



**NANOMALZEME ENJEKSİYONU İLE GRANÜLER
ZEMİNLERİN GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİNİN
İYİLEŞTİRİLMESİ**

Mehdi JAFARIAN BAROUGH

Doktora Tezi
Nanobilim ve Nanomühendislik Ana Bilim Dalı
Doç. Dr. Semet ÇELİK
2022
(Her Hakkı Saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
NANOBİLİM VE NANOMÜHENDİSLİK ANA BİLİM DALI

**NANOMALZEME ENJEKSİYONU İLE GRANÜLER ZEMİNLERİN GEOTEKNİK
ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ**

(Improvement of Geotechnical Properties of Granular Soils By Nanomaterials Injection)

DOKTORA TEZİ

Mehdi JAFARIAN BAROUGH

Danışman: Doç. Dr. Semet ÇELİK

Erzurum
Eylül, 2022

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü

TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI

**NANOMALZEME ENJEKSİYONU İLE GRANÜLER ZEMİNLERİN GEOTEKNİK
ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ**

Doç. Dr. Semet ÇELİK danışmanlığında, Mehdi JAFARIAN BAROUGH tarafından hazırlanan bu çalışma, 07/09/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Nanobilim ve Nanomühendislik Anabilim Dalı Nanobilim ve Nanomühendislik Bilim Dalı'nda Doktora tezi olarak oybirliği ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Osman SİVARİKAYA <i>Karadeniz Teknik Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır.
Danışman:	Doç. Dr. Semet ÇELİK <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır.
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Murat OLGUN <i>Konya Teknik Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır.
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Fatih SEVİM <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır.
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. Meral OLTULU <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır.

Enstitü Yönetim Kurulunun
.../.../... tarih ve sayılı
kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN

Enstitü Müdürü

Aslı Islak İmzalıdır.

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Graduate School of Natural and
Applied Sciences

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ REKTÖRLÜĞÜ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Doktora Tezi olarak *Doç. Dr. Semet ÇELİK* danışmanlığında sunulan “Nanomalzeme Enjeksiyonu ile Granüler Zeminlerin Geoteknik Özelliklerinin İyileştirilmesi” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	2	30
Kuramsal Temeller	12	30
Materyal ve Metot	12	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	6	20
Sonuçlar ve Öneriler	0	20
Tezin Geneli	12	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Sunulan bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ettiğimizi beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Mehdi JAFARIAN BAROUGH	Doç. Dr. Semet ÇELİK
9.9.2022	9.9.2022
İmza: Aslı Islak İmzalıdır.	İmza: Aslı Islak İmzalıdır.

* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun .../.../... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun .../.../... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

Not: Bu form, Tezin son şekline uygun olarak bilgisayar ortamında doldurulmalı, çıktısı imzalanıp Tezin sonuna eklenmelidir.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince bana her türlü imkanı sağlayan, deneylerimde ve tez yazımım boyunca yardımını hiç esirgemeyen tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Semet ÇELİK'e teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam süresince emeği geçen Sayın Prof. Dr. Fatih SEVİM'e, Sayın Doç. Dr. Meral OLTULU'ya, Atatürk Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Geoteknik Anabilim Dalı, Zemin Mekaniği laboratuvarındaki görevlilere ve arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalar esnasında yardımları ve önerilerini sunan Sayın Dr. Payam MAJEDI ve Sayın Dr. Siyab HOUSHMANDI KHANGAH'a, teşekkürlerimi sunarım.

Her zaman ve her konuda beni asla yalnız bırakmayan ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen çok değerli aileme şükranlarımı sunarım.

Mehdi JAFARIAN BAROUGH

ÖZET

DOKTORA TEZİ

NANOMALZEME ENJEKSİYONU İLE GRANÜLER ZEMİNLERİN GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ

Mehdi JAFARIAN BAROUGH

Danışman: Doç. Dr. Semet ÇELİK

Amaç: Bu tezin amacı, farklı oranlarda nano malzemeler (nano silika ve nano alümina) ve silis dumanı katkısı kullanılarak enjeksiyon yapılmış kötü derecelenmiş bir kum zeminin (SP) mukavemet ve permeabilite özelliklerini araştırmaktır.

Yöntem: Tez çalışmasında, su/katı oranı (1,0, 1,4, 1,8), nano malzeme türü (nano silika, nano alümina), nano malzeme oranı (% 0,3, % 0,6, % 0,9), silis dumanı (% 5) ve zeminin rölatif sıkılığı (% 30, % 70) parametre olarak seçilmiştir. Deneylerde, PÇ 42,5 tipi Portland çimentosu kullanılmıştır. 1. Aşamada enjeksiyon karışımlarının reolojik özelliklerini belirlemek amacıyla Mars Hunisi, Çökeltme, Vikat İğnesi deneyleri yapılmıştır. 2. Aşamada silindirik kalıplarda hazırlanmış numunelere enjeksiyon yapılmıştır. Enjeksiyon yapılmış numuneler 7 ve 28 gün kür edildikten sonra tek eksenli basınç ve permeabilite deneylerine tabi tutulmuştur. 3. Aşamada ise karışım numuneleri hazırlandıktan sonra tek eksenli basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Bulgular: Yapılan deneyler sonucunda, enjeksiyon karışımı olarak çimento ile birlikte nano malzeme ve silis dumanı kullanılmasının numunelerin tek eksenli basınç dayanımını arttırdığı ve permeabiliteyi azalttığı belirlenmiştir. Tüm rölatif sıkılıklarda hazırlanmış numunelere yapılmış enjeksiyonların tek eksenli basınç dayanımları göz önüne alındığında en yüksek tek eksenli basınç dayanımı % 94,1 Ç + %5SD + % 0,9 NS katkılı ve 28 gün kür edilmiş numuneden 8,847 MPa olarak elde edilmiştir. En düşük permeabilite ise, $D_r=70$ rölatif sıkılıkta, $s/k=1,0$ oranında ve % 0,6 nano silika katkılı enjeksiyon yapılmış numuneden elde edilmiştir ($2,05 \times 10^{-7}$ cm/sn).

Sonuç: Zemin enjeksiyonunda çimento ile birlikte silis dumanı, nano silika ve nano alümina kullanılmasının kum zeminin mukavemetini arttırdığı ve zemin enjeksiyonunda kullanılabileceği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Enjeksiyon, Nano silika, Nano Alümina, Tek Eksenli Basınç Dayanımı, Permeabilite.

Eylül 2022, 121 sayfa

ABSTRACT

DOCTORAL DISSERTATION

IMPROVEMENT OF GEOTECHNICAL PROPERTIES OF GRANULAR SOILS BY NANOMATERIALS INJECTION

Mehdi JAFARIAN BAROUGH

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Semet ÇELİK

Purpose: The aim of this thesis is to investigate the strength and permeability properties of a poorly graded sand soil (SP) grouted by using different ratios of nanomaterials (nano silica and nano alumina) and also silica fume additively.

Method: In this study, water to solid ratio (1,0, 1,4, 1,8), nano material type (nano silica, nano alumina), nanomaterial ratio (0,3%, 0,6%, 0,9%), silica fume (5%) and the relative density of sand (30%, 70%) were chosen as parameters. In these experiments, Portland cement PÇ 42,5 was used. In the first step, tests of Marsh Funnel, Settlement, and Vicat Needle determined the rheological properties of the injection mixtures. In the second step, the samples were prepared in cylindrical molds. For 7 and 28 days, these samples were pressurized and tested (permeability tests). In the third step, compressive strength tests of mixture samples were prepared.

Results: The experiments revealed that combining nanomaterial and silica fume in cement as an injection mixture increases the compressive strength of the samples while decreasing permeability. Considering the compressive strength of the injections for prepared samples at all relative densities, the highest compressive strength was obtained as 8,847 MPa in the sample with parameters of %94,1Ç + %5 SD + 0,9% NS cured for 28 days. The lowest permeability was obtained in Dr=70% relative densities, water/solid (w/s) =1,0 and 0,6% nano silica ($2,05 \times 10^{-7}$ cm/sec).

Conclusion: It has been determined that the use of silica fume, nano silica, and nano alumina together with cement in soil grouting increases the strength of sand soil and can be used in soil grouting.

Keywords: Injection, Nano Silica, Nano Alumina, Compressive Strength, Permeability

September 2022, 121 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TABLolar DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	3
Zemin Enjeksiyonu	3
Enjeksiyonun Tarihçesi	4
Enjeksiyon Yöntemleri.....	7
Permeasyon enjeksiyonu	8
Kompaksiyon enjeksiyonu	11
Çatlatma enjeksiyonu	13
Kontak enjeksiyonu.....	14
Kaya enjeksiyonu	15
Konsolidasyon enjeksiyonu	16
Perde enjeksiyonu	16
Yüksek basınçlı enjeksiyon (Jet grout)	17
İnce taneli çimento enjeksiyonu	18
Enjeksiyon Harcının Temel Reolojik Özellikleri.....	19
Duraylılık	19
Priz süresi.....	20
Viskozite	20
Enjeksiyon Edilebilirlik	25
Enjeksiyon Harçları.....	26
Çimento harçları.....	27
Kimyasal harçlar	28
Enjeksiyon Düzenekleri	29

Konu ile İlgili Yapılmış Çalışmalar	30
Zemin enjeksiyonu ile ilgili yapılmış çalışmalar	30
Geoteknik alanında nano malzemeler ile ilgili yapılmış çalışmalar	41
MATERYAL VE YÖNTEM	48
Materyal	48
Nano silika	48
Nano alümina	49
Silis dumanı.....	51
Çimento	51
Zemin	52
Yöntem.....	54
Enjeksiyon deney düzeneği.....	54
Enjeksiyon ön deneyleri.....	55
Priz süresi deneyi (Vicat iğnesi)	58
Marsh Hunisi deneyi (Viskozite)	59
Çökelme (Sedimentasyon) deneyi.....	60
Enjeksiyon deneylerinin yapılması	60
Permeabilite deneyi.....	62
Tek eksenli basınç deneyi	63
Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi.....	63
X-Işını kırımı (XRD) analizi.....	63
ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	65
Ön Deneylerin Sonuçları.....	65
Karışımların Reolojik Özellikleri.....	66
Çökelme deney sonuçları	66
Marsh Hunisi deney sonuçları.....	69
Priz süresi deney sonuçları.....	73
Karışımların Mekanik Özellikleri Deney Sonuçları.....	76
Karışım numunelerinin tek eksenli basınç dayanımı	76
Enjeksiyon Yapılmış Numunelerin Tek Eksenli Basınç Deneyi Sonuçları	83
$D_r = \%70$ 'de enjeksiyon yapılmış numunelerde kür süresinin tek eksenli basınç dayanımları üzerine etkisi	85
$D_r = \%70$ 'de enjeksiyon yapılmış numunelerde katkı maddesi ve yüzdesinin tek eksenli basınç dayanımı üzerine etkisi	87

D _r = %30'da enjeksiyon yapılan numunelerde kür süresinin tek eksenli basınç dayanımları üzerine etkisi	91
D _r = %30'da enjeksiyon yapılmış numunelerde katkı maddesi ve yüzdesinin tek eksenli basınç dayanımı üzerine etkisi	93
Enjeksiyon yapılmış numunelerin s/k oranı, katkı maddesi ve yüzdesine bağlı olarak tek eksenli basınç dayanımlarının değişimi	98
Permeabilite Deneyleri Sonuçları	101
SEM ve EDAX Analiz Sonuçları.....	106
XRD Analizi Sonuçları	109
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	111
KAYNAKLAR.....	114
ÖZGEÇMİŞ.....	121

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Zemin Özelliklerine Bağlı Kullanılan Harçlar	8
Tablo 2. Nano Silikanın Kimyasal Analizi	49
Tablo 3. Nano Alüminanın Kimyasal Analizi	50
Tablo 4. Silis Dumanı Kimyasal Kompozisyonu	51
Tablo 5. Deneylerde Kullanılan Çimentonun Kimyasal, Fiziksel ve Mekanik Özellikleri	51
Tablo 6. Kötü Derecelenmiş Kum Zeminin (SP) Fiziksel Özellikleri.....	53
Tablo 7. Deney Karışım Oranları.....	57
Tablo 8. Çökelme Deneyi Sonuçları.....	67
Tablo 9. Enjeksiyon Karışımlarının Akış Süreleri.....	70
Tablo 10. Enjeksiyon Harç Karışımlarının Vicat İğnesi Deney Sonuçları.....	73
Tablo 11. Karışım Numunelerinin Tek Eksenli Basınç Dayanımları	76
Tablo 12. Dr= %70’de Enjeksiyon Yapılmış Numunelerin 7 ve 28 Gündeki Tek Eksenli Basınç Dayanımları.....	84
Tablo 13. Dr= %30’da Enjeksiyon Yapılmış Numunelerin 7. ve 28. Gündeki Tek Eksenli Basınç Dayanımları.....	85
Tablo 14. Dr= %70’da Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin Permeabilite Deney Sonuçları	102
Tablo 15. Dr= %30’da Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin Permeabilite Deney Sonuçları	103

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Zemin enjeksiyon teknikleri.....	7
Şekil 2. Permeasyon enjeksiyonu.....	10
Şekil 3. Kompaksiyon enjeksiyonu.....	13
Şekil 4. Çatlatma enjeksiyonu.....	14
Şekil 5. Kontak enjeksiyonu.....	15
Şekil 6. Kaya enjeksiyonu.....	16
Şekil 7. Konsolidasyon enjeksiyonu.....	16
Şekil 8. Perde enjeksiyonu.....	17
Şekil 9. Jet grout tekniği.....	18
Şekil 10. Newtonian modeli.....	21
Şekil 11. Newtonian modelinin reolojik davranış grafiği.....	21
Şekil 12. Newtonian akışkan kayma gerilmesinde formasyon hızı arasında doğrusal ilişki ...	22
Şekil 13. Bingham modeli (sürtünme direnci-kuvvet).....	22
Şekil 14. Bingham modelinin reolojik davranış grafiği.....	22
Şekil 15. Marsh Hunisi.....	24
Şekil 16. Lombardi abağı.....	24
Şekil 17. Çeşitli enjeksiyonların penetrasyon kabiliyeti.....	26
Şekil 18. Dolaşımli enjeksiyon sistemi.....	29
Şekil 19. Direkt enjeksiyon sistemi.....	30
Şekil 20. Deneylerde kullanılan nano silika.....	48
Şekil 21. Deneylerde kullanılan nano silikaya ait SEM görüntüsü.....	49
Şekil 22. Deneylerde kullanılan nano alümina.....	50
Şekil 23. Nano alümina SEM görüntüsü.....	50
Şekil 24. Deneylerde kullanılan kum zemin (SP).....	53
Şekil 25. Deneylerde kullanılan zeminin tane çapı dağılım eğrisi.....	54
Şekil 26. Enjeksiyon deney düzeneğinin şematik gösterimi.....	55
Şekil 27. Vicat iğnesi deney aleti ve yapılışı.....	58
Şekil 28. Marsh hunisi deneyine ait bir görüntü ve Marsh Hunisi boyutları.....	59
Şekil 29. Çökeltme deneyine ait bir görüntü.....	60

Şekil 30. Enjeksiyon çalışması (a) karışımların hazırlaması, (b) kalıplarda zemin yerleştirilmesi, (c) enjeksiyon uygulaması, (d) numunelerin kür edilmesi, (e) tek eksenli basınç deneyi, (f) Permeabilite deneyi.....	61
Şekil 31. Permeabilite deneyinin şematik gösterimi	63
Şekil 32. Başarısız enjeksiyon örnekleri	66
Şekil 33. Nano silika katkılı karışımların çökelme yüzdesinin nano silika yüzdesi ile değişimi	68
Şekil 34. Nano alümina katkılı karışımların çökelme yüzdesinin nano alümina yüzdesi ile değişimi	68
Şekil 35. Nano silika katkılı karışımların çökelme yüzdesinin zamanla değişimi.....	68
Şekil 36. Nano alümina katkılı karışımların çökelme yüzdesinin zamanla değişimi.....	69
Şekil 37. Nano silika katkılı karışımların akış süresinin nano silika yüzdesi ile değişimi.....	71
Şekil 38. Nano alümina katkılı karışımların akış süresinin nano alümina yüzdesi ile değişimi	71
Şekil 39. Enjeksiyon harçlarının su/katı oranı ile akış süresinin değişimi.....	72
Şekil 40. Nano silika katkılı karışımların priz süresinin nano silika yüzdesi ile değişimi.....	74
Şekil 41. Nano alümina katkılı karışımların priz süresinin nano alümina yüzdesi ile değişimi	74
Şekil 42. Nano silika katkılı karışım numunelerinin s/k oranına bağlı olarak tek eksenli basınç dayanımı değişimleri.....	77
Şekil 43. Nano alümina katkılı karışım numunelerinin s/k oranına bağlı olarak tek eksenli basınç dayanımı değişimleri.....	78
Şekil 44. s/k=1,0 olan harçların tek eksenli basınç dayanımlarının kür süresine bağlı olarak değişimi	78
Şekil 45. s/k=1,4 olan harçların tek eksenli basınç dayanımlarının kür süresine bağlı olarak değişimi	79
Şekil 46. s/k=1,8 olan harçların tek eksenli basınç dayanımlarının kür süresine bağlı olarak değişimi	79
Şekil 47. Harç karışımların 7.gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımlarının s/k oranına ve katkı yüzdesine göre değişimi	79
Şekil 48. Harç karışımların 28.gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımlarının s/k oranına ve katkı yüzdesine göre değişimi	80
Şekil 49. Nano silika katkılı karışımların tek eksenli basınç dayanımlarının kür süresine bağlı olarak değişimi ($Dr=70\%$)	86

Şekil 50. Nano alümina katkılı karışımların tek eksenli basınç dayanımlarının kür süresine bağlı olarak değişimi ($Dr = \%70$)	86
Şekil 51. $s/k=1,0$ 'de enjeksiyon yapılmış numunelerin tek eksenli basınç dayanımının katkı maddesi ve yüzdesi ile değişimi ($Dr = \% 70$)	87
Şekil 52. $s/k=1,4$ 'de enjeksiyon yapılmış numunelerin tek eksenli basınç dayanımının katkı maddesi ve yüzdesi ile değişimi ($Dr = \% 70$)	88
Şekil 53. $s/k=1,8$ 'de enjeksiyon yapılmış numunelerin tek eksenli basınç dayanımının katkı maddesi ve yüzdesi ile değişimi ($Dr = \% 70$)	88
Şekil 54. Nano silika katkılı karışımların tek eksenli basınç dayanımlarının kür süresine bağlı olarak değişimi ($Dr = \% 30$)	92
Şekil 55. Nano alümina katkılı karışımların tek eksenli basınç dayanımlarının kür süresine bağlı olarak değişimi ($Dr = \%30$)	92
Şekil 56. $s/k=1,0$ 'de enjeksiyon yapılmış numunelerin tek eksenli basınç dayanımının katkı maddesi ve yüzdesi ile değişimi ($Dr = \% 30$)	94
Şekil 57. $s/k=1,4$ 'de enjeksiyon yapılmış numunelerin tek eksenli basınç dayanımının katkı maddesi ve yüzdesi ile değişimi ($Dr = \% 30$)	94
Şekil 58. $s/k=1,8$ 'de enjeksiyon yapılmış numunelerin tek eksenli basınç dayanımının katkı maddesi ve yüzdesi ile değişimi ($Dr = \% 30$)	95
Şekil 59. Enjeksiyon yapılmış numunelerin s/k oranına, katkı maddesi ve yüzdesine bağlı olarak tek eksenli basınç dayanımların değişimi	99
Şekil 60. $Dr = \% 70$ sıklıkta enjeksiyon yapılmış numunelerin permeabilite değerlerinin katkı tipi ve yüzdesine bağlı olarak değişimi	104
Şekil 61. $Dr = \% 30$ sıklıkta enjeksiyon yapılmış numunelerin permeabilite değerlerinin katkı tipi ve yüzdesine bağlı olarak değişimi	104
Şekil 62. Sadece çimento enjeksiyonu yapılmış numunenin SEM görüntüsü	107
Şekil 63. W10SNS9 numunenin SEM görüntüsü ve EDAX spektrumu.....	108
Şekil 64. Nano alümina katkılı numunelerde en yüksek tek eksenli dayanıma sahip (W10SNA6) numunenin SEM görüntüsü ve EDAX spektrumu	109
Şekil 65. Çimento ve en yüksek dayanımı veren enjeksiyon numunelerinin XRD grafikleri	110

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

C_c	: Derecelenme Katsayısı
C_u	: Üniİormluluk Katsayısı
D₁₀	: Zeminin Efektif Dane Çapı
D₁₅	: Granülometri Eğrisinde %15 geçen yüzdesine karşılık gelen çap
D₃₀	: Granülometri Eğrisinde %30 geçen yüzdesine karşılık gelen çap
D₆₀	: Granülometri Eğrisinde %60 geçen yüzdesine karşılık gelen çap
D₈₅	: Granülometri Eğrisinde %85 geçen yüzdesine karşılık gelen çap
D₉₀	: Granülometri Eğrisinde %90 geçen yüzdesine karşılık gelen çap
D₉₅	: Granülometri Eğrisinde %95 geçen yüzdesine karşılık gelen çap
D_r	: Rölatif Sıkılık
dk	: Dakika
EDAX	:Enerji Dağılımlı X Işını Analizi
e_{max}	: Maksimum Boşluk Oranı
e_{min}	: Minimum Boşluk Oranı
kPa	: Kilopaskal
MPa	: MegaPascal
s	: Saniye
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
s/k	: Su/Katı
SP	: Kötü Derecelenmiş Kum
t	: Zaman
USCS	: Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi
XRD	: X-Işını Kırınım Yöntemi
γ_{kmak}	: Zeminin Maksimum Kuru Birim Ağırlığı
γ_{kmin}	: Zeminin Minimum Kuru Birim Ağırlığı
γ_n	: Doğal Birim Hacim Ağırlık
γ_s	: Dane Birim Ağırlığı
θ	: Bragg Açısı

GİRİŞ

Kuantum uzmanı ve nobel ödüllü Richard Feynman 1959 yılında verdiği “*There is plenty of room in the bottom*” başlıklı ünlü konferansında madde biliminin gelişmemiş boyutunu konu etmiştir. Bilim insanlarının transistörler ve diğer yapıların küçük ölçeklerde yapılabilmesini öğrendiklerinde, ölçeklerin daha da küçülebileceğini ifade etmiştir.

Bilim insanlarının çoğu, nanoteknolojiyi gelecekle eşdeğer olarak nitelendirmişler ve değişik bilim dalı uzmanlarının nano ölçekli konuları öğrenmeden gelecek yıllarda büyümeye fırsat bulamayacaklarını belirtmişlerdir. Dolayısıyla nanoteknoloji bilimi akademisyenler, araştırmacılar ve yetkililer için hayati önem taşımaktadır.

Nanoteknoloji bilimi, atom ve molekül düzeyinde maddeleri, araçları ve yeni sistemler üretebilme yeteneğini geliştirdiği için değişik bilimsel ve endüstriyel alanlarda (enerji, elektronik, bilgisayar ve bilgi teknolojisi, madde üretme ve biyoteknoloji gibi) çok sayıda kullanım alanı bulmuştur. Bu nedenle, nanoteknolojinin etkilemediği herhangi bir teknoloji kalmamış ve insanlık nanoteknoloji ürünleriyle buluşulabilmiştir. Bu alanlardan biri olan malzeme alanında oldukça hafif ve çok uygun özellikleri olan malzemeler üreten projeler uygulanmaktadır. Bu malzemeler inşaat, otomotiv ve havacılık sektörleri gibi birçok yaşam gereçleri üretiminde kullanılmaktadır. Dolayısıyla, insan yaşamını da kapsayacak olan nanoteknolojinin geniş alanı göz ardı edilmeyecek bir noktadadır. Geoteknik mühendisliğinde nanoteknoloji iki amaç için kullanılmaktadır:

1. Zemin yapısının nano ölçekte incelenmesi ve niteliğinin belirlenmesi
2. Nanomalzemelerin zemine eklenmesi ve mühendislik özelliklerinin incelenmesi

Zeminlerin mühendislik özelliklerini iyileştirmek için son zamanlarda en çok kullanılan yöntemler: enjeksiyon, kazıklar, destek sistemleri (zemin çivisi, ön gerilmeli ankraj, dolgu), dolgular, duvarlar (enjeksiyon kolonu, palplanş), kazıklar, dolgular, kaplamalar, çelik ve ahşap yapılar), katkılar, zemin donatılandırılması ve biyolojik iyileştirme olarak sayılabilir.

Zemin enjeksiyonu, belirli bir zaman sürecinde sertleşen bir harcın, basınçla zemine ya da çatlaklı kayaya enjeksiyonu biçiminde uygulanan bir metottur. Zemin özelliklerinin güçlendirilmesi, temel güçlendirmesi, çökme ve oturmaların azaltılması için enjeksiyon yapılması, özellikle granüler zeminler ve kayada çok fazla kullanılmaktadır. Ayrıca, barajlarda sızmanın önlenmesi, tünellerde doğal zemin ile tünelin birleştirilmesi durumunda da zemin

enjeksiyonu uygulanmaktadır. Zemin iyileştirilmesi yöntemi yaygın olarak kullanılan bir metot olmasına rağmen, günümüzde enjeksiyonun değişik zeminlerin geoteknik özellikleri üzerine olan etkileri ile ilgili çalışmalar devam etmektedir. Genellikle daha önce enjeksiyon ile ilgili yapılan laboratuvar çalışmalarında, enjeksiyon yapılan harcın özellikleri ve zemine enjeksiyon edilebilirliği araştırılmıştır. Özellikle çimentolu harçların, mekanik ve fiziksel özellikleri üzerine yapılan araştırmalarda: silis dumanı ve kil benzeri malzemeler çimentoya eklenerek harcın akışkanlığı, mukavemeti ve çökelmeleri araştırılmıştır. Ayrıca, laboratuvar da farklı enjeksiyon karışımları kullanılarak farklı rölatif sıklıklardaki taneli zeminlere enjeksiyon yapılmış, mukavemet ve permeabiliteleri incelenmiştir.

Bu doktora çalışmasında, nano silika, nano alümina ve silis dumanı katkılı çimento karışımlar kullanılarak düşük basınçlı çimento enjeksiyon ile granüler zeminlerin özelliklerinin iyileştirmesi amaçlanmıştır.

Çalışma kapsamında 1.aşamada, farklı oranlarda çimento, nano silika, nano alümina ve silis dumanı karışımlarının fiziksel özellikleri belirlenmiş ve taneli zeminlerin enjeksiyonunda kullanılabilirliği araştırılmıştır. Enjeksiyon sıvısının içerisine çimento ağırlığının % 0,3, % 0,6 ve % 0,9 oranlarında nano silika ve nano alümina ve % 5 oranında silis dumanı katılmıştır. Deneylerde, PÇ 42,5 tipi Portland çimentosu kullanılmıştır. Enjeksiyon karışımının s/k oranı yapılan ön deneyler sonucunda 1,0, 1,4 ve 1,8 olarak, enjeksiyon basıncı ise 200 kPa olarak seçilmiştir.

2.aşamada, karışım numunelerinin tek eksenli basınç dayanımını belirlemek için 1,0, 1,4 ve 1,8 s/k oranlarında çimento, çimento+silis dumanı, çimento+silis dumanı+nano silika ve çimento+silis dumanı+nano alümina karışımları hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler 7 ve 28 gün kür edildikten sonra tek eksenli basınç deneylerine tabi tutulmuştur.

3.aşamada ise, elde edilen karışımlar laboratuvar da % 30 ve % 70 rölatif sıklıklarda yerleştirilmiş kötü derecelenmiş (SP) bir kum zemine 200 kPa basınç altında enjeksiyon yapılmıştır. Enjeksiyon yapılan numuneler kürde bekletilerek 7 ve 28 günlük tek eksenli basınç dayanımları belirlenmiştir. Ayrıca, enjeksiyon yapılan numunelerin 28 gün sonundaki permeabilite leri de belirlenmiştir. Sonuç olarak, bu çalışmada rölatif sıklığın, enjeksiyon karışımının s/k oranının ve katkıların (silis dumanı, nano silika ve nano alümina) numunelerin tek eksenli basınç dayanımı ve permeabilite leri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Ayrıca numuneler üzerinde SEM ve XRD analizleri yapılarak oluşan yapılar incelenmiş ve yorumlanmıştır.

KURAMSAL TEMELLER

Zemin Enjeksiyonu

Enjeksiyon, zeminin fiziksel özelliklerini iyileştirmek için enjeksiyon sıvısının zemine veya kayaya kontrollü enjekte edilmesi işlemi olarak tanımlanabilir. Enjeksiyon, pompalanabilir bir enjeksiyon harcının zemine uzaktan yerleştirilmesinin, enjeksiyon harcının reolojik özelliklerinin ayarlanması ve zemin enjeksiyon parametrelerinin (basınç, hacim ve akış hızı) dolaylı olarak kontrol edildiği bir işlemdir. Enjeksiyon, özellikle geçirimliği azaltmak, mukavemeti artırmak, yer değiştirmeleri azaltmak için zemin veya kaya oluşumlarındaki boşluklara, yarıklara veya oyuklara enjeksiyon harcının enjekte edilmesi işlemidir. İstenilen amaca ulaşmak için iyileştirilecek zeminde sondaj delikleri açılır ve daha sonra enjeksiyon yapılan yerin etrafındaki boşluklar tasarımda belirtilen koşulları sağlayacak şekilde dolana kadar basınç altında enjeksiyon enjeksiyonu yapılır (Nonveiller 1989). Enjeksiyon modern inşaat mühendisliğinde geniş bir uygulama alanına sahiptir.

Geoteknik mühendisliğinde enjeksiyon başka zemin iyileştirme yöntemlerine destek olarak da değerlendirilebilir. Mesela; kazık temel sistemleri ve zemin ankrajlarında taşıma kapasitesini arttırmak, derin kazılarda yanal gerilmeleri hafifletmek için değerlendirilir (Warner 2004). Enjeksiyon metodu vibroflatasyon, dinamik sıkışma gibi derin iyileştirme metotlarıyla mukayese edildiğinde, gerek uygulama ve harekete geçirmedeki rahatlığı gerekse hesaplı olduğu için daha yararlıdır.

Enjeksiyon zemin iyileştirmenin en yaygın kullanılan yöntemlerinden biridir. Bu metot, kayaların çatlaklarını veya kum, çakıl gibi granüler zeminlerin boşluklarını doldurup zemini daha yoğun yapmak için kullanılan bir metottur. Enjeksiyon harcı basınç kullanılarak zemindeki boşluklara doldurulduktan sonra belli süre içinde sertleşir. Enjeksiyon yapılacak harçların özelliklerini uygulama amacı belirler. Örneğin; dayanımı yükseltmek için kullanılan harcın dayanımının fazla olması önemli iken, geçirimsizlik için kullanılan harcın dayanımının fazla olması önem taşımamaktadır (Çinicioğlu 1997). Enjeksiyon sırasında çimento veya değişik reçineler kullanılarak yapılan kimyasal harçlarda kullanılır. Çoğunlukla iki ya da daha çok madde karıştırılarak oluşturulan harçlar, zemin enjeksiyonunda kullanılmaktadır. Enjeksiyon harcının kıvamı uygulamanın amacına göre değişebilir. Enjeksiyon yapıldıktan sonra enjeksiyon sıvısı zeminin bazı bölgelerinde taneleri bir araya getirerek kayma dayanımını

yükseltir. Enjeksiyon sıvısının viskozitesi, kullanılan karışım malzemeleri ve amaca uygun olarak sertleştiğinde, esnek jel hafif veya katı olabilir (Warner 2004).

Enjeksiyonun başarılı olması karışım niteliklerinin ve bunun zemine iletilme metotlarının bütün yönleriyle karşılaştırmalı olarak anlaşılması ile sınırlıdır. Dahası, enjeksiyon yapılmadan önce zemin etüdünün yapılması oldukça önemlidir. Yukarıda ifade edilen konularla ilgili ne kadar fazla bilgi sahibi olursa da zeminin homojen olmaması nedeniyle uygulayıcının becerisi enjeksiyon uygulaması için oldukça önemli bir faktördür (Çinicioğlu 1997). İnşaat mühendisliğinde zemin enjeksiyonu ile ilgili çok geniş uygulama sahaları vardır. Zemin enjeksiyonunun uygulama sahaları:

- Baraj gibi su yapılarının temel altlarında zeminin geçirimsizliğini azaltarak sızmaları ve baraj gölündeki su kayıplarını önlemek,
- Şevlerin duraylılığını artırmak,
- Zeminin kayma dayanımını artırmak ve deformasyonu azaltmak,
- Tünel yüzey betonu kullanarak kaya arasındaki boşlukları doldurmak,
- Ankrajları sabitlemek,
- Derin kazılarda kazı çukuruna suyun girmesine engel olmak,
- Derin kazılarda yanıl gerilmeleri azaltmak,
- Etrafa zararlı sıvıların akmasını engellemek,
- Kazıkların taşıma kapasitesini arttırmak,
- Sıvılaşma tehlikesini azaltmak

olarak sıralanabilir (Warner 2004).

Enjeksiyonun Tarihçesi

Enjeksiyon tarihçesi 1800'lü yıllara ve hatta daha öncesine dayanmaktadır. İlk çalışmaların çoğu, su sızıntısını azaltmak için, genellikle çimento, kireç veya kil içeren sulu süspansiyonların veya bulamaçların, su sızıntısını azaltmak için barajların altındaki ana kayalardaki kırık ve çatlaklara enjeksiyonunu içermektedir. İlk uygulama, kırık veya boşlukların doldurulmasını içerdiğinden, harcın, belirli süreksizliğin kalınlığından önemli ölçüde daha küçük bir maksimum parçacık boyutu ile çok akıcı olması gerekmektedir (Warner 2004).

1800'den 1850'ye kadar, İngiltere ve Fransa'da çok çeşitli projelerde temel koşullarını iyileştirmek için çimento ve/veya su ile karıştırılmış kireçten oluşan puzolanik harçlar kullanılmıştır. Bu ilk uygulamalar arasında alüvyon enjeksiyonu (çakıl temellerde boşluğunun doldurulması), kanallar etrafında su kontrolü için boşluk doldurma, köprü ayakları için oturma

önleme, baraj çatlağı sızdırmazlığı ve temel iyileştirmesi sayılabilir. Bu dönemin sonuna doğru, Amerika Birleşik Devletleri'nde bir savağın temelini geliştirmek için enjeksiyon kullanılmıştır. Zemin iyileştirmesi için bu uygulamadan önce, enjeksiyon sadece kusurlu temelleri düzeltmek için kullanılmaktaydı (Evans *et al.* 2021).

1850'den 1900'e kadar, enjeksiyon kullanımı, madenlere ve tünellere su girişi de dahil olmak üzere sızıntı kontrol sorunlarını çözmek için yoğun bir şekilde genişlemiştir. Enjeksiyon tekniklerinde ve beton santrallerinde önemli gelişmeler yaşanmıştır. Bu dönemdeki bazı önemli gelişmeler arasında, enjeksiyon dağıtım noktalarının izole edilmesi için kauçuk pakelerin kullanımı, ardışık enjeksiyonlar, agrega malzemelerinin önceden yerleştirilmesi ve süreksizlik araştırması yer almaktadır. Bu dönemdeki uygulamalar arasında, maden sızıntısı kontrolü, demir tünel kaplamaları etrafındaki boşluk doldurma, barajların altındaki kaya çatlakları kapatma ve karstik anakaya oluşumlarında boşluk doldurma sayılabilir. Şu anda, çoğu enjeksiyon hala ağırlıklı olarak çimento bazlı tekniklere dayanmaktadır (Evans *et al.* 2021).

1900'den 1950'ye kadar, enjeksiyon alanındaki bazı gelişmeler:

- Yeni pompaların geliştirilmesi,
- Silikatların erken kullanımları (kimyasal enjeksiyon),
- Birden fazla sıvının aynı anda enjeksiyonu,
- Viskozitenin geliştirilmesi (örneğin Marsh hunisi),
- Basınç deneyi,
- Kusma/zemin mekaniği/çimento hamuru özelliklerinin daha iyi anlaşılması,
- Aşamalı enjeksiyon ve
- Daha küçük çatlaklarda çimento esaslı enjeksiyon sınırlamaları sayılabilir (Evans *et al.* 2021).

1950'den 1975'e kadar, enjeksiyon alanındaki bazı gelişmeler:

- Kapatma kriterlerinin geliştirilmesi (basınç ve akış limitleri)
- Daha yüksek basınçlı enjeksiyon,
- Laboratuvar ve arazi araştırmalarında iyileştirmeler,
- Genişleyen harçlar,
- Yapıların su yalıtımı için enjeksiyon,
- Yüksek erken dayanımlı çimentoların kullanılması,
- En son teknoloji yayınlar aracılığıyla uygulama standartlarının iyileştirilmesi,

- Fiziksel özellikleri iyileştirmek için bentonit, uçucu kül ve silt gibi diğer katkı maddelerinin daha geniş kullanımı,
- Harçların reolojik, fiziksel ve kimyasal özelliklerinin daha iyi anlaşılması sayılabilir (Evans *et al.* 2021).

1975'ten günümüze enjeksiyon alanındaki bazı gelişmeler:

- Sondaj, pompa ve enjeksiyon control ekipmanlarının geliştirilmesi,
- Gerçek zamanlı bilgisayarlı izleme, enstrümantasyon ve kontrolün kullanılması,
- Enjeksiyonlu zeminlerin mekanik davranışlarının anlaşılması,
- Mikro ince ve ultra ince çimentoların kullanımı,
- Dispersanların ve süper akışkanlaştırıcıların kullanımı ve geliştirilmesi,
- Enjeksiyon basıncının ve enjekte edilen hacmin bir ürünü olan enjeksiyon yoğunluk numarasının (GIN) geliştirilmesi,
- Dengeli ve stabil harçların geliştirilmesi sayılabilir (Evans *et al.* 2021).

Zeminlerdeki boşluklar genellikle tipik kaya eklem açıklıklarından çok daha küçük olduğu için, taneli enjeksiyon zeminlerde sınırlı başarılı olmuştur. Bu yüzden, granüler zeminlere nüfuz edebilen ve daha sonra kimyasal olarak sertleşebilen düşük viskoziteli kimyasal çözelti enjeksiyonları geliştirilmiştir. 1887'de, yerinde karıştırılabilen ve enjekte edilebilen sodyum silikat bazlı bir formülasyon için Jeziorski tarafından bir patent alınmıştır. Fakat, kimyasallar kısa sürede reaksiyona girdiği için çok hızlı bir enjeksiyon sistemine ihtiyaç duyulmuştur. Enjeksiyon hızlı olmadığında karışım pompa ve dağıtım sistemlerinde sertleşmiş sonucunda bu yöntemini uygulanabilirliğini kısıtlamıştır.

Erken sertleşme sorununun üstesinden gelmek için, Hollandalı bir maden mühendisi olan Hugo Joosten, 1925'te Amerika Birleşik Devletleri'nde patentli çift komponentli sodyum silikat bazlı bir sistem geliştirmiştir. Bu sistemde sodyum silikat bazlı kimyasal ilk olarak toprağa enjekte edilmiş, ardından, silikatın sertleşmesine neden olacak, genellikle kalsiyum klorür olan bir reaktan enjeksiyonu yapılmıştır (Warner 2004).

Çift komponentli kimyasal enjeksiyon yöntemi 1960' lı yıllarına sonlarına kadar kullanılmasına rağmen bileşenlerin zeminde tam olarak karışmasındaki zorlukları nedeniyle geniş bir kullanım alanı bulamamıştır. Fakat sodyum silikatın hızlı sertleşme problemi kullanıcı dostu reaktanların mevcudiyeti ile aşılmıştır.

Normal çimeto enjeksiyonları kimyasal enjeksiyonlardan önemli derecede daha ucuz olması nedeniyle kullanımı hala daha devam etmektedir. Ancak, Uygulanabilirlikleri kaba zeminlerle sınırlıdır. Son yıllarda ultra ince çimentonu geliştirilmesiyle, süspansiyon harçları

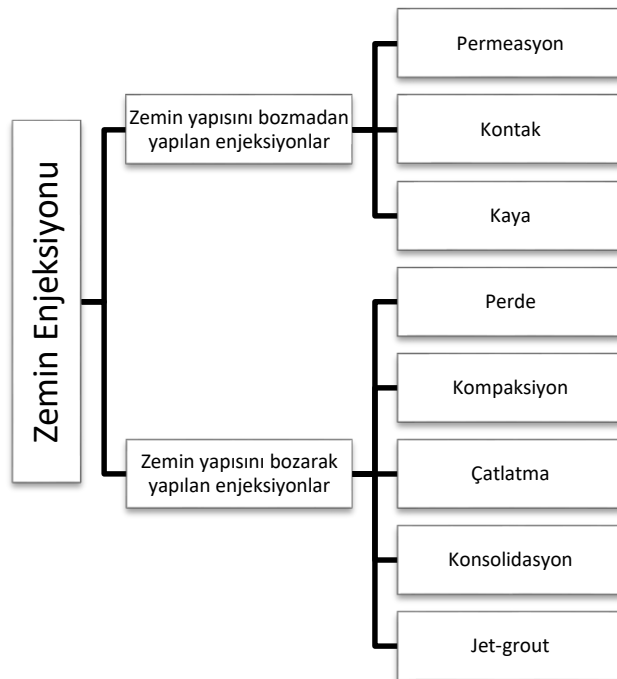
artık ince kumlara bile enjeksiyonda kullanılmakta ve başarılı sonuçlar alınmaktadır (Warner 2004).

Enjeksiyon Yöntemleri

Enjeksiyon yöntemleri, karışımının zemin içine doldurulma şekillerine göre sınıflandırılabilir(Çinicioğlu 1997):

- Permeasyon (sızdırma) enjeksiyonu
- Sıkıştırma (kompaksiyon) enjeksiyonu
- Sertleştirme (konsolidasyon) enjeksiyonu
- Bağlantı enjeksiyonu
- Kaya enjeksiyonu
- Çatlatma enjeksiyonu
- Perde enjeksiyonu
- Yüksek basınç enjeksiyonu (Jet-grout).

Bazı enjeksiyon yöntemleri zeminin yapısına zarar vermeden enjeksiyon harcının oyuklara doldurulmasıyla yapılırken bazıları da tanelerin yer değiştirmesiyle oluşan boşluk veya çatlaklara enjeksiyon harcının doldurulması yoluyla uygulanır. Zemin enjeksiyon teknikleri Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Zemin enjeksiyon teknikleri (Mutman 2007)

Zemin geçirimliliği enjeksiyon tekniğini belirleyen en önemli parametredir. Doğal zemin ile kayada değişik geçirimliliğin olması bazı durumlarda birden fazla enjeksiyon

yönteminin birlikte kullanılmasını gerektirebilir (Hontoria and Sanchez 2006). Tablo 1’de zemin geçirimsizliğine bağlı olarak kullanılan enjeksiyon harçlar gösterilmiştir.

Tablo 1. Zemin Özelliklerine Bağlı Kullanılan Harçlar (Hontoria and Sanchez 2006)

	Zemin Tipi	Zeminin Yapısını Bozmayan Enjeksiyon İçin Harçlar	Zeminin Yapısını Bozan Enjeksiyon İçin Harçlar
Kum	Çakıl, kumlu çakıl $k > 10^{-3}$ m/s	Çimento harçlar	Yüksek viskoziteli çimento harcı
	Kum, orta kum $10^{-3} < k < 10^{-5}$ m/s	Mikro ince taneli harçlar	Çimento harçlar
	Ince kum, silt $10^{-5} < k < 10^{-6}$ m/s	Özel kimyasal harçlar	Çimento harçlar
Kaya	Çatlaklı $e^* > 100$ mm	Çimento harçlar	
	Kırık, çatlaklı $0,1 < e < 100$ mm	Çimento harçlar Mikro ince taneli harçlar	Çimento harçlar
	Mikro, çatlaklı $0,05 < e < 0,1$ mm	Mikro-ince ve ultra-ince taneli harçlar	
	$e < 0,05$ mm	Özel kimyasal harçlar	

*e, sızdırmayı göstermektedir.

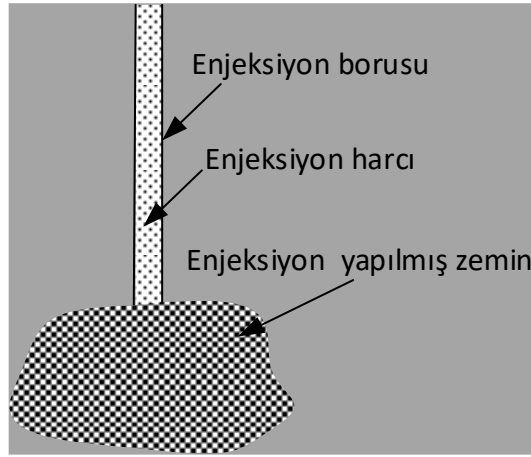
Permeasyon enjeksiyonu

Permeasyon enjeksiyonu, düşük viskoziteli parçacıklı veya kimyasal sıvıların, zeminin fiziksel yapısında çok az değişikliklerle zemin boşluklarına enjeksiyonudur (Şekil 2). Permeasyon enjeksiyonunun ana amacı, ya zemin tanelerini bir araya getirerek zemini güçlendirmek ya da zemin boşluklarını doldurarak su akışını azaltmaktır. Permeasyon enjeksiyonunun tarihi 1800’lerin sonlarına kadar izlenebilir. Permeasyon enjeksiyon tekniği, yeraltı suyu akışını kontrol etmek, zemindeki kazıları stabilize etmek, mevcut temelleri desteklemek, barajlarda sızdırmazlık sağlamak, kazık oturmalarını azaltmak ve sismik kaynaklı oturma ve sıvılaşmayı önlemek için başarıyla kullanılmıştır (Andrus and Chung 1995).

Permeasyon enjeksiyonunun etkinliğini etkileyen bir dizi faktör vardır. Bu faktörler:

- Zemin (Temiz granüler zeminlere permeasyon enjeksiyonu yapılması ince taneli zeminlere göre daha kolaydır. Tek en faydalı indeks zemin geçirimsizliğidir. Porozite, tüketilen harç miktarını belirler. Diğer önemli parametreler, tane boyutu, toprak dokusu ve stratigrafiyi içerir.)
- Toprak basıncı (Örtü yükü basıncı düşük olduğunda ve enjeksiyon basıncı ve hızı yüksek olduğunda zemin kırılması ve kabarması meydana gelir.)

- Yeraltı su koşulları (Enjeksiyon harcı, sızıntı yoluyla zeminden sızabilir veya kimyasal veya biyolojik olarak saldırıya uğrayabilir. Bazı kimyasal harçlar, su seviyesinin dalgalandığı yerlerde çatlar.)
- Enjeksiyon harcı (Parçacıklı harçlar veya süspansiyonlar, Portland çimentosu, mikro ince çimento, uçucu kül, kil ve sudan oluşabilir. Kimyasal harç türleri veya çözeltileri arasında sodyum silikatlar, akrilamidler, lignosülfonatlar ve reçineler bulunur. Sodyum silikat harçları, zemin güçlendirme için en yaygın kullanılan kimyasal harçtır. Çözelti veya toz halindeki akrilamidler ve ligno sülfonatlar da kullanılan katalizör oldukça zehirlidir. İşçilerin sağlık ve güvenliğini sağlamak ve çevreyi korumak için özel karıştırma prosedürleri gerekebilir. Harç partikül boyutu, viskozite, sıcaklık, priz süresi, stabilite, mukavemet, sünme ve durabilite dikkate alınmalıdır. Genel olarak, sıradan Portland çimento harçları çoğu kuma nüfuz etmeyecek, mikro-ince çimento harçları orta-ince taneli kumlara nüfuz etmeyecek ve kimyasal harçlar yaklaşık % 25'den fazla silt ve kil içeren kumlara nüfuz etmeyecektir.)
- Grout Enjeksiyon Basıncı ve Oranı (Aşırı enjeksiyon basınçları ve oranları, zemin kırılmasına ve kabarmasına neden olacaktır. Enjeksiyon basınçlarının saha denemesi ile belirlenen kırılma basıncının yaklaşık %25'inde tutulması tavsiye edilmiştir.)
- Grout Enjeksiyon Hacmi (Harcın düzensiz dağılımı muhtemelen eşit olmayan iyileştirme ile sonuçlanacaktır.)
- Enjeksiyon Aralığı (Çok uzak aralıklı delikler, iyileştirilmemiş zemin bölgeleri bırakacaktır.)
- Enjeksiyon sırasıdır.



Şekil 2. Permeasyon enjeksiyonu

Permeasyon enjeksiyonun da harç tanelerinin zemin içerisinde süzülmesi nedeniyle enjeksiyon yolu tıkanabilir ve muhtemelen uygulama başarısız olur. Hatta enjeksiyon harcının viskozitesi de enjeksiyonu sınırlandıran başka etkidir. Harcın zemin içindeki hareket istikametini belirleyen etken zeminin geçirimsizliğidir. En uygun, üniform zeminde karışımın yayılması küresel veya radyal olur. Enjeksiyon heterojen ve anizotropik şekilde yayılır ve genelde zemin içerisinde tekdüze olmayan harçlı bölgeler oluşturur. (Littlejohn 1993).

Enjeksiyon basıncının zemin boşluklarında bulunan su ile yer değiştirmesini ve enjeksiyon harcının boşluk suyu ile karışmaması gerekmektedir. Ayrıca, enjeksiyon basıncı, zemindeki boşluk suyu basıncını artırmamalıdır. Enjeksiyon harcının yeterli miktarda çatlak ve boşluklara doldurulması enjeksiyon uygulamasının ana amacını oluşturmaktadır. Bu amacın gerçekleşebilmesi için uygulamada bazen farklı içerikli harçlar kullanılmaktadır. Örneğin; çimento bentonit karışımı, harçların küçük boşluklarını dolduramadıkları için kimyasal harçlar bu harçların tamamlayıcısı olarak kullanılmaktadırlar (Rawlings *et al.* 2000).

Taneli karışımlar kullanılarak uygulanan enjeksiyon, karışımın ve zeminin tane boyutlarına bağlıdır (Akbulut and Saglamer 2002). Birçok araştırmacı harcın zemine enjeksiyon edilebilirliğini incelemişlerdir. Burwell (1958) enjeksiyon edilebilirliği aşağıdaki ampirik bağıntı ile belirtmiştir. Bağıntıdan hesaplanan N, 25’den büyük olduğunda enjeksiyonun yapılabileceğini, N 11’den küçük olduğunda yapılamayacağını ifade etmiştir.

$$N = \frac{D_{15}(\text{zemin})}{D_{85}(\text{harç})} \quad (1)$$

İncecik ve Ceren (1995) zeminin harçla enjeksiyon edilebilirliği için 2’deki bağıntıyı önermişlerdir. Bağıntıdan hesaplanan N sayısı 10’dan büyük olduğunda enjeksiyonun yapılabileceğini belirtmişlerdir.

$$N = \frac{D_{10(zemin)}}{D_{90(harç)}} \quad (2)$$

Akbulut ve Sağlamer (2002) araştırmalarında enjeksiyon edilebilirlik için aşağıdaki bağıntıyı önermişlerdir. Yapılan araştırmaların sonuçlarına göre enjeksiyon edilebilirlik için N sayısının 28'den büyük olması gerekir.

$$N = \frac{D_{10(zemin)}}{D_{90(harç)}} + 0,5 \frac{\frac{s}{c}}{FC} + 0,01 \frac{P}{D_r} \quad (3)$$

Bu bağıntıda:

FC: 0,6 mm'den geçen zeminin toplam zemine yüzdesi,

S/Ç: su/çimento oranı

P: enjeksiyon basıncı

D_r: zeminin rölatif sıkılığı

Enjeksiyon tipleri arasında en çok uygulan permeasyon enjeksiyonun da zeminin heterojen yapısı nedeniyle enjeksiyon basıncı ile kuyuların seçimi deneyime bağlıdır. Permeasyon enjeksiyonunda zemin durumunun etken olması nedeniyle gözlemsel yaklaşımlar kullanılır. Genel olarak, enjeksiyon işlemi tekrarlanır. Gerekmesi durumunda, enjeksiyonun uygulandığı kuyular veya aralarında açılmış olan kuyularda enjeksiyon tekrarlanabilir (Akbulut ve Sağlamer 2002).

Permeasyon enjeksiyonunda enjeksiyon kuyularının konumları, enjeksiyon harcının zemine üniform olarak doldurulması sağlanacak şekilde belirlenir. Enjeksiyon kuyuları zeminin boşluk oranı, tane dağılımı ve geçirimsizliğine göre belirlenir. Enjeksiyondan sorumlu kişinin becerisinin de enjeksiyon kuyularının belirlenmesinde önemli rolü vardır (Rawlings *et al.* 2000).

Kompaksiyon enjeksiyonu

Düşük hareket kabiliyetine sahip harç, "kompaksiyon harcı" ve onu enjekte etme işlemi "kompaksiyon enjeksiyonu" olarak bilinir hale geldi. Bununla birlikte, ilk geliştirildiği zamanki gibi, harcın düşük hareketlilik özelliği, onu insan yapımı (madenler gibi) veya doğal olarak oluşan (karst koşulları gibi) yeraltı boşluklarının doldurulması veya yüksek modüllü kolonların inşa edilmesi gibi diğer uygulamalar için çekici kılmıştır (Kirsch and Bell 2012).

Kompaksiyon enjeksiyonu, düşük hareket kabiliyetine sahip bir harcın yavaş ve kontrollü enjeksiyonu ile zeminin mukavemetini ve/veya sertliğini artıran bir zemin iyileştirme

teknikidir. Harç kütlesi genişledikçe zemin yer değiştirir ve sıkıştırılır. Enjeksiyon işleminin kontrollü bir şekilde ilerlemesi koşuluyla, enjeksiyon malzemesi zemin içinde büyüyen bir kütle halinde kalır ve zemine nüfuz etmez veya zemini kırmaz. Bu davranış, genişleyen harç kütlesi çevresinde tutarlı bir yoğunlaşma sağlayarak, artan yoğunluklu zeminle çevrelenen sert harç kalıntılarına neden olur. İşlem, yeraltı su seviyesinin üstünde ve altında eşit derecede uygulanabilir. Genellikle aşırı boşluk basıncının birikmesini önlemek için yeterli drenaja sahip gevşek dolgulara ve gevşek doğal zeminlere uygulanır (Kirsch and Bell 2012). Kompaksiyon enjeksiyonunun bir çizimi Şekil 3'de gösterilmektedir. Kompaksiyon enjeksiyon tekniğinin gelişimi 1950'lerin başlarında Amerika Birleşik Devletleri'nde başlamıştır. Yapısal oturmayı düzeltmek, kentsel alanlarda yumuşak zeminlerde tünel açma sırasında oturmayı önlemek, yapıları yerel obruk oturma bölgelerine karşı korumak ve sıvılaşabilir zemini yoğunlaştırmak için başarıyla kullanılmıştır (Andrus and Chung 1995).

Kompaksiyon enjeksiyonunun etkinliğini etkileyebilecek çok sayıda faktör vardır. Bunlardır (Andrus and Chung 1995):

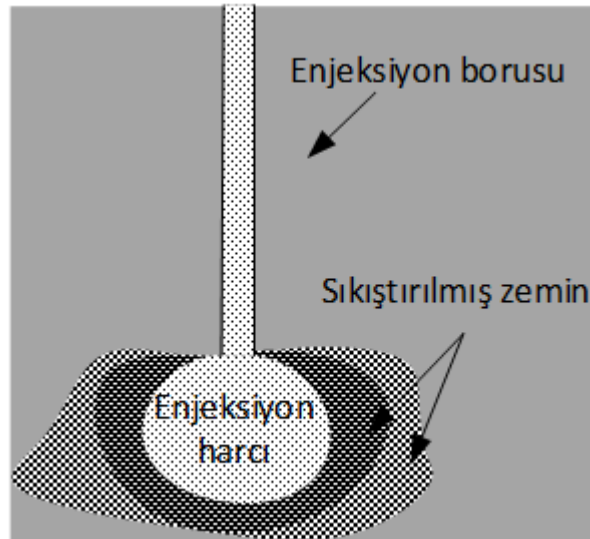
- Zemin (Kohezyonlu zeminlerin sıkıştırılması kohezyonsuz zeminlere göre daha zordur. Kompaksiyon enjeksiyonu kalın, doygun killi zeminlerde etkili değildir.)
- Toprak basıncı (Örtü yükü basıncı düşükse ve enjeksiyon basıncı ve hızı çok yüksekse, üstteki zemin kabarmaktadır.)
- Harç karışımı (Önerilen harç karışımları siltli kum, çimento, uçucu kül ve sudan oluşur. Harç çökmesi genellikle yaklaşık 25 mm'ye ayarlanır. Eğer harç, çökmeden bağımsız olarak yeterli kil içeriyorsa, hidrolik kırılma ve sınırlı sıkıştırma meydana geleceğinden, bentonit ve diğer kil malzemelerinin kullanımının kısıtlanması tavsiye edilmiştir. Çimento sadece toprak sıkıştırmasında gerekli olmayabilir.)
- Enjeksiyon basıncı ve oranı (Yüksek enjeksiyon basınçları üstteki zeminin erken kabarmasıyla sonuçlanacaktır. Maksimum basınç ayrıca bitişik yapıların hassasiyetine de bağlıdır.)
- Enjeksiyon hacmi (Harcın düzensiz dağılımı muhtemelen eşit olmayan iyileştirme ile sonuçlanacaktır.)
- Enjeksiyon aralığı (Enjeksiyon yapılan noktalar arasındaki mesafenin çok büyük tutulması, yoğunlaşmamış zemin bölgeleri bırakacaktır. Enjeksiyon yapılan noktalar arasındaki mesafe, derin enjeksiyonda 2 -4 m, sık enjeksiyonda 1-2m aralığında değişir.)
- Enjeksiyon sırası (Enjeksiyon yukarıdan aşağıya veya aşağıdan yukarıya yapılabilir. Aşamalı enjeksiyon genellikle daha ekonomik olmakla birlikte, aşamalı

enjeksiyon önceki çalışmalarda oluşturulan sınırlamayı kullanır. Çevre basınçlarının düşük olduğu zemin yüzeyinin yakınında, belirtilen sıkıştırma seviyelerine ulaşmak için kademeli enjeksiyon gerekebilir.)

Oturmayı azaltmak (Gambin, 1991) ve üstteki yapıyı yerel obruk oturma bölgelerine karşı korumak için sıkıştırma enjeksiyonu için rasyonel tasarım yöntemleri geliştirilmiştir. (Schmertmann and Henry 1992; Gambin 1991).

Kompaksiyon enjeksiyonunun sıvılaştırılabilir zeminlerde kullanılması tercih edilir. İnce kumlu ve silt içeriği en çok % 40 oranında olan siltli kumlarda uygulanır. s/ç oranı 1 ve daha küçük olan çimento karışımlıları kompaksiyon enjeksiyonu için uygundur. Kompaksiyon enjeksiyonu zeminde harçlı tabaka meydana getirmez. Oluşan harç yığınlarının çapı en çok 1 metredir. Harç yığınlarının yatayda birbirleriyle hiç ilişkisi olmaz. Yalnızca aralarındaki zemin katmanlarını sertleştirirler. Harç yığınları birbirinden en çok 2 metre aralıkta bulunurlar (Kutzner 1996).

Kompaksiyon enjeksiyonunda çatlatma basıncı enjeksiyon basıncından büyüktür. Enjeksiyon basıncı zeminin ve enjeksiyon harcının özelliklerine göre hesaplanır. Enjeksiyon basıncı her metre derinlik için en çok 400 ile 500 kPa olarak belirlenir. Enjeksiyon debisi enjeksiyon başlarken 20 lt/dak -30 lt/dak aralığında alınırken enjeksiyonun sonunda 2 lt/dak-3 lt/dak aralığına kadar azaltılır. Yüksek enjeksiyon basınç ile hızlı bir şekilde uygulanması durumunda zeminde çatlaklar meydana gelir (Warner 1982).



Şekil 3. Kompaksiyon enjeksiyonu

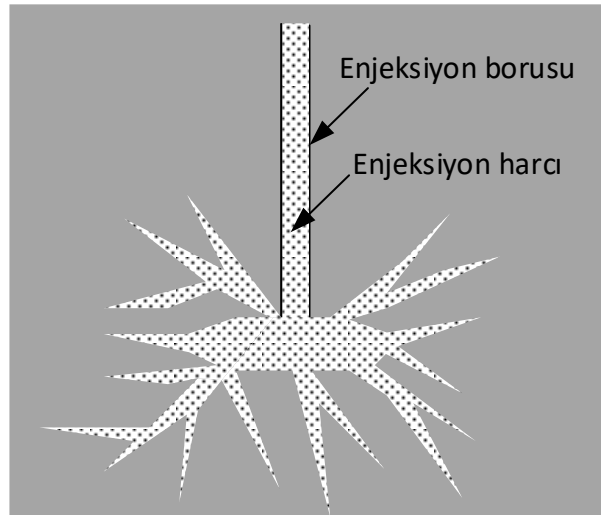
Çatlatma enjeksiyonu

Çatlatma enjeksiyonu, tipik olarak süspansiyon enjeksiyonları kullanılarak gerçekleştirilen özel bir penetrasyon enjeksiyonu uygulamasıdır. Bu uygulamada, kaya veya

zemindeki doğal veya yapay çatlakları doldurmak için harçlar kullanılır. Yapay çatlaklar, zemini veya kaya kütlelerini hidrolik olarak kırmak için harcın yüksek basınç altında pompalanmasıyla oluşturulur. Çatlatma enjeksiyonu genellikle artan viskoziteye sahip dengeli, stabil enjeksiyonların ardışık enjeksiyonları kullanılarak gerçekleştirilir. Daha küçük kırıklara nüfuz etmesi amaçlanan harçları, daha büyük kırıkları doldurmaya yönelik daha kalın harçlar takip eder (Evans *et al.* 2021).

Farklı açılarda eğimli ve çeşitli derinliklerde bulunan kırıkları kesiştirmek için, çatlak enjeksiyonu genellikle bölünmüş bir aralık düzeninde gerçekleştirilir. Bölünmüş aralık, harç deliklerinin değişen bir düzende doldurulduğu bir yöntemdir. Başlangıçta enjeksiyon delikleri birincil delikler olarak bilinir ve birincil enjeksiyonlu delikler arasındaki sonraki konumlar ikincil delikler olarak adlandırılır. Bazı projelerde üçüncül enjeksiyon delikleri kullanılmaktadır. Ayrıca, enjeksiyon yapılacak olan kaya veya zemin kütlelerinin düzlemlerini dik olarak kesecek şekilde seçilen eğim ile eğimli enjeksiyon delikleri kullanılarak enjeksiyon yapılabilir (Evans *et al.* 2021).

Enjeksiyon kuyuları 2 metre aralıklarla açılır. Zemin zayıf olduğunda kuyuların aralığı 4 metreye kadar artırılabilir. Zemini çatlatmak üzere yüksek basınç uygulanır. Sonradan karışımı enjekte etmek amacıyla uygulanan basınç yeni bir çatlağın oluşturulmaması için daha düşük tutulur. Uygulanan basınç maksimum 1,50 MPa olmalıdır. Enjeksiyon karışımı tasarıma bağlı olarak iki değişik materyalden oluşturulabilir. Gerekirse çimento karışımına bentonit eklenebilir. Karışımın s/ç oranının en çok 1 olması gerekir (Kutzner 1996).



Şekil 4. Çatlatma enjeksiyonu

Kontak enjeksiyonu

Kontak enjeksiyonu, başlangıç destek veya son kaplama arkasındaki boşlukların doldurulmasını içerir. Dolgu, saf bir çimento veya kumlu grout, geleneksel beton, hücresel

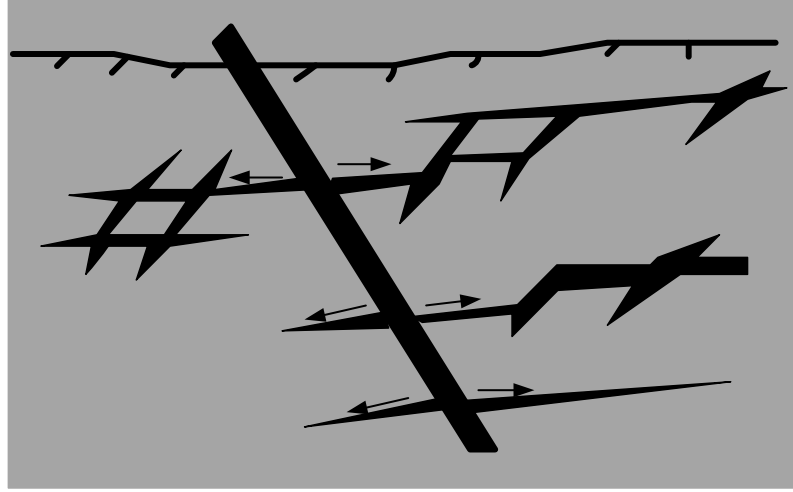
beton (köpük harcı) veya son kaplamanın arkasındaki halka boşluğuna akıcı bir dolgu gibi çeşitli malzemelerden birinin yerleştirilmesinden oluşur. Kontak enjeksiyonu genellikle nispeten küçük bir boşluğa saf bir çimento veya kumlu harç karışımının enjekte edilmesini gerektirir. Bir proje için gerekli olan kontak harcı miktarı, gereken dolgu malzemesi miktarına kıyasla genellikle küçüktür (Warner 2004).



Şekil 5. Kontak enjeksiyonu

Kaya enjeksiyonu

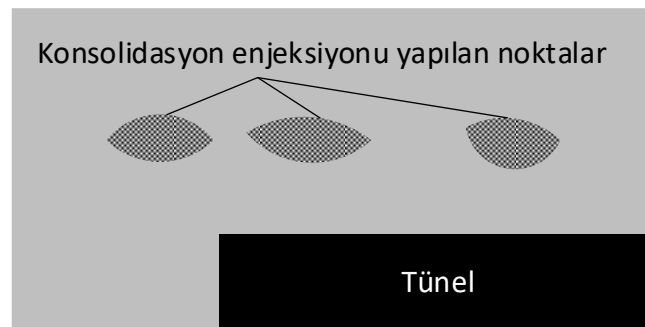
Kaya enjeksiyonunun temel amacı, tipik olarak suyun hareketini azaltmak veya durdurmak, kayayı güçlendirmek veya her ikisini birden yapmaktır. Kayadaki enjeksiyonların çoğu, baraj ve tünellerin inşası ve bakımı ile bağlantılı olarak yapılır, ancak aynı zamanda kuyu açma ve madencilik uygulamalarında ve diğer yeraltı inşaatlarında da kullanılır. Kireçtaşı gibi çözünür kayalardaki boşluklar bazen üstteki toprağın çökmesini önlemek veya düzeltmek için doldurulur. Standart beton pompaları ve hazır beton veya harç ile sıklıkla gerçekleştirilir (Warner 2004).



Şekil 6. Kaya enjeksiyonu

Konsolidasyon enjeksiyonu

Konsolidasyon enjeksiyonu, zemin yüzeyine yakın zayıf veya çok kırıklı kayalarda gerçekleştirilir. Dolgu barajlarda, üstteki dolgudan aşınmış malzeme alabilecek yüzeye yakın kusurları kapatmak için kullanılır. Ayrıca barajları ve diğer yapıları desteklemek için temel kayasını güçlendirmeyi amaçlamaktadır (Warner 2004). Konsolidasyon enjeksiyonu, temel zeminini güçlendirir ve yapıya yeraltı suyunun akışını azaltır. Yüksek basınçlı su kuyuları ve tünellerde, konsolidasyon enjeksiyonu, tesis hizmete girdikten sonra yapının kaplamasından dışarı doğru su akışını çevreleyen kayaya en aza indirir. Çevredeki kayaya su kaybı sakıncalıdır, çünkü su bir insan tüketimi için değerli meta, elektrik enerjisi ve sulama üretimi ve ayrıca endüstriyel amaçlar için kullanılıyor. Ek olarak, dışa doğru akışın neden olduğu yapıya bitişik temel malzemesindeki su ve buna bağlı su basıncındaki artış yapısal, estetik ve çevresel nedenlerle kabul edilemez olabilir.



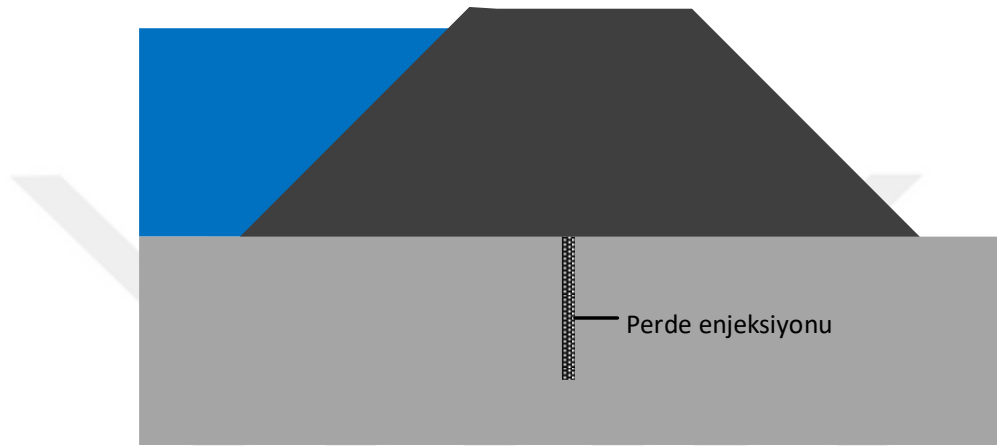
Şekil 7. Konsolidasyon enjeksiyonu

Perde enjeksiyonu

Perde enjeksiyonu, suyu taşıyan ve depolayan yeraltı hidrolik yapılarında, doğalgaz ve petrol ürünlerini depolayan yeraltı rezervuar yapılarında geçirimsizliği azaltılması için

kullanılmaktadır. Bu tür yapılara örnek olarak basınçlı şaftlar ve tüneller, yeraltı santralleri, rezervuarlar ve pompa istasyonları verilebilir.

Şaftlar ve tüneller için perde enjeksiyonu genellikle bir yapının tüm çevresine radyal olarak monte edilir. Elektrik santralleri ve rezervuarlar gibi yeraltı odaları için enjeksiyon perdeleri, etrafına simetrik olarak kurulur. Kuyularda ve tünellerde perdenin aşağısında veya ötesinde su sızıntısını azaltırlar. Santrallerin çevresinde, tesise su girişini sınırlarlar. Rezervuarlarda perdeler, depolanan sıvıların ve gazların çıkışını sınırlar. Bazen yeraltı suyunun akış yolunu uzatmak içinde kullanılırlar (Henn 1996).



Şekil 8. Perde enjeksiyonu

Yüksek basınçlı enjeksiyon (Jet grout)

Jet grout, 1960'lardan beri geliştirilen, çimento groutlarının ince yüksek basınçlı jetlerden bir sondaj deliği duvarına yanal olarak boşaltıldığı bir tekniktir.

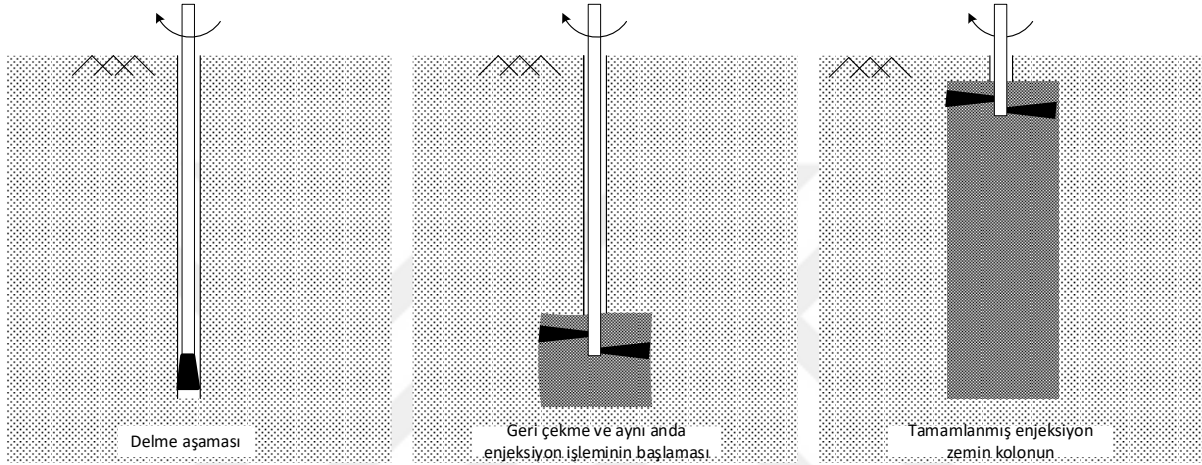
Jet pompaları aynı anda zemini kazıp karıştırmaktadır. Jetlerin kesme etkisi, basınçlı hava ile artırılabilir. Enjektörlerden groutun yüksek basınçlı enjeksiyonu, projenin özel gereksinimlerine uyacak şekilde zeminin geoteknik özelliklerinde değişikliklere izin verir. Sonuç, düşük geçirimsizliğe ve iyileştirilmiş mukavemete sahip modifiye edilmiş bir zemin kolonudur (Henn 1996).

Jet grout yöntemi, delme aşaması ve eş zamanlı programlanmış enjeksiyonla geri çekme aşaması olarak iki aşamadan oluşur.

Jet grout 60 metre veya daha fazla derinliklerde kullanılabilir. Hızlıdır ve hemen hemen her türlü zeminde uygulanabilir ve etkilidir. Ancak etkinlik zemine bağlıdır; kohezyonlu zeminlerde en düşüktür ve zemin daha taneli hale geldikçe artar. Taneli zeminlerde ortaya çıkan Zemin betonu 13,8 Mpa veya daha fazla dayanıma ulaşabilir. Genellikle büyük ve özel ekipman gereklidir. Büyük kayalar veya diğer engeller karıştırmayı zorlaştırır ve sürekliliği kesintiye uğratabilir (Warner 2004).

Oluşturulan jet grout kolonlarının çapı bir kaç faktöre bağlıdır. Bunlar;

- 1-800 bar aralığında basınç sağlayabilen özel bir pompa tarafından oluşturulan çalışma basıncı,
- Delme çubuklarının döndürülme ve çekilme hızına göre belirlenen enjeksiyon süresi,
- Yerinde zeminin kesme mukavemeti,
- Enjektörlerin boyutu,
- Groutların özgül ağırlığıdır (Henn 1996).



Şekil 9. Jet grout tekniği

İnce taneli çimento enjeksiyonu

1970 yılında bir toksisite olayının ardından düşük viskoziteli kimyasal harçların kullanımı yasaklandığında kalan boşluğu doldurmak için Japonya'da ince taneli çimento geliştirildi (Karol 2003). İnce taneli çimento, ortalama tane boyutu 4 mikron veya daha küçük olan bir Portland çimentosu veya cürufudur (Henn 1996). İnce taneli çimento (MC-500) %75 Portland çimentosu ve %25 yüksek fırın cürufundan oluşan çok ince öğütülmüş bir malzemedir. İnce taneli çimento, Portland çimentosunun yapabileceğinden çok daha küçük boşluklara ve çatlaklara nüfuz etmesine izin verir ve ayrıca parçacıkları çok daha uzun süre süspansiyonda tutar (Karol 2003).

Şu anda, ultra ince çimentolar için tane boyutu dağılımı açısından referans standardı bulunmamaktadır. Amerikan Beton Enstitüsü (ACI), ultra ince çimento için resmi olmayan bir referans standardı benimsemiştir. En son teknolojiye sahip geoteknik çimento enjeksiyonu üzerine bir taslak raporda bu komite, ultra ince çimentoyu en büyük tane boyutunun 15 mikrondan küçük olan çimento olarak tanımlamıştır (Henn 1996).

İnce taneli çimentoların iyi sızma yeteneğine sahip olması, oluşturduğu ortamın geçirimsizliği, çevreye zarar vermemesi, yüksek dayanım değerine sahip olması nedeniyle günümüzde kullanımı artmaktadır. İnce taneli çimentolarda hidrasyon, priz zamanı, akma gerilmesi ve viskozite değerlerini arttırmak için ilave katkıları kullanılır. İlave katkılarla akışkanlığı daha yüksek, akma gerilmesi daha düşük olan enjeksiyonlar yapılmaktadır (Perret *et al.* 2000).

Enjeksiyon Harcının Temel Reolojik Özellikleri

Reoloji, deformasyon özelliklerini tanımlar. Kullanılacak madde akışkan olduğunda akışkanın durumunun ve davranışının ne tür olduğunu belirlemek amacıyla reolojik niteliklerin saptanması gereklidir. Süspansiyonların enjekte edilebilirlikleri onların reolojik nitelikleriyle direkt olarak bağlantılıdır (Abraham 2005; Schwarz and Krizek 2000). Enjeksiyon harcının esas reolojik nitelikleri; duraylılık (stabilite), katılaşma zamanı, jelleşme ve viskozitedir (Schwarz 1998). Başka önemli diğer mühendislik özellikleri; kıvam, süspansiyonların parçacık ve enjeksiyon yapılmış zeminin nihai dayanımıdır. Çimento reolojisinin etkilendiği etkenler; s/ç oranı, özgül yüzey, çimento türü, çimento hidrasyonu, zamanı (Hakansson *et al.* 1992).

Duraylılık

Süspansiyondaki taneler, yerçekimi etkisi altında durgun haldeki bir sıvıya tane çapının karesiyle orantılı olacak şekilde çöker. Önce iri taneler, ardından daha ince taneler çöker ve parçacıkların boyutuyla birlikte süspansiyonun yoğunluğu azalır. Çok ince taneler yalnızca yerçekimi kuvvetine değil, aynı zamanda karşılıklı olarak etki eden elektrokimyasal kuvvetlere ve 1 mikrondan küçük kolloidal parçacıkların süspansiyonlarında görülen Brownian hareketine de maruz kalırlar ve böylece sedimentasyon hızı Stoke yasasına karşılık gelen hızdan daha düşük olur (Nonveiller 1989).

Tanelerin 24 saatten fazla bir süre içinde hiç çökmediği, özenle oluşturulmuş enjeksiyon süspansiyonlarına stabil süspansiyonlar denir. Yüzeyde, partikül çökmesine bağlı olmayan, ancak elektrokimyasal kuvvetlerin ve yerçekiminin süspansiyonun tüm hacmi üzerindeki etkisinin neden olduğu sineretik hacim büzülmesinin bir sonucu olarak, yüzeyde bir miktar temiz su görünebilir (Nonveiller 1989).

Enjeksiyon süspansiyonlarının stabilitesi basit laboratuvar testleri ile belirlenir. Belirtilen miktarlardaki bileşenler (çimento, kil, bentonit, vb.) damıtık su ile karıştırılır ve istenen bileşim ve yoğunlukta süspansiyon numuneleri elde edilir ve cam silindire aktarılır. Duraylılık (stabilite) süspansiyonda: “1000 ml’ lik cam silindirin içerisindeki karışımın üzerinde

oluşan temiz su hacmi iki saat sonunda toplam hacmin %5'inden az olursa duraylı olarak adlandırılır.” şeklinde tanımlanır (Håkansson *et al.* 1992).

Mühendisler, kusmayı (bleeding) katı tanelerin sıvıdan ayrılması şeklinde ifade ederler. Katkısız çimento enjeksiyonları yüksek kusma potansiyeline sahiptirler. Aşırı kusmayı kontrol etmek ve dayakılığı arttırmak için uçucu kül eklenir.

Priz süresi

Süspansiyon türü enjeksiyonlarda katılaşma süresi enjeksiyon sıvısının akışkanlığını kaybetme süresidir. Priz süresi, çimento ve suyun karıştırıldığı süreyle çimento hamurunun şekil olarak değişikliğe uğrayarak sertleşmeye başladığı süre ile arasındaki zaman olarak tarif edilir. Bu süre çimento esaslı enjeksiyonlar için katkı maddelerinin kullanımına göre 2 ile 24 saat arasında değişir. Priz süresi enjeksiyon deneylerinin denetim altında alınabilmesi açısından önemlidir. Zeminlerde yeraltı suyu bulunduğunda, priz hızlı olmalıdır. Enjeksiyon sıvısının boşlukların hepsini doldurması için belli bir zaman geçmesi gerekir. Bu bakımdan optimum sertleşme süresinin belirlenmesi gereklidir. Priz süresi sıcaklık, karıştırma suyunun dozu ve neme bağlıdır. Sıcaklığın artmasıyla priz süresi de artar. s/ç oranının artması priz süresini artırır. Çevrenin nemli olması prizi geciktirir ve priz süresini artırır. Katkıların kullanılmasıyla süspansiyon akışkanlaşır, katılaşma süresi kısaltılıp uzatılabilir (Warner 2004).

Enjeksiyon harcı tasarlanırken, sertleşme süresi enjeksiyon noktasından gerekli mesafeye groutun ulaşması için geçen süreden daha büyük olmalıdır.

Priz süresi vicat deneyi ile belirlenir. Bu deneyde, zamanla geliştirilen standart bir çimento hamurunun mukavemeti, standartlaştırılmış küçük sondanın numunenin içine girmesine ve numune yüzeyinde hiçbir iz kalmamasına karşı direnç olarak belirlenir. Hidrasyon işlemi deney sırasında dinlenmeye bırakılan numunenin bileşimine bağlı olduğundan, bu şekilde tanımlanan priz başlangıcı ve bitişi mutlak değerler değildir. Enjeksiyon söz konusu olduğunda, kullanılan çimento süspansiyonları standart bileşimde değildir ve çimentonun çatlaklara enjekte edilene kadar sürekli hareket halindedir ve sertleşmeye ve mukavemet kazanmaya başlayabilir (Nonveiller 1989).

Viskozite

Viskozite, moleküller arasındaki sürtünme nedeniyle akışkan maddenin akışa karşı göstermiş olduğu dirençtir. Süspansiyon karışımlar genellikle Newtonian akışkan şeklinde değil, Bingham sıvısı şeklinde tanımlanır. Newtonion sıvısının viskozite ölçüsü kayma oranının değişmesiyle sabit olduğu halde, Bingham sıvısının viskozitesi kayma oranı ve kayma

gerilmesine bağı olarak değişir. Bingham modelinin eğimi, plastik viskoziteyi verir (Warner 2004). Newtonian'ın viskozite tanımı aşağıdaki gibidir:

$$\tau = \mu \frac{dv}{dz} \quad (4)$$

Burada,

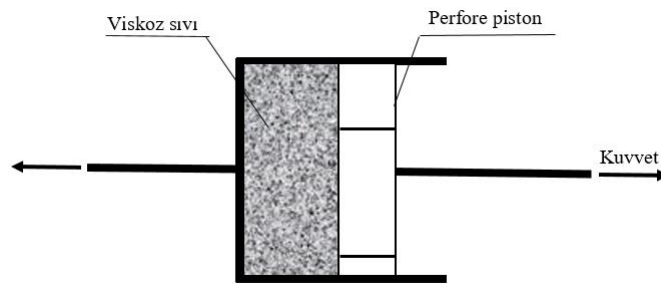
τ : sıvının kayma gerilmesi

$\frac{dv}{dz}$: hız bileşeninin türevi.

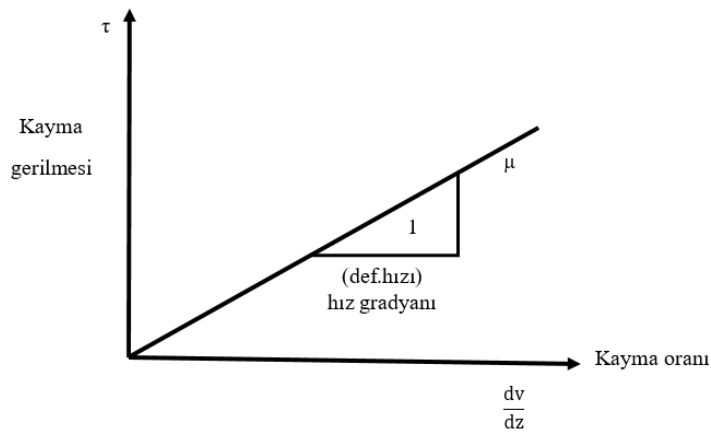
μ : viskozite

Yukarıdaki eşitlik, laminar akımlara özgüdür. Başka ifadeyle, dairesel yada spiral hareket akımlarıyla örselenmeyen düz akım çizgilerini izleyen sıvı parçacık akımları için geçerlidir (Warner 2004).

Şekil 10 ve Şekil 11'de görüldüğü gibi, Newtonian sıvısında kayma gerilmesi (τ), hız eğimi ile oransal şekilde değişir. Newtonian sıvısının eşiti olan mekanik model bir sönümleyicidir.

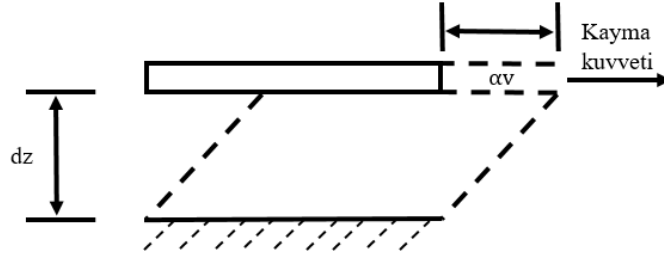


Şekil 10. Newtonian modeli (Warner 2004)



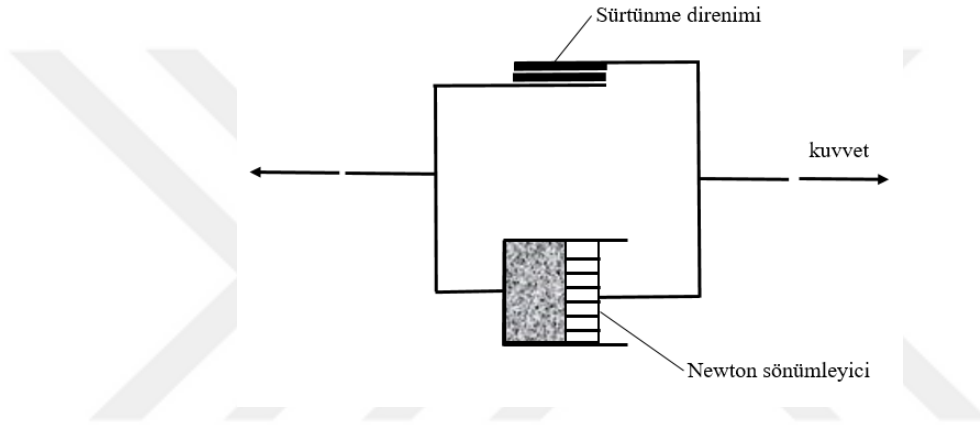
Şekil 11. Newtonian modelinin reolojik davranış grafiği (Warner 2004)

Kayma gerilmesi-hız eğimi (deformasyon hızı) arasında doğrusal bir bağ olduğunda, reolojik örnek doğrusal şekilde isimlendirilir (Şekil 12).



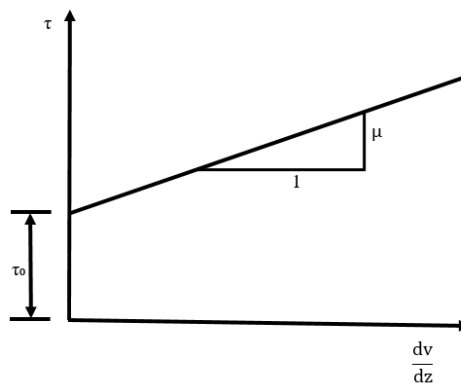
Şekil 12. Newtonian akışkan kayma gerilmesinde formasyon hızı arasında doğrusal ilişki (Warner 2004)

Bir sıvı τ ile dv/dz arasında doğrusal olmayan bağ varsa, bu sıvı non-Newtonian sıvısı olarak isimlendirilir. Şekil 13, sürekli deformasyon hızı oluşmadan önce aşılması gerekli olan başlangıç akma gerilmeli bir gerecin davranışını göstermektedir (Warner 2004).



Şekil 13. Bingham modeli (sürtünme direnci-kuvvet) (Warner 2004)

Bingham modeli, paralel bağlantılı bir sönümleyici ve sürtünme dirençli bir bileşendir (Şekil 14) (Warner 2004).



Şekil 14. Bingham modelinin reolojik davranış grafiği (Warner 2004)

Bu kaideye uyanlara Bingham sıvısı adı verilir. Esasen, Bingham prototipi bir sıvı değil, visko-plastik katıdır. Buna karşın, enjeksiyonla ilgili araştırmalarda Bingham sıvısı yaygın olarak kullanılır. Bingham modelinin reolojik davranışı,

$$\tau = \tau_0 + \mu \frac{dv}{dz} \quad (5)$$

formülü ile ifade edilir. Burada, τ_0 (başlangıç akma gerilmesi) rijitlik adı verilir. Kimi zaman da akış sınırı adı verilir. Üstteki eşitlik gereğince, akma davranışına ideal plastik adı verilir.

Karıştırıldığında sertliğini yitiren, bir süre dokunulmadığında tekrar sertliğini geri kazanan süspansiyonlara tiksotropik (thixotropic) adı verilir. Tiksotropik özellikli bentonit çimento karışımı, enjeksiyonların duraylılığını sürdürmesine yardımcı olurlar (Warner 2004).

Suyun davranışı Newtonian sıvısı gibidir. Süspansiyon içerisindeki kil parçacıkları non-Newtonian davranış gösterir. Kil veya çimento enjeksiyonu yaklaşık Bingham modeli kabul edilebilir. Bentonit kil, tipik bir tiksotropik malzemeleridir. Viskozite ' μ ', etkin ya da kesin viskozite de denilmektedir. Viskozite yoğunluğa bölündüğünde kinematik viskoziteyi verir. Viskozitenin birimi SI sisteminde Pascal-saniyedir (Pa.s). Genellikle Centipoise (cP) birimi kullanılır (Warner2004). Kinematik viskozite birimleri, m/sn² veya Centistoke (cSt)'dir.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\mu \cdot g}{\gamma} \quad (6)$$

Yukarıdaki denklem türbülanslı akım için, dinamik “eddy” viskozite (η) eklenerek değiştirilmiştir.

$$\tau = (\mu + \eta) \frac{du}{dz} \quad (7)$$

Türbülanslı akım, pompalama sırasında enjeksiyon harcının duraylılığının devamlılığı dikkate alındığı zaman önemlidir. Zemin ya da kaya ortamına enjeksiyonda çoğunlukla laminar akım koşulları dikkate alınır (Warner 2004). Laminer akıştan türbülanslı akışa geçişte genellikle boyutsuz Reynolds sayısından (Re) yararlanılır.

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (8)$$

Burada;

ρ : yoğunluk

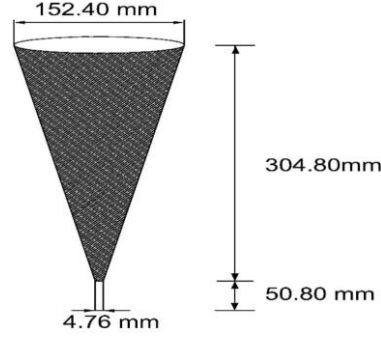
v : akış hızı

L : karakteristik uzunluk

μ : viskozite

Düşük Reynolds sayısı, viskoz kuvvetlerin atalet kuvvetlerine kıyasla güçlü olduğunu gösterir ve laminar akış koşullarının oluştuğunu anlatır (Warner 2004).

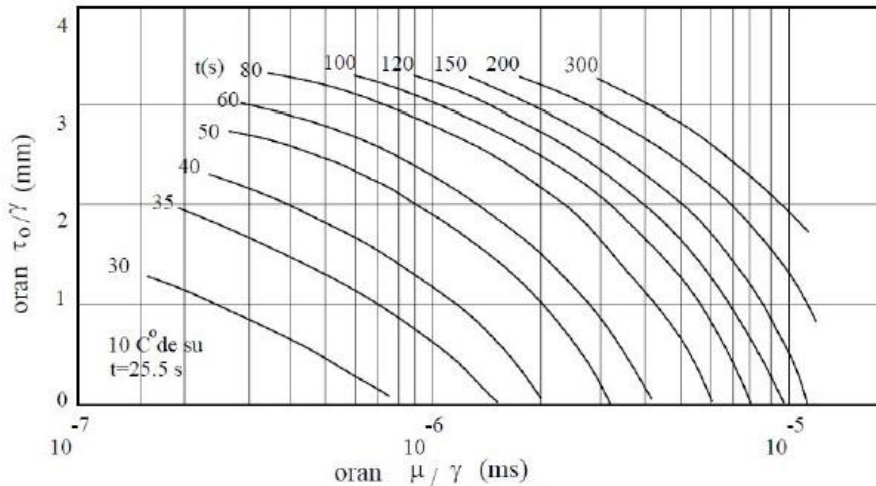
Zemin enjeksiyonlarında viskozitenin belirlenmesinde iki metot vardır. Birinci metot, belirli miktarda sıvının bir huniden akış süresinin ölçülmesi ile elde edilir. Diğeri de, sayısal vizkometre aygıtlarından yararlanmaktır (Langevin 1995). Bu çalışmada Mars hunisi kullanılarak viskozite belirlenmiştir (Şekil 15).



Şekil 15. Marsh Hunisi

Marsh hunisi süresi genellikle Marsh hunisi viskozitesi olarak adlandırılır. En yaygın kullanım Newton tipi olmayan sıvılar olan sondaj çamurları için olsa da, Marsh hunisi bir reometre değildir, çünkü tek bir akış koşulunda yalnızca bir ölçüm sağlar. Viskozitenin belirlenmesinde Marsh hunisi ile birlikte Lombardi kohezyon ölçer plakada kullanılır. Pürüzlü yüzeyli çelik bir plaka (15 x 15 cm) enjeksiyon malzemesine daldırılır. Plakaya yapışan enjeksiyon harcının damlaması bitinceye kadar beklenir. Plakanın her iki tarafında yapışan ağırlık (ΔW) bulunur. Akma gerilmesi hesaplanır (τ_0). Akma gerilmesi hesaplandıktan sonra enjeksiyon harcının birim hacmi bulunur (γ). τ_0/γ değeriyle Marsh hunisinden edinilen veriler, Lombardi'nin geliştirdiği çizelgeye işaretleyerek enjeksiyon harcının etkin viskozitesi (μ) belirlenir (Lombardi 1985).

Akışkanlaştırıcılar, sıcaklık, s/ç oranı viskoziteyi etkiler. Sıcaklık ile s/ç oranı yükseldikçe viskozite küçülür (Şekil 16) (Warner 2004).



Şekil 16. Lombardi abağı (Lombardi 1985; Warner 2004)

Enjeksiyon Edilebilirlik

Enjeksiyon karışımının zemine doldurulabilmesine veya doldurulamamasına enjekte edilebilirlik denilir (Schwarz 1998). Süspansiyon karışımlarında enjekte edilebilirliği zeminin tane çapı, maksimum çimento tane çapı, s/ç oranı, zemindeki ince tane yüzdesi, rölatif sıkılık ile enjeksiyon basıncı etkiler (Lombardi 1985).

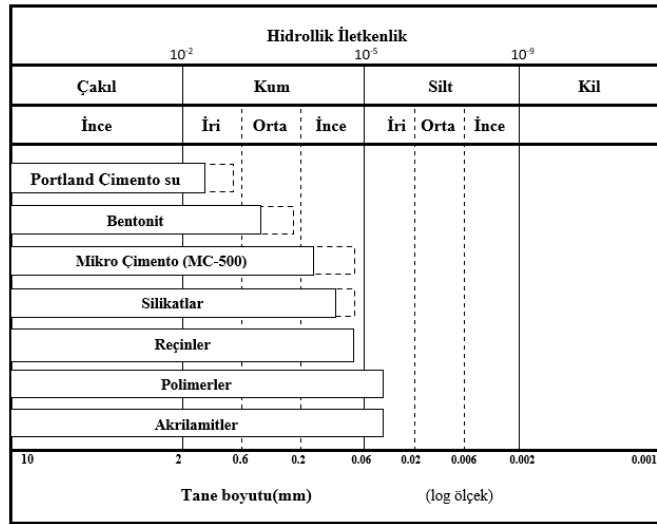
Enjeksiyonu etkileyen en önemli değişkenlerden birisi, karışımların s/ç oranıdır. Enjeksiyon karışımlarındaki s/ç oranının artması enjeksiyon edilebilirliği ve geçirimsizliği artırırken dayanımı azaltmaktadır (Akbulut and Sağlamer 2002).

Enjeksiyonun başarısı, karışım tanelerinin enjekte edilecek boşluklardan küçük olması ile ilgilidir. s/ç oranının artırılmasıyla yüksek basınçlarda en yüksek penetrasyon neticeleri alınabilir. Ancak zayıf taneli zeminlerde sadece enjeksiyon basıncını yükseltmek yeterli olmaz sızıntı görülebilir. Sızıntı, güçlü basınçlarda süspansiyon parçacıklarının süspansiyon sıvısından uzaklaşması şeklinde değerlendirilir (Akbulut and Sağlamer 2002).

Bell (1993) aracılığıyla yürütülen çalışmalar neticesinde tane çapı 2 mm'den az olan uniform kum içerisine çimento enjeksiyonu verildiğinde filtre oluşumu meydana geleceğini göstermiştir. Taneli karışımların bir biçimlenme yeteneği, süspansiyonların tane çapına, karışım tanelerinin dolgu yapılarak boşluklardan küçük olması ile ilişkilidir. Ayrıca enjeksiyon edilebilirlik limit ölçüsüne yaklaşıncı, karışımın uygun olduğuna güvenmek için enjeksiyon edilebilirliğin eşitliğe göre yeniden denetlenmesi gerekmektedir.

İnce taneli çimento karışımları değerlendirilerek kuru ve yaş kumlara yapılan enjeksiyonlar neticesinde, bazı yönden yaş kumların, kuru kumlara oranla suyu daha iyi doldurdukları saptanmıştır (Perret *et al.* 1997).

Akışkanlaştırıcı kullanılarak yapılan çimento enjeksiyonlarında, değerlendirilen ilave maddelerin çimento karışımlarının enjeksiyon edilebilirliği önceden yürütülen uygulamalarda gözlemlenmiştir (Yıldız 2007). Şekil 17'de çeşitli enjeksiyon tiplerinin farklı viskoz karışımlara bağlı penetrasyon kabiliyeti gösterilmiştir (Kutzner 1996).



Şekil 17. Çeşitli enjeksiyonların penetrasyon kabiliyeti (Kutzner 1996)

Önceden yürütülen çalışmalarda, enjeksiyon edilebilirlikte zeminin tane çapı ile çimentonun tane çapının birbiriyle ilişkili olduğu görülmüştür. Deneylerde boşluk hacimlerinin, ince taneli çimentonun en fazla tane büyüklüğünün 1,5-2,0 misli olduğunda çimentonun boşluklara penetre edilebildiğini belirtmiştir (Abraham 2005; Cambefort1951; Herndon and Lenahan1976).

Enjeksiyon Harçları

Enjeksiyon deneylerinde genellikle yalnızca çimento ile sudan meydana gelen harçlar kullanılmıştır. Sebep olarak, çimentonun diğer malzemelere nazaran daha kolay temin edilmesidir. Çimento karışımlarında daha çok su altında sertleşebilen hidrolik çimentolar kullanılır. Ek olarak değişik çimento çeşitleri de kullanılmaktadır. Enjeksiyon uygulamalarında yalnız çimento temelli karışımlar kullanılamaz. Değişik kimyasal çözeltiler ile reçinelerden meydana gelen karışımlar da enjeksiyon da kullanılmaktadır. Bazen gerektiğinde çimento temelli karışımlarla kimyasal karışımlar birlikte değerlendirilir. Çimento ile kimyasal harçların enjeksiyon için değerlendirilmesi, başka kullanımlarıyla karşılaştırıldığında daha düşük oranda olduğu için enjeksiyon harçlarında belli bir kriter yoktur. Enjeksiyon için değerlendirilen harçların viskozite, tane çapı ile dayanımı, enjeksiyonun yürütülmesine etki eden en önemli değişkenlerdir (Mutman 2007).

Permeasyon ve kaya enjeksiyonlarında viskozitesi düşük harçlar kullanılır. Böylece harç zemin boşlukları içindeki suyla yer değiştirebilir ve zeminde boşluklardan meydana gelen hatlar boyunca uzak yerlere sızabilir (Mutman 2007).

Harçların içinde büyük tanelerin olması harcın zemin içinde uzak yerlere ulaşamamasını dolayısıyla yakın enjeksiyon kuyularının açılmasına yol açar. Sonucunda enjeksiyon süresi ile

maliyeti artar. Böylelikle kompaksiyon enjeksiyonu, çatlatma enjeksiyonu kadar zemin tanelerini yer değiştiren enjeksiyonlarda viskozitesi büyük harçlar kullanılmaktadır. Böylece harç, basınç yardımıyla zemini sıkıştırabilir veya çatlatabilir (Mutman 2007).

Bilhassa permeasyon ile kaya enjeksiyonlarında, harcın tane boyutunun, zemin içerisinde süzölmelere sebep olmaması maksadıyla, zeminin en küçük tane çapından üç veya beş misli küçük olması gerekir. Ancak kompaksiyon enjeksiyonunda, harcın tane çapının, zeminin en küçük tane çapından daha büyük olması, enjeksiyonun muvaffakiyeti için önemli etken sayılır.

Sertleşmiş harcın, enjeksiyon yapıldığı zemin iyileştirebilmesi amacıyla makul dayanımda olması gerekir. Zemindeki kayma dayanımlarının iyileştirilmesi amacıyla düşük dayanımlı harçlar yeterlidir. Zemindeki boşlukları, dayanıklı karışıma kıyasla bazı yönlerden daha zayıf karışımla doldurmak ekonomik açıdan uygun görülür. Böylelikle sızdırmazlık amacıyla değerlendirilen perde enjeksiyonlarında harcın dayanımı önemsenmez (Mutman 2007).

Çimento harçları

Enjeksiyon uygulamalarında en çok kullanılan çimento Portland çimentosudur. Portland çimentosunun bir enjeksiyon harcı olarak ilk kullanımı İngiltere'deki Thames tünelidir. 1880 ve 1905 yılları arasında, Fransa ve Belçika'da kömür için kuyu açma sırasında karşılaşılan çatlaklı, su taşıyan kaya tabakalarından su girişini kontrol etmek için çimento harcı kullanıldı. Bu süre zarfında ekipman tasarımı ve uygulama tekniklerinde büyük ilerleme kaydedilmiştir. Bu gelişmeler kısa sürede tünellere ve baraj temellerine uygulanmıştır (Karol 2003).

Çimento harçlarında Portland çimentosundan başka ince taneli çimentolar da kullanılmaktadır. Enjeksiyon edilecek zeminin geçirimsizliği az olduğunda bu tür çimentolar değerlendirilir. Bazı uygulamalarda, büyük zemin boşluklarının doldurulması amacıyla çimento harcının içine kil, ince gibi malzemeler eklenir. Bazen çimentonun içerisine puzzolanik ilaveler veya süper akışkanlaştırıcılar da katılır (Akbulut ve Sağlamer 2002).

Çimento harcına ilave edilen malzemeler harcın dayanımını azaltacağı kadar çimento tanelerinin harç içinde çökmelerini de etkileyebilir. Dolayısıyla çimento harcına karıştırılan malzemeler enjeksiyon uygulamasının maksadına uygun olarak kullanılması gerekir (Akbulut ve Sağlamer 2002).

Kimyasal harçlar

Ticari olarak çeşitli tipte kimyasal harçlar üretilmektedir. Tüm kimyasal enjeksiyonlar benzer temel işlevlere sahipken, her bir harç türünün kendine özgü özellikleri ve hedef uygulamaları vardır (Evans *et al.* 2021).

Sodyum silikatlar, 20. yüzyılın başlarında tercih edilen kimyasal harçtı (Mirghasemi *et al.* 2004). Daha sonra iki aşamalı teknik ortaya atılmıştır. Bu yöntem, birinci aşamada kalıcı bir bağ oluşturmak için bir sodyum silikat çözeltisi ve ikinci aşamada bir alkali aktivatör enjekte etmeyi içeriyordu. Bu süreç daha sonra tek aşamalı bir prosedüre basitleştirildi ve sodyum silikatların pratik kullanımı devam etti (Mirghasemi *et al.* 2004).

İstenen özellikleri değiştirmek için çeşitli silika/alkali oranlarına sahip ürünler ticari olarak mevcuttur. Silika/alkali oranları tipik olarak yaklaşık 3 ila 4 arasında değişir ve su % 62 ila % 72 aralığındadır ve özgül ağırlık değerleri 1,27-1,40 aralığındadır. Kullanılan orana bağlı olarak maksimum mukavemete ulaşmak 4 hafta kadar sürebilir. Genel bir kural olarak, sodyum silikatlar çevre dostu ve toksik değildir (Karol 2003).

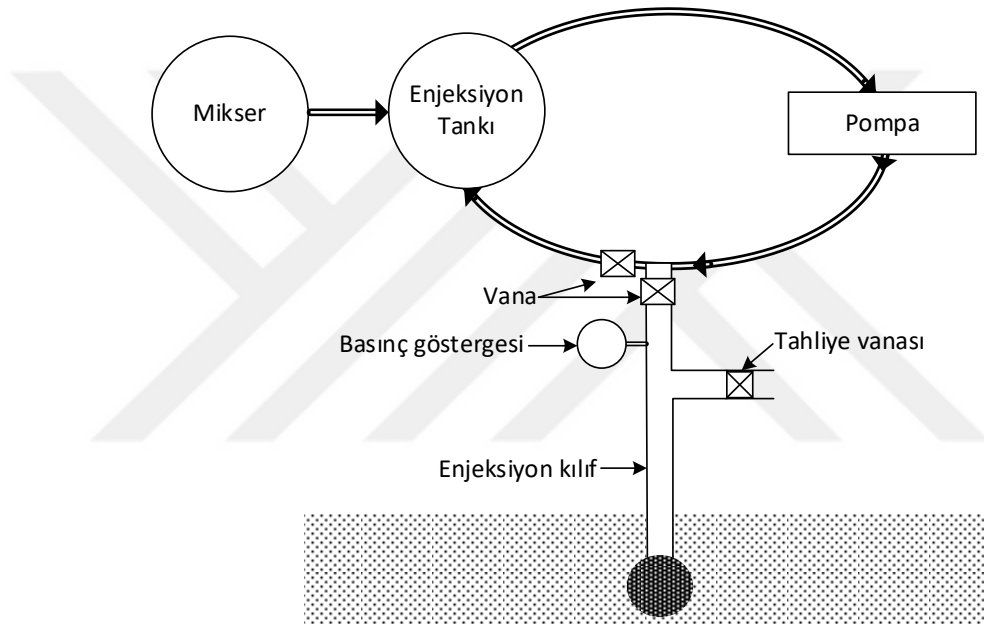
Akrilamid bazlı harçların (akrilikler) ilk belgelenmiş kullanımları 1950'lere kadar uzanmaktadır. Birçok yönden, bu harçlar, daha kolay kontrol edilen bir jel süresi ve daha kolay bir enjeksiyon işlemi gibi silikatlardan daha iyi özelliklere sahiptir. Ancak akrilikler silikatlardan daha pahalıdır. Akrilamidin de toksik olduğu bilinmektedir. Akrilamid bazlı enjeksiyon harçları bu sorunları hafifletmek için seyreltilir, ancak akriliklerin sağlık, güvenlik ve çevresel etkileri her zaman akılda tutulmalıdır (Karol 2003).

Lignokrom harçları, ahşap işlemeden üretilen atıklardan yapılır. Spesifik olarak, lignokromlar, odun artıklarından liginosülfonatların çıkarılması ve bunların çeşitli krom bileşikleri, en yaygın olarak sodyum dikromat ile birleştirilmesiyle oluşturulur. Bu harçların gücü, pH yükseltilerek veya düşürülerek değiştirilebilir. Lignokromlar, odun yan ürünlerinden yapıldıkları için nispeten ucuzdur, ancak harçlarda kullanılan krom bileşikleri oldukça zehirlidir (Karol 1990). Bu toksisite sorunları nedeniyle, çok az lignokrom hala ticari olarak temin edilebilir veya kullanılmaktadır. Diğer kimyasal harç katkı maddeleri arasında fenolik reçineler, aminoplastlar ve poliüretanlar bulunur (Evans *et al.* 2021).

Kimyasal harçların süspansiyon halinde olmaması nedeniyle bilhassa ince kum zemin tabakalarında kullanılmaktadır. Kimyasal harçlar çimento ile kıyaslandığında pahalıdır. Kimyasal harçların özelliklerinin, duraylılıklarının, dayanımlarının, zehirlilik ve maliyetlerinin uygulamalarda değerlendirilme sırasında büyük katkısı vardır (Mutman 2007).

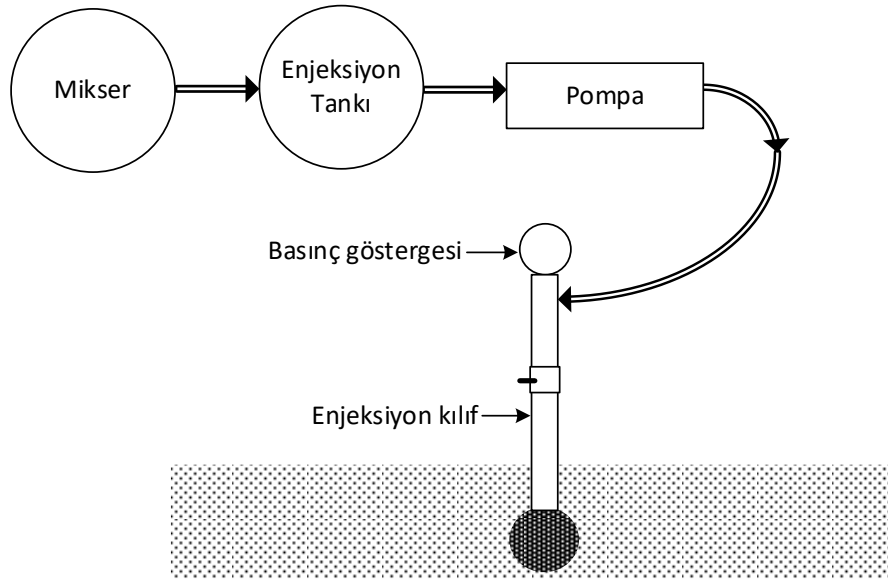
Enjeksiyon Düzenekleri

Permeasyon enjeksiyonunda kullanılan iki enjeksiyon düzeneği mevcuttur. İlki ve kesinlikle tarihsel olarak en sık kullanılanı, Şekil 18'de gösterildiği gibi dolaşımli bir harç sistemini içeren dolaşımli enjeksiyon düzeneğidir. Dolaşımli enjeksiyon sisteminde, enjeksiyon harcı bir karıştırıcıdan sürekli olarak sirküle edilir ve tekrar geri döner. Enjeksiyon deliğine bağlantı yapılacak şekilde T borusu yerleştirilmiştir. Enjeksiyon deliğini besleyen “T”nin kolunda bir vana ve harç dönüş hattında bir vana bulunur. Vana ayarı ile akış hızı ve dolayısıyla deliğe giren enjeksiyon harcının basıncı kontrol edilebilir. Bu, pompalama hızından bağımsız olarak belirli bir basınç seviyesini korumak için harç akış hızının değiştirilmesine izin verir (Warner 2004).



Şekil 18. Dolaşımli enjeksiyon sistemi

Doğrudan enjeksiyon sistemi ise, Şekil 19'da gösterildiği gibi, doğrudan pompadan enjeksiyon deliğine giden tek bir enjeksiyon hattını içerir. Enjeksiyon harç basıncı enjeksiyon hızı ile doğrudan ilişkili olduğundan, pompa çıkışı ayarlanarak kontrol edilir. Doğrudan enjeksiyon sistemi, basitlik ve minimum miktarda hortum kullanımı avantajına sahiptir. Bununla birlikte, en büyük avantaj, sağlanan taze harcın sürekli teminidir. Dolaşımli enjeksiyon sistemlerinde, enjeksiyon işlemi sırasındaki kullanılmayan harcı miksera geri verdiği için harç özellikleri zamanla değişebilir (Warner 2004).



Şekil 19. Direkt enjeksiyon sistemi

Konu ile İlgili Yapılmış Çalışmalar

Zemin enjeksiyonu ile ilgili yapılmış çalışmalar

Zemin enjeksiyonu ile ilgili yapılmış ilk çalışmalar 200 yıllık bir geçmişe sahiptir. Enjeksiyon konusu ile ilgili laboratuvar ve arazide yapılmış çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Laboratuvar çalışmaları enjeksiyon harcının reolojik özellikleri ile zemin içine sızabilmesi konusunda ağırlık kazanır. Hatta laboratuvar da zemin dayanımlarını enjeksiyonla mümkün olabildiğince artıracak harçlar ve enjeksiyon yöntemleri üzerinde çalışılmıştır. s/ç oranı ile ilgili çalışmalarda literatürde mevcuttur. Arazideki uygulamalarda enjeksiyonun uygulanmasına yoğunlaşmıştır. Arazideki uygulamalarda genellikle uygulama yöntemleri ele alınmıştır. Ancak enjeksiyonun farklı geoteknik özelliklere sahip zeminlere etkilerini konu alan uygulamalar çok fazla bulunmamaktadır. Değişik tane çapı dağılımına sahip zeminler üzerinde yapılan laboratuvar ve arazi uygulamaları kaynaklarda çok fazla mevcut değildir. Zemin enjeksiyonu konusunda yapılmış olan çalışmaların bazıları aşağıda verilmiştir.

Aitcin *et al.* 1984, çimentoya değişik oranda silis dumanı ekleyerek elde edilen enjeksiyon harçlarının viskozite, kuma, hacim ile basınç dayanımının zamanla değişimlerini incelemişlerdir. Silis dumanını, çimento ağırlığının %5, %10, %15 ile %20 oranlarında karıştırarak beş değişik enjeksiyon harçları oluşturmuşlardır. s/ç oranı ilk aşamada 0,4 olup silis dumanı oranı arttıkça s/ç oranı da arttırılmıştır. Çimento miktarının ağırlıkça % 0,8–%1,2 oranlarında süper akışkanlaştırıcı kullanmışlardır. Basınç dayanımının ve viskozitenin silis dumanı oranına bağlı olarak arttığı görülmüştür. En yüksek basınç dayanımını % 20 silis dumanı katkılı numunelerden elde edildiği belirtmişlerdir. Ayrıca, silis dumanı içeren enjeksiyon harçlarında sulanmanın azaldığını ifade etmişlerdir.

Krizek *et al.* (1992), örneklerin % 50' sini yatay şekilde kür ederken diğer % 50' sini düşey olarak küretmişlerdir. Düşey küredilen örneklerin geçirimsizliğinin daha düşük çıktığını, (s/ç) oranı arttıkça örneklerin geçirimsizliğinin de arttığını, yatay kür edilen ve s/ç oranı 1,5 çıkan örneklerde basınç dayanımının daha yüksek çıktığını ifade etmişlerdir.

İncecik ve Ceran (1995), çimento, bentonit, akışkanlaştırıcı ile hava sürükleyici katkılarla farklı s/ç oranlarında enjeksiyon harçları oluşturmuşlardır. Çimento ağırlığının % 4'ü oranında bentonit, %1 oranında ise akışkanlaştırıcı ile hava sürükleyici katkıları kullanmışlardır. 15 cm çapında ve 30 cm uzunluğundaki silindirik kalıplara çakıl Zemin % 50 rölatif sıkılıkta yerleştirilmiştir. Hazırlanan numunelere 100 kPa düşey basınç uygulayarak enjeksiyon uygulamışlardır. 7 ve 28 gün kür edilen numunelerin basınç dayanımlarını, gerilme-deformasyon ilişkilerini, s/ç oranının basınç dayanımı ve viskozite üzerindeki değişimlerini araştırmışlardır. Enjeksiyon edilmiş örneklerin basınç dayanımının s/ç oranının artmasıyla düştüğünü ancak bir müddet sonra yükseldiğini, maksimum basınç dayanımını akışkanlaştırıcı içeren çimento harçları ile enjeksiyon edilen örneklerin oluşturduğunu, en düşük basınç dayanımının ise % 4 bentonit içerikli örneklerin oluşturduğunu ifade etmişlerdir.

Perret *et al* (1997) yaptıkları çalışmada, dört farklı yüksek oranda su azaltıcı katkı ile altı farklı mikro-ince çimento (üç portland bazlı ve üç cüruf bazlı) kullanılarak hazırlanan enjeksiyon harcının performansını incelemişlerdir. Çimento ve katkı maddeleri arasındaki etkileşim, taze enjeksiyon harçlarının reolojik özelliklerini ve nihai priz süresini etkilediğini ifade etmişlerdir. Optimize edilmiş bir grout formülasyonunda veya yüksek oranda su azaltıcı katkı tipinde çimento tipinin değiştirilmesi, grout özelliklerinde değişikliklere yol açtığını belirtmişlerdir. İyi bir grout kalitesi (akışkan ve stabil) elde etmek için, sahada tekrarlanabilir rutin testlerle laboratuvarındaki davranışlarını kontrol etmenin öneminden bahsetmişlerdir. Saha çalışmasında kullanılan grout formülasyonları ve bileşenlerinin, laboratuvarda test edilenlerle aynı olması gerektiğini belirtmişlerdir.

Akbulut (1999) yaptığı doktora çalışmasında, taneli karışımlarla taneli zeminlere enjeksiyon uygulaması yapmıştır. Enjeksiyon harcı olarak çimento, çimento-silis dumanı, çimento-uçucu kül ve çimento-kil karışımlarını kullanmıştır. Rölatif sıkılığı %30 ile %80 hazırlanan örneklerle enjeksiyon uygulamış, basınç dayanımının zamanla değişimlerini incelemiştir. %50 rölatif sıkılıktaki enjeksiyon yapılmış numunelerde ise permeabilite değişimlerini araştırmıştır. Silis dumanıyla yapılmış örneklerde basınç dayanımının yükseldiğini yalnız geçirimsizliğin azaldığını ifade etmiştir. Uçucu kül katkılı çimento enjeksiyonunda basınç dayanımının çok az azaldığını, geçirimsizliğin arttığını, kil katkılı örneklerde de basınç dayanımının azaldığını bildirmiştir.

Chen *et al.* (2000) yaptıkları çalışmada, enjeksiyon işlemlerini görselleştirmek için yeni bir floresan yaklaşımı geliştirmişlerdir. Enjeksiyon etkisini (başarısını) değerlendirmek için genel olarak permeabilite ve porozite karakteristikleri gibi fiziksel ölçümler yapılmasının geleneksel olduğundan bahsetmişlerdir. Bu tahminlerin pratik enjeksiyon verileriyle zorunlu olarak ilişkili olmadığını belirterek floresan yöntemini önermişlerdir. Floresan maddeler içeren değişik enjeksiyon karışımlarının dağılımlarını bir inceleme çukurunda ultraviyole ışık altında gözlemlemişlerdir. Floresanlı çimento harcını 5 m derinliğindeki kuyularda enjeksiyon yapmışlardır. Daha sonra harcın dağılımını enjeksiyon kuyusunda mor ötesi ışıkla incelemişlerdir. Bu teknik ile harcın zemin içerisindeki dağılımının kolayca gözlemlenmesinin enjeksiyon uygulamalarının planlanmasında kolaylık sağladığını belirtmişlerdir.

Akbulut ve Sağlamer (2002) yaptıkları çalışmada, zeminin enjeksiyonunu etkileyen farklı parametreleri değerlendirmiş ve granüler zeminlerin enjeksiyon edilebilirliğini tahmin etmek için yeni bir yöntem önermişlerdir. Granüler zeminlerin enjeksiyon edilebilirliğini etkileyen parametrelerin çimento esaslı enjeksiyon harçlarının ve zeminin tane çapı, rölatif sıklık, zeminin ince tane içeriği, enjeksiyon karışımının s/ç oranı ve enjeksiyon basıncı olduğunu belirtmişlerdir. Parametrelerin enjeksiyon edilebilirliği üzerindeki etkilerini incelemek için, laboratuvar da deneysel bir çalışma yürütülmüş ve enjeksiyon edilebilirliği tahmin etmek için ampirik bir formül önermişlerdir. Deneylerde farklı gradasyona sahip 10 farklı SP Zemin %30 ile %80 rölatif sıklıklarda kalıplara yerleştirilmiş ve farklı s/ç oranlarında enjeksiyon deneyleri yapmışlardır. Yeni yaklaşımın, permeasyon enjeksiyonu için granüler zeminlerin N'sini tahmin etmede mevcut diğer formüllerle karşılaştırıldığında, yeni geliştirilen formülün daha makul sonuçlar verdiği ifade edilmiştir.

Güngörmüş (2003) yüksek lisans tezinde, farklı oranlarda uçucu kül, silis dumanı ve bentonit kullanarak enjeksiyon deneyleri yapmıştır. Çalışmada, granüler bir zemini % 70 rölatif sıklıkta kalıplara yerleştirilmiş ve enjeksiyon deneyleri yapılmıştır. Enjeksiyon yapılmış numuneler 7, 14 ve 28 gün kürde bekletilmiş ve tek eksenli basınç dayanımları belirlenmiş ve katkıların tek eksenli basınç dayanımı üzerine etkisi incelenmiştir. Yaptıkları deneyler sonucunda, en yüksek tek eksenli basınç dayanımının % 3 bentonit, % 10 uçucu kül ve % 20 silis dumanının kullanıldığı numunelerden elde edildiğini belirtmişlerdir. Ayrıca optimum oranların enjeksiyon karışımının işlenebilirlik, su kuma, viskozite, homojenlik ve priz süreleri gibi özelliklerini olumlu yönde etkilediği belirtilmiştir. Tek eksenli basınç dayanımı üzerinde en etkili parametrenin silis dumanı olduğunu ve silis dumanı oranının arttıkça dayanımında arttığını ifade etmişlerdir. Uçucu kül oranının arttıkça tek eksenli basınç dayanımının azaldığı belirtilmiştir.

Zaimoğlu (2003) doktora çalışmasında, farklı oranlarda bentonit, uçucu kül ve silis dumanı kullanarak hazırladığı enjeksiyon karışımlarının serbest basınç mukavemeti, dinamik viskozite, çökeltme, priz süreleri ve akma özellikleri araştırmıştır. Deneylerinde Taguchi deneysel tasarım tekniğine göre 3 parametrelili 4 seviyeli L16 deney tasarımı seçilmiştir. Enjeksiyon karışımlarının hazırlanmasında, katı ağırlığın % 0, % 0,5, % 1 ve % 3 oranlarında bentonit, % 10, % 20, % 30 ve % 40 oranlarında uçucu kül ve % 0, % 5, % 10 ve % 20 oranlarında silis dumanı kullanmıştır. Deneylerinde PÇ 42,5 katkısız Portland çimentosu kullanılmıştır. Yukarıda belirtien karışım oranlarında hazırlanan enjeksiyon numuneleri 7, 14 ve 28 gün kürde bekletilmiş ve serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Ayrıca enjeksiyon karışımlarının reolojik özelliklerini belirlemek amacıyla çökeltme, Marsh Hunisi, Vicat iğnesi ile dönmeli viskozimetre deneylerini yapmıştır. Deneyler üç farklı su/katı (s/k) oranlarında (0,75, 1,00, 1,25) yapılmıştır. Deneyler sonucunda, serbest basınç mukavemeti üzerinde en etkin parametrenin uçucu kül, en az etkin parametrenin ise bentonit olduğu ifade edilmiştir. Yine yapılan deneysel çalışmalar neticesinde, priz başlama süresi üzerinde en etkin parametrelerin silis dumanı ve uçucu kül olduğu, priz bitiş süresinde ise bentonit ve uçucu kül olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, dane çapı aralığı 2-10 mm olan çakıl zemin kalıplara % 70 rölatif sıklıkta yerleştirilmiş iki farklı enjeksiyon katkı oranları (% 0 bentonit + % 10 uçucu kül + % 20 silis dumanı ve % 3 bentonit + % 10 uçucu kül + % 20 silis dumanı) ve uç farklı s/k oranlarında 1 atmosfer basınçta enjeksiyon yapılmış numunelerin 7, 14 ve 28 günlük serbest basınç mukavemetleri belirlenmiş ve sadece çimento kullanılarak hazırlanmış numunelerle karşılaştırılmıştır. Deneyler sonucunda, sadece çimento kullanılarak yapılan enjeksiyondan elde edilen numunelerin serbest basınç mukavemetleri katkılı numunelerden daha düşük çıkmıştır. Bunun sebebinin ise, çimento ile yapılan karışımın çökeltme yüzdesinin fazla, priz süresinin uzun ve viskozitesinin iyi olmadığından kaynaklandığı ifade edilmiştir.

Soga *et al.* (2004) yaptıkları çalışmada, 1-10 arasında değişen farklı aşırı konsolidasyon oranlarında hazırlanan numuneler üzerinde laboratuvarda çoklu enjeksiyon deneyleri yapmışlardır. Çatlatma enjeksiyonu için iki tip enjeksiyon yöntemi incelemişlerdir. Kompaksiyon enjeksiyonunu temsilen balon genişleme testi ve çatlatma enjeksiyonunu temsilen de epoksi enjeksiyonunu uygulamışlardır. Epoksi enjeksiyonunun balon genişletmeden daha az enjeksiyon etkisi olmasına karşın çatlakların oluşturulmasında ortaya çıkan boşluk suyu basınçlarının büyük olması nedeniyle her iki enjeksiyon tekniğinin de enjeksiyon süresi ve enjeksiyon kuyusu aralıklarında aynı etkilere neden olduğunu ifade etmişlerdir.

Kavak ve Mutman (2005) yürüttükleri çalışmada, sıvılaşma riskini taşıyan zemin numunesine enjeksiyon yapmışlar ve mukavemetin su/çimento ve enjeksiyon basıncı ile değişimini incelemişlerdir. Japonya İnşaat Mühendisleri Birliğinin sunduğu, sıvılaşma riski bulunan bölgede kalan zemin gradyonu kullanılarak % 25±5 rölatif sıklıkta kalıplar içerisinde numuneler hazırlamışlardır. Hazırlanan numuneler üzerinde laboratuvar, 100, 150, 200 kPa basınç altında su/çimento oranı 1/1, 1,5/1 ve 2/1 olan çimento karışımı kullanılarak enjeksiyon deneyleri yapmışlardır. Enjeksiyon yaptıkları numuneleri 7 ve 28 gün kürde bekleterek serbest basınç deneyleri yapmışlardır. Yapılan enjeksiyon deneyleri sonucunda, çimento karışımının su oranı arttıkça yetersiz enjeksiyon uygulanmış numune sayısının arttığı ve bunun çökelme miktarının artmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Sabit enjeksiyon basıncı altında su/çimento oranının artmasıyla serbest basınç mukavemetlerinde düşüşler olduğunu bildirmişlerdir.

Özgan *et al.* (2007) çalışmalarında, düşük poroziteli zemin örneklerine laboratuvar ortamında çimento enjeksiyonu uygulamışlardır. Çalışmada, MICROCEM 900 H tipi çimentoya farklı tip ve oranlarda super akışkanlaştırıcı ile katkı maddeleri kullanarak farklı zemin numunelerine enjeksiyon yapmışlardır. Yaptıkları deneyler sonucunda, 28 gün sonundaki en büyük basınç dayanımının (118 kgf/cm²), 20/80 kum-çakıl oranına sahip, rölatif sıklığı % 35, 6 atmosfer enjeksiyon basıncına maruz bırakılan ve % 5 oranında SAK ilave edilmiş zemin numunelerinden ve en düşük basınç dayanımının (63 kgf/cm²), 40/60 kum-çakıl oranına sahip, rölatif sıklığı % 35, 2 atmosfer enjeksiyon basıncına maruz bırakılan ve % 3 oranında Na₂Si₄ ilave edilmiş zemin numunelerinden elde edildiğini belirtmişlerdir.

Mutman ve Kavak (2007) yaptıkları çalışmalarında, zemin sıvılaşma riskini azaltmak için arazide kumlu zeminde düşük basınçlı çimento enjeksiyonu uygulamışlardır. Enjeksiyon yapılmadan arazide SPT ve CPT deneyleri yapılmıştır. Geoteknik özellikleri belirlenen zeminde belli aralıklarla derinliğe bağlı olarak s/ç=1 olan enjeksiyon harcı 100 ve 150 kPa basınçla zemine enjekte edilmiştir. Enjeksiyon uygulamasından 28 gün sonra arazide tekrar SPT ve CPT deneyleri yapılmıştır. Enjeksiyon uygulamasından önce ve enjeksiyon uygulandıktan sonra yapılan arazi deneylerinden elde edilen sonuçlar kullanılarak zeminin sıvılaşma potansiyelinin değişimi incelenmiştir. Enjeksiyon sonrasında SPT-N sayılarının % 30 oranında arttığı belirtilmiştir. Enjeksiyon sonrasında CPT uç dirençlerinin 4,5-8 m aralığından çok fazla değişmediği 8m'den sonra ise %50 civarında arttığı belirtilmiştir. Arazide yapılan çalışmalar sonucunda, kumlu zeminlerde düşük basınçlı çimento enjeksiyonunun sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısını arttırdığı ifade edilmiştir.

Mutman (2007) tarafından yapılan Doktora tez çalışmasında, laboratuvarında % 25, % 50, % 75 ve % 100 rölatif sıklıkta hazırlanmış GP ve SP sınıfı iki farklı zemine, 100, 150 ve 200 kPa basınçlar altında, 0,7, 1,0, 1,5 su/çimento oranında çimento enjeksiyonu yapmıştır. Enjeksiyon yapılmış numuneler 7 ve 28 gün kür edildikten sonra serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Ayrıca, seçilen üç arazide yerinde çimento enjeksiyonu yapmıştır. Enjeksiyon öncesinde ve sonrasında arazide SPT, CPT ve sismik kırılma deneyleri yapılmıştır. Su/çimento oranı 1 olan enjeksiyon harcı, enjeksiyon yapılacak derinliğe bağlı olarak 100, 150, 200 kPa basınç ile enjekte edilmiş ve 28 gün sonra tekrar geoteknik özellikleri belirlenmiştir. Laboratuvarında yapılan deneyler sonucunda, enjeksiyon basıncının değişiminin serbest basınç mukavemeti üzerinde etkisi olmadığı ve serbest basınç mukavemetinin harcın su/çimento oranı ile ters orantılı olduğu belirtilmiştir. Arazi çalışmaları sonucunda ise, V_p ve V_s hızlarında % 64 ve % 36 artışlar olduğu ifade edilmiştir. Yapılan iyileştirme sonucunda yerel zemin sınıflarının bir sınıf yükseldiği belirtilmiştir.

Avcı (2009) yaptığı yüksek lisans çalışmasında, sabit s/ç oranlı katkısız ince taneli çimento(Ultrafin 12) enjeksiyonunun farklı tane çaplı ve rölatif sıklıklardaki kum zeminlere ve farklı su/çimento oranlı katkısız ince taneli çimento enjeksiyonunun sabit rölatif sıklıkta ve farklı tane çapına sahip kum zeminlere enjeksiyon yapılabilirliğini araştırmıştır. Enseksiyon yapılan numuneler üzerinde permeabilite ve mukavemet deneyleri yapmıştır. Farklı su /çimento oranlarına (0,6, 0,8, 1,0, 1,2, 1,5, 2,0, 2,5, 3,0, 3,5, 4,0) sahip süspansiyonların reolojik özellikleri (sedimentasyon, Vicat iğnesi, Marsh Hunisi) belirlenerek en optimum su/çimento oranı seçilmiştir. İnce kum içeren numunelere yapılan enjeksiyon deneylerinin oldukça başarılı olduğu belirtilmiştir. Rölatif sıklığın artmasının enjeksiyon edilme kabiliyetini düşürdüğü ifade edilmiştir. Su/çimento oranının artmasıyla enjekte edilebilirliğin arttığı tezde belirtilmiştir. Su/çimento oranı 1,5’da ve ince kum oranı % 100 de dahil olmak üzere tüm ince kum numunelerinde enjeksiyonun başarılı olduğu ifade edilmiştir. Enjeksiyonu başarılı olan numuneler 1, 3, 7, 14, 28 ve 56 gün kür edildikten sonra mukavemet deneyleri yapmışlardır. Rölatif sıklığın ve s/ç oranının artmasıyla muvavemetin düştüğü belirtilmiştir. Ayrıca ince kum yüzdesinin artmasıyla mukavemet değerlerinin düştüğü ifade edilmiştir. Enjeksiyon başarılı olmuş numunelere üzerinde permeabilite deneyleri yapılmış ve numunelerin geçirimsiz olduğu belirlenmiştir.

Tekin ve Mollamahmutoğlu (2010) yürüttükleri çalışmada, çok ince taneli çimento karışımının farklı tane çaplı kum zeminlere enjekte edilebilirliğini araştırmışlardır. Enjeksiyon edilebilirliğin, groutların reolojik özellikleri, enjeksiyon basıncı, kum zeminlerin dane çapı dağılımı, rölatif sıklık ve ince tane yüzdesi ile değiştiği ifade edilmiştir. Yaptıkları çalışmada,

ince, orta ve iri kumlardan oluşan ve ince kum yüzdesi 10, 15, 20, 25 ve 30 olan numunelere, s/ç oranı 0,8, 1,0, ve 1,2 groutların enjeksiyon deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçları literatürdeki enjekte edilebilirlik ilişkileriyle karşılaştırmışlardır. Yaptıkları deneyler sonucunda, ince kum yüzdesinin ve s/ç oranının enjekte edilebilirliği kontrol eden en önemli parametre olduğunu ifade etmişlerdir.

Tekin ve Akbaş (2010) yaptıkları çalışmada, çok değişkenli istatistiksel bir yöntem olan diskriminant analizinin, enjeksiyon edilebilirliğin tahmin edilmesinde kullanılabilirliğini incelemiştir. Enjekte edilebilirliğin, süspansiyonun reolojik özellikleri, enjeksiyon basıncı, zeminin dane çapı dağılımı, zeminin rölatif sıklığı ve ince dane miktarı ile değiştiğini göz önünde bulundurarak, önceki çalışmalardan 88 adet enjeksiyon verisi kullanarak diskriminant analizi yapmışlardır. Diskriminant fonksiyonları oluşturulan iki ayrı model kullanılmıştır. Yaptıkları Diskriminant analizi sonucunda, enjekte edilebilirliğin tahmin edilmesinde en önemli parametrenin zeminin ağırlıkça %15'inin geçtiği elek çapının (D_{15}), enjeksiyon malzemesinin ağırlıkça %85'inin geçtiği elek çapına (D_{85}) oranı olduğunu belirtmişlerdir. Oluşturulan modellerden birincisi, literatürde yer alan ampirik yöntemler ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırıldığında, bu modelin, kullandığı az sayıda değişkene rağmen, var olan yöntemlerin içerisinde en iyi ikinci sonucu verdiğini ifade etmişlerdir.

Mollamahmutoğlu ile Yılmaz (2011) yürüttükleri çalışmada, Rheocem 900 ile süperakışkanlaştırıcı katkı ve katkısız hazırlanan mikro ince çimento süspansiyonlarının yalnızca kimyasal enjeksiyonun uygulanabildiği çeşitli gradasyona sahip ince-orta kum zeminlere enjekte edilebilirliğini incelemiştir. İlk olarak mikro ince çimentonun viskozite, priz süresi ve duraylılık gibi reolojik özelliklerini belirlemişlerdir. Ayrıca, groutların farklı enjeksiyon basınçları altında farklı derecelenmiş ince ile orta kumlara enjekte edilebilirliğini araştırmışlardır. Son olarak, başarılı enjeksiyon yapılmış numunelerin dayanım ve permeabilite özelliklerini incelemiştir. Yaptıkları deneysel çalışma sonucunda, super akışkanlaştırıcı katkısının mikro ince çimentonun enjeksiyon performansının büyük ölçüde arttırdığını ve enjeksiyon basıncını düşürdüğünü ifade etmişlerdir. Ayrıca, katkısız çimento enjeksiyonu yapılan numunelerin serbest basınç dayanımının, super akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılarak enjeksiyon yapılan numunelerden biraz düşük olduğu görülmüştür. Süper akışkanlaştırıcı içeren ve içermeyen çimento esaslı harçlarla enjekte edilmiş zemin numunelerinin permeabilite katsayıları tüm numunelerde, $k < 1,10^{-7}$ m/s olmuş, dolayısıyla numunelerin geçirimsiz oldukları belirtilmiştir.

Tan vd (2014) yaptıkları deneysel çalışmada, çimento esaslı enjeksiyon harçlarında uçucu kül (% 10, % 20, % 30 ve % 40), silis dumanı (% 0, % 5, % 10 ve % 20 ve bentonitin (%

0, % 0,5, % 1 ve % 3) katkı malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırmışlardır. Deneylerde Taguchi optimizasyon yöntemi kullanılmış ve üç faktörlü ve dört seviyeli L16 Ortogonal Dizisi (OA) seçilmiştir. Granül zemin % 70 rölatif sıklıkta kalıplara yerleştirilmiş ve daha sonra enjeksiyon işlemi yapılmıştır. Enjeksiyon yapılmış numuneleri 7, 14 ve 28 gün kür ettikten sonra serbest basınç dayanımlarını belirlemişler ve katkıların serbest basınç üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Yaptıkları deneyler sonucunda, katkılı enjeksiyon harçlarının sadece su ve çimento ile hazırlanan harçlardan daha yüksek serbest basınç mukavemeti verdiğini ve en etkin parametrenin silis dumanı olduğunu ifade etmişlerdir. Mukavemetler üzerinde en az etkisi olan katkının ise bentonit olduğu belirlenmiştir.

Çelik (2017) yaptığı çalışmada, portland çimentosu ile kırmızı çamurun zemin enjeksiyonunda kullanılabilirliğini araştırmıştır. Deneylerde, silindir kalıplarda hazırlanmış kum zemin numuneler çimento ve %0, % 5, % 10, % 15, % 20, % 25, ve % 100 kırmızı çamur ile enjekte edilmiş, 7 ve 28 gün kür edildikten sonra, Serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Ayrıca, 28 günlük numuneler üzerinde XRD, SEM ve TG/DTG deneyleri de yapılmıştır. Maksimum Serbest basınç mukavemetinin %15 kırmızı çamur ve %85 çimento içeren numunelerden elde edildiğini ifade etmiştir. XRD, SEM ve TG/DTG sonuçlarına göre, çimentoya kırmızı çamur dahil edildiğinde, portlandit miktarında artış gözlenmiştir.

Markou *et al.* (2017) yaptıkları çalışmada, enjeksiyon noktasından olan mesafenin ve çimento, süspansiyon ve kum ile ilgili parametrelerin mikroçimento harçlarının etkinliği üzerindeki etkisini değerlendirmek için deneysel bir araştırma yapmışlardır. Her biri 100, 20 ve 10 μ m nominal maksimum tane çaplarına sahip üç farklı çimento tipi kullanılmıştır. Enjeksiyonun etkinliği, özel olarak oluşturulmuş bir aparat kullanılarak, farklı tane boyutlarına sahip beş üniform kum fraksiyonuna ve farklı gradasyonlara sahip sekiz kompozit kuma ağırlıkça 1, 2 ve 3 su-çimento (s/ç) oranlarına sahip süspansiyonlar enjekte edilerek değerlendirilmiştir. 28 ve 90 gün kürlendikten sonra elde edilen enjeksiyonlu kum numuneler üzerinde serbest basınç ve permeabilite deneyleri yapılmıştır. Mikro çimento enjeksiyonlu kumlar, 14,9 MPa'ya kadar serbest basınç dayanımı değerleri ve $1,3 \times 10^{-6}$ cm/sn kadar düşük veya temiz kumlardan 5 kat daha düşük permeabilite katsayıları elde edilmiştir. s/ç oranı ve süspansiyonların kusma kapasitesinin yanı sıra kumların efektif tane çapı ve permeabilite katsayısının da çok önemli parametreler olduğu belirtilmiştir. Enjeksiyon noktasından uzaklaştıkça enjeksiyonlu kum özelliklerinin iyileştirilmesi, enjeksiyonlu kumların çimento içeriğinde gözlemlenen artışla tutarlı olduğu ifade edilmiştir.

Çelik *et al.* (2018) çalışmalarında, kötü derecelenmiş kum zeminin iyileştirmesi için polyester kullanmışlardır. Deneysel çalışmada, katkı maddesi olarak farklı yüzdelerde

mikronize kil ve kırmızı çamur seçilerek enjeksiyon yapmışlardır. Numuneleri 1, 3 ve 7 gün kür ettikten sonra serbest basınç ve dinamik deneyler yapmışlardır. Kür süresi ve katkı maddelerin yüzdeleri arttıkça serbest basınç mukavemeti ve sönümlleme oranı değerlerinde artış gözlemlendiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, sadece polyesterle enjekte edilmiş numunelerin en düşük serbest basınç mukavemeti değerlerine sahip olduklarını ifade etmişlerdir.

Zhang *et al.* (2018) yaptıkları çalışmada, kil dozajı ve su/çimento oranlarının kil-çimento harcının performansı üzerindeki etkisini araştırmak için deneysel bir çalışma sunmuşlardır. Mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılan su/çimento oranları 0,5'ten 2'ye ve kil dozajları % 5'ten % 45'e kadar değiştirilerek 20 grup harç numunesi tasarlamışlardır. Sonuçlar, kil-çimento harcının optimal performansının yüksek oranda kil dozajına ve su/çimento oranına bağlı olduğunu göstermişlerdir. Genel olarak, daha yüksek kil dozajı ve daha düşük su/çimento oranının, stabiliteyi iyileştirdiği ve kil-çimento harcının daha düşük geçirimsizliğe yol açtığı, ancak akışkanlık ve mukavemet açısından zayıf bir performansa yol açtığını ifade etmişlerdir. Çeşitli saha taleplerini karşılamak için optimum kil dozajını ve su/çimento oranını belirlemek için bir metodoloji önermişlerdir. Sunulan yöntemin uygulanabilirliği ve ekonomik faydaları, kil-çimento harcı için optimum içerik dozajının belirlenmesine yönelik çerçevenin etkinliğini de gösteren ayrıntılı bir vaka çalışması ile değerlendirmişlerdir.

Gopinathan ve Anand (2018) yaptıkları çalışmada, performansı iyileştirilmiş bir çimento enjeksiyon harcı elde etmeyi amaçlamışlardır. Performansı yüksek grout elde etmek için çimento, ultra ince cüruf (UFS), süper akışkanlaştırıcı ve su kullanmışlardır. Çimento enjeksiyon harçlarının akışkanlık, kuma, basınç dayanımı ve büzülme gibi özelliklerini incelemişlerdir. Groutların reolojik özelliklerini de ayrıca incelemişlerdir. Yaptıkları deneyler sonucunda, harçlarda cüruf ile çimento ikamesinin, karışımların işlenebilirliğini etkilemeden kumayı önemli ölçüde azaltılabileceğini göstermişlerdir. Cürufun eklenmesinin basınç dayanımını arttırdığı ve büzülme miktarını makul ölçüde azalttığını ifade etmişlerdir. Bu durumda maksimum değerler, Su/Çimento oranı 0,35, (SNF) oranı %5 ve Su/Çimento oranı 0,30, (PCE) oranı %15 karışımlardan elde edilmiştir. Ultra ince cürufun, harç davranışını iyileştirmek için çimento esaslı harçlarda kullanılabileceğini göstermişlerdir. Sulphonated Naphthalene Formaldehyde' (SNF) ve 'poly carboxylate ether' (PCE) süper akışkanlaştırıcı içeren groutlarda çimento oranı sırayla %10 ve %15 miktarlarda azaltılmış ve yerine cüruf eklendiğinde, sızdırmazlık elde edilmiştir.

Furuncu (2019) yaptığı çalışmada, çimento içeren enjeksiyon harçlarının hazırlamasında farklı s/ç oranlarında naftalin sülfonat esaslı süper akışkanlaştırıcı kullanmıştır.

Hazırlanan karışımlar kullanılarak, % 45 ve % 55 rölâtif sıklıkta tanklara yerleştirilmiş kum zeminlerde jet grout kolonları oluşturulmuştur. Çalışma sonucunda, s/ç oranı 1,0 ve 1,5 olan enjeksiyon karışımları zemine enjekte edilebilirken, kullanılan naftalin sülfonat kökenli yapı kimyasalının süper akışkanlaştırıcı özelliğinden dolayı enjeksiyon harcının işlenebilirliği arttırılmıştır. Karışımlarda süper akışkanlaştırıcı kullanmasından dolayı s/ç oranı 0,60 olan enjeksiyon harcı ile enjeksiyon işlemi başarılı bir şekilde yapılmıştır. Kolonların hazırlamasından 28 gün geçtikten sonra, kolonlar zeminden çıkarılmış ve kolonlar üzerinde boyut analizi yapılmıştır. Boyut analizleri tamamlandıktan sonra, kolonların homojen olan kısımlarından yeterli sayıda karot numuneleri alınmış ve bu numunelerin üzerinde mukavemet analizleri yapılmıştır. Sonuçlara göre, s/ç oranı aynı olan ve katkı maddesi içeren kolonların çap ve yüksekliğinin arttığı görülmüştür.

Pekrioglu Balkis (2020) yaptığı çalışmada, süperakışkanlaştırıcı içeren ve süperakışkanlaştırıcı içermeyen hazırlanan yüksek hacimli uçucu kül çimento süspansiyonlarının %30, %60, %73 ve %83 farklı rölâtif sıklıklara sahip kumlu zemine sızma enjeksiyonu yoluyla enjekte edilebilirliğini araştırmıştır. Çalışmada, puzolanik aktivitesi ve inceliği nedeniyle C sınıfı uçucu kül kullanmıştır. Bulgulara göre, uçucu kül-çimento harçları hazırlandıktan sonra uygun bir süre için nispeten sabit ve düşük viskozite değerlerine sahiptir, sınırlı veya ihmal edilebilir sızdırma kapasitesi sergiler ve nispeten kısa bir süre içinde tatmin edici bir mukavemet oluşturur ve geliştirir. Zemin enjeksiyonu laboratuvarında yapılmış ve elde edilen zeminin fiziksel ve mekaniksel özelliklerindeki incelenmiştir. Deney olarak, enjekte edilmiş zeminin serbest basınç dayanımı, kesme mukavemet dayanımı ve geçirgenlik özellikleri yapılmıştır. Numunelerin serbest basınç dayanımı değerleri 410 ile 1107 kPa arasında, içsel sürtünme açısı 45,2 ile 55 arasında, Kohezyon değerleri uçucu kül süspansiyonu için 373 ile 511 kPa, çimento için 2200 ile 2987 kPa ve uçucu kül-çimento karışımı için 325,2 ile 472,7 kPa arasında değişmiştir. Enjekte edilmiş kum zemin numunelerinin permeabilite katsayıları 7 günlük numuneler için $9,56 \times 10^{-6}$ ile $1,3 \times 10^{-4}$ cm/sn arasında, 28 günlük numuneler için $7,3 \times 10^{-7}$ ile 1×10^{-5} cm/sn arasında belirlenmiştir. Sonuçlar, kum zeminin geçirgenliğinde 3-6 büyüklük derecesinde bir iyileşme olduğunu göstermiştir.

Jafarpour *et al.* (2020) yaptıkları çalışmada, zemin enjeksiyonu uygulamalarında çimento kullanımını azaltmak için, çimento ağırlığının %0, %10, %30, %50, %70 ve %90 oranında zeolit kullanmışlardır. Üç farklı Su/Katkı (3, 5 ve 7) oranlarda hazırlanmış zeolit-çimento groutlar, çapı 50 ve boyu 100 mm olan silindir kalıplarda %30 rölâtif sıklıkta yerleştirilmiş ve 100, 300 ve 500 kPa basınç altında enjeksiyon yapmışlardır. Toplamda hazırlanmış oldukları 57 numune üzerinde üç eksenli (CU) deneyi yapmışlardır. Sonuçlara göre,

enjeksiyon yapılmış numunelerin pik deviatör gerilmesi (q_{max}) % 50 oranında zeolit kullanımına kadar artmış daha sonra azalmıştır. Ayrıca su/çimento oranı arttıkça enjeksiyon yapılmış numunelerin mukavemeti azalmıştır. Grout karışımında %30 oranına kadar zeolit kullanımının numunelerin içsel sürtünme açılarını arttırmıştır.

Vasumithran *et al.* (2020) yaptıkları çalışmada, zemin enjeksiyonu işlemlerinde kullanılan çimento esaslı harçları geliştirmek için çimentoya ince kum ve uçucu kül gibi dolgu maddelerinin eklenmesinin, hazırlanan harçların akışkanlık ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Yaptıkları deneysel çalışmada, karıştırma işlemi sırasında polikarboksilat eter esaslı süper akışkanlaştırıcı kullanmışlardır. Deneysel çalışmada farklı bileşimlerde groutlar hazırlamışlardır. Tüm enjeksiyon çalışmalarında, çimento ağırlığının %10'u oranında silis dumanı ve belirli karışımlarda ise çimento ağırlığının % 50'ye kadar oranlarda dolgu maddesi kullanılmış, taze ve sertleşmiş durumda özellikleri değerlendirilmiştir. Sonuçlara göre, su/çimento oranı arttıkça aşırı kuma, harç kararsızlığı, uzun priz süerleri ve düşük mekanik dayanım problemlerinin ortaya çıktığından bahsedilmiştir. Silis dumanı içeren karışımların düşük su/çimento oranlarında işlenebilirliğinin zor olduğu buna karşın diğer grout karışımlarına göre daha iyi dayanım verdiği belirtilmiştir. İnce kum ve uçucu kül içeren harçların, sadece silis dumanı içeren çimento harçlarına kıyasla düşük erken yaş dayanımları gösterdiği çalışmada belirtilmiştir. Ayrıca, dolgu maddesi olarak ince kumlu harçlar, çimento harçlarına göre büzülme ve su emme için performansının iyileştiğinden bahsetmişlerdir.

Lee *et al.* (2021) yaptıkları çalışmada, zemin enjeksiyonu uygulamalarında biyopolymer esaslı grotların kullanılabilirliklerini incelemişlerdir. Deneysel çalışmada, biopolymer olarak 'Xanthan gum' (XG), zemin olarak üç farklı tane boyutuna sahip cam boncukları ve kötü derecelenmiş (SP) kumu kullanmışlardır. Cam boncukları, (XG) hidrojelini enjekte edilebilirliği üzerindeki etkilerini dikkate almak için kullanmışlardır. Yaptıkları doğrusal enjeksiyon sonuçlarına göre, enjeksiyonun başarılı olması, enjeksiyon basıncı ve biopolymerin yoğunluğuna bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Biopolymer yoğunluğunun artmasının enjeksiyon performansını negatif etkilediğini belirtmişlerdir. Taneli bir ortama (XG) enjeksiyonu uygulanması sonucunda, gözenek boyutunun maksimum enjeksiyon hacmini etkilediğini izlemişlerdir. Enjeksiyon malzemesi olarak XG biyopolimerin kullanılmasının hidrolik iletkenliğin azalttığını belirtmişlerdir.

Spagnoli (2021) yaptığı review makalesinde, zemin enjeksiyonu uygulamalarında geleneksel olmayan grotların kullanılmasını gözden geçirmiştir. Çalışmada, sodyum silikat, kolloidal silika, reçineler, polimerler ve ince taneli çimento maddelerinden elde edilmiş harçların kum ve kohezyonlu zeminlerde yapılan enjeksiyon çalışmalar gözden geçirilmiştir.

Bulgulara göre, epoksi reçinesi içeren harçların UCS değeri, sodyum silikat, koloidal silika ve polimer içeren harçlara göre daha fazla çıkmıştır. Bulgulara göre reçine, daha yüksek D_{50} değerleri için daha yüksek UCS değerleri vermiştir. Sodyum Silikat, koloidal silika grotların UCS değerleri 1 MPa civarındayken, çeşitli polimer harçların UCS değeri 10 MPa olmuştur. Genel olarak ince taneli çimento içeren harçlarla uygulanmış zeminlerin UCS değerleri, çimentosuz harçlarla elde edilen değerlerden daha yüksek olmuştur. Süper akışkanlaştırıcılar veya bentonit gibi katkı maddeleri permeabiliteyi arttırmıştır ancak numunenin mukavemetini azaltmıştır. Genel olarak, kimyasal maddelerle enjeksiyon edilmiş zeminler, işlem görmemiş zemin numunelere kıyasla sıvılaşma direncini iyileştirmiştir.

Olgun *et al.* (2021) yaptıkları çalışmada, üç farklı bağlayıcı türünün Jet Grout kolonlarının performansı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Bağlayıcı olarak ince taneli çimento (DMFC-800), Portland Çimentosu (OPC) ve ağırlıkça %10 silis dumanı (SF) içeren Portland çimentosu kullanmışlardır. Farklı su/çimento (W/C) oranlarında enjeksiyon karışımları hazırlayarak Jet Grout kolonları üretmişlerdir. Maksimum serbest basınç dayanımı (UCS) değeri ince taneli çimentolu numunelerden elde edilirken (W/C = 1,0 için maks. UCS = 24,6 MPa), Portland çimentosu + %10 silis dumanı içeren numunelerden de çok yüksek dayanım elde etmişlerdir. Portland çimentosu + %10 silis dumanı içeren karışımların kullanıldığı numunelerin maksimum yarmada çekme dayanımı (STS) değerlerinin (W/C = 1,25 için, STS = 3,62 MPa) olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, permeabilite deneyleri sonrasında, DMFC-800 ve OPC + %10 SF kaynaklı karışımların kullanıldığı kolonların diğer bağlayıcılardan yapılan kolonlara göre en düşük permeabilite katsayılarını gösterdiğini gözlemlemişlerdir (min. $k = 0,1124 \times 10^{-8}$ m/s). Taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntü analizi, DMFC-800 çimento ve Portland çimentosu + % 10 silis dumanı içeren karışımın taneler arasındaki boşlukları azalttığını ve enjeksiyon karışımının bağlanma kabiliyetini arttırdığını ortaya koymuşlardır.

Geoteknik alanında nano malzemeler ile ilgili yapılmış çalışmalar

Zhang *et al.* (2007), zemini 1-100 nanometre ile birkaç santimetre büyüklükteki taneciklerden oluşan bir madde olarak tanımlamaktadırlar. Yazarlara göre doğadaki nanoparçacıklar genel olarak üç biçimde bulunmaktalar: 1- nanoboru, 2- nanoparçacık ve 3- nanosayfa. Nanoparçacıklar çok küçük ölçüleri ve yüksek özel yüzeyleri nedeniyle araştırmalarda adeta bir sayfa biçiminde görünürler. Bu nanoparçacıklar zeminin diğer taneciklerinin yanında tamamen etkin şekilde bulunurlar ve zeminin fiziksel, kimyasal ve mühendislik özelliklerini önemli derecede etkilerler. Nanoparçacıkların birbirine yaptığı

etkiden dolayı, kıvam limitleri önemli derecede etkilenmektedir. Zeminlerin kesme ve basınç dayanımı özellikleri nanomalzeme olduğu durumda önemli derecede değiştiği ifade edilmiştir.

Taha and Taha (2012) yaptıkları çalışmada, nano kil, nano alümina ve nano bakır olmak üzere üç çeşit nano malzemeyi değişik oranlarla bentonite ekledikten sonra zeminle karıştırıp zeminlerin fiziksel, kimyasal ve mühendislik özelliklerini incelemişlerdir. Optimum miktarda nano malzemelerin zeminlere karıştırılması durumunda çatlamanın azaldığı ve elektrik iletkenliğinin değişmediğini belirtmişlerdir. Nano malzemeler eklendiğinde zeminin en çok optimum su muhtevası, basınç dayanımı ve yoğunluğunun arttığını ifade etmişlerdir. Nano malzeme içeriğinin belirli bir oranında zemin özelliklerinin iyileştiği belirtilmiştir. Örneğin; nano kil belirli bir oranda dayanım ve yoğunluğu olumsuz etkilediği ve nano bakır içeriğinin artması nano alümina artmasına göre dayanım ve yoğunluk üzerinde daha etkili olduğu ifade edilmiştir. Nano bakır parçacıkları kullanıldığında yoğunluk, nano alümina parçacıklarına göre daha fazla olduğu ve karışımın yoğunluğunun daha fazla arttığı belirtilmiştir. Ayrıca, nano malzeme içeriğinin artması zeminin hidrolik özelliğini değiştirmeden elektrik iletkenliği arttırdığı ifade edilmiştir.

Majed and Taha (2012), nano Cu, nano MgO ve nano kil dahil olmak üzere farklı nanomalzemelerin eklenmesinin Penang Eyaletinden alınan yumuşak zemin örneklerinin geoteknik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmayı amaçlamışlardır. Nano malzemelerin zeminin kompaksiyon karakteristikleri, kıvam limitleri ve basınç dayanımı üzerindeki etkilerini incelemek için zemine çeşitli miktarlarda nanomalzemeler eklemişlerdir. Eklenen her bir nano malzemenin yüzdesi arttıkça ve eklenen nano malzemenin türüne bağlı olarak bu geoteknik özelliklerdeki iyileştirmeler zeminin maksimum kuru yoğunluğunu arttırdığını belirtmişlerdir. Artan nanomalzeme içeriği ile lineer büzülme ve plastisite indisinin azaldığını ifade etmişlerdir. Zeminde nanomalzeme içeriği belirli bir yüzdeye kadar arttıkça serbest basınç dayanımının arttığı ve daha sonra azaldığı çalışmada belirtilmiştir.

Zahedi *et al.* (2014) yaptıkları çalışmada, in vitro koşullarda donmaya maruz kalan killi zeminlerin direnci üzerine nano kilin etkisini araştırmayı amaçlamışlardır. Kil numunesi, dikkate alınan araziden seçilmiştir. Uzunluğu 7,62 cm ve çapı 3,81cm olan silindir kalıplarda sadece kil ve kil yüzdesinin % 1,5, % 3, % 4,5 ve % 6 oranlarda nano kil eklenmiş kil numuneler hazırlanmış, 3 kez donma-çözülme döngüsüne maruz bırakmışlardır. Yüzde 1,5, 3, 4,5 ve 6 oranında nanokil eklenmesinin donma döngüleri sırasında zemin mukavemetini azaltacağını göstermişlerdir. Nanokil ilavesi numunelerin özgül yüzeyini arttıracığından; sonuç olarak, artan elektrik yükü su emilimini arttırdığı, bu da kısmen zemin mukavemetinde etkili olmayan nanokil artışına neden olduğunu ifade etmişlerdir. Nem oranı düşük olan zeminler ile daha

yüksek nemli olan zeminlerin basınç dayanımları arasında da önemli bir fark olduğunu ifade etmişlerdir. Artan nemin mukavemet seviyesini azalttığını, numunelerin nanokil tarafından su absorpsiyonunun artmasının mukavemet azalmasının nedeni olduğunu ifade etmişlerdir.

Kalhor *et al.* (2019) tarafından yapılan çalışmada, donma-çözünme döngülerinin nanoparçacıklarla stabilize edilmiş numuneler üzerindeki etkileri araştırmışlardır. Nano silika ile karıştırılmış killi bir zemin üzerinde Standart Proktor, Atterberg limitleri ve serbest basınç deneyleri yapmışlardır. Numuneleri 42 gün kürde bekletmişlerdir. Yaptıkları deneyler sonucunda, nano-silika ile stabilize edilmiş numunelerin optimum su içeriği, likit limit ve plastik limitin arttığını maksimum kurum birim ağırlığın ve plastisite indisinin azaldığını belirtmişlerdir. Nano silikanın %2'ye kadar artması ve kür süresinin 42 güne kadar artması, serbest basınç dayanımını yaklaşık % 63 oranında iyileştirdiği belirtilmiştir. Ayrıca nano silika dakı artış numunelerin kırılma davranışına yol açtığı ifade edilmiştir. Donma-çözünme döngüsü arttıkça numunelerin serbest basınç mukavemetlerinin azaldığı belirtilmiştir. Dokuz donma-çözünme döngüsünden sonra, %2 nano silika ile işlenmemiş ve işlenmiş zeminin dayanımı sırasıyla yaklaşık %64 ve %42 azaldığı ve donma-çözünme döngülerinin artmasıyla, stabilize edilmiş numuneler daha fazla süneklik sergilediği belirtilmiştir.

Samala and Mir (2020) yaptıkları çalışmada, nano silika malzemesi ile muamele edilmiş bir zeminin dayanım özellikleri araştırılmıştır. Çalışmada ayrıca, zeminler ve nano malzemeler üzerinde XRD ve SEM analizleri yapılmıştır. İki yumuşak zemine % 0,5, % 1,0, % 1,5 ve %2,0 oranlarında nano silika katılmıştır. Zeminler üzerinde kompaksiyon, optimum su muhtevası, Atterberg limitleri, tane çapı dağılımı deneyleri yapılmıştır. Çalışmada, iki çeşit yumuşak zemin farklı sahalardan 1 metre derinlikten alınmış, deneyleri yürütmek için laboratuvara götürülmüşlerdir. Nanoparçacıklar, büyük özgül yüzey alanlarından dolayı, etkili bir şekilde zemindeki katyon, mineraller ve kil parçacıklarıyla reaksiyon göstermekte, dolayısıyla zeminde az miktarda bulunsalar bile zeminin fiziksel ve kimyasal yapısı ile mühendislik özellikleri üzerinde önemli etkileri bulunduğu ifade edilmiştir. İyileştirilmiş zeminlerin mukavemet özelliklerini belirlemek için optimum su muhtevasında zemin ve farklı yüzdelerde nano silika karışımları çapı 38 ve boyu 76 mm'lik silindir kalıplarda standart kompaksiyon yöntemi ile sıkıştırılmış, elde edilen numuneler UCS ve kesme kutusu deneylerine maruz bırakılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, zeminlerdeki nano silika yüzdesi arttıkça, zeminlerin maksimum kuru birim hacim ağırlıkları azalmış ve optimum su muhtevaları artmıştır. Optimum su muhtevaların artması zeminler ve nanopartiküller arasında meydana gelen sementasyon reaksiyonlardan kaynaklandığı ifade edilmiştir. Kür edilmemiş ve nano silika içeren zemin numunelerin UCS değerlerinde, 1. sahadan alınmış zeminde 2,7 ve 2. sahadan alınmış zeminde 2,5 kat artış

izlenmiştir. Bu durumda, zeminlerde kullanması gereken optimum nano silika oranı %1,5 olarak belirlenmiştir. 7 ve 14 gün kür edilmiş ve nano silika içeren 1. sahadan alınmış zemin numunelerin UCS değerlerinde sırayla 4,5 ve 5,5 kat artış görülmüştür. Bu durumda, zeminde kullanması gereken optimum nano silika oranı %1 ile %1,5 olarak belirlenmiştir. 7 ve 14 gün kür edilmiş ve nano silika içeren 2. sahadan alınmış zemin numunelerin UCS değerlerinde sırayla 2,5 ve 3,5 kat artış görülmüştür. Bu durumda ise, zeminde kullanması gereken optimum nano silika oranı %1 ile %1,5 olarak belirlenmiştir. Fazla oranda nano silika kullanması, UCS değerinin düşmesine neden olmuştur. Elde edilen SEM analizi sonuçlarına göre, nano silika içeren zeminlerdeki killerin yapısı, zamanla değişmiştir. Ayrıca, nano silika içeren zeminlerin kesme mukavemetlerinin de arttığı belirtilmiştir.

Karumanchi *et al.* (2020) yaptıkları çalışmada, nanokilinin kil zeminlerin mühendislik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Nano kil eklenmiş numunelerin plastisite indisi, özgül ağırlık, kompaksiyon, kesme mukavemeti ve permeabilite özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Yaptıkları çalışma sonucunda, Nanokil ile zeminin stabilizasyonu mükemmel sonuçlar verdiğini ve indeks ve mühendislik özellikleri gibi tüm geoteknik özellikleri iyileştirdiğinden bahsetmişlerdir. Bu çalışmada, Atterberg limitleri sonuçlarına dayanarak, maksimum kuru birim hacim ağırlığı $1,62 \text{ kN/m}^2$ ve optimum su muhtevası %18,18 olan düşük plastisiteli bir yumuşak kil (CL) zemine %0,05, %0,10, %0,15, %0,25, %0,50, %0,75, %1, %2, %3, %4 ve %5 kuru zemin ağırlığında nanokil eklenmiş ve modifiye edilmiş zeminin, mühendislik özellikleri araştırılmıştır. Tüm katkı maddesi oranlarında zeminin özgül ağırlığı hesaplanmış, % 0,15 katkı oranında 2,125'den 2,365'e yükselmiş ve diğer oranlarda azalmıştır. % 0,15 katkı oranında, kil zeminin plastisite indisi (PI) %21'den %19,5'a düşmüş, maksimum kuru birim hacim ağırlığı $1,62 \text{ kN/m}^2$ 'den $1,81 \text{ kN/m}^2$ 'ye yükselmiştir. Dolayısıyla, zemin içerisinde nanokilin optimum miktarı, % 0,15 olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, % 0,15 nanokil katkı oranındaki hazırlanmış zemin numunelerin gözenekleri tamamen dolmuş, dolayısıyla zemin tamamen geçirimsiz olmuştur. Nanokil ile iyileştirilmiş kil zeminin 18 günlük UCS değeri 36 kN/m^2 'den 128 kN/m^2 'ye yükselmiş, konsolidasyon oturma miktarı 4,2 mm'den 1,1 mm'ye düşmüştür.

Başka bir çalışmada, Karumanchi *et al.* (2020) Terrasil isimli bir nanokimyasal madde ile şişen zeminlerin iyileştirebilmesini araştırmışlardır. Çalışmada kullanılan kil zeminin plastisite indisi (PI) %31,91, maksimum kuru birim hacim ağırlığı $1,48 \text{ kN/m}^2$, optimum su muhtevası %26, UCS değeri $31,3 \text{ kN/m}^2$, permeabilite katsayısı $4 \times 10^{-6} \text{ cm/sn}$, konsolidasyon katsayısı $0,0014 \text{ cm}^2/\text{dk}$ ve nihai konsolidasyon oturması miktarı 3,354 mm olarak hesaplanmıştır. Bu verilere dayanarak deneylerde kullanılan zemin, plastisitesi yüksek kil (CH) olarak belirlenmiştir.

Deneylerde, kuru zemin ağırlığının %1,5 oranında çimento, daha sonra kuru zemin ağırlığının %0,02'den %0,07'ye kadar Terrasil nanokimyasal maddesi zemine ilave edilmiştir. %0,03 katkı değerinde, zeminin plastisite indisi %31,91'den %22,24'de inmiştir. Böylece Terrasil'in zemini daha fazla sertleştirdiği belirlenmiştir. Aynı katkı değerinde numunelerin 28 günlük UCS değeri, 31,3 kN/m²'den 75,5 kN/m²'ye çıkmıştır. Bu iyileşme, kimyasal maddesi ve zemin partikülleri arasındaki oluşan reaksiyondan kaynaklanmış, sonuç olarak suya karşı geçirimsiz bir zemin elde edilmiştir. İyileştirilmiş zeminin konsolidasyon katsayısı 0,0041 cm²/dk'dan 0,0322 cm²/dk'ya çıkmış, oturması 3,345 mm'den 0,82 mm'ye inmiştir. SEM analizi sonuçlarına göre, nanokimyasal maddesi ile iyileştirilmiş zeminin parçacıkları normal zemine kıyasla daha sıkı bir şekilde görünüyormuştur. Optimum karışım olarak, zemin + %1,5 çimento + %0,03 Terrasil kombinasyonu seçilmiştir.

Yousefi *et al.* (2020) yaptıkları çalışmada, katkı maddesi olarak çimento ve nano çimentonun, kil zeminlerin mekanik davranışları üzerinde etkisini araştırmışlardır. Çalışmada, kuru zemine ağırlığının % 1, % 2, % 3 ve % 4 oranlarında çimento ve nano çimento karıştırılmış ve numunler üzerinde Atterberg limitleri, standart kompaksiyon ve serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Numuneler 42 gün kür edilmiştir. Sonuçlara göre, kil zemine çimento ve nanoçimento ilave edilmesi neticesinde, zeminin likit ve plastik limitlerinde %30 artış izlenmiştir. Ayrıca zeminin plastisite indisi azalmıştır. Normal zeminle kıyasla, modifiye edilmiş zeminin maksimum kuru birim hacim ağırlığı %13 azalmış, optimum su muhtevası %18 artmıştır. Çimento ve nanoçimento ile iyileştirilmiş zemin numunelerin UCS değerinde normal zemin numunelerine göre 12 kat artış elde edilmiştir. Nanoçimento ile stabilize edilmiş numunelerde dayanımdaki artış miktarı, çimento içeren numunelerdekinden yaklaşık %16 daha yüksek çıkmıştır. 42 gün kür edilmiş normal zemin numunelerin UCS değeri 200 kPa iken, % 4 çimento oranı ile modifiye edilmiş zeminin UCS değeri 2113 kPa, % 4 nanoçimento ile iyileştirilmiş zeminin UCS değeri ise 2416 kPa olarak belirlenmiştir.

Ahmadi (2021), çalışmasında ince taneli kum zemine ve çimento ile iyileştirilmiş kum zemine nano boyutundaki SiO₂, MgO ve Al₂O₃ malzemelerin zeminin eksenel rijitliğindeki etkisini incelemiştir. Bu deneysel çalışmada farklı miktarlarda çimento ve nano malzemelerle silindirik numuneler hazırlandıktan sonra serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Sonuçlara göre nanomalzemeler zemin taneleri arasındaki boşlukları doldurmuş ve böylece partiküllerin daha iyi kenetlenmesini sağlamışlardır. Bu nedenle tanelerin arasındaki sürtünme artmış, kütle deformasyonu azaltmıştır. Elde edilen sonuçlara göre zemin ağırlığının %1 oranında nano malzeme kullanması durumlarda, zeminin eksenel rijitliğinde %24 artış izlenmiştir.

Rajabi *et al.* (2021) yaptıkları çalışmada, killi zemine nano demir oksit ilave ederek zeminin dayanım ve konsolidasyon parametrelerini incelemişlerdir. Bu amaçla doğal zemin

üzerinde indeks deneyleri yapılmış ve daha sonra zemine %0,5, %1, %2, %3, %4 ve %5 oranında nano demir oksit eklenmiş ve kesme kutusu, serbest basınç ve konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Ayrıca, stabilizasyon öncesi ve sonrası zemini dokusal özelliklerini değerlendirmek ve karşılaştırmak için taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Sonuçlar, %2'ye kadar nano demir oksit eklenmesinin, zeminin artan mukavemet parametrelerine (kohezyon ve iç sürtünme açısı dahil) ve azaltılmış sıkıştırılabilirlik ve şişme katsayılarına yol açabileceğini göstermiştir.

Haeri and Valishzadeh (2021) yaptıkları deneysel çalışmada, nano silika, nano kil ve nano kalsiyum karbonatın düşük plastisiteli silt üzerinde olan etkilerini araştırmışlardır. Belirli yüzdelere hazırlanan su, zemin ve nano malzeme karışımından hazırlanan numuneler üzerinde serbest basınç ve konsolidasyon deneyleri yapmışlardır. Sonuçlara göre, nano malzemenin miktarı az olduğunda bile, zeminin mekaniksel özelliklerini önemli ölçüde etkilediği belirtilmiştir. Kuru zemin ağırlığının %0,1 Nano silika, %0,2 nano kalsiyum ve %0,4 nano kalsiyum karbonat eklendiğinde, maksimum serbest basınç mukavemet değeri elde edilmiştir.

Jafarian Barough *et al.* (2021) çalışmalarında, kötü derecelenmiş kum zeminin iyileştirmesi için enjeksiyon yöntemini kullanmışlardır. Bu çalışmada katkı maddesi olarak, farklı yüzdelerde portland çimento ile nano silika ve nano alümina, silindir kalıplarda iki farklı rölatif sıkılıktaki hazırlanmış kum zemin numunelere enjekte edilmiş, 7 ve 28 gün kür edildikten sonra, Serbest basınç ve permeabilite deneylerine tabi tutulmuştur. Ayrıca, 28 günlük numuneler üzerinde XRD ve SEM deneyleri de yapılmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre, nanomalzeme enjekte edilmiş her iki farklı rölatif sıkılıktaki zemin numunelerinin serbest basınç mukavemetleri artmış, permeabilite leri azalmıştır.

Kalhor *et al.* (2022) yaptıkları araştırmada, nano silika ile iyileştirilmiş kil bir zeminin performansını incelemiştir. Bu amaç için, Atterberg limitleri, Standart Kompaksiyon, permeabilite ve Konsolidasyonsuz drenajsız (UU) deneyleri ağırlıkça % 1, % 2, % 3 ve % 4 nano silika ile karıştırılmış kil içeren ince taneli bir zeminde (CL) yapılmıştır. Katkısız ve nano silika içeren zemin numuneleri üzerinde SEM ve XRF analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, nano silika kullanımı neticesinde killi zeminin plastik limit (PL) ve likit limit (LL) değerleri artmış, plastisite indeksi (PI) azalmıştır. Nano silika ile iyileştirilmiş kil zeminin optimum su muhtevası artmış ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı azalmıştır. Nano silika ile iyileştirilmiş killi zeminin permeabilite katsayısı önemli miktarda azalmıştır. %1, %2 ve %3 oranlarda nano silika içeren zemin numunelerin üç eksenli mukavemet değerlerinde stabilize edilmemiş zemine göre sırayla 1,2, 1,65 ve 1,2 kat artış elde edilmiştir. Ayrıca, nano silika içeren zeminlerin kohezyon ve içsel sürtünme açılarında artış görülmüştür.

Sonuçlara göre nanopartiküller zemin boşluklarını doldurur, moleküler bağlar oluşturur. Dolayısıyla, nanopartikülleri zemin taneciklerinin hem fiziksel hem de kimyasal özelliklerini etkiliyor.



MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, silis dumanı ve farklı oranlarda nano silika, nano alümina ve çimento kullanılarak 3 farklı s/k (1,0, 1,4, 1,8) oranlarında hazırlanan enjeksiyon harçları, 2 farklı rölatif sıkılıkta ($D_r = \%30, \%70$) hazırlanan kötü derecelenmiş kum zemine (SP) enjekte edilmiştir. İlk önce enjeksiyon harçları üzerinde çökelme, Marsh hunisi ve Vicat iğnesi deneyleri yapılmıştır.

Enjeksiyon yapılmış numuneler 7 ve 28 gün kür süreleri sonunda tek eksenli basınç ve 28 gün kür süresi sonunda da permeabilite deneylerine tabi tutulmuşlardır. Ayrıca, numuneler üzerinde SEM ve XRD analizleri yapılmıştır.

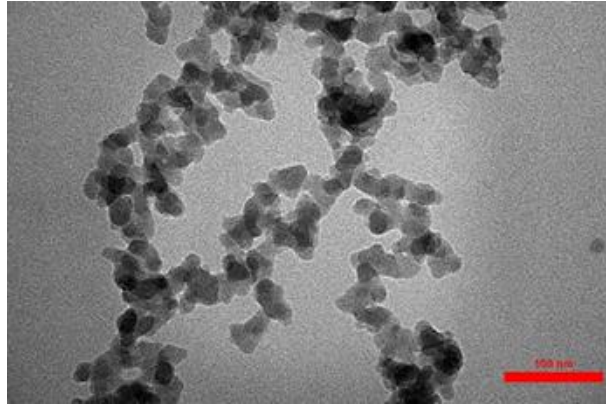
Materyal

Nano Silika

Nano silika, “Pishgaman Nano İRAN” firmasından temin edilmiştir. Nano silika çimento ağırlığının % 0,3, % 0,6 ve % 0,9 oranlarında kullanılmıştır. Kullanılan nano silika Şekil 20’de gösterilmiştir. Nano silikanın SEM görüntüsü Şekil 21’de, analiz sonuçları ise Tablo 2’de verilmiştir.



Şekil 20. Deneylerde kullanılan nano silika



Şekil 21. Deneylerde kullanılan nano silikaya ait SEM görüntüsü (Anonim 2021)

Tablo 2. Nano Silikanın Kimyasal Analizi (Anonim 2021)

Sio ₂	Ti	Ca	Na	Fe	Boyut	SSA (m ² /g)	Renk	γ_B (g/cm ³)	γ_T (g/cm ³)
>99%	<120ppm	<70ppm	<50ppm	<20ppm	11-13nm	200	beyaz	<0,10	2,4

Silika veya nanosilikanın nanopartikülleri olarak da bilinen silikon dioksitin nanopartikülleri, yüksek stabilitesi ve çok çeşitli moleküller ve polimerlerle birlikte kullanılabilme kabiliyeti nedeniyle katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Ahmadi ve Shafiee (2019) çalışmasında, yaklaşık 20 nm partikül boyutuna, beyaz renge, 2,40 g/ml yoğunluğa ve toz formuna sahip nano silika kullanmıştır.

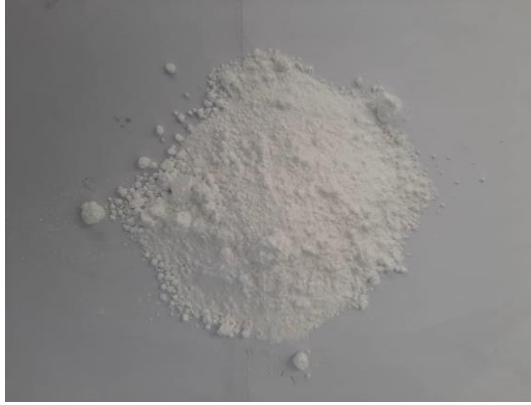
Nano silika (NS), partikül boyutu dağılımı ve yüksek özgül yüzey alanı nedeniyle nano silika içeriğine bağlı olarak harç ve hamurlarda su ihtiyacını önemli ölçüde artırır (Tobon *et al.* 2010; Nazari and Riahi, 2011).

Araştırmalarda silika nano parçacıkların bulunduğu çimento hamurundaki Portlandit (CH) miktarında, 1 günde %90, 28 günde %59'a varan azalmalar olduğu bildirilmektedir (Singh *et al.* 2012). Nano silika kullanılması durumunda, daha fazla CSH jeli oluşmakta ve beton içindeki CH oranında dikkate değer azalmalar ortaya çıkmaktadır. Bu sonuçlar XRD ve FTIR çözümlmeleri ile desteklenmektedir. Mineral içerikli çimento hamurlarının priz süreleri nano silika kullanımı ile düşürülmektedir (Zhang *et al.* 2015). Nano silikanın, çimento hamurunun yüksek sıcaklık kullanılarak termal duraylılığının iyileştiği de vurgulanmaktadır (Aggarwal *et al.* 2015).

Nano Alümina

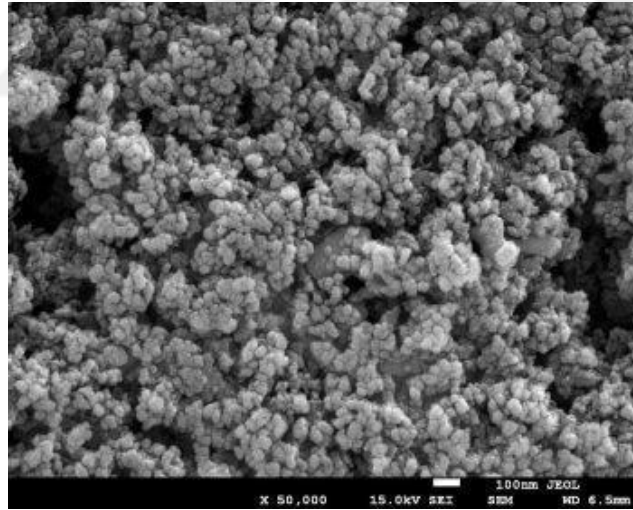
Nano alümina, “Pishgaman Nano İRAN” firmasından temin edilmiştir. Nano alümina deneylerde çimento ağırlığının %0,3, % 0,6 ve % 0,9 oranlarında kullanılmıştır. Deneylerde

kullanılan Nano alümina Şekil 22’de gösterilmiştir. Nano alüminanın SEM görüntüleri Şekil 23’de, kimyasal analiz sonuçları ise Tablo 3’de verilmiştir.



Şekil 22. Deneylerde kullanılan nano alümina

Soundarya *et al.* (2015) çalışmasında nano alümina ilavesi betonun mukavemetini arttırmıştır. Nano alümina ekleyerek, yüksek basınç dayanımında büyük bir başarı elde edilmiştir. Nano alüminin çimento kompozitlerin elastisitesi ve basınç dayanımı üzerinde olumlu etkileri olduğu belirlenmiştir.



Şekil 23. Nano alümina SEM görüntüsü (Anonim 2021)

Tablo 3. Nano Alüminanın Kimyasal Analizi (Anonim 2021)

AL ₂ O ₃	Ca	V	CL	Na	Mn	Co	Boyut	SSA (m ² /g)	Renk ve Şekil	γ_B (g/cm ³)	γ_T (g/cm ³)
>99%	<20 ppm	<50 ppm	<280 ppm	<30 ppm	<5 ppm	<5 ppm	50nm	>19	Beyaz- yuvarlak	<0,10	2,4

Silis dumanı

Silis dumanı, “Fumed Silica Fusil 200 A.Ş.” fabrikasından temin edilmiştir. Yüksek dayanımlı betonlarda silis dumanı çimento ağırlığının %5-%15’i oranında kullanılabilir (Oltulu and Şahin 2011). Ancak, bazı sakıncalar nedeniyle, bu oranın %10’u aşmaması önerilir (Ata and Vipulanandan 1997; Aitcin *et al* 1984). Deneylerde, silis dumanı çimento ağırlığının %5’i oranında kullanılmıştır. Silis dumanına ait kimyasal analiz sonuçları Tablo 4’de gösterilmiştir. Silis dumanı çimento tanelerine göre daha küçük tane çapına sahiptir.

Tablo 4. Silis Dumanı Kimyasal Kompozisyonu (Anonim 2019a)

Oksit	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	TiO ₂
Silis Dumanı(%)	96,23	0,5	0,5	0,82	1,35	0,6

Silis dumanı, silisyum veya demir silisyum alaşımlarının ergime yöntemi kullanılarak üretildiği esnada, ana bileşeni 1 µm’dan küçük, küresel, biçimsiz, camsı silis (SiO₂) parçacıklardan oluşan, yüksek düzeyde puzolanik etkinliği olan bir yan üründür. Silikon metalin veya silikon içeren metal alaşımlarının üretimi sırasında oluşan gazın hızlı soğutulup yoğunlaştırılması sonucunda ve % 85-% 98 oranında silis içeren biçimsiz yapısı olan çok ince katı parçacıklardan oluşan malzemeye “yoğunlaştırılmış silis dumanı” veya kısaca “silis dumanı” denilmektedir. Silis dumanı aşırı ince parçalar içerdiği ve yüksek etkinliği olduğu için, çok yüksek dayanımlı (≥100 MPa) ya da erken yaşta yüksek dayanımlı beton üretmek için süper akışkanlaştırıcılar ile birlikte kullanılır (Güngormüş 2003).

Çimento

Deneylerde CEM II 42,5 Portland çimentosu kullanılmıştır. Çimento Aşkale Çimento fabrikası’ndan temin edilmiştir. Deneylerde kullanılan çimentonun kimyasal ve fiziksel analiz sonuçları Tablo 5’de verilmiştir.

Tablo 5. Deneylerde Kullanılan Çimentonun Kimyasal, Fiziksel ve Mekanik Özellikleri (Anonim 2019b)

Kimyasal Analizler	
SiO ₂	18,73
Al ₂ O ₃	4,56
Fe ₂ O ₃	3,07
CaO	63,91
MgO	2,08
SO ₃	2,90
Kızdırma Kaybı	3,36
K ₂ O	0,62

Tablo 5. (devam)

Na ₂ O	0,29
Na ₂ O+0,658K ₂ O	0,70
Cl	0,0185
Ölçülemeyen	0,46
Toplam	100
Cao	0,56
Çözünmeyen Kalıntı	0,85
Fiziksel ve Mekanik testler	
İncelik 45µm Elek Üstü%	8,98
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3,14
Özgül Yüzey (cm ² /g)	3807
İlk Piriz (Saat-Dakika)	45
Son Piriz (Saat-Dakika)	2-55
Hacim Genleşmesi(mm)	1
Basınç Dayanımı 2 Gün (MPa)	27,7
Basınç Dayanımı 28 Gün (MPa)	57,2
Su İhtiyacı (%)	28,6

Çimento, esas olarak “Doğal kalker taşları ve kil karışımının yüksek sıcaklıkta ısıtıldıktan sonra öğütülmesi ile elde edilen hidrolik bir bağlayıcı malzeme” olarak tanımlanır. Diğer bağlayıcı malzemeler gibi çimentolar da CaO, MgO gibi alkalin ögeler ve SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ gibi hidrolik ögelerden oluşmaktadır (EN 197-1). Çimento, bağlayıcılık işlevini su ile tepkimeye girdikten sonra elde ettiği için hidrolik bağlayıcı olarak adlandırılır. Çimento su ile karıştırılarak plastik hamur durumuna geldikten belirli bir süre sonra havada ya da su içinde yavaş yavaş katılaşmaya başlar. Bu katılaşma olayı “priz” olarak adlandırılır. Normal koşullar altında bu katılaşma olayının gerçekleşmesi yaklaşık bir saat sürer. Bu çalışmada (EN 197-1) standartlarına uyarınca CEM II 42,5 türü çimento kullanılmıştır(TS EN 12504-1 2019).

Zemin

Deneysel çalışmada kullanılan zemin, Erzurum-Çat karayolunda bulunan Polat İnşaat şantiyesinden temin edilmiştir. Zemin, Atatürk Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü Zemin Mekaniği Laboratuvarında ASTM D2487 standardına uygun olan bir seri elekten elenerek dane çapı dağılımı belirlenmiştir. Eleme işlemi tamamlandıktan sonra zemin, etüvde 105°C’de kurutulmuş ve ortam sıcaklığında havalandırılmıştır (Şekil 24).



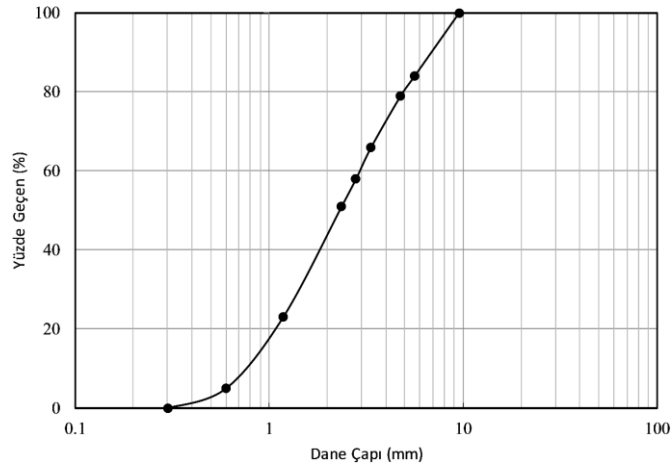
Şekil 24. Deneylerde kullanılan kum zemin (SP)

Kum zemin, Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine (USCS) göre kötü derecelenmiş kum (SP) olarak sınıflandırılmıştır. Kum zeminin granülometri parametreleri Tablo 6’da, tane çapı dağılım eğrisi ise Şekil 25’de verilmiştir.

Enjeksiyon deneylerinde kullanılan kötü derecelenmiş kum zeminin özgül ağırlığı ASTM D854-14’e göre belirlenmiştir. Ayrıca, kum zeminin minimum boşluk oranı ASTM D4253-14’e göre, maksimum boşluk oranı ise ASTM 4254-14’e göre belirlenmiştir. Enjeksiyonda kullanılan kum zeminin fiziksel özellikleri Tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 6. Kötü Derecelenmiş Kum Zeminin (SP) Fiziksel Özellikleri

Granülometri Parametreleri	Değer
Efektif Tane Çapı, D_{10} (mm)	1,2
D_{30} (mm)	1,67
D_{60} (mm)	2,8
D_{15} (mm)	1,6
D_{85} (mm)	5,5
D_{90} (mm)	6
Üniformluk Katsayısı, $C_u = D_{60}/D_{10}$	3,68
Derecelenme Katsayısı, $C_c = (D_{30})^2 / (D_{60} \times D_{10})$	1,31
$N_{(Burwell)}$	29
$N_{(İncecik)}$	20
$N_{(Akbulut)}$	42
Zemin Sınıfı (USCS)’ye Göre	SP
e_{min} , Minimum boşluk oranı	0,54
e_{max} , Maksimum boşluk oranı	0,89
G_s , Özgül ağırlık	2,64



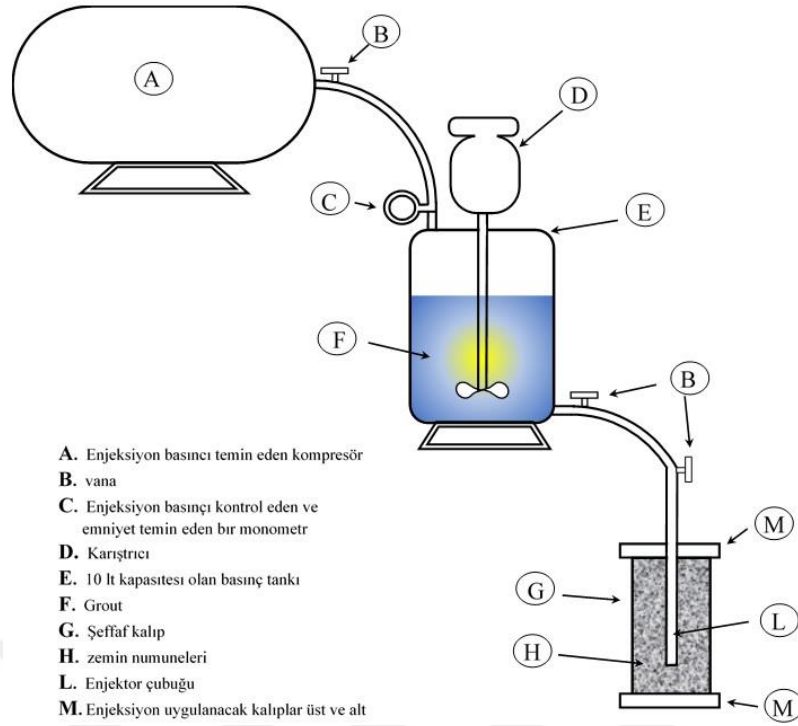
Şekil 25. Deneylerde kullanılan zeminin tane çapı dağılım eğrisi

Yöntem

Enjeksiyon deneylerine başlamadan önce, zeminin indeks özellikleri belirlenmiştir. Kötü derecelenmiş kum zemin (SP), silindirik şeffaf kalıplara $D_r = \% 70$ ve $\% 30$ rölatif sıkılıkta yerleştirilmiş ve enjeksiyon deneyleri yapılmıştır. Enjeksiyon deneylerine başlamadan önce ön deneyler yapılarak, en uygun parametreler seçilmiştir. Ayrıca enjeksiyon harcı üzerinde Vicat İğnesi, Marsh Hunisi ve çökeltme deneyleri yapılmıştır. Son olarak, en iyi sonucu veren numuneler üzerinde SEM ve XRD analizleri yapılmıştır.

Enjeksiyon deney düzeneği

Ön deneylerde ve asıl deneylerde kullanılan enjeksiyon deney düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 26'da verilmiştir. Enjeksiyon deney düzeneği; enjektör, 10 lt kapasiteli basınç tankı, kompresör, karıştırıcı, enjeksiyon basıncını kontrol eden monometre, vanalar ve pleksiglass kalıplardan oluşmaktadır.



Şekil 26. Enjeksiyon deney düzeneğinin şematik gösterimi

Enjeksiyon ön deneyleri

Tez çalışmasında, parametre olarak s/k oranı, kum zeminin rölatif sıkılığı ve katkı yüzdeleri seçilmiştir. Enjeksiyon deneyleri %70 ve %30 rölatif sıkılıkta hazırlanmış kötü derecelenmiş kum zemin (SP) üzerinde yapılmıştır. Silis dumanı ve nano malzeme yüzdeleri belirlenirken belirlenirken literatür çalışmaları göz önünde bulundurulmuştur. Enjeksiyon çalışmalarında ve betonda katkı maddesi olarak silis dumanının kullanılmasının mukavemet ve permeabilite üzerinde olumlu etkileri olduğu bilinmektedir (Akbulut 2002: Oltulu and Şahin 2011: Oltulu and Şahin 2014). Akbulut (2002)' a göre enjeksiyon çalışmalarında mukavemet açısından en yüksek basınç mukavemetinin % 10 silis dumanı ilave edilmiş numunelerden elde edildiğini ifade etmiştir. Yüksek mukavemetli betonlarda silis dumanı oranının % 5- % 15 arasında kullanılabileceği belirtilmiştir (Yeğınobalı 2003). Oltulu (2011) yaptığı doktora çalışmasında, çimento harçlarına katkı maddesi olarak nano parçacıklar ve % 5 oranında silis dumanı ilave etmiştir. Ancak bazı olumsuzluklar nedeniyle bu oranın % 10'u aşmaması gerektiği belirtilmiştir (Thomas *et al.* 1998). Bu çalışmada % 5 silis dumanı kullanılmıştır. Nano parçacıkların oranları belirlenirken yine literatürden faydalanılmıştır (Oltulu 2011). Oltulu (2011) yaptığı doktora çalışmasında, en yüksek basınç dayanımının % 1-1,5 arasında nona toz içeren harçlardan elde edildiği belirtilmiştir. Ayrıca, katkı maddesi olarak nano malzemelerin yüksek oranda kullanılmasının özgül yüzey alanlarının çok fazla olması nedeniyle homojen karıştırma problemi olacağı ve enjeksiyon edilebilirliğini etkileyeceği göz önünde bulundurularak, bu tez çalışmasında nano silika ve nano alümina katkı yüzdeleri % 0,3, % 0,6

ve % 0,9 olarak seçilmiştir. Enjeksiyon çalışmasında % 5 silis dumanı ve üç farklı yüzde de nano silika ve nano alümina kullanılmıştır. Enjeksiyonda silis dumanı kullanılmasının amacı mikro boşluklar ve nano malzemeler kullanılmasının amacı ise daha kılcal boşluklar içindir. Nano silika oranının fazla olması işlenebilirliği azaltmaktadır. Ayrıca, ekonomik olmamaktadır.

Asıl deneylerde kullanılacak enjeksiyon basıncı belirlemek için, 10 cm çapında ve 20 cm yüksekliğinde şeffaf pleksiglas kalıpların içi yağlanmış ve enjeksiyon yapılacak zemin $Dr = 30$ ve $Dr = 70$ sıklıkta kalıplara yerleştirilmiştir. Daha sonra, literatürden faydalanılarak belirlenen katkı oranları kullanılarak enjeksiyon harçları hazırlanmış ve enjeksiyon yapılmıştır. s/k oranı 1 seçilmiştir. Enjeksiyon basınçları 100, 150, 200, 250 ve 300 kPa olarak seçilmiştir. $Dr = 70$ rölatif sıklıkta hazırlanan numunelere yapılan enjeksiyonlarda, katkı oranı arttıkça düşük basınçlarda (100, 150 kPa) enjeksiyon başarılı olmamış ve boşluklar tamamen dolmamıştır. 250 ve 300 kPa basınçlar altında yapılan enjeksiyonlarda ise daneler yerdeğiştirmiş, boşluk hacmi değişmiş ve homojen bir dağılım elde edilememiştir. $Dr = 70$ rölatif sıklıkta hazırlanan numuneler için en uygun enjeksiyon basıncı 200 kPa olarak belirlenmiştir. $Dr = 30$ rölatif sıklıkta hazırlanan numunelere yapılan enjeksiyonlarda, katkı oranı arttıkça 100 kPa basınçta enjeksiyon başarılı olmamış ve boşluklar tamamen dolmamıştır. 250 ve 300 kPa basınçlar altında yapılan enjeksiyonlarda ise daneler yerdeğiştirmiş, boşluk hacmi değişmiş ve homojen bir dağılım elde edilememiştir. $Dr = 30$ rölatif sıklıkta hazırlanan numuneler için en uygun enjeksiyon basıncı 150 ve 200 kPa olarak belirlenmiştir. Yapılan ön deneyler sonucunda, her iki rölatif sıklık için enjeksiyon basıncı 200 kPa olarak seçilmiştir.

Asıl enjeksiyon deneylerinde kullanılacak s/k oranlarını belirlemek için 200 kPa enjeksiyon basıncı altında ön deneyler yapılmıştır. Ön deneylerde s/k oranları 0,7, 1,0, 1,4, 1,8, 2,0, 2,5 ve 3,0 olarak seçilmiştir. Asıl deneylerde kullanılacak s/k oranlarını belirlemek için zemin pleksiglas kalıplara $Dr = 30$ ve $Dr = 70$ sıklıkta yerleştirilmiştir. Daha sonra, literatürden faydalanılarak belirlenen katkı oranları kullanılarak 0,7, 1,0, 1,4, 1,8, 2,0, 2,5 ve 3,0 s/k oranlarında hazırlanan enjeksiyon harçları 200 kPa basıncı altında enjekte edilmiştir. s/k oranı 0,7 olan numunelerde yeterli enjeksiyon yapılmadığı gözlenmiştir. s/k=1 olan numunelerde enjeksiyon başarılı olmuştur. s/k oranının üst sınırını bulmak için s/k oranları 1,8, 2,0, 2,5 ve 3,0 seçilerek, 200 kPa basınç altında enjeksiyon yapılmıştır. s/k oranı 1,8' den büyük numuneler kalıptan çıkarılırken dağılmış, s/k oranı için üst sınır 1,8 olarak belirlenmiştir. Yapılan ön deneyler sonucunda s/k oranları 1,0, 1,4, ve 1,8 seçilmiştir. Ön deneylerden elde edilen bulgular kullanılarak asıl deneyler yapılmıştır. Deney karışım oranları Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. Deney Karışım Oranları

Kod	Rölatif Sıklık, %	(s/k)	Malzemeler			
			Nano Silika, %	Nano Alümina, %	Silis Dumanı, %	Çimento, %
D3W10	30	1	0	0	0	100
D3W10S	30	1	0	0	5	95
D3W10SNS3	30	1	0,3	0	5	94,7
D3W10SNS6	30	1	0,6	0	5	94,4
D3W10SNS9	30	1	0,9	0	5	94,1
D3W10SNA3	30	1	0	0,3	5	94,7
D3W10SNA6	30	1	0	0,6	5	94,4
D3W10SNA9	30	1	0	0,9	5	94,1
D3W14	30	1,4	0	0	0	100
D3W14S	30	1,4	0	0	5	95
D3W14SNS3	30	1,4	0,3	0	5	94,7
D3W14SNS6	30	1,4	0,6	0	5	94,4
D3W14SNS9	30	1,4	0,9	0	5	94,1
D3W14SNA3	30	1,4	0	0,3	5	94,7
D3W14SNA6	30	1,4	0	0,6	5	94,4
D3W14SNA9	30	1,4	0	0,9	5	94,1
D3W18	30	1,8	0	0	0	100
D3W18S	30	1,8	0	0	5	95
D3W18SNS3	30	1,8	0,3	0	5	94,7
D3W18SNS6	30	1,8	0,6	0	5	94,4
D3W18SNS9	30	1,8	0,9	0	5	94,1
D3W18SNA3	30	1,8	0	0,3	5	94,7
D3W18SNA6	30	1,8	0	0,6	5	94,4
D3W18SNA9	30	1,8	0	0,9	5	94,1
D7W10	70	1	0	0	0	100
D7W10S	70	1	0	0	5	95
D7W10SNS3	70	1	0,3	0	5	94,7
D7W10SNS6	70	1	0,6	0	5	94,4
D7W10SNS9	70	1	0,9	0	5	94,1
D7W10SNA3	70	1	0	0,3	5	94,7
D7W10SNA6	70	1	0	0,6	5	94,4
D7W10SNA9	70	1	0	0,9	5	94,1
D7W14	70	1,4	0	0	0	100
D7W14S	70	1,4	0	0	5	95
D7W14SNS3	70	1,4	0,3	0	5	94,7
D7W14SNS6	70	1,4	0,6	0	5	94,4
D7W14SNS9	70	1,4	0,9	0	5	94,1
D7W14SNA3	70	1,4	0	0,3	5	94,7
D7W14SNA6	70	1,4	0	0,6	5	94,4
D7W14SNA9	70	1,4	0	0,9	5	94,1
D7W18	70	1,8	0	0	0	100
D7W18S	70	1,8	0	0	5	95
D7W18SNS3	70	1,8	0,3	0	5	94,7
D7W18SNS6	70	1,8	0,6	0	5	94,4
D7W18SNS9	70	1,8	0,9	0	5	94,1
D7W18SNA3	70	1,8	0	0,3	5	94,7
D7W18SNA6	70	1,8	0	0,6	5	94,4
D7W18SNA9	70	1,8	0	0,9	5	94,1

Priz süresi deneyi (Vicat iğnesi)

Priz süresi enjeksiyon harcının plastiklik özelliğini kaybetme süresidir. Enjeksiyon işlemleri sırasında priz süresinin belirlenmesi ve kontrolü oldukça önemlidir. Bazen koşullara bağlı olarak priz süresinin kısa veya uzun olması istenebilir(Warner 2004). Priz süresi iki aşamadan oluşur: Birinci aşamada akışkanlık zamana bağlı olarak gittikçe azalır ve enjeksiyon edilemeyecek bir hal alır. İkinci aşamada sertleşme başlar ve mukavemet gittikçe artar (Mollamahmutoğlu 1995).

Priz süresini etkileyen bir çok faktör vardır. Sıcaklığın artması priz süresini kısaltır düşmesi ise priz süresini arttır. Karıştırma suyunun fazla olması priz süresini uzatır ve çimentonun özelliklerini olumsuz yönde etkiler. Nem priz başlamasını geciktirir ve priz süresini uzatır. Katkı madelerinin özelliklerine bağlı olarak priz süresi uzayıp kısalabilir.

Priz süresini belirlemek için Vicat deneyi yapılmaktadır. Çimento ve diğer katkılardan hazırlanan enjeksiyon harçlarının ilk ve son priz zamanlarını belirlemek için ASTM C191 standardına uygun olarak Vicat deneyi yapılmıştır. Hazırlanan enjeksiyon harçları nemli bir kabine yerleştirilerek sertleşmeye başlamasına izin verilir. 1 mm'lik bir Vicat iğnesinin bu çimento harcına batmasına izin verilerek periyodik penetrasyon deneyleri yapılır. Vicat başlangıç priz süresi, çimento ve suyun ilk teması ile penetrasyonun ölçüldüğü veya 25 mm olarak hesaplandığı zaman arasında geçen süredir. Vicat son priz süresi, çimento ve suyun ilk teması ile iğnenin macun yüzeyinde tam dairesel bir izlenim bırakmadığı zaman arasında geçen süredir. Vicat deneyine ait bir fotoğraf Şekil 27'de gösterilmiştir.



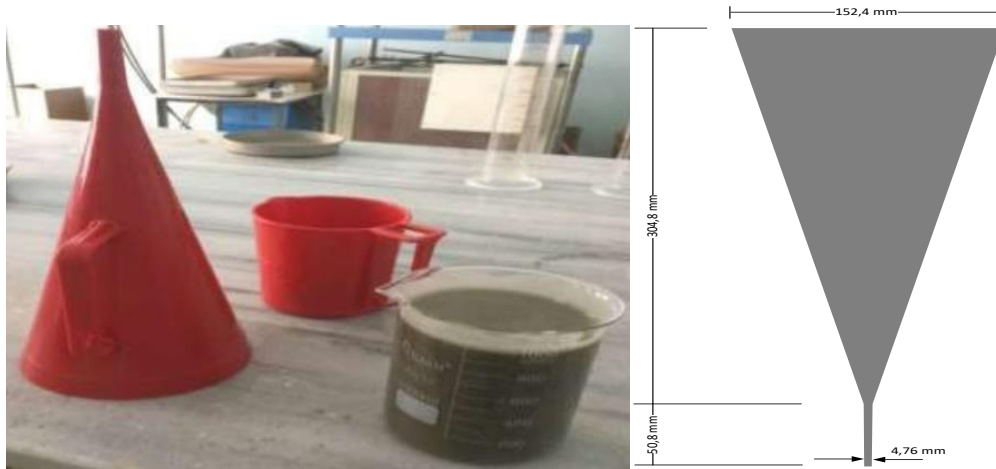
Şekil 27. Vicat iğnesi deney aleti ve yapılışı

Marsh Hunisi deneyi (Viskozite)

Harcın akış özelliklerini belirlemek için huni deneyi veya vizkozimetre deneyi yapılmaktadır. Huni deneyi için çeşitli huni konfigürasyonu önerilmiş ve/veya kullanılmıştır. Akış süresi olarak bilinen belirli bir miktardaki harcın bir huniden dışarı akması için gereken süre, saniye cinsinden belirlenir. Enjeksiyon groutlarının özelliklerini belirlemek için iki farklı huni kullanılmaktadır. Birincisi, 1940'ların başında geliştirilen akış konisidir. 1988 yılında ASTM tarafından "Akış Konisi Metodu" olarak kabul edilmiş ve ASTM C 939 standardıyla standartlaştırılmıştır. İkincisi ise Marsh Hunisi deneyidir. Bu çalışmada Mars Hunisi deneyi yapılmıştır. Marsh Hunisi deneyi ve belirli boyutlarda dereceli bir kap kullanarak karışımların viskozitesinin dolaylı bir ölçümünü sağlar. Bu deney yöntemi, viskozitenin pratik bir göstergesidir. Viskozite, moleküller arasındaki sürtünme nedeni ile akışkan malzemenin akmaya karşı gösterdiği dirençtir (Warner 2004).

Sondaj sıvılarının akış özelliklerini değerlendirmek için uzun süredir kullanılan Marsh hunisi (Şekil 28), genellikle enjeksiyonlar harçları için de kullanılır. Koninin üst kısmının çapı 152,4 mm, yüksekliği 304,8 mm, boşaltma deliğinin çapı 4,76 mm ve boşaltma kısmının uzunluğu ise 50,8 mm'dir. Koninin hacmi yaklaşık 1500 mililitredir, ancak deney sonucu tam olarak 946 mililitrenin boşalmasına dayalıdır. Bir parmakla boşaltma deliği kapatılarak huni yaklaşık tepesine kadar doldurulur. Boşaltma deliğini kapatan parmak çıkarılarak altındaki 946 mililitrelik kapın tamamen dolması için geçen süre saniye cinsinden not edilir.

Su için akış süresi 26 saniye olmalıdır ve harç için yaklaşık 26 ila 60 saniye arasında değişecektir. Yaklaşık akış süresi 75 saniyeden uzun süren harçlar için Marsh Hunisi deneyi uygun değildir (Warner 2004).



Şekil 28. Marsh hunisi deneyine ait bir görüntü ve Marsh Hunisi boyutları

Çökelme (Sedimentasyon) deneyi

Tüm sıvı harçlar, üst yüzeyde temiz suyun biriktiği, kuma olarak bilinen katı tanelerin çökmesine maruz kalır. Çökelme sonusunda zamanla su buharlaşacak ve daha önce kapladığı alan hava ile dolacak ve böylece bir boşluk oluşacaktır. Süspansiyon harçlarının kusması, tarihsel olarak enjeksiyon uygulamasının en büyük eksikliklerinden biri olmuştur ve olmaya devam etmektedir. İsteğe bağlı olarak yüzde 5'lik bir kuma miktarı, maksimum makul miktar olarak kabul edilmekte ve daha büyük kumaya maruz kalan enjeksiyon harçları kararsız olarak adlandırılır (Warner 2004).

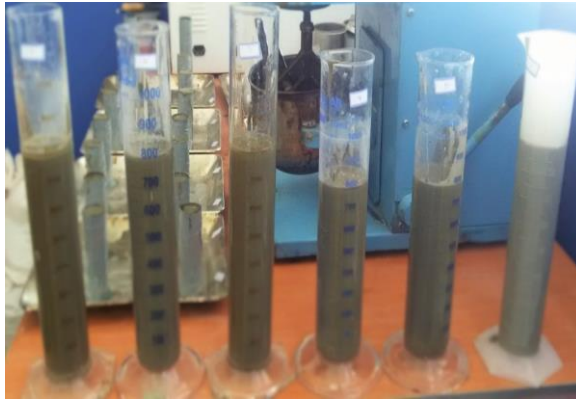
Çökelme deneyleri ASTM C 940 standardına uygun olarak yapılmıştır. Karıştırmadan önce tüm malzemeler ve karıştırma suyunun sıcaklığı $23,0 \pm 2^0$ C getirilmiştir. Daha sonra, tüm malzemeler karıştırıcı içinde 10 dakika karıştırılmış ve 1000 ml dereceli mezur içine aktarılmıştır. Belirli zaman aralıklarında (15 dk, 30 dk, 45 dk, 60 dk, 120 dk, 180 dk) mezurde çökelmiş malzemenin yüksekliği okunmuştur. İki okuma aynı olduğu zaman deney sonlandırılmıştır. Deneyden bir fotoğraf Şekil 29'da verilmiştir. Çökelme miktarı aşağıda verilen bağıntı ile hesaplanır.

$$\text{Çökelme Yüzdesi} = \frac{\Delta H}{H} \times \% 100 \quad (9)$$

Burada;

ΔH : cökme miktarı

H: başlangıç seviyesini göstermektedir.

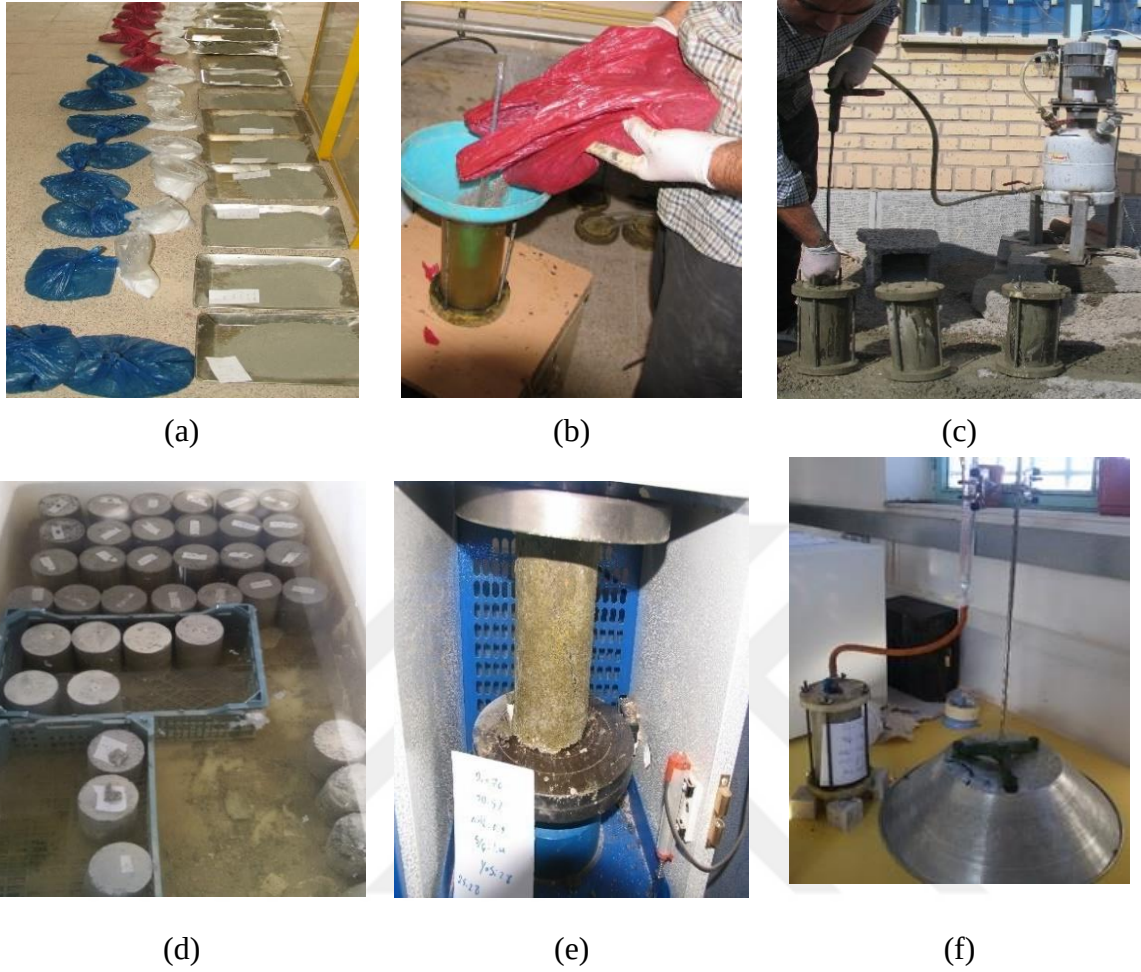


Şekil 29. Çökelme deneyine ait bir görüntü

Enjeksiyon deneylerinin yapılması

Ön deneyler sonucunda belirlenen parametre aralıkları kullanılarak Vicat İğnesi, Marsh Hunisi ve çökelme deneyleri yapılmıştır. Daha sonra asıl enjeksiyon deneyleri yapılmıştır. Enjeksiyon çalışmaları sırasıyla, enjeksiyon karışımlarının hazırlanması, enjeksiyon yapılacak zeminlerin belirlenmiş rölatif sıklıkta kalıplara yerleştirilmesi, enjeksiyon yapılması,

numunelerin kür edilmesi, tek eksenli basınç ve permeabilite deneylerinin yapılmasından oluşmaktadır (Şekil 30).



Şekil 30. Enjeksiyon çalışması (a) karışımların hazırlanması, (b) kalıplarda zemin yerleştirilmesi, (c) enjeksiyon uygulaması, (d) numunelerin kür edilmesi, (e) tek eksenli basınç deneyi, (f) Permeabilite deneyi

Enjeksiyon uygulaması için, iç çapı 100 mm, uzunluğu 200 mm ve kalınlığı 3 mm olan şeffaf pleksiglas kalıplar kullanılmış ve zemin önceden belirlenmiş rölatif sıklıkta ($D_r = \%30$ ve $\%70$) huni ile kalıplarda yerleştirilmiştir. Kalıplar için üst ve alt başlıklar hazırlanmıştır. Enjeksiyon yapılabilmesi için, üst başlığın merkezinde 15 mm çapında delik bulunmaktadır. Enjeksiyon basıncını kontrol etmek için, enjeksiyon çubuğunun başında bir adet vana bulunmaktadır. Kum zemin kalıplara yerleştirildikten sonra kalıpların başlıkları kapatılmıştır.

Nano silika ve nano alümina kuru malzeme ağırlığınca $\%0,3$, $\%0,6$ ve $\%0,9$ oranlarında ve silis dumanı ise tüm karışımlarda kuru malzeme ağırlığınca $\%5$ oranında ilave edilerek enjeksiyon harçları hazırlanmıştır. Enjeksiyon harç karışımlarını hazırlamak için önce su mikser tankına aktarılıp silis dumanı ilave edildikten sonra 10000 dev/dak gücüyle karıştırılmıştır. Daha sonra nano malzemeler ve çimento eklenerek karıştırmaya devam edilmiştir. Harç karışımları 10000 dev/dak hıza sahip olan mikser ile hazırlanmış ve karıştırma süresi literatür

baz alınarak 10 dakika olarak belirlenmiştir. Hazırlanan karışım, basınç tankına aktarılmış ve sonrasında numunelere enjekte edilmiştir. Deneyler, 3 farklı s/k oranında (1,0, 1,4, 1,8) yapılmıştır.

Numunelerin 7 ve 28 günlük tek eksenli basınç dayanımı değerini belirlemek için, hazırlanan numunelerin priz alması için 24 saat kalıpta bekletilmiş ve daha sonra kalıplardan çıkarılarak kür edilmiştir. Numuneler, tek eksenli basınç dayanımı deneyi için 24 saat önceden kürden çıkarılmış, kurutulmuş ve deneye tabi tutulmuşlardır. Her deney 3 kez tekrar edilmiştir.

Permeabilite deneyi

Permeabilite deneyi yapmak için hazırlanan numuneler kalıp içerisinde 28 gün kür edilmiş, ASTM D5856-15 standartına göre permeabilite deneyleri yapılmıştır. Permeabilite deneyleri kullanılan katkıya bağlı olarak, 1-2 saatten 2-3 güne kadar sürmüştür. Deney düzeneği Şekil 31’de gösterilmiştir. Permeabilite katsayısı aşağıdaki bağıntıdan hesaplanmıştır.

$$k = 2.303 \frac{aL}{At} \log_{10} \frac{h_1}{h_2} \quad (10)$$

Burada;

a= Deney borusunun alanı

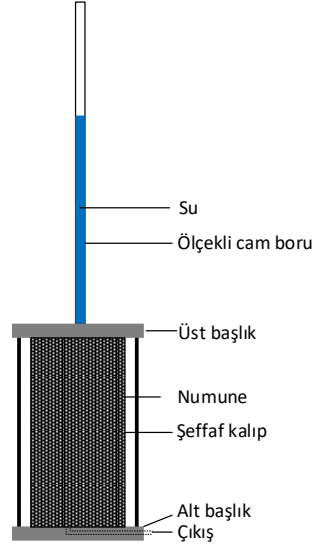
L= Numune uzunluğu

A= Numunenin enkesit alanı

t = Zaman (saniye)

h₁= İlk uzunluk

h₂ = Son uzunluk



Şekil 31. Permeabilite deneyinin şematik gösterimi

Tek eksenli basınç deneyi

Kalıptan çıkarılan numuneler, 7 ve 28 gün kür edildikten sonra ASTM C39 standartına göre tek eksenli basınç deneyine tabi tutulmuştur. Deney yapmak için numuneler 24 saat önceden kürden çıkarılmış, kurutulmuş ve tek eksenli basınç deneyine tabi tutulmadan önce numuneler kükürtle başlıklanmıştır. Tek eksenli basınç dayanımı maksimum kırılma yükünün, numunenin kesit alanına bölünmesiyle bulunmuştur. Deney boyunca yükler ve deformasyonlar 30 saniye aralıklarla kaydedilmiştir.

Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi

Ürünlerin yüzey nitelemesi ve farklılıklarını incelemek üzere FEI/Quanta 450 FEG instrument mikroskop tekniğine göre vakum altında ve palladyum- altınla kaplanarak değişik büyütmelerde Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi'nde SEM görüntüleri alınmıştır. Sadece en yüksek dayanımı veren nano silika, nano alümina ve çimento enjeksiyonu yapılmış numunelerden SEM görüntüleri alınmıştır.

X-Işını kırımı (XRD) analizi

Numunelerin kristalografik analizlerinin belirlenmesi Erzurum Teknik Üniversitesinde bulunan X-Ray cihazı kullanılmıştır. XRD, her bir kristalin diğerine benzemeyen atomik sıralamasına dayanmaktadır. Bu yöntemde, X ışınlarını sırayla kırma prensibiyle çalışmaktadır. Her bir kristalin kırınım şekili parmak izi gibidir ve o kristalı simgeler (Hwang ve Wu 1989).

En yüksek dayanımı veren nano silika ve imento numuneler üzerinde XRD analizi yapılmış ve kristal yapılar incelenmiştir.



ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Ön Deneylerin Sonuçları

Bu tez çalışmasında literatürden faydalanılarak nano silika ve nano alümina katkı yüzdeleri % 0,3, % 0,6 ve % 0,9 olarak seçilmiştir. Enjeksiyon çalışmasında % 5 silis dumanı kullanılmıştır. Bu tez kapsamında, asıl deneylere başlamadan önce en uygun enjeksiyon basıncını ve s/k oranlarını belirlemek için ön deneyler yapılmıştır.

Asıl deneylerde kullanılacak enjeksiyon basıncı belirlemek için, 10 cm çapında ve 20 cm yüksekliğinde şeffaf pleksiglas kalıpların içi yağlanmış ve enjeksiyon yapılacak zemin $Dr=30$ ve $Dr=70$ sıklıkta kalıplara yerleştirilmiştir. Daha sonra, literatürden faydalanılarak belirlenen katkı oranları kullanılarak enjeksiyon harçları hazırlanmış ve enjeksiyon yapılmıştır. s/k oranı 1 seçilmiştir. Enjeksiyon basınçları 100, 150, 200, 250 ve 300 kPa olarak seçilmiştir. $Dr=70$ rölatif sıklıkta hazırlanan numunelere yapılan enjeksiyonlarda, katkı oranı arttıkça düşük basınçlarda (100, 150 kPa) enjeksiyon başarılı olmamış ve boşluklar tamamen dolmamıştır. 250 ve 300 kPa basınçlar altında yapılan enjeksiyonlarda ise daneler yer değiştirmiş, boşluk hacmi değişmiş ve homojen bir dağılım elde edilememiştir. $Dr=70$ rölatif sıklıkta hazırlanan numuneler için en uygun enjeksiyon basıncı 200 kPa olarak belirlenmiştir. $Dr=30$ rölatif sıklıkta hazırlanan numunelere yapılan enjeksiyonlarda, katkı oranı arttıkça 100 kPa basınçta enjeksiyon başarılı olmamış ve boşluklar tamamen dolmamıştır. 250 ve 300 kPa basınçlar altında yapılan enjeksiyonlarda ise daneler yer değiştirmiş, boşluk hacmi değişmiş ve homojen bir dağılım elde edilememiştir. $Dr=30$ rölatif sıklıkta hazırlanan numuneler için en uygun enjeksiyon basıncı 150 ve 200 kPa olarak belirlenmiştir. Yapılan ön deneyler sonucunda, her iki rölatif sıklık için enjeksiyon basıncı 200 kPa olarak seçilmiştir.

Asıl enjeksiyon deneylerinde kullanılacak s/k oranlarını belirlemek için 200 kPa enjeksiyon basıncı altında ön deneyler yapılmıştır. Ön deneylerde s/k oranları 0,7, 1,0, 1,4, 1,8, 2,0, 2,5 ve 3,0 olarak seçilmiştir. Asıl deneylerde kullanılacak s/k oranlarını belirlemek için zemin pleksiglas kalıplara $Dr=30$ ve $Dr=70$ sıklıkta yerleştirilmiştir. Daha sonra, literatürden faydalanılarak belirlenen katkı oranları kullanılarak 0,7, 1,0, 1,4, 1,8, 2,0, 2,5 ve 3,0 s/k oranlarında hazırlanan enjeksiyon harçları 200 kPa basıncı altında enjekte edilmiştir. s/k oranı 0,7 olan numunelerde yeterli enjeksiyon yapılmadığı gözlenmiştir. s/k=1 olan numunelerde enjeksiyon başarılı olmuştur. s/k oranının üst sınırını bulmak için s/k oranları 1,8, 2,0, 2,5 ve 3,0 seçilerek, 200 kPa basınç altında enjeksiyon yapılmıştır. s/k oranı 1,8' den büyük

numuneler kalıptan çıkarılırken dağılmış, s/k oranı için üst sınır 1,8 olarak belirlenmiştir. Yapılan ön deneyler sonucunda s/k oranları 1,0, 1,4, ve 1,8 seçilmiştir. Parametre aralıklarını belirlemek için yüz civarında numune dökülmüştür. Başarısız enjeksiyon numunelerden örnek Şekil 32’de gösterilmektedir.



Şekil 32. Başarısız enjeksiyon örnekleri

Karışımların Reolojik Özellikleri

Tez çalışmasında enjeksiyonda kullanılan karışımların reolojik özelliklerini belirlemek için Çökelme yüzdesi, Marsh hunisi ve Vicat iğnesi deneyleri yapılmış, elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

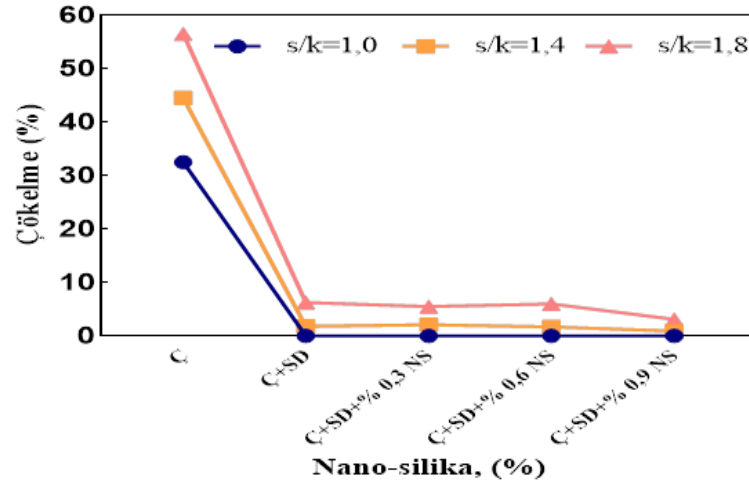
Çökelme deney sonuçları

Enjeksiyon deneylerinde kullanılan karışımlarının fiziksel ve akış özelliklerini belirlemek için çökelme deneyi yapılmıştır. Karışım numuneleri 10 dakika mikserde karıştırıldıktan sonra 1000 cm³ hacmindeki ölçekli cam silindir kaba boşaltılarak çökelmeye bırakılmış ve 3 saat (180 dakika) boyunca çökelme yüzdeleri okunmuştur.

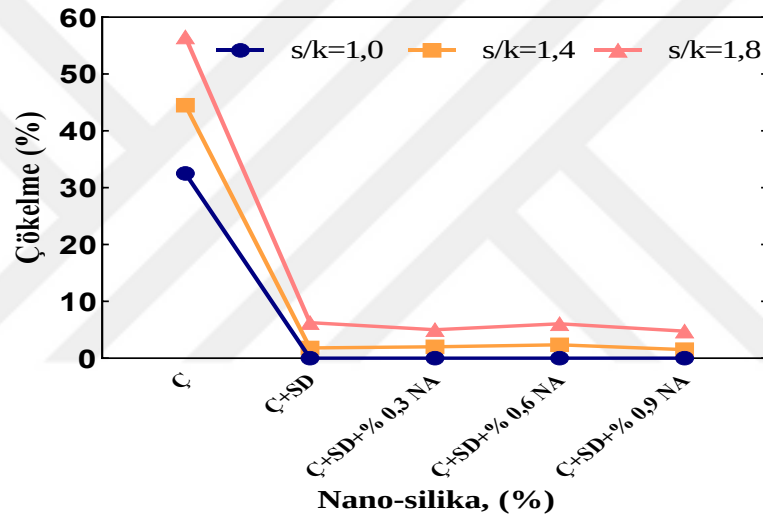
Enjeksiyonda kullanılacak çimento, çimento + % 5 silis dumanı, çimento + % 5 silis dumanı + nano silika (% 0,3, % 0,6 ve % 0,9) ve çimento + % 5 silis dumanı + nano alümina (% 0,3, % 0,6 ve % 0,9) karışımları üzerinde 1,0, 1,4 ve 1,8 s/k oranlarında çökelme deneyleri yapılmıştır. Çökelme deney sonuçları Tablo 8’de verilmiştir. Nano silika katkılı karışımların çökelme yüzdesinin nano silika yüzdesi ile değişimi Şekil 33’ de nano alümina katkılı karışımların çökelme yüzdesinin nano alümina yüzdesi ile değişimi Şekil 34’ de, nano silika katkılı karışımların çökelme yüzdesinin zamanla değişimi Şekil 35’de ve nano alümina katkılı karışımların çökelme yüzdesinin zamanla değişimi Şekil 36’da verilmiştir.

Tablo 8. Çökelme Deneyi Sonuçları

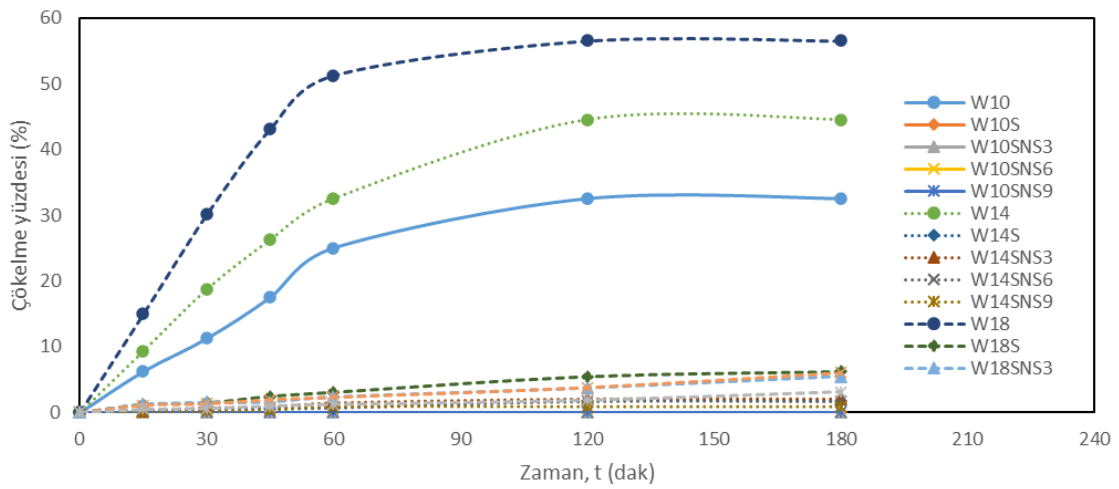
Kod	s/k	Katkı	Katkı Oranı	Çökelme (%)
W10	1	Ç	100	32,50
W10S	1	SD+Ç	5+95	0,00
W10SNS3	1	NS+SD+Ç	0,3+5+94,7	0,00
W10SNS6	1	NS+SD+Ç	0,6+5+94,4	0,00
W10SNS9	1	NS+SD+Ç	0,9+5+94,1	0,00
W10SNA3	1	NA+SD+Ç	0,3+5+94,7	0,00
W10SNA6	1	NA+SD+Ç	0,6+5+94,4	0,00
W10SNA9	1	NA+SD+Ç	0,9+5+94,1	0,00
W14	1,4	Ç	100	44,50
W14S	1,4	SD+Ç	5+95	1,80
W14SNS3	1,4	NS+SD+Ç	0,3+5+94,7	2,10
W14SNS6	1,4	NS+SD+Ç	0,6+5+94,4	1,70
W14SNS9	1,4	NS+SD+Ç	0,9+5+94,1	0,90
W14SNA3	1,4	NA+SD+Ç	0,3+5+94,7	2,00
W14SNA6	1,4	NA+SD+Ç	0,6+5+94,4	2,40
W14SNA9	1,4	NA+SD+Ç	0,9+5+94,1	1,50
W18	1,8	Ç	100	56,50
W18S	1,8	SD+Ç	5+95	6,25
W18SNS3	1,8	NS+SD+Ç	0,3+5+94,7	5,50
W18SNS6	1,8	NS+SD+Ç	0,6+5+94,4	6,05
W18SNS9	1,8	NS+SD+Ç	0,9+5+94,1	3,10
W18SNA3	1,8	NA+SD+Ç	0,3+5+94,7	5,00
W18SNA6	1,8	NA+SD+Ç	0,6+5+94,4	6,10
W18SNA9	1,8	NA+SD+Ç	0,9+5+94,1	4,80



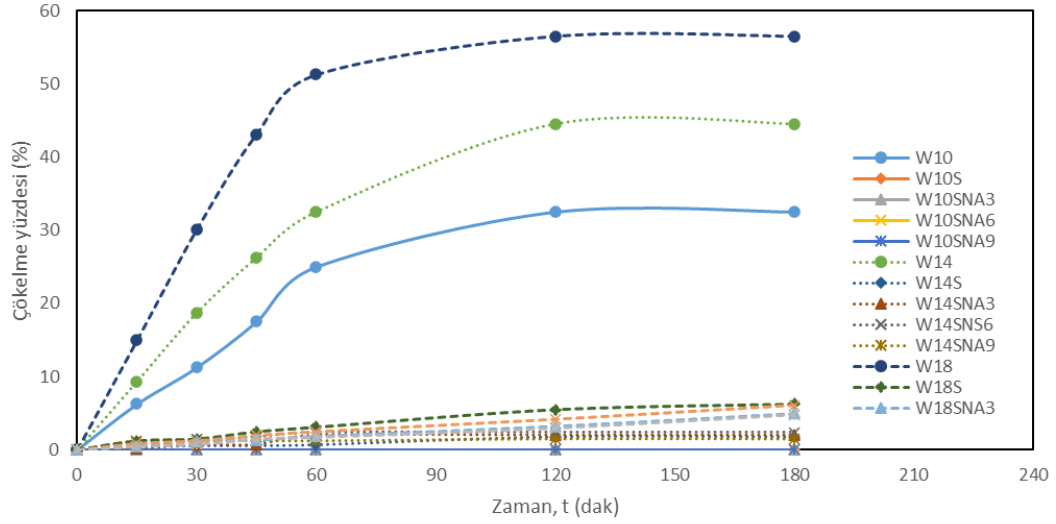
Şekil 33. Nano silika katkılı karışımların çökeltme yüzdesinin nano silika yüzdesi ile değişimi



Şekil 34. Nano alümina katkılı karışımların çökeltme yüzdesinin nano alümina yüzdesi ile değişimi



Şekil 35. Nano silika katkılı karışımların çökeltme yüzdesinin zamanla değişimi



Şekil 36. Nano alümina katkılı karışımların çökeltme yüzdesinin zamanla değişimi

Tablo 8 ve Şekil 33.-36. incelendiğinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Çalışma kapsamında kullanılan tüm katkılarda s/k oranı arttıkça çökeltme yüzdesi artmıştır.
- Aynı s/k oranında, nano silika ve nano alümina katkı yüzdeleri arttıkça çökeltme miktarları azalmıştır.
- Nano silika kullanılan karışımlarda, tüm s/k oranlarında en düşük çökeltme yüzdesi % 0,9 nano silika içeren enjeksiyon harçlarından elde edilmiştir.
- Nano alümina kullanılan karışımlarda, tüm s/k oranlarında en düşük çökeltme yüzdesi % 0,9 nano alümina içeren enjeksiyon harçlarından elde edilmiştir.

Enjeksiyon harcının hem enjekte edilebilir hem de stabil olması gerekmektedir. Harcın s/k oranı arttıkça enjekte edilebilirliği artmaktadır. s/k oranının yanında homojen olmalı, yani kuma veya çökeltme olmamalıdır. Kıvamı boşlukların yerleştirilmesine ve doldurulmasına izin vermelidir. Ayrıca malzeme homojen olmalıdır, yani hiçbir çökeltme veya kanama olayı göstermemelidir. s/k oranı arttıkça enjeksiyon harcı daha az stabil olmakta ve çökeltme ve/veya kuma olayı artmaktadır. Enjeksiyon harcında katkı olarak silis dumanı, nano silika ve nano alüminanın kullanılması çökeltme ve kusmayı azaltmaktadır. Bunun sebebi özgül yüzey alanlarının yüksek olmasıdır.

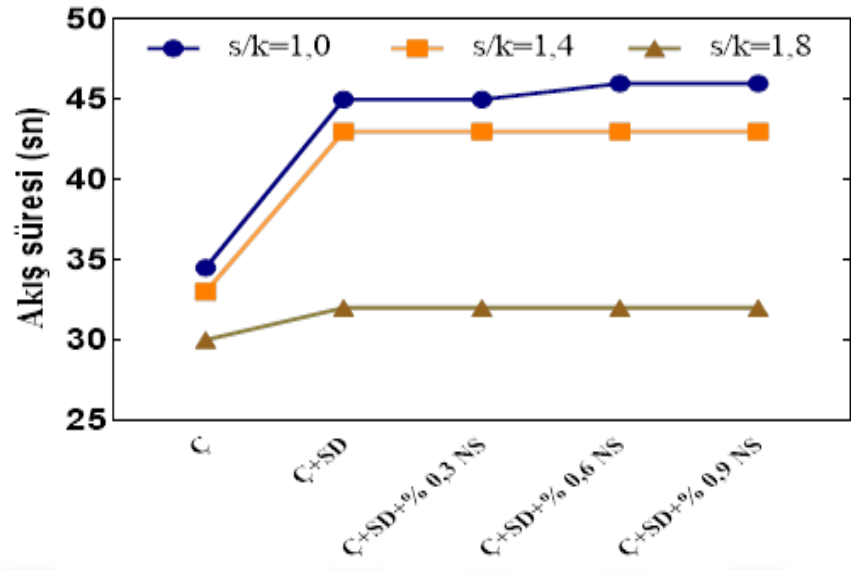
Marsh Hunisi deney sonuçları

Taze harçların akışkanlığı genellikle akış süresi ile temsil edilir ve Marsh Hunisi ile ölçülür. Enjeksiyonda kullanılacak çimento, çimento + % 5 silis dumanı, çimento + % 5 silis dumanı + nano silika (% 0,3, % 0,6 ve % 0,9) ve çimento + % 5 silis dumanı + nano alümina

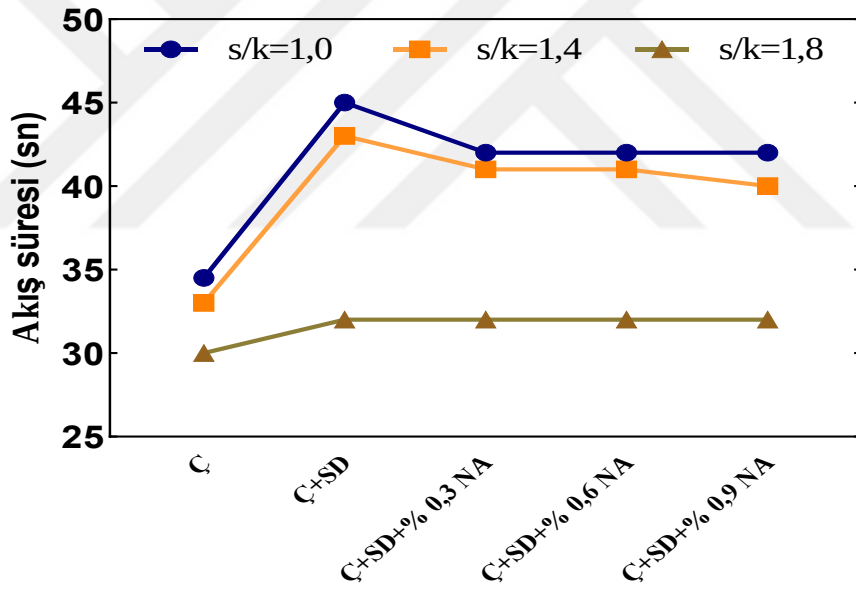
(% 0,3, % 0,6 ve % 0,9) karışımları üzerinde 1,0, 1,4 ve 1,8 s/k oranlarında Marsh Hunisi deneyleri yapılarak akış süreleri belirlenmiştir. Akış süreleri Tablo 8’de verilmiştir. Nano silika katkılı karışımların akış süresinin nano silika yüzdesi ile değişimi Şekil 37’ de, nano alümina katkılı karışımların akış süresinin nano alümina yüzdesi ile değişimi Şekil 38’ de ve tüm karışımların su/katı oranı ile akış süresinin değişimi Şekil 39’da verilmiştir.

Tablo 9. Enjeksiyon Karışımlarının Akış Süreleri

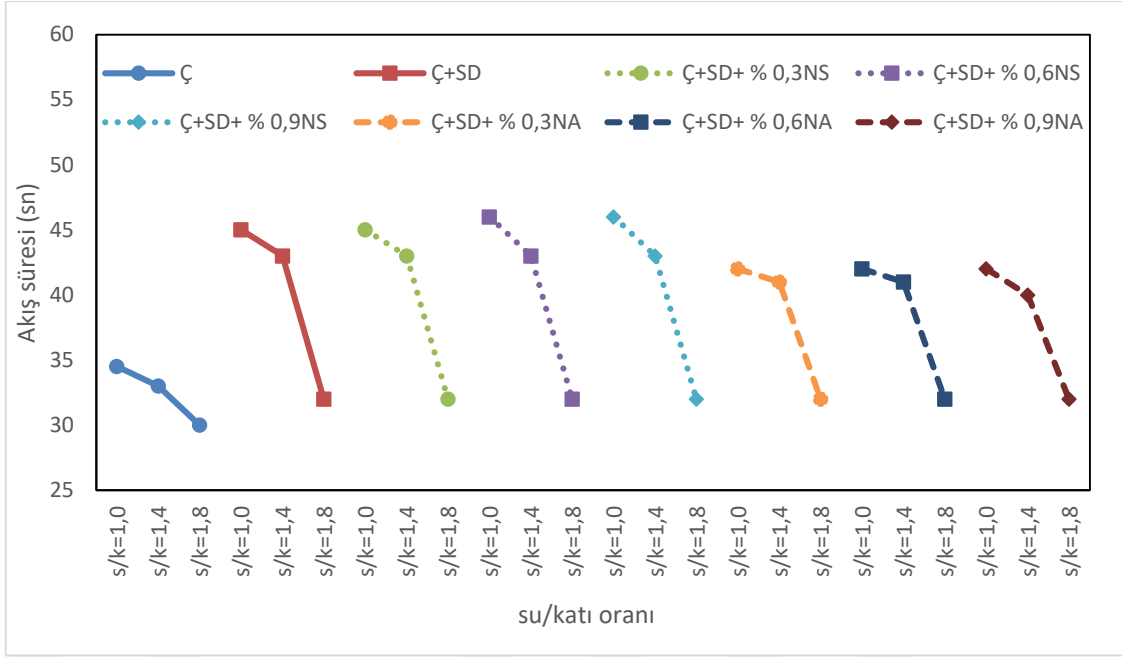
Kod	s/k	Katkı	Katkı Oranı (%)	Akma süresi (sn)
W10	1	Ç	100	34,5
W10S	1	SD+Ç	5+95	45
W10SNS3	1	NS+SD+Ç	0,3+5+94,7	45
W10SNS6	1	NS+SD+Ç	0,6+5+94,4	46
W10SNS9	1	NS+SD+Ç	0,9+5+94,1	46
W10SNA3	1	NA+SD+Ç	0,3+5+94,7	42
W10SNA6	1	NA+SD+Ç	0,6+5+94,4	42
W10SNA9	1	NA+SD+Ç	0,9+5+94,1	42
W14	1,4	Ç	100	33
W14S	1,4	SD+Ç	5+95	43
W14SNS3	1,4	NS+SD+Ç	0,3+5+94,7	43
W14SNS6	1,4	NS+SD+Ç	0,6+5+94,4	43
W14SNS9	1,4	NS+SD+Ç	0,9+5+94,1	43
W14SNA3	1,4	NA+SD+Ç	0,3+5+94,7	41
W14SNA6	1,4	NA+SD+Ç	0,6+5+94,4	41
W14SNA9	1,4	NA+SD+Ç	0,9+5+94,1	40
W18	1,8	Ç	100	30
W18S	1,8	SD+Ç	5+95	32
W18SNS3	1,8	NS+SD+Ç	0,3+5+94,7	32
W18SNS6	1,8	NS+SD+Ç	0,6+5+94,4	32
W18SNS9	1,8	NS+SD+Ç	0,9+5+94,1	32
W18SNA3	1,8	NA+SD+Ç	0,3+5+94,7	32
W18SNA6	1,8	NA+SD+Ç	0,6+5+94,4	32
W18SNA9	1,8	NA+SD+Ç	0,9+5+94,1	32



Şekil 37. Nano silika katkılı karışımların akış süresinin nano silika yüzdesi ile değişimi



Şekil 38. Nano alümina katkılı karışımların akış süresinin nano alümina yüzdesi ile değişimi



Şekil 39. Enjeksiyon harçlarının su/katı oranı ile akış süresinin değişimi

Tablo 9 ve Şekil 37.-39. aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Maksimum akışkanlık $s/k=1,8$ ve sadece Normal Portland çimentosu kullanılarak hazırlanan enjeksiyon harçlarından elde edilmiştir (30 sn). 4
- s/k oranının artmasıyla tüm katkı yüzdelерinde hazırlanan enjeksiyon harçlarının akış süresinin azaldığı (viskozitenin azaldığı) görülmüştür.
- Aynı s/k oranında, çimentoya silis dumanı katılarak elde edilen enjeksiyon harçlarının akış süreleri artmıştır.
- Aynı s/k oranında, çimentoya silis dumanı ve nano silika katılarak elde edilen enjeksiyon harçlarının akış süreleri artmıştır.
- Aynı s/k oranında, çimentoya silis dumanı ve nano alümina katılarak elde edilen enjeksiyon harçlarının akış süreleri artmıştır.
- $s/k=1,0, 1,4$ ve $1,8$ olan enjeksiyon harçlarına nano silika ve nano alüminanın katılması, silis duman katkılı çimentolu enjeksiyon harçlarına göre akış süresinde az bir artış olmuştur.
- Nano silika ve nano alümina katkısının artmasıyla akış süresinde az da olsa bir artış olmuştur.

Enjeksiyonda kullanılacak olan karışımların akış süreleri incelendiğinde, aynı s/k oranında silis dumanı, nano silika ve nano alümina katkıları akış süresini arttırmıştır. Bu davranış enjeksiyon harcının plastik viskozitesindeki değişimden kaynaklanmaktadır (Sonebi *et al.* 2015). Silis dumanı, nano silika ve nano alümina katkılı enjeksiyonların akış süresini arttırması, tanelerin çok ince olmasından (özellik yüzey alanlarının büyük olması) kaynaklandığı

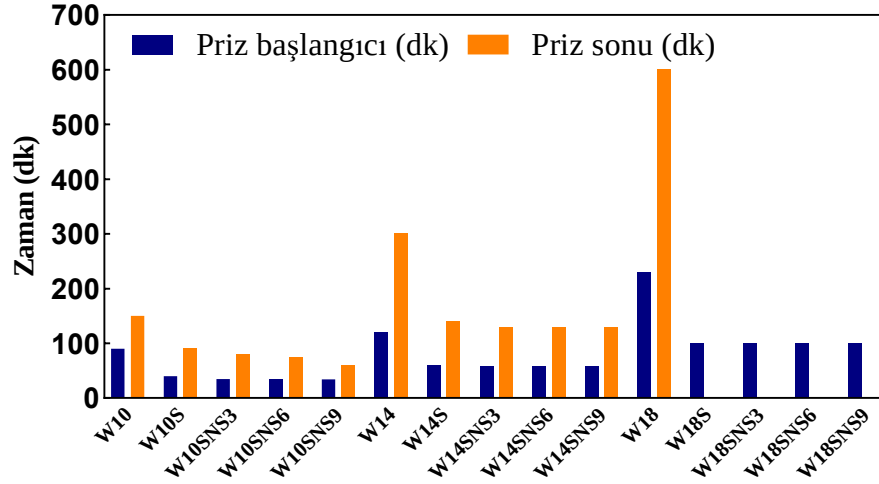
düşünülmektedir. Kullanılan enjeksiyon süspansiyonlarının enjekte edilebilirliği, katkı yüzdesi, katkı oranı ve s/k oranıyla ilgilidir (Jafarian Barough *et al.* 2021).

Priz süresi deney sonuçları

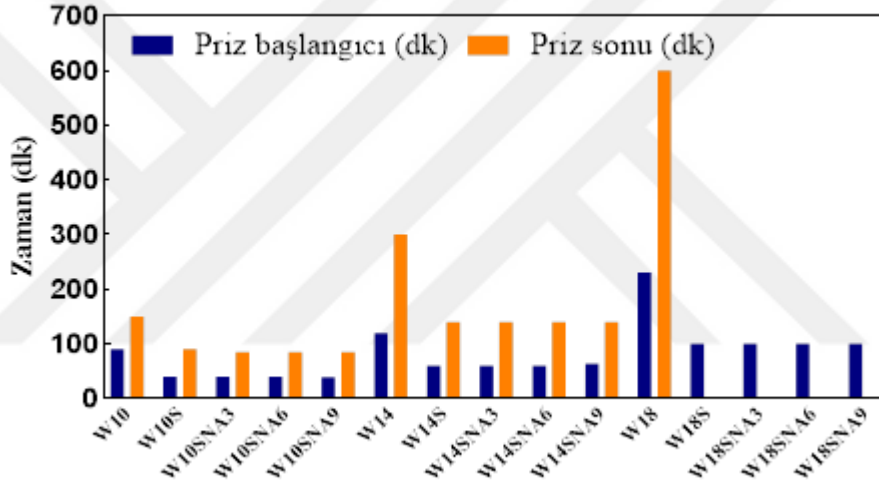
Tez çalışması kapsamında farklı katkı tipleri, yüzdeleri ve s/k oranlarının priz süresi üzerine etkilerini araştırmak ve daha sonra yapılacak olan enjeksiyon işlerinde kullanmak için 24 adet Vicat iğnesi deneyleri yapılmış ve priz başlangıç ve priz bitiş süreleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 10’da gösterilmiştir. Nano silika katkılı karışımların priz başlangı ve bitiş süresinin nano silika yüzdesi ile değişimi Şekil 41’de ve Nano alümina katkılı karışımların priz başlangı ve bitiş süresinin nano alümina yüzdesi ile değişimi Şekil 42’de verilmiştir.

Tablo 10. Enjeksiyon Harç Karışımlarının Vicat İğnesi Deney Sonuçları

Kod	s/k	Katkı	Katkı Oranı (%)	Priz başlangıcı (dk)	Priz sonu (dk)
W10	1	Ç	100	90	150
W10S	1	SD+Ç	5+95	40	90
W10SNS3	1	NS+SD+Ç	0,3+5+94,7	35	79
W10SNS6	1	NS+SD+Ç	0,6+5+94,4	35	75
W10SNS9	1	NS+SD+Ç	0,9+5+94,1	34	60
W10SNA3	1	NA+SD+Ç	0,3+5+94,7	40	85
W10SNA6	1	NA+SD+Ç	0,6+5+94,4	40	85
W10SNA9	1	NA+SD+Ç	0,9+5+94,1	39	85
W14	1,4	Ç	100	120	300
W14S	1,4	SD+Ç	5+95	60	140
W14SNS3	1,4	NS+SD+Ç	0,3+5+94,7	58	130
W14SNS6	1,4	NS+SD+Ç	0,6+5+94,4	58	130
W14SNS9	1,4	NS+SD+Ç	0,9+5+94,1	58	130
W14SNA3	1,4	NA+SD+Ç	0,3+5+94,7	60	140
W14SNA6	1,4	NA+SD+Ç	0,6+5+94,4	60	140
W14SNA9	1,4	NA+SD+Ç	0,9+5+94,1	63	140
W18	1,8	Ç	100	230	600
W18S	1,8	SD+Ç	5+95	100	-
W18SNS3	1,8	NS+SD+Ç	0,3+5+94,7	100	-
W18SNS6	1,8	NS+SD+Ç	0,6+5+94,4	100	-
W18SNS9	1,8	NS+SD+Ç	0,9+5+94,1	100	-
W18SNA3	1,8	NA+SD+Ç	0,3+5+94,7	100	-
W18SNA6	1,8	NA+SD+Ç	0,6+5+94,4	100	-
W18SNA9	1,8	NA+SD+Ç	0,9+5+94,1	100	-



Şekil 40. Nano silika katkılı karışımların priz süresinin nano silika yüzdesi ile değişimi



Şekil 41. Nano alümina katkılı karışımların priz süresinin nano alümina yüzdesi ile değişimi

Enjeksiyon deneylerinde kullanılacak karışımlarının priz süreleri belirlenmiş ve aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır.

- Sadece çimentolu enjeksiyon harçların s/k oranı arttıkça priz başlangıç (60 dk, 120 dk, 230 dk) ve bitiş süreleri (150 dk, 300 dk, 600 dk) uzamaktadır. Sadece çimentolu ve s/k=1,4 olan enjeksiyon harcının başlangıç priz ve bitiş süreleri s/k=1,0 olan enjeksiyon harçlarına göre % 33 ve % 100 uzamıştır. Sadece çimentolu ve s/k=1,8 olan enjeksiyon harcının başlangıç priz ve bitiş süreleri s/k=1,0 olan enjeksiyon harçlarına göre % 156 ve % 300 uzamıştır. s/k oranının fazla olmasının priz süresini uzadığı bilinmektedir.
- Çimento ve % 5 silis dumanı katkılı enjeksiyon harçların s/k oranı arttıkça priz başlangıç ve bitiş süreleri uzamaktadır. Çimento ve % 5 silis dumanı ve s/k=1,4 olan enjeksiyon harcının başlangıç priz ve bitiş süreleri s/k=1,0 olan enjeksiyon harçlarına

göre % 50 ve % 56 uzamıştır. Çimento ve % 5 silis dumanı ve s/k=1,8 olan enjeksiyon harcının başlangıç priz süresi s/k=1,0 olan enjeksiyon harcına göre % 150 uzamıştır. Çimento ve % 5 silis dumanı ve s/k=1,8 olan enjeksiyon harcının priz bitiş süresi 600 dakika geçmesine rağmen tespit edilememiştir.

- Çimentoya % 5 silis dumanı ilave edilerek elde edilen enjeksiyon harçlarının priz başlangıç ve bitiş süreleri aynı s/k oranlarında sadece çimentolu enjeksiyon harçlarına göre azalmıştır. s/k=1,0 oranında hazırlanan, çimento ve % 5 silis dumanı enjeksiyon harcının priz başlangıç ve bitiş süreleri sadece çimentolu enjeksiyon harçlarına göre % 56 ve % 40 azalmıştır. s/k=1,4 olan numunelerde, çimentoya %5 silis dumanı katılarak elde edilen enjeksiyon harcının, sadece çimento harcına göre ilk priz süresi %50 ve son priz süresi %53 azalmıştır. s/k=1,8 olan numunelerde, çimentoya %5 silis dumanı katılması sonucunda elde edilen harcın, sadece çimento harcına göre ilk priz süresi %57 azalmış ve 600 dakika geçmesine rağmen priz bitiş süresi belirlenememiştir.
- Aynı s/k oranlarında, çimento ve % 5 silis dumanına ilave olarak belirlenen oranlarda nano silika veya nano alümina eklenerek elde edilen enjeksiyon karışımlarının priz başlangıç ve bitiş süreleri, sadece çimento ve çimento + % 5 silis dumanı katılarak elde edilen enjeksiyon harçlarına göre azalmıştır. s/k=1,0 olan numunelerde, çimento+% 5 silis dumanına ilave % 0,9 nano silika katılarak elde edilen enjeksiyon harcının çimento harcına göre priz başlangıç süresi % 62 ve priz bitiş süresi % 60, %0,9 nano alümina katılması durumunda çimentoya harcına göre priz başlangıç süresi % 57 ve priz bitiş süresi % 43 azalmıştır. s/k=1,4 olan numunelerde, çimento+%5 silis dumanına ilave % 0,9 nano silika katılarak elde edilen harcın çimento harcına göre priz başlangıç süresi %52 ve priz bitiş süresi %56, %0,9 nano alümina katılması durumunda çimentoya göre priz başlangıç süresi % 48 ve priz bitiş süresi % 53 azalmıştır. s/k=1,8 olan numunelerde ise, çimento+%5 silis dumanına ilave olarak nano silika ve nano alümina katılması durumunda elde edilen harçların çimentoya göre, ipriz başlangıç süresi %57 azalmış ve priz bitiş süresi belirlenmemiştir.
- Aynı nano silika ve nano alümina oranlarında ve aynı s/k oranlarında hazırlanan harçların priz başlangıç ve bitiş süreleri karşılaştırıldığında nano silika katkılı harçların priz süreleri daha düşük çıkmıştır.

Çimento ve katkı maddeleri arasındaki etkileşim, taze harçların reolojik özelliklerini ve priz sürelerini etkiler (Perret *et al.* 2000). Nano silika ve nano alümina nano malzemeler küçük tane boyutlarına ve büyük yüzey enerjisine sahiptirler. Bu özelliklerden dolayı çimento esaslı

nano silika ve nano alümina içeren harçların hidratasyon hızı artmakta, priz süreleri azalmaktadır (Seifan *et al.* 2021; Nazari and Riahi 2011; Nazari *et al.* 2010).

Çimento esaslı enjeksiyon harçlarında silis dumanının kullanılması, priz süresinin azalmasına neden olmaktadır. Silis dumanı esasen puzolanik reaksiyon sağlar ve taneler çok küçük olduğu için reaksiyonu hızlandırır ve erken dayanımı da arttırabilir (Oltulu and Şahin 2014).

Enjeksiyon işlemleri sırasında priz süresinin kısa olmasının enjeksiyon makinelerine zarar verebileceği, uzun olmasının ise inşaat süresini uzatacağı ve verimliliği azaltacağı göz önünde bulundurularak harçların priz süresinin sıkı bir şekilde denetlenmesi gerekmektedir.

Karışımların Mekanik Özellikleri Deney Sonuçları

Karışım numunelerinin tek eksenli basınç dayanımı

s/k=1,0, 1,4, 1,8 oranlarında çimento, çimento+ % 5 silis dumanı, çimento+% 5 silis dumanı+ (% 0,3, % 0,6 ve % 0,9) nano silika ve çimento+% 5 silis dumanı+nano alümina (% 0,3, % 0,6 ve % 0,9) karışım numunelerinin 7.ve 28.gündeki tek eksenli basınç dayanımları belirlenmiş ve Tablo 11’de verilmiştir.

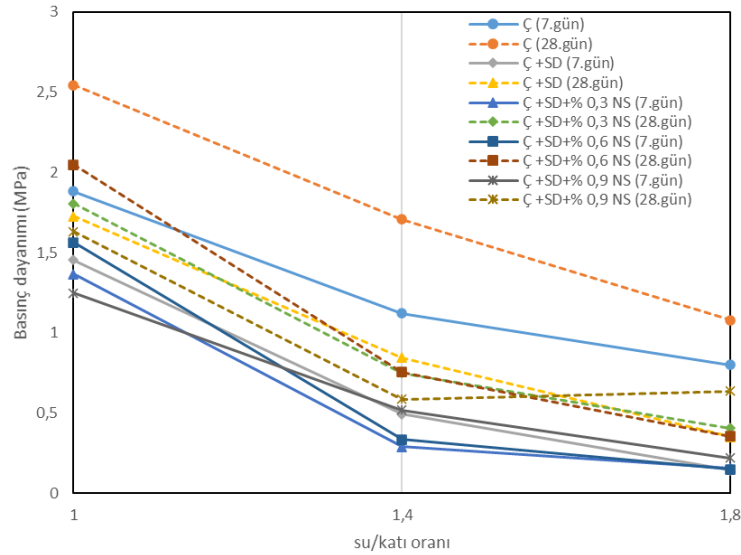
Nano silika katkılı karışım numunelerinin s/k oranına bağlı olarak tek eksenli basınç dayanımı değişimleri Şekil 42’de ve nano alümina katkılı karışım numunelerinin s/k oranına bağlı olarak tek eksenli basınç dayanımı değişimleri ise Şekil 43’de verilmiştir.

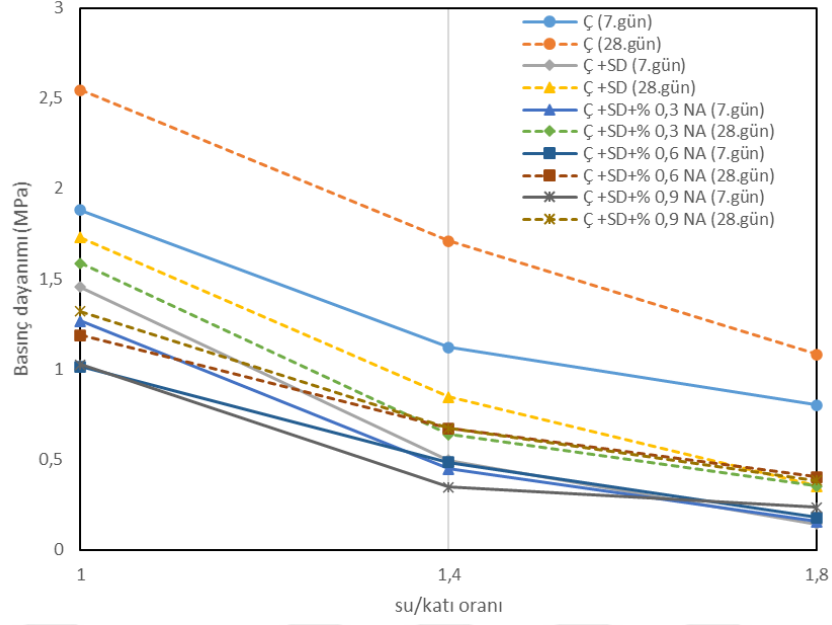
Tablo 11. Karışım Numunelerinin Tek Eksenli Basınç Dayanımları

Kod	s/k	Katkı	Katkı Oranı (%)	Tek eksenli basınç dayanımı (7. gün) MPa	Tek eksenli basınç dayanımı (28. gün) MPa
K10	1	Ç	100	1,881	2,544
K10S	1	SD+Ç	5+95	1,453	1,728
K10SNS3	1	NS+SD+Ç	0,3+5+94,7	1,367	1,805
K10SNS6	1	NS+SD+Ç	0,6+5+94,4	1,565	2,050
K10SNS9	1	NS+SD+Ç	0,9+5+94,1	1,249	1,631
K10SNA3	1	NA+SD+Ç	0,3+5+94,7	1,265	1,585
K10SNA6	1	NA+SD+Ç	0,6+5+94,4	1,014	1,188
K10SNA9	1	NA+SD+Ç	0,9+5+94,1	1,024	1,320
K14	1,4	Ç	100	1,121	1,708
K14S	1,4	SD+Ç	5+95	0,494	0,846
K14SNS3	1,4	NS+SD+Ç	0,3+5+94,7	0,290	0,749
K14SNS6	1,4	NS+SD+Ç	0,6+5+94,4	0,336	0,755

Tablo 11. (devamı)

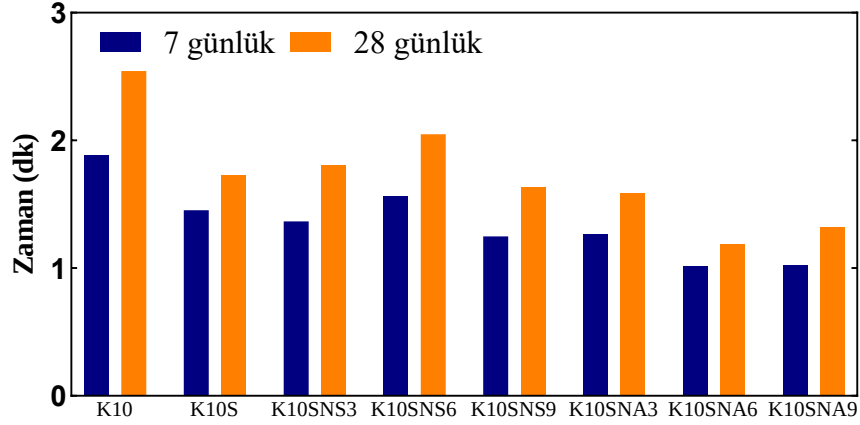
K14SNS9	1,4	NS+SD+Ç	0,9+5+94,1	0,519	0,586
K14SNA3	1,4	NA+SD+Ç	0,3+5+94,7	0,449	0,637
K14SNA6	1,4	NA+SD+Ç	0,6+5+94,4	0,484	0,672
K14SNA9	1,4	NA+SD+Ç	0,9+5+94,1	0,347	0,672
K18	1,8	Ç	100	0,800	1,080
K18S	1,8	SD+Ç	5+95	0,143	0,352
K18SNS3	1,8	NS+SD+Ç	0,3+5+94,7	0,157	0,407
K18SNS6	1,8	NS+SD+Ç	0,6+5+94,4	0,148	0,356
K18SNS9	1,8	NS+SD+Ç	0,9+5+94,1	0,219	0,637
K18SNA3	1,8	NA+SD+Ç	0,3+5+94,7	0,157	0,352
K18SNA6	1,8	NA+SD+Ç	0,6+5+94,4	0,178	0,403
K18SNA9	1,8	NA+SD+Ç	0,9+5+94,1	0,234	0,382

**Şekil 42.** Nano silika katkılı karışım numunelerinin s/k oranına bağlı olarak tek eksenli basınç dayanımı değişimleri

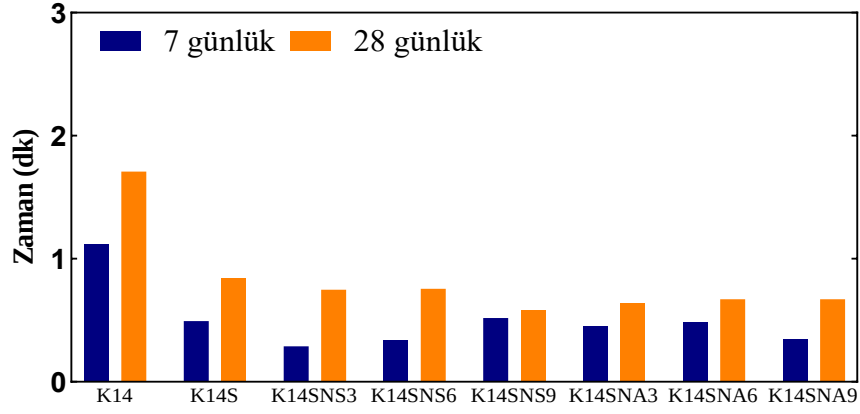


Şekil 43. Nano alümina katkılı karışım numunelerinin s/k oranına bağlı olarak tek eksenli basınç dayanımı değişimleri

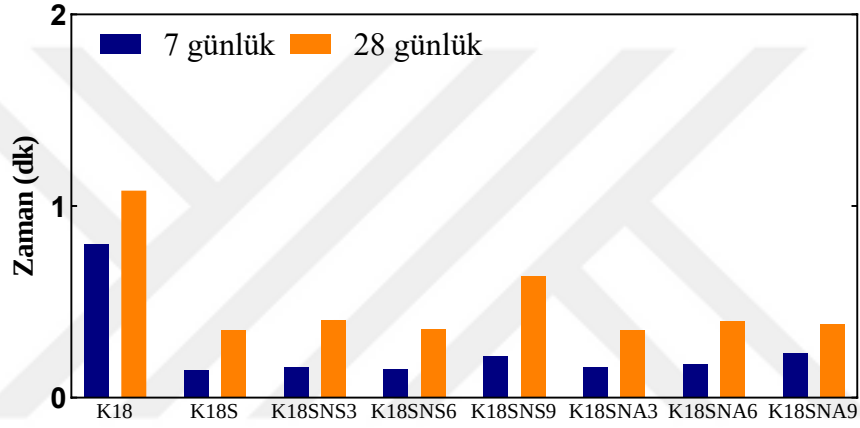
Çimento, çimento + % 5 silis dumanı, çimento + % 5 silis dumanı + (% 0,3, % 0,6 ve % 0,9) nano silika ve çimento + % 5 silis dumanı + (% 0,3, % 0,6 ve % 0,9) nano alümina katkılı numunelerinin tek eksenli basınç dayanımlarının kür süresine bağlı olarak değişimi Şekil 44-46’de verilmiştir.



Şekil 44. s/k=1,0 olan harçların tek eksenli basınç dayanımlarının kür süresine bağlı olarak değişimi

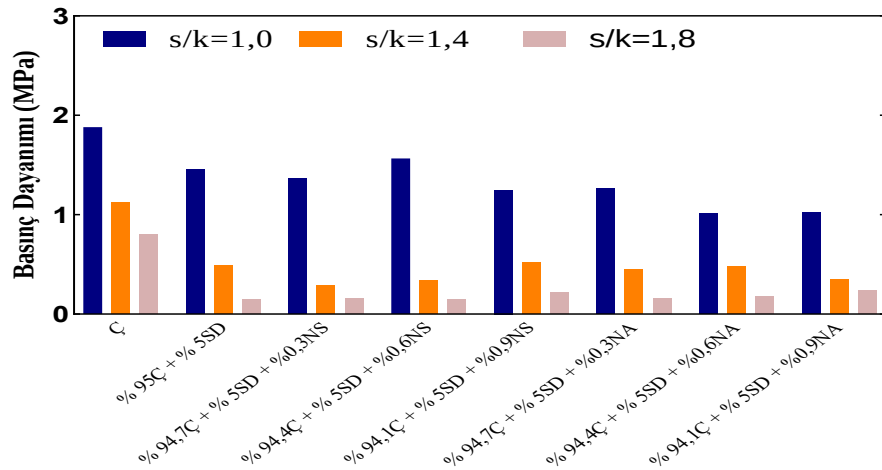


Şekil 45. $s/k=1,4$ olan harçların tek eksenli basınç dayanımlarının kür süresine bağlı olarak değişimi

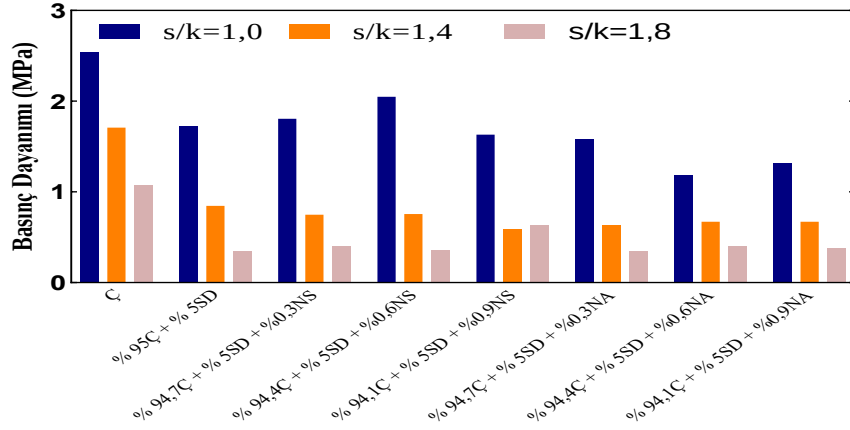


Şekil 46. $s/k=1,8$ olan harçların tek eksenli basınç dayanımlarının kür süresine bağlı olarak değişimi

Harç karışımların 7.gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımlarının s/k oranına ve katkı yüzdesine göre değişimi Şekil 47’de ve 7.gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımlarının s/k oranına ve katkı yüzdesine göre değişimi Şekil 49’da verilmiştir.



Şekil 47. Harç karışımların 7.gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımlarının s/k oranına ve katkı yüzdesine göre değişimi



Şekil 48. Harç karışımların 28.gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımlarının s/k oranına ve katkı yüzdesine göre değişimi

Tablo 11 ve Şekil 43-48 incelendiğinde aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır.

- Çimento + % 5 silis dumanı, çimento + % 5 silis dumanı + nano silika (% 0,3, % 0,6 ve % 0,9) ve çimento % 5 silis dumanı + nano alümina (% 0,3, % 0,6 ve % 0,9) içeren karışımların 7. ve 28. gün tek eksenli basınç dayanımları, sadece çimento içeren karışımlardan daha düşük çıkmıştır.
- Kür süresi arttıkça tek eksenli basınç dayanımı da artmıştır.
- En yüksek tek eksenli basınç mukavemeti (2,544 MPa) s/k=1,0, sadece çimentonun kullanıldığı (K10) ve 28 gün kür edilmiş numunelerden elde edilmiştir.
- s/k oranı arttıkça tek eksenli basınç dayanımı tüm enjeksiyon karışımlarında düşmüştür.
- s/k=1,0 olan karışımlarda, K10 karışım numunesinin 28 günlük tek eksenli basınç dayanımı 7 günlük tek eksenli basınç dayanımına göre % 35 artış göstermiştir. K10S karışım numunesinin 28 günlük tek eksenli basınç dayanımı 7 günlük tek eksenli basınç dayanımına göre % 19 artış göstermiştir. K10SNS3 karışım numunesinin 28 günlük tek eksenli basınç dayanımı 7 günlük tek eksenli basınç dayanımına göre % 32, K10SNS6 karışım numunesinin 28 günlük tek eksenli basınç dayanımı 7 günlük tek eksenli basınç dayanımına göre % 31 ve K10SNS9 karışım numunesinin 28 günlük tek eksenli basınç dayanımı 7 günlük tek eksenli basınç dayanımına göre % 30 artış göstermiştir. K10SNA3 karışım numunesinin 28 günlük tek eksenli basınç dayanımı 7 günlük tek eksenli basınç dayanımına göre % 25, K10SNA6 karışım numunesinin 28 günlük tek eksenli basınç dayanımı 7 günlük tek eksenli basınç dayanımına göre % 17 ve K10SNA9 karışım numunesinin 28 günlük tek eksenli basınç dayanımı 7 günlük tek eksenli basınç dayanımına göre % 28 artış göstermiştir.

- $s/k=1,4$ olan karışımlarda, maksimum tek eksenli basınç dayanımı, 28 günlük ve %100 çimento içeren karışımlarda elde edilmiştir. K14 karışım numunesinin 28 günlük tek eksenli basınç dayanımı 7 günlük tek eksenli basınç dayanımına göre % 52 artış göstermiştir. K14S karışım numunesinin 28 günlük tek eksenli basınç dayanımı 7 günlük tek eksenli basınç dayanımına göre % 71 artış göstermiştir. K14SNS3 karışım numunesinin 28 günlük tek eksenli basınç dayanımı 7 günlük tek eksenli basınç dayanımına göre % 158, K14SNS6 karışım numunesinin 28 günlük tek eksenli basınç dayanımı 7 günlük tek eksenli basınç dayanımına göre % 124 ve K14SNS9 karışım numunesinin 28 günlük tek eksenli basınç dayanımı 7 günlük tek eksenli basınç dayanımına göre % 13 artış göstermiştir. K14SNA3 karışım numunesinin 28 günlük tek eksenli basınç dayanımı 7 günlük tek eksenli basınç dayanımına göre % 42, K14SNA6 karışım numunesinin 28 günlük tek eksenli basınç dayanımı 7 günlük tek eksenli basınç dayanımına göre % 39 ve K14SNA9 karışım numunesinin 28 günlük tek eksenli basınç dayanımı 7 günlük tek eksenli basınç dayanımına göre % 94 artış göstermiştir.
- $s/k=1,8$ olan karışımlarda, maksimum tek eksenli basınç dayanımı, 28 günlük ve %100 çimento içeren karışımlarda elde edilmiştir. K18 karışım numunesinin 28 günlük tek eksenli basınç dayanımı 7 günlük tek eksenli basınç dayanımına göre % 35 artış göstermiştir. K18S karışım numunesinin 28 günlük tek eksenli basınç dayanımı 7 günlük tek eksenli basınç dayanımına göre % 146 artış göstermiştir. K18SNS3 karışım numunesinin 28 günlük tek eksenli basınç dayanımı 7 günlük tek eksenli basınç dayanımına göre % 159, K18SNS6 karışım numunesinin 28 günlük tek eksenli basınç dayanımı 7 günlük tek eksenli basınç dayanımına göre % 141 ve K18SNS9 karışım numunesinin 28 günlük tek eksenli basınç dayanımı 7 günlük tek eksenli basınç dayanımına göre % 191 artış göstermiştir. K18SNA3 karışım numunesinin 28 günlük tek eksenli basınç dayanımı 7 günlük tek eksenli basınç dayanımına göre % 124, K18SNA6 karışım numunesinin 28 günlük tek eksenli basınç dayanımı 7 günlük tek eksenli basınç dayanımına göre % 126 ve K18SNA9 karışım numunesinin 28 günlük tek eksenli basınç dayanımı 7 günlük tek eksenli basınç dayanımına göre % 63 artış göstermiştir.
- $s/k=1,0$ olan karışımlarda, 28 gün kür süresi sonunda en yüksek tek eksenli basınç dayanımı % 100 çimento içeren numuneden (K10) elde edilmiştir (2,544). $s/k=1,0$ olan karışımlarda, K10S, K10SNS3, K10SNS6 ve K10SNS9 numunelerinin 28 gün kür süresi sonundaki basınç dayanımları, K10 numunesine göre yaklaşık % 32, % 29, % 19, % 36 azalmıştır. $s/k=1,0$ olan karışımlarda, K10SNA3, K10SNA6 ve

K10SNA9 numunelerinin 28 gün kür süresi sonundaki basınç dayanımları, K10 numunesine göre yaklaşık % 38, % 53 ve % 48 azalma görülmüştür. $s/k=1,0$ olan karışımlarda, 7 gün kür süresi sonunda en yüksek tek eksenli basınç dayanımı % 100 çimento içeren numuneden (K10) 1,881 MPa olarak elde edilmiştir. $s/k=1,0$ olan karışımlarda, K10S, K10SNS3, K10SNS6 ve K10SNS9 numunelerinin 7 gün kür süresi sonundaki basınç dayanımları, K10 numunesine göre yaklaşık % 23, % 27, % 17, % 34 azalmıştır. $s/k=1,0$ olan karışımlarda, K10SNA3, K10SNA6 ve K10SNA9 numunelerinin 7 gün kür süresi sonundaki basınç dayanımları, K10 numunesine göre yaklaşık % 33, % 46 ve % 45 azalma görülmüştür.

- $s/k=1,4$ olan karışımlarda, 28 gün kür süresi sonunda en yüksek tek eksenli basınç dayanımı % 100 çimento içeren numuneden (K14) elde edilmiştir (1,708 MPa). $s/k=1,4$ olan karışımlarda, K14S, K14SNS3, K14SNS6 ve K14SNS9 numunelerinin 28 gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımları, K14 numunesine göre yaklaşık % 50, % 56, % 56, % 66 azalmıştır. $s/k=1,0$ olan karışımlarda, K14SNA3, K14SNA6 ve K14SNA9 numunelerinin 28 gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımları, K14 numunesine göre yaklaşık % 63, % 61 ve % 61 azalma görülmüştür. $s/k=1,4$ olan karışımlarda, 7 gün kür süresi sonunda en yüksek tek eksenli basınç dayanımı % 100 çimento içeren numuneden (K14) 1,121 MPa olarak elde edilmiştir. $s/k=1,4$ olan karışımlarda, K14S, K14SNS3, K14SNS6 ve K14SNS9 numunelerinin 7 gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımları, K14 numunesine göre yaklaşık % 56, % 74, % 70, % 54 azalmıştır. $s/k=1,4$ olan karışımlarda, K14SNA3, K14SNA6 ve K14SNA9 numunelerinin 7 gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımları, K14 numunesine göre yaklaşık % 60, % 57 ve % 69 azalma görülmüştür.
- $s/k=1,8$ olan karışımlarda, 28 gün kür süresi sonunda en yüksek tek eksenli basınç dayanımı % 100 çimento içeren numuneden (K18) elde edilmiştir (1,08 MPa). $s/k=1,8$ olan karışımlarda, K18S, K18SNS3, K18SNS6 ve K18SNS9 numunelerinin 28 gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımları, K18 numunesine göre yaklaşık % 67, % 62, % 67, % 41 azalmıştır. $s/k=1,8$ olan karışımlarda, K18SNA3, K18SNA6 ve K18SNA9 numunelerinin 28 gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımları, K18 numunesine göre yaklaşık % 67, % 63 ve % 65 azalma görülmüştür. $s/k=1,8$ olan karışımlarda, 7 gün kür süresi sonunda en yüksek tek eksenli basınç dayanımı % 100 çimento içeren numuneden (K18) 0,8 MPa olarak elde edilmiştir. $s/k=1,8$ olan karışımlarda, K18S, K18SNS3, K18SNS6 ve K18SNS9 numunelerinin 7 gün kür süresi sonundaki tek eksenli

basınç dayanımları, K18 numunesine göre yaklaşık % 82, % 80, % 81, % 73 azalmıştır. $s/k=1,8$ olan karışımlarda, K18SNA3, K18SNA6 ve K18SNA9 numunelerinin 7 gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımları, K18 numunesine göre yaklaşık % 80, % 78 ve % 71 azalma görülmüştür.

- Aynı s/k oranlarında ve nano silika ve nano alümina yüzdeleri karıştırılarak elde edilmiş numunelerin 28 günlük tek eksenli basınç mukavemetleri göz önüne alındığında, nano silika katkılı numunelerin tek eksenli basınç dayanımı nano alümina katkılı numunelerden genellikle daha büyük çıkmıştır.
- Aynı s/k oranlarında ve nano silika ve nano alümina yüzdeleri karıştırılarak elde edilmiş numunelerin 7 günlük tek eksenli basınç mukavemetleri göz önüne alındığında, $s/k=1,0$ olan numunelerde nano silika katkılı numunelerin tek eksenli basınç dayanımı nano alümina katkılı numunelerden daha büyük, $s/k=1,4$ ve $1,8$ olan numunelerde ise nano silika katkılı numunelerin tek eksenli basınç dayanımı nano alümina katkılı numunelerden genellikle daha düşük çıkmıştır.
- 7 günlük ve 28 günlük kür süreleri sonundaki tek eksenli basınç dayanımları karşılaştırıldığında, katkılı numunelerde s/k oranı arttıkça kür zamanına bağlı olarak mukavemetteki artış yüzdesi de genellikle daha fazla olmuştur.

Sonuçlar göz önüne alındığında, tüm s/k oranlarında ve kür sürelerinde en yüksek tek eksenli basınç dayanımı sadece çimentonun kullanıldığı karışım numunelerinden elde edilmiştir. Oysa, enjeksiyon yapılmış numunelerde çimento ile birlikte silis dumanı, nano silika ve nano alümina kullanılmasının tek eksenli basınç dayanımını arttırdığı belirlenmiştir. Karışım numunelerinde durum tam tersidir. Karışım numunelerinin hazırlanırken, hazırlanan enjeksiyon harçları iç çapı 38 mm ve yüksekliği 200 mm olan kalıplara dökülmüş, sertleştikten sonra l/d oranı $2/1$ olacak şekilde numunler hazırlanmış ve kürde bekletildikten sonra tek eksenli basınç dayanımları belirlenmiştir. Nano malzemelerin çökeltme oranlarının düşük olmasında dolayı karışım numuneleri daha boşluklu bir yapıya sahip olmuş ve bunun sonucunda mukavemeti katkı yüzdesi arttıkça düşmüştür. Ayrıca, nano malzemelerin büyük özgül yüzeyleri ve van der Waals kuvveti nedeniyle, katkı oranı arttıkça homojen dağılmamakta ve sonucunda mukavemet düşmektedir (Nili and Ehsani 2015).

Enjeksiyon Yapılmış Numunelerin Tek eksenli Basınç Deneyi Sonuçları

Enjeksiyon deneyleri için, kötü derecelenmiş kum zemin (SP), iç çapı 100 mm ve uzunluğu 200 mm olan silindir kalıplara $D_r=\%70$ ve $\%30$ rölatif sıklıkta yerleştirilmiştir. Önceden ön deneyler sonucunda katkı yüzdeleri belirlenen enjeksiyon harcı 200 kPa basınç altında hazırlanan numunelere enjekte edilmiştir. Katkı olarak silis dumanı, nano silika ve nano

alümina kullanılmıştır. Numuneler sertleştikten sonra kalıplardan çıkarılmış ve 7 ve 28 günlük tek eksenli basınç deneyleri için kür edilmiştir. Tek eksenli basınç deneyleri için bir gün önceden numuneler kürden çıkarılmış ve kurutulmuştur. Daha sonra 7 ve 28 gün tek eksenli basınç mukavemetleri belirlenmiştir. D_r =%70 rölatif sıkılıkta hazırlanan numuneler üzerinde yapılan enjeksiyon sonucunda elde edilen 7 ve 28 günlük tek eksenli basınç dayanımları Tablo 12’de ve D_r =%30 rölatif sıkılıkta hazırlanan numuneler üzerinde yapılan enjeksiyon sonucunda elde edilen 7 ve 28 günlük tek eksenli basınç dayanımları ise Tablo 13’de verilmiştir.

Tablo 12. D_r = %70’de Enjeksiyon Yapılmış Numunelerin 7. ve 28. Gündeki Tek Eksenli Basınç Dayanımları

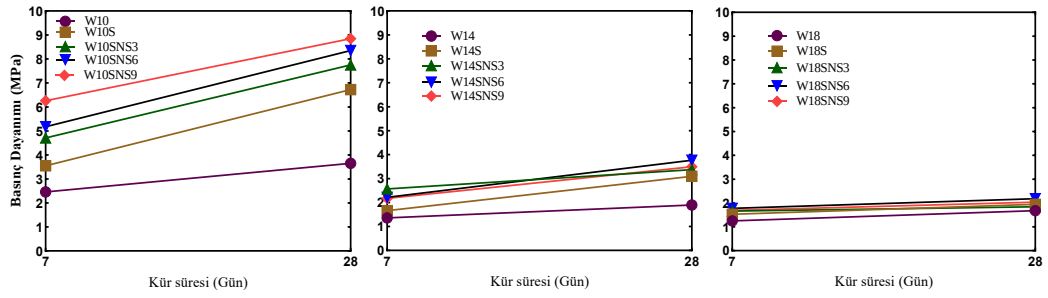
Kod	s/k	Katkı	Katkı Oranı (%)	Tek eksenli basınç dayanımı (7. Gün) (MPa)	Tek eksenli basınç dayanımı (28. Gün) (MPa)
W10	1	Ç	100	2,458	3,650
W10S	1	SD+Ç	5+95	3,546	6,727
W10SNS3	1	NS+SD+Ç	0,3+5+94,7	4,708	7,753
W10SNS6	1	NS+SD+Ç	0,6+5+94,4	5,173	8,354
W10SNS9	1	NS+SD+Ç	0,9+5+94,1	6,258	8,847
W10SNA3	1	NA+SD+Ç	0,3+5+94,7	4,242	6,664
W10SNA6	1	NA+SD+Ç	0,6+5+94,4	4,739	7,581
W10SNA9	1	NA+SD+Ç	0,9+5+94,1	3,248	6,474
W14	1,4	Ç	100	1,360	1,897
W14S	1,4	SD+Ç	5+95	1,662	3,095
W14SNS3	1,4	NS+SD+Ç	0,3+5+94,7	2,566	3,375
W14SNS6	1,4	NS+SD+Ç	0,6+5+94,4	2,218	3,763
W14SNS9	1,4	NS+SD+Ç	0,9+5+94,1	2,173	3,492
W14SNA3	1,4	NA+SD+Ç	0,3+5+94,7	1,961	2,946
W14SNA6	1,4	NA+SD+Ç	0,6+5+94,4	2,096	3,312
W14SNA9	1,4	NA+SD+Ç	0,9+5+94,1	2,159	3,099
W18	1,8	Ç	100	1,251	1,680
W18S	1,8	SD+Ç	5+95	1,527	1,942
W18SNS3	1,8	NS+SD+Ç	0,3+5+94,7	1,662	1,843
W18SNS6	1,8	NS+SD+Ç	0,6+5+94,4	1,775	2,182
W18SNS9	1,8	NS+SD+Ç	0,9+5+94,1	1,689	2,033
W18SNA3	1,8	NA+SD+Ç	0,3+5+94,7	1,134	1,658
W18SNA6	1,8	NA+SD+Ç	0,6+5+94,4	1,238	1,744
W18SNA9	1,8	NA+SD+Ç	0,9+5+94,1	1,048	1,635

Tablo 13. Dr= %30’da Enjeksiyon Yapılmış Numunelerin 7. ve 28. Gündeki Tek Eksenli Basınç Dayanımları

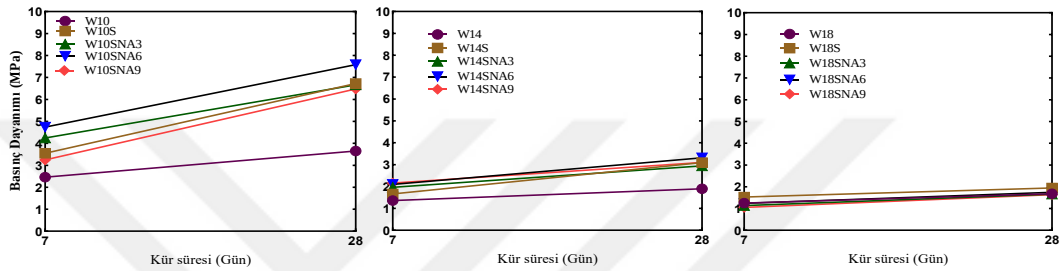
Kod	s/k	Katkı	Katkı Oranı (%)	Tek eksenli basınç dayanımı (7. Gün) (MPa)	Tek eksenli basınç dayanımı (28. Gün) (MPa)
W10	1	Ç	100	2,304	3,230
W10S	1	SD+Ç	5+95	3,289	6,443
W10SNS3	1	NS+SD+Ç	0,3+5+94,7	5,074	7,125
W10SNS6	1	NS+SD+Ç	0,6+5+94,4	5,155	8,011
W10SNS9	1	NS+SD+Ç	0,9+5+94,1	4,486	8,350
W10SNA3	1	NA+SD+Ç	0,3+5+94,7	3,217	5,797
W10SNA6	1	NA+SD+Ç	0,6+5+94,4	3,967	7,202
W10SNA9	1	NA+SD+Ç	0,9+5+94,1	3,551	6,127
W14	1,4	Ç	100	1,332	1,635
W14S	1,4	SD+Ç	5+95	1,617	2,765
W14SNS3	1,4	NS+SD+Ç	0,3+5+94,7	1,527	2,647
W14SNS6	1,4	NS+SD+Ç	0,6+5+94,4	2,028	3,524
W14SNS9	1,4	NS+SD+Ç	0,9+5+94,1	1,320	2,250
W14SNA3	1,4	NA+SD+Ç	0,3+5+94,7	1,811	2,918
W14SNA6	1,4	NA+SD+Ç	0,6+5+94,4	1,595	2,656
W14SNA9	1,4	NA+SD+Ç	0,9+5+94,1	1,680	2,837
W18	1,8	Ç	100	0,533	1,558
W18S	1,8	SD+Ç	5+95	1,107	1,509
W18SNS3	1,8	NS+SD+Ç	0,3+5+94,7	1,150	1,527
W18SNS6	1,8	NS+SD+Ç	0,6+5+94,4	1,210	1,622
W18SNS9	1,8	NS+SD+Ç	0,9+5+94,1	1,116	1,888
W18SNA3	1,8	NA+SD+Ç	0,3+5+94,7	1,192	1,613
W18SNA6	1,8	NA+SD+Ç	0,6+5+94,4	1,098	1,500
W18SNA9	1,8	NA+SD+Ç	0,9+5+94,1	0,406	1,251

Dr= %70’de enjeksiyon yapılmış numunelerde kür süresinin tek eksenli basınç dayanımları üzerine etkisi

Dr= %70 rölatif sıklıkta hazırlanan numunelere s/k =1,0 1,4 ve 1,8 olan katkılı ve katkısız groutlar enjekte edilmiş, 7 ve 28 günlük tek eksenli basınç dayanımları belirlenmiştir. Nano silika katkılı enjeksiyon numunelerinin tek eksenli basınç dayanımlarının kür süresine bağlı olarak değişimi Şekil 49’de ve nano alümina katkılı enjeksiyon numunelerin tek eksenli basınç dayanımlarının kür süresine bağlı olarak değişimi Şekil 53’de verilmiştir.



Şekil 49. Nano silika katkılı karışımların tek eksenli basınç dayanımlarının kür süresine bağlı olarak değişimi ($Dr=70\%$)



Şekil 50. Nano alümina katkılı karışımların tek eksenli basınç dayanımlarının kür süresine bağlı olarak değişimi ($Dr=70\%$)

Şekil 49 ve 50 incelendiğinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

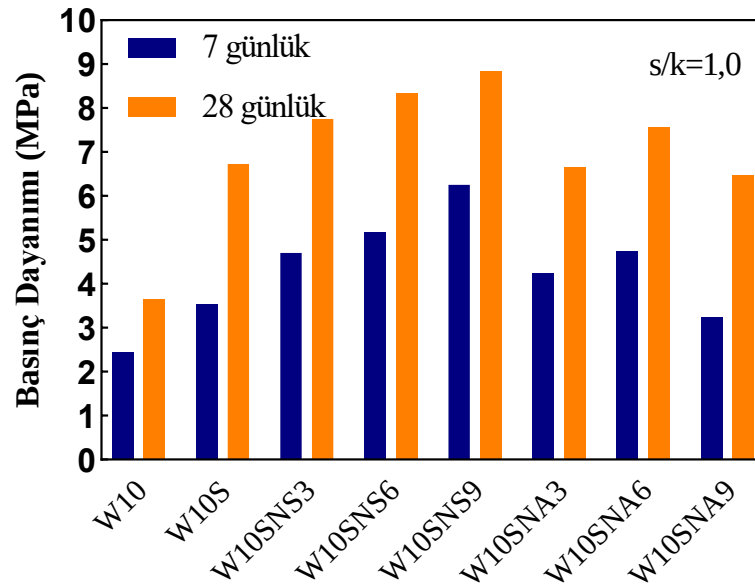
- Tüm enjeksiyon yapılmış numunelerde 28 günlük tek eksenli basınç dayanımları 7 günlük tek eksenli basınç dayanımlarından daha büyük çıkmıştır.
- 7 ve 28 günlük tek eksenli basınç dayanımları karşılaştırıldığında, tek eksenli basınç dayanımdaki en büyük artış yüzdesi W10SNA9 numunesinden (% 99) ve en düşük artış yüzdesi ise W18SNS3 numunesinden (% 11) elde edilmiştir.
- $s/k=1,0$ olan numunelerde, 7 ve 28 günlük tek eksenli basınç dayanımları karşılaştırıldığında, tek eksenli basınç dayanımdaki en büyük artış yüzdesi W10SNA9 numunesinden (% 99) ve en düşük artış yüzdesi ise W10SNS9 numunesinden (% 41) elde edilmiştir.
- $s/k=1,4$ olan numunelerde, 7 ve 28 günlük tek eksenli basınç dayanımları karşılaştırıldığında, tek eksenli basınç dayanımdaki en büyük artış yüzdesi W14S numunesinden (% 86) ve en düşük artış yüzdesi ise W14SNS3 numunesinden (% 31) elde edilmiştir.
- $s/k=1,8$ olan numunelerde, 7 ve 28 günlük tek eksenli basınç dayanımları karşılaştırıldığında, tek eksenli basınç dayanımdaki en büyük artış yüzdesi

W18SNA9 numunesinden (% 56) ve en düşük artış yüzdesi ise W18SNS3 numunesinden (% 11) elde edilmiştir.

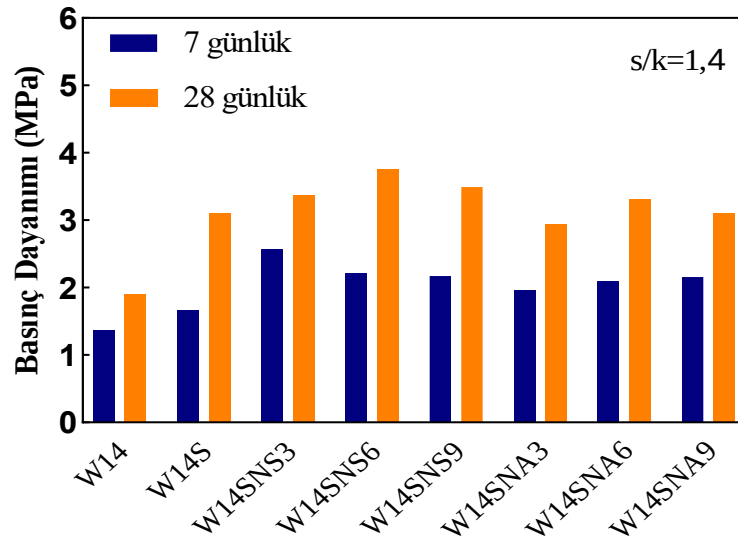
- 7 ve 28 günlük tek eksenli basınç dayanımları karşılaştırıldığında, s/k oranı arttıkça tek eksenli basınç dayanımındaki artış yüzdesi de düşmüştür. Ortalama artış yüzdesi, s/k=1,0 olan numunelerde % 65, s/k=1,4 olan numunelerde % 55 ve s/k=1,8 olan numunelerde ise % 32 olmuştur.
- 7 ve 28 günlük tek eksenli basınç dayanımları karşılaştırıldığında, Nano silika katkılı numunelerde en büyük artış yüzdesi W14SNS6 numunesinden (% 70) ve en düşük artış yüzdesi ise W18SNS3 numunesinden (% 11) elde edilmiştir.
- 7 ve 28 günlük tek eksenli basınç dayanımları karşılaştırıldığında, Nano alümina katkılı numunelerde en büyük artış yüzdesi W10SNA9 numunesinden (% 99) ve en düşük artış yüzdesi ise W18SNA6 numunesinden (% 40) elde edilmiştir.

Dr= %70'de enjeksiyon yapılmış numunelerde katkı maddesi ve yüzdesinin tek eksenli basınç dayanımı üzerine etkisi

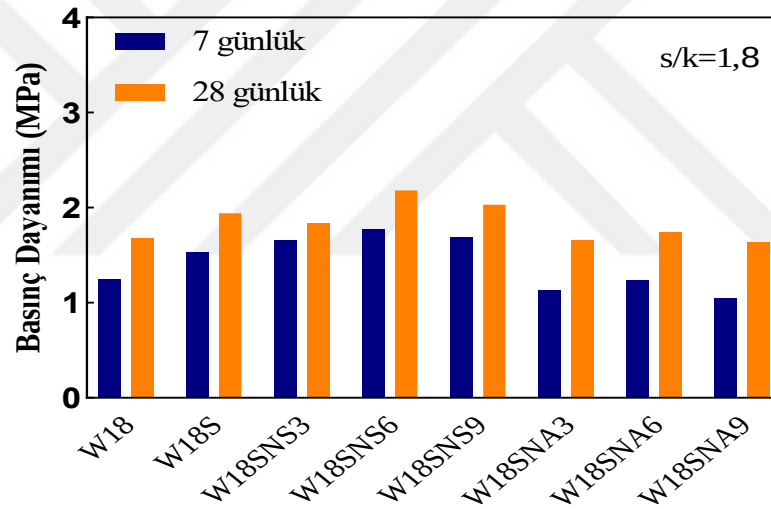
Katkı maddesi ve yüzdesinin tek eksenli basınç dayanımları üzerine etkisi araştırılmıştır. s/k=1,0'de enjeksiyon yapılmış numunelerin katkı maddeleri ve yüzdelere bağlı olarak tek eksenli basınç dayanımlarının değişimi Şekil 51' de, s/k=1,4'de enjeksiyon yapılmış numunelerin katkı maddeleri ve yüzdelere bağlı olarak tek eksenli basınç dayanımlarının değişimi Şekil 52' de ve s/k=1,8'de enjeksiyon yapılmış numunelerin katkı maddeleri ve yüzdelere bağlı olarak tek eksenli basınç dayanımlarının değişimi Şekil 56' da gösterilmiştir.



Şekil 51. s/k=1,0'de enjeksiyon yapılmış numunelerin tek eksenli basınç dayanımının katkı maddesi ve yüzdesi ile değişimi (Dr=% 70)



Şekil 52. $s/k=1,4$ 'de enjeksiyon yapılmış numunelerin tek eksenli basınç dayanımının katkı maddesi ve yüzdesi ile değişimi ($Dr=\% 70$)



Şekil 53. $s/k=1,8$ 'de enjeksiyon yapılmış numunelerin tek eksenli basınç dayanımının katkı maddesi ve yüzdesi ile değişimi ($Dr=\% 70$)

Şekil 51-53 incelendiğinde aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır.

- Tüm enjeksiyon yapılmış numunelerde, en yüksek tek eksenli basınç dayanımı 28 gün kür edilmiş W10SNS9 numunesinden (8,847 MPa) ve en düşük tek eksenli basınç mukavemeti 7 gün kür edilmiş W18SNA9 numunesinden (1,048 MPa) elde edilmiştir.
- $s/k=1$ 'de enjeksiyon yapılmış numunelerde, en yüksek tek eksenli basınç dayanımı 28 gün kür edilmiş W10SNS9 numunesinden (8,847 MPa) ve en düşük tek eksenli basınç mukavemeti 7 gün kür edilmiş W10 numunesinden (2,458 MPa) elde edilmiştir.

- $s/k=1,0$ 'de sadece silis dumanı katkılı enjeksiyonda, W10S numunenin 7 ve 28 gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımları W10 numunesine göre % 44 ve % 84 artmıştır.
- $s/k=1,0$ 'de silis dumanı ve nano silika katkılı enjeksiyonlarda, W10SNS3, W10SNS6 ve W10SNS9 numunelerinin 7 gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımları, W10 numunesine (kontrol numunesi) göre yaklaşık % 92, % 110 ve % 155 artmıştır. Silis dumanı ve nano alümina katkılı enjeksiyon yapılmış numunelerde, W10SNA3, W10SNA6 ve W10SNA9 numunelerinin 7 gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımları, W10 numunesine göre yaklaşık % 73, % 93 ve % 32 artmıştır.
- $s/k=1,0$ 'de silis dumanı ve nano silika katkılı enjeksiyon yapılmış numunelerde, W10SNS3, W10SNS6 ve W10SNS9 numunelerinin 28 gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımları, W10 numunesine göre yaklaşık % 112, % 129 ve % 142 artmıştır. Silis dumanı ve nano alümina katkılı enjeksiyon yapılmış numunelerde, W10SNA3, W10SNA6 ve W10SNA9 numunelerinin 28 gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımları, W10 numunesine göre yaklaşık % 83, % 108 ve % 77 artmıştır.
- $s/k=1,0$ 'de ve $Dr=\% 70$ rölatif sıklıkta kötü derecelenmiş bir kum zemine (SP) yapılan katkısız ve katkılı enjeksiyonlarda, tek eksenli basınç dayanımları açısından en iyi sonucu veren karışım oranı % 94,1 çimento + % 5 silis dumanı + % 0,9 nano silika olarak belirlenmiştir.
- $s/k=1,0$ 'de nano silika ve nano alümina katkılı enjeksiyon yapılmış numuneler karşılaştırıldığında, tüm katkı yüzdelerinde nano silika katkılı numunelerin 7 ve 28 gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımları nano alümina katkılı numunelerden daha yüksek çıkmıştır. $s/k=1,0$ 'de nano silika katkılı enjeksiyon yapılmış W10SNS3, W10SNS6 ve W10SNS9 numunelerinin 7 gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımları, W10SNA3, W10SNA6 ve W10SNA9 numunelerine göre yaklaşık % 11, % 9 ve % 93 artmıştır. $s/k=1,0$ 'de nano silika katkılı enjeksiyon yapılmış W10SNS3, W10SNS6 ve W10SNS9 numunelerinin 28 gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımları, W10SNA3, W10SNA6 ve W10SNA9 numunelerine göre yaklaşık % 16, % 10 ve % 37 artmıştır.
- $s/k=1,4$ 'de enjeksiyon yapılmış numunelerde, en yüksek tek eksenli basınç dayanımı 28 gün kür edilmiş W14SNS6 numunesinden (3,763 MPa) ve en düşük tek eksenli basınç mukavemeti 7 gün kür edilmiş W14 numunesinden (1,360 MPa) elde edilmiştir.

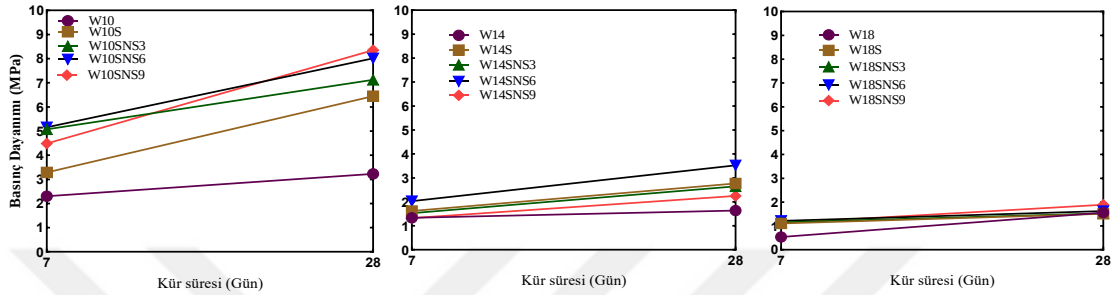
- $s/k=1,4$ 'de sadece silis dumanı katkılı enjeksiyonda, W14S numunenin 7 ve 28 gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımları W14 numunesine göre % 22 ve % 63 artmıştır.
- $s/k=1,4$ 'de silis dumanı ve nano silika katkılı enjeksiyonlarda, W14SNS3, W14SNS6 ve W14SNS9 numunelerinin 7 gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımları, W14 numunesine göre yaklaşık % 89, % 63 ve % 60 artmıştır. Silis dumanı ve nano alümina katkılı enjeksiyon yapılmış numunelerde, W14SNA3, W14SNA6 ve W14SNA9 numunelerinin 7 gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımları, W14 numunesine göre yaklaşık % 44, % 54 ve % 59 artmıştır.
- $s/k=1,4$ 'de silis dumanı ve nano silika katkılı enjeksiyon yapılmış numunelerde, W14SNS3, W14SNS6 ve W14SNS9 numunelerinin 28 gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımları, W14 numunesine göre yaklaşık % 78, % 98 ve % 84 artmıştır. Silis dumanı ve nano alümina katkılı enjeksiyon yapılmış numunelerde, W14SNA3, W14SNA6 ve W14SNA9 numunelerinin 28 gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımları, W14 numunesine göre yaklaşık % 55, % 75 ve % 63 artmıştır.
- $s/k=1,4$ 'de ve $Dr=\% 70$ rölatif sıkılıkta kötü derecelenmiş bir kum zemine (SP) yapılan katkısız ve katkılı enjeksiyonlarda, tek eksenli basınç dayanımları açısından en iyi sonucu veren karışım oranı % 94,4 çimento + % 5 silis dumanı + % 0,6 nano silika olarak belirlenmiştir.
- $s/k=1,4$ 'de nano silika ve nano alümina katkılı enjeksiyon yapılmış numuneler karşılaştırıldığında, tüm katkı yüzdelerinde nano silika katkılı numunelerin 7 ve 28 gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımları nano alümina katkılı numunelerden daha yüksek çıkmıştır. $s/k=1,4$ 'de nano silika katkılı enjeksiyon yapılmış W14SNS3, W14SNS6 ve W14SNS9 numunelerinin 7 gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımları, W14SNA3, W14SNA6 ve W14SNA9 numunelerine göre yaklaşık % 31, % 6 ve % 1 artmıştır. $s/k=1,0$ 'de nano silika katkılı enjeksiyon yapılmış W14SNS3, W14SNS6 ve W14SNS9 numunelerinin 28 gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımları, W14SNA3, W14SNA6 ve W14SNA9 numunelerine göre yaklaşık % 15, % 14 ve % 13 artmıştır.
- $s/k=1,8$ 'de enjeksiyon yapılmış numunelerde, en yüksek tek eksenli basınç dayanımı 28 gün kür edilmiş W18SNS6 numunesinden (2,182 MPa) ve en düşük tek eksenli basınç mukavemeti 7 gün kür edilmiş W18SNA9 numunesinden (1,048 MPa) elde edilmiştir.

- $s/k=1,8$ 'de sadece silis dumanı katkılı enjeksiyonda, W18S numunenin 7 ve 28 gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımları W18 numunesine göre % 22 ve % 16 artmıştır.
- $s/k=1,8$ 'de silis dumanı ve nano silika katkılı enjeksiyonlarda, W18SNS3, W18SNS6 ve W18SNS9 numunelerinin 7 gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımları, W18 numunesine göre yaklaşık % 33, % 42 ve % 35 artmıştır. Silis dumanı ve nano alümina katkılı enjeksiyon yapılmış numunelerde, W18SNA3, W18SNA6 ve W18SNA9 numunelerinin 7 gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımları, W18 numunesine göre yaklaşık %9, %1 ve %16 azalmıştır.
- $s/k=1,8$ 'de silis dumanı ve nano silika katkılı enjeksiyon yapılmış numunelerde, W18SNS3, W18SNS6 ve W18SNS9 numunelerinin 28 gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımları, W18 numunesine göre yaklaşık % 16, % 10 ve % 30 artmıştır. Silis dumanı ve nano alümina katkılı enjeksiyon yapılmış numunelerde, W18SNA3, W18SNA6 ve W18SNA9 numunelerinin 28 gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımları, W18 numunesine göre yaklaşık % 1, % 4 ve % 3 azalmıştır.
- $s/k=1,8$ 'de ve $D_r=\% 70$ rölatif sıkılıkta kötü derecelenmiş bir kum zemine (SP) yapılan katkısız ve katkılı enjeksiyonlarda, tek eksenli basınç dayanımları açısından en iyi sonucu veren karışım oranı % 94,4 çimento + % 5 silis dumanı + % 0,6 nano silika olarak belirlenmiştir.
- $s/k=1,8$ 'de nano silika ve nano alümina katkılı enjeksiyon yapılmış numuneler karşılaştırıldığında, tüm katkı yüzdelerinde nano silika katkılı numunelerin 7 ve 28 gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımları nano alümina katkılı numunelerden daha yüksek çıkmıştır. $s/k=1,4$ 'de nano silika katkılı enjeksiyon yapılmış W18SNS3, W18SNS6 ve W18SNS9 numunelerinin 7 gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımları, W18SNA3, W18SNA6 ve W18SNA9 numunelerine göre yaklaşık % 47, % 43 ve % 61 artmıştır. $s/k=1,0$ 'de nano silika katkılı enjeksiyon yapılmış W18SNS3, W18SNS6 ve W18SNS9 numunelerinin 28 gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımları, W18SNA3, W18SNA6 ve W18SNA9 numunelerine göre yaklaşık %11, %25 ve %24 artmıştır.
- $D_r=\% 70$ rölatif sıkılıkta hazırlanmış kötü derecelenmiş bir kum zemine tüm katkı yüzdelerinde ve s/k oranlarında enjeksiyon yapılmış ve en yüksek tek eksenli basınç dayanımı W10SNS9 numunesinden elde edilmiştir.

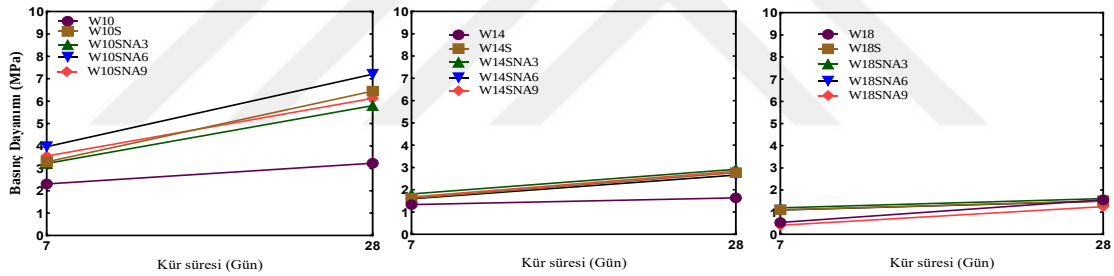
$D_r= \%30$ 'da enjeksiyon yapılan numunelerde kür süresinin tek eksenli basınç

dayanımları üzerine etkisi

$D_r = \%30$ rölatif sıkılıkta hazırlanan numunelere $s/k = 1,0$ 1,4 ve 1,8 olan katkılı ve katkısız groutlar enjekte edilmiş, 7 ve 28 günlük tek eksenli basınç dayanımları belirlenmiştir. $s/k = 1,0$ ve nano silika katkılı numunelerin kür süresine bağlı olarak tek eksenli basınç dayanımlarının değişimi Şekil 54’de ve nano alümina katkılı numunelerin kür süresine bağlı olarak tek eksenli basınç dayanımlarının değişimi Şekil 55’de gösterilmiştir.



Şekil 54. Nano silika katkılı karışımların tek eksenli basınç dayanımlarının kür süresine bağlı olarak değişimi ($D_r = \%30$)



Şekil 55. Nano alümina katkılı karışımların tek eksenli basınç dayanımlarının kür süresine bağlı olarak değişimi ($D_r = \%30$)

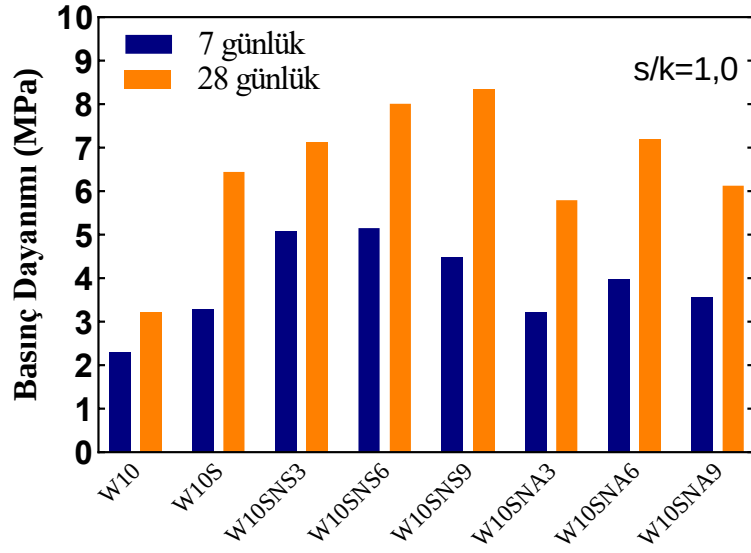
Şekil 54 ve 55 incelendiğinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Tüm enjeksiyon yapılmış numunelerde 28 günlük tek eksenli basınç dayanımları 7 günlük tek eksenli basınç dayanımlarından daha büyük çıkmıştır.
- 7 ve 28 günlük tek eksenli basınç dayanımları karşılaştırıldığında, tek eksenli basınç dayanımdaki en büyük artış yüzdesi W18SNA9 numunesinden (% 208) ve en düşük artış yüzdesi ise W14 numunesinden (% 22) elde edilmiştir.
- $s/k=1,0$ olan numunelerde, 7 ve 28 günlük tek eksenli basınç dayanımları karşılaştırıldığında, tek eksenli basınç dayanımdaki en büyük artış yüzdesi W10S numunesinden (% 96) ve en düşük artış yüzdesi ise W10 numunesinden (% 40) elde edilmiştir.

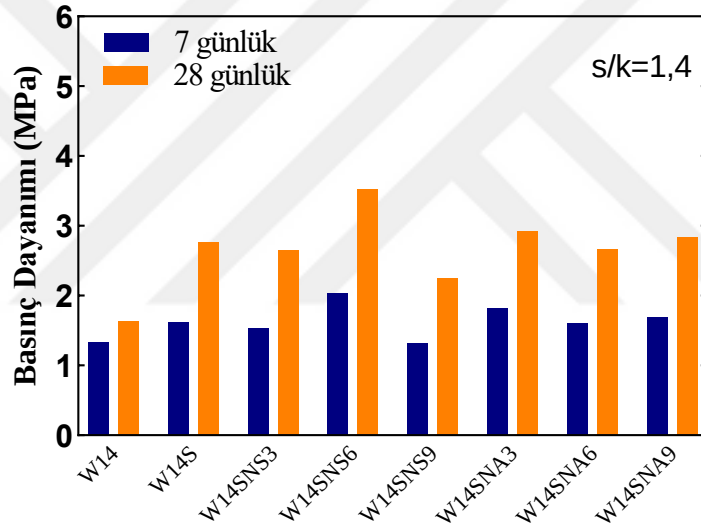
- $s/k=1,4$ olan numunelerde, 7 ve 28 günlük tek eksenli basınç dayanımları karşılaştırıldığında, tek eksenli basınç dayanımdaki en büyük artış yüzdesi W14SNS6 numunesinden (% 74) ve en düşük artış yüzdesi ise W14 numunesinden (% 23) elde edilmiştir.
- $s/k=1,8$ olan numunelerde, 7 ve 28 günlük tek eksenli basınç dayanımları karşılaştırıldığında, tek eksenli basınç dayanımdaki en büyük artış yüzdesi W18SNA9 numunesinden (% 208) ve en düşük artış yüzdesi ise W18SNS3 numunesinden (% 33) elde edilmiştir.
- 7 ve 28 günlük tek eksenli basınç dayanımları karşılaştırıldığında, s/k oranı arttıkça tek eksenli tek eksenli basınç dayanımındaki artış yüzdesi de genellikle düşmüştür.
- 7 ve 28 günlük tek eksenli basınç dayanımları karşılaştırıldığında, Nano silika katkılı numunelerde en büyük artış yüzdesi W10SNS9 numunesinden (% 86) ve en düşük artış yüzdesi ise W18SNS3 numunesinden (% 33) elde edilmiştir.
- 7 ve 28 günlük tek eksenli basınç dayanımları karşılaştırıldığında, Nano alümina katkılı numunelerde en büyük artış yüzdesi W18SNA9 numunesinden (% 208) ve en düşük artış yüzdesi ise W18SNA3 numunesinden (% 35) elde edilmiştir.

$D_r = 30\%$ 'da enjeksiyon yapılmış numunelerde katkı maddesi ve yüzdesinin tek eksenli basınç dayanımı üzerine etkisi

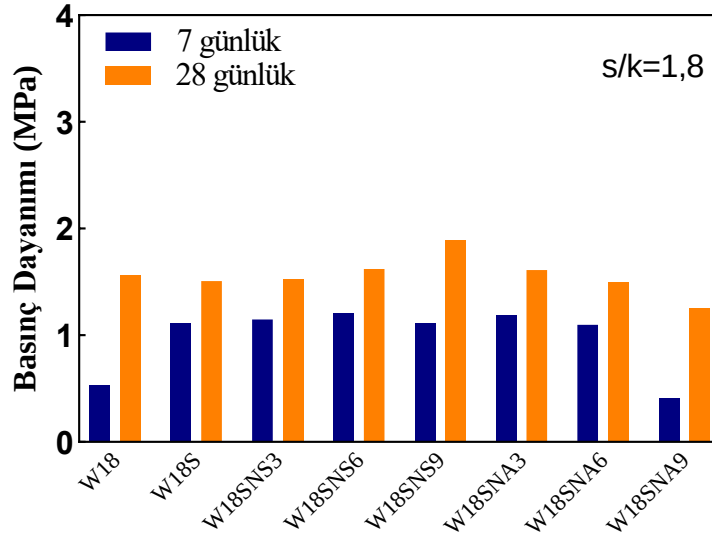
Katkı maddesi ve yüzdesinin tek eksenli basınç dayanımları üzerine etkisi araştırılmıştır. $s/k=1,0$ 'de enjeksiyon yapılmış numunelerin katkı maddeleri ve yüzdelere bağlı olarak tek eksenli basınç dayanımlarının değişimi Şekil 56'da, $s/k=1,4$ 'de enjeksiyon yapılmış numunelerin katkı maddeleri ve yüzdelere bağlı olarak tek eksenli basınç dayanımlarının değişimi Şekil 57' de ve $s/k=1,8$ 'de enjeksiyon yapılmış numunelerin katkı maddeleri ve yüzdelere bağlı olarak tek eksenli basınç dayanımlarının değişimi Şekil 58' de gösterilmiştir.



Şekil 56. $s/k=1,0$ 'de enjeksiyon yapılmış numunelerin tek eksenli basınç dayanımının katkı maddesi ve yüzdesi ile değişimi ($Dr=\% 30$)



Şekil 57. $s/k=1,4$ 'de enjeksiyon yapılmış numunelerin tek eksenli basınç dayanımının katkı maddesi ve yüzdesi ile değişimi ($Dr=\% 30$)



Şekil 58. $s/k=1,8$ 'de enjeksiyon yapılmış numunelerin tek eksenli basınç dayanımının katkı maddesi ve yüzdesi ile değişimi ($Dr=\% 30$)

Şekil 56-58 incelendiğinde aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır.

- Tüm enjeksiyon yapılmış numunelerde, en yüksek tek eksenli basınç dayanımı 28 gün kür edilmiş W10SNS9 numunesinden (8,350 MPa) ve en düşük tek eksenli basınç mukavemeti 7 gün kür edilmiş W18SNA9 numunesinden (0,406 MPa) elde edilmiştir.
- $s/k=1$ 'de enjeksiyon yapılmış numunelerde, en yüksek tek eksenli basınç dayanımı 28 gün kür edilmiş W10SNS9 numunesinden (8,350 MPa) ve en düşük tek eksenli basınç mukavemeti 7 gün kür edilmiş W10 numunesinden (2,304 MPa) elde edilmiştir.
- $s/k=1,0$ 'de sadece silis dumanı katkılı enjeksiyonda, W10S numunenin 7 ve 28 gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımları W10 numunesine göre % 43 ve % 99 artmıştır.
- $s/k=1,0$ 'de silis dumanı ve nano silika katkılı enjeksiyonlarda, W10SNS3, W10SNS6 ve W10SNS9 numunelerinin 7 gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımları, W10 numunesine (kontrol numunesi) göre yaklaşık % 120, % 124 ve % 95 artmıştır. Silis dumanı ve nano alümina katkılı enjeksiyon yapılmış numunelerde, W10SNA3, W10SNA6 ve W10SNA9 numunelerinin 7 gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımları, W10 numunesine göre yaklaşık % 40, % 72 ve % 54 artmıştır.
- $s/k=1,0$ 'de silis dumanı ve nano silika katkılı enjeksiyon yapılmış numunelerde, W10SNS3, W10SNS6 ve W10SNS9 numunelerinin 28 gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımları, W10 numunesine göre yaklaşık % 121, % 148 ve % 159 artmıştır. Silis dumanı ve nano alümina katkılı enjeksiyon yapılmış

numunelerde, W10SNA3, W10SNA6 ve W10SNA9 numunelerinin 28 gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımları, W10 numunesine göre yaklaşık % 79, % 123 ve % 90 artmıştır.

- $s/k=1,0$ 'de ve $Dr=\% 30$ rölatif sıklıkta kötü derecelenmiş bir kum zemine (SP) yapılan katkısız ve katkılı enjeksiyonlarda, tek eksenli basınç dayanımları açısından en iyi sonucu veren karışım oranı % 94,1 çimento + % 5 silis dumanı + % 0,9 nano silika olarak belirlenmiştir.
- $s/k=1,0$ 'de nano silika ve nano alümina katkılı enjeksiyon yapılmış numuneler karşılaştırıldığında, tüm katkı yüzdelerinde nano silika katkılı numunelerin 7 ve 28 gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımları nano alümina katkılı numunelerden daha yüksek çıkmıştır. $s/k=1,0$ 'de nano silika katkılı enjeksiyon yapılmış W10SNS3, W10SNS6 ve W10SNS9 numunelerinin 7 gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımları, W10SNA3, W10SNA6 ve W10SNA9 numunelerine göre yaklaşık % 58, % 30 ve % 26 artmıştır. $s/k=1,0$ 'de nano silika katkılı enjeksiyon yapılmış W10SNS3, W10SNS6 ve W10SNS9 numunelerinin 28 gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımları, W10SNA3, W10SNA6 ve W10SNA9 numunelerine göre yaklaşık % 23, % 11 ve % 36 artmıştır.
- $s/k=1,4$ 'de enjeksiyon yapılmış numunelerde, en yüksek tek eksenli basınç dayanımı 28 gün kür edilmiş W14SNS6 numunesinden (3,524 MPa) elde edilmiştir.
- $s/k=1,4$ 'de sadece silis dumanı katkılı enjeksiyonda, W14S numunenin 7 ve 28 gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımları W14 numunesine göre % 21 ve % 69 artmıştır.
- $s/k=1,4$ 'de silis dumanı ve nano silika katkılı enjeksiyonlarda, W14SNS3, W14SNS6 ve W14SNS9 numunelerinin 7 gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımları, W14 numunesine göre yaklaşık % 15, % 52 ve % 0 artmıştır. Silis dumanı ve nano alümina katkılı enjeksiyon yapılmış numunelerde, W14SNA3, W14SNA6 ve W14SNA9 numunelerinin 7 gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımları, W14 numunesine göre yaklaşık % 36, % 20 ve % 26 artmıştır.
- $s/k=1,4$ 'de silis dumanı ve nano silika katkılı enjeksiyon yapılmış numunelerde, W14SNS3, W14SNS6 ve W14SNS9 numunelerinin 28 gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımları, W14 numunesine göre yaklaşık % 62, % 116 ve % 38 artmıştır. Silis dumanı ve nano alümina katkılı enjeksiyon yapılmış numunelerde, W14SNA3, W14SNA6 ve W14SNA9 numunelerinin 28 gün kür

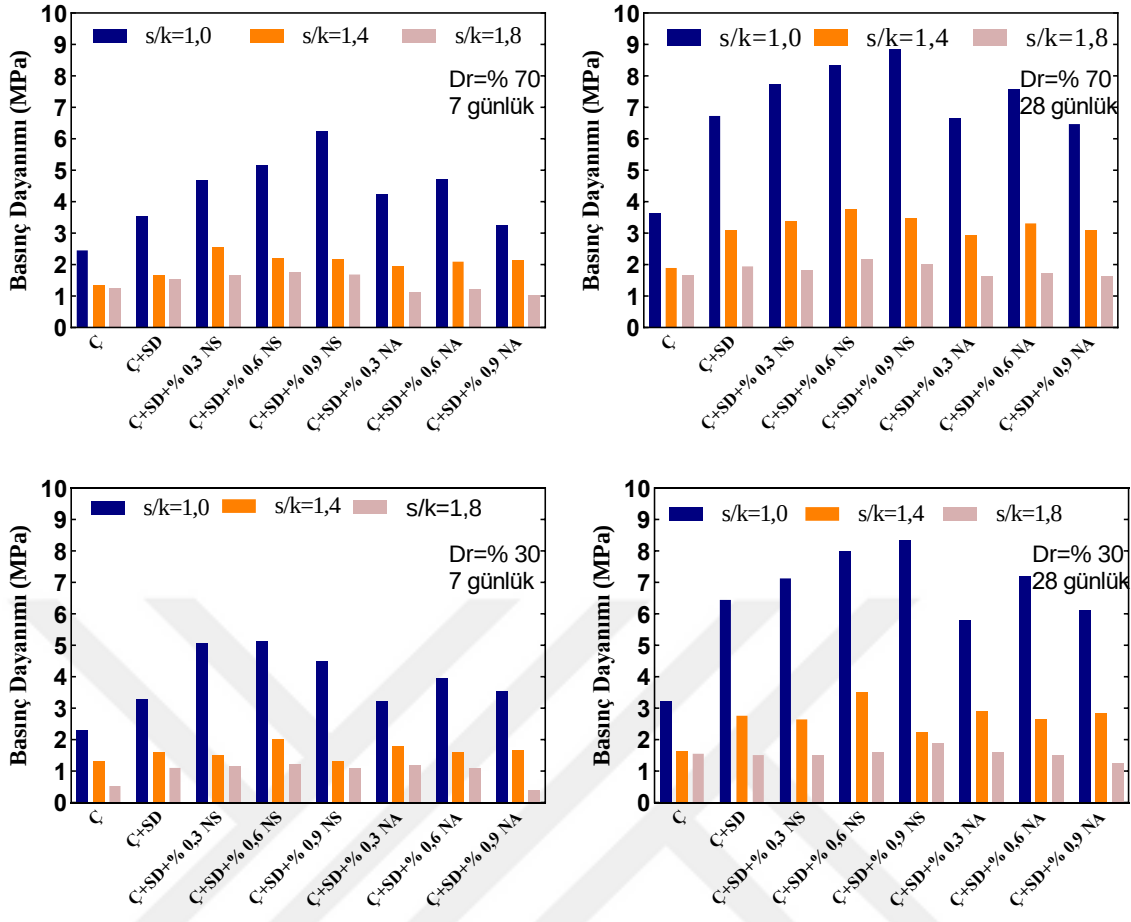
süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımları, W14 numunesine göre yaklaşık % 78, % 62 ve % 74 artmıştır.

- $s/k=1,4$ 'de ve $Dr=\% 30$ rölatif sıklıkta kötü derecelenmiş bir kum zemine (SP) yapılan katkısız ve katkılı enjeksiyonlarda, tek eksenli basınç dayanımları açısından en iyi sonucu veren karışım oranı % 94,4 çimento + % 5 silis dumanı + % 0,6 nano silika olarak belirlenmiştir.
- $s/k=1,4$ 'de nano silika ve nano alümina katkılı enjeksiyon yapılmış numuneler karşılaştırıldığında, % 0,6 nano silika katkılı numunelerin 7 ve 28 gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımı % 0,6 nano alümina katkılı numunelerden daha yüksek çıkmıştır. Diğer katkı oranlarında nano alümina katkılı numunelerin tek eksenli basınç dayanımı daha yüksek çıkmıştır. $s/k=1,4$ 'de nano silika katkılı enjeksiyon yapılmış W14SNS6 numunesinin 7 gün ve 28 gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımları W14SNA6 numunelerine göre % 27 ve % 33 atmıştır. $s/k=1,4$ 'de nano silika katkılı enjeksiyon yapılmış W14SNS6 ve W14SNS9 numunelerinin 7 gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımları, W14SNA6 ve W14SNA9 numunelerine göre yaklaşık % 17 ve % 21 azalmıştır. $s/k=1,0$ 'de nano silika katkılı enjeksiyon yapılmış W14SNS3 ve W14SNS9 numunelerinin 28 gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımları, W14SNA3 ve W14SNA9 numunelerine göre yaklaşık % 9 ve % 21 azalmıştır.
- $s/k=1,8$ 'de enjeksiyon yapılmış numunelerde, en yüksek tek eksenli tek eksenli basınç dayanımı 28 gün kür edilmiş W18SNS9 numunesinden (1,888 MPa) ve en düşük tek eksenli basınç mukavemeti 7 gün kür edilmiş W18SNA9 numunesinden (0,406 MPa) elde edilmiştir.
- $s/k=1,8$ 'de sadece silis dumanı katkılı enjeksiyonda, W18S numunenin 7 ve 28 gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımları W18 numunesine göre % 108 artmış ve % 3 azalmıştır.
- $s/k=1,8$ 'de silis dumanı ve nano silika katkılı enjeksiyonlarda, W18SNS3, W18SNS6 ve W18SNS9 numunelerinin 7 gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımları, W18 numunesine göre yaklaşık % 116, % 127 ve % 109 artmıştır. Silis dumanı ve nano alümina katkılı enjeksiyon yapılmış numunelerde, W18SNA3, W18SNA6 ve W18SNA9 numunelerinin 7 gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımları, W18 numunesine göre yaklaşık % 124, % 106 artmış ve % 24 azalmıştır.

- $s/k=1,8$ 'de silis dumanı ve nano silika katkılı enjeksiyon yapılmış numunelerde, W18SNS3, W18SNS6 ve W18SNS9 numunelerinin 28 gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımları, W18 numunesine göre yaklaşık % 2 azalmış, % 4 ve % 21 artmıştır. Silis dumanı ve nano alümina katkılı enjeksiyon yapılmış numunelerde, W18SNA3, W18SNA6 ve W18SNA9 numunelerinin 28 gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımları, W18 numunesine göre yaklaşık % 4 artmış, % 4 ve % 20 azalmıştır.
- $s/k=1,8$ 'de ve $Dr=\% 30$ rölatif sıklıkta kötü derecelenmiş bir kum zemine (SP) yapılan katkısız ve katkılı enjeksiyonlarda, tek eksenli basınç dayanımları açısından en iyi sonucu veren karışım oranı % 94,1 çimento + % 5 silis dumanı + % 0,9 nano silika olarak belirlenmiştir.
- $s/k=1,8$ 'de nano silika ve nano alümina katkılı enjeksiyon yapılmış numuneler karşılaştırıldığında, % 0,3 nano silika katkılı numunelerin 7 ve 28 gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımları % 0,3 nano alümina katkılı numunelerden daha düşük çıkmıştır. Diğer katkı yüzdelерinde ise, nano silika katkılı numunelerin tek eksenli basınç dayanım nano alümina katkılı numunelerden daha yüksek çıkmıştır. $s/k=1,4$ 'de nano silika katkılı enjeksiyon yapılmış W18SNS6 ve W18SNS9 numunelerinin 7 gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımları, W18SNA6 ve W18SNA9 numunelerine göre yaklaşık % 10 ve % 175 artmıştır. $s/k=1,0$ 'de nano silika katkılı enjeksiyon yapılmış W18SNS6 ve W18SNS9 numunelerinin 28 gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımları, W18SNA6 ve W14SNA9 numunelerine göre yaklaşık % 8 ve % 51 artmıştır. $s/k=1,8$ 'de nano silika katkılı enjeksiyon yapılmış W14SNS3 numunesinin 7 gün ve 28 gün kür süresi sonundaki tek eksenli basınç dayanımları W14SNA3 numunelerine göre yaklaşık % 3 ve % 5 azalmıştır.

Enjeksiyon yapılmış numunelerin s/k oranı, katkı maddesi ve yüzdesine bağlı olarak tek eksenli basınç dayanımlarının değişimi

$Dr=\% 70$ ve 30 ' da hazırlanmış SP zemine 3 farklı s/k oranında katkısız ve katkılı groutlar kullanılarak enjeksiyon yapılmış ve 7-28 gün tek eksenli basınç dayanımları belirlenmiştir. Tüm rölatif sıklıklarda katkılı ve katkısız enjeksiyon yapılmış ve 7 ve 28 gün kür edilmiş numunelerin, s/k oranına, katkı maddesi ve yüzdesine bağlı olarak tek eksenli basınç dayanımların değişimi Şekil 59'de verilmiştir.



Şekil 59. Enjeksiyon yapılmış numunelerin s/k oranına, katkı maddesi ve yüzdesine bağlı olarak tek eksenli basınç dayanımların değişimi

Şekil 59 incelendiğinde aşağıdaki sonuçları çıkarılmıştır.

- Dr=% 70 ve % 30 rölatif sıklıklarda ve s/k oranlarında enjeksiyon yapılmış numunelerde, tüm katkı yüzdelерinde en yüksek tek eksenli basınç dayanımları s/k=1,0 olan numunelerden elde edilmiştir.
- Dr=% 70 sıklılıkta enjeksiyon yapılmış numunelerin tek eksenli basınç dayanımları Dr=% 30 sıklılıkta enjeksiyon yapılmış numunelerden genellikle daha yüksek çıkmıştır.
- Tüm katkı yüzdelерinde s/k oranı arttıkça 7 ve 28 günlük tek eksenli basınç dayanımları azalmıştır.
- Tüm rölatif sıklıklarda hazırlanmış numunelere yapılmış enjeksiyonların tek eksenli basınç dayanımları göz önüne alındığında en yüksek tek eksenli basınç dayanımı % 94,1Ç + %SD + % 0,9NS katkılı numunelerden 8,847 MPa olarak elde edilmiştir.

Enjeksiyon ilk olarak 1800 yıllar hatta daha öncesinde başlamıştır. İlk enjeksiyon uygulamaları, su sızıntısını azaltmak için, genellikle çimento, kireç veya kil içeren sulu süspansiyonlar veya bulamaçlar barajların altındaki ana kayaların çatlaklarını doldurmada kullanılmıştır (Warner 2004). Zeminlerin boşluklarının çok küçük olması partiküllü enjeksiyonun o boşlukları doldurmasını zorlaştırdığından, granüler zeminlerin boşluklarına nüfuz edebilen ve daha sonra kimyasal olarak sertleşebilen düşük viskoziteli kimyasal enjeksiyonlar geliştirilmiştir. Kimyasal enjeksiyonlar maliyet ve ekonomik kaygılardan dolayı çok fazla kullanım alanı bulamamıştır. Son yıllarda zemindeki ince taneli çimento üretilmiş ve enjeksiyon işlerinde kullanım alanı bulmuştur. Normal çimentoların tane boyutu, iri kumlar dışındaki zeminlere enjeksiyon yapılamayacak kadar büyük olmasına rağmen, uygun ultra ince çimentodan oluşan süspansiyon harçları, hemen hemen tüm kumların ve hatta bazı siltli kumların boşluk matrisine nüfuz edebilme kabiliyetine sahiptir. Literatürde çimentoya ilave farklı katkıları kullanılarak enjeksiyon yapılmış çok sayıda çalışma mevcuttur.

Bu tez çalışmasında, çimentoya katkı olarak silis dumanı, ve literatürden farklı olarak nano silika ve nano alümina kullanılmıştır. Silis dumanı zemindeki mikro boşlukları doldurmak, nano malzemeler ise nano boyuttaki boşlukları doldurmak için kullanılmıştır. Katkı yüzdeleri belirlenirken literatürden faydalanılmıştır.

Çimentoya % 5 SD ilave edilerek tüm s/k oranlarında enjeksiyon yapılmış numunelerin tek eksenli basınç dayanımları, normal çimento enjeksiyonu yapılmış numunelerin tek eksenli basınç dayanımından yüksek çıkmıştır. s/k oranı arttıkça artış yüzdesi azalmıştır. Ayrıca, 28 gün kür edilmiş numunelerin tek eksenli basınç dayanımındaki artış yüzdesi, 7 gün kür edilmiş numunelere göre daha fazla çıkmıştır. Literatürde enjeksiyonda silis dumanı katkısının tek eksenli basınç dayanımı üzerine olumlu etkileri olduğunu belirten çalışmalar mevcuttur (Akbulut 1999). Silis dumanının tane çapları, normal çimentonun tane çaplarından daha küçük olduğu için daha küçük boşluklara nüfuz edebilme yeteneğine sahiptir. Ayrıca, silika dumanı eklendiğinde, zemin-enjeksiyon harcı arasındaki bağı güçlendirme ve ara yüzey bölgesinde daha az gözenekli ve daha homojen bir yapı oluşturarak zayıf bağlantıyı ortadan kaldırır. Silis dumanı puzzolanik bir malzemedir. Silis dumanının puzzolanik reaksiyonu CH'lar oluşuktan sonra gerçekleşeceğinden, dayanım artışı zamanla daha fazla olmaktadır.

Enjeksiyon harcına silis dumanına ilave olarak nano silika ve nano alümina katılarak enjeksiyon yapılmış numunelerin tek eksenli basınç dayanımında özellikle düşük s/k oranlarında çimento ve çimento + silis dumanlı enjeksiyon yapılmış numunelere göre önemli artışlar sağlamıştır. En yüksek tek eksenli basınç dayanımı % 0,9 nano silis katkılı numunelerden elde edilmiştir. Nano malzemelerin tane çapları silis dumanı ve çimentodan çok

daha küçük olduğu için zemin içerisindeki nano boşlukları doldurabilme yeteneğine sahiptirler. Ayrıca, deneysel çalışmada kullanılan nano silika ve nano alümina pozolanik malzemeler oldukları için dayanım üzerinde önemli katkıları olmaktadır. Kür süresi arttıkça dayanım daha da artmıştır. Nano malzeme katkılı enjeksiyon yapılmış numuneler çimento ve çimento + silis dumanı katkılı enjeksiyon yapılmış numunelere göre erken yaşta daha fazla dayanım kazanmıştır. Nano malzemelerin erken yaşlarda daha fazla dayanım kazanmasının sebebi, C_2S , C_3S ve CH 'ın C-S-H jeline pozolanik dönüşüm hızından kaynaklanmaktadır (Saleh *et al.* 2015). Başka bir ifadeyle, nano malzemeler hidratasyon süreci hızlandırmakta, dayanım ve mikro yapıyı iyileştirmektedir.

Nano alümina katkılı enjeksiyon yapılmış numunelerde, en yüksek dayanım % 0,6 nano alümina katkılı numunelerden elde edilmiştir. Nano alümina miktarı % 0,9 olduğunda dayanım azalmıştır. Karışımında bulunan nano alümina partiküllerinin (pozzolan) miktarının, hidratasyon işlemi sırasında açığa çıkan kireçle birleşmek için gereken miktardan daha fazla olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

s/k oranı arttıkça tüm enjeksiyon yapılmış numunelerde dayanımlarda azalmaktadır. s/k oranı arttıkça enjeksiyon edilebilirlik artmakta ama dayanım azalmaktadır. Çünkü fazla su hidratasyon işlemine dahil olmaz ve enjeksiyon yapılmış numunelerin dayanımında s/k oranına bağlı olarak azalır. Ayrıca s/k oranı arttıkça nano malzemelerin nano boşlukları doldurmasında sıkıntılar oluşmaktadır. Bu da dayanım üzerinde olumsuz etkilere sebep olmaktadır.

Permeabilite Deneyleri Sonuçları

SP zemin silindirik kalıplara $D_r = \%70$ ve $\%30$ rölatif sıkılıkta yerleştirilmiş ve 200 kPa basınç altında 3 farklı s/k oranında enjeksiyon yapılmıştır. Katkı olarak silis dumanı, nano silika ve nano alümina kullanılmıştır. Enjeksiyon yapılmış numuneler 1 gün kalıpta bekletildikten sonra kalıp başlıkları sökülerek kalıplardan çıkarılmadan 28 gün boyunca kür edilmiş daha sonra düşen seviyeli permeabilite deneylerine tabi tutulmuşlardır. Permeabilite deney sonuçları Tablo 14-15'de verilmiştir.

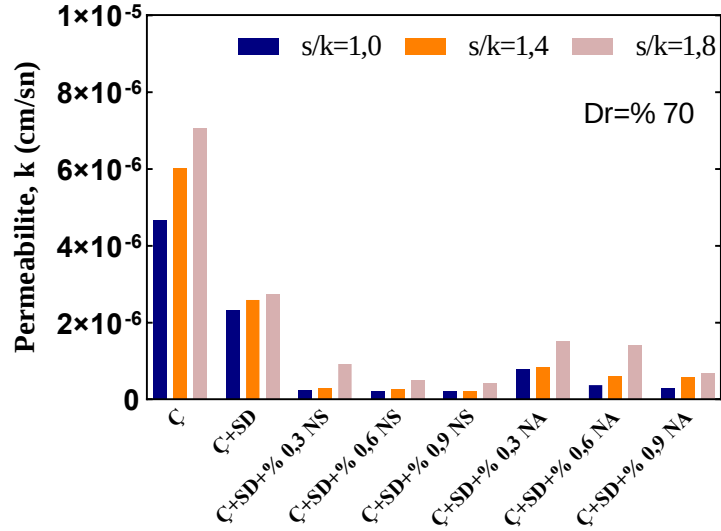
Tablo 14. D_r= %70'da Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin Permeabilite Deney Sonuçları

Kod	s/k	Katkı	Katkı Oranı (%)	Permeabilite (cm/sn)
W10	1	Ç	100	4,67E-06
W10S	1	SD+Ç	5+95	2,32E-06
W10SNS3	1	NS+SD+Ç	0,3+5+94,7	2,27E-07
W10SNS6	1	NS+SD+Ç	0,6+5+94,4	2,05E-07
W10SNS9	1	NS+SD+Ç	0,9+5+94,1	2,10E-07
W10SNA3	1	NA+SD+Ç	0,3+5+94,7	7,80E-07
W10SNA6	1	NA+SD+Ç	0,6+5+94,4	3,67E-07
W10SNA9	1	NA+SD+Ç	0,9+5+94,1	2,81E-07
W14	1,4	Ç	100	6,01E-06
W14S	1,4	SD+Ç	5+95	2,59E-06
W14SNS3	1,4	NS+SD+Ç	0,3+5+94,7	2,93E-07
W14SNS6	1,4	NS+SD+Ç	0,6+5+94,4	2,70E-07
W14SNS9	1,4	NS+SD+Ç	0,9+5+94,1	2,07E-07
W14SNA3	1,4	NA+SD+Ç	0,3+5+94,7	8,40E-07
W14SNA6	1,4	NA+SD+Ç	0,6+5+94,4	6,11E-07
W14SNA9	1,4	NA+SD+Ç	0,9+5+94,1	5,80E-07
W18	1,8	Ç	100	7,05E-06
W18S	1,8	SD+Ç	5+95	2,74E-06
W18SNS3	1,8	NS+SD+Ç	0,3+5+94,7	9,20E-07
W18SNS6	1,8	NS+SD+Ç	0,6+5+94,4	4,92E-07
W18SNS9	1,8	NS+SD+Ç	0,9+5+94,1	4,20E-07
W18SNA3	1,8	NA+SD+Ç	0,3+5+94,7	1,51E-06
W18SNA6	1,8	NA+SD+Ç	0,6+5+94,4	1,40E-06
W18SNA9	1,8	NA+SD+Ç	0,9+5+94,1	6,80E-07

Tablo 15. $D_r = \%30$ 'da Enjeksiyon Uygulanmış Numunelerin Permeabilite Deney Sonuçları

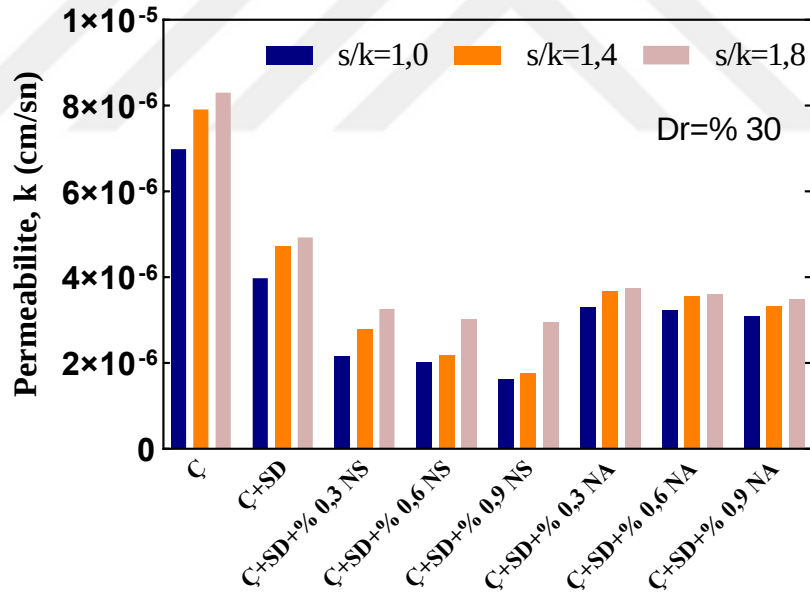
Kod	s/k	Katkı	Katkı Oranı (%)	Permeabilite (cm/sn)
W10	1	Ç	100	6,99E-06
W10S	1	SD+Ç	5+95	3,98E-06
W10SNS3	1	NS+SD+Ç	0,3+5+94,7	2,16E-06
W10SNS6	1	NS+SD+Ç	0,6+5+94,4	2,01E-06
W10SNS9	1	NS+SD+Ç	0,9+5+94,1	1,62E-06
W10SNA3	1	NA+SD+Ç	0,3+5+94,7	3,31E-06
W10SNA6	1	NA+SD+Ç	0,6+5+94,4	3,22E-06
W10SNA9	1	NA+SD+Ç	0,9+5+94,1	3,10E-06
W14	1,4	Ç	100	7,91E-06
W14S	1,4	SD+Ç	5+95	4,73E-06
W14SNS3	1,4	NS+SD+Ç	0,3+5+94,7	2,79E-06
W14SNS6	1,4	NS+SD+Ç	0,6+5+94,4	2,18E-06
W14SNS9	1,4	NS+SD+Ç	0,9+5+94,1	1,77E-06
W14SNA3	1,4	NA+SD+Ç	0,3+5+94,7	3,67E-06
W14SNA6	1,4	NA+SD+Ç	0,6+5+94,4	3,55E-06
W14SNA9	1,4	NA+SD+Ç	0,9+5+94,1	3,33E-06
W18	1,8	Ç	100	8,30E-06
W18S	1,8	SD+Ç	5+95	4,93E-06
W18SNS3	1,8	NS+SD+Ç	0,3+5+94,7	3,26E-06
W18SNS6	1,8	NS+SD+Ç	0,6+5+94,4	3,01E-06
W18SNS9	1,8	NS+SD+Ç	0,9+5+94,1	2,95E-06
W18SNA3	1,8	NA+SD+Ç	0,3+5+94,7	3,74E-06
W18SNA6	1,8	NA+SD+Ç	0,6+5+94,4	3,60E-06
W18SNA9	1,8	NA+SD+Ç	0,9+5+94,1	3,49E-06

$D_r = \%70$ 'de enjeksiyon yapılmış numunelerin 28 gün kür süresi sonundaki permeabilite değerlerinin katkı tipi ve yüzdesine bağlı olarak değişimi Şekil 60'da verilmiştir.



Şekil 60. Dr=% 70 sıkılıkta enjeksiyon yapılmış numunelerin permeabilite değerlerinin katkı tipi ve yüzdesine bağlı olarak değişimi

Dr=% 30'da enjeksiyon yapılmış numunelerin 28 gün kür süresi sonundaki permeabilite değerlerinin katkı tipi ve yüzdesine bağlı olarak değişimi Şekil 60'da verilmiştir.



Şekil 61. Dr=% 30 sıkılıkta enjeksiyon yapılmış numunelerin permeabilite değerlerinin katkı tipi ve yüzdesine bağlı olarak değişimi

Tablo 14-15 ve Şekil 60-61 incelendiğinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- En düşük permeabilite değeri Dr=% 70 rölatif sıkılıkta, s/k=1,0 oranında ve % 0,6 nano silika katkılı enjeksiyon yapılmış numuneden elde edilmiştir ($2,05 \times 10^{-7}$ cm/sn).

- Aynı rölatif sıklık ve s/k oranlarında, nano silika katkılı numunelerin permeabilite değerleri nano alümina katkılı numunelerden daha düşük çıkmıştır.
- Tüm s/k oranlarında, katkı tiplerinde ve yüzdelerinde, $Dr = \% 70$ rölatif sıklıkta hazırlanmış numunelerin permeabilite değerleri, $Dr = \% 30$ rölatif sıklıkta hazırlanmış numunelerde daha düşük çıkmıştır. Rölatif sıklık arttıkça tüm s/k oranlarında permeabilite değerlerinde çimentoya göre azalış yüzdesi düşmüştür.
- Tüm katkı tipleri ve yüzdelerinde, s/k oranı arttıkça permeabilite değerleri de artmıştır.
- $Dr = \% 70$ ve $s/k = 1,0$ 'de enjeksiyon yapılmış numunelerde, $\% 0,6$ ' ya kadar nano silika yüzdesi permeabiliteyi azaltmış daha sonra arttırmıştır. Nano silika yüzdesi arttıkça permeabilite değerlerinde çimentoya göre yaklaşık $\% 95$, $\% 96$ ve $\% 96$ azalma meydana gelmiştir. $Dr = \% 70$ ve $s/k = 1,0$ 'de enjeksiyon yapılmış numunelerde, nano alümina yüzdesi arttıkça permeabilite değerleri düşmüştür. Nano alümina yüzdesi arttıkça permeabilite değerlerinde çimentoya göre yaklaşık $\% 83$, $\% 92$ ve $\% 94$ azalma meydana gelmiştir.
- $Dr = \% 70$ ve $s/k = 1,4$ 'de enjeksiyon yapılmış numunelerde, nano silika yüzdesi arttıkça permeabilite azalmıştır. Nano silika yüzdesi arttıkça permeabilite değerlerinde çimentoya göre yaklaşık $\% 95$, $\% 96$ ve $\% 97$ azalma meydana gelmiştir. $Dr = \% 70$ ve $s/k = 1,4$ 'de enjeksiyon yapılmış numunelerde, nano alümina yüzdesi arttıkça permeabilite değerleri düşmüştür. Nano alümina yüzdesi arttıkça permeabilite değerlerinde çimentoya göre yaklaşık $\% 86$, $\% 90$ ve $\% 90$ azalma meydana gelmiştir.
- $Dr = \% 70$ ve $s/k = 1,8$ 'de enjeksiyon yapılmış numunelerde, nano silika yüzdesi arttıkça permeabilite azalmıştır. Nano silika yüzdesi arttıkça permeabilite değerlerinde çimentoya göre yaklaşık $\% 87$, $\% 93$ ve $\% 94$ azalma meydana gelmiştir. $Dr = \% 70$ ve $s/k = 1,8$ 'de enjeksiyon yapılmış numunelerde, nano alümina yüzdesi arttıkça permeabilite değerleri düşmüştür. Nano alümina yüzdesi arttıkça permeabilite değerlerinde çimentoya göre yaklaşık $\% 77$, $\% 80$ ve $\% 90$ azalma meydana gelmiştir.
- $Dr = \% 30$ ve $s/k = 1,0$ 'de enjeksiyon yapılmış numunelerde, kadar nano silika yüzdesi arttıkça permeabiliteyi azaltmıştır. Nano silika yüzdesi arttıkça permeabilite değerlerinde çimentoya göre yaklaşık $\% 69$, $\% 71$ ve $\% 77$ azalma meydana gelmiştir. $Dr = \% 30$ ve $s/k = 1,0$ 'de enjeksiyon yapılmış numunelerde, nano alümina yüzdesi arttıkça permeabilite değerleri düşmüştür. Nano alümina yüzdesi arttıkça

permeabilite değerlerinde çimentoya göre yaklaşık % 53, % 54 ve % 56 azalma meydana gelmiştir.

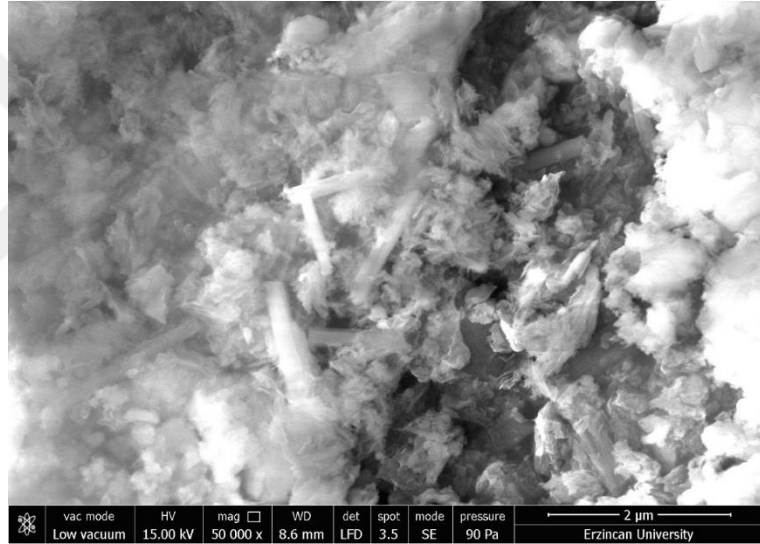
- Dr=% 30 ve s/k=1,4'de enjeksiyon yapılmış numunelerde, nano silika yüzdesi arttıkça permeabilite değerleri azalmıştır. Nano silika yüzdesi arttıkça permeabilite değerlerinde çimentoya göre yaklaşık % 65, % 72 ve % 78 düşüş meydana gelmiştir. Dr=% 30 ve s/k=1,4'de enjeksiyon yapılmış numunelerde, nano alümina yüzdesi arttıkça permeabilite değerleri düşmüştür. Nano alümina yüzdesi arttıkça permeabilite değerlerinde çimentoya göre yaklaşık % 54, % 55 ve % 58 düşüş meydana gelmiştir.
- Dr=% 30 ve s/k=1,8'de enjeksiyon yapılmış numunelerde, nano silika yüzdesi arttıkça permeabilite değerleri düşmüştür. Nano silika yüzdesi arttıkça permeabilite değerlerinde çimentoya göre yaklaşık % 61, % 64 ve % 65 azalma meydana gelmiştir. Dr=% 30 ve s/k=1,8'de enjeksiyon yapılmış numunelerde, nano alümina yüzdesi arttıkça permeabilite değerleri düşmüştür. Nano alümina yüzdesi arttıkça permeabilite değerlerinde çimentoya göre yaklaşık % 55, % 57 ve % 58 azalma meydana gelmiştir.
- Çimentoya katkı olarak sadece silis dumanı katılması da permeabilite değerlerini düşürmüştür. Tüm rölatif sıklıklarda ve s/k oranlarında katkı olarak sadece silis dumanı kullanılması durumunda permeabilite değerleri çimentoya göre yaklaşık % 40-% 61 arasında düşmüştür.

Tüm rölatif sıklıklarında ve s/k oranlarında yapılan enjeskiyonlarda, çimentoya katkı olarak sadece silis dumanı katılması durumunda permeabilite değerleri düşmüştür. Çimentoya, silis dumanına ilave olarak nano silika ve nano alümina katılması durumunda permeabilite değerleri daha da düşmüştür. Nano malzeme yüzdesi arttıkça da zemin boşluklarını daha fazla nano malzeme doldurduğu için permeabilite değerlerindeki düşüş devam etmiştir. Nano malzeme miktarının artması, zemin taneleri arasındaki nano boşlukları azaltır ve taneler arasında güçlü bağlar oluşturur. Bunun sonucu olarak geçirimsizliği önemli ölçüde azaltır (Özçoban *et al.* 2022; Karumanchi *et al.* 2020; Kalhor *et al.* 2020).

SEM ve EDAX Analizi Sonuçları

Sadece çimento enjeksiyonu yapılmış numunenin SEM görüntüsü Şekil 62'de verilmiştir. En yüksek tek eksenli basınç dayanımına sahip W10SNS9 (% 94,1 Çimento + % 5 silis dumanı + % 0,9 nano silika) numunesinin SEM Görüntüsü ve EDAX Spektrumu Şekil 63'de ve nano alümina katkılı enjeksiyon yapılmış numunelerden en yüksek tek eksenli basınç dayanımı veren W10SNA6 (% 94,4 Çimento + % 5 silis dumanı + % 0,6 nano alümina)

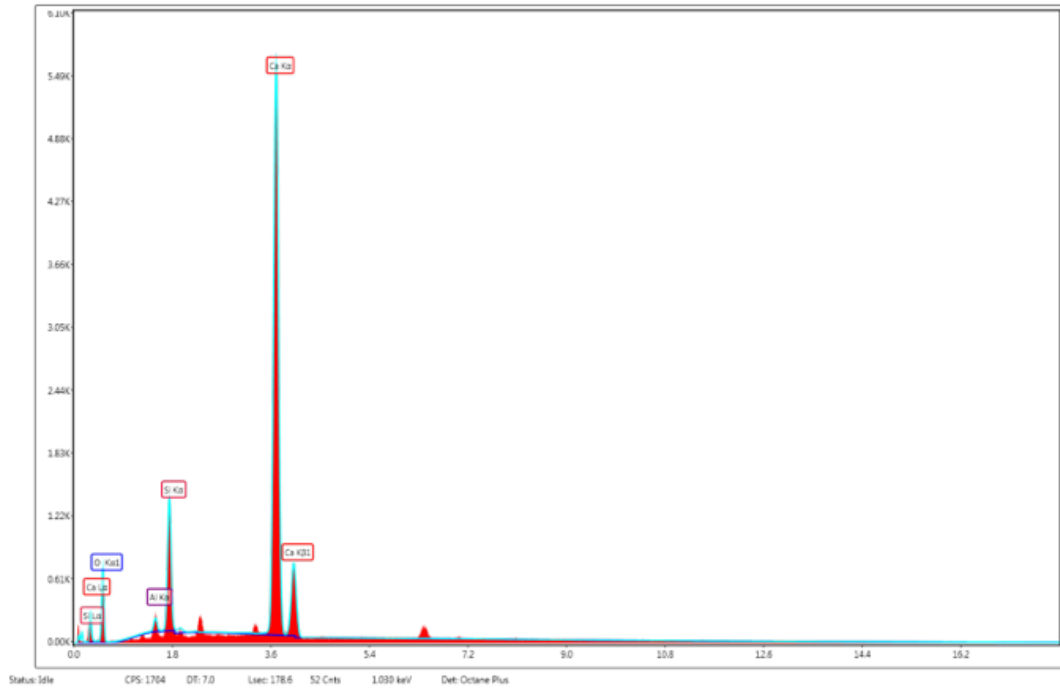
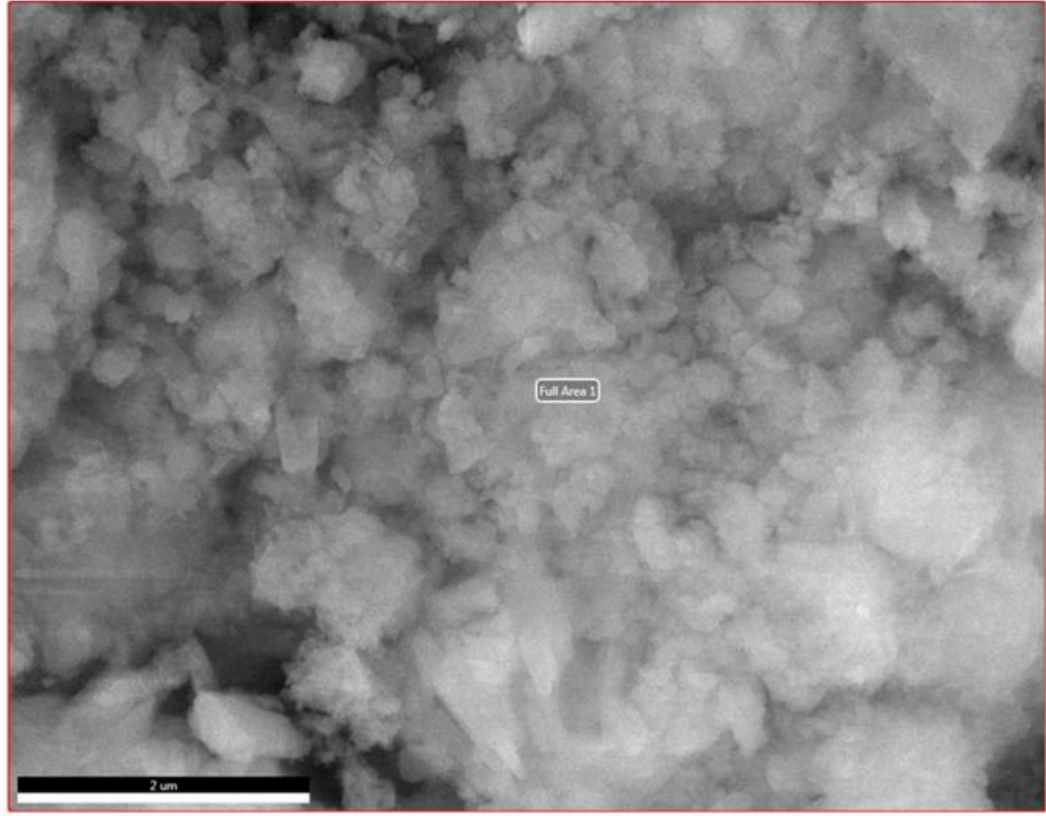
numunesinin SEM Görüntüsü ve EDAX Spektrumu Şekil 64’de verilmiştir. Sadece çimento, nano silika ve nano alümina katılmış numunelerin SEM görüntüleri incelendiğinde, iç yapılarında en az boşluğa sahip numunenin nano silika katkılı numune olduğu söylenebilir. Nano alümina katkılı numunedeki boşlukların sadece çimentolu numuneden daha az nano silika katkılı numunelerden ise daha fazla olduğu görülmektedir. Nano silika katkılı numunenin SEM görüntüsüne bakıldığı zaman, boşlukların daha az olduğu ve C-S-H yapılarının olduğu tespit edilmiş ve numunenin dayanımı artmıştır. Nano silika içeren enjeksiyonlarda, enjeksiyon harcının CH ile reaksiyona girerek C-S-H oluşumuna neden olduğu bunun sonucunda dayanımın arttığı, aynı zamanda nano silikanın çok küçük boşlukları doldurarak daha yoğun bir yapı oluşturduğu bilinmektedir. (Li *et al.* 2004b; Givi *et al.* 2007). Nano alümina katkılı numunenin SEM analizinde görülen altıgen yapıların C-A-H olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, nano alümina katkılı numunenin EDAX spektrumu incelendiğinde, belirgin Al piklerinin olduğu görülmektedir.



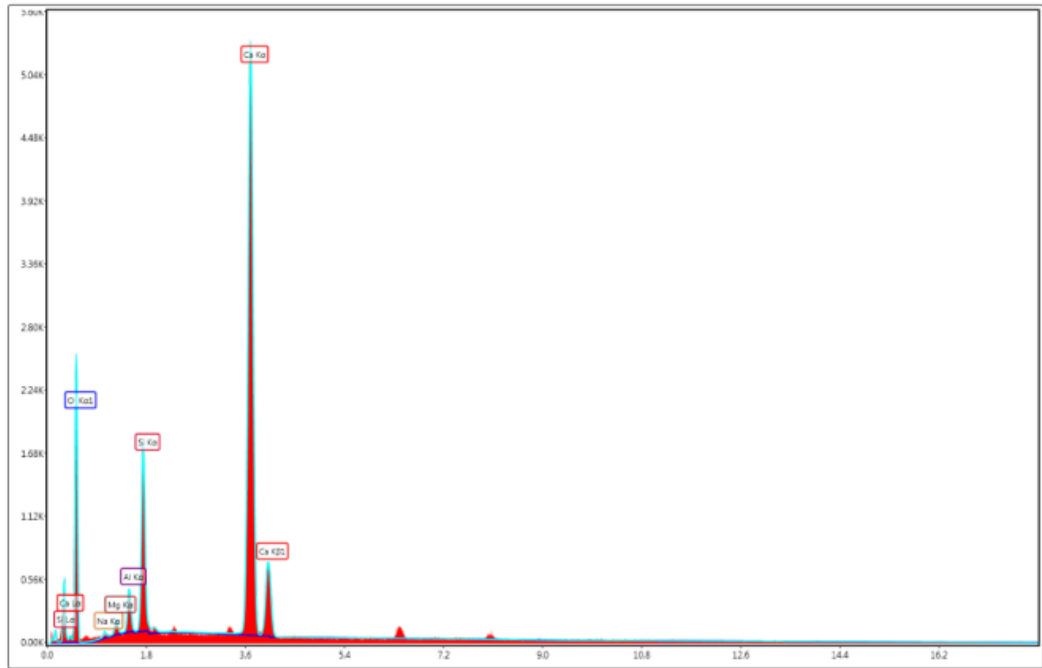
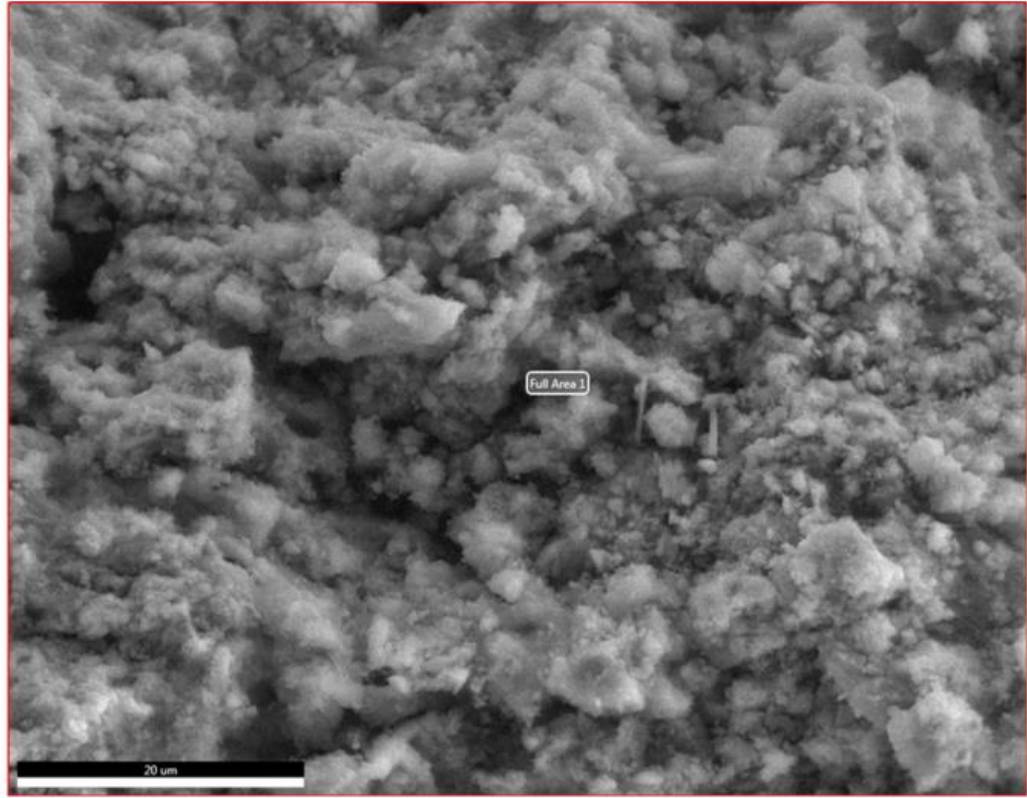
Şekil 62. Sadece çimento enjeksiyonu yapılmış numunenin SEM görüntüsü

Sadece çimentonun SEM görüntüsünde, partiküllerinin arasında boşluklar bulunmaktadır. Bunun sonucu olarak, katkılı numunelerle kıyaslandığında sadece çimentolu numunelerin permeabilite lerinin daha fazla ve dayanımlarının daha düşük çıkmasına sebep olduğu düşünülmektedir.

Nano malzemelerin geniş ve düzgün dağılımı nedeniyle, nano malzemelerin yüzdesinin artması, zemin gözeneklerini doldurarak sıkı bir yapı oluşturur. Ayrıca zemin ve çimento karışımına nano silikanın eklenmesiyle bu nano malzemelerin pozolanik aktiviteleri ve homojen dağılımı artar. Bunun sonucu olarak permeabilite azalır ve dayanım artar. Katkı olarak nano alümina katılması durumunda, CAH yapıları oluşmaktadır. C-A-H'ların geniş ve düzgün dağılımı nedeniyle zemin partiküllerinin yüzeyinde boşlukların ve geçirimsizliğin azaldığı ve tek eksenli basınç dayanımının arttığı sonucuna varılabilir.



Şekil 63. W10SNS9 (en yüksek tek eksenli basınç dayanıma sahip) numunenin SEM görüntüsü ve EDAX spektrumu

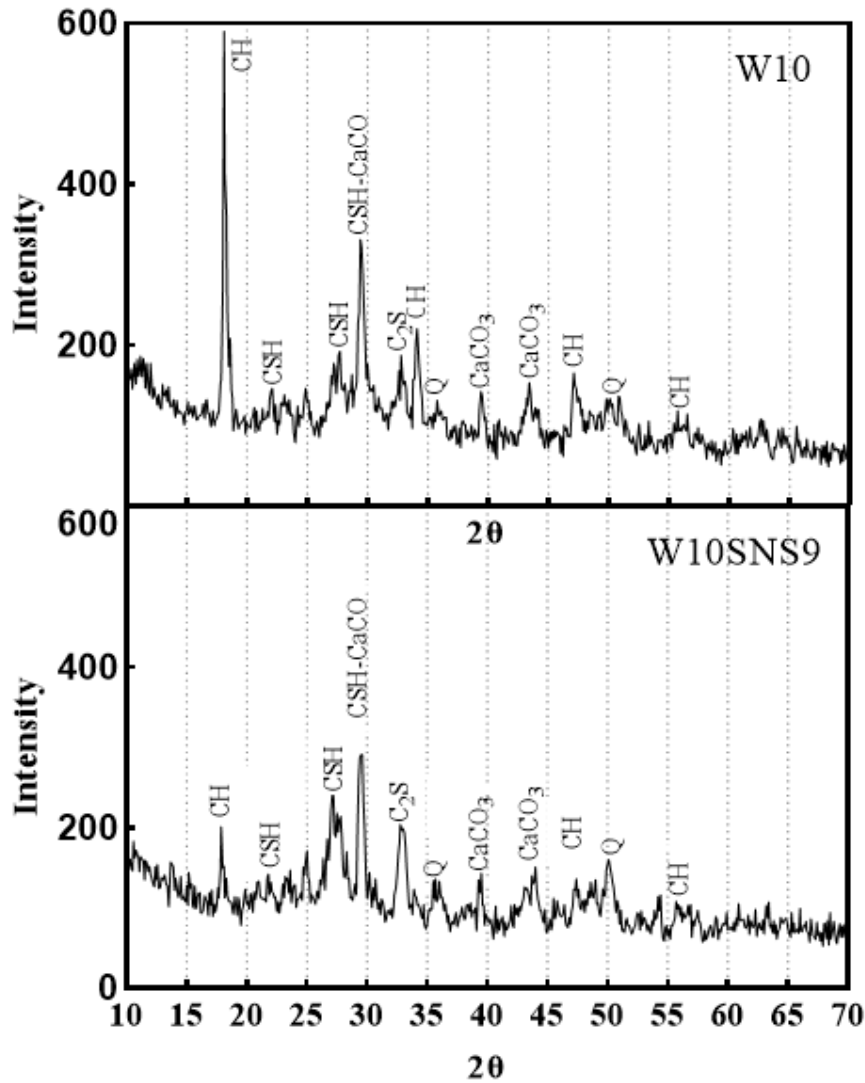


Şekil 64. Nano alümina katkılı numunelerde en yüksek tek eksenli basınç dayanıma sahip (W10SNA6) numunenin SEM görüntüsü ve EDAX spektrumu

XRD Analizi Sonuçları

Çimento (W10) ve % 94,1 Ç+ % 5 SD + % 0,9 NS (W10SNS9) numunelerine ait XRD grafikleri Şekil 65’ de verilmiştir. Sadece çimento enjekte edilmiş numunesinin XRD difraktogramlarında; kuvars, CH (Portlandit), CSH (Kalsiyum silikat hidrat), CaCO_3 (Kalsit) ve C_2S pikleri görülmüştür. W10SNS9 numunesinin XRD difraktogramlarında da kuvars, CH

(Portlandit), CSH (Kalsiyum silikat hidrat), CaCO_3 (Kalsit) ve C_2S pikleri görülmüştür. Kuvars piki, enjeksiyon yapılmış numunedeki agregadan kaynaklanmaktadır. CH ve CSH ana hidratasyon ürünleridir. CSH çimentoya bağlayıcılık özelliği kazandıran ve mukavemet üzerinde etkili olan en önemli parametredir. CSH zayıf bir kristal yapıya sahip olduğu için XRD analizlerinde kolaylıkla belirlenememektedir. CH'ın XRD analizlerinde belirlenmesi kolaydır. CH'ın azalması puzolanik reaksiyonun meydana geldiğini ve CSH, CAH, CASH gibi ilave hidratasyon ürünlerinin oluşumunu gösterir (Çelik 2017). W10SNS9 numunesindeki CH pikleri W10 numunesindeki CH pikleri ile karşılaştırıldığında, bazı CH piklerinin yoğunluğunun azaldığı bazı CH piklerinin ise olmadığı görülmektedir. W10SNS9 numunesinde bulunan silis dumanı ve nano silika CH ile reaksiyona girerek CSH oluşturmuş ve bunun sonucunda da mukavemet artmıştır.



Şekil 65. Çimento ve en yüksek tek eksenli basınç dayanımı veren enjeksiyon numunelerinin XRD grafikleri

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, çimento, % 5 silis dumanı ve farklı yüzdelerde nano silika (% 0,3, % 0,6 ve % 0,9) ve nano alümina (% 0,3, % 0,6 ve % 0,9) kullanılarak 3 farklı s/k (1,0, 1,4, 1,8) oranlarında hazırlanan enjeksiyon harçları, 2 farklı rölatif sıkılıkta ($D_r = \%30, \%70$) hazırlanan kötü derecelenmiş kum zemine (SP) enjekte edilmiş, 7-28 gün dayanımları ve 28 gün kür süresi sonunda permeabiliteleri belirlenmiştir. Katkı yüzdeleri belirlenirken literatürden faydalanılmıştır. Deneyler 200 kPa enjeksiyon basıncı altında yürütülmüştür. s/k oranları ve enjeksiyon basıncı ön deneyler sonucunda belirlenmiştir. Enjeksiyon deneylerine başlamadan önce karışımların fiziksel, mekanik ve akış özellikleri belirlenmiştir. Çalışmadan elde edilen bulgular aşağıda verilmiştir. Ayrıca, çimento ve en yüksek tek eksenli basınç dayanımı veren numune (W10SNS9) üzerinde XRD ve çimento, en yüksek dayanımı veren nano alümina (W10SNA6) ve nano silika (W10SNS9) katkılı numuneler üzerinde SEM analizi yapılmıştır.

- Enjeksiyon harcının s/k oranı arttıkça çökeltme yüzdesi de artmıştır. Aynı s/k oranında, nano silika ve nano alümina katkı yüzdeleri arttıkça çökeltme miktarları azalmıştır. Bu durum, nano malzemelerin özgül yüzey alanlarının yüksek olmasından kaynaklanmaktadır.
- Marsh Hunisi deney sonuçlarına göre, s/k oranının artmasıyla akış süresinin azaldığı, aynı s/k oranında katkıların akış süresini arttırdığı yani başka bir ifadeyle viskoziteyi arttırdığı belirlenmiştir. Aynı s/k oranında katkı yüzdesi arttıkça akış süresi de artmıştır.
- Enjeksiyon harçların s/k oranı arttıkça priz başlangıç ve bitiş süreleri uzamaktadır. Aynı s/k oranında çimentoya silis dumanı, nano silika ve nano alümina katılmasının priz başlangıç ve bitiş sürelerini azalttığı görülmüştür. Katkı oranı arttıkça priz başlangıç ve bitiş süreleri de azalmaktadır.
- Enjeksiyon harçları üzerinde yapılan tek eksenli basınç deneyi sonuçlarına göre, en yüksek tek eksenli basınç dayanımı 2,544 MPa olarak s/k=1,0 olan numunelerden elde edilmiştir. s/k oranı arttıkça tek eksenli basınç dayanımları azalmış kür süresi arttıkça tek eksenli basınç dayanımı artmıştır.
- Enjeksiyon yapılmış numunelerin tek eksenli basınç deneyi sonuçlarına göre, $D_r = \%70$ ve $\%30$ rölatif sıkılıklarda ve s/k oranlarında enjeksiyon yapılmış numunelerde,

tüm katkı yüzdelерinde en yüksek tek eksenli basınç dayanımları $s/k=1,0$ olan numunelerden elde edilmiştir. $D_r=\% 70$ sıklıkta enjeksiyon yapılmış numunelerin tek eksenli basınç dayanımları $D_r=\% 30$ sıklıkta enjeksiyon yapılmış numunelerden genellikle daha yüksek çıkmıştır. Enjeksiyon harcına silis dumanına ilave olarak nano silika ve nano alümina katılarak enjeksiyon yapılmış numunelerin tek eksenli basınç dayanımında özellikle düşük s/k oranlarında çimento ve çimento + silis dumanlı enjeksiyon yapılmış numunelere göre önemli artışlar sağlamıştır. En yüksek tek eksenli basınç mukavemeti $\% 0,9$ nano silis katkılı numunelerden elde edilmiştir. Nano malzemelerin tane çapları silis dumanı ve çimentodan çok daha küçük olduğu için zemin içerisindeki nano boşlukları doldurabilme yeteneğine sahiptirler. Ayrıca, deneysel çalışmada kullanılan nano silika ve nano alümina pozolanik malzemeler oldukları için dayanım üzerinde önemli katkıları olmaktadır. Kür süresi arttıkça dayanım daha da artmıştır. Nano malzeme katkılı enjeksiyon yapılmış numuneler çimento ve çimento + silis dumanı katkılı enjeksiyon yapılmış numunelere göre erken yaşta daha fazla dayanım kazanmıştır.

- s/k oranı arttıkça tüm enjeksiyon yapılmış numunelerde dayanımlarda azalmaktadır. s/k oranı arttıkça enjeksiyon edilebilirlik artmakta ama dayanım azalmaktadır.
- Nano alümina katkılı enjeksiyon yapılmış numunelerde, en yüksek dayanım $\% 0,6$ nano alümina katkılı numunelerden 7,581 MPa olarak elde edilmiştir. Nano alümina miktarı $\% 0,9$ olduğunda dayanım azalmıştır. Karışımında bulunan nano alümina partiküllerinin (pozzolan) miktarının, hidrasyon işlemi sırasında açığa çıkan kireçle birleşmek için gereken miktardan daha fazla olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.
- Tüm rölatif sıklıklarda hazırlanmış numunelere yapılmış enjeksiyonların tek eksenli basınç dayanımları göz önüne alındığında en yüksek tek eksenli basınç dayanımı $\% 94,1\text{Ç} + \%SD + \% 0,9\text{NS}$ (W10SNS9) katkılı numunelerden 8,847 MPa olarak elde edilmiştir.
- Tüm rölatif sıklıklarda hazırlanmış numunelere yapılmış enjeksiyonların 28 gün kür süresi sonundaki permeabilite deney sonuçları göz önüne alındığında, en düşük permeabilite değeri W10SNS6 ($\% 94,1\text{Ç} + \%SD + \% 0,9\text{NS}$) katkılı numuneden $2,05 \times 10^{-7}$ cm/sn olarak belirlenmiştir. $\% 0,9$ nano silika katkılı numunenin permeabilite değeri $\% 0,6$ nano silika katkılı numunenin permeabilite değerine oldukça yakın çıkmıştır. s/k oranı arttıkça permeabilite katsayısı da artmıştır. Aynı rölatif sıklık ve s/k oranlarında, nano silika ve nano alümina katkılı numunelerin permeabilite değerleri sadece çimento ve çiment+silis dumanı katkılı numunelerden

daha düşük çıkmıştır. Bu da nano malzemelerin zemin boşluklarını daha iyi doldurması ve bağ oluşturmamasından kaynaklanmaktadır. Nano silika ve nano alümina katkılı numunelerin permeabilite değerleri sadece çimento enjeksiyonu yapılmış numunelere göre yaklaşık % 53- % 97 azalmıştır. Permeabilite sonuçlarına göre, permeabilite üzerinde en etkili katkının nano silika olduğu görülmüştür.

- SEM analizi sonuçlarına göre, sadece çimento, nano silika ve nano alümina katılmış numunelerin iç yapılarında en az boşluğa sahip numunenin nano silika katkılı numune olduğu söylenebilir. Nano silika katkılı numunenin SEM görüntüsüne bakıldığı zaman, boşlukların daha az olduğu ve C-S-H yapılarının olduğu tespit edilmiştir. Nano alümina katkılı numunenin SEM görüntülerinde ise C-A-H yapıları tespit edilmiştir. Nano silika ve nano alüminanın katkı olarak çimentoya eklenmesiyle, boşluklar azalmış, C-S-H ve C-A-H yapıları oluşmuş bu da dayanımda artışa ve permeabilitenin azalmasına sebep olmuştur.
- Yapılan XRD analizleri sonucunda, W10SNS9 numunesinde bulunan silis dumanı ve nano silika CH ile reaksiyona girerek CSH oluşturmuş ve bunun sonucunda da mukavemet artmıştır.

Yapılan enjeksiyon deneyleri sonucunda, nano silika ve nano alüminanın katkı olarak kullanılmasının dayanım ve permeabilite üzerinde olumlu etkilerinin olduğu görülmektedir. Farklı gradasyona sahip ince taneli zeminler üzerinde değişik tipte ve s/k oranlarında nano malzeme kullanılarak yapılacak enjeksiyon deneyleriyle, ince taneli çimento enjeksiyonuna ve kimyasal enjeksiyona bir alternatif olup olmayacağının araştırılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- ASTM C39, 2019. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.
- ASTM C191, 2019. Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle. 164-166.
- ASTM C939, 2016. Standard Test Method for Flow of Grout for Preplaced-Aggregate Concrete (flow cone method).
- ASTM C940, 2016. Standard Test Method for Expansion and Bleeding of Freshly Mixed Grouts for Preplaced-Aggregate Concrete in the Laboratory.
- ASTM D5856, 2015. Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Porous Material Using a Rigid-Wall, Compaction-Mold Permeameter.
- ASTM C939-2016. Standard Test Method for Flow of Grout for Preplaced-Aggregate Concrete (Flow Cone Method).
- ASTM D854, 2014. Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer.
- ASTM D2487, 2011. Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (unified soil classification system).
- ASTM D4254, 2014. Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density.
- Abraham, A. 2005. Effect of initial moisture state on the engineering properties of microfine cement grouted sands.
- Aggarwal, P., Singh, R. P., & Aggarwal, Y. 2015. Use of nano silica in cement based materials—A review. *Cogent Engineering*, 2(1).
- Ahmadi, H. 2021. Experimental study of the effect of nano additives on the stiffness of cemented fine sand, *International Journal of Geotechnical Engineering*, 433-446.
- Ahmadi, H., and Shafiee, O., 2019. Experimental comparative study on the performance of nano-SiO₂ and microsilica in stabilization of clay. *Eur. Phys. J. Plus*, 134: 459. DOI 10.1140/epjp/i-12918-1
- Aitcin, P.-C., Ballivy, G., Parizeau, R. 1984. The use of condensed silica fume in grouts. *Special Publication*, 83, 1–18.
- Akbulut, S., 1999. Enjeksiyon ile gran r zeminlerin geoteknik özelliklerinin iyileştirilmesi. Doktora tezi, İT  Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Akbulut, S. and Saglamer, A., 2002. Estimating the groutability of granular soils: a new approach. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 17(4), 371–380.
- Andrus, R. D., and Chung, R. M., 1995. Ground improvement techniques for liquefaction remediation near existing lifelines. US National Institute of Standards and Technology.
- Anonim, 2021. <https://nanosany.com> (15.12.2021)/IRAN.
- Anonim, 2019a. <https://www.fuchangchem.com/product/14.html> (15.10.2019)/China.
- Anonim, 2019b. <http://www.askalecimiento.com.tr> (03.10.2019)/Turkey.

- Atıncıkici, T.G., 2007. Nanoboyutlu Bakır İçeren İkili Katalizörlerin Hazırlanması ve Tanımlanması, Doktora Tezi, Kimya Mühendisliği: Proses ve Reaktör Tasarımı, İstanbul Üniversitesi, İstanbul.
- Ata, A., Vipulanandan, C., 1997. Silcafume in Silicat and Cement Grouts and Grouted Sands , Proceedings, Grouting: Compaction, Remediation and Testing, 242-257.
- Avcı, E., 2009. Farklı rölatif sıkılık ve tane dağılımına sahip kum zeminlerde Ultrafin 12 enjeksiyonu permeasyon yetisi. Yüksek lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Beer, G., 2009. Tube-à-manchette installation using horizontal directional drilling for soil grouting. Technology Innovation in Underground Construction, CRC Press, 359-370.
- Bell, F. G., Milligan, V. 1993. Engineering Treatment of Soils. Engineering Geology, 37(2), 162-164.
- Burwell, E. B. 1958. Cement and clay grouting of foundations: practice of the corps of engineers. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 84(1), 1-22.
- Cambefort, H. 1951. Foliate gravelly alluvium with opened structure. In Proceedings of the Fourth Conference on Large Dams (New Delhi (Vol. 4, pp. 434-452).
- Campillo, I., Guerrero A., Dolado J.S., Porro A., Ibáñez J.A., Goñi S., 2007. Improvement of initial mechanical strength by nanoalumina in belite cements. Materials Letters, 61, 8-9, 1889-1892.
- Çelik, S., 2017. An Experimental Investigation of Utilizing Waste Red Mud in Soil Grouting. KSCE Journal of Civil Engineering, 21(4), 1191-1200.
- Çelik, S., Majedi, P., Akbulut, S. (2018). Granular Soil Improvement by Using Polyester Grouts. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 43, 599-606.
- Chen, Y., Nishiyama, T., Terada, M., & Iwamoto, Y. 2000. A fluorescent approach to the identification of grout injected into fissures and pore spaces. Engineering Geology, 56(3-4), 395-401.
- Çinicioğlu, F., 1997. Zemin Mekaniğinde Harç Enjeksiyonu. İstanbul: İstanbul Üniversitesi Basımevi.
- Evans, J., Ruffing, D., and Elton, D., 2021. Fundamentals of Ground Improvement Engineering. CRC Press, 412 p, Florida, USA.
- Furuncu, O., 2019. Naftalin sülfonat esaslı yapı kimyasallarının jet grout kolonların performansı üzerindeki etkilerinin deneysel olarak araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya Teknik Üniversitesi.
- Gambin, M. P. 1991. Lateral Static Densification at Monaco-Design, Construction, and Testing. Deep Foundation Improvements: Desire, Construction, and Testing. ASTM STP1089, M.I. Esrig and R.C. Bachus, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- Givi, A.N., Rashid S.A., Aziz F.N.A, Salleh M.A.M., 2010. Experimental investigation of the size effects of SiO₂ nano-particles on the mechanical properties of binary blended concrete. Composites Part B: Engineering, 41/8, 673-677.
- Gopinathan, S., and Anand, K. B., 2018. Properties of cement grout modified with ultra-fine slag. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 12(1), 58-66.
- Güngörmüş, G., 2003. Bentonit uçucu kül ve silis dumanı katkılı çimento enjeksiyonu uygulanan granüler zeminlerde serbest basınç mukavemetinin incelenmesi. Yüksek

Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.

- Haeri, S.M., Valishzadeh, A. 2021. Evaluation of Using Different Nanomaterials to Stabilize the Collapsible Loessial Soil. *Int J Civ Eng*, 19, 583–594.
- Hakansson, U., Hässler, L., Stille, H. 1992. Rheological Properties of Microfine Cement Grouts. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 7(4), 453–458.
- Henn, R. W., 1996. Practical guide to grouting of underground structures, ASCE Press, 191 p, Virginia, USA.
- Herndon, J., Lenahan, T. 1976. Grouting In Soils Volume 1: A State-Of-The-Art Report.
- Hwang, C. L., and Wu, D. S. 1989. Properties of Cement Paste Containing Rice Husk Ash. *American Concrete Institute*, 114, 733-765.
- Incecik, M., and Ceran, I. 1995. Cement Grouting Model Tests. *Bulteni-Istanbul Teknik Universitesi*, 48, 305–318.
- Jafarian Barough, M., Çelik, S. Oltulu, M. 2021. Investigation into The Effect of Nanomaterial Injection on Improving the Geotechnical Properties of Granular Soils. *Iran J Sci Technol Trans Civ Eng*.
- Jafarpour, P., Moayed, R. Z., Kordnaeij, A., 2020. Behavior of zeolite-cement grouted sand under triaxial compression test. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 12(1), 149-159.
- Kalhor, A., Ghazavi, M., Roustaei, M., Mirhosseini, S.M. 2019. Influence of nano-SiO₂ on geotechnical properties of fine soils subjected to freeze-thaw cycles. *Cold Regions Science and Technology*. 161. 129-136.
- Karol, R. H. 2003., Chemical grouting and soil stabilization, CRC Press, 536 p, Florida, USA
- Karumanchi, M., Avula, G., Pang, R., Sirigiri, S., 2020. Improvement of consistency limits, specific gravities, and permeability characteristics of soft soil with nanomaterial: nanoclay. *Materials Today: Proceedings*, 33, 232-238.
- Kirsch, K. and Bell, A., 2012. Ground improvement. CRC Press, 494 p, Florida, USA.
- Kalhor, A., Ghazavi, M., Roustaei, M., 2022. Impacts of Nano-silica on Physical Properties and Shear Strength of Clayey Soil. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47(4), 5271-5279.
- Kavak, A., Mutman, U. 2005. Düşük Basıncılı Çimento Enjeksiyonu ile Zemin İyileştirilmesi. *Deprem Sempozyumu*, Kocaeli
- Koli, D., Agnihotri, G., Purohit, R. 2013. Properties and Characterization of Al-Al₂O₃ Composites Processed by Casting and Powder Metallurgy Routes. *International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology (IJLTET)*.
- Krizek, R. J., Liao, H. J., & Borden, R. H. 1992. Mechanical Properties of Microfine Cement/Sodium Silicate Grouted Sand. *Geotechnical Special Publication*, 1(30), 688–699.
- Kutzner, C. 1996a. Grouting of Rock and Soil: AA Balkema. Rotterdam/Brook Field, 271p.
- Kutzner, C. 1996b. Grouting of Rock and Soil: Rotterdam. Netherlands: Balkema.
- Küçükali, S. Cokgor, S. 2008. Boulder-Flow Interaction Associated with Self-Aeration. *Journal of Hydraulic Research*, 46(3), 415-419
- Langevin, M. 1995. Rheological and Mechanical Behavior of Microfine Cement-Based Grouts.
- Lee, M., Im, J., Chang, I., Cho, G. C., 2021. Evaluation of Injection capabilities of a

- biopolymer-based grout material. *Geomechanics and Engineering*, 25(1), 31-40.
- Li, H., Xiao H., Ou, J., 2004b. A study on mechanical and pressure sensitive properties of cement mortar with nanophase materials. *Cem. and Conc. Res.* 34, 435-438.)
- Littlejohn, G, S. 1993. *Chemical Grouting*. CRC Press, Inc.
- Lombardi, G. 1985. The Role of Cohesion in Cement grouting of rock. 15th Cong. Large Dams, 1985.
- Majed, R.A., Mahdi, M., Al-Kaisy., H., Abdul Maged, Saja. 2014. Corrosion Behavior for Al-Cu-Mg Alloy by Addition of SiO₂ Particles in Seawater. *Eng. & Tech. Journal*, Vol. 32, Part (A), No.2
- Majeed, ZH., Taha, MR. 2012. Effect of nanomaterial treatment on geotechnical properties of a Penang soft soil. *J Asian Sci Res* 2(11):587
- Markou, I.N., Droudakis, A.I., 2013. Factors Affecting Engineering Properties of Microfine Cement Grouted sands. *Geotech Geol Eng*, 31(4), 1041–1058.
- Meeravali, K., Ruben, N., Rangaswamy, K., 2020. Stabilization of soft-clay using nanomaterial: Terrasil. *Materials Today: Proceedings*, 27, 1030-1037.
- Mirghasemi, A.A., Etemadzadeh, M and Pakzad, M., 2004. Results and experiences obtained from chemical grout testing in part of conglomerate foundation of Karkheh dam—Iran. *New developments in dam engineering*. 627.
- Mollamahmutoğlu, M. and Yılmaz, Y., 2011. Engineering Properties of Medium to- Fine Sands Injected with Microfine. *Marine Georesources and Geotechnology*. 29 (2), 95-109.
- Mutman, U., 2007. Düşük Basıncılı Çimento Enjeksiyonu ile Zemin Özelliklerinin İyileştirilmesi. *Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli*.
- Mutman, U. and Kavak, A. 2007. Sıvılaşma Riskinin Düşük Basıncılı Çimento Enjeksiyonu İle Azaltılması. In *International Earthquake Symposium*, Kocaeli.
- Nazari, A., Riahi, Sh., Shamekhi, S.F., Khademno, A. 2010. Mechanical Properties of Cement Mortar with Al₂O₃ Nanoparticles. *Journal of American Science*. 6(4), 94-97.
- Nazari, A., Riahi, Sh. 2011. Abrasion Resistance of Concrete Containing SiO₂ and Al₂O₃ Nanoparticles in Different Curing Media. *Enerjy and buildings*. 43. 2939-2946.
- Nili, M., and Ehsani, A. 2015. Investigating the effect of the cement paste and transition zone on strength development of concrete containing nanosilica and silica fume. *Materials and Design*, 75, 174-183.
- Nonveiller, E., 1989. *Grouting Theory and Practice*. Elsevier Science Publishing Company 250 P, New York, USA.
- Olgun, M., Kanat, A., Senkaya, A., Erkan, I. H., 2021. Investigating the properties of jet grouting columns with fine-grained cement and silica fume. *Construction and Building Materials*, 267, 120637.
- Oltulu, M., 2011. Mineral katkılı çimento harçlarının fiziko-mekanik özellikleri ve mikroyapısı üzerine nano-SiO₂, nano-Al₂O₃ ve nano-Fe₂O₃ tozlarının tekli ve bileşik etkisi. *Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum*.
- Oltulu, M., Şahin, Remzi. 2014. Pore Structure Analysis of Hardened Cement Mortars Containing Silica. *Constr Build Mater* 53:658–664.
- Oltulu, M., Şahin, Remzi. 2011. Single and Combined Effects of Nano-SiO₂, Nano-Al₂O₃ and Nano-Fe₂O₃ Powders on Compressive Strength and Capillary Permeability of Cement Mortar Containing Silica Fume. *Mater Sci. Eng. A* 528: 7012-7019.

- Özçoban, M., Acarer, S., 2022. Investigation of the Effect of Leachate on Permeability and Heavy Metal Removal in Soils Improved with Nano Additives. *Appl. Sci.* 12, 6104. Switzerland..
- Özgan, E., Gökdemir, A., Subaşı, S., Yıldız, K. 2007. Düşük Poroziteli Zeminlerde MICROCEM 900 H Çimento Enjeksiyonu Uygulaması. *International Earthquake Symposium*, Kocaeli.
- Pekrioglu Balkis, A., 2020. Properties and performance of a high volume fly ash grout. *Marine Georesources & Geotechnology*, 38(1), 73-82.
- Perret, S., Ballivy, G., Khayat, K., Mnif, T. 1997. Injectability of Fine Sand With Cement-Based Grout. In *Grouting: Compaction, Remediation and Testing* (pp. 289–305). ASCE.
- Perret, S., Palardy, D., Ballivy, G. 2000. Rheological Behavior and Setting Time of Microfine Cement-Based Grouts. *Materials Journal*, 97(4), 472–478.
- Rajabi, A.M., Ardakani, S.B. Abdollahi, A.H. 2021. The Effect of Nano-Iron Oxide on the Strength and Consolidation Parameters of a Clay Soil: An Experimental Study. *Iran J Sci Technol Trans Civ Eng*, 45, 1759–1768.
- Rawlings, C.G., Hellowell, E., Kilkeny, E., 2000, *Grouting for Ground Engineering*, Ciria, London, 15-74.
- Saleh, N. J., Ibrahim, R. I., and Salman, A. D. 2015. Characterization of nano-silica prepared from local silica sand and its application in cement mortar using optimization technique. *Advanced Powder Technology*, 26(4), 1123-1133.
- Samala, H.R., Mir, B.A. 2020. Some studies on microstructural behaviour and unconfined compressive strength of soft soil treated with SiO₂ nanoparticles. *Innov. Infrastruct. Solut*, 5(34),1-12.
- Seifan, M., Mendoza, Sh., Berenjian, A. 2021. A Comparative Study on the Influence of Nano and Micro Particles on the Workability and Mechanical Properties of Mortar Supplemented with Fly Ash. *Buildings*, 11, 60.
- Senff, L., Labrincha, J.A., Ferreira, V.M., Hotza, D. and Repette, W.L., 2009. Effect of nano-silica on rheology and fresh properties of cement pastes and mortars. *Construction and Building Materials*, 23(7): p. 2487-2491
- Schmertmann, J. H., and Henry, J. F. 1992. A design theory for compaction grouting. In *Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics*, ASCE, 1, 215-228.
- Schwarz, L. G., 1998. Roles of rheology and chemical filtration on injectability of microfine cement grouts. *Northwestern University*.
- Schwarz, L. G., and Krizek, R. J., 2000. Evolving morphology of early age Microfine cement grout. In *Advances in Grouting and Ground Modification*, p. 181–199.
- Singh, L.P., Karade, S.R., Bhattacharyya, Yousuf, M.M. and Ahalawat, S., 2013. Beneficial role of nanosilica in cement based materials—A review. *Construction and Building Materials*, 47: p. 1069-1077.
- Sobolev, K. Flores, V., Ismael, T., Leticia, V., Cuéllar, E. 2009. Engineering of SiO₂ Nanoparticles for Optimal Performance in Nano Cement-Based Materials. *Proceedings of the Nanotechnology in Construction 3 (NICOM3)*. 139-148.
- Soga, K., Au, S. K. A., Jafari, M. R., Bolton, M. D. 2004. Laboratory Investigation of Multiple Grout Injections into Clay. *Géotechnique*, 54(2), 81–90.
- Sonebi, M., Hughes, D., Harley, R., Lynch, K. 2012. Characterisation of The Performance of Sustainable Grout Containing Bentonite For Geotechnical Application. In *The*

- international conference on Sustainable Built Environment for Now and the Future. Hanoi.
- Sonebi, M., Bassuoni, M. T., Kwasny, J., Amanuddin, A. K. 2015. Effect of nanosilica on rheology, fresh properties, and strength of cement-based grouts. *Journal of materials in Civil Engineering*, 27(4).
- Soundarya, S., Sowmya. M., Sujithra. E., Deepak. A., Manoj. N., 2015. A Review on Advancements in Concrete Using Nanomaterials. *International Journal for Innovative Research in Science & Technology*. ISSN (online), 2349-6010.
- Spagnoli, G., 2021. A review of soil improvement with non-conventional grouts. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 15(3), 273-287.
- Speakman, S., 2016. Basics of X-ray Diffraction, Massachusetts Institute of Technology, USA.
- Taha, MR., Taha, OME, 2012. Influence of nanomaterial on the expansive and shrinkage soil behavior. *Journal of Nanoparticle Research*, 14: 1190
- Tan, O., Gungormus. G., Zaimoglu, A.S., 2014. Effect of Bentonite, Fly Ash and Silica Fume cement injections on uniaxial compressive strength of granular bases. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18 (6), 1650-1654.
- Tekin, E. 2004. İnce taneli çimento (Rheocem 900) enjeksiyonu ile değişik gradasyonlu kumların enjekte edilebilirliği üzerine deneysel çalışmalar. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Tekin, E. and Akbaş, S.O, 2010. Çimento Enjeksiyonlarının Kumlara Enjekte Edilebilirliğinin Diskriminant Analizi İle İrdelenmesi. *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 25(3), 625-633.
- Tekin, E. and Mollamahmutoğlu, M., 2010. Çok ince taneli çimento (rheocem 900) enjeksiyonu ile farklı gradasyona sahip kumların enjekte edilebilirliği. *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 25(3), 533-539.
- Thomas, M. D. A., Cail, K., and Hooton, R. D., 1998. Development and field applications of silica fume concrete in Canada: a retrospective. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 25(3), 391-400.
- Tobón, J. I., Restrepo, O. J., Payá, J., 2010. Comparative Analysis Of Performance Of Portland Cement Blended With Nanosilica And Silica Fume. *Medellin .Dyna*, Year 77, Nro. 163, Pp. 3746., Issn 00127353.
- Vasumithran, M., Anand, K. B., Sathyan, D., 2020. Effects of fillers on the properties of cement grouts. *Construction and Building Materials*, 246, 118346.
- Ye, G., Zhou J., Breugel K., Schutter G., 2006. Characterisation of the Hydration of Portland Cement Blended with Blast Furnace Slag Based on SEM Image Analysis. *RILEM Proceedings* pro046, 444-453
- Yeğınobalı, A., 2003. Silis dumanı ve çimento ile betonda kullanımı. Türkiye Çimento Mustahsilleri Birliği, Ankara.
- Yıldız, B., 2007, Rheobuild 2000 PF Katkılı Rheocem 900 İnce Taneli Çimentonun Değişik Gradasyonlu Kum Numunelere Penetrasyon Yetisi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-46
- Yousefi, A., Jahanian, H., Azadi, M., 2020. Effect of adding cement and nanocement on mechanical properties of clayey soil. *The European Physical Journal Plus*, 135(8), 1-16.
- Wang, Y., Forssberg, E., 2006. Production of carbonate and silica nano-particles in stirred bead milling, *Int. J. Miner. Process* 81 (2006) 1–14.
- Warner, J. 1982. Compaction Grouting-the First Thirty years. In *Grouting in Geotechnical*

- Engineering (pp. 694–707). ASCE.
- Warner, J., 2004. Practical handbook of grouting: soil, rock, and structures. John Wiley, Sons.
- Zahedi, M., Sharifipour, M., Jahanbakhshi, F., Bayat, R. 2014. Nanoclay Performance on Resistance of Clay under Freezing Cycles. J. Appl. Sci. Environ. Manage. vol 18(3), 427-434.
- Zaimoğlu, A.Ş., 2003. Bentonit, uçucu kül ve silis dumanı katkılı çimento enjeksiyonu karşımalarında fiziksel ve mekanik özelliklerin Taguchi yöntemi ile incelenmesi, Doktora tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Zhang, G., 2007. Soil Nanoparticles and their Influence on Engineering Properties of Soils. ASCE Library, [https://doi.org/10.1061/40917\(236\)37](https://doi.org/10.1061/40917(236)37)
- Zhang, C., Yang J., Ou X., Fu J., Xie, Y. Liang, X., 2018. Clay dosage and water/cement ratio of clay-cement grout for optimal engineering performance. Applied clay science, 163, 312-318



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Mehdi Jafarian BAROUGH
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
Tel:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	Ardabil Lisesi
Lisans:	İslam Azad Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Tabriz, (2002)
Yüksek lisans:	Elm o Sanaat Üniversitesi, Fenbilimleri Ens, İnşaat Anabilim Dalı, Tehran, (2009)
Doktora:	Atatürk Üniversitesi
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	Orta
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
İnşaat Mühendisler Odası (İran)	
Tezden Üretilmiş Yayınlar	
1. Effect of Nanoparticles on Geotechnical Engineering Properties of Granular Soils by Using Injection Method, <i>J Biochem Tech</i> dergisi 2. Investigation into the Effect of Nanomaterial Injection on Improving the Geotechnical Properties of Granular Soils, <i>Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering</i> dergisi	