

**DEĞİŞİK DISPERSİF AJAN VE ÇİMENTO İLE STABİLİZE EDİLEN
KİLİN SERBEST BASINÇ DAYANIM ÖZELLİKLERİ**

Ayşegül GÖREN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ŞUBAT 2013
ANKARA**

Ayşegül GÖREN tarafından hazırlanan “DEĞİŞİK DİSPERSİF AJAN VE ÇİMENTO İLE STABİLİZE EDİLEN KİLİN SERBEST BASINÇ DAYANIM ÖZELLİKLERİ” adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Yüksel YILMAZ

.....

Tez Danışmanı, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Nail ÜNSAL

.....

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, G.Ü.

Doç. Dr. Yüksel YILMAZ

.....

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, G.Ü.

Yrd. Doç. Dr. Nureddin DİNLER

.....

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, G.Ü.

Tez Savunma Tarihi: 05 / 02 / 2013

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Ayşegül GÖREN

**DEĞİŞİK DISPERSİF AJAN VE ÇİMENTO İLE STABİLİZE EDİLEN
KİLİN SERBEST BASINÇ DAYANIM ÖZELLİKLERİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Ayşegül GÖREN

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Şubat 2013

ÖZET

Bu deneysel çalışmada Ankara kilinin serbest basınç dayanımının çimento ve değişik dispersif ajanlarla nasıl değiştiği araştırılmıştır. Çalışmanın öncelikli hedefi çimentonun killi zeminin stabilizasyonunda kimyasal ajanların etkinliğinin araştırılmasıdır. Çalışma kapsamında kil üzerinde ilk olarak sınıflama deneyleri yürütülmüş ve zemin sınıfının yüksek plastisiteli kil olduğu saptanmıştır. Daha sonra kil üzerinde Standart Proktor deneyi yapılarak kilin optimum su muhtevası %29,81 ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı 13,42 kN/m³ olarak belirlenmiştir. Kilin optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı, katkılı ve katkısız tüm serbest basınç numunelerinin hazırlanmasında kullanılmıştır.

Serbest basınç deneyleri üç aşamada yürütülmüştür. İlk aşamada kil, saf su ve çimento/(çimento + kil) oranı %0, 5, 10 olan çimento karışımıyla elde edilen numunelerin dayanımına sadece çimentonun etkisi araştırılmıştır. İkinci aşamada kil ve ajan/su oranı %5, 10 ve 20 olan solüsyon halinde karışıma katılan kimyasal ajanların karışımıyla elde edilen numunelerin dayanımına sadece kimyasal ajanların etkisi araştırılmıştır. Kimyasal katkı olarak sodyum hegzametafosfat, alüminyum sülfat, sodyum karbonat ve sodyum silikat kullanılmıştır. Üçüncü aşamada kil, çimento ve solüsyon halinde karışıma katılan kimyasal ajanlardan oluşan karışımın serbest basınç dayanımına

Çimento ve kimyasal katkının beraber etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre imento içeriği arttıa dayanımın arttığı gözlenmiştir. Tüm kimyasal katkılarda kimyasal katkının solüsyon içindeki konsantrasyonu arttıa serbest basınç dayanımı belirgin olarak azalma eğilimi gstermektedir.

Bilim Kodu :911.1.050

Anahtar Kelimeler :Kil, imento, dispersif ajan, serbest basınç dayanımı

Sayfa Adedi :88

Tez Yneticisi :Do.Dr. Yüksel YILMAZ

UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH PROPERTIES OF VARIOUS DISPERSING AGENTS AND CEMENT STABILIZED CLAY

(M.Sc. Thesis)

Ayşegül GÖREN

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

February 2013

ABSTRACT

In this experimental study, the change of unconfined compressive strength of Ankara Clay with respect to cement and various dispersive agents has been studied. The primary purpose of the study is to investigate for the effectiveness of the chemical agents on the stabilization of the clayey soils with cement. Within the scope of this research, first of all, classification experiments have been performed which showed that the soil is a high plasticity clay. Later on, by performing Standard Proctor experiment, optimum water content and maximum dry unit weight of the clay have been determined as 29,81% and 13,42 kN/m², respectively. Values of optimum water content and maximum dry weight of the clay have been used for the preparation of unconfined compression specimens with or without additives.

Unconfined compression experiments have performed in three stages. In the first stage, solely the effect of the cement content on the strength of the specimens which are composed of cement admixture with clay, in cement/(cement + clay) percentages of 0%, 5%, 10% has been investigated. As for the second stage, only the effect of chemical agents on the strength of clay specimens that are prepared by adding the ratios of 5, 10 and 20 percent of agent/water in solution form, has been investigated. Sodium hexametaphosphate, aluminium sulfate, sodium carbonate and sodium silicate have been used as chemical agents. In the third stage, the combined effect of both cement and chemical agents on the unconfined compressive strength of specimens that are composed of clay, cement and chemical agent solutions has been investigated.

According to the results obtained, it has been observed that strength increases as cement content raises. For all chemical agents, as the concentration of chemical in the solution increases, unconfined compressive strength tends to decrease noticeably.

Science Code : 911.1.050

Key Words : Clay, cement, dispersing agent, unconfined compressive strength

Page Number: 88

Adviser : Assoct. Prof. Dr. Yüksel YILMAZ

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca gösterdiği her türlü destek, ilgi ve yardımlarından dolayı saygı değer danışman hocam Doç. Dr. Yüksel YILMAZ'a, laboratuvar çalışmalarımda yardımlarını esirgemeyen Uzman Aydın GÖKÇE'ye, yüksek lisans eğitimimdeki katkıları için tüm bölüm hocalarıma, hem eğitim süresince hem de tez aşamasında sabır ve desteklerini esirgemeyen HİDROKON Müh. Müş. ve PROSAN Müh.'deki patronlarım ve tüm çalışma arkadaşlarıma, maddi, manevi her zaman her konuda destekleriyle, varlıklarıyla beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan sevgili babam Fehmi GÖREN, sevgili annem Serpil GÖREN ve sevgili kardeşim Serdar GÖREN'e sonsuz teşekkürlerimi bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xiii
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. ÇALIŞMANIN AMACI VE KAPSAMI.....	2
3. LİTERATÜR ÖZETİ.....	3
3.1. Katkı Maddeleriyle Zemin İyileştirilmesi.....	9
3.1.1. Kireç ile zemin stabilizasyonu.....	9
3.1.2. Uçucu kül ile zemin stabilizasyonu.....	11
3.1.3. Yüksek fırın cürufu ile zemin stabilizasyonu.....	13
3.1.4. Bitüm ile zemin stabilizasyonu.....	15
3.1.5. Eski kamyon lastiği ile zemin stabilizasyonu.....	17
3.1.6. Yapay polimerler ile zemin stabilizasyonu.....	18
3.1.7. Pirinç kabuğu külü ile zemin stabilizasyonu.....	21
3.1.8. Çimento ile zemin stabilizasyonu.....	22
3.1.9. Diğer kimyasal katkıları ile zemin stabilizasyonu.....	27
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	35
4.1. Çalışmada Kullanılan Kil, Çimento ve Katkı Maddeleri.....	36
4.1.1. Çalışmada kullanılan kil.....	36
4.1.2. Çalışmada kullanılan çimento.....	37
4.1.3. Çalışmada kullanılan katkı maddeleri.....	38

Sayfa

4.2. Standart Proktor Deneyi.....	41
4.2.1. Deneyin yapılışı.....	42
4.3. Dayanım Deneyi İçin Numunelerin Hazırlanması.....	43
4.4. Serbest Basınç Deneyi.....	47
4.4.1. Deneyin yapılışı.....	48
5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	49
5.1. Laboratuvar Kompaksiyon Karakteristikleri.....	49
5.2. Sadece Kil ve Çimento Katkılı Numunelerin Serbest Basınç Dayanımları.....	50
5.3. Sadece Kil ve Kimyasal Katkı Maddeleri Karışımlarının Serbest Basınç Dayanımları.....	53
5.4. Kil, Kimyasal Katkı Maddeleri ve Çimento Karışımlarının Serbest Basınç Dayanımları.....	55
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	58
KAYNAKLAR.....	59
EKLER.....	63
EK-1. Çimento ile saf kil karışımından oluşan numunelerin eksenel gerilme-ksenel birim deformasyon grafiği.....	64
EK-2. Katkı_1 ile saf kil karışımından oluşan numunelerin eksenel gerilme-ksenel birim deformasyon grafiği.....	65
EK-3. Katkı_1 ile saf kil karışımı numunelerinin serbest basınç deney sonucundaki fotoğrafları.....	66
EK-4. Katkı_1, %5 çimento ile kil karışımından oluşan numunelerin eksenel gerilme-ksenel birim deformasyon grafiği.....	67
EK-5. Katkı_1, %5 çimento ve kil karışımı numunelerinin serbest basınç deney sonucundaki fotoğrafları.....	68
EK-6. Katkı_1, %10 çimento ile kil karışımından oluşan numunelerin eksenel gerilme-ksenel birim deformasyon grafiği.....	69
EK-7. Katkı_1, %10 çimento ve kil karışımı numunelerinin serbest basınç deney sonucundaki fotoğrafları.....	70
EK-8. Katkı_2 ve saf kil karışımından oluşan numunelerin eksenel gerilme-ksenel birim deformasyon grafiği.....	71
EK-9. Katkı_2 ve saf kil karışımından oluşan numunelerinin serbest basınç deney sonucundaki fotoğrafları.....	72
EK-10. Katkı_2, kil ve %5 çimento karışımından oluşan numunelerin eksenel gerilme-ksenel birim deformasyon grafiği.....	73

Sayfa

EK-11. Katkı_2, kil ve %5 çimento karışımından oluşan numunelerinin serbest basınç deney sonucundaki fotoğrafları.....	74
EK-12. Katkı_2, kil ve %10 çimento karışımından oluşan numunelerin eksenel gerilme-eksenel birim deformasyon grafiği.....	75
EK-13. Katkı_2, kil ve %10 çimento karışımından oluşan numunelerinin serbest basınç deney sonucundaki fotoğrafları.....	76
EK-14. Katkı_3 ve saf kil karışımından oluşan numunelerin eksenel gerilme-eksenel birim deformasyon grafiği.....	77
EK-15. Katkı_3 ve saf kil karışımından oluşan numunelerinin serbest basınç deney sonucundaki fotoğrafları.....	78
EK-16. Katkı_3, %5 çimento ve kil karışımından oluşan numunelerin eksenel gerilme-eksenel birim deformasyon grafiği.....	79
EK-17. Katkı_3, %5 çimento ve kil karışımından oluşan numunelerinin serbest basınç deney sonucundaki fotoğrafları.....	80
EK-18. Katkı_3, %10 çimento ve kil karışımından oluşan numunelerin eksenel gerilme-eksenel birim deformasyon grafiği.....	81
EK-19. Katkı_3, %10 çimento ve kil karışımından oluşan numunelerinin serbest basınç deney sonucundaki fotoğrafları.....	82
EK-20. Katkı_4 ve saf kil karışımından oluşan numunelerin eksenel gerilme-eksenel birim deformasyon grafiği.....	83
EK-21. Katkı_4 ve saf kil karışımından oluşan numunelerinin serbest basınç deney sonucundaki fotoğrafları.....	84
EK-22. Katkı_4, %5 çimento ve kil karışımından oluşan numunelerin eksenel gerilme-eksenel birim deformasyon grafiği.....	85
EK-23. Katkı_4, %5 çimento ve kil karışımından oluşan numunelerinin serbest basınç deney sonucundaki fotoğrafları.....	86
EK-24. Katkı_4, %10 çimento ve kil karışımından oluşan numunelerin eksenel gerilme-eksenel birim deformasyon grafiği.....	87
EK-25. Katkı_4, %10 çimento ve kil karışımından oluşan numunelerinin serbest basınç deney sonucundaki fotoğrafları.....	88
ÖZGEÇMİŞ.....	89

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Zemin ıslah yöntemlerinin sınıflandırılması (Yıldırım, 2009).....	4
Çizelge 3.2. Stabilizasyon metodları (Tunç, 2001-2002).....	7
Çizelge 3.3. Zemin cinsine göre stabilizasyon yöntemleri (Tunç, 2001-2002).....	7
Çizelge 3.4. Uygulanabilir stabilizasyon teknikleri (Tunç, 2002).....	8
Çizelge 4.1. Çalışmada kullanılan kilin bazı fiziksel özellikleri.....	37
Çizelge 4.2. Portland Çimentosunu Oluşturan Oksitler ve Miktarları (Glasser, 1997)	37
Çizelge 4.3. Standart proktor deneyinin uygulanma kriterleri.....	40
Çizelge 4.4. Kil-çimento karışımında kullanılan malzemelerin miktarları.....	42
Çizelge 4.5. Kimyasal ajanlarla oluşturulan karışımdaki solüsyon.....	42
Çizelge 4.6. Kil, kimyasal ajan ve çimento karışımlarında kullanılan malzeme miktarları.....	42
Çizelge 4.7. Kimyasal ajanların tanımlamaları.....	43
Çizelge 5.1. Kil ve sadece çimento karışımlarının su muhtevası değerleri.....	49

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. İyileştirme yöntemlerinin dane boyutuna göre uygulanabilirliği (Yıldırım, 2009).....	5
Şekil 3.2. 3 farklı İran zemininin kireç yüzdesine göre 7 günlük serbest basınç değerleri (El-Rawi ve ark. 1995).....	10
Şekil 3.3. Yüksek plastisiteli kille tüm karışımların kür süresine göre ortalama serbest basınç mukavemet değerleri (Kızılçelik, 2010).....	11
Şekil 3.4. Her bir kür süresi için uçucu kül-kil karışımlarının tek eksenli basınç dayanımlarının saf kilin tek eksenli basınç dayanıma nazaran yüzde artışı (Sevencan, 2009).....	12
Şekil 3.5. Numunelerin katkı oranına bağlı olarak 1, 7 ve 30 günlük mukavemetleri (Aksoy ve ark., 2008).....	13
Şekil 3.6. Numunelerin karışım oranlarına göre 1, 7 ve 28 günlük serbest basınç dayanım değerleri (Bilge, 2011).....	14
Şekil 3.7. Değişik oranlarda karıştırılmış cüruf kireç ve bentonit kilinin serbest basınç dayanım değerleri (Kavak ve Bilgen, 2005).....	15
Şekil 3.8. Zemin-asfalt stabilizasyonu numunelerinde serbest basınç mukavemeti ve asfalt yüzdesi ilişkisi (Yıldırım ve ark., 2007).....	16
Şekil 3.9. Eski kamyon lastiği içeriğinin serbest basınç dayanımına etkisi (A zemini) (Akbulut ve ark., 2007).....	17
Şekil 3.10. Fiber-uçucu kül-fiber karışım oranlarına göre serbest basınç dayanımındaki değişim (Sevencan, 2009).....	19
Şekil 3.11. Polipropilen oranının serbest basınç mukavemetine etkisi (Çetin, 2011).....	20
Şekil 3.12. Kopolimer oranının serbest basınç mukavemetine etkisi (Çetin, 2011).....	20
Şekil 3.13. Pirinç kabuğu külü oranının serbest basınç mukavemetine etkisi (Sarkar ve ark., 2012).....	21
Şekil 3.14. Pirinç kabuğu külünün zemin- uçucu kül karışımının serbest basınç dayanımına etkisi (Brooks, 2009).....	22
Şekil 3.15. Çimento oranının serbest basınç dayanımına etkisi (Balasingam ve ark., 2008).....	23
Şekil 3.16. Kil çimento karışımının kür sürelerine göre serbest basınç dayanımları (Nontananandh ve ark., 2005).....	24

Şekil	Sayfa
Şekil 3.17. Çimento oranına göre serbest basınç dayanımındaki değişim (Sen, P. Ve ark., 2011).....	25
Şekil 3.18. Kür süresinin farklı çimento oranlarındaki kil-çimento karışımının serbest basınç dayanımına etkisi (Saadeldin, R ve ark., 2011).....	26
Şekil 3.19. Çimento ile stabilize edilen kilin gerilme-deformasyon eğrileri (Saadeldin, R ve ark., 2011).....	26
Şekil 3.20. Zemin- çimento karışımının 7 günlük kür süresi sonunda çimento oranına göre serbest basınç dayanımları (El-Rawi, Al-Samadi, 1996).....	27
Şekil 3.21. Kaolin kilinin HMP katkısıyla zamana göre serbest basınç dayanımı (Falamanki vd., 2008).....	28
Şekil 3.22. Sodyum silikat konsantrasyonunun karışımın zamana bağlı serbest basınç dayanımına etkisi (Moayedı, H., v.d., 2011).....	29
Şekil 3.23. Sodyum silikat-zemin karışımının zamana göre serbest basınç dayanımları (Satee, J.).....	30
Şekil 3.24. %12 çimento ile stabilize edilen zeminlerin 7 günlük serbest basınç dayanımlarının kimyasal katkı konsantrasyonu ve tipine göre değişimi (El-Rawi, Al-Samadi, 1995).....	31
Şekil 3.25. Kimyasal katkı içeriklerine göre karışımların gerilme-deformasyon ilişkileri (Abood, T. T., v.d., 2007).....	32
Şekil 3.26. Çimento ile stabilize edilen Iowa kilinin serbest basınç dayanımın kimyasal katkı oranına göre değişimi (Laguros, J. G.,1962).....	34
Şekil 4.1. Çalışmada kullanılan kilin dane boyutu dağılım eğrisi.....	36
Şekil 4.2. Zeminde kesme gerilmesi-kesme birim deformasyonu eğrileri ve tanımları (Coduto, D. P., 2006).....	46
Şekil 5.1. Çalışmada kullanılan kile ait standart kompaksiyon eğrisi.....	48
Şekil 5.2. Özdeş numunelerin serbest basınç dayanımlarındaki farklılıklar.....	50
Şekil 5.3. Kil ve sadece çimento ile oluşturulan karışımların ortalama serbest basınç değerleri.....	51
Şekil 5.4. Katkisız ve katkılı numunelerin ortalama serbest basınç dayanımları.....	52
Şekil 5.5. Kil, %5 çimento ve kimyasal katkılı numunelerin ortalama serbest basınç dayanımları.....	53
Şekil 5.6. Kil, %10 çimento ve kimyasal katkılı numunelerin ortalama serbest basınç dayanımları.....	55

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Numune sıkıştırma kalıbı.....	44
Resim 4.2. Numune Hazırlama Aşamaları.....	45
Resim 4.3. Serbest basınç deneyi aşamaları.....	47

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
CH	Yüksek plastisiteli kil
G_s	Özgöl ağırlık
γ_{dry}	Kuru birim hacim ağırlık
LL	Likit limit
M	Molarite
M_{çimento}	Çimento ağırlığı
M_{kil}	Kil ağırlığı
M_{yaş}	Yaş numunenin ağırlığı
N	Normalite
PI	Plastisite indeksi
PL	Plastik limit
w	Su muhtevası
Kısaltmalar	Açıklama
HMP	Hegzametafosfat
N.P.Ç.	Normal portland çimentosu
S.D.Ç.	Sülfat dirençli çimento
YFC	Yüksek fırın cürufu

1.GİRİŞ

Geoteknik mühendisliğindeki ilk önemli adım, yirminci yüzyılın ilk yıllarında İsveç'te, ülkedeki zemin problemlerinin çok fazla olması sonucu bu problemlere çözüm bulma çabasıyla atılmıştır. Zemin davranışı üzerinde yaptıkları birçok araştırma geoteknik mühendisliğinin doğmasına katkı sağlamıştır. Ancak geniş çapta kabul görmüş bir dal olarak geoteknik mühendisliğinin doğuşu, 1925 yılında Karl Terzaghi sayesinde olmuştur. 1920'li ve 1930'lu yıllarda diğer seçkin mühendisler de genç geoteknik mühendisliği mesleğine önemli katkılar yapmıştır. Zeminin yapısı ve davranışı ile ilgili çalışmalar günümüzde de gelişerek devam etmektedir (Coduto, 2006).

En eski inşaat malzemelerinden biri olan zemin herhangi bir inşaat alanında kullanılacağında her zaman beklenen davranışı göstermeyebilir. Zemin özelliklerinin elverişsiz olduğu durumlarda inşaat yerinin değiştirilmesi, zeminin kaldırılarak yerine daha iyi zemin konulması çoğu zaman ekonomik bir çözüm değildir. Bu çözümler yerine zeminin mühendislik özelliklerini iyileştirme açısından birçok zemin iyileştirme yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden katkı maddeleriyle zemin iyileştirme yöntemi ile ilgili bazı çalışmalar bu tez kapsamında örneklendirilmiştir.

2. ÇALIŞMANIN AMACI VE KAPSAMI

Bu yüksek lisans tezinde, belli oranlarda çimento (% 0, 5, 10) ve su ile solüsyon haline getirilmiş dispersif maddelerin (%5, 10, 20) ayrı ayrı ve birlikte kile ilave edilmesiyle elde edilen numunelerinin dayanım özellikleri deneysel olarak araştırılmıştır. Kil numuneleri üzerinde hidrometre, elek analizi, sınıflama ve standart proktor deneyleri, kil ve çimento karışımı ve bu karışıma solüsyon halindeki dispersif maddelerin ilavesinden oluşan numuneler üzerinde serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre çimento kil karışımına eklenen dispersif maddelerin, çimentonun etkinliğini nasıl etkilediği araştırılmıştır.

Elde edilen çalışmalar sonucunda bu yüksek lisans tezi 5 bölümden oluşmaktadır. Çalışmanın birinci bölümünde geoteknik mühendisliğinin başlangıcı ve zemin iyileştirilmesi ile ilgili kısa bir giriş yapılmış olup tezin amacı ve kapsamı hakkında bilgi verilmiştir. İkinci bölümde katkı maddeleriyle zemin iyileştirilmesi hakkında daha önceden yapılan araştırmalar özetlenmiş, sonuçlarına değinilmiştir. Üçüncü bölümde çalışmanın deney aşamasında kullanılan maddelerin tanımı, kullanılan materyaller ve yapılan deneyler hakkında bilgi verilmiştir. Dördüncü bölümde laboratuarda yapılan deney sonuçları irdelenmiştir. Beşinci ve son bölümde ise elde edilen deney sonuçlarına göre sonuçlar ve öneriler sunulmuştur.

3. LİTERATÜR ÖZETİ

Bu bölümde, yapılan çalışma kapsamında kilin çimento ve kimyasal katkı malzemeleri ile serbest basınç dayanım özelliklerinin iyileştirilmesi üzerine bir araştırma gerçekleştirilmesi nedeniyle daha çok katkı maddeleri ile stabilizasyon ile ilgili teorik ve deneysel çalışmalar özetlenmiştir. Stabilizasyon kavramı, genellikle zeminin kayma mukavemetini artıran, geçirgenlik ve sıkışma özelliğini azaltan işlemler için kullanılır. Benzer şekilde Karayolları Teknik Sözlüğü'ne göre; zeminin mühendislikle ilgili özelliklerini ıslah etmek için, stabilizitesini artırmak veya muhafaza etmek amacıyla kimyasal ve mekanik işlemlere tabii tutulması olarak tanımlanmaktadır (Kılıç, 2008).

Olumsuz zemin koşullarının iyileştirilmesinde mekanik, hidrolik, fiziksel ve kimyasal iyileştirme ile başlıca dört tür iyileştirme yapılabilir. Bu yöntemlerin uygulanması ile kayma dayanımını artırmak ve önemli yükler altında zemin davranışını iyileştirmek, oturmayı azaltmak, zeminden su sızıntısı kayıplarını azaltmak mümkündür (Yıldırım, 2009).

Mekanik iyileştirme ile kısa süreli mekanik kuvvetlerin etkisiyle zemin yoğunluğunun artırılması amaçlanmaktadır. Örneğin yüzeydeki zemin tabakalarının statik, titreşimli veya darbeli silindir ya da titreşimli tablalarla sıkıştırılması, zeminlerin derinde titreşimle sıkıştırılması mekanik iyileştirme yöntemleri arasında sayılabilir. Patlatma ile sıkıştırma, sıkıştırma kazıklarıyla zeminin sıkıştırılması da bu grup içerisinde sayılabilir (Yıldırım, 2009).

Hidrolik iyileştirme drenler veya kuyular yardımı ile boşluk suyu basıncının düşürülerek kayma dayanımını artırmayı hedefleyen iyileştirme yöntemidir. Kaba daneli zeminlerde kuyu ve hendeklerden pompalama ile yeraltı su seviyesinin indirilmesi, ince daneli 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 kullanılarak zemin suyunun uzaklaştırılması teknikleri bu grup içerisinde sayılabilir (Yıldırım, 2009).

Fiziksel ve kimyasal iyileştirme yüzeysel zemin tabakalarında katkıların fiziksel olarak karışımı ile yapılabilir. Doğal zeminler, endüstriyel atık ürünleri veya atıklar, birbiriyle veya zeminle reaksiyona giren çimento ve kimyasallar katkı maddesini oluşturur. Katkı, zemin boşluklarına veya yapı elemanı ile zemin arasındaki boşluğa basınçlı bir şekilde verildiğinde bu uygulama enjeksiyon adını almaktadır. Isıtma ve dondurma yolu ile yapılan iyileştirmeler (ısısal yöntemler) ile son yıllarda yurdumuzda geniş uygulama alanı bulan jet grout kolonu uygulaması bu grup içerisinde sayılabilir (Yıldırım, 2009).

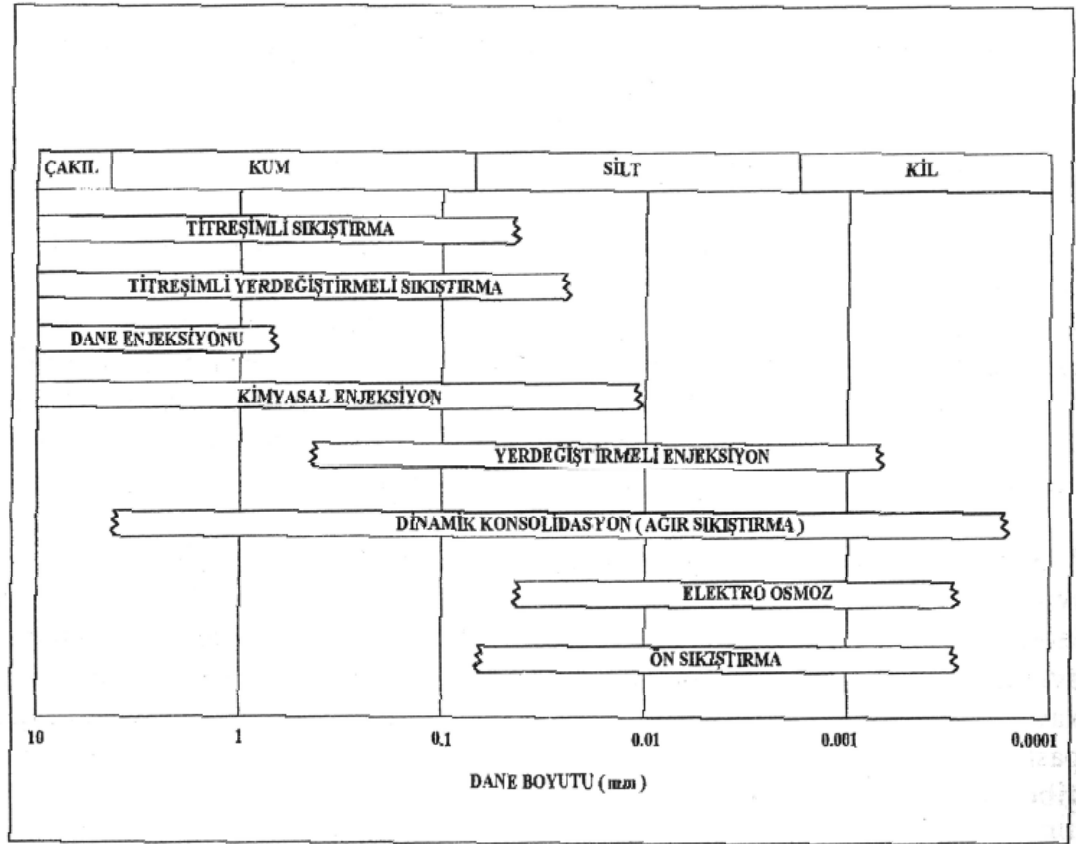
Ekleme ve sınırlama ile iyileştirmede fiberler, şeritler, donatılar ve hasırların zemine yerleştirilmesiyle zemin kütlesi dayanımı artırılmaktadır. Benzer şekilde zemin çivileri ve ankraj yerleştirilecek zeminin donatılandırılması ekleme ile yapılan iyileştirme anlamındadır. Beton, çelik veya diğer üretilmiş elemanlarla zemini sınırlandırarak duraylı zemin yapıları elde etmek mümkündür. Yaşayan (kafes) duvarlar, gabion elemanlar, geotekstilli bohçalama duvarları, taşkolon ve geokolon bu grup içerisinde sayılabilir (Yıldırım, 2009).

Bahsedilen bu zemin iyileştirme yöntemleri Çizelge 3.1’de özetlenmiştir.

Çizelge 3.1. Zemin ıslah yöntemlerinin sınıflandırılması (Yıldırım, 2009)

İyileştirme Yöntemleri			
Mekanik	Hidrolik	Fiziksel ve Kimyasal	Ekleme ve Sınırlama
Titreşimli Sıkıştırma	Ön Yükleme	Enjeksiyon	Şerit
Darbeli Silindir	Geosentetik	Isıtma-Dondurma	Donatı
Titreşimli Tabla	Diyafram Duvar	Jet Grout	Hasır
Derinde Titreşim	Palplanş Duvar	Çimento v.b. Katkı Maddeleri	Zemin Çivisi
Sıkıştırma Kazıkları	Geomembran		Ankraj
Patlatma	Basınçlı Hava		Kafes Duvar
	Pompalama		Gabion Eleman
			Bohçalama Duvarı
			Taşkolon
			Geokolon
			Fiber

Zeminlerin problem yaratan özellikleri belirlendikten sonra zemin türlerine göre stabilizasyon yöntemleri belirlenir. Şekil 3.1’de zemin iyileştirme yöntemlerinin bazılarının dane boyutuna göre hangi türlerde başarılı olabileceği gösterilmiştir. Görüldüğü gibi çakıl ve kumlar için geçerli olan tekniklerin çoğu ince taneli zeminlerde verimsiz kalmıştır. Bu durumun bir nedeni olarak killerde geçirimsizliğin düşük olması ve zemindeki su durumu gösterilebilir (Tunç, 2001-2002; Önalp, 1983; Tumluer 2006).



Şekil 3.1. İyileştirme yöntemlerinin dane boyutuna göre uygulanabilirliği (Yıldırım, 2009)

Stabilizasyon teknikleri ile zeminin hacimsel stabilitesi, mukavemeti, permeabilitesi (geçirgenlik), sıkışabilirliği, dayanıklılığı (durabilite) iyileştirilebilir (Tunç, 2002; Tumluer, 2006).

Zeminin su içeriğindeki değişimler sonucu oluşan şişme ve büzülme gibi hacimsel değişikliklerden doğan problemler, drenaj, ilave yük, seçme malzeme ile geçirimli tabaka inşası gibi zemin stabilizasyonu arasında sayılabilen yöntemlerle giderilebilir. Şişme potansiyeli yüksek bir kil kimyasal katkı ile daha yoğun ve suya duyarlılığı daha az hale dönüştürülebilir ya da zemin yüzeyi belli bir miktarda kazılıp yerine dren kabiliyeti yüksek seçme bir malzeme ile doldurulup yaratılan ilave yükü şişme basınçlarını azaltmak da bir stabilizasyon yöntemi sayılabilir (Tunç, 2002; Tumluer, 2006).

Zeminin mukavemeti genel olarak kompaksiyon ile artırılır. Ancak önyükleme (sürşarj), drenaj, mevcut zemini başka bir zeminle karıştırmak, kimyasal stabilizasyon (çimento, kireç, uçucu kül, bitüm veya kimyasal katkıları) yöntemleri ile zemin mukavemetinin iyileştirilmesi de mümkündür. Zemin mukavemeti ile ilgili sorunlara genellikle yüksek oranda organik madde içeren zeminlerde karşılaşılmaktadır (Tunç, 2002; Tumluer, 2006).

Zeminin permabilite özelliğinin değiştirilmesinde en etkin metot kompaksiyon olmakla birlikte kireç, jips, uçucu kül, puzolan v.b. maddelerin katkısı ile zemin danelerini birbirine sıkıca bağlayarak çimentolaşması sağlanabilir. Bitüm ise granüler zemin danelerinde bağlayıcılık görevi yapmakla beraber geçirimsizliği de sağlamaktadır. Ancak bu amaçla kullanılacak stabilizatörler zeminin cinsine bağlı olarak seçilmelidir (Tunç, 2002; Tumluer, 2006).

Zeminin diğer özelliklerinde olduğu gibi kompaksiyon, sıkışabilirlik özelliğinin iyileştirilmesinde kullanılan etkin bir metottur. Kompaksiyon ile zeminin sıkışabilirliğinde önemli azalmalar yaratılır. Ancak sıkışabilirlik özelliğinin iyileştirilmesinde kompaksiyon tek başına yeterli değildir. Örneğin aşırı konsolide olabilen zeminlerde konsolidasyon teknikleri uygulanmalıdır (Tunç, 2002; Tumluer, 2006).

Farklı amaçlar için zemin cinsine bağlı olarak farklı stabilizasyon yöntemleri Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. Stabilizasyon metodları (Tunç, 2001-2002)

AMAÇ	ZEMİN CİNSİ	STABİLİZASYON METODU
Yük taşıma ve deformasyon direncini artırmak	İnce granüler	Asfalt, çimento, mekanik karıştırma, kompaksiyon
	Kaba granüler	Asfalt, çimento, mekanik karıştırma, kompaksiyon
	Düşük PI killer	Kompaksiyon, çimento, kireç
	Yüksek PI killer	Kireç
Don duyarlılığını azaltmak	İnce granüler	Çimento, asfalt, uçucu kül
	Düşük PI killer	Çimento, kireç
Su geçirimsizliği	Düşük PI killer	Çimento, asfalt, kireç
Kabarma-büzülme kontrolü (hacim stabilitesi)	Düşük PI killer	Çimento, kompaksiyon, kireç
	Yüksek PI killer	Kireç
Esnekliği azaltmak	Yüksek PI killer	Kireç
	Elastik kil veya siltler	Çimento

Çizelge 3.3. Zemin cinsine göre stabilizasyon yöntemleri (Tunç, 2001-2002)

Zemin Bileşimi	Tavsiye Edilen Stabilizasyon	Amaç
Organik madde	Mekanik Stabilizasyon	Diğer metodlar etkisizdir.
Kum	Mekanik Stabilizasyon Çimento Asfalt	–İnce plastik olmayan malzeme karıştırılarak stabiliteyi artırmak –Mukavemeti artırmak –Kohezyon sağlamak
Silt	Mekanik veya kimyasal Stabilizasyon	–Zemin özelliklerini iyileştirmek
Killer; Alofenler	Kireç veya kireç-uçucu kül karışımı	–Mukavemeti artırmak
Kaolin	Kum ile mekanik stab. Çimento Kireç	–Stabiliteyi artırmak –Kısa süreli mukavemeti artırmak –İşlenebilirlik ve uzun süreli mukavemeti artırmak
İllit	Çimento Kireç	–Kısa süreli mukavemeti artırmak –İşlenebilirlik ve uzun süreli mukavemeti artırmak
Montmorillenit	Kireç	–İşlenebilirlik ve kısa süreli mukavemeti artırmak

Zeminlerin ıslahında farklı amaçlar için farklı stabilizasyon teknikleri kullanılmaktadır. Çizelge 3.4’de zemin ıslah yöntemlerinin farklı amaçlar için kullanımı özetlenmiştir. Dolayısıyla zemin cinsi, mevcut ekipman, deneyim, zemin ıslah seviyesi, v.b. hususlar göz önünde tutularak stabilizasyon yöntemi seçilmelidir (Tunç, 2002; Tumluer, 2006).

Çizelge 3.4. Uygulanabilir stabilizasyon teknikleri (Tunç, 2002)

Amaç	Stabilizasyon Tekniği
Taşıma gücü	Vibrokompaksiyon Taş kolon Dinamik kompaksiyon Patlatma Kireç/çimento kolonlar Enjeksiyon Kum/çakıl kompaksiyon kazığı Drenaj Kireç/çimento/bitüm stabilizasyonu
Ani oturma	Vibrokompaksiyon Dinamik kompaksiyon Patlatma Enjeksiyon Kireç/çimento kolonlar Kum/çakıl kolon Taş kolon
Konsolidasyon	Önyikleme Kum dren Enjeksiyon Taş kolon Kireç/çimento kolonlar
Konsolidasyon oturmasının hızlandırılması	Kum dren Önyikleme Kum/çakıl kompaksiyon kazığı
Şev stabilitesi	Payanda dolgusu Drenaj Enjeksiyon Zemin çivisi Taş kolon Kum/çakıl kolon

3.1. Katkı Maddeleriyle Zemin İyileştirilmesi

Katkı maddeleri ile iyileştirme işleminde, zeminlerin mekanik özelliklerinde çevre ve yükleme koşullarına göre gerekli iyileştirmenin güvenli, ucuz ve doğal bir malzemeye gerçekleştirilmesi amaçlanmaktadır. Daha çok ulaştırma yapıları, su yapıları, hafif yapı temelleri, katı atık depolama tesislerinde uygulanmakta olan bu işlemde kullanılan katkı malzemeleri olarak çimento, kireç, uçucu kül, bitüm, yüksek fırın cürufu, kullanılmış lastikler, yapay polimerler, pirinç kabuğu külü ve bazı özel kimyasal bileşikler sayılabilir (Kılıç, 2008).

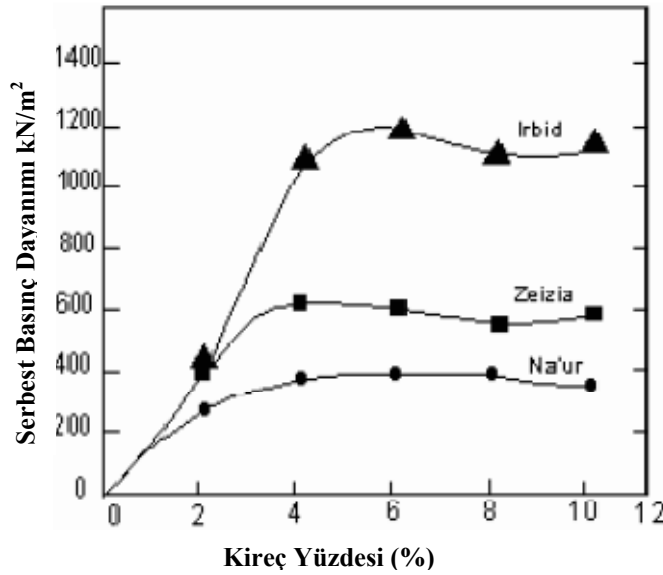
Bu katkılarla yapılan zemin stabilizasyonu ile ilgili çalışmalar aşağıda alt başlıklar halinde kısaca anlatılmıştır.

3.1.1. Kireç ile zemin stabilizasyonu

Kireç stabilizasyonu, yol kaplaması ve yapılarda sağlam bir temel tabakası oluşturmak üzere, zemin malzemesi ile kirecin birlikte kullanılması işlemidir (Çıragöz, 1962). Kireç, zeminlerin kurutulması, işlenebilirliğinin artırılması, hacim değişiminin sınırlandırılması ve dayanımının artırılması için kullanılmaktadır (Aytekin, 2004).

Kireç stabilizasyonu ile ilgili yapılan araştırmalardan El-Rawi ve Al Samadi (1995) tarafından yapılan bir çalışmada havayolu ve üstyapı inşasında kullanılacak 3 farklı İran zemini kireçle stabilize edilmiştir. Çalışmada kullanılan kireç, plastik zeminlerin dayanımını artırmak için ilave edilmiştir. Yapılan çalışmaya göre kullanılan bu üç zeminin sınıfları siltli kil (Irbid), marnlı kil (Na'ur) ve killi silt (Zeizia) şeklinde belirlenmiştir. Çalışmada zemin ağırlığının %2, 4, 6, 8 ve 10 oranlarında kireç kullanılarak, her bir zemin için 5'er farklı numune elde edilmiştir. Maksimum kuru birim hacim ağırlığında ve optimum su muhtevasında hazırlanan numuneler, 25°C'de ve 7 günlük kürde bekletildikten sonra serbest basınç deneyine tabii tutulmuştur. Çalışmalar sonucunda, siltli kildeki maksimum serbest basınç dayanımı %6 kireç içeriğinde elde edilmiş olup, serbest basınç dayanımı 1200 KN/m² bulunmuştur. Ancak %6'nın üzerinde kireç içeriğine sahip numunelerin serbest basınç dayanımı

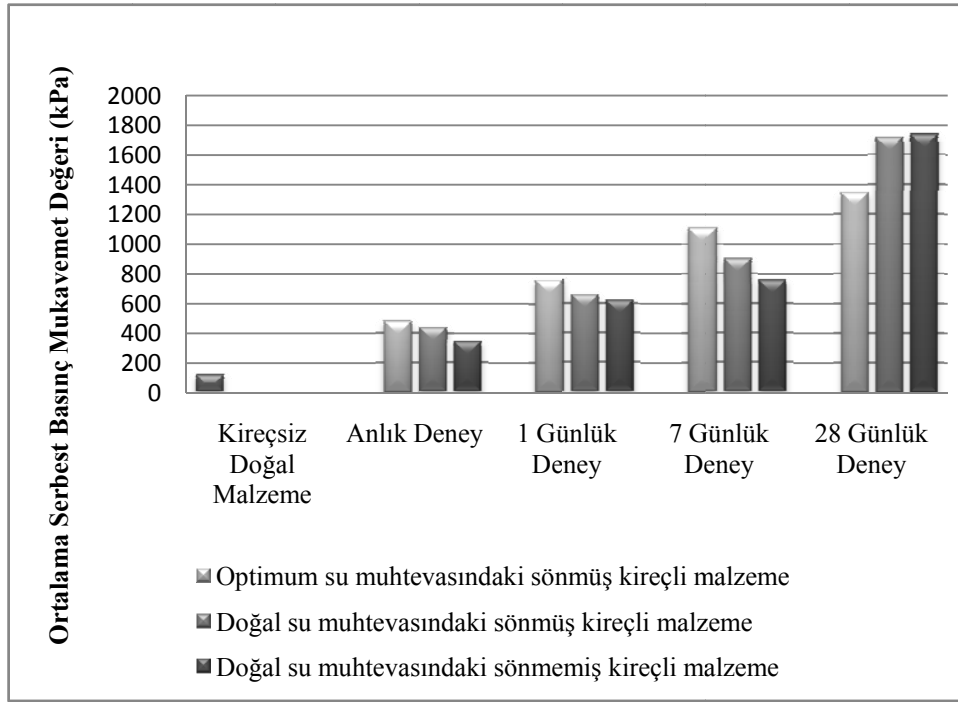
azalmaya başlamıştır. Killi siltte ve marnlı kilde sırasıyla maksimum serbest basınç dayanımı optimum kireç içeriğine göre 600 KN/m^2 ve 400 KN/m^2 bulunmuştur. Kireçle stabilize edilen 3 farklı zeminden siltli kilin diğer zeminlere göre serbest basınç dayanımında daha iyi sonuç verdiği elde edilmiştir.



Şekil 3.2. 3 farklı İran zemininin kireç yüzdesine göre 7 günlük serbest basınç değerleri (El-Rawi ve ark., 1995)

Kızılcılık (2010) tarafından yüksek plastisiteli killi zemin üzerinde yapılan çalışmada sönmüş ve sönmemiş kireç kullanımının stabilizasyona katkıları incelenmiştir. Çalışma kapsamında serbest basınç deneyine tabii tutulmak üzere; kirecsiz doğal malzeme, optimum su muhtevasında hazırlanan sönmüş kireçli malzeme ve doğal su muhtevasında hazırlanan ayrı ayrı sönmüş ve sönmemiş kireçli malzeme üzerinde dört çeşit deney yapılmıştır. Kirecsiz doğal malzemenin kullanıldığı deneyde zamana bağlı reaksiyonlar öngörülmediği için sadece anlık deney yapılmıştır. Kirecin kullanıldığı deneylerde ise kirecin zamanla reaksiyona devam etmesinden ötürü anlık, 1 günlük, 7 günlük ve 28 günlük deneyler yapılmıştır. Elde edilen deney sonuçlarına göre Şekil 3.4'ten anlaşılabacağı üzere yüksek plastisiteli kilin mukavemetinin kür süresi arttıkça arttığı görülmektedir. 28 günlük kür süresi sonunda doğal numuneye göre, optimum su muhtevasında hazırlanan sönmüş kireçli numunenin mukavemetinin yaklaşık 10 kat arttığı, doğal su muhtevasında hazırlanan sönmüş ve sönmemiş kireçli numunenin mukavemetinin de 14 kat arttığı

gözlenmiştir. 1 günlük ve 7 günlük deneylerde doğal su muhtevasında hazırlanan sönmemiş kireçli numunelerin mukavemetinin, sönmüş kireçli numunelere göre daha düşük olmasına rağmen 28 günlük deneyde sönmemiş kireçli numunenin mukavemetinin sönmüş kireçli numuneye göre daha büyük çıktığı gözlenmiştir.



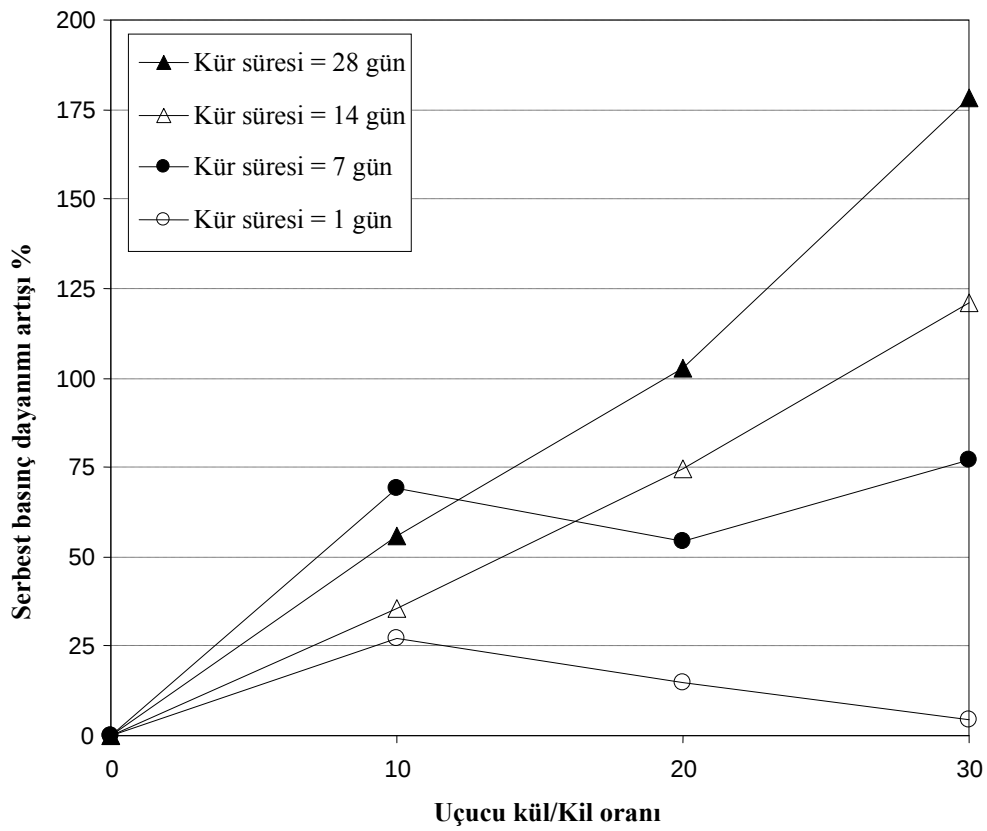
Şekil 3.3. Yüksek plastisiteli kille tüm karışımların kür süresine göre ortalama serbest basınç mukavemet değerleri (Kızılçelik, 2010)

3.1.2. Uçucu kül ile zemin stabilizasyonu

Uçucu kül, termik santrallerde kömürün yakılmasıyla oluşan gazların atmosfere bırakılmadan önce bacalardaki filtreler tarafından tutulan silt ebatında parçacıklardır (Malhotra v.d., 1994; Aksoy ve ark. 2008). Uçucu küller, dolguların stabilizasyonunda, altyapı ve taban malzemesi olarak, alt drenaj tabakası olarak, iri stabilize malzemelerin boşluklarını doldurmada ve zemin enjeksiyonunda kireçle birlikte kullanılmaktadır (Öksüz, 2006).

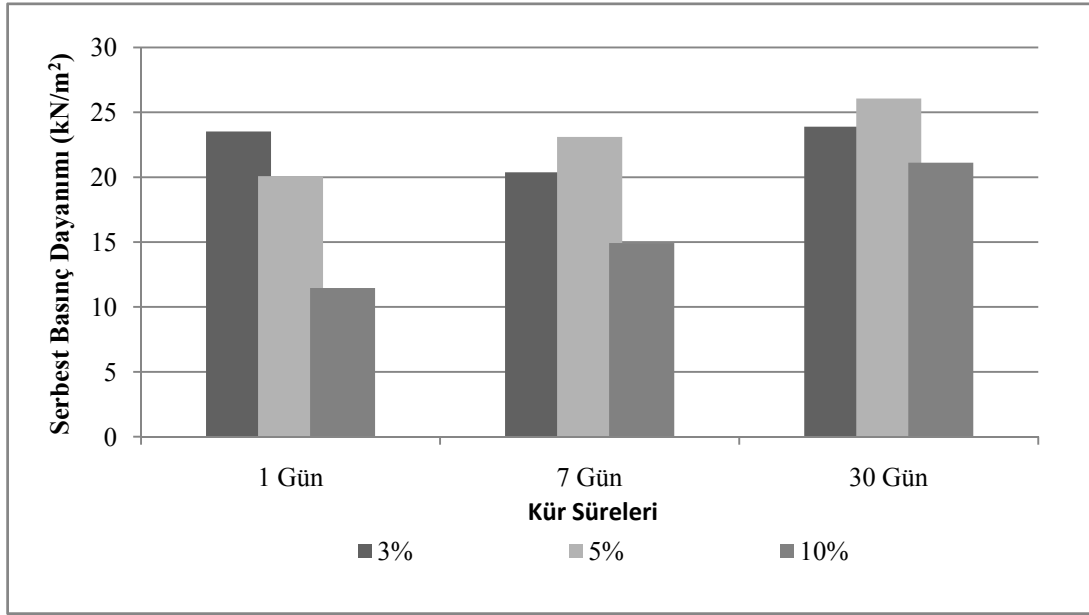
Sevencan (2009) tarafından yapılan çalışmada Ankara kilinin mühendislik özelliklerinin farklı oranlarda Çayırhan uçucu külü ile nasıl değiştiği araştırılmıştır. Çalışmada kullanılan uçucu külün kile oranı kuru ağırlıkça %10, 20, 30 'dur.

Optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlığında hazırlanan kil-uçucu kül karışımları 1, 7, 14 ve 28 günlük kür süreleri sonunda tek eksenli basınç deneyine tabii tutulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre, 1 ve 7 günlük kür süresinde karışımın serbest basınç dayanımındaki artışın az miktarda olduğu, 14 ve 28 günlük kür süresinde ise serbest basınç dayanımının uçucu kül miktarı ile belirgin bir şekilde arttığı gözlenmiştir (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Her bir kür süresi için uçucu kül-kil karışımlarının tek eksenli basınç dayanımlarının saf kilin tek eksenli basınç dayanımına nazaran yüzde artışı (Sevencan, 2009)

Aksoy ve ark. (2008) tarafından yapılan çalışmada killi bir zemin, Tunçbilek uçucu kili ile stabilize edilmiştir. Yapılan çalışmada killi zemine %0, 3, 5 ve 10 oranlarında uçucu kül katılarak optimum su muhtevasında hazırlanan numuneler üzerinde 1 günlük, 7 günlük ve 30 günlük serbest basınç deneyleri yapılmıştır.



Şekil 3.5. Numunelerin katkı oranına bağlı olarak 1, 7 ve 30 günlük mukavemetleri (Aksoy ve ark., 2008)

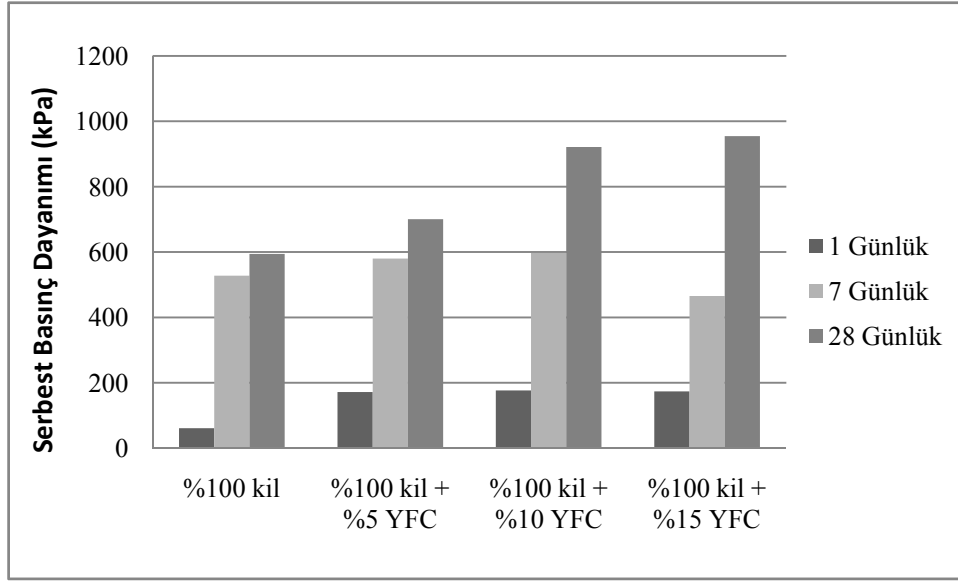
Elde edilen sonuçlara göre numunelerin içindeki uçucu kül miktarı %5'e arttıkça numunenin serbest basınç dayanımının arttığı, daha fazla uçucu kül katkısı ile serbest basınç dayanımında düşüşe geçildiği gözlenmiştir. Ayrıca kür süresi arttıkça mukavemetin arttığı gözlenmiştir (Şekil 3.5).

3.1.3. Yüksek fırın cürufu ile zemin stabilizasyonu

Cürufur çeşitli metalurji tesislerinden elde edilen atık madde gruplarından birisidir. Tüm cürufur arasında en önemlisi ve en yaygın olarak kullanılanı yüksek fırın cürufurudur (YFC). Ham demir üretiminde atık malzeme olarak elde edilen YFC yüksek fırınlarda, daha hafif olmasından dolayı, ham demirin üstünde yer alır. Demir filiz gangi, kok ve kireçtaşının yanma sonrası atıkları YFC'nu oluşturur (Tokyay, 2003; Tumluer, 2006). YFC zeminlerin yüzeysel stabilizasyonunda kullanılmaktadır.

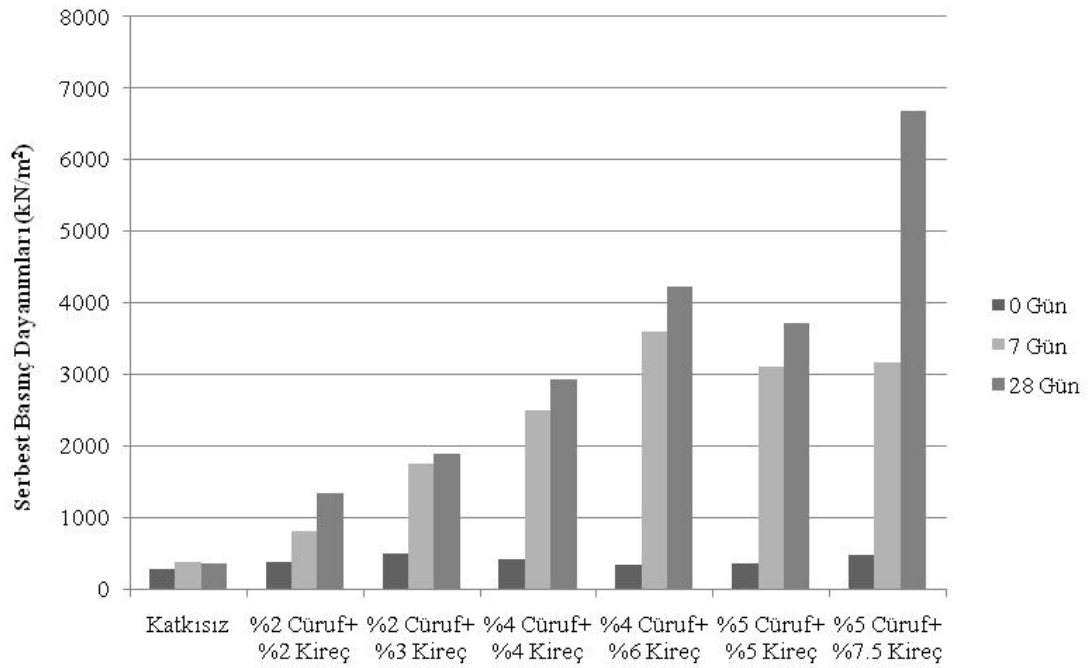
Bilge (2011) tarafından yapılan çalışmada YFC'nun bentonit kilinde iyileştirme malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. %5, 10 ve 15 oranlarında YFC ile kil karışımından oluşan numunelerin 7 günlük ve 28 günlük kür süresi sonunda serbest basınç dayanımları elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre %100 kile göre

YFC katkılı karışımlarda günlük, 7 ve 28 günlük numunelerin genel olarak serbest basınç dayanımları artmıştır. En yüksek dayanımlar 28 günlük kürde bekleyen numunelerde görülmüştür. En yüksek dayanım 28 günlük kürde bekleyen %100 kil+ %15 YFC karışımında görülmüştür (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Numunelerin karışım oranlarına göre 1, 7 ve 28 günlük serbest basınç dayanım değerleri (Bilge, 2011)

Kavak ve Bilgen (2005) atık bir malzeme olan yüksek fırın cürufunun yol alt yapısında, killi zeminin güçlendirilmesinde kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmada, laboratuvar koşullarında bentonit kili ile hazırlanan numunelere değişik oranlarda YFC ve kireç katılmak suretiyle, YFC'nun kil zemin üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Yapılan laboratuvar çalışmaları iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada bentonit ve cüruf (900 mikron boyutunda) farklı oranlarda karıştırılarak serbest basınç dayanım değerleri incelenmiş ve dayanımda bir artış gözlenmemiştir. Bu boyutlarda kullanılan cürufun uygun olmadığı anlaşılmış ve YFC 150 mikrondan küçük olacak şekilde öğütülmüş ve karışıma kireç de eklenerek deneyler tekrarlanmıştır. Bentonite 150 mikrondan elenen YFC ile kireç ağırlıkça; %2 cüruf-%2 kireç; %2 cüruf-%3 kireç; %4 cüruf-%4 kireç; %4 cüruf-%6 kireç; %5 cüruf-%5 kireç; %5 cüruf-%7,5 kireç oranlarında eklenmiştir. Optimum su muhtevasında hazırlanan serbest basınç numuneleri, 0, 7 ve 28 günlük olmak üzere üç bölümde kırılmıştır.



Şekil 3.7. Değişik oranlarda karıştırılmış cüruf kireç ve bentonit kilinin serbest basınç dayanım değerleri (Kavak ve Bilgen, 2005)

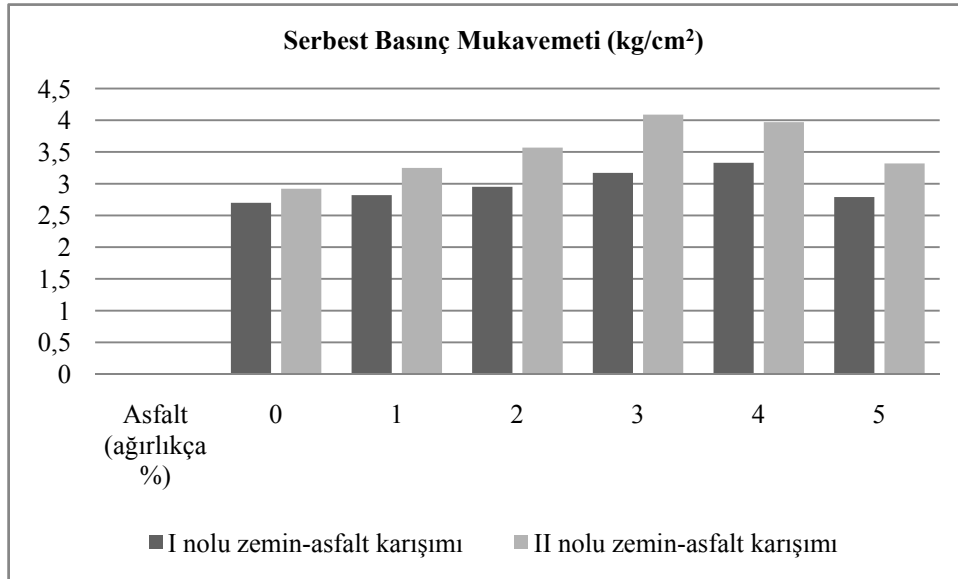
Deney sonuçlarına göre 0 günlük serbest basınç değerinde çok büyük değişiklik olmazken, 7 günlük serbest basınç değerinde 0 güne göre 6 kat artış gözlenmiştir. 28 günlük serbest basınç değerleri ise özellikle %5 cüruf+ % 7,5 kireç eklenmiş karışımların sıfır günlüğe göre 14 kat, katkısız haline göre 24 kat arttığı gözlenmiştir.

3.1.4. Bitüm ile zemin stabilizasyonu

Bitümle stabilizasyonda; asfalt, katran gibi maddeler kullanılır. Bitümlü maddelerin, taneler arasında bağlayıcılık ile geçirimsizlik sağlama işlevleri vardır. Bitüm, asfalt v.b. petrolden elde edilen siyah, yapışkan, sıcakken sıvı olan bir üründür. Bitümlü stabilizasyon, özellikle yollarda, yüzey kaplamasında kullanılır (Uzuner, 2000; Tumluer 2006).

Yıldırım ve ark. (2007) yaptıkları çalışmada zemin-asfalt karışımları üzerinde deneyler yaparak zemin-asfalt stabilizasyonu sonucunda üstyapıda sağlanacak ekonomiyi araştırmışlardır. Stabilizasyonda iki çeşit zemin kullanılmıştır. I nolu zeminde kil oranı daha fazla, II nolu zeminde ise kum oranı daha fazladır. Optimum

su içeriğinin biraz altında %10 su içeriği ile zemin numuneleri hazırlanarak içerisine %1-2-3-4-5 oranlarında 120°C sıcaklıkta MC-800 katbek asfaltı püskürtülmüş ve karışım hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler rutubetli bir ortamda 7 gün kürde bekletilmiştir. Ayrıca optimum su içeriğinde 3 adet asfaltsız numune hazırlanmıştır. Deney sonuçlarına göre I nolu zemin-asfalt karışımı numunelerde optimum asfalt miktarı %4 ve 7 günlük serbest basınç mukavemeti 3,33 kg/cm²; II nolu zeminde ise optimum asfalt miktarı %3 ve maksimum serbest basınç mukavemeti 4,09 kg/cm² olarak bulunmuştur (Şekil 3.8).

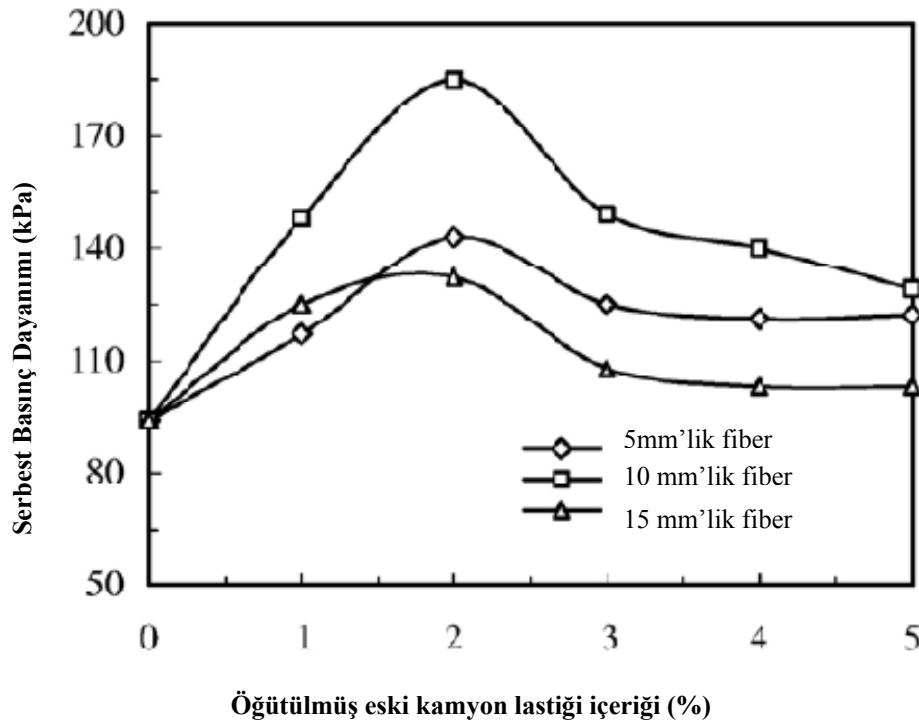


Şekil 3.8. Zemin-asfalt stabilizasyonu numunelerinde serbest basınç mukavemeti ve asfalt yüzdesi ilişkisi (Yıldırım ve ark., 2007)

3.1.5. Eski kamyon lastiği ile zemin stabilizasyonu

Geri dönüşüme katkı sağlaması ve ekonomik olması sebebiyle son on yıldır inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanılan ömrünü tamamlamış lastikler; toz, granüle veya şeritler halinde ufaltılarak kullanıldıkları gibi bütün halde ya da birçok lastiğin bir araya getirilmesi ile oluşan balyalar halinde tekrar kullanılabilir. İnşaat mühendisliği uygulamalarında parçalanmış lastiklerin kullanımı daha yaygındır. Parçalanmış lastikler birçok dolgu ve istinat duvarı uygulamalarında hafifi olması, kayma mukavemetinin yüksek olması, kolay drene olması ve ısı geçirirliğinin düşük olması gibi faydaları sebebiyle kullanılmıştır (Çetin, 2011).

Akbulut ve ark. (2007) eski kamyon lastiği kullanarak güçlendirilmiş zeminin serbest basınç dayanımı üzerine bir çalışma yapmışlardır. Yapılan çalışmada üç farklı yüksek plastisiteli kil zemin (A, B, C) ve eski kamyon lastiği kullanılmıştır. A kili %2, B kili %15 ve C kili %25 kum içermektedir. 150 mm ve daha küçük şeritler halinde kesilen eski lastikler 5mm, 10mm ve 15mm'lik fiberler halinde öğütülerek 3 farklı şekilde karışım için hazırlanmıştır. Toplam ağırlığın %1, 2, 3, 4 ve 5 oranlarındaki fiberler, optimum su muhtevsındaki kille karıştırılarak silindirik numuneler elde edilmiştir. Üç farklı boyutta ve üç farklı zemin tipine göre hazırlanan numuneler serbest basınç deneyine tabii tutulmuştur.



Şekil 3.9. Eski kamyon lastiği içeriğinin serbest basınç dayanımına etkisi (A zemin)
(Akbulut ve ark., 2007)

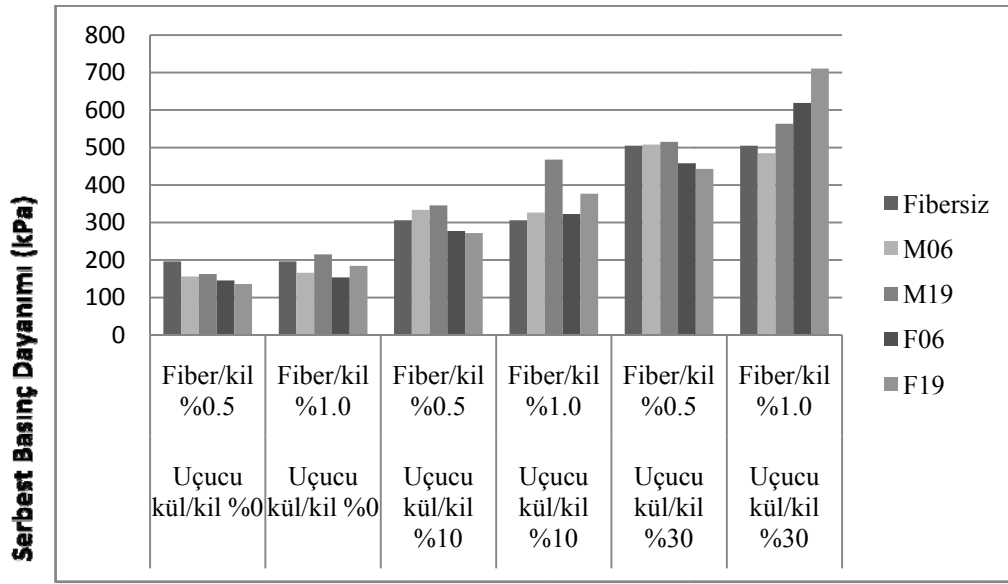
Elde edilen sonuçlara göre zemin-fiber karışımının serbest basınç dayanımının başta arttığı pik noktasından sonra azalmaya başladığı gözlenmiştir. A zemin için %2 oranında ve 10 mm boyutunda kullanılmış lastikle hazırlanan numunenin serbest basınç dayanımı katkısız numuneye göre 94 kPa'dan 185 kPa'ya yükselmiştir. B zemin için aynı karışım oranı için serbest basınç dayanımı katkısız numuneye göre 94 kPa'dan 176 kPa'a, C zemin için ise 89 kPa'dan 163 kPa'a yükselmiştir. En

yüksek serbest basınç dayanımı %2 oranında ve 10 mm boyutunda kullanılmış lastikle hazırlanan karışımdan elde edilmiş olup serbest basınç dayanımında katkısız numuneye göre yaklaşık 2 kat artış gözlenmiştir.

3.1.6. Yapay polimerler ile zemin stabilizasyonu

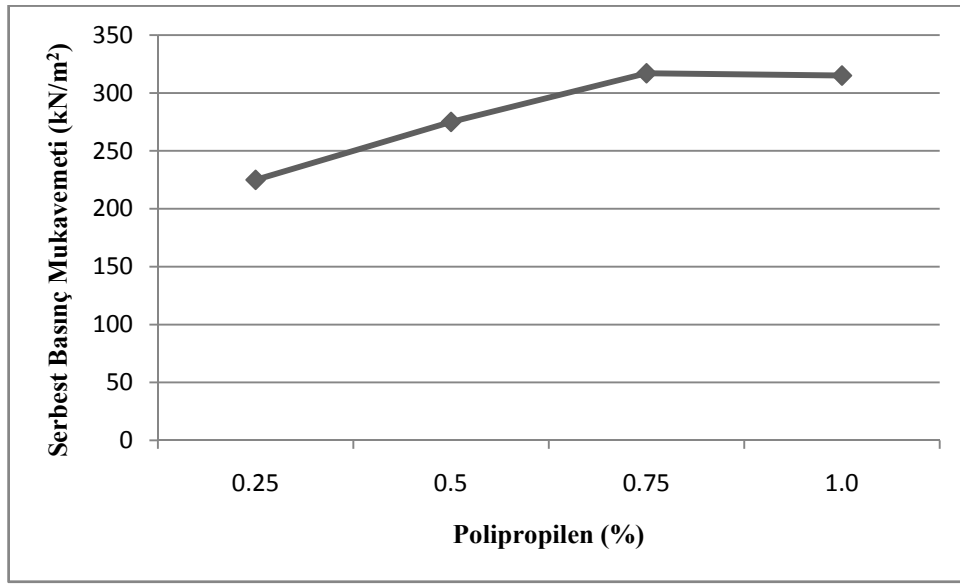
Polimerler veya polimer zincirleri, monomer denilen küçük basit moleküllerin birbirine kovalent bağlar ile bağlanmasıyla ve devamlı olarak birbirini takip etmesi sonucu meydana gelen makro bileşiklerdir. Yüzeysel zemin stabilizasyonu kapsamında, polipropilen, polyester ve kopolimer gibi polimerler, son yıllarda geoteknik mühendisliğinde alternatif malzeme olarak kullanılmaktadır (Çetin, 2011). Bu malzemelerden polifiberler %100 polipropilen esaslı olup, beton karışımlar içerisinde yıllardır kullanılan bir mikro donatı çeşidi olarak birçok uygulamada kullanılmaktadır. Polifiberler malzeme içerisine katılışları bakımından F tipi ve M tipi olarak kullanılmaktadır. M tipi polifiberler görünüm olarak ince saç teline benzemektedir. F tipi polifiberler ise ağ görünümlü liflerdir (Sevencan, 2009).

Sevencan (2009) yüksek plastisiteli kil-uçucu kül karışımlarına ilave olarak polipropilen fiberin etkisini araştırmıştır. Yapılan çalışmada 6,0 mm ve 19,0 mm olmak üzere iki farklı boyda ve M tipi (M06, M19) ve F tipi (F06, F19) olmak üzere iki farklı fiber kullanılmıştır. Fiberler uçucu kül-kil karışımlarına %0.5 ve %1.0 oranlarında eklenmiştir. Karışımdaki uçucu kül oranının %0, 10 ve 30 olduğu durumlarda, fiber katkısının karışımın 28 günlük tek eksenli basınç dayanımına etkisi araştırılmıştır. Elde edilen deney sonuçlarına göre fiber tek başına kullanıldığında tek eksenli basınç dayanımının bir miktar düştüğü gözlenmiştir. Sadece M19 fiber katkılı numunede dayanımın çok az arttığı gözlenmiştir. %30 uçucu kül içeren karışımların tek eksenli basınç dayanımının %0,5 fiber içeriği ile çok az azalırken, %10 fiber içeriği ile karışımın tek eksenli basınç dayanımının arttığı gözlenmiştir. %30 uçucu kül ve %0,1 fiber karışımları için F tipi fiberin tek eksenli basınç dayanımına etkisinin M tipi fibere göre daha fazla olduğu belirlenmiştir. Her iki fiber için fiber boyu arttıkça tek eksenli basınç dayanımının arttığı gözlenmiştir (Şekil 3.10).



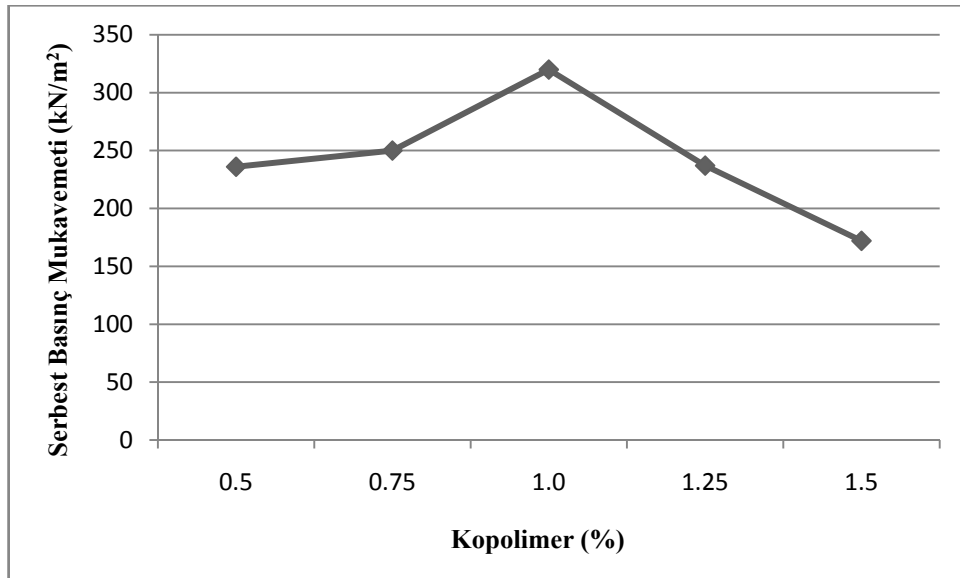
Şekil 3.10. Fiber-uçucu kül-fiber karışım oranlarına göre serbest basınç dayanımındaki değişim (Sevencan, 2009)

Yapay polimerlerle ilgili yapılan bir başka çalışmada (Çetin, 2011) yüksek plastisiteli kilin eskitilmiş kopolimer ve ağ yapılı polipropilen katkısıyla taşıma gücünün artırılmasına yönelik deneysel çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmada kuru zemin ağırlığının %0,25-0,5-0,75-1,0 oranlarında polipropilen-kil karışımları, %0,5-0,75-1,0-1,25-1,5 oranlarında kopolimer-kil karışımları hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler serbest basınç deneyine tabii tutulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre polipropilen- kil karışımlarından elde edilen maksimum serbest basınç mukavemeti %0,75 polipropilen-kil karışımından elde edilmiş olup, bu değer 317 kN/m^2 olarak belirlenmiştir. Polipropilen oranı %0,75'ten sonra arttıkça serbest basınç mukavemeti azalmaya başlamaktadır (Şekil 3.11).



Şekil 3.11. Polipropilen oranının serbest basınç mukavemetine etkisi (Çetin, 2011)

Kopolimer-kil karışımlarından elde edilen deney sonuçlarına göre maksimum serbest basınç mukavemet değeri %1,0 kopolimer-kil karışımından elde edilmiş olup, bu değer 320 kN/m² olarak belirlenmiştir (Şekil3.12).

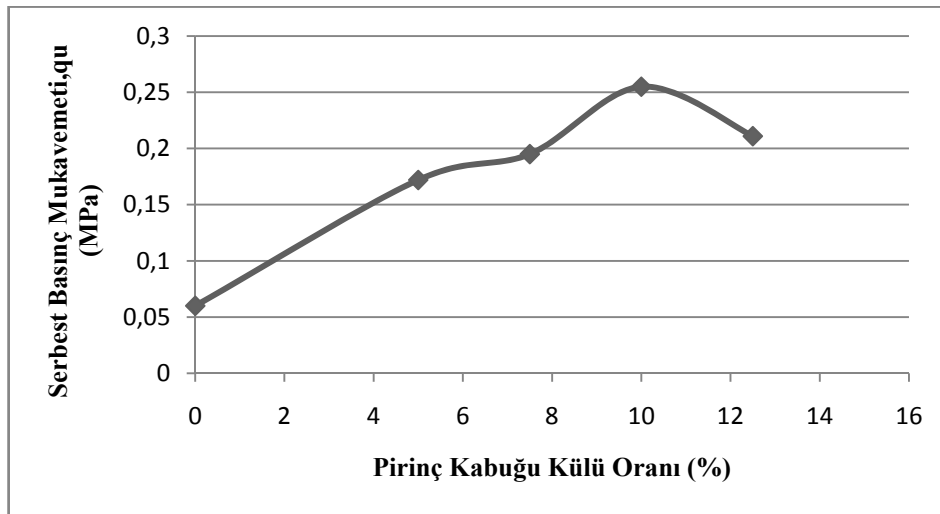


Şekil 3.12. Kopolimer oranının serbest basınç mukavemetine etkisi (Çetin, 2011)

3.1.7. Pirinç kabuğu külü ile zemin stabilizasyonu

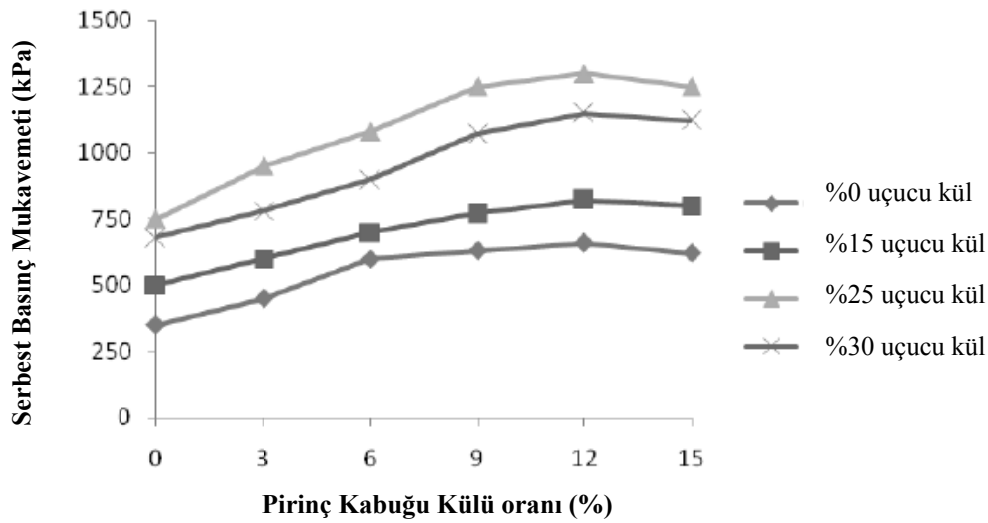
Bir çeşit sanayi artığı olan pirinç kabuğu; yapı malzemesi, gübre, yalıtım malzemesi ve yakıt olarak kullanıldığı gibi alternatif bir yüzeysel stabilizasyon malzemesi olarak geoteknik mühendisliğinde de kullanılmaya başlamıştır. Pirinç kabuğu külü, geoteknik mühendisliğinde, yüzeysel stabilizasyonda kullanılan uçucu kül, metal cüruf gibi yapay puzzolan sınıfına girmektedir ve benzer kimyasal özelliklere sahiptir. Bu sebeple son yıllarda pirinç kabuğu külünün yumuşak zeminlerin yüzeysel stabilizasyonunda kullanılmasına yönelik araştırmalar başlamıştır.

Sarkar ve ark. (2012) kohezyonlu zeminlerin stabilizasyonunda pirinç kabuğu külünün zeminin geoteknik özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Çalışmada kullanılan zemin, zemin sınıflamasına göre yüksek plastisiteli kil (CH) olarak belirlenmiştir. Çalışmada kil ağırlığının %0-5-7,5-10-12,5 oranlarında pirinç kabuğu külü, maksimum birim hacim ağırlığında ve optimum su muhtevasındaki kille karıştırılarak serbest basınç dayanımları elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre %5 pirinç kabuğu külü eklenmesiyle serbest basınç dayanımı saf kile göre 0,06 MPa'dan 0,172 MPa'a hızlı bir şekilde artış gösterdiği belirlenmiştir. Optimum serbest basınç dayanımı %10 pirinç kabuğu külü oranında elde edilmiş olup 0,255 MPa olarak belirlenmiştir. %10 pirinç kabuğu külü oranından sonra pirinç kabuğu külü eklendikçe serbest basınç dayanımı azalmaya başlamıştır (Şekil 3.13).



Şekil 3.13. Pirinç kabuğu külü oranının serbest basınç mukavemetine etkisi (Sarkar ve ark., 2012)

Brooks (2009) yüksek plastisiteli kil-uçucu kül karışımına pirinç kabuğu külü ilave ederek pirinç kabuğu külünün serbest basınç dayanımına etkisini araştırmıştır. Yapılan çalışmada uçucu kül- kil karışımındaki uçucu kül oranları % 0-15-25-30'dur. Bu karışıma %0-3-6-9-12 ve 15 oranlarında pirinç kabuğu külü ilave edilerek 28 günlük serbest basınç dayanımları elde edilmiştir.



Şekil 3.14. Pirinç kabuğu külünün zemin- uçucu kül karışımının serbest basınç dayanımına etkisi (Brooks, 2009)

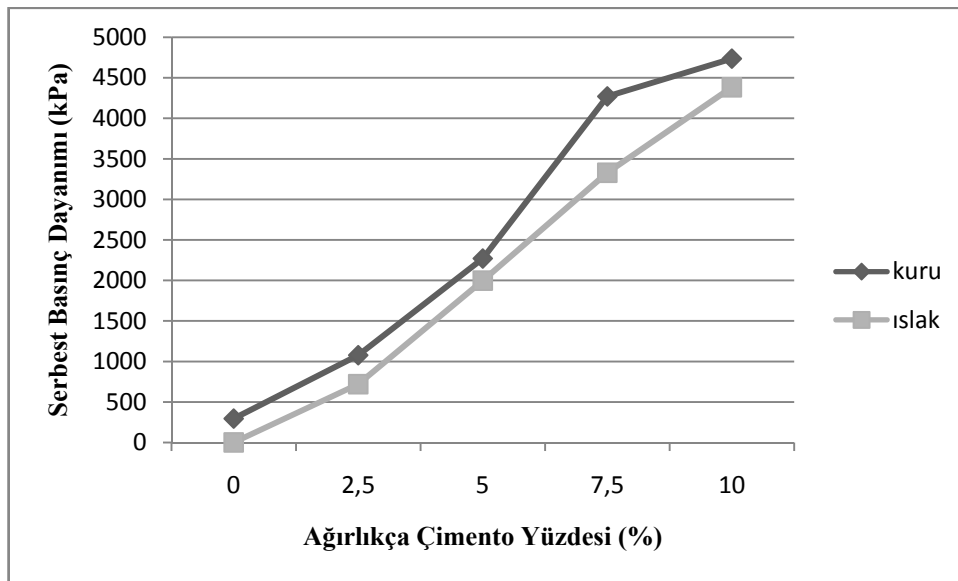
Elde edilen sonuçlara göre pirinç kabuğu külü oranı %0'dan %12'ye kadar arttıkça serbest basınç dayanımının 660 kPa'dan 1300 kPa'a arttığı gözlenmiştir. Uçucu kül oranı %25'ten sonra artmaya başladığında serbest basınç dayanımında azalma gözlenmiştir. Aynı şekilde pirinç kabuğu külü oranı %12'den sonra arttıkça serbest basınç dayanımının azalmaya başladığı gözlenmiştir. Bu sonuçları değerlendirildiğinde karışım için belirlenen optimum değerlerin; uçucu kül oranı için %25, pirinç kabuğu külü için ise %12 olduğu belirlenmiştir (Şekil 3.14).

3.1.8. Çimento ile zemin stabilizasyonu

Zemin stabilizasyonunda çimento, ilk olarak 1935 yılında Güney Karolina yakınlarında (Johnsonville, ABD) yol inşasında kullanılmıştır (Das, 1990; Muhunthan and Sariosseiri, 2008). Çimento genel olarak; zayıf altyapı temellerinde zemini iyi bir zeminle değiştirmek yerine daha ekonomik olacağından alternatif bir katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Çimento stabilizer olarak, zeminlerin şişme

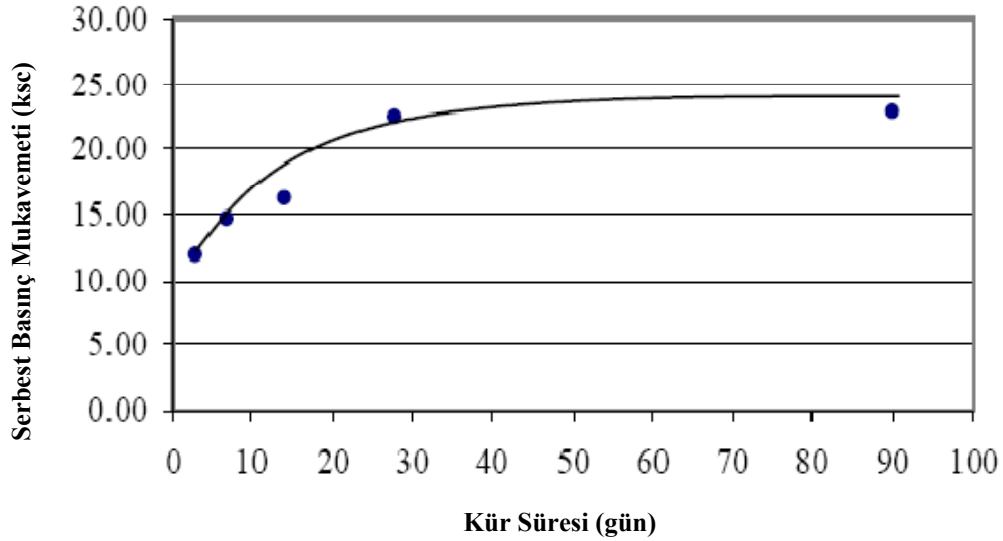
potansiyelinin azaltılması, plastisite indisinin azaltılması, taşıma gücünün artırılması gibi amaçlarla kullanılmaktadır (Bergado, 1996). Çimento stabilizasyonu %2'den çok organik madde içeren ve pH'ı 5,3'ten düşük zeminler dışında her türlü zemin tipine uygulanabilmektedir (ACI 230.1R-90, 1990; Muhunthan and Sariosseiri, 2008).

Çimento stabilizasyonu ile ilgili yapılan çalışmalardan Balasingam ve ark.'nın (2008) yaptığı çalışmada 3 farklı zemin tipine uygulanan farklı oranlardaki çimentonun etkisi araştırılmıştır. Çalışmada kullanılan zeminler kumlu çakıl, siltli kil ve düşük plastisiteli kil olarak belirlenmiştir. Kil üzerinde yapılan deneylerde numuneler maksimum birim hacim ağırlığında ve optimum su muhtevasında hazırlanmıştır. Karışımda kullanılan çimento, kilin kuru ağırlığınca % 0-2,5-5-7,5 ve 10 oranlarında karışıma ilave edilmiştir. Numuneler iki farklı kür ortamında bekletilmiştir. Bunlardan biri oda koşullarında 7 gün bekletildikten sonra, diğeri de suda 2 gün bekletildikten sonra serbest basınç deneyinde kırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, hem ıslak hem de kuru numunelerde çimento oranı arttıkça serbest basınç dayanımının arttığı gözlenmiştir. Aynı zamanda Şekil 3.15.'ten anlaşılabacağı gibi kuru numunelerin serbest basınç dayanımının ıslak numunelerinkinden fazla olduğu belirlenmiştir.



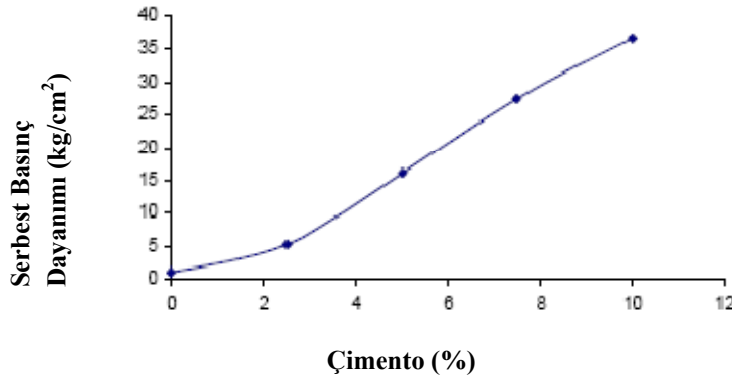
Şekil 3.15. Çimento oranının serbest basınç dayanımına etkisi (Balasingam ve ark., 2008)

Nontananandh ve ark. (2005) yaptıkları çalışmada kil zemine çimento katılmasıyla serbest basınç dayanımının zamana göre etkisini araştırmıştır. Çalışmada kullanılan kil, zemin sınıflandırılmasına göre yüksek plastisiteli kil olarak tespit edilmiştir. Çalışmada çimento olarak normal portland çimentosu kullanılmıştır. Homojen olarak oluşturulan kil çimento karışımları 3, 7, 14, 28 ve 90 gün kürde bekletildikten sonra serbest basınç deneyinde kırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre serbest basınç dayanımı ilk iki hafta birden ve hızlı bir şekilde artmaktadır. Geniş zamanda serbest basınç dayanımı yavaş bir şekilde artmaktadır (Şekil 3.16).



Şekil 3.16. Kil çimento karışımının kür sürelerine göre serbest basınç dayanımları (Nontananandh ve ark., 2005)

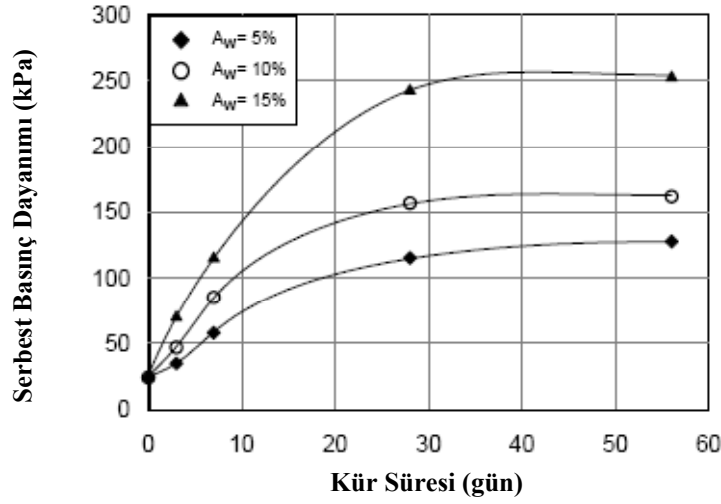
Sen P. ve ark. (2011) çalışmasında killi zeminin farklı zemin stabilizatörleriyle dayanımının nasıl değiştiğini araştırmıştır. Bu stabilizatörlerden çimento cinsi olarak normal portland çimentosu kullanılmıştır. Kil ile farklı oranlardaki çimento karışımlarından oluşan numuneler üzerinde 7 günlük serbst basınç deneyleri yapılmıştır. Karışım için hazırlanan numunelerde kullanılan çimento oranları %2,5 ile %10 arasında değişmektedir. Çimento yüzdesine göre elde edilen serbest basınç dayanımları Şekil 3.17'de gösterilmiştir. Şekil 3.15'e göre serbest basınç dayanımı, çimento oranı arttıkça artmaktadır. %10 çimento yüzdesine denk gelen maksimum serbest basınç değeri 35 kg/cm^2 olarak belirlenmiştir.



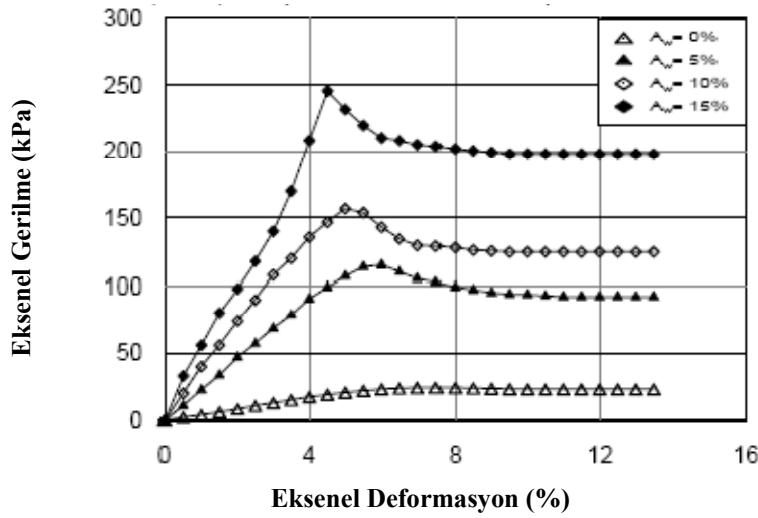
Şekil 3.17. Çimento oranına göre serbest basınç dayanımındaki değişim (Sen, P. Ve ark., 2011)

Saadeldin R. ve ark. (2011) tarafından yapılan çalışmada üzerine yol dolgusu inşa edilen, çimento ile stabilize edilen yumuşak killi zeminin performansı incelenmiştir. Çalışmada katkı olarak normal portland çimentosu kullanılmış olup, çimento-kil karışımlarının dayanım özellikleri araştırılmıştır. İnşaat sahasındaki yumuşak kil zemininden alınan örselenmiş numune, yaklaşık 5 dakika doğal su muhtevasında standart laboratuvar mikserinde karıştırılmıştır. 0,25 oranında su/çimento karışımı ile çimento şerbeti oluşturulmuştur. Oluşturulan bu çimento şerbeti kille homojen bir şekilde karıştırılarak numuneler hazır hale getirilmiştir. Çalışmada kuru zemin ağırlığınca %5, 10 ve 15 (Aw) oranlarında çimento kullanılmıştır. Elde edilen karışımlar sonucu numuneler 3, 7, 28 ve 56 gün kürde bekletildikten sonra serbest basınç deneyine tabii tutulmuştur. Kür süresinin serbest basınç dayanımına etkisi Şekil 3.18.'de gösterilmiştir. Sonuçlara göre kür süresi arttıkça serbest basınç dayanımının arttığı gözlenmiştir. Serbest basınç dayanımı 28 güne kadar hızlı bir şekilde arttıktan sonra durgunlaşmıştır (Şekil 3.18).

Kil-çimento karışımının 28 günlük kür sonucunda elde edilen serbest basınç dayanımlarının çimento oranına göre değişimi Şekil 3.19'de gösterilmektedir. Sonuçlara göre çimento yüzdesi arttıkça serbest basınç dayanımının arttığı gözlenmektedir. %15 çimento içeriğinde serbest basınç dayanımının doğal numuneye göre 10 kat arttığı, 24 kPa'dan 242 kPa'a çıktığı gözlenmiştir.



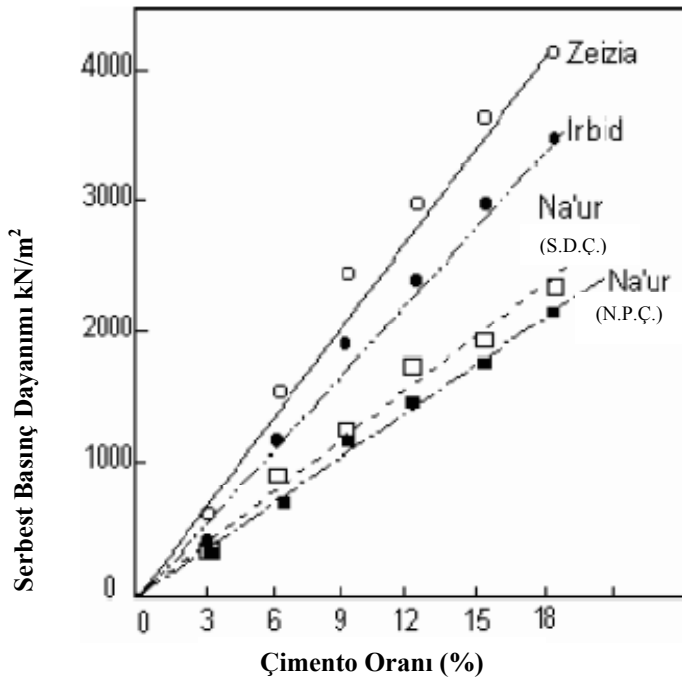
Şekil 3.18. Kür süresinin farklı çimento oranlarındaki kil-çimento karışımının serbest basınç dayanımına etkisi (Saadeldin, R ve ark., 2011)



Şekil 3.19. Çimento ile stabilize edilen kilin gerilme-deformasyon eğrileri (Saadeldin, R ve ark., 2011)

El-Rawi ve Al-Samadi, (1995) tarafından yapılan çalışmada havayolu ve karayolu alttemeli olarak kullanılacak üç farklı zeminin çimento ile stabilizasyonunu araştırmışlardır. Yapılan çalışmaya göre kullanılan bu üç zeminin sınıfları siltli kil (Irbid), marnlı kil (Na'ur) ve killi silt (Zeizia) şeklinde belirlenmiştir. Çalışma kapsamında, iki tip çimento kullanılmıştır. Biri normal portland çimentosu (N.P.Ç.) diğeri sülfat dirençli çimentodur (S.D.Ç.). Çalışmada kullanılan çimento zemine,

zeminin kuru birim ağırlığınca %0, 3, 6, 9, 12, 15 ve 18 oranlarında ilave edilmiştir. Oluşturulan karışımlar 7 günlük kür süresi sonunda serbest basınç deneyi ile kırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre her iki çimento tipi için de çimento yüzdesi arttıkça serbest basınç dayanımı artmıştır. En düşük sonuçlar, yüksek sülfat yüzdesine sahip çimento ile oluşturulan marnlı kil-çimento karışımından elde edilmiştir. Şekil 3.20’de görüldüğü gibi üç zemin tipindeki 7 günlük serbest basınç dayanımının aynı olduğu çimento içerikleri; %9 çimento-killi silt, %12 çimento-siltli kil ve %18 çimento-marnlı kil karışımlarından elde edilmiştir. Elde edilen bu ortak serbest basınç değeri 2100 kN/m^2 olduğu belirlenmiştir.

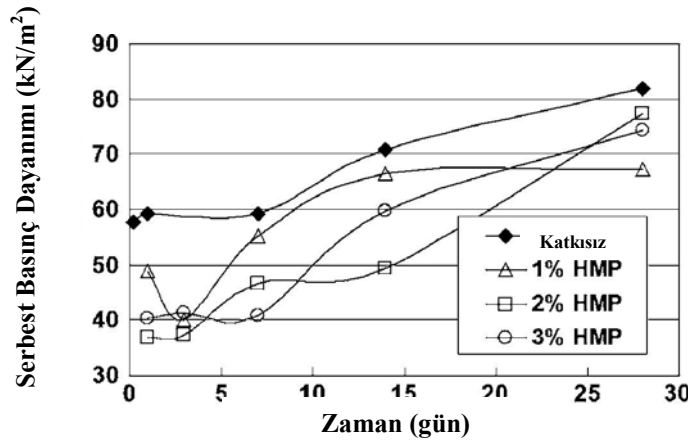


Şekil 3.20. Zemin- çimento karışımının 7 günlük kür süresi sonunda çimento oranına göre serbest basınç dayanımları (El-Rawi, Al-Samadi, 1996)

3.1.9. Diğer kimyasal katkıları ile zemin stabilizasyonu

Zemin özelliklerini iyileştirmek amacıyla sık kullanılan maddeler haricinde çok yaygın olmayan kimyasal katkıları da farklı amaçlarla zemin stabilizasyonu ile ilgili bazı araştırmalara yardımcı olmuştur. Bu çalışmalardan bazıları aşağıda kısaca özetlenmiştir.

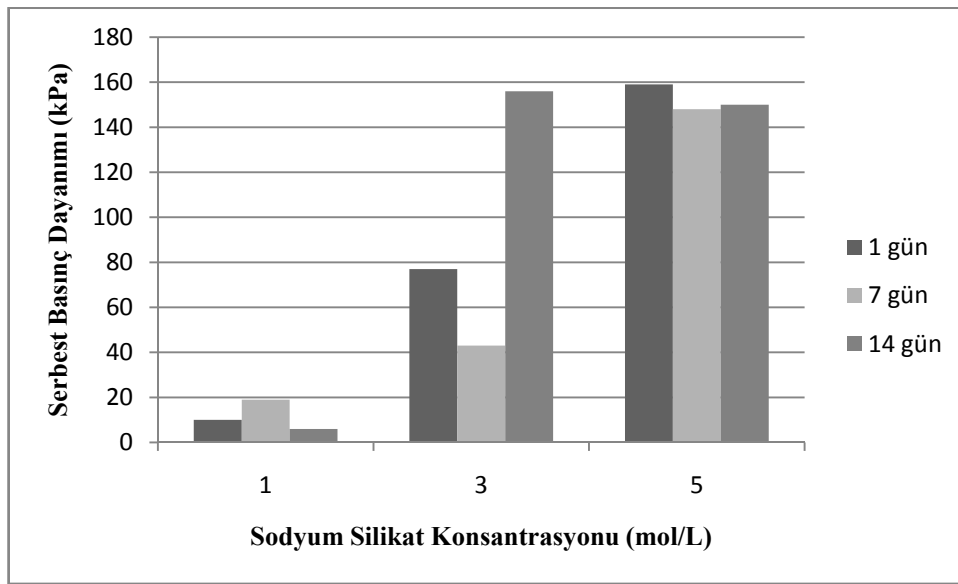
Bu çalışmalardan Falamanki A. v.d. (2008) tarafından yapılan çalışmada hegzametafosfat'la (HMP) iyileştirilmiş zeminlerin mukavemeti üzerinde durulmuştur. Çalışmada HMP, zeminin silt ve kil boyutlu yapılarını ayırmak, HMP tarafından oluşturulan PO_4^{-3} metal katyonların çökmesini sağlamak amacıyla kullanılmıştır. Çalışmada kaolin ve siltli kum olmak üzere iki çeşit zemin kullanılmıştır. Bu zeminlerin tane boyutu dağılımı %62 silt, %38 kil içeren kaolin, %55 kum, %34 silt %11 kil içeren siltli kumdan oluşmaktadır. Çalışmada kaolin kiliyle oluşturulan karışımlarda HMP/zemin oranı %1, 2, 3 seçilmiştir. Kil ve HMP karışımlarıyla oluşturulan numuneler 1, 3, 7, 24 ve 28 günlük kürlerde bekletildikten sonra serbest basınç deneyiyle kırılmıştır. Şekil 3.21'de yapılan çalışmada elde edilen sonuçlara göre HMP içeriği ile zamana bağlı serbest basınç dayanımı görülmektedir. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre katkısız kaolin için serbest basınç dayanımı 4 hafta boyunca $58,8 \text{ kN/m}^2$ 'den $78,5 \text{ kN/m}^2$ 'ye yükselmiştir. Buna rağmen HMP eklenen tüm karışımlardan elde edilen serbest basınç dayanımları saf numuneden elde edilen serbest basınç dayanımından düşük çıkmıştır.



Şekil 3.21. Kaolin kilinin HMP katkısıyla zamana göre serbest basınç dayanımı (Falamanki vd., 2008)

Moayedi, H. v.d. (2011) çalışmasında yumuşak killi zeminin sodyum silikatla mühendislik özelliklerinin nasıl değiştiğini araştırmıştır. Çalışmada kullanılan zemin Malezya'nın Serdang yakınlarından alınan kaolin kilidir. Çalışmada kullanılan sodyum silikat, suda kolay çözülmesi ve alkali çözeltisi olması sebebiyle seçilmiştir. Çalışmada yapılan deneylerde kullanılan numuneler; 1, 3, 5 mol/L değerindeki 3 farklı konsantrasyonda hazırlanan sodyum silikatla zeminin homojen karışımından

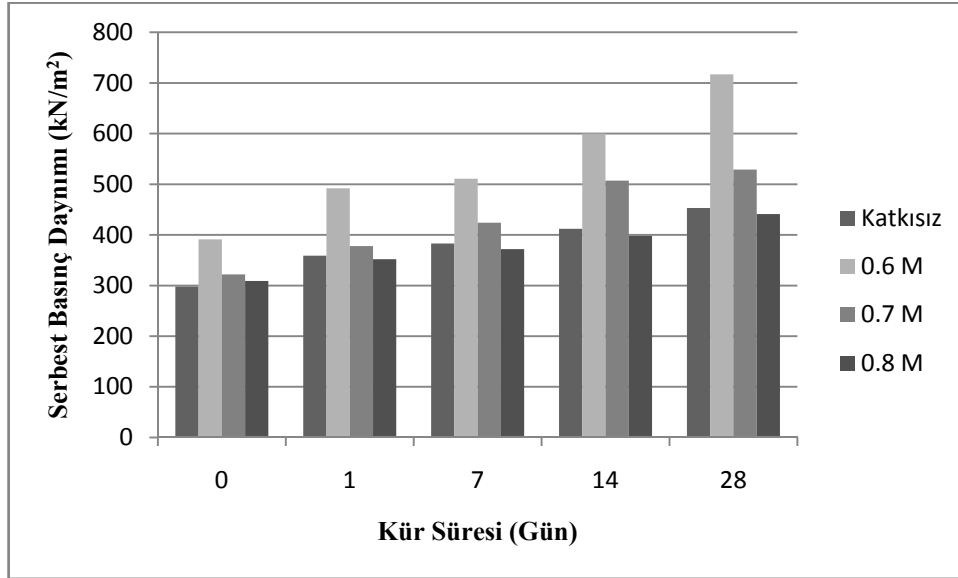
oluşturulmuştur. Oluşturulan numuneler üzerinde 1, 7 ve 14 günlük serbest basınç deneyi yapılmıştır. Şekil 3.22.'de sodyum silikat konsantrasyonunun kaolinin zamana bağlı serbest basınç dayanımına etkisi görülmektedir. 14 günlük kür süresi sonunda 3 ve 5 mol/L konsantrasyonunda hazırlanan numunelerden elde edilen serbest basınç dayanımlarının aynı olduğu gözlenmiştir. En yüksek serbest basınç dayanımının, 1 günlük kür süresi sonunda 5 mol/L sodyum silikat-kaolin karışımından elde edilmiş olup yaklaşık olarak 159 kPa olduğu gözlenmiştir.



Şekil 3.22. Sodyum silikat konsantrasyonunun karışımın zamana bağlı serbest basınç dayanımına etkisi (Moayedi, H., v.d., 2011)

Satee J. tarafından yapılan çalışmada laterit zeminin, sodyum silikatla kimyasal zemin iyileştirilmesi araştırılmıştır. Çalışma kapsamında zeminin mühendislik özellikleri belirlenmiş olup, zemin sınıflandırmasına göre zemin sınıfı yüksek plastisiteli siltli çakıl olarak belirlenmiştir. Numuneler 0,6 molarite (M), 0,7 M ve 0,8 M konsantrasyonlarında sodyum silikat ve zemin karışımından oluşmaktadır. Oluşturulan numuneler maksimum kuru birim hacim ağırlığında ve optimum su muhtevasında hazırlanmıştır. Çalışmada hazırlanan numunelerin 0, 1, 7, 14 ve 28 günlük serbest basınç dayanımları elde edilmiş olup, kimyasal ajanın etkisi araştırılmıştır. Şekil 3.23'de görüldüğü gibi katkısız numunenin serbest basınç dayanımı, 4 hafta boyunca 298 kN/m²'den 453 kN/m²'ye yükselmiştir. Maksimum serbest basınç dayanımı 0,6 M sodyum silikat zemin karışımından elde edilmiştir.

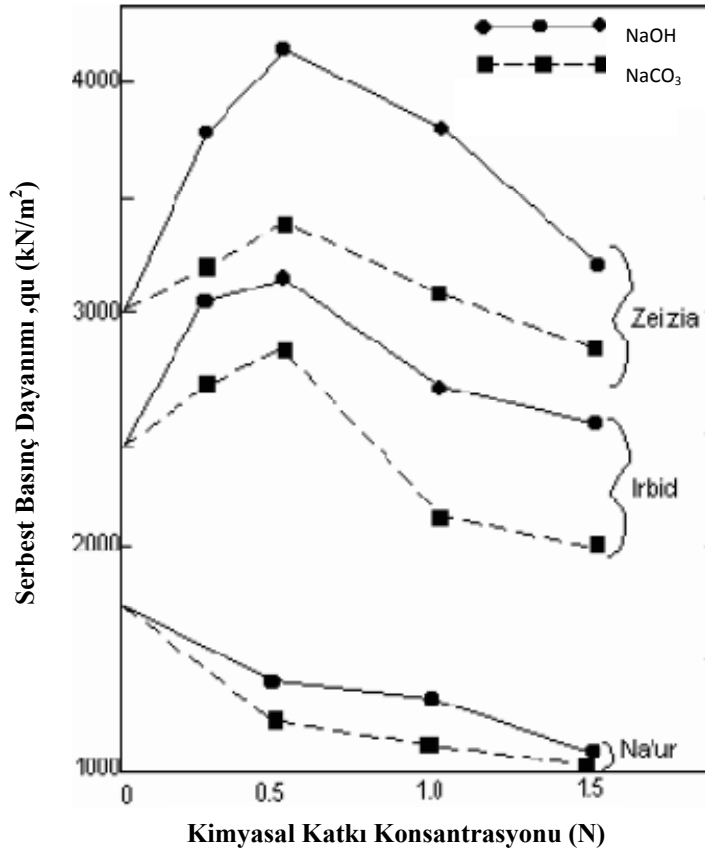
Tüm karışımlar için en yüksek dayanımlar 28 günlük kür sonunda elde edilmiştir. Sodyum silikat konsatrasyonu arttıkça dayanımın azaldığı gözlenmiştir.



Şekil 3.23. Sodyum silikat-zemin karışımının zamana göre serbest basınç dayanımları (Satee, J.)

El-Rawi ve Al-Samadi (1995) çalışmalarında 3 farklı zeminin çimento ile stabilizasyonuna kimyasal madde ilavesiyle elde edilen serbest basınç dayanımlarını incelemiştir. Çalışmada kullanılan zemin çeşitleri siltli kil (Irbid), marnlı kil (Na'ur) ve killi silt (Zeizia) olarak belirlenmiştir. Kimyasal katkı olarak 0,25~2,0 Normalite (N) konsantrasyonlarında sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum karbonat (NaCO_3) kullanılmıştır. Çimento olarak portland çimentosu, zemin ağırlığının %12 oranında kullanılmıştır. Zemin, çimento ve kimyasal katkıdan oluşan numunelerin 7 günlük kürden sonra serbest basınç değerleri belirlenmiştir. Çimentoyla stabilize edilen zeminin 7 günlük serbest basınç dayanımına farklı konsantrasyonlardaki kimyasal katkıların etkileri Şekil 3.24'te görülmektedir. Sonuçlara göre Zeizia ve Irbid zeminlerinin çimento ile karışımına 0,5 N konsantrasyonunda NaOH ve NaCO_3 ilavesiyle oluşturulan numunelerin serbest basınç dayanımlarının en iyi sonuçları verdiği gözlenmiştir. Marnlı kil için elde edilen sonuçların faydalı olmadığı gözlenmiştir. NaOH ilavesi NaCO_3 'e göre daha büyük dayanım değerleri elde

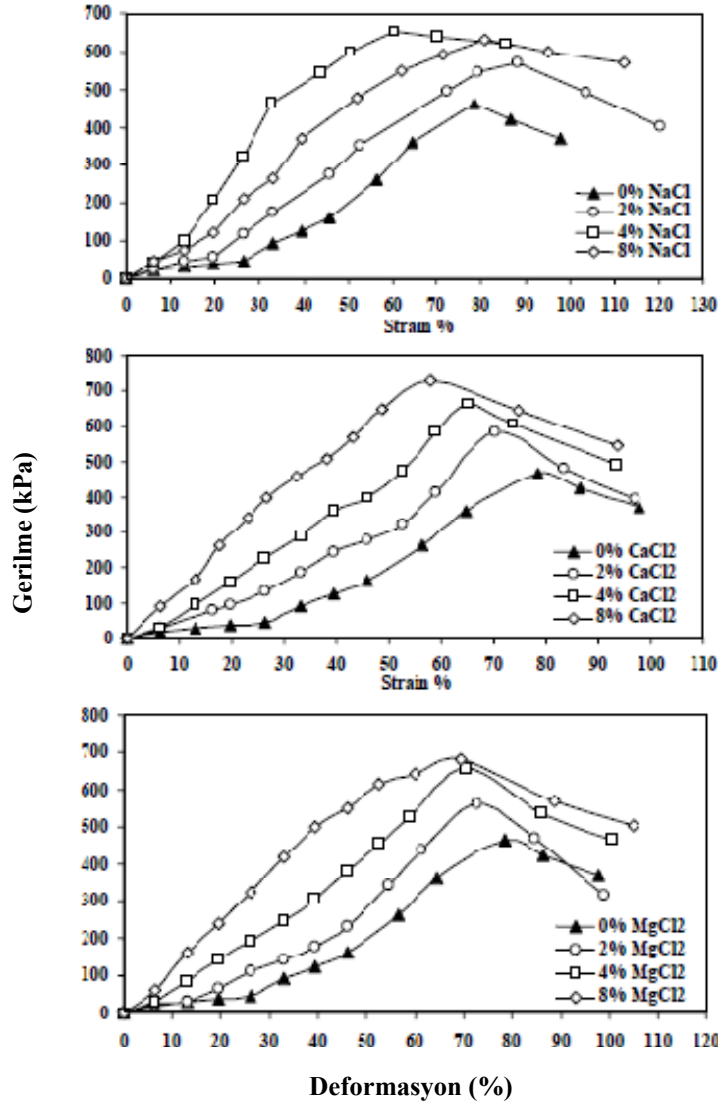
edilmiştir. En yüksek dayanım değeri 0,5 N NaOH konsantrasyonunda elde edilmiş olup, serbest basınç dayanımının yaklaşık olarak 4000 kN/m^2 olduğu gözlenmiştir.



Şekil 3.24. %12 çimento ile stabilize edilen zeminlerin 7 günlük serbest basınç dayanımlarının kimyasal katkı konsantrasyonu ve tipine göre değişimi (El-Rawi, Al-Samadi, 1995)

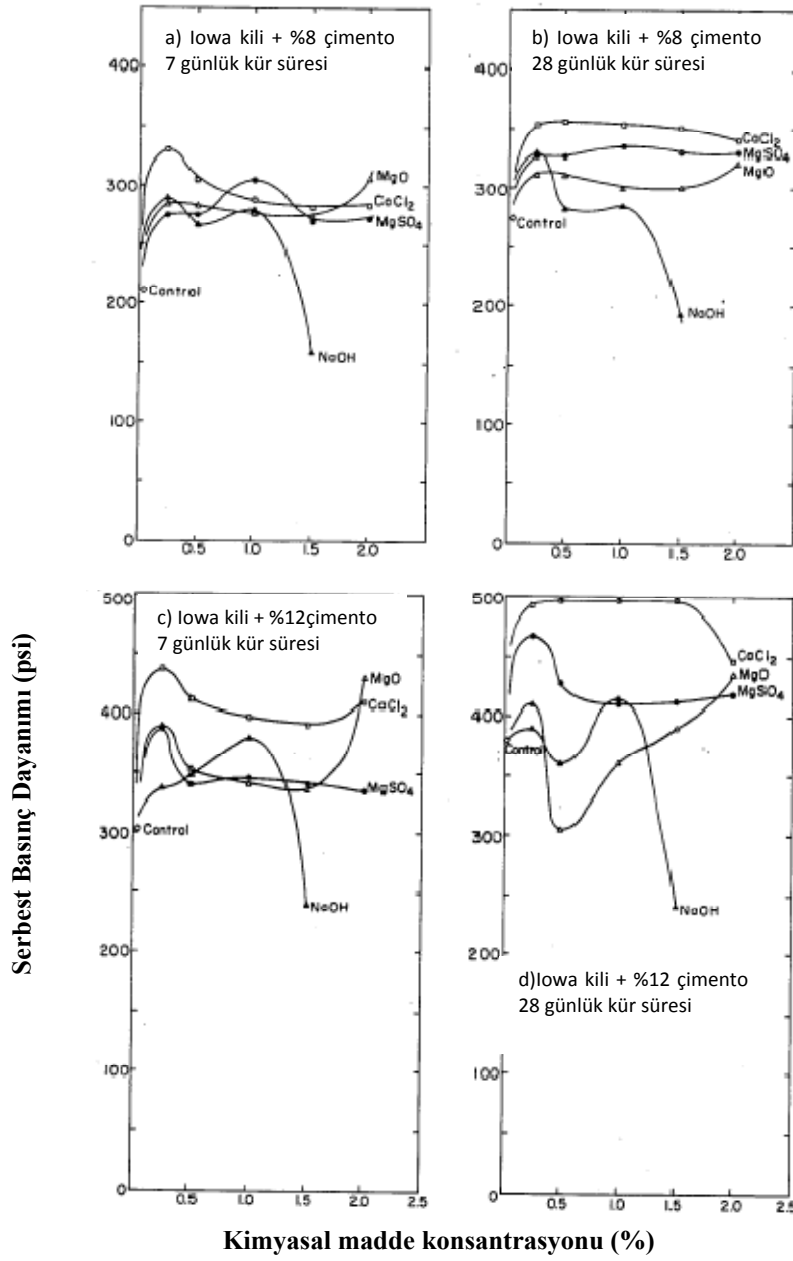
Abood, T. T., v.d. (2007) çalışmasında sodyum, kalsiyum ve magnezyum klorür bileşiklerinin (NaCl , MgCl_2 , CaCl_2) siltli kilin mühendislik özelliklerine etkilerini incelemiştir. Çalışmada kullanılan kil, zemin sınıflamasına göre yüksek plastisiteli kil olarak belirlenmiştir. Çalışma için hazırlanan karışımda kullanılmak üzere NaCl , MgCl_2 ve CaCl_2 suda çözündükten sonra zemine karıştırılmıştır. Solüsyondaki oranları %2, 4 ve 8 olan kimyasal katkılarla zemin karışımlarından oluşan numuneler serbest basınç deneyinde kırılmıştır. Numunelerin serbest basınç deneyi ile elde edilen gerilme-deformasyon ilişkileri Şekil 3.25'de görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi kimyasal katkı içeriği arttıkça serbest basınç dayanımı artmaktadır. Sonuçlara göre maksimum kesme dayanımı kalsiyum klorürle oluşturulan karışımdan elde

edilmiş olup değeri yaklaşık 700 kPa'dır. Zemine kalsiyum klorür eklenmesi diğer katkılara göre zemin iyileştirilmesi açısından daha faydalı olup, daha fazla dayanım değerlerine ulaşmaya yardımcı olmuştur.



Şekil 3.25. Kimyasal katkı içeriklerine göre karışımların gerilme-deformasyon ilişkileri (Abood, T. T., v.d., 2007)

Laguros J. G., (1962) yaptığı çalışmada Iowa kili ile çimento karışımlarının dayanımına bazı kimyasal katkıların etkisini araştırmıştır. Çalışmada çimento çeşidi olarak portland çimentosu, kimyasal katkı olarak sodyum hidroksit (NaOH), kalsiyum klorür (CaCl_2), magnezyum oksit (MgO) ve magnezyum sülfat (MgSO_4) kullanılmıştır. Yapılan çalışmada 2 farklı oranda çimento ile zemin karışımına eklenen kimyasal katkılarla oluşturulan numunelerin 7 ve 28 günlük serbest basınç dayanımları belirlenmiştir. Karışıma kuru zemin ağırlığınca çimento %8 ve 12 oranlarında, kimyasal katkılar %0, 0,5 ve 1,5 oranlarında katılmıştır. Sonuçlara göre serbest basınç dayanımındaki en büyük artış CaCl_2 ile yapılan karışımdan elde edilmiştir. CaCl_2 'nin kullanıldığı karışımın serbest basınç dayanımının çimento yüzdesi ve kür süresi arttıkça arttığı gözlenmiştir. En yüksek serbest basınç dayanımı % 0,5, 1,0 ve 1,5 oranlarında kullanılan CaCl_2 'in bulunduğu karışımdan elde edilmiş olup bu değerin yaklaşık olarak 500 psi olduğu gözlenmiştir. Diğer kimyasal katkılarla oluşturulan karışımların dayanımlarında da artış gözlenmiştir ancak CaCl_2 'le oluşturulan karışımdan elde edilen dayanım kadar artış olmamıştır (Şekil 3.26).



Şekil 3.26. Çimento ile stabilize edilen Iowa kilinin serbest basınç dayanımının kimyasal katkı oranına göre değişimi (Laguros, J. G., 1962)

4. MATERYAL VE YÖNTEM

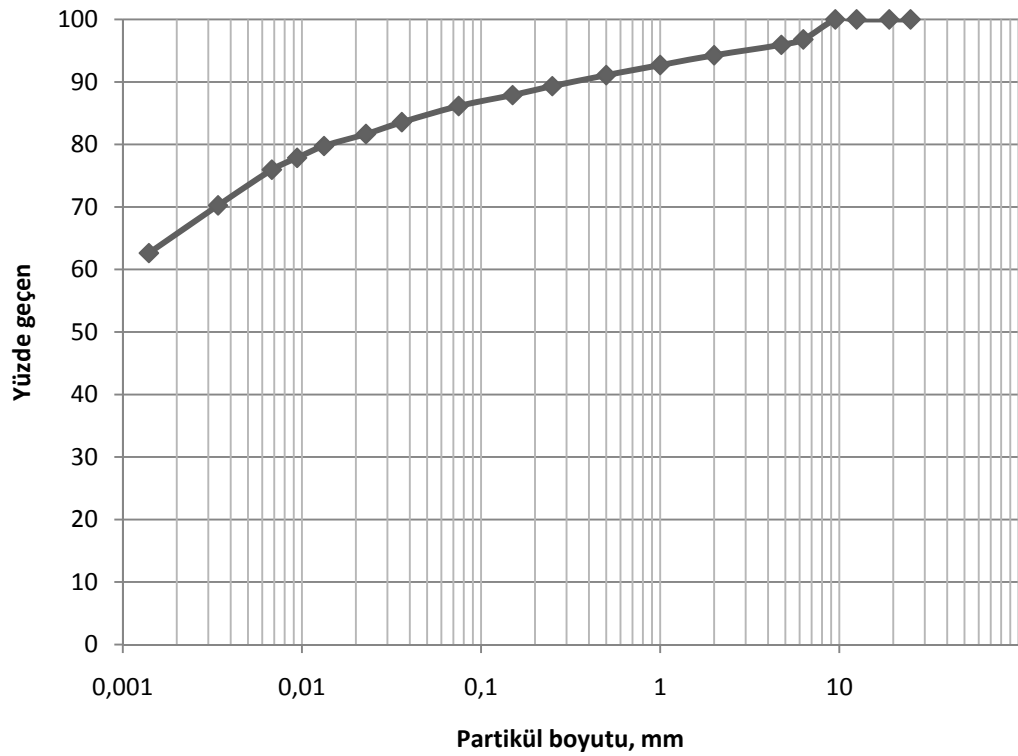
Çalışmanın bu bölümünde Ankara ilinin Maltepe semtinden temin edilen kil numunesi üzerinde yapılan deneyler, deneylerde kullanılan malzemeler ve deney numunelerinin hazırlanışı hakkında bilgiler verilmiştir. Deneylerde kullanılacak kil numunesi üzerinde kıvam limitleri, elek analizi ve hidrometre deneyleri yapılarak zeminin tipi, dane boyutu dağılımı ve özgül ağırlığı belirlenmiştir. Kil üzerinde standart proktor deneyi yapılarak zeminin optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı belirlenmiştir.

Serbest basınç deneyleri; kil ile çimento karışımı, kil ile üç farklı konsantrasyonda hazırlanan dört farklı kimyasal ajan ve çimento karışımı ile hazırlanan numuneler üzerinde yapılmıştır. Tüm deneylerde karışım için kullanılan kil, optimum su muhtevasında ve maksimum kuru birim hacim ağırlığında karışımlara katılmıştır. Deneylerde kullanılan çimento yüzdesi kil+çimento ağırlığının % 0, 5, 10 oranlarında karışıma katılmıştır. Deneylerde kullanılan kimyasal ajanlar, sodyum hegzametafosfat ($(\text{NaPO}_3)_6$), alüminyum sülfat ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)$), sodyum karbonat (Na_2CO_3) ve sodyum silikat (Na_2O)'dır. Kimyasal katkılar ajan/su oranı olarak %5, 10, 20 oranlarında solüsyon olarak katılmıştır. Hazırlanan karışımlar üzerinde 28 günlük serbest basınç deneyleri yapılarak elde edilen sonuçlar 4. ve 5. bölümde değerlendirilmiştir.

4.1. Çalışmada Kullanılan Kil, Çimento ve Katkı Maddeleri

4.1.1. Çalışmada kullanılan kil

Çalışmada kullanılan kilin dane boyutu dağılım eğrisi, kıvam limitleri ve özgül ağırlığı sırasıyla ASTM D 422, ASTM D 4318 ve ASTM D 854 standartlarına göre elde edilmiştir. Dane boyutu ile ilgili sonuçlar Şekil 4.1’de, kilin fiziksel özellikleri ile bilgi de Çizelge 4.1’de özetlenmiştir.



Şekil 4.1. Çalışmada kullanılan kilin dane boyutu dağılım eğrisi

Birleşik zemin sınıflama sistemine ASTM D 2487 standardına göre kilin sınıfı CH olarak belirlenmiştir. (Çizelge 4.1.)

Çizelge 4.1. Çalışmada kullanılan kilin bazı fiziksel özellikleri

Özellik	Kil
Likit Limit, LL (%)	74
Plastik Limit, PL (%)	29
Plastisite İndeksi, PI (%)	35
Özgül Ağırlık, G_s	2,406
Birleşik Zemin Sınıflama Sistemine (USCS) göre sınıfı	CH

4.1.2. Çalışmada kullanılan çimento

Çalışmada zemin stabilizasyonunda sıkça kullanılan portland çimentosu kullanılmıştır. İçerisinde bol miktarda silis bulunduran ana maddesi kalkerle kil olan ve mineral parçalarını yapıştırmada kullanılan çimento, su ile reaksiyona girerek sertleşen bir bağlayıcı olup bir seri reaksiyon sonucu zemin yapısında güçlü bağlar oluşturur (Kılıç, 2008). Ham çimentonun kurutulup toz haline getirilerek 200°C'ye kadar soğutulması ve içerisine alçı ve anhidrit gibi malzemeler konulması ile üretilen portland çimentosunun kimyasal bileşimi Çizelge 4.2'de verilmiştir (Glasser, 1997).

Çizelge 4.2. Portland Çimentosunu Oluşturan Oksitler ve Miktarları (Glasser, 1997)

Oksit	Sembol	Çimento Kimyasına Göre Sembolü	Miktarı (%)
Kireç	CaO	C	61-67
Silis	SiO ₂	S	17-24
Alümin	Al ₂ O ₃	A	3-8
Demir	Fe ₂ O ₃	F	1-6
Magnezi	MgO	M	0,1-4
Alkaliler	Na ₂ O+K ₂ O	N+K	0,5-1,5
Kükürt Anhidriti	SO ₃	$\bar{S}$	1-3

Zemin iyileştirme çalışmalarında yaygın olarak Portland Çimentosunun kullanılmasının temel sebebi, kolay elde edilmesi, mukavemetinin yüksek olması ve kimyasal karışımlardan ucuz olmasıdır. Olumsuz yanı ise geç priz almasıdır. Çimento kullanımında dikkat edilmesi gereken temel faktörler zeminin cinsi ve su/çimento oranıdır. Su miktarının azlığı veya fazlalığı plastisite ve basınç mukavemetine önemli derecede etki etmektedir. Örneğin su/çimento oranı 1,0'den büyük olduğunda aşırı sulanma eğilimi ortaya çıkmakta ve bu durum düşük mukavemet oluşmasına yol açabilmektedir. Bunun tersine, düşük su/çimento oranlarında karışımlar daha zor enjeksiyon edilmelerine rağmen, daha yüksek mukavemet değerleri verirler. Ayrıca sınırlı oranda kalmak kaydıyla bazı katkıları mukavemet kazandırmaktan çok başka geoteknik özellikleri iyileştirme amaçlı kullanılabilirler (Kılıç, 2008). Bu katkıları genel olarak şöyle sıralandırılmaktadır;

- Priz hızlandırıcı ve geciktirici malzemeler.
- Akışkanlaştırıcı malzemeler.
- Ayırışma önleyici malzemeler.
- Büzülme önleyici şişen malzemeler.
- Su tutucu malzemeler.

4.1.3. Çalışmada kullanılan katkı maddeleri

Sodyum hegzametafosfat (NaPO_3)₆

Geoteknikte Kullanımı;

Hegzametafosfat (HMP) suda çözünmeye dayanıklı beyaz granüler bir katı maddedir. HMP, sodyum silikat gibi kimyasallara göre daha az zehirlidir. Fosfat bazlı bağlayıcılar, maden atıkları barajlarının iyileştirilmesi ve stabilizasyonu, eski katı atık depolarının rehabilitasyonu, yeni kil kaplama yapıları, geçirgen bariyerler gibi geoteknik ve çevre mühendisliği uygulamalarında görülmüştür. Maden atığı barajlarının yapımı esnasında veya sonrasında maden atığının geoteknik parametrelerinin iyileştirilmesinde kullanılmaktadır. Sodyum hegzametafosfat (HMP)'ın kullanılması ucuz ve kolay bulunması açısından faydalıdır. Ancak asit

stabilizasyonunun iki önemli dezavantajı bulunmaktadır. Bunlar; asitle zeminin karıştırılmasındaki teknik zorluklar ve zeminden çıkan asitin çevreye etkisidir (Falamaki, v.d., 2008). Spance ve Shi (2005) fosfat stabilizasyonu hakkında 50'den fazla çalışma yapmıştır. Kimyasal özelliklerdeki değişiklikler ve fosforik asit kullanılarak iyileştirilmiş kilin dezavantajları Skolovich (1973) ve Yeoh ve Oades (1981) tarafından ele alınmıştır. Ghazali ve ark. (1991) fosforik asitin, kaolin kilinin sıkışabilirlik indisini azalttığını, kohezyon ve içsel sürtünme açısını arttırdığını açıklamışlardır.

Alüminyum sülfat $Al_2(SO_4)_3$

Geoteknikte Kullanımı;

Bazı geoteknik ve geoçevre projelerinde, dispersif zeminlerin problemlerini geliştirmenin en kolay yolu zemini bir başka zeminle değiştirmektir. Ancak, bazı kimyasal iyileştirmelerle dispersif killerin problemlerinin üstesinden gelinebilir ve zemin tekrar kullanılabilir. Dispersif zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılan en yaygın maddeler kireç, gipsiyum ya da alüminyum sülfattır. İçerisinde yüksek miktarda sodyum bulunan ve bu nedenle dispersif olan killerin floklaşmasına alüminyum sülfat yardımcı olur. Alüminyum sülfat kildeki sodyumu absorbe ederek ayrışmayı engeller. Ouhadi v.d. (2006) çalışmalarında %1,5 alum ilavesiyle dispersivite oranının % 40'lara kadar düştüğünü ve alüminyum sülfat uygulanması ile ayrışmış yapıdan floklaşan ve ayrışmamış yapıya geçerek zeminin yapısının değiştiğini bulmuşlardır. Deker v.d. (1977) da yüksek plastisiteli killerin, %40'dan az dispersivite oranına sahip olduğunda ayrışmamış zemin gibi davrandığını söylemiştir.

Sodyum karbonat (Na_2CO_3)

Geoteknikte kullanımı;

Sodyum karbonat çimento ya da kireç stabilizasyonunda kimyasal katkı olarak kullanıldığında etkili olduğu belirtilmiştir (El-Rawi, Al-Samadi, 1995).

Sodyum silikat (Na_2SiO_3)

Geoteknikte Kullanımı;

Sodyum silikat çok eskiden düşük standartlı yollarda toz kontrollü yol yapımında rutubet temini için sıkça kullanılmıştır. Günümüzde zeminlerin stabilizasyonunda yüksek PH değerlerinden ötürü zemin danelerinin yüzeyinde çimentolaşma reaksiyonu yaparak stabilitenin artması için kullanılmaktadır. Düşük aktiviteli killerde etkili iken yüksek aktiviteli killerde pek etkili değildir. Genellikle %2- %10 arasında sodyum silikat % 1 civarında bentonit ile karıştırıldığında mukavemet artışı gözlemlenir (Tumluer, 2006).

4.2. Standart Proktor Deneyi

Deneyin amacı; zeminin optimum su içeriğinin ve buna karşılık gelen maksimum kuru birim hacim ağırlığının belirlenmesidir. Maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su muhtevasını belirlemek için 3 alternatif yöntem kullanılır. ASTM D 698’de önerilen yöntemler Çizelge 4.3’te özetlenmiştir.

Çizelge 4.3. Standart proktor deneyinin uygulanma kriterleri

Standart Proktor Deneyi							
	Kullanım Şartı	Kullanılan Malzeme	Kalıp Boyutları		Tabaka	Vuruş Sayısı	Tokmak Kütlesi (kg)
			Çap (mm)	Yükseklik (mm)			
Metod A	%20 ve daha az malzeme 4,75 mm'lik elek üzerinde kalıyor ise	4,75 mm'lik elekten geçen malzeme kullanılmalı	105	115,5	üç	25	2,5
Metod B	%20 ve daha fazla malzeme 4,75 mm'lik elek üzerinde kalıyor ve %20 ve daha az malzeme 9,5 mm'lik elek üzerinde kalıyor ise	9,5 mm'lik elekten geçen malzeme kullanılmalı	105	115,5	üç	25	2,5
Metod C	%20 ve daha fazla malzeme 9,5 mm'lik elek üzerinde kalıyor ve %30 ve daha az malzeme 20 mm'lik elek üzerinde kalıyor ise	20 mm'lik elekten geçen malzeme kullanılmalı	152,4	115,5	üç	56	2,5

4.2.1. Deneyin yapılışı

Bu çalışmada yapılan standart proktor deneyi ASTM D698 standartına uygun olarak yapılmış olup, çalışmada kullanılan zeminin ince taneli zemin olması ve 4,75mm'lik elekten geçen malzeme yüzdesinin %20'den az olması sebebiyle deney metodu olarak Metot A seçilmiştir. 4 numaralı elekten geçirilen ve kurutulan belli bir miktardaki kil numunesi, ağırlığının yaklaşık %7-8'i kadar su ilavesiyle homojen bir karışım elde edilene kadar karıştırıldıktan sonra kapalı bir poşette bekletilmiştir. Boş proktor kalıbı ve alt tablası 0.01gr duyarlılıkla tartıldıktan sonra kalıbın üst yükleme halkası takılmıştır. Bekletilmiş karışım geniş bir kapta bir miktar daha su eklenerek iyice karıştırılmıştır. Hazırlanan malzeme, kalıbın içinde yaklaşık 7-8 cm yükseklik oluşturulacak şekilde kalıbın içine dökülmüştür. Malzemenin yüzeyi hafifçe düzeltildikten sonra 30,5 cm yükseklikten düşen tokmakla 25 darbe vurularak malzeme sıkıştırılmıştır. Bu işlem her bir darbenin bir önceki darbe izinin yarı seviyesine gelmesine dikkat edilerek yapılmıştır. Tokmaklama işlemi eşit yükseklikteki üç tabaka halinde yapılmıştır. Her tabaka geçişinde sıkıştırılmış yüzey pürüzlendirilerek tabakalar arasında tam kaynaşma sağlanmıştır. Kalıbın yaka kısmı çıkarıldıktan sonra kalıptaki fazla malzeme çelik cetvel yardımıyla alınmıştır. Sıkıştırılan numune kap ağırlığıyla birlikte 1 gr duyarlılıkta tartılmıştır. Sıkıştırılmış numunenin bir kısmı su muhtevasının belirlenmesi için ayrılmıştır. Geriye kalan kısım tekrar deneyin başında hazırlanan zemine katılmıştır. Bu işlemler her seferinde su içeriği biraz daha artırılarak en az beş kez tekrarlanmıştır. Deney sonunda kil zeminin optimum su muhtevası ve maksimum birim hacim ağırlığı belirlenmiştir.

4.3. Dayanım Deneyi İçin Numunelerin Hazırlanması

Bu başlık altında; en iyi dayanım özelliklerini belirlemek için oluşturulan kil, çimento ve kimyasal ajan karışımlarının farklı kombinasyonları ve bu kombinasyonlarla oluşturulan numunelerin dayanım deneylerine hazırlanışı anlatılmıştır. Kil numunesi ve çimento kullanılarak oluşturulan karışımların çimento yüzdesi kil+çimento ağırlığı üzerinden belirlenmiştir. Karışımdaki saf su miktarı kilin optimum su muhtevasına göre hesaplanmıştır. Çizelge 4.4'te kil ve çimento ile oluşturulan karışımlarda kullanılan kil, çimento ve saf su miktarları verilmiştir.

Çizelge 4.4. Kil-çimento karışımında kullanılan malzemelerin miktarları

Çimento/(Çimento+Kil) (%)	M _{kil} (g)	M _{çimento} (g)	Su (g)	Her bir tabaka için tartılan toplam kütle M _{yaş} (g)
0	832,65	0,00	248,21	116,22
5	791,02	41,63	248,21	116,22
10	749,39	83,27	248,21	116,22

Sadece kil ve kimyasal ajan karışımlarından oluşan numunelerde, dört farklı kimyasal ajanın üç farklı konsantrasyonu kullanılarak solüsyonlar hazırlanmıştır. Solüsyondaki kimyasal ajan yüzdesi su ağırlığınca hesaplanmıştır. Çizelge 3.5'te oluşturulan solüsyondaki su ve kimyasal ajan miktarları verilmiştir.

Çizelge 4.5. Kimyasal ajanlarla oluşturulan karışımdaki solüsyon

Ajan/Su (%)	Ajan (g)	Su (g)	Solüsyon (g)
5	40,0	800,0	840,0
10	80,0	800,0	840,0
20	160,0	800,0	840,0

Kil, kimyasal ajan ve çimentoyla oluşturulan karışımlarda kullanılan malzeme miktarları çimento+kil karışımlarındaki metodla aynı şekilde belirlenmiştir. Aradaki tek fark kimyasal ajanlarla oluşturulan karışımdaki su yüzdesi ajan+su olarak yani solüsyon olarak belirlenmiştir. Çizelge 3.6'da kil, kimyasal ajan ve çimento ile oluşturulan numunelerin karışım miktarları özetlenmiştir.

Çizelge 4.6. Kil, kimyasal ajan ve çimento karışımlarında kullanılan malzeme miktarları

Çimento/(Çimento+Kil) (%)	M _{kil} (g)	M _{çimento} (g)	Ajan+Su=Solüsyon (g)	Her bir tabaka için tartılan toplam kütle M _{yaş} (g)
0	832,65	0,00	248,21	116,22
5	791,02	41,63	248,21	116,22
10	749,39	83,27	248,21	116,22

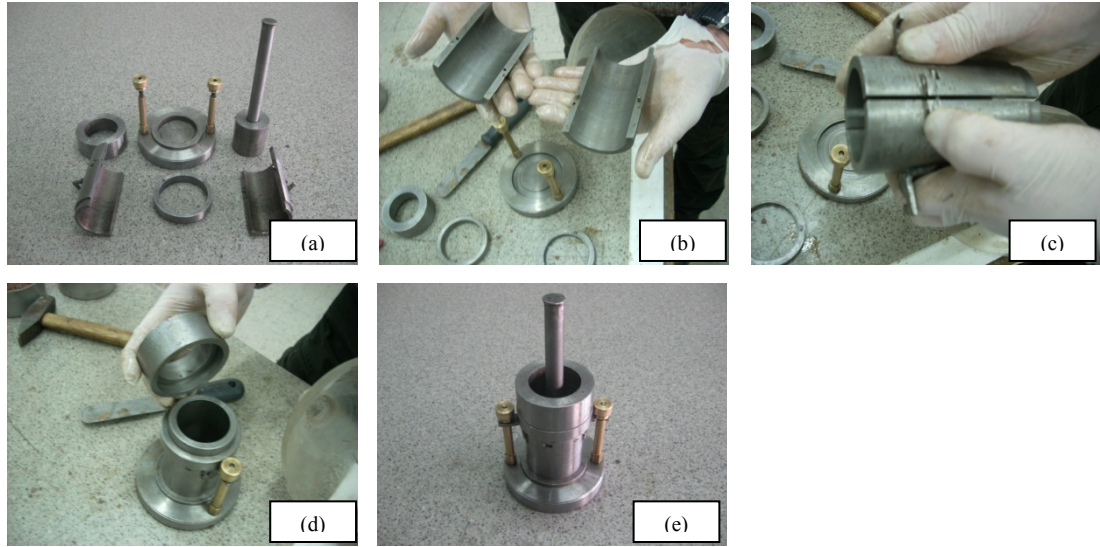
Deney sonuçlarında kullanılacak şekillerdeki göstergelerin okunabilirliğini sağlamak amacıyla kimyasal ajanlar için aşağıda belirtilen tanımlamalar kullanılmıştır.

Çizelge 4.7. Kimyasal ajanların tanımlamaları

Kimyasal Ajan	Notasyon
Sodyum hegzametafosfat	K1
Alüminyum sülfat	K2
Sodyum karbonat	K3
Sodyum silikat	K4

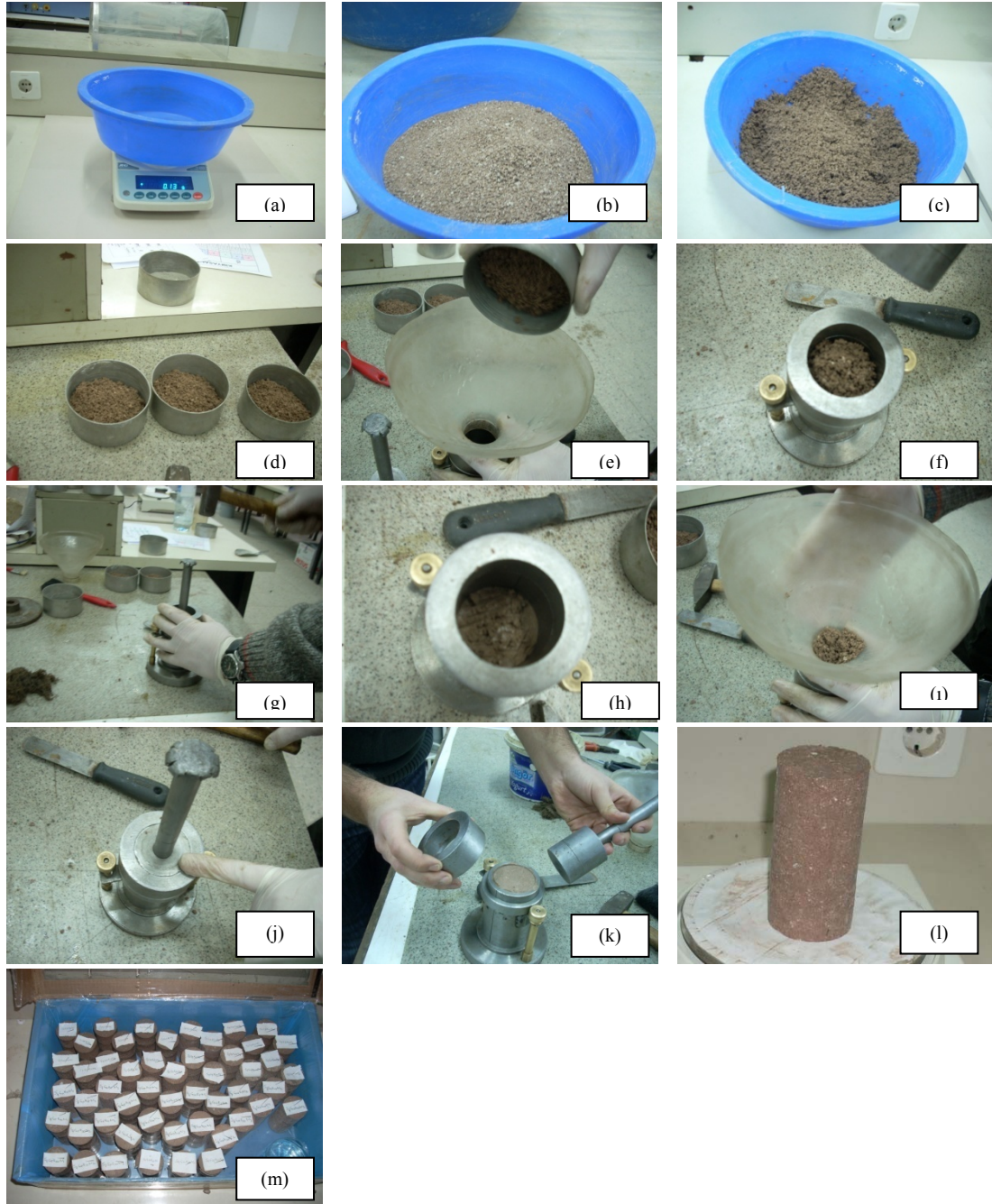
Kimyasal ajan kullanılarak hazırlanan solüsyonlar K1, K2 ve K3 için kuru kütle/su, K4 için sıvı kütle/su olarak belirlenmiştir. Örneğin Katkı_1 (%5), Çimento (%10)_N1 tanımlı numune için; çimento/(çimento+kil) oranı %10 olan karışıma katkı_1 kullanılarak hazırlanan %5'lik solüsyon, optimum su içeriği olarak eklenmiştir. Her bir karışım için özdeş üç numune hazırlanmış olup diğer iki numune de N2 ve N3 olarak isimlendirilmiştir. Diğer tüm karışım yüzdeleri için aynı metod uygulanmıştır.

Dayanım deneyleri için oluşturulan numuneler, özel olarak tasarlanan sıkıştırma kalıplarında hazırlanmıştır. Numune içerisinde oluşacak boşlukları engellemek için numuneler üç tabaka halinde sıkıştırılmıştır. Bu durum göz önüne alınarak sıkıştırma kalıbı, her bir tabakanın yüksekliği 33,5mm, numunenin toplam yüksekliği 100,5 mm ve numunenin çapı 50 mm olacak şekilde tasarlanmıştır. Tabakalar, tokmak üzerinde bulunan işaret çizgileri hizalanarak sıkıştırılmış olup her bir tabakanın eşit olması bu şekilde sağlanmıştır. Ayrıca sıkıştırma kalıbı, sıkıştırılmış numunenin zarar görmeden kalıptan çıkarılmasını kolaylaştırmak için iki parça halinde imal edilmiştir. Sıkıştırma kalıbı ile ilgili parçalar Resim 4.1'de gösterilmiştir.



Resim 4.1. Numune sıkıştırma kalıbı a) Numune sıkıştırma kalıbının parçaları b-c-d) Sıkıştırma kalıbının hazır hale getirilişi e) Numune sıkıştırma kalıbının hazır hali

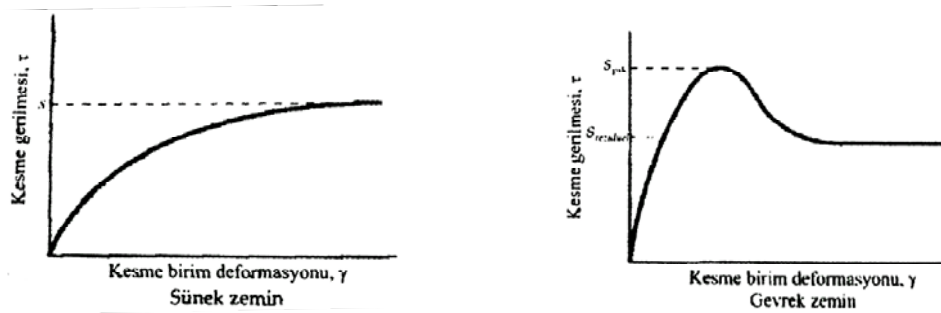
Darası alınmış kapta, karışım içerisindeki ağırlıkça oranı ($\text{çimento}/(\text{çimento}+\text{kil})$) % 0, 5, 10 olan çimento ve kil kuru şekilde iyice karıştırılmıştır. Daha sonra bu karışıma kilin optimum su muhtevasına göre belirlenen miktarda su, azar azar karışıma ilave edilmiştir. Topaklanma olmamasına dikkat edilerek homojen bir karışım elde edilmiştir. Kimyasal ajan kullanılarak oluşturulan karışımlar hazırlanırken, yine kil ile çimento, kil+çimento ağırlığının % 0, 5, 10 oranlarında çimento ilavesiyle kuru halde karıştırıldıktan sonra solüsyon halinde hazırlanan kimyasal ajanlar, kilin optimum su muhtevasına göre ayarlandığı oranda karışıma azar azar ilave edilmiştir. Homojen karışımlar oluşturulduktan sonra sıkıştırma kalıbı hazır hale getirilmiştir. Sıkıştırılacak her bir tabaka için belirlenen miktarda alınan malzeme, huni yardımıyla sıkıştırma kalıbına dökülmüştür. Kalıba dökülen malzeme tokmak yardımıyla, tokmaktaki ilk tabaka için işaretli olan kısma kadar sıkıştırılmıştır. Diğer iki tabakada da aynı işlem tekrarlanmış olup, tabaka geçişlerinde sıkışmış tabaka yüzeyi bıçak yardımıyla pürüzlendirilerek tabakalar arası kaynaşma sağlanmıştır. Son tabaka sıkıştırıldıktan sonra tokmakla sıkıştırma kalıbının hemiyüz olup olmadığı kontrol edilmiştir. Sıkıştırma işlemi tamamlandıktan sonra numune kalıptan dikkatlice çıkarılmıştır. Kalıptan çıkarılan numune serbest basınç deneyine tabi tutulmak üzere 28 gün kürde bekletilmiştir. Numunelerin hazırlanması ile ilgili fotoğraflar Resim 4.2’de gösterilmiştir.



Resim 4.2. Numune Hazırlama Aşamaları a) Darası alınmış kap b) Kuru kil c) Kil, saf su, çimento ve kimyasal ajanın karışım hali d) Her bir tabaka için sıkıştırılmaya hazır karışımlar e) Huni yardımıyla malzemenin sıkıştırma aparatına dökülmesi f) Aparat içindeki sıkıştırılmaya hazır malzeme g) Sıkıştırma işlemi h) Diğer tabakaya geçerken yüzeyin pürüzlenmiş hali i) Bir başka tabaka için malzeme dökülmesi j) Sıkıştırma işleminin bittiğini gösteren, tokmakla sıkıştırma aparatının hemiyüz olması k) Sıkıştırılan numunenin aparattan çıkarılması l) Kürde bekletilmeye hazır sıkıştırılmış numune m) Kürde bekletilen numuneler

4.4. Serbest Basınç Deneyi

Serbest basınç deneyi, genelde kil zeminlerde kullanılan, zemin numunesinin yanal sınırlama olmadan sadece düşey basınç gerilmesine maruz kalarak kayma direncinin belirlendiği deneydir. Serbest basınç deneyi gerilme kontrollü ya da birim boy kısalması kontrollü olarak iki biçimde yapılabilmektedir. Birim boy kısalması kontrollü deney basit olduğu için yaygın olarak kullanılmaktadır. Serbest basınç deneyi sonucunda numunelerin gerilme birim deformasyon eğrileri elde edilmektedir. Zeminler için Şekil 4.2’de gösterildiği gibi iki çeşit kesme gerilmesi-birim deformasyon eğrisi söz konusudur. Sünek eğrili olanlar genellikle iyi tanımlanmış pik kesme gerilmesinde sabit değere ulaşır. Bu değer tasarım kesme dayanımı olarak kullanılabilir. Bununla birlikte, gevrek (veya deformasyon yumuşamalı) eğrili olanlar için iki çeşit dayanım söz konusudur. Birincisi eğrideki yüksek nokta olan pik dayanım ikincisi, çok daha büyük bir kesme deformasyonunda oluşan rezidüel dayanımdır. Her iki değer tasarımda kullanılabilir (Coduto, 2006)



Şekil 4.2. Zeminde kesme gerilmesi-kesme birim deformasyonu eğrileri ve tanımları (Coduto, D. P., 2006)

4.4.1. Deneyin yapılışı

Serbest basınç deneyleri ASTM D 2166 standartına uygun olarak, katkısız saf kil numunelerde 0,5 mm/dk yükleme hızı altında deformasyon kontrollü olarak yapılmıştır. Yüksek dayanımlı numunelerde serbest basınç deney düzeneğinin (frame) kapasitesi zorlanmaktadır. Dolayısıyla saf killi numuneler dışındaki tüm numunelerde serbest basınç deneyleri CBR deney düzeneği kullanılarak 1,27 mm/dk yükleme hızı altında deformasyon kontrollü olarak yapılmıştır. 28 gün kürde bekletilmiş ve kırılma zamanı gelmiş numunenin deneye başlamadan önce çapı,

yüksekliği ve deney öncesi ağırlığı ölçülmüştür. Numune deney aygıtının alt başlığının merkezine yerleştirilmiştir. Numunenin yük halkasının çemberiyle tam temas halinde olmasına dikkat edilmiştir. Numunenin alt ve üst yüzeyleri deney aygıtının alt ve üst başlıklarının merkezine gelecek şekilde ayarlanmıştır. Deformasyon ve yük halkası okuma saatleri sıfırlanarak yükleme işlemine başlanmıştır. Yük ve deformasyon okumaları belli aralıklarla kaydedilmiştir. Deneye numune üzerinde kırılma düzlemi oluşuna kadar devam edilmiştir. Bu tür kırılma gevrek kırılma türü olduğundan en yüksek gerilme değeri okunduktan sonra birkaç gerilme değeri daha okunmuştur. Pik değeri okunamayan mukavemeti yüksek olan bazı numunelerde kırılma türünün sünek olduğu gözlenmiştir. Deney sonuçlandıktan sonra numune ağırlığı 0,01 gr duyarlı terazide tartılmıştır. Numune etüvde 1 gün bekletildikten sonra numunenin kuru ağırlığı tartılarak su içeriği belirlenmiştir. Deneyin yapılışı ile ilgili fotoğraflar Resim 4.3'te gösterilmiştir.

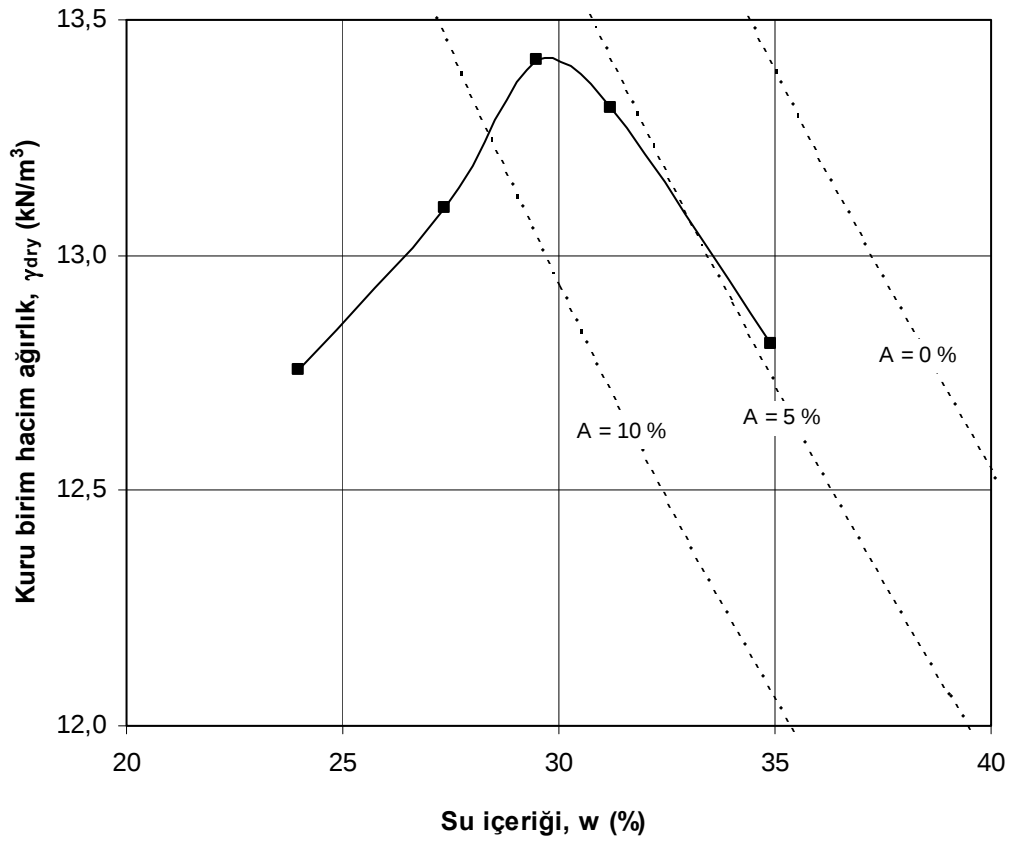


Resim 4.3. Serbest basınç deneyi aşamaları a) Kumpas yardımıyla numune boy ve çapının ölçülmesi b) Numunenin deney öncesi ağırlığının tartılması c) Numunenin düzeneğe yerleşmiş hali d) Deneyin başlaması e) Numunede oluşan kırılma çizgileri f) Deney sonrası numunenin yaş ağırlığının ölçülmesi g) Etüvde kurutulmuş numunenin kuru ağırlığının ölçülmesi

5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

5.1. Laboratuvar Kompaksiyon Karakteristikleri

Deneylerde kullanılan kil üzerinde ASTM D 698 standartına uygun olarak yapılan standart proktor deneyinin sonucu Şekil 5.1’de gösterilmiştir. Deney sonucuna göre elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlık $13,42 \text{ kN/m}^3$, optimum su muhtevası %29,81 bulunmuştur. Deney sonucunda elde edilen optimum su muhtevası yapılan serbest basınç deneyleri için hazırlanan numunelerde kullanılmıştır.



Şekil 5.1. Çalışmada kullanılan kile ait standart kompaksiyon eğrisi

5.2. Sadece Kil ve Çimento Katkılı Numunelerin Serbest Basınç Dayanımları

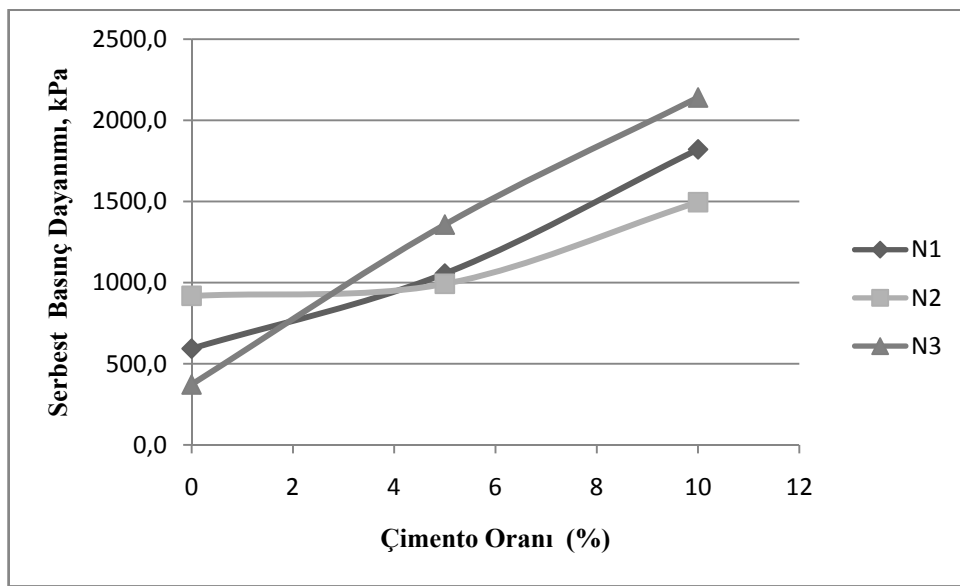
Deneylerin ilk aşamasında kil, saf su ve çimento karışımıyla elde edilen numunelerin dayanımına sadece çimentonun etkisi araştırılmıştır. Numuneler, çimento/(çimento+kil) oranı % 0, 5, 10 olan çimento ve kilin hedeflenen optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığında karıştırılmasıyla oluşturulmuştur. Numuneler üçer tabaka halinde sıkıştırılmıştır. Her çimento/(çimento+kil) oranında üçer tane özdeş numune hazırlanmıştır. Deney sonuçları değerlendirilirken kolaylık sağlamak amacıyla özdeş numuneler N1, N2 ve N3 şeklinde isimlendirilmiştir. Sıkıştırma işlemi tamamlanan numuneler 28 gün kürde bekletildikten sonra üzerinde serbest basınç deneyi yürütülmüştür. Deney sonuçları incelendiğinde Çizelge 5.1’de görüldüğü gibi deney sonucunda numunelerin su muhtevalarının birbirine yakın olduğu ve hedeflenen optimum su muhtevasına yakın sonuçların elde edildiği gözlenmiştir.

Çizelge 5.1. Kil ve sadece çimento karışımlarının su muhtevası değerleri

Numune Adı	Çimento/(Çimento+Kil) (%)	Su İçeriği, w (%)
N1	0	26,60
N2		22,50
N3		29,69
N1	5	27,80
N2		27,36
N3		23,90
N1	10	24,67
N2		26,30
N3		21,00

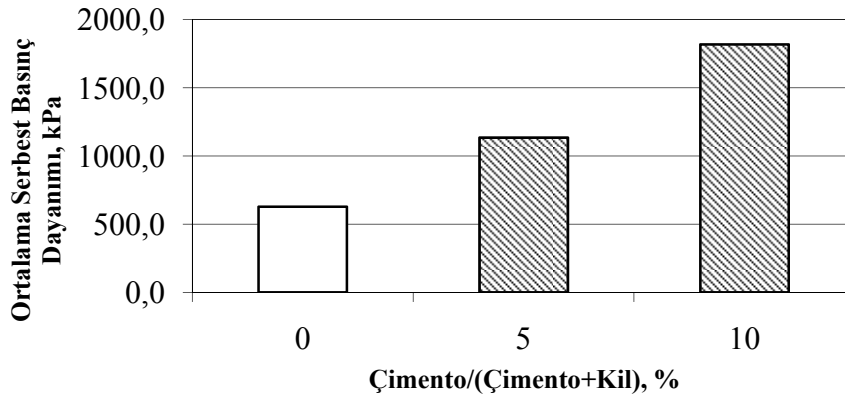
Özdeş numunelerin dayanım farklılıkları incelendiğinde Şekil 5.2’de görüldüğü gibi elde edilen eğrilerin birbirine yakın olduğu gözlenmiştir. Çimento katkısız numunelerde; N2 numunesinden elde edilen serbest basınç dayanımı N1 numunesinden elde edilen serbest basınç dayanımının yaklaşık %155’i, N3 numunesinden elde edilen dayanım da N1 numunesinin yaklaşık %63’ü olarak bulunmuştur. Çimento/(çimento+kil) oranı %5 çimento ile kille oluşturulan numunelerde N2 numunesinden elde edilen serbest basınç dayanımı N1

numunesinden elde edilen serbest basınç dayanımının yaklaşık %94'ü, N3 numunesinden elde edilen dayanım da N1 numunesinin yaklaşık %128'i olarak bulunmuştur. Çimento/(çimento+kil) oranı %10 çimento ile kille oluşturulan numunelerde N2 numunesinden elde edilen serbest basınç dayanımı N1 numunesinden elde edilen serbest basınç dayanımının yaklaşık %82'si, N3 numunesinden elde edilen dayanım da N1 numunesinin yaklaşık %118'i olarak bulunmuştur.



Şekil 5.2. Özdeş numunelerin serbest basınç dayanımlarındaki farklılıklar

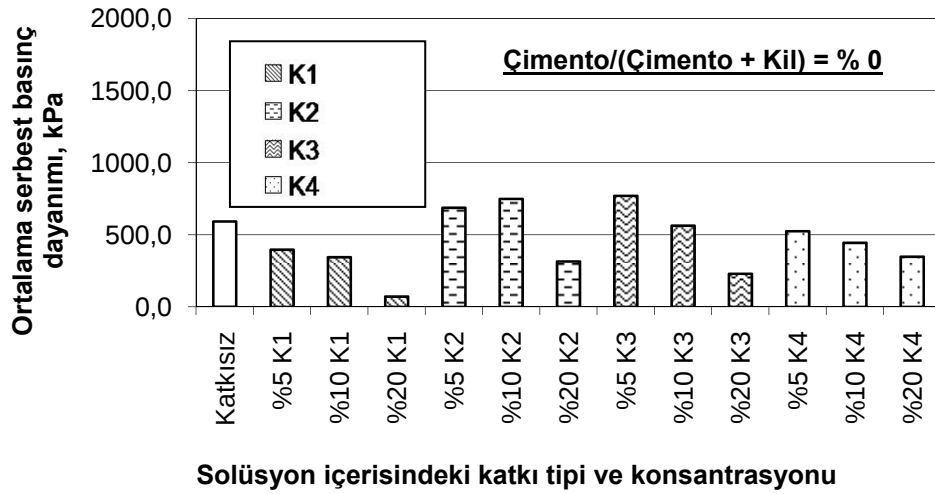
Numunelerin ortalama serbest basınç değerleri göz önüne alındığında elde edilen sonuçlar Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde çimento/(çimento+kil) oranı %5 olan çimento içeriğinin, karışımın basınç dayanımını çimentosuz kil ve saf su karışımından elde edilen serbest basınç değerine göre %80 artırdığı gözlenmiştir ve karışımdan elde edilen ortalama serbest basınç dayanımının 1135 kPa olduğu gözlenmiştir. Çimento/(çimento+kil) oranı %10 olan çimento içeriğinin, karışımın basınç dayanımını çimentosuz kil ve saf su karışımından elde edilen serbest basınç değerine göre %190 artırdığı gözlenmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde karışımın çimento oranı arttıkça serbest basınç dayanımının arttığı gözlenmiştir ve karışımdan elde edilen ortalama serbest basınç dayanımının 1819,3 kPa olduğu gözlenmiştir.



Şekil 5.3. Kil ve sadece çimento ile oluşturulan karışımların ortalama serbest basınç değerleri

5.3. Sadece Kil ve Kimyasal Katkı Maddeleri Karışımlarının Serbest Basınç Dayanımları

Deneylerin ikinci aşamasında kil ve solüsyon halinde karışıma katılan kimyasal ajanların karışımıyla elde edilen numunelerin dayanımına sadece kimyasal ajanların etkisi araştırılmıştır. Kimyasal katkı olarak sodyum hegzametafosfat (K1), alüminyum sülfat (K2), sodyum karbonat (K3) ve sodyum silikat (K4) kullanılmıştır. Kimyasal ajanlar karışıma ajan/su oranı % 5, 10 ve 20 olan solüsyonlar halinde katılmıştır. Karışımlar optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığında hazırlanmıştır. Her karışımdan üçer silindirik numune elde edilmiştir. Oluşturulan karışımlar üçer tabaka halinde sıkıştırılmıştır. Sıkıştırılan numuneler 28 günlük serbest basınç deneyine tabii tutularak kırılmıştır. Deney sonucunda elde edilen serbest basınç dayanımlarının ortalamaları alınmıştır. Şekil 5.4'te katkısız kile sadece saf su katılmasıyla oluşturulan numunelerin ortalama serbest basınç dayanımı ile farklı oranlarda karıştırılan katkı maddelerinin etkisiyle oluşan ortalama serbest basınç dayanımları kıyaslanmıştır.

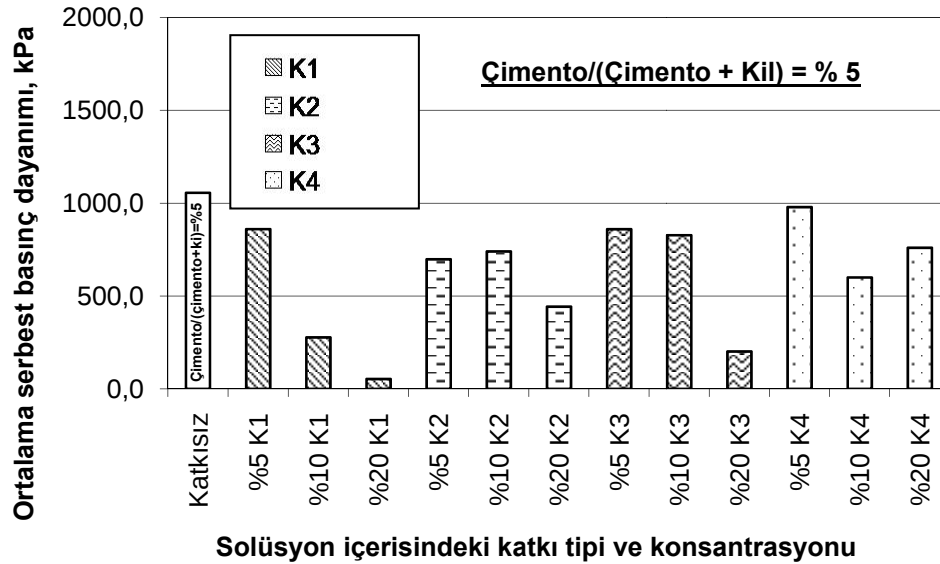


Şekil 5.4. Katkısız ve katkılı numunelerin ortalama serbest basınç dayanımları

%5 oranında K1 kullanıldığında ortalama serbest basınç dayanımının katkısız numuneye göre %33 azaldığı gözlenmiştir. %10 oranında K1 kullanıldığında %42 azalma, %20 K1 kullanıldığında ise %88 oranında bir azalma olduğu görülmüştür. K1 oranı arttıkça dayanımdaki azalma yüzdesinin arttığı gözlenmiştir. %5 K2 kullanıldığında ortalama serbest basınç dayanımının katkısız numuneye göre %16 arttığı gözlenmiştir. %10 K2 kullanıldığında ortalama serbest basınç dayanımının katkısız numuneye göre %26 arttığı gözlenmiştir. %20 K2 kullanıldığında ise ortalama serbest basınç dayanımının %47 azaldığı gözlenmiştir. K2 kullanıldığında dayanımın belli bir noktaya kadar arttıktan sonra düşmeye başladığı gözlenmiştir. En iyi dayanım artışı %10 oranında K2 kullanıldığında elde edilmiştir. %5 K3 kullanıldığında ortalama serbest basınç dayanımının katkısız numuneye göre %30 arttığı gözlenmiştir. %10 oranında K3 kullanıldığında %5 azalma, %20 K3 kullanıldığında ise %61 oranında bir azalma olduğu görülmüştür. K3 kullanıldığında dayanımın belli bir noktaya kadar arttıktan sonra düşmeye başladığı gözlenmiştir. En iyi dayanım artışı %5 oranında K3 kullanıldığında elde edilmiştir. %5 oranında K4 kullanıldığında ortalama serbest basınç dayanımının katkısız numuneye göre %11 azaldığı gözlenmiştir. %10 oranında K4 kullanıldığında %25 azalma, %20 K4 kullanıldığında ise %41 oranında bir azalma olduğu görülmüştür. K4 kullanıldığında katkı oranı arttıkça dayanımdaki azalma yüzdesi arttığı gözlenmiştir.

5.4. Kil, Kimyasal Katkı Maddeleri ve Çimento Karışımlarının Serbest Basınç Dayanımları

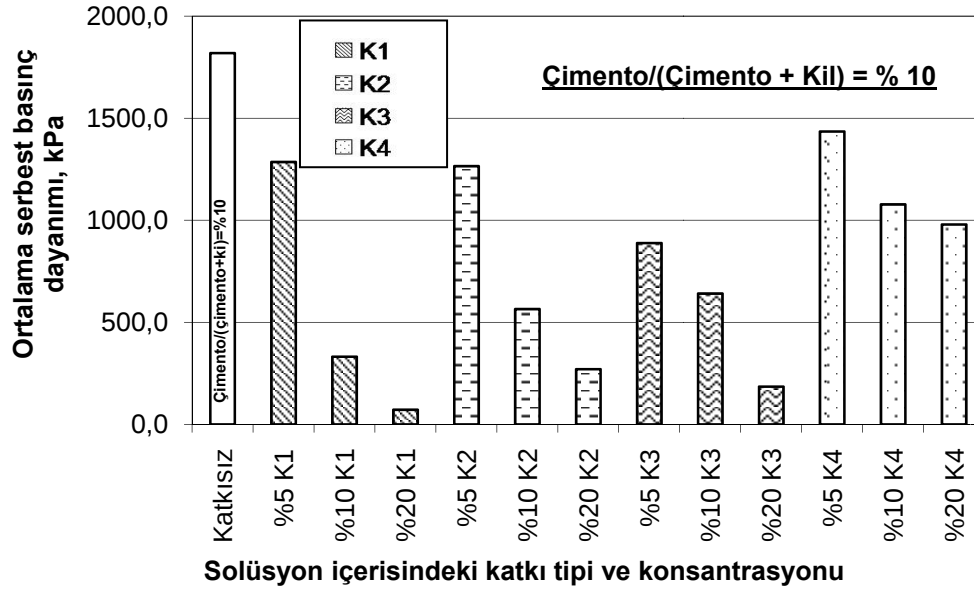
Deneylein üçüncü aşamasında kil, çimento ve solüsyon halinde karışıma katılan kimyasal ajanlardan oluşan karışımın serbest basınç dayanımına çimento ve kimyasal katkıının beraber etkisi araştırılmıştır. Kimyasal katkı olarak sodyum hegzametafosfat (K1), alüminyum sülfat (K2), sodyum karbonat (K3) ve sodyum silikat (K4) kullanılmıştır. Öncelikle kil ve çimento/(çimento+kil) oranı % 5, 10 olan çimento karıştırılmıştır. Bu karışıma ajan/su oranı %5, 10, 20 olan kimyasal ajanlar solüsyon olarak katılmıştır. Karışımlar optimum su muhtevası ve maksimum birim hacim ağırlığı hedeflenerek hazırlanmıştır. Her karışımdan üçer özdeş silindirik numune hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler üçer tabaka halinde sıkıştırılmıştır. Sıkıştırılan numuneler 28 gün kürde bekletildikten sonra serbest basınç deneyiyle kırılmıştır. Deney sonucunda elde edilen serbest basınç değerlerinin ortalamaları alınmıştır. Elde edilen sonuçlara göre çimento/(çimento+kil) oranı %5 olan çimento, kil ve kimyasal katkıları karışımların ortalama serbest basınç değerleri Şekil 5.5'te gösterilmiştir.



Şekil 5.5. Kil, %5 çimento ve kimyasal katkıları numunelerin ortalama serbest basınç dayanımları

Kimyasal katkısız, %5 çimentolu numunelerin ortalama serbest basınç dayanımı ile kil, %5 çimento ve farklı oranlarda karıştırılan kimyasal katkıdan oluşan karışımın ortalama serbest basınç dayanımları kıyaslandığında; kil, %5 çimento ve %5 K1 ile oluşturulan karışımın ortalama serbest basınç dayanımında kimyasal katkısız numuneye göre %19 oranında azalma görülmüştür. %10 K1 kullanıldığında %74 oranında, %20 K1 kullanıldığında %95 oranında azalma gözlenmiştir. %5 çimento ile birlikte K1 katkısı kullanıldığında serbest basınç dayanımının azaldığı gözlenmiştir. Katkı oranı arttıkça dayanımdaki azalma miktarı artmıştır. %5 çimento, kil ve %5 K2 kullanıldığında ortalama serbest basınç dayanımında kimyasal katkısız numuneye göre %34 oranında azalma görülmüştür. %10 K2 kullanıldığında %30 oranında, %20 K2 kullanıldığında %58 oranında azalma gözlenmiştir. %5 çimento ile birlikte K2 katkısı kullanıldığında serbest basınç dayanımının azaldığı gözlenmiştir. %5 çimento, kil ve %5 K3 kullanıldığında ortalama serbest basınç dayanımında kimyasal katkısız numuneye göre %19 oranında azalma görülmüştür. %10 K3 kullanıldığında %22 oranında, %20 K3 kullanıldığında %58 oranında azalma gözlenmiştir. %5 çimento ile birlikte K3 katkısı kullanıldığında serbest basınç dayanımının azaldığı gözlenmiştir. Katkı oranı arttıkça dayanımdaki azalma miktarı artmıştır. %5 çimento, kil ve %5 K4 kullanıldığında ortalama serbest basınç dayanımında kimyasal katkısız numuneye göre %7 oranında azalma görülmüştür. %10 K4 kullanıldığında %43 oranında, %20 K4 kullanıldığında %28 oranında azalma gözlenmiştir. %5 çimento ile birlikte K4 katkısı kullanıldığında serbest basınç dayanımının azaldığı gözlenmiştir. Katkı oranı arttıkça dayanımdaki azalma miktarı artmıştır.

Çimento/(çimento+kil) oranı %10 olan çimento, kil ve kimyasal katkılı karışımların ortalama serbest basınç değerleri Şekil 5.6'da gösterilmiştir.



Şekil 5.6. Kil, %10 çimento ve kimyasal katkılı numunelerin ortalama serbest basınç dayanımları

Kimyasal katkısız, % 10 çimentolu numunelerin ortalama serbest basınç dayanımı ile kil, %10 çimento ve farklı oranlarda karıştırılan kimyasal katkıdan oluşan karışımın ortalama serbest basınç dayanımları kıyaslandığında; kil, %10 çimento ve %5 K1 kullanıldığında ortalama serbest basınç dayanımında kimyasal katkısız numuneye göre %29 oranında azalma görülmüştür. %10 K1 kullanıldığında %82 oranında, %20 K1 kullanıldığında %96 oranında azalma gözlenmiştir. %10 çimento ile birlikte K1 katkısı kullanıldığında serbest basınç dayanımının azaldığı gözlenmiştir. Katkı oranı arttıkça dayanımdaki azalma miktarı artmıştır. %10 çimento, kil ve %5 K2 kullanıldığında ortalama serbest basınç dayanımında kimyasal katkısız numuneye göre %30 oranında azalma görülmüştür. %10 K2 kullanıldığında %69 oranında, %20 K2 kullanıldığında %85 oranında azalma gözlenmiştir. %5 çimento ile birlikte K2 katkısı kullanıldığında serbest basınç dayanımının azaldığı gözlenmiştir. Katkı oranı arttıkça dayanımdaki azalma miktarı artmıştır. %10 çimento, kil ve %5 K3 kullanıldığında ortalama serbest basınç dayanımında kimyasal katkısız numuneye göre %51 oranında azalma görülmüştür. %10 K3 kullanıldığında %65 oranında, %20

K3 kullanıldığında %90 oranında azalma gözlenmiştir. %10 çimento ile birlikte K3 katkısı kullanıldığında serbest basınç dayanımının azaldığı gözlenmiştir. Katkı oranı arttıkça dayanımdaki azalma miktarı artmıştır. %10 çimento, kil ve %5 K4 kullanıldığında ortalama serbest basınç dayanımında kimyasal katkısız numuneye göre %21 oranında azalma görülmüştür. %10 K4 kullanıldığında %41 oranında, %20 K4 kullanıldığında %46 oranında azalma gözlenmiştir. %10 çimento ile birlikte K4 katkısı kullanıldığında serbest basınç dayanımının azaldığı gözlenmiştir. Katkı oranı arttıkça dayanımdaki azalma miktarı artmıştır.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışmada elde edilen verilere göre yapılan değerlendirmeler aşağıda sıralanmıştır.

1. Sadece kil, saf su ve çimento karışımlarından elde edilen sonuçlara göre; çimento oranı arttıkça serbest basınç dayanımının arttığı gözlenmiştir. Özdeş numunelerden elde edilen serbest basınç dayanımlarının birbirine yakın sonuçlar verdiği gözlenmiştir.
2. Sadece kil ve farklı konsantrasyonlardaki kimyasal ajanlarla oluşturulan karışımlardan elde edilen sonuçlara göre; tüm kimyasal katkılarda kimyasal katkının solüsyon içindeki konsantrasyonu arttıkça serbest basınç dayanımı belirgin olarak azalma eğilimi göstermektedir. Sadece K2 kimyasal ajanında konsantrasyon %5'ten %10'a arttığında serbest basınç dayanımı artmıştır fakat konsantrasyon %10'dan %20'ye çıktığında serbest basınç dayanımı %5 konsantrasyonlu karışımın serbest basınç dayanımının altına düşmüştür.
3. Kil, çimento ve farklı konsantrasyonlardaki kimyasal ajanlarla oluşturulan karışımlardan elde edilen sonuçlara göre; tüm karışımlarda kimyasal katkının içindeki konsantrasyonu arttıkça serbest basınç dayanımının azalma eğilimi gösterdiği gözlenmiştir. Karışımındaki çimento oranı arttıkça dayanımlarda az miktarda artış gözlenmiştir fakat elde edilen serbest basınç dayanımları, katkısız numuneden elde edilen serbest basınç dayanımını geçememiştir.
4. Özellikle yüksek konsantrasyonlu kimyasal ajan varlığında (%20) K1 ve K3 katkılarının kohezyon dayanımını çok büyük ölçüde azalttığı görülmüştür. Dolayısıyla, daha sonraki araştırmalarda üç eksenli basınç deneyleri ile sürtünme dayanımlarındaki değişimlerin incelenmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Aboood, T. T., Kasa, A. B., Chik, Z. B., “Stabilization of Silty Clay Soil Using Chloride Compounds”, *Journal of Engineering Science and Technology*, 102-110, (2007).
- ACI 230.1R-90, “State-of-the-Art Report on Soil Cement”, *ACI Material Journal*, 87(4) (1990).
- Akbulut, S., Arasan, S., Kalkan, E., “Modification of Clayey Soils Using Scrap Tire Rubber and Synthetic Fibers”, *Applied Clay Science*, 23-32 (2007).
- Aksoy, S.H., Yılmaz, M., Akarsu, E.E, “Killi Bir Zeminin C Sınıfı Uçucu Kül Kullanılarak Stabilizasyonu”, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onbirinci Ulusal Kongresi*, Trabzon, 173-177 (2006).
- ASTM D 2487-00, “Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)”, *Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken, PA, 1-12, (2002).
- ASTM D 2166-06, “Standart Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil”, *Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken, PA, 19428-2959, (2007).
- ASTM D 422-63, “Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils”, *Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken, PA, 1-8, (2002).
- ASTM D 4318-00, “Standart Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils”, *Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken, PA, 1-14, (2002).
- ASTM D 854-02, “Standard Test Method for Spesific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer”, *Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken, PA, 1-7, (2002).
- Aytekin, M., “Deneysel Zemin Mekaniği, 2. Baskı”, *Teknik Yayınevi*, Ankara, 217-218 (2004).
- Balasingam, M., Farid S., “Interpretation of Geotechnical Properties oc Cement Treated Soils”, *Washington State Transportation Center*, (2008).
- Bergado, D. T., Anderson, L. R., Miura, N., Blasubramaniam, A. S., ”Soft Ground Improvement”, *ASCE pres.*, (1996)
- Bilge, T., “Yüksek Fırın Cürufu Katkısının Kil Zeminlerin Stabilizasyonuna Etkisinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Balıkesir Üniversitesi*, 34-101 Balıkesir, (2011)

- Coduto, D. P., “Geoteknik Mühendisliği İlkeler ve Uygulamalar, 1. Baskı”, Mollamahmutoğlu, M, Kayabalı, K., **Gazi Kitapevi**, Ankara, 471-472 (2006).
- Currin, D. D., Allen, J. J., and Little, D. N., “Validation of Soil Stabilization Index System with Manual Development”, **Frank J. Seisler Research Laboratory**, United States Air Force Academy, Colorado, (1976).
- Çetin, A.Y., “Yüksek Plastisiteli Kil Zeminlerin Alternatif Malzemeler ile Yüzeysel Zemin Stabilizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, **İstanbul Teknik Üniversitesi**, İstanbul, (2011).
- Çıragöz, M., “Yol İnşaatında Kireç Stabilizasyonu”, **Türkiye Mühendislik Haberleri**, 13-15 (1962).
- Das, B. M. “Principle of Foundation Engineering”, **PWS-KENT Publishing Company**, Boston (1990).
- Deker, R. S., Dunnigan, L. P., “Development and Use of the Soil CONservation Service Dispersion Test”, **ASTM, STP 623**, 94-109, (1977).
- Dr. Robert M. Brooks, “Soil Stabilization with Flyash and Rice Husk Ash”, **International Journal of Research an Reviews in Applied Sciences**, 1(3), (2009).
- El-Rawi, N.M., Al-Samadi, M.Y.M., “Optimization of Cement-Lime-Chemical Additives to Stabilize Jordanian Soils”, **Journal of Islamic Academy of Sciences**, 8(4): 167-174 (1995).
- Engineering Manual 1110-3-137, “Soil Stabilization for Pavements Mobilization Construction Department of The Army”, **Corps of Engineers Office of the Chief of Engineers**, (1984).
- Falamanki, A., Shariatmadari, N., Noorzad, A., “Strength Properties of Hexametphosphate Treated Soils”, **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, Asce, (2008).
- Ghazali, F. M., Baghdadi, Z.A., and Khan, A. M., “Overconsolidated Behavior of Phosphoric Acid and Lime-Stabilized Kaolin Clay”, **Transportation Research Record**, Washington D. C., 1295, (1991).
- Glasser, F. P., “Fundamental Aspects of Cement Solidification and Stabilisation “, **Journal of Hazardous Material**, 151-170, (1997).
- Sarkar, G., Islam, R., Alamgir, M., Rokonzaman, “Interpretation of Rice Husk Ash on Geotechnical Properties of Cohesice Soil”, **Global Journal of Researches in Engineering Civil and Structural Engineering**, 12 (2) (2012).
- Kavak, A., Bilgen, G., “Yüksek Fırın Cürufu ve Kirecin Katkı Olarak Kil Üzerindeki Etkileri ve Yol Yapımında Kullanımının Araştırılması”, **Geoteknik Sempozyumu**, Adana, (2005).

- Kılıç, G., “Çimento ile Zemin Stabilizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, **Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 20 (2008).
- Kızılcılık, M., “Yüksek Plastisiteli Bir Kilin Kireç ile Stabilizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, **Kocaeli Üniversitesi**, Kocaeli, (2010)
- Laguros, J. G., “Effect of Chemical on Soil-Cement Stabilization”, Doctor of Philosophy, **Lowa State University of Science and Technology**, Proquest Dissertations.
- Moayedi, H., Huat, B. B. K., Moayedi, F., Asadi, A., Parsaie, A., “Effect of Sodium Silicate on Unconfined Compressive Strength of Soft Clay”, **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, (2011).
- Nontananandh, S., “Investigations on Reaction Products in Soil Cement”, **Natioanal Convention on Civil Engineering**, (2005).
- Ouhadi, V. R., Goodarzi, A. R., “Assessment of the Stability of a Dispersive Soil Treated by Alum”, **Engineering Geology** 85, 92-95, (2006).
- Önalp, A., “İnşaat Mühendislerine Geoteknik Bilgisi, Cilt II”, **Karadeniz Teknik Üniversitesi**, Trabzon, 1225 (1983).
- Saadeldin, R., Salem, M. A., Lotfi, H.A., “Performance of Road Embankment on Cement Stabilized Soft Clay”, **Pan-Am CGS Geotechnical Conferance**, (2011).
- Saate, J., “Effect of Curing Period on Sodium Silicate Stabilized Soils”, **Faculty of Civil Engineering**, University Technology of Malaysia.
- Sen, P., Mukesh, Dixit, M., “Evaluation of Strength Characteristics of Clayey Soil by Adding Soil Stabilizing Additives”, **International Journal of Earth Sciences and Engineering**, 1060-1063, (2011).
- Sevençan, Ü., “Polipropilen Fiber ve Uçucu Kül Katkılı Ankara Kilinin Geoteknik Özelliklerinin Araştırılması”, Yüksek Lisan Tezi , **Kırıkkale Üniversitesi**, 52 (2009)
- Sokolovich, V. E., “Acids as Chemical Stabilizers of Clay Soils”, **J. Soil Mech. And Found. Div.**, 271-273, (1973).
- Spance, R. D. And Shi, C. “Stabilization and Solidification of Hazardous”, **Radioactive and Mixed Wastes**, 1st Ed. CRC Press, Boca Raton, Fla, (2005).
- Tokyay, M. ve Erdoğan, K., “Cürufklar ve Cürufllu Çimentolar”, **Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği**, Ankara, (2002).
- Tumluer, G., “Çimento Katkılı Kumlu Zeminlerin Mukavemeti”, Yüksek Lisans Tezi, **Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Adana, 88 (2006).
- Tunç, A., “Yol Malzemeleri ve Uygulamaları”, **Atlas Yayın Dağıtım**, İstanbul, 840 (2001).

Tunç, A., “Yol Mühendisliğinde Geoteknik ve Uygulamaları”, *Atlas Yayın Dağıtım*, İstanbul, 912 (2002).

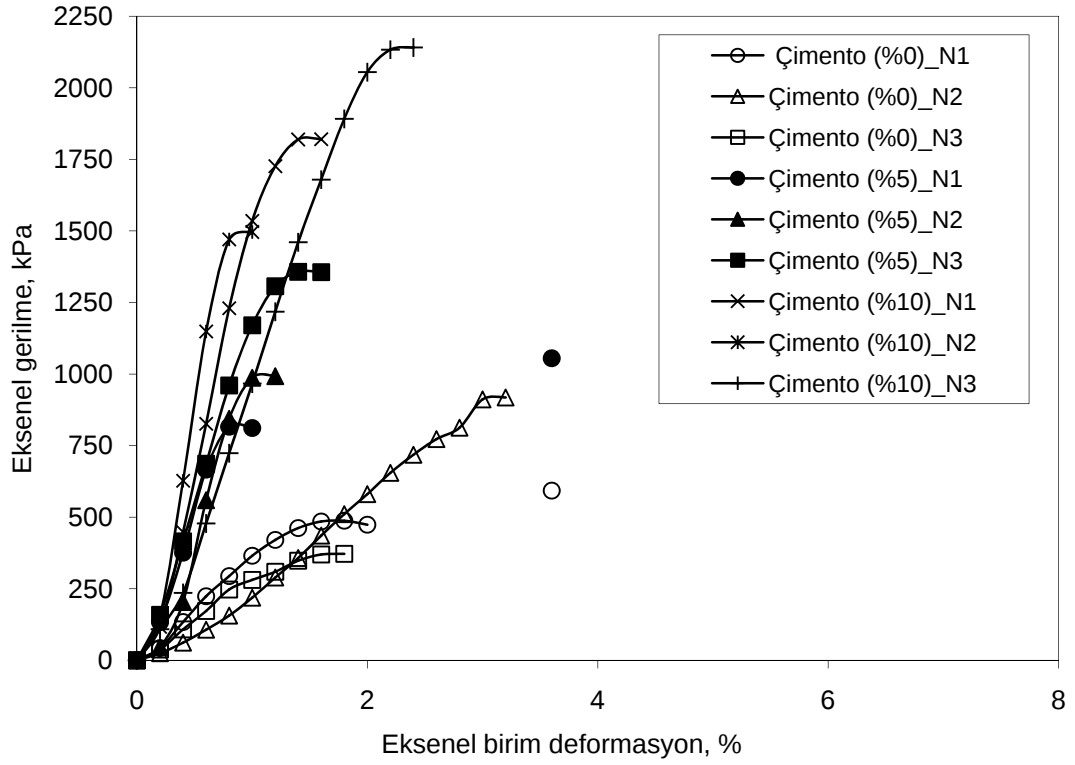
Yeoh, N. S., and Oades, J. M., “Properties of Soil and Clays After Acid Treatment I. Clay Minerals”, *J. Soil Res.*, Australia, 147-158, (1981).

Yıldırım, B., Alataş, T., Dağdelen, Ş., “Zemin Stabilizasyonunda Bitümün Kullanılması ile Üst Yapıda Sağlanacak Ekonominin Araştırılması”, *İkinci Geoteknik Sempozyumu* (2007).

Yıldırım, S., “Zemin İncelemesi ve Temel Tasarımı”, *Birsen Yayınevi*, İstanbul, 466, (2009)

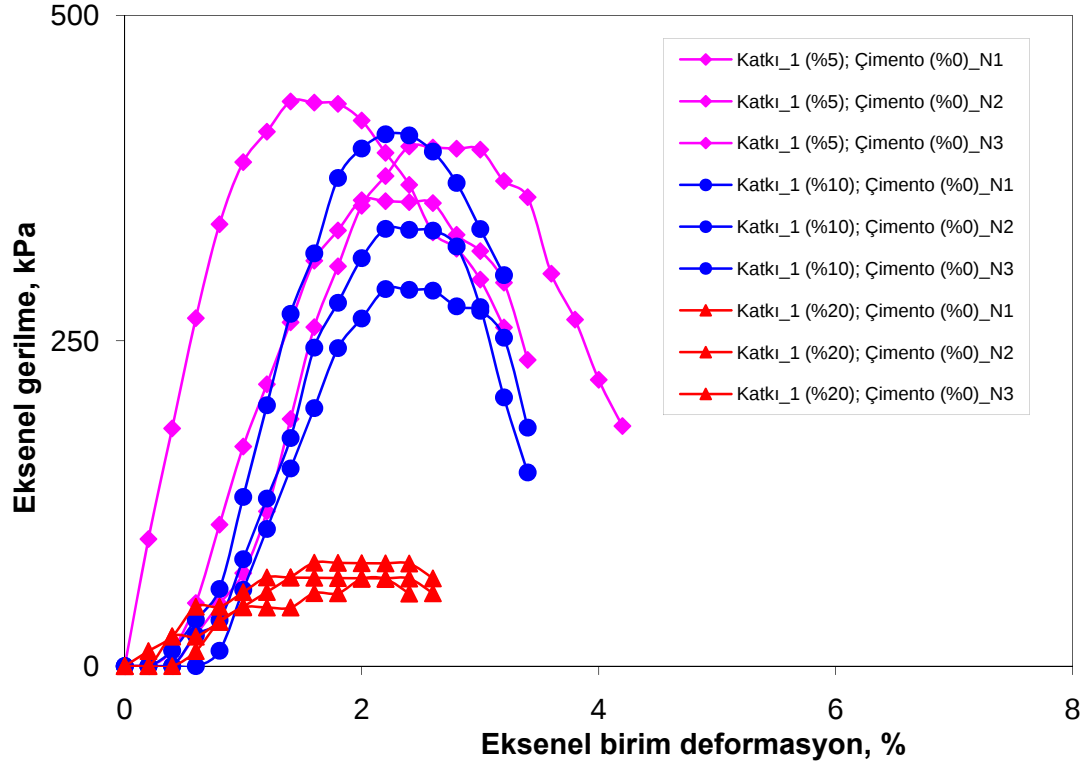
EKLER

EK-1. Çimento ile saf kil karışımından oluşan numunelerin eksenel gerilme-eksenel birim deformasyon grafiği



Şekil 1.1. 28 gün kürde bekletildikten sonra serbest basınç deneyi ile kırılan çimento ile saf kil karışımından oluşan numunelerin eksenel gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkileri

EK-2. Katkı_1 ile saf kil karışımından oluşan numunelerin eksenel gerilme-eksenel birim deformasyon grafiği



Şekil 2.1. 28 gün kürde bekletildikten sonra serbest basınç deneyi ile kırılan katkı_1 ile saf kil karışımından oluşan numunelerin eksenel gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkileri

EK-3. Katkı_1 ile saf kil karışımı numunelerinin serbest basınç deney sonucundaki fotoğrafları



S1Ç0K5N1



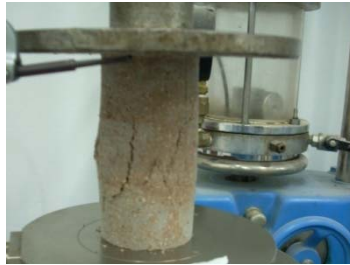
S1Ç0K5N2



S1Ç0K5N3



S1Ç0K10N1



S1Ç0K10N2



S1Ç0K10N3



S1Ç0K20N1



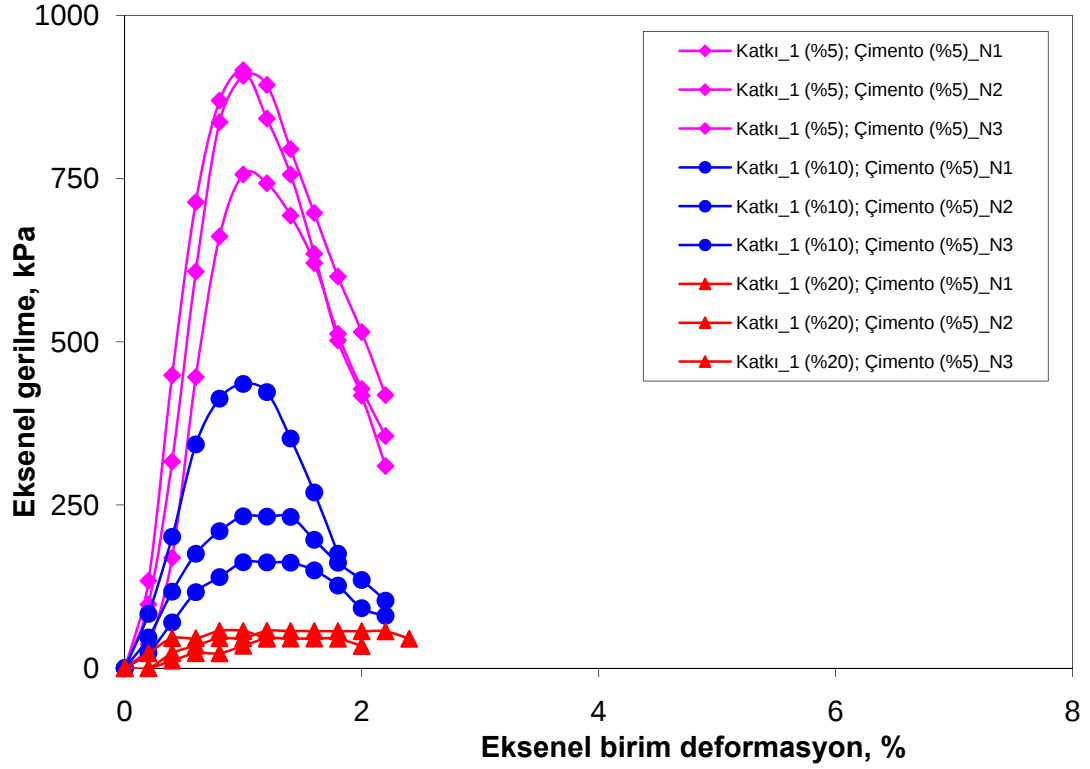
S1Ç0K20N2



S1Ç0K20N3

Resim 3.1. 28 gün kürde bekletildikten sonra serbest basınç deneyi ile kırılan katkı_1 ile saf kil karışımı numunelerinde oluşan kırılmalar

EK-4. Katkı_1, %5 çimento ile kil karışımından oluşan numunelerin eksenel gerilme-eksenel birim deformasyon grafiği



Şekil 4.1. 28 gün kürde bekletildikten sonra serbest basınç deneyi ile kırılan katkı_1, %5 çimento ile kil karışımından oluşan numunelerin eksenel gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkiler

EK-5. Katkı_1, %5 çimento ve kil karışımı numunelerinin serbest basınç deney sonucundaki fotoğrafları



S1Ç5K5N1



S1Ç5K5N2



S1Ç5K5N3



S1Ç5K10N1



S1Ç5K10N2



S1Ç5K10N3



S1Ç5K20N1



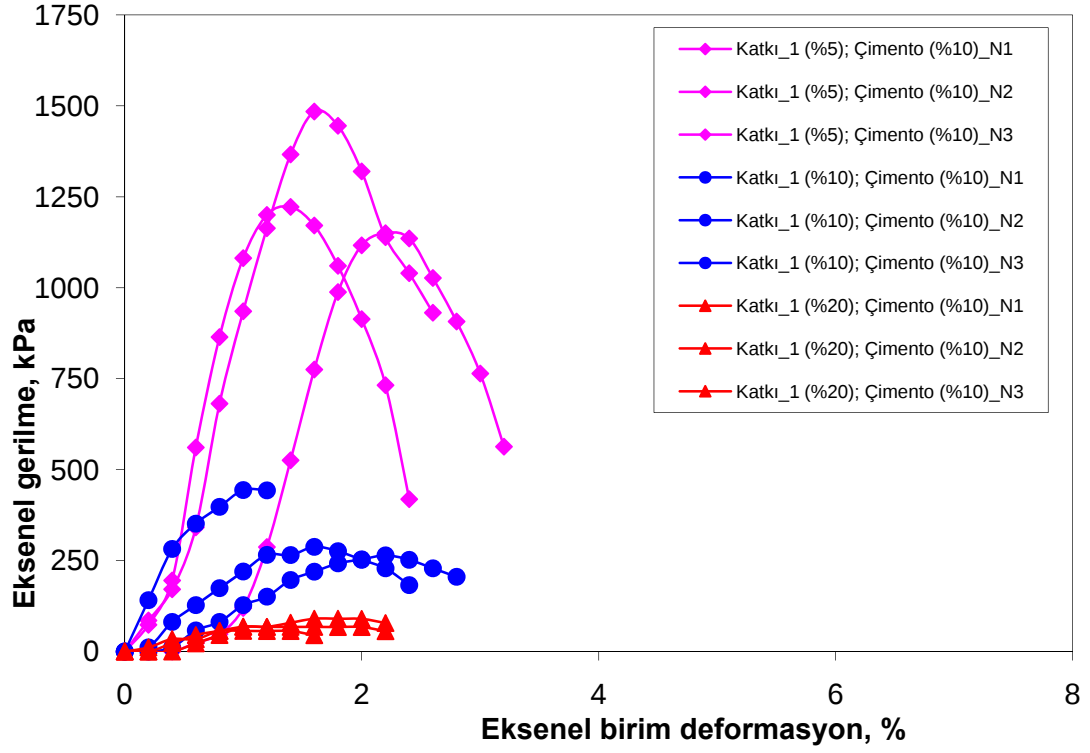
S1Ç5K20N2



S1Ç5K20N3

Resim 5.1. 28 gün kürde bekletildikten sonra serbest basınç deneyi ile kırılan katkı_1, %5 çimento ve kil karışımı numunelerinde oluşan kırılmalar

EK-6. Katkı_1, %10 çimento ile kil karışımından oluşan numunelerin eksenel gerilme-eksenel birim deformasyon grafiği



Şekil 6.1. 28 gün kürde bekletildikten sonra serbest basınç deneyi ile kırılan katkı_1, %10 çimento ile kil karışımından oluşan numunelerin eksenel gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkileri

EK-7. Katkı_1, %10 çimento ve kil karışımı numunelerinin serbest basınç deney sonucundaki fotoğrafları



S1Ç10K5N1



S1Ç10K5N2



S1Ç10K5N3



S1Ç10K10N1



S1Ç10K10N2



S1Ç10K10N3



S1Ç10K20N1



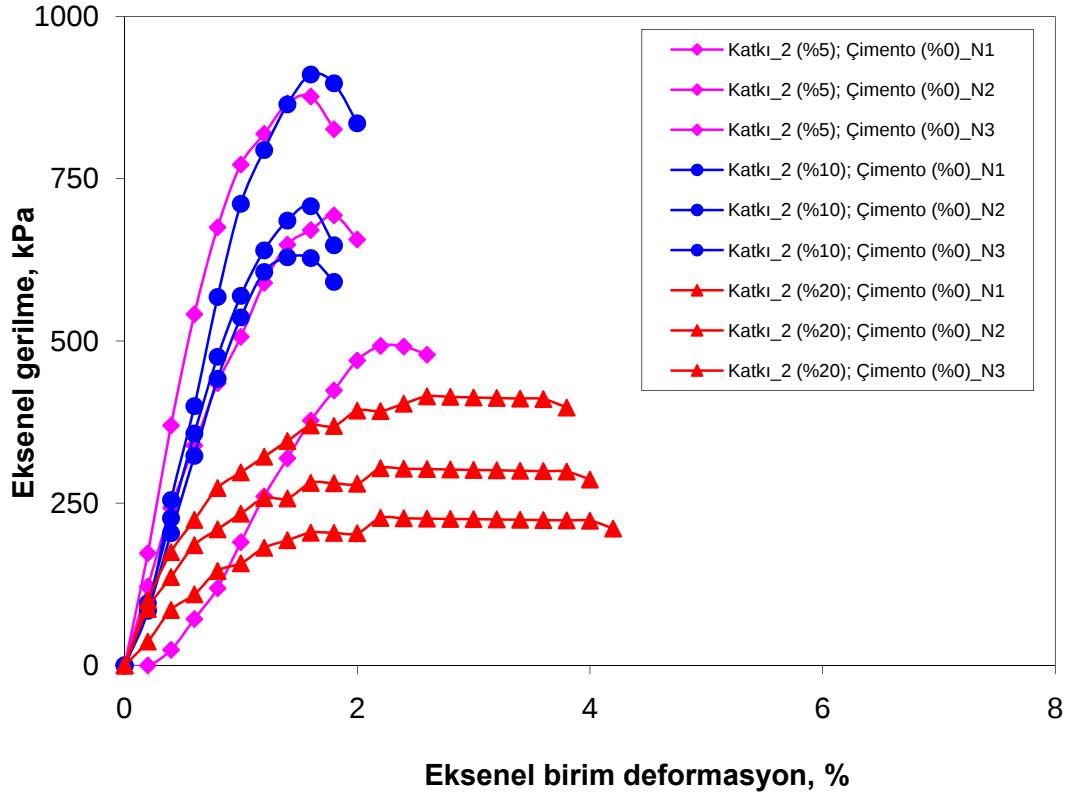
S1Ç10K20N2



S1Ç10K20N3

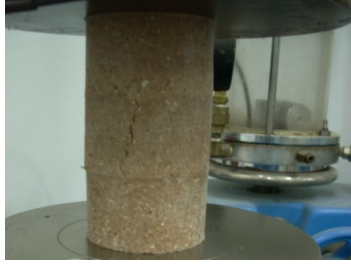
Resim 7.1. 28 gün kürde bekletildikten sonra serbest basınç deneyi ile kırılan katkı_1, %10 çimento ve kil karışımı numunelerinde oluşan kırılma

EK-8. Katkı_2 ve saf kil karışımından oluşan numunelerin eksenel gerilme-eksenel birim deformasyon grafiği



Şekil 8.1. 28 gün kürde bekletildikten sonra serbest basınç deneyi ile kırılan katkı_2 ve saf kil karışımından oluşan numunelerin eksenel gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkileri

EK-9. Katkı_2 ve saf kil karışımından oluşan numunelerinin serbest basınç deney sonucundaki fotoğrafları



S2Ç0K5N1



S2Ç0K5N2



S2Ç0K5N3



S2Ç0K10N1



S2Ç0K10N2



S2Ç0K10N3



S2Ç0K20N1



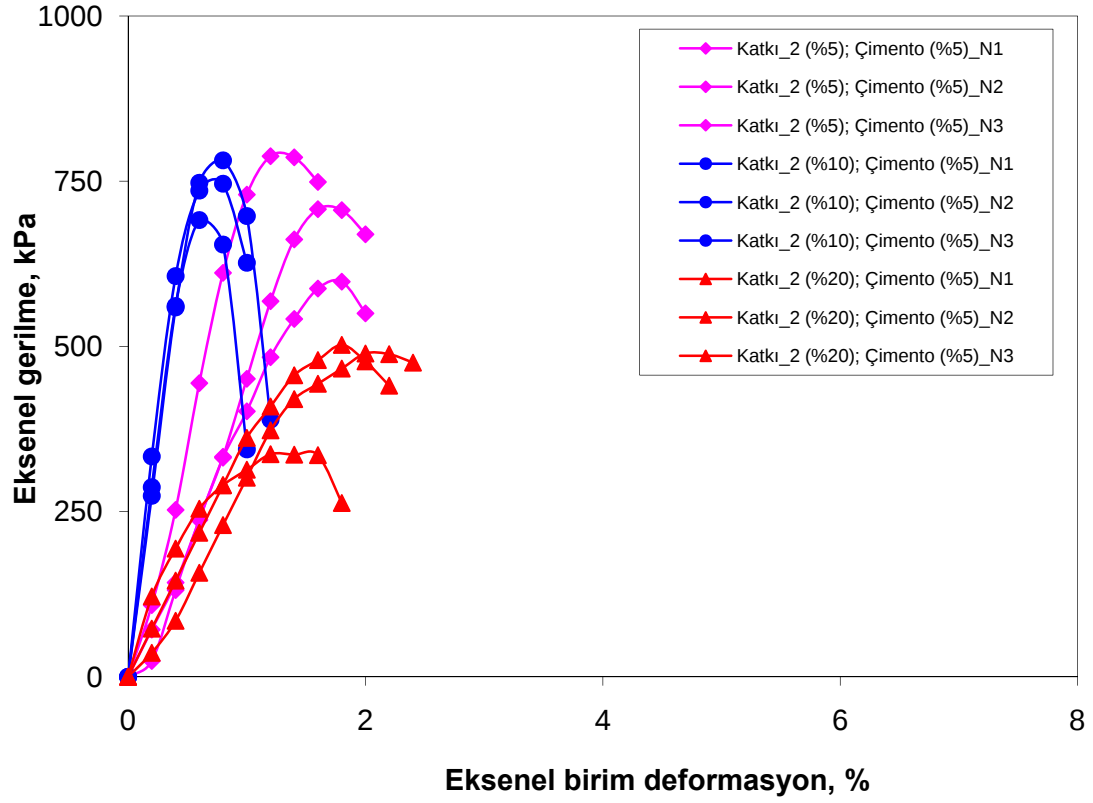
S2Ç0K20N2



S2Ç0K20N3

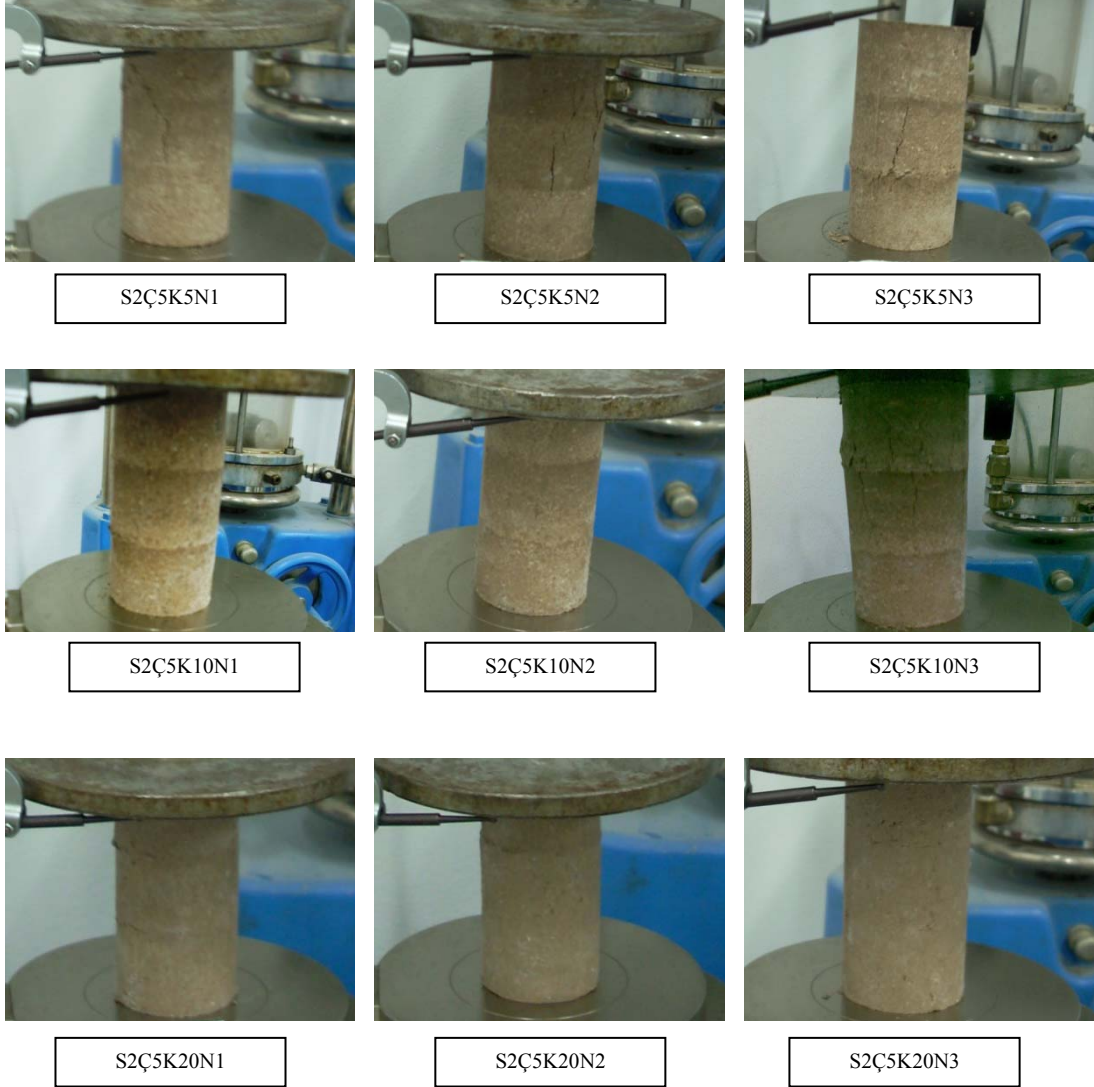
Resim 9.1. 28 gün kürde bekletildikten sonra serbest basınç deneyi ile kırılan katkı_2 ve saf kil karışımından oluşan numunelerinde oluşan kırılma

EK-10. Katkı_2, kil ve %5 çimento karışımından oluşan numunelerin eksenel gerilme-eksenel birim deformasyon grafiği



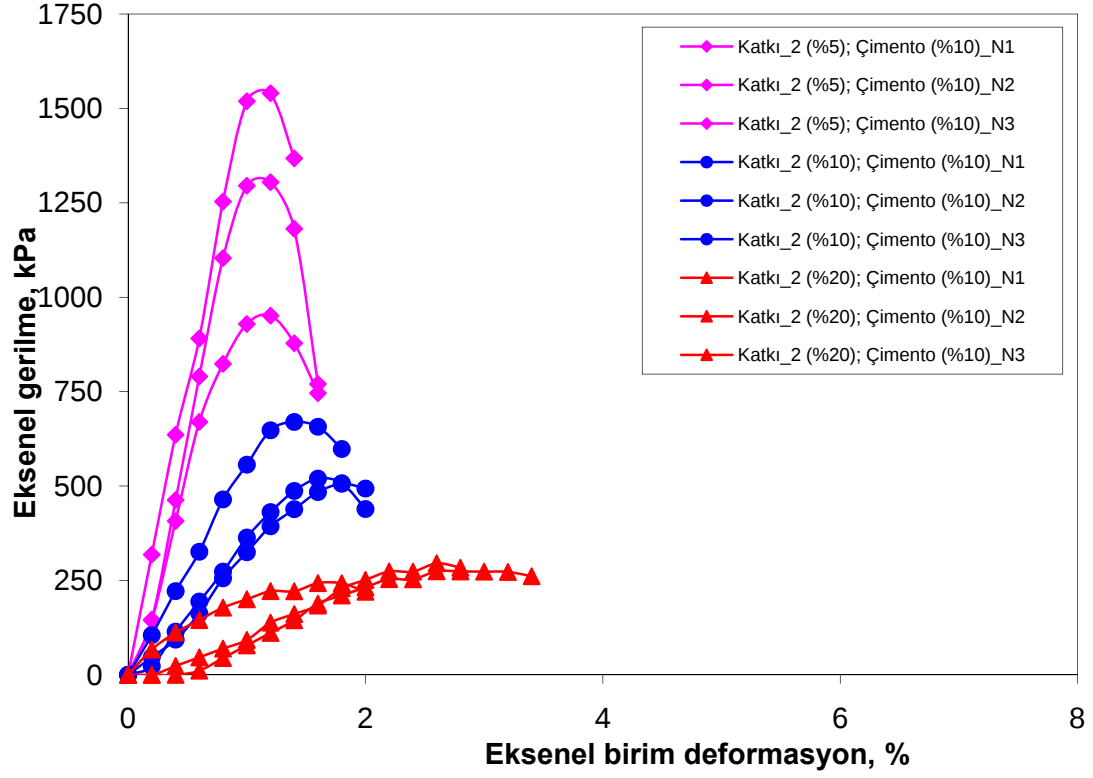
Şekil 10.1. 28 gün kürde bekletildikten sonra serbest basınç deneyi ile kırılan katkı_2, kil ve %5 çimento karışımından oluşan numunelerin eksenel gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkileri

EK-11. Katkı_2, kil ve %5 çimento karışımından oluşan numunelerinin serbest basınç deney sonucundaki fotoğrafları



Resim 11.1. 28 gün kürde bekletildikten sonra serbest basınç deneyi ile kırılan katkı_2, kil ve %5 çimento karışımından oluşan numunelerinde oluşan kırılma

EK-12. Katkı_2, kil ve %10 çimento karışımından oluşan numunelerin eksenel gerilme-eksenel birim deformasyon grafiği



Şekil 12.1. 28 gün kürde bekletildikten sonra serbest basınç deneyi ile kırılan katkı_2, kil ve %10 çimento karışımından oluşan numunelerin eksenel gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkileri

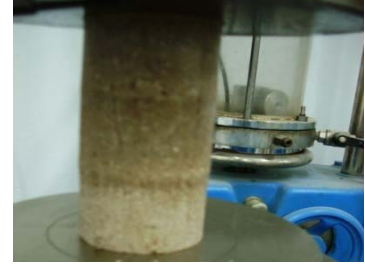
EK-13. Katkı_2, kil ve %10 çimento karışımından oluşan numunelerinin serbest basınç deney sonucundaki fotoğrafları



S2Ç10K5N1



S2Ç10K5N2



S2Ç10K5N3



S2Ç10K10N1



S2Ç10K10N2



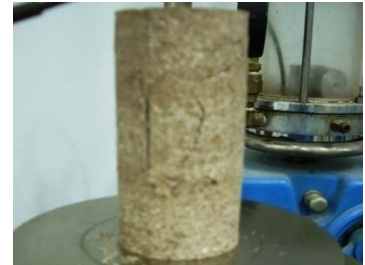
S2Ç10K10N3



S2Ç10K20N1



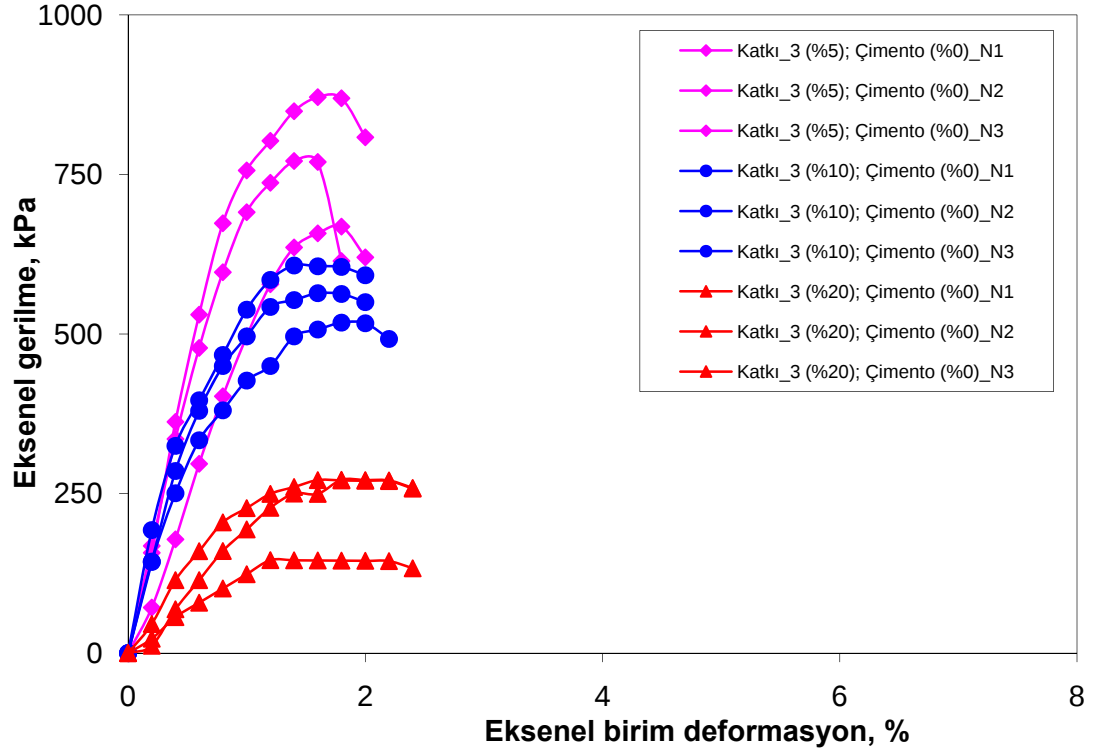
S2Ç10K20N2



S2Ç10K20N3

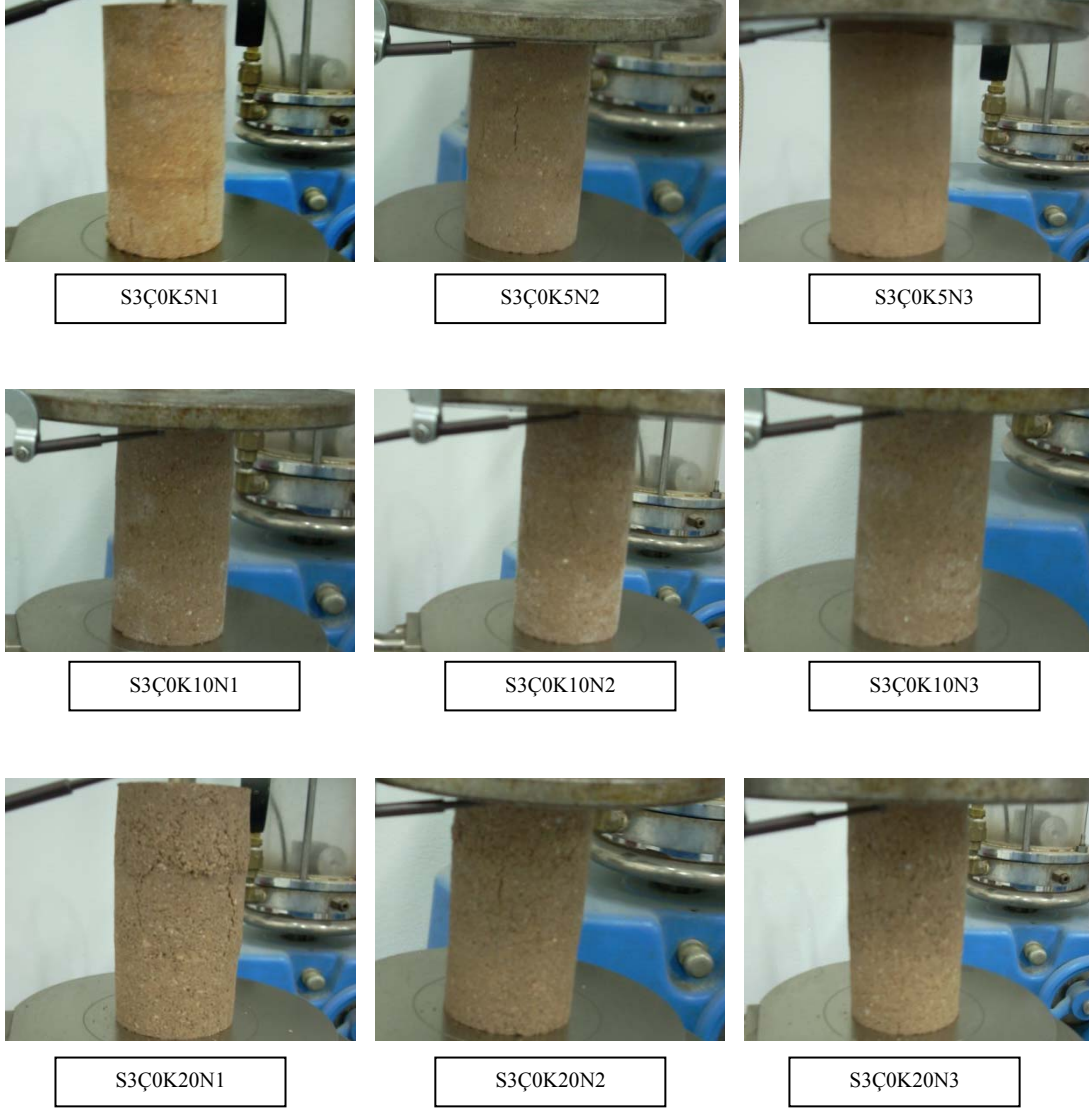
Resim 13.1. 28 gün kürde bekletildikten sonra serbest basınç deneyi ile kırılan katkı_2, kil ve %10 çimento karışımından oluşan numunelerinde oluşan kırılma

EK-14. Katkı_3 ve saf kil karışımından oluşan numunelerin eksenel gerilme-eksenel birim deformasyon grafiği



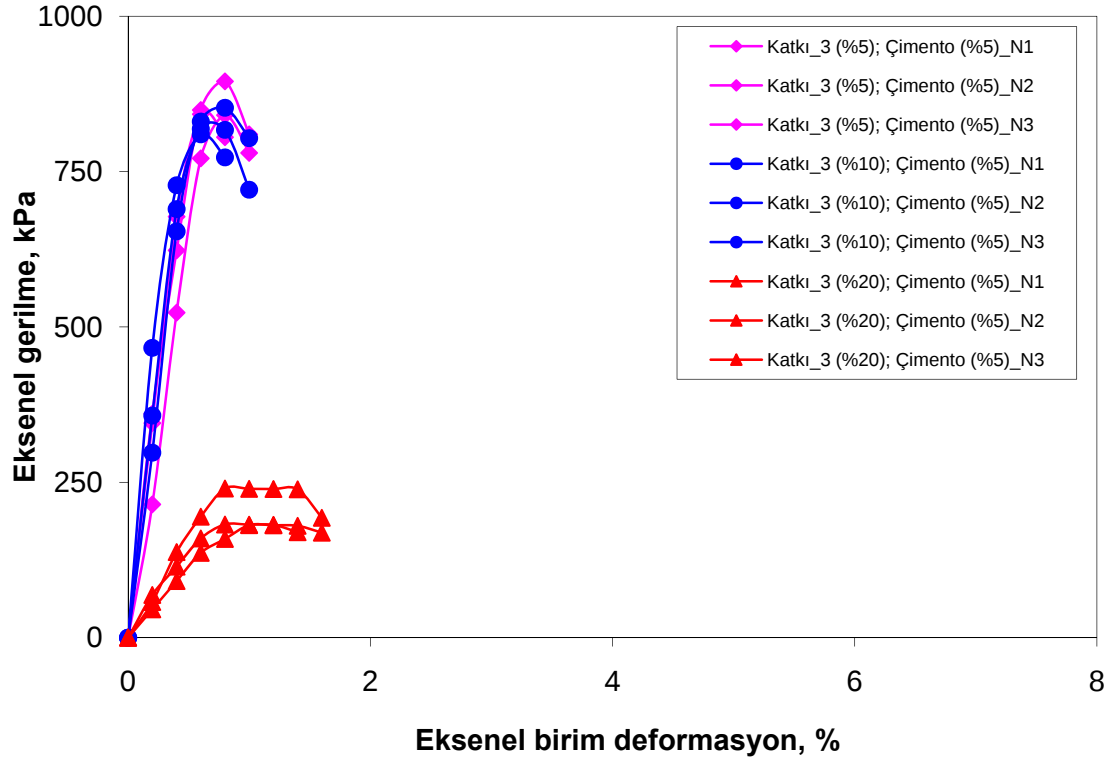
Şekil 14.1. 28 gün kürde bekletildikten sonra serbest basınç deneyi ile kırılan katkı_3 ve saf kil karışımından oluşan numunelerin eksenel gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkileri

EK-15. Katkı_3 ve saf kil karışımından oluşan numunelerinin serbest basınç deney sonucundaki fotoğrafları



Resim 15.1. 28 gün kürde bekletildikten sonra serbest basınç deneyi ile kırılan katkı_3 ve saf kil karışımından oluşan numunelerde oluşan kırılma

EK-16. Katkı_3, %5 çimento ve kil karışımından oluşan numunelerin eksenel gerilme-eksenel birim deformasyon grafiği



Şekil 16.1. 28 gün kürde bekletildikten sonra serbest basınç deneyi ile kırılan katkı_3, %5 çimento ve kil karışımından oluşan numunelerin eksenel gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkileri

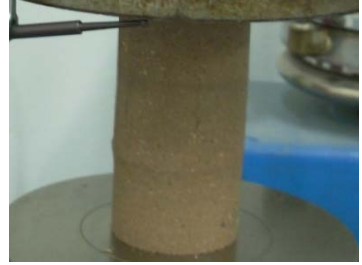
EK-17. Katkı_3, %5 çimento ve kil karışımından oluşan numunelerinin serbest basınç deney sonucundaki fotoğrafları



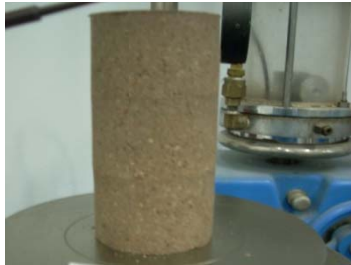
S3Ç5K5N1



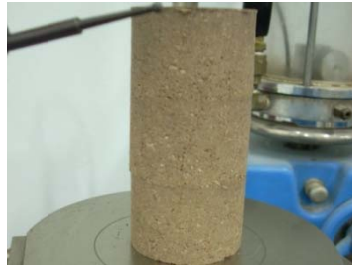
S3Ç5K5N2



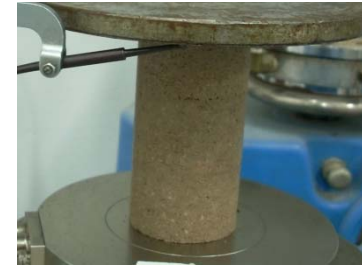
S3Ç5K5N3



S3Ç5K10N1



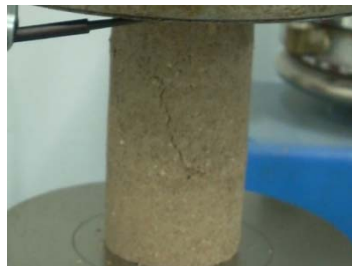
S3Ç5K10N2



S3Ç5K10N3



S3Ç5K20N1



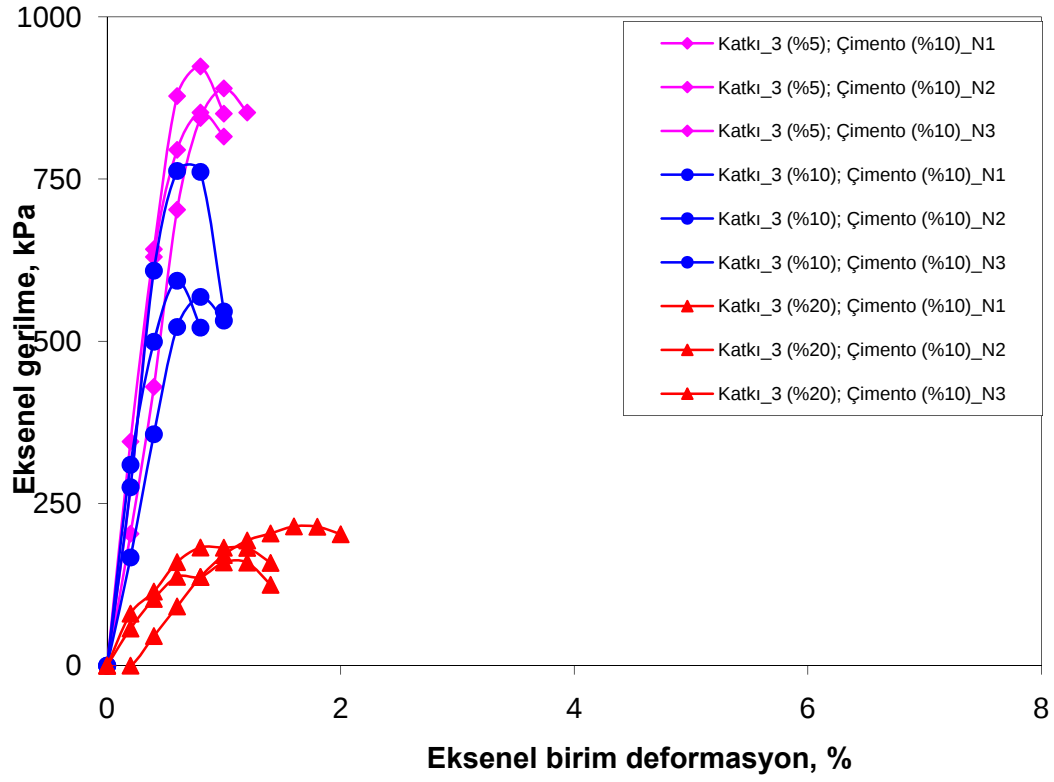
S3Ç5K20N2



S3Ç5K20N3

Resim 17.1. 28 gün kürde bekletildikten sonra serbest basınç deneyi ile kırılan katkı_3, %5 çimento ve kil karışımından oluşan numunelerde oluşan kırılma

EK-18.Katkı_3, %10 çimento ve kil karışımından oluşan numunelerin eksenel gerilme-eksenel birim deformasyon grafiği



Şekil 18.1. 28 gün kürde bekletildikten sonra serbest basınç deneyi ile kırılan katkı_3, %10 çimento ve kil karışımından oluşan numunelerin eksenel gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkileri

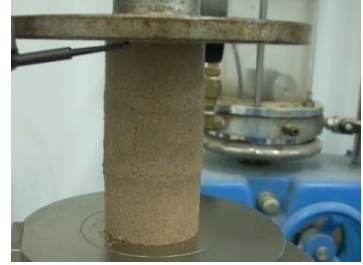
EK-19. Katkı_3, %10 çimento ve kil karışımından oluşan numunelerinin serbest basınç deney sonucundaki fotoğrafları



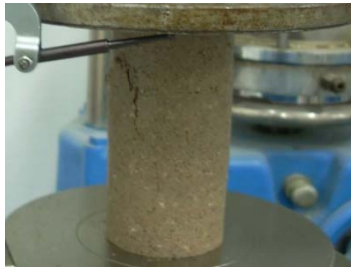
S3Ç10K5N1



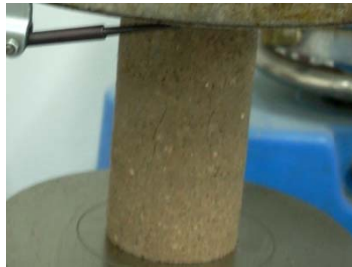
S3Ç10K5N2



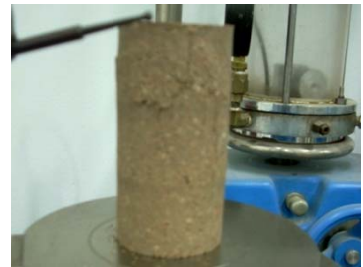
S3Ç10K5N3



S3Ç10K10N1



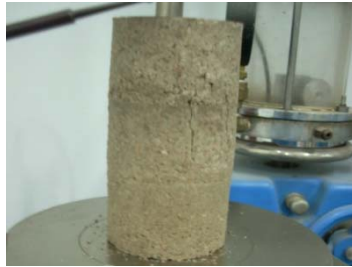
S3Ç10K10N2



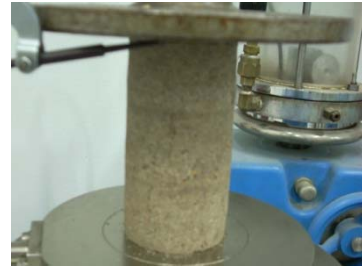
S3Ç10K10N3



S3Ç10K20N1



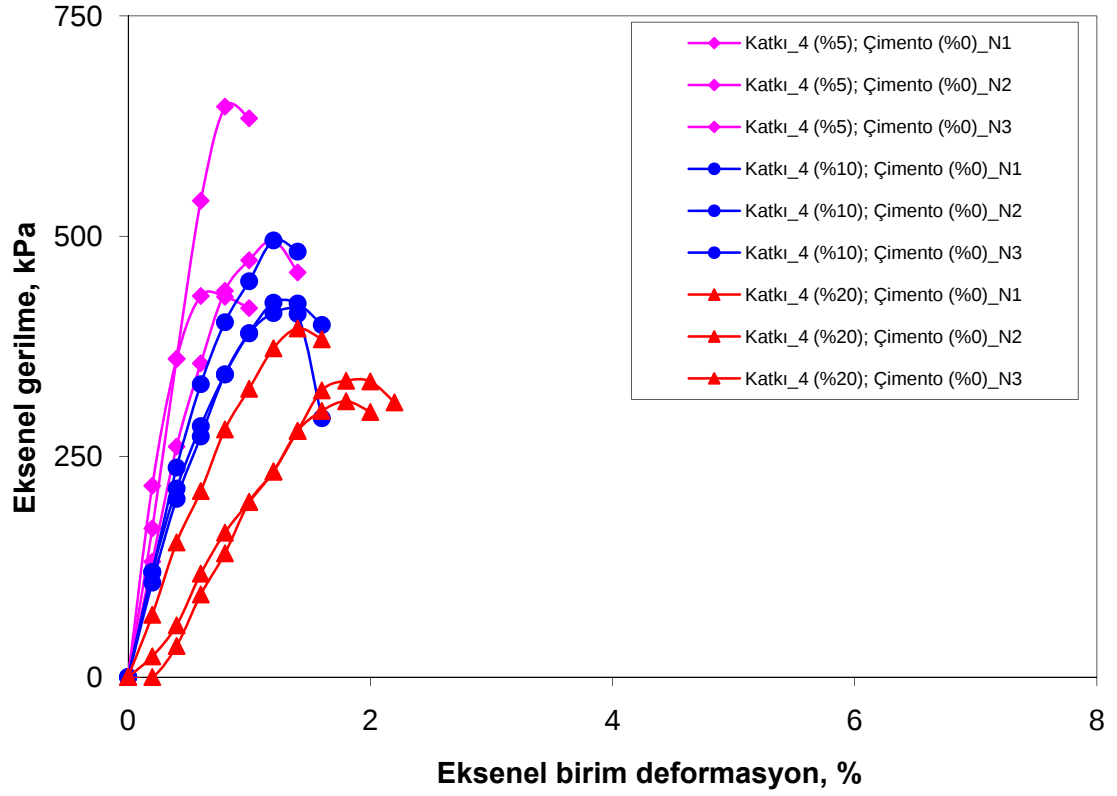
S3Ç10K20N2



S3Ç10K20N3

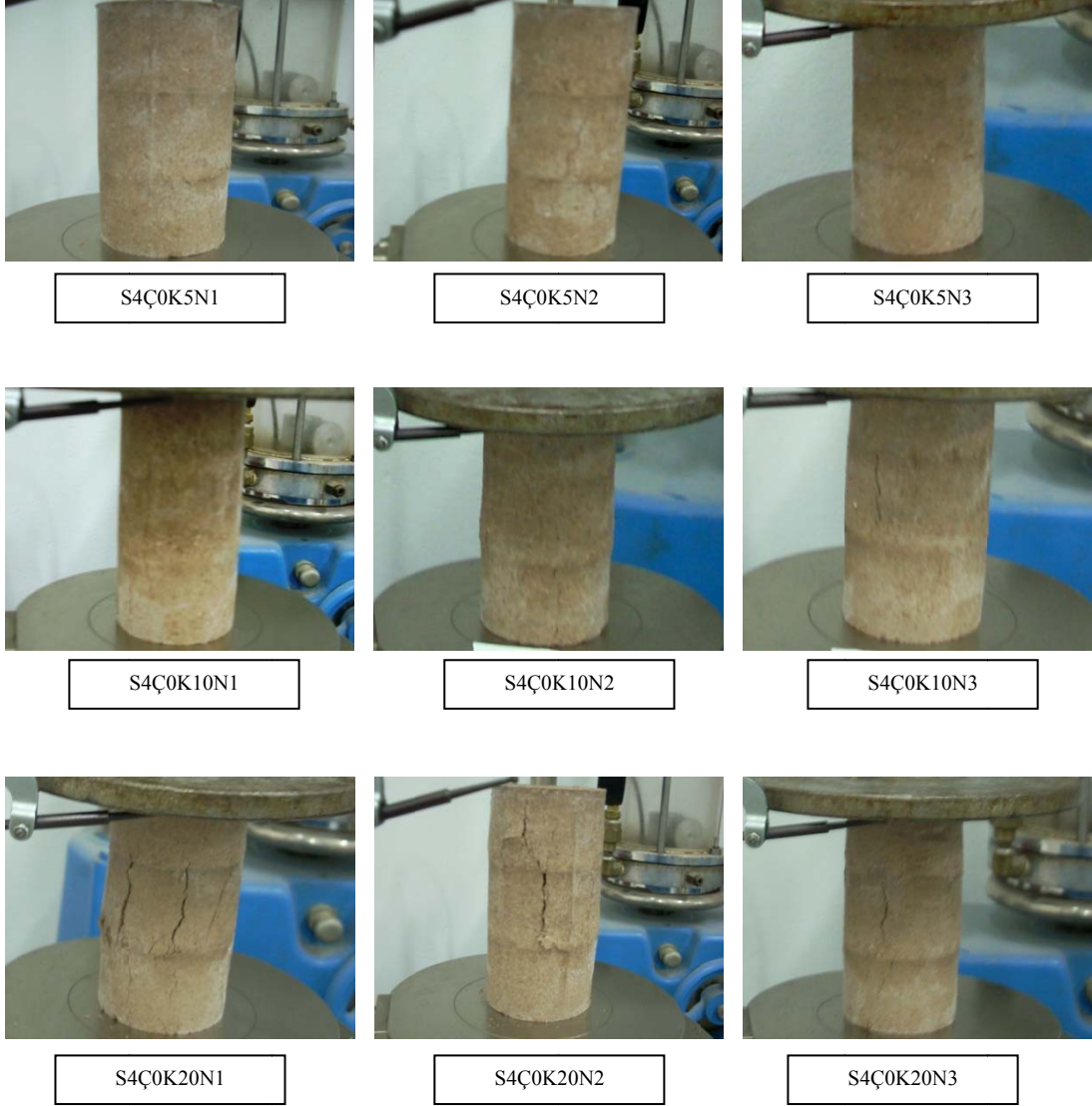
Resim 19.1. 28 gün kürde bekletildikten sonra serbest basınç deneyi ile kırılan katkı_3, %10 çimento ve kil karışımından oluşan numunelerde oluşan kırılma

EK-20. Katkı_4 ve saf kil karışımından oluşan numunelerin eksenel gerilme-eksenel birim deformasyon grafiği



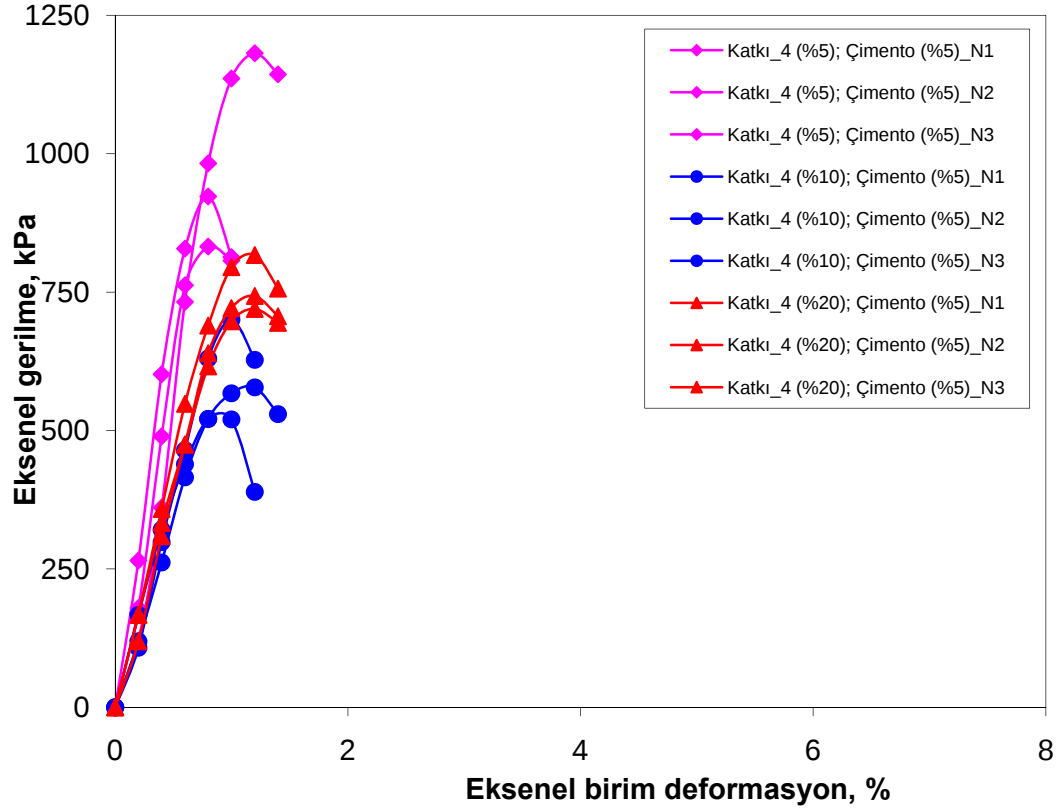
Şekil 20.1. 28 gün kürde bekletildikten sonra serbest basınç deneyi ile kırılan katkı_4 ve saf kil karışımından oluşan numunelerin eksenel gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkileri

EK-21. Katkı_4 ve saf kil karışımından oluşan numunelerinin serbest basınç deney sonucundaki fotoğrafları



Resim 21.1. 28 gün kürde bekletildikten sonra serbest basınç deneyi ile kırılan katkı_4 ve saf kil karışımından oluşan numunelerde oluşan kırılma

EK-22. Katkı_4, %5 çimento ve kil karışımından oluşan numunelerin eksenel gerilme-eksenel birim deformasyon grafiği

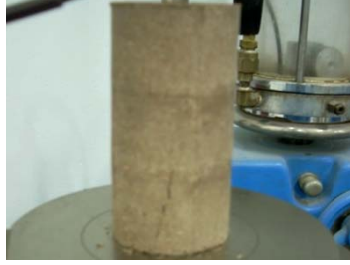


Şekil 22.1. 28 gün kürde bekletildikten sonra serbest basınç deneyi ile kırılan katkı_4, %5 çimento ve kil karışımından oluşan numunelerin eksenel gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkileri

EK-23. Katkı_4, %5 çimento ve kil karışımından oluşan numunelerinin serbest basınç deney sonucundaki fotoğrafları



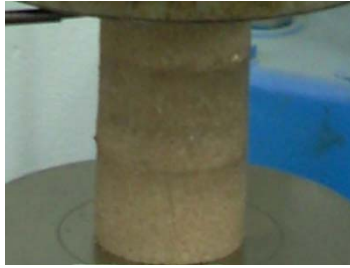
S4Ç5K5N1



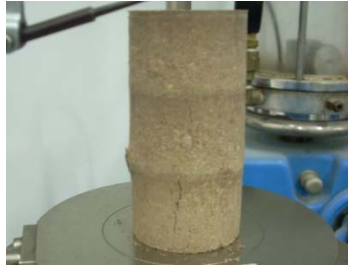
S4Ç5K5N2



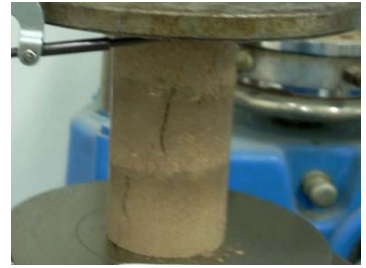
S4Ç5K5N3



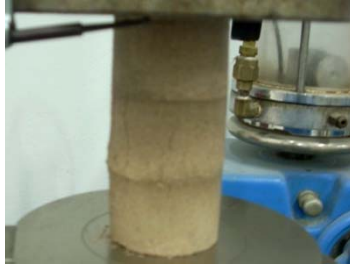
S4Ç5K10N1



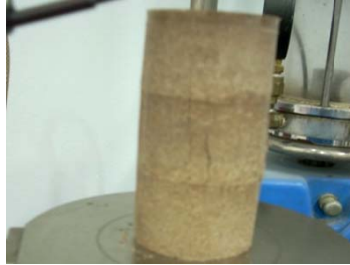
S4Ç5K10N2



S4Ç5K10N3



S4Ç5K20N1



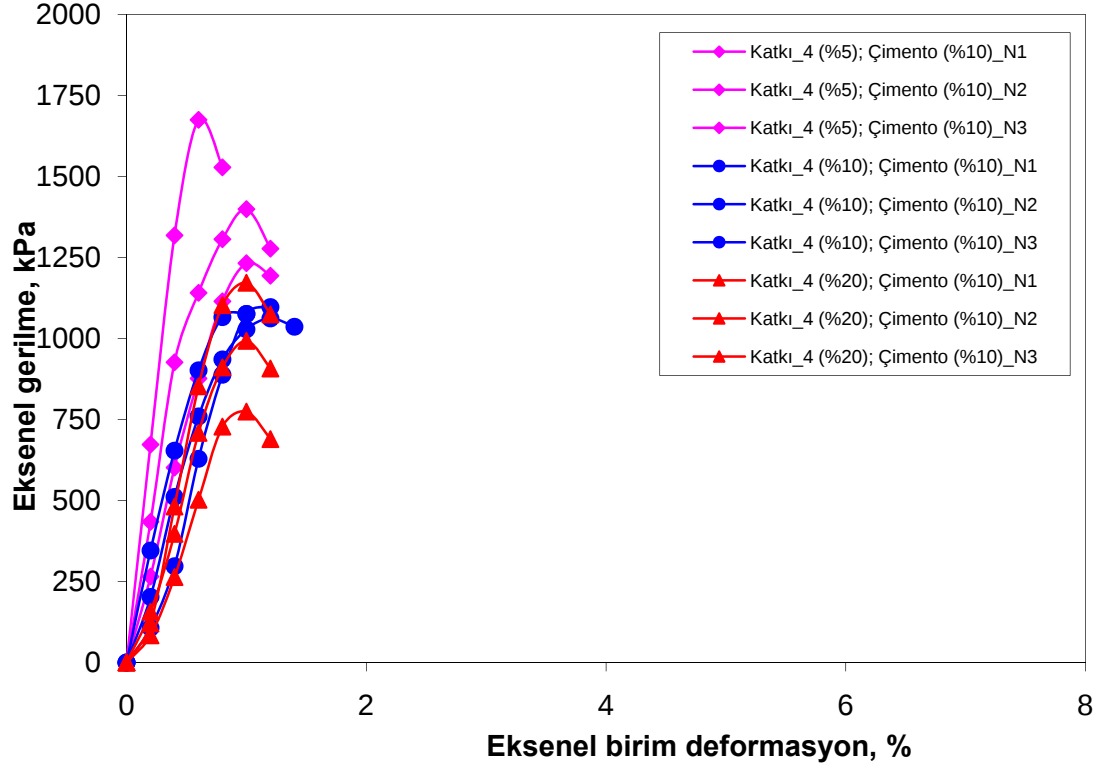
S4Ç5K20N2



S4Ç5K20N3

Resim 23.1. 28 gün kürde bekletildikten sonra serbest basınç deneyi ile kırılan katkı_4, %5 çimento ve kil karışımından oluşan numunelerde oluşan kırılma

EK-24. Katkı_4, %10 çimento ve kil karışımından oluşan numunelerin aksenal gerilme-aksenal birim deformasyon grafiği

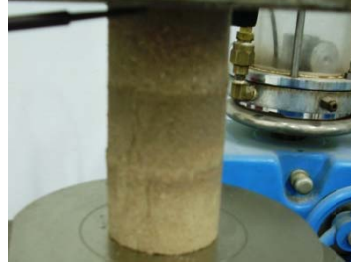


Şekil 24.1. 28 gün kürde bekletildikten sonra serbest basınç deneyi ile kırılan katkı_4, %10 çimento ve kil karışımından oluşan numunelerin aksenal gerilme-aksenal birim deformasyon ilişkileri

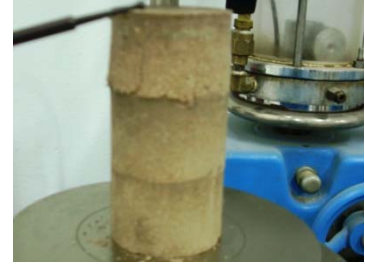
EK-25. Katkı_4, %10 çimento ve kil karışımından oluşan numunelerinin serbest basınç deney sonucundaki fotoğrafları



S4Ç10K5N1



S4Ç10K5N2



S4Ç10K5N3



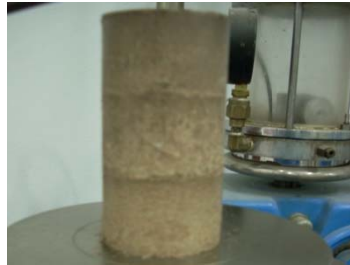
S4Ç10K10N1



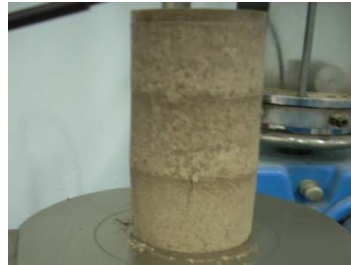
S4Ç10K10N2



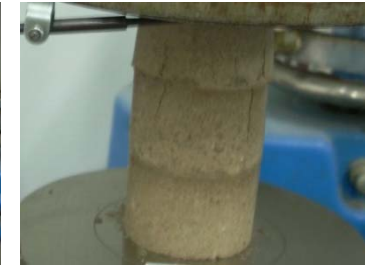
S4Ç10K10N3



S4Ç10K20N1



S4Ç10K20N2



S4Ç10K20N3

Resim 25.1. 28 gün kürde bekletildikten sonra serbest basınç deneyi ile kırılan katkı_4, %10 çimento ve kil karışımından oluşan numunelerde oluşan kırılma

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : GÖREN, Ayşegül
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 21.04.1985 Ankara
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0 (554) 464 66 55
Faks : -
e-mail : a.goren85@gmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi MF/İnşaat Müh. Böl.	2013
Lisans	Kırıkkale Üniversitesi MF/İnşaat Müh. Böl.	2008
Lise	Fatih Sultan Mehmet Y.Dil Ağırlıklı Lisesi	2003

İş Deneyimi

Yer	Görev
11/2011-	Hidrokon Müh. Müş. A.Ş.
09/2008-11/2011	Prosan Müh. Proje İnş. Taah. ve Tic.

Yabancı Dil

İngilizce