri.....	94
Tablo 2.15. Deneyde kullanılan kirecin kimyasal bileşimi.....	94
Tablo 3.1. SP karışımlarının kıvam limitleri.....	100
Tablo 3.2. SKP karışımlarının kıvam limitleri.....	101
Tablo 3.3. SP karışımlarının kompaksiyon parametreleri.....	109
Tablo 3.4. SKP karışımlarının kompaksiyon parametreleri.....	109
Tablo 3.5. SP ve SKP karışımlarının geçirimsizlik katsayıları	114
Tablo 3.6. SP ve SKP karışımlarının şişme parametreleri.....	117
Tablo 3.7. SP karışımlarının konsolidasyon deney verileri	120
Tablo 3.8. SKP karışımlarının konsolidasyon deney verileri	121
Tablo 3.9. SP karışımlarının serbest basınç dayanımları	123
Tablo 3.10. SKP karışımlarının serbest basınç dayanımları.....	123
Tablo 3.11. SP ve SKP karışımlarının kesme kutusu deneyi parametreleri	127
Tablo 3.12. Mühendislik özelliklerinin regresyon analizi denklemleri	137

SEMBOLLER DİZİNİ

A	: Aktivite, Alan, Al_2O_3
AASHTO	: Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma İdareleri Birliği
AB	: Avrupa Birliği
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
ASCE	: Amerika İnşaat Mühendisleri Derneği
ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Kurumu
b_i	: Regresyon denklemi katsayıları
C	: CaO
c	: Kohezyon
CAH	: Kalsiyum alümina hidrate
CASH	: Kalsiyum alümina-silika hidrate
CBR	: Kaliforniya taşıma oranı
C_c	: Sıkışma indisi
CH	: Yüksek plastisiteli inorganik kil
CHO	: Yüksek plastisiteli organik kil
CI	: Orta plastisiteli inorganik kil
CIO	: Orta plastisiteli organik kil
CL	: Düşük plastisiteli inorganik kil
CLO	: Düşük plastisiteli organik kil
C_r	: Eğrilik katsayısı, Yeniden yükleme indisi
CSA	: Kanada Standartlar Derneği
CSH	: Kalsiyum silika hidrate
C_u	: Uniformluluk katsayısı
e	: Boşluk oranı
E	: Elastisite modülü
FHWA	: Federal Karayolu İdaresi
GC	: Killi çakıl
GM	: Siltli çakıl
GP	: Kötü derecelenmiş çakıl
G_s	: Özgül ağırlık

GW	: İyi derecelenmiş çakıl
H	: H ₂ O
H ₀	: Kil tabakası kalınlığı
i	: Hidrolik eğim
k	: Geçirimsizlik katsayısı
K	: Kireç miktarı
K-Ç-P	: Kireç, çimento ve puzolan kombinasyonu
km	: Kilometre
kPa	: Kilopaskal (kN/m ²)
LL	: Likit limit
Mg	: Megagram
MH	: Yüksek plastisiteli inorganik silt
MHO	: Yüksek plastisiteli organik silt
MI	: Orta plastisiteli inorganik silt
MIO	: Orta plastisiteli organik silt
MIT	: Massachusetts Teknoloji Enstitüsü
ML	: Düşük plastisiteli inorganik silt
MLO	: Düşük plastisiteli organik silt
mm	: Milimetre
MPa	: Megapaskal (MN/m ²)
NP	: Plastisite özelliği göstermeyen
P	: Perlit oranı
pH	: Hidrojen gücü
PI	: Plastisite indisi
PL	: Plastik limit
ppm	: Miligram/Kilogram
q _u	: Serbest basınç dayanımı
R ²	: Determinasyon (korelasyon) katsayısı
S	: SiO ₂ , Kükürt
SBD	: Serbest basınç dayanımı
SC	: Killi kum
SI	: Büzülme indisi
SKK	: Söndürülmüş kalker kireci

SKP	: Doğal zemin, kireç ve perlit karışımı
SL	: Büzülme (rötre) limiti
SM	: Siltli kum
SP	: Doğal malzeme ve perlit karışımı, Kötü derecelenmiş kum
SW	: İyi derecelenmiş kum
T	: Zaman
TEAŞ	: Türkiye Elektrik İletim A.Ş.
TS	: Türk Standartları
USCS	: Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi
v	: Hız
w_{opt}	: Optimum su içeriği
x_i	: Bağımsız değişken(ler)
y	: Bağımlı değişken
£	: Pound
°C	: Santigrat derece
°F	: Fahrenheit derece
ΔH	: Konsolidasyon oturması
μm	: Mikrometre
$\rho_{d,max}$: Maksimum kuru yoğunluk
σ	: Düşey gerilme
σ_3	: Çevre basıncı
σ'_c	: Ön konsolidasyon basıncı
σ'_f	: Nihai efektif gerilme
σ'_o	: Başlangıçtaki efektif gerilme
τ	: Kayma mukavemeti
φ	: İçsel sürtünme açısı

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Yapıların stabilitesi ve hizmet ömrü, üzerine oturduğu zeminin ve/veya dolguda kullanılan zeminin mühendislik özellikleri ile doğrudan ilişkilidir. Zira zeminler temel sistemleri ile birlikte yapı ağırlıklarının ve kullanım yüklerinin oluşturduğu gerilmelere emniyetle karşı koyabilmelidir. Ayrıca çevre ve iklim koşullarından ötürü zemin özelliklerinin değişmesi ile (örneğin kabarma-büzülme, don kabarması, oturma, su içeriğindeki değişiklikler vb.) taşıma gücünde azalmalar ve ilave gerilmeler gibi hususların oluşmaması, oluşuyorsa yapıda olumsuz etkiler yaratmayacak seviyede olması gerekmektedir. Bu yüzden mühendislik uygulamalarında yapıların yeterli özelliklere sahip zemin üzerine oturtulması gelenekselleşmiş bir düşüncedir.

Bina, köprü, yol ve baraj gibi mühendislik yapılarının üzerinde inşa edileceği zeminler her zaman uygun özelliklerde olmayabilir. Kentlerin büyümesi ve sanayi yapılarının artması ile sağlam zemin bölgelerinin azalması düşük direnç ve yüksek deformasyon özellikli zayıf zeminlerin üzerine de yapıların inşasını zorunlu hale getirmiştir. Buna paralel olarak problem yaratan zayıf zeminler için uygun bir mühendislik çözümü ile sorunun giderilmesi çalışmalarında başlamıştır.

Zayıf zeminlerin oluşturduğu ortamlarda geoteknik mühendisleri aşağıda genelleştirilmiş alternatiflerden birine karar vermek durumundadır:

- ❖ Uygun olmayan zemini olduğu gibi kabul etme
- ❖ Uygun olmayan zemini atıp yerine uygun bir zemin koyma
- ❖ Uygun olmayan zemini ıslah etme

Birinci alternatif, zeminin zayıf özellikleri göz önüne alınarak üzerine inşa edilecek mühendislik yapılarına (mühendislik dolguları, sanat yapıları vb.) ait temel sistemlerinin bu zayıflıklara karşı koyabilecek şekilde ve tipte tasarlanmasıdır. Ancak bu durumda yapının aşırı büyük boyutlarda dizayn edilmesi gerektiğinden ötürü ekonomik olamayacağı gibi uzun dönemde zeminin olumsuz etkileri ile yapı performansı, hizmet ömrü ve bakım/onarım masrafları gibi konularda yetersizlikler ortaya çıktığını geçmiş tecrübeler göstermektedir.

İkinci alternatif, uygun olmayan zeminin kazılması ve kazılan zeminin uygun bir depo yerine taşınması, yerine konacak uygun zemin için bir malzeme ocağının bulunması, malzeme ocağında hafriyat yapılması, uygun olmayan zeminin olduğu yere taşınması ve sıkıştırılması işlemlerini kapsar. Bunlar ise zaman alıcı olduğu gibi çok büyük bir maliyetle de karşı karşıya kalınabilmektedir.

Üçüncü alternatifte değişik zemin ıslah teknikleri ile zayıf mühendislik özelliklerine sahip doğal zeminin iyileştirilerek kullanılmasıdır (Tunç, 2002).

Türkiye’de eş anlamlı olarak kullanılan “zemin iyileştirmesi” ve “zemin stabilizasyonu” terimleri gerçekte bazı farklılıklar gösterirler. İyileştirme genel bir terim olup zeminin yoğunluğu, geçirimsizliği, ısı iletkenliği, şişme/büzülme yeteneği, göçebilirliği, dağınık yapısı gibi özellikleri değiştirmeyi gözetir. Bir parselde bina yükünün makul derinliğe inilmesine karşın zemin veya kaya tarafından hedeflenen taşıma gücü veya oturma limitleri içinde kalarak temel sistemine taşıtılamaması durumu ise stabilizasyon uygulaması gerektirir. Stabilizasyon işlemleri özellikle sıkışabilirlik ve kayma direnci parametrelerinin istenen yönde değiştirilmesi ve sıvılaşma riskinin giderilmesi olarak algılanmalıdır (Önalp ve Sert, 2006).

1.2. Amaçlar

Bu çalışmadaki ana amaçlar; doğal bir puzolan olan ve Erzincan ili Mollaköy yöresinden tedarik edilen perlit agregasının tek başına ve kireç ile birlikte mühendislik açısından problemlili Trabzon Merkez ilçesine bağlı Gürbulak beldesi doğal malzemesinin plastisite, geçirimsizlik, hacim değiştirme, dayanım ve durabilite gibi geoteknik özelliklerinde gerçekleştireceği değişimler göz önüne alınarak, başarılı bir stabilizasyon yapıp yapılamayacağını araştırılması ve stabilizasyonda en uygun performansı hangi katkı oranı ya da oranlarında gösterdiğinin ortaya konulmasıdır.

Bu amaçlara uygun olarak Karadeniz Teknik Üniversitesi Geoteknik ve Ulaştırma Laboratuvarı’nda deneysel bir doktora çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma ile dünyadaki toplam rezervin yaklaşık %74’ünün ülkemizde bulunduğu perlit madeninin puzolanik özellikleri sayesinde Gürbulak beldesinde 2006 yılında meydana gelmiş heyelana ait sahanın şişme potansiyeline sahip yüksek plastisiteli killi zeminin stabilizasyonunda başarılı bir şekilde kullanılabilmesi kanıtlandığında, perlit için yeni bir

kullanım alanının doğacağı ve ülkemiz ekonomisine büyük katkı sağlanacağı düşünülmektedir.

1.3. Tezin Organizasyonu

Doktora çalışmasında hedeflenen amaçlar ve tez içeriği ile ilgili detaylar, tez konusu ile yakından ilişkili zemin stabilizasyon yöntemlerine ait kapsamlı bilgiler ve bu yöntemlerle ilgili özellikle son 10 yılın literatür çalışmalarının özetleri Bölüm 1’de; deneysel çalışmanın metodolojisi ile alakalı ayrıntılar (laboratuvar testleri ile ilgili prosedürler, numune hazırlama, saklama ve isimlendirme vb.) ve çalışmada kullanılan materyallerle (doğal malzeme, perlit ve kireç) ilgili bilgiler Bölüm 2’de; perlitin tek başına ve kireç ile birlikte stabilizasyonda kullanılmasının avantaj ve dezavantajlarını ortaya koyan deneylere ait sonuçlar, deney parametrelerinin değişim eğrileri ve regresyon analizi kullanılarak deney verileri ile mühendislik özellikleri arasında matematiksel ilişkilerin üretilmesi Bölüm 3’de; çalışma bulgularının irdelenmesi Bölüm 4’de; bu tezden elde edilen genel sonuçlar ve bundan sonraki akademik çalışmalara ışık tutması amacıyla sunulan öneriler Bölüm 5’de ve tez kapsamında yararlanılan kaynaklar Bölüm 6’da olacak şekilde bu doktora tezi organize edilmiştir.

1.4. Zemin Stabilizasyon Teknikleri

1.4.1. Giriş

Mühendislik yapılarına problem teşkil edebilecek zeminlerle karşılaşıldığındaki en temel çözüm yöntemleri; zayıf zeminin kazılıp tamamen kaldırılması ve yerine yeterli özelliklerde malzeme getirilip sıkıştırılması veya zayıf zeminin yapı yüklerini taşıyabilmesi için büyük temel sistemlerinin seçilmesi olarak söylenebilir (Ingles ve Metcalf, 1973). Bu iki yöntemin uygulanması kolay olmadığı gibi ucuza da mal edilememektedir. Uzun dönemde zeminin olumsuz etkileri ile yapı performansı, hizmet ömrü ve bakım/onarım masrafları gibi konulardaki olumsuzlukları da geçmiş tecrübeler göstermektedir. Bu yüzden doğal zeminin kendisinin çeşitli yöntemlerle ıslahı yoluna gidilmesi her zaman daha avantajlı olmaktadır.

Stabilizasyon çalışmaları ilk anda masraflı gözükse de yapının güvenliğinin artırılmasının yanı sıra inşaatın kalan kısmının maliyetinin azalmasını sağlaması bakımından gerekli olmaktadır. Zemin stabilizasyon teknikleri ile;

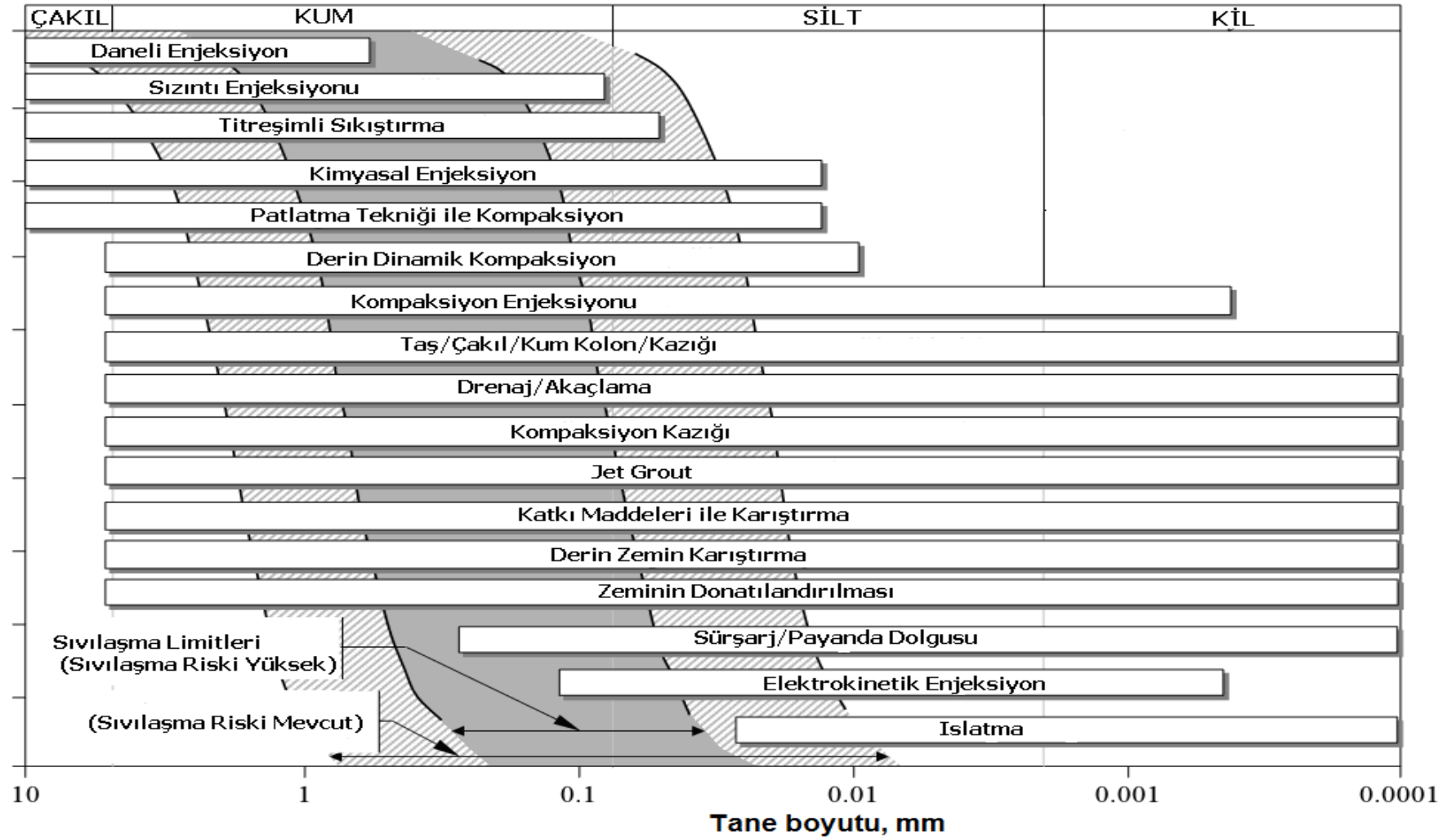
- ❖ Kayma direnci dolayısıyla taşıma gücü artırılır.
- ❖ Temellerin oturması azaltılır.
- ❖ Oturmaların azaltılması ve hacim stabilitesinin sağlanması ile üst yapıdaki deformasyonlar azaltılır.
- ❖ Geçirimlilik kontrol altına alınır. (Hidratlı kireç geçirimsizliği artırır.)
- ❖ Yeraltı suyunun dren edilmesi kolaylaştırılır ve/veya boşluk suyu basıncı azaltılır.
- ❖ Zeminlerin şişme ve büzülme kapasitesi azaltılır.
- ❖ Yamaçların, dolguların ve toprak barajların güvenliği artırılır.

Geoteknik mühendisi öncelikle zeminin mühendislik özelliklerini iyice belirledikten sonra kısa ve/veya uzun dönemde problem yaratabilecek kısımlar için uygun ve ekonomik bir zemin ıslah yöntemi belirlemelidir. Farklı zemin cinsleri farklı stabilizasyon tekniği gerektirdiği gibi, her bir stabilizasyon amacı için farklı uygulama teknikleri mevcuttur.

Zemin türlerine göre uygulanabilecek zemin stabilizasyon yöntemlerini Mitchell ve Gallagher (1998) ve Hunt (1986 ve 1994) sırayla Şekil 1.1 ve Tablo 1.1'deki gibi verirken, U.S. Army Corps. of Eng. (2003) ise Tablo 1.2'deki gibi istenen zemin stabilizasyon amaçlarına göre seçilebilecek olası ıslah tekniklerini listelemiştir.

Lambe vd. (1990), Kota vd., (1996), Hausmann (1990), McCallister-Petry (1990) ve Puppala-Hanchanloet (1996) gibi bir çok araştırmacı ise stabilizasyon tekniklerini genellikle mekanik stabilizasyon ve kimyasal stabilizasyon olarak iki ana grup altında toplamaktadırlar. Mekanik stabilizasyon, fiziksel işlemlerle zeminlerin fiziksel, hidrolik ve mekanik özelliklerini değiştirmeye yarayan yöntemleri içermektedir. Bu yöntemler, zemine ihtiyaca göre ince veya iri boyutlu malzeme karıştırarak iyi derecelenmiş ve sıkı zemin karışımları elde etmeyi sağlarlar. Mekanik stabilizasyon işlemleri ile zeminin sıkılığında, mukavemetinde, dren kabiliyetinde ve hacimsel stabilitesinde pozitif değişimler sağlanır. Mekanik stabilizasyon ile iyileştirilemeyen zeminlere, çeşitli katkılarla kimyasal reaksiyonlar yaptırılarak zemin mühendislik özelliklerinin değiştirilmesi esasına dayanan işlemlere kimyasal stabilizasyon denir (Lambe vd., 1990). Zeminin mukavemetinde, sıkışabilirliğinde, geçirimsizliğinde, büzülme/genleşme potansiyelinde, sıvılaşmasında ve işlenebilirliğinde iyileşmelere yol açan katkılar, kalsiyum kökenli çimento, kireç ve uçucu

kül, bitüm ile çeşitli tuzlardır. Ancak zemine katılan bu tür kimyasal (puzolanik) reaksiyon yapma kabiliyetine sahip katkıları, stabilizasyonda oldukça etkili olsalar da, kullanımda bazı kısıtlamalar mevcuttur. Çimento ve kireç gibi kalsiyum kökenli çoğu katkı sülfatça zengin zeminlerde zamanla şişme problemine sebep olmaktadır (Kota vd., 1996). İnce taneli ve organik zeminlerde çimento katkılı stabilizasyon çalışmaları ekonomik olmamaktadır (Hausmann, 1990). Sızma probleminin olduğu yerlerde ve iri taneli zeminlerde kireç ile stabilizasyon yapılamamaktadır (McCallister ve Petry, 1990; Puppala ve Hanchanloet, 1996). Uçucu küllerin bileşimindeki ağır metallerden dolayı çevre ve su kirliliği sorunları yaratabilmektedir. Bitüm ile yapılan stabilizasyonda, killi zeminlerden ziyade granüler zeminlerde uygulanabilmektedir (Hausmann, 1990).



Şekil 1.1. Zemin türlerine göre muhtemel zemin stabilizasyon yöntemleri (Mitchell ve Gallagher, 1998).

Tablo 1.1. Zemin cinslerine göre zemin stabilizasyon yöntemleri (Hunt (1986 ve 1994).

Zemin cinsleri		Stabilizasyon yöntemleri
Çeşitli dolgular	Sığ	Kazı/Geri dolgu
	Derin	Dinamik kompaksiyon, kum kolonlar
Organik zeminler	Sığ	Kazı/Geri dolgu, geotekstil
	Derin	Sürşarj, geotekstil, kum kolonlar
	Tabakalı	Sürşarj, patlatma tekniği, dinamik kompaksiyon, kompaksiyon enjeksiyonu, kum kolonlar, taş kolonlar
Yumuşak killer	Sığ	Kazı/Geri dolgu, geotekstil
	Derin	Sürşarj, geotekstil, kum veya kireç kolonlar
	Tabakalı	Sürşarj, dinamik kompaksiyon, kompaksiyon enjeksiyonu, kum veya kireç kolonlar
Killer		Mekanik stabilizasyon, kireç stabilizasyonu, termal(dondurma), elektro-osmoz, geosentetik, drenaj
Gevşek siltler	Sığ	Kazı/Geri dolgu, tuz katkısı
	Derin	Dinamik kompaksiyon, sürşarj, taş kolonlar, elektro-osmoz, vakum kuyuları
Gevşek kumlar	Sığ	Çimento veya bitüm stabilizasyonu, dinamik kompaksiyon
	Derin	Vibroflatasyon, vibrokompaksiyon, dinamik kompaksiyon, enjeksiyon, taş kolonlar, drenaj kuyuları, termal (dondurma)
Sıvılaştırılabilen zeminler		Dinamik kompaksiyon, enjeksiyon, taş kolonlar, drenaj
Şişen zeminler		Kireç stabilizasyonu, drenaj, çimento, uçucu kül, tuz, kimyasal katkıları
Çatlaklı kayalar		Enjeksiyon, ankraj, şatkrit, yüzey altı yatay drenaj

Tablo 1.2. Stabilizasyon amacına göre olası ıslah metotları (U.S. Army Corps. of Eng., 2003).

Amaçlar	Stabilizasyon yöntemleri
Sıvılaşma direncini arttırmak. Deplasmanları azaltmak.	Vibrokompaksiyon Taş kolonlar Derin dinamik kompaksiyon Patlayıcı tekniği ile kompaksiyon Çakıl kolonlar Jet grout Kompaksiyon enjeksiyonu Granüler kolonlar (kum ve çakıldan)
Farklı oturmaya maruz kalabilecek yapıların zeminlerini ıslah etmek. Farklı oturma, deformasyon ve kırılma direncinin arttırmak.	Kompaksiyon enjeksiyonu Jet grout Mini kazıklar
Ani oturmaları azaltmak.	Vibrokompaksiyon Derin dinamik kompaksiyon Patlayıcı tekniği ile kompaksiyon Kompaksiyon enjeksiyonu Jet grout Granüler kolonlar (kum ve çakıldan)
Konsolidasyon oturmalarını azaltmak.	Ön yükleme (sürşarj) Jet grout Kompaksiyon enjeksiyonu Taş kolonlar Elektro-osmoz
Konsolidasyon oturması oranının arttırmak.	Sürşarj dolgulu veya dolgusuz düşey drenler Granüler kolonlar (kum ve çakıldan)
Şev stabilitesini arttırmak.	Payanda dolgusu Çakıl drenler Granüler kolonlar (kum ve çakıldan) Kompaksiyon enjeksiyonu Jet grout Zemin çivi ve vidaları
Şişen zeminlerin ıslah etmek.	Kireç stabilizasyonu Çimento stabilizasyonu Mekanik stabilizasyon Drenaj
Erozyon direncini arttırmak.	Bioteknik stabilizasyon Mekanik stabilizasyon Kompaksiyon

Tablo 1.2'nin devamı

Amaçlar	Stabilizasyon yöntemleri
Sızıntı yollarını kapamak ve/veya su akımı doğrultusundaki borulanmayı azaltmak.	Kompaksiyon enjeksiyonu Penetrasyon enjeksiyonu
Çatlaklardan ve birleşim yerlerinden su kaçaklarını engellemek.	Kompaksiyon enjeksiyonu
Göçen zeminleri ıslah etmek.	Derin dinamik kompaksiyon Vibrokompaksiyon Enjeksiyon

Van Impe (1989), stabilizasyon yöntemlerinde değişik bir gruplandırmaya giderek bunları üç ana başlık altında toplamıştır:

- ❖ Geçici etkili (kozmetik) yöntemler
- ❖ Kalıcı etkili, yabancı bir katkı eklenmeden sonuçlandırılan yöntemler
- ❖ Kalıcı etkili, ancak ortama katkı maddesi veya yabancı cisim ekleyerek gerçekleştirilen yöntemler

Etkisine özel ve acil durumlarda gereksinim duyulan yöntemler geçici ve kozmetik önlemlerdir. Bunlar yeraltı su seviyesinin düşürülmesi, zeminin dondurulması ve elektrokinetik olarak da bilinen elektro-osmoz yöntemler olarak sayılabilir. Bina inşaatı veya temel kazısı tamamlandıktan sonra sürdürülmeyen, etkisi de ortadan kalkan bu çalışmalar yüksek maliyetli ancak acil çözüm sağlayan etkinliklerdir.

Zemine bir katkı maddesi veya yabancı bir cisim eklenmeden sonuçlandırılan kalıcı stabilizasyon teknikleri, titreşim uygulayarak ortamın yoğunluğunu yükselten yada ortamı yüksek sıcaklıklara çıkararak taşlaştıran yöntemlerdir.

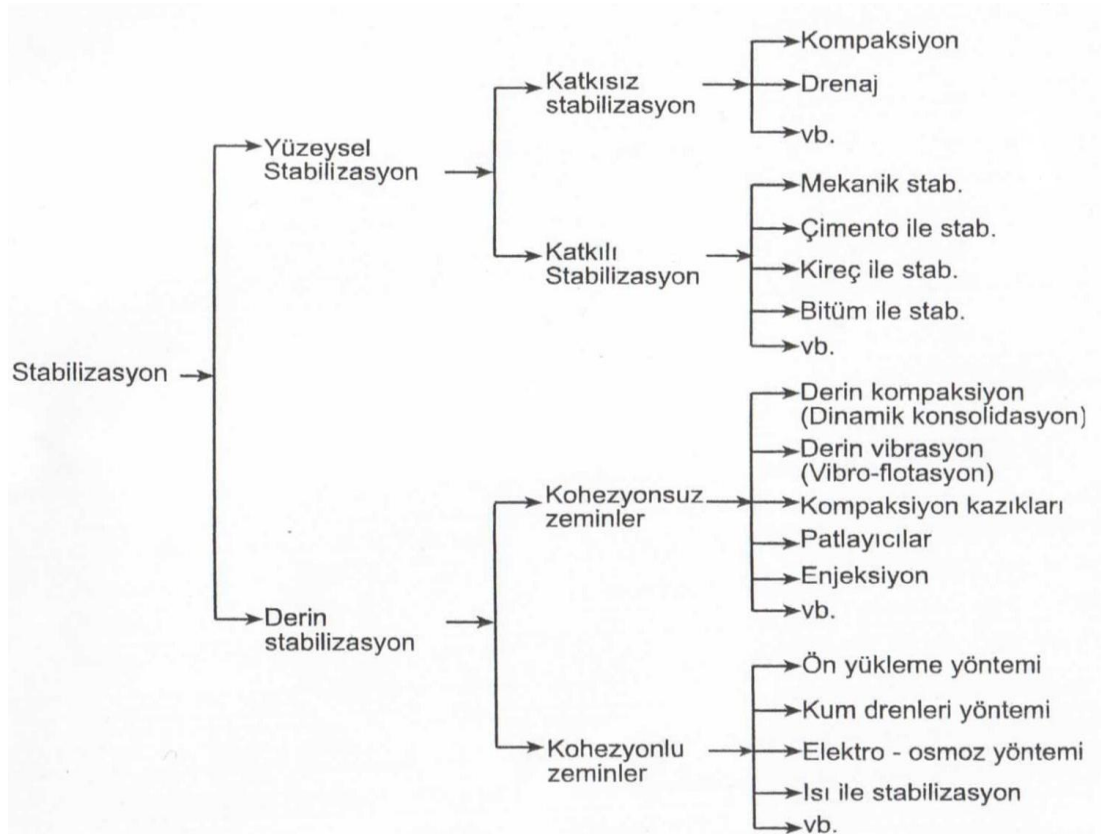
Ortama eklenen kireç, çimento ve çeşitli kimyasallar, çelik donatılar ve zemin çivileri veya suyu hızla ileten drenler ise Van Impe'nin üçüncü grubunda yer alır.

Yıldırım (2002) ise stabilizasyon yöntemlerini; mekanik, hidrolik, fiziksel-kimyasal ve katkılı yapısal destekli-kütleyi kısıtlayarak özellikleri iyileştiren olmak üzere dört grup altında toplamıştır.

Mekanik iyileştirme kısa süreli mekanik kuvvetlerin etkisi ile zemin yoğunluğunun artırılmasını amaçlamaktadır. Örneğin yüzeydeki zemin tabakalarının statik, titreşimli veya darbeli silindir ya da titreşimli tabakalarla sıkıştırılması, zeminlerin derinde titreşimle sıkıştırılması mekanik iyileştirme yöntemlerini oluşturmaktadır. Patlatma ile sıkıştırma, sıkıştırma kazıkları ile zeminin sıkıştırılması bu grup içerisinde sayılabilir.

Hidrolik iyileştirme drenler veya kuyular yardımı ile boşluk suyu basıncının düşürülerek kayma dayanımını arttırmayı hedefleyen iyileştirme yöntemleridir. Kaba taneli zeminlerde kuyu veya hendeklerden pompalama ile yeraltı su seviyesinin indirilmesi, ince taneli zeminlerde düşey drenlerin yardımı ile ön yükleme yapılması, elektriksel yüklerle boşluk suyunun uzaklaştırılması türünden iyileştirmeler bu grup altında toplanabilir. Geosentetiklerin geleneksel tekniklere katkısı bu alanda büyük olmuştur. Diyafram duvarlar, palplanş duvarlar ve geomembranlar, keson ve tünelde basınçlı hava kullanarak zemin suyunun uzaklaştırılması teknikleri bu grup içerisinde sayılabilir.

Uzuner (2011), Şekil 1.1, Tablo 1.1 ve Tablo 1.2’de verilen stabilizasyon yöntemlerini, stabilizasyonu yüzeysel ve derin stabilizasyon olarak ikiye ayırdıktan sonra, Şekil 1.2’de görüldüğü gibi alt gruplarda toplamıştır.



Şekil 1.2. Zemin ıslah yöntemlerinin sınıflandırılması (Uzuner, 2011).

Stabilizasyonun başarılı olabilmesi için ıslah metotları ve uygulama teknikleri iyi bilinmelidir. Belli bir uygulama için en uygun olan yöntemin seçimi, uygulamanın kapsamı, stabilizasyon derinliği, elde edilmesi gereken iyileştirmenin seviyesi ve

büyüklüğü, ıslah edilen zeminin türü ve maliyet gibi birçok etkene bağlı olarak belirlenir. Uygun stabilizasyon yönteminin seçiminde bir diğer önemli faktör, özellikle seçilecek tekniğin arazide uygulanabilirliğidir. İyileştirme tekniğinin sahaya uygulanmasında komşu binaların ve tesislerin kısıtlayıcı etkisinden dolayı uygun seçenek diğer elenen seçeneklerden daha fazla bir maliyete sebep olabilir. Fikir vermesi amacıyla Tablo 1.3'de çeşitli zemin stabilizasyon yöntemlerinin yaklaşık maliyetleri verilmiştir.

İyileştirmenin güncel önemi sadece zemin ortamının amaca uygun hale getirmek olarak algılanmamalıdır. Günümüzde büyük bir hızla gelişen endüstri, birincil ve yan ürünlerini (sanayi atık ürünleri) zemin ıslah işlemlerinde kullandırmaya çalışmaktadır. Bu ürünlerin ıslah edici madde olarak kullanımı yapılan üretim düşünüldüğünde çok büyük hacimde olacağından yatırımcıların ilgisini çekmektedir. Örneğin hurda oto lastiklerinin duvar yüzü yapımında kullanılması veya termik santrallerin atık ürünleri olan uçucu kül ve cürufkların stabilizasyon çalışmalarında kullanılması endüstri atıklarından bile ekonomik fayda sağlanabileceğini göstermektedir. Bunun yanı sıra kimyasal katkı olarak çimento ve kirecin tüketimi bu maddeler için yeni bir kullanım alanı oluşturmaktadır.

Tablo 1.3. Çeşitli zemin iyileştirme metotlarının yaklaşık maliyetleri (U.S. Army Corps. of Eng., 2003).

Metotlar	Göreceli maliyet	\$/m	\$/m ²	\$/m ³	Referans
Derin dinamik kompaksiyon	Düşük	---	8-32	~5	FHWA(1998)
Vibrokompaksiyon	Düşük-Orta	Arka dolgusuz 15, granüler arka dolgulu 25	---	1-4	
Taş kolonlar	Orta	45-60	---	---	
Çakıl drenler	Orta	11-22	---	---	Ledbetter (1985)
Patlatma tekniği ile kompaksiyon	Düşük	---	---	2-4	Adalier (1996)
Jet grout	Yüksek-Çok yüksek	Sızma kontrolü 30-200, kazı sahasının desteklenmesi 95-650	---	---	FHWA(1998)
Zemin çivileri	Orta-Yüksek	---	Geçici 165-775, sürekli 160-400	---	
Kompaksiyon enjeksiyon	Düşük-Orta	---	---	5-50	
Derin zemin karıştırılması	Yüksek-Çok yüksek	---	---	100-150	
Kimyasal enjeksiyon	Yüksek	---	---	150-400	Hayward (1996)
Bioteknik stabilizasyon	Uygulamaya bağlı	Bitkilendirilmiş geogridler 40-100	Şevi ağ şeklinde saran bitkilendirme 275-550	---	ASCE (1997)
Zeminin değiştirilmesi	Orta	---	---	10-20	Hayward (1996)
Düşey drenler	Düşük	1.2-4	---	---	FHWA(1998)
Taneli enjeksiyon	Orta	---	---	3-30	Adalier (1996)

Zeminlerin kayma mukavemetlerinin ve taşıma gücünün artırılması, büzülme ve kabarmadan ötürü oluşan hacimsel değişimlere karşı direncin artırılması, yeterli geçirimsizlik sağlanarak drenaj yeteneğinin artırılması, oturmaların önlenmesi veya hızlandırarak inşaatın tamamlanmasından sonra oturma problemlerinin ortadan kaldırılması, değişen iklim ve ortam şartlarında durabilitesini devam ettirmesi gibi hususlar stabilizasyon çalışmalarında elde edilen kazançlar olmaktadır. Fakat stabilizasyon çalışmalarında çeşitli nedenlerden dolayı istenilen kazançlar her zaman elde edilememektedir. Aşağıda listelenen koşullar ve kısıtlar stabilizasyonun kalitesini etkileyebilmektedir:

- ❖ Ortamın türü: Kil, organik, tortul vb.
- ❖ Islah edilecek bölgenin alanı ve hacmi, ortamın geometrik özellikleri ve yapı türüne bağlılığı
- ❖ Yapının türü ve yüklerin dağılımı
- ❖ Zeminin özellikleri: Kayma direnci, sıkışabilirlik, geçirimsizlik vb.
- ❖ İzin verilebilir toplam ve farklı oturmaların miktarı
- ❖ Malzeme durumu: Çakıl, kum, su, katkı maddeleri vb.
- ❖ Teknisyen, vasıflı işçi, özel aletlerin varlığı
- ❖ Çevre koşulları: Atıkların kullanımı, erozyon, su kirlenme kısıtlamaları vb.
- ❖ Yerel bilgi ve deneyim birikimi, ekonomik veriler (Mitchell, 1976).

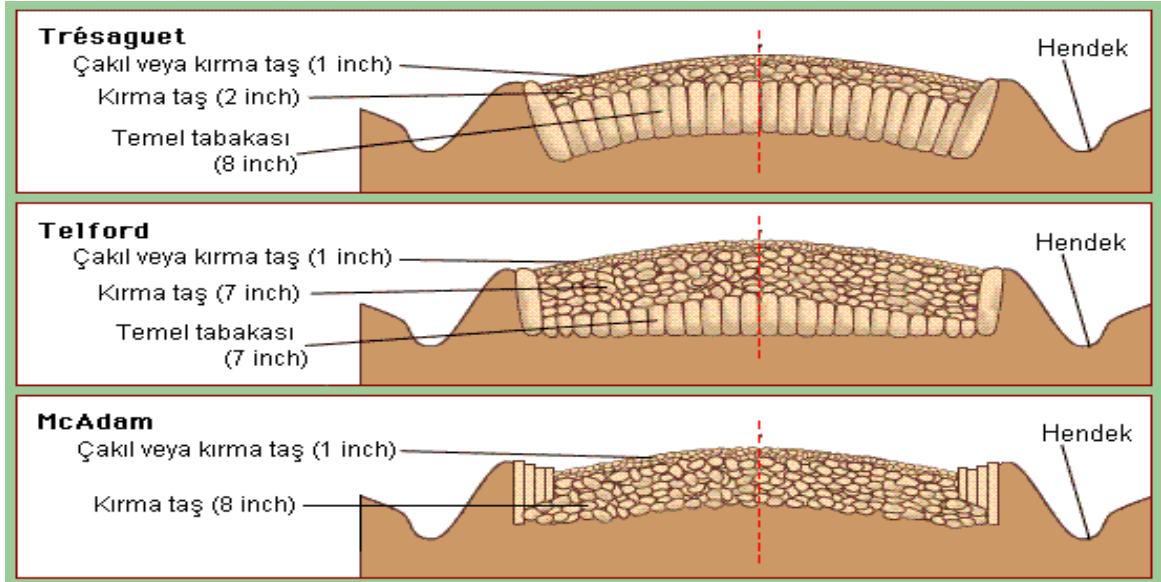
Zeminlerin iyileştirilmesi konusu kolay görünen ancak birçok değişkenin aynı anda dikkate alınması gereken çalışmalardır. Geoteknik mühendisinin deneyimi yoksa başarısız ve yüksek maliyetli sonuçlara götürebilecek bir etkinlik haline gelebilmektedir. Türkiye'ye özel koşullar örneğin ekonomik kaygıların yüksekliği, teknoloji transferinin yavaş olması, iş sahibinin yeterli hassasiyete sahip olmaması gibi nedenlerle de stabilizasyon çalışmalarında Türk mühendislerin elini kolunu ayrıca bağlamaktadır.

Perlitin tek başına ve kireç ile birlikte zemin stabilizasyonunda kullanılmasının mühendislik özellikleri üzerindeki etkilerini inceleyen bu çalışma, mekanik stabilizasyon ve katkı maddeleri ile stabilizasyon gibi iki ıslah yöntemini içinde barındırmaktadır. Burada iki yönteme ait geniş ve detaylı bilgiler verildikten sonra bu yöntemlerle alakalı literatür incelemesi ile bu bölüm sonlandırılacaktır.

1.4.2. Mekanik Stabilizasyon

Mekanik stabilizasyon, iki yada daha fazla farklı zeminin uygun oranlarda karıştırılarak istenilen şartları sağlayan bir zemin haline dönüştürülmesidir (Aytekin, 2004). Mekanik stabilizasyonda, ince taneli (kohezyonlu) zeminlere belli oranda kaba taneli (granüler, kohezyonsuz) malzeme katarak zemin ıslah edilmektedir. Bu nedenle çoğunlukla mekanik stabilizasyona granüler stabilizasyon denmektedir.

Mekanik stabilizasyonunun ilk örnekleri, Babil ve Roma yollarının inşasında görülür. Babilliler ve Romalılar yollarını trafik yükleri altında yüzey stabilitesini koruması için zayıf zeminin üstüne büyük taş bloklardan yan yana ve üst üste dizerek imal ederlerdi. Bu yöntemin etkili ve minimum maliyetli olacak şekilde kullanımı ancak Şekil 1.3'de enkesitleri verilen 19. yüzyılın Tresaguet, Telford ve McAdam tipi yollarda olabilmiştir. Bu yollarda Babil ve Roma yollarındaki gibi büyük boyutlu olmasa da kırma taşlardan temel tabakaları oluşturulmakta ancak stabiliteyi üsteki daha küçük boyutlardaki çakıl ve kırma taşların kenetlenmeleri sağlamaktadır.



Şekil 1.3. 19. yüzyıl yollarının enkesit görüntüleri (Ingles ve Metclaf, 1973).

Mekanik stabilizasyon, iyileştirilmesi gereken zeminin kazılması, mekanik özelliklerinin ıslah edilmesi ve tekrar yerine yerleştirilmesi aşamalarını içermektedir (Edil vd., 2002). Zeminin karıştırılması yolda, sabit veya hareketli bir plentde ya da malzeme

oçağında yapılır ve karışım yola serilerek klasik yöntemlerle kontrollü bir şekilde sıkıştırılır.

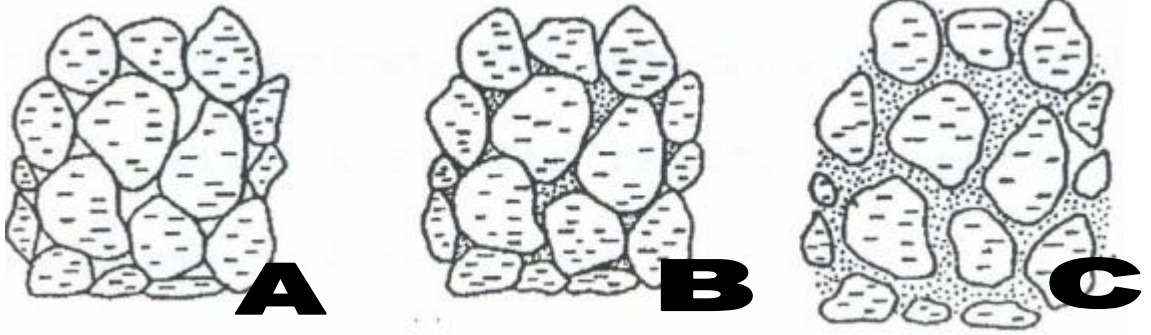
Mekanik stabilizasyonda amaç gradasyonun düzeltilmesi, likit limitin veya plastisite indisinin azaltılması, dren kabiliyetinin artırılması, uzun dönemli oturmaların ve don duyarlılığının azaltılması, kapileritenin azaltılması, dayanım ile durabilitenin artırılması olarak sayılabilir (Winterkorn ve Fang, 1975).

Mekanik stabilizasyonda kullanılacak malzemelerin karışım oranı için belli bir sistem ve/veya bir metot yoktur. Değişik tip zeminlerden çeşitli oranlarda deneme karışımları hazırlanmakta ve özellikleri incelenmek suretiyle karar verilmektedir. Zeminlerde mekanik stabilizasyon, ince taneli yani 200 No.lu elekten geçen kısmı fazla olan (genellikle %50'den fazla) kohezyonlu zeminlere, kaba taneli zemin (yani kum-çakıl gibi dere malzemesi, kırma taş, alüvyon, teras malzemesi, yamaç molozu vb. granüler zemin) uygun oranda karıştırılarak mühendislik özelliklerinin (mekanik, hidrolik vb.) ıslah edilmesi şeklinde yapılmaktadır. Elde edilen karışımın gradasyonu (tane dağılımı, granülometri eğrisi) ile ince kısmının plastisite özellikleri mekanik stabilizasyonun başarısında en etkin rolü oynamaktadır. Bilindiği gibi gradasyon; zeminin yoğunluğu, geçirimsizliği, stabilitesi, su tutma yeteneği vb. üzerinde doğrudan etkilidir. Gradasyonun sürekli olması halinde en yoğun zemin elde edilmektedir. Ayrıca segregasyon azalmakta ve işlenebilirlik artmaktadır (Jewell, 1969; ARRB, 1969). Bu yüzden AASHTO'da (1993) yapılacak karışımların sağlaması gereken gradasyon sınırları belirlenmiştir. Bu sınırlar Tablo 1.4'de verilmektedir. Bu tablodaki Tip I kaba gradasyonlu zeminler, Tip II kumlu zeminler için kullanılmaktadır.

Tablo 1.4. Mekanik stabilizasyon için gerekli gradasyon sınırları (AASHTO, 1993).

Elek no	Tip I				Tip II	
	A	B	C	D	E	F
2" (50 mm)	100	100	---	---	---	---
1" (25 mm)	---	75-95	100	100	100	100
3/8" (9.5 mm)	30-65	40-75	50-85	60-100	---	---
No.4 (4.75 mm)	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	70-100
No.10 (2 mm)	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100
No.40 (0.425 mm)	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70
No.200 (0.075 mm)	2-8	5-15	5-15	8-15	6-15	8-15

Mekanik stabilizasyonda amaç en büyük zemin yoğunluğunu elde etmek olduğundan sürekli bir gradasyon oldukça önemlidir. Buna göre ortamdaki kaba ve ince taneli malzeme miktarlarına göre karşılaşılabilecek durumlar Şekil 1.4’de gösterilmiştir.



Şekil 1.4. Zemindeki ince malzemenin durumları (Kreps ve Walker, 1971).

Şekil 1.4 (A)’da ince malzeme yok veya çok az bulunduğu durum, (B)’de boşlukları tam dolduracak kadar ince malzemenin olduğu durumu, (C)’de aşırı ince malzemenin olduğu durum görülmektedir. Tablo 1.5’de bu üç durumdaki zeminin özellikleri özetlenmiştir.

Tablo 1.5. İnce malzemenin zemin gradasyonundaki miktarına göre zemine etkileri

İnce malzeme yok veya çok az	Boşlukları tam dolduracak kadar ince malzeme var	Aşırı ince malzeme var
Taneler arası temas iyi ile vasat arasındır. Değişken yoğunluğa sahiptir. Geçirgendir. Yüksek stabilitelidir. Çok zor sıkıştır. Dona duyarsızdır. Sudan etkilenmez.	Deformasyona karşı direnç, taneler arası temasla artar. Yoğunluk artar. Pratik olarak geçirgen değildir. Yüksek stabiliteye sahiptir. Orta derecede sıkıştır. Dona duyarlıdır. Sudan çok az etkilenir.	Taneler ince malzeme içinde yüzdüğünden temas yoktur. Yoğunluk düşer. Geçirgen değildir. Düşük stabilitelidir. Kolay sıkıştır. Dona çok duyarlıdır. Sudan çok fazla etkilenir.

Zemindeki maksimum tane boyutunun çok büyük olması işlenebilirliği azaltmakta ve kaba kısmın çok olması segregasyona neden olmaktadır. Zemindeki ince malzemenin fazla olması halinde yüksek su içeriklerinde karıştırmayı güçleştirmekte ve zemin kuru halde

iken topaklanmalar oluşacağından homojen karışımlar elde edilememektedir (Rodriquez vd., 1973).

Uygun olmayan zemine bir başka zemin veya düşük plastisiteli bir malzeme karıştırarak uygun zeminler elde edilmesi için karışımın homojen olması esastır. Ancak ince kısmı fazla plastisiteli zeminlerin özellikle kuru halde iken ufalanmalarının zor olması nedeniyle problem yaratmaktadır. Bu nedenle yapılacak çalışmalarda Şekil 1.5’de görülen özel zemin tırmıkları gibi araçlar ile zemin ufalanmalıdır (Dunn, 1966).



Şekil 1.5. Zeminlerin ufalanmasını için kullanılan tırmıklar (Dunn, 1966).

Mekanik stabilizasyon ile ıslah edilen zeminlerin kaba kısmı hacimsel stabilite ve içsel sürtünme açısından sorumlu iken ince kısmı karışımın kohezyonundan yani kaba taneleri birbirine bağlayıcı olmasından sorumludur. Bilindiği gibi zeminlerin kayma mukavemeti (τ) formülasyonunda kohezyon ve içsel sürtünme açısı vardır. Burada c (kohezyon) tamamen ince malzemenin özelliğine bağlıdır. Bağlayıcı olan ince kısım kaba tanelerin etrafını sararak ve/veya bu taneler arasında köprü görevi görerek zeminin kaba kısmının rijitliğini ve stabilitesini sağlamaktadır. Ancak ince kısım sahip olduğu kohezyon ile bir miktar mukavemet artışına neden olması bir avantaj sağlarken plastisite özelliği ile de olumsuz etkilerinin olmaması istenir (Tunç, 2002). Bu yüzden zeminin kuruması halinde büzülme, ıslanması halinde şişme (kabarma), aşırı su içeriğinde taşıma gücünde azalmalar ve zeminin su tutma (emme) potansiyelinin artması vb. olumsuz etkiler meydana getirdiğinden ince kısmın likit limit ve plastisite indisi değerleri sınırlandırılır. Örneğin

dolgularda kullanılacak malzemeler için Clare'de (1961) $LL < 70$ ve $PI < 40$; KTŞ'de (2006) $LL \leq 65$, $PI \leq 35$ ve maksimum kuru yoğunluğun 1.45 Mg/m^3 'den fazla olma şartları getirilmiştir. Yol inşaatlarında ise alt temel için $LL < 35$ ve $PI < 12$ ve temel tabakasında $LL < 28$ ve $PI < 8$ olması istenmektedir (NGS, 1997).

1.4.3. Kimyasal Stabilizasyon

Yetersiz mühendislik özelliklerine sahip zeminlerde olası problemleri çözmek için akla gelen ilk seçenekler sorunlu zemini kaldırıp yerine iyi özelliklere sahip bir zemin yerleştirmek ya da zayıf zemin üzerine gelen yüklere karşı koyabilecek büyük temel sistemleri dizayn etmek olmaktadır (Ingles ve Metcalf, 1973). Bu seçeneklerin hepsi zaman-emek alıcı ve ucuz olmayan işlemlerdir. Bu yüzden insanlar tarih boyunca problemlili zeminlere sihirli bir madde katarak sorunlarını çözmeyi istemişlerdir. Bundan dolayı geoteknikte hint yağından fosforik asite, tuzdan melasa kadar birçok kimyasal bileşim zeminlerin özelliklerini iyileştirmek için kullanılmıştır. Dayanımı artırmak, geçirimsizliği azaltmak, hacim değişimini en aza indirmek gibi amaçlarla yapılan bu çalışmaların her zaman bilimsel olduğu söylenemez. Ayrıca endüstri yan ürünleri ve atıklarının bu alanda kullanma gayretleri de çevresel ortamın kirlenmesine yol açmıştır. Zamanın kazandırdığı deneyim, incelenen yüzlerce maddeden bugün sadece birkaçı sürekli uygulama olanağı bulabilmiştir. Bunlar etkinlikleri yanında, ucuzluk ve gereksinim duyulduğunda kolayca bulunabilme özelliğine göre kireç, çimento, bitüm, puzolanlar, bazı kimyasallar (hidroflorik asit, fosforik asit, sodyum silikat, kloritler, fosfat, kalsiyum sülfat, sodyum hidroksit (kostik soda), alüminyum tuzları vb), reçine ve polimerler olarak sıralanabilirler. Bu tür katkı maddelerinin zemin ile meydana getirdiği kimyasal reaksiyonlar sonucunda zeminin mühendislik özelliklerini ıslahına kimyasal stabilizasyon denir (Tunç, 2002). Kimyasal stabilizasyon zemin özelliklerinin geliştirilmesinde en etkili ve en ekonomik işlemlerdir (Kukko, 2000).

Literatüre bakıldığında killerin ıslahında kirecin ve puzolanların etkisini tetkik etmeye daha bir önem verildiği görülebilir. Kireç kalsiyum bazlı iken puzolanlar genelde silikat (SiO_2) ve alüminat (Al_2O_3) içeriklidir. Kalsiyum içerikli olmayan diğer bazı katkıların (sodyum silikat, fosforik asit, klorit ve bitüm vb.) zemin ıslahındaki yerinin incelenmesi ancak birkaç sınırlı çalışmada yer almaktadır. Ayrıca bu tür malzemelerin kullanımında bazı sınırlamalar ve sakıncalar olması nedeniyle yeni ve daha uygun katı ve

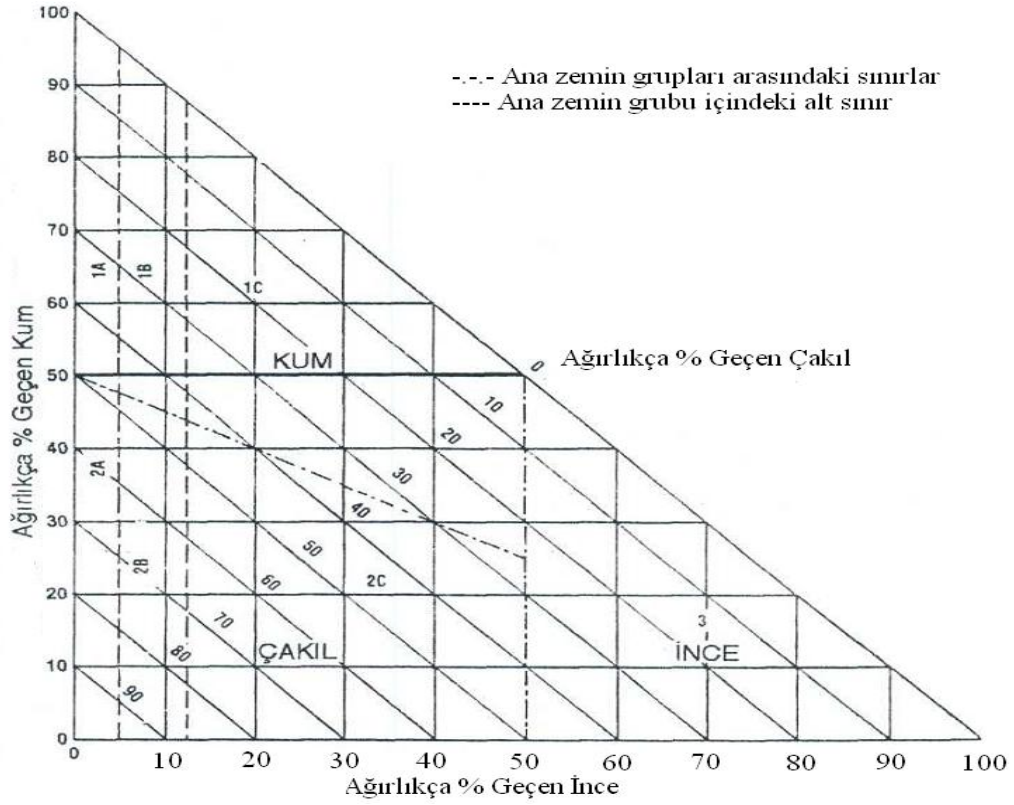
likit formda katkı maddeleri bulma arayışı devam etmektedir (Likit katkıların kullanımı, taşıma ve zeminle karıştırma maliyetlerinin azaltılmasını sağladığından daha avantajlıdır.).

Kimyasal stabilizasyonda iki önemli reaksiyon oluşmaktadır. Bunlardan birincisi katyon alışverişi reaksiyonu (bunu takip eden yumaklaşma ve agregasyon), diğeri ise çimentolaşmadır (Mitchell, 1993). Katyon alışverişi reaksiyonunun oluşabilmesi için inorganik katyonlar içeren kalsiyumlu ve organik kimyasallar kullanılır. Çimentolaşma reaksiyonu için ise Portland çimento, kireç, puzolan, sodyum silikat, fosforik asit, sodyum hidroksit, jips, alüminyum tuzları ve bitüm emülsiyonları zemine eklenir. Yine de kimyasal stabilizasyonun en etkili sonuçları katyon değişimi ve çimentolaşma reaksiyonlarının birlikte olduğu ıslah çalışmalarında elde edilir. Katyon değişimi ve çimentolaşma ile ilgili ayrıntılı bilgi 1.4.3.1. Kireç ile Zemin Stabilizasyonu bölümünde verilecektir.

Kimyasal stabilizasyonda; stabilizör seçiminde, zemin cinsi, stabilizasyonun amacı (stabilite artışı, kaplama kalınlığının azalması vb.), zeminin hangi özelliğinin iyileştirileceği, maliyet ve malzeme temin etme kolaylığı gibi hususların göz önünde bulundurulması gerekir.

Şekil 1.6'da görülen üçgen gradasyon nomogramı zeminin ufalanma karakteristiği esas alınarak hazırlanmıştır. Bilindiği gibi killi zeminler özellikle kuru halde iken değişik boyutta ve ufalanması güç olan katı topaklar halinde bulunur. Zira killi zeminlerde kimyasal stabilizasyonun etkili olabilmesi için zeminin parçalanarak ufalanması gerekir. Böylece kullanılacak stabilizör, zemin ile homojen bir karışım yapabilecektir.

Şekil 1.6'daki nomogram ile zemine ait Alan No tespit edilerek zeminin ufalanma karakteristiği belirlenir. Zeminin bu karakteristiği ile PI, LL ve gradasyon özelliklerine bağlı olarak Tablo 1.6'dan en uygun stabilizör cinsi belirlenir.



Şekil 1.6. Zemin üçgen gradasyon nomogramı (U.S. Army Corps. of Eng., 2003).

Örneğin PI değeri 15 olan, %67 çakıl, %26 kum ve %7 ince malzeme içeren zeminin Alan No'su Şekil 1.6'dan 2B olarak bulunur. Tablo 1.6'ya göre bu alandaki zemin için bitüm (asfalt), çimento, kireç ve K-Ç-P kombinasyonu olmak üzere 4 farklı katkı maddesi önerilmektedir. Fakat PI değerinin 10'dan büyük olması sebebiyle asfalt stabilizasyonu, 4 No.lu elekten geçen kısım ($\%26 + \%7 = \%33$) $\%45$ olduğu için çimento stabilizasyonu bu zemin için uygun olmamaktadır. Bu yüzden bu zemin için kireç ya da K-Ç-P kombinasyonu seçeneklerinden biri tercih edilmelidir.

Uygulama sahasında kireç, çimento, puzolan, bitüm tek başına kullanılabildiği gibi kireç-çimento, kireç-asfalt ve kireç-çimento-puzolan gibi stabilizör kombinasyonları da tercih edilebilir. Zemin katkılarının bu tür birlikte kullanılmaları tek başına kullanılmalarından daha çok avantaj sağlamaktadır. Örneğin kireç zeminin işlenebilirliğini artırırken, plastisitesini düşürmektedir. Daha sonra katılan çimento ise zeminin mukavemetini hızla artırır. Aynı şekilde zemine katılan kireç, asfalt yol kaplamasından zemin tanelerinden soyulmasına engel olmakta ve karışımın stabilitesinin artmasını sağlamaktadır.

Tablo 1.6. Zemin stabilizasyonu için katkılarının seçimi (U.S. Army Corps. of Eng., 2003).

Alan no	Zemin sınıfı	Önerilen katkı	Kısıtlamalar	200 No.lu elekten geçen	Açıklamalar
1A	SW SP	Bitüm Çimento K-Ç-P*	- - PI<25	-	
1B	SW SP SW-SC	Bitüm Çimento Kireç	PI<10 PI<30 PI<12	-	
1C	SM SC SM-SC	Bitüm Çimento Kireç K-Ç-P*	PI<10 ** PI>12 PI<25	En fazla %30 - - -	
2A	GW GP	Bitüm Çimento K-Ç-P*	- - PI<25	-	Çimento katkısı sadece iyi gradasyonlu zeminlerde ve 4 No.lu elekten geçen en az %45 olduğu durumlarda
2B	GW GP GW-GC GP-GC	Bitüm Çimento Kireç K-Ç-P*	PI<10 PI<30 PI>12 PI<25	-	
2C	GM GC GM-GC	Bitüm - Kireç K-Ç-P*	PI<10 ** PI>12 PI<25	En fazla %30 - - -	
3	CH CL ML ML-CL	Çimento Kireç	LL<40 ve PI<20 PI>12	- -	Organik ve kuvvetli asidik zeminler uygun olmamaktadır.

* K-Ç-P: Kireç, çimento ve puzolan kombinasyonu

** $PI \leq 20 - ((50-200 \text{ No.lu elekten geçen yüzde})/4)$

Katkı maddelerinin seçiminde maliyet ve malzeme tedarikinin kolay olması hususları da mühendislerce dikkate alındıktan sonra zemin için en uygun olan stabilizör madde veya maddeler belirlenir. Belirlenen katkı maddesi ile arazide yapılacak stabilizasyon işlemlerine öncülük etmek üzere laboratuarda örnekler hazırlanır ve yapılacak deneyler ile gerekli mühendislik özelliklerini sağlayıp sağlamadığı kontrol edilir.

Zeminlerin katkı maddeleri ile ıslahında gradasyon, mukavemet ve durabilite açısından belli minimum değerleri sağlaması gerekmektedir. Zeminler gradasyon açısından Tablo 1.4'de verilen gradasyon sınırlarından birine uygun tane dağılımı göstermelidirler. Kireç, çimento, puzolan-kireç ve puzolan-çimento-kireç kombinasyonlarından hangisi

kullanılırsa kullanılsın ıslah edilen zemin Tablo 1.7'deki serbest basınç dayanımı değerlerini ve Tablo 1.8'deki durabilite kriterlerini asgari olarak sağlamalıdır. Tablo 1.7'de verilen değerler, çimento stabilizasyonunda 7 günlük kürden sonraki; kireç, puzolan-kireç ve puzolan-çimento-kireç kombinasyonları ile yapılan stabilizasyonlarda 28 günlük kürden sonraki serbest basınç mukavemeti değerleridir (U.S. Army Corps. of Eng., 2003).

Tablo 1.7. Kireç, çimento, puzolan-kireç ve puzolan-çimento-kireç kombinasyonlarında sağlanması gereken asgari serbest basınç mukavemeti değerleri (U.S. Army Corps. of Eng., 2003).

	Esnek kaplama	Rijit kaplama
Yol temel tabakası	5.17 MPa	3.45 MPa
Yol alt temel, yol tabanı, dolgular	1.72 MPa	1.38 MPa

Tablo 1.8. Kireç, çimento, puzolan-kireç ve puzolan-çimento-kireç kombinasyonlarında sağlanması gereken durabilite kriterleri (U.S. Army Corps. of Eng., 2003).

Zemin türü	12 defa ıslanma-kuruma veya donma-çözülme periyodunun sonunda numune ağırlığında izin verilen maksimum kayıp, %
Granüler, PI<10	11-14
Granüler, PI>10	8-14
Silt	8-14
Kil	6-14
A-1, A-2-4, A-2-5, A-3	14
A-2-6, A-2-7, A-4, A-5	10
A-6, A-7	7

Islanma-kuruma testi: 7 günlük kürde bekletilen numune oda sıcaklığındaki suya batırılır. 5 saat bekletildikten sonra çıkarılır. Daha sonra 42 saat süreyle 71°C etüvde kurutulduktan sonra numuneni tüm yüzeyi fırçalanarak ıslanma-kuruma esnasında gevşeyen malzemeler giderilir. Bu işlem 12 defa tekrarlandıktan sonra numune 100°C fırında sabit ağırlığa ulaşılan kadar bekletilip tartılır. Test başlangıcındaki ağırlığına göre kaybı yüzde olarak belirlenir.

Donma-çözülme testi: 7 günlük kürden sonra numune -23°C'deki donma kabiniinde 24 saat bekletildikten sonra 21°C'lik sıcaklıkta ve %100 bağıl nemli ortamda 24 saat tutulur. Fırça ile gevşeyen malzeme giderilir. Bu işlem 12 defa tekrarlandıktan sonra

numune 100°C fırında sabit ağırlığa ulaşılan kadar bekletilip tartılır. Test başlangıcındaki ağırlığına göre kaybı yüzde olarak belirlenir (U.S. Army Corps. of Eng., 2003).

1.4.3.1. Kireç ile Zemin Stabilizasyonu

Kireç ile yapılan stabilizasyon çalışmalarında sönmüş kireç (hidrate kireç, Ca(OH)_2 -kalsiyum hidroksit) veya sönmemiş kireç (CaO-kalsiyum oksit) kullanılmaktadır. Tarım kireci (CaCO_3) denen diğer bir kireç türü de piyasada bulunmaktadır. Tarım kireci diğer iki kireç türü gibi sulu ortamda kimyasal reaksiyon yapma yeteneği yoktur. Ancak bazı stabilizasyon çalışmalarında gradasyonu iyileştirmek için filler olarak kullanılmıştır.

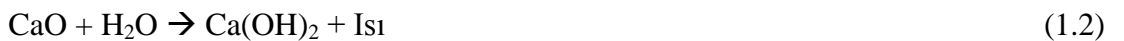
Kirecin hammaddesi kireç taşıdır. Ancak içinde %30'a kadar MgCO_3 içeren kireç taşları da (dolomit gibi) bu amaçla kullanılabilir. Kireç taşından elde edilen kireçler beyaz, MgCO_3 içeren kireç taşlarından elde edilen kireçler esmer ve dayanımı nispeten yüksek olmaktadır.

Kireç taşının (kalker) öğütülerek 900°C'nin üstünde döner fırınlarda pişirilmesi (kalsinasyon) ile (1.1)'deki reaksiyon oluşur:



(1.1)'deki reaksiyon sonucu oluşan kalsiyum oksit, sönmemiş kireçtir. Zeminlerin iyileştirilmesinde sönmemiş kirecin daha etkin olduğunu gösteren çalışmalar bulunmaktadır. Ancak sönmemiş kireç (CaO) yakıcı ve tehlikeli özelliğe sahiptir. Bu yüzden arazide sönmemiş kireç ile yapılan stabilizasyon uygulamalarında çalışan personelin vücutlarında deri yanması riski oldukça yüksektir. Ayrıca depolama, taşıma ve inşaat esnasında havanın nemi ile kolayca reaksiyona girerek yapısındaki serbest kalsiyum oksit miktarı düştüğünden dolayı iyileştirme etkinliği azalabilmektedir.

CaO su ile karıştırılınca büyük miktarda ısı (300-400°C) açığa çıkararak (1.2)'deki gibi bir kimyasal reaksiyon meydana gelir. Bu işleme kirecin söndürülmesi işlemi ve Ca(OH)_2 'ye sönmüş kireç denir (Baradan, 2000). Piyasada bulunan ticari kireç türlerine ait özellikler Tablo 1.9'da özetlenmiştir.



Tablo 1.9. Ticari kireçlerin özellikleri (NLA, 1988).

	Sönmemiş kireç	
	Yüksek kalsiyumlu	Dolomitli
CaO	92.25-98.00	55.50-57.50
MgO	0.30-2.50	37.60-40.80
CO ₂	0.40-1.50	0.40-1.50
SiO ₂	0.20-1.50	0.10-1.50
Fe ₂ O ₃	0.10-0.40	0.05-0.40
Al ₂ O ₃	0.10-0.50	0.05-0.50
H ₂ O	0.10-0.90	0.10-0.90
Özgül ağırlık	3.20-3.40	3.20-3.40
Yoğunluk, Mg/m ³	0.88-0.96	0.88-0.96
	Sönmüş kireç	
	Yüksek kalsiyumlu	Dolomitli
Kimyasal bileşimi	Ca(OH) ₂	Ca(OH) ₂ + Mg(OH) ₂
Özgül ağırlık	2.3-2.4	2.4-2.6
Yoğunluk, Mg/m ³	0.40-0.56	0.48-0.64

Stabilizasyon işlemlerinde genelde sönmemiş kireç gibi yakıcı özelliği olmayan hidrate kireç kullanılmaktadır. Yinede uzun süre kirece maruz kalması personelin derisinde kaşıntıya sebep olmakta, sonucunda da tahrişe sebebiyet verebilmektedir. Bundan dolayı çalışanların koruyucu kıyafet giymeleri tavsiye edilmektedir. Kirecin neden olduğu göz ve deri tahrişlerine karşı bol miktarda soğuk ve temiz su ile o bölge iyice yıkanmalıdır. Saha uygulamalarında kireç zemine genelde kuru olarak karıştırılırken son zamanlarda işçi sağlığı güvenliğinden dolayı zemine karıştırılmak üzere kireçli su çözeltileri de kullanılmaktadır.

Zemin sınıfı CH, CL, MH, ML, ML-CL, SC, SM-SC, SM, GC, GM-GC, GM olan zeminler kireç ile ıslah edilerek kullanılabilir. Kireç stabilizasyonu, genel olarak PI indeksi 10 ile 50 arasındaki killi zeminler için çok iyi sonuçlar veren bir metottür. Kireç ile ıslah edilebilen zemin sınıflarına ve verilen PI değeri aralığına bakıldığında zeminin belli bir

miktarda kil ve silt içermesi gerekmektedir. Çünkü kireç; orta, ince ve çok ince tanelerle reaksiyona girerek zeminin plastisitesinin düşmesini, şişme-büzülme potansiyelinin azalmasını sağlarken; işlenebilirliğinin, mukavemetinin ve durabilitesinin artmasına neden olmaktadır.

Kireç ile ıslah edilen zeminin asgari olarak serbest basınç mukavemeti Tablo 1.7’de verilen değerlerin üstünde ve durabilitesinin de Tablo 1.8’de verilen kriterleri sağlamalıdır. Bunun için değişik kireç oranlarında numuneler hazırlanıp dayanım ve durabilite kriterlerine uyan en düşük kireç içeriği deneme-yanılma yöntemi ile saptanmalıdır.

Kireç suyla karıştırıldıktan sonra elde edilen solüsyonun pH değeri yaklaşık 12.4 civarındadır. Başlangıç kireç katkısı seçilirken zemin ve kireç katkısının toplam kütlesi 20 g olacak şekilde damıtık su ile süspansiyon hazırlanır. Hazırlanan süspansiyonun pH değeri belirlenir. Değişik miktarlarda kireç katkısı ile hazırlanan süspansiyonların pH değerinin kireç oranına bağlı olarak değişimi bir grafik üzerinde çizilir. Yaklaşık pH değeri 12.4 olması durumundaki kireç miktarı başlangıç değeri olarak alınabilir. Daha sonra bu oranın bir miktar altında ve üstünde kireç oranları ile zemin özelliklerinin hangi kireç katkı oranında amaca uygun olduğu belirlenir (Aytekin, 2004). Bu yöntemde Tablo 1.10’da zemin türüne göre önerilen kireç miktarları yol gösterici olarak kullanılabilir.

Tablo 1.10. Optimum kireç oranı için kullanılacak başlangıç değerleri (Aytekin, 2004).

Zemin türü	Kireç miktarı, kuru zeminin ağırlıkça yüzdesi
İyi derecelenmiş killi çakıl	3
Kum, organik zeminler	Tavsiye edilmez.
Kumlu kil	5
Siltli kil	2-4
Plastik kil	3-8
Yüksek plastisiteli kil	3-10

Başlangıç kireç içeriğinin civarında en az üç fakat ideal olarak beş ayrı kireç içeriğinde optimum su içeriğinde standartlarda belirtilen sıkışma kriterlerine uygun olarak sıkıştırılarak numuneler hazırlanmalıdır. Numunelerin, serbest basınç deneyi ile Tablo 1.7’deki mukavemet değerlerini, 12 defa ıslatma-kuruma veya donma-çözülme periyodundan sonra Tablo 1.8’deki durabilite kriterini sağlayıp sağlamadığı kontrol edilir.

Bu tablolardaki şartları sağlayan en düşük kireç oranı o zeminin kireç stabilizasyonundaki “optimum kireç oranı”dır.

Sülfat içeren killerin kireçle stabilizasyonunda çimentolaşma ürünleri arasında etrenjit ve tomasitin oluşmasından dolayı zeminde şişme problemleri görülebilir (Mitchell, 1986 ve Hunter, 1988). Mitchell (1986), 5000 ppm (ppm: mg/kg) veya %0.5’den fazla sülfat içeren zeminlerde kireç stabilizasyonunun kullanılmaması gerektiğini söylemiştir. Petry ve Little (1992), 1:1 su-zemin oranında 500 ppm veya %0.05, 1:10 su-zemin oranında 2000 ppm veya %0.2’ye kadar sülfat oranlarında da şişme problemi görülebileceğini belirtmişlerdir. Bundan dolayı zeminin sülfat içeriğinin tespiti kireç stabilizasyonunda gereken bir incelemedir.

Genel olarak fazla organik madde içeren zeminlerde kireç stabilizasyonu etkili değildir. Zeminin içeriğindeki %5’den fazla organik madde, kireç stabilizasyonunda gerçekleşen kimyasal reaksiyonları durdurucu bir etki yapmaktadır (Arman ve Moonfish, 1972). Ayrıca kireç stabilizasyonuna zarar verici etkide de bulunabilmektedir. Organik madde ve sülfat iyonunun varlığı önceleri stabilizasyonu olumsuz etkilediğini belli etmemekte, ancak daha sonra kuruma-ıslanma periyotlarında zemin ufalayarak dağıtmaktadır (Nelson ve Debora, 1992).

Kireç stabilizasyonu killi zeminlerde daha etkin olurken kumlu zeminlerde etkisi oldukça azdır. Çünkü kumlu zeminler gibi granüler malzemelerde kirecin etkileşime gireceği silika alanların az ve reaksiyon potansiyelleri yetersizdir. Yinede kum-kireç karışımlarında kirecin etkinliği kumun içindeki silika mineraline etki edecek uygun bir kimyasalla arttırılabilir (El-Rawi ve Abdul-Hasan, 1986).

Plastik olmayan ve düşük PI değerli zeminler için tek başına kireç kullanmak genellikle tatmin edici olmamaktadır. Bu durumda puzolan ilave edilirse zeminin kireçle reaksiyonu mümkün olabilmektedir. Kaba gradasyonlu ve çok az ya da hiç ince malzeme içermeyen zeminler için kireç-çimento-puzolan kombinasyonu genellikle daha iyi sonuç vermektedir. Puzolan, çimento gibi silis ve alüminat içeren bir malzeme oluşu nedeniyle kireç ve su ile karıştırıldığında yüksek basınç mukavemetleri elde edilmektedir. (Chu ve Kao, 1993; Dawson vd., 1995; Ferguson, 1993; Miller ve Azad, 2000; Rahman, 1986; Sezer vd., 2006; Tsonis vd., 1983). Puzolanların kullanıldığı zemin stabilizasyon çalışmalarına ait kapsamlı bilgiler 1.4.3.2. Puzolanlar ile Zemin Stabilizasyonu bölümünde verilecektir.

Ingles ve Metclaf (1973) ile Kedzi (1979) zemin ıslahı için zeminin kuru ağırlığının %2~%3'ü sönmüş kireç miktarının yeterli olacağını söylerken, Yoder ve Witzcak (1975) ise en az %4'ü kadar sönmüş kireç kullanılması gerektiğini belirtmiştir. Eades ve Grim (1960) ise optimum kireç miktarı için kil türlerine bağlı olarak kaolin tipi kil içeren zeminler %4~%8, illit ve montmorillonit tipi kil içeren zeminler için %8 gibi yaklaşık değerler vermektedir. Nelson ve Debora (1992) tarafından zemin türlerine bağlı olarak tavsiye edilen kireç miktarları Tablo 1.11'de özetlenmiştir.

Tablo 1.11. Değişik zemin türleri için yaklaşık kireç miktarları (Nelson ve Debora, 1992).

Zemin türü	Tavsiye edilen yaklaşık kireç miktarları, %	
	Sönmemiş kireç	Sönmüş kireç
Killi çakıl (GC, GM-GC)	2-3	2-4
Siltli kil	3-8	5-10
Kil	3-6	3-8

Stabilizasyon çalışmalarında sönmemiş kireç (CaO) ve sönmüş kireçten (Ca(OH)₂) herhangi birinin kullanılabileceği daha önce belirtilmişti. Literatüre bakıldığında sönmemiş kireç daha çok granüler malzemeler içeren oldukça ıslak veya doymuş zeminlerde kullanılırken, kil ve silt içeren zeminlerde sönmüş kireç tercih edilmektedir. Stabilizasyon çalışmalarında sönmemiş kirecin sönmüş kireçten daha etkin olmasından dolayı sönmüş kirece nazaran daha az miktarda kullanımı ile aynı iyileştirme sağlanabilmektedir. Bunun bir sonucu olarak Tablo 1.11'e bakıldığında Nelson ve Debora (1992), sönmemiş kireç için sönmüş kireç miktarından daha küçük değerler vermişlerdir.

Sönmemiş kireç, boşluklardaki serbest su ile (1.2)'deki gibi bir reaksiyon yapmaya yatkındır. Bu reaksiyon sonucu ortaya çıkan ısı zeminin su içeriğinde önemli azalmalara neden olmaktadır. Sönmemiş kirecin bu kurutucu etkisi optimum su seviyesinden yüksek doğal su içeriğine sahip zeminlerde bir avantaj olarak karşımıza çıkmaktadır. Yinede sönmemiş kirecin su ile yakıcı özellik göstermesi, inşaat ekipmanını korozyona uğratici etkisi ve işçi sağlığı için tehlike oluşturmasının sonucu olarak son yıllarda kullanımından kaçınılmaktadır. Ama ilginç şekilde Avrupa'daki stabilizasyon çalışmalarında sönmemiş

kirecin kullanım oranı 1976'da %16 iken 1987'de %25'e çıkmıştır (Rollings ve Rollings, 1996).

Ola (1978), özellikle killi zeminlerde %10'dan daha fazla kireç içeriklerinde mukavemet artışı yok denecek kadar az olduğunu ortaya çıkarmıştır. Kireç içeriğinin %8'den fazla olduğu durumlarda kirecin mukavemet artışına etkisi son derece az iken %8'e kadar kireç oranlarında zemin mukavemetindeki artış miktarı daha fazla olmaktadır. Ayrıca araştırmacılar kireç yüzdesinin artmasının her zaman mukavemetinde artması manasına gelmeyeceğini bilakis belli bir değerden sonra mukavemette düşüşler meydana geldiğini göstermişlerdir. Bunu sebebi olarak kirecin kendi başına hissedilir bir sürtünmesi ve kohezyonunun olmaması gösterilmektedir.

Kireç miktarı artıkça kompaksiyonda maksimum kuru yoğunluğu azalırken, optimum su içeriğinde aksine artış meydana gelmektedir. Örneğin %5~8 arasında kireç kullanılan stabilizasyon çalışmalarında yaklaşık maksimum kuru yoğunlukta 0.05 ila 0.08 Mg/m³ azalma, optimum su içeriği de %2~4 artış meydana gelmektedir (Ahmad, 1988). Kompaksiyon parametreleri olan maksimum kuru yoğunluk ve optimum su içeriği, zemin ve katkı maddesinin tane çapı dağılımlarına ve özgül ağırlıklarına bağlı olarak değişmektedir. Katkı maddesinin zemin tanelerini sarması sonucu tane çapını genişleterek tanenin daha büyük hacim kaplamasını sağlaması (flokülleşme, topaklanma) ve çoğu katkı maddesinin (çimento hariç) özgül ağırlığı zeminin özgül ağırlığından küçük olduğundan dolayı maksimum kuru yoğunlukta azalma görülmektedir (Ola, 1978; Lees vd., 1982; Rahman, 1986). Optimum su içeriğinde meydana gelen artışa, zemin ile katkı maddesi arasında meydana gelen puzolanik reaksiyonların ekstra su ihtiyacı sebep olmaktadır (Manasseh ve Olufemi, 2008).

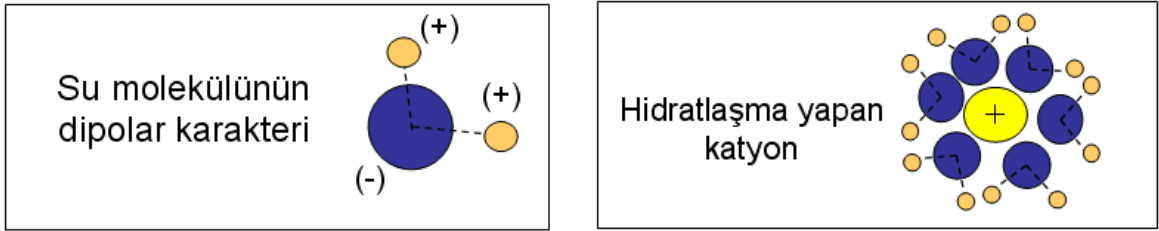
Kireç ile iyileştirilen zeminler birkaç saat içinde mukavemet kazanmaya başladığından dolayı karışımdan sonra yapılacak kompaksiyon işlemi ne kadar gecikirse elde edilecek maksimum kuru yoğunlukta o kadar azalmaktadır. Bu nedenle zemin, kireç ve su karıştırıldıktan maksimum yarım saat içinde kompaksiyon başlanıp hızla tamamlanmalıdır. Eğer stabilizasyon çalışmasında sönmemiş kireç (CaO-kalsiyum oksit) kullanılıyorsa su ile reaksiyonu sonucu yüksek ısı açığa çıkaracaktır. Bu yüzden bu ısının zeminde su kaybına neden olmaması için kompaksiyon çok hızlı gerçekleştirilmeli ve kür uygulanmalıdır (Quigley, 1975).

Kireç ile zemin stabilizasyonunda gerçekleşen olaylar katyon değişimi, yumaklaşma (flokülleşme), agregasyon, çimentolaşma ve karbonatlaşma adı verilen evrelerde

gerçekleşir (Fang, 1991). Burada unutulmaması gereken bu olayların gerçekleşmesi için ortamda suyun mevcudiyeti şarttır (Little, 1987).

Kil tanelerinin yüzeyi negatif elektrik yüküyle kaplıdır. Bu yükün kaynağı; alüminyum ve silikon gibi katyonların izomorf yer değiştirmesi, hidroksil iyonlarının yüzeyden ayrılması, yüzeye bağlanmış anyonlar ve tane çevresindeki organik malzemelerdir (Craig, 1978). Kuru haldeki kil tanelerinin negatif yükleri zeminde genelde var olan sodyum, potasyum ve magnezyumu kendine çekerek yüzeylerindeki negatif yükleri dengelemektedirler. Ancak kil tanesinin elektriksel etkisindeki bu katyonların termal enerjilerinden dolayı birbirlerinden uzaklaşma eğiliminde olduğu da bilinmektedir. Kil tanesi-katyon ve katyon-katyon arasında var olan sırasıyla çekme ve itme kuvvetlerinin etkisinde kil tanesine bitişik ancak kil yüzeyine sıkıca yapışmayan, değişen çevresel şartlar (sıcaklık, basınç, pH, ortamdaki suyun kimyasal ve biyolojik bileşimi) ile kendisinden kuvvetli katyonlarla kolaylıkla yer değiştiren sodyum, potasyum ve magnezyum gibi katyonların içinde dağıldığı bir katman oluşmaktadır. Kil tanesini saran absorbe su tabakası ve kilin elektriksel etkisindeki katyonların oluşturduğu iyon bulutunun her ikisine birden çift tabaka adı verilmektedir.

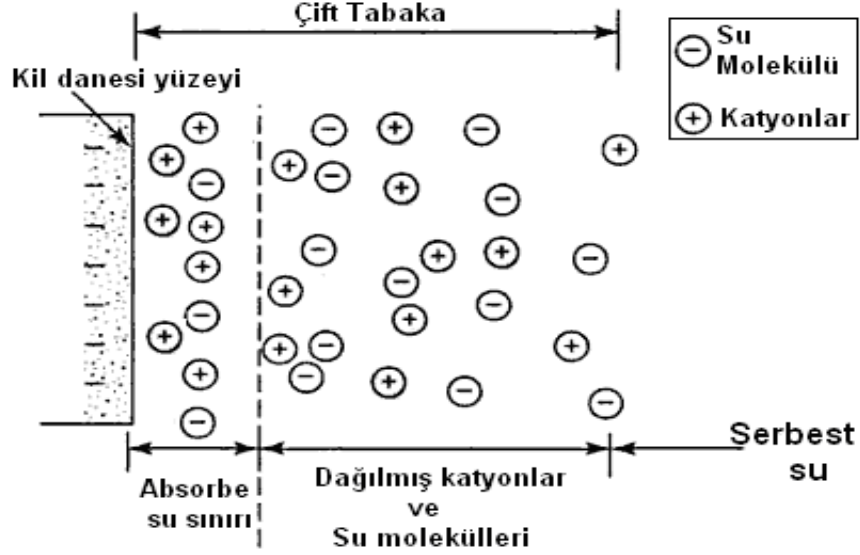
Eğer ortama su eklenirse, kil tanesinin elektriksel etkisindeki katyonlara dipolar su molekülleri bağlanarak Şekil 1.7'de görülen bir tür hidratasyon olayı gerçekleştirirler.



Şekil 1.7. Su molekülünün dipolar karakteri ve hidratlaşma yapan katyon (Little, 1987).

Ayrıca kil taneleri, yüzeylerindeki negatif yükler sayesinde su moleküllerindeki pozitif hidrojen iyonunu çekerek su moleküllerini hidrojen bağı ile kendilerine bağlamaktadırlar. Taneler etrafındaki bu suya absorbe su denilmektedir. Bu su tane tarafından oldukça kuvvetli kendine çekildiğinden bilinen su davranışı göstermemektedir. Absorbe su, normal suya göre oldukça yüksek viskoz yapıdadır. Bu viskoz özellik tane yüzeyinden absorbe su sınırına gidildikçe kaybolmakta ve viskozitesi yüksek su, absorbe su sınırında normal su özelliğine geri dönmektedir. Absorbe su, tane yüzeyi boyunca

hareket edebilirken tane yüzeyine dik doğrultuda hareketi hidrojen bağları sebebiyle engellenmektedir. Şekil 1.8’de nemli durumdaki kil tanesi etrafındaki çift tabaka ve bu tabakadaki iyon konsantrasyonu görselleştirilmiştir.



Şekil 1.8. Kil tanesinin etrafındaki çift tabaka bölgesi (Van Impe, 1989).

Stabilizasyon için katılan kirecin zemin taneleri arasındaki boşluk suyunda (1.3)’de verildiği gibi iyonlaşması ortamdaki Ca^{+2} iyonu konsantrasyonunu artırırken, OH^- iyonları da ortamın pH değerini yükseltirler.

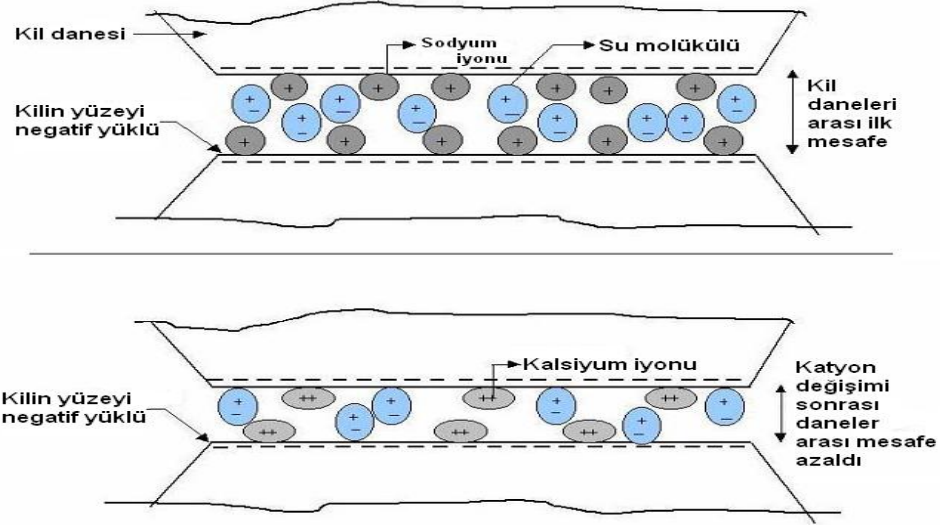


Genelde zeminlerde düşük değerlikli katyonlara sahip elementler yüksek değerlikli katyonlara sahip elementlerle yer değiştirmeye eğilimlidirler ve katyonlara ait tipik değişim serisi $\text{Li}^{+1} < \text{Na}^{+1} < \text{H}^{+1} < \text{K}^{+1} < \text{NH}_4^{+1} < \text{Mg}^{+2} < \text{Ca}^{+2} < \text{Al}^{+3} < \text{Si}^{+4}$ şeklinde olmaktadır. (Hanchanloet, 1999). Ca^{+2} iyonunun, kil tanesinin yüzeyindeki negatif yüklerin etkisindeki Na^+ , K^+ ve Mg^{+2} gibi pozitif değerlikli iyonlardan daha kuvvetli değişim özelliğine sahip olmasından dolayı bu iyonlarla kalsiyum iyonları yer değiştirir ve kilin negatif yüklerini Na^+ , K^+ ve Mg^{+2} iyonları yerine artık Ca^{+2} iyonları dengelemeye başlar. Kirecin ortamın pH değerini yükseltmesi de zeminin katyon değişim kapasitesini artırmaktadır. Genellikle birkaç saat sonunda hızlıca tamamlanan ve zeminin plastisite, işlenebilirlik ve şişme-

büzülme karakteristiğinde önemli değişimleri başlatacak olan bu reaksiyonlara katyon değişimi reaksiyonları denir (Bell, 1996).

Katyon değişimi olayı ile birlikte kil tanelerinin yüzeyinde Ca^{+2} katyonlarının hakim duruma geçmesinden sonra zeminde yumaklaşma (flokülleşme) ve agregasyon olayları başlamaktadır.

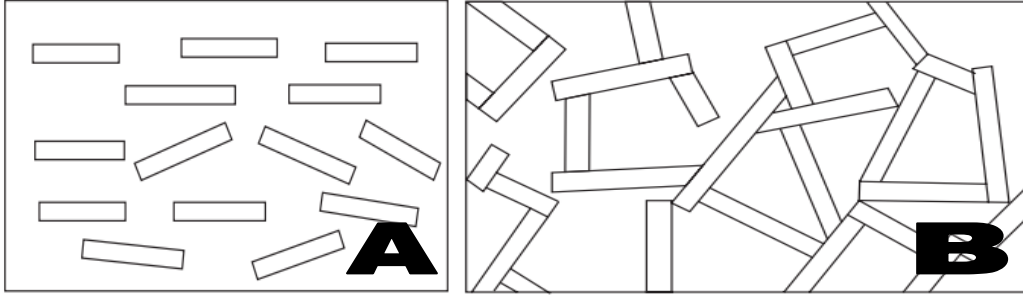
Kil taneleri arasındaki yakınlık ve taneleri saran çift tabaka bölgesinin kalınlığı çift tabaka bölgesinde bulunan katyonların sahip olduğu değerliğe ve konsantrasyonuna bağlı olarak değişmektedir. Kirecin eklenmesi ile ortamda konsantrasyonu artan Ca^{+2} katyonu, Şekil 1.9'da görüldüğü gibi kil tanelerini birbirine daha fazla yaklaştırmaktadır. Ayrıca Ca^{+2} katyonları, kil tanesini saran çift tabaka bölgesi dış sınırını da taneye doğru itmektir (Yazıcı, 2004). Kireç ile stabilizasyonda görülen ilk değişimler olan zeminlerin plastisitesindeki ve şişme-büzülme potansiyellerindeki iyileşmeler killeri arası mesafenin ve kil tanelerini etrafındaki çift tabaka bölgesinin kalınlığının azalmasının bir sonucudur.



Şekil 1.9. Kil taneleri arasındaki mesafenin azalması (Yazıcı, 2004).

Killer arası mesafenin ve kil tanelerini etrafındaki çift tabaka bölgesi kalınlığının küçülmesi komşu kil taneleri arasındaki mevcut itme kuvvetinin büyüklüğünü azaltmaktadır (İtme kuvveti, tanelerin çift tabaka bölgelerindeki benzer yüklerin birbirini itmesinden dolayı oluşmaktadır. Çekme kuvvetinin kaynağını ise taneler arasındaki etkileşimden doğan kısa mesafeli Van der Waals kuvvetleri oluşturur. Önemli miktarda kil içeren zeminlerde görülen kohezyon özelliğinin sebebi; kil taneleri arasındaki bu Van der

Waals çekim kuvvetinin varlığıdır.). Komşu kil tanelerinin negatif yüklü yüzeyleri ile pozitif yüklü kenarları arasındaki çekme kuvvetinin, azalan itme kuvvetini yenmesi ile kil tanelerinin Şekil 1.10 (A)'daki net itme kuvvetinin olduğu disper (dağınık) yapıdan, (B)'deki net çekme kuvvetinin olduğu yumak (flok) yapıya dönüşmesine yumaklaşma (flokülleşme) denilmektedir. Tablo 1.12'de potasyum, magnezyum ve kalsiyum gibi katyonların kil tanelerini yumaklaştırma gücü, sodyumun yumaklaştırma gücü baz alınarak verilmektedir. Çift tabaka bölgesinde genelde var olan sodyum, potasyum ve magnezyum katyonlarına oranla kireçte bulunan kalsiyumun yumaklaşma gücünün büyüklüğü Tablo 1.12'de açıkça görülmektedir (Sumner ve Naidu, 1998).



Şekil 1.10. Kil tanelerinin disper ve flok yapıları (Yazıcı, 2004).

Tablo 1.12. Bazı katyonların kil tanelerini rölatif yumaklaştırma gücü (Sumner ve Naidu, 1998).

Katyon	Rölatif yumaklaşma gücü
Sodyum	1.0
Potasyum	1.7
Magnezyum	27.0
Kalsiyum	43.0

Yumak yapıdaki taneler disper yapıya göre birbirine daha çok yaklaşmakta hatta temas ettiği yüzeyler bulunmaktadır. Komşu kil tanelerinin yaklaştığı ve temas ettiği yüzey-kenar kesitlerinde oluşan hidrojen ve Van der Waals bağlarıyla taneler birbirine kenetlenerek geniş çaplı kümeler oluştururlar. Yumaklaşmayı takip eden bu olaya agregasyon adı verilmektedir.

Yumaklaşma ve agregasyon ile kil tanelerinin mikro yapısında ve efektif tane boyutunda belirgin değişimler meydana gelmektedir. Öyle ki kireç ile stabilizasyon

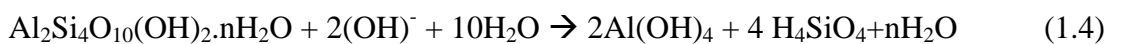
sonucunda killi zeminler, siltli veya kumlu zemin davranışı gösterebilmektedir (İpek, 1998).

Katyon değişimi, yumaklaşma ve agregasyonu kapsayan ilk aşama sonunda zeminin plastisitesinde ve şişme-büzülme karakteristiğindeki iyileşmeler ile işlenebilirliğindeki artış açıkça gözlenebilmektedir. Bu aşamanın tamamen sona ermesi çok kısa sürede olmaktadır. Ayrıca kireç eklenmesi ile yaklaşık 12.4'e çıkan zeminin pH değeri bir sonraki aşamada gerçekleşecek olan çimentolaşma (puzolanik) reaksiyonları için gerekli ortamı sağlamaktadır.

Her zeminin kendine ait bir kireç doygunluk derecesi mevcuttur. Bu doygunluk derecesine kadar eklenen kireç; ancak katyon değişimi, yumaklaşma ve agregasyon aşamalarındaki reaksiyonlar için gerekli olan kireç ihtiyacını karşılamaktadır. Taneler arasında ayrıca çimentolaşma reaksiyonlarının olması isteniyorsa bu limit değer üzerinde bir kireç miktarının zemine katılması gerekmektedir. Burada fazlada eklenen kireç miktarı ile zeminin plastisitesinde, şişme-büzülmesinde ve işlenebilirliğinde yeni kazanımlar sağlamaktan çok çimentolaşma için gerekli ihtiyaç karşılamaktadır (Al-Rawas vd., 2002; Mathew ve Rao, 1997).

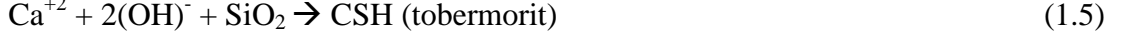
Denklem (1.3)'de görüldüğü gibi kireç boşluk suyunda iyonlaşarak ortama OH⁻ iyonları vermektedir. Bunun sonucunda zeminin pH değeri artarak yaklaşık 12.4 seviyelerine çıkmaktadır. Bazik karakter kazanan ortam sayesinde killerin bileşiminde genelde var olan silisyumlu, alüminyumlu ve/veya demirli oksitler (SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃) aktivite kazanarak iyonlaşma reaksiyonları yapmaktadırlar. Eğer zemin SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ bileşikleri içermiyorsa doğal puzolan (örneğin volkanik cüruf, diatomeli toprak (silisli bir tür tortu kayacı), volkanik tüfler vb.) veya yapay puzolan (silisli uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı vb.) ilave edilerek kirecin etkinliği artırılmaktadır (Atanur, 1973).

Denklem (1.4)'de montmorillonit türü kilin bazik ortamdaki (pH değerinin en az 10.5 olması gerekmekte) ayrışma reaksiyonu verilmiştir. Aynı şekilde illit ve kaolinit türü killer içinde benzer ayrışma denklemleri yazılabilir.



Silisyum, alüminyum ve/veya demir iyonları ile kirecin ortama verdiği diğer bir iyon olan Ca⁺² katyonu arasındaki kimyasal reaksiyonlar (puzolanik reaksiyonlar) sonucunda

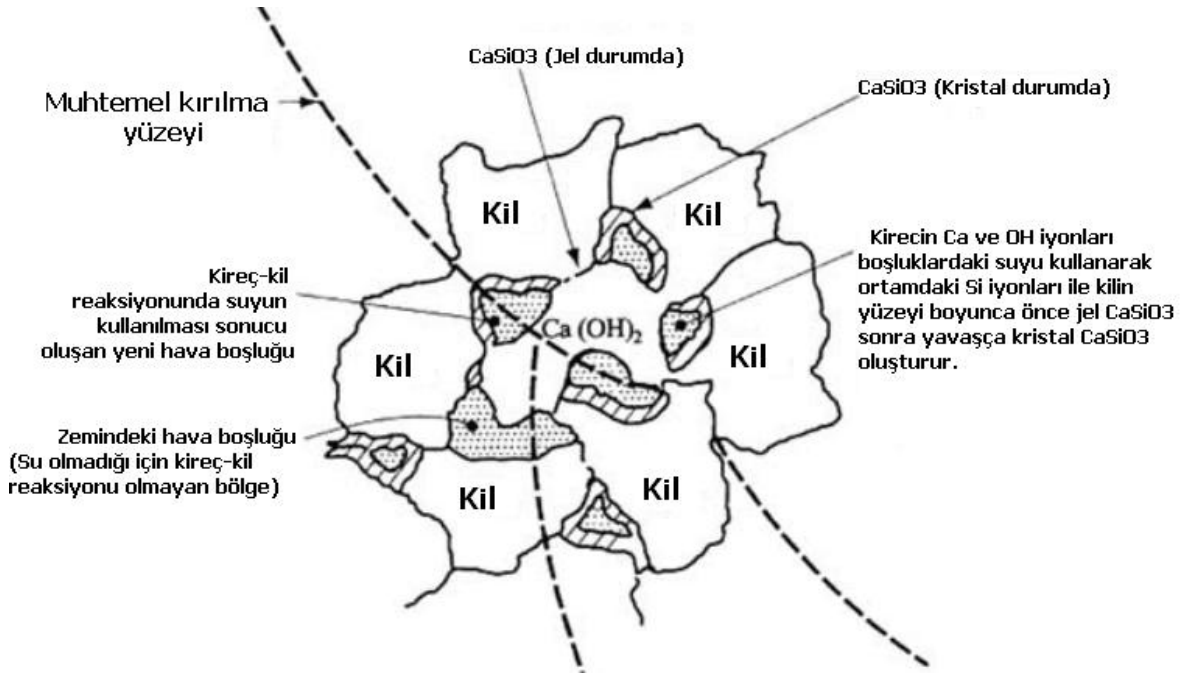
kalsiyum silika hidrate (CSH), kalsiyum alümina hidrate (CAH) ve kalsiyum alümina-silika hidrate (CASH) gibi mukavemetli ürünler meydana gelmesine çimentolaşma denmektedir (Nalbantoğlu ve Tuncer, 2001). Çimentolaşma aşamasındaki puzolanik reaksiyonlara ait denklemler (1.5), (1.6) ve (1.7)'de verilmektedir.



Burada denklemleri verilen puzolanik reaksiyonların tamamlanması birinci aşamadaki katyon değişimi, yumaklaşma ve agregasyonun aksine oldukça uzun bir zaman periyodunda (hatta yıllarca sürebilen) gerçekleşmektedir.

Çimentolaşma ürünleri CSH, CAH ve CASH (özellikle CSH), puzolanik reaksiyonlar sonucu ilk meydana geldiklerinde jel kıvamındadır. Oluşan bu jel, zemin tanelerini çevreleyip zemin boşluklarını tıkamaktadır. Zaman geçtikçe CSH, CAH ve CASH jelleri kristalleşerek sertleşmektedir. Yüksek mukavemetli, sert ve suda erimez olan bu kristal yapılar zeminin dayanımında ve durabilitesinde meydana gelecek iyileşmeleri sağlayacak olan ürünlerdir. Sözü edilen bu mekanizma Şekil 1.11'de görselleştirilmiştir.

Çimentolaşma aşamasında dayanım ve durabilitede elde edilen toplam kazançlar sıcaklık ve zamana bağlı olarak çoğalmaktadır. Stabilizasyon sürecinin başlangıcındaki dayanım artışları genelde oldukça hızlı iken zaman geçtikçe artış miktarı azalmakla birlikte yinede devam etmektedir. Normal laboratuvar koşullarında nihai dayanım değerine genelde kirecin zemine karıştırılmasından sonraki 1~3 ay içerisinde ulaşılmaktadır (Anday, 1962; Dawson, 1956; Laguros vd., 1956).



Şekil 1.11. Çimentolaşma mekanizması (CDIT, 2002).

Sıcaklığın 4°C 'nin altına düştüğü durumlarda puzolanik reaksiyonlar yavaşlama hatta durma noktasına gelmektedir. Düşük sıcaklıklarda yavaşlamış veya durmuş olan reaksiyonlar, sıcaklığın yükselmesi ile tekrar aktif hale geçerek çimentolaşma ürünleri vermeye devam edebilmektedir (Bell, 1996). Stabilizasyon çalışmalarında deney sıcaklığının 38°C 'den yüksek olmasıyla kazanılan zemin dayanımı, aynı süre normal oda sıcaklığında tutulanlara nazaran oldukça yüksek olmaktadır (Thompson, 1969; Drake, 1971). Davidson vd. (1960), 100°F (38°C) ve üstü sıcaklıklarda kür periyodunun başlangıcında kazanılan dayanım artışlarının küçük katkı miktarlarında bile yüksek çıktığını söylemişlerdir. Ayrıca araştırmalarında 21°C 'de 28 günlük kür sonundaki dayanıma yaklaşık eşit dayanımı 38°C 'de 3 günlük kürde elde etmişlerdir. Anday (1962-1963), arazideki koşullarındaki 45 günlük dayanım değerini, kür koşullarının 60°C 'de 18 saat veya 50°C 'de 24 saat içerisinde elde edilebileceğini bulmuştur. Howard (1966), kaolin tipi killi zeminlerdeki deneylerinde 50°C 'de 24, 40 ve 48 saatlik kürlerin 22°C 'deki sırasıyla 20, 40 ve 60 günlük dayanımlara yakın değerler verdiğini ortaya koymuştur. Loguros vd. (1956), normal oda koşullarında elde edilen dayanımın asla yüksek sıcaklıklarda elde edilen dayanımlara ulaşamayacağını söylemişlerdir.

Her ne kadar yüksek sıcaklıklardaki kür koşullarının nihai dayanımı pozitif yönde değiştirdiği bilinmesine rağmen, kireçle ıslah edilen zeminlerin normal koşullardaki sıcaklıkta kür edilmesi aşağıdaki sebeplerden dolayı istenebilir:

- Arazi şartlarındaki kazanımlarla karşılaştırma yapılması istenen durumlarda normal oda sıcaklığındaki kür koşulları daha uygun olmakta,

- Kür periyodu esnasında yüksek sıcaklıklardaki duruma göre görece olarak daha az nem kaybı istendiği durumlarda,

- Oda koşullarındaki kür koşullarında zeminin dayanım-zaman eğrisinin eğiminin nispeten küçük olması nedeniyle zaman içinde dayanımda ani ve yüksek değişimler olmayacak ve deney sonuçlarının doğruluğu artacaktır (Anday, 1962; Drake, 1971; Thompson, 1964).

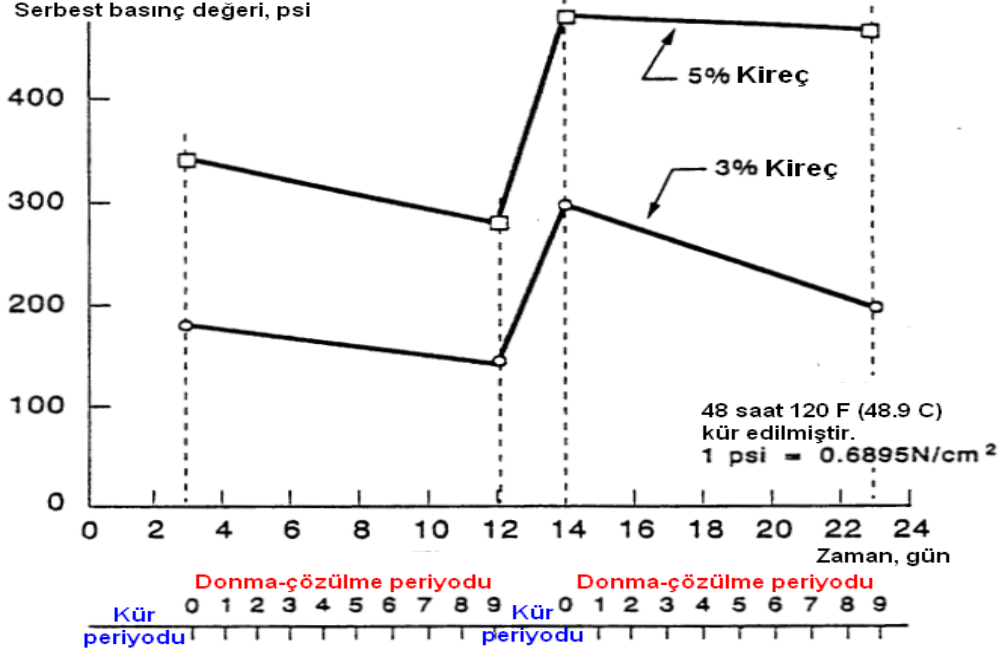
Puzolanik reaksiyonlar, ortamın pH değeri 10.5'un üzerinde kaldığı sürece devam etmektedir. (1.4)'deki zeminin ayrışma reaksiyonu, (1.5), (1.6) ve (1.7)'deki çimentolaşma ürünlerinin oluşum reaksiyonları ortamın (OH)⁻ iyonunu kullandığından zeminin pH değerini 10 seviyelerine indirebilmektedir (Hunter, 1988). Çimentolaşma sürecinde pH değerinin zamanla 10.5 limit değerinin altına düşmesi puzolanik reaksiyonların durmasına sebep olacaktır.

Kireç (Ca(OH)₂) ile havanın karbondioksiti (CO₂) reaksiyona girerek kalsiyum karbonatı (CaCO₃) oluşturmasına karbonatlaşma denir. CaCO₃; CSH, CAH ve CASH gibi yüksek mukavemete sahip olmadığı gibi ortamın kirecini harcayarak oluştuğu için puzolanik reaksiyonları olumsuz etkilemektedir (Reaksiyonlarda kullanılan Ca⁺² katyonu ile pH değerinin yükselten OH⁻ anyonun miktarında azalttığından dolayı). Azalan hatta durma noktasına gelen puzolanik reaksiyonlardan ötürü zemin gereken iyileşmeleri sağlayamayacaktır. Ayrıca azalacak pH değerinin sınır değer olarak önceden verilen 10.5'in altına geldiği durumlarda havadan absorbe edilecek CO₂ ile çimentolaşma ürünleri CSH, CAH ve CASH arasında da reaksiyonlar meydana gelerek silisli ve alüminyumlu karbonatlar oluşturduğu rapor edilmiştir. Bu yüzden zemine yeterli derecede kireç katılarak ortamın bazikliği 10.5 altına düşmemesi sağlanmalı, zemine kireç katıldıktan sonra (havadan karbondioksiti absorbe etmesine izin vermemek için) hemen karıştırma, serme ve kompaksiyon işlerinin başlatılması ve en yüksek yoğunluk en düşük boşluk olacak şekilde çok iyi bir kompaksiyon yapılarak potansiyel karbonatlaşma probleminin önüne geçilmelidir (Çetiner, 2004).

Kireç ile ıslah edilecek zeminde veya boşluk suyunda eğer sülfat iyonu mevcut ise sülfat kilin yapısındaki alüminyum iyonu ve kireçteki kalsiyum iyonunu ile etrenjit ($\text{Ca}_6[\text{Al}(\text{OH})_6]_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 26\text{H}_2\text{O}$) adı verilen bir bileşik oluşturmaktadır. Etrenjit oldukça yüksek su emme kapasitesine sahip bir ürün olduğundan zeminin şişme potansiyelini çok yükseltmektedir (Mohamed, 2000). Bundan dolayı ortamın sülfat içeriğinin Mitchell (1986) ve Petry ve Little (1992) tarafından önerilen sınır değerleri geçmemesi gerekmektedir.

Kireç katkılı stabilizasyon çalışmalarında oluşan reaksiyonların hızlarının yüksek olmaması nedeniyle yapım sırasında sorunlar çıkarmaması bir avantajdır. Yerinde yapılacak gecikmeli kompaksiyonun bazı sakıncaları öne sürülmüşse de (özellikle karbonatlaşma) bu diğer katkı maddelerine oranla ihmal edilebilecek ölçekte dir. Kireç stabilizasyonu ile killi zeminlerde elde edilen faydalar ve ekonomik kazançlar genel olarak çimento stabilizasyonuna nazaran elde edilen kazanımlardan daha fazladır. Bu nedenle uygulamada kil içeren zeminlerin kireç ile stabilizasyonu daha yaygın ve etkin olarak kullanılmaktadır.

Kireçle ıslah edilmiş zeminlerin en önemli avantajlarından biri de otojen onarım mekanizmasıdır. Bu terim, yenilmiş bir bağlayıcılı (katkılı) malzemenin direncini zamana bağlı olarak kazanması sürecini anlatmaktadır. Kesin olmamakla birlikte bu onarımın, kırılma ya da akmanın kısa kür sürelerinde daha etkin olduğu ve artan rutubet, sıcaklık gibi çevre koşullarından olumlu etkilendiği bulunmuştur (Thompson ve Dempsey, 1969). Şekil 1.12'de iki farklı kireç içeriği ile ıslah edilen zeminin donma-çözülme etkisinde bırakıldıktan sonra dayanım kaybedip tekrar dayanım kazanması görülmektedir.



Şekil 1.12. Otojen onarım mekanizması (CDIT, 2002).

Yeni yapılan araştırmalar kil içeriği yüksek olan zeminlerde jipsin de kireç kadar faydalı bir katkı malzemesi olabileceğini göstermektedir.

Sonuç olarak kireç stabilizasyonu yapılan zeminlerin;

- ❖ PI değeri (LL düşerken PL artar.) azalır.
- ❖ Büzülme limiti (SL) artar.
- ❖ Şişme-büzülme potansiyeli azalır.
- ❖ Dayanım (serbest basınç, CBR, plaka yükleme vb.) artar.
- ❖ Çekme mukavemeti artar.
- ❖ Suya karşı direnci artar.
- ❖ Geçirimsizliği artar.
- ❖ İşlenebilirliği artar.

1.4.3.2. Puzolanlar ile Zemin Stabilizasyonu

Kendi başlarına bağlayıcılık özelliği hiç olmayan veya çok az olan, ancak uygun su içeriğinde ve normal ortam sıcaklığında kalsiyum hidroksit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) içeren bağlayıcılarla kimyasal reaksiyona girip çimentolaşma ürünleri açığa çıkaran, ince taneli malzemelere puzolan denilmektedir. Puzolan kelimesi, İtalya'daki Vezüv Yanardağı'nın eteklerinde

bulunan Pozzuoli kasabasının isminden gelmektedir. Milattan yaklaşık 100 yıl önce, eski Romalılar, Pozzuoli kasabasının civarındaki volkanik kül ile söndürülmüş kirecin suyla birlikte karılmasıyla elde edilen malzemenin hidrolik bağlayıcılık özelliği gösterdiğini fark etmişlerdir. O nedenle su altında sertleşme gösterebilen bu yeni malzeme “puzolan” ismiyle anılmaya başlanmıştır. Puzolan terimi, genel bir ifade olmakla beraber puzolanlara zaman içinde buldukları ülkelere göre özel adlar verilmiştir. Mesela Almanya’nın Ren bölgesindeki puzolanlara Tras ismi verilirken, Yunanistan’a bağlı Santorin Adası’ndaki puzolanlar ise Santorin toprağı olarak adlandırılmıştır (Akman, 1990). Günümüzde ince taneli durumdayken söndürülmüş kireçle ve su ile birleştirildiğinde hidrolik bağlayıcılık gösteren silikatlı ve alüminatlı malzemelerin tümü puzolan olarak anılmaktadır.

Silisyum dioksit (silikat-SiO₂), alüminyum oksit (alüminat-Al₂O₃) ve demir oksit (Fe₂O₃) gibi mineraller çok yüksek sıcaklıkta ergime durumuna gelmesi (örneğin volkanik olaylar esnasında) ve ani soğumaları sonucu camsı (amorf) bir yapıya dönüşmektedirler (Akman ve Esenli, 1992).

Oluşan bu camsı (amorf) yapı (Puzolandaki kristal yapının azlığı ve camsı yapının fazlalığı kimyasal reaksiyona girme yeteneğini artırmaktadır.), içerdiği SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ gibi oksitler (Puzolanik etkiyi sağlayan en önemli oksit silisyum dioksit (Silikat-SiO₂) olduğundan bu mineralin miktarı toplam kütlede %25’in altına düşmemelidir.) ile özgül yüzey değeri (yeterince ince taneli olması) puzolana yeterli aktiviteyi gösterebilmesi için gereken özellikleri sağlamaktadır.

Puzolanların ne ölçüde bağlayıcılık sağlayabileceği puzolanik aktivite deneyi ile saptanmaktadır. Kireç, standart kum ve su ile hazırlanan kontrol harcından hazırlanan 50 mm’lik küp numunelerin 7. gün ve 28. gün sonundaki basınç dayanımının; kireç, standart kum, su ve puzolan karıştırılarak hazırlanan küp numunelerin basınç dayanımı arasında dayanım aktivite indeksi tanımlanmaktadır (Bir puzolanın dayanım aktivite indeksinin minimum sağlaması gereken değerler TS ve ASTM standartlarına göre Tablo 1.14’de verilmektedir.).

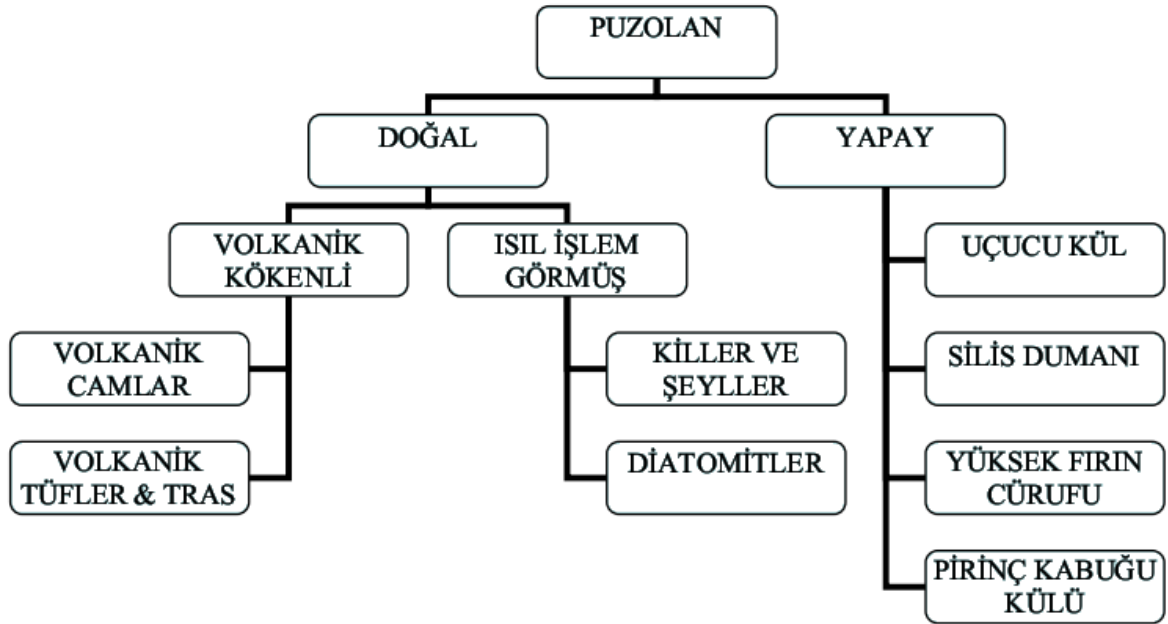
Kimyasal bileşimleri açısından diğer bağlayıcı maddelerle karşılaştırıldığında puzolanlar silikat ve alüminat (SiO₂ ve Al₂O₃) esaslı iken, kireç ve çimento CaO esaslıdır. Bu nedenle puzolanların büyük kısmı kendi başına bağlayıcı özelliğe sahip değildir. Bundan dolayı puzolanlar ikincil bağlayıcı maddeler olarak da anılmaktadırlar.

Puzolanlar; GW, GP, GM, GC, SW, SP, SM, SC gibi kaba gradasyonlu zeminlerde etkin olarak kullanılmaktadır. Puzolanlar genelde tek başlarına kullanılan stabilizörler

olmadığı ve kalsiyum hidroksit (sönmüş kireç- Ca(OH)_2) içeren bağlayıcılarla sulu ortamlarda karıştırıldığında belirli bir süre sonunda zeminde sertleşme yapan ve dayanım kazandıran maddeler olduğu söylenmişti. Burada kireç ile puzolan arasında optimum bir oran vermek gerekirse 1/2 ila 1/7 arası değerler uygun olmaktadır. Genellikle %2.5-%4 kirece %10-%15 puzolan oranı çok iyi sonuçlar verir.

İyileştirme mekanizması aşamaları, 1.4.3.1. Kireç ile Zemin Stabilizasyonu bölümünde verilen katyon değişimi, yumaklaşma, agregasyon ve çimentolaşma olaylarına benzer şekilde gelişmektedir. Katyon değişimi, yumaklaşma, agregasyon aşamaları genellikle birlikte kullanıldığı kireç veya çimento gibi kalsiyum bazlı katkıların dominant olduğu aşamalar olurken, asıl etkisini çimentolaşma ürünlerinin olduğu çimentolaşma aşamasında göstermektedir (Yapılarında bulunan silikat ve alüminatların varlığı sebebiyle kalsiyum bazlı diğer katkı ile CSH, CAH ve CASH ürünlerini meydana getirirler.).

Puzolanlar oluşum şekillerine göre doğal ve yapay olmak üzere Şekil 1.13'de görüldüğü gibi iki ana gruba ayrılmaktadır (Ün, 2007).



Şekil 1.13. Puzolanların sınıflandırılması (Ün, 2007).

Doğal ya da yapay bütün puzolanların yapılarında kalsiyum içerikli katkılarla yapacağı kimyasal reaksiyon kapasitelerini belirleyen üç tip bileşen mevcuttur:

- Aktif tertip maddeleri: Az ya da çok değişmiş cam fazlar, opal, silisli toprak vb.

- Atıl bileşenler: Zeolitlerden farklılaşan kristal fazları (augit, piroksen vb.)
- Zararlı (istenmeyen) bileşenler: Organik maddeler, kalay ve karbon (Dayı, 2006).

Puzolanlar, sızdırmazlık sağlamak amacıyla atık depo sahalarında, yol kaplaması altındaki temel tabakası yapımında, donatılı zemin duvarlarında arka dolgu olarak, döşemelerdeki farklı oturma hasarlarını onarmak için kireç veya çimento gibi bir katkı ile birlikte çok çeşitli çalışmalarda kullanılmaktadır (Wasti, 1993).

1.4.3.2.1. Doğal Puzolanlar

Doğada bulunan, doğrudan veya bir ön işlem yapıldıktan sonra (örneğin ısı işlemler) öğütülerek kullanıma hazır hale gelen büyük miktarda silikat ve alüminat içeren malzemelere doğal puzolan adı verilmektedir. Doğal puzolanların tabiatta genellikle bloklar halinde bulunduğundan öğütülmeleri ve ince taneli hale getirilmeleri gerekmektedir (Yıldız, 2006).

Doğal puzolanların çoğu piroklastik kayalardır. Piroklastik kayalar volkan bacasından havaya fırlayan eriyik haldeki mağmanın, havada değişik boyutlarda katılarak yeryüzüne düşmesi ve yine volkan kökenli daha ince taneli malzeme ile çimentolaşması sonucu oluşurlar. Piroklastik kayaların oluşumları sırasındaki koşulların bir sonucu olarak iki önemli karakteristik özelliğe sahiptirler:

- ❖ Maddelerin hızlı soğumasına bağlı olarak fişkırtma sürecinde oluşan sıvı kristalleşmez ve amorf (camsı) yapıda katılaştır.
- ❖ Yeryüzüne yaklaştığında basınç azalır ve içeriğindeki gazların serbest kalmasına neden olur. Gözenekli ve kabarcıklı bir yapı meydana gelir. Bu yapı ya olduğu gibi kalır ya da serbest kalan gazların patlayıcı etkisiyle az çok bozularak kavisli ve iğnemsî bir yapı oluşur. Her iki durumda da özgül yüzey büyüktür. Fışkıran malzeme katılma sürecinde camsı bir hal almaya başlar. Ayrıca sadece camsı fazdan oluşan piroklastik kaya da yoktur. Bunun sebebi fışkıran parçacıklar az veya çok miktarda (%1 - %61) fenokristaller şeklinde kristalize madde içerirler. Piroklastik kayalarda feldspat, kuvars, biotit, magnetit, hornblend ve ojit en fazla bulunan fenokristallerdir (Leckeubush, 1984; Çimen, 2005).

Volkanik kökenli doğal puzolanlar, erimiş magmanın püskürmesi ile oluşmaktadır. Şekil 1.14'de resimleri verilen volkanik camlar, volkanik tüfler ve riyolitik pomza taşı bu gruba girmektedir. Magmanın şiddetli püskürmesi sonucunda,

yüksek puzolanik aktiviteye sahip daha camsı yapıda malzemeler oluşurken daha zayıf şiddetteki püskürmeler kireçle daha az kimyasal reaksiyon yapan volkanik külleri meydana getirir.



Şekil 1.14. Volkanik kökenli doğal puzolanlar (pomza taşı, volkanik cam ve tüf)

Volkanik camlar, Yunanistan'a bağlı Santorin Adası'nda, İtalya'da Bacoli ve Japonya'da Shirasu'da zengin yataklar halinde bulunmaktadır. Bu malzemeler puzolanik aktivite karakteristiklerini esas olarak, düzensiz yapıdaki silisli ve alüminli camsı yapılarından alırlar. Küçük miktarda reaktif olmayan kuvars, feldspat ve mika gibi mineral kristalleri, camsı faz içinde bulunabilir. İnce öğütülmeleri halinde oldukça güçlü puzolanik özellikleri vardır (Gündeşli, 2008).

İtalya'da Segni-Latium'da, Almanya'da Ren bölgesinde, Türkiye'de Kula cürufu ve Kayseri trası volkanik tüflerin ve trasların tipik örnekleridir. Riyolit tüfler, dasit tüfler ve zeolit tüfler en iyi puzolanik malzemelerdir. Andezit, bazalt ve bazalt tüfü genellikle kalite ve performans açısından yeterli değildir. Değişik tip traslar içinde ojit, apatit, biotit, magnetit, muskovit, hematit, kristobalit, kaolinit, illit, mika ve hornblend gibi mineraller mevcuttur.

Isıl işlemler sonucu elde edilen puzolanlar grubunda öğütülmüş pişmiş kil ve şeyller ile diatomitler (diatomeli toprak) yer almaktadır.

Killer ve killi zeminler, plaka veya çubuk şekline sahip olan boyutları 0.002 mm'den daha küçük tanelerden oluşurlar. Küçük taneler, orijinal kayaların daha az stabil olan bileşenlerinin kırılmasından meydana gelen ve çoğunlukla silis ve alümin içeren kil minerallerinden oluşur. Şeyller, killer ile benzer bileşenlere sahiptir ancak su içerikleri killerden daha azdır. Kil mineralleri kristal yapıda olup, killerin ve şeyllerin hammadde formları puzolanik özellik göstermez. Ancak 700°C ile 900°C arasında 1~2 saat ısıl işleme

kalsine olurlar ve puzolanik özellik kazanırlar. Isıl işlem killerin ve şeyllerin kristal yapılarını bozar ve yarı amorf şekle veya bozulmuş alümina silikat yapısına dönüştürür.

Puzolanik aktiviteyi sağlayan esas bileşik silisyum dioksit (Silikat-SiO₂) olduğundan ısıtılma tabii tutulacak kil ve şeylin bu oksidi en az %25 oranında içermesi gerekmektedir. Örneğin laterit toprakları, limonit veya hematit gibi yüksek miktarda demir minerali; boksitli topraklar ise alüminyum minerali içerirken silisyum dioksit açısından zengin değildir. Bu yüzden Al₂O₃ ve Fe₂O₃ içeriği bakımından çok zengin olsa da bu iki toprak çeşidinin pişirilip öğütülmesi ile elde edilecek malzemeler silis içeren diğer malzemelere göre daha az puzolanik aktiviteye sahip olacaktır (Erdoğan, 2003).

Killerin ve şeyllerin pişirilip öğütülmesi ile elde edilen puzolanlar ABD’de, Brezilya’da ve Hindistan’da birçok baraj inşaatında kullanılmışlardır (Baradan, 2000). Fakat günümüzde yakıt giderlerinin artması sebebiyle giderek kullanımı azalmakta yerini daha kolay ve ekonomik olarak bulunabilen yapay puzolanlara bırakmışlardır.

Şekil 1.15’de görülen diatomitler, hücre duvarları silikadan oluşmuş, opal ve hidrate silika içeren, mikroskobik büyüklükteki tek hücreli su bitkisi olan diatomların kalıntılarıdır. Diatomeli topraklar ise bu tek hücreli bitkinin kalıntılarından kaynaklanan ve amorf yapıda olan %94 gibi yüksek miktarda silis içeren bir toprak türüdür. Diatomeli toprakların sahip olduğu puzolanik aktivite, içerdiği bu amorf silisten gelmektedir. Yüksek miktarda kil minerali içeren bazı tür diatomeli topraklarda, killer puzolanik aktiviteyi azaltır. Bu yüzden bu tür toprakların 760-1000°C sıcaklığa kadar pişirilmeleri sonra ince taneli duruma getirilmeleri ile puzolanik etkileri tekrar arttırılmaktadır (Ramachandran, 1995). Büyük miktarda diatomit yataklarına Kaliforniya (ABD), Cezayir, Almanya, Danimarka ve Kanada’da rastlanmaktadır.



Şekil 1.15. Diatomlar ve diatomeli toprak tabakaları

Tablo 1.13’de doğal puzolanların kimyasal bileşimlerinde yer alan bazı önemli oksitlerin oranları verilmiştir. Buradan görüleceği gibi doğal puzolanların ana oksitleri SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 ’dür. Sönmemiş kireç (CaO) oranı %22 gibi bir yüksek değere ulaşarak diğer puzolanlardan ayrılan pişmiş kil, puzolanik özelliği yanında yüksek miktarda CaO sayesinde bir miktar bağlayıcı özelliği de bulunmaktadır (Erdoğan, 2003).

Doğal puzolanların uygun bir katkı maddesi olarak kullanılabilmesi için sahip olmaları gereken fiziksel ve kimyasal özelliklere dair sınır değerler TS 25 ve ASTM C 618’de belirtilmektedir. Doğal puzolanların katkı maddesi olarak kullanılabilmesi için sağlaması gereken fiziksel değerler Tablo 1.14’de, kimyasal değerler Tablo 1.15’de TS 25 (1975) ve ASTM C 618’e (2002) verilmektedir.

Tablo 1.13. Doğal puzolanların kimyasal bileşimindeki bazı oksitlerin miktarı (Erdoğan, 2003).

	Volkanik cam	Volkanik tüf	Diatomit	Pişmiş kil	Pomza taşı
SiO_2	%65.1	%52.1	%86.0	%42.2	%60.5
Al_2O_3	%14.5	%18.3	%2.3	%16.1	%17.2
Fe_2O_3	%5.5	%5.8	%1.8	%7.0	%3.4
CaO	%3.0	%4.9	-	%21.8	%4.7
MgO	%1.1	%1.2	%0.6	%1.9	%2.1

Tablo 1.14. Doğal puzolanların sağlaması gereken fiziksel değerler

	TS 25 (1975)	ASTM C 618 (2002)
İncelik:		
45µm göz açıklıklı elekten ıslak olarak elendiğinde elek üstünde kalan miktar, maks. %	-	34
Özgül yüzey, min. mm^2/g	300000	-
Dayanım aktivite indeksi:		
7. gün, min. %	-	75
28. gün, min. %	70	75
Su ihtiyacı:		
Kontrol numunesine kıyasla, maks. %	-	115

Tablo 1.15. Doğal puzolanların sağlaması gereken kimyasal değerler

	TS 25 (1975)	ASTM C 618 (2002)
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ , min. %	70.0	70.0
SO ₃ , maks. %	5.0	4.0
Nemlilik, maks. %	3.0	3.0
Kızdırma kaybı, maks. %	10.0	10.0
MgO, maks. %	5.0	-
Na ₂ O, K ₂ O olarak alkaliler, maks. %	1.5	1.5

Türkiye jeoloji haritasında 155 000 km² alanı kaplayan volkanik kökenli kayalar oluşumları ülke yüzölçümünün yaklaşık 1/5'i kadardır. Bu değere göre ülkemiz, kolayca ve bol şekilde doğal puzolan hammaddesi elde edilecek volkanik kaynakların zengin olduğu şanslı ülkelerdendir (Okucu, 1998).

1.4.3.2.2. Yapay Puzolanlar

Şekil 1.16'da fotoğrafları verilen uçucu kül, yüksek fırın cürufu (letiyesi), silis dumanı (tozu) ve pirinç kabuğu külü yapay puzolanlar grubunda yer almaktadır.



Şekil 1.16. Yapay puzolanlar (silis dumanı, pirinç kabuğu külü, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül)

Silisyum dioksit (silikat-SiO₂), alüminyum oksit (alüminat-Al₂O₃) ve demir oksit (Fe₂O₃) ana oksitleri olmak üzere doğal puzolanlarla aralarında kimyasal açıdan önemli bir fark yoktur. Yapay puzolanların tek farkı tabiatta doğal olarak bulunmayıp hepsinin birer endüstriyel yan ürün (sanayi atığı) olmasıdır. Bu yan ürünlerin mevcudiyeti su ve havanın kalitesi, tarım ürünleri, doğal hayat ve bölgenin ekonomik durumu açısından tehlike arz

ettiğinden bunların çeşitli kullanım alanlarında değerlendirilerek ortadan kaldırmak hatta ülke ekonomisine kazandırmak gerekmektedir. Doğal puzolanlara yakın fiziksel ve kimyasal özelliklerinin verdiği olanaklarla yapay puzolanlar, puzolanik aktivitesiyle inşaat sektöründe kendilerine geniş kullanım alanları edinmeye başlamışlardır (Aytekin, 2009).

Silikon metalinin veya silikonlu metal alaşımların üretiminde, yüksek saflıktaki kuvars, elektrik fırınlarında yaklaşık 2000°C sıcaklıkta kömür yardımıyla indirgenmeye (redüklenme) tabi tutulmaktadır. Üretim işleminde çok büyük miktarı SiO'dan oluşan gazlar çıkmaktadır. Gaz halindeki SiO'nun, fırının soğuk bölgelerinde havanın oksijeni ile temas etmesi ve çok çabuk soğumasıyla birlikte SiO, amorf yapıya sahip SiO₂ durumuna dönüşmektedir. Bu parçacıklar fiber filtreden geçirildikten sonra yoğunlaştırılmış silis dumanı elde edilmiş olur.

Silis dumanı özgül ağırlığı 2.2–2.3 arasında, %85-%98 silis içeren, 13x10⁵-28x10⁵ mm²/g özgül yüzeye sahip (Sigara dumanının 1x10⁶ mm²/g, uçucu külün 4x10⁵-7x10⁵ mm²/g ve Portland çimentosunun yaklaşık 3x10⁵ mm²/g özgül yüzeye sahip olduğu akla getirildiğinde silis dumanının ne kadar ince olduğu daha iyi anlaşılmaktadır.), 1 µm'den küçük, küresel amorf yapıya sahip bir maddedir. Silis dumanının amorf yapısı, büyük özgül yüzeyi ve yüksek miktarda içerdiği SiO₂ ile mükemmel bir yapay puzolandır. Bu malzeme mikrosilis, silika tozu veya silika fume gibi isimlerle de anılmaktadır.

Tablo 1.16'da ABD, Norveç ve Türkiye'de üretilen silis dumanlarının kimyasal kompozisyonları gösterilmektedir (Erdoğan, 2003). Türkiye verileri, Antalya Ferrosilikon fırınından elde edilen malzemeye aittir.

Tablo 1.16. Silis dumanının kimyasal kompozisyonu (Erdoğan, 2003).

	ABD	Norveç	Türkiye
SiO ₂	%90.0-93.0	%90.0-96.0	%93.0-95.0
Al ₂ O ₃	%0.5-1.6	%0.5-3.0	%0.4-1.4
Fe ₂ O ₃	%0.4-0.7	%0.2-0.8	%0.4-1.0
CaO	%0.5-0.8	%0.1-0.5	%0.6-1.0
MgO	%0.3-0.5	%0.5-1.5	%1.0-1.5
K ₂ O	%1.0-1.2	%0.4-1.0	%0.5-1.0
Na ₂ O	%0.1-0.3	%0.2-0.7	%0.1-0.4

Silis dumanın puzolan madde olarak kullanılması için TS ve ASTM standartlarında herhangi bir sınır değeri belirtilmemiştir. Ancak CSA-A23.5.M.86 no'lu Kanada standardı bu konuda bazı bilgi ve hükümler içermektedir. CSA-A23.5.M.86, dayanım aktivite indeksi en az %85, 45µm elek üzerinde kalan miktar en çok %10, kontrol numunesine oranla maksimum su ihtiyacı %134 olması şeklinde bu hükümler standartlaştırılmıştır (CAN/CSA, 1986).

Pirinç kabuğu, çeltik üretimi sonunda elde edilen zirai ürün atığıdır. Pirinç, dünyada 1.6 milyar kişinin besin maddesinin yarısını oluşturmaktadır. Ekilebilen alanların %11'inde yani yaklaşık olarak 145 milyon hektar alanda pirinç ekimi yapılmaktadır. Çeltik bitkisi yeryüzünde buğdaydan sonra en fazla üretilen tahıldır. Çeltik fabrikalarında işlenerek pirinç elde edilir ve işleme sırasında çeltiğin %9-%10'u kadar kepek, %20'si kadar da kavuz elde edilir (Ölmez, 1988).

Pirincin iç kabuğu olan kepek, besleyici yönden zengin olduğundan hayvan yemi olarak kullanılır. Çeltik sanayinin diğer atığı olan kavuz, ham olarak kullanılamamakta üretimin fazla olduğu bölgelerde büyük alanları kaplayarak çevrenin kirlenmesine neden olmaktadır (Mazlum, 1989). Kavuz; yapısal iskeleti silis ve karbon içermekte olan pirincin daha sert olan dış kabuğudur. Kavuzun yapısındaki SiO₂, yakıldıktan sonra elde edilen kül hızlı bir şekilde soğutulursa amorf, yavaş soğutulursa kristal SiO₂ oluşur. Amorf yapı kazanacak şekilde ani soğutulursa özgül yüzeyi 50-60 m²/g gibi büyük bir değere ulaşır. Bu sayede puzolanik aktivite kazanan bu atık malzemede de ekonomiye kazandırılmış olmaktadır.

Hematit (Fe₂O₃) ve magnetit (Fe₃O₄) gibi demir cevherleri, doğada demir oksit olarak bulunmaktadır. Demir cevherlerinde çok az miktarda silis, alümin, kükürt, fosfor, mangan gibi bazı yabancı maddeler yer almaktadır. Demir elde edebilmek için demir cevherlerinin yüksek fırın olarak adlandırılan fırınlarda çok yüksek sıcaklıklara kadar (yaklaşık 1600°C sıcaklığa kadar) ısıtılmaları, böylece oksijenden ve yabancı maddelerden arındırılmaları gerekmektedir. Kok kömürünün yakıt olarak kullanıldığı bu fırınlarda, ayrıca arıtma işlemine yardımcı olabilmesi için kalker taşıda cevherle birlikte ısıtılmaktadır. Yüksek sıcaklığın etkisiyle, kok kömürünün karbonu ile demir oksitteki oksijen birleşerek karbon monoksit ve karbon dioksit gazları oluşarak fırını terk etmektedir. Geride demir ve eriyik durumda olan CaO, SiO₂, MgO, MnO ve S gibi yabancı maddeler topluluğu kalmaktadır. Demirin yoğunluğu, yabancı maddeler topluluğunun yoğunluğunda daha yüksek olduğu için, eriyik durumdaki demir fırının en alt bölümünde,

eriyik durumdaki yabancı maddeler ise demirin hemen üzerinde yer almaktadır. Demir ve yabancı maddeler topluluğu farklı çıkışlardan dışarı alınmaktadır. İşte böyle elde edilen yabancı maddeler topluluğu yüksek fırın cürufu olarak adlandırılmaktadır.

Yüksek fırından atık malzeme olarak dışarıya çıkartılan eriyik durumdaki cüruf yaklaşık 1500°C sıcaklıktadır. Eriyik cürufun havada (yavaş hızla) soğutulması durumunda, elde edilen cüruf kristal yapıya sahip olmaktadır. Ancak eriyik cüruf, su içerisine dökülerek çok hızlı soğumaya tabi tutulursa, hem irili ufaklı çakıl ve kum boyutunda granüle (kohezyonsuz) duruma gelmekte hem de büyük oranda amorf (camsı) yapı kazanmaktadır. Eriyik cürufun çok hızlı soğutulma işlemi, çok büyük miktarlarda basınçlı su püskürtülmesi ile de yapılabilir.

Amorf yapıya sahip olan ve büyük miktarda SiO₂ ve Al₂O₃ içeren granüle (kohezyonsuz) yüksek fırın cürufu, öğütülerek çok daha ince duruma getirildiği takdirde doğal puzolanlara benzer özellik göstermektedir. Ayrıca büyük miktarda CaO içermesi nedeniyle öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun kendiliğinden de bir miktar bağlayıcı özelliği bulunmaktadır. Tablo 1.17’de değişik ülkelerdeki yüksek fırın cüruflarının kimyasal kompozisyonları gösterilmiştir.

Tablo 1.17. Yüksek fırın cüruflarının kompozisyonları (Erdoğan, 2003).

	ABD	Güney Afrika	Avustralya	Türkiye
CaO	%29-50	%30-40	%39-44	%34-41
SiO ₂	%30-40	%30-36	%33-37	%34-36
Al ₂ O ₃	%7-18	%9-16	%15-18	%13-19
Fe ₂ O ₃	%0.1-1.5	-	%0-0.7	%0.3-2.5
MgO	%0-19	%8-21	1-3	%3.5-7
MnO	%0.2-1.5	-	%0.3-1.5	%1.0-2.5
S	%0-2.0	%1.0-1.6	%0.6-0.8	%1-2

İnce taneli durumdaki granüle yüksek fırın cürufunun kalsiyum hidroksit ve su ile birleştirilmelerinden elde edilen hidrolik bağlayıcılık özelliği 1774 yılından beri bilinmektedir. Bu malzeme 1889 yılında Paris metrosunun inşaatında kullanılmıştır. Ancak günümüzde kullanım alanı yok denecek kadar azdır (Mielenz, 1983).

Türk standartları, granüle yüksek fırın cüruflarına ait herhangi bir değer vermemektedir. ASTM C 989'da (1994) granüle yüksek fırın cürufunun kalitesini sınıf 80, sınıf 100 ve sınıf 120 olarak üç sınıfta ele almaktadır. ASTM'ye göre sağlanması gereken fiziksel ve kimyasal özellikler Tablo 1.18'de verilmiştir.

Ülkemizde her geçen gün artan nüfus ihtiyacına paralel olarak gelişen kentleşme ve sanayileşmenin karşılanması gereken en önemli gereksinimlerinden biri enerjidir. Bu ihtiyacın kendi olanaklarımızla karşılanması ve en ucuza elde edilmesi ülkemiz için hayati öneme sahiptir. Bu nedenle eldeki mevcut kaynakları değerlendirilerek elektrik enerjisi üretiminde hidroelektrik santraller ve yakıt olarak öğütülmüş (pulverize) kömürün yaygın olarak kullanıldığı termik santraller kurulmuştur. Son yıllarda bunlara ek olarak doğalgaz santralleri de katılmıştır. Türkiye'de halen sadece kömür ile çalışan 15 tane termik santral faaliyet göstermektedir. Çatalağzı, Çolakoğlu ve Sugözü termik santrali dışındaki (bu santrallerde taş kömürü kullanılmakta) tüm santraller linyit kömürü ile çalışmaktadır. Tablo 1.19'da Türkiye'deki termik santraller, kullanılan yakıt türü, kurulu güçleri ve bulunduğu iller verilmiştir (Tokyay ve Erdoğan, 1998).

Tablo 1.18. ASTM'ye göre yüksek fırın cürufunda bulunması istenen özellikler

	ASTM C 989 (1994)
İncelik:	
45µm göz açıklıklı kalan miktar, maks. %	20
Dayanım aktivite indeksi:	
7. gün, min. %	
Sınıf 80	-
Sınıf 100	75
Sınıf 120	95
28. gün, min. %	
Sınıf 80	75
Sınıf 100	95
Sınıf 120	110
Kimyasal özellikler:	
S olarak gösterilen kükürt, maks. %	2.5
SO ₃ olarak belirtilen sülfat iyonu, maks. %	4.5

0.09 mm inceliğe kadar öğütülen taş kömürü veya linyit kömürünün termik santrallerin tipine göre 1100-1600°C’de yanması sonucu oluşan, baca gazları ile atmosfere sürüklenen silisli ve alüminli toz halindeki kalıntılara uçucu kül veya pulverize yakıt külü denilmektedir. Uçucu küllerin yanı sıra, taban külü olarak adlandırılan, gazlarla birlikte atmosfere sürüklenemeyerek fırın tabanına düşen uçucu küle nazaran daha iri taneli maddelerde oluşmaktadır (Mehta, 1986). Termik santrallerin toplam atıklarının %75-%80 uçucu kül olurken, geri kalan kısmı taban külüdür.

Ülkemizde elektrik enerjisinin yaklaşık yarısının üretildiği termik santrallerde yanma kalıntısı olarak bacalardan 25 milyon ton/yıl uçucu kül elde edilmektedir (TEAŞ, 2000). Bu kalıntıların miktarı ABD’de 45 milyon ton/yıl ve Hindistan’da 50 milyon ton/yıl civarındadır (Verma vd., 1998).

Tablo 1.19. Türkiye’deki termik santraller (Tokyay ve Erdoğan, 1998).

Santral adı	Yakıt cinsi	Kurulu güç, MW	Bulunduğu il
Afşin-Elbistan A	Linyit	1355	Kahramanmaraş
Afşin-Elbistan B	Linyit	1440	Kahramanmaraş
Çan	Linyit	320	Çanakkale
Çatalağzı	Taş kömürü	300	Zonguldak
Çayırhan Park	Linyit	620	Ankara
Çolakoğlu	Taş kömürü	190	Kocaeli
Kangal	Linyit	457	Sivas
Kemerköy	Linyit	630	Muğla
Orhaneli	Linyit	210	Bursa
Seyitömer	Linyit	600	Kütahya
Soma A-B	Linyit	1034	Manisa
Sugözü	Taş kömürü	1210	Adana
Tunçbilek	Linyit	429	Kütahya
Yatağan	Linyit	630	Muğla
Yeniköy	Linyit	420	Muğla

Almanya, Hollanda ve Belçika’da üretilen toplam uçucu külün %95’inden fazlası, İngiltere’de ise yaklaşık %50’si, büyük miktarlarda uçucu kül üreten ABD ve Çin’de ise sırasıyla yaklaşık %32 ve %40 oranında uçucu külün diğer alanlarda kullanıldığı

görülmektedir. Dünyada üretilen toplam uçucu külün ancak %25'den daha azı farklı alanlarda değerlendirilebilmektedir (Bhattacharjee ve Kandpal, 2002). Türkiye'de ise uçucu kül kullanım oranı 1990'lı yılların verilerine göre %1 civarındadır. Atıl kalan %99 oranındaki uçucu külün depolanması, saklanması veya atılmasının çevreye ve kamuya vereceği zararlar çok büyük olmaktadır. Örneğin Şekil 1.17'de Afşin-Elbistan termik santralinin atık sahasındaki uçucu kül adasının büyüklüğü net olarak görülmektedir. Bu miktardaki yanma atıklarının açık sahalarda depolanmasıyla (tozlanma, tarım ürünlerine zarar verme, yağmur ve rüzgâr erozyonu, toprakta süzülme ve radyasyon sebebiyle) su ve havanın kalitesi, tarım ürünleri, doğal hayat, bölgenin ekonomik durumu ve çevre güzelliği açısından istenmeyen sonuçlar ortaya çıkmaktadır (Tokyay ve Erdoğan, 1998). Günümüzde, enerji açığının kısa sürede karşılanması amacıyla yeni yapılacak termik santrallerle birlikte uçucu küllerin oluşturacağı sorunların daha da artacağı kesindir. Bu yüzden uçucu küllerin çeşitli sahalarda değerlendirilerek harcanması amacıyla birçok araştırma yapılmaktadır.



Şekil 1.17. Afşin-Elbistan termik santrali atık sahasındaki uçucu kül adası (Tokyay ve Erdoğan, 1998)

Uçucu küller, termik santrallerde kullanılan kömürün türüne göre iki ana gruba ayrılabilirler:

- ❖ Taş kömürü uçucu külleri

❖ Linyit uçucu külleri

Kimyasal yapıları bakımından ise uçucu küller 4 ana gruba ayırmak mümkündür:

- ❖ Silikat alüminat esaslı uçucu küller: Bileşimlerinin büyük bir kısmını silikat (SiO_2) ve bir miktar alüminat (Al_2O_3) meydana getirmektedir. Genellikle taş kömürü uçucu külleri bu yapıdadır. İçerdikleri alkali ve toprak alkali element oksitleri nedeni ile çok ince taneli ve camsı yapıya sahiptirler.
- ❖ Silikat kalsit esaslı uçucu küller: Yapılarındaki ana oksitler silikat (SiO_2) ve kalsittir (CaO). Bazı durumlarda ek kireç kullanımına gerek kalmaksızın kendi kendilerine bir bağlayıcılık oluştururlar. Zayıf bir bağlayıcı özellikleri vardır.
- ❖ Sülfokalsit esaslı uçucu küller: Yapılarının büyük bir bölümü kükürt trioksit (SiO_3) ve kalsitten (CaO) meydana gelmiştir. Sulu ortamda kendiliklerinden sertleşebilirler. Bu sınıfa genellikle linyit uçucu külleri girmektedir.
- ❖ Sınıflandırılmayan uçucu küller: Termik santrallerdeki yakma sisteminin homojen olmamasından kaynaklanan ve belirli bir kimyasal yapıya sahip olmayan küllerdir.

Fakat uçucu küllerin sınıflandırılması denildiğinde akla genelde ASTM C 618'de (2002) önerilen sınıflandırma gelmektedir. ASTM C 618'e (2002) göre uçucu küller F ve C olarak iki genel sınıfa ayrılır.

- ❖ F sınıfı uçucu küller: Bitümlü kömürden üretilen ve toplam SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 miktarı %70'den fazla olan uçucu küller bu sınıfa girmektedir. Aynı zamanda bu küllerde reaktif kireç yüzdesi %10'un altında olduğu için düşük kireçli olarak da adlandırılırlar. F sınıfı uçucu küller, sadece puzolanik özelliğe sahiptirler.
- ❖ C sınıfı uçucu küller: Linyit veya yarı bitümlü kömürden üretilen ve toplam SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 miktarı %50'den fazla olan küllerdir. Aynı zamanda, C sınıfı uçucu küllerde CaO %10'dan fazla olduğu için bu küller kireçli uçucu kül olarak adlandırılırlar. C sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğin yanı sıra bağlayıcı özelliğe de sahiptirler.

Belirtilen tüm bu sınıflandırmalar sorunu gerçektekenden daha basitleştirmektedir. Uçucu küllerin kimyasal kompozisyonlarının elde edildikleri kömürün jeolojik geçmişiyle, termik santrallerdeki yanma sıcaklığıyla, üretilen enerji miktarıyla, kül toplama sisteminin özellikleriyle doğrudan ilişkili olması her türlü sınıflandırma çabasını yetersiz kılmaktadır. Yukarıda görüldüğü gibi geniş sınıflandırmalar yapmak mümkündür ancak bazı uçucu

küller birden fazla sınıfın özelliklerini taşıırken bazıları da neredeyse kendileri bir sınıf olacak şekilde özel niteliklere sahip olabilmektedir.

Uçucu külün fiziksel ve kimyasal özelliklerini; kömür cinsi, yanma sistemi, filtre sistemi gibi birçok etkene bağlıdır. Uçucu küller genelde gri olmalarına karşın, içinde yanmamış karbon miktarının fazla olması durumunda daha koyu renkli olabilirler (Linyit uçucu külü taş kömürü uçucu külünden daha koyu renktedir.). Tipik olarak küresel şekilde olan uçucu kül taneleri 1-150 μm arasında değişim göstermekle beraber %75'den fazlasının çapı 45 μm 'den daha küçüktür. Bu küresel tanelerin içi dolu veya boş olabilmektedir. İçeri boş olan kül taneleri külün toplam ağırlığının %5'ini, hacim olarak ise yaklaşık %20'sini oluşturmaktadır. Özgül ağırlıkları ise 2.1 ila 2.7 gibi bir aralıkta çıkabilmektedir. Uçucu küllerin sulu çözeltileri bazik karakterli olmaktadır (pH değerleri 6 ila 11 arasında çıkmaktadır.) (Erşan, 1996; Toros, 1987).

Kullanılan kömüre ve yanma sıcaklığına bağlı olarak uçucu küllerin ve taban küllerinin kimyasal yapılarında bulunan bileşikler değişiklik göstermektedir. Tablo 1.20'de verilen uçucu kül ve taban küllerine ait kimyasal bileşimleri incelendiğinde çoğunlukla SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ve MgO (ve CaO , özellikle C sınıfı uçucu küllerde) bileşiklerinden oluşmaktadır (Alataş, 1996).

Tablo 1.20. Uçucu kül ve taban külünün kimyasal kompozisyonları (Alataş, 1996).

	Uçucu kül		Taban külü
	C sınıfı	F sınıfı	
CaO	% 11.5-29.0	% 0.7-6.7	% 0-22
SiO ₂	% 23.1-50.5	% 43.6-64.4	% 21-60
Al ₂ O ₃	% 13.3-21.8	% 19.6-30.1	% 10-37
Fe ₂ O ₃	% 3.7-22.5	% 3.8-30.1	% 5-37
MgO	% 1.5-7.5	% 0.9-1.7	% 0-4
SO ₃	% 0.3-1.9	% 0.4-7.2	-

Kireç ile zemin stabilizasyonunda elde edilen kazanımları uçucu külle elde etmek için yüksek miktarda kullanmak gerekir. Tablo 1.20'de görüldüğü gibi uçucu küller yüksek sülfat içeriğine sahip malzemelerdir. Bu yüzden zeminde kabarma problemi çıkarma

potansiyeline sahiptirler. Uçucu küllerin miktarını azaltmak için tek başına değil de kireç, çimento veya her ikisi ile birlikte zemine karıştırılarak kullanılmaktadır (Hausmann, 1990).

Uçucu küllerin kimyasal ve mineralojik bileşimleri arasında doğrudan bir ilişki olmamasına rağmen mevcut ulusal ve uluslararası standartlarda yalnızca kimyasal oksit analizi kullanılarak bu malzemelerin kullanılabilirliği belirlenmektedir. Oysa uçucu küllerin de tüm puzolanlar gibi reaktivitesi mineralojik yapılarıyla ilgilidir. Uçucu küllerle ilgili Türk standartlarında TS 639 (1975), Amerikan standartlarında ise ASTM C 618 (2002) bulunmaktadır. ASTM C 618 ve TS 639’de herhangi bir uçucu külün puzolan olarak kullanılması için Tablo 1.21’de verilen değerleri sağlanması gerekmektedir. Tablo 1.22’de ise uçucu küllerin puzolan olarak kullanılması için sağlanması gereken fiziksel özellikler verilmektedir.

Tablo 1.21. Uçucu küllerin puzolan olarak kullanılabilirlik sınırları

	ASTM C 618 (2002)		TS 639 (1975)
	F sınıfı	C sınıfı	
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ , min. %	70	50	70
MgO, maks. %	5	5	5
SO ₃ , maks. %	5	5	5
Na ₂ O + K ₂ O, maks. %	1.5	1.5	-
Nemlilik, maks. %	3	3	3
Yanma kaybı, maks. %	12	6	10

Tablo 1.22. Uçucu küllerin sağlanması gereken fiziksel değerler

	ASTM C 618 (2002)		TS 639 (1975)
	F sınıfı	C sınıfı	
İncelik:			
45µm göz açıklıklı kalan miktar, maks. %	34	34	-
Özgül yüzey, min. mm ² /g	-	-	300000
Dayanım aktivite indeksi:			
28. gün, min. %	75	75	70
Su ihtiyacı:			
Kontrol numunesine kıyasla, maks. %	105	105	-

Bu doktora çalışmasıyla doğrudan ilişkili zemin stabilizasyon yöntemleri hakkındaki geniş ve detaylı bilgilerden sonra bu yöntemlerle alakalı literatür araştırmasına ait özetler aşağıda verilmiştir.

1.5. Literatür Çalışması

Atom ve Al-Sharif (1998), zemin stabilizasyon çalışmalarında zeytinyağı endüstriyel atık ürününü 550°C yakarak elde ettikleri atık malzeme külünü katkı olarak kullanmışlardır. 4 farklı zemine katılan %0, %2.5, %5 ve %7.5 gibi dört farklı orandaki atık malzeme külü ile hazırlanan karışımlar 72 saat oda sıcaklığında ve nem koşullarında kür edildikten sonra Atterberg limitlerine, serbest basınç dayanımlarına ve serbest şişme yüzdelere bakmışlardır. 4 farklı zeminde, artan atık malzeme külü kullanımı ile karışımların plastisite düşüş göstermiştir. Kullanılan 4 farklı zeminden daha plastik olanlardaki iyileşme daha az plastik olanlara göre daha yüksek olmuştur. %2.5 oranında atık malzeme külü kullanımı ile en yüksek serbest basınç dayanımı elde edilirken bu orandan daha fazla atık külü kullanımı serbest basınç dayanımında düşüşe sebep olmuştur. Artan atık malzeme külü oranlarında karışımların serbest şişme yüzdeleri azalırken en küçük değere %7.5 oranda atık malzeme kullanımı ile ulaşılmıştır. Bu iyileşmelere atık malzeme külünün plastik olmayan yapısı ve içeriğindeki CaO neden olarak söylenmiştir.

Akawwi ve Al-Kharabsheh (2000), Ürdün'ün başkenti Amman'ın yaklaşık %40'nı kaplayan, kaynağını marn, kireçtaşı ve kuvarslı ana kayalardan alan şişen zeminlerin kireç ile stabilizasyonunu incelemişlerdir. Plastisite indeksi 30~39, lineer büzülme limiti 18.6~20.7 arasında olan %45~%54 kil ve %36~%53.5 silt içeren CH sınıfındaki 8 farklı malzeme ile %0, %2, %4, %6 ve %8 gibi farklı oranlarda kireç içeren karışımlar hazırlanmıştır. Artan kireç oranlarında LL düşerken, PI %4'e kadar düşmüş, %6 ve %8 kireç oranlarında PI yükselmiştir. Büzülme limiti artan kireç miktarı ile %18.8'den %6.3'e kadar inmiştir. En iyi deney sonuçları %4 ve %6 kireç oranlarında elde etmişlerdir.

Miller ve Azad (2000), çimento üretim tesislerindeki fırın bacalarından elde edilen fırın külü ile yapılan zemin stabilizasyon çalışmasındaki deney sonuçlarına zemin türünün etkisini araştırmışlardır. Araştırma kapsamında USCS zemin sınıflandırma sistemine göre CH, CL ve ML sınıfında yer alan üç farklı zeminin kompaksiyon parametrelerini, kıvam limitlerini, serbest basınç dayanımlarını ve pH testi değerlerini karşılaştırmışlardır. Bu zeminlerin stabilizasyonunda %10, %15, %20 ve %25 oranlarında fırın külü kullanılmıştır.

Her üç zemin sınıfında artan fırın külü oranı ile maksimum kuru yoğunluk değeri düşerken, optimum su içeriği değeri yükselmiştir. CH sınıfı zeminde fırın külü miktarı arttıkça LL düşerken, PL azalmakta; CL sınıfı zeminde LL'de pek değişim olmazken PL artmakta; ML sınıfı zeminde LL ve PL'nin ikisi de artmaktadır. LL ve PL'deki değişimler sonucunda PI değerlerine bakıldığında CH ve CL sınıfı zeminde düşüş olurken, ML sınıfı zeminde önemli bir değişim olmamıştır. Fırın külü ile ıslah edilen zemin türlerinin serbest basınç dayanımlarına bakıldığında yükselişler görülmüştür. Bu yükselişler 7~14 güne kadar hızlı şekilde olurken sonraları dayanımdaki artış miktarı yavaşlamıştır. Serbest basınç deneylerindeki fırın külü katılan numunelerine bakıldığında kırılmaya kadar düşük deformasyon ve gevrek kırılma davranışı göstermişlerdir. Bu deneylerde ayrıca düşük plastisiteli zeminler olan CL ve ML daha büyük kazanımlar sağlamışlardır. Yapılan pH testi sonuçlarından CL ve ML sınıfı zeminler yaklaşık %15 fırın külü oranında 12.3 değerine ulaşırken CH sınıfı zemin %40 fırın külü oranında bu değere ulaşılmıştır. Karışımların pH değerleri ile PI ve serbest basınç dayanımlarında (SBD) meydana gelecek değişimler arasında güvenilir ilişkiler tespit edilmiştir.

Rajasekaran ve Rao (2002), kireç ile ıslah çalışmasında aşırı plastik bir zemininin permeabilite, konsolidasyon ve dayanım açısından değişimini incelemişlerdir. Kireç, plastik zemininin permeabilite katsayısını zaman içinde 15~18 kat artırmıştır. Fakat 7~10 gün sonrasında permeabilite katsayılarındaki değişimler önemli mertebelerde olmamıştır. 30 ile 45 günlük kür süresince 8~10 kat yükselen dayanım, 45 günden sonraki artış miktarları ihmal edilecek seviyede olmuştur. Konsolidasyon testleri sonuçlarına bakıldığında yük altındaki sıkışmasında %33 ile %50 arasında iyileşmeler görülmüştür.

Lim vd. (2002), su arıtma tesislerinden elde edilen atık çamurun, sönmüş kireç-lös ve sönmüş kireç-uçucu kül gibi iki stabilizör kombinasyonu ile ıslah edilmesi sonucunda elde edilen mühendislik özelliklerini araştırmışlardır. Kuru çamur ağırlığının %5, %10, %15 oranlarında kireç, %50, %100, %200 oranlarında uçucu kül ve %10, %20, %50, %100 oranlarında lös kullanılarak karışımlar hazırlanmıştır. Atık çamura eklenen kireç, uçucu kül ve lös kombinasyonları, optimum su içeriğini düşürürken maksimum kuru yoğunluk değerini yükseltmiştir. Stabilizatör kombinasyonları ile CBR değerlerinde önemli bir değişim olmayan karışımların (CBR değerleri %2.74~%5.13) 28 günlük kürden sonra serbest basınç mukavemeti değerleri 100 kPa üzerinde çıkmıştır. Karışımların permeabilite katsayıları 1.10^{-3} ile 8.10^{-7} mm/sn aralığındadır. Kireçli karışımların diğer iki stabilizöre göre en önemli avantajı atık çamurun içindeki mikroorganizmaları sterilize etmesi olarak

gösterilmiştir. Sonuç olarak atık çamurun kireç-lös kombinasyonunda mühendislik açısından en iyi sonuçları verdiği ve yapı malzemesi olarak değişik imalatlarda kullanılabileceği söylenmiştir.

Kumar ve Sharma (2004), uçucu külün şişen zeminin serbest şişme yüzdesi ve basıncı, plastisite, kompaksiyon, dayanım ve geçirimsizlik karakterleri üzerindeki etkisini incelemiştir. %0, %5, %10, %15 ve %20 uçucu kül oranlarında karışımlar hazırlanmıştır. Artan uçucu kül miktarı ile LL değerleri ve optimum su içerikleri azalırken, PL değerlerini ve maksimum kuru yoğunlukları artmaktadır. Serbest şişme yüzdesi ve basıncı artan uçucu kül miktarı ile düşmektedir. Örneğin % 20 uçucu kül oranında bu düşüş %50 mertebesine ulaşmaktadır. Uçucu külün kullanımı zeminin geçirimsizliğini azaltmıştır. Uçucu kül miktarı artıkça karışımların serbest basınç dayanımı değerlerinde yükseliş görülmüştür.

Tonoz vd. (2004), smektit grubundan yüksek şişme potansiyeline sahip Ankara kili %0, %2, %4, %6, %8 ve %10 oranlarında kireç içeren 6 farklı zemin karışımının 3, 7,14 ve 28 günlük kür sürelerindeki serbest basınç dayanımlarını incelemiştir. Serbest basınç deneyleri sonuçlarına bakıldığında optimum kireç oranı olarak %4 ve yeterli dayanım sonuçları için en az 28 gün kür edilmesi gerekmiştir. Örneğin 28. gün sonunda serbest basınç dayanımında %84'e varan kazanım elde edilmiştir.

Abd El-Aziz vd. (2004), killi zeminlerde kireç ile silis dumanı birlikte ıslah çalışmalarında kullanılmasının etkinliğini araştırmışlardır. %1, %3, %5, %7, %9 ve %11 kireç oranları ile %5, %10 ve %15 silis dumanı oranları ile hazırlanan katkı kombinasyonları zeminin plastisite indeksinin %40.25'den %0.98, serbest şişme yüzdesini %19.00'dan % 0.02'e düşürmüştür. Kireç-silis dumanı kombinasyonu kullanımı zeminde maksimum kuru yoğunlukları düşürürken optimum su içeriklerini yükseltmiştir. Dayanım açısından bakıldığında ise kireç-silis dumanı kombinasyonu kullanılması ile karışımların CBR değerleri %3'den %17'e, içsel sürtünme açıları 5.8°'den 24.75°'e, görünür kohezyon değerleri 55.52 kN/m²'den 157.54 kN/m²'ye çıktığı görülmüştür. Konsolidasyon deneyi ile tespit edilen karışımların sıkışma indislerinde (C_c) ise 0.025'den 0.007'ye düşüş olmuştur.

Huat vd. (2005), tropik bataklık zemininin kireç ve çimento ile ıslah edilmesiyle indeks ve mühendislik özelliklerinin değişimi araştırmışlardır. Kuru zemin ağırlığının %5, %10, %15 oranlarında çimento ve %10, %20, %25 oranlarında kireç kullanılarak deney numuneleri hazırlanmıştır. Artan çimento ve kireç oranları ile LL ve optimum su içeriği azalırken, maksimum kuru yoğunluk artmıştır. Serbest basınç dayanımı uzun kür süreci sonunda çimento ve kireç oranlarının artmasıyla oldukça yüksek değerlere ulaşmıştır.

Ancak bu tür zeminlerin tipik özelliği olan yüksek organik madde miktarı ve su içeriği sebebiyle kazanılan dayanım zaman içerisinde kaybedilmiştir. Tropik bataklık alanlarındaki zeminlerde kireç ile çimentodan hangisinin daha etkili olduğuna cevap Portland çimentonun performansı sönmüş kirece nazaran daha iyi olduğu şeklindedir.

Sivapullaiah ve Lakshmikantha (2005), kireçsiz ve %1 kireç katkılı %100 illitli, %80 illitli ve %20 bentonitli üç farklı zemin karışımının kompaksiyon, permeabilite, plastisite özellikleri ile dayanımlarını araştırmışlardır. İllitli ve bentonitli karışımında %1 kirecin etkisinin incelenmesi için hemen, 1 günlük, 7 günlük ve 28 günlük olmak üzere farklı deney zamanları seçilmiştir. Zeminde hemen görülen özellikler;

- ❖ İllitli ve bentonitli zeminin plastisite özelliklerinde %1 kireç etkili olmamıştır.
- ❖ Büzülme limiti artmıştır.
- ❖ Optimum su içeriği artarken, maksimum kuru yoğunlukta değişim gözlenmemiştir.
- ❖ Geçirimsizliği artmıştır.
- ❖ Serbest basınç değeri artmıştır.

Kür zamanları sonunda;

- ❖ Kür zamanı ile plastisitesinde azalma gözlenmiştir.
- ❖ Optimum su içeriği zamanla daha da artmıştır.
- ❖ Geçirimsizlik durumunda kür zamanı ile birlikte azalma görülmüştür.
- ❖ Serbest basınç dayanımında zamanla az miktarda düşüş olmuştur.

İllitli zemine katılan %20 bentonit ile katı atık depolarında geçirimsizlik bariyeri olarak kullanılabilen hidrolik özelliklere sahip olmasını sağlamıştır. Bentonit, kompaksiyon ve hacim değişim özelliklerinde önemli bir değişim yapmazken zeminin kation değişim kapasitesini artırmış ve geçirimsizlik katsayısını azaltmıştır. Ayrıca plastisite indeksinde yükseliş ve büzülme limitinde düşüş olduğu deney sonuçlarında görülmüştür.

Al-Rawas vd. (2005), şişen zeminin stabilizasyonunda kireç, çimento ve Sarooj adı verilen yapay bir puzolanın kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Çimento ve kireç için %3, %6 ve %9 oranları seçilirken Sarooj puzolanı için %3, %6, %9 ve %12 oranları belirlenmiştir. Bu üç katkı LL değerlerinde artışa neden olurken, PI değerlerinde azalma görülmüştür. En düşük plastisite indeksi değeri kireç katkılı karışımlardan elde edilmiştir. Doğal durumda %9.39 serbest şişme yüzdesine sahip olan zemin, %3 kireç oranında %2.7 iken %6 ve %9 kireç oranında şişme özelliği ortadan kaybolmuştur. Serbest şişme yüzdeleri sırayla çimento ile %5.43, %4.57 ve %3.67; Sarooj yapay puzolan ile %5.96,

%6.10, %6.04 ve %6.00 olmak üzere halen şişme özelliği göstermiştir. Bu çalışmada ayrıca şişen zemin 740°C ve 780°C'de 30 ile 60 dakika yakılmıştır. Şişme yapan kil minerali olan montmorillonit bu sıcaklıklarda bozulduğu için şişme potansiyeli olmamıştır. Sonuçlara göre şişen zeminde kullanılan üç katkıdan en etkili katkı kireç olmuştur. Bu etkinlik içinde en az %6 kireç kullanılması önerilmiştir.

Edil vd. (2006), elektrik üretim tesisinde yakılan bitümlü kömürden elde edilen C sınıfı uçucu külün %95'den fazla ince malzeme içeren 7 farklı zeminde (6'sı inorganik, 1'i %10 organik madde içeren) meydana getirdiği değişimleri incelemiştir. Dayanım açısından incelenen numunelerin CBR ve elastisite modülleri karşılaştırılmıştır. Doğal durumda %1~%5 arasında olan CBR değerleri, % 10 uçucu kül oranında %8~%17, %18 uçucu kül oranında %15~%31 arasındadır. Elastisite modülleri doğal durumda 3~15 MPa iken %10 uçucu külde 12~60 MPa ve %18 uçucu külde 51~106 MPa aralığında çıkmıştır. Organik madde içeren zeminde uçucu kül eklenmesi CBR ve elastisite modülünde çok az değişim yapmıştır.

Jha ve Gill (2006), çalışmalarında kireç ile ıslah edilen zemine puzolan olarak katılan pirinç kabuğu külünün etkisini araştırmışlardır. Zemine eklenen kireç ve pirinç kabuğu külü ile hazırlanan karışımların kompaksiyon, dayanım özellikleri ve durabilite durumuna bakılmıştır. Pirinç kabuğu külü oranı arttıkça maksimum kuru yoğunluk düşmekte, optimum su içeriği artmıştır. Dayanım özellikleri ve durabilite için yapılan deney sonuçlarına bakıldığında optimum pirinç kabuğu külü oranı %12 olarak bulunmuştur. %12 pirinç kabuğu külü oranına kadar karışımların 7., 28. ve 56. gündeki serbest basınç dayanımları artış göstermiş bu değerden sonra çok az artmakta hatta bir miktar düşüş de görülmektedir. CBR değerlerinde de aynı eğilim mevcuttur. Durabilite açısından bakıldığında ise 12 ıslanma-kuruma periyodu sonunda pirinç kabuğu külü kullanımı ile 28 günlük serbest basınç dayanımının %59~%69 dayanımlara sahip olduğu görülmüştür. Tüm deney verileri ışığında kireç ile pirinç kabuğu külünün birlikte kullanımı sadece dayanımda değil durabilitede de faydalar sağladığı söylenmiştir.

Türköz (2006), Eskişehir Osmangazi Üniversitesi kampus alanındaki yüksek şişme potansiyeline sahip Meşelik killerin kireç ile stabilizasyonu üzerinde durmuştur. Bu araştırmada sönmüş kireç katkısı oranı ve değişik sıkışma enerjilerine göre şişme yüzdesi değişimi incelenmiştir. Üç farklı noktadan alınan malzemenin %0, %1, %3, %5 kireç yüzdelerindeki karışımlarından standart ve modifiye proktor enerji seviyelerinde 88 adet deney numunesi hazırlanmıştır. Klasik ödometre cihazı ile yapılan serbest şişme yüzdesi

deneyi sonuçlarına göre modifiye proktor enerjisi ile sıkıştırılan numuneler daha büyük şişme göstermektedirler. %3 kireç katkısı seviyesinden sonra iki enerji seviyesinde hazırlanan karışımların şişme potansiyelleri kontrol altına alınabilmiştir. Kireç katkılı karışımların modifiye proktor enerjisi ile sıkıştırılmasındaki serbest şişme yüzdesi standart proktor enerjisinde sıkıştırılan karışımlara oranla daha düşüktür.

Ansary vd. (2006), Bangladeş'in Chittagong sahil bölgesinde yer alan Anwora ve Banshkali sitelerinden sağlanan iki tür zemini uçucu kül ile ıslah etmeye çalışmışlardır. %0, %6, %12 ve %18 uçucu kül, %3 kireçle birlikte hazırlanan karışımlar 7, 14 ve 28 gün kür edildikten sonra plastisite ve dayanım özelliklerine bakılmıştır. Yükselen uçucu kül oranında plastisite indeksi düşük olan Anwora zemininin LL değerleri düşerken PL değerleri yükselmekte, daha plastik olan Banshkali zemininin LL ve PL değerlerinin her ikisi birden artış göstermektedir. Her iki zeminin artan uçucu kül oranı ile büzülme limitleri ve lineer büzülmeleri azalmıştır. Kompaksiyon özelliklerine bakıldığında maksimum kuru yoğunlukta %7~%8 artış, optimum su içeriğinde %9~%10 azalma görülmüştür. Serbest basınç dayanımı artan uçucu kül oranı ve kür süresi ile birlikte yüksek artışlar göstermiştir. Örneğin zeminler %6 uçucu kül oranında 28 günün sonunda dayanım yaklaşık 4 kat artarken %18 uçucu kül oranında bu artış 5 kata ulaşmaktadır. Burada plastisite indeksi düşük olan Anwora zemini dayanım kazanmada daha plastik olan Banshkali zemininden iyi sonuçlar vermiştir. Çalışmanın sonucu olarak deneylerde kullanılan sahil zeminlerinin %12-%18 uçucu kül ve %3 kireçle birlikte hafif trafikli yolların temel ve alt temelleri için gerekli plastisite ve dayanım şartlarını sağladığı bildirilmiştir.

Nalbantoglu (2006), şişme potansiyeline sahip kil içeren zeminde kireç kullanılmasının fiziksel özellikler, dayanım, sıkışma ve şişme potansiyeli üzerindeki etkisini araştırmıştır. %3, %5 ve %7 kireç oranları ile karışımlar hazırlanmıştır. Artan kireç oranlarında LL düşerken, PL değerleri yükselmiştir. Kireç ile plastisitesi azalan karışımların lineer büzülme değerleri de azaldığından hacimsel stabilitesi artmıştır. Yükselen kireç oranı ile karışımların maksimum kuru yoğunluğu düşerken, optimum su içeriği değerleri artmıştır. Kür zamanı ve artan kireç oranı ile serbest basınç dayanımında yüksek kazanımlar sağlanırken zeminin şişme basıncını azaltmıştır. Doğal durumda serbest basınç dayanımı 720 kPa'dan %7 kireç oranında 30 günlük kürden sonra 2510 kPa değerine ulaşılırken doğal durumda 480 kPa şişme basıncına sahip olan zemin %3 kireç oranındaki şişme basıncı 98 kPa'a düşmüştür. 30 günden sonra şişme basıncı %3 kireç

oranında dahi sıfır olmuştur. Konsolidasyon verilerine bakıldığında ise sıkışma indisi (C_c) ve yeniden yükleme indisi (C_r) değerleri artan kireç oranı ile düşme göstermiştir.

Sezer vd. (2006), yüksek plastisiteli killi bir zeminin ($LL = 71.0$ ve $PI = 41.3$) %5, %10, %15 ve %20 oranlarında yüksek kireç ihtiva eden uçucu kül ile stabilizasyonunda kompaksiyon ve dayanım parametreleri açısından 1, 7, 28 ve 90 günlük kür süreleri sonundaki değişimleri incelemişlerdir. Karışımların kompaksiyon deneyi sonuçlarına göre maksimum kuru yoğunluk değerleri 16.64 kN/m^3 'den 14.52 kN/m^3 'e düşerken, optimum su içeriği %22'den %24'e yükselmiştir. Artan uçucu kül miktarında ve kür süresinde karışımların serbest basınç dayanımları, görünür kohezyon ve içsel sürtünme açıları yükselme görülmüştür. Ancak dayanımda görülen iyileşmeler %15'den sonra %20 uçucu kül oranında ihmal edilecek kadar az olmuştur. Benzer şekilde 28 güne kadarki dayanım artışı çok hızlı olurken bundan sonra artış oranlarında azalmalar göstermiştir. Bunlara göre optimum uçucu kül oranı %15 ve کافی derecede dayanım göstermesi için en az 28 gün kür edilmesi önerilmiştir. Zemine katılan uçucu kül oranı ve zamanın değişken olarak alındığı serbest basınç dayanımı, görünür kohezyon ve içsel sürtünme açısını veren ilişkiler (1.8), (1.9) ve (1.10)'da ortaya konmuştur: (UK: Uçucu kül oranı, % - T: Zaman, gün)

$$q_u, \text{ kN/m}^2 = 247.1034 + 22.2932 \text{ UK} + 7.5042 \text{ T} \quad R^2 = 0.84 \quad (1.8)$$

$$c, \text{ kN/m}^2 = 20.7375 + 9.9473 \text{ UK} + 1.9468 \text{ T} \quad R^2 = 0.82 \quad (1.9)$$

$$\phi, \text{ derece} = 17.3267 + 0.5083 \text{ UK} + 0.0698 \text{ T} \quad R^2 = 0.96 \quad (1.10)$$

Buhler ve Cerato (2007), Oklahoma'daki yüksek şişme kapasitesine sahip zeminlerin kireç ve uçucu kül ile şişme-büzülme davranışını kontrol altına almak amacıyla araştırmalar yapmışlardır. Yapı ve yol platformları için her yıl önemli sorunlar çıkaran bu zeminlere %5, %10, %20, %25 oranında kireç ve %5, %10, %20, %30, %40, %50 oranında C sınıfı uçucu kül ayrı ayrı kullanılarak ıslah edilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmada ıslah derecesinin kontrolü lineer büzülme deneyi ile tetkik edilmiştir. Uçucu kül ve kirecin her ikisi de lineer büzülme azaltmasına rağmen kireçli karışımların uçucu küllü karışımlara göre daha büyük düşüşler sağladığı görülmüştür. Örneğin %5 kireç ile lineer büzülmede %4~%7 iyileşme sağlanırken %5 uçucu küldede %1~%2 iyileşme olmaktadır. Plastisite ve lineer büzülmede aynı düşme miktarı için kireçten daha az kullanmak

yeterlidir. Fakat uçucu külün bir sanayi atığı olduğu düşünüldüğünde daha fazla kullanmak gerekse bile kirece göre üretim maliyeti bakımından kirece nazaran daha uygun olmaktadır.

Lin vd. (2007), %0, %2, %4, %8 ve %16 gibi oranlarda atık çamur külü (atık su arıtma tesisinden elde edilen çamurun 800°C yakılmasıyla oluşan kül) ve uçucu külün %70 silt ve kilden oluşan, AASHTO sınıflandırmasına göre A-4 sınıfında yer alan doğal zeminde meydana getirdiği değişimleri karşılaştırmışlardır. Bu iki kül tipi kompaksiyon parametreleri açısından hemen hemen aynı özelliklere sahiptirler. Atık çamur küllü karışımların serbest basınç dayanımları doğal zeminin basınç dayanımından 1.4~2 kat fazla çıkarken uçucu küllü karışımlardan 20~30 kPa daha düşük olduğu görülmüştür. İki kül tipinin zeminde miktarı arttıkça içsel sürtünme açıları azalırken, görünür kohezyon değerleri artmaktadır. Doğal zemine göre çamur külü ve uçucu küllü karışımların taşıma gücü sırasıyla 4 kat ve 5~6 kat daha yüksektir. CBR deneyi sonuçlarına bakıldığında ise uçucu kül kullanılan karışımlar daha büyük değerler vermektedir. Özetlersek elde edilen sonuçlara göre atık çamur külünün uçucu kül yerine kullanılacak kadar iyi bir malzeme olduğu söylenebilir. Ayrıca optimum atık çamur oranı olarak %8 verilmektedir.

Arabani ve Karami (2007), killi kum zeminlerin kireç ile stabilize edilmesi sonucunda zeminin basınç dayanımını, çekme dayanımını (Brezilya deneyi) ve CBR değerlerini araştırmışlardır. Kil oranı %5 ile %36 arasında değişen 5 farklı kumlu zemin %3, %6 ve %9 kireç oranları ile ıslah edilmiştir. Her bir kireç oranında %30 kil içeriğine kadar basınç dayanımları artış gösterirken daha yüksek kil içeriklerinde düşüşler olmuştur. Yüksek kil içeren kumlu zeminler kireçle birlikte daha kırılğan hale dönüşmüşlerdir. Kil ve kireç arasındaki reaksiyonlar sadece basınç dayanımını değil çekme dayanımını ve CBR değerlerini de pozitif olarak etkilemiştir. 5 farklı kumlu zemindeki basınç dayanımı, çekme dayanımı ile CBR deneylerinin sonuçlarına göre en uygun kil ve kireç oranı olarak sırasıyla %25-%30 ve %7-%8 olarak bulunmuştur. Ayrıca deney sonuçlarından çekme dayanımı (r_t) ve CBR değerleri ile serbest basınç dayanımı (q_u , MPa) arasında uygun matematiksel ilişkiler tespit edilmiştir. Bulunan bu ilişkiler matematiksel olarak (1.11) ve (1.12)'deki gibi formüle edilmişlerdir:

$$\text{CBR, \%} = 8.0132 q_u \quad R^2 = 0.96 \quad (1.11)$$

$$\text{ÇD, MPa} = 0.18 q_u \quad R^2 = 0.84 \quad (1.12)$$

(1.11) ve (1.12)'deki yüksek korelasyon katsayıları basınç dayanımının çekme dayanımı ve CBR değerleri arasındaki uygun ilişkiyi göstermektedir.

Ghosh ve Subbarao (2007), F sınıfı (düşük CaO içerikli) uçucu küllerin kireçli ve kireç-alçı kombinasyonu ile ıslah çalışmalarında kullanılması durumlarında göstereceği dayanım karakteristiğini araştırmışlardır. %4, %6 ve %10 oranlarında önce kireçli, sonrada kireçle birlikte %0.5 ve %1 alçının uçucu küle katılarak deney numuneleri hazırlanmıştır. Üç eksenli deney ve serbest basınç deneyi sonuçlarına bakıldığında F sınıfı uçucu külün artan kireç oranı ile dayanım kazandığı görülmektedir. Kireçle birlikte kullanılan alçı, deney numunelerinin daha hızlı dayanım kazanmasına yardımcı olmuştur. Öyle ki sadece kireçli numunelerin 45 günde kazandığı dayanımı alçı ile kirecin kullanıldığı karışımlar 28 günde elde edebilmektedir. Deney numunelerinin basınç dayanımları 214 kPa ile 6308 kPa arasında değişmektedir (%10 kireç ve %1 alçının kullanıldığı deney numunelerinde maksimum değer olan 6308 kPa elde edilmiştir.). Üç eksenli deney sonuçlarına göre karışımların görünür kohezyonu 16~700 kPa, içsel sürtünme açısı 30.0~40.0 arasında çıkmaktadır. Durabilite deneyi için su altında bırakılan tüm numunelerde basınç dayanımlarında azalma görülmüştür. Kirecin alçı ile kullanıldığı numunelerdeki dayanım kaybı %25 olan sınır değerlerden az olurken yalnız kirecin kullanıldığı numunelerde bu kayıp %25 üzerindedir. Bu çalışmanın sonucunda F sınıfı uçucu küller kireç ve az miktarda alçı ile birlikte yol ve dolgu inşaatlarında kullanılabilir dayanıma ve durabiliteye sahip olacağı ortaya çıkmıştır.

Guney vd. (2007), kireç ile ıslah edilmiş şişen zeminin serbest şişme davranışına ıslanma-kuruma periyodunun etkisini araştırmışlardır. Na-bentonit ve kaolin türü kil içeren üç farklı zemin %3 ve %6 kireç eklenerek karışımlar hazırlanmıştır. Kireç eklenmesi ıslanma-kuruma periyodundan önce şişme yüzdesi ve basıncını oldukça düşürmüştür. Islanma-kuruma periyodu ile kirecin olumlu etkileri azalmaya başlamış 4. ile 6. çevrimden sonra karışımların tüm kazanımlar kaybolmuştur. Sonuç olarak şişen zeminlerin kireçle stabilizasyonuna ıslanma ve kurumanın gerçekleştiği bölgelerde kullanılmayacağı belirtilmiştir.

Khatab vd. (2008), killi bir zeminin, şeker endüstrisinin kireç içeren fabrika atığı ve ticari sönmüş kireç ile ıslah edilmesi sonucu elde edilen dayanım, durabilite ve hidrolik özellikler açısından bu iki malzemeyi karşılaştırmışlardır. Kuru zemine eklenen ticari sönmüş kireç oranları %2, %4 ve %6, kireçli atık malzeme oranları %2, %4 %6 ve %8 olarak seçilmiştir. Standart Proktor deneyi sonuçlarına göre ticari kirecin maksimum kuru

yoğunlukları kireçli atık malzemeye göre daha düşük iken optimum su içerikleri daha yüksek çıkmaktadır. Ticari kireçte %4'den sonra ve kireçli atık malzemedede ise %6'dan sonra killi zemin plastisite özelliğini yitirerek NP hale dönüşmektedir. Değişik kür zamanlarındaki serbest basınç dayanımına bakıldığında kireçli atık malzeme daha yüksek değerler vermektedir. Serbest basınç deneylerinde maksimum değerlere %4 ticari kireç ve %6 kireçli atık malzemenin kullanıldığı karışımlarda ulaşılmıştır. Ancak durabilite açısından ticari kireç daha avantajlı olduğu görülmüştür. Kireç içeren atık malzeme ile hazırlanan karışımların permeabilite katsayıları ticari kireçle hazırlanan karışımlara göre daha büyük çıkmıştır. Permeabilite katsayılarında 7. güne kadar yükseliş sürmekte sonra düşüşler görülmektedir. Ancak bu düşüşler olsa bile doğal zeminin permeabilite katsayısına göre yüksek kalmaktadır. En yüksek permeabilite katsayılarına %4 kireçli atık malzemeli ve %2 ticari kireçli karışımlarında ulaşılmıştır. Şişme basıncı ve potansiyeli ticari kireçli karışımlarda atık malzemeli karışımlara göre daha az çıkmıştır. Sonuç olarak şeker endüstrisi atığı olan kireçli malzemenin mühendislik çalışmalarında ticari kireç yerine kullanılabilceği söylenmiştir. Fakat kireçli atık malzemenin kullanıldığı karışımların durabilite açısından yetersiz olması sebebiyle yapılan üretimin sudan etkilenmesinin en aza düşürülmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Wong vd. (2008), bataklık zemininin yüksek fırın cürufu, Portland çimento ve silika kumu ile stabilizasyonu sonucu elde edilecek serbest basınç dayanımlarını ve geçirimsizlik katsayılarını araştırmışlardır. Silika kumu karışımlara filler olarak katılmıştır. Çimento ve yüksek fırın cürufu karışımları için; %75 çimento + %25 cüruf, %50 çimento + %50 cüruf, %25 çimento + %75 cüruf olmak üzere üç farklı birleşim seçilmiştir. Farklı çimento cüruf birleşimlerinden 200 kg/m^3 , 250 kg/m^3 , 300 kg/m^3 lık dozajlar belirlenerek silika kumlu ve silika kumsuz karışımlar hazırlanarak bataklık zeminine katılmıştır. Doğal durumda 4.5 kPa olan serbest basınç dayanımı %75 çimento + %25 cüruf birleşiminden 300 kg/m^3 dozajında filler olarak eklenen silika kumu ile birlikte bataklık zeminin serbest basınç dayanımı 178.6 kPa ulaşmıştır. Aynı katkı karışımının, laboratuvar Veyn deneyi sonuçlarına bakıldığında diğer karışımlara göre yine en yüksek değeri vermiştir. Doğal durumda 11 kPa olan drenajsız kayma direnci %75 çimento + %25 cüruf birleşiminden 300 kg/m^3 dozajında filler olarak eklenen silika kumu ile 28 günlük kür sonunda 23.1 kPa olmuştur. Çimento, yüksek fırın cürufu ve silika kumunun birlikte kullanıldığı karışımların geçirimsizlik katsayıları doğal zemine göre daha düşüktür. Örneğin doğal durumda

6.343×10^{-6} m/sn olan geçirimsizlik katsayısı, %50 çimento + %50 cürüflük karışımdan 300 kg/m^3 dozajında filler olarak eklenen silika kumu ile 4.006×10^{-6} m/sn olmuştur.

Manasseh ve Olufemi (2008), AASHTO zemin sınıflandırma sistemine göre A-7-6 sınıfındaki şeyl türü zeminin kireç ile stabilizasyonu sonucunda karışımların kompaksiyon, CBR ve serbest basınç deneyi sonuçlarının değişimlerini araştırmışlardır. %0, %2, %4, %6, %8, %10, %12 ve %14 oranlarında katılan kireç ile hazırlanan karışımların maksimum kuru yoğunlukları 1.51 Mg/m^3 'den 1.35 Mg/m^3 'e düşerken, optimum su içerikleri %22'den %26.5'e yükselmiştir. Artan kireç oranı ile LL değerleri düşerken (72'den 60'a), PL değerleri artmıştır (27'den 41'e). LL ve PL bu değişim sonucu plastisite indeksi değerleri 45'den 19'a gelmiştir. Serbest basınç ve CBR deneylerindeki en yüksek değerlere %8 kireç oranında ulaşılrken bu değerden sonra düşüşler olmuştur. %8 kireç oranında serbest basınç dayanımlarının maksimum değerleri 7. günde 1263 kN/m^2 , 14. günde 1400 kN/m^2 , 28. günde 1480 kN/m^2 ve maksimum CBR değeri %37 olarak elde edilmiştir. CBR ve 7 günlük kür sonrasındaki serbest basınç dayanımlarının kireç oranına bağlı olan ilişkiler (1.13) ve (1.14)'de verilmiştir (K; Kireç miktarı, %)

$$\text{CBR, \%} = 0.661 + 0.829 K + 0.789 K^2 - 0.0530 K^3 \quad R^2 = 0.92 \quad (1.13)$$

$$\text{SBD, kN/m}^2 = 370.954 + 318.716 K - 37.65 K^2 + 1.329 K^3 \quad R^2 = 0.94 \quad (1.14)$$

Katebi (2009), kalker içerikli zeminlerin kireç ile birlikte yol temeli ve/veya yol alt temeli olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. İran'ın Doğu Azerbaycan eyaletinde yer alan Tebriz'in Vali-Asr bölgesinden alınan kalkerli zemine %2, %3, %4, %5 ve %6 oranlarında kireç ekleyerek karışımlar hazırlanmıştır. Bu araştırmada karışımların uygunluğu için dayanım ana kriter olarak belirlendiğinden CBR ve serbest basınç dayanımı üzerinde durulmuştur. İran standartları yol temelinde (veya alt temeli) kullanılacak malzemeleri için uygunluk sınırı olarak CBR değeri olarak en az %32 ve serbest basınç dayanımı olarak en az 430 kPa değerlerini sağlaması gerektiğini söylemektedir. Deneyler sonucunda %6 kireç oranında kalkerli zeminin CBR değeri ve serbest basınç dayanımı sırasıyla %35 ve 450 kPa olarak bu sınırlar sağlamıştır.

Silitonga vd. (2009), deniz, göl gibi yerlerde çökelen zeminlerin uçucu kül, çimento ve kireç gibi katkıları ile stabilizasyonu sonucu oluşan tane mekanik davranışı incelemiştir. Deneylerde kullanılan çökelti malzemesi, Cherbourg limanında (Fransa)

deniz tabanından alınarak %0, %5, %10, %15, %20 ve %30 oranlarında iki tip uçucu kül ile karışımlar hazırlanmıştır. Karışımların her birine %2 kireç ve %1 çimentoda bağlayıcı olarak eklenmiştir. Çökelti malzemesi ile ayrıca %6 kireçli ve %6 çimentolu iki ayrı karışım da hazırlanmıştır. Artan uçucu kül oranlarında doğal çökelti malzemesine göre maksimum kuru yoğunluk düşerken, optimum su içeriği yükselmiştir. 28 günlük külden sonra uçucu kül-kireç-çimento karışımlarının serbest basınç dayanımı doğal malzemeye, sadece kireçli ve sadece çimentolu karışımlara göre daha yüksek çıkmıştır. Bu karışımların dayanım kazanmaları 100. güne kadar sürmekle birlikte 60. günle 100. gün arasındaki dayanım artışı %2.3 gibi çok az bir miktarda olmuştur. %6 kireçli karışımın dayanım kazanması %6 çimentolu karışıma göre daha yavaş olmuştur. Islanma-kuruma metodu ile yapılan durabilite deneyinde en başarılı karışımlar %20 ve %30 uçucu kül içeren karışımlar olurken; donma-çözülme metodunda ise en başarılı sonuçları %30 uçucu kül içeren karışım vermiştir. Bu çalışma sonucu çökelti malzemesi için uçucu kül-kireç-çimento kombinasyonunun en başarılı katkı tercihi olacağı ortaya çıkmıştır.

Mollamahmutoğlu vd. (2009), smektit grubunda yer alan yüksek şişme potansiyeline sahip kil içeren zeminin kimyasal, fiziksel, ve mineralojik özelliklerinin %5, %10, %15, %20, %25, %30, %35 ve %40 oranlarında C tipi uçucu kül ile stabilize edilmesiyle nasıl bir değişim yaptığını araştırmışlardır. Deney sonuçlarına göre optimum uçucu kül oranı %35 olarak tespit edilmiştir. Şişme basıncı 650 kN/m^2 , şişme yüzdesi %17.9 olan şişen zeminin %35 uçucu kül oranında sırasıyla 257 kN/m^2 , %8.1 elde edilmiştir. %35 uçucu kül oranında zeminin serbest basınç dayanımı 20 güne kadar belirgin şekilde yükselirken sonraları gitgide düşüşler göstermiştir. Ancak düşüşler olmasına rağmen ilk gündeki dayanım değerine göre yüksektir. Örneğin ilk günlerde 270 kN/m^2 olan serbest basınç dayanımı 55 gün sonrasında 290 kN/m^2 olmuştur. %35 uçucu kül CBR değerlerini %2.4'den %8.9'a çıkarmıştır. Serbest şişme yüzdesi artan uçucu kül oranlarında azalma göstermiştir. 5 ıslanma kuruma periyodu sonunda karışımların serbest şişme yüzdelere bakıldığında ise az da olsa artış görülmüştür.

Brooks (2009), şişen zeminin dayanım özellikleri açısından uçucu kül ve pirinç kabuğu külünün kullanılabilirliğini incelemiştir. %12 pirinç kabuğu külü ve %25 uçucu kül oranlarında şişen zeminde maksimum dayanım elde edilmiştir. Bu oranlarda serbest basınç dayanımlarında %97, CBR değerlerinde %47 artış sağlanmıştır. Optimum değerlerden sonra artan pirinç kabuğu ve uçucu kül oranlarında serbest basınç ve CBR değerlerinde azalmalar olmuştur.

Ene ve Okagbue (2009), piroklastik kül (volkanizma sırasında çıkan kül) ile şişen zemine yapılan ıslah çalışmasında plastisite, lineer büzülme, kompaksiyon, CBR ve serbest basınç dayanımlarının değişimini incelemiştir. %4, %8 ve %12 oranlarında kullanılan piroklastik kül katkısı ile hazırlanan karışımların plastisitesinde ve lineer büzülmesinde kayda değer düşüşler görülmüştür. %4 ve %8 piroklastik kül oranlarında karışımların maksimum kuru yoğunluklarında, optimum su içeriklerinde, CBR değerlerinde ve serbest basınç dayanımlarında artış meydana gelirken, %12 oranında bu parametrelerde düşüş görülmüştür. Tüm deney sonuçları göz önüne alındığında optimum piroklastik kül oranı %8 olarak tespit edilmiştir.

Yılmaz ve Civelekoglu (2009), şişen killi bir zeminin stabilizasyonu için alçı kullanımının şişme potansiyeli ve dayanım üzerindeki etkisini incelemiştir. %2.5, %5, %7.5 ve %10 alçı kullanarak hazırlanan deney numuneleri 7 gün kür edildikten sonra Atterberg limitlerinin, serbest şişme ve serbest basınç dayanımlarının nasıl etkilendiğine bakmışlardır. Alçı kullanımı LL ve PI değerlerinde düşüğe sebep olmuştur. Karışımların LL değerleri 237.3'den 152.8, PI değerleri ise 186.9'dan 120.8'e gerilemiştir. Karışımların serbest şişme yüzdeleri ise artan alçı oranlarında %64.9'dan %19.8'e gelmiştir. Alçı kullanımı ile numunelerin serbest basınç dayanımları kPa olarak 58.7'de 80.1'e çıkmıştır. Deney sonuçlarına bakıldığında şişen zemin için optimum alçı oranı %5 olarak tespit edilmiştir. Şişen zeminlerin stabilizasyonunda kullanılan bir diğer katkı olan kirece göre 1/2~1/3 mertebesinde daha ucuz olan alçının üretim maliyetlerini düşüreceği belirtilmekle birlikte alçının yeraltı suyunun mevcudiyetinde yüksek sülfat içeren zeminlerde betonarme yapılara zarar verebilmesi ise dezavantaj olarak söylenmiştir.

Sakr vd. (2009), Mısır'ın Idku kentinden alınan %14 organik madde içeren zeminin %1, %3, %5 ve %7 oranlarında kireç kullanarak yapılan stabilizasyon çalışmasında çeşitli kür zamanlarında tane boyutunu, plastisite limitlerini, serbest basınç dayanımını ve sıkışma özelliklerini incelemiştir. Deney sonuçlarına göre bu organik zemin için optimum kireç yüzdesi %7, plastisite açısından en az %3 kireç oranı gerektiği bulunmuştur. Elek analizi sonuçlarına göre artan kireç oranı ve kür zamanı ile birlikte siltten kuma kadar olan zemin tane miktarında artış olmuştur. Yükselen kireç miktarı ile artan LL ve PL değerleri zamanla düşüş göstermişlerdir. Elastisite modülü ve serbest basınç dayanımında kireç oranı ve kür zamanı pozitif etki yapmıştır. Mesela doğal zeminin serbest basıncı 10 kPa iken %7 kireçte 7. günde %330, 60. günde %660 artış kaydedilmiştir. Sıkışma indisi ve

permeabilite katsayısı 15. güne kadar artış gösterirken sonraları azalmaktadır. Ön konsolidasyon basıncı 15. güne kadar azalmış sonra zamanla artış göstermiştir.

Deney sonuçlarından K: Kireç miktarı (%), T: Zaman (gün) olmak üzere (1.15), (1.16), (1.17), (1.18) ve (1.19)'daki ilişkiler tespit edilmiştir:

$$LL, \% = 95.63 + 1.23 KY - 0.11 T \quad R^2 = 0.93 \quad (1.15)$$

$$PL, \% = 63.76 + 3.62 KY - 0.44 T \quad R^2 = 0.95 \quad (1.16)$$

$$q_u, \text{ kPa} = 6.28 + 8.68 KY + 0.47 T \quad R^2 = 0.91 \quad (1.17)$$

$$E, \text{ MPa} = -0.31 + 0.25 KY + 0.02 T \quad R^2 = 0.90 \quad (1.18)$$

$$c, \text{ kPa} = 2.54 + 4.37 KY + 0.24 T \quad R^2 = 0.91 \quad (1.19)$$

Okafor ve Okonkwo (2009), AASHTO sınıflandırmasına göre A-2-6 olarak sınıflandırılan lateritli zeminin (sıcak ve nemli tropik bölgelerin demir ve alüminyum bakımından zengin kırmızı renkli killi zemin) %5, %7.5, %10 ve %12.5 oranlarında pirinç kabuğu külü ile ıslah edilmesinin kompaksiyon, kıvam limitleri ve dayanım özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Artan pirinç kabuğu külü oranı ile karışımların maksimum kuru yoğunlukları azalırken, optimum su içeriği değerleri yükselmiştir. Pirinç kabuğu külü miktarının artması ile karışımların plastisitesi düşüş gösterirken, dayanımları ve hacimsel stabilite artmıştır. Deney sonuçlarının tümü göz önüne alındığında optimum pirinç kabuğu külü oranının %10 olduğu tespit edilmiştir.

Harichane ve Ghrici (2009), USCS sınıflandırma sistemine göre CH ve CL olarak sınıflandırılan iki zemin türünün kireç, doğal puzolan ve bu iki katkının beraber kullanılması şeklinde yapılan ıslah çalışmalarında karışımların Atterberg limitlerindeki değişimi araştırmışlardır. Kullanılan kireç oranları %2, %4, %6, %8 ve %10, doğal puzolan oranları %5, %10, %15 ve %20 olarak seçilmiştir. Kireç, CH sınıfı zeminde LL değerlerinde düşmeye, PL değerlerinde artışa sebep olmuştur. CL sınıfı zeminde artan kireç oranı ile LL ve PL değerlerinde artış görülmüştür. Puzolanın kullanıldığı durumda CH türü zeminin LL değerlerinde önemli bir değişim olmazken, PL değerlerinde artış olmuştur. CL türü zeminde puzolan LL değerlerini düşürmüş, PL değerlerini artırmıştır.

Puzolan ve kirecin birlikte kullanıldığı zemin karışımlarında CH sınıfı zeminde LL değerlerinde büyük düşüşler olurken PL değerlerinde artış görülmüştür. CL sınıfı zeminde ise puzolan kireç kombinasyonu LL'de kayda değer bir değişim olmazken PL artış göstermiştir. Tüm karışımlarda ortak nokta ise kireç, puzolan ve bu iki katkının kombinasyonundan hangisi kullanılırsa kullanılsın zeminin plastisitesinde düşüşün görülmesidir. Burada CH sınıfı zeminde plastisiteyi en çok düşüren kireç olurken, CL sınıfı zeminde doğal puzolan olmuştur.

Bozbey ve Garaisayev (2010), şişen zeminlerin kireç ile stabilizasyonunda tane ufalanma kalitesinin etkisini incelemişlerdir. 500 kN/m² şişme basıncı ve %19 serbest şişme yüzdesine sahip zeminin zayıf, orta ve yüksek öğütülme seviyesindeki halleri %3, %6 ve %9 kireç ile stabilize edilmiştir. Doğal zeminin 3 öğütülme seviyesinde serbest basınç değeri sırasıyla 309, 411 ve 432 kN/m²'dir. %3 kireç içeriğinde 7 ve 28 günlük kür sonunda serbest basınçta önemli bir değişim olmazken %6 kireç içeriğinde 384 ila 896 kN/m², %9 kireç oranında ise 850 ile 1529 kN/m² aralığına yükselmiştir. Ancak buradaki serbest basınç değerlerine bakıldığında her bir kireç oranında zayıf öğütülen zeminde daha düşük, öğütme kalitesi arttıkça daha yüksek değerler görülmüştür. Sekant elastisite modülü değerleri de serbest basınç dayanımlarında görülen davranışı sergilemiştir. Karışımların elastisite modülleri (MN/m²) için, 0.086 q_u (kN/m²) (yüksek ve orta öğütülme seviyeleri için), 0.052 q_u (kN/m²) (zayıf öğütülme seviyesi için) ilişkileri verilmiştir. Görüldüğü gibi zeminin yüksek öğütülme seviyesinden zayıf öğütülme seviyesine doğru bir azalma mevcuttur. Bunların yanı sıra Atterberg limitlerine bakıldığında %3 kireç oranının etkili olduğu ancak hem plastisite hem de puzolanik etki için en az %6 kireç kullanılması gerektiği serbest basınç ve sekant modülü değerlerine bakılarak söylenmiştir.

Al-Mukhtar vd. (2010), yüksek plastik killi zeminin kireç ile stabilizasyonu ve 50°C'de kür edilmesinin puzolanik reaksiyonlara ve zemin davranışına etkisini incelemişlerdir. Deney sonuçları 20°C oda şartlarındaki kazanımlarla karşılaştırmışlardır. Kullanılan kireç oranları %2, %4, %6, %8, %10 ve %20 olarak seçilmiştir. Zeminin plastisitesi için en az %6 kireç oranı gerektiği belirtilmiştir. %6 ve üzeri kireç oranında ve sıcaklığın 20°C'den 50°C'ye çıkarılması ile çimentolaşma ürünleri CAH ve CSH miktarı artmıştır. Bu iki etki puzolanik aktiviteyi 6 kat yükseltirken ilk günlerde dahi hızlı dayanım kazanmasını sağlamıştır. Dayanım açısından bakıldığında artan kireç oranı ve sıcaklığın 50°C'e çıkarılması olumlu etkilemiştir. Örneğin %6 kireç oranında 50°C'de kür edilen numunelerin 90. gündeki serbest basınç dayanımı doğal zeminin dayanımının 13 katı,

20°C'deki aynı kür süresindeki numunenin 2 katı çıkmıştır. Ayrıca 50°C'de 28. gündeki serbest basınç dayanımı 20°C'de aynı dayanımı kazanımı sağlaması için 90 günden fazla kür edilmesi gerektiği belirtilmiştir.

Harichane vd. (2010), USCS sınıflandırma sistemine göre CH ve CL olarak sınıflandırılan iki zemin türünün stabilizasyonunda doğal puzolan ve kireç kombinasyonunun kullanılmasının 12 ıslanma-kuruma periyoduna direnci (durabilite) incelemiştir. %0~%8 arasında kireç oranları ve %0~%20 arasında puzolan oranları olmak üzere çeşitli katkı kombinasyonları hazırlanarak CH ve CL sınıfı iki zemine katılmıştır. Artan kireç-doğal puzolan kombinasyonu miktarı ile CH sınıfı zeminde maksimum kuru yoğunluk artarken, optimum su içeriği azalmıştır. CL sınıfı zeminde ise CH sınıfı zeminin tam tersi bir durum mevcuttur. Her iki zemin sınıfında da artan katkı kombinasyon miktarı ve kür süresi ile serbest basınç dayanımları yükselmiştir. Örneğin %20 puzolan ve %8 kireç kullanılan kombinasyonda CH sınıfı zeminin serbest basınç dayanımı 55.6 kPa'dan 7. günde 1415.4 kPa, 28. günde 2620.5 kPa çıkmıştır. Hazırlanan karışımlar 12 ıslanma-kuruma periyoduna maruz bırakıldığında ise sadece kireç ve sadece puzolan içeren karışımlara göre daha dayanıklı çıkmıştır. Kireç ve doğal puzolan kombinasyonunun kullanıldığı iki zemin sınıfı zemin karşılaştırıldığında CH sınıfı zemin ıslanma-kuruma periyoduna CL sınıfı zemine göre daha duyarlı çıkmıştır. Ancak yinede hem CH hem de CL sınıfı zeminin kireç-doğal puzolan kombinasyonu ile hazırlanan tüm karışımları ıslanma-kuruma periyoduna dayanabilmişlerdir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

2.1. Metodoloji

Doktora çalışması kapsamında kullanılan materyallerle (doğal malzeme, perlit ve kireç) hazırlanan karışımların fiziksel, mekanik ve hidrolik özelliklerinin ortaya çıkarılması için yapılan zemin mekaniği deneyleri, bu deneylerin gerçekleştirilmesinde referans alınan standartlar, deney numunelerinin hazırlanması, isimlendirmesi ve saklanması (kür edilmesi) ile ilgili ayrıntılar bu kısımda yer almaktadır.

2.1.1. Yapılan Deneyler ve Referans Alınan Deney Standartları

Doktora çalışması kapsamında yapılan tüm zemin deneyleri ilgili olduğu standarda uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Tablo 2.1’de yapılan deneyler ve bu deneylerin yapılmasında referans alınan ASTM standartları listelenmiştir.

Tablo 2.1. Deneylerde referans alınan standartlar

Deneyin adı	Standart
X-ışını kırınım analizi	ASTM D 934 (2003)
Özgül ağırlık deneyi	ASTM D 854 (2010)
Elek analizi - Hidrometre deneyi	ASTM D 422 (2007)
Kıvam limitlerinin belirlenmesi (LL, PL ve SL)	ASTM D 4318 (2010)
Standart kompaksiyon deneyi	ASTM D 698 (2007)
Düşen seviyeli geçirimsizlik deneyi	ASTM D 5856 (2007)
Konsolidasyon deneyi	ASTM D 2435 (2011)
Serbest basınç deneyi	ASTM D 2166 (2006)
Kesme kutusu deneyi	ASTM D 3080 (2011)
Serbest şişme yüzdesi deneyi	ASTM D 4546 (2008)
Şişme basıncı deneyi	ASTM D 3877 (2008)
Optimum kireç miktarının tespiti	ASTM D 6276 (2006)
Organik madde tayini	ASTM D 2974 (2007)
Durabilite testi	ASTM D 559 (2003)

2.1.2. Deneysel Numunelerin İsimlendirilmesi ve Hazırlanması

Kullanılan katkıların (perlit ve kireç) doğal malzemenin fiziksel, kimyasal ve hidrolik özellikleri üzerinde meydana getireceği değişimler standart zemin mekaniği deneyleri ile araştırılmıştır. Bu deneysel araştırma sürecinin iki aşamadan oluşması planlanmıştır. Birinci aşamada sadece perlitin stabilizasyon katkısı olarak kullanıldığı durum, ikinci aşamada perlit ve kirecin birlikte stabilizasyonda kullanıldığı durum tetkik edilmiştir. İki aşama esnasında üretilen tüm deney karışımlarına verilen isimlendirmeler Tablo 2.2’de görülmektedir.

Tablo 2.2. Doktora çalışmasında üretilen karışımlara ait isimlendirmeler

Materyallerin deney karışımlarındaki oranları		Notasyon	
Doğal malzeme	Perlit		
% 100	%0	SP0	
% 90	% 10	SP10	
% 80	% 20	SP20	
% 70	% 30	SP30	
% 60	% 40	SP40	
% 50	% 50	SP50	
Doğal malzeme	Perlit	Sönmüş kireç	Notasyon
% 100	% 0	Her bir karışıma kuru ağırlığının %8’i kadar kireç katılmıştır.	SKP0
% 90	% 10		SKP10
% 80	% 20		SKP20
% 70	% 30		SKP30
% 60	% 40		SKP40
% 50	% 50		SKP50

Tablo 2.2’de görülen karışımları oluşturacak olan üç materyal (doğal malzeme, perlit ve kireç) etüvde değil de havada kurutulduğundan belli bir miktar su içermektedir (Yaklaşık doğal malzeme %10.54, perlit %0.41 ve kireç %0.49 su içeriğine sahiptir.). Bu yüzden doğal malzeme ve perlit oranları, toplam karışımdaki kuru ağırlıkça yüzdeleri olduğundan sahip oldukları su içerikleri göz önünde tutularak istenen oranının sağlanması için kullanılacak ıslak (nemli) doğal malzeme ve perlit miktarları hesaplanmıştır. Kirecin

eklendiği ikinci aşamanın karışımlarına toplam kuru malzeme ağırlığına ASTM D 6276'ya (2006) göre belirlenen optimum kireç yüzdesi kadar kireç eklenmiştir.

Laboratuara getirilen doğal malzeme havada kurutulduktan sonra plastisiteden dolayı topaklar halinde olduğundan ve deneyler için homojen karışımlar hazırlamak gerektiğinden numunenin tane özelliklerini bozmayacak şekilde bu topaklar lastik tokmakla ezilerek ufalanmıştır. Her bir materyalden Tablo 2.2'de verilen oranlarda olacak şekilde ezilmiş ve ufalanmış doğal malzemeye perlit ve kireç kombinasyonu katılarak hazırlanan karışımlar deneylere hazır hale getirilmiştir.

Geçirimsizlik deneyi, konsolidasyon deneyi, serbest basınç deneyi, kesme kutusu deneyi, şişme deneyleri ve durabilite deneyi için gereken numuneler optimum su içeriğinde maksimum kuru yoğunluğa sahip olacak şekilde hazırlanacağından her bir karışımın ilk önce standart kompaksiyon deneyi ile optimum su içerikleri ve maksimum kuru yoğunlukları belirlenmiştir.

Optimum su içerikleri belirlenen karışımlar, bu su içeriğine sahip olacak şekilde nemlendirildikten sonra standart kompaksiyon kalıbına ASTM D 698'e (2007) göre sıkıştırılmıştır. Konsolidasyon deneyi, serbest şişme ve şişme basıncı deneyleri için çapı 76.2 mm ve yüksekliği 19.1 mm olan konsolidasyon halkaları, serbest basınç deneyi ve durabilite deneyi için çapı 38 mm ve yüksekliği 76 mm numuneler almak için ince cidarlı metal tüpler, kesme kutusu deneyi için eni ve boyu 60 mm, yüksekliği 20 mm olan kare kalıplar örselenmelerin en az olacak şekilde kompaksiyon kalıbına hidrolik krikoyardımlarıyla itilmiştir. Sonra numuneler kalıbın içinden çıkarılarak deney için gereken boyutlara getirilmiştir. Hazırlanan bu numunelerin farklı kür sürelerindeki değişimleri inceleneceğinden sahip oldukları su içeriklerini deney gününe kadar kaybetmemeleri için öncelikle streç filmle sarılarak desikatörde saklanmıştır. Desikatörün içindeki ortam şartları 21°C ($\pm 3^\circ\text{C}$) ve %98 ($\pm \%1$) bağıl nem olarak ölçülmüştür. Burada örnek olarak Şekil 2.1'de serbest basınç deneyi numunelerinin hazırlanma süreci ve desikatörde saklanması ile ilgili fotoğraflar verilmiştir.

Geçirimsizlik deneyleri için ise hazırlanan karışımlar optimum su içeriklerinde çapı 100 mm ve yüksekliği 130 mm olan kalıp içine standart Proktor enerjisi ile sıkıştırılmıştır. Zemin dolu bu kalıplar 28 günlük kürden sonra doymuş hale getirmek için nem odasında plastik kovalara yerleştirilerek düşen seviyeli geçirimsizlik deneylerine hazır hale getirilmiştir.



Şekil 2.1. Serbest basınç deneyi için numunelerinin hazırlanması ve saklanması

2.2. Materyaller

Bu çalışma esnasında hazırlanan deney numunelerinde kullanılan materyaller olan doğal malzeme, perlit ve kirece ait fiziksel, kimyasal ve diğer mühendislik özellikleri ile ilgili bilgiler bu kısımda yer almaktadır.

2.2.1. Doğal Malzeme

Doktora çalışmasında kullanılmak üzere Şekil 2.2'deki haritada görülen Trabzon Merkez ilçesine bağlı Gürbulak beldesinden doğal malzeme tedarik edilmiştir. Trabzon'un batısındaki Hacı Beşir köprüsünden 5 km içeride (şehir merkezine kuş uçuşu 8.8 km) bulunan bu beldeden $41^{\circ} 00' 13''$ kuzey enlemi ve $39^{\circ} 36' 09''$ doğu boylamı

koordinatlarında 260 m rakımlı eski bir heyelan sahasına oldukça yakın ve Şekil 2.3 (A)'da görüldüğü üzere zemin yüzeyinden yaklaşık 1.5 m derinlikten kafi miktarda doğal malzeme alınarak Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik ve Ulaştırma Laboratuvarına getirilmiştir.

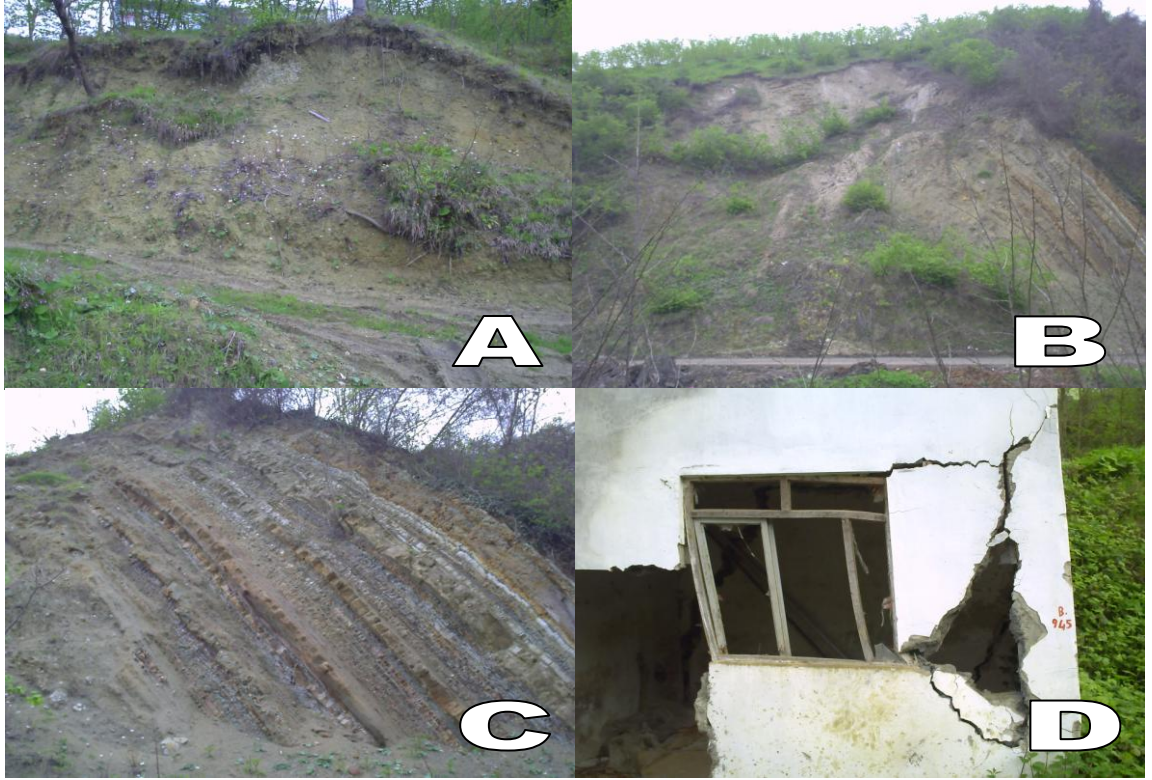


Şekil 2.2. Doğal malzemenin alındığı Gürbulak beldesinin konumu (URL-1, 2007)

Çalışılan bölgedeki jeolojik yapı Bakırköy formasyonudur (Doğu Pontid kuzey zonunda, Üst Kretase döneminde, asit ve bazik volkanik aktivitenin faaliyetlerinin tamamlamalarından sonra sığ ve derin denizel havzalarda türbiditik veya resifal çökeller oluşmuştur. Türbiditik karakterli olan bu çökeller Doğu Pontid kuzey zonunda Artvin ili kuzeyinde Bakırköy yöresinde en iyi yüzeylenme gösterdiğinden Güven (1993) tarafından Bakırköy (Krü5a) formasyonu ismiyle adlandırılmıştır.). Bakırköy formasyonu; Polut Dağı, Hayrat civarı, Araklı ve Yorma'nın güneyi, Zağnos ve Tabakhane vadi tabanları ile yerleşimin yoğun olduğu Yenicuma, Bahçecik ve Boztepe mahallelerinde, Uğurlu ve Gürbulak yöreleri ile Tonya yörelerinde yüzeylenir. Birim çoğunlukla marn, killi kireçtaşı, kumlu kireçtaşı ve az oranda kumtaşlarından oluşmuştur (Bölgede bulunan marn ve kireçtaşı ideal çimento hammaddesidir. Bundan dolayı, Gürbulak beldesinde Aşkale Çimento Sanayi Ticaret A.Ş. firmasına ait Trabzon Çimento Fabrikası'na hammadde sağlamak amacıyla 275 000 ton/yıl kapasiteyle açık-kademeli işletme tarzıyla bir taş ocağı

işletilmektedir.). Bu bölgede ince ve orta kalınlıkta tabakalı bir yapı izlenmektedir. Kesin olmayan kalınlığı 100~250 m arasındadır. Formasyonun yaşı Üst Kretase (Maestrichtiyen-Paleosen) olarak saptanmıştır.

Deneyleerde kullanılan doğal malzemenin mühendislik özellikleri açısından problemlili olduğunu göstermesi amacıyla çalışma alanında yer alan hasarlı bir köy evi ve aynı bölgede yakın zamanda meydana gelmiş heyelan sahası Şekil 2.3 (B), (C) ve (D)'de verilmiştir.



Şekil 2.3. Doğal malzemenin alındığı yer, heyelan sahası ve hasarlı köy evi

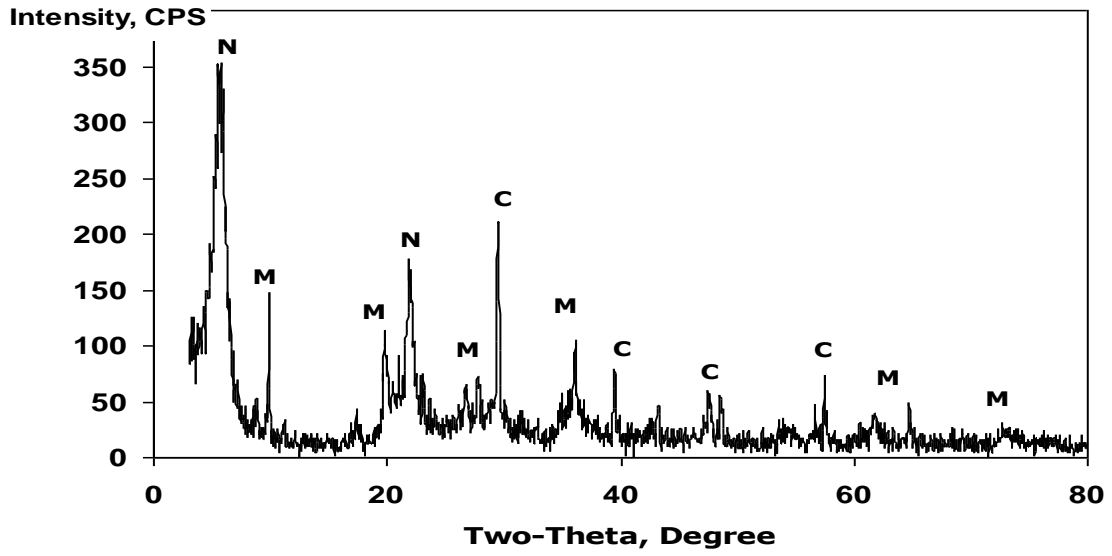
Stabilize edilmemiş doğal malzeme etüvde kurutularak ASTM 200 No.lu elekten elenmiştir. 200 No.lu elekten geçen doğal malzemenin X-ışını kırınım deseni (difraktogram), Karadeniz Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü Katıhal Fiziği Laboratuvarındaki Şekil 2.4'de görülen RIGAKU D/MAX-IIIC marka X-ışını difraktometresi kullanılarak ASTM D 934'e (2003) göre gerçekleştirilmiştir. Difraktometre, 30 mA akım ve 40 kV voltaj ile çalışan $\lambda(\text{Cu K}\alpha_1) = 1.54059 \text{ \AA}$ özellikli bir X-ışını tüpüne sahiptir. Bu ışın tüpü ile $2\theta = 3^\circ\text{-}79.95^\circ$ aralığında sürekli tarama modunda 6 derece/dakika tarama oranı ile deney örneğinin X-ışınları kırınım deseni çıkarılmıştır.

Kırınım desenlerinin analiz edilmesinde HANAWALT metoduna göre çalışan JADE v7 paket programı kullanılmıştır.

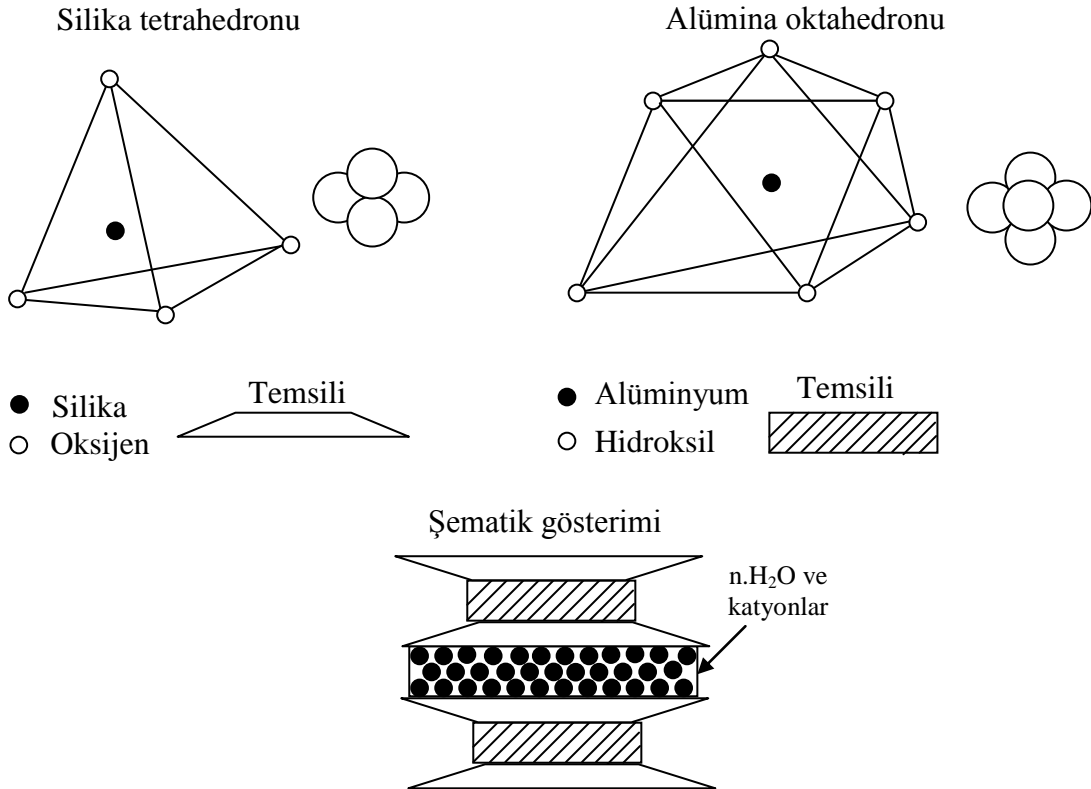


Şekil 2.4. RIGAKU D/MAX IIIC marka difraktometre

Difraktometre tarafından çizilen X-ışınları kırınım deseni Şekil 2.5’de verilmiştir. Buna göre doğal malzeme içindeki başlıca mineraller nontronit (15A) ($\text{Na}_{0.3}\text{Fe}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}\text{OH}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), montmorillonit (18A) ($\text{Na}_{0.3}(\text{AlMg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}\text{OH}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ve kalsit (CaCO_3) olduğu ortaya çıkmıştır. X-ışınları kırınım analizine göre doğal malzemede baskın olan kil mineralleri nontronit ve montmorillonittir. Bu iki mineral smektit grubu killerin alt grubudur. Smektit mineralleri, iki silika tetrahedron plakası arasında tek alümina oktahedron plakasının ardı ardına dizilip arasına çok zayıf su molekül bağı ve kationların mevcut olduğu bir yapıya sahip olup yapısal şeması Şekil 2.6’da görselleştirilmiştir. Smektit grubu kil minerallerinin mühendislik açısından dikkati çeken yönü suyla temas ettiklerinde aşırı hacim değişimi yaparak yapıları olumsuz etkilemeleridir. Zaten bu tür kil içeren doğal malzemenin üst yapı için olumsuz etkileri Şekil 2.3’de verilen heyelan sahası ve hasarlı köy evine ait fotoğraflarda açıkça görülmektedir.



Şekil 2.5. Doğal malzemenin X-ışını kırınım deseni (difraktogram) (N: Nontronit, M: Montmorillonit, C: Kalsit) Nontronit (15A): $\text{Na}_{0.3}\text{Fe}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}\text{OH}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Montmorillonit (18A): $\text{Na}_{0.3}(\text{AlMg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}\text{OH}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – Kalsit: CaCO_3)



Şekil 2.6. Smektit grubu killerin ana birimleri (Craig, 1978).

Zeminlerin mineralojik yapısı; plastisite, şişme potansiyeli, sıkışma, dayanım, durabilite ve geçirimsizlik özellikleri üzerinde etkin bir rol oynamaktadır. Ancak zeminin mineralojik yapısını incelemek yerine tane kompozisyonu (biçimi ve tane dağılımı vb.) ve mühendislik özellikleri (kıvam limitleri, kohezyon, içsel sürtünme açısı vb.) ile zemin özellikleri saptanmaya çalışılmaktadır. Çünkü zeminin mineralojik yapısı ile geoteknik özellikleri arasında doğrudan ilişkiler olmadığından mühendislik üretimleri için gerekli parametreleri saptayabilmek mümkün olmamaktadır.

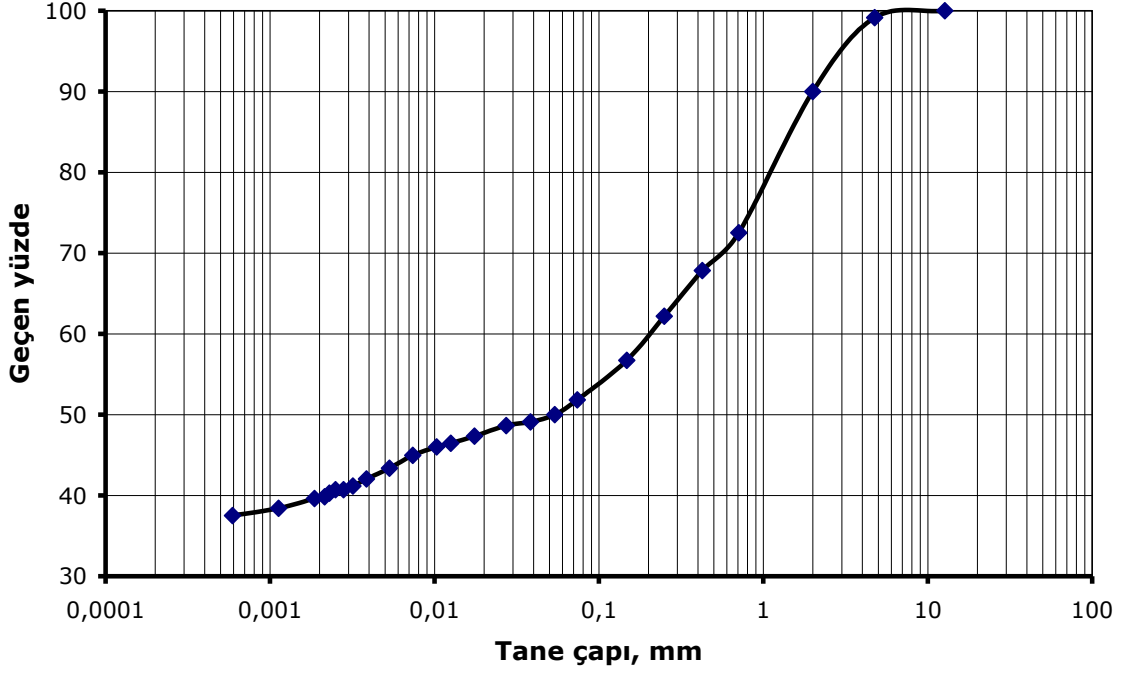
Doğal malzemenin mühendislik özellikleri zemin mekaniği deneyleri ile saptanarak Tablo 2.3’de özetlenmiştir.

Tablo 2.3. Doğal malzemenin mühendislik özellikleri

Mühendislik parametreleri	
Renk	Sarımtırak
Likit limit, LL (%)	87.2
Plastik limit, PL (%)	28.9
Büzülme limiti, SL (%)	14.4
Plastisite indeksi, PI (%)	58.3
Özgül ağırlık, G_s	2.59
Geçirimsizlik katsayısı, mm/sn	7.281×10^{-8}
Standart kompaksiyon parametreleri	
Optimum su içeriği, w_{opt} (%)	24.5
Maksimum kuru yoğunluk, $\rho_{d,maks.}$ (Mg/m^3)	1.461
Sınıflandırma	
USCS	CH (Kumlu yağlı kil)
AASHTO	A-7-6
Şişme parametreleri*	
Serbest şişme, %	7.94
Şişme basıncı, kPa	282
Konsolidasyon parametreleri*	
Sıkışma indisi, C_c	0.235
Yeniden yükleme indisi, C_r	0.0407
Dayanım parametreleri*	
Serbest basınç dayanımı, kPa	225.5
Görünür kohezyon, kPa	37.08
İçsel sürtünme açısı, °	20.5

* Standart kompaksiyon deneyi ile hazırlanmış numuneler ile yapılmışlardır.

Doğal malzemenin tane boyutu dağılım (gradasyon) eğrisinin belirlenmesi için elek analizi ve hidrometre deneyi yapılmıştır. Bu deneylere ait tane dağılım eğrileri kombine yöntem ile birleştirilerek Şekil 2.7’de gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Doğal malzemenin tane boyutu dağılım eğrisi

Şekil 2.7’de görülen tane boyutu dağılım eğrisi dikkate alınarak MIT ve USCS’ye göre doğal malzemedeki çakıl, kum, silt ve kil yüzdeleri Tablo 2.4’de verilmiştir.

Tablo 2.4. Doğal malzemedeki zemin sınıflarının MIT ve USCS’ye göre yüzdeleri

Sınıflandırma türü	Çakıl	Kum	Silt	Kil
MIT ve TS 1500	%10	%39	%11.3	%39.7
USCS*	%0.8	%47.4	%51.8 (silt + kil)	

*: USCS’de kil ve silt “inceler” olarak nitelendirilmekte ve bu iki zemin türünü ayıran belirli bir tane çapı verilmemektedir.

Türk standartları zemin sınıflandırma sistemi 1987, 2000 ve son olarak Mart 2006’da gözden geçirilmiştir. O güne kadar ASTM’nin bir tercümesi olan Türk Standartları’nda bazı revizyonlar öngörülmüştür. Bunlardan en önemlisi kabul edilen yeni çakıl ve kum

sınır boyutudur. USCS’de çakıl-kum sınırı ASTM 4 No.lu elek (4.76mm) olarak tariflenirken MIT ve TS 1500’de (2000) bu sınır ASTM 10 No.lu eleğe (2 mm) çekilmiştir. Bu değişiklik daha önceden İngiliz ve Alman standartlarının yanı sıra 1990 yılında AASHTO sisteminde de gerçekleştirilmiş ve çakıl-kum sınırı 2.0 mm’ye indirilmiştir.

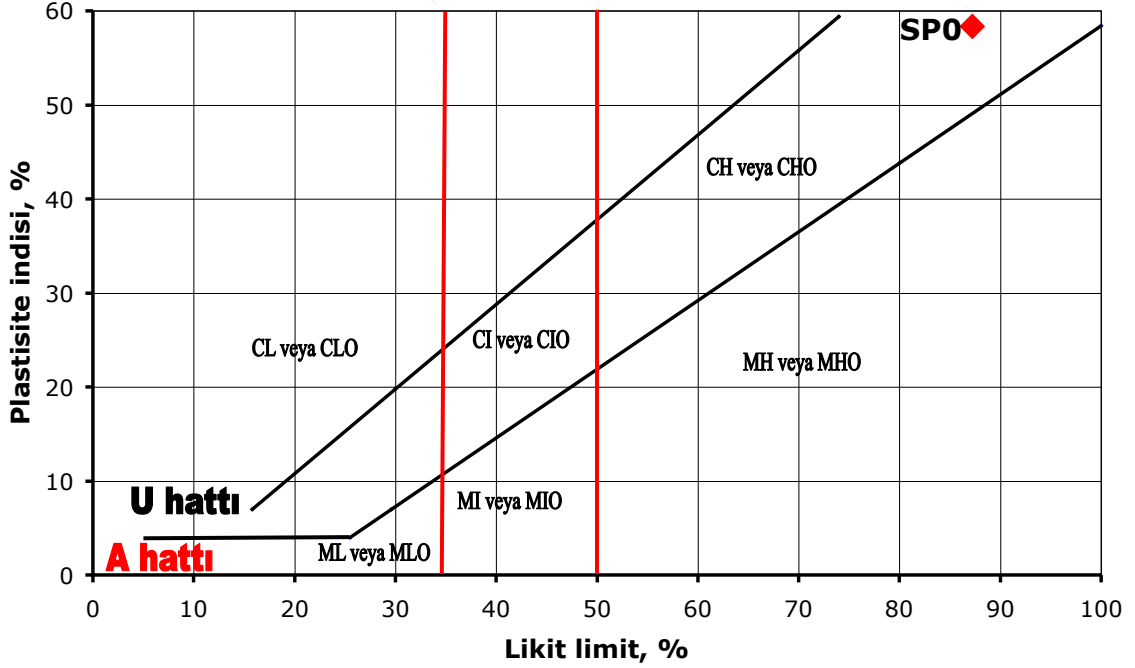
Türk Standartları’na getirilen bir diğer önemli bir değişiklik ise plastisite kartındadır. Özellikle 1999 Marmara depreminde NP siltlerde görülen sıvılaşma olayı ince taneli zeminlerin düşük, orta ve yüksek plastisiteli olarak ayrılmasının daha gerçekçi olacağını göstermiştir. Orta ve yüksek plastisiteli siltlerin ve killerin (MI-CI ve MH-CH) kesinlikle sıvılaşmayacağı şimdi söylenebilmektedir. Plastisite kartında düşük plastisiteli siltler (ML) ise kolayca sıvılaşma potansiyeli gösteren grup olarak anılmaktadır.

TS 1500 (2000) revizyonundan sonra getirilen bir başka yenilikte CL-ML çift simgesinin kaldırılmasıdır. Çok kısıtlı bir alanda ve siltle kili bir arada tanımlayan çelişkili ve nadiren karşılaşılan bu durumu ortadan kaldırmak için A hattının üstündeki geniş alan düşük plastisiteli killere, içinde kil minerali bulunmayan bu nedenle plastik limiti ölçülemeyen (NP) siltler de A hattının altındaki kısıtlı bölgeye atanmıştır. Bu şekilde daha somut bir sınıflandırma yapılabilecektir. Ayrıca Türk Standartları’nın verdiği plastisite kartında görülen U hattı yaklaşık doğal zeminler için üst sınırı oluşturduğundan bu hattın üzerine çıkılmamalıdır. TS 1500’de (2000) eğer U hattının üstüne çıkılıyorsa likit limit ve plastik limit deneylerinin tekrarlanması gerektiği belirtilmiştir.

Su kohezyonsuz (granüler, kaba) zeminlerin davranışında çok fazla etkili değilken kohezyonlu zeminlerin mühendislik özellikleri su içeriği arttıkça önemli değişiklikler göstermektedir. Bunun nedeni kohezyonlu zeminlerde tane çapının çok küçük ve buna bağlı olarak özgül yüzey alanının çok büyük olmasıdır. Böylece aktif yüzeyler oluşmakta ve daha çok su tutma kabiliyetine sahip olmaktadır. Önemli kil minerallerinden montmorillonit 80×10^7 mm²/g, illit 80×10^6 mm²/g ve kaolinit $10 \sim 30 \times 10^6$ mm²/g özgül yüzey alanına sahiptirler. Özgül yüzey alanı ve aktivitenin artması ile tanelerinin etrafındaki absorbe su miktarı ve su filminin kalınlığı artmakta ve dolayısıyla zeminlerin LL ve PI değeri yükselmektedir. Bir başka deyişle zemin kompozisyonu içindeki kil minerallerinin su ile olan elektrokimyasal etkileşimi zeminin LL, PL ve PI değerlerini belirlemektedir. Zira kil mineralleri yüzeylerinde negatif elektrik yükleri bulunan plaka şeklinde taneler ile suyun içindeki katyon iyonu (H⁺) arasındaki çekim kuvveti sayesinde zeminin su tutma kabiliyeti artmakta bu da kohezyonlu zeminlerin kıvam limitlerini değerlerini artırmaktadır.

Kilin mineralojik yapısının yanında şişme potansiyelini belirleyen önemli faktörler LL-PI-SL, tane boyut dağılımındaki kil içeriği yani 2 µm'den küçük tanelerin yüzdesi ve kilin aktivitesi olarak sıralanabilir.

TS 1500'de (2000) yer alan plastisite kartı Şekil 2.8'de verilirken doğal malzemenin plastisite kartındaki yeri Tablo 2.3'deki LL ve PI değerlerine göre işaretlenmiştir.



Şekil 2.8. TS 1500'de yer alan Casagrande plastisite kartı ve doğal malzemenin plastisite kartındaki yeri

Aktivite, kilin su ile etkileşiminin ne derece olduğuna yönelik bir kavram olarak tanımlanabilir. Zeminin plastisite indisi ve kil miktarına bağlı olarak (2.1)'deki denklemden hesaplanmaktadır.

$$\text{Aktivite, } A = \frac{PI, \%}{\text{Kil miktarı, \%}} \quad (2.1)$$

Aktivite katsayısı 0.75'den küçük olan killer aktif olmayan killer, 0.75-1.25 arasında olanlar normal killer, 1.25'den büyük olanlar ise aktif killer olarak kabul edilmektedir (Skempton, 1953).

Tablo 2.3’de verilen $LL = 87.2$, $PI = 58.3$ ve $SL = 14.4$ değerleri; Tablo 2.4’de verilen %39.7 kil yüzdesi; sahip olduğu 1.47 kil aktivitesi ve kimyasal yapısındaki smektit grubu kil mineralleri, doğal malzemenin şişme potansiyeline sahip olduğunun göstergeleri olarak kabul edilebilir.

Serbest şişme yüzdesinin ortaya çıkarılması için ASTM D 4546’ya (2008) uygun olarak odometre deney düzeneğinde 1 kPa yük altında serbest şişme yüzdesi deneyi gerçekleştirilerek serbest şişme yüzdesi %7.94 olarak bulgulanmıştır. ASTM D 3877’ye (2008) göre doğal malzemenin şişme basıncı 282 kPa olarak ölçülmüştür.

Ayrıca suyun doğal malzeme üzerindeki etkisi için çapı 38 mm ve yüksekliği 76 mm olan deney numunesinin su içinde hacimsel bütünlüğünü koruyamaması Şekil 2.9’da görselleştirilmesidir.



Şekil 2.9. Doğal malzemenin su içinde hacimsel bütünlüğünü kaybetmesi

Organik madde içeren zeminin tanımlanmasında zeminin doku, renk ve koku tetkikleri yanında etüvde ve havada kurutulmuş şekilde hazırlanmış iki numunenin likit limit deney sonuçlarının karşılaştırmasının yapılması yoluna da başvurulmaktadır. Denklem (2.2)’de görülen oranlamanın 0.75 sınır değerinden yüksek veya küçük olmasına göre zemin inorganik veya organik olarak nitelendirilmektedir (Coduto, 2006).

$$\frac{LL[\text{etüv kurusu}]}{LL[\text{hava kurusu}]} \cong 0.85 \geq 0.75 \quad (2.2)$$

Tablo 2.3’deki doğal malzemenin LL değeri havada kurutulmuş deney numunesinin LL değeridir. Doğal malzemenin 100°C ($\pm 5^\circ\text{C}$) sıcaklığındaki etüvde kurularak hazırlanan diğer deney numunesinin LL değeri ise 73.9 çıkmıştır. Buna göre havada ve

etüvde kurutulmuş numunelerin likit limit değerlerinin birbirine oranı 0.85 çıktığından doğal malzeme inorganik bir zemindir.

Her ne kadar likit limit değerlerinin kıyaslanması ile doğal malzemenin organik olmadığı ortaya çıkarılmasına rağmen Karadeniz Teknik Üniversitesi Yapı ve Malzeme Laboratuvarı'ndaki yüksek sıcaklığa çıkabilen izolasyonlu fırın yardımıyla ASTM D 2974'e (2007) göre organik madde tayini yapılarak %4.8 organik madde içerdiği ortaya çıkarılmıştır.

Stabilizasyon çalışmalarını olumsuz etkileyen en zararlı maddeler zeminde bulunabilecek organik madde ve sülfat iyonudur. Organik madde ve sülfat iyonunun ortamda varlığı ilk zamanlar stabilizasyonu olumsuz etkilediği belli olmamakta ancak daha sonra zeminde su içeriğinde meydana gelen değişimlerle birlikte ufalanmaya ve dağılmaya sebep olmaktadır. Bu yüzden iki maddenin varlığının araştırılması stabilizasyon çalışmaları için gereken ön çalışmalardandır.

Sülfat içeren zeminlerin çimentolaşma ürünleri arasındaki etrenjit ve tomasitin ortamda mevcut su ile reaksiyonu sonucu zeminde şişme problemleri meydana getireceğinden doğal malzemenin sülfat içeriğinin tespitine karar verilmiştir. Trabzon Merkez ilçesine bağlı Gürbulak beldesinden alınan doğal malzeme üzerinde Karadeniz Teknik Üniversitesi Kimya Bölümü'nde TS EN 1744-1'e (2000) göre yapılan sülfat tayini testi sonucunda sülfat içeriği 40.2 ppm olarak bulgulanmıştır. Sonuç olarak doğal malzeme sülfat iyonu ve organik madde miktarı bakımından SP ve SKP karışımlarından hazırlanan deney numuneleri için sorun teşkil etmemektedir.

Özgül ağırlık deneyi zemin mekaniği laboratuvarında yapılan en zor deneylerden biridir. Nedeni suyun ve su-kuru örnek karışımının içinden havanın tam olarak alınamamasından dolayı özgül ağırlık gerektiğinden daha küçük ölçülmekte ve hataya düşülmektedir. Özgül ağırlık değerini değiştiren bir diğer faktörde zeminin organik madde içermesidir. Bu nedenlerle bir zeminin özgül ağırlığının zahmetli buna karşın hata yapmaya açık laboratuvar ölçümü yerine kil ağırlıklı karışımlarda 2.68, kum ağırlıklı karışımlarda 2.65 olarak alınması çoğunlukla yeğlenmektedir. Zaten pratik mühendislik uygulamalarında karşılaşılan inorganik zeminlerin özgül ağırlıkları da Tablo 2.5'de verildiği üzere 2.65 ile 2.80 arasında olmaktadır (Önalp, 2002).

Tablo 2.5. Zeminlerin karakteristik özgül ağırlıkları (Önalp, 2002).

Zemin türleri	Özgül ağırlık
Çakıl ve kum	2.65-2.68
Silt	2.62-2.68
İnorganik kil	2.68-2.76
Organik kil	2.58-2.65

Doğal malzemenin 2.59 olan özgül ağırlığı inorganik zeminlerin özgül ağırlık aralığı olan 2.65-2.80 dışında çıkmıştır. Bunun sebebi olarak doğal malzeme içinde %4.8 oranında bulunan organik madde olduğu düşünülmektedir. Kil ağırlıklı zemin karışımlarının özgül ağırlığını 2.68, organik maddenin özgül ağırlığını 1.21 (Kolay vd. (2011)'den alınmıştır.) alındığında, %4.8 organik madde içeren zeminin özgül ağırlığı, $G_s = 2.68 \times (1 - 0.048) + 1.21 \times 0.048 \approx 2.61$ çıkabilmekte bu değerde doğal malzeme için tespit edilen 2.59 değerine yakın olmaktadır.

2.2.2. Perlit

Perlit terimi magmanın asit fazında oluşan lavların soğuyup, gözle veya mikroskopla görülebilecek bir yapıda kırılmasının meydana getirdiği, kütle bünyesinde su damlacıkları bulunan, volkanik bir cam türünü ifade eder. Perlit ismi bazı perlit tiplerinin kırıldığında inci parlaklığında küçük küreler elde edilmesi nedeniyle inci anlamına gelen perle kelimesinden türetilmiştir.

Doktora çalışmasında ERPER Madencilik Mühendislik Limited Şirketi'nin Erzincan iline bağlı Mollaköy beldesinde yer alan perlit ocağından alınan ham, kırılmış ve elenmiş perlit agregası kullanılmıştır. Şekil 2.10'da Erzincan Mollaköy'deki perlit tesisine ait fotoğraflar verilmiştir.

Özel dokulu, iç yapısında belli oranda su içeren, asit bileşimli volkanik bir cam olarak ifade edilen perlit fibrik yapılı değildir. Nitrat, sülfat, fosfor, ağır metal, radyoaktif element ve organik madde içermez. Dolayısıyla kimyasal olarak oldukça saftır. İnsan sağlığı için tehlike yaratabilecek herhangi bir bileşik içermemektedir.



Şekil 2.10. Erzincan Mollaköy'deki perlit ocağı ve agrega konkasörü

Deneyleerde kullanılan Mollaköy perlitin mühendislik özellikleri Tablo 2.6'da ve kimyasal analizi Tablo 2.7'de verilmektedir.

Tablo 2.6. Mollaköy perlitinin mühendislik özellikleri

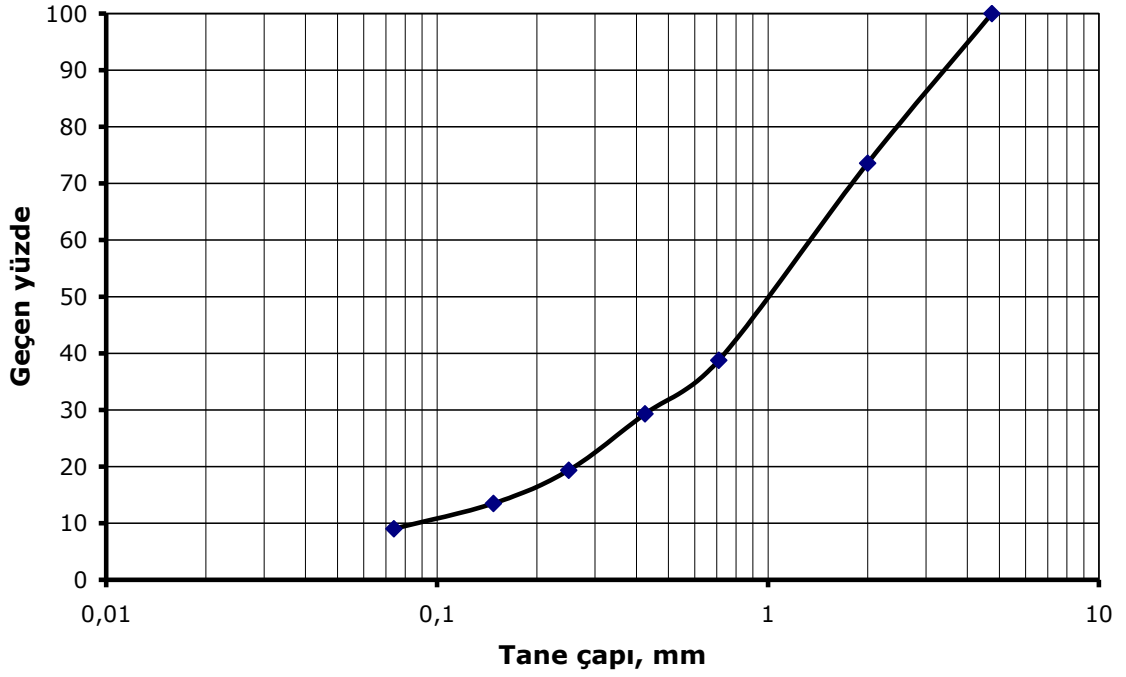
Mühendislik parametreleri	
Tanım	Konkoidal, sferidal kırıklı camsı volkanik kayaç
Renk	Beyaz, gri ve tonları
Kıvam limitleri	NP
Özgül ağırlık, G_s	2.38
Sertlik	5-6
pH	6.5
Sınıflandırma	
USCS	SW-SM (İyi derecelenmiş kum ve az silt)
AASHTO	A-1-b
Standart kompaksiyon parametreleri	
Optimum su içeriği, w_{opt} (%)	2.04
Maksimum kuru yoğunluk, $\rho_{d,maks.}$ (Mg/m^3)	1.556
Dayanım parametreleri*	
Görünür kohezyon, kPa	0.0
İçsel sürtünme açısı, °	54.9

* Standart kompaksiyon deneyi ile hazırlanmış numuneler ile yapılmıştır.

Tablo 2.7. Mollaköy perlitinin kimyasal özellikleri

Bileşik formülü	Miktar, %
SiO ₂	75.30
Al ₂ O ₃	9.35
Fe ₂ O ₃	1.36
Na ₂ O	0.05
K ₂ O	4.82
Aktif CaO	0.76
SO ₃	0.06
MgO	0.05

Doktora çalışmasında kullanılan Mollaköy yöresi perlitinin tane boyutu dağılım eğrisi Şekil 2.11’de gösterilmiştir.



Şekil 2.11. Perlitin tane boyutu dağılım eğrisi

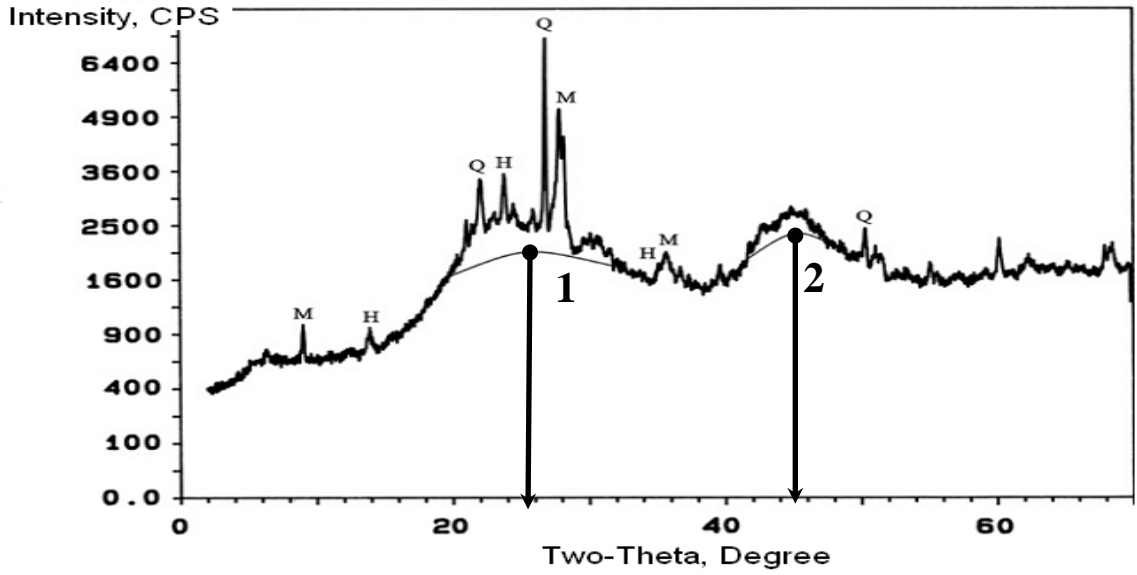
Şekil 2.11’de görülen tane boyutu dağılım eğrisi dikkate alınarak perlitteki çakıl, kum, silt ve kil yüzdeleri MIT ve USCS’ye göre Tablo 2.8’de verilmiştir. Perlitin tane boyutu dağılım eğrisinden elde edilen 4 No.lu elek üstü = %0.0, 200 No.lu elek altı = %9, NP, C_u = 16.7, C_r = 1.7 olmak üzere USCS sınıflandırmasında SW-SM, iyi derecelenmiş

kum ve az silt olarak adlandırılırken, 10 No.lu elekten geçen = %73.6, 40 No.lu elekten geçen = 29.3, 200 No.lu elekten geçen = %9, NP ve GI = 0 ile AASHTO zemin sınıflandırma sisteminde A-1-b, taş parçaları, çakıl ve kum sınıfına girmektedir.

Tablo 2.8. Perlitteki zemin sınıflarının MIT ve USCS'ye göre yüzdeleri

Sınıflandırma türü	Çakıl	Kum	Silt	Kil
MIT ve TS 1500	%26.4	%64.6	%9	-
USCS	%0	%91	%9	

Erzincan Mollaköy'den tedarik edilen ham perlitin X-ışını kırınım analizi Şekil 2.12'de verilmiştir.



Şekil 2.12. Erzincan Mollaköy yöresi perlitin X-ışını kırınım deseni

Bu X-ışını kırınım desenine göre mineralojik bakımdan ana bileşenleri kuvars, muskovit ve hauyindir. X-ışını kırınım deseninde (difraktogram) kristalleşmiş minerallerin çok keskin pikler görülürken, kristalleşmemiş (amorf) katı parçacıklar yatık tepeler şeklinde bir yol izlemektedir. Bundan dolayı X-ışını kırınım eğrilerindeki yatık tepeler materyalin amorf doğasının bir işareti kabul edilmektedir. Şekil 2.12'deki Mollaköy yöresi ham perlitine ait X-ışını kırınım deseninde $2\theta = 25.8^\circ$ ve 45.1° 'deki kuvarsin ana

piklerindeki tepelerin yatıklığı ve yakınlığı perlitin silika yapısının amorf fazının belirtisidir.

Puzolan olarak kullanılacak malzemelerde bulunması gereken önemli özelliklerden toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarı, sülfat içeriği, puzolanik aktivite indeksi ve tane inceliğinin Mollaköy yöresi perlitindeki durumu Tablo 2.9'da gösterilmektedir.

Tablo 2.9. Puzolan olarak Mollaköy yöresi perlitinin durumu

	Perlit
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$, %	86.01
SO_3 , %	0.06
<i>Puzolanik aktivite indeksi, %</i>	
7. gün	78.00
28. gün	80.00
<i>İncelik, %</i>	
45 μm elekta kalan malzeme miktarı	91.00

Tablo 2.9'daki özelliklerin yanı sıra stabilizasyon aktivitesini etkileyen bir diğer özellikte materyalin amorf (camsı) yapıya sahip olmasıdır. Çünkü kimyasal (puzolanik) reaksiyonlar için puzolanlar amorf yapıda olmalıdır. Örneğin ham perlit gibi zengin silis ve alümin içeriğine sahip olan killer amorf yapıda değil de kristalli yapıda olduğundan puzolanik aktiviteye sahip olamamaktadır (Ancak killer 700~900 °C arasında ısıl işleme tabi tutulduğunda toz haline getirildiğinde kristal yapısı bozularak yarı amorf yapıya sahip olabilir. Böylece puzolan olarak kullanılır hale gelebilmektedirler.).

Perlit gibi doğal puzolanlar silikat (SiO_2) ve alüminat (Al_2O_3) esaslı olmalarına rağmen yetersiz CaO içeriği nedeniyle büyük çoğunluğu kendi başlarına bağlayıcılık özelliğine ya çok az ya da hiç sahip değildirler. Uygun su içeriğinde ve normal ortam sıcaklığında kireç ve çimento gibi yüksek CaO içeren materyallerle bu eksiklik giderilebilmektedir. Bu yüzden yüksek CaO içermeyen puzolanlar, ikincil bağlayıcı maddeler olarak anılırlar.

Perlitin %0.76 gibi düşük CaO içeriğinden dolayı zeminde dayanım ve durabilitede olumlu etkiler meydana getiren çimentolaşma reaksiyonları oluşmayacaktır. Perlitin aktif CaO eksikliğini kireç gibi %65'lik yüksek aktif CaO içeren bir bağlayıcı ile bu etken

maddenin ortama verilmesinin sağlanması düşünülmüştür. Bu yüzden sadece perlitin kullanıldığı SP karışımlarının yanısıra perlit ve kirecin birlikte kullanıldığı SKP karışımlarının da mühendislik özelliklerindeki değişimin incelemesi de doktora çalışması kapsamına dâhil edilmiştir.

2.2.2.1. Dünya’da Perlit

Dünya’da önemli perlit rezervleri tersiyer-erken orta kuvaterner yaşlı volkanik bölgelerde yoğunlaşmıştır. Perlit bakımından önemli bazı ülkelerin görünür ve tahmini rezervleri Tablo 2.10’da verilmiştir. ABD, Yunanistan, Türkiye, Japonya, İtalya ve Ermenistan perlit kaynakları bakımından zengin ülkelerdir. Tablo 2.10’da görülebileceği gibi Türkiye’nin görünür rezervi 30 milyon ton gözüküyorsa da yapılan çalışmalar toplam mümkün perlit rezervlerinin 5.7 milyar ton olacağı tahmin edilmektedir. Bu miktar dünya toplam tahmini rezervin %74’üne oluşturmaktadır (DPT, 2001).

Tablo 2.10. Önemli perlit yatakları ve rezerv miktarları (DPT, 2001).

Ülkeler	Görünür rezervler (milyon ton)	Tahmini rezervler (milyon ton)
ABD	50	200
Yunanistan	50	300
Türkiye	30	5700
Diğer	600	1500
Toplam	730	7700

2.2.2.2. Türkiye’de Perlit

Ülkemizde önemli perlit rezervleri, tersiyer-erken orta kuvaterner yaşlı volkanik bölgelerde yoğunlaşmıştır. Genel olarak riyolitik volkanizmalarla ilgilidir. Türkiye’deki perlit oluşumları yüzeye oldukça yakın oluşumlar olduğundan (Perlit cevheri yataklarının derinliği 25-90 m arasındadır.) üretim zorluğu bulunmamaktadır. Aynı şekilde perlit kalitemizde oldukça iyidir. Tüm bu avantajlara rağmen rezerv payını üretime

yansıtamamaktadır. Ülkemizdeki önemli perlit yataklarındaki rezerv miktarları Tablo 2.11’de özetlenmiştir.

Türkiye’de tüvenan perlit üretimi 1994-1999 yılları arasında ortalama yıllık 150.000 ton civarındadır. Ülkemizde perlit bakımından zengin kaynak ve kapasiteye sahip olmasına rağmen yurtiçi talep 8000~8500 ton/yıl olarak üretime göre çok sınırlı kalmaktadır. Perlit iç tüketimde pek çok avantajına rağmen gerekli ivmeyi bir türlü kazanamamıştır. İç talepteki yetersizlik Türkiye’yi ihracata yöneltmiştir. Türkiye’nin perlit ihracatındaki miktarı yıllara göre Tablo 2.12’de DPT’nin (2001) çalışma raporu esas alınarak verilmiştir.

Ülkemizden son yıllarda bilhassa AB ülkeleri (İngiltere, Fransa, Danimarka gibi), Hindistan, Makedonya, Venezüella, Suudi Arabistan, Brezilya ve Güney Kore’ye perlit ihraç edilmektedir. Dünya’da Türkiye’nin en güçlü rakibi Yunanistan olmaktadır. Zaten Yunanistan en büyük perlit kullanıcısı ABD pazarını büyük bir oranda elinde bulundurmaktadır (DPT, 2001).

Tablo 2.11. Türkiye’nin perlit rezervleri (DPT, 2001).

Bölge		Rezerv miktarı (bin ton)
Ankara	Çamlıdere	8.000
	Çubuk	32.000
	Kızılcahamam	34.200
Balıkesir	Evrindi	25.000
	Savaştepe-Sındırğa	47.000
Adilcevaz/Bitlis-Erciş/Van-Tatvan		1.400.000
Orta/Çankırı		30.000
Biga/Çanakkale		3.400
Seyitgazi/Eskişehir		20.000
Mollaköy/Erzincan		27.000
Pasinler/Erzurum		100.000
İzmir	Bergama	16.500
	Dikili	8.000
	Foça	16.500
	Menderes (Cuma Ovası)	60.000
Sarıkamış/Kars		1.500.000
Manisa	Demirci-Soma	18.600
	Saruhanlı	18.000
Nevşehir	Acıgöl	86.2000
	Derin kuyu	350.000

Tablo 2.12. Türkiye'nin perlit ihracatı (DPT, 2001).

Yıllar	Miktar (bin ton)
1994	165.955
1995	199.862
1996	196.077
1997	223.966
1998	169.887

2.2.2.3. Perlit Üretim, Tüketim ve Stok Durumu

Perlit cevheri açık işletmecilik metodu ile genellikle patlatılarak yapılır. Daha sonra kırma, öğütme, sınıflandırma işlemlerini takiben genleştirme işlemi yapılmaktadır.

Perlit madenciliği çoğunlukla yerleşim alanlarından uzak bölgelerde yapıldığından ve işgal ettiği alanların az olmasından dolayı ciddi bir sorun çıkarmaz. Terk edilen ocaklarda açıkta kalan posa malzemesinin de çevre sağlığı için bir problem yaratmadığı bilinmektedir. Aslında perlitin ocağının işlenmesi kimyasal işlem değil fiziksel işlemlerle sağlandığı için üretimden kaynaklanan atıklar bulunmamaktadır. Sadece kırma-eleme işlemleri esnasında çok toz çıkışı olabileceğinden bu ünitelerin bulunduğu yerlere toz tutma ekipmanları yerleştirilmektedir.

Perlit genelde kolayca kırılabilen, iyi öğütülebilen bir kayadır. Perlit ile ilgili talepler değişik boyutlara yöneldiğinden üretimde esneklik önem taşımaktadır. Piyasada en çok aranan 0.03-1 mm ile 0.8-4 mm arasındaki tane boyutlarıdır.

Öğütülmüş boyutlanmış ham perlit 400°C sıcaklığa kadar bir ön ısıtmaya tabi tutulur. Daha sonra 700-1200 °C arasında sıcaklığındaki ortama verildiğinde içindeki suyun buhar halinde çıkmasıyla kısa sürede mısır gibi patlayarak hacmi 4-30 kat artar. Bu şekilde oluşan ürüne genleştirilmiş perlit adı verilmektedir. Bu olaya intümesens denilmektedir.

Tüvenan cevherin ocağa yakın bir yerde ilk kaba kırmadan geçirilip gerekli tane iriliğine getirilmesi, genleşen perlitin ise hafif fakat hacimce büyük olduğundan pazar alanlarına yakın yerlerde tesisler kurularak genleştirme işlemi yapılması ekonomik bulunmaktadır.

Genleşme tesisinde kullanılacak fırının tipi perlitin cinsine ve istenen ürüne göre değişmekle beraber son yıllarda sabit dikey fırınlar tercih edilmektedir. Bu fırınlar genellikle mazotla çalışmaktadır.

Günümüzde ham perlit ve işlenmiş perlit en çok üreten ve tüketen ülke ABD'dir. Perlit yatakları ülkenin batı eyaletlerinde (New Mexico, Arizona, California, Colorado, Nevada, Oregon, Utah) bulunmaktadır. Genleştirme tesisleri ise tüketim alanlarına yakın olacak şekilde doğu eyaletlerinde yer almaktadır. Okyanus navlunu demiryolu taşımacılığına göre daha ucuz olduğundan dolayı kırılmış ve elenmiş perlit Avrupa'dan özellikle Yunanistan'dan ithal edilmektedir. 1995'li yıllarda ABD ve Yunanistan'ın yanına Japonya ile Türkiye ana perlit üreticisi olarak gelmişlerdir. Avrupa Birliği ülkeleri de başta Belçika, Lüksemburg ve Fransa olmak üzere geniş çapta ithalat yapmaktadırlar (1995 yılı için 324 bin ton). Bu ithalatın büyük bir kısmı olan %43'lük dilimi Türkiye sağlamaktadır.

Perlit tüketimini etkileyen en önemli faktör inşaat sektöründeki aktivitedir. Bu nedenle perlit talebi inşaat sektöründeki gelişme ve durgunluklara paralel bir durum arz etmektedir. Perlit üretimi talep miktarı ile orantılı olarak gittiği için stok miktarı yok denecek az veya sınırlı tutulmaktadır.

Ham perlit kimyasal bileşimi itibariyle silisli ve alüminyumlu bileşikler içerdiğinden kalsiyum esaslı bağlayıcılar ile kimyasal reaksiyona girerek hidrolik aktivite gösterir. Bu özelliği nedeniyle inşaat sektöründen ham perlit olarak talep gelmektedir. Ham perlit kaya kütleli şeklinde bulunduğu perlit ocaklarında kırılma-öğütülme ve elenmesi gerektiği gibi doğal olarak agrega halinde bulunduğu ocaklarda vardır. Bu şekilde doğal agrega olarak bulunan perlitin ülkemizde geniş rezervleri vardır (özellikle Erzincan, Nevşehir, Ankara civarındaki perlit yatakları).

Ham perlit kırılmış, öğütülmüş ve tane boyutlarına ayrılmış olarak;

- ❖ Asit ve bazlara karşı dayanıklı olduğu için kanalizasyon borularının üretiminde
- ❖ İç ve dış inşaat sıvalarında
- ❖ Demiryolu patinaj kumu olarak
- ❖ Filtre kumu olarak su arıtma tesislerinde
- ❖ Asfalt dolgu malzemesi olarak kullanılabilir (DPT, 2001).

2.2.2.4. Perlitin Satış Fiyatı

Yıllar itibariyle dünya perlit satış fiyatları Tablo 2.13'de gösterilmiştir. Perlit fiyatları oldukça sabit kalmaya eğilimlidir. Buna rağmen Tablo 2.13'de işlenmemiş (ham) ve genleşmiş perlitin fiyatları arasında önemli farklılıklar olduğu hemen göze çarpmaktadır.

Tablo 2.13. Yıllar itibariyle perlit satış fiyatları (DPT, 2001).

Yıl	Ham kırılmış, elenmiş	Genleşmiş agrega
1997	55-60 £/ton	288-422 £/m ³
1998-1999-2000	55-60 £/ton	210-300 £/m ³

2.2.3. Kireç

Doktora çalışmasında, Karsan Kireç Sanayi Ticaret A.Ş.'nin ürettiği SKK80-Söndürülmüş Kalker Kireci kullanılmıştır. Tablo 2.14'de bu kirece ait fiziksel özellikler ve Tablo 2.15'de kimyasal analiz sonuçları verilmiştir.

Tablo 2.14. Deneyde kullanılan kirecin fiziksel özellikleri

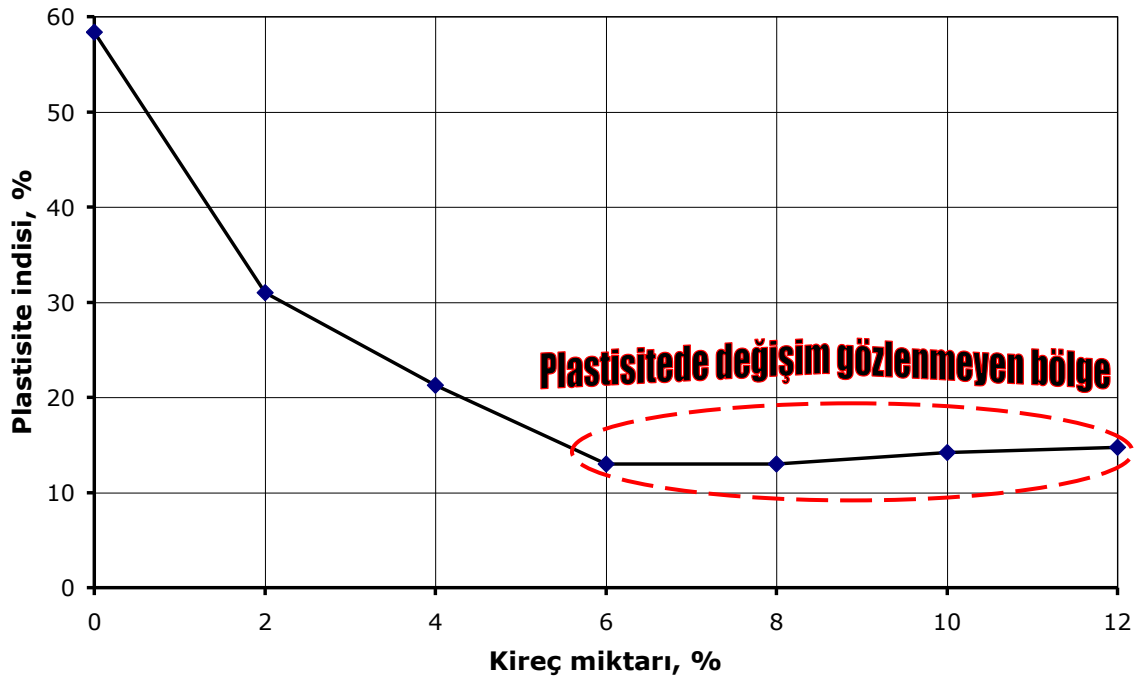
Fiziksel parametreler	
200 No.lu elek üstü	% 3.8
Yoğunluk, Mg/m ³	0.48
Özgül ağırlık	2.37
pH değeri	12.4

Tablo 2.15. Deneyde kullanılan kirecin kimyasal bileşimi

Kimyasal bileşimi	Miktar, %
Ca(OH) ₂	85.80
Aktif CaO	65.00
MgO	1.40
SiO ₂	0.23
Al ₂ O ₃	0.11
Fe ₂ O ₃	0.40

Şekil 2.13'de doğal malzemenin kireç doygunluk derecesinin belirlenmesi amacıyla çeşitli kireç oranlarında hazırlanan karışımların LL, PL ve bunlara bağlı olarak PI değerleri araştırılmıştır. 1.4.3.1. Kireç ile Zemin Stabilizasyonu kısmında kireç doygunluk derecesi ile ilgili olarak "Her zeminin kendine ait bir kireç doygunluk derecesi mevcuttur. Bu

doygunluk derecesine kadar eklenen kireç; ancak katyon değişimi, flokülleşme ve agregasyon aşamalarındaki reaksiyonlar için gerekli olan kireç ihtiyacını karşılamaktadır. Taneler arasında ayrıca çimentolaşma reaksiyonlarının olması isteniyorsa bu limit değerin üzerinde bir kireç miktarının zemine katılması gerekmektedir. Burada fazlada eklenen kireç miktarı ile zeminin plastisitesinde, şişme-büzülmesinde ve işlenebilirliğinde yeni kazanımlar sağlamaktan çok çimentolaşma için gerekli ihtiyaç karşılamaktadır (Al-Rawas vd., 2002; Mathew ve Rao, 1997).” bilgisi verilmişti. Doğal malzemenin plastisitesindeki değişim yaklaşık %6 kireç oranından sonra ihmal edilecek seviyede olduğu Şekil 2.13’de görülmektedir. Bir başka deyişle %6 oranında kireç ile doğal malzemede en iyi katyon değişimi, flokülleşme ve agregasyon elde edilmektedir. Perlitle birlikte kullanıldığı karışımlarda çimentolaşma reaksiyonları (puzolanik reaksiyonlar) olması da istendiğinden katılacak kireç oranı %6’dan fazla olacaktır.

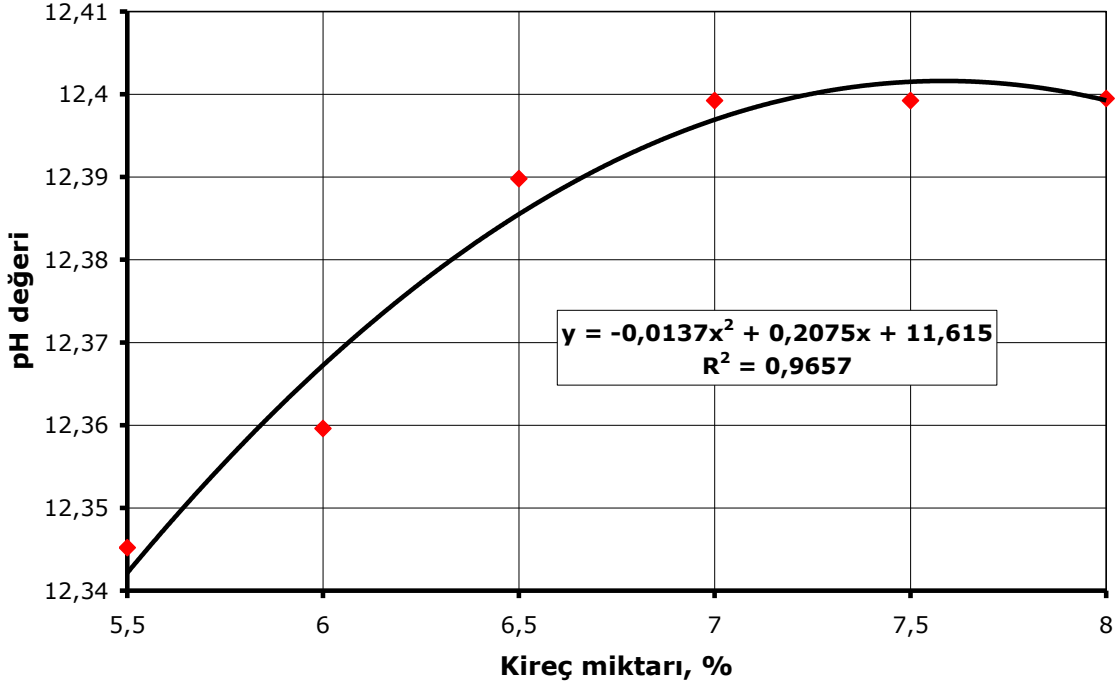


Şekil 2.13. Çeşitli oranlarda katılan kirecin doğal malzemenin plastisitesine etkisi

ASTM D 6276 (2006) standardına uygun olarak zemin stabilizasyon çalışmalarında kullanılacak optimum kireç miktarını saptayabilmek için doğal malzemenin değişik kireç yüzdelerindeki pH değerleri Karadeniz Teknik Üniversitesi Kimya Bölümü’nde belirlenmiştir. Doğal malzemenin değişik miktarlardaki kireç katkısı ile hazırlanan

süspansiyonlarının pH değerinin kireç oranına bağlı olarak değişim grafiği Şekil 2.14 üzerine çizilmiştir.

Kireç suyla karıştırıldıktan sonra elde edilen solüsyonun pH değeri yaklaşık 12.4 civarında olduğundan bu değere karşılık gelen kireç oranı başlangıç değeri alınarak istenen minimum şartları sağlayan en düşük kireç oranı o zeminin kireç stabilizasyonundaki optimum kireç oranı olmaktadır. Şekil 2.14'de pH değerinin 12.4 olduğu andaki kireç miktarı yaklaşık %7.3 olarak tespit edilmiştir.

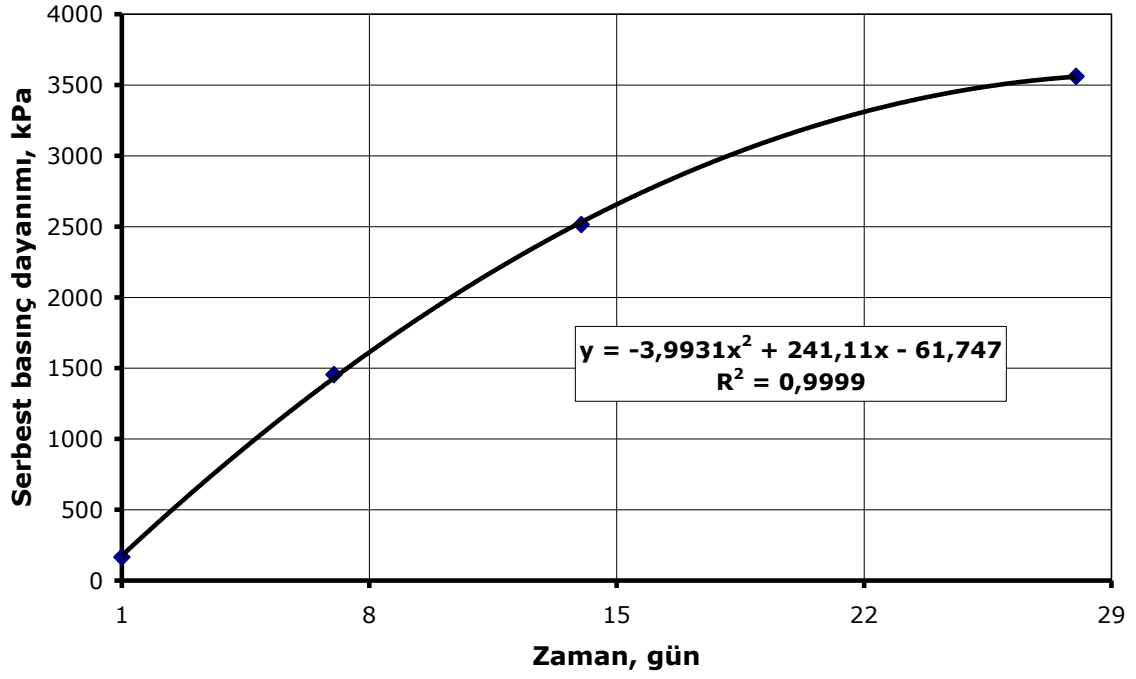


Şekil 2.14. Optimum kireç oranının ASTM D 6276'ya göre tespiti

Tablo 1.7'deki puzolan-kireç kombinasyonlarında sağlanması gereken asgari serbest basınç mukavemeti değerlerini 28. günlük kür sonunda sağlanması için %6.5, %7, %7.5, %8 ve %8.5 oranlarında kireç katkılı doğal malzeme karışımları hazırlanarak serbest basınç değerleri bulunmuştur. Serbest basınçları karşılaştırılan 5 farklı kireç oranından, Şekil 2.15'de görüldüğü gibi kuru doğal malzeme kütesinin %8 oranında kireç kullanıldığında 28. günün sonunda yol temel tabakası için 3450 kPa sınır değeri 3561 kPa ile sağlanmıştır.

Sağlanması gereken bir diğer kriter de Tablo 1.8'deki durabilite kriteridir. 12 ıslanma-kuruma periyodu sonunda numune kütesindeki maksimum izin verilen kayıp

değeri %14'ü aşmama şartı %8 kireç oranındaki karışımda 11. ıslanma-kuruma periyodunda sağlanmıştır. Son 2 ıslanma-kuruma periyodundaki kayıplar %14'ü aşmasına rağmen hesap kolaylığı bakımında doğal malzeme için optimum kireç yüzdesi olarak %8 oranı yeterli görülmüştür.



şekil 2.15. %8 kireç oranındaki serbest basınç dayanımlarının zamana bağlı değişimi

3. BULGULAR

3.1. Deney Verileri

Zeminler genel olarak homojen ve izotrop olmayan ayrıca mühendislik özellikleri çevre koşullarına, jeolojik tarihçesine ve zamana bağlı olarak büyük değişiklikler gösteren inşaat malzemeleridir. Bu açıdan zeminlerin mühendislik davranışlarını tanımlayan genel analitik modellerin ve sabit malzeme katsayılarının belirlenmesi mümkün olmamaktadır. Zemin özelliklerinin her proje sahası için deneysel olarak saptanması ve arazide geçerli olacak koşulların dikkate alınması gerekmektedir. Dolayısıyla deneysel çalışmalar zemin mekaniğinin ayrılmaz ve vazgeçilmez bir parçasını oluşturmaktadır. Ancak deneysel olarak saptanabilen birçok zemin özelliği belli koşullarda geçerliliğini korumaktadır. Kullanılan deneysel yöntemlerin ve zemin davranışını etkileyen faktörlerin iyi anlaşılması, elde edilen sonuçların birçok durumda oldukça yanıltıcı olmasına yol açabilmektedir.

Zemin çok karmaşık bir yapıya sahip olmasına rağmen bazı özelliklerinin belirlenmesi geoteknik uygulamalar için zorunludur. Çünkü zeminler, yapı yüklerini taşıyan ortamlar olmakla birlikte, birçok zemin yapısının hammaddesi olarak da kullanılır. Bu nedenle yer kabuğunu oluşturan malzemelerin yani zemin ve kayaların taşıma gücü, mukavemet, hacimsel değişim davranışı (sıkışma, şişme-kabarma, büzülme, don kabarması vb.), yarma ve dolgu şevlerinin stabilitesi, dren yeteneği, artan su içeriğindeki davranış değişimleri gibi hususlar iyi bilinmelidir. Zeminlerin fiziksel, hidrolik ve mekanik (mühendislik parametreleri) özellikleri tam olarak belirlenebildiği takdirde zeminlerin analizi, dizaynı ve yapım yöntemleri bir başka deyişle geoteknik uygulamaları tam olarak gerçekleştirilebilecektir.

Gürbulak yöresi doğal malzemesinin perlit ve kireç kullanılarak yapılan bu stabilizasyon çalışması kapsamında mühendislik parametrelerinde göstereceği değişimleri ortaya çıkarmak için yapılan zemin deneyleri dört ana grup altında toplanmıştır:

- ❖ İndeks özellikleri (kıvam limitleri, maksimum kuru yoğunluk, optimum su içeriği, geçirimsizlik katsayısı, serbest şişme yüzdesi ve şişme basıncı, tane boyut dağılımları)
- ❖ Sıkışma parametreleri (sıkışma indisi, yeniden yükleme indisi)

- ❖ Dayanım parametreleri (içsel sürtünme açısı, görünür kohezyon, serbest basınç dayanımı)
- ❖ Durabilite (dayanıklılık) tetkikleri (hacimsel stabiliteyi ve serbest basınç dayanımını esas alan iki durabilite tetkiki)

3.1.1. İndeks Özellikleri

3.1.1.1. Kıvam Limitleri

Killer ve kil içeren kuru karışımlar suyla yoğrulduklarında katı-sert görünümünden çamura, su miktarının artırılmasına devam edildiği takdirde sıvıya dönüşürler. Kilin su ile gösterdiği bu özellik değişimine ‘kıvam’ denmektedir. Çakıl, kum ve siltler kıvam özelliği göstermezler. Killer ise kıvam özelliği gösteren yegâne zemin grubudur. Killerin su ile gösterdiği bu davranış değişikliğini benzen veya karbon tetraklorür gibi heterpolar sıvılarla göstermemesi kil-su ilişkisini araştırmacılar için oldukça ilginç hale getirmektedir (Önalp, 2002). Zeminlerin kıvamı, tanecikler arasındaki adezyon kuvvetini (veya bağ kuvvetleri), yük karşısında kayma direncini ile stabilitesini ve hangi su içeriğinde hangi katılığa sahip olacağını belirleyen en temel özelliktir. Ayrıca birbirinden farklı zeminler aynı su içeriğinde farklı kıvamlılık gösterirken, katı halden sıvı hale dönüşürken de birbirinden farklı suya ihtiyaç duyarlar. Bu nedenle zeminlerin hangi su içeriğinde hangi kıvamda olacağını tespit etmek ve özellikle plastik ve likit (viskoz likit) kıvamlarındaki su içeriğinin bilinmesi önemlidir. Örneğin granüler mineral malzemeler su içeriği değiştikçe hacimsel değişimler göstermediği gibi suyun varlığından ötürü yük altındaki davranışlarında da daha az değişim gösterirler. Hâlbuki kohezyonlu zeminler su içeriği değiştikçe büyük hacimsel değişimler gösterdiği gibi en önemlisi su içeriği arttıkça yüke karşı dirençleri düşer ve büyük deformasyonlar gösterirler. Kıvamın sistematik incelenmesi ilk kez 1911’de seramik endüstrisinde çalışan A. Atterberg tarafından yapılmıştır (Holtz ve Kovacs, 1981). Atterberg, killerin suyla karıştırıldığında göstereceği davranışların en az iki parametre ile gösterilmesi gerekeceğini;

- ❖ Viskoz akmanın üst limiti,
- ❖ Viskoz akmanın alt limiti (likit limit),
- ❖ Çamurun metale yapışma özelliğini yitirmesi (yapışma limiti),
- ❖ Kilin plastisite özelliğini yitirdiği limit (plastik limit),

- ❖ Su kaybının hacim azalmasıyla doğru orantısının kaybı (rötre limiti) limitleriyle açıklamıştır (Atterberg, 1911).

Atterberg'in bu 5 limitinden kısmen faydalanılarak inşaat mühendisliğinde önce 1920'lerde K.Terzaghi ardından 1930'larda Casagrande'nin katkılarıyla bugün kullandığımız 3 limit olan Atterberg (kıvam-konsistans) limitleri denilen likit limit, plastik limit ve rötre (büzülme) limiti karayolu inşaatlarında ve toprak işlerinde kullanılmaya başlanmıştır (Casagrande, 1932).

Öncelikle doğal malzemenin SP ve SKP karışımlarında kür sürelerine bağlı olarak kıvam limitlerindeki değişim araştırılmıştır. Bu sayede değişik perlit oranlarının ve kür sürelerinin SP ile SKP karışımlarının kıvam limitlerine etkisi belirlenmeye çalışılmıştır.

Doğal malzeme ve perlitli karışımlarının (SP) likit limit, plastik limit ve rötre limiti deneyleri sonuçları ile karışımların plastisite indisleri Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1. SP karışımlarının kıvam limitleri

Kür süresi		SP0	SP10	SP20	SP30	SP40	SP50
LL, %	1. Gün	87.2	67.1	62.9	51.2	47.2	39.3
	7. Gün		67.9	61.2	53.5	47.3	40.0
	14. Gün		66.9	61.8	54.0	48.9	39.6
	28. Gün		70.0	64.5	57.5	51.0	43.6
PL, %	1. Gün	28.9	23.9	23.8	23.1	21.8	25.1
	7. Gün		24.0	23.7	22.5	22.2	23.9
	14. Gün		24.3	22.9	22.6	21.9	23.7
	28. Gün		20.7	21.3	21.9	22.6	24.1
SL, %	1. Gün	14.4	13.7	14.2	15.5	15.1	19.8
	7. Gün		13.7	14.4	14.6	15.4	18.5
	14. Gün		14.0	13.7	14.6	14.9	18.4
	28. Gün		11.5	12.4	13.6	15.1	17.8
PI, %	1. Gün	58.3	43.2	39.2	28.1	25.4	14.3
	7. Gün		43.9	37.5	31.0	25.1	16.1
	14. Gün		42.6	38.9	31.4	27.0	15.9
	28. Gün		50.0	43.2	35.7	28.4	19.5

Doğal malzeme, kireç ve perlit karışımlarının (SKP) likit limit, plastik limit ve rötre limiti deneylerine ait sonuçlar ile karışımların plastisite indisleri Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2. SKP karışımlarının kıvam limitleri

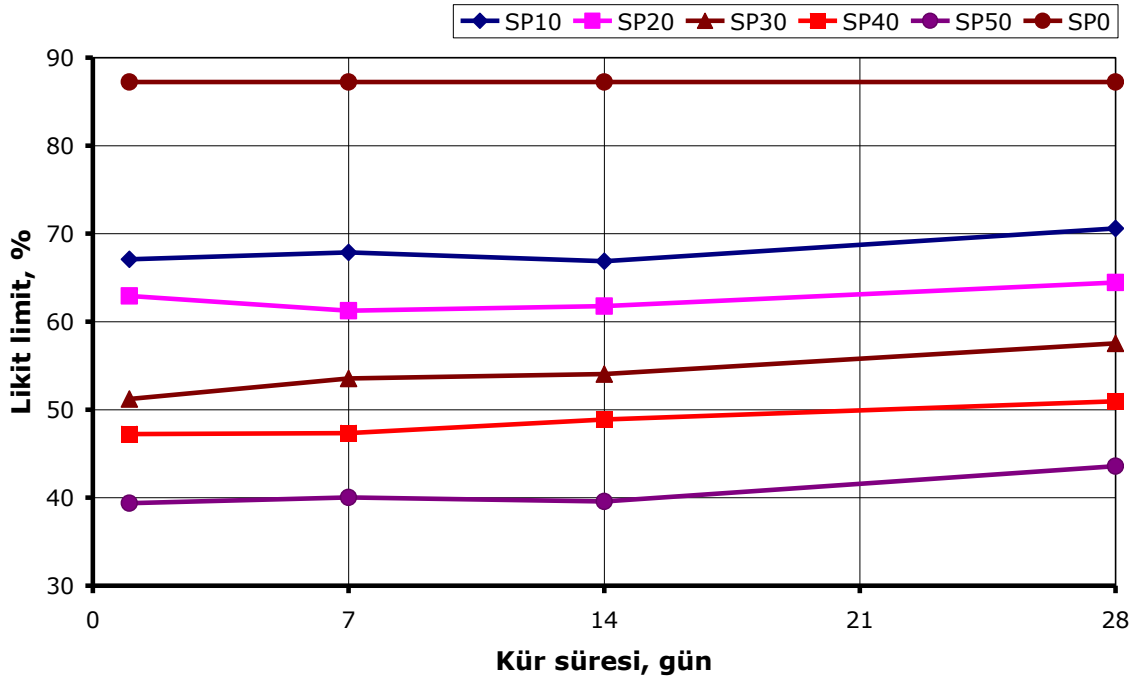
	Kür süresi	SKP0	SKP10	SKP20	SKP30	SKP40	SKP50
LL, %	1. Gün	57.9	54.6	52.7	46.4	42.9	39.2
	7. Gün	70.9	65.3	59.7	56.5	49.4	44.4
	14. Gün	74.4	69.6	62.5	57.5	51.6	NP
	28. Gün	75.3	72.8	71.6	58.5	54.3	
PL, %	1. Gün	42.4	43.1	41.3	39.8	37.1	34.8
	7. Gün	62.5	55.9	51.3	50.7	46.5	44.3
	14. Gün	64.6	61.1	54.5	53.2	50.4	NP
	28. Gün	64.0	61.0	59.8	50.5	47.2	
SL, %	1. Gün	32.5	35.1	33.7	35.2	37.1	32.1
	7. Gün	53.4	47.0	43.8	45.4	46.5	44.2
	14. Gün	53.8	52.2	46.8	48.8	50.4	NP
	28. Gün	52.0	49.3	48.2	43.5	47.2	
PI, %	1. Gün	15.5	11.5	11.5	6.6	5.8	4.4
	7. Gün	8.4	9.4	8.4	5.8	2.9	0.1
	14. Gün	9.8	8.4	8.0	4.4	1.2	NP
	28. Gün	11.3	11.7	11.9	7.9	7.1	

SP karışımlarının Tablo 3.1’deki LL, PL, SL ve PI değerlerinin kür sürelerine göre değişim eğrileri sırasıyla Şekil 3.1, Şekil 3.2, Şekil 3.3 ve Şekil 3.4’de görülmektedir.

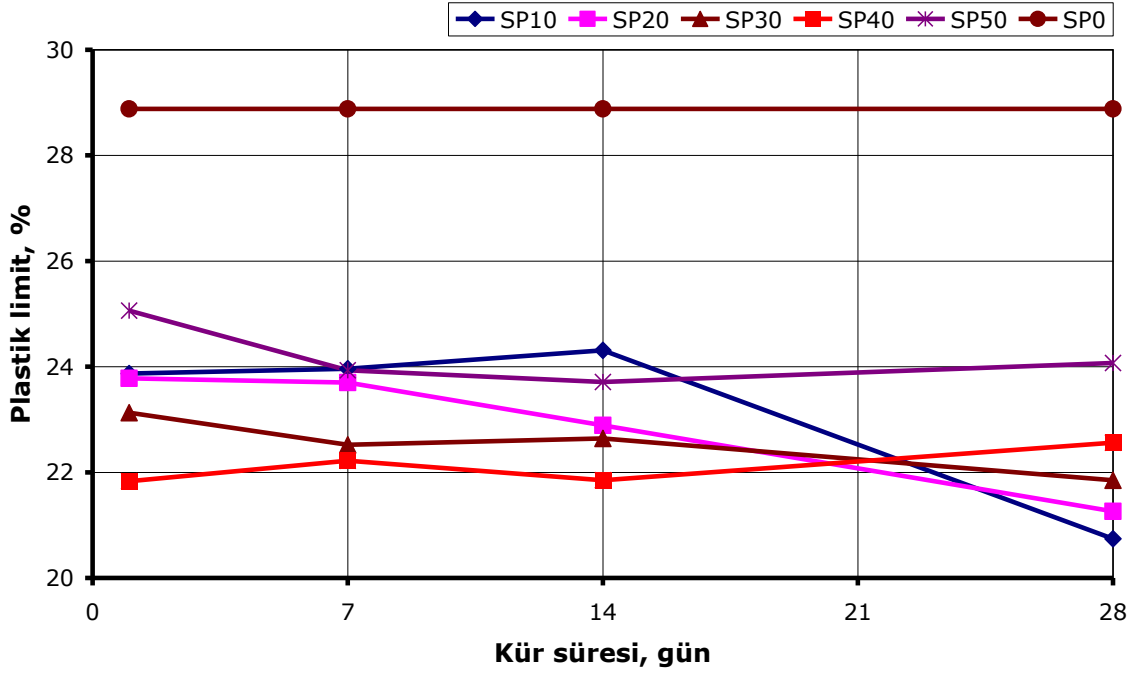
Şekil 3.5’deki Casagrande plastisite kartına SP numunelerin 28. kür günündeki LL ve PI değerleri işaretlenerek doğal malzemenin plastisitesindeki değişim görselleştirilmiştir.

SKP karışımlarının Tablo 3.2’deki LL, PL, SL ve PI değerlerinin kür sürelerine göre değişim eğrileri sırasıyla Şekil 3.6, Şekil 3.7, Şekil 3.8 ve Şekil 3.9’da görülmektedir.

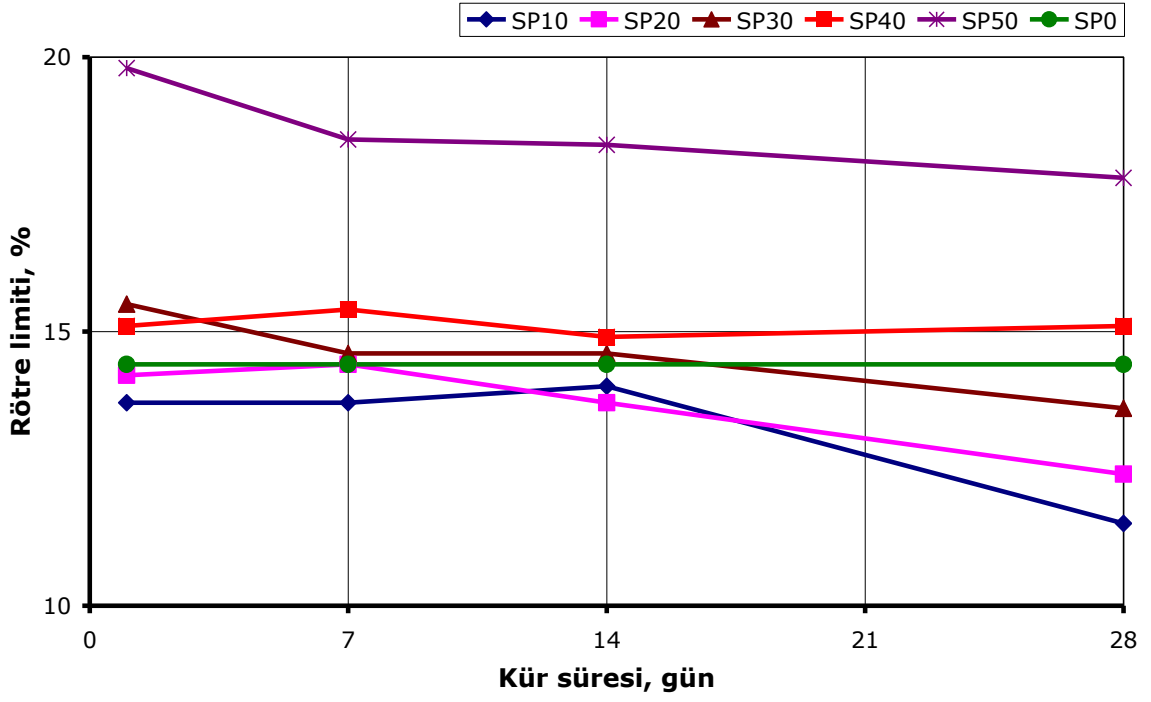
SKP50 karışımının 14. kür günü itibariyle plastisite özelliğini kaybetmesinden dolayı 7 günlük kür süresi sonunda yapılan kıvam deneylerinden elde edilen verilere göre Şekil 3.10’da SKP karışımlarının plastisite kartındaki yerleri işaretlenmiştir.



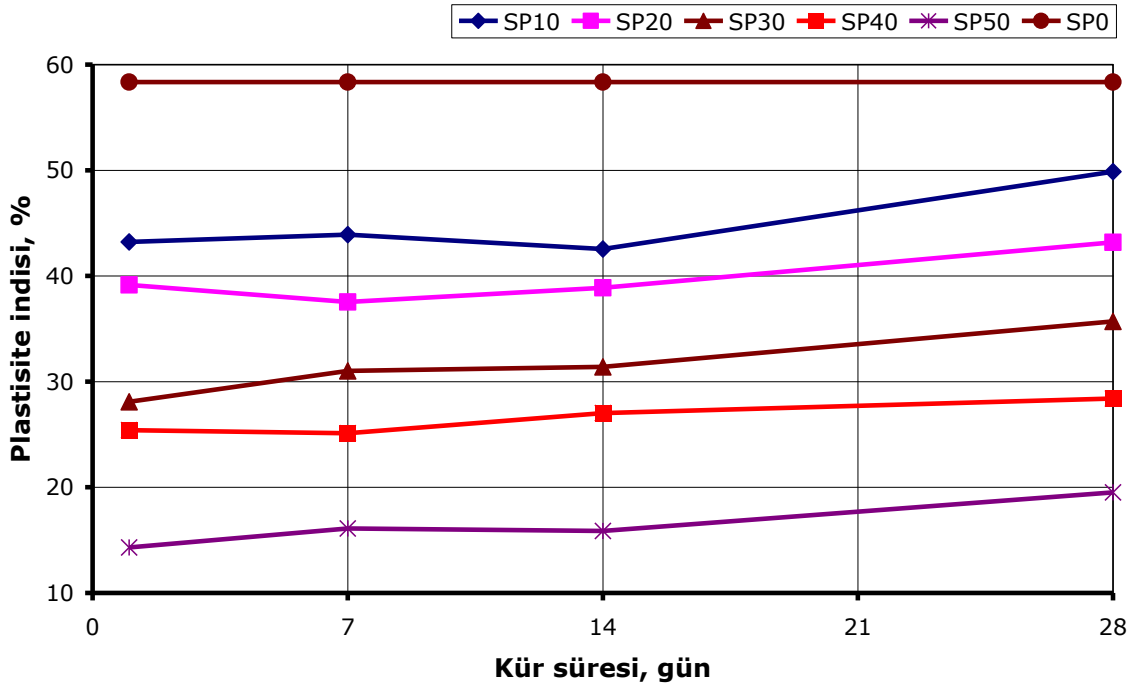
Şekil 3.1. SP karışımlarının likit limitleri



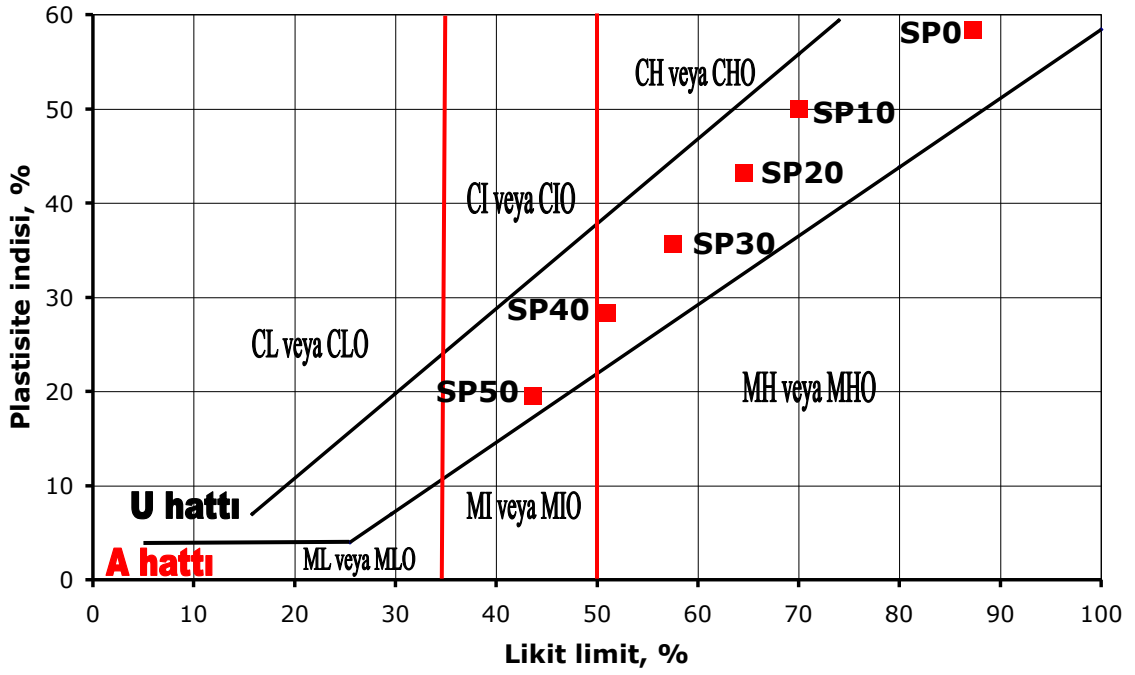
Şekil 3.2. SP karışımlarının plastik limitleri



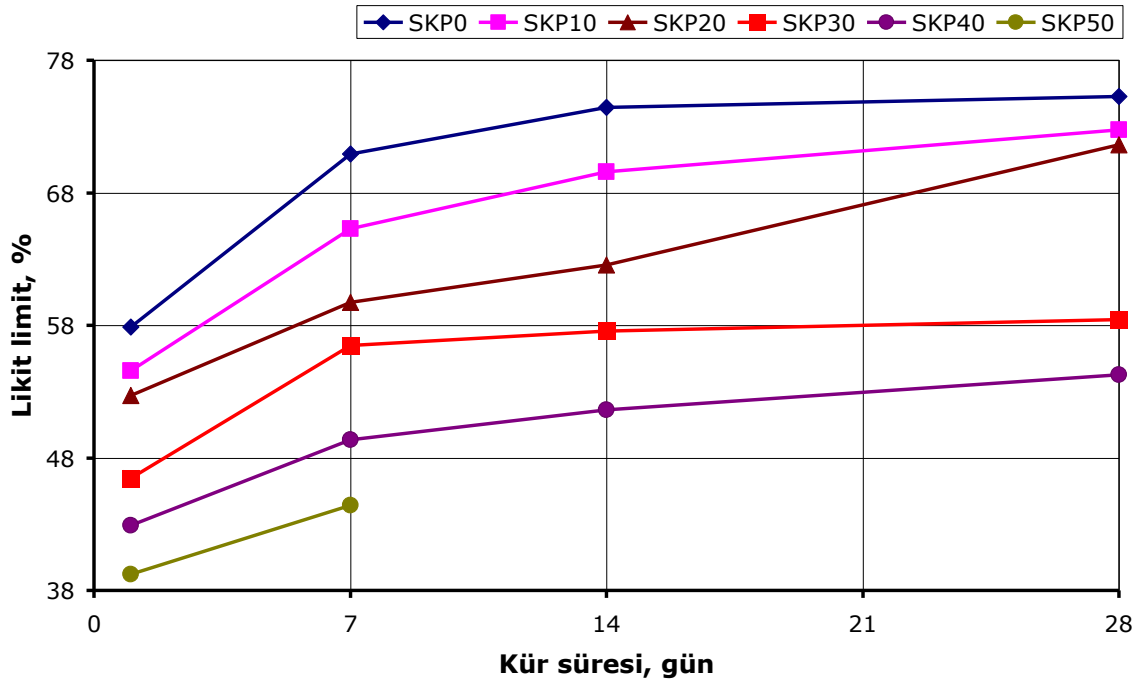
Şekil 3.3. SP karışımlarının rötre limitleri



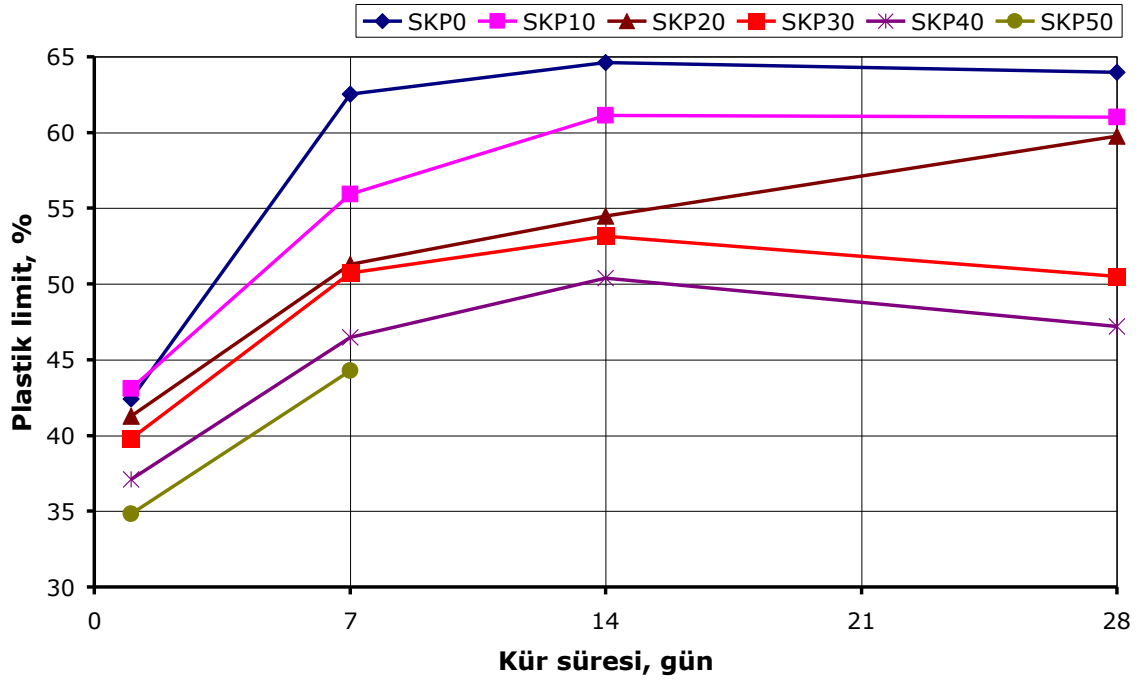
Şekil 3.4. SP karışımlarının plastisite indisleri



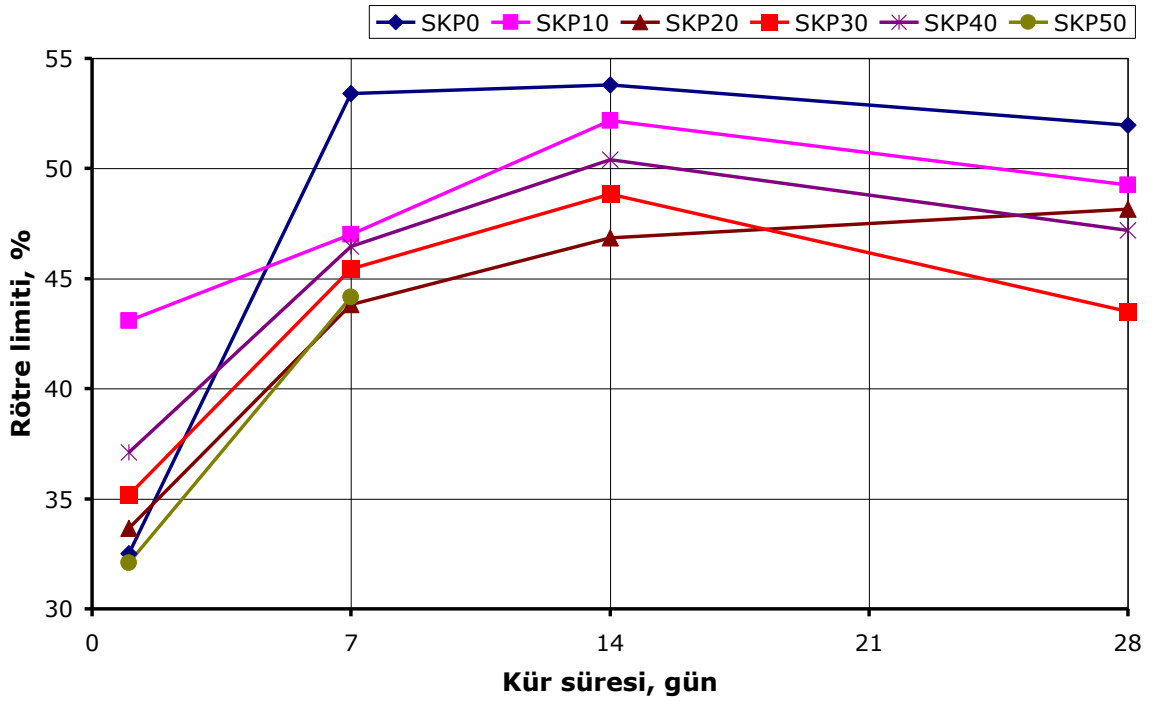
Şekil 3.5. SP karışımlarının plastisite kartındaki yerleri



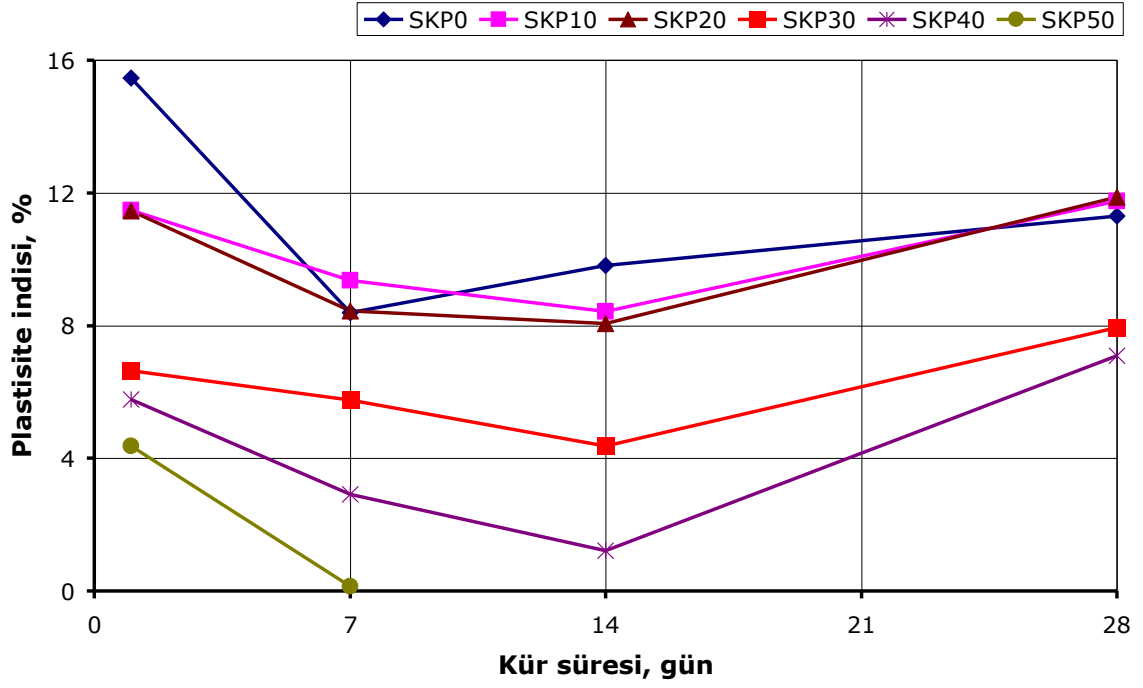
Şekil 3.6. SKP karışımlarının likit limitleri



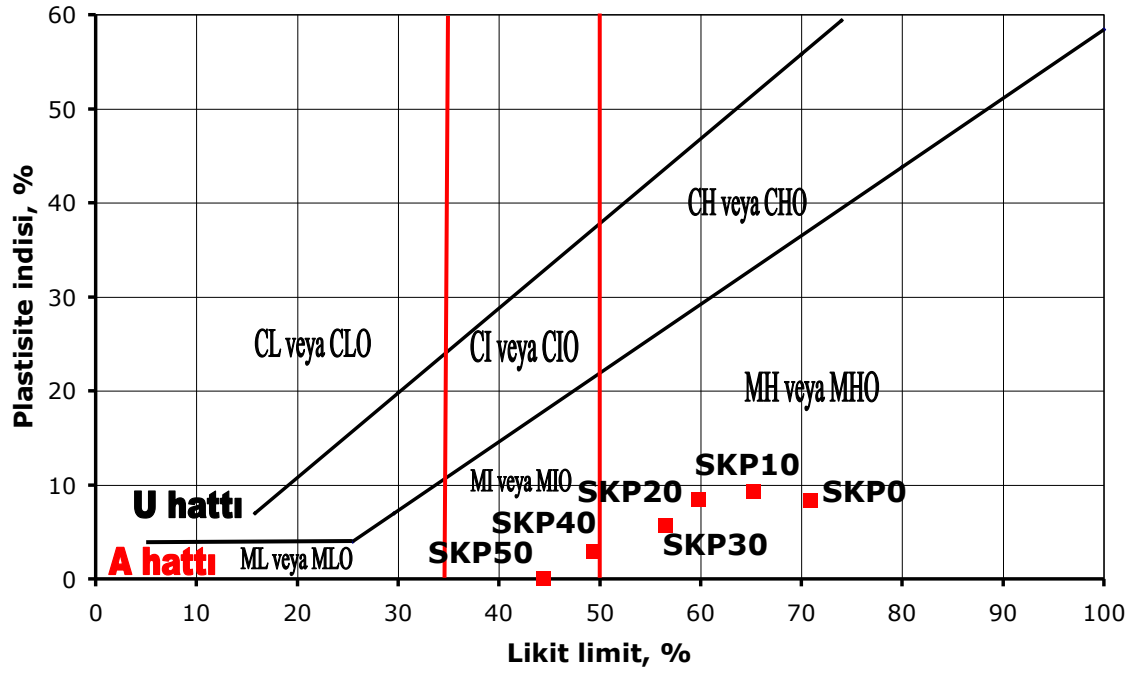
Şekil 3.7. SKP karışımlarının plastik limitleri



Şekil 3.8. SKP karışımlarının rötre limitleri



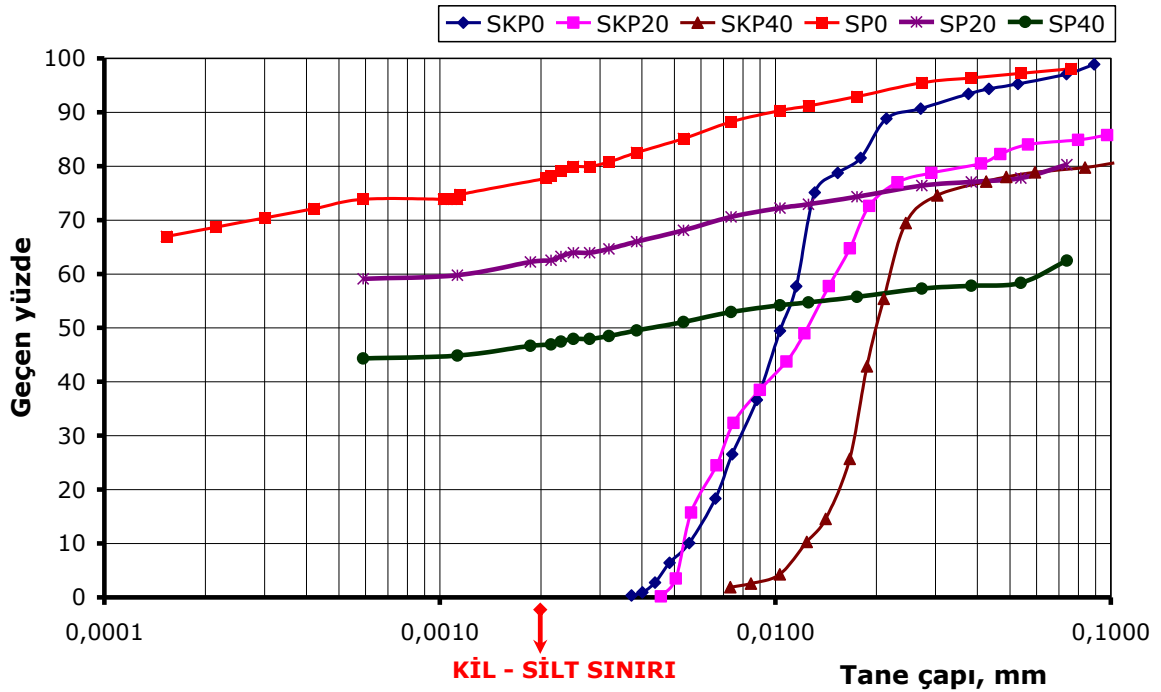
Şekil 3.9. SKP karışımlarının plastisite indisleri



Şekil 3.10. SKP karışımlarının plastisite kartındaki yerleri

Tek başına perlitin ve perlit-kireç kombinasyonunun doğal malzemenin plastisite davranışını değiştirmesi sırasıyla Şekil 3.5 ve Şekil 3.10'da görüldüğü gibi olurken bu değişimin zeminin tane boyutu açısından incelenmesi SP0, SP20, SP40, SKP0, SKP20 ve SKP40 karışımları ile yapılan hidrometre deneyleri sayesinde olmuştur. Böylece perlitin tek başına ve kireç ile birlikte zeminin mikro yapısında ve efektif tane çapında meydana getirdiği değişim ortaya konmuş olacaktır.

Elde edilen hidrometre deney sonuçlarına göre dikkate alınan 6 adet doğal malzeme, perlit ve/veya kireç karışımının Şekil 3.11'deki gibi tane dağılımlarına sahip olduğu görülmüştür.



Şekil 3.11. SP0, SP20, SP40, SKP0, SKP20 ve SKP40 karışımlarının tane boyutu dağılım eğrileri

3.1.1.2. Kompaksiyon Parametreleri

Zeminler gerek üzerlerine inşa olunan yapıların temelleri altında taşıyıcı tabaka olarak gerekse birçok durumda inşaat malzemesi olarak bütün inşaat projelerinde karşımıza çıkmaktadır. Zeminlerin mühendislik özellikleri zeminin cinsi yanında arazi koşullarına bağlı olarak (sıkılık derecesi, su muhtevası, konsolidasyon basıncı, yükleme ve drenaj koşulları gibi) geniş bir aralık içinde değişmektedir. Bundan dolayı inşaat sahasında

karşılaşılan zeminler her zaman istenilen özelliklere sahip olmayabilirler. İnşaat yerinin değiştirilmesinin yanında istenilen özelliklere sahip olmayan zeminlerin atılarak yerine elverişli zeminlerin kullanılması ise teknolojik ve ekonomik nedenlerle çoğu kere daha uygun çözüm olarak kabul edilmektedir. Kullanılacak olan malzeme çoğu kez başka sahadan (ariyet sahası) kazılarak elde edilen zemin olmaktadır. Kazıdan elde edilen bu zeminin herhangi bir dikkat ve itina gösterilmeden gelişi güzel dolgu sahasına dökülmesi yayılması ile oluşturulacak bir dolgu tabakası yüksek poroziteye, permabiliteye (su geçirgenliği), sıkışabilirliğe ve düşük mukavemete sahip olması yanında özellikleri dolgu derinliği boyunca ve noktadan noktaya büyük farklılıklar gösteren heterojen bir görünüm arz edecektir. Bu durumdaki bir zemin tabakasının ise gerek projelendirme yönünden gerekse uygulanacak yükler altındaki muhtemel davranışı açısından kabul edilebilir olmayacağı açıktır. Bu nedenlerle çok eski çağlardan beri insanlar dolgu inşaatlarında dikkatli davranılması ve özellikle sıkıştırılarak yerleştirilmesi gerektiği bilincine sahip olmuşlardır (Özaydın, 1989).

Zeminlere sıkıştırma enerjisi tatbik edilerek zemin içindeki hava boşluklarını azaltmak, zeminin katı tanelerini birbirleri içerisinde daha sıkı olacak şekilde yeniden yerleşmelerini sağlamak ve zeminin hacmini azaltmak yani yoğunluğu artırmak için yapılan işlemlere zemin kompaksiyonu (sıkıştırılması) denilir. Kompaksiyon, zemin tabaka tabaka serilerek silindirlerle vibrasyon ve tokmaktama gibi işlemlerle yapılır. Bu sıkışma ani (kısa sürede) olur (Uzuner, 2001). Kompaksiyon ile zeminin;

- ❖ Zeminin taşıma gücünün artması,
- ❖ Oturmaların azalması,
- ❖ Geçirimsizliğin artması,
- ❖ Zemin mukavemetinin artması,
- ❖ Hacim değiştirme (don kabarması, şişme/büzülme) direncinin artması,
- ❖ Şev stabilitesinin artması sağlanabilmektedir.

Zeminlerin kompaksiyonu ile zeminden havanın çıkması sağlanırken su içeriği önemli mertebede değişmemektedir. Çünkü sıkıştırma işlemi zeminin yapısındaki havanın çıkarılması ile alakalı olduğundan zeminin su içeriği sıkışmadan sonrada pek farklı değildir. Kompaksiyonun amacı minimum seviyede hava boşluğunu sağlayarak maksimum yoğunluğu elde etmektir (Bilindiği gibi zemindeki suyun çıkması ile elde edilen sıkışmaya konsolidasyon, havanın çıkması ile elde edilen sıkışmaya kompaksiyon denilir.). Kompaksiyon zemin ıslah yöntemleri içerisinde en kolay, en ucuz ve özellikle en etkin

olanıdır (Tunç, 2002). Kompaksiyonda zeminin hangi su içeriği ile sıkıştırılması halinde en iyi sonuç elde edileceğinin bulunması en önemli kısmını oluşturur.

Yüksek plastisiteli doğal malzemenin sadece perlit katkılı durumdaki (SP karışımları) optimum su içerikleri ve bu su içeriklerinde elde edilen maksimum kuru yoğunlukları ile boşluk oranları Tablo 3.3’de verilirken bu parametrelerin perlit oranlarına göre değişim eğrileri Şekil 3.12, 3.13 ve 3.14’de gösterilmiştir.

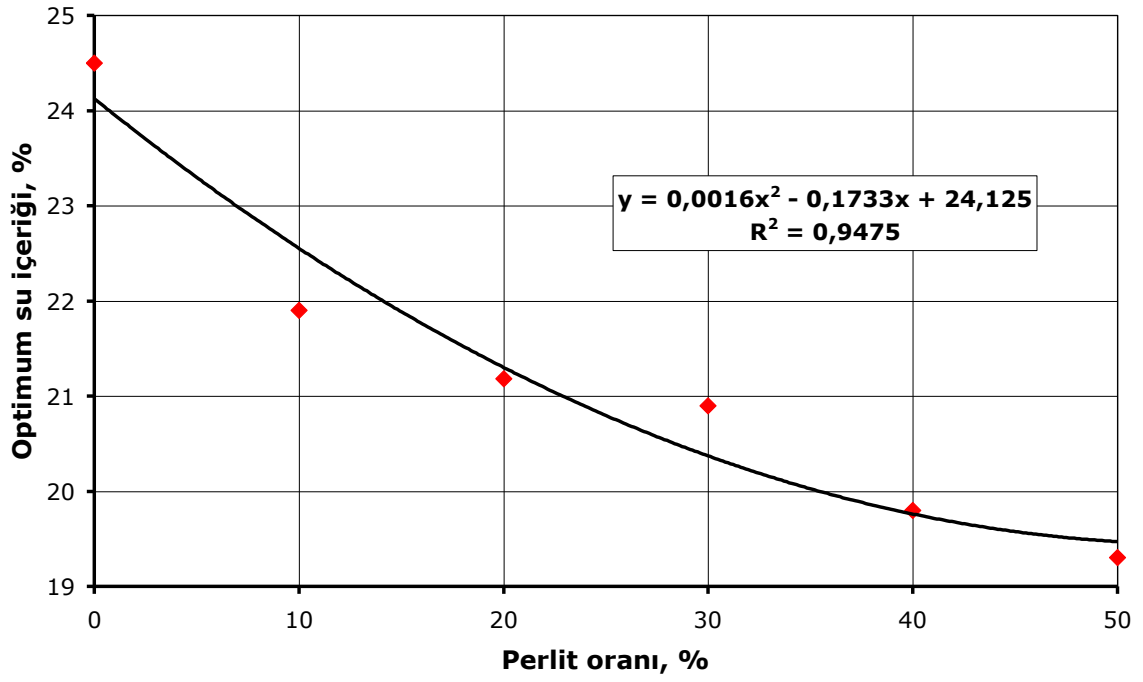
Doğal malzemeye perlit ve kirecin birlikte katılması şeklinde hazırlanan SKP karışımlarının optimum su içeriği, maksimum kuru yoğunluk ve boşluk oranı parametreleri Tablo 3.4’de, bu parametrelerin değişim eğrileri Şekil 3.15, 3.16 ve 3.17’deki gibidir.

Tablo 3.3. SP karışımlarının kompaksiyon parametreleri

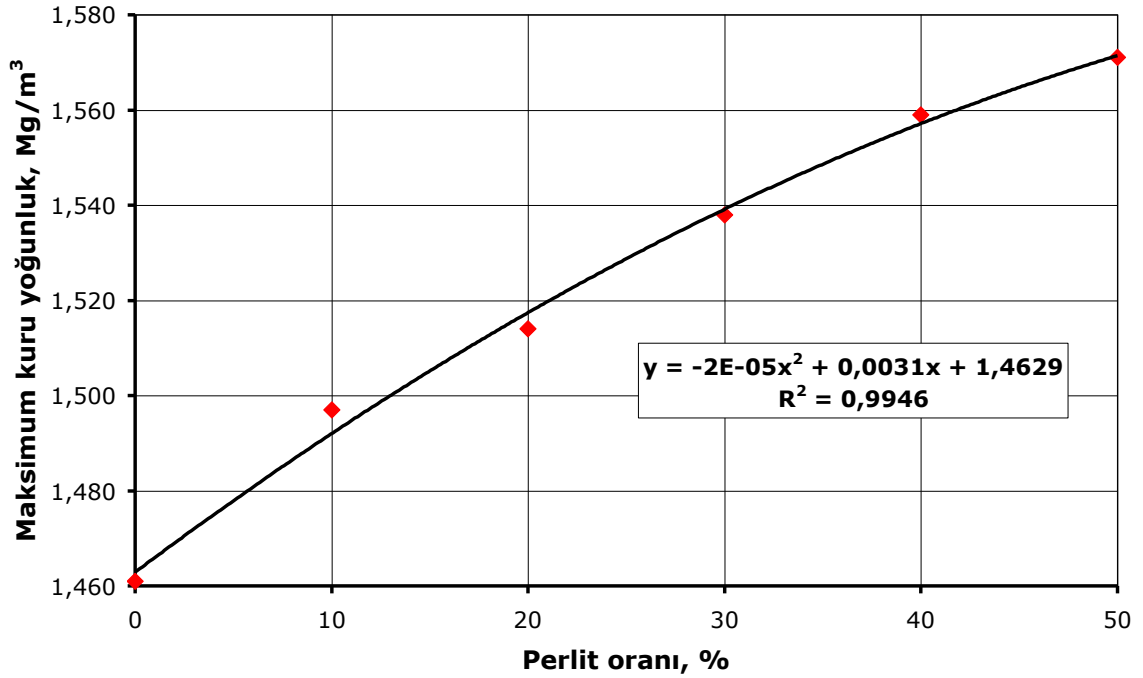
	Optimum su içeriği, %	Maksimum kuru yoğunluk, Mg/m ³	Boşluk oranı, e
SP0	24.5	1.461	0.773
SP10	21.9	1.497	0.716
SP20	21.2	1.514	0.683
SP30	20.9	1.538	0.643
SP40	19.8	1.559	0.607
SP50	19.3	1.571	0.582

Tablo 3.4. SKP karışımlarının kompaksiyon parametreleri

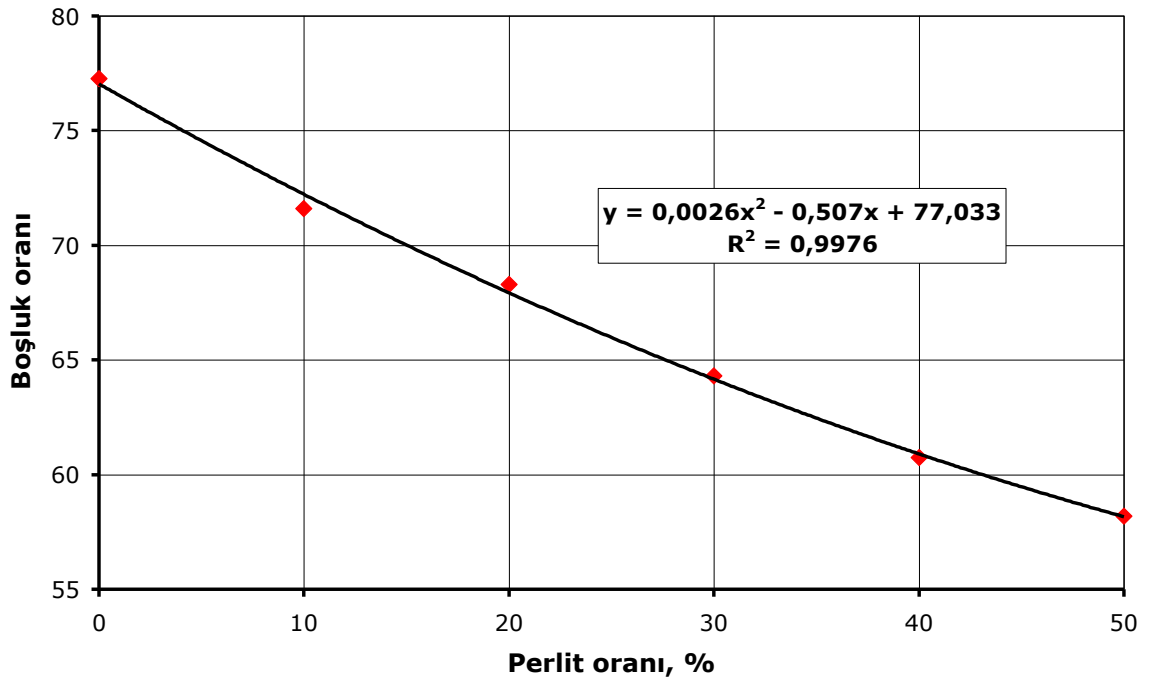
	Optimum su içeriği, %	Maksimum kuru yoğunluk, Mg/m ³	Boşluk oranı, e
SKP0	29.6	1.421	0.810
SKP10	25.0	1.470	0.735
SKP20	22.5	1.509	0.677
SKP30	22.3	1.520	0.651
SKP40	20.5	1.549	0.608
SKP50	20.1	1.562	0.582



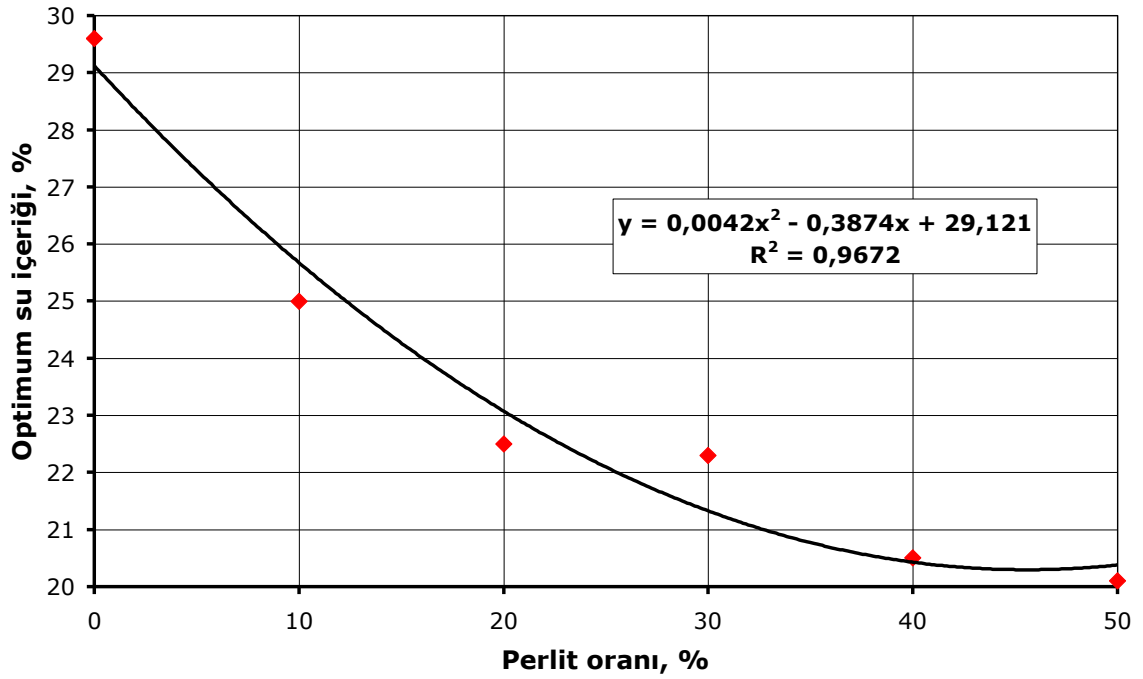
Şekil 3.12. SP karışımlarının optimum su içerikleri



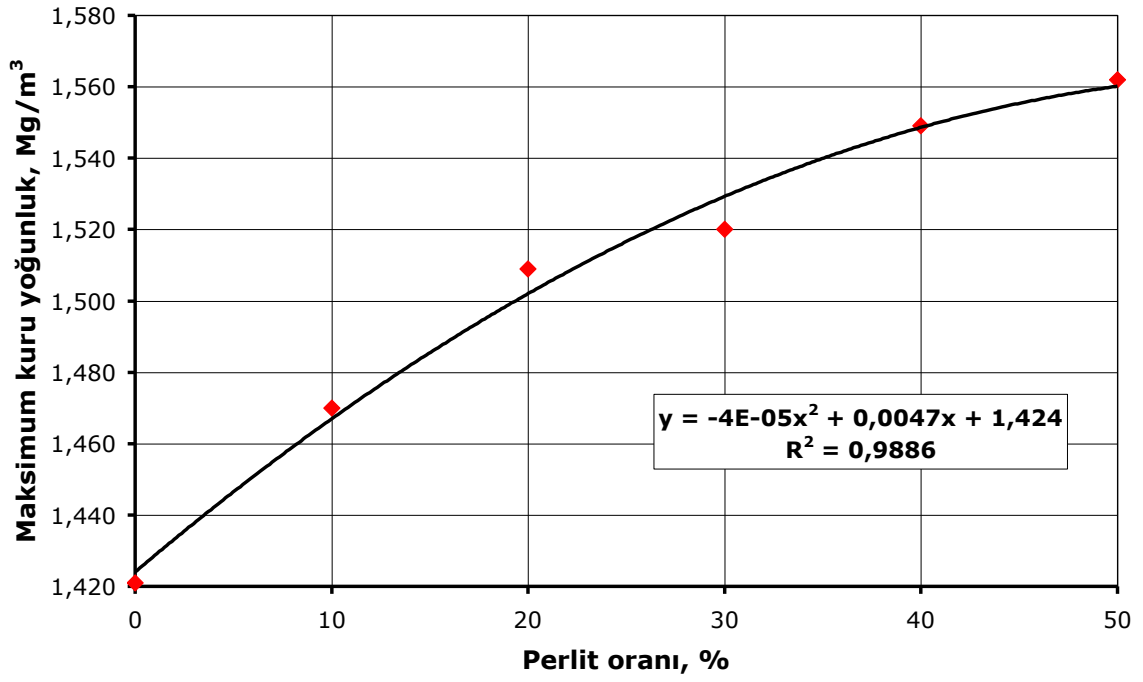
Şekil 3.13. SP karışımlarının maksimum kuru yoğunlukları



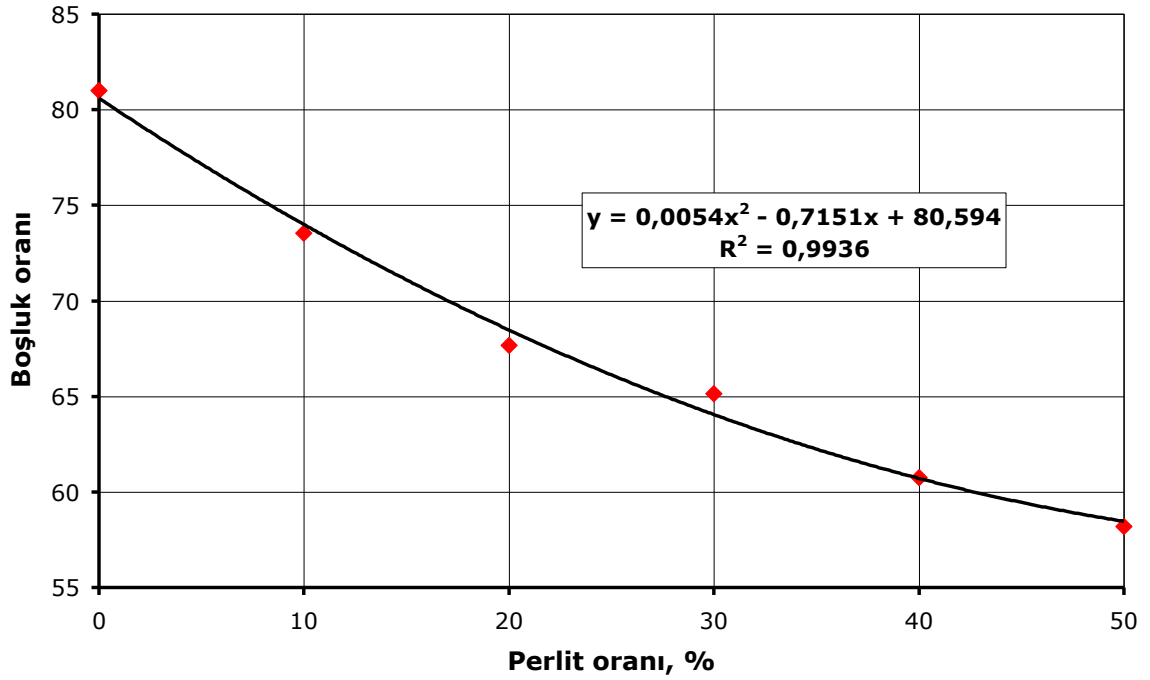
Şekil 3.14. SP karışımlarının boşluk oranları



Şekil 3.15. SKP karışımlarının optimum su içerikleri



Şekil 3.16. SKP karışımlarının maksimum kuru yoğunlukları



Şekil 3.17. SKP karışımlarının boşluk oranları

3.1.1.3. Geçirimsizlik Katsayıları

Zemin boşluklu bir ortam olup boşlukları birbirine bağlıdır. Su zemin ortamında boşluklarda hareketsiz (durgun) durumda bulunabildiği gibi, birbirine bağlı boşluklardan geçerek (hareketli yer altı su durumu) akabilir (Uzuner, 2001). Zemin içindeki serbest suyun akımı hidrolik yasalarına uygun olarak meydana gelir. Zemin içerisinde meydana gelen akımla bir su borusu içinde meydana gelen akım arasındaki fark, zemin içinde akan suyun tam kesit yerine sadece zemin boşluklarından akıyor olmasıdır (Aytekin, 2004).

Genel olarak geçirimsizlik problemlerinde su miktarı veya debisi bilinmek istenen değerlerdir. Zemin içindeki serbest suyun akımı Darcy yasası olarak bilinen (3.1)'deki bağıntıya uygun olarak hareket etmektedir. Denklem (3.1)'de görüldüğü üzere zeminden geçen su miktarı geçirimsizlik katsayısı (k) ile doğrudan ilişkilidir.

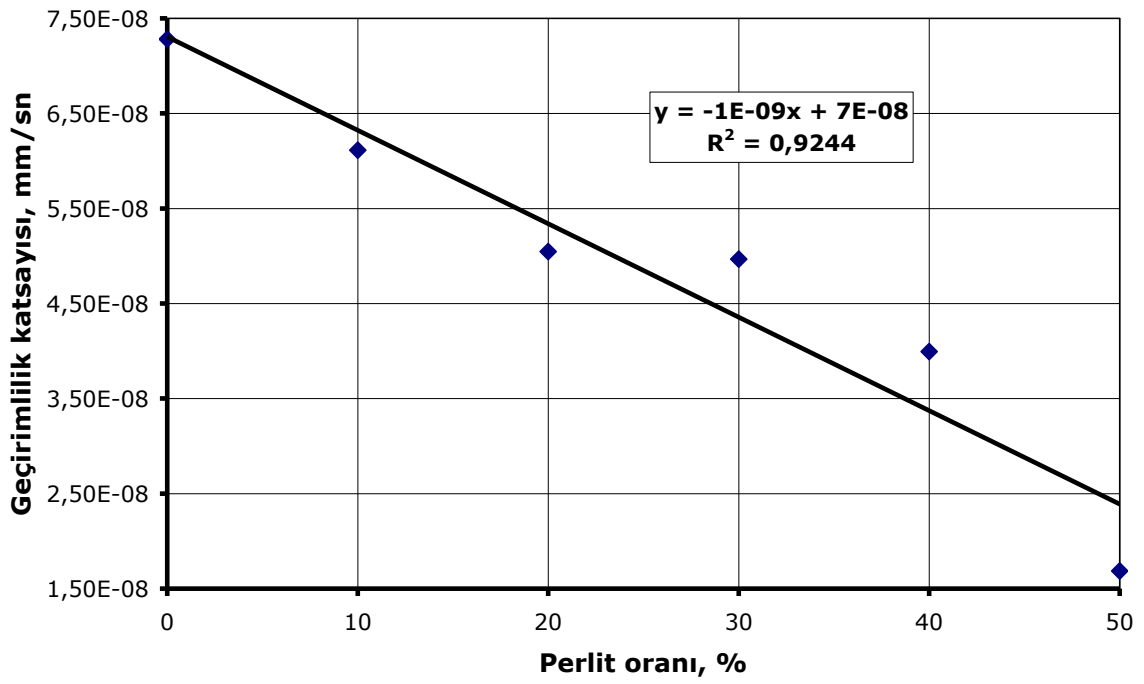
$$q = k i A \quad (3.1)$$

Killi zeminlerin geçirgenliği kil-su sisteminin karmaşık ilişkisi yüzünden çok fazla değişkenin etkisindedir. Örneğin örselenmemiş bir kilin geçirimsizlik katsayısı yoğrulma sonucu 4 kat azalabilmektedir. Suyun tanelere elektro-kinetik bağlantısı, kil boşluklarındaki suyun yüksek viskozitede bulunması, zemin dokusunun çapraşıklığı nedeniyle akım yönlerinin tariflenememesi ve boşluk geometrisinin kolloidlerin kümelenmesi sonucu eşit olmayan dağılımı vb. nedenler kilde geçirimsizliğin basitçe tahmin edilemeyen bir katsayı olması sonucunu getirmektedir. Kil yapısının konsolidasyon özelliği nedeniyle boşluk hacminde değişimler olmakta ve geçirimsizlik katsayısını etkilemektedir. Sonuç olarak geçirimsizlik zeminin özelliklerine (boşluk oranı, kuru yoğunluk, plastisite vb.) bağlı olarak büyük bir aralıkta değişim gösterebilmektedir.

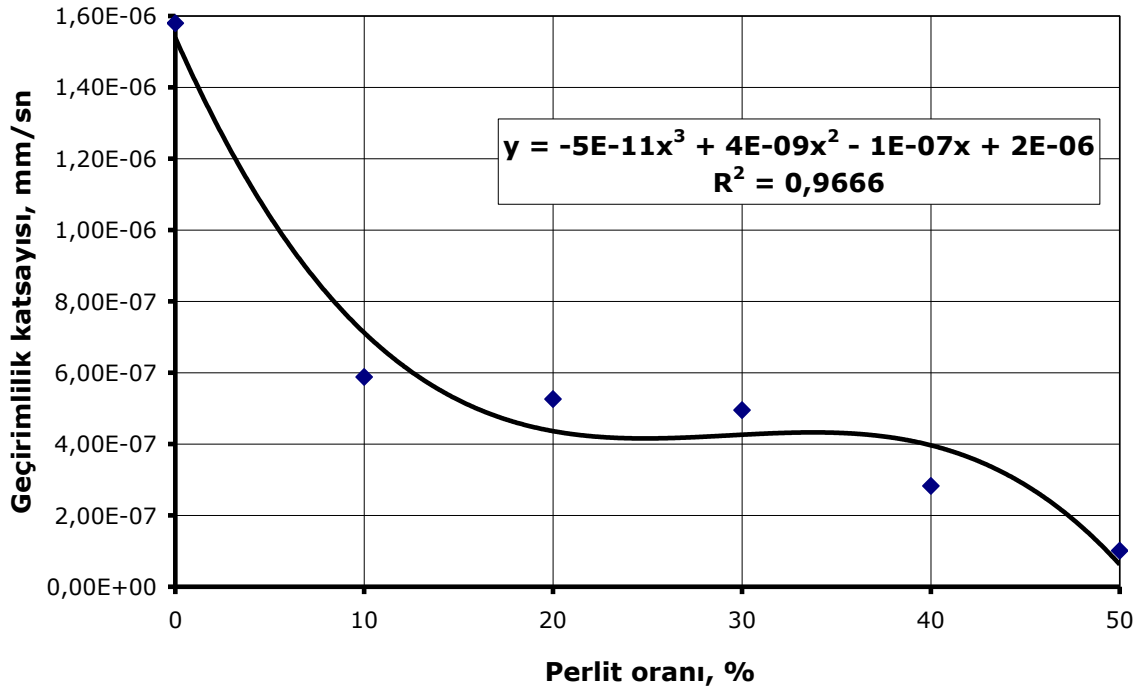
Doğal malzemeye perlit ve kireç katılarak hazırlanan SP ve SKP karışımlarının geçirimsizlik katsayıları üzerinde doğrudan etkisi olan kıvam limitleri, su içerikleri, kuru yoğunlukları ve boşluk oranları gibi parametrelerinde değişimler olduğu 3.1.1.1. Kıvam Limitleri ve 3.1.1.2. Kompaksiyon Parametreleri bölümlerinde gösterilmiştir. Mühendislik özelliklerindeki bu değişimlerin geçirimsizlik katsayıları üzerindeki etkisinin ortaya çıkarılması için yapılan düşen seviyeli geçirimsizlik deneyleri sonuçları Tablo 3.5'de, değişim eğrileri ise Şekil 3.18 ve Şekil 3.19'da gösterilmiştir.

Tablo 3.5. Doğal malzeme, kireç ve perlit karışımlarının geçirimsizlik katsayıları

	Geçirimsizlik katsayısı, mm/sn		Geçirimsizlik katsayısı, mm/sn
SP0	7.281×10^{-8}	SKP0	1.580×10^{-6}
SP10	6.114×10^{-8}	SKP10	5.880×10^{-7}
SP20	5.046×10^{-8}	SKP20	5.259×10^{-7}
SP30	4.967×10^{-8}	SKP30	4.950×10^{-7}
SP40	3.994×10^{-8}	SKP40	2.828×10^{-7}
SP50	1.686×10^{-8}	SKP50	1.010×10^{-7}



Şekil 3.18. SP karışımlarının geçirimsizlik katsayıları



Şekil 3.19. SKP karışımlarının geçirimsizlik katsayıları

3.1.1.4. Şişme Parametreleri

Genleşen killerde şişme mekanizması karmaşıktır ve birçok faktörden etkilenmektedir. Genleşme, iç gerilme dağılımını bozan zemin suyunun miktarındaki değişikliklerin bir sonucu olarak oluşmaktadır. Kil mineralleri, genellikle yüzeylerinde negatif, kenarlarında ise pozitif elektrik yüklerine sahip tabakalı partiküllerdir. Negatif yükler, elektriksel kuvvetler nedeniyle, partiküllerin yüzeyine yapışan zemin suyunun içindeki katyonlar tarafından dengelenir. Partiküller arası elektriksel kuvvet alanı, negatif yüzey yüklerinin ve zemin suyu elektro-kimyasının bir fonksiyonudur. Kil kristalleri ve su molekülleri arasındaki Van der Waals yüzey kuvvetleri ve emilme kuvvetleri, bu kuvvet alanını etkilemektedir. İç elektro-kimyasal kuvvet sistemi, dıştan uygulanan gerilmeler ve zemin suyundaki kapiler gerilmeler ile denge içerisinde olmalıdır (Chen, 1988).

Eğer zemin suyunun kimyası, su miktarı ya da kimyasal kompozisyonu ile değişirse kuvvet alanı da değişecektir. İç kuvvetler arasındaki nihai değişme, eğer dıştan uygulanan gerilmelerdeki değişiklikler tarafından dengelenmezse, iç kuvvetler dengeleninceye kadar partikül boşlukları da değişecektir. Bu partikül boşluklarındaki değişiklik kendini şişme yada büzülme olarak gösterecektir.

Şişme mekanizmasını etkileyen mikro ölçekli faktörler olarak kilin mineralojisi ve zemin suyu kimyası olarak söylenebilir. Doğal malzemenin bünyesindeki kil mineralleri X-ışını kırınım analizi ile smektit grubu mineralleri nontronit ve montmorillonit olduğu Şekil 2.5’de gösterilmişti. Bilindiği gibi smektit grubu mineralleri yüksek genleşmeye sahip ve en problemlili kil mineralleri olmaktadır. Şekil 2.3 ve 2.9’da doğal malzemenin davranışı üzerinde suyun meydana getirdiği olumsuzluklar fotoğraflarla görselleştirilmişti.

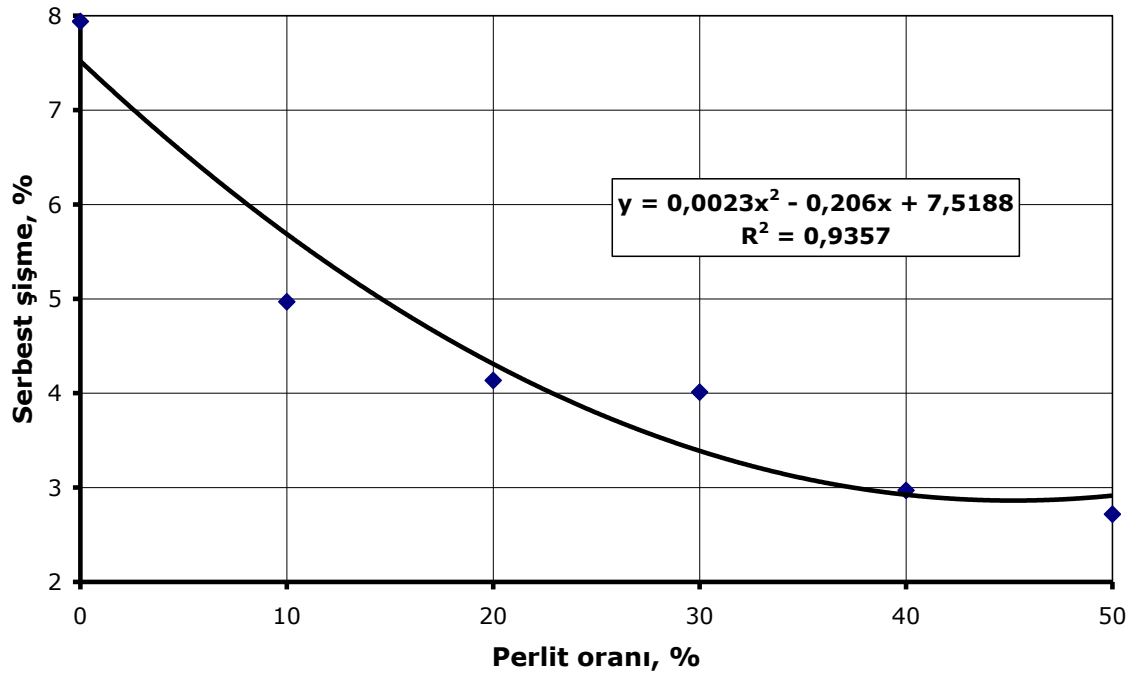
Zemin suyu kimyası, şişme potansiyeli açısından önemlidir. Sodyum, kalsiyum, magnezyum ve potasyum gibi tuz katyonları, zemin suyu içerisinde çözünür. Bunlar negatif elektriksel yüzey yüklerini dengelemek için kil yüzeyleri tarafından emilen yer değiştirebilir katyonlardır. Bu katyonların hidrasyonu sonucunda emici kuvvetler kil kristalleri tarafından kullanılır ve kil partikülleri arasında büyük miktarda su toplanmasına sebep olurlar (Nelson ve Debora, 1992). Numunelerin hazırlanmasında saf su kullanıldığından karışım suyunun kimyasından dolayı zeminin şişme potansiyelinde ekstra değişimler olamayacaktır. Deneylede ölçülen şişme parametreleri değerleri üzerinde sadece doğal malzeme, perlit ve kirecin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin etkisi olmaktadır.

Zeminlerin şişme potansiyeline etki eden makro ölçekli faktör olarak genellikle plastisite özelliği dikkate alınmaktadır. Aslında makro ölçekli zemin özellikleri zeminin mikro ölçek doğasını yansıtmaktadır. Çünkü zeminin plastisitesi gibi makro mühendislik özellikleri, şişme potansiyelini kontrol eden ve sağlayan mikro ölçekli faktörlerden etkilenmektedir. Makro ölçekli karakteristiklerden olan kıvam limitleri şişme davranışının birincil göstergeleridir. Bundan dolayı şişme potansiyeli için kullanışlı bir öncül olarak değerlendirilmektedir.

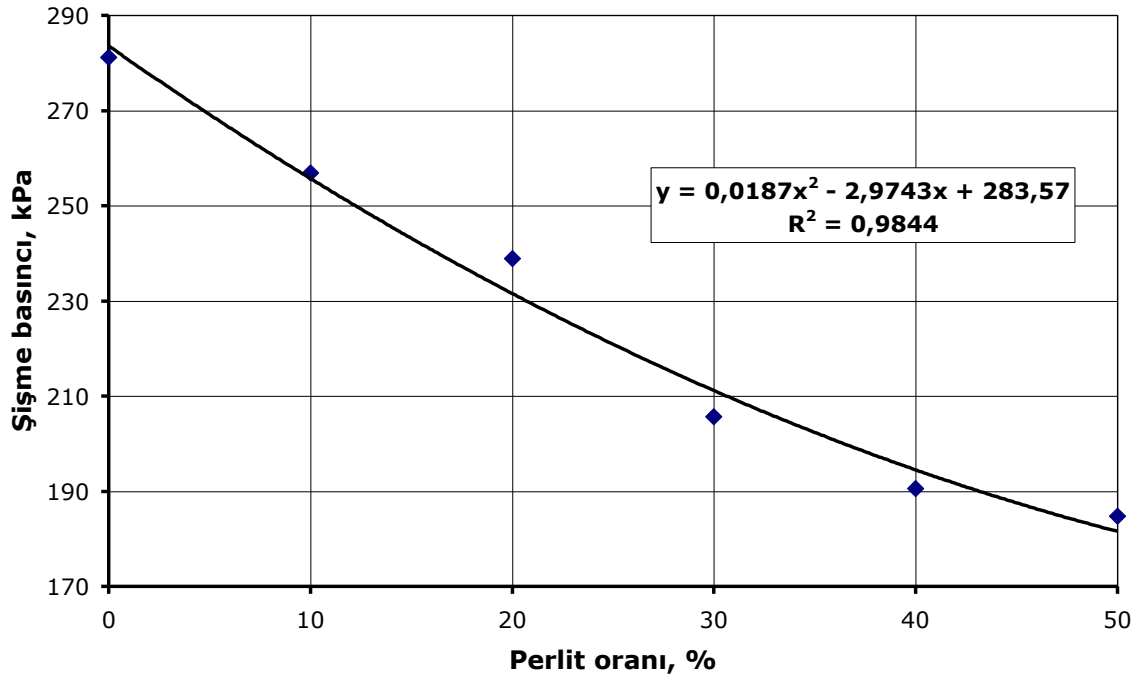
Şişme potansiyeline sahip olduğu düşünülen doğal malzemeye katılan perlit ve kirecin etkisinin ortaya çıkarılması için klasik bir boyutlu ödometre cihazı ile karışımların serbest şişme yüzdeleri ve şişme basınçları belirlenerek Tablo 3.6’da verilmiştir. Serbest şişme yüzdelerinin ve şişme basınçlarının değişim eğrileri; SP karışımlar için Şekil 3.20, Şekil 3.21 ve SKP karışımlar için Şekil 3.22, Şekil 3.23’de olmak üzere gösterilmiştir.

Tablo 3.6. SP ve SKP karışımlarının şişme parametreleri

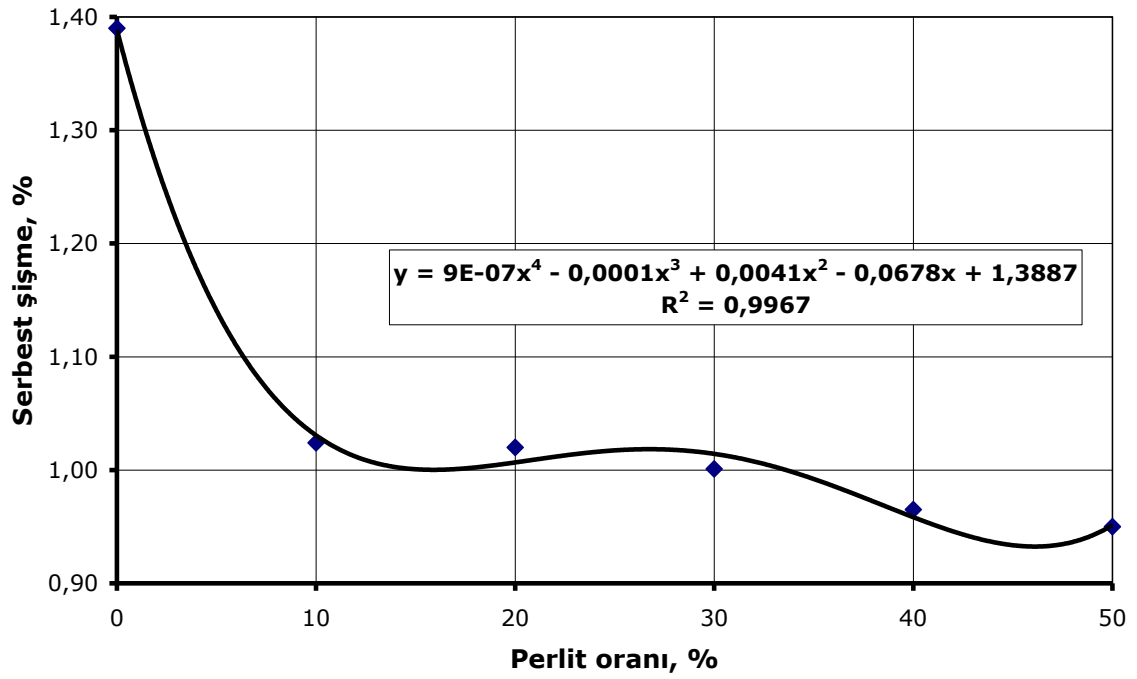
	Serbest şişme, %	Şişme basıncı, kPa		Serbest şişme, %	Şişme basıncı, kPa
SP0	7.94	282.0	SKP0	1.39	65.8
SP10	4.97	256.9	SKP10	1.02	45.5
SP20	4.14	238.9	SKP20	1.02	44.5
SP30	4.01	205.6	SKP30	1.00	43.8
SP40	2.97	190.6	SKP40	0.97	42.4
SP50	2.72	184.8	SKP50	0.95	43.6



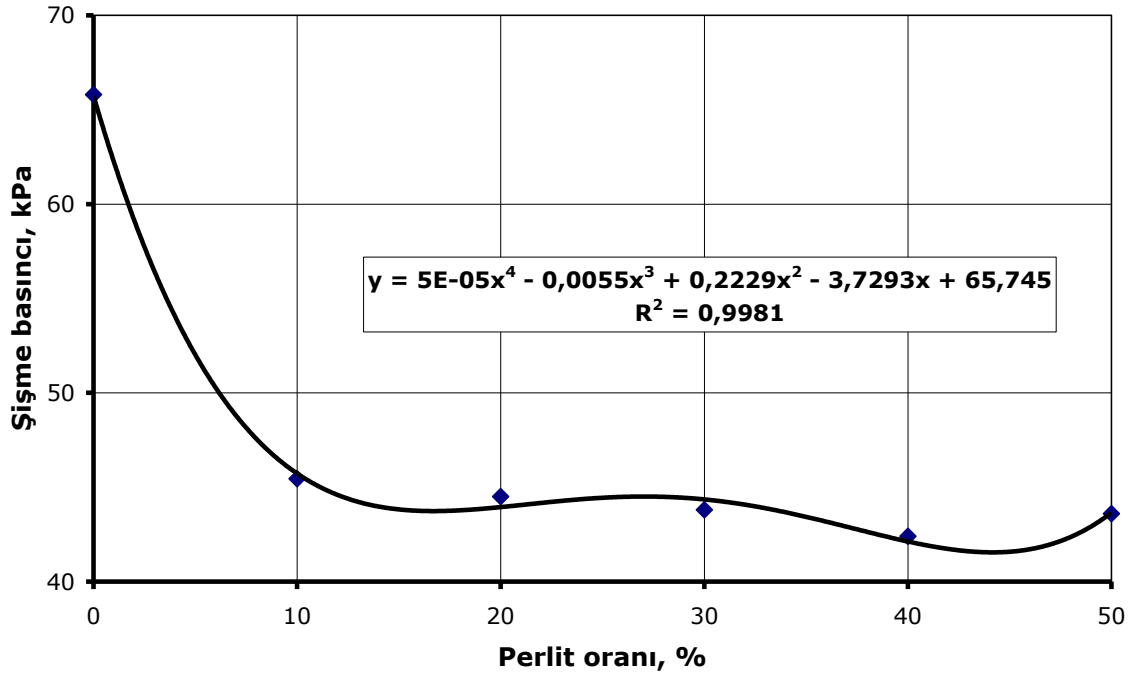
Şekil 3.20. SP karışımlarının serbest şişme yüzdeleri



Şekil 3.21. SP karışımlarının şişme basınçları



Şekil 3.22. SKP karışımlarının serbest şişme yüzdeleri



Şekil 3.23. SKP karışımlarının şişme basınçları

3.1.2. Sıkışma Parametreleri

Dinamik veya statik yükler altında zeminin içindeki havanın dışarı atılması sonucu oluşan hacim değişimlerine kompaksiyon, suyun dışarı atılması sonucu oluşan hacim değişimlerine ise konsolidasyon denilir. Kompaksiyon ile hacim değiştirme olayı kısa sürede olurken konsolidasyon ile hacim değiştirme olayı teorik olarak sonsuza kadar devam eder. Ayrıca granüler zeminlerin serbest dren olabilme yeteneğinden ötürü kompaksiyondan sonra pratik olarak hiç oturma beklenmez iken özellikle suya doymuş kohezyonlu zeminler suyun yavaş dreninden ötürü sürekli hacimsel azalma göstererek konsolide olurlar. Bir başka deyişle konsolidasyon killi zeminlerde görülen bir problemdir. Zira konsolide olabilen bir zemindeki ince malzemelerin boşluğunda hapsolan su zerreciklerinin zeminden dışarı atılması uzun zaman almaktadır. Çünkü zemindeki gerilmeler başlangıçta boşluk suyu basıncı karşılanırken zamanla suyun dren olması sonucu gerilmeler yavaş yavaş zemin tanelerine aktarılmakta ve suyun boşaltıldığı boşluklar sıkışarak oturmalar meydana gelmektedir. Boşluk suyu basıncının zaman içinde azalarak devam etmesi ve boşluk suyu basıncının minimuma inmesi (sönmesi) sonucunda

bütün gerilmelerin taneler tarafından karşılanması sürecine konsolidasyon ve hacminin azalması neticesi oluşan sıkışmaya konsolidasyon oturması denir (Önalp, 2002).

Her cisim gibi zeminde bir gerilme artışı ($\Delta\sigma$) aldığıında hacim kaybına uğrar. Gerilme artışı sonucu zemin boyunda beliren kısalmanın gerilme düzeyi ve zaman dışında, sıkışabilirliğin kil-su karışımında çift tabaka kalınlığına birinci dereceden bağlı olmakla beraber, doğal boşluk oranı, likit limit, doğal su içeriği ve ilginç bir bulgu olarak kuru yoğunluk gibi fiziksel ve mekanik özelliklere bağlı olduğu bulunmuştur.

e-log σ eksenlerinde çizilen sıkışma eğrisinin yardımıyla zeminlerde sıkışabilirlik ile sıkışma indisi (C_c) ve yeniden yükleme indisi (C_r) tanımlanmıştır. Konsolidasyon oturması miktarının veya gerilme altında düşey sıkışmasının göstergesi olarak bu indisler kullanılabilmekte ve konsolidasyon oturması denklem (3.2)'ye göre hesaplanabilmektedir.

$$\Delta H = \frac{C_r}{1+e_0} H_0 \log \frac{\sigma'_c}{\sigma'_0} + \frac{C_c}{1+e_0} H_0 \log \frac{\sigma'_c + (\sigma'_f - \sigma'_c)}{\sigma'_c} \quad (3.2)$$

SP ve SKP karışımlarının tane iskelet yapılarının yük altındaki deformasyona karşı gösterdiği direnç, konsolidasyon deneyinde kullanılan yükler esas alınmak suretiyle hesaplanacak sıkışma indisi (C_c) ve yeniden yükleme indisi (C_r) değerlerinin incelenmesi ile araştırılmıştır. Denklem (3.2)'ye göre sıkışma indisinin ve yeniden yükleme indisinin değeri arttıkça zeminin yük altındaki deformasyonu artmaktadır.

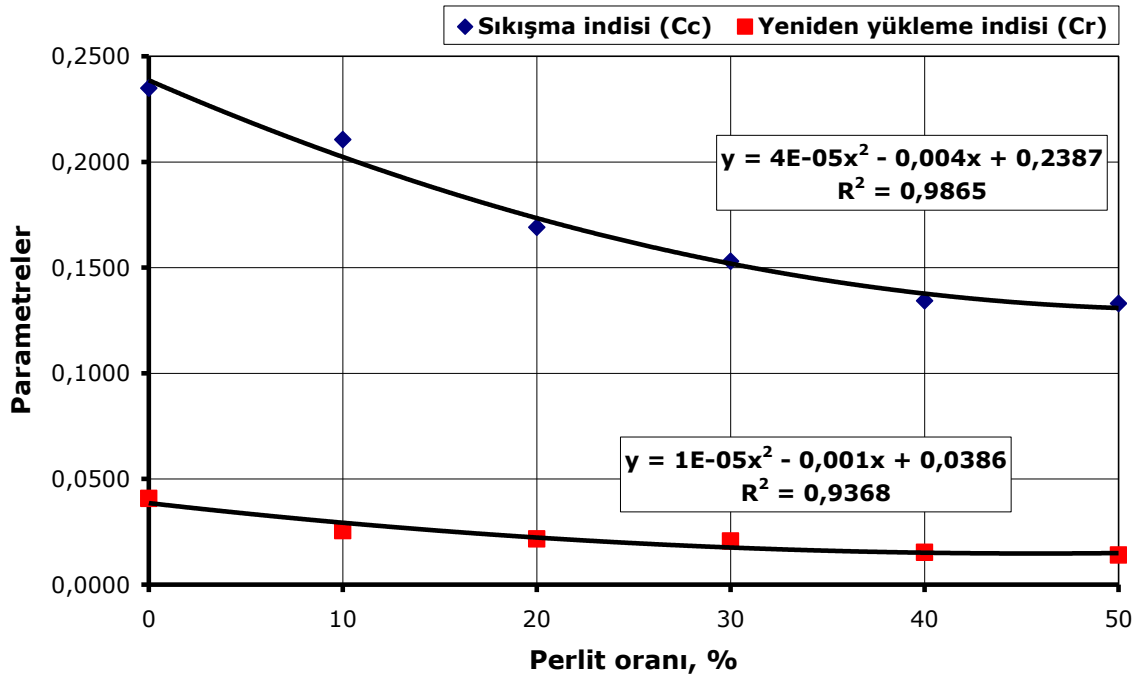
Konsolidasyon deneylerinden elde edilen bu iki indisin ve deney sonunda numunelerin toplam hacim değişimi Tablo 3.7 ve Tablo 3.8'de özetlenirken Şekil 3.24'de SP karışımlarına ve Şekil 3.25'de ise SKP karışımlarına ait sıkışma ve yeniden yükleme indislerinin değişim eğrileri verilmiştir.

Tablo 3.7. SP karışımlarının konsolidasyon deney verileri

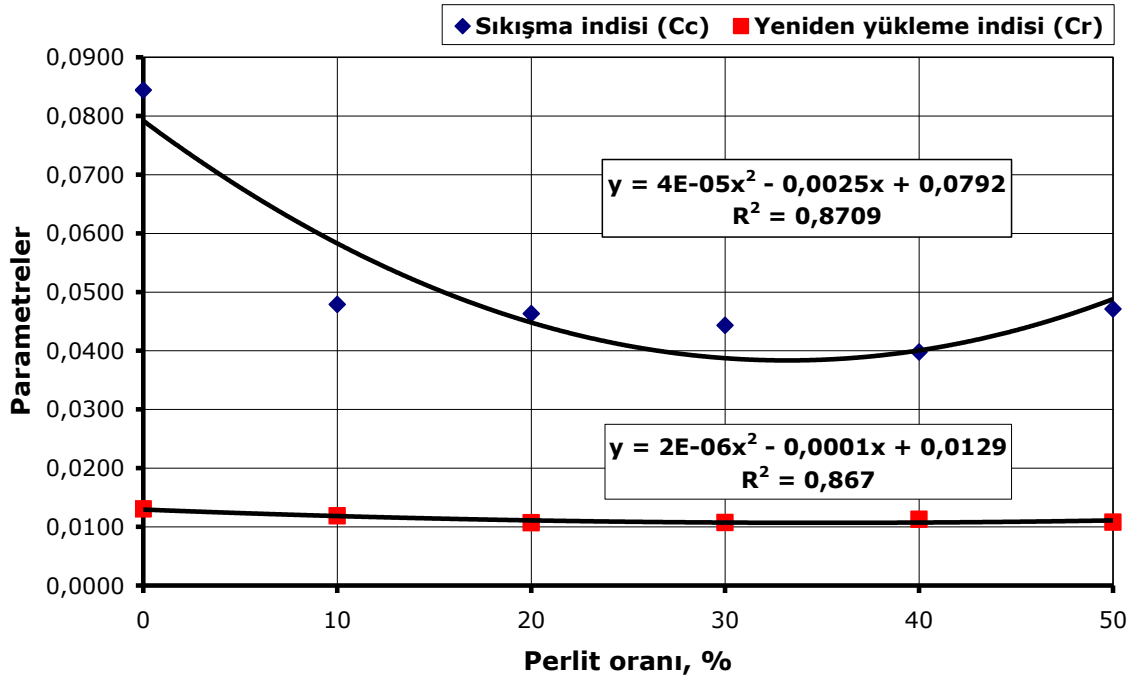
	$\Delta H, \%$	Sıkışma indisi, C_c	Yeniden yükleme indisi, C_r
SP0	26.5	0.235	0.0407
SP10	17.7	0.211	0.0255
SP20	16.0	0.169	0.0216
SP30	15.0	0.153	0.0206
SP40	12.0	0.134	0.0153
SP50	13.5	0.133	0.0140

Tablo 3.8. SKP karışımlarının konsolidasyon deney verileri

	ΔH , %	Sıkışma indisi, C_c	Yeniden yükleme indisi, C_r
SKP0	5.7	0.0844	0.0130
SKP10	4.0	0.0479	0.0107
SKP20	3.4	0.0463	0.0119
SKP30	3.8	0.0443	0.0107
SKP40	3.4	0.0340	0.0113
SKP50	3.7	0.0471	0.0108



Şekil 3.24. SP karışımlarının konsolidasyon parametreleri



Şekil 3.25. SKP karışımlarının konsolidasyon parametreleri

3.1.3. Dayanım Parametreleri

3.1.3.1. Serbest Basınç Dayanımları

Bir numunenin tek ekseninde basınç uygulanarak kırılması dayanımının en basit yoldan ölçümü olan serbest basınç deneyi daha ziyade doymuş killi zeminlerde ($\phi=0$) kullanılır. Bu test granüler zeminlere uygulanamaz. Serbest basınç deneyi özel bir UU deneyi olarak görülebilir.

Bu test sırasında kırılma genel olarak diyagonal bir düzlemde gerçekleşir. Numunede oluşan kayma düzleminin alt ve üst yükleme başlıkları ile kesişmemesi için boy uzunluğu/çap oranı (h/d) en az iki olmalıdır. Silindirin kırılma anındaki basınç gerilmesi, düşey basınç deformasyonunun (yani numune yüksekliğindeki azalma) kimi kurumlarca %15'i, kimi kurumlarca da %20'si olduğundaki gerilme olarak alınmaktadır. Çünkü çok yumuşak killerde kayma düzlemi diyagonal bir düzlem göstermeyebilir ve bu nedenle düşey deformasyonun belli bir yüzdesine erişildiğinde kırılma olduğu kabul edilmektedir.

Bu deneye yöneltilen en önemli eleştiri, zemin doğal koşullarda σ_3 , ($K_0 \sigma_z$) gibi yanal eşdeğer gerilme altında iken serbest basınç deneyinde hiç yanal basınca tabi

tutulmamasıdır. Ancak doymuş zeminden dışarıya alındığında oluşan kılcallıktan dolayı numunenin gerçekte (3.3)'deki denklem gibi bir eşdeğer çevre basıncı aldığı gösterilmiş, bu nedenle bazı durumlarda serbest basınç deneyinin CU üç eksenli deneyi yerine geçebileceği öne sürülmüştür (Terzaghi ve Peck, 1967).

$$\sigma_3 = \frac{1}{3}(\sigma_v + 2\sigma_h) \approx 0.7 \rightarrow 0.9 \sigma \quad (3.3)$$

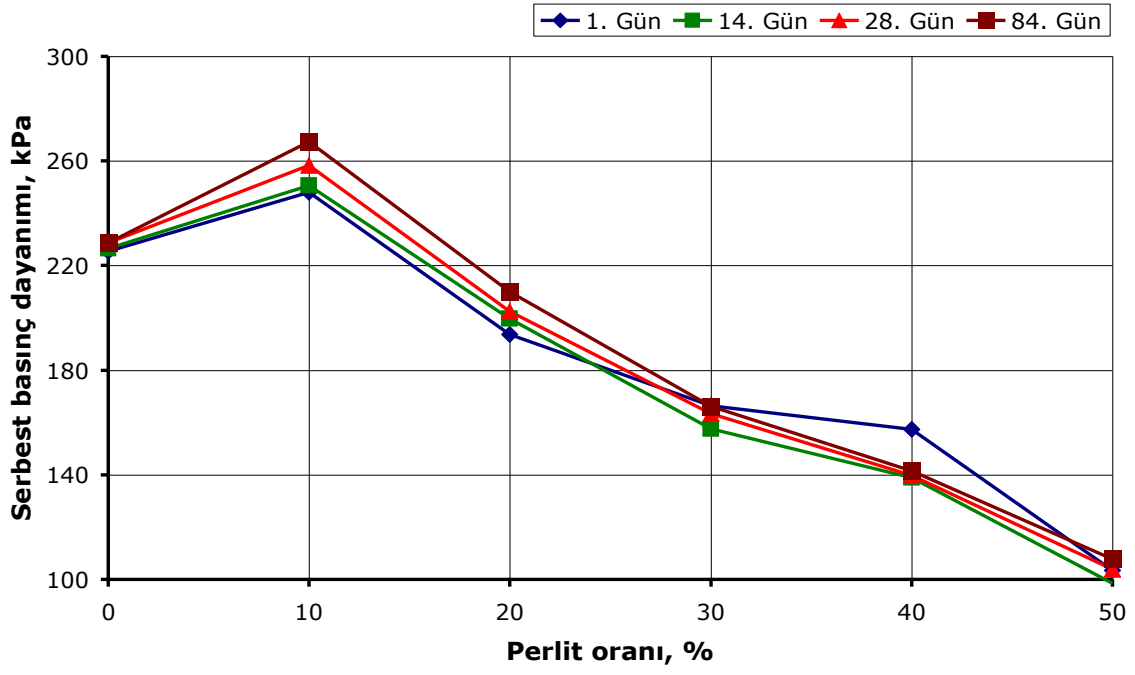
SP ve SKP karışımlarına ait serbest basınç dayanımlarının 1, 7, 14, 28 ve 84 günlük külden sonraki değerleri Tablo 3.9 ve 3.10'da verilmiştir. Bu değerlere ait değişim eğrileri Şekil 3.26 ve 3.27'de görülmektedir.

Tablo 3.9. SP karışımlarının serbest basınç dayanımları

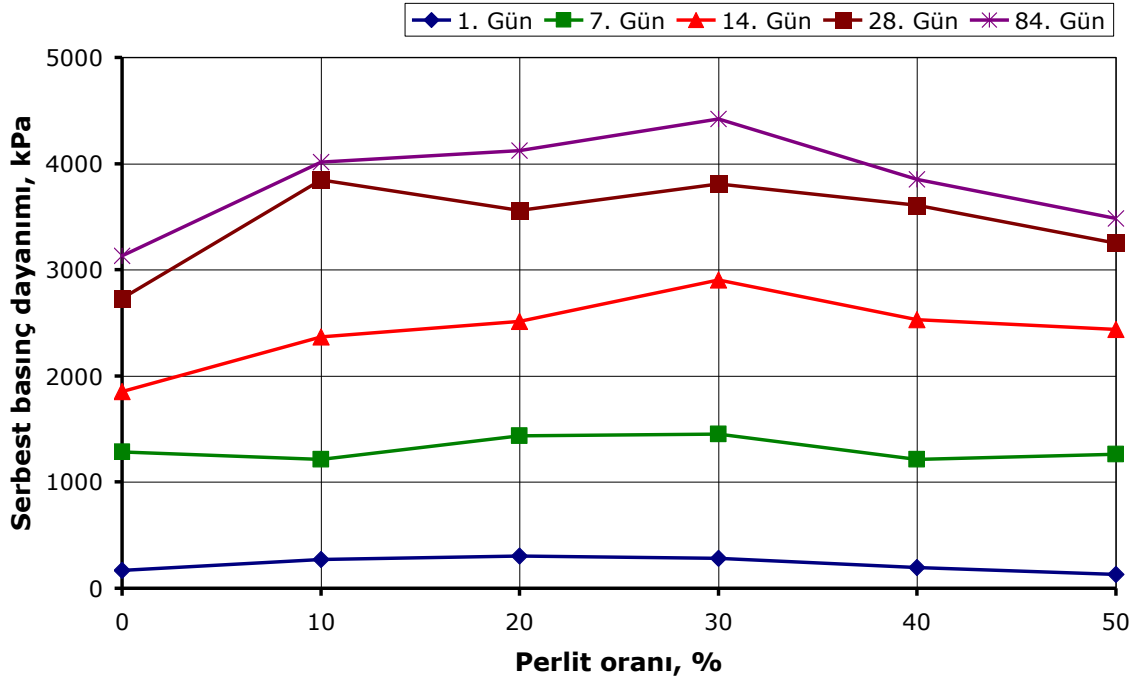
	Kür süresi	SP0	SP10	SP20	SP30	SP40	SP50
Serbest basınç dayanımı, kPa	1. Gün	225.5	248.0	193.7	166.3	157.4	103.5
	14. Gün	226.6	250.6	199.6	157.5	138.8	98.6
	28. Gün	228.6	258.3	202.5	163.3	139.7	103.8
	84. Gün	228.5	267.4	210.0	166.3	141.5	107.8

Tablo 3.10. SKP karışımlarının serbest basınç dayanımları

	Kür süresi	SKP0	SKP10	SKP20	SKP30	SKP40	SKP50
Serbest basınç dayanımı, kPa	1. Gün	165.4	270.2	304.5	280.2	194.9	128.6
	7. Gün	1282.4	1211.2	1435.2	1450.5	1214.1	1264.3
	14. Gün	1850.7	2366.5	2514.7	2900.9	2530.9	2435.1
	28. Gün	2729.5	3848.4	3561.4	3806.0	3609.0	3250.7
	84. Gün	3128.5	4015.5	4124.3	4419.5	3851.9	3483.4



Şekil 3.26. SP karışımlarının serbest basınç dayanımları



Şekil 3.27. SKP karışımlarının serbest basınç dayanımları

3.1.3.2. Görünür Kohezyon ve İçsel Sürtünme Açıları

Zemin tabakaları içinde gerek kendi ağırlıklarından (jeolojik gerilmeler) gerekse zemin yüzünde uygulanan yüklerden dolayı gerilmeler oluştuğu bilinmektedir. Uygulanan bu yükler altında zeminlerde ortaya çıkan gerilmelerin zeminde şekil değiştirmelere sebep olacaktır. Diğer birçok inşaat malzemesine oranla, zeminlerin gerilme-şekil değiştirme davranışı genellikle çok daha karmaşık olmaktadır. Zeminin yük altında davranışı, zeminin başlangıç gerilme durumu, gerilme tarihçesi, yükleme hızı ve yükleme sırasında zemin suyunun dışarı çıkmasının kolaylık derecesi gibi birçok faktöre bağlı olmaktadır. Konsolidasyon davranışının incelendiği kısımda, uygulanan gerilmeler altında zeminlerde meydana gelen şekil değiştirmelerin genellikle gerilme seviyesi ile doğrusal artmadığı gibi, aynı zamanda yük kaldırıldığı zaman bu şekil değiştirmelerin büyük kısmının kalıcı olduğu (geri gelmediği) görülmüştür. Zemin davranışının bir diğer özelliğinin de şekil değiştirmelerin zamana bağlı olarak gelişmesi olduğu bilinmektedir. Bu bilgilerin ışığı altında, zeminlerin gerilme-şekil değiştirme davranışının genellikle doğrusal olmayan viskoz-plastik bir davranış biçimi olduğu söylenebilir.

Diğer bütün malzemelerde olduğu gibi, zeminlerde de üzerine uygulanan yüklerin yol açtığı gerilmeler belirli sınır değerleri aştığı zaman göçme meydana gelmektedir. Değişik malzemelerin göçme biçimlerinin birbirinden farklı olduğu bilinmektedir. Elastoplastik davranış gösteren malzemelerin akma tipi göçme gözlenirken (çelik gibi), kırılmalık malzemelerde ani göçme meydana gelmektedir (beton gibi). Zeminlerde gözlenen göçme türü, zeminin cinsine ve bazı fiziksel ve bünyesel özelliklerine (su muhtevası gibi) bağlı olmakla beraber genellikle zeminin göçmesi müsaade edilebilir şekil değiştirme seviyelerinin aşılması olarak tanımlanmaktadır.

Bir zemin kütlesi içindeki her nokta göçme durumuna ulaşmak üzere olduğu anda, o zemin kütlesinin plastik denge durumunda olduğu kabul edilmektedir. Zeminlerde göçme meydana gelmesi için, olası kayma düzlemi boyunca oluşan kayma direncinin aşılması gerekmektedir. Bu düzlem her zaman en büyük kayma gerilmesi düzlemi olmayabilmektedir. Genel olarak göçme belli bir kayma düzlemi üzerine etkiyen normal ve kayma gerilmelerinin ortaklaşa etkisi sonucu ortaya çıkmaktadır. Zeminin kayma mukavemeti ise göçmeye meydan vermeden karşı koyabileceği en büyük kayma gerilmesi olarak tanımlanabilir (Özaydın, 1989).

Zeminler için göçmeye yol açan normal ve kayma gerilmelerinin ortak etkisini göz önüne alan birçok hipotez geliştirilmiştir. Bunlar içinde en basit olanı ve uygulamada yaygın olarak kullanılanı Mohr-Coulomb göçme kriteri olmaktadır. Buna göre zeminin kayma mukavemeti (birlikte göçmeye yol açan normal ve kayma gerilmelerinin sınır değerleri) göçme zarfı denen bir doğru ile temsil edilmektedir. Bu şekilde normal gerilmeler yatay ekseninde, kayma gerilmeleri düşey ekseninde gösterilmekte, göçme zarfı olarak nitelendirilen doğrunun altında kalan gerilme durumları için göçme ortaya çıkmazken, bu zarfa ulaşıldığı anda zeminde göçme meydana gelmektedir.

Göçme zarfı eğrisinin düşey eksenini kestiği nokta c ve yatay ile yaptığı açı ϕ ile gösterilirse kayma mukavemetini veren denklem, (3.4)'deki gibi yazılabilir:

$$\tau = c + \sigma \tan\phi \quad (3.4)$$

Zeminlerin kayma mukavemetinin olası bir göçme düzlemi boyunca kaymaya karşı oluşan dirençten kaynaklandığı bilinmektedir. Bu direnç, o düzlem boyunca ortaya çıkan sürtünmeden kaynaklanmaktadır. (3.4)'deki $(\sigma \tan\phi)$ kısmı sürtünme direncini ifade eden terim olmakta ve ϕ açısı zeminin kayma mukavemeti açısı (içsel sürtünme açısı) olarak nitelendirilmektedir. Kayma mukavemeti açısı (ϕ) sadece tane yüzeyleri arası sürtünmeden kaynaklanan direnci değil, aynı zamanda tanelerin birbirine göre hareketine engel olan kilitleme etkisini de içeren toplam direnci temsil etmektedir. Tanelerin yüzey pürüzlülüğü ve köşeliliği arttıkça, taneler arası boşluk oranı azaldıkça, tane çapı büyüdükçe, gradasyon iyileştikçe ve ince malzeme miktarı ile su içeriği azaldıkça içsel sürtünme açısı büyümektedir. Mohr-Coulomb bağıntısındaki diğer kayma mukavemeti parametresi (c) ise genellikle kohezyon katsayısı olarak nitelendirilmekle beraber gerçek fiziksel anlamı çok iyi açıklığa kavuşmuş değildir. Bu katsayının yaygın bilinen açıklaması tanelerin birbirini tutma özelliğinden kaynaklandığı şeklindedir. Fakat aynı zeminin değişik koşullarda yüklenmesi ile bu katsayı oldukça farklı değerler alabilmektedir. Bu gerçeği göz önüne alan bazı araştırmacılar kohezyon parametresinin (c) zeminin fiziksel bir özelliği olmadığı, yalnızca belli koşullarda sürtünme direncini ifade etmek için kullanılan bir katsayı olarak düşünülmesi gerektiğini öne sürmüşlerdir.

Killi zeminlerin kayma mukavemetinden büyük ölçüde kohezyon sorumludur. Hâlbuki granüler (kohezyonsuz) malzemelerde ise içsel sürtünme açısı (ϕ) kayma mukavemeti üzerinde daha belirgin bir etkiye sahiptir. Zeminin kayma mukavemeti sabit

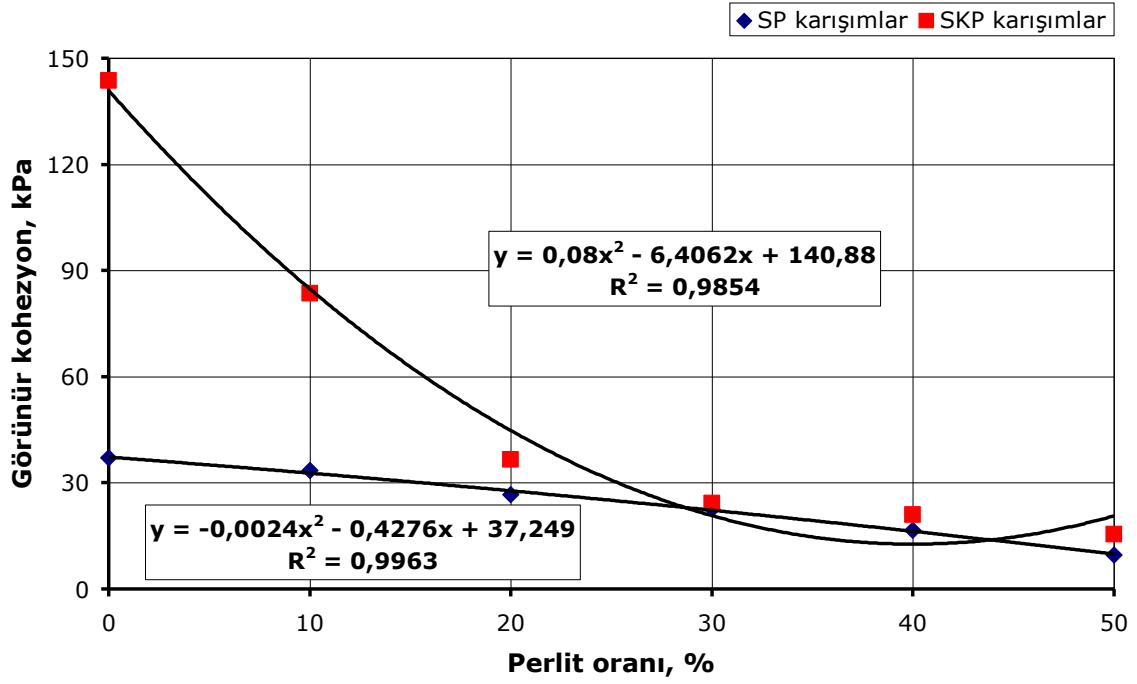
bir değer olmayıp su içeriği, yükleme hızı, süresi ve daha birçok değişkene bağlı olarak değişir.

Zemin stabilitesi doğrudan kayma mukavemeti ile ilgili olduğundan zeminlere ait kohezyon ve içsel sürtünme açısının tespiti oldukça önemlidir. Kayma direnci parametrelerinin ölçümünde kullanılan ilk deney kesme kutusu deneyidir. Bu testin uygulanması oldukça kolay ve üç eksenli basınç testine nazaran da daha hızlıdır. Ancak gerilme, deformasyon ve drenaj şartları tam olarak anlaşılamadığı gibi üç eksenli testte olduğu gibi kontrol edilememektedir. Ayrıca boşluk suyu basıncı ölçülememekte ve sadece toplam normal gerilme saptanabilmektedir. Her ne kadar numune üzerinde kayma gerilmesi yaratılsa da kesme düzlemi üzerindeki kayma gerilmeleri uniform olmadığı gibi numunenin kopması uçlardan merkeze doğru oluşmaktadır. Test sırasında kesilmeye çalışılan alan ve düşey yük sabit değildir. Tüm bu dezavantajlarına rağmen bu basit ve ucuz deney tüm zemin laboratuvarlarında kum ve killer için standart uygulama olmayı sürdürmektedir.

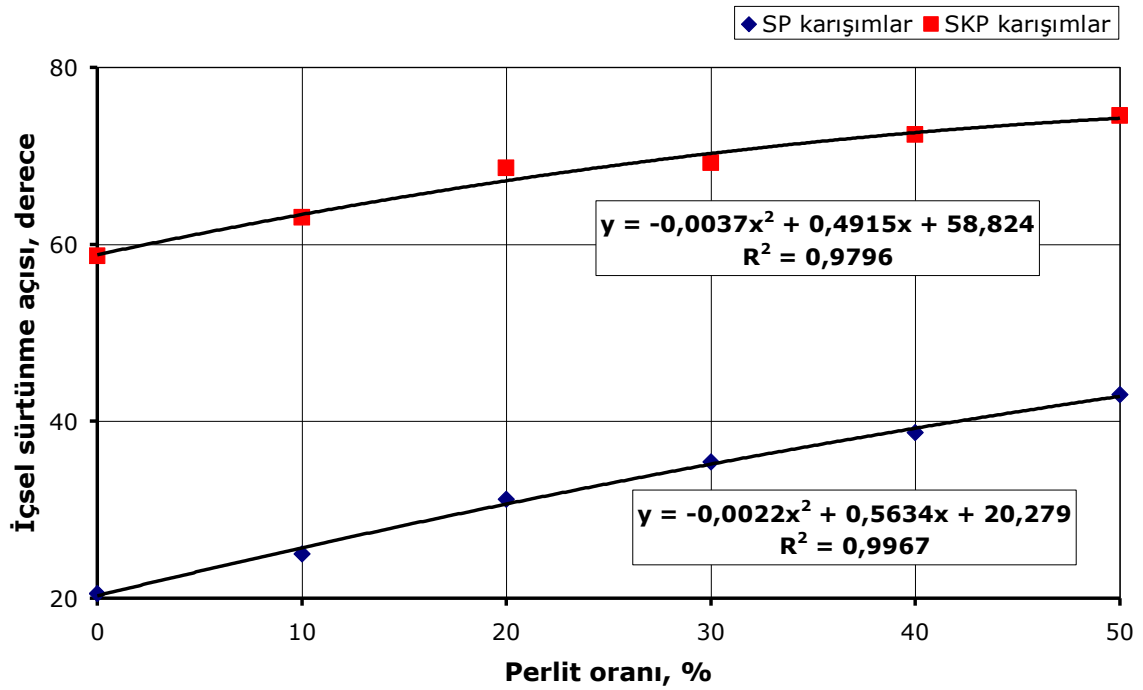
SP ve SKP karışımlarına ait görünür kohezyon ve içsel sürtünme açıları Tablo 3.11’de verilirken bunlara ait değişim eğrileri şekil 3.28 ve 3.29’da görülmektedir.

Tablo 3.11. SP ve SKP karışımlarının kesme kutusu deneyi parametreleri

	Görünür kohezyon, kPa	İçsel sürtünme açısı, °		Görünür kohezyon, kPa	İçsel sürtünme açısı, °
SP0	37.08	20.5	SKP0	143.7	58.7
SP10	33.48	25.0	SKP10	83.6	63.0
SP20	26.68	31.2	SKP20	36.5	68.7
SP30	22.60	35.4	SKP30	24.3	69.2
SP40	16.58	38.7	SKP40	20.9	72.4
SP50	9.65	43.0	SKP50	15.5	74.6



Şekil 3.28. Karışımların görünür kohezyon değerlerinin değişim eğrileri



Şekil 3.29. Karışımlara ait içsel sürtünme açılarının değişim eğrileri

3.1.4. Durabilite Tetkikleri

SP ve SKP karışımlarında elde edilen iyileşmelerin değişen çevre şartlarına dayanıklılığı iki ayrı yöntemle araştırılmıştır. Bunlardan birincisi hacimsel stabiliteyi diğeri ise serbest basınç dayanımını göz önüne alan durabilite tetkikleridir.

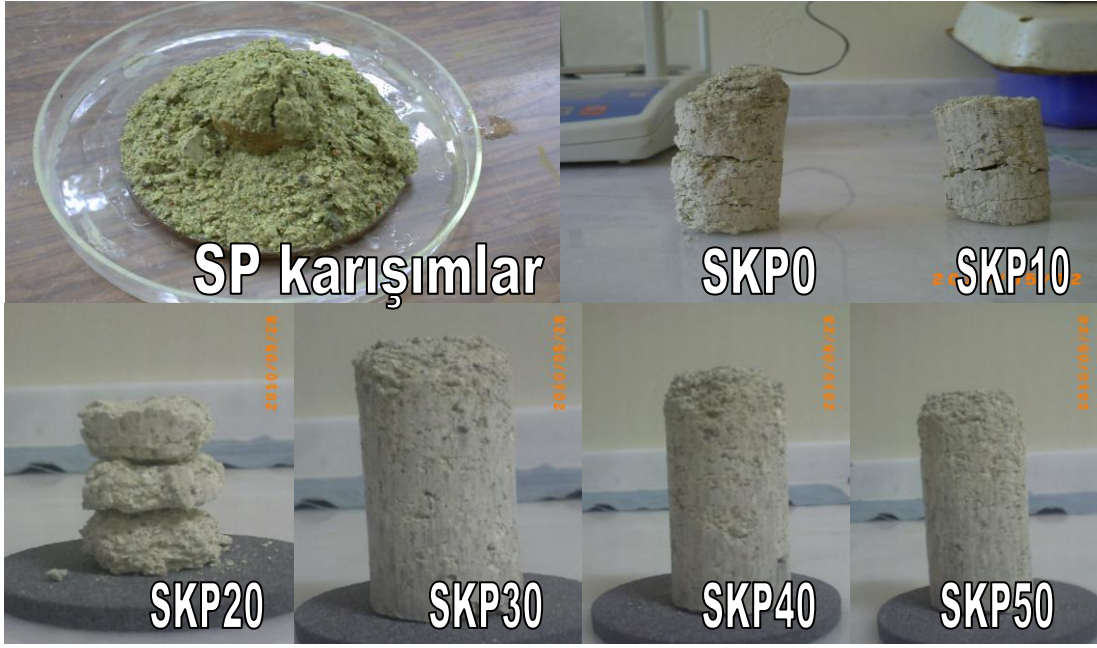
3.1.4.1. Hacimsel Stabiliteyi Esas Alan Durabilite Tetkiki

Kireç, çimento, puzolan-kireç ve puzolan-çimento-kireç kombinasyonları gibi katkı maddeleri ile yapılan stabilizasyon çalışmalarında sağlanması gereken durabilite kriterleri Tablo 1.8’de verilmiştir. Tablo 1.8’deki hacimsel stabiliteyi esas alan bu kriterlerin SP ve SKP karışımlarından hazırlanan çapı 38 mm, yüksekliği 76 mm olan silindirik deney numuneleri ile kontrolü için önce numuneler desikatörün içinde (desikatör 21°C (\pm 3°C) ve %98 (\pm %1) bağıl nem ortam şartlarına sahip) 28 gün süre ile kür edilmişlerdir. Kür sürecinden sonra deney numuneleri Şekil 3.30’deki gibi ASTM D 559’a (2003) göre gerçekleştirilen 12 adet ıslanma-kuruma periyoduna tabi tutulmuşlardır.

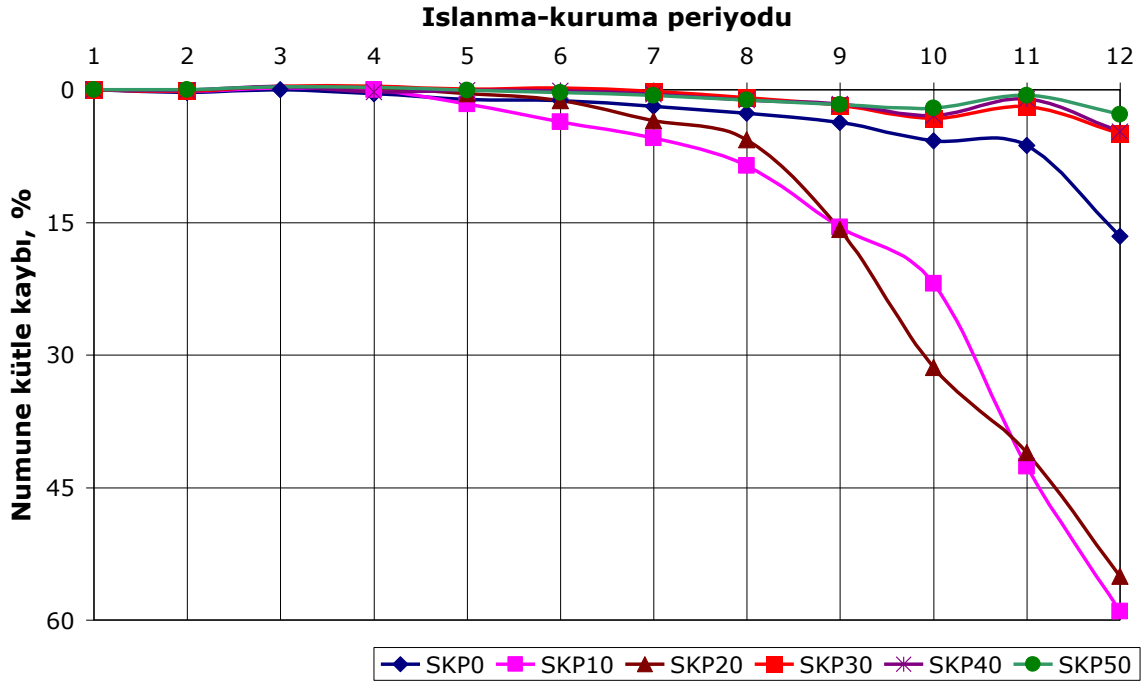


Şekil 3.30. 12 adet ıslanma-kurumu periyodundan birine ait görüntü

Bu sürecin sonunda SP karışımlardan hazırlanan numuneler hacimsel bütünlüğünü koruyamazken SKP karışımlardan hazırlanan numuneler direnç gösterebilmişlerdir. Çapı 38 mm, yüksekliği 76 mm olan SKP karışımı numuneleri 12 adet ıslanma-kuruma periyodu sürecinin sonunda Şekil 3.31’de verilen biçimleri almışlardır. SKP karışımlarından hazırlanan numunelere ait kütle kaybı eğrileri Şekil 3.32’de verilmiştir.



Şekil 3.31. 12 kez ıslanma-kurumaya maruz kalan deney numunelerinin görüntüleri



Şekil 3.32. SKP karışımlarının ıslanma-kuruma periyodundaki kütle kaybı eğrileri

3.1.4.2. Serbest Basınç Dayanımını Esas Alan Durabilite Tetkiki

SKP karışımlarından hazırlanan deney numuneleri serbest basınç dayanımını esas alan durabilite tetkiki için 14 gün süre ile desikatör içinde kür edilen deney numuneleri 14 gün su içinde bırakılmıştır. Bu şekilde işleme tabi tutulan deney numunelerinin 28. günün sonundaki serbest basınç dayanımları ile 28 gün desikatör içerisinde kür edilen aynı karışım oranlarına sahip karşılaştırma numunelerin serbest basınçları arasındaki dayanım kaybı durumuna göre durabilite incelemesi gerçekleştirilmiştir (Ola, 1974).

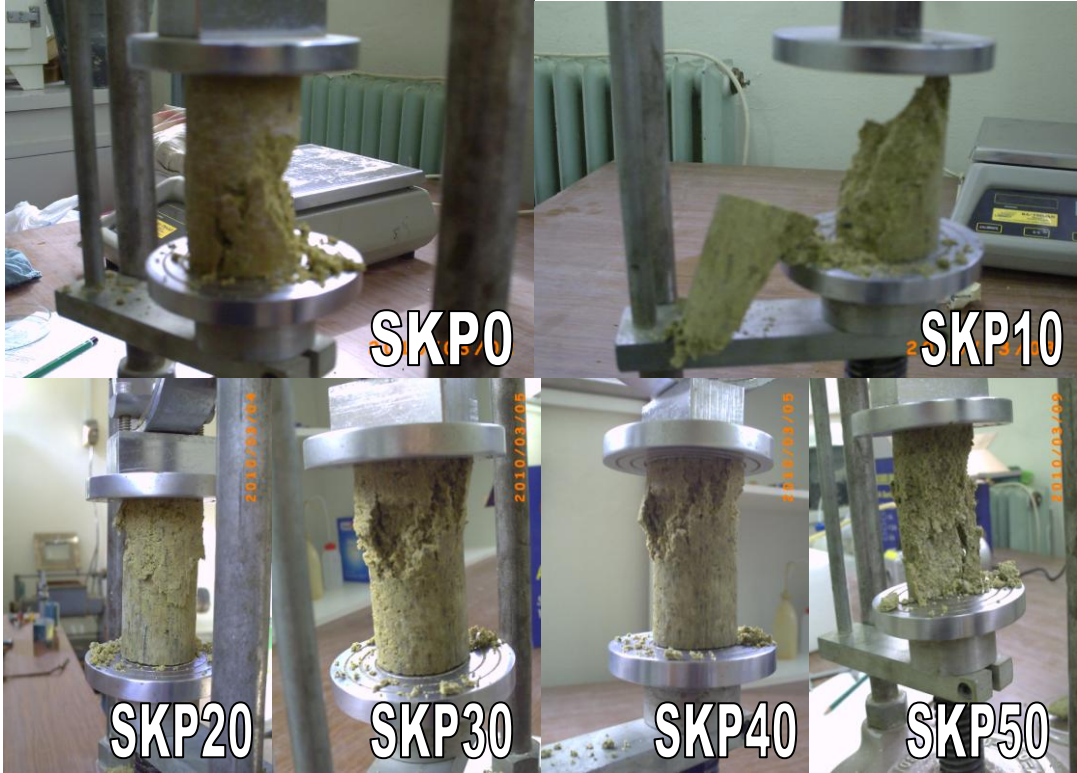
Ola (1974), durabilitenin serbest basınç dayanımları üzerinden bu şekilde belirlendiği durumlarda serbest basınç dayanımlarında maksimum kayıp olarak %20 sınır değerini vermiştir.

Şekil 3.33'de numunelerin 14 gün su içinde bırakıldığı aşama, Şekil 3.34'de serbest basınç deneyi yapılan SKP deney numunelerinin kırılma biçim ve görüntüleri verilmiştir.

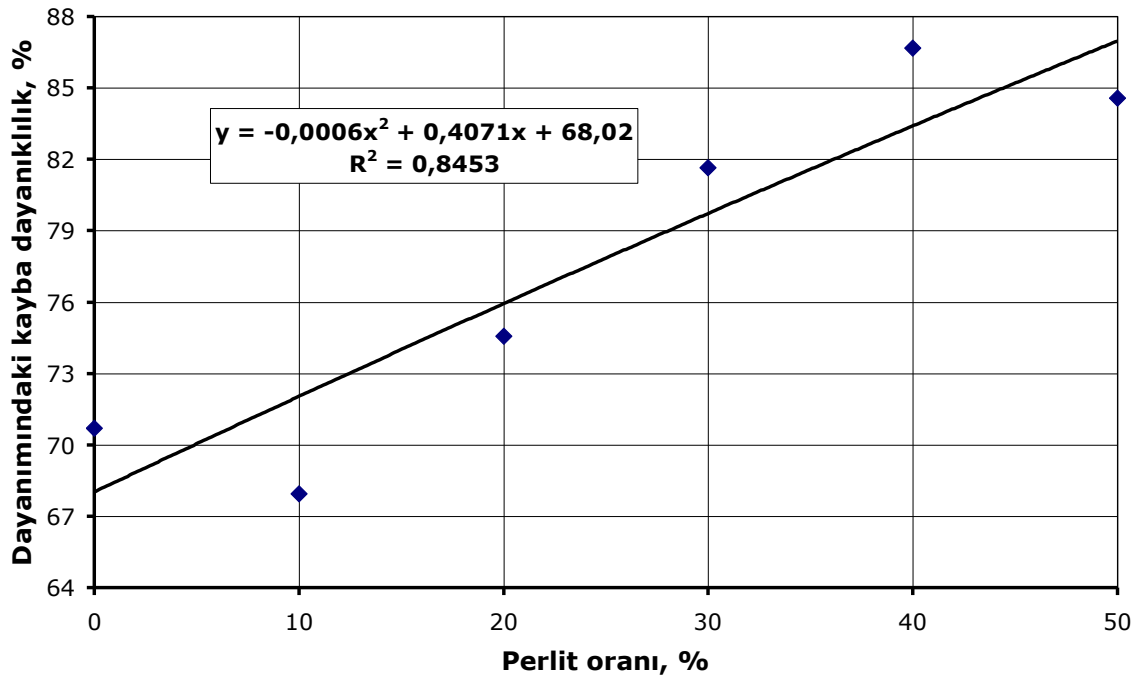
Serbest basınç deneyi sonuçlarını esas alan bu durabilite incelemesinde elde edilen sonuçlara ait değişim eğrisi Şekil 3.35'da görülmektedir.



Şekil 3.33. Durabilite deneyi için deney numunelerinin su içinde bırakılması



Şekil 3.34. SKP karışımlarının durabilite tetkiki kapsamında yapılan serbest basınç deneyleri sonundaki numunelerin kırılma biçimleri



Şekil 3.35. SKP karışımlarının değişen çevre koşullarında serbest basınç dayanımlarındaki kayba gösterdiği dayanıklılık

3.2. Deney Verilerinin Regresyon Analizleri

İki ya da daha çok değişken arasında ilişki olup olmadığını, ilişki varsa yönünü ve gücünü inceleyen “korelasyon analizi” ile değişkenlerden birisi veya birkaçı belirli bir birim değiştiğinde diğerinin nasıl bir değişim gösterdiğini inceleyen “regresyon analizi” en çok kullanılan istatistiksel yöntemlerdir.

Korelasyon analizinde değişkenlerin bağımlı ve bağımsız değişken olarak belirlenmesi hesaplamaların sonucu açısından önemli değildir.

Regresyon analizinde ise değişkenlerin hangisinin bağımlı hangisinin bağımsız değişken olduğunu tespit etmek oldukça çok önemlidir. Bu analizde değişkenlerin bağımlı değişken ve bağımsız değişken(ler) olarak iki gruba ayrılması bir zorunluluktur. Bağımlı değişken, bağımsız değişken(ler) tarafından açıklanmaya çalışılan değişkendir. Regresyon analizinde bir bağımlı değişken ile bir bağımsız (basit-tek değişkenli regresyon) veya birden fazla bağımsız (çoklu-çok değişkenli regresyon) değişken arasındaki ilişki (3.5), (3.6) ve (3.7)'deki gibi matematiksel eşitlikler ile açıklanmaktadır. Elde edilen bu matematiksel eşitlikler ile ilgili bağımlı değişkende tahminler ya da kestirimler yapabilmeye mümkün olabilmektedir.

Bağımsız değişkenlerin birindeki bir birim artışa karşılık, bağımlı değişkende sabit bir değişiklik meydana geliyorsa tüm bu değişkenler arasında doğrusal bir ilişki vardır. Basit doğrusal regresyon analizinde bir bağımlı ve bir bağımsız değişken söz konusu iken, çoklu doğrusal regresyon analizinde ise bir bağımlı değişken varken iki ya da daha fazla bağımsız değişken bulunmaktadır (Eğer bağımlı ve bağımsız değişkenler arasında eğrisel bir ilişki var ise bu ilişki eğrisel regresyon analizi ile açıklanmaktadır.). Basit doğrusal regresyon analiz birçok durum için elverişli olabilmektedir. Ancak gerçek hayatta birçok modelin açıklaması için iki veya daha fazla açıklayıcı değişkene gerek duyulmaktadır.

Analiz sonuçlarının yorumlanmasında ciddi hatalar yapılmaktadır. En yaygın hata, regresyon analizi sonuçlarının yorumlanmasında, x_i bağımsız değişkeninin/değişkenlerinin y bağımlı değişkenine sebep olduğu şeklindeki yorumdur. Bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkendeki değişimi açıklıyor olması sebepselliği gerekli kılmaz. Başka bir ifade ile bağımlı ve bağımsız değişkenler arasında (pozitif veya negatif) bir ilişkinin olması her zaman bağımsız değişken(lerin) bağımlı değişkenin sebebi olduğu sonucunu doğurmayacaktır. İki değişken arasında bir ilişkinin olabilmesi için sebepsellik şart değildir. İlişkinin sebebi belki de iki değişkenin üçüncü bir değişkenle olan ilişkilerinden

kaynaklanıyor olabileceği gibi söz konusu ilişki tamamen tesadüfi olarak da ortaya çıkmış olabilir. Sebepsellik ile ilişkiselliğin aynı şeyler olmadığı unutulmamalıdır.

Doktora çalışması süresince elde edilen deney verileri kullanılarak yapılan regresyon analizlerinde sonucunda bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkileri gösteren (3.5), (3.6) ve (3.7)'deki gibi formüle edilen matematiksel denklemler üretilmiştir.

$$y = b_0 + b_1 x \quad (3.5)$$

$$y = b_0 + b_1 x_1 + \dots + b_n x_n \quad (3.6)$$

$$y = b_0 + b_1 x^2 + b_2 x \quad (3.7)$$

Bu denklemdeki y : bağımlı değişken, x_i : bağımsız değişken, b_n : regresyon katsayı parametrelerini ifade etmektedir (Kalaycı, 2006).

Regresyon analizlerinde matematiksel denklem oluşturulurken genelde en küçük kareler ve en büyük olasılırlılık teknikleri olarak bilinen iki yaklaşımdan birisi kullanılmaktadır (URL-2, 2011).

Stabilizasyon çalışmalarında genellikle LL, PI ve serbest basınç dayanımı değerlerine ait kriterler (Claire (1961), KTSŞ (2006), NGS (1967) ve U.S. Army Corps. of Eng. (2003) olduğu gibi) şartnamelerde ve sözleşmelerde verildiğinden bu özellikler bağımlı değişken, kür zamanı ve karışımlara katılan perlit oranı bağımsız değişkenler olmak üzere çoklu doğrusal regresyon analizleri, diğer mühendislik özelliklerinde ise Bölüm 3 içerisinde verilen deneylere ait değişim eğrilerine uygun olacak şekilde en yüksek determinasyon katsayılarını (R^2) veren basit doğrusal regresyon veya basit eğrisel regresyon analizleri yapılmıştır. Bu analizlerde bağımlı ve bağımsız değişkenler arasında en küçük kareler yöntemi ile matematiksel ilişkiler üretilmiştir.

3.2.1. Likit Limit ve Plastisite İndislerinin Çoklu Doğrusal Regresyon Analizi

Perlit katkı oranı ve kür süresine bağlı olarak kıvam deneylerinde elde edilen veriler Bölüm 3.1'de tablolar ve şekiller halinde verilmişti. Buradaki PI ve LL değerlerine göre yapılan çoklu doğrusal regresyon analizleri sonucunda ortaya çıkan değişkenler arasındaki ilişki denklemleri (3.8), (3.9), (3.10) ve (3.11)'de gösterilmiştir.

SP karışımları için;

$$LL, \% = 80.1 - 0.856 P + 0.118 T \quad R^2 = 0.95 \quad (3.8)$$

$$PI, \% = 53.6 + 0.779 P - 0.165 T \quad R^2 = 0.97 \quad (3.9)$$

SKP karışımları için;

$$LL, \% = 63.9 - 0.498 P + 0.510 T \quad R^2 = 0.91 \quad (3.10)$$

$$PI, \% = 14.1 - 0.207 P + 0.301 T \quad R^2 = 0.88 \quad (3.11)$$

P: Perlit oranı (%), T: Zaman (gün)

Bu analiz çıktılarının determinasyon katsayılarının (R^2) yüksek çıkması LL ve PI için seçilen değişkenlerin işlevselliğini göstermektedir. (3.8), (3.9), (3.10) ve (3.11)'deki ilişki denklemleri yardımıyla, istatistiksel olarak yeterli doğrulukta (Analizlerde %95 güvenilirlik düzeyi seçilmiştir.), doğal malzemenin LL ve PI değerlerinde tahmin ve kestirimde bulunmak için perlit ve kür süresi değişkenlerine bağlı olarak gerçekleştirilebilir. Kirecin kullanıldığı SKP karışımlarının (3.10) ve (3.11)'deki çoklu doğrusal regresyon analiz denklemlerinde kullanılan kireç oranının bağımsız değişken olarak LL ve PI değerlerine etkisi bakılmış ancak katsayı parametresinin (b_n) sıfır olduğu görülmüştür. Bunun sebebi olarak; karışımlarda kullanılan kireç oranı etkisinin LL, PI gibi bağımlı değişkenlerin sayısal değerleri üzerinde olduğu, perlit oranı ve kür süresi gibi ayrı bir bağımsız değişken olarak denkleme girmesine gerek kalmaması sonucuna varılmıştır.

3.2.2. Serbest Basınç Dayanımlarının Çoklu Doğrusal Regresyon Analizi

SP ve SKP karışımlarına ait serbest basınç dayanımları ile yapılan çoklu doğrusal regresyon analizleri sonucunda ortaya çıkan ilişki denklemleri (3.12) ve (3.13)'de gösterilmiştir.

SP karışımları için;

$$\text{SBD, kPa} = 251.0 - 2.833 P + 0.076 T \quad R^2 = 0.88 \quad (3.12)$$

SKP karışımları için;

$$\text{SBD, kPa} = 1195.4 + 4.007 P + 35.774 T \quad R^2 = 0.61 \quad (3.13)$$

P: Perlit oranı (%), T: Zaman (gün)

Serbest basınç dayanımları dikkate alınarak oluşturulan regresyon denklemlerinden SP karışımlarının regresyon analizinde 0.88 gibi yüksek determinasyon sayısının çıkmasına rağmen SKP karışımlarında bu sayı 0.61 gibi düşük bir değer çıkmıştır. Bu düşük değerini nedeni olarak kirecin doğal malzeme ve perlit ile yaptığı puzolanik reaksiyonlardan dolayı serbest basınç dayanımı değerlerindeki doğrusal olmayan değişimler olduğu düşünülmektedir. Bu yüzden SKP karışımları için yapılan basit eğrisel regresyon analizindeki ilişki denklemi (3.14)'deki gibi elde edilmiş ve regresyon katsayısı 0.92'ye yükselmiştir.

SKP karışımları için;

$$\text{SBD, kPa} = -1.6041 P^2 + 84.716 P + 62.53 \quad R^2 = 0.92 \quad (3.14)$$

3.2.3. Diğer Mühendislik Özelliklerinin Regresyon Analizleri

SP ve SKP karışımlarının kompaksiyon, geçirimsizlik, serbest şişme yüzdesi ve şişme basıncı, konsolidasyon ve kesme kutusu gibi deneylerden tespit edilen mühendislik özelliklerinin perlit oranına bağlı olarak yapılan basit doğrusal ve eğrisel regresyon analizi sonuçları Tablo 3.12'de özetlenmiştir.

Tablo 3.12'deki regresyon analizleri sonucunda elde edilen determinasyon katsayılarının %80'nin üzerinde olması, ilgili mühendislik özelliklerinin değerlerinde önceden tahminler ya da kestirimler yapılabilmesine yeterli güvenilirlik seviyesinde olanak sağlamaktadır.

Tablo 3.12. Mühendislik özelliklerinin regresyon analizi denklemleri

Mühendislik özellikleri	Regresyon analizi denklemi	R ²
Optimum su içeriği, %	SP→ -0.0931 P + 23.59	0.89
	SKP→ -0.1749 P + 27.705	0.86
Maks. kuru yoğunluk, Mg/m ³	SP→ 0.0022 P + 1.469	0.98
	SKP→ 0.0027 P + 1.4371	0.95
Geçirimsizlik katsayısı, mm/sn	SP→ -1E-10 P + 7E-9	0.92
	SKP→ 7E-13 P ² + 2E-11 P + 5E-10	0.95
Serbest şişme, %	SP→ -0.0921 P + 6.7591	0.83
	SKP→ 0.0003 P ² - 0.0214 P + 1.3263	0.83
Şişme basıncı, kPa	SP→ -2.0405 P + 277.34	0.97
	SKP→ 0.0189 P ² - 1.2913 P + 62.53	0.85
Sıkışma indisi	SP→ 4E-5 P ² - 0.004 P + 0.2387	0.99
	SKP→ -0.0022 P + 0.2264	0.93
Tekrar yükleme indisi	SP→ 1E-5 P ² - 0.001 P + 0.0386	0.94
	SKP→ -0.0005 P + 0.0348	0.83
Görünür kohezyon, kPa	SP→ -0.5484 P + 38.054	0.99
	SKP→ 0.08 P ² - 6.4062 P + 140.88	0.99
İçsel sürtünme açısı, derece	SP→ -0.4509 P + 21.029	0.99
	SKP→ 0.3086 P + 60.043	0.95

4. İRDELEME

Tüm deney verileri, geoteknik özelliklerin perlit oranı-zamana bağlı değişimleri ve deney verileri ile yapılan istatistiksel çalışmalardan elde edilen bulgu ve bilgilerin irdelemesi aşağıdaki gibidir:

- ❖ Trabzon'un Gürbulak yöresinden alınan sarımtırak renkli doğal malzemenin, X-ışını kırınım analizine göre, yüksek plastisiteli ve şişme-büzülme potansiyeline sahip (aktif killer) nontronit ve montmorillonit gibi smektit grubu kil mineralleri içerdiği tespit edilmiştir. Bu kil grubunun su ile etkileşimi oldukça yüksek olduğundan (Aktivitesi 1.47) mühendislik özellikleri değişen çevre şartlarından oldukça etkilenecektir. Bu yüzden Şekil 2.3'deki heyelana ve köy evindeki göçmeye neden olacak potansiyele sahip doğal malzemenin stabilizasyonunun gerekliliği ortaya çıkmış olmaktadır.
- ❖ Erzincan ili Mollaköy beldesinden alınan ham perlitin X-ışını kırınım analizi ile doğal puzolanların karakteristik özellikleri olan amorf (camsı) yapıya sahip olduğu, mineralojik analiz ile çimentolaşma reaksiyonları için gerekli $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ içeriğinin yüksekliği (yaklaşık %86) ortaya konmuştur.
- ❖ Mineralojik analizde perlitin tek başına zeminde puzolanik (çimentolaşma) reaksiyonları başlatacak gerekli aktif CaO oranına sahip olmaması (yaklaşık %0.76) nedeniyle sönmüş kireç gibi %65 aktif CaO içeren bir bağlayıcı ile eksik olan bu etken maddenin tamamlanması düşünülmüştür. Bu yüzden SP şeklinde adlandırılan sadece perlitli karışımların yanı sıra perlit ve kirecin birlikte kullanıldığı SKP biçiminde adlandırılan karışımların da mühendislik özelliklerinin incelemesi doktora çalışması kapsamına alınmıştır.
- ❖ Gürbulak yöresi doğal malzemesinin kirece doygunluk seviyesi Şekil 2.13'de görüleceği üzere %6 olarak bulunmuştur. Bu orana kadar eklenen kireç ancak plastisite, şişme-büzülme potansiyelinde ve işlenebilirlik açısından gerekli değişimleri sağlamaktadır. Bu çalışmada ayrıca dayanım ve durabilite açısından gerekli iyileşmeler için çimentolaşma reaksiyonlarının gerçekleşmesini istediğimizden, SKP karışımlarında kullanılacak olan kireç oranını, ASTM D 6276 (2006) standardına göre kuru malzeme ağırlığının yaklaşık %8 olduğu belirlenmiş ve karışımlara eklenmiştir.

- ❖ SP karışımlarında artan perlit oranı ile likit limit ve plastisite indisi değerlerinde düşüş olurken kür süresi ile bu değerlerde önemli bir değişim olmamakta birlikte az miktarlarda artışlar görülmüştür. Plastik limit değerlerinde artan perlit oranı ve kür süresine göre karışık bir davranış söz konusudur. Bunun sebebi olarak perlitin tek başına doğal malzemenin plastik limiti üzerinde önemli bir değişim meydana getirmediği için SP karışımlarının çok küçük bir aralıkta yer alması ve homojenliği aşırı duyarlı olduğu düşünülmektedir. Zeminin şişme potansiyelinde etkili rötre limiti değerlerinde ise SP karışımlarda kullanılan perlit miktarının artmasıyla yükselmeler meydana gelmiş ve en büyük rötre limiti değerine SP50 karışımında ulaşılmıştır.
- ❖ SP karışımları LL-PI değerlerine göre Casagrande plastisite kartına işaretlendiğinde; 28 günlük kür sonunda SP50 karışımı orta plastisiteli kil (CI) bölgesinde; SP10, SP20, SP30 halen yüksek plastisiteli kil (CH) bölgesinde; SP40 karışımının ise CH ile CI sınırında olduğu görülmektedir.
- ❖ SKP karışımlarında yapılan likit limit deneyleri sonucunda ilk gün SP karışımlarına göre daha düşük değerler elde edilse de artan kür süresi ile birlikte likit limit değerleri artmaya başlayarak SP karışımlarındaki LL değerlerinin üstüne çıkmaktadır. SKP karışımlarının plastik limitleri SP karışımların plastik limitlerinden daha yüksek değerlere sahip olmaktadır. SKP karışımlarında 14. kür günü sonuna kadar likit limit ve plastik limit değerleri yükselmeye devam ederken 14. günden sonra ise plastik limit değerleri bir dengeye ulaşarak değerlerinde önemli bir değişim olmamaktadır. SKP karışımlarında artan perlit miktarı ile hem likit limit hem de plastik limit değerlerinde önemli düşüşler olmuştur. SKP karışımlarının SP karışımlarına göre rötre limiti değerlerinde tıpkı plastik limit değerlerindeki gibi artışlar olmaktadır. 14. kür gününe kadar bu rötre limiti değerleri artış göstermeye devam ederken 14. günden sonra rötre limitlerinde azalma eğilimi başlasa da önemli düşüşler olmamıştır. SKP karışımlarının plastisite indisi değerleri SP karışımlarına göre oldukça düşük çıkmıştır. Burada PL değerlerinin LL değerlerine göre daha çok yükselmesi sonucu PI değerlerinde düşüş meydana gelmiştir. SKP karışımlarının plastisite indisleri artan perlit miktarı ile azalma göstermektedir. SKP karışımlarının plastisite indisi değerlerinde 14 günlük kürden sonra hafif artışlar meydana gelmiştir. Kirecin plastisitede meydana getirdiği iyileşmelerin tamamlanması 14

gün sürdüğü LL, PL, SL ve PI değişim grafiklerine bakıldığında açıkça görülmektedir. SKP50 karışımı 14 günlük kürden sonra NP davranış göstermeye başlamıştır.

- ❖ Şekil 3.10'daki Casagrande plastisite kartında SKP karışımlarının yerine bakıldığında; 14 günlük kür sonunda SKP50 ve SKP40 orta plastisiteli silt (MI) bölgesinde; SP10, SP20, SP30 yüksek plastisiteli silt (MH) bölgesinde olduğu görülmektedir.
- ❖ SP karışımlarda artan perlit oranı ile birlikte yüksek plastisiteden orta plastisiteli seviyeye inerken doğal malzemede halen kil davranışı sergileyen tane mevcuttur. SKP karışımlarında kireç ve perlitin birlikte meydana getirdiği puzolanik reaksiyonlar sonucunda doğal malzemedeki kil davranışı gösteren tane oranının sıfır olduğu silt davranışı gösteren tanelere dönüştüğü Şekil 3.11'de verilen tane boyutu dağılım eğrileri ile göz önüne serilmektedir. Kireç zeminin efektif dane çapında ve mikro yapısında önemli değişimlere sebep olarak kil davranışına sahip Gürbulak yöresi doğal malzemesinin silt davranışı göstermeye başlamıştır. Sonuç olarak plastisite açısından bakıldığında perlit ve kirecin birlikte kullanıldığı SKP karışımlarının daha iyi sonuçlar verdiği ortadadır.
- ❖ SP karışımlarının kompaksiyon deneyi sonuçlarına bakıldığında artan perlit kullanımı ile optimum su içeriği değerleri %24.5'den %19.3'e düşerken, karışımların maksimum kuru yoğunlukları 1.461'den 1.571'e yükselmektedir. Perlitin özgül ağırlığı doğal malzemenin özgül ağırlığından daha küçük olmasından dolayı karışımların maksimum kuru yoğunluklarında bir azalma beklenmekteydi. Burada aksine maksimum kuru yoğunluklarda meydana gelen artışın karışımlarda perlit kullanımının işlenebilirlik üzerindeki olumlu etkisi sebebiyle birim hacimdeki tane miktarının arttırdığı şeklinde yorumlanabilir. SKP karışımlarının kompaksiyon deneyi sonuçlarına bakıldığında ise optimum su içeriklerinde SP karışımlara göre bir artış meydana gelmiştir. Bu artışa SKP karışımlarında bulunan kirecin ek su ihtiyacı sebep olmaktadır. Ayrıca SKP karışımlarının kuru yoğunlukları SP karışımların kuru yoğunluklarından daha küçük çıkmıştır. Ancak kuru yoğunluklardaki düşüş miktarı artan perlit oranlarında daha az olmuştur. Buna benzer bir eğilim boşluk oranlarındaki değişimde de görülmektedir.

- ❖ SP ve SKP karışımlarının geçirimsizlik katsayıları, artan perlit miktarlarına göre düşüş eğilimi göstermişlerdir. Ayrıca SKP karışımların geçirimsizlik katsayılarının SP karışımlara nazaran daha yüksek olduğu ortaya çıkarılmıştır. Bunun sebebi olarak perlit ve kirecin kullanıldığı SKP karışımlarında puzolanik reaksiyonların etkinliğinden dolayı tane davranışının kilden sitle kaymasının sebep olduğu düşünülmektedir. Çünkü siltli zeminlerin geçirimsizlik katsayısı killi zeminlere nazaran daha yüksektir.
- ❖ Trabzon'un Gürbulak yöresinden alınan doğal malzeme X-ışını kırınım analizine göre nontronit ve montmorillonit gibi smektit grubu kil mineralleri içerdiğinden şişme potansiyeline sahiptir. ASTM D 4546 (2008) ve ASTM D 3877'ye (2008) göre belirlenen serbest şişme yüzdeleri ve şişme basıncı değerleri SP ve SKP karışımlara bakıldığında, her ikisinde de artan perlit miktarı ile azalma göstermiştir. En düşük şişme değerleri yine SKP karışımlarında elde edilmiş serbest şişme yüzdesinin %7.94'den %1 altına ve şişme basıncının 282 kPa'dan 42.4 kPa seviyelerine indiği bulunmuştur.
- ❖ Sıkışma indisi değerleri incelendiğinde artan perlit kullanımı ile SP karışımlarda düşüşler meydana gelmekte birlikte perlitin kireç ile beraber kullanıldığı SKP karışımlarındaki değerler SP karışımlarından elde edilenlere göre dörtte bir mertebelerindedir. SP karışımlarındaki yeniden yükleme indisi değerlerinde kullanılan perlit miktarı ile azalma olduğu gözlenirken SKP karışımlarda karışık bir durum söz konusu olsa da SP karışımlara göre daha küçüktür. Sıkışma deneyi karışımlarının yük altındaki oturma miktarının sıkışma indisi ve yeniden yükleme indisi değerleri ile doğrudan ilişkili olduğundan bu iki indisin küçük çıktığı SKP karışımlarının çok daha başarılı olduğu sonucuna varılmıştır.
- ❖ SP karışımlarının serbest basınç dayanımı değerlerine bakıldığında SP10 karışımı hariç diğer perlitli karışımların dayanımları doğal malzemenin serbest basınç dayanımı değerinden küçük çıkmaktadır. Bilindiği gibi serbest basınç dayanımının yarısı zeminin kohezyon değerine eşittir. Perlitin NP özelliği sebebiyle karışımların kohezyonunu azaltmakta dolayısıyla serbest basınç dayanımı değerlerini düşürmektedir. Her ne kadar perlit kullanımı doğal malzemenin işlenebilirliğini artırarak daha yüksek yoğunlukta karışımlar elde edilmesine rağmen perlitin düşük aktif CaO içeriği sebebiyle taneleri birbirine kenetleyen ürünler CSH, CAH, CASH'yi oluşturacak puzolanik reaksiyonların

gerçekleşmemesi ve düşen kohezyonu karşılayamadığından serbest basınç dayanımı değerlerinde düşüşler görülmüştür. Sadece SP10 karışımında görülen artışın sebebi olarak diğer SP karışımlarına göre kohezyondaki düşüşün az olması sebebiyle doğal malzemeye göre daha yoğun bir yapı elde edilmesi ve az da olsa gerçekleşen puzolanik reaksiyonlar ile serbest basınç dayanımında yükseliş olmaktadır. Kür süresi arttıkça serbest basınç dayanımlarında görülen artış puzolanik reaksiyonların oluştuğuna bir işaret kabul edilmekle birlikte değişimin az olması sadece perlitin çimentolaşma reaksiyonları için yetersizliğini ortaya koyan bir işarettir.

- ❖ SKP karışımlarında ise serbest basınç dayanımları oldukça yüksek değerlere ulaşmıştır. SP karışımlara nazaran artış miktarı 13-27 kat mertebelerindedir. En yüksek artış miktarı olan 27 en çok perlitin kullanıldığı SKP50 karışımında elde edilmiştir. Yüksek aktif CaO içeriğiyle kirecin perlit ve doğal malzeme ile yaptığı puzolanik reaksiyonlar bu kadar yüksek iyileşmenin ana sebebidir. Artan kür sürelerinde yükselen serbest basınç dayanımı değerlerine bakıldığında en yüksek değere 84. kür günü sonunda SKP30 karışımında ulaşılmıştır. SKP0 karışımının ilk gün serbest basınç dayanımı SP0 karışımından daha düşük çıkarken perlitin kullanıldığı SKP karışımlarında ise tam tersi bir durum söz konusudur. SKP karışımlarının serbest basınç dayanımlarında 28. kür gününe kadar meydana gelen artış miktarlarının 28 ile 84. kür günü arasında yavaşladığı deney sonuçlarında görülmüştür. Bu davranış SKP karışımlardaki puzolanik reaksiyonların ilk 28 günde büyük oranda gerçekleştiğinin bir göstergesidir. Ayrıca SKP karışımlarından hazırlanan numunelerin serbest basınç deneylerindeki kırılma biçimleri ani ve gevrek kırılma şeklinde olmuştur. SKP karışımları, serbest basınç dayanımı değerlerine bakıldığında SP karışımlarına göre daha çok iyileşme sağlamaktadır.
- ❖ SP ve SKP karışımlarının kesme kutusu deneylerinde elde edilen görünür kohezyon değerleri dikkate alındığında artan perlit oranı ile birlikte düşüşler meydana gelirken, SKP karışımlarının görünür kohezyon değerleri SP karışımlara göre yüksek çıkmaktadır. SP karışımlarında perlitin tanesinin kırıklık yüzeyinin (açısal) etkisi olumlu olurken karışımların içsel sürtünme açıları 20.5°'den 43.0°'e yükseltmiştir. SKP karışımlarında perlit ve kireç arasındaki kuvvetli puzolanik reaksiyonlar ile içsel sürtünme açıları aynen serbest basınç

dayanımı değerlerindeki gibi oldukça yüksek değerlere ulaşırken, 58.7° ile 74.6° aralığında içsel sürtünme açıları elde edilmiştir. SKP karışımlarının deney numunelerinde ölçülen yatay deformasyon değerleri SP karışımlarına göre oldukça küçük olduğundan, aynen serbest basınç deneyindeki gibi göçme (kırılma) davranışı ani ve gevrek dağılma şeklinde olmaktadır. Serbest basınç ve kesme kutusu deneylerinde numunelerin kırılma davranışına bakıldığında SKP karışımlarından hazırlanan numuneler rijit bir yapı teşkil etmektedirler (Bu da SKP karışımlarının elastisite modüllerinin çok yüksek olması sonucunu doğuracaktır.). Sonuç olarak SKP karışımları yüksek dayanım değerleri ve düşük deformasyonları ile zemin stabilizasyon işlemlerinde SP karışımlara göre çok daha avantajlı olmaktadır.

- ❖ Durabilite açısından hacimsel stabiliteyi ve serbest basınç dayanımını esas alan iki ayrı kriter göz önü alındığında tüm SP karışımları ile SKP0, SKP10 ve SKP20 karışımları mühendislik özelliklerini korumada değişen çevre koşullarında yetersiz oldukları görülmüştür. SKP karışımlarından sadece SKP30, SKP40 ve SKP50 karışımlarının hacimsel stabiliteyi ve serbest basınç dayanımını esas alan iki yöntemle göre yapılan durabilite kontrollerinde sınır değerleri sağladıkları ortaya çıkarılmıştır. Değişen çevre koşullarına dayanıklılık açısından (durabilite) yalnız kireç ile iyileştirilen doğal malzemenin (SKP0 karışımı) başarısız olurken kirecin perlitte birlikte kullanıldığı SKP30, SKP40 ve SKP50 karışımlarının başarılı olması perlitin puzolanik aktivitesinin kireç ile birlikte zemine sağladığı dikkat çekici bir fayda olmaktadır.
- ❖ LL, PI ve serbest basınç dayanımı değerleri üzerinde gerçekleştirilen çoklu doğrusal regresyon analizleri ile kullanılan perlit oranı ve zamana bağlı olarak matematiksel ilişkiler üretilmiştir. Bu ilişkilerin istatistiksel olarak yeterli doğrulukta olduğunu gösteren yüksek determinasyon katsayılarının (R^2) bulunması perlitte yapılacak sonraki çalışmalarda deney sonuçlarında tahminler ya da kestirimler yapabilmelerini mümkün kılmaktadır. Ayrıca doktora çalışması kapsamında yapılan diğer zemin mekaniği deneylerine ait sonuçlar yardımıyla da perlit oranına bağlı mühendislik özelliklerinin regresyon analizlerden elde edilen ilişki denklemleri verilmiştir. Bu ilişki denklemlerinde de yüksek determinasyon sayılarının (R^2) bulunması yeter doğrulukta tahmin ve kestirimler yapmayı olanaklı hale getirmektedir.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Zayıf zeminlerin mühendislik özelliklerini ıslahında mekanik ve kimyasal iyileşmeyi sağlayan yöntemlerin beraber kullanımı en ekonomik ve en etkili çözümler olmaktadır. Bu açıdan doktora çalışmasında kullanılan perlit, granüler ve plastisite özelliği olmayan yapısı ile yoğunlukta, plastisitede, içsel sürtünme açısında, hacimsel stabilitede ve işlenebilirlikte pozitif değişimler yapmakla birlikte, ortama eklenecek kalsiyum esaslı ikinci bir bağlayıcı ile yapısındaki yüksek miktardaki SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 gibi oksitler arasında gerçekleşen puzolanik reaksiyonlar sayesinde kimyasal iyileşmeler sağlanmıştır. Böylece zeminin bütün geoteknik özelliklerinde aynı anda iyileşmeler elde edilmiştir.

Gürbulak beldesinden tedarik edilen smektit grubu kil mineralleri içeren yüksek plastisiteli doğal malzemenin stabilizasyonunda %0, %10, %20, %30, %40, %50 perlit ve %8 kireç (sadece SKP karışımlarında) kullanılarak 6 tane SP ile 6 tane SKP karışım hazırlanarak bunların geoteknik özellikleri incelenmiştir. Ayrıca deneylerde “perlit oranı” ve “zaman” bağlı olarak karışımların geoteknik özelliklerinin nasıl değişim gösterdiği araştırılmıştır.

Bu doktora tezinden aşağıdaki sonuçları çıkarmak mümkündür:

- ❖ Sadece perlitin katkı olarak kullanıldığı SP karışımlarının plastisite özelliğinin göstergeleri olan LL ve PI değerlerinde, kullanılan perlit oranı ile doğrusal şekilde bir düşüş olmuştur. Bu değerlerde zamana bağlı önemli bir değişim gözlenmemiştir.
- ❖ SKP karışımlarında perlit ve kirecin birlikte kullanımı ile LL, PL ve SL değerlerinde zaman içinde büyük artışlar olurken, artan perlit miktarı bu değerlerde düşüslere sebep olmuştur. SKP karışımlarında PL değeri LL değerinden daha fazla arttığı için karışımların plastisitelerinde önemli iyileşmeler sağlanmıştır.
- ❖ SKP karışımlarda perlit ve kireç arasındaki çimentolaşma reaksiyonları zeminin mikro yapısında ve tane çapında önemli değişimlere neden olduğundan, yüksek plastisiteli kil içeren Gürbulak yöresi zemini silt ve ince kum davranışı göstermeye başlamıştır.
- ❖ Perlit ve kirecin özgül ağırlığının doğal malzemeden düşük olmasına rağmen perlitin hem tek başına hem de kireçle birlikte işlenebilirlikte sağladığı iyileşme

sayesinde, karışımların yoğunlukları daha da yükselmiş ve boşluk oranları azalmıştır. Burada artan perlit kullanımı SP ve SKP karışımlarda işlenebilirlikte pozitif etki yapmıştır.

- ❖ Artan perlit kullanımı SP ve SKP karışımlarda daha geçirimsiz bir yapı elde etmeyi sağlarken, SKP karışımlarda kireç kullanımı ile birlikte zemin geçirimliliği arttırmıştır.
- ❖ SP ve SKP karışımlarında perlit kullanımının artması, serbest şişme ve şişme basıncı değerlerinde düşüşe neden olurken en iyi sonuçlara perlitin kireç ile birlikte kullanıldığı SKP karışımlarında ulaşılmıştır.
- ❖ Yük altında hacim sıkışması miktarı artan perlit oranlarında düşüş gösterirken en iyi sonuçlara yine perlitin kireç ile birlikte kullanıldığı SKP karışımlarında elde edilmiştir.
- ❖ SP karışımların artan perlit oranı ve zamana bağlı olarak serbest basınç dayanımında, SP10 karışımı hariç, düşüşler görülürken, SKP karışımlarında perlit ve kireç arasındaki kimyasal reaksiyonlar sebebi ile perlit miktarı ve zamana bağlı olarak gelişen büyük artışlar olmuştur. Serbest basınç dayanımlarına bakıldığında elde edilen toplam iyileşme 15.4-19.5 kat seviyelerinde ulaşırken, SKP karışımlarda perlit kullanımının katkısı %11-%40 arasında dayanım artışı olmuştur. Serbest basınç dayanımındaki en büyük iyileşmelere %30 perlit ve %8 kireç içeren SKP30 karışımında ulaşılmıştır.
- ❖ Direk kesme deneyi parametrelerinden olan görünür kohezyon değerlerinde artan perlit miktarı ile düşüşler olmakla birlikte SKP karışımlarının görünür kohezyonları SP karışımlara nazaran daha yüksek çıkmaktadır. Perlit kullanımının artması ile karışımların içsel sürtünme açılarında büyük artışlar elde edilmiştir.
- ❖ Hacimsel stabiliteyi ve serbest basınç dayanımını esas alan durabilite tetkiklerinde SP karışımlar yeterli dayanıklılığı gösteremezken, perlit ve kirecin birlikte kullanıldığı SKP30, SKP40 ve SKP50 karışımlarının değişen çevre şartlarına dayanıklı olduğu ortaya çıkmıştır.
- ❖ İşlenebilirlik, yoğunluk, plastisite, şişme-büzülme potansiyeli, sıkışma, dayanım ve durabilite açısından bakıldığında Gürbulak yöresi yüksek plastisiteli zeminin stabilizasyonu için en optimum karışımın SKP30 olduğu sonucuna varılmıştır.

- ❖ Elde edilen deney verileri ile yapılan regresyon analizlerinde lineer ve lineer olmayan matematiksel denklemler elde edilmiştir. Bu denklemler; LL, PI ve serbest basınç dayanımı ile perlit oranı ve zaman değişkenleri arasında, diğer mühendislik özelliklerinde ise sadece perlit oranına bağlı olarak türetilmiştir. Burada seçilen değişkenlerle, söz konusu geoteknik özellikler arasında güçlü ilişkilerin mevcut olduğu görülmüştür.

Bu konuda yapılabilecek yüksek lisans ve doktora çalışmalarına ışık tutması amacıyla aşağıdaki öneriler sunulmuştur:

- ❖ Doğal puzolan tanelerinin inceliği arttıkça aktivitesi artmaktadır. Bu çalışmada kullanılan perlit tanelerinin inceliği artırılarak deney sonuçlarının nasıl değiştiği araştırılabilir.
- ❖ Bu doktora çalışmasında perlitin kireç ile etkileşimi incelenmiştir. Aynı şekilde zemin stabilizasyon çalışmalarında perlit ve çimentonun ilişkisi de bir incelenme alanıdır.
- ❖ Pomza taşı gibi diğer doğal puzolanların Gürbulak yöresi doğal malzemesinin kirecsiz/kireçli karışımları ile standart zemin deneyleri yapılarak perlit ile karşılaştırılması yapılabilir.
- ❖ Kaolin veya illit türü kil içeren doğal malzemelerle perlitin kirecsiz ve kireç ile birlikte meydana getireceği iyileşme incelenebilir.
- ❖ Perlitin zemin stabilizasyonunda sağladığı iyileşmeleri daha sağlıklı görebilmek için arazide dolgu, yol alttemeli veya yol temeli üretiminde kullanılarak mühendislik özellikleri araştırılabilir.

6. KAYNAKLAR

- AASHTO, 1993. Guide for Design of Pavement Structures, AASHTO M 147, USA, 63-65.
- Abd El-Aziz, M., A., Abo-Hashema, M., A. ve El-Shourbagy, M., 2004. The Effect of Lime-Silica Fume Stabilizer on Engineering Properties of Clayey Subgrade, Paper No.96, Engineering Conference of Mansoura University Faculty, April, Sharm.
- Adalier, K., 1996. Mitigation of Earthquake-Induced Liquefaction Hazards, PhD Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, New York.
- Ahmad, R., 1988. Engineering Properties and Mineralogical Composition of Expansive Clays in Al-Qatif Area, Master Thesis, King Fahd University of Petroleum and Minerals, Saudi Arabia.
- Akawwi, E. ve Al-Kharabsheh, A., 2000. Lime Stabilization Effects on Geotechnical Properties of Expansive Soils in Amman-Jordan, Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 5, 1, 1-10.
- Akman, M., S., 1990. Yapı Malzemeleri, İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası Sayı: 1408, İstanbul.
- Akman, S. ve Esenli, F., 1992. A Comparative Study of Natural Pozzolans Used Blended Cement Production, IV. Canment / ACI International Conference of Fly Ash, May, İstanbul, Bildiriler Kitabı: 471-477.
- Alataş, T., 1996. Afşin Elbistan Termik Santrali Uçucu Külünün Yol Stabilizasyonunda Çeşitli Maddelerle Kullanımı Üzerine Bir Araştırma, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Al-Mukhtar, M., Lasledj, A. ve Alcover, J., F., 2010. Behaviour and Mineralogy Changes in Lime-Treated Expansive Soil at 50°C, Applied Clay Science, 50, 199-203.
- Al-Rawas, A., A., Hago, A., W. ve Al-Sarmi, H., 2005. Effect of Lime, Cement and Sarooj (Artificial Pozzolan) on the Swelling Potential of an Expansive Soil from Oman, Building and Environment, 40, 681-687.
- Al-Rawas, A., A., Taha, R., Nelson, J., D., Al-Shab, T., B. ve Al-Siyabi, H., 2002. A Comparative Evaluation of Various Additives Used in the Stabilization of Expansive Soils, Geotechnical Testing Journal, 25, 2, 199-209.
- Anday, M., C., 1962. Accelerated Curing for Lime Stabilized Soils, HRB Bulletin No. 304, National Research Council, Washington DC, 1-13.

- Anday, M., C., 1963. Curing Lime-Stabilized Soils, HRB Bulletin No. 29, National Research Council, Washington, 13-24.
- Ansary, M., A., Noor, M., A. ve Islam, M., 2006. Effect of Fly Ash Stabilization on Geotechnical Properties of Chittagong Coastal Soil, Geotechnical Symposium, March, Roma, 443-454.
- Arabani, M. ve Karami, M., V., 2007. Geotechnical Properties of Lime Stabilized Clayey Sands, The Arabian Journal of Science and Engineering, 32, 1B, 11-25.
- Arman, A. ve Moonfish, G., A., 1972. Lime Stabilization of Organic Soils, Research Record No. 381, Highway Research Record, Washington, 37-45.
- ARRB, 1969. Symposium on the Selection and Construction of Base Materials in Roads, Bulletin No. 5, October, Melbourne.
- ASTM C 618, 2002. Annual Book of ASTM Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete, American Society for Testing and Materials, PA.
- ASTM C 989, 1994. Standard Specification for Ground Granulated Blast-Furnace Slag for Use in Concrete and Mortars, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 2166, 2006. Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 2435, 2011. Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 2974, 2007. Standard Test Methods for Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Other Organic Soils, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 3080, 2011. Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 3877, 2008. Standard Test Methods for One-Dimensional Expansion, Shrinkage, and Uplift Pressure of Soil-Lime Mixtures, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 422, 2007. Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 4318, 2010. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 4546, 2008. Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Collapse of Cohesive Soils, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 559, 2003. Standard Test Methods for Wetting and Drying Compacted Soil-Cement Mixtures, ASTM, Pennsylvania.

- ASTM D 5856, 2007. Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Porous Material Using a Rigid Wall Compaction-Mold Permeameter, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 6276, 2006. Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 698, 2007. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 854, 2010. Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 934, 2003. Standard Practices for Identification of Crystalline Compounds in Water-Formed Deposits, ASTM, Pennsylvania.
- Atanur, A., 1973. Kireç Stabilizasyonu ve Yol Yapımındaki Tatbikatı, Karayolları Genel Müdürlüğü Matbaası, Ankara, 11-17.
- Atterberg, A., 1911. The Behaviour of Clays with Water, Their Limits of Plasticity and Their Degrees of Plasticity, Kungliga Lantbruksakademiens Handlingor Och Tidskrift, 50, 2, 132-158.
- Attom, M., F. ve Al-Sharif, M., M., 1998. Soil Stabilization with Burned Olive Waste, Applied Clay Science, 113, 219-230.
- Aytekin, M., 2004. Deneysel Zemin Mekaniği, Teknik Yayınevi, Ankara, 206-207.
- Aytekin, S., 2009. Uçucu Küllerin Killi Zeminlerin İslahında Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi , Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Baradan, B., 2000. Yapı Malzemesi II, Mühendislik Fakültesi Yayınları No. 207, Dokuz Eylül Üniversitesi Matbaası, İzmir, 1-7.
- Bell, F., G., 1996. Lime Stabilization of Clay Minerals and Soils, Engineering Geology, 42, 223-237.
- Bhattacharjee, U. ve Kandpal, T., C., 2002. Potential Fly Ash Utilisation in India, Energy, 27, 2, 151-166.
- Bozbey, I. ve Garaisayev, S., 2010. Effects of Soil Pulverization Quality on Lime Stabilization of an Expansive Clay, Environmental Earth Science, 60, 1137-1151.
- Brooks, R., M., 2009. Soil Stabilization with Fly Ash and Rice Husk Ash, Int. Journal of Research and Reviews in Applied Sciences, 1, 3, 209-217.

- Buhler, R., L. ve Cerato, A., B., 2007. Stabilization of Oklahoma Expansive Soils Using Lime and Class C Fly Ash, GeoDenver Congress: New Peaks in Geotechnics, 1-10.
- CAN/CSA, 1986. Supplementary Cementing Materials, Canadian Standards Association, CSA.A23.5.M86, Ontario, 10-17.
- Casagrande, A., 1932. Research on the Atterberg Limits of Soils, Public Roads, 13, 8, 121-136.
- CDIT, 2002. The Deep Mixing Method: Principles, Design and Construction, Coastal Development Institute of Technology, AA Balkema, Netherlands.
- Chen, F., H., 1988. Foundation on Expansive Soils, American Elsevier Science Publication, New York, 64-82.
- Chu, S., C. ve Kao, H., S., 1993. A Study of Engineering Properties of a Clay Modified by Fly Ash and Slag, ASCE Fly Ash for Soil Improvement-Geotechnical Special Publication, New York, 89-99.
- Claire, K., E., 1961. Soil Stabilization in the Tropics, Road and Road Construction, 12, 357-360.
- Coduto, D., P., 2006. Geoteknik Mühendisliği İlkeler ve Uygulamalar, Gazi Kitabevi, Ankara, 114 s.
- Craig, R., F., 1978. Soil Mechanics Second Edition, Van Nostrand Reinhold Company, England, 1-4.
- Çetiner, S., I., 2004. Stabilization of Expansive Soils by Çayırhan Fly Ash and Desulphogypsum, Master Thesis, Middle East Technical University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara.
- Çimen, Ö., 2005. Pomzanın Mühendislik Karakteristikleri ve Yüksek Plastisiteli Bir Kilin Stabilizasyonunda Kullanılması, Türkiye Pomza Sempozyumu, Eylül, Isparta, Bildiriler Kitabı: 251-257.
- DPT, 2001. Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, Devlet Planlama Teşkilatı Yayın No: 2617, Başbakanlık Basımevi, Ankara, 24-56.
- Davidson, D., T., Mateos, M. ve Barnes H., F., 1960. Improvement of Lime Stabilization of Montmorillonite Clay Soils with Chemical Additives, HRB Bulletin No. 15, National Research Council, Washington, 33-50.
- Dawson, R., F., 1956. Special Factors in Lime Stabilization, Highway Research Board Bulletin No. 19, National Research Council, Washington, 103-110.

- Dawson, A., R., Elliot, R., C., Rowe, R., C. ve Williams G., M., 1995. Assesment of Suitability of Some Industrial By-Products for Use in Pavement Bases in the UK, TRB Record No. 1486, Transportation Research Board, Washington, 114-123.
- Dayı, M., 2006. Doğal ve Yapay Puzolanların Kompoze Çimento Üretiminde Kullanabilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Drake, J., L., 1971. Accelerated Curing of Lime and Salt-Lime Modified and Stabilized Cohesive Oklahoma Soils, Master Thesis, Oklahoma State University, Oklahoma.
- Dunn, C., S., 1966. Stability of Aggregates Used in Road Subbases, Road and Road Construction, 17, 253-259.
- Eades, J., L. ve Grim, R., E., 1960. The Reaction of Hydrated Lime with Pure Clay Minerals in Soil Stabilization, Bulletin No. 262, Highway Research Board, 51-63.
- Edil, T., B., Acosta, H., A. ve Benson, C., H., 2006. Stabilizing Soft Fine Grained Soils with Fly Ash, Journal of Materials in Civil Engineering, 18, 2, 283-294.
- Edil, T., B., Benson, C., H., Bin-Shafique, M., S., Kim, W., Tanyu, B., F. ve Senol, A., 2002. Field Evaluation of Construction Alternatives for Roadway over Soft Subgrade, Record No. 1786, Transportation Research Board, Washington, 36-48.
- El-Rawi, N., M. ve Abdul-Hasan, M., 1986. Effect of Chemical Additives on the Strength of Some Iraqi Soils-Lime Mixtures, Journal of Building Research Center, 14, 3, 25-31.
- Ene, E. ve Okagbue, C., 2009. Some Basic Geotechnical Properties of Expansive Soil Modified Using Pyroclastic Dust, Engineering Geology, 107, 61-65.
- Erdoğan, T., Y., 2003. Beton, Middle East Technical University Press, Ankara, 169-207.
- Erşan, H., 1996. Uçucu Küllerin Siltli Zeminlerin Kayma Mukavemeti Üzerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Fang, H., Y., 1991. Foundation Engineering Handbook 2nd Edition, Van Nostrang Reinhold Publishing, London.
- Ferguson, G., 1993. Use of Self-Cementing Fly Ash as a Soil Stabilizing Agent, ASCE, New York.

- FHWA, 1998. Ground Improvement Technical Summaries Final Draft, FHWA Demonstration Project No.116 Contact No. DTFH61-93-R-00145 by Elias V., Welsh J., Warren J., Lukas R., USA.
- Ghosh, A. ve Subbarao, C., 2007. Strength Characteristics of Class F Fly Ash Modified with Lime and Gypsum, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 133, 7, 757-766.
- Guney, Y., Sari, D., Cetin, M. ve Tuncan, M., 2007. Impact of Cyclic Wetting-Drying on Swelling Behavior of Lime Stabilized Soil, Building and Environment, 42, 681-688.
- Gündeşli, U., 2008. Uçucu Kül, Silis Dumanı ve Yüksek Fırın Cürufunun Beton ve Çimento Katkısı Olarak Kullanımı Üzerine Bir Kaynak Taraması, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Güven, İ. H., 1993. Doğu Pantidlerin Jeolojisi ve 1/250000 Ölçekli Komplikasyonu, MTA, Ankara.
- Hanchanloet, S., 1999. Evaluation of a New Chemical Stabilization Method on Physical and Strength Properties of Cohesive Soils, Master Thesis, The University of Texas, USA.
- Harichane, K. ve Ghrici, M., 2009. Effect of Combination of Lime and Natural Pozzolana on the Plasticity of Soft Clayey Soils, Near East University 2nd International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, May, North Cyprus, 574-581.
- Harichane, K., Ghrici, M., Khebizi, W. ve Missoum, H., 2010. Effect of the Combination of Lime and Natural Pozzolana on the Durability of Clayey Soils, The Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 15, 1194-1210.
- Hausmann, M., R., 1990. Engineering Principles of Ground Modification, McGraw-Hill, New York, 632-635.
- Hayward, B., 1996. Ground Modification Seminar Notes, Odenton.
- Holtz, R., D., ve Kovacs, W., D., 1981. An Introduction to Geotechnical Engineering, Prentice Hall, New Jersey, 96-102.
- Howard, D., D., 1966. Evaluation of an Accelerated Curing Procedure for Stabilization of Kaolinite with Lime, Technical Report No. 47, River Division Laboratories, Ohio.
- Huat, B., B., K., Maail, S. ve 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.

- Hunt, R., E., 1986. Geotechnical Engineering Techniques and Practices, McGraw Hill, USA.
- Hunt, R., E., 1994. Geotechnical Engineering Investigation Manual, McGraw Hill, USA.
- Hunter, D., 1988. Lime Induced Heave in Sulfate Bearing Clays, Journal of Geotechnical Engineering, 114, 2, 150-167.
- Ingles, O., G. ve Metcalf, J., B. 1973. Soil Stabilization, John Wiley&Sons, New York.
- İpek, T., 1998. Stabilization of Expansive Soils Using Lime, Cement and Fly Ash, Master Thesis, Middle East Technical University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara.
- Jewell, R., J., 1968. An Evaluation of Criteria for Selection of Pavement Base Course Materials in Western Australia, Master Thesis, University of Western Australia, Australia.
- Jha, J., N. ve Gill, K., S., 2006. Effect of Rice Hush Ash on Lime Stabilization, Journal of the Institution of Engineers, 87, 33-39.
- Kalaycı, Ş., 2006. SPSS Uygulamalı Çok Değişkenli İstatistik Teknikleri, Asil Yayınları, Ankara.
- Katebi, H., 2009. Lime Stabilisation of Calcareous Soil, Journal of Institution of Engineers, 90, 3-6.
- Kedzi, A., 1979. Stabilized Earth Roads, Elsevier, Amsterdam, 325-327.
- Khatab, S., A., A., Al-Juari, K., A., K. ve Al-Kiki, I., M., A., 2008. Strength, Durability and Hydraulic Properties of Clayey Soil Stabilized with Lime and Industrial Waste Lime, Al-Rafidain Engineering, 16, 1, 102-116.
- Kolay, P., K., Sii, H., Y. and Taib, S., N., L., 2011. Torpical Peat Soil Stabilization Using Class F Pond Ash from Coal Fired Power Plant, International Journal of Civil and Environmental Engineering, 3, 2, 79-83.
- Kota, P., B., V., Hazlett, D. ve Perrin, L., 1996. Sulfate-Bearing Soils: Problems with Calcium Based Stabilizers, Record No. 1546, Transportation Research Board, Washington.
- Kreps, R., D. ve Walker, R., D., 1971. Highway Materials, McGraw Hill, USA.
- KTŞ, 2006. Karayolu Teknik Şartnamesi (Yol Altyapısı, Sanat Yapıları, Köprü ve Tüneller, Üstyapı ve Çeşitli İşler), Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara, 35 s.
- Kukko, H., 2000. Stabilization of Clay with Inorganic Products, Journal of Materials in Civil Engineering, 12, 4, 307-309.

- Kumar, B., R., P. ve Sharma, R., S., 2004. Effect of Fly Ash on Engineering Properties of Expansive Soils, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 130, 7, 764-767.
- Laguros, J., G., Davidson, D., T., Handy, R., L. ve Chu, T., Y., 1956. Evaluation of Lime for Stabilization of Loess, ASTM, 56, 1301-1315.
- Lambe, P., C., Khosla, N., P. ve Jayaratne, N., N., 1990. Soil Stabilization in Pavement Structures, Report No. 232411-88-1, Transportation Studies Research, North Carolina.
- Leckebush, R., 1984. Türkiye'deki Doğal Puzolanların Çimento Katkı Maddesi Olarak Kullanımı, Çimento Araştırma ve Geliştirme Merkezi, Ankara, 1-10.
- Ledbetter, R., H., 1985. Improvement of Liquefiable Foundation Conditions Beneath Existing Structures, Technical Report No. REMR-GT-2, Dept. of The Army, USA.
- Lees, G., Abdelkader, M., P. ve Hamdani, S., K., 1982. Effect of the Clay Fraction on Some Mechanical Properties of Lime-Soil Mixtures, Journal of Highway Engineering, 29, 11, 2-9.
- Lim, S., Jeon, W., Lee, J., Lee, K. ve Kim, N., 2002. Engineering Properties of Water/Wastewater-Treatment Sludge Modified by Hydrated Lime, Fly Ash and Loess, Water Research, 36, 4177-4184.
- Lin, D., F., Lin, K., L. ve Luo, H., L., 2007. A Comparison between Sludge Ash and Fly Ash on the Improvement in Soft Soil, Journal of the Air-Waste Management Association, 57, 59-64.
- Little, N., D., 1987. Fundamentals of the Stabilization of Soil with Lime, Bulletin No. 232, National Lime Association, Arlington , 19-20.
- Manasseh, J. ve Olufemi, A., I., 2008. Effect of Lime on Some Geotechnical Properties of Igumale Shale, Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 13, 1-12.
- Mathew, P., K. ve Rao, S., N., 1997. Effect of Lime on Cation Exchange Capacity of Marine Clay, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 123, 2, 183-185.
- Mazlum, F., 1989. Pirinç Kabuğu Külünün Puzolanik Özellikleri ve Külün Çimento Harcının Dayanıklılığına Etkisi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- McCallister, L., D. ve Petry, T., M., 1990. Property Changes in Lime Treated Expansive Clays under Continuous Leaching, Report No. DACA 39-88-M-0550, US Army Corps of Engineers, Washington.

- Mehta, P., K., 1986. Concrete-Structure, Properties and Materials, Prentice-Hall, New Jersey.
- Mielenz, R., C., 1983. Mineral Admixtures-History and Background, Concrete International ACI, August, 34-42.
- Miller, G. ve Azad, S., 2000. Influence of Soil Type on Stabilization with Cement Kiln Dust, Journal of Construction Build Materials, 14, 2, 89-97.
- Mitchell, J., K., 1976. Stabilization of Soils for Foundations of Structures, University of California-Department of Civil Engineering Press, Berkeley.
- Mitchell, J., K., 1986. Practical Problems from Suprising Soil Behavior, Journal of Geotechnical Engineering, 112, 3, 259-289.
- Mitchell, J., K., 1993. Fundamentals of Soil Behaviour 2nd Edition, John Wiley&Sons Inc., New York, 437 s.
- Mitchell, J., K. ve Gallagher, P., M., 1998. Guidelines for Ground Improvement of Civil Works and Military Structures and Facilities, Publication No. ETL 1110-1-185, U.S. Army of Corps. of Engineers, Washington, 109 p.
- Mohamed, A., M., O., 2000. The Role of Clay Minerals in Marly Soils on its Stability, Engineering Geology, 57, 193-203.
- Mollamahmutoglu, M., Yilmaz, Y. ve Güngör, A., G., 2009. Effect of a Class C Fly Ash on the Geotechnical Properties of an Expansive Soil, Int. Journal of Eng. Research-Development, 1, 1, 1-6.
- Nalbantoğlu, Z. ve Tuncer, E., R., 2001. Compressibility and Hydraulic Conductivity of a Chemically Treated Expansive Clay, Canadian Geotechnical Journal, 38, 154-160.
- Nalbantoglu, Z., 2006. Lime Stabilization of Expansive Clay, Expansive Soils: Recent Advances in Characterization and Treatment, Taylor-Francis/Balkema, London, 341-348.
- Nelson, J., D. ve Debora, J., M., 1992. Expansive Soils-Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering, John Willey&Sons Inc., London, 259-261.
- NGS, 1997. General Specification for Road and Bridges, Nigerian General Specifications, Nigeria.
- NLA, 1988. Chemical Lime Facts, Bulletin No. 214, National Lime Association, Arlington.

- Okafor, F., O. ve Okonkwo, U., N., 2009. Effects of Rice Husk on Some Geotechnical Properties of Lateritic Soil, Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies, 15, 67-74.
- Okucu, A., 1998. Bigadiç ve Turnatepe Yörelerindeki Zeolitik ve Perlitik Tüflerin Puzolanik Özellikleri, Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- Ola, S., A., 1974. Need for Estimated Cement Requirements for Stabilization of Laterite Soils, Journal of Transportation Engineering, 100, 2, 379-388.
- Ola, S., A., 1978. The Geology and Geotechnical Properties of the Black Cotton Soils of North-Eastern Nigeria, A.A. Balkema, Rotterdam, 131-144.
- Ölmez, H., 1988. Endüstriyel Tarımsal Atıkların Çimento Üretiminde Değerlendirilmesi, Yayın No. 47, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Yayınları, Samsun, 79-80.
- Önalp, A., 2002. Geoteknik Bilgisi I: Çözümlü Problemlerle Zeminler ve Mekanığı, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Önalp, A. ve Sert, S., 2006. Geoteknik Bilgisi III - Bina Temelleri, Birsen Yayınevi, İstanbul, 206-243.
- Özaydın, K., 1989. Zemin Mekanığı, Birsen Yayınevi, İstanbul, 22-23.
- Petry, T., M. ve Little, D., N., 1992. Update on Sulfate Induced Heave in Treated Clays: Problematic Sulfate Levels, Record No. 1362, Transportation Research Board, Washington.
- Puppala, A., J. ve Hanchanloet, S., 1999. Evaluation of a New Chemical Treatment Method on Strength and Resilient Properties of a Cohesive Soil, Record No. 990389, Transportation Research Board, Washington.
- Quigley, R., M., 1975. Compaction-Strength-Stabilization Properties of Weathered Surface Clays of Southwestern Ontario, OJT CRP Project L-3, Ministry of Natural Resources, USA, 96-98.
- Rahman, M., A., 1986. The Potentials of Some Stabilizers for Use of Laterite Soil in Construction, Journal of Building and Environment, 21, 1, 57-61.
- Rajasekaran, G. ve Rao, S., N., 2002. Permeability Characteristics of Lime Treated Marine Clay, Ocean Engineering, 29, 113-127.
- Ramachandran, V., S., 1995. Concrete Admixtures Handbook, Noyes Publication, New Jersey.
- Rodriguez, A., R., Castillo, H. ve Sowers, G., F., 1973. Soil Mechanics in Highway Engineering, Trans Tech Publications, Germany.

- Rollings, M., P. ve Rollings, R., S., 1996. Geotechnical Materials in Construction, McGraw Hill, New York.
- Sakr, M., A. ve Shahin, M., A., 2009. Utilization of Lime for Stabilizing Soft Clay Soil of High Organic Content, Geotech. Geol. Eng., 27, 105-113.
- Sezer, A., Inan, G., Yılmaz, H., R. ve Ramyar, K., 2006. Utilization of a Very High Lime Fly Ash for Improvement of Izmir Clay, Building and Environment, 41, 1, 150-155.
- Silitonga, E., Levacher, D. ve Mezazigh, S., 2009. Effects of the Use of Fly Ash as a Binder on the Mechanical Behaviour of Treated Dredged Sediments, Environmental Technology, 30, 8, 799-807.
- Sivapullaiah, P., V. ve Lakshmikantha, H., 2005. Lime Stabilized Illite as a Liner, Ground Improvement, 9, 1, 39-45.
- Skempton, A., W., 1953. The Colloidal Activity of Clays, 3rd Int. Conference on Soil Mechanics and Foundation Zurich University, August, Switzerland, 57-61.
- Sumner, M. ve Naidu, R., 1998. Sodic Soils-Distribution, Properties, Management and Environmental Consequences, Oxford Univ. Press, New York, 3-17.
- TEAŞ, 2000. Faaliyet Raporu, Ankara.
- Terzaghi, K. ve Peck, R., B., 1967. Soil Mechanics in Engineering Practice, John Wiley&Sons Inc., New York.
- Thompson, M., R., 1964. Lime Reactivity of Illinois Soils as It Relates to Compressive Strength, PhD Thesis, University of Illinois at Urbana, Illinois.
- Thompson, M., R., 1969. Mixtures Design for Lime-Treated Soils, Civil Engineering, Studies No. 26, Highway Engineering Series, Illinois.
- Thompson, M., R. ve Dempsey B., J., 1969. Autogenous Healing of Lime-Soil Mixtures, Report No. 263, Highway Research Records, Washington.
- Tokyay, M. ve Erdoğan, K., 1998. Türkiye Termik Santrallerinden Elde Edilen Uçucu Küllerin Karakterizasyonu, TÇMB, Ankara.
- Tonoz, M., C., Ulusay, R. ve Gokceoglu, C., 2004. Effect of Lime Stabilization on Engineering Properties of Expansive Ankara Clay, Earth and Environmental Science, 104, 466-474.
- Toros, H., 1987. Afşin Elbistan Termik Santrali Uçucu Küllerinin Yapı Malzemesi Olarak Kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Adana.

- TS 1500, 2000. İnşaat Mühendisliğinde Zeminlerin Sınıflandırması I. Baskı, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 6-10.
- TS 25, 1975. Tras, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 639, 1975. Uçucu küller, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1744-1, 2000. Agregaların Kimyasal Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 1: Kimyasal Analiz, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Tsonis, P., Christoulas, S. ve Koliyas, S., 1983. Soil Improvement with Coal Ash in Road Construction, The 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, September, Moscow, 961-964.
- Tunç, A., 2002. Yol Mühendisliğinde Geoteknik ve Uygulamaları, Atlas Yayın Dağıtım, Ankara, 490-493.
- Türköz, M., 2006. Şişen Killerin Kireç Katkısı ile Stabilizasyonu ve Eskişehir-Meşelik Killerine Uygulanması, Eskişehir Osmangazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi, 19, 75-88.
- U.S. Army Corps. of Eng., 2003. Guidelines on Ground Improvement for Structures and Facilities, Research No. 20314-1000, Department of the Army, Washington.
- URL-1, maps.google.com Gürbulak Haritası. 23 Kasım 2007.
- URL-2, www.istatistikanaliz.com/regresyon_analizi.asp Regresyon Analizi. 02 Mart 2011.
- Uzuner, B., A., 2001. Çözümlü Problemlerle Temel Zemin Mekaniği, Teknik Yayınevi, Ankara.
- Uzuner, B., A., 2011. Temel Mühendisliğine Giriş, Derya Kitabevi, Trabzon, 330-347.
- Ün, H., 2007. İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemeleri Ders Notları, Pamukkale Üniversitesi, Denizli.
- Van Impe, W., F., 1989. Soil Improvement Techniques and Their Evolution, A.A. Balkema, Rotterdam, 125 s.
- Verma, C., L., Handa, S., K. ve Jain, S., K., 1998. Techno-Commercial Perspective Study for Sintered Fly Ash Lightweight Aggregates in India, Construction and Building Materials, 12, 6, 341-346.
- Wasti, Y., 1993. Uçucu küllerin Geoteknik Uygulamalarda Kullanımı, Endüstri Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanımı Sempozyumu, Kasım, Ankara, Bildiriler Kitabı: 37-44.
- Winterkorn, H., F. ve Fang, H., Y., 1975. Foundation Engineering Handbook, Van Nostrand Reinhold Publication, London, 176 s.

- Wong, L., S., Hashim, R. ve Ali, F., H., 2008. Strength and Permeability of Stabilized Peat Soil, Journal of Applied Sciences, 8, 21, 3986-3990.
- Yazıcı, V., 2004. Stabilization of Expansive Clays Using Granulated Blast Furnace Slag (GBFS), GBFS-Lime Combinations and GBFS Cement, Master Thesis, Middle East Technical University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara.
- Yıldırım, S., 2002. Zeminlerin İncelenmesi ve Temel Tasarımı, Birsen Yayınevi, İstanbul, 466 s.
- Yıldız, E., 2006. Farklı Tipteki Puzolanların Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Yılmaz, I. ve Civelekoglu, B., 2009. Gypsum: an Additive for Stabilization of Swelling Clay Soils, Applied Clay Science, 44, 166-172.
- Yoder, E., J. ve Witczak, M., W., 1975. Principles of Pavement Design, John Wiley&Sons Inc., New York.

ÖZGEÇMİŞ

Ümit ÇALIK, 02 Eylül 1980'de Trabzon ili Vakfıkebir ilçesinde doğdu. 1986-1991 yılları arasında Trabzon 24 Şubat İlkokulu'nda ve 1991-1994 yılları arasında Trabzon Cumhuriyet Ortaokulunda olmak üzere ilköğretimini, 1994-1998 yılları arasında Trabzon Fatih Lisesi'nde ortaöğretimini tamamladı. 1999 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde lisans öğrenimine başladı. 2004 yılında mezun olduktan sonra, aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda doktora öğrenimine başladı.

Kasım 2005'de Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü'nde araştırma görevlisi olarak meslek hayatına başlayan Ümit ÇALIK, Nisan 2011'de Karayolları Genel Müdürlüğü 10. Bölge Müdürlüğü Giresun Dereli Yol Kontrol Şefliğine kontrol mühendisi olarak atandı.

İyi derece İngilizce bilmektedir.