



**BORİK ASİT - SODYUM SİLİKAT ENJEKSİYONLU KUMLARIN
MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ**

Sercan Kerem TOMAÇ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

KASIM 2016

Sercan Kerem TOMAÇ tarafından hazırlanan “BORİK ASİT - SODYUM SİLİKAT ENJEKSİYONLU KUMLARIN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Murat MOLLAMAHMUTOĞLU

İnşaat Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Başkan : Prof. Dr. Erdal ÇOKÇA

İnşaat Mühendisliği, Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Üye : Doç. Dr. Sami Oğuzhan AKBAŞ

İnşaat Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Tez Savunma Tarihi: 22/11/2016

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....
Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Sercan Kerem TOMAÇ

22/11/2016

BORİK ASİT - SODYUM SİLİKAT ENJEKSİYONLU KUMLARIN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Sercan Kerem TOMAÇ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Kasım 2016

ÖZET

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, borik asit ve sodyum silikat içerikli solüsyon türü kimyasal enjeksiyon malzemesi geliştirilmiş, reolojik özellikleri ve farklı rölatif sıklık ve gradasyondaki ince ve orta kum numunelere enjekte edilebilirlikleri ile, enjeksiyon sonrası numunelerin zaman ve saklama koşullarına bağlı olarak değişen mukavemet ve permeabilite özellikleri araştırılmıştır. Enjeksiyonlarda kullanılan borik asit – sodyum silikat yoğunluklarının belirlenmesine yönelik 49 farklı karışım oranı irdelenmiş ve jelleşme süreleri ile zamana bağlı sinerez ölçümleri alınmıştır. Elde edilen veriler neticesinde 6 farklı kimyasal karışımın enjeksiyon deneylerinde kullanılmasına karar verilmiş ve viskoziteleri de belirlenmiştir. Enjeksiyonu gerçekleştirilen kum numunelerde 3 farklı rölatif sıklık ve 6 farklı gradasyon kullanılmış, numuneler laboratuvarında açık havada ve su altında kür tankında bekletilerek 2 farklı bekleme koşulu modellenmiştir. Ayrıca, kum numunelere enjeksiyonunun gerçekleştirilmesi aşamasında minimum enjeksiyon basıncı değerleri de tespit edilmiştir. Enjeksiyonu tamamlanan numuneler çeşitli zaman aralıklarında serbest basınç ve permeabilite deneylerine tabi tutulmuş ve zamana bağlı davranışları belirlenmiştir. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda borik asit ve sodyum silikat oranının artması ile enjekte edilmiş zemin numunelerinde mukavemetin arttığı gözlenmiş, 150. güne kadar her iki kür ortamında bekletilen numunelerde dayanımının 56. gün itibariyle nihai değere ulaştığı ve sabitleştiği gözlenmiştir. Enjeksiyon sonrası jelleşme süreleri tamamlanan numuneler moldlardan çıkarılmadan düşen seviyeli permeabilite deney düzeneğine bağlanmış, 7, 28 ve 56. günlerde düşen seviyeli permeabilite testleri gerçekleştirilerek permeabilite katsayıları (k) tespit edilmiştir. Zemine sodyum silikat ve borik asit karışımı solüsyon enjeksiyonu yapılması, permeabilite katsayısını yaklaşık 300 ile 10000 kat arasında azaltmıştır.

Bilim Kodu : 91105

Anahtar Kelimeler : Kimyasal enjeksiyon, sodyum silikat, borik asit, penetrasyon yetisi, serbest basınç dayanımı, permeabilite

Sayfa Adedi : 106

Danışman : Prof. Dr. Murat MOLLAMAHMUTOĞLU

ENGINEERING PROPERTIES OF SODIUM SILICATE - BORIC ACID GROUTED
SANDS

(M. Sc. Thesis)

Sercan Kerem TOMAÇ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

November 2016

ABSTRACT

In the scope of this thesis, boric acid and sodium silicate mixtures were developed as a chemical grouting material. The rheological properties of chemical mixtures and their penetrability into fine and medium grained sand samples having a wide range of gradation and relative density were investigated. In addition, the permability and strenght properties of grouted sand specimens taking into account curing time and storage condition were determined. Gel time and syneresis of 49 different mixtures of sodium silicate and boric acid mixtures were examined to optimize the volume of chemical contents. From the results, six different mixtures were found suitable for the injection purpose. The initial viscosities of the chosen mixtures were also determined. Sand samples with six different gradation were prepared at three different relative densities and grouted. The minimum required pressures for injection were also investigated. Both wet and air cured samples were subjected to unconfined compressive strength and permability tests to determine their time dependent permeability and strength characteristics. The results show that increase in both boric acid and sodium silicate content in mixtures increased the strength of injected sand samples. The test specimens reached their ultimate strength after 56 days curing period and stabilized. Grouted sand specimens were also subjected to falling head permability tests on 7, 28 and 56 days curing period and their coefficient of permability values were evaluated. The sodium silicate based boric acid mixtures caused the permeability coefficients of sand specimens to decrease about 300 and 1000 times.

Science Code : 91105

Key Words : Chemical grouting, penetrability, unconfined compressive strength, sodium silicate, boric acid, permeability

Page Number : 106

Supervisor : Prof. Dr. Murat MOLLAMAHMUTOĞLU

TEŐEKKÖR

Çalıőmalarım boyunca bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen ve bana yol gösteren değerli hocalarım Prof. Dr. Murat MOLLAMAHMUTOğLU'na ve Yrd. Doç. Dr. Eyübhan AVCI'ya, deneysel çalıőmalarım süresince zaman tanımaksızın hiçbir zaman yardımını esirgemeyen Uzman İnş. Yük. Müh. Aydın GÖKÇE'ye, SAN-TEZ projesi kapsamında desteklerini sunan Doç. Dr. Dursun Ali KÖSE'ye, Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığına ve Yapı Merkezi Ltd. Şti. Firmasına, yüksek lisans eğitimim süresince beni anlayıőla karőılayan ve destekleyen Mustafa Serdar NALÇAKAN'a ve beni yetiőtiren aileme sevgi ve saygılarımı sunarım.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. ENJEKSİYON.....	5
2.1. Enjeksiyon Türleri.....	5
2.2. Uygulama Metoduna Göre Enjeksiyonlar.....	5
2.2.1. Permeasyon (emdirme) enjeksiyonu.....	6
2.2.2. Kompaksiyon enjeksiyonu.....	7
2.2.3. Çatlatma enjeksiyonu.....	8
2.2.4. Jet enjeksiyonu.....	9
2.3. Kimyasal Enjeksiyonun Tarihi Gelişimi.....	10
2.4. Kimyasal Enjeksiyon Çeşitleri.....	10
2.4.1. Sodyum silikatlar.....	11
2.4.2. Akrlamitler.....	13
2.4.3. Lignosulfonatlar.....	14
2.4.4. Fenoplastlar.....	15
2.4.5. Aminoplastlar.....	15

	Sayfa
2.4.6. Diğer kimyasallar.....	16
2.5. Kimyasal Enjeksiyonların Reolojik Özellikleri.....	16
2.5.1. Kalıcılık.....	17
2.5.2. Penetrebilite.....	18
2.5.3. Dayanım.....	19
2.5.4. Jelleşme süresi.....	23
2.5.5. Hassaslık.....	24
2.5.6. Toksikite.....	24
2.6. İdeal Kimyasal Enjeksiyon.....	25
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	27
3.1. Giriş.....	27
3.2. Enjeksiyon Deney Düzenegi.....	28
3.3. Enjeksiyon Deneylerinde Kullanılan Kumun Özellikleri.....	31
3.3.1. Spesifik gravite testleri.....	32
3.3.2. Minimum ve maksimum boşluk oranı değerlerinin belirlenmesi.....	33
3.3.3. Tane dağılımı.....	35
3.3.4. Enjeksiyon deneylerinde kullanılan numunelerin permeabilite değerleri.....	35
3.4. Deneylerde Kullanılan Sodyum Silikatın Özellikleri.....	37
3.5. Deneylerde Kullanılan Reaktantın Özellikleri.....	38
3.6. Deneylerde Kullanılan Kimyasal Solüsyonun Reolojik Özellikleri.....	39
3.7. Deneylerde Kullanılan Kimyasal Solüsyonların Sinerez Yüzdeleri.....	45
3.8. Kimyasal Solüsyonların Viskozite Değerleri.....	50
3.9. Deneylerin Yapılışı.....	50
3.9.1. Moldlara yerleştirilecek kum numunelerin rölatif sıklık ve gradasyona bağlı kütlelerinin belirlenmesi.....	51

	Sayfa
3.9.2. Numunelerin moldlara yerleştirilmesi.....	52
3.9.3. Numunelerin enjeksiyona hazır hale getirilmesi.....	54
3.9.4. Enjeksiyonların Yapılması.....	55
3.9.5. Farklı çözeltiler ile enjekte edilen farklı gradasyon ve rölatif sıklıktaki kum numunelere penetrasyon yetisinin belirlenmesi.....	56
3.10. Enjeksiyon Deneplerinde Başarılı Olan Numunelerin Serbest Basınç Dayanımı Denepleri.....	61
3.11. Kimyasal Enjeksiyonu Gerçekleştirilen Numunelerin Permeabilite Denepleri..	80
4. MALİYET ANALİZİ VE KARŞILAŞTIRMALAR.....	87
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	89
KAYNAKLAR.....	95
EKLER.....	97
EK-1. Kimyasal karışımların sinerez yüzdeleri.....	98
EK-2. Serbest basınç testi sonuçları.....	100
ÖZGEÇMİŞ.....	106

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Silikat enjeksiyonlarının mukavemet değerleri.....	22
Çizelge 2.2. Farklı kimyasal enjeksiyon malzemelerinin mukavemet değerleri.....	22
Çizelge 3.1. Minimum ve maksimum boşluk oranı değerleri.....	34
Çizelge 3.2. Gradasyon numaralarına ait karışım oranları.....	35
Çizelge 3.3. Tipik permeabilite değerleri.....	36
Çizelge 3.4. Enjeksiyon öncesi numunelere ait permeabilite katsayıları.....	37
Çizelge 3.5. Enjeksiyon deneylerinde kullanılan sodyum silikat'a ait fiziko-kimyasal özellikler.....	38
Çizelge 3.6. Borik Asite ait fiziksel ve kimyasal özellikler.....	39
Çizelge 3.7. Borik asidin suda çözünülebilir maksimum miktarları.....	39
Çizelge 3.8. A, B, C ve D grubu kimyasal solüsyonlar.....	42
Çizelge 3.9. E, F ve G grubu kimyasal solüsyonlar.....	43
Çizelge 3.10. Enjeksiyonda kullanılan çözeltilerin viskozite deney sonuçları.....	50
Çizelge 3.11. Molda yerleştirilmesi gereken kum miktarları.....	52
Çizelge 3.12. Enjeksiyonda kullanılan çözeltilerin fiziksel özellikleri.....	56
Çizelge 3.13. Minimum enjekte edilebilirlik basınçları.....	58
Çizelge 3.14. Minimum enjekte edilebilirlik basınçları.....	59
Çizelge 3.15. Serbest basınç testine tabi tutulan numunelere ait değişkenler.....	63
Çizelge 3.16. Basınç testine tabi tutulan numunelere ait değişkenler.....	80
Çizelge 3.17. Enjeksiyon öncesi ve sonrası numunelerin permeabilite değerleri.....	81
Çizelge 3.18. E2 ve E3 kimyasal enjeksiyonlu numunelerin permeabilite sonuçları.....	82
Çizelge 3.19. F1 ve F2 kimyasal enjeksiyonlu numunelerin permeabilite sonuçları.....	82
Çizelge 3.20. G1 ve G2 kimyasal enjeksiyonlu numunelerin permeabilite sonuçları.....	83

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. 1 litre solüsyonun maliyet analizi.....	87
Çizelge 4.2. Çeşitli sodyum silikat enjeksiyonu çalışmalarından elde edilen sonuçlar...	88



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Enjeksiyon tipleri a) Çatlatma b) Permeasyon c) Kompaksiyon d) Jet Enjeksiyon.....	6
Şekil 2.2. Kademeli enjeksiyon işlemi.....	7
Şekil 2.3. Lignosulfanot dozajına bağlı viskozite grafiği	14
Şekil 2.4. Kimyasalların farklı zemin koşullarında penetre edilebilirliği.....	19
Şekil 2.5. Jelleşme süresi boyunca viskozite artışı	23
Şekil 3.1. Farklı numunelere ait gradasyon eğrileri	35
Şekil 3.2. Sodyum silikat- Borik asit çözeltisi reaksiyonu.....	40
Şekil 3.3. Borik asit ve sodyum silikat miktarı değişiminin jelleşme süresine etkisi.....	44
Şekil 3.4. A grubu kimyasalların sinerez-zaman grafiği.....	45
Şekil 3.5. B grubu kimyasalların sinerez-zaman grafiği.....	46
Şekil 3.6. C grubu kimyasalların sinerez-zaman grafiği.....	46
Şekil 3.7. D grubu kimyasalların sinerez-zaman grafiği.....	46
Şekil 3.8. E grubu kimyasalların sinerez-zaman grafiği.....	47
Şekil 3.9. F grubu kimyasalların sinerez-zaman grafiği.....	47
Şekil 3.10. G grubu kimyasalların sinerez-zaman grafiği.....	47
Şekil 3.11. 2,8 gr./100 ml. borik asit içeriğine sahip değişen oranda sodyum silikat içeren çözeltilerin zamana bağlı sinerez yüzdeleri.....	48
Şekil 3.12. 2,6 gr./100 ml. borik asit içeriğine sahip değişen oranda sodyum silikat içeren çözeltilerin zamana bağlı sinerez yüzdeleri.....	48
Şekil 3.13. 2,4 gr./100 ml. borik asit içeriğine sahip değişen oranda sodyum silikat içeren çözeltilerin zamana bağlı sinerez yüzdeleri.....	49
Şekil 3.14. Moldun içindeki enjeksiyona hazır zemin numunesi.....	53
Şekil 3.15. 150. gün basınç testlerine ait basınç-birim deformasyon eğrileri.....	65
Şekil 3.16. Kür tankı ve açık ortamda bekleyen numunelerin gradasyonuna bağlı 150. gündeki ortalama basınç mukavemetleri.....	66

Şekil	Sayfa
Şekil 3.17. Kür tankı ve açık ortamda bekleyen numunelerin rölatif sıklığa bağlı 150. gündeki ortalama basınç mukavemetleri.....	67
Şekil 3.18. Kür tankında bekleyen numunelerin değişen sodyum silikat ve borik asit içeriğine bağlı olarak 150. gündeki ortalama basınç mukavemetleri.....	68
Şekil 3.19. Açık ortamda bekleyen numunelerin değişen sodyum silikat ve borik asit içeriğine bağlı olarak 150. gündeki ortalama basınç mukavemetleri.....	68
Şekil 3.20. Kür tankı ve açık ortamda bekleyen numunelerin değişen sodyum silikat ve borik asit içeriğine bağlı olarak 150. gündeki ortalama basınç mukavemetleri.....	69
Şekil 3.21 Kür tankında bekletilen numunelerin zamana bağlı ortalama basınç dayanımları.....	70
Şekil 3.22. Açık ortamda bekletilen numunelerin zamana bağlı ortalama basınç dayanımları.....	70
Şekil 3.23. G1 Kimyasalı enjeksiyonlu, %30 rölatif sıklıktaki zemin numunesi için mukavemet zaman ilişkisi.....	71
Şekil 3.24. G1 Kimyasalı enjeksiyonlu, %50 rölatif sıklıktaki zemin numunesi için mukavemet zaman ilişkisi.....	71
Şekil 3.25. G1 Kimyasalı enjeksiyonlu, %70 rölatif sıklıktaki zemin numunesi için mukavemet zaman ilişkisi.....	72
Şekil 3.26. G2 Kimyasalı enjeksiyonlu, %30 rölatif sıklıktaki zemin numunesi için mukavemet zaman ilişkisi.....	72
Şekil 3.27. G2 Kimyasalı enjeksiyonlu, %50 rölatif sıklıktaki zemin numunesi için mukavemet zaman ilişkisi.....	73
Şekil 3.28. G2 Kimyasalı, %70 rölatif sıklıktaki zemin numunesi için mukavemet zaman ilişkisi.....	73
Şekil 3.29. F1 Kimyasalı enjeksiyonlu, %30 rölatif sıklıktaki zemin numunesi için mukavemet zaman ilişkisi.....	74
Şekil 3.30. F1 Kimyasalı enjeksiyonlu, %50 rölatif sıklıktaki zemin numunesi için mukavemet zaman ilişkisi.....	74
Şekil 3.31. F1 Kimyasalı enjeksiyonlu, %70 rölatif sıklıktaki zemin numunesi için mukavemet zaman ilişkisi.....	75

Şekil	Sayfa
Şekil 3.32. F2 Kimyasalı enjeksiyonlu, %30 rölatif sıklıktaki zemin numunesi için mukavemet zaman ilişkisi.....	75
Şekil 3.33. F2 Kimyasalı enjeksiyonlu, %50 rölatif sıklıktaki zemin numunesi için mukavemet zaman ilişkisi.....	76
Şekil 3.34. F2 Kimyasalı enjeksiyonlu, %70 rölatif sıklıktaki zemin numunesi için mukavemet zaman ilişkisi.....	76
Şekil 3.35. E2 Kimyasalı enjeksiyonlu, %30 rölatif sıklıktaki zemin numunesi için mukavemet zaman ilişkisi.....	77
Şekil 3.36. E2 Kimyasalı enjeksiyonlu, %50 rölatif sıklıktaki zemin numunesi için mukavemet zaman ilişkisi.....	77
Şekil 3.37. E2 Kimyasalı enjeksiyonlu, %70 rölatif sıklıktaki zemin numunesi için mukavemet zaman ilişkisi.....	78
Şekil 3.38. E3 Kimyasalı enjeksiyonlu, %30 rölatif sıklıktaki zemin numunesi için mukavemet zaman ilişkisi.....	78
Şekil 3.39. E3 Kimyasalı enjeksiyonlu, %50 rölatif sıklıktaki zemin numunesi için mukavemet zaman ilişkisi.....	79
Şekil 3.40. E3 Kimyasalı enjeksiyonlu, %70 rölatif sıklıktaki zemin numunesi için mukavemet zaman ilişkisi.....	79
Şekil 3.41. Kimyasal enjeksiyonlu numunelerin zamana bağlı ortalama permeabilite değerleri.....	81
Şekil 3.42. E2 Kimyasal enjeksiyonlu numunelerin 56. gün permeabilite değerleri.....	83
Şekil 3.43. E3 Kimyasalı enjeksiyonları 56. gün permeabilite değerleri.....	84
Şekil 3.44. F1 Kimyasal enjeksiyonlu numunelerin 56. gün permeabilite değerleri.....	84
Şekil 3.45. F2 Kimyasal enjeksiyonlu numunelerin 56. gün permeabilite değerleri.....	85
Şekil 3.46. G1 Kimyasal enjeksiyonlu numunelerin 56. gün permeabilite değerleri.....	85
Şekil 3.47. G2 Kimyasal enjeksiyonlu numunelerin 56. gün permeabilite değerleri.....	86

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. İmalat sonrası çap kontrolü amacıyla zeminden çıkartılan jet enjeksiyon kolonu.....	9
Resim 3.1. Enjeksiyon deney düzeneği.....	29
Resim 3.2. Enjeksiyon moldu gövde ve başlıkları.....	30
Resim 3.3. Yıkanmış, elenmiş olan ince ve orta kum numuneler.....	31
Resim 3.4. İnce ve orta kuma ait elektron mikroskopu görüntüleri (SEM)	31
Resim 3.5. Borik asit.....	38
Resim 3.6. Kimyasal solüsyonların jelleşme süresi ölçümleri.....	41
Resim 3.7. Sodyum silikat-borik asit karışımları.....	43
Resim 3.8. Enjeksiyonda kullanılmasına karar verilen kimyasal karışımların jelleşme sonrası 150. gündeki durumu.....	49
Resim 3.9. Moldun titreşimli tokmağa yerleştirilmesi.....	53
Resim 3.10. Enjeksiyon işlemi için hazır hale getirilmiş zemin numuneleri.....	54
Resim 3.11. Enjeksiyonu tamamlanan ve başlıkları açılan kum numuneler.....	56
Resim 3.12. Enjeksiyon sonrası molddan çıkarılan ve 28. günde basınç testine tabi tutulan numune.....	60
Resim 3.13. İnce ve orta kuma ait enjeksiyon öncesi optik mikroskop görüntüsü.....	61
Resim 3.14. İnce ve orta kuma ait enjeksiyon sonrası 28. gün optik mikroskop görüntüsü.....	61
Resim 3.15. Enjeksiyon sonrası başlıkları çıkartılan numuneler.....	62
Resim 3.16. Laboratuvar ortamında ve kür tankında bekletilen enjeksiyonlu numuneler.....	62
Resim 3.17. Başlıkları yerleştirilen enjeksiyon numuneleri.....	64
Resim 3.18. Enjeksiyon numunelerinin serbest basınç testine ait deney fotoğrafı.....	65

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
μm	Mikrometre
D_{100}	En büyük tane çapı
G_s	Spesifik gravite
M_s	Kuru zemin kütlesi
$M_{\rho_{ws,t}}$	Piknometre, su ve zemin toplam kütlesi
$M_{\rho_w,t}$	Piknometre ve su kütlesi
K	Sıcaklık düzeltme katsayısı
ρ_s	Zemin yoğunluğu
$\rho_{w,t}$	Su yoğunluğu
M_{s1}	Deneye tabi tutulan zemin kütlesi
M_1	Mold ve zemin kütlesi
M	Mold kütlesi
ρ_{\min}	Minimum yoğunluk
ρ_{\max}	Maksimum yoğunluk
V_m	Deneye tabi tutulan zeminin hacmi = Mold hacmi
Q	Su hacmi
A	Zemin numunesine ait kesit alan
t	Su toplama süresi
i	Hidrolik eğim
h	Su yüksekliği
L	Akış doğrultusuna paralel numune uzunluğu
D_r	Rölatif sıklık
e	Boşluk oranı
e_{\max}	Maksimum boşluk oranı
e_{\min}	Minimum boşluk oranı

Simgeler**Açıklamalar** **M_k**

Mold içerisine yerleştirilecek kum kütlesi

 γ

Birim hacim ağırlık

Kısaltmalar**Açıklamalar****ARGE**

Araştırma Geliştirme

ASCE

American Society of Civil Engineers

ASTM

American Society for Testing Materials

BAP

Bilimsel Araştırmalar Projeleri

SAN-TEZ

Sanayi Tezleri

1. GİRİŞ

Günümüzde arazi maliyetlerinin yükselmesi, yapılaşmanın çok katlı yüksek bloklar şeklinde gelişmesi, zemin davranışının ve potansiyel tehlikelere olan farkındalığın artması geoteknik mühendisliğine ve çözümlerine olan önemi artırmıştır.

Geoteknik mühendisliğinde, yapı zemin etkileşimi dikkate alındığında, zeminin yetersiz mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla birçok yöntem kullanılmakta ve enjeksiyon yöntemleride sıkça kullanılan iyileştirme tekniklerinden biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Enjeksiyon, zemin veya kaya formasyonundaki boşluklara basınç altında süspansiyon veya solüsyon türü malzemelerin enjekte edilmesi işlemidir [1]. Enjeksiyon metodunun ana işlevi, enjekte edilen karışımın zemin veya kaya içerisindeki boşlukları doldurarak, dayanım ve geçirgenlik gibi mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesidir.

Günümüzde enjeksiyonlar genellikle baraj temellerinin yer aldığı zeminlerin geçirimsizliklerinin sağlanmasında, yeraltında geçirimsiz yüzeylerin, perde duvarların oluşturulmasında, şev stabilitelerinin uzun ve kısa dönemde sağlanmasında, zeminin taşıma kapasitesinin artırılmasında, sıvılaşma potansiyeli içeren granüle zemin birimlerinin rehabilitasyonunda ve sıkça tünel gibi yapılarda yeraltısuyu akışının kontrol altına alınmasında kullanılmaktadır [2]. Bu kapsamda enjeksiyon metotları günümüzde sıkça kullanılan, efektif sonuçları olan ve uygulama alanları ile öne çıkan önemli bir iyileştirme tekniğidir.

Geoteknik mühendisliğinde, farklı amaçlara yönelik birçok enjeksiyon metodu bulunmakta ve fakat permeasyon (emdirme) enjeksiyonları yaygın olarak kullanılan metotlardan biri olarak yer almaktadır. Permeasyon enjeksiyonu, süspansiyon yada solüsyon tipi karışımların düşük basınçlar altında, zemin tanelerinin yerini değiştirmeden uygulanan zemine zerk edilmesi işlemidir. Permeasyon enjeksiyonunda kullanılan karışımın özelliklerine bağlı olarak dayanımı yüksek ve geçirimsiz zeminler elde edilmektedir [3].

Permeasyon enjeksiyonlarında kullanılan karışımın partikül boyutları veya viskozitesi enjeksiyon malzemesinin düşük basınç altında zemine zerk edilmesinde önemli bir faktördür. Ekonomik faktörler nedeniyle günümüzde sıkça çimento içerikli süspansiyon enjeksiyonları kullanılmakta olup, Portland çimentosu gibi partikül boyutları ($D_{100} = 100\mu\text{m}$) yüksek

karışımların, permeasyon yoluyla orta ve ince kum gibi zeminlere enjeksiyonu imkansızdır. Bu doğrultuda çimento esaslı süspansiyon türü karışımların, geçirimsizliği düşük olan zeminlere permeasyonunun sağlanamaması, kimyasal enjeksiyonların geliştirilmesine yol açmıştır.

Tezin amacı

Günümüzde kimyasal enjeksiyonlar kapsamında sodyum silikat esaslı malzemeler sıkça kullanılmaktadır. Sodyum silikat bazlı kimyasal enjeksiyonlarda jelleşmenin gerçekleşmesi amacıyla farklı reaktant malzemeler kullanılmaktadır. Dünya çapındaki üreticiler ülke pazarında bu doğrultuda önemli bir paya sahiptir.

Bu tez kapsamında ülke kaynakları referans alınarak sodyum silikat enjeksiyonlarında reaktant olarak borik asit kullanımı araştırılmış, uygun karışım oranları geliştirilmiştir. Böylece, ülkemizde ilk kez sodyum silikat kökenli bir kimyasal enjeksiyon türü geliştirilmiştir. Ayrıca, geliştirilen bu kimyasal enjeksiyonun ince ile orta kum arasında değişen boyutlardaki granüler birimlere olan penetrasyon yetisi irdelenmiş, enjeksiyon sonrası zemin numunelerinin mukavemet ve permeabilite özelliklerine olan etkileri çalışılmıştır.

Tez kapsamında yürütülen çalışmalar Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'nca oluşturulan Sanayi Tezleri (SAN-TEZ) projesi kapsamında, 0554.STZ.2013-2 proje kodu ile yürütülmüş, Yapı Merkezi LTD. ŞTİ. ve Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'nca finansal olarak desteklenmiştir.

Bu tez kapsamında kullanılan verilerin bir bölümü, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Eyüphan AVCI tarafından yürütülen "Spinor A6 Süspansiyon Enjeksiyonunun, Solüsyon Türü Kimyasal Enjeksiyonlara Alternatifliğinin Araştırılması" başlıklı Doktora Tezi çalışmasından elde edilmiştir.

Tez kapsamında planlanan ve gerçekleştirilen çalışmalar aşağıda sıralanmıştır.

- 1- Enjeksiyon işlemlerinde kullanılan borik asit ve sodyum silikat temin edilmiştir.
- 2- Borik asitin suda çözünübilirlik limitleri belirlenmiştir.

- 3- Sodyum silikat ve borik asitin farklı oranlarındaki 49 adet karışımı uzun süreli olarak incelenmiş ve solüsyonların zamana bağlı sinerez oranları ve jelleşme süreleri belirlenmiştir.
- 4- Enjeksiyonlarda kullanılacak kum numuneleri temin edilmiş ve ASTM standartlarına göre ince ve orta boyut kum olmak üzere kategorize edilmiş ve yıkanmıştır.
- 5- Kum numunelerin özgül ağırlık, permeabilite, maksimum ve minimum yoğunluk testleri Eyüphan AVCI tarafından yürütülen “Spinor A6 Süspansiyon Enjeksiyonunun, Solüsyon Türü Kimyasal Enjeksiyonlara Alternatifliğinin Araştırılması” başlıklı Doktora Tezi verilerinden alınmıştır.
- 6- Enjeksiyon işlemleri aşamasında kum numunelerin yerleştirileceği moldlar, SAN-TEZ projesi kapsamında tedarik edilmiştir.
- 7- Sinerez ölçümleri alınan 49 farklı solüsyonun bir bölümü, pilot çalışma kapsamında kum numunelere enjekte edilmiş ve enjeksiyon sonrası numunelerin kondisyonları incelenmiştir.
- 8- Borik asit ve Sodyum silikat kullanılarak üretilen toplamda altı farklı solüsyonun, uzun dönemde kum numunelerin mukavemet ve permeabilite özelliklerine olan etkisinin incelenmesine karar verilmiştir.
- 9- Enjeksiyonda kullanılacak olan kimyasal karışımların viskozite değerlerinin belirlenmesine yönelik testler, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Reolojik Karakterizasyon Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.
- 10- Enjeksiyon sonrası numunelerin serbest basınçlarının ölçülebilmesi amacıyla, SAN-TEZ projesi kapsamında modifiye edilmiş serbest basınç deney düzeneği tedarik edilmiştir.
- 11- Enjeksiyon öncesi kum numuneler farklı rölatif sıklıklarda ve farklı gradasyonlarda hazırlanmış ve enjeksiyonları farklı kimyasal karışımlar ile gerçekleştirilmiştir.
- 12- Enjeksiyonu yapılan kum numuneler, enjeksiyon sonrası ertesi gün moldlarından çıkartılmış ve eşdeğer özellikteki numunelerin bir bölümü su içinde kür tankında, bir bölümü ise laboratuvarında açık havada bekletilmiştir.
- 13- Enjeksiyon işlemleri tamamlanan numuneler, 7, 14, 28, 56 ve 150. günlerde serbest basınç deneylerine tabi tutulmuştur.
- 14- Enjeksiyon sonrası numunelerin geçirimsizliğinin incelenmesi amacıyla, 7, 28 ve 56. günlerde numunelerin permeabilite testleri gerçekleştirilmiştir.



2. ENJEKSİYON

Enjeksiyon, zeminlerin ve kayaların geçirimsizlik, mukavemet, taşıma gücü ve benzeri mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla, enjeksiyon malzemesinin belli bir basınç altında zemine veya kayalarda bulunan boşluklara ve/veya çatlaklara zerk edilmesi işlemidir [4].

2.1. Enjeksiyon Türleri

Geoteknik mühendisliği kapsamında zeminde gerçekleştirilen enjeksiyonlar kullanılan malzeme açısından iki gruba ayrılmaktadır [5].

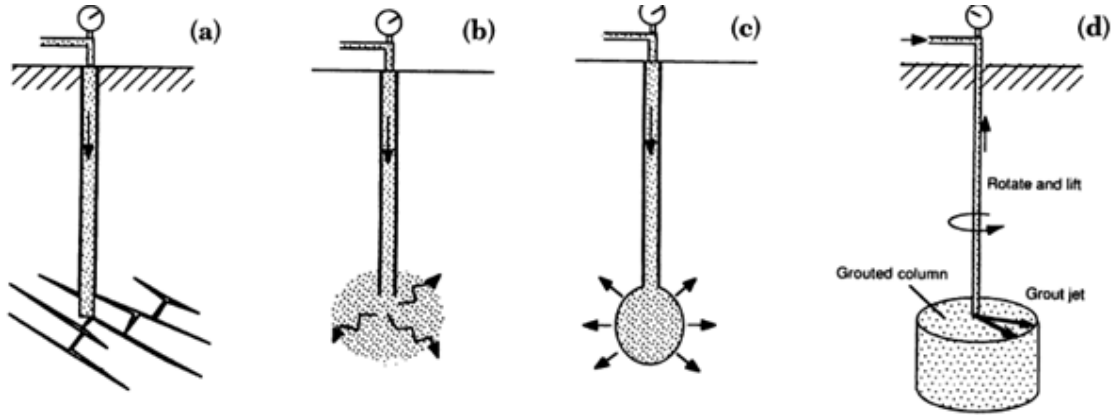
- Süspansiyon enjeksiyonları
- Solüsyon enjeksiyonları

Süspansiyon enjeksiyonlarında katı malzeme partikülleri sıvı ile beraber zemine enjekte edilmekte olup, karışım heterojen görünümündedir. Çimento enjeksiyonları günümüzde kullanılan süspansiyon enjeksiyonlarına bir örnektir. Süspansiyon enjeksiyonlarında katı partiküller su içinde çözünmemekte, enjeksiyon esnasında su vasıtası ile zemin içerisine taşınmaktadır [3].

Solüsyon türü kimyasal enjeksiyonlarında kullanılan karışım tamamen su içerisinde çözünmektedir. Bu kapsamda solüsyon (kimyasal) türü ve süspansiyon türü enjeksiyonlar arasındaki en önemli fark, partikül boyutuna bağlı olarak etkilenen ve viskoziteninde fonksiyonu olan zemine penetrasyon yetisidir.

2.2. Uygulama Metoduna Göre Enjeksiyonlar

Enjeksiyon işlemlerinde uygulanan enjeksiyon basıncı, ekipmanın dönüş hızı, zeminin permeabilitesi ve benzeri değişkenler enjeksiyon metodunu doğrudan etkilemektedir. Şekil 2.1.'de dört ana tip enjeksiyon metoduna yer verilmiştir [4].



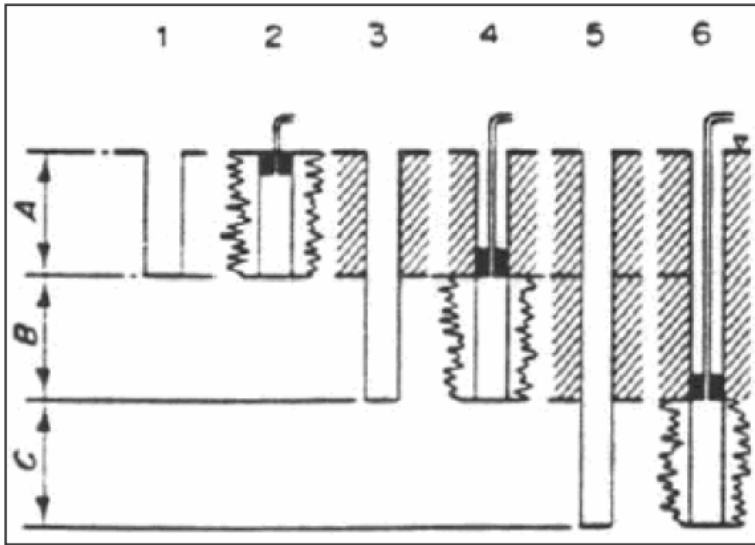
Şekil 2.1. Enjeksiyon tipleri a) Çatlatma b) Permeasyon c) Kompaksiyon d) Jet Enjeksiyon

2.2.1. Permeasyon (emdirme) enjeksiyonu

Permeasyon enjeksiyonu tekniğinde, düşük viskoziteli enjeksiyon malzemesi, zemin içerisindeki boşluklara zerk edilir. Bu işlem esnasında zeminde düşük enjeksiyon basınç değerleri kullanılarak ($<0,5$ MPa) zeminde herhangi bir ötelenme, tahribat veya kırılmaya izin verilmez. Zemin içerisinde yer alan boşluklara yerleşen enjeksiyon malzemesi, zeminin dayanım ve geçirgenlik gibi temel mühendislik özelliklerini iyileştirmektedir. Permeasyon enjeksiyonu sıkça kullanılan enjeksiyon türlerinden biridir [3].

Permeasyon enjeksiyonunda iki ana temel mekanizmadan bahsedilebilmektedir. İlk olarak enjeksiyon şerbeti ile zemin taneleri arasındaki etkileşim artmakta ve zemin daha rijit bir yapı sergilemektedir. Diğerinde ise, zemin taneleri arasında boşlukları doldurulan zemin kütlelerinin, deprem gibi tekrarlı yükler altında sıkışma eğilimi azaltılmaktadır [6].

Permeasyon enjeksiyonları sahada yüzeysel ve kademeli olmak üzere iki türlü yapılabilmektedir. Yüzeysel iyileştirmenin gerektireceği bölgelerde enjeksiyon derinliğine kadar arazide delgi yapılır ve tek sefer enjeksiyonla uygulama tamamlanır. Fakat permeasyon enjeksiyonunun daha derinlerde yapılması gerekmesi durumunda, arazideki mevcut gerilme halihazırda yüksek olacağından enjeksiyon basıncının artırılması gerekir. Bu durumda arazide istenilen derinliğe kadar delgi yapılır ve enjeksiyonlama işlemi kademeler şeklinde gerçekleştirilir. Her bir kademe arasında enjeksiyon şerbetinin prizlenmesi beklenerek sadece hedef alınan bölgenin iyileştirilmesi sağlanır. Bu işlem aşağıdan yukarıya yapılabileceği gibi, Şekil 2.2.' de gösterildiği üzere yukarıdan aşağıya ilave delgiler yoluyla da yapılabilmektedir [7].



Şekil 2.2. Kademeli enjeksiyon işlemi [7]

Günümüzde en yaygın süspansiyon tipi enjeksiyon malzemesi çimentodur. Enjeksiyonda kullanılan çimento, katkılı veya katkısız, daha ince daneli olabilir. Çimentonun dane çapı genel olarak, ince tane içermeyen iri kumların ve çakılların oluşturduğu boşluklara girmeye daha uygundur. Süspansiyon tipi enjeksiyonlar, genellikle iri daneli kum birimlerden daha düşük dane çapı içeren zemin boşluklarına zerk edilemezler. Bu tip zeminlerde kimyasal enjeksiyonlar öne çıkmaktadır.

2.2.2. Kompaksiyon enjeksiyonu

ASCE (American Society of Civil Engineers) Enjeksiyon Komitesi 1850 yılında kompaksiyon enjeksiyonunu, 25 mm'den az çökme değeri olan, bu ölçütü sağlayacak kadar kum içeren katı enjeksiyon malzemesinin zemin boşlukları içerisine penetre olmaksızın, enjeksiyon cidarındaki zemin sıkıştırarak şekilde yüksek basınçlarla enjekte edilmesi olarak tanımlamıştır [8].

Bu yöntem ilk olarak A.B.D.'de, çoğunlukla zayıf veya yumuşak zeminlerin sıkıştırılmasında, temel ve döşemelerin alttan desteklenmesinde, yapı oturmalarının kontrol edilmesinde, farklı oturmalar gösteren yapı temellerinin rehabilitasyonun ve tekrar eski seviyelerine yükseltilmesinde kullanılmıştır [9].

Kompaksiyon enjeksiyonu, inşası tamamlanan fakat farklı oturmalar nedeniyle üst yapıyı tehdit eden zemin problemlerinin yaşandığı alanlarda sıkça uygulanmaktadır. Farklı delgi açılarıyla üst yapı çevresinden delgiler yapılarak enjeksiyon işlemleri gerçekleştirilebilmektedir.

Kompaksiyon enjeksiyonu ile permeasyon enjeksiyonu arasındaki en önemli farklılık, kompaksiyon enjeksiyonunda kullanılan yüksek basınçlar (1-7 MPa) ve yüksek viskoziteli enjeksiyon malzemeleri ile zemin yapısını bozma ve delgi çevresinde radyal bir sıkılaştırma sağlamaktır. Permeasyon enjeksiyonunda basınç 0,5 MPa değerini aşmaz ve düşük viskoziteye sahip enjeksiyon malzemeleri kullanılır.

Kompaksiyon enjeksiyonunda dikkat edilmesi gereken bir diğer husus ise zeminin yumuşak doymuş kil birimlerden oluşması durumunda, enjeksiyon basıncı ile aşırı boşluk suyu basıncı gelişimi ve buna bağlı olarak zeminde zamana yayılan oturmaların gerçekleşmesidir [10].

2.2.3. Çatlatma enjeksiyonu

Çatlatma enjeksiyonunda ağırlıklı olarak çimento esaslı harçlar, zemine 4 MPa mertebesindeki basınçlar ile enjekte edilir ve zemin kütlelerinin çatlatılması sağlanır. Enjeksiyon sonucunda zeminde birbiri ile bağlantısı olmayan çatlaklar doldurulur, zemin bir miktar sıkıştırılır [5,7].

Çatlatma enjeksiyonu, yatay olarak uygulanabilme imkanı ile diğer metotlara göre farklılık gösterir. Çatlak oluşumu ile zemine nüfuz etme çoğunlukla çimento esaslı şerbetler ile gerçekleştirilir. Bununla beraber ince dane oranının fazla olduğu zeminlere kimyasal enjeksiyonların hidrolik çatlatma yolu ile nüfuz edilebildiği de belirlenmiştir [11].

Bu yöntem özellikle geçirimsizliği nedeniyle şerbeti yeterli miktarda alamayan kayaç ve zeminlerde akım yolları açmak amacıyla kullanılmaktadır. Tabakalaşma gösteren bir formasyonda daha efektif bir enjeksiyon işleminin gerçekleştirilmesi, enjeksiyon delgisinin bu düzlemlere dik olarak gerçekleştirilmesine bağlıdır.

Kompaksiyon enjeksiyonu ile çatlatma enjeksiyonu arasında diğer bir fark, çatlatma enjeksiyonunda kompaksiyon enjeksiyonuna göre daha düşük basınçlar kullanılmasıdır [7].

2.2.4. Jet enjeksiyonu

Zemin ıslahında ana hedef, taşıma kapasitesinin artırılması, geçirgenliğin azaltılması, zeminin elastisitesinin artırılması ve genel olarak mukavemet parametrelerinin iyileştirilmesidir. Jet enjeksiyonu uygun zemin koşulları için belirtilen iyileştirmeleri sağlayabilecek en efektif metotlardan biridir.

Jet enjeksiyon yönteminde uygulanan basınçlar diğer metotlara göre çok daha yüksek, minimum 30 MPa değerlerindedir. Püskürtülen harç zeminin örselenmesine ve parçalanmasına yol açarken, ağırlıklı olarak çimento esaslı enjeksiyon şerbetleri zeminle beraber rijit zemin-çimento kolonları oluşturmaktadır. Resim 2.1.'de arazide uygulama sonrası çap kontrolü amacıyla çıkartılan bir jet enjeksiyonu kolonu yer almaktadır.



Resim 2.1. İmalat sonrası çap kontrolü amacıyla zeminden çıkartılan jet enjeksiyon kolonu

Jet enjeksiyon yöntemi istenilen iyileştirme mertebesine bağlı olmakla beraber, günümüzde kum, çakıl ve farklı kil birimlerinin oluşturduğu tüm kombinasyonlarda uygulanabilmektedir.

Jet enjeksiyonları tamamlanan delgi içerisinde enjeksiyon malzemesinin yüksek basınç altında tijlerin aksel dönmesi yoluyla zeminin içine nüfuz ettirilmesi ve kolon görünümündeki çimento-zemin karışımlarının oluşturulmasıdır. Geleneksel fore kazık gibi iyileştirme metotlarına göre çok daha ekonomik bir alternatif sunmakla beraber, uygulama derinlikleri ve çapları büyük oranda zemin tipine bağlı olarak değişir.

Zemin yüzeyinden derinliğe bağlı artan yanal gerilmeler, zeminin permeabilitesi, enjeksiyon basıncını belirleyen önemli faktörlerdendir. Günümüzde kullanılan jet enjeksiyon ekipmanları, enjeksiyon şerbetinin basıncının yanı sıra su ve hava basıncı yolu ile de zeminde sıkışmaya yol açmakta ve 80 MPa mertebesine varan basınçlar uygulamaktadır. Bu tip yöntemlerle granüle zemin birimlerinde 2 m. çapa varan kolonlar oluşturulabilmektedir.

2.3. Kimyasal Enjeksiyonun Tarihi Gelişimi

Kimyasal enjeksiyonların kullanımı günümüzde nispeten yeni bir teknoloji olarak kabul edilmekle beraber 1950'li yıllarda geliştirilmiş ve 1990'lı yıllardan itibaren dünyaca kabul görmeye başlamıştır [3].

Kimyasal enjeksiyonların temeli 1886 yılında Jeziorski'nin sodyum silikatı ve kalsiyum klorid çözeltisini zemine açılan iki bitişik delgiden enjekte edilmesiyle atılmıştır. 1909 yılında Lemarie ve Dumont seyreltik silikat ve asit solüsyonlarını tek bir delgiden enjekte ederek "single shot" yöntemi patentini almıştır. Devam eden yıllarda ise Francois sodyum silikat ile alüminyum-sülfat karışımını tek bir delgiden zemine zerk etmiştir [3].

Hollandalı mühendis H. J. Joosten 1925'li yıllarda kimyasal enjeksiyon denemeleri kapsamında yoğunlaştırılmış sodyum silikatı zemine bir delgiden enjekte etmiş ve bitişikteki ayrı bir delgiden yüksek basınçla kalsiyum klorit enjeksiyonu uygulamıştır. Günümüzde bu metot güncelliğini korumakla beraber birtakım modifikasyonlarla halen uygulanmakta ve "Joosten Metodu" olarak anılmaktadır. Joosten devam eden yıllarda reaktant olarak, sodyum bikarbonat, sodyum alüminat, hidroklorik asit ve bakır sülfat kullanarak arazide birçok başarılı uygulama gerçekleştirmiştir [3].

Kimyasal enjeksiyonların ilk gelişiminde sodyum silikat baz alınmış ve değişen reaktantlar ile arazide sıkça uygulanmıştır. Günümüzde uygulanan kimyasal enjeksiyonların halen büyük bir bölümünün sodyum silikat esaslı kimyasallar oluşturmaktadır.

2.4. Kimyasal Enjeksiyon Çeşitleri

Kimyasal enjeksiyonların arazide başarılı bir şekilde uygulanmaya başlaması ile beraber, birçok yeni kimyasal ürün geliştirilmiş ve zemin güçlendirmede yeni bir alternatif ortaya

çıkmiştir. Günümüzde kimyasal enjeksiyonların kullanımına yönelik en önemli faktör toksisite olarak ortaya çıkmaktadır. Bu kapsamda halen en yaygın olarak sodyum silikat kullanılmaktadır. Amerika'da uygulanan kimyasal enjeksiyonların %85-90'luk bölümünü sodyum silikat esaslı enjeksiyonlar oluşturmaktadır [3].

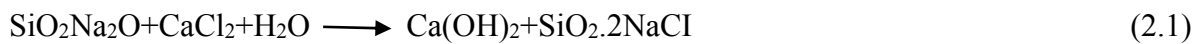
Kullanılan kimyasal esasına göre, enjeksiyon malzemeleri aşağıda yer aldığı şekilde gruplandırılabilir.

- Sodyum Silikatlar
- Akrlamitler
- Lignosulfanotlar
- Fenoplastlar
- Aminoplastlar
- Diğer malzemeler

2.4.1. Sodyum silikatlar

Günümüzde kimyasal enjeksiyonların büyük bir bölümünü sodyum silikat oluşturmaktadır. Su camı olarak bilinen bu kimyasal, zayıf asit olarak silika içermekle beraber sodyum silikat bazik karakterdedir. Sodyum silikatlar, silika kumu ya da herhangi formdaki silikanın Na_2CO_3 ile $900\text{ }^\circ\text{C}$ civarında ısıtılmasına tabi tutulması ile elde edilir. Rafine işleminden sonra akışkan bir kıvamda elde edilen sodyum silikat belli oranlarda su ile karıştırılarak istenilen konsantrasyonda elde edilmektedir.

Sodyum silikatlar bazik karakter sergilemekte olup, enjeksiyon işlemlerinde zayıf bir asit ya da tuz asidi ile beraber kullanımında jel formu sağlanır. Örnek olarak Joosten metodu olarak bilinen kalsiyum klorit reaktant olarak kullanılmasında Eşitlik 2.1'de yer alan reaksiyon gerçekleşir.



Enjeksiyonda kullanılacak olan çözeltinin seyreltilmesi reaksiyon sürecini yavaşlatmaktadır. Aksi durumda yüksek konsantrasyondaki sodyum silikat ve reaktant anında reaksiyona girmekte ve enjeksiyon işlemi pratikte sağlanamamaktadır [3].

Sodyum silikatlarda reaktant olarak organik ve inorganik malzemeler kullanılabilir. İnorganik ürünler genelde toksik etkisi olmayan maliyeti düşük ürünlerdir. Organik ürünlerin genel olarak maliyeti daha yüksek olup, enjeksiyon sonrası daha düşük basınç dayanımları sağlanmaktadır. Bununla beraber jelleşme süreleri daha kolay ayarlanabilmekte ve uzun bir aralığa sahip olabilmektedir. İnorganik reaktant olarak kalsiyum klorit, kalsiyum hidroksit, kalsiyum oksit, kalsiyum karbonatlar, bikarbonatlar, karbondioksit fosfatlar, mineral asitleri, ince taneli çimentolar, puzolan ve alüminatlar kullanılmaktadır [3]. Organik reaktantlara örnek olarak etil asetat, dibazik ester, monoasetin, triasetin, formamid, propilen karbonat örnek verilebilir [3,12].

Sodyum silikatların enjeksiyon malzemesi olarak kullanılabilmesi için, alkali silika oranının ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) 3 ile 4 arasında olması gerekmektedir. Bu oranın 4 'ün üzerinde yer alması durumunda çözeltiler karasız halde olmakta, yani katı partiküller ile sıvının ayrışması söz konusu olabilmektedir [1].

Sodyum silikat enjeksiyonlarının kalıcılığını yeraltısuyu ve içerisindeki kimyasallar doğrudan etkilemektedir. Yeraltı suyunun sodalı olması durumunda (polisilik asit içermesi) jel formu zamanla çözülmekte kalıcılığı kaybolmaktadır [3].

Sodyum silikat enjeksiyonları arazide kalıcı çözüm olarak kabul edilmekle beraber kalıcılığın ilişkin iki olgu öne çıkmaktadır. Zemine sodyum silikat enjeksiyonunun tamamlanmasının ardından, jel formu zamana bağlı olarak su kismaya ve büzülme eğilimlidir. Bu tanıma sinerez denmekte ve gerçekleşme büyüklüğü kullanılan kimyasalların oranına bağlı olmaktadır.

Sinerez, enjeksiyon sonrası zemindeki boşluklara enjekte edilen jel formu üzerinde meydana gelmekte ve bu boşluklardaki kuma nedeniyle zamana bağlı olarak zeminin permeabilitesini artırmaktadır [3].

Joosten metodu olarak bilinen ve iki ayrı delgiden reaktantın ve sodyum silikatın enjekte edilmesi arazide homojen jelleşmenin önüne geçebilmekte ve kontrol edilememesine yol açabilmektedir [3].

2.4.2. Akrilamitler

Sodyum silikat bazlı enjeksiyon malzemelerinin keşfinden sonra yapılan araştırmalar, 1951 yılında Amerika'da akrilamitlerin keşfine yol açmıştır. Akrilamitler birden çok organik monomerlerden meydana gelmekte olup katalizör yoğunluğu kontrolü ile jelleşme süresi ayarlanabilmektedir. Akrilamitler, enjeksiyon boyunca suya yakın viskozite ve yoğunluğa sahip olmakla beraber jel formunun katılması ani bir süreçte gerçekleşmektedir. 1953 yılında AM-9 adlı ilk ticari ürün satışa sunulmuş ve pilot çalışmalarda oldukça yüksek başarıya ulaşılmıştır. Akrilamit esaslı kimyasal enjeksiyonlar keşfedildiği günlerde ideal bir enjeksiyon malzemesi olarak dikkat çekiyordu. Düşük viskozitesi nedeniyle kolaylıkla enjekte edilebiliyor, enjeksiyon sırasında viskozitesinde değişiklik meydana gelmiyor ve jel kontrolü çok rahat sağlanabiliyordu. Fakat maliyeti sodyum silikatlara oranla daha yüksekti ve nörotoksik olduğu ortaya çıkmıştı [3].

İlerleyen dönemlerde akrilamit esaslı enjeksiyon işlemleri sırasında minimum 56 zehirlenme vakası belirlenmiş ve akrilamitlerin insan sağlığına olan etkisine dikkat çekilmiştir. Daha sonrasında yapılan araştırmalar neticesinde akrilamidin insan sağlığına olan etkisi irdelenmiş ve hayvanlar üzerinde %50 ölüm oranına sebep olan LD₅₀ miktarı 200 mg/kg olarak belirlenmiştir [3].

1978 yıllarında dört farklı akrilamit kökenli kimyasal piyasada iken AM-9 olarak lanse edilen ilk akrilamit kökenli kimyasalın üretimi herhangi bir açıklama olmadan durdurulmuştur. AM-9 adlı ürünün üretiminin durdurulmasıyla beraber Amerikan pazarında Japon Nitto SS ve Fransız ürün Rocagil BT ürünlerinin satışı başlamıştır. Japonya'da 1974 yılında Nitto SS ürünü ile bir kuyu kenarında yapılan dikkatsiz bir kimyasal enjeksiyon çalışmasında birden fazla zehirlenme olayına yol açmış ve kullanımı Japonya'da yasaklanmıştır. AM-9 ürünün üretiminin yüksek toksisitesi nedeniyle durdurulması ile piyasaya büyük oranda zehirsiz ve viskozitesi 2 cP mertebesinde olan, akrilat tabanlı AC-400 olarak adlandırılan yeni bir ürün sunulmuştur [3].

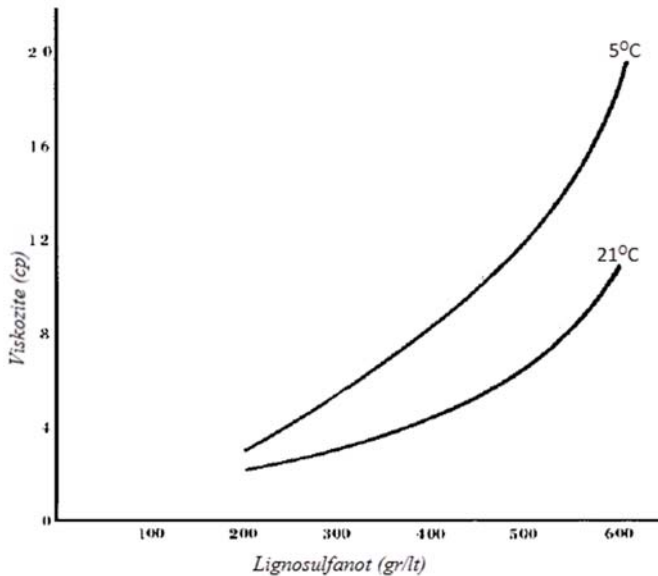
Akrilamit kökenli kimyasal enjeksiyonların kullanımı toksisite nedeniyle son derece sınırlı olmakla beraber birçok ülkede kullanımı yasaklanmıştır. Akrilamidlerin deri ile teması son derece tehlikeli ve kanserojendir [3].

2.4.3. Lignosulfonatlar

Lignosulfanatlar, odun hamurunun bisülfid prosesi ile selüloz üretimi esnasında ortaya çıkan yan ürünlerdir. Bu sebeple maliyetleri diğer kimyasallara göre düşüktür. Oluşan yan ürün konsantre durumdadır ve üretimi şurup kıvamında bir sıvı veya toz şeklindedir [2].

Lignosulfanatlar tek başına toksik değildirler. Fakat karışıma sodyum dikromat eklenmesi durumunda zehirli hale gelmektedir. Mevcut lignosulfanatın asidik ($\text{pH} < 6$) olması durumunda karışımda herhangi bir reaktantın kullanılmasına gerek yoktur. Bununla beraber lignosulfanatlar bazik karakterde ise reaktant kullanılabilir [3].

Lignosulfanatların odun hamurunun işlenmesi sırasında ortaya çıkan yan bir ürün olduğundan kimyasal içeriği üretildiği bölgeden bölgeye ve ağaç türüne göre değişmektedir. Enjeksiyon uygulamalarında litrede 200 ile 600 gram arasında çözülerek konsantrasyon şeklinde zemine enjekte edilir. Kimyasalın viskozitesi ortam sıcaklığına ve lignosulfanatın içeriğine bağlı olarak geniş bir aralıkta, ortalama 2 ile 8 cP arasında değişebilmektedir. Şekil 2.3.'de ortam sıcaklığı ve lignosulfanat içeriğine bağlı olarak, kimyasalın viskozitesi gösterilmiştir. Jelleşme süresi ise kimyasalın pH değerleriyle doğrudan bağlantılı olup, asidik veya alkalin tuzlarla kontrol edilebilmektedir [3].



Şekil 2.3. Lignosulfanat dozajına bağlı viskozite grafiği [3]

2.4.4. Fenoplastlar

Fenoplastlar fenol ve aldehitlerin reaksiyonu sonucu ortaya çıkan kimyasallardır. Yüksek sıcaklıklarda ve geniş bir pH aralığında katılaşırlar. Fenoplast ve türevi kimyasallar petrol kuyusu delgilerinde sıkça kullanılmakta, jelleşmesi için halihazırda yapılan delgideki jeotermal sıcaklıktan yararlanılmaktadır. Ortam sıcaklıklarında ise jelleşme süreci çoğunlukla asit ortamı gerektirir fakat çoğu zemin koşulu nötr ya da bazik bir ortama sahiptir [3].

Ortam sıcaklığında jelleşmenin sağlanması amacıyla zeminde asit ortamı gerekmeksizin rezorsinol gibi kimyasallar kullanılabilir. Rezorsinol günümüzde dezenfektan ve antiseptik olarak kullanılmakla beraber formaldehitlerle reaksiyona girmektedir. Kimyasal karışımda pH değerinin kontrolü için katalizör kullanımı gerekmektedir ve çoğunlukla sodyum hidroksit kullanılır [3].

Fenoplast karışımlarının jelleşme süresine etkileyen birçok parametre olmakla beraber karışım pH'ı ve sıcaklığı önemli rol oynar. pH derecesinin 9'un üzerinde olması durumunda jelleşme süresi kısalmaktadır. pH değerinin kontrolü amacıyla fenoplast karışımlarına dikromat eklenmektedir. pH değerinin yanı sıra karışım sıcaklığının artması jelleşme sürecini kısaltmakta, karışımın konsantrasyonu ise doğrudan etkilemektedir [3].

Fenoplast karışımlarının viskozite değerleri 1.5 ile 3 cP arasında değişmektedir. Akrilamitlere benzer olarak jelleşme süresi boyunca karışımın viskozitesi sabit kalmaktadır [2].

Fenoplastlar her zaman bir fenol, formaldehit ve alkalik taban içerir. Bu üç bileşenin tamamı insan sağlığı açısından zararlı ve çevreye karşı toksik etki yaratmaktadır. Rezorsinol diğer fenoller kadar tehlikeli olmasa da zehirli ve yanıcıdır. Formaldehit insan sağlığı açısından tehlikeli bir malzeme olarak bilinir ve kronik solunum yolu rahatsızlıklarına sebep olabilmektedir [2].

2.4.5. Aminoplastlar

Aminoplastlar ana bileşenleri üre ve formaldehit olan karışımlardır. Aminoplastlarda fenoplastlara benzer şekilde reaksiyonun tamamlanması için sıcak ve asidik bir ortam gerektirir. Ortamın asidik olması reaksiyonun tamamlanması için gerek bir şarttır. Bu

kapsamda enjeksiyonun yapılacağı alanda yeraltısuyu veya zemin kütlesinin pH'ının 7'nin altında olması gerekir. Aminoplastlar kömür madenleri ve buna benzer alanlarda kullanılabilir [3].

Enjeksiyon işlerinde saf sıvı hal yerine sıvı ile katı arasında ortalama bir üre-formaldehit karışımı kullanılır. Ağ elemanları arasında kovalent bağın meydana geldiği geçirimsiz ve güçlü bir jel oluşturabilmek için konsantrasyonun en az %20-30 arasında olması gereklidir [2].

Aminoplastlar, içerisinde formaldehit ve asit katalizörü içerir ve her iki kimyasalda zehirli ve aşındırıcı bir özelliğe sahiptir. Jelleşmiş durumdaki aminoplastlar içerisinde reaksiyona girmemiş formaldehit içerebilir. Maliyetleri düşük olan bu ürünler firmalar tarafından özel enjeksiyon işlemleri için kullanılabilir. Aminoplast kökenli kimyasalların viskozitesi sıcaklığa bağlı olarak 13-45 cP aralığında yer almaktadır [3].

2.4.6. Diğer kimyasallar

Su ve reaktant kullanılarak jelleşen ve polimerleşen kimyasallar dışında, köpük formundaki ürünlerde enjeksiyon malzemesi olarak kullanılabilir. 1960'ların sonuna doğru bu tür malzemelerin kullanımına ilişkin çalışmalara başlanmış ve silikon, fenolik, epoksi ve poliüretan malzemeleri denenmiştir [3].

İçeriğinde poliosianat ile polyolün reaksiyonu sonucu oluşan poliüretanlar en başarılı mekanik özelliklere sahiptir ve geniş bir formasyon aralığına enjekte edilebilir [3].

Epoksi ve reçineler ise genellikle bir katılaştırıcı malzeme ile kullanılır. Piyasada çok farklı fiziksel özelliklere sahip epoksi ve reçine türleri mevcuttur [13].

2.5. Kimyasal Enjeksiyonların Reolojik Özellikleri

Günümüzde piyasada halihazırda bulunabilen, çok sayıda kimyasal enjeksiyon ürünü yer almaktadır. Bu malzemeler çok geniş bir aralık içerisinde değişen viskoziteye ve mukavemet parametrelerine sahiptir. Zemin iyileştirme amacıyla uygulanması planlanan kimyasal enjeksiyonlarda doğru malzeme seçimi oldukça önemlidir. Kimyasalın türüne göre ürünlerin zeminde yarattığı permeabilite, duraylılık ve kalıcılık gibi faktörler değişkenlik

göstermektedir. Bunun belirlenmesinde ise kimyasalların reolojik özelliklerinden yararlanır. Ürünün toksisitesi, jelleşme süresi, arazideki kalıcılığı, zemine sağladığı mukavemet artışı ürün seçiminde en önemli kriterleri oluşturmaktadır [3].

2.5.1. Kalıcılık

Çoğu zaman bir tünel kazısında su akışını kesmek, yeni bir inşaat için temel kazısı sırasında çevre yapıların stabilizasyonunu sağlamak, geçici iyileştirme tekniklerini gerektirir. Bununla beraber üst yapı temel zeminlerinin iyileştirilmesi ise, yapı ömrü referans alındığında kalıcılık ön plana çıkmaktadır. Çoğu zaman yapıların dizayn aşamasında 50 yıl yapı ömrünün dikkate alındığı düşünüldüğünde, kimyasal enjeksiyonların kalıcılığında da 50 yıl referans olarak kabul edilebilmektedir. Geçmiş zamanda yapılan çalışmalar ve günümüzde tutulan kayıtlar kimyasal enjeksiyonlarda bu kriterin sağlandığını göstermektedir [3].

Günümüzde radyoaktif atıkların depolanması gittikçe artan bir problem olarak ortaya çıkmaktadır. Daha büyük bir sorun ise, bu atıkların güvenli bir şekilde imha edilememesi ve yeraltına gömülmesidir. Radyoaktif atıkların yeraltısuyuna karışmaması amacıyla kimyasal enjeksiyon bariyerleri kullanılabilir. Bu doğrultuda kimyasalların radyoaktif ışınma nedeniyle bozulmaması önemli bir faktör olarak ortaya çıkmaktadır. Radyoaktif atıkların yarılanma ömrünün yüzyılları bulabilmesi göz önüne alındığında kimyasal enjeksiyonların bozunmadan bu partiküllerle beraber kalıcılığını sağlaması önem arz etmektedir. Fakat silikat bazlı enjeksiyonlar hariç, hiçbir enjeksiyon materyali yüzyılı aşan bir süreçte gözlemlenememiştir. Sadece hızlandırılmış laboratuvar testleri, ekstrapolasyonla malzemelerin uzun dönem davranışına sadece bir önbilgi sağlayabilmektedir [3].

Tüm kimyasal enjeksiyon karışımlarının içeriğinde kimyasal olarak solüsyona bağlı bulunmayan su vardır. Bu tip enjeksiyonda donma çözülme etkisi kimyasalların bozunmasına yol açabilecektir. Enjeksiyonu yapılan kum numunelerde donma çözülme testi yapıldığında 4 ile 6. döngüde numunelerin bozunduğu gözlenmiştir. Arazi şartları ile laboratuvar deneyleri kıyaslandığında arazide bu etkinin görülmesi daha az olasıdır. Don derinliğinin çoğunlukla 1,5 ile 3,0 m. aralığında değiştiği göz önüne alınırsa bu etki son derece sınırlı olabilecektir [3].

Kimyasal enjeksiyonlarda kalıcılığı tehdit eden en önemli faktörlerden biride, kimyasal yapının yeraltısuyu içerisinde ya da zeminde çözünmesidir. Çoğunlukla bu duruma karşı hassas olan kimyasallar zaten kimyasal enjeksiyon malzemesi olarak kullanılmamaktadır. Fakat beklenmeyen güçlü reaktantların olabileceği yeraltı suları enjeksiyon malzemesini çözebilmektedir [3].

Sodyum silikat-bikarbonat birleşimi ile yapılan enjeksiyonlar hariç tüm kimyasalların kalıcı olduğu kabul edilebilmektedir [3].

2.5.2. Penetrebilite

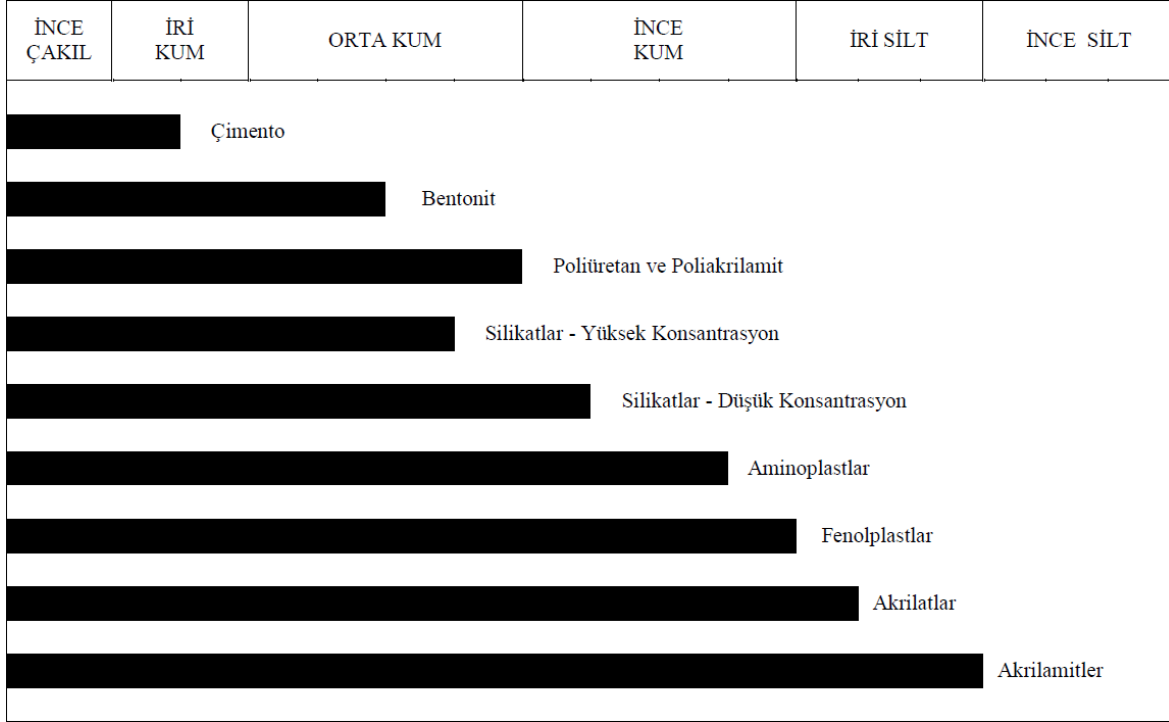
Kimyasalların zemine olan penetrasyonu, karışımların viskozitesi ile ilgilidir. Malzemenin akmaya karşı gösterdiği direnç (viskozite) ne kadar düşükse zemine olan penetrebilitesi o kadar kolaydır. Penetrebilite kimyasalın viskozitesinin yanı sıra ayrıca zeminin permeabilitesine bağlıdır. Şekil 2.4.'de çeşitli kimyasalların zemin türüne bağlı olarak penetrebilitesi gösterilmiştir [3].

Viskozitesi 2 cP gibi düşük olan akrilamid tabanlı kimyasalların herhangi bir sorunla karşılaşmaksızın permeabilitesi 10^{-4} cm/sn ve daha yüksek olan zeminlere penetre edilebilmektedir. 5 cP mertebesindeki fenoplastlar, permeabilitesi 10^{-3} cm/sn ve daha yüksek zeminlere, 10 cP mertebesinde viskoziteye sahip olan sodyum silikat enjeksiyonlarının ise permeabilitesi 10^{-2} cm/sn ve daha düşük olan zeminlere penetre edilebilmektedir [3].

Hazırlanmış olan bu tez kapsamında, sodyum silikat karışımlarının viskozitesinin 4 cP mertebesinde yer aldığı ve başarı ile permeabilitesi 10^{-3} cm/sn mertebesinde olan ince kumlara penetre edilebildiği Bölüm 3.'de yer alan deneysel çalışmalarda görülmüştür.

Bütün kimyasal enjeksiyon çalışmalarında zeminde yer alan silt içeriğinin %20'nin üzerinde bir oranda yer alması durumunda penetre edilebilirlik oldukça zor veya imkansız hale gelmektedir [3].

Vipulanandan ve Özgürel tarafından, akrilamidlerin silt içerikli zeminlere olan enjekte edilebilirliğine yönelik yürüttüğü çalışmalarda da %3, %6, %12 ve %27 oranlarında silt içeren kum numuneler üzerinde enjeksiyon çalışmaları gerçekleştirilmiş, %27 mertebesinde silt içeren kum karışımında enjeksiyonun başarısız olduğu belirtilmiştir [14].



Şekil 2.4. Kimyasalların farklı zemin koşullarında penetre edilebilirliği

2.5.3. Dayanım

Epoksi ve polyester türevli malzemeler hariç tüm kimyasal enjeksiyonlar çimentoya kıyasla daha düşük basınç dayanımına sahiptirler. Fakat genel olarak enjeksiyon sonrası zeminin bütünsel olarak dayanımı daha çok öneme sahiptir. Permeasyon enjeksiyonlarının öncelikli amaçlarından birisi, zemin boşluklarını tamamen doldurarak ve zemin tanelerini birbirine bağlayarak sürekli ve üniform olmayan bir yapı meydana getirmek ve zemin danelerinin göreceli olarak hareketini kısıtlayarak mukavemetini artırmaktır [3]. Bu sebeple enjeksiyonu yapılan numunelerin mukavemetinin ölçülmesi son derece önemlidir.

Kimyasal enjeksiyon uygulamaları yaygın olarak yeraltısuyu seviyesinin altında gerçekleştirilmektedir. Bu kapsamda laboratuvar testlerinde ıslak halde bekletilen numunelerin mukavemeti çok daha fazla önem arz etmektedir [6].

Yapılan deneysel çalışmalara göre enjeksiyon sonrası ıslak halde bekletilen numunelerin mukavemetleri, kuru ortamda bekletilen numunelere göre daha düşüktür ve bu farkın 10 kat mertebesine kadar çıktığı belirtilmektedir. Bunun sebebi ise kuru halde bekletilen numunelerde zamanla büzülme meydana gelmekte ve kapilariteye benzer şekilde güçlü bir etki ortaya çıkmasıdır [3].

Enjeksiyon sonrası numunelerin mukavemeti, numunenin sıklığına ve gradasyonuna doğrudan bağlıdır. Kötü derecelenmiş bir kum numunesi, iyi derecelenmiş numunelere göre daha düşük basınç dayanımı vermekte, aynı şekilde rölatif sıklığın artması basınç dayanımlarını doğrudan artırmaktadır. Bu doğrultuda enjeksiyon sonrası basınç mukavemetlerinin geniş bir aralıkta verilmesi daha uygundur [3].

Çizelge 2.1.'de silikat enjeksiyonlarının farklı reaktantlarla olan bileşimlerinin kum numunelere enjeksiyonu sonucu elde edilen mukavemet parametreleri görülmektedir. En yüksek basınç dayanımını sodyum silikat-formamid bileşenlerinin oluşturduğu ve 5171 kPa'lık bir serbest basınç dayanımı elde edildiği görülmektedir. En düşük basınç dayanımına ise Klorit ve Bikarbonatın reaktant olarak kullanıldığı karışımların neden olduğu belirtilmektedir.

Formamid ve sodyum silikat ile yapılan çalışmalarda, enjeksiyon sonrası 150. günde gerçekleştirilen serbest basınç testlerinde, kür tankı içerisinde bekletilen numunelerde 120 ile 780 kPa arasında değişen mukavemet değerleri elde edilmiştir [15].

Çizelge 2.2.'de farklı kimyasalların zemine enjeksiyonu sonucu elde edilen mukavemet parametreleri görülmektedir. Epoksi bazlı kimyasalların kum numunelerde 70 MPa'a varan serbest basınç mukavemetini sağladığı, akrilamit tabanlı düşük viskoziteye sahip malzemelerin ise 365 kPa mertebesinde serbest basınç mukavemeti sağladığı görülmektedir [3].

Kimyasal enjeksiyonların kullanıldığı numunelerin mukavemeti çoğunlukla serbest basınç testi ile belirlenmiştir. Yanal basıncın sağlanmadığı bu testler, aslında saha koşullarını net olarak yansıtmamakta, sadece yüzeye yakın olan derinliklerde geçerli olabilmektedir. Fakat çoğu zaman yüzeysel temellerin yer aldığı zemin birimlerinde dahi ciddi yanıl gerilmeler oluşmaktadır. Bu doğrultuda serbest basınç testinin yanı sıra üç eksenli testlerin yapılması zemin mukavemet parametrelerinin daha doğru bir şekilde belirlenmesine olanak sağlayacaktır. Bununla beraber çoğu zaman serbest basınç testleri, kimyasal enjeksiyon kullanılan numunelerin kıyaslanması açısından son derece önemlidir.

Kimyasal enjeksiyonlar üzerinde yapılan gerilme kontrollü serbest basınç testlerinde maksimum dayanım belirlenmekte ve referans olmaktadır. Fakat sürekli sabit yükler altında

numunelerin sünme eğiliminde olması, enjeksiyonu yapılan birimlerin saatler, günler ve hatta aylar içerisinde yıkılabileceğini göstermektedir [3].

Mollamahmutoglu (1999), %40 ve %50 oranlarında sodyum silikat içeren karışımlar ile kum numuneler üzerinde kimyasal enjeksiyonlar gerçekleştirmiş ve enjeksiyonu yapılan numuneler üzerinde sünme davranışının belirlenmesi amacıyla değişen yükler altında üç eksenli basınç testi ile serbest basınç deneyleri gerçekleştirmiştir. Gerçekleştirilen basınç testleri kapsamında kum numunelerde başlangıç yük, elde edilen maksimum yükün %30'u kadar ele alınmış ve sabit yüke tabi tutulan kum numunelerde çeşitli zaman aralıklarında %30 olan başlangıç yükü %40, %50, %60 ve %70'e çıkarılmıştır. Gerek serbest basınç testlerinde gerekse üç eksenli basınç testlerinde, zamanla farklı yüklere tabi tutulan numunelerde başlangıç birim deformasyon-zaman eğrisinin değişmediği belirtilmiştir [16].

Mollamahmutoglu (1999), tarafından yapılan çalışmalarda sodyum silikat yüzdesinin %40'dan %50 ye artırılması ile maksimum dayanım yükünün %40'ı mertebesindeki yüke tabi tutulan numunelerde, sünmeye bağlı yenilmenin 100 dakikadan 3000 dakikaya uzadığını göstermiştir. Elde edilen diğer bir önemli bulgu ise, yanal gerilmenin sağlandığı testlerde sünmeye bağlı yenilme davranışının değişkenlik gösterdiği olmuştur. Çevre basıncının 0 kPa'dan 100 kPa mertebesine artırılması ile beraber, eşdeğer özellikteki numunelerde, sünmeye bağlı yenilme çevresel gerilmenin sağlanmadığı numunelerde ortalama 5000 dakikada gerçekleşirken, 100 kPa'lık çevresel gerilmenin sağlandığı numunelerde sünme davranışının 10000 dakika sonrasında stabil hale geldiğini ve yenilme gerçekleşmediğini göstermektedir [16]. Bu davranış aslında çoğu arazi koşulu için daha gerçekçi olup, sünme davranışının üç eksenli testler ile kayıt altına alınması uygulanabilirlik açısından daha elverişli sonuçlar doğurmaktadır.

Gonzalez ve Vipulanandan (2007) tarafından sodyum silikat - dimetil ester kullanılarak yapılan kimyasal enjeksiyonlarda ise maksimum basınç dayanımının %36'sına karşılık gelen sabit yük altında numunelerin 30 dakika sonrasında kırıldığı, bu oranın %25 olması durumunda ise numunelerde bir hafta boyunca gerçekleştirilen gözlemler sonucunda yenilme olmadığı belirtilmiştir [17].

Çizelge 2.1. Silikat enjeksiyonlarının mukavemet değerleri [2, 16, 18, 19]

Reaktant	Enjekte edilen kum	Mukavemet Bilgisi	Araştırmacı
Klorit	İri kum Dr = % 58-97	c = 103 –310 kPa Ø = 35°-51°	Skipp (1963)
	Orta kum Dr = % 63,2	c= 620 kPa Ø = 32° q _u = 896-2000 kPa	Cooling (1968)
Bikarbonat	Orta-sıkı kum	q _u = 206 kPa	Neeland ve James (1963)
Formamid veya Formik asit + etil asetat	Sıkı Kum	q _u = 5171 kPa	Graf (1982)
	Orta-sıkı kum	q _u = 2068 kPa	Neeland ve James (1963)
	Orta kum	c = 1078 kPa q _u = 3334 kPa	Alam Singh (1983)
	Kuru Kum	q _u = 1961 kPa	Verfel (1979)
Alüminat+ Amide	Orta sıkı kum	q _u = 1930 kPa	Karol (1958)
	İnce-Orta Sıkı kum	c= 3692 kPa Ø = 35° q _u = 3375 kPa	Davidson (1982)
	Kuru Kum	q _u = 1647 kPa	Graf (1982)
Silicate-Hardener 600B	Leighton Buzzard Sand (Orta sıkı-Orta Kum)	q _u = 184-343 kPa	Mollamahmutoglu (1999)
Glioksal	İnce-Orta Kum Karışımları	q _u = 120-520 kPa	Mollamahmutoglu, Avcı (2016)
Kolloidal Silika-Tuz Karışımları	Gevşek, Orta Kum	q _u = 178-277 kPa	Yıldız, (2006)

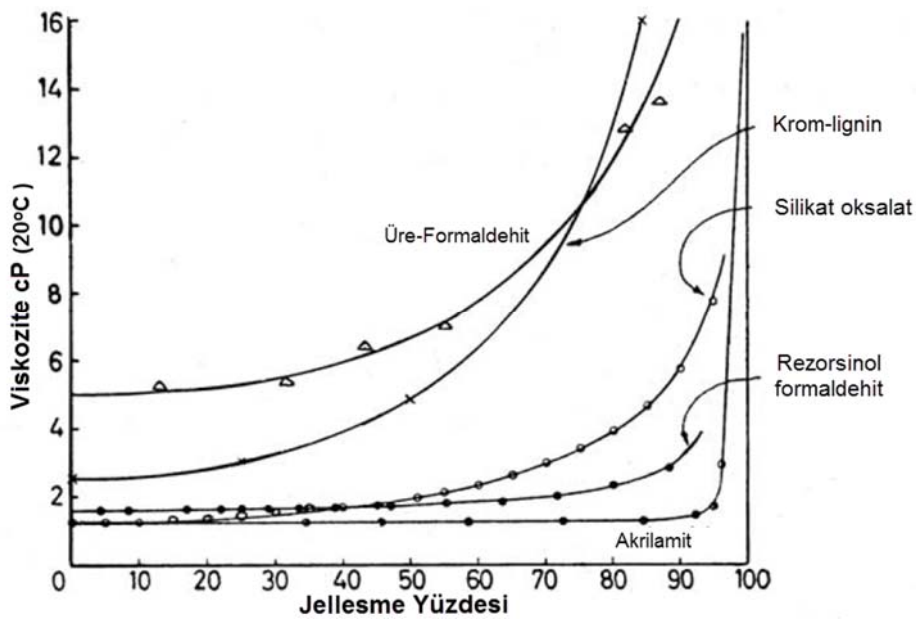
Çizelge 2.2. Farklı kimyasal enjeksiyon malzemelerinin mukavemet değerleri [2]

Enjeksiyon Malzemesi	Enjekte edilen kum	Mukavemet Bilgisi	Araştırmacı
Krom Lignin	Kuru Kum	c = 69 kPa Ø = 35°-51° q _u = 2068 kPa	Schiffman ve Wilson (1958)
Üreformaldehid (Aminoplast)	İri kum	c= 96-345 kPa Ø = 22°-40° q _u = 48-186 kPa	Skipp (1963)
Rezorsinol formaldehid	Kum 0,1-0,4 mm	q _u = 411-1176 kPa	Caron (1963)
AM-9	Siltli Kum	q _u = 304 kPa	Caron (1963)
	Kumlu Çakıl	q _u = 2068 kPa	Neeland & James (1963)
	Kuru Kum	q _u = 8650 kPa σ ₁ -σ ₃ = 8478 kPa	Graf (1982)
Akrilamit	İri Kum	q _u = 365 kPa σ ₁ -σ ₃ = 365 kPa	Clarke (1961)
Üretan	İnce kum 0,01-0,03 mm	q _u = 13729 kPa	Jiaci (1982)
Epoksi	Bazalt	q _u = 69823 kPa	Shroff ve Shah (1985)

2.5.4. Jelleşme süresi

Arazi uygulamaları sırasında kimyasalların enjeksiyon esnasında jelleşme süresini kontrol edebilmek veya değiştirebilmek, başarılı uygulama projeleri için oldukça önemlidir. Joosten metodu dışında yapılan tüm enjeksiyon tekniklerinde, jelleşme süresi imalat için her zaman bir kriterdir. Öngörülemeyen etkenlerin olmaması durumunda dahi, jelleşme süresi kullanılan aktivatör, inhibitör ve katalizörün oranlarına bağlı olarak değişmektedir. Çoğu kimyasal enjeksiyon ürünlerinde, jelleşme süresi bu üç bileşene ait konsantrasyonun değiştirilmesiyle kısaltılabilir ya da uzatılabilir. Eğer geniş bir aralıkta tekrarlı olarak eşdeğer jelleşme süreleri elde edilebiliyorsa, kimyasalın jelleşme kontrolü için mükemmel ya da iyi denilebilir. Sadece belli bir aralıkta jelleşme süresi elde edilebiliyorsa kimyasalın jelleşme kontrolü zayıf olarak adlandırılır [3].

Bazı kimyasal ürünler reaktant ile karıştırıldıktan sonra viskozitesi sabit kalmakta ve belli bir süre sonra anında bir jelleşme eğilimi göstermektedir. Şekil 2.5.'de rezorsinol formaldehit ve akrilamitlerin bu eğilimde olduğu gösterilmektedir. Üre-formaldehit ve silikatların ise viskozitesinin zamana bağlı olarak değiştiği ve yükseldiği, bu tip kimyasallarda jelleşme kontrolünün çok daha önemli olduğu belirtilmektedir. %100 jelleşme aşamasına kadar artan viskozite değerleri nedeniyle kimyasalın tüm bu süreç boyunca araziye enjekte edilemeyebileceği göz önüne alınmalıdır [3].



Şekil 2.5. Jelleşme süresi boyunca viskozite artışı [3]

2.5.5. Hassaslık

Herhangi bir kimyasal enjeksiyon malzemesinin jelleşme süresi sıcaklığa bağlıdır. Kimyasal reaksiyonlar sıcaklığın düşmesiyle yavaşlamakta, artması ile beraber hızlanmaktadır. Birçok kimyasal için her 5.5 °C'lik düşüş jelleşme süresini iki kat artırmaktadır (sodyum silikatlar hariç). Sıcaklığın yanı sıra enjeksiyonun yapılacağı alandaki yeraltıyusu, kimyasal solüsyonları seyreltmekte ve jelleşme süresini etkileyebilmektedir.

Yeraltıyusu jelleşme süresine doğrudan etki edebilmekte, içerebileceği çözünmemiş tuzlar jelleşmeyi pH seviyesine bağlı olarak hızlandırabilmektedir. Aynı şekilde enjeksiyon işleminde kullanılan ekipmanların içerebileceği temizlenmemiş katı maddeler jel süresine etki edebilmektedir.

Kimyasal enjeksiyonların belirtilen faktörler karşısındaki davranışı kimyasalın hassasiyeti adı altında tanımlanır. Aşırı hassas kimyasalların bu kapsamda sahada uygulanabilirliği oldukça zor olabilmektedir [3].

2.5.6. Toksikite

Günümüzde insan sağlığı ve çevresel etkilerin değerlendirilmesi gittikçe artan ve hassaslaşan bir konu olarak öne çıkmakta buna bağlı olarak çeşitli kimyasalların kullanımının sınırlandırıldığı ya da yasaklandığı görülmektedir. Geçmişten günümüze bazı kimyasallar nörotoksik, kanserojen, toksik, aşındırıcı, rahatsızlık verici gibi çeşitli sınıflandırmalar içinde yer almıştır. Bununla beraber geçmişte olan vaka analizleri incelendiğinde kimyasala maruz kalarak rahatsızlanan çoğu kişinin, enjeksiyon çalışmalarında yer alan kişilerin üreticinin talimatlarına uygun olmayan şekilde kullanımı sonucu rahatsızlandığı belirlenmiştir [3].

Tehlikeli kimyasallar, üreticiler tarafından çeşitli prosedürler referansında testlere tabi tutulmakta ve LD₅₀ olarak belirtilen bir değer ile toksisitesi standartlaştırılmaktadır. LD₅₀ hayvanlar üzerinde %50 oranında ölüme sebep olan, kilogram başına günlük olarak maruz kalınan mg. bazındaki miktarı temsil etmektedir.

A.B.D. kimyasalların toksisitesini aşağıda görüleceği üzere gruplandırmıştır:

- Çok toksik: $LD_{50}= 5-50$ mg/kg
- Orta toksik: $LD_{50}= 50-500$ mg/kg
- Az toksik: $LD_{50}= 500-5000$ mg/kg

2.6. İdeal Kimyasal Enjeksiyon

Yeni bir kimyasal enjeksiyon malzemesinin geliştirilmesi hedeflendiğinde kimyasalın;

- Suda kolay çözünebilen toz formunda,
- Ucuz ve bol miktarda üretilebilen,
- Tüm depolama koşullarında stabil,
- Toksik etkisi olmayan,
- Aşındırıcı etkisi olmayan,
- Patlayıcı olmayan nitelikte olması olarak sıralanabilir.

Kimyasal karışımının ise;

- Düşük viskoziteli,
- Tüm sıcaklıklarda stabil,
- Toksik, aşındırıcı ve patlayıcı etkisi olmayan,
- Pahalı olmayan kimyasallarla jelleşebilen,
- Yüksek pH oranlarında stabil olan,
- Geniş bir aralıkta jelleşme kontrolü sağlanabilen,
- Yeraltısuyu nedeniyle seyrelmeye dayanabilen olması beklenir.

Enjeksiyon sonrası zeminde ise;

- Kalıcı bir jel,
- Yeraltısuyu içerisindeki kimyasallara karşı dirençli,
- Yüksek dayanımlı,
- Toksik-aşındırıcı ve patlayıcı etkisi olmaması gibi kriterler aranır.

Yukarıdaki kriterlerin tamamını sağlayan bir kimyasal tabii ki mevcut değildir. Fakat enjeksiyonun yapılacağı alanda gereken iyileştirme özellikleri çerçevesinde, enjeksiyon ürününün seçiminde yukarıda listelenen kriterler göz önüne alınır [3].



3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1. Giriş

Bu deneysel çalışma, yurt dışından ithal edilen silikat kökenli kimyasal enjeksiyonlara alternatif olabilecek, sodyum silikat ve borik asit karışımından oluşan, yerli üretim bir kimyasal enjeksiyon malzemesinin geliştirilmesi amacıyla yürütülmüştür.

Deneysel çalışmalar iki aşamalı olarak yürütülmüştür. Enjeksiyon işlemlerinde kullanılan sodyum silikat – borik asit çözeltisinin ilk aşamada reolojik özellikleri (dayanım, jelleşme süresi, viskozite) belirlenmiş ve bu kapsamda 49 farklı çözeltiliye ait veriler kaydedilmiştir.

İkinci aşamada ise, elde edilen verilerin ışığında 6 farklı kimyasal solüsyon, enjeksiyon için uygun görülmüş ve çözeltilide kullanılan reaktant (borik asit) ile silikat içeriğinin değişimine bağlı olarak, enjeksiyonu yapılan numunelerin permeabilite ve mukavemet değerleri ölçülmüştür. Enjeksiyon yapılan numuneler üzerinde, serbest basınç deneyi ile permeabilite deneyleri gerçekleştirilmiştir. Serbest basınç deneyleri tüm değişkenler dikkate alınarak, çok geniş bir yelpazede ele alınmıştır. Bu kapsamda;

- 6 farklı gradasyon,
- 3 farklı rölatif sıklık (%30, %50, %70),
- 3 farklı silikat içeriği,
- 2 farklı borik asit çözeltisi içeriği,
- 5 farklı zaman dilimi (7, 14, 28, 56, 150. günler),
- 2 farklı kür koşulu (açık havada ve su dolu kür tankında)

dikkate alınarak toplamda 1080 adet enjeksiyonu yapılan kum numuneleri üzerinde serbest basınç deneyi gerçekleştirilmiştir.

Numuneler üzerinde gerçekleştirilen mukavemet deneylerinin yanı sıra, enjeksiyon sonrası numunelerin zamana bağlı permeabilite değerleri de ölçülmüştür. Bu kapsamda, 6 farklı kimyasal karışımın enjekte edildiği toplam 54 adet numunenin zamana bağlı (7, 28 ve 56. günler) permeabilite değerleri tespit edilmiştir.

3.2. Enjeksiyon Deney Düzeneği

Proje kapsamında enjeksiyon işlemlerinin gerçekleştirilebilmesi amacıyla özel bir tasarıma sahip, aynı anda 18 adet numunenin enjeksiyonuna imkan tanıyabilen, BAP projesi kapsamında Prof. Dr. Murat MOLLAMAHMUTOğLU tarafından tasarlanan deney düzeneği kullanılmıştır.

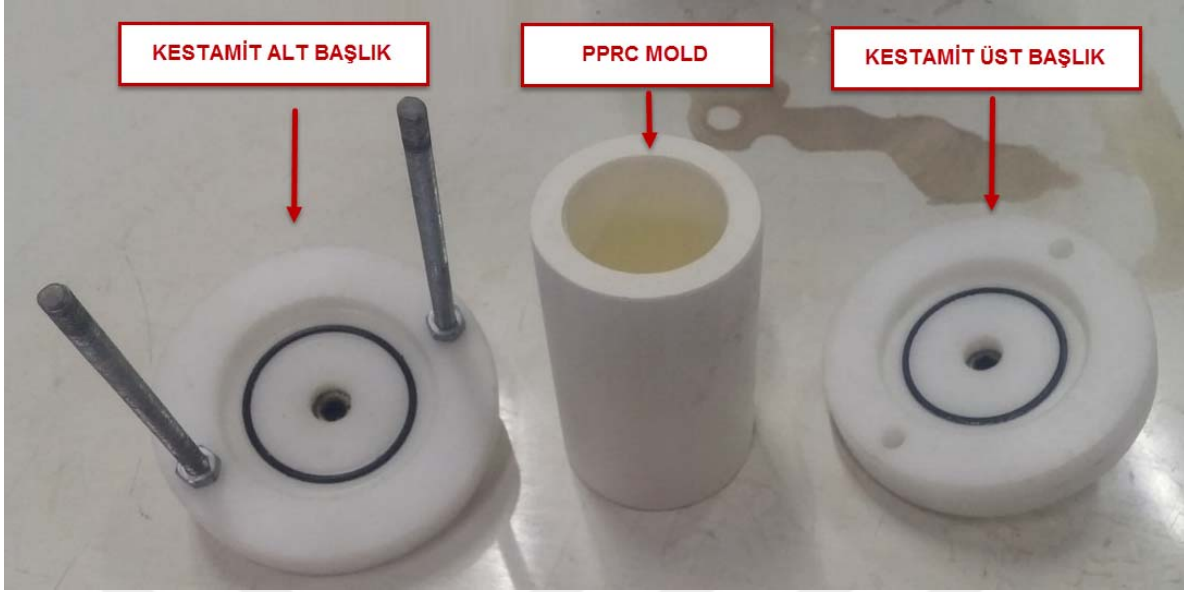
Enjeksiyon deney düzeneği, gerekli basıncın sağlanabilmesi amacıyla 1 MPa kapasiteli kompresör, solüsyon-çözeltilerin karışımının sağlanabilmesi amacıyla karıştırma tankı, enjeksiyon basınçlarının takibinin sağlanabilmesi amacıyla manometre ve ara bağlantı elemanlarından oluşmaktadır (Resim 3.1.).

Enjeksiyon işlemleri daha önce moldlar içerisinde hazırlanan iri daneli zeminler (ince ve orta kum) üzerinde uygulanmıştır. Moldlar 120 mm yüksekliğinde, 52 mm. çapında, enjeksiyon basıncına dayanabilecek nitelikte sızdırmaz PPRC gövde ve kestamit başlıklardan oluşmaktadır (Resim 3.2.).

Plastik moldların kullanımı enjeksiyon sonrasında numunelerin çıkarımını kolaylaştırmış ve bu moldlar aynı zamanda permeabilite deney düzeneğine uygun tasarlanmış olduğundan ayrıca permeabilite testlerinde de kullanılmıştır.



Resim 3.1. Enjeksiyon deney düzeneği



Resim 3.2. Enjeksiyon moldu gövde ve başlıkları

Enjeksiyon düzeneği, 7 lt. kapasiteli karıştırma tankı olup, içerisinde konumlandırılmış 40 devir/dakika hıza sahip pedallı ve redüktör motorlu bir karıştırıcı barındırmaktadır. Tank içerisinde yer alan mekanizma, süspansiyon çözeltilerinde segregasyonun önüne geçilmesi amacıyla dizayn edilmiştir. Bu tez kapsamında yapılan çalışmada, çözelti formunda yer alan borik-asit sodyum silikat karışımı kullanıldığından bir ayrışma söz konusu olmamıştır.

Enjeksiyon düzeneği tank haznesi üzerinde, alt ve üst kısımda yer almak üzere toplam 6 adet giriş-çıkış mekanizması yer almaktadır. Alt kısımda yer alan 2 adet çıkış noktası enjeksiyon çözelti miktarının belirlenmesini ve çözeltinin moldlara iletimini sağlamaktadır. Üst kısımda yer alan 4 adet giriş ise, enjeksiyon çözeltisinin eklenmesi, basıncın tanka iletilmesi, hava tahliyesi ve basıncın ölçülmesini sağlamaktadır. Enjeksiyon basıncının ölçülmesini sağlayan manometre 1.2 MPa basınç ölçme kapasitesine sahiptir.

Enjeksiyon deney düzeneğinde kullanılan tüm iletim elemanları şeffaf pnömatik plastik malzemeden oluşmaktadır. Malzeme gerek enjeksiyon işleminin doğrudan takibinin sağlanılmasını, gerekse enjeksiyon işlemi sonrası kullanılan ekipmanın temizlenmesi işlemlerini kolaylaştırmıştır.

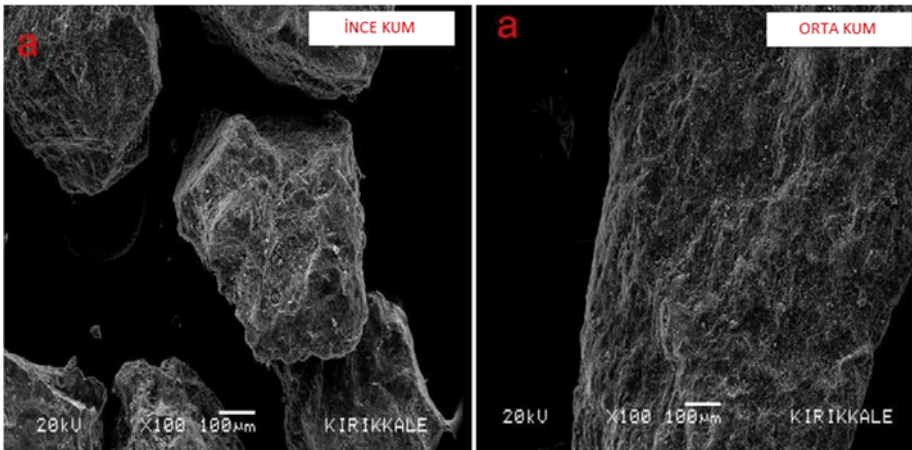
3.3. Enjeksiyon Deneylerinde Kullanılan Kumun Özellikleri

Proje kapsamında Çorum ili, Osmancık ilçesinden geçen Kızılırmak nehri kumu kullanılmıştır. Araziden getirilen kum yıkanarak #200 nolu elekten geçirilmiştir. Elde edilen salt iri daneli numuneler etüvde kurutulmuş ve ASTM [20] standardına göre sırasıyla #10 (2,00 mm.) ve #40 (0,43 mm.) nolu elekler yardımıyla elenmiştir. Eleme işlemi sonrasında kum numuneler ASTM standardına [21] göre ince (#200-#40) ve orta (#40-#10) kum olmak üzere iki gruba ayrılmıştır (Resim 3.3.).



Resim 3.3. Yıkanmış, elenmiş olan ince ve orta kum numuneler

Yıkanan ve elenen kum numuneler üzerinde elektron mikroskobu ile görüntüleme işlemleri yapılmış ve Resim 3.4.'de yer verilmiştir [15]. SEM görüntüleri kum yapısının köşeli ve üniform olmayan aşınma yüzeylerine sahip olduğunu göstermektedir.



Resim 3.4. İnce ve orta kuma ait elektron mikroskobu görüntüleri (SEM) [15]

3.3.1. Spesifik gravite testleri

Deneyde kullanılan ince ve orta kum numunelere ait spesifik gravitenin belirlenmesi amacıyla, ASTM standardı [22] kapsamında gerekli testler gerçekleştirilmiştir.

Kum numunelere ait spesifik gravitenin belirlenmesi amacıyla öncelikle havası alınan su ile doldurulan piknometrenin kütlesi belirlenir ($M_{\rho_{w,t}}$). Sonrasında çeyrekleme methoduyla elde edilen yaklaşık 100 gr. miktarındaki kum numunesi boş piknometre içine boşaltılır ve piknometrenin yaklaşık yarısına gelecek şekilde tamamen su eklenir. Piknometre içerisindeki su-zemin karışımı içerisinde hava kabarcığı kalmaması için zemin su karışımı 2 saat boyunca vakuma tabi tutulur. Vakumlama işlemi sonrasında piknometre içerisinde yer alan boş hacim, havası alınmış su ile doldurulur ve tekrardan toplam kütle belirlenir ($M_{\rho_{ws,t}}$).

Son olarak test süresince ölçülen ortam sıcaklığına bağlı olarak düzeltme katsayısı (K) ASTM standardında [22] yer alan tablo üzerinden belirlenir ve aşağıda yer Eşitlik 3.1 ile spesifik gravite belirlenir.

$$G_s = \frac{\rho_s}{\rho_{w,t}} = \frac{M_s}{[M_{\rho_{w,t}} - (M_{\rho_{ws,t}} - M_s)]} \times K \quad (3.1)$$

Burada;

G_s = Spesifik gravite

ρ_s = Zemin yoğunluğu

$\rho_{w,t}$ = Su yoğunluğu

M_s = Kuru zemin kütlesi

$M_{\rho_{ws,t}}$ = Piknometre, su ve zemin toplam kütlesi

$M_{\rho_{w,t}}$ = Piknometre ve su kütlesi

K = Sıcaklık düzeltme katsayısıdır.

Yapılan deneyler sonucunda ince kum için G_s değeri 2,70, orta kum için ise 2,69 olarak bulunmuştur [15].

3.3.2. Minimum ve maksimum boşluk oranı değerlerinin belirlenmesi

Deneylerde kullanılacak orta ve ince kum karışımlarına ait minimum ve maksimum boşluk oranları, ilgili ASTM standartlarına [23,24] göre belirlenmiştir.

Maksimum boşluk oranının bulunması

Zemin numunesi mold içerisine, malzemeyi sıkıştırmadan özel bir huni vasıtasıyla, moldun üzerini yaklaşık 1 cm. aşacak şekilde yerleştirilir. Mold üzerinde kalan fazla numune çelik bir cetvel yardımıyla tıraşlanarak alınır. Mold ve zemin numunesi tartılır (M_1). Elde edilen veriler doğrultusunda (Eş. 3.2, 3.3, 3.4) maksimum boşluk oranı (e_{maks}) bulunur.

$$M_{s1} = M_1 - M \quad (3.2)$$

$$\rho_{min} = \frac{M_{s1}}{V_m} \quad (3.3)$$

$$e_{max} = \frac{\rho_w \times G_s}{\rho_{min}} - 1 \quad (3.4)$$

Eşitliklerde;

M_{s1} = Deneye tabi tutulan zemin kütlesi,

M_1 = Mold ve zemin kütlesi,

M = Mold kütlesi,

ρ_{min} = Minimum yoğunluk,

V_m = Deneye tabi tutulan zeminin hacmi = Mold hacmi,

e_{maks} = Maksimum boşluk oranı,

G_s = Spesifik gravitedir.

Minimum boşluk oranının bulunması

Minimum boşluk oranının bulunması amacıyla kum numunesi mold içerisine sıkıştırılarak yerleştirilmektedir. Bu kapsamda yakası takılmış olan mold içerisine kum numunesi yerleştirilir ve numune sarsma tablasına yerleştirilir. Bu aşamada yeterli sıkışmanın sağlanması amacıyla numune üzerine uygun mertebede sürşarj uygulanır.

Test kapsamında 9412 gr. kütlesinde sürşarj uygulanmıştır. Sarsma tablasında bu işlem 10 dakika devam ettirilir ve koruyucu yaka çıkarılarak üstteki fazla numunenin çelik cetvelle alınması sağlanır. Numunenin minimum boşluk oranı elde edilen veriler doğrultusunda, Eş. 3.5, 3.6 ve 3.7'den hesaplanır.

$$M_{S2} = M_2 - M \quad (3.5)$$

$$\rho_{max} = \frac{M_{S2}}{V_m} \quad (3.6)$$

$$e_{min} = \frac{\rho_{w,t} \times G_s}{\rho_{max}} - 1 \quad (3.7)$$

Eşitliklerde,

M_{S2} = Deneye tabi tutulan zemin kütlesi,

M_2 = Mold ve zemin kütlesi,

M = Mold kütlesi,

ρ_{maks} = Maksimum yoğunluk,

V_m = Deneye tabi tutulan zeminin hacmi = Mold'un iç hacmi,

e_{min} = Minimum boşluk oranı,

$\rho_{w,t}$ = Su yoğunluğu,

G_s = Spesifik gravitedir.

Deneyler sonucunda bulunan minimum ve maksimum boşluk oranı değerleri Çizelge 3.1.'de gösterilmiştir [15].

Çizelge 3.1. Minimum ve maksimum boşluk oranı değerleri [15]

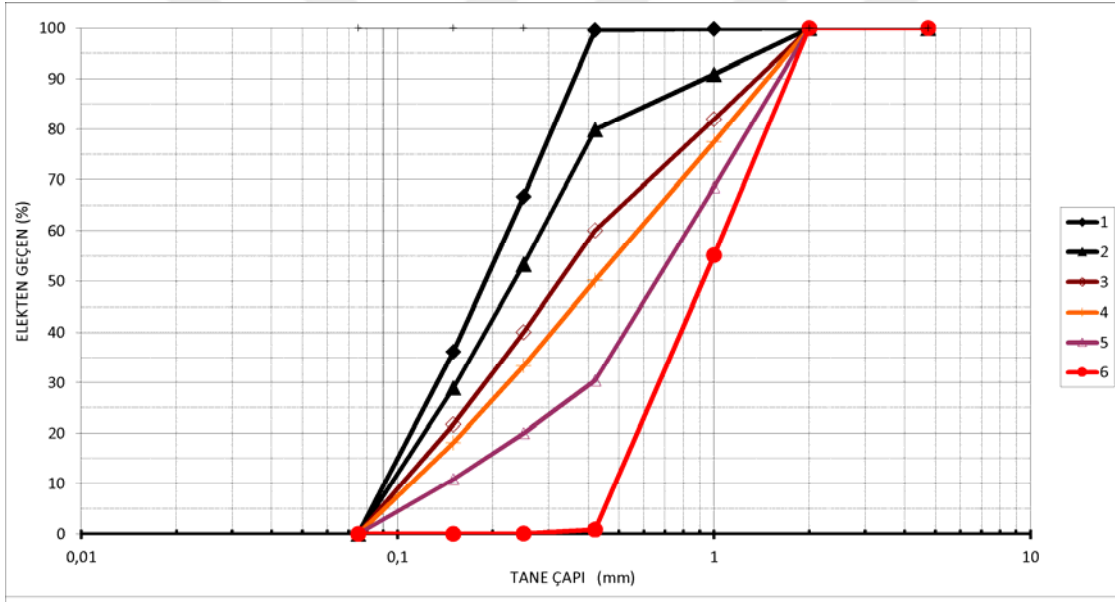
Gradasyon No	Tane Dağılımı %		Spesifik Gravite, G_s	ρ_{maks} (gr/cm ³)	ρ_{min} (gr/cm ³)	e_{maks}	e_{min}
	İnce Kum (#200-#40)	Orta Kum (#40-#10)					
1	100	0	2,70	1,58	1,26	1,14	0,71
2	80	20	2,70	1,57	1,27	1,13	0,72
3	60	40	2,70	1,56	1,27	1,12	0,73
4	50	50	2,69	1,56	1,28	1,11	0,73
5	30	70	2,69	1,55	1,28	1,10	0,74
6	0	100	2,69	1,54	1,30	1,08	0,75

3.3.3. Tane dağılımı

Enjeksiyon deneylerinde kullanılacak olan kum numunelere ait elek analizi ASTM standardına [20] göre yapılmış ve deneyde kullanılan kum karışımlarına ait tane dağılımı eğrileri, Şekil 3.1.'de gösterilmiştir. Çizelge 3.2.'de ise bu numunelerdeki ince ve orta kum oranları verilmiştir.

Çizelge 3.2. Gradasyon numaralarına ait karışım oranları

Gradasyon No	1	2	3	4	5	6
İnce (%)	100	80	60	50	30	0
Orta (%)	0	20	40	50	70	100



Şekil 3.1. Farklı numunelere ait gradasyon eğrileri [15]

3.3.4. Enjeksiyon deneylerinde kullanılan numunelerin permeabilite değerleri

Zeminlerin permeabilite değerlerini, zeminin gradasyonu, boşluk boyu dağılımı, boşluk oranı, sıvının viskozitesi, tanelerin yüzey pürüzlülükleri ve doygunluk derecesi doğrudan etkilemektedir. Bu doğrultuda permeabilite katsayıları farklı zemin tipleri için çok geniş bir aralıkta verilebilmektedir. Çizelge 3.3.'de zemin sınıflarına bağlı olarak tipik değerler özetlenmiştir.

Çizelge 3.3. Tipik permeabilite değerleri

Zemin Tipi	k (cm/sn)
Temiz çakıl	1-100
Kaba kum	1-0,01
İnce kum	0,01-0,001
Siltli kil	0,001-0,0001
Kil	< 0,000001

Enjeksiyon deneyi yapılacak olan zemin numunelerinin permeabilite katsayılarının belirlenmesi amacıyla daha uygun olan sabit seviyeli permeabilite testleri ASTM standardına [25] göre gerçekleştirilmiştir. Sabit seviyeli permeabilite deneyinde, zemin numunesi permeabilite molduna yerleştirildikten sonra mold deney düzeneğine bağlanır ve girişteki su haznesi hidrolik yükü, deneyin başında ve sonunda sabit kalacak şekilde ayarlanır. Daha sonra sabit bir debiye ulaşıldığında numuneden geçen su, dereceli cam silindirde toplanır.

Aşağıda verilen formülasyonlar yardımıyla permeabilite katsayıları hesaplanır (Eş. 3.8, 3.9).

$$i = \frac{h}{L} (\text{hidrolik eğim}) \quad (3.8)$$

$$k = \frac{QxL}{Axhxt} (\text{permabilite}) \quad (3.9)$$

Eşitlik 3.8 ve 3.9'da;

Q=Toplanan su hacmi,

A= Zemin numunesine ait kesit alan,

t=Su toplama süresi,

i= Hidrolik eğim,

h= Su yüksekliği,

L= Akış doğrultusuna paralel numune uzunluğudur.

Enjeksiyonda kullanılan 3 farklı rölatif sıklık ve 6 farklı gradasyona ait toplam 18 farklı zemin numunesi üzerinde permeabilite testi gerçekleştirilmiş ve sonuçları Çizelge 3.4.'de verilmiştir. %30, %50 ve %70 rölatif sıklıkta ve %100 ince kum kullanılarak hazırlanan numunelerde permeabilite, $1,07 \times 10^{-3}$ ile $3,22 \times 10^{-3}$ cm/sn aralığında, %100 orta kum kullanılarak hazırlanan numunelerde ise permeabilite değerleri $1,48 \times 10^{-1}$ ile $9,98 \times 10^{-2}$ cm/sn. aralığında belirlenmiştir.

Çizelge 3.4. Enjeksiyon öncesi numunelere ait permeabilite katsayıları [15]

Örnek No	Tane Yüzdesi (%)		Rölatif Sıklık (%)	Permeabilite katsayısı (cm/sn.)
	İnce	Orta		
1	100	0	30%	$3,22 \times 10^{-3}$
2	80	20		$5,68 \times 10^{-3}$
3	60	40		$8,88 \times 10^{-3}$
4	50	50		$9,95 \times 10^{-3}$
5	30	70		$5,55 \times 10^{-2}$
6	0	100		$1,48 \times 10^{-1}$
1	100	0	50%	$2,11 \times 10^{-3}$
2	80	20		$4,89 \times 10^{-3}$
3	60	40		$7,65 \times 10^{-3}$
4	50	50		$8,89 \times 10^{-3}$
5	30	70		$3,42 \times 10^{-2}$
6	0	100		$1,11 \times 10^{-1}$
1	100	0	70%	$1,07 \times 10^{-3}$
2	80	20		$3,65 \times 10^{-3}$
3	60	40		$5,72 \times 10^{-3}$
4	50	50		$6,19 \times 10^{-3}$
5	30	70		$1,42 \times 10^{-2}$
6	0	100		$9,98 \times 10^{-2}$

3.4. Deneylerde Kullanılan Sodyum Silikatın Özellikleri

$\text{Na}_2(\text{SiO}_2)_n\text{O}$ genel formülüne sahip Sodyum silikat, ilgili marketlerde su camı olarak bilinen kimyasal bir bileşendir. Genel biçimi renksiz haldedir. Ancak ticari olarak kullanılan türevlerinde yabancı maddelerle birlikte yeşil veya mavi renk alabilirler. Sodyum silikat, çimento sektöründe, tekstilde, kereste işleme sanayinde, otomobillerde ve refrakter özellikli malzemelerde sıklıkla kullanılır [15].

Sodyum silikatlar su ile her oranda karışarak, alkali reaksiyon verir ve yaygın olarak yapıştırıcı, deterjan, döküm, metalürji, fırın harçları, beton ve zemin enjeksiyonların da kullanılmaktadır. Sodyum silikatların enjeksiyon malzemesi olarak kullanılabilmesi için silika/alkali oranlarının ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) 3 ile 4 arasında olması gerekmektedir [3].

Kimyasal enjeksiyon deneylerinde, Ege Holding tarafından üretilen Egenat 3203 kodlu sodyum silikat kullanılmıştır. Ürüne ait fiziksel ve kimyasal özellikler Çizelge 3.5.'de verilmiştir.

Çizelge 3.5. Enjeksiyon deneylerinde kullanılan sodyum silikata ait fiziko-kimyasal özellikler

Fiziksel ve Kimyasal Özellikler	Limitler
Görünüş	Renksiz, berrak kıvamlı
Formülasyon	Na_2SiO_3
Ağırlıkça Modül (SiO_2/NaO)	3,1
Be' (20 °C)	40
Yoğunluk (20 °C, gr/cm ³)	1,37-1,39
Na_2O (%)	8,7
SiO_2 (%)	27,0
pH (20 °C)	11,66
Viskozite (20 °C'de, cP)	150

3.5. Deneylerde Kullanılan Reaktantın Özellikleri

Enjeksiyon deneylerinde reaktant olarak, Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü tarafınca piyasaya sürülen, H_3BO_3 genel formülüne sahip Borik Asit ürünü (Resim 3.5.) kullanılmıştır. Borik asit borun zayıf bir asidi olarak yer alıp, beyaz toz halinde suda çözünebilir formdadır. Borik asit boraks ile bir mineral asidin reaksiyona girmesi ile elde edilmektedir.



Resim 3.5. Borik asit

Borik asit günümüzde cam ve cam elyafı, seramik, deterjan, tarım, nükleer enerji, tıp gibi çok farklı alanlarda kullanıma sahiptir. Enjeksiyon işlemlerinde dünyada ilk kez bu çalışma kapsamında kullanılmış ve önerilmiştir. Reaktant olarak kullanılan bu ürüne ait kimyasal ve fiziksel özellikler Çizelge 3.6.'da verilmiştir.

Çizelge 3.6. Borik aside ait fiziksel ve kimyasal özellikler

Fiziksel ve Kimyasal Özellikler	Limitler
Görünüm	Beyaz-katı kristal formda
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	1.51
Molekül Ağırlığı (g/mol)	61,83
Erime Noktası (°C)	450
Kaynama Noktası (°C)	1860
Safiyet (%)	Min. %99,90
B ₂ O ₃ (%)	Min. %56,25
SO ₄ (ppm)	Maks.500
Cl (ppm)	Maks. 10
Fe (ppm)	Maks. 10

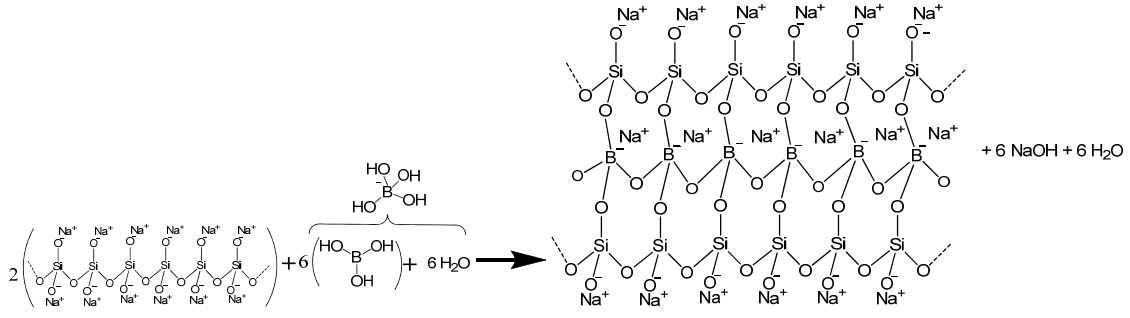
Kullanılan bileşene ait en önemli özellik, ürünün suda çözünübilirlik derecesidir. Çizelge 3.7.'de üretici tarafından paylaşılan verilere yer verilmiştir.

Çizelge 3.7. Borik asidin suda çözdürülebilir maksimum miktarları

Sıcaklık °C	100 ml. suda çözünen maksimum borik asit miktarı (gr.)
0	2,52
10	3,78
15	4,13
20	5,08
25	5,54
30	6,72
35	7,16
40	8,81

3.6. Deneylerde Kullanılan Kimyasal Solüsyonun Reolojik Özellikleri

Kimyasal enjeksiyon deneylerinde, bazik özellikli sodyum silikata inorganik kökenli, su ile seyreltilmiş borik asit reaktantı eklenmiş ve aşağıda gösterilen reaksiyon elde edilmiştir (Şekil 3.2.). Kimyasal reaksiyona ait incelemeler ve tanımlamalar SAN-TEZ projesi kapsamında görev alan Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Bölümü Öğretim Üyesi Doç. Dr. Dursun Ali Köse tarafından gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.2. Sodyum silikat- Borik asit çözeltisi reaksiyonu

Reaksiyon denkleminde göre bazik karakterde olan sodyum silikat sulandırıldığı zaman sulu ortamda hidrolize olarak iyonlaşır. Na⁺ katyonları ve tetrahedral silika zincirlerinin etrafı H₂O molekülleri ile çevrelenmiş olurlar. Bazik karakterdeki bu çözeltinin üzerine derişimi ayarlanmış sulu borik asit çözeltisi ilave edildiği zaman zayıf asidik karakterde olan ve inorganik karakterli borik asit yavaş yavaş polimerik zincir yapısında olan sodyum silikat zincirlerinin arasına girerek ortamın pH'ını nötral seviyelere doğru çeker. Ortam pH'ı nötr olduğu zaman yukarıdaki reaksiyonda ürünler tarafında önerilen polimerik sodyum borosilikat yapısının oluştuğu ve mekanik sertleşmenin meydana geldiği düşünülmektedir. Borik asidin derişiminin kontrol edilmesi ile ortamın pH'ının kontrol edilebilirliği kolaylaşmakta olup, bu da oluşacak sert malzemenin zaman ayarlamasına imkan tanımaktadır. Trigonal yapıdaki borik asit sulu çözeltisi hazırlandığında hidroliz olarak tetragonal (silikat yapısına benzer geometri) yapıya dönüşür ki bu da silikat benzeri bir zincirin oluşarak polimerik silikat türevleri arasına girmesini kolaylaştırır. Anyonik karakterde olan tetragonal borat yapısı, yükünü sodyum silikat yapısında bulunan katyonik Na⁺ atomlarıyla dengeleyerek oluşan sert malzemenin kararlılığını artırmaktadır. Sodyum silikat zincirleri ile tetragonal borat anyonları arasında gerçekleşen reaksiyon bir tür esterleşme reaksiyonu olup H₂O eliminasyonu üzerinden yürüdüğü düşünülmektedir.

Sodyum silikat enjeksiyonlarının jelleşme süresi birçok parametreye bağlıdır. Bunlar SiO₂/Na₂O oranı, sodyum silikat konsantrasyon yüzdesi, reaktant malzeme miktarı ve türü, sıcaklık ile ortamın pH değeridir. Minimum jelleşme süresi pH derecesinin 5 ve 6 olduğu durumlarda gerçekleşirken, daha uzun jelleşme süreleri bu sınırın alt ya da üstündeki pH dereceleri için gerçekleşebilir.

Enjeksiyon deneylerinde kullanılan malzemelerin jelleşme sürelerinin tespit edilmesinde öznel gözlemlerden yararlanılmış ve 49 farklı numune üzerinde testler gerçekleştirilmiştir (Resim 3.6.). Jelleşme sürelerinin belirlenmesine düşük sodyum silikat oranlarından başlanmış ve sodyum silikat oranları arttırılarak karışımların jelleşme süreleri ve jel formunun sağlamlığına ilişkin durumları belirlenmeye çalışılmıştır. Reaktant miktarları da değiştirilerek reaktantın jelleşme sürelerine ve jel formuna olan etkisi incelenmiştir.



Resim 3.6. Kimyasal solüsyonların jelleşme süresi ölçümleri

Yapılan deneylerde en önemli kısıtlayıcı faktörlerden birinin, borik asitin su içerisinde çözünürlüğünün olduğu anlaşılmıştır. Bölüm 3.4' de değinildiği gibi üretici tarafından 20 °C sıcaklıktaki, 100 ml suda çözünebilir borik asit miktarı 5.08 gr. olarak belirtilmiştir. Yapılmış olan deneylerde, asit miktarının çözünürlüğünün limit sınırlara yaklaştıkça oldukça zorlaştığı gözlenmiş, yapılan deneyler sonucunda 20 °C sıcaklığındaki 100 ml. su içerisinde maksimum 4.8 gr borik asit çözdürülebilmektedir. Bu miktardan sonra çözelti içerisinde borik asit partiküllerinin dibe çöktüğü gözlenmiştir.

Su sıcaklığının çözünebilir borik asit miktarını doğrudan etkilediği Çizelge 3.7.'de gösterilmektedir. Ancak daha yüksek oranda borik asit miktarının kullanılabilmesi amacıyla kullanılan su sıcaklığının artırılması, aynı zamanda jelleşme süresini doğrudan etkilediğinden ve yapılmış olan çalışmanın sahada uygulanabilirliği de dikkate alınarak, çözelti sıcaklığı tüm deneylerde 20 °C'de sabit tutulmuştur.

Yapılmış olan deneylerde reaktant miktarı değişiminin yanı sıra, sodyum silikat miktarının jelleşme üzerindeki etkisi de incelenmiştir (Resim 3.7.). Sodyum silikat oranının hacimce %42'ye kadar jelleşme sağladığı, bu değer üzerindeki oranlarda ya jelleşmenin olmadığı ya da karışım esnasında ani jelleşmenin olduğu gözlemlenmiştir. Sodyum silikat oranının hacimce %42'ye kadar sınırlanmasının sebebi, azalan su miktarında çözünebilen borik asit miktarının sınırlanması olmuştur. Bununla beraber sodyum silikat oranının artması ile jelleşme süresinin uzadığı görülmüştür. Aşağıda yer alan Çizelge 3.8. ve 3.9.'da değişen orandaki borik asit ve sodyum silikat içeren solüsyonlara ait jelleşme sürelerine ait sonuçlar özetlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, grafik üzerinde yansıtılarak sodyum silikat ve borik asit değişkenlerine ait yüzdesel oranların jelleşme süresine olan etkisi net bir şekilde Şekil 3.3.'de gösterilmektedir. Deneyler sonucunda reaktant miktarının artması ile jelleşme sürelerinin kısaldığı görülmektedir.

Çizelge 3.8. A, B, C ve D grubu kimyasal solüsyonlar

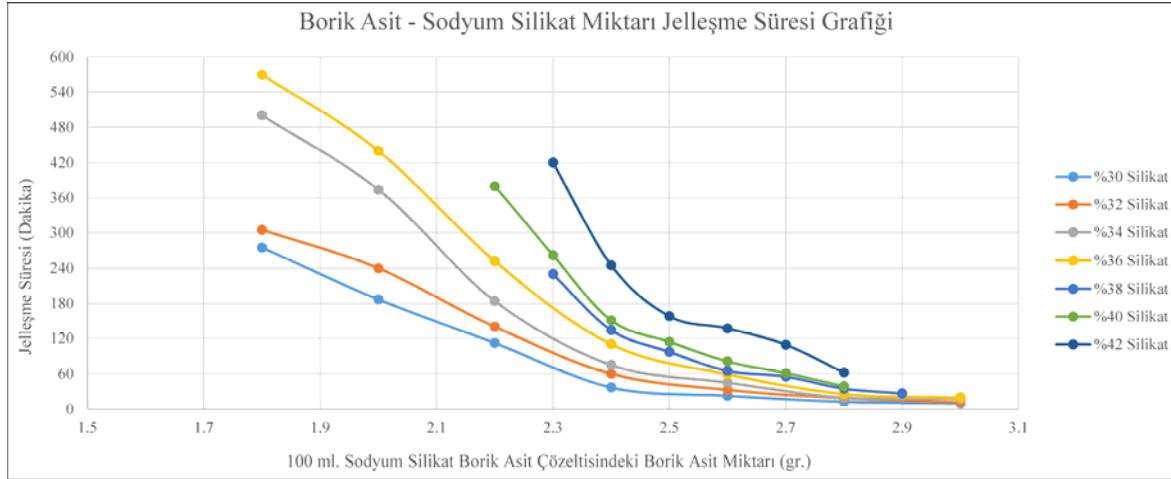
Karışım kodu	Sodyum silikat miktarı (ml.)	Su miktarı (ml.)	100 ml. çözeltideki borik asit miktarı (gr.)	Borik asidin su içerisindeki kütlece yüzdesi (%)	Jelleşme süresi (dk.)
A1	30	70	3	4.3	10
A2	30	70	2.8	4.0	13
A3	30	70	2.6	3.7	23
A4	30	70	2.4	3.4	37
A5	30	70	2.2	3.1	112
A6	30	70	2	2.9	187
A7	30	70	1.8	2.6	275
B1	32	68	3	4.4	12
B2	32	68	2.8	4.1	19
B3	32	68	2.6	3.8	33
B4	32	68	2.4	3.5	60
B5	32	68	2.2	3.2	140
B6	32	68	2	2.9	240
B7	32	68	1.8	2.6	305
C1	34	66	3	4.5	18
C2	34	66	2.8	4.2	20
C3	34	66	2.6	3.9	45
C4	34	66	2.4	3.6	75
C5	34	66	2.2	3.3	184
C6	34	66	2	3.0	374
C7	34	66	1.8	2.7	500
D1	36	64	3	4.7	20
D2	36	64	2.8	4.4	26
D3	36	64	2.6	4.1	59
D4	36	64	2.4	3.8	110
D5	36	64	2.2	3.4	252
D6	36	64	2	3.1	440
D7	36	64	1.8	2.8	570

Çizelge 3.9. E, F ve G grubu kimyasal solüsyonlar

Karışım kodu	Sodyum silikat miktarı (ml.)	Su miktarı (ml.)	100 ml. çözeltideki borik asit miktarı (gr.)	Borik asidin su içerisindeki kütlece yüzdesi (%)	Jelleşme süresi (dk.)
E1	38	62	2.9	4.7	27
E2	38	62	2.8	4.5	35
E3	38	62	2.7	4.4	55
E4	38	62	2.6	4.2	65
E5	38	62	2.5	4.0	97
E6	38	62	2.4	3.9	134
E7	38	62	2.3	3.7	230
F1	40	60	2.8	4.7	39
F2	40	60	2.7	4.5	61
F3	40	60	2.6	4.3	81
F4	40	60	2.5	4.2	114
F5	40	60	2.4	4.0	151
F6	40	60	2.3	3.8	262
F7	40	60	2.2	3.7	380
G1	42	58	2.8	4.8	62
G2	42	58	2.7	4.7	109
G3	42	58	2.6	4.5	137
G4	42	58	2.5	4.3	158
G5	42	58	2.4	4.1	245
G6	42	58	2.3	4.0	420
G7	42	58	2.2	3.8	Jelleşme gözlenmedi.



Resim 3.7. Sodyum silikat-borik asit karışımları



Şekil 3.3. Borik asit ve sodyum silikat miktarı değişiminin jelleşme süresine etkisi

Şekil 3.3.'de görüldüğü üzere, sodyum silikat miktarının azaltılması, borik asit miktarının ise artırılması jelleşme süresini oldukça kısaltmaktadır. Yapılmış olan deneylerde, %42 miktarında (hacimce en yüksek) sodyum silikat kullanılabilmiştir. Bu oranın üzerinde yer alan sodyum silikat içerikli solüsyonlarda, değişen borik asit miktarlarına rağmen jelleşme görülebilmiştir.

Yapılan deneyler sonucunda diğer önemli bir gözlem ise; sabit silikat oranı için borik asit miktarının azaltılmasının jel formunun dayanıklılığını azaltması, borik asit miktarının artmasının ise, jel formunu daha dayanıklı hale getirdiği fakat jelleşme süresini azalttığı olmuştur. Çizelge 3.9'da görüldüğü üzere %42 sodyum silikat oranına sahip G7 kodlu karışımda, düşük miktarda borik asit kullanımı nedeniyle jelleşme görülmemiş, bununla beraber aynı oranda borik aside sahip %40 sodyum silikat oranına sahip F7 kodlu karışımda jelleşme görülebilmektedir.

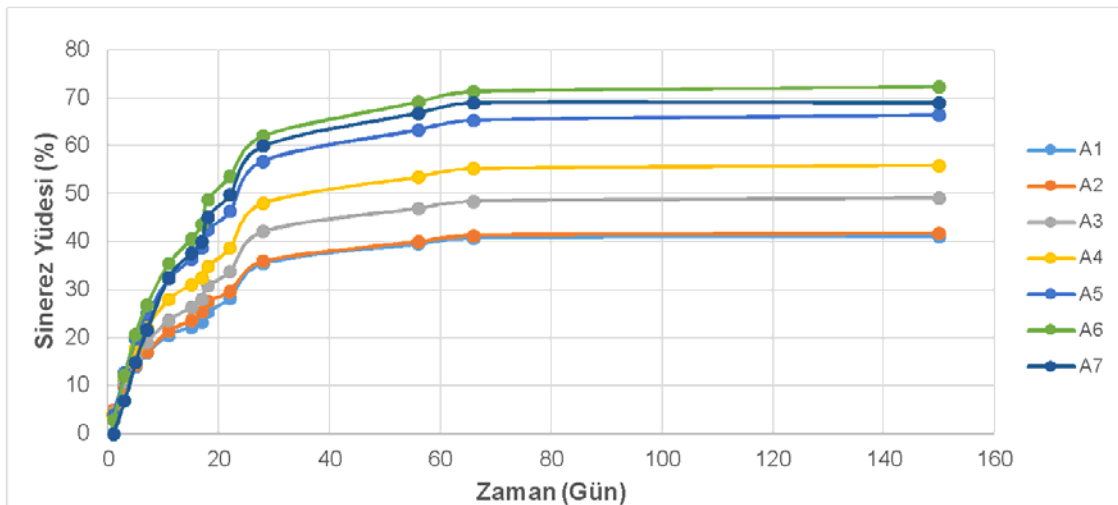
Yapılmış olan tüm deneylerde net olarak, borik asit miktarının artmasının jel formunun dayanıklılığını artırdığı gözlenmiş fakat daha önce belirtildiği üzere 20 °C sıcaklığında su içerisinde çözünebilir optimum borik asit miktarının 4.8 gr. olarak belirlenmesi, çözeltide kullanılabilir limit borik asit değerini oluşturmuştur. Karışımlarda kullanılan borik asit miktarının artmasının ayrıca jelleşme süresini kısalttığı gözlenmiştir. Çözeltinin asidik pH mertebelerinde yer alması, jelleşme süresini azaltırken silikat miktarının artması, yani çözeltinin bazikleşmesi jelleşme süresini artırmaktadır.

Deneyler aşamasında da görülmüştür ki, borik asit çözeltisi içerisinde sodyum silikatın karıştırılmaya başlaması, aşırı asidik ortamdaki sodyum silikatı topaklaştırarak, homojen bir çözelti oluşmasının önüne geçmektedir. Bu kapsamda tüm deneylerde solüsyonlar hazırlanırken borik asit-su çözeltisi, sodyum silikat içerisinde karıştırılarak hazırlanmış, bu doğrultuda solüsyon bazik pH ortamından nötrleştirilerek ani jelleşmenin önüne geçilmiştir.

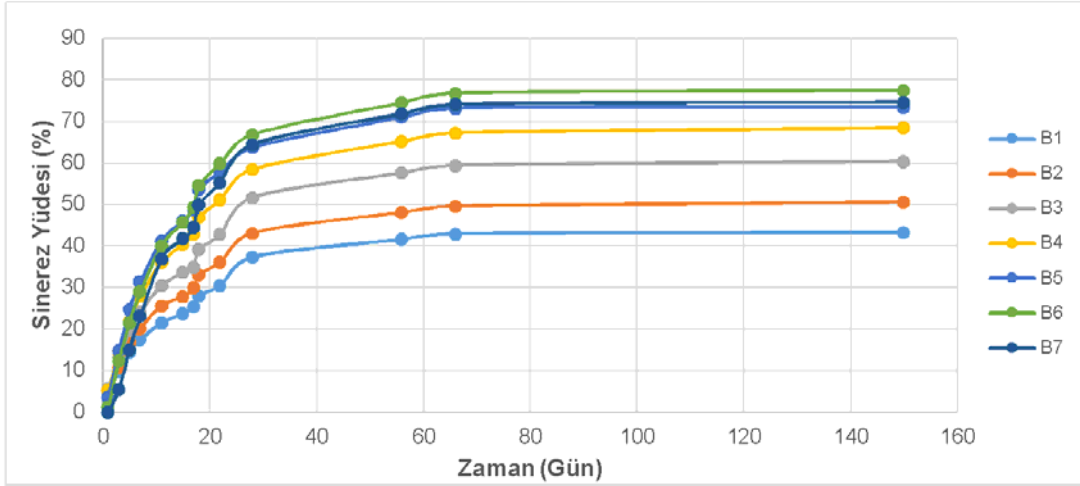
3.7. Deneylerde Kullanılan Kimyasal Solüsyonların Sinerez Yüzdeleri

Enjeksiyon deneylerinde kullanılacak en uygun karışım oranlarının belirlenmesi amacıyla jelleşme süresi tespit edilen 49 adet numunenin 1, 3, 5, 7, 11, 15, 17, 18, 22, 28, 56, 66 ve 150. günlerdeki sinerez yüzdeleri ölçülmüş ve bu değerler grafik üzerinde Şekil 3.4.-3.10.'da verilmiştir. Kapalı kaplarda bekletilen numunelerin jelleşme sonrası açığa çıkan sıvı miktarları, zamana bağlı ölçülmüş ve toplam hacme bölünerek sinerez yüzdeleri hesaplanmıştır. İlgili değerler çizelge halinde ayrıca EK-1'de sunulmuştur.

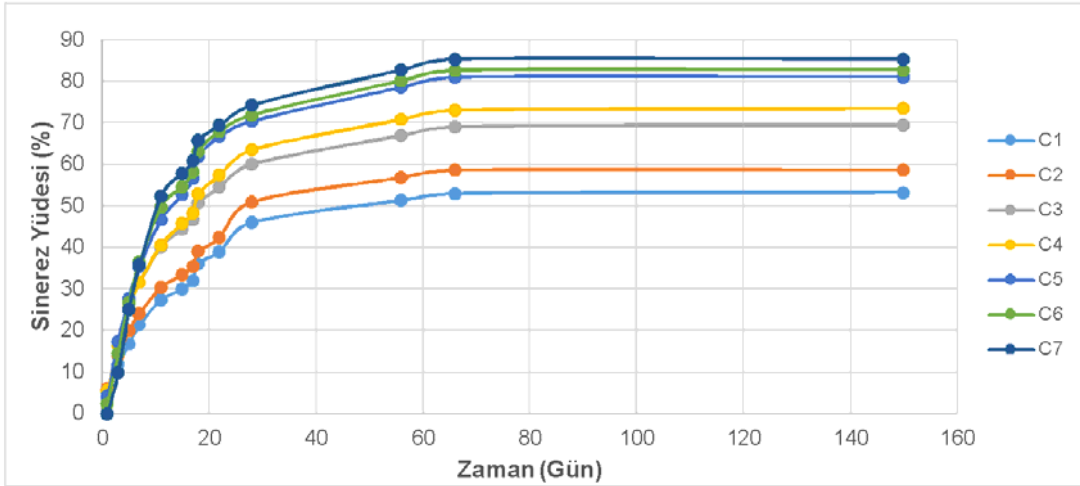
Şekil 3.4.-3.10. incelendiğinde sabit sodyum silikat oranında, çözeltilerin içerisinde yer alan borik asit miktarı artışının, sinerezi doğrudan etkilediği ve jelleşme sonrası daha az miktarda gerçekleştiği ortaya çıkmıştır. Zamana bağlı yapılan ölçümlerde ise, genel olarak sinerezin 28. güne kadar çoğunlukla lineer doğrultuda hızlı bir şekilde geliştiği sonrasında ise, 66. güne doğru yavaşladığı ve 150. gün verisi dikkate alındığında, bu zaman diliminden sonra sabitleştiği görülmektedir.



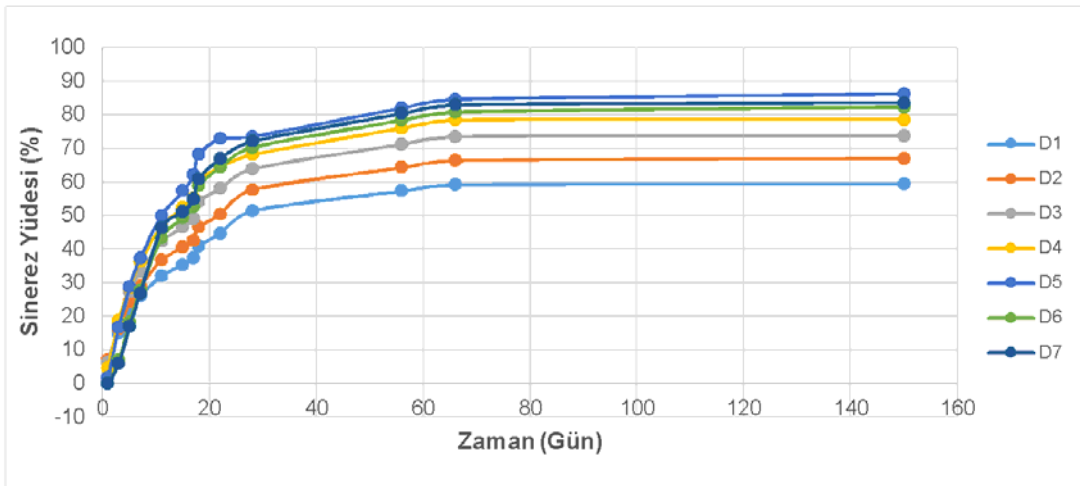
Şekil 3.4. A grubu kimyasalların sinerez-zaman grafiği



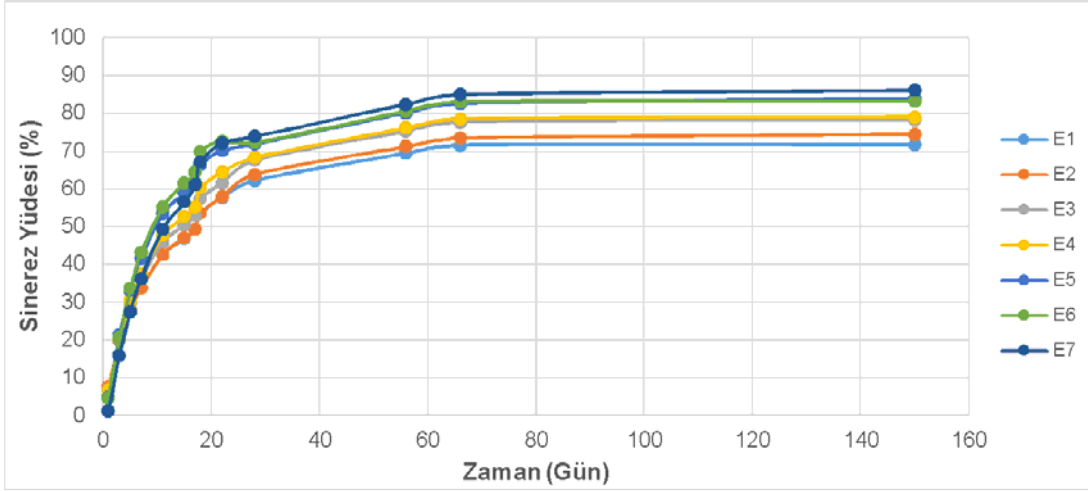
Şekil 3.5. B grubu kimyasalların sinerez-zaman grafiği



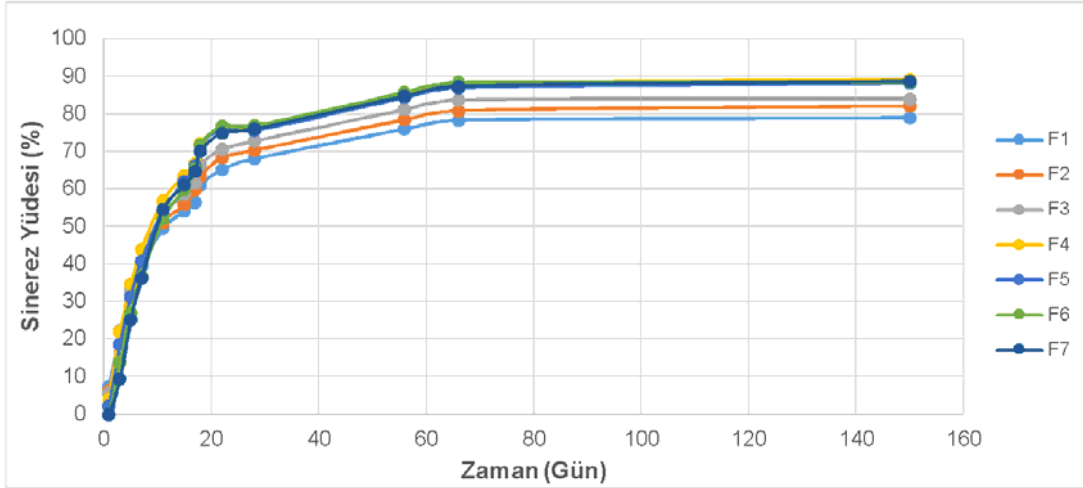
Şekil 3.6. C grubu kimyasalların sinerez-zaman grafiği



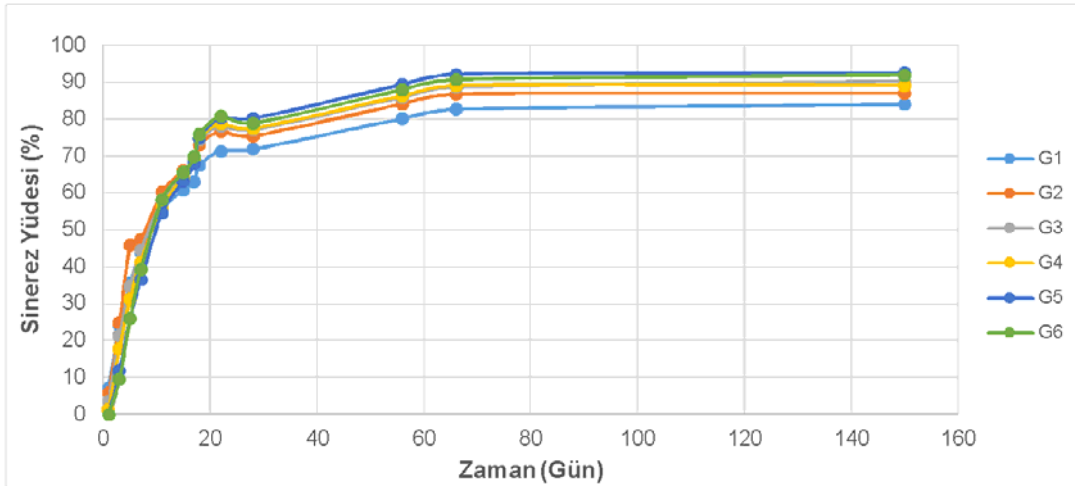
Şekil 3.7. D grubu kimyasalların sinerez-zaman grafiği



Şekil 3.8. E grubu kimyasalların sinerez-zaman grafiği

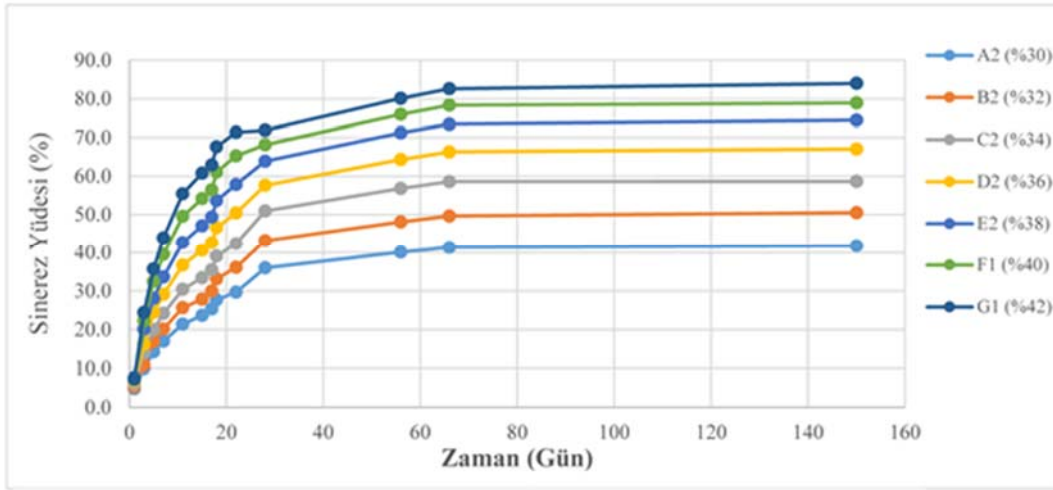


Şekil 3.9. F grubu kimyasalların sinerez-zaman grafiği

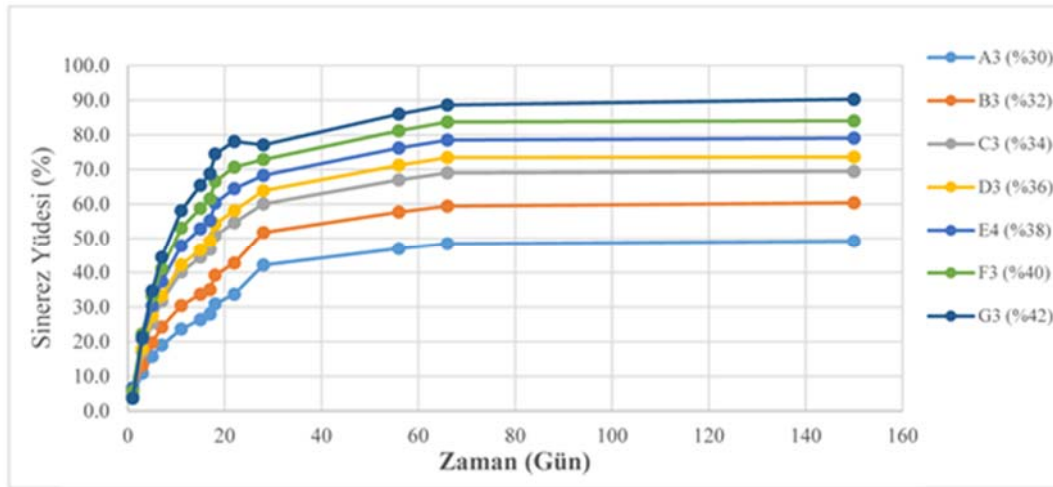


Şekil 3.10. G grubu kimyasalların sinerez-zaman grafiği

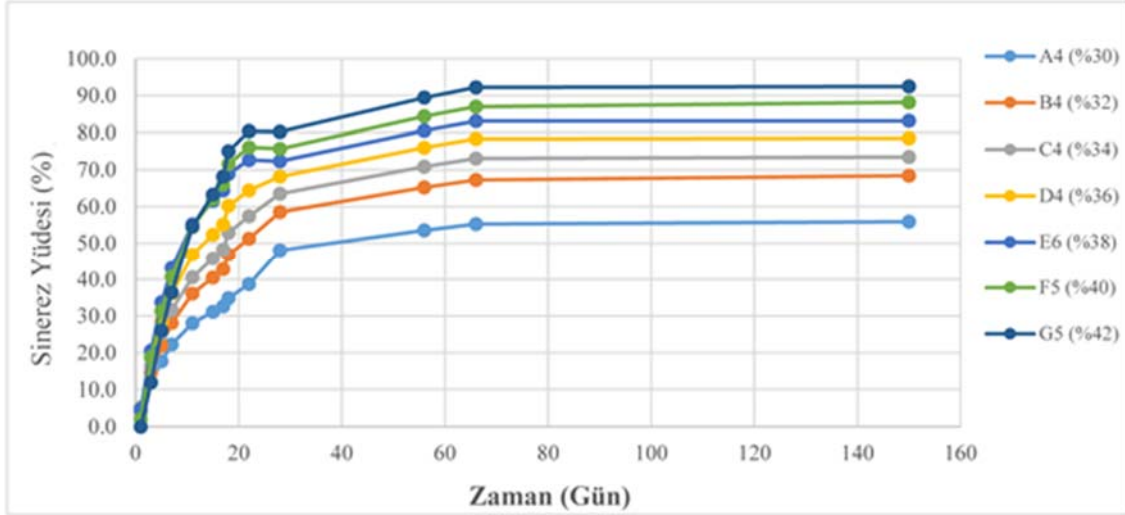
Çözeltilerde kullanılan borik asit miktarının yanı sıra kullanılan sodyum silikat miktarının sinereze olan etkisi ayrıca Şekil 3.11., 3.12. ve 3.13.'de gösterilmiştir. İlgili grafikler, yüksek sodyum silikat oranına sahip çözeltilerin daha fazla sinereze uğradığını göstermektedir. Grafiklerde genel olarak sinerez hızına ait eğrilerin birbiri ile uyumlu olduğu görülmektedir. Ancak "G" grubu, %42 sodyum silikata sahip çözeltilerde sinerez hızının ilk 14 gün içerisinde nispeten yavaş sonrasında ise diğer karışımlara benzer trendi izlediği görülmüştür. Yapılmış olan jelleşme süresi testlerinde de görülmüştür ki; G grubu yüksek sodyum silikat oranına sahip solüsyonlarda, jelleşme süreleri daha düşük silikat içeren solüsyonlara göre daha uzun sürmüştür ve bunun doğrudan ilk iki haftalık periyottaki sinerez hızını etkilediği görülmüştür.



Şekil 3.11. 2,8 gr./100 ml. borik asit içeriğine sahip değişen oranda sodyum silikat içeren çözeltilerin zamana bağlı sinerez yüzdeleri.

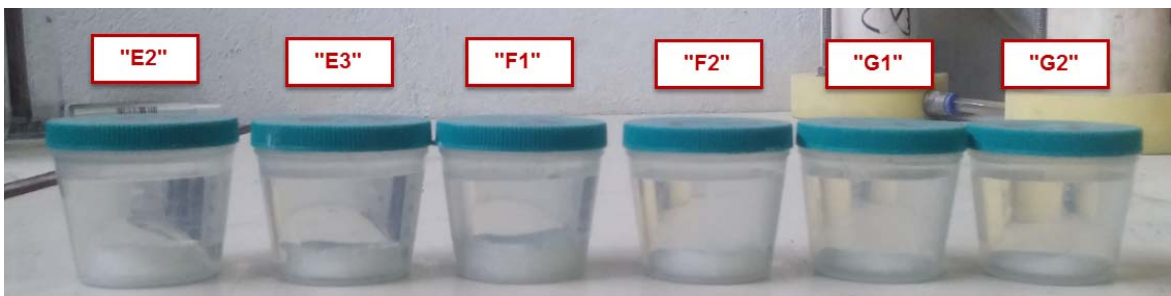


Şekil 3.12. 2,6 gr./100 ml. borik asit içeriğine sahip değişen oranda sodyum silikat içeren çözeltilerin zamana bağlı sinerez yüzdeleri



Şekil 3.13. 2,4 gr./100 ml. borik asit içeriğine sahip değişen oranda sodyum silikat içeren çözeltilerin zamana bağlı sinerez yüzdeleri

Sinerez yüzdeleri ve jelleşme süreleri belirlenen 49 farklı kimyasal karışımdan 6 adedinin enjeksiyonlarda kullanılmasına karar verilmiş ve bu kimyasal karışımların 150. gündeki görüntüleri Resim 3.8.'de verilmiştir. Resim 3.8.'de görüleceği üzere %78,3-87,1 arasında değişen yüksek sinerez oranlarına sahip kimyasal karışımlar ile pilot enjeksiyon çalışmaları gerçekleştirilmiş ve enjeksiyonları yapılan kum numuneler kapalı cam kaplarda muhafaza edilmiştir. Kapalı cam kaplarda bekletilen numunelerde ise sinerez sebebiyle bir su kasma olayı gözlenmemiştir. Enjeksiyon sonrası özellikle numune çeperlerinde meydana gelen sertleşmenin kabuk etkisi oluşturduğu ve karışımdaki suyu bünyesinde tuttuğu düşünülmektedir.



Resim 3.8. Enjeksiyonda kullanılmasına karar verilen kimyasal karışımların jelleşme sonrası 150. gündeki durumu

3.8. Kimyasal Solüsyonların Viskozite Değerleri

Enjeksiyon deneylerinde kullanılmasına karar verilen kimyasal solüsyonların viskozite değerlerinin belirlenmesine yönelik gerçekleştirilen testler, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Merkez Laboratuvarı ARGE Eğitim ve Ölçme merkezi Reolojik Karakterizasyon Laboratuvarında yürütülmüştür. Karışımlarının viskozite değerlerinin belirlenmesinde rheometre cihazı kullanılmıştır. Kimyasalların karışım sonrası viskozite değerleri Çizelge 3.10.'da verilmiştir. Laboratuvar verileri doğrultusunda sodyum silikat oranının artması ile viskozite değerlerinin arttığı görülmektedir. Reaktant miktarının artması viskoziteyi çok az bir miktar artırmıştır.

Çizelge 3.10. Enjeksiyonda kullanılan çözeltilerin viskozite deney sonuçları

Çözelti	Sodyum Silikat oranı (ml)	Su oranı (ml)	Borik asit (gr)	μ (N.s/m ²)	μ (cP)
E2	38	62	2,8	0,0037	3,65
E3	38	62	2,7	0,0036	3,56
F1	40	60	2,8	0,0040	4,01
F2	40	60	2,7	0,0039	3,92
G1	42	58	2,8	0,0043	4,32
G2	42	58	2,7	0,0043	4,28

*N.s/m²=Pa.s, cP: centipoise = 10⁻³ Pa.s

3.9. Deneylerin Yapılışı

Enjeksiyon deneylerinde kullanılacak malzeme ve ekipmanların enjeksiyona hazır hale getirilmesi işlemleri aşağıdaki adımları içermektedir:

- Moldlara yerleştirilecek kum numunelerin rölatif sıklık ve gradasyona bağlı kütlelerinin belirlenmesi,
- Numunelerin moldlara yerleştirilmesi,
- Numunelerin enjeksiyona hazır hale getirilmesi,
- Enjeksiyonların yapılması.

3.9.1. Moldlara yerleştirilecek kum numunelerin rölatif sıklık ve gradasyona bağlı kütlelerinin belirlenmesi

Enjeksiyon çalışmaları için kullanılan kum numunelerin moldlara istenilen rölatif sıklıkta yerleştirilebilmesi amacıyla tüm gradasyonlara ait gereken boşluk oranları (e_0) belirlenen minimum ve maksimum boşluk oranları (e_{min} , e_{maks}) referansında belirlenmiştir. İstenilen rölatif sıklığa bağlı olarak hesaplanan (e_0) değeri, kum numunenin yerleştirileceği moldun hacmi (V_m) ve kum numunesinin spesifik gravitesi (G_s) bilgisi referansında moldlara yerleştirilecek olan kum numunelerin kütlesi hesaplanmış ve Çizelge 3.11.'de verilmiştir.

$$D_r = \frac{e_{maks} - e_0}{e_{maks} - e_{min}} \quad (3.10)$$

$$e_0 = \frac{G_s \times p_w}{\gamma} - 1 \quad (3.11)$$

$$M_k = \gamma \times V_m \quad (3.12)$$

Eşitlik 3.10, 3.11 ve 3.12'de;

D_r = Rölatif sıklık

e_0 = İstenilen sıklıktaki kum karışımının boşluk oranı

e_{maks} = Kum karışımının maksimum boşluk oranı

e_{min} = Kum karışımının minimum boşluk oranı

G_s = Spesifik gravite

p_w = Suyun yoğunluğu

M_k = Mold içerisine yerleştirilecek kum kütlesi

γ = İstenilen sıklıktaki kum karışımının yoğunluğu

V_m = Mold hacmidir.

Çizelge 3.11. Molda yerleştirilmesi gereken kum miktarları

Numune No	Tane Dağılımı %		Karışım (ϵ_{max})	Karışım (ϵ_{min})	Dr (%)	Kalıp		Alt filtre boyu (cm)	Numune yüksekliği (cm)	Numune hacmi (cm ³)	e_0	G_s	Kalba yerleştirilecek numune ağırlığı m (gr)	Kalba yerleştirilecek tabaka ağırlığı (gr)
	İnce kum	Orta kum				Çap (cm)	Boy (cm)							
1	100	0	1,1	0,71	0,30	5,2	10,4	0,8	10,40	220,8	1,01	2,70	296,53	98,84
2	80	20	1,1	0,72	0,30	5,2	10,4	0,8	10,40	220,8	1,00	2,70	297,12	99,04
3	60	40	1,1	0,73	0,30	5,2	10,4	0,8	10,40	220,8	1,00	2,70	297,71	99,24
4	50	50	1,1	0,73	0,30	5,2	10,4	0,8	10,40	220,8	0,99	2,69	297,65	99,22
5	30	70	1,1	0,74	0,30	5,2	10,4	0,8	10,40	220,8	0,99	2,69	298,25	99,42
6	0	100	1,0	0,75	0,30	5,2	10,4	0,8	10,40	220,8	0,98	2,69	299,91	99,97
7	100	0	1,1	0,71	0,50	5,2	10,4	0,8	10,40	220,8	0,92	2,70	309,78	103,26
8	80	20	1,1	0,72	0,50	5,2	10,4	0,8	10,40	220,8	0,92	2,70	309,78	103,26
9	60	40	1,1	0,73	0,50	5,2	10,4	0,8	10,40	220,8	0,92	2,70	309,78	103,26
10	50	50	1,1	0,73	0,50	5,2	10,4	0,8	10,40	220,8	0,92	2,69	309,43	103,14
11	30	70	1,1	0,74	0,50	5,2	10,4	0,8	10,40	220,8	0,92	2,69	309,43	103,14
12	0	100	1,0	0,75	0,50	5,2	10,4	0,8	10,40	220,8	0,91	2,69	310,24	103,41
13	100	0	1,1	0,71	0,70	5,2	10,4	0,8	10,40	220,8	0,83	2,70	324,26	108,09
14	80	20	1,1	0,72	0,70	5,2	10,4	0,8	10,40	220,8	0,84	2,70	323,56	107,85
15	60	40	1,1	0,73	0,70	5,2	10,4	0,8	10,40	220,8	0,84	2,70	322,86	107,62
16	50	50	1,1	0,73	0,70	5,2	10,4	0,8	10,40	220,8	0,84	2,69	322,19	107,40
17	30	70	1,1	0,74	0,70	5,2	10,4	0,8	10,40	220,8	0,84	2,69	321,49	107,16
18	0	100	1,0	0,75	0,70	5,2	10,4	0,8	10,40	220,8	0,84	2,69	321,32	107,11

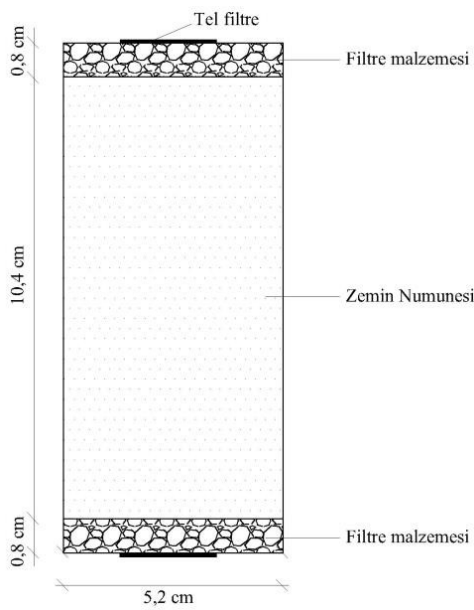
3.9.2. Numunelerin moldlara yerleştirilmesi

Enjeksiyon işleminden sonra numunenin mold içerisinde kolayca çıkarılabilmesi amacıyla, ana gövde makine yağı ile yağlanmıştır. Zemin numunesi molda yerleştirilmeden önce alt başlık titreşimli tokmağa sabitlenmiştir (Resim 3.9).



Resim 3.9. Moldun titreşimli tokmağa yerleştirilmesi

Moldun tokmak içerisindeki düzeneğe sabitlenmesinin ardından başlık üzerinde yer alan enjeksiyon giriş açıklığı üzerine 2 mm. açıklıklı tel ve üzerine 8 mm. kalınlığında iri kum malzeme filtrasyon amacıyla yerleştirilmiştir. Filtrasyon, enjeksiyon basıncı altında kum danelerinin mold içerisinde çıkışını engellemek amacıyla kullanılmıştır (Şekil 3.14.).



Şekil 3.14. Moldun içindeki enjeksiyona hazır zemin numunesi

Hesaplamalar sonucunda molda yerleştirilmesi belirlenen kum kütlesi toplamda 3 ayrı tabaka halinde, huni yardımıyla mold içerisine aktarılmış ve kontrollü bir şekilde titreşimli tokmak yardımıyla istenilen sıklıkta oluşturulmuştur. Yerleştirilen numune üzerine filtrasyon amacıyla tekrardan 8 mm. kalınlığında iri kum malzeme ve 2 mm. açıklıklı tel kullanılarak üst başlık yerleştirilmiş ve numune enjeksiyona hazır hale getirilmiştir (Resim 3.10.).



Resim 3.10. Enjeksiyon işlemi için hazır hale getirilmiş zemin numuneleri

3.9.3. Numunelerin enjeksiyona hazır hale getirilmesi

Enjeksiyon işlemleri için daha önceden belirlenen gradasyon ve sıklıkta hazırlanmış olan numuneler moldlara yerleştirilmiş ve moldlar enjeksiyon düzeneğine elastik pnömatik şeffaf hortumlar ile bağlanmıştır. Bu doğrultuda enjeksiyon işlemi sırasında kimyasal çözeltinin tüm akış çizgisi takip edilebilmiştir. Kum numuneler moldlara yerleştirildikten sonra mold içerisinden su akışı gerçekleştirilmiş ve kum numunelerin suya doyurulması sağlanmıştır. Enjeksiyon deney düzeneği toplamda 18 adet deney numunesinin aynı anda enjeksiyonunu gerçekleştirebilmektedir.

3.9.4. Enjeksiyonların yapılması

Enjeksiyona hazır hale getirilen mold içerisindeki numuneler sisteme bağlanılmış ve kimyasal karışımlar enjeksiyona hazır hale getirilmiştir. Kimyasal enjeksiyonlarda kullanılan değişik oranlardaki borik asit ve sodyum silikat solüsyonları ve buna bağlı olarak elde edilen jelleşme süreleri büyük önem arz etmiştir. Enjeksiyon yapılacak olan mold sayısına bağlı olarak değişmekle beraber, her 18 mold için farklı karışımlar hazırlanmıştır. Bu doğrultuda enjeksiyon işlemi sırasında olası bir jelleşmenin önüne geçilmiştir. Hazırlanan borik asit-su çözeltisi sodyum silikat ile karıştırılmış ve elde edilen solüsyon enjeksiyon tankına boşaltılmıştır. Tank içerisinde karıştırıcı pervane olmakla beraber, solüsyonun süspansiyon çözeltilerinin aksine homojen bir karışım oluşturması nedeniyle tank içerisinde karışımın ayrışma problemi söz konusu olmamıştır.

Enjeksiyon tankına kimyasal karışımın boşaltılmasının ardından sisteme kompresör yardımıyla hava basıncı verilmiştir. Sisteme verilen basınç enjeksiyon deney düzeneğinde yer alan manometre yardımıyla ölçülmüş ve her bir numune için minimum enjekte edilebilirlik basıncı ölçülmüştür. Enjeksiyon işlemi gerçekleştirilen numuneler ertesi gün moldların içerisinde çıkarılmış ve numunenin formuna bakılarak enjeksiyon işleminin başarılı ya da başarısız olması kanaati getirilmiştir. Resim 3.11.'de enjeksiyon işlemi gerçekleştirilen ve başlıkları çıkarılan deney numunelerine yer verilmiştir. Çeşitli sebepler nedeniyle enjeksiyon işlemi başarısız olan deneyler yenilenmiştir.

Enjeksiyon işlemlerinde kullanılan çözelti +20 °C ortam sıcaklığında sabit tutulmuş olup, enjeksiyon sonrası deney düzeneği içerisinde yer alan tank içerisine su eklenerek tüm sistemin temizlenmesi sağlanmıştır.



Resim 3.11. Enjeksiyonu tamamlanan ve başlıkları açılan kum numuneler

3.9.5. Farklı çözeltiler ile enjekte edilen farklı gradasyon ve rölatif sıklıktaki kum numunelere penetrasyon yetisinin belirlenmesi

Yapılmış olan deneysel çalışmalar kapsamında sinerez ve jelleşme süreleri ölçülen 49 farklı solüsyondan 6 adedi seçilmiş ve kimyasal enjeksiyonlarda kullanılmıştır. Bu aşamada jelleşme süresinin sahada uygulanabilirliği ve elde edilen jel formunun yeterli dayanıklılığa sahip olup olmaması kriterleri göz önüne alınmıştır. Enjeksiyon işlemlerinde seçilen numunelere ait fiziksel özellikler Çizelge 3.12.'de verilmiştir.

Çizelge 3.12. Enjeksiyonda kullanılan çözeltilerin fiziksel özellikleri

Çözelti	Sodyum Silikat oranı	Su oranı	Borik asit (gr/100ml.)	Jelleşme Başlangıç Süresi (dk.)
E2	%38	%62	2,8	35
E3	%38	%62	2,7	55
F1	%40	%60	2,8	39
F2	%40	%60	2,7	61
G1	%42	%58	2,8	62
G2	%42	%58	2,7	109

Enjeksiyon işlemlerinde kullanılan kumlarda %30, %50, ve %70 olmak üzere 3 farklı rölatif sıklık ve ince ile orta kum boyutunun değişen oranlardaki karışımına ait 6 farklı gradasyon belirlenmiştir. Bu kapsamda her bir kimyasal enjeksiyonun penetrasyon yetisi 18 farklı numune üzerinden irdelenmiştir. Enjeksiyon işlemlerinde kullanılan numunelere istenilen rölatif sıklığın verilmesi ve numunelerin hazırlanması sonrasında moldların düzeneğe yerleştirilmesi aşamasında rölatif sıklığa etki edebilecek çarpma, sarsma vb. çevresel faktörlere azami hassasiyet gösterilmiştir.

Çizelge 3.13. ve 3.14.'de görüleceği üzere tüm enjeksiyon işlemleri son derece düşük basınçlar ile kolaylıkla gerçekleştirilebilmiştir. Bu kapsamda "E2" ve "E3" kodlu çözeltiler 0,05 ile 0,30 bar aralığında, "F1" ve "F2" kodlu çözeltiler 0,11 ile 0,42 bar aralığında ve son olarak "G1" ile "G2" kodlu çözeltilerde ise enjeksiyon 0,17 ve 0,54 bar aralığında değişen basınçlar ile numunelere enjekte edilebilmiştir.

Çizelge 3.15 ve 3.16'da belirtilen sonuçlardan da görüleceği üzere sodyum silikat oranının artmasına bağlı olarak enjeksiyon basıncı bir miktar artmış ayrıca gradasyona bağlı olarak değişkenlik göstermiştir. Deneyleerde borik asit miktarının minimum enjekte edilebilirliğe ilişkin doğrudan bir etkisi görülememiştir.

Enjeksiyonda başarılı olan numunelere 7, 14 ,28, 56 ve 150. günlerde serbest basınç testi uygulanmış ve toplamda 1080 adet test gerçekleştirilmiştir. Literatürde yer alan çalışmalarda mukavemet testleri çoğunlukla 28. güne kadar sürdürülmüş olup, yapılmış olan bu çalışma ile malzeme davranışı çok daha uzun bir süreçte irdelenmiştir.

Çizelge 3.13. Minimum enjekte edilebilirlik basınçları

Örnek no	Tane yüzdesi (%)		Rölatif sıklık (%)	Karışım kodu					
	İnce Kum	Orta Kum		E2		E3		F1	
				Minimum enjekte edilebilirlik basıncı (bar)	Başarı durumu	Minimum enjekte edilebilirlik basıncı (bar)	Başarı durumu	Minimum enjekte edilebilirlik basıncı (bar)	Başarı durumu
1	100	0	30	0,1	Başarılı	0,1	Başarılı	0,18	Başarılı
2	80	20		0,1	Başarılı	0,1	Başarılı	0,18	Başarılı
3	60	40		0,1	Başarılı	0,1	Başarılı	0,18	Başarılı
4	50	50		0,1	Başarılı	0,1	Başarılı	0,18	Başarılı
5	30	70		0,05	Başarılı	0,05	Başarılı	0,11	Başarılı
6	0	100		0,05	Başarılı	0,05	Başarılı	0,11	Başarılı
1	100	0	50	0,2	Başarılı	0,2	Başarılı	0,28	Başarılı
2	80	20		0,2	Başarılı	0,2	Başarılı	0,28	Başarılı
3	60	40		0,2	Başarılı	0,2	Başarılı	0,28	Başarılı
4	50	50		0,2	Başarılı	0,2	Başarılı	0,24	Başarılı
5	30	70		0,1	Başarılı	0,1	Başarılı	0,18	Başarılı
6	0	100		0,1	Başarılı	0,1	Başarılı	0,18	Başarılı
1	100	0	70	0,3	Başarılı	0,3	Başarılı	0,42	Başarılı
2	80	20		0,3	Başarılı	0,3	Başarılı	0,42	Başarılı
3	60	40		0,3	Başarılı	0,3	Başarılı	0,42	Başarılı
4	50	50		0,2	Başarılı	0,2	Başarılı	0,28	Başarılı
5	30	70		0,1	Başarılı	0,1	Başarılı	0,22	Başarılı
6	0	100		0,1	Başarılı	0,1	Başarılı	0,22	Başarılı

Çizelge 3.14. Minimum enjektörde edilebilirlik basınçları

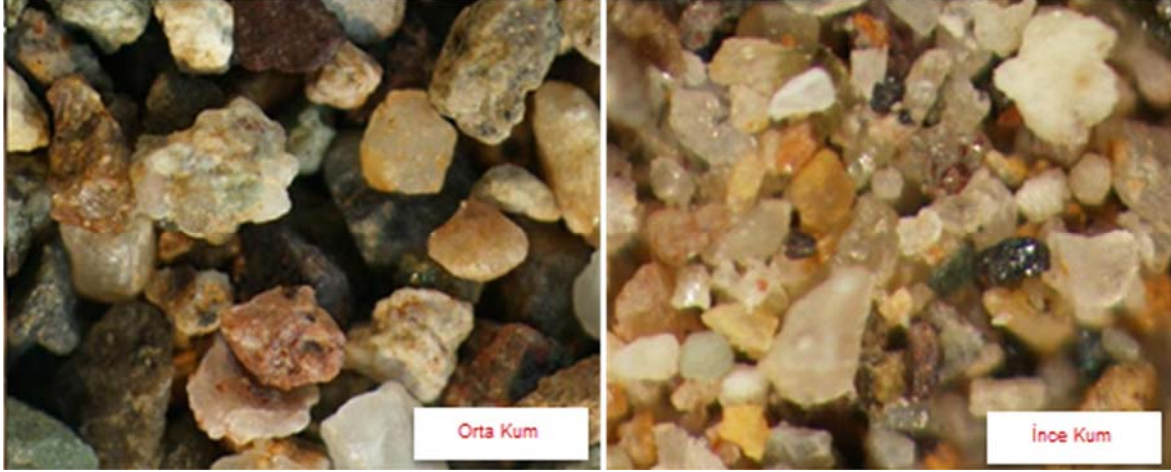
Örnek no	Tane yüzdesi (%)		Rölatif sıklık (%)	Karışım kodu					
	İnce kum	Orta kum		F2		G1		G2	
				Minimum enjektörde edilebilirlik basıncı (bar)	Başarı durumu	Minimum enjektörde edilebilirlik basıncı (bar)	Başarı durumu	Minimum enjektörde edilebilirlik basıncı (bar)	Başarı durumu
1	100	0	30	0,18	Başarılı	0,26	Başarılı	0,26	Başarılı
2	80	20		0,18	Başarılı	0,26	Başarılı	0,26	Başarılı
3	60	40		0,18	Başarılı	0,26	Başarılı	0,26	Başarılı
4	50	50		0,18	Başarılı	0,26	Başarılı	0,26	Başarılı
5	30	70		0,11	Başarılı	0,17	Başarılı	0,17	Başarılı
6	0	100		0,11	Başarılı	0,17	Başarılı	0,17	Başarılı
1	100	0	50	0,28	Başarılı	0,36	Başarılı	0,36	Başarılı
2	80	20		0,28	Başarılı	0,36	Başarılı	0,36	Başarılı
3	60	40		0,28	Başarılı	0,36	Başarılı	0,36	Başarılı
4	50	50		0,24	Başarılı	0,28	Başarılı	0,28	Başarılı
5	30	70		0,18	Başarılı	0,26	Başarılı	0,26	Başarılı
6	0	100		0,18	Başarılı	0,26	Başarılı	0,26	Başarılı
1	100	0	70	0,42	Başarılı	0,54	Başarılı	0,54	Başarılı
2	80	20		0,42	Başarılı	0,54	Başarılı	0,54	Başarılı
3	60	40		0,42	Başarılı	0,54	Başarılı	0,54	Başarılı
4	50	50		0,28	Başarılı	0,36	Başarılı	0,36	Başarılı
5	30	70		0,22	Başarılı	0,34	Başarılı	0,34	Başarılı
6	0	100		0,22	Başarılı	0,34	Başarılı	0,34	Başarılı

Resim 3.12.'de enjeksiyon işlemi sonrasında ertesi gün moldlardan çıkarılan bir grup numune ve 28. günde kırılan numuneye ait fotoğraf görülmektedir. Başlangıçta jel formunun kum numunenin tüm boşluklarını dolduran nitelikte yer aldığı fakat zamana bağlı olarak gerçekleşen yüksek mertebedeki sinerez nedeniyle kum numune içerisinde boşluklu bir yapının oluştuğu görülmektedir.

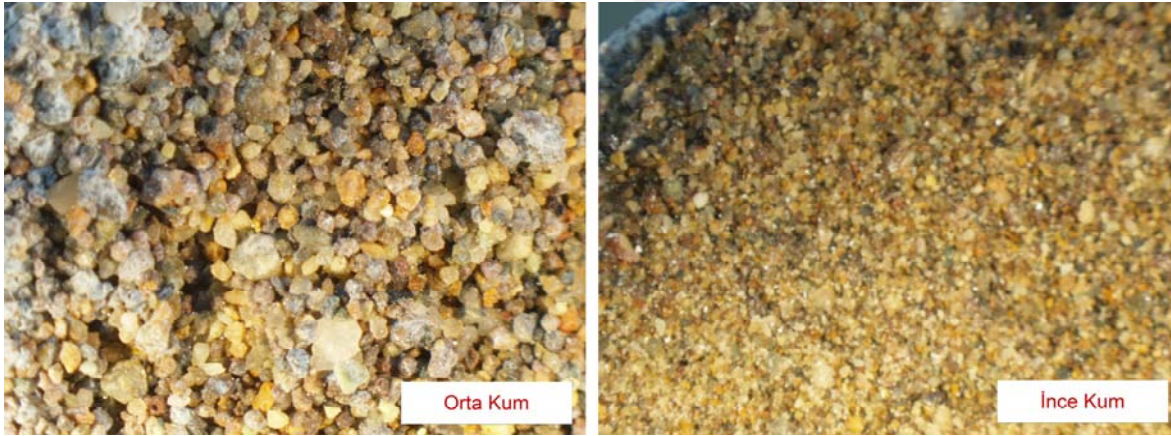


Resim 3.12. Enjeksiyon sonrası molddan çıkarılan ve 28. günde basınç testine tabi tutulan numune

Resim 3.13. ve 3.14.'de enjeksiyon deneyinde kullanılan ince ve orta kum numunelerine ait optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Görüntüler Olympus stereo zoom araştırma mikroskobu kamera ataçmanlı SZX 16 modeli ile çekilmiştir. Resim 3.13.'de enjeksiyon yapılmayan numunelere ait fotoğraf yer almaktadır. Resim 3.14.'de ise enjeksiyon sonrası 28 gün bekleyen ince ve orta kum numunesine ait görüntü yer almaktadır. İlgili fotoğrafta görüldüğü üzere kum yapısı genellikle numunenin iç kısımlarında boşluklu bir yapıya sahip olup, enjeksiyon sonucu özellikle numunelerin cidar bölgesinde enjeksiyona bağlı bağlayıcı yapıda bir yoğunluk görülmektedir. Bu yapı gerek deneyler de gerekse optik görüntülerden anlaşıldığı üzere, numune çevresinde bir kabuk etkisi yaratmaktadır. Resim 3.14.'de optik mikroskop görüntülerinde gözlenen kabuk yapısını doğrular niteliktedir.



Resim 3.13. İnce ve orta kuma ait enjeksiyon öncesi optik mikroskop görüntüsü



Resim 3.14. İnce ve orta kuma ait enjeksiyon sonrası 28. gün optik mikroskop görüntüsü

3.10. Enjeksiyon Deneylerinde Başarılı Olan Numunelerin Serbest Basınç Dayanımı Deneyleri

Enjeksiyonda başarılı olan numunelerinin dayanım özelliklerinin belirlenmesi amacıyla enjeksiyon işlemi yapılan toplam 1080 adet numune üzerinde ASTM standardına [26] göre serbest basınç deneyi gerçekleştirilmiştir. Kimyasal enjeksiyonları gerçekleştirilen numuneler, ortalama 24 saat boyunca jelleşme sürecinin tamamlanması amacıyla mold içerisinde bekletilmiş ve sonrasında mold içerisinden çıkartılmıştır. Resim 3.15.'de başlıkları çıkartılan enjeksiyonu tamamlanmış moldlara ait fotoğrafa yer verilmiştir.



Resim 3.15. Enjeksiyon sonrası başlıkları çıkartılan numuneler

Deney programına göre belirlenen süreç doğrultusunda, farklı sıklık ve gradasyona sahip tüm numunelerin ıslak ve kuru ortamda bekleme koşullarına göre ayrı ayrı basınç testleri gerçekleştirilmiştir. Resim 3.16.'da laboratuvarda açık havada ve su içinde kür tankında serbest basınç testi sürecini bekleyen numunelere ait fotoğraf yer almaktadır.



Resim 3.16. Laboratuvar ortamında ve kür tankında bekletilen enjeksiyonlu numuneler

Serbest basınç deneyine tabi tutulan ve enjeksiyon işlemi gerçekleştirilen numunelere ait değişkenler Çizelge 3.15.'de özetlenmiştir.

Çizelge 3.15. Serbest basınç testine tabi tutulan numunelere ait değişkenler

Değişken	Açıklama	Varyasyon adedi
Kimyasal solüsyon tipi	E2, E3, F1, F2, G1, G2 kodlu çözeltiler	6
Sıklık	%30,%50,%70 rölatif sıklık oranları	3
Gradasyon	Farklı ince ve orta kum karışımları	6
Basınç testinin gerçekleştirildiği zaman	7-14-28-56-150. günler	5
Numune bekleme ortamı	Kür tankı ve kapalı laboratuvar ortamı	2
Toplam test edilen numune sayısı		1080

Enjeksiyon işlemleri yapılan numuneler-moldlardan çıkartıldıktan sonra alt ve üst yüzeylerin doğrudan serbest basınç deneyine tabi tutulacak bir yapıya sahip olmaması nedeniyle, yaklaşık 0,5 cm. kalınlığında ince kumdan oluşan malzeme ile alt ve üst başlıkları doldurularak basınç deneyi süresince homojen bir yük dağılımının sağlanması hedeflenmiştir (Resim 3.17.). Yüzey düzgünlüğünün sağlanması amacıyla kullanılan ince kum malzemenin numune üzerinden dökülmemesini sağlamak amacıyla plastik alt ve üst taban kullanılmış ve bu malzemenin daha geniş çaplı seçilmesi yoluyla, enjeksiyon numunesine kırım aşamasında yanal basınç sağlamamasına dikkat edilmiştir.



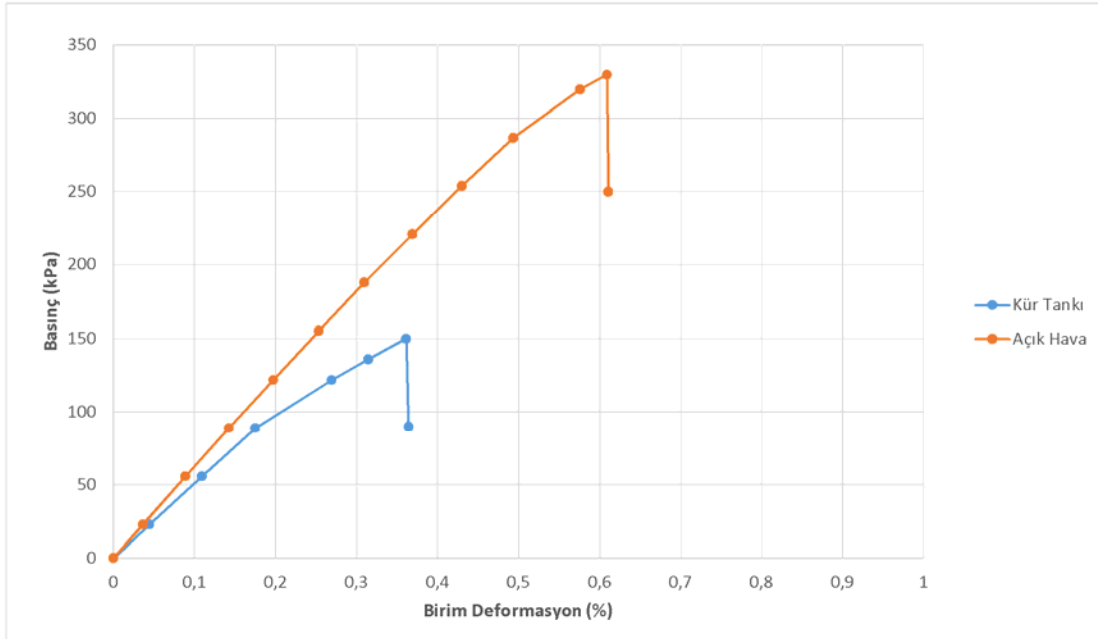
Resim 3.17. Başlıkları yerleştirilen enjeksiyon numuneleri

Borik asit- sodyum silikat çözeltisinin çeşitli değişkenlere sahip kum numuneler üzerinde enjekte edilebilirliği test edilmiş ve tamamı başarılı olan enjeksiyon deneylerinde toplam 1080 adet numune üzerinde serbest basınç testi gerçekleştirilmiştir. Deneylere ait sonuçlar detaylı bir şekilde EK-2.'de verilmektedir.

Serbest basınç testleri, 10 ton kapasiteli özel yapım dijital göstergeli yükleme çerçevesi ile gerçekleştirilmiştir. Yükleme hızı 1.27 mm/dk. olarak seçilmiş olup, 120 mm. yüksekliğe sahip enjeksiyon numuneleri dakikada %1,058 birim deformasyon oranı mertebesinde yüklenmiştir. Yükleme sırasında malzemenin gevrek bir yapı sergilediği ve maksimum yükte düşey deformasyonun son derece sınırlı mertebede gerçekleştiği belirlenmiştir (Resim 3.18). 150. günde gerçekleştirilen basınç testleri dikkate alındığında ortalama olarak açık havada belirtilen numunelerde yenilme anında birim deformasyon %0,6 mertebesinde, kür tankında bekletilen numunelerde ise %0.35 mertebesinde belirlenmiştir. Tipik birim deformasyon - basınç diyagramı Şekil 3.15.'de gösterilmiştir. Düşük birim deformasyon değerleri nedeniyle doğrudan kırılma anındaki maksimum yük dikkate alınarak numunelere ait serbest basınç mukavemeti ölçülmüştür.



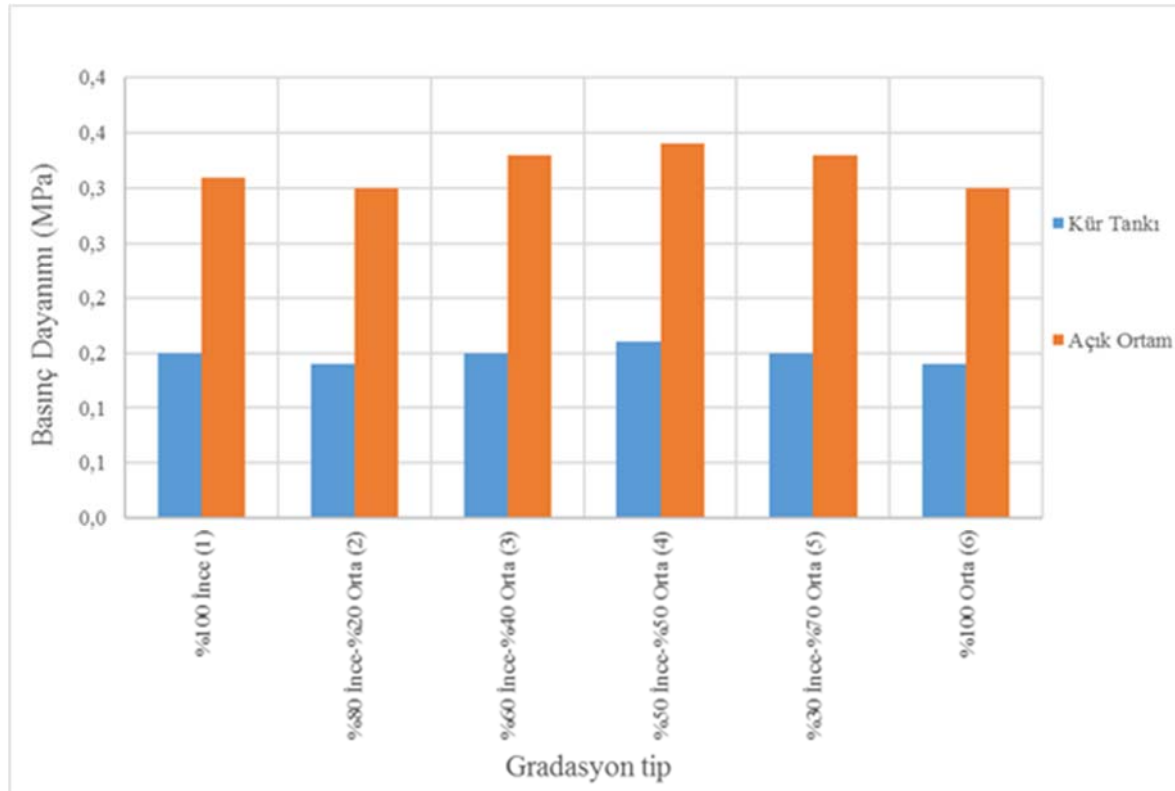
Resim 3.18. Enjeksiyon numunelerinin serbest basınç testine ait deney fotoğrafı



Şekil 3.15. 150. gün basınç testlerine ait basınç-birim deformasyon eğrileri

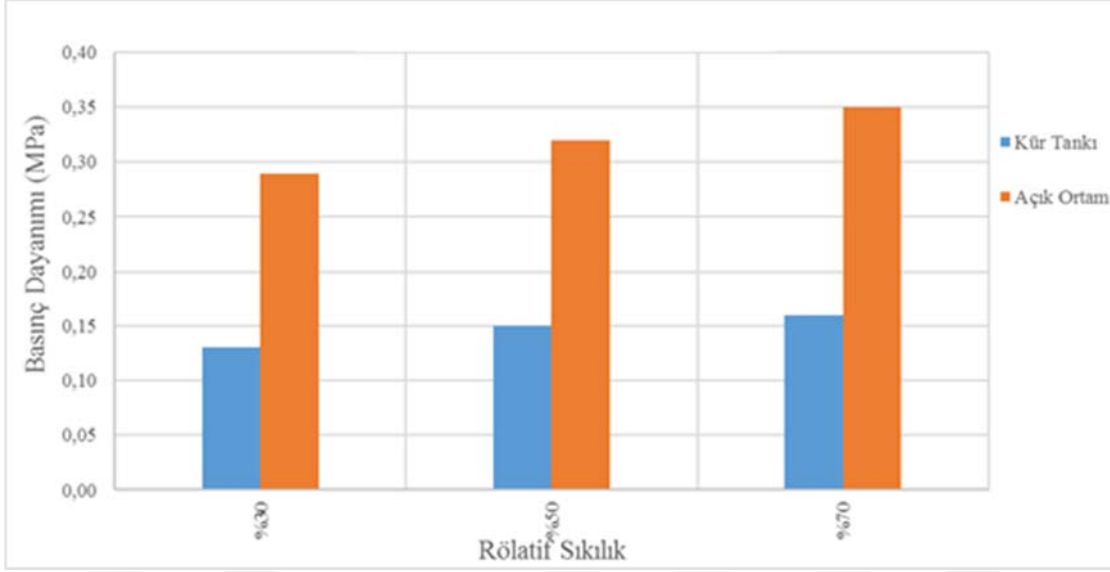
Serbest basınç mukavemeti testleri kapsamında enjeksiyon işlemi tamamlanan numuneler, enjeksiyon işleminden 1 gün sonra moldlarından çıkarılmış ve zamana bağlı ilk mukavemet testi 7. günde gerçekleştirilmiştir.

Gradasyonun basınç mukavemetine etkisi irdelendiğinde, tamamen orta kumdan oluşan numuneler üzerinde yapılan testlerde en düşük mukavemet değerleri elde edilmiştir. En yüksek basınç mukavemeti ise, %50 ince ve %50 orta kum karışımından oluşan numuneler üzerinde elde edilmiştir. Şekil 3.16.'da kür tankı ve açık ortamda bekleyen numunelerin gradasyona bağlı olarak değişen 150. gündeki ortalama basınç mukavemetleri verilmektedir. Yapılan testler sonucunda elde edilen minimum mukavemet değeri ile maksimum mukavemet değeri arasında ortalama %14 mertebesinde bir fark olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3.16. Kür tankı ve açık ortamda bekleyen numunelerin gradasyonuna bağlı 150. gündeki ortalama basınç mukavemetleri

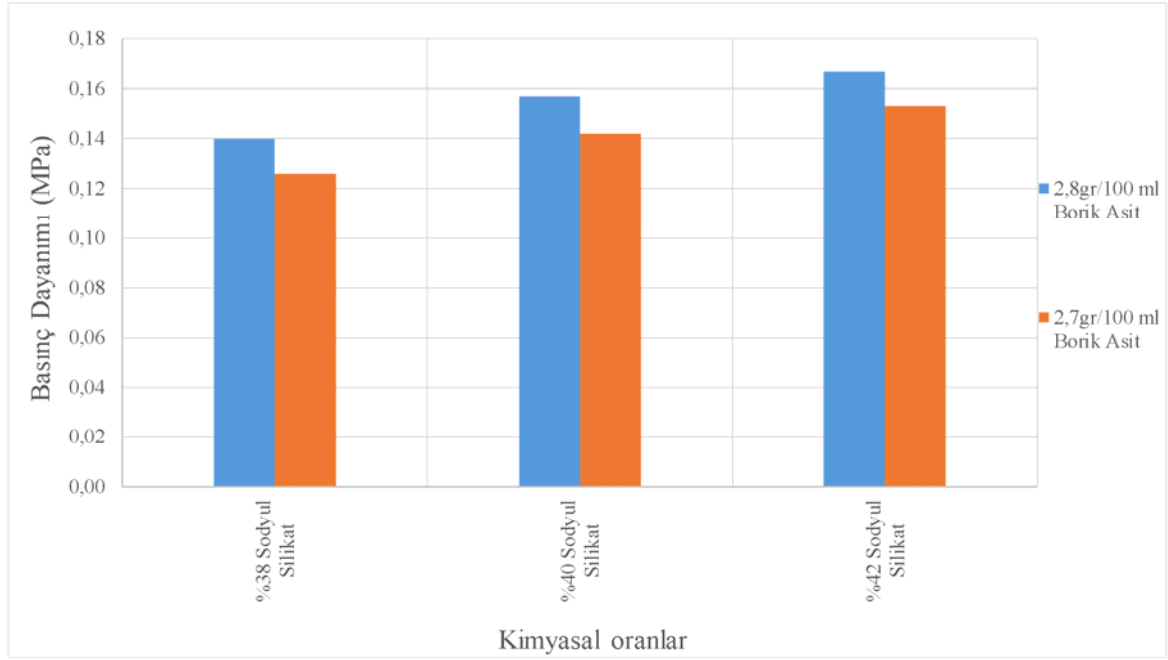
Yapılmış olan testlerde rölatif sıklık etkisi dikkate alındığında en yüksek basınç mukavemeti değerleri %70 rölatif sıklığa bağlı numunelerde, en düşük basınç mukavemeti ise %30 rölatif sıklığa bağlı numunelerde elde edilmiştir. Şekil 3.17.'de açık ortamda ve kür tankında bekletilen numunelerin 150. gündeki basınç mukavemeti değerleri rölatif sıklık değişkenine bağlı olarak gösterilmiştir. Yapılmış deneyler sonucunda en yüksek basınç mukavemeti ile en düşük basınç mukavemeti arasında %23 mertebesinde bir fark oluşmuştur.



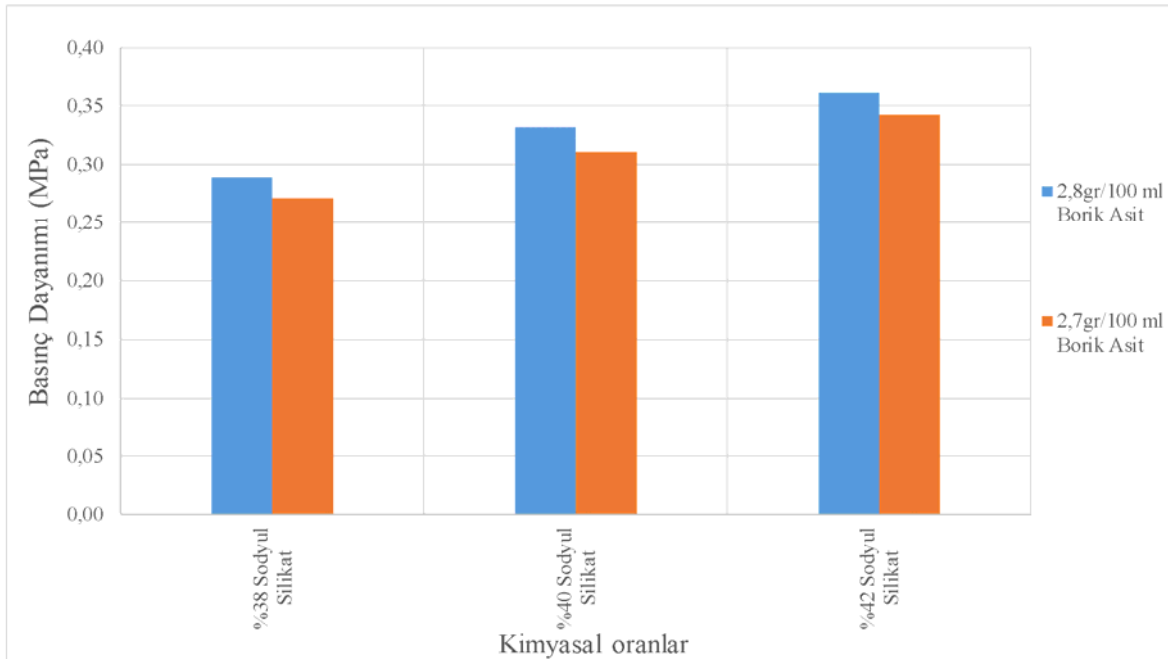
Şekil 3.17. Kür tankı ve açık ortamda bekleyen numunelerin rölatif sıklığa bağlı 150. gündeki ortalama basınç mukavemetleri

Şekil 3.18. ve 3.19’da açık ortam ve kuru ortamda bekleyen numunelerin sodyum silikat ve borik asit oranına bağlı olarak değişen 150. gündeki ortalama basınç mukavemet değerleri verilmiştir. Eşit sodyum silikat oranı, farklı miktarda (2,7-2,8 gr/100 ml) borik asit içeren kimyasallar ile yapılan enjeksiyon işlemleri sonucunda elde edilen mukavemet değerleri göz önüne alındığında, 100 ml. su çözeltisindeki borik asit miktarının 2,7 gramdan 2,8 grama artırılması ile mukavemette %5 ile %11 arasında değişen artışlar gözlemlenmiştir.

Eşit miktarda borik asit içeren fakat farklı sodyum silikat içeriğine (%38, %40 ve %42) sahip kimyasal karışımlar ile yapılan enjeksiyonlar sonucunda elde edilen basınç mukavemetleri incelendiğinde ise en yüksek basınç dayanımının, %42 sodyum silikat yoğunluğuna sahip G grubu kimyasallar ile yapılan enjeksiyon deneylerinde elde edildiği belirlenmiştir (0,13-0,67 MPa). En düşük basınç mukavemeti değerleri ise %38 oranında Sodyum silikat kullanılan E grubu kimyasal karışımlarda elde edilmiştir (0,11-0,53 MPa). Her iki mukavemet değeri incelendiğinde, sodyum silikat içeriğinin %38’den %42’ye çıkarılması ile ortalama %21-27 oranında mukavemet artışı sağlanmıştır.



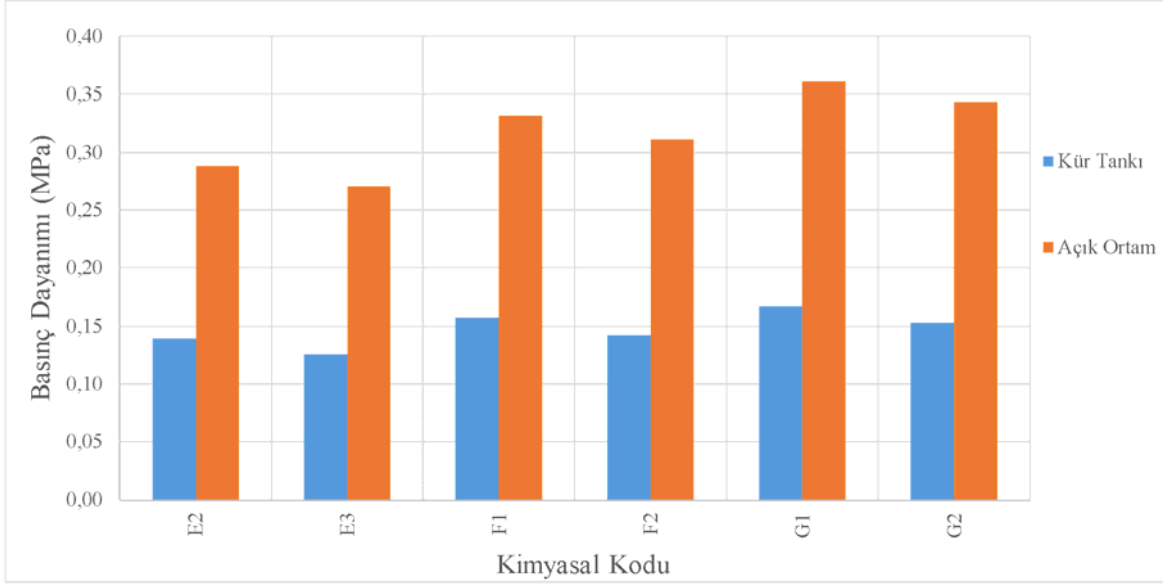
Şekil 3.18. Kür tankında bekleyen numunelerin değişen sodyum silikat ve borik asit içeriğine bağlı olarak 150. gündeki ortalama basınç mukavemetleri



Şekil 3.19. Açık ortamda bekleyen numunelerin değişen sodyum silikat ve borik asit içeriğine bağlı olarak 150. gündeki ortalama basınç mukavemetleri

Enjeksiyon işlemleri yapılan numunelerin basınç mukavemetlerinin ortam koşuluna bağlı olarak incelenmesi amacıyla numuneler kür tankında su içinde ve laboratuvarında açık havada bekletilmiştir. Şekil 3.20.'de 150. günde serbest basınç testi yapılan numunelerin basınç

mukavemeti değerlerine yer verilmiştir. Aynı kimyasal solüsyon ile enjeksiyonu yapılan numunelerin açık havada bekletilmesi ile kür tankı içerisinde bekletilmesi irdelendiğinde, açık havada bekletilen numunelerin basınç mukavemetinin, kür tankında bekletilenlere oranla 2,07-2,19 kat daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

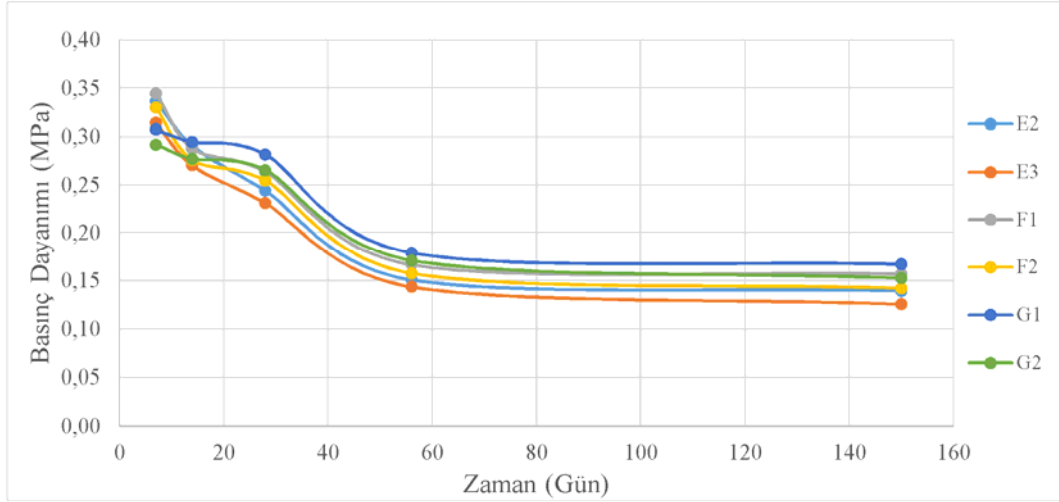


Şekil 3.20. Kür tankı ve açık ortamda bekleyen numunelerin değişen sodyum silikat ve borik asit içeriğine bağlı olarak 150. gündeki ortalama basınç mukavemetleri

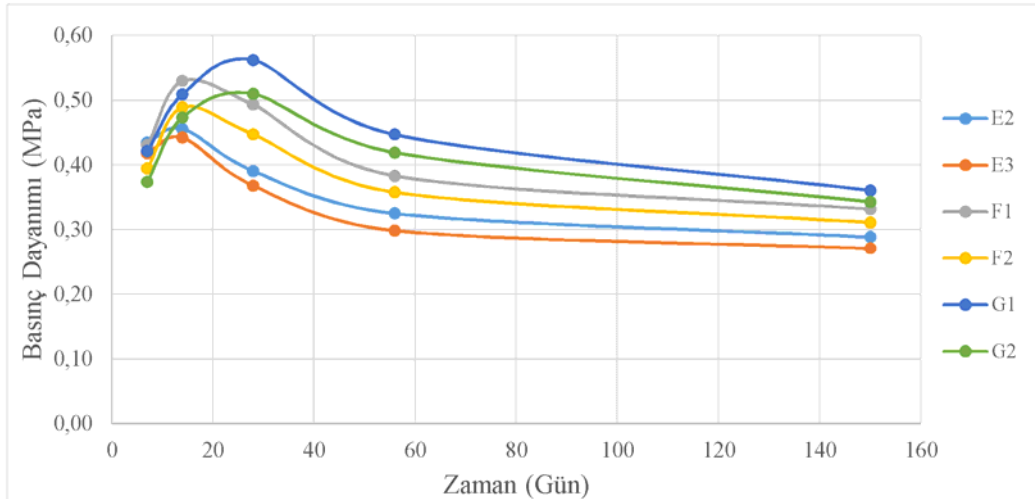
Kimyasal enjeksiyonu gerçekleştirilen numunelerin zamana bağlı mukavemetlerinin irdelenmesi amacıyla numuneler 7, 14, 28, 56 ve 150. günlerde serbest basınç testine tabi tutulmuştur. Enjeksiyon sonrasında kür tankında bekletilen numunelerin en yüksek basınç mukavemeti 7. günde elde edilmiş, sonrasında zamana bağlı olarak 56. güne kadar azalmış ve 150. gün mukavemet verileri dikkate alındığında 56. günden sonra mukavemetinin sabitleştiği gözlenmiştir (Şekil 3.21.).

Açıkta bekletilen numunelerde ise en yüksek basınç mukavemeti E ve F grubu kimyasal karışımların kullanıldığı numunelerde 14. günde, G grubu kimyasal solüsyon kullanılan numunelerde ise 28. günde elde edilmiştir (Şekil 3.22.). Bu farklılığın jelleşme süresi ile doğrudan ilintili olduğu anlaşılmaktadır.

Açıkta bekletilen numuneler üzerinde gerçekleştirilen serbest basınç testlerinde, 56. gün ve 150. gün mukavemet değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür.

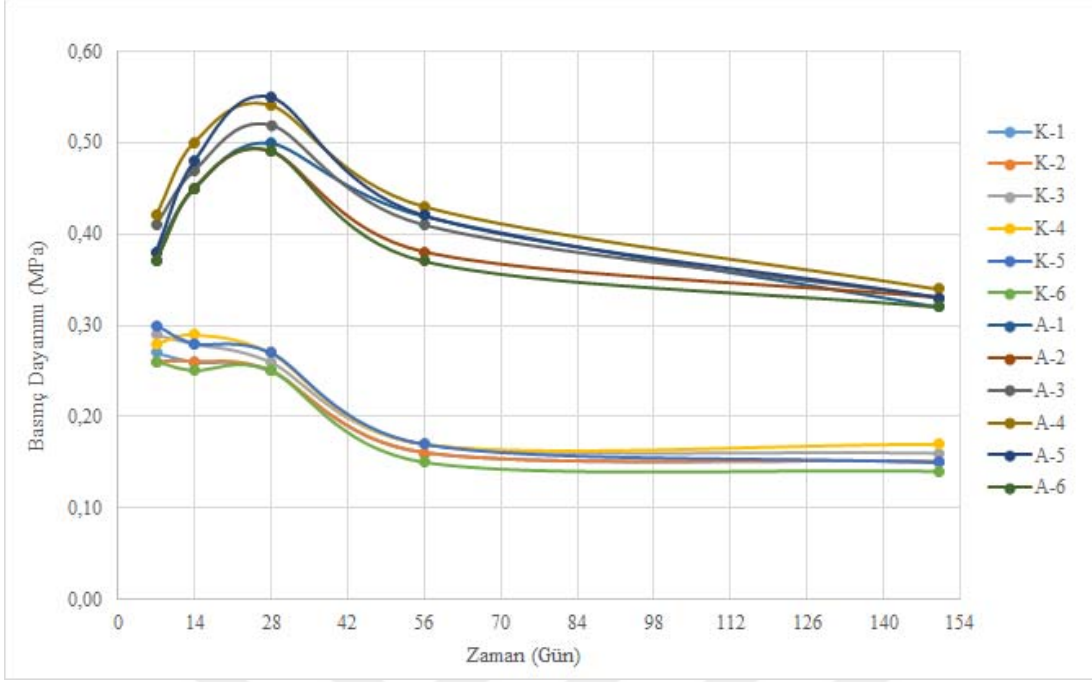


Şekil 3.21 Kür tankında bekletilen numunelerin zamana bağlı ortalama basınç dayanımları

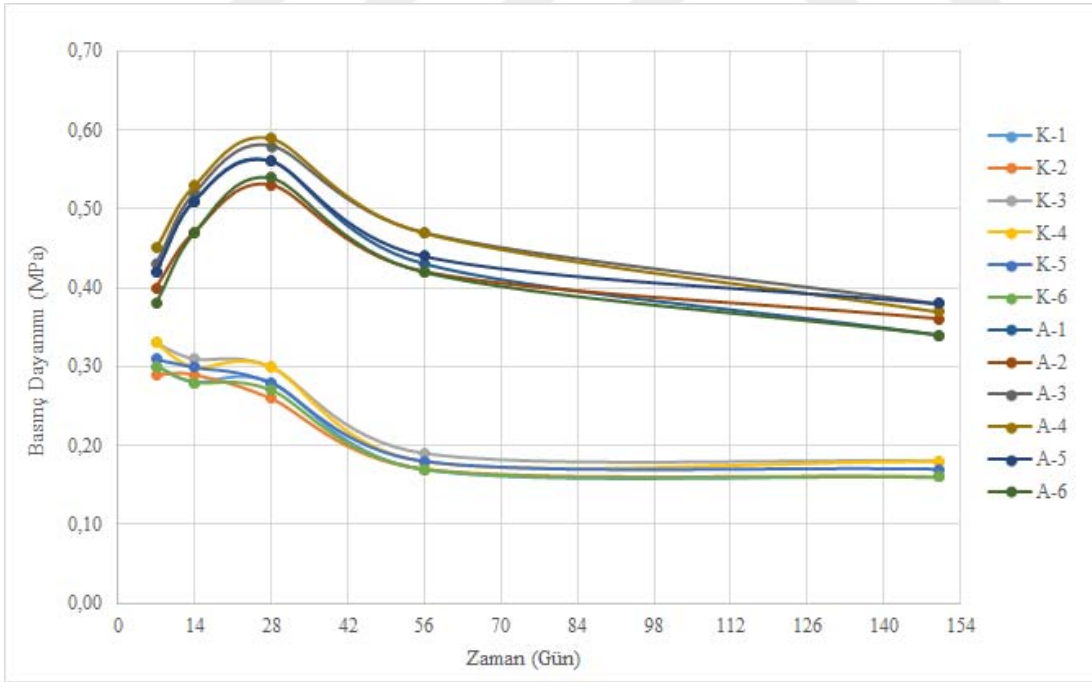


Şekil 3.22. Açık ortamda bekletilen numunelerin zamana bağlı ortalama basınç dayanımları

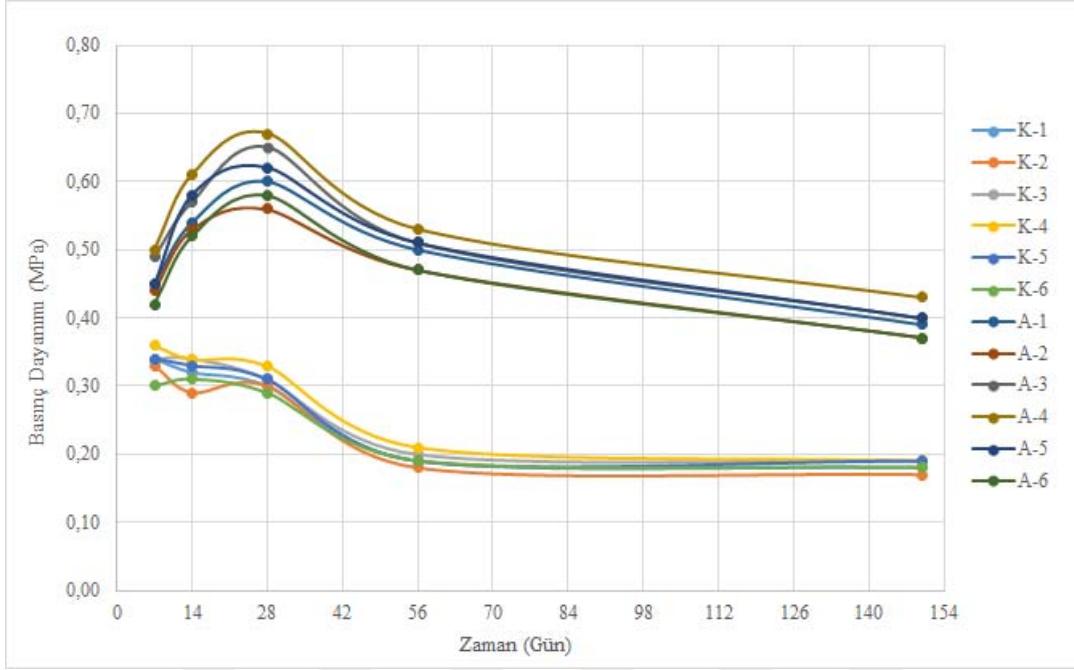
Yapılmış olan tüm deneyler neticesinde en yüksek basınç mukavemetlerinin yüksek sodyum silikat ve yüksek borik asit içerikli ve iyi derecelenmiş kum numunelere ait olduğu anlaşılmıştır. Yapılmış olan testlerde en yüksek basınç mukavemeti 28. günde teste tabi tutulan, açıkta bekletilen, %70 rölatif sıklığa, %50 ince ve %50 orta kum gradasyonuna sahip G1 kodlu solüsyonla enjeksiyon işlemi yapılan numune üzerinde elde edilmiş ve 0,67 MPa basınç değerine ulaşılmıştır. En düşük mukavemet değeri ise kür tankında bekletilen, 150. günde kırımı gerçekleştirilen, E3 kodlu solüsyonla enjeksiyonu yapılan, %100 orta kum gradasyonuna, %30 rölatif sıklığa sahip numune üzerinde, 0,11 MPa değerinde elde edilmiştir (EK-2). Elde edilen tüm basınç dayanımları grafik üzerine yansıtılarak Şekil 3.23.-3.40.'da gösterilmiştir.



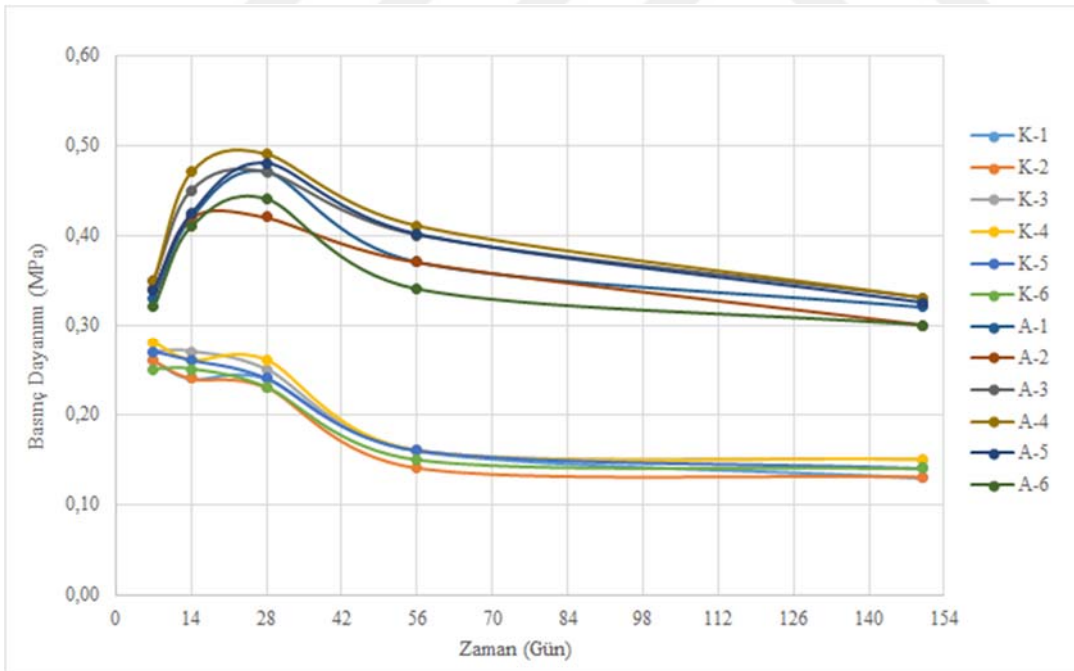
Şekil 3.23. G1 Kimyasalı enjeksiyonlu, %30 rölatif sıklıktaki zemin numunesi için mukavemet zaman ilişkisi



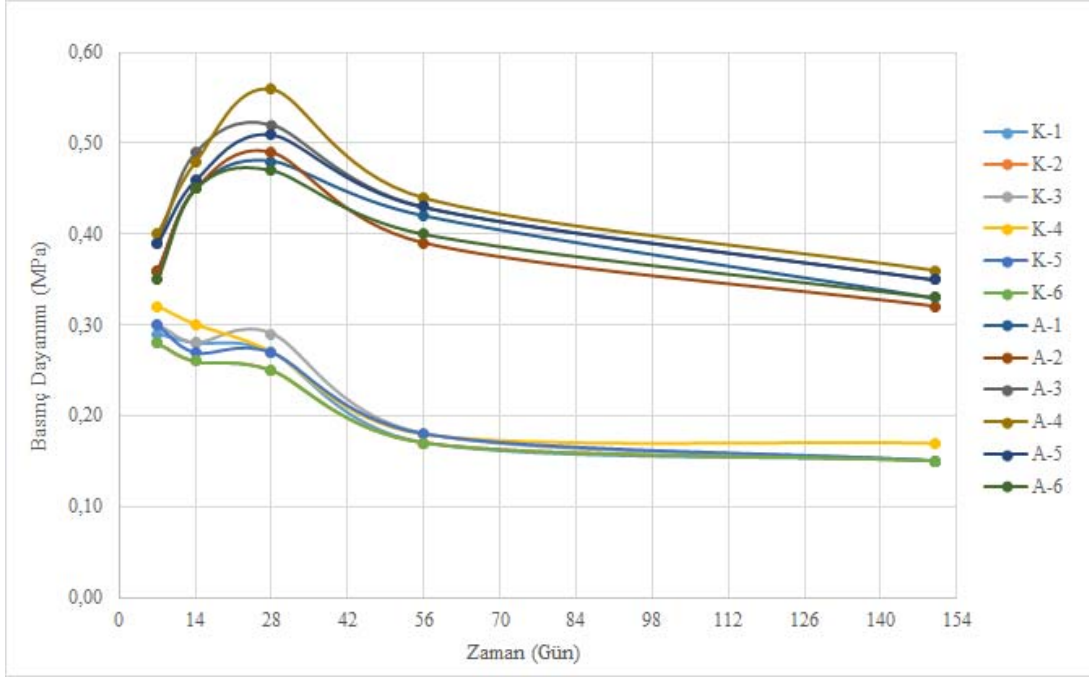
Şekil 3.24. G1 Kimyasalı enjeksiyonlu, %50 rölatif sıklıktaki zemin numunesi için mukavemet zaman ilişkisi



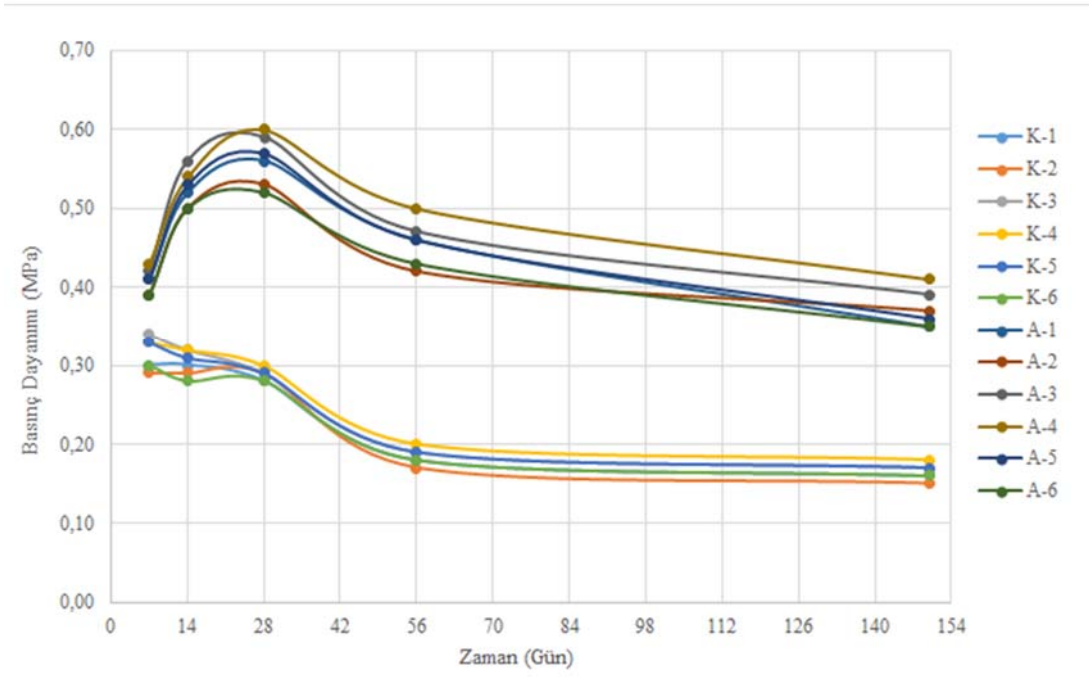
Şekil 3.25. G1 Kimyasalı enjeksiyonlu, %70 rölâtif sıklıktaki zemin numunesi için mukavemet zaman ilişkisi



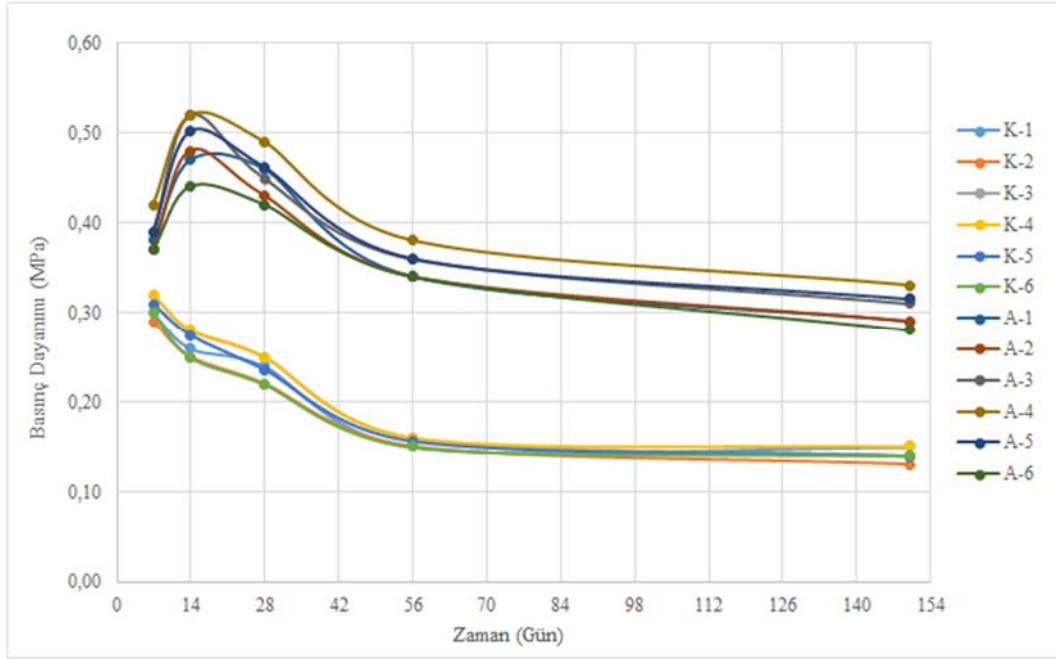
Şekil 3.26. G2 Kimyasalı enjeksiyonlu, %30 rölâtif sıklıktaki zemin numunesi için mukavemet zaman ilişkisi



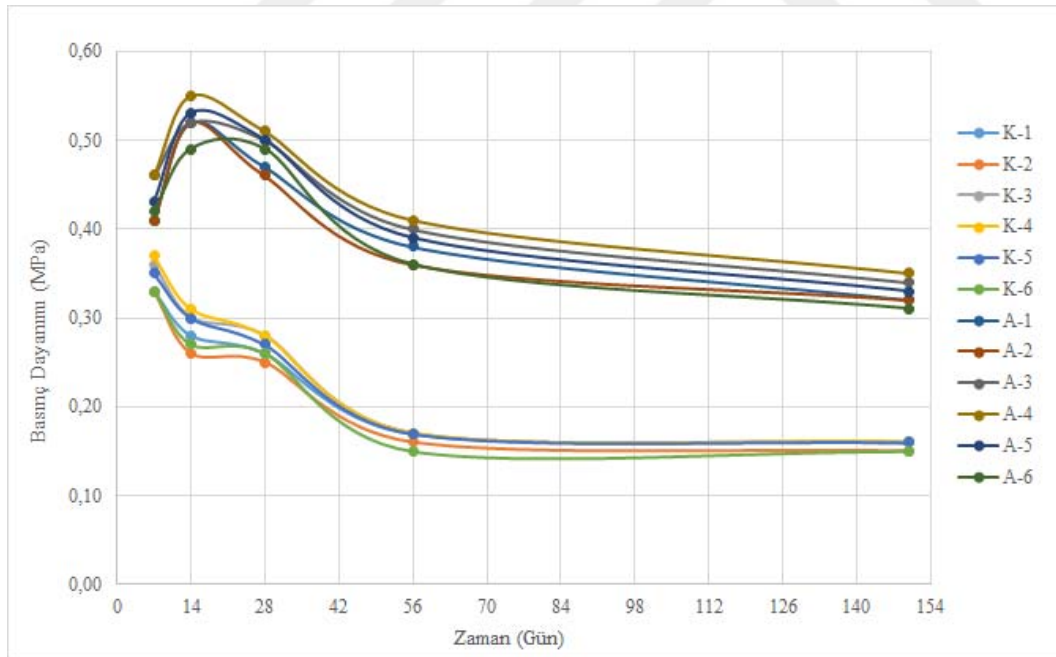
Şekil 3.27. G2 Kimyasalı enjeksiyonlu, %50 rölatif sıklıktaki zemin numunesi için mukavemet zaman ilişkisi



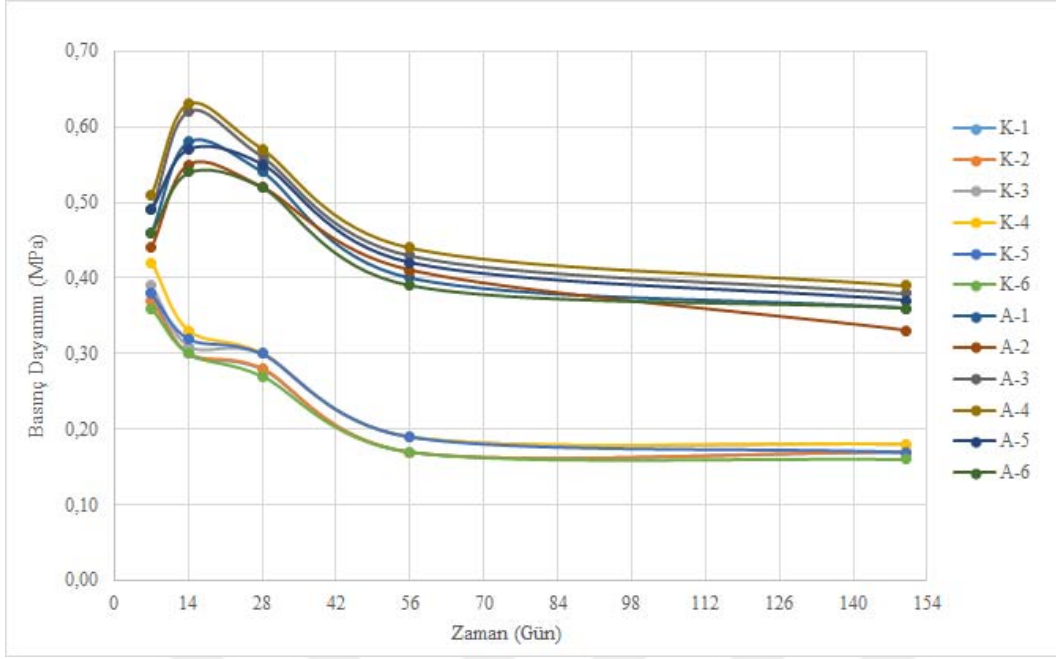
Şekil 3.28. G2 Kimyasalı, %70 rölatif sıklıktaki zemin numunesi için mukavemet zaman ilişkisi



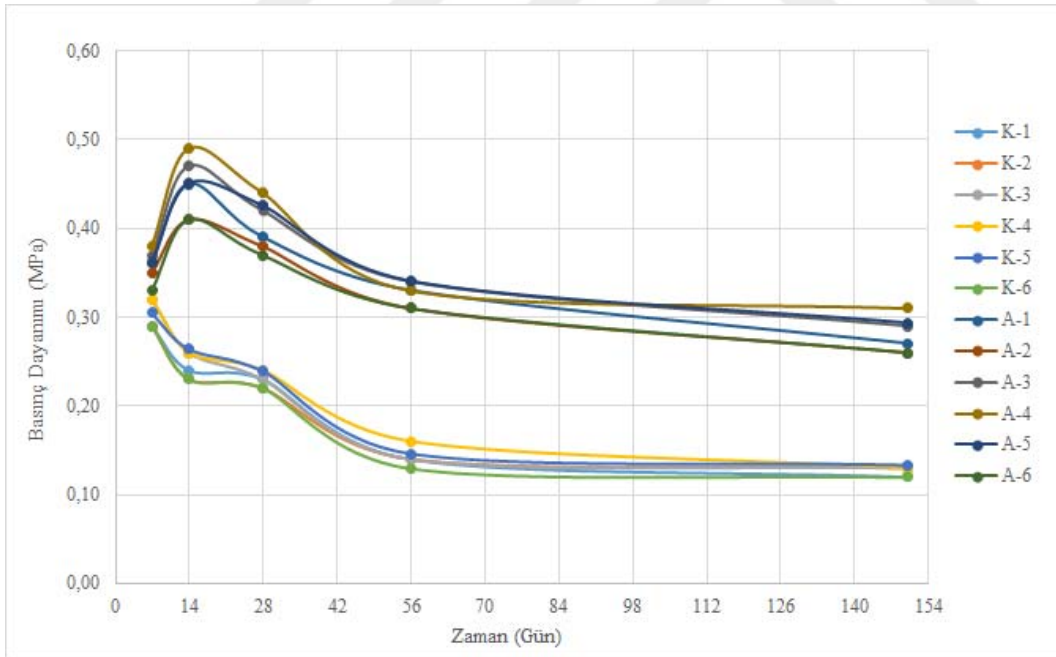
Şekil 3.29. F1 Kimyasalı enjeksiyonlu, %30 rölatif sıklıktaki zemin numunesi için mukavemet zaman ilişkisi



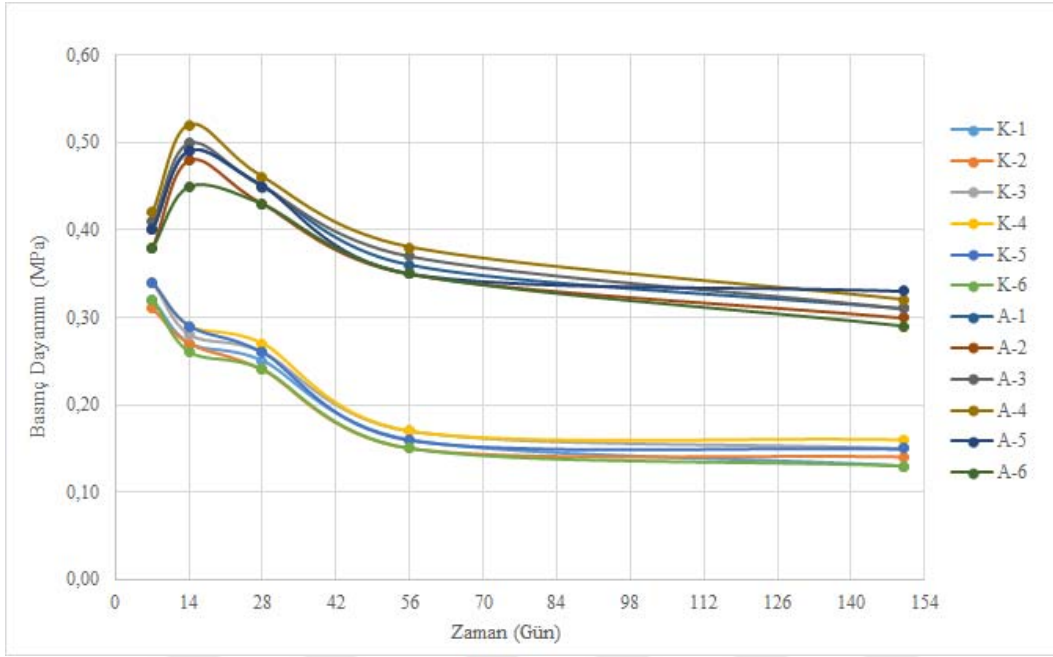
Şekil 3.30. F1 Kimyasalı enjeksiyonlu, %50 rölatif sıklıktaki zemin numunesi için mukavemet zaman ilişkisi



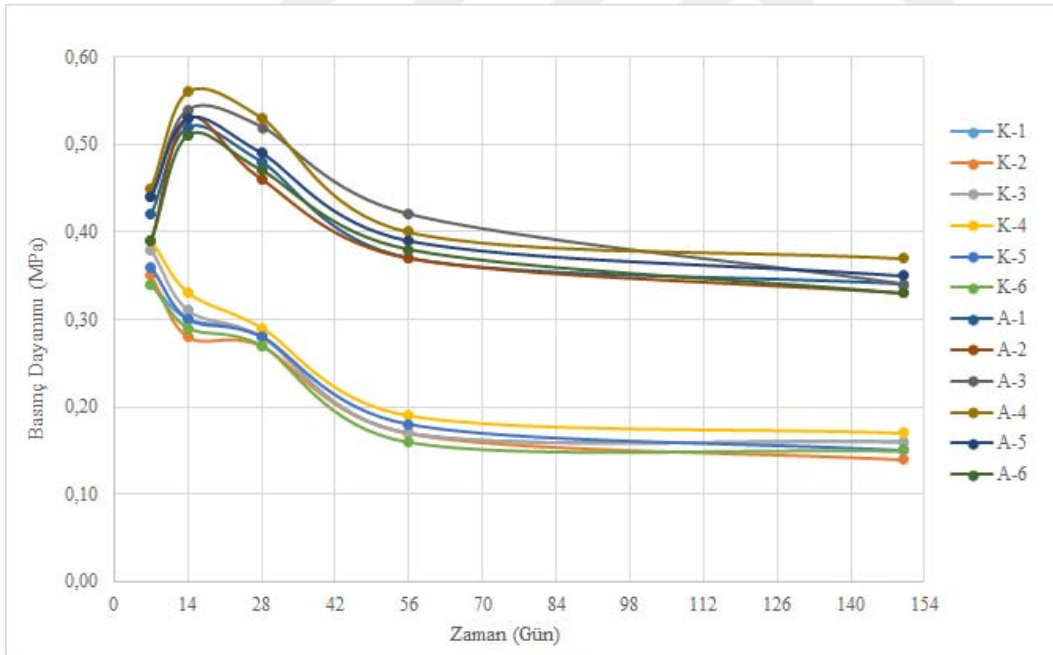
Şekil 3.31. F1 Kimyasalı enjeksiyonlu, %70 rölatif sıklıktaki zemin numunesi için mukavemet zaman ilişkisi



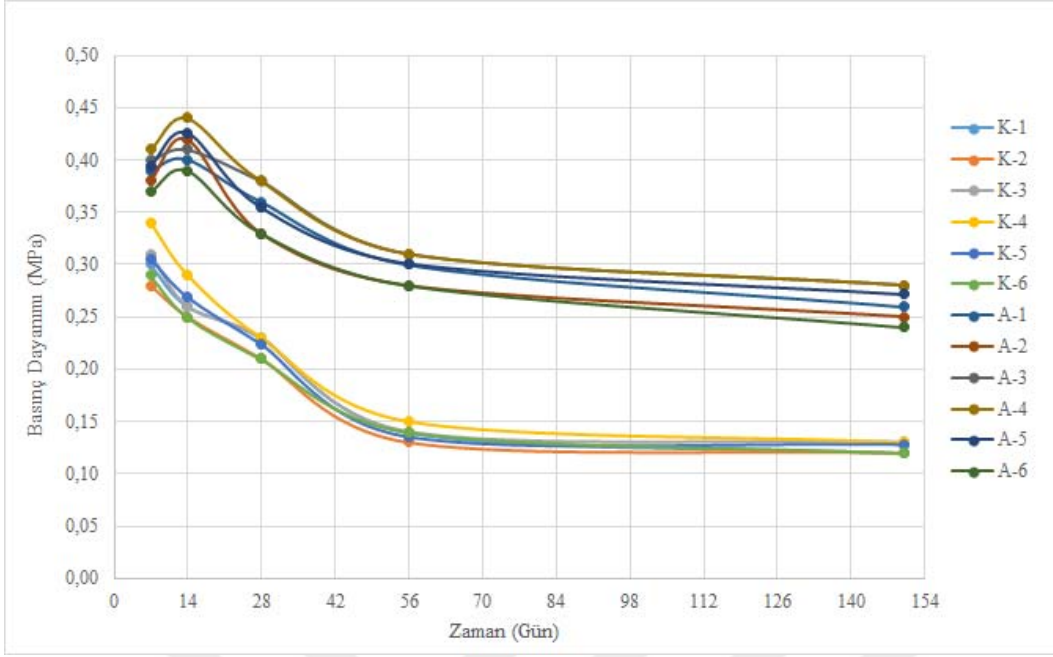
Şekil 3.32. F2 Kimyasalı enjeksiyonlu, %30 rölatif sıklıktaki zemin numunesi için mukavemet zaman ilişkisi



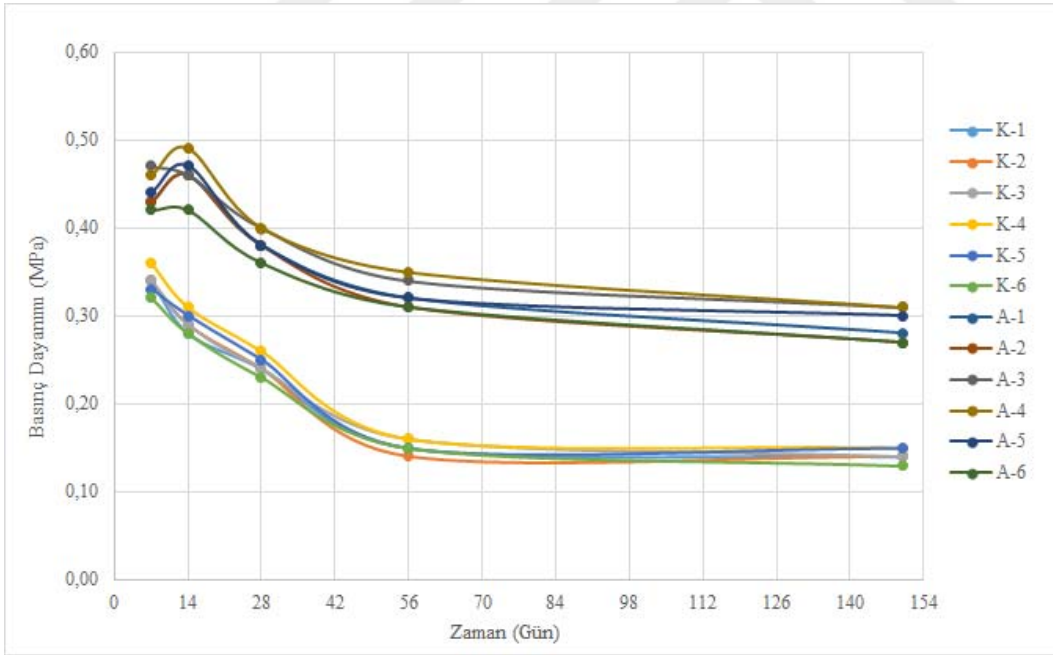
Şekil 3.33. F2 Kimyasalı enjeksiyonlu, %50 rölatif sıklıktaki zemin numunesi için mukavemet zaman ilişkisi



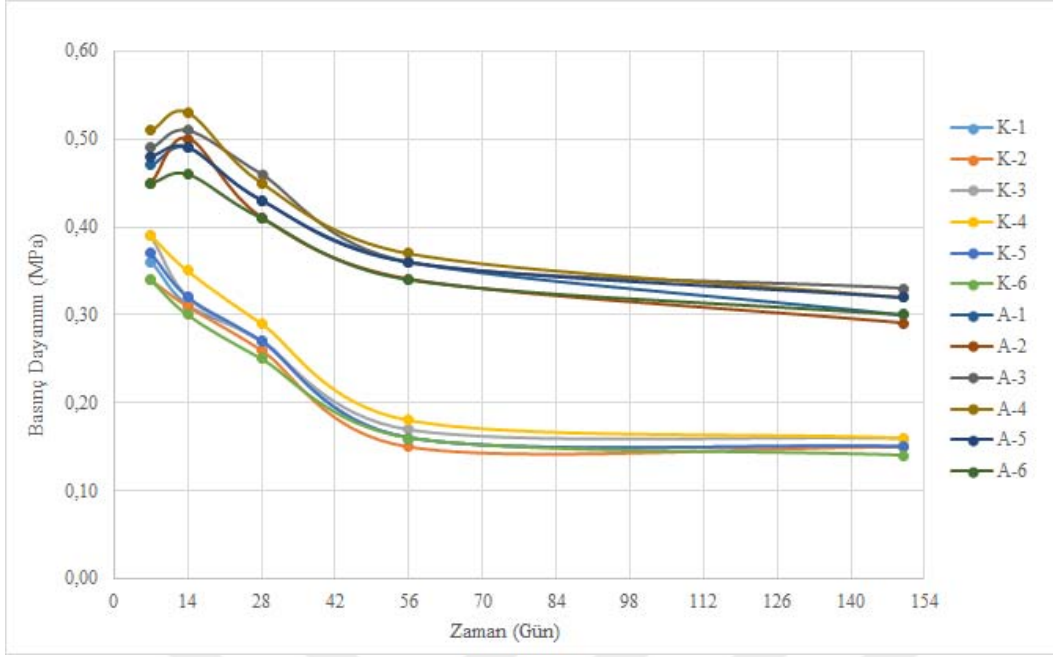
Şekil 3.34. F2 Kimyasalı enjeksiyonlu, %70 rölatif sıklıktaki zemin numunesi için mukavemet zaman ilişkisi



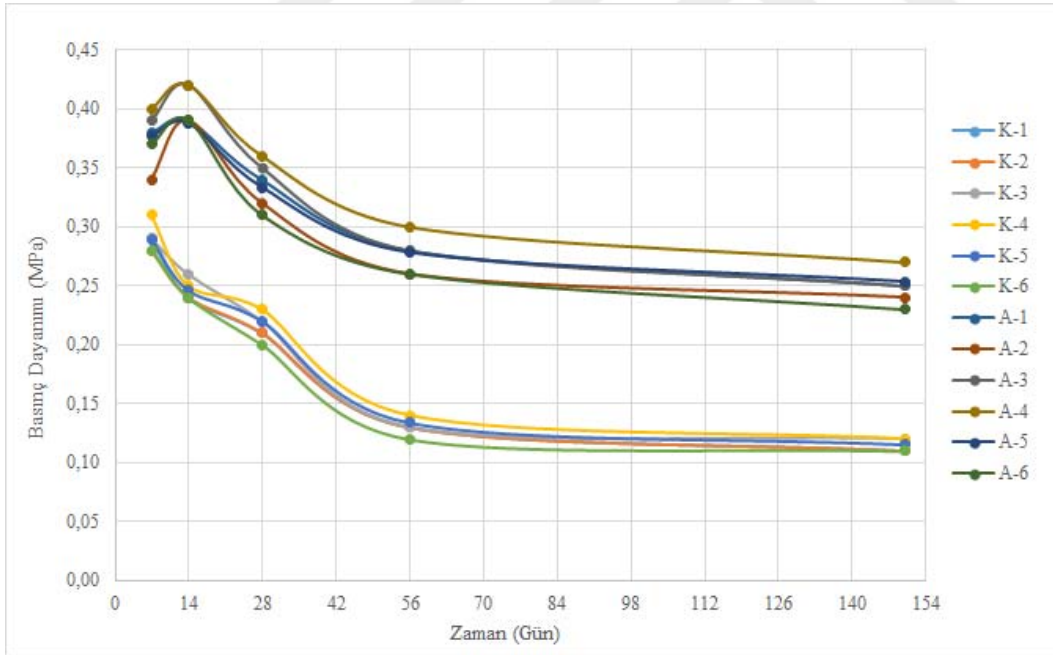
Şekil 3.35. E2 Kimyasalı enjeksiyonlu, %30 rölâtif sıklıktaki zemin numunesi için mukavemet zaman ilişkisi



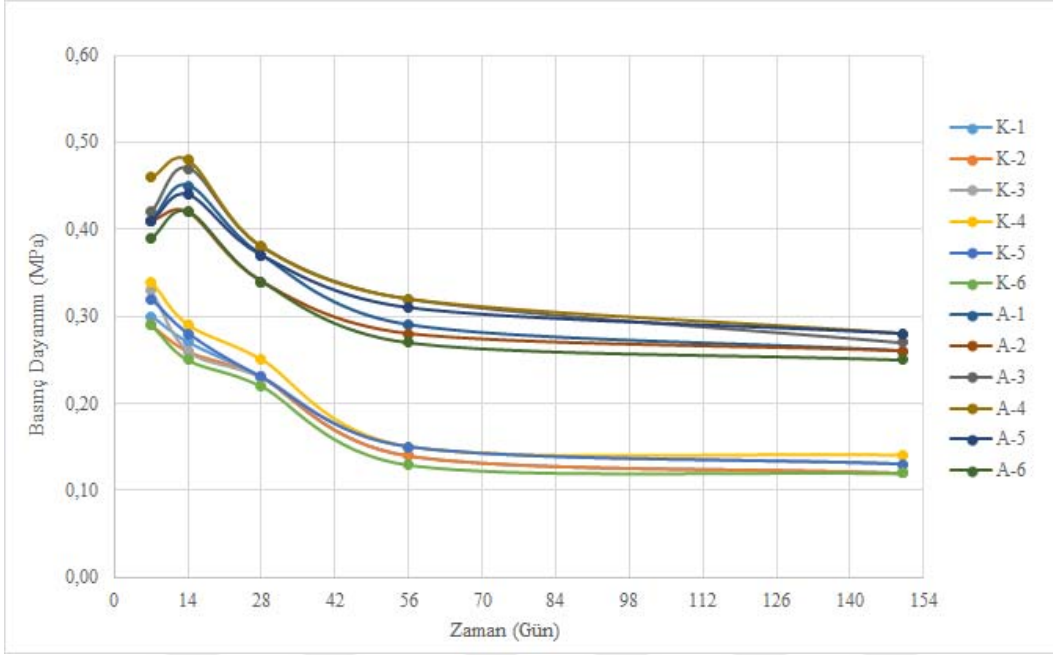
Şekil 3.36. E2 Kimyasalı enjeksiyonlu, %50 rölâtif sıklıktaki zemin numunesi için mukavemet zaman ilişkisi



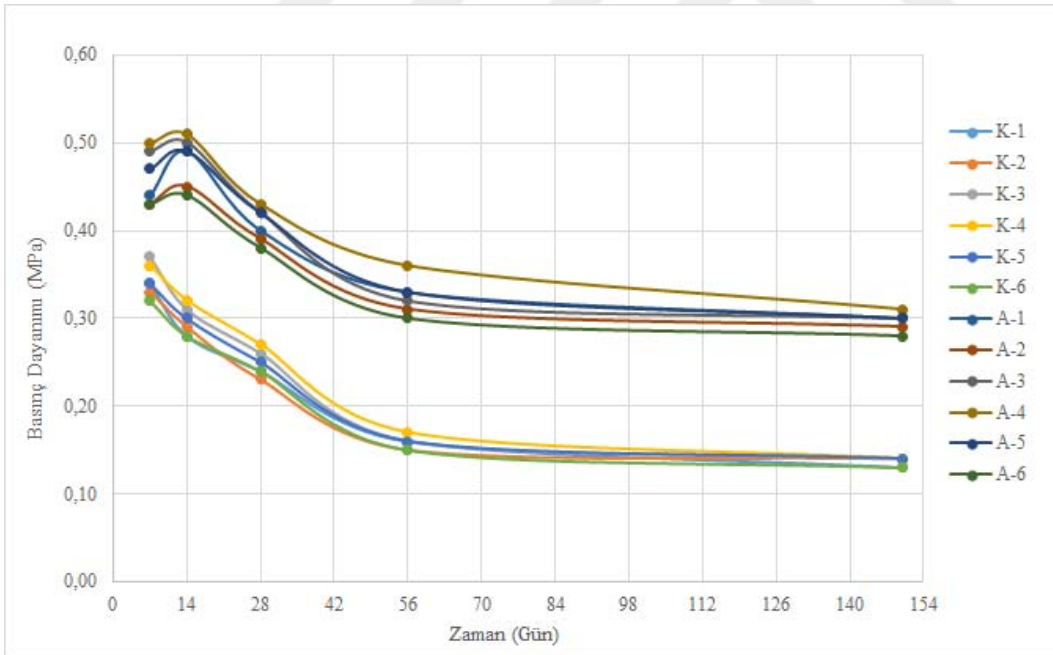
Şekil 3.37. E2 Kimyasalı enjeksiyonlu, %70 rölatif sıklıktaki zemin numunesi için mukavemet zaman ilişkisi



Şekil 3.38. E3 Kimyasalı enjeksiyonlu, %30 rölatif sıklıktaki zemin numunesi için mukavemet zaman ilişkisi



Şekil 3.39. E3 Kimyasalı enjeksiyonlu, %50 rölatif sıklıktaki zemin numunesi için mukavemet zaman ilişkisi



Şekil 3.40. E3 Kimyasalı enjeksiyonlu, %70 rölatif sıklıktaki zemin numunesi için mukavemet zaman ilişkisi

3.11. Kimyasal Enjeksiyonu Gerçekleştirilen Numunelerin Permeabilite Deneyleri

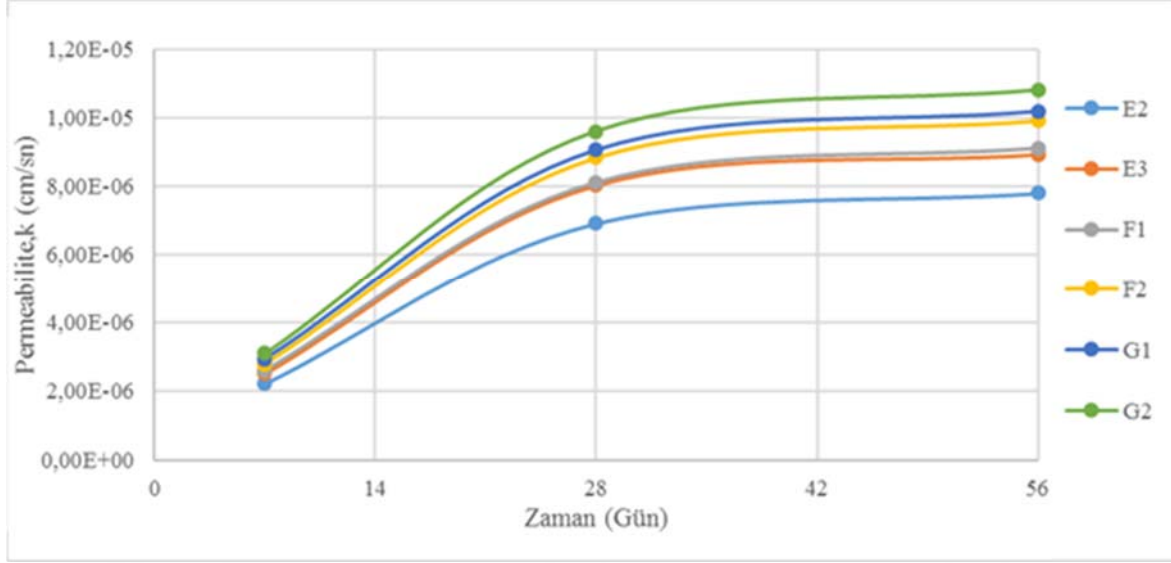
Kimyasal enjeksiyonu gerçekleştirilen numunelerin geçirimsizliği, ASTM standardı [25] dikkate alınarak düşük seviyeli permeabilite testleri ile belirlenmiştir. Gradasyon, rölatif sıklık, kimyasal karışım ve zaman etkilerinin permeabilite değerlerine olan etkisinin araştırılması amacıyla toplamda 54 adet numune üzerinde 7., 28. ve 56. günlerde permeabilite testleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, detayları Çizelge 3.16.'da yer aldığı üzere verilen toplamda 162 adet test gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.16. Basınç testine tabi tutulan numunelere ait değişkenler

Değişken	Açıklama	Varyasyon Adedi
Kimyasal Solüsyon Tipi	E2, E3, F1, F2, G1, G2 kodlu kimyasallar	6
Sıklık	%30,%50,%70 rölatif sıklık oranları	3
Gradasyon	%100 İnce kum %50 İnce - %50 Orta kum %100 Orta Kum	3
Permeabilite Testinin Gerçekleştirildiği Zaman	7-28-56. Günler	3
Toplam Test Sayısı		162

Enjeksiyonu tamamlanan numuneler moldlarından çıkartılmadan 7. güne kadar bekletilmiş ve deney düzeneğine bağlanarak geçirimsizlik değerleri elde edilmiştir. Test sonrası aynı numuneler 28. ve 56. günlerde tekrardan deney düzeneğine bağlanarak zamana bağlı değişim gözlenmiştir.

Permeabilite testlerinde başlangıç hidrolik eğim 15 alınmıştır. Şekil 3.41.'de enjeksiyon işlemleri gerçekleştirilen tüm numunelerin zamana bağlı ortalama geçirimsizlik değerlerine yer verilmiştir. Yapılan testler neticesinde enjeksiyonları yapılan numunelerin 7. gün ile 28. gün permeabilite değerleri arasında 3 kat mertebesinde bir fark olduğu, sonrasında ise sabitleştiği belirlenmiştir. Numunelerin geçirgenliğine ilişkin bu davranış ayrıca sinerez-zaman ilişkisi ile de uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Kimyasal karışımların sinerez oranlarının 28. günden sonra sabitleşmesi, permeabilitenin doğrudan sinereze bağlı olduğunu göstermiştir. Permeabilite testlerinde elde edilen bir diğer önemli sonuç; 6 kimyasal karışım içerisinde en yüksek sinerez oranına sahip olan G2 kimyasalı ile enjekte edilen numunelerde en yüksek geçirimsizlik, en düşük sinerez oranına sahip olan E2 kimyasalı ile enjekte edilen numunelerde ise en düşük geçirimsizlik katsayıları belirlenmiştir. Bu doğrultuda sinerez esnasında açığa çıkan sıvının doğrudan permeabiliteyi etkilediği belirlenmiştir.



Şekil 3.41. Kimyasal enjeksiyonlu numunelerin zamana bağlı ortalama permeabilite değerleri

Enjeksiyon öncesi kum numunelere ait geçirimsizlik değerleri enjeksiyon sonrası 56. gün geçirimsizlik değerleri ile kıyaslanmış ve Çizelge 3.17.'de verilmiştir. Elde edilen değerler neticesinde enjeksiyonu yapılan kum numunelerin permeabilitesi %100 ince kum gradasyonundaki numuneler için ortalama 300 kat, %50 ince - %50 orta kum gradasyonundaki numuneler için ortalama 1000 kat, %100 orta kum gradasyonuna sahip kum numuneler için ise ortalama 10000 kat azalmıştır.

Çizelge 3.17. Enjeksiyon öncesi ve sonrası numunelerin permeabilite değerleri

Rölatif sıklık oranı	Gradasyon	Permeabilite değerleri (cm/sn)						
		Enjeksiyon öncesi	Kimyasal karışıma bağlı enjeksiyon sonrası 56. gün permeabilite değerleri					
			E2	E3	F1	F2	G1	G2
30%	%100 İnce Kum	$3,22 \times 10^{-3}$	$6,35 \times 10^{-6}$	$7,37 \times 10^{-6}$	$7,17 \times 10^{-6}$	$7,87 \times 10^{-6}$	$8,16 \times 10^{-6}$	$8,82 \times 10^{-6}$
	%50 İnce %50 Orta Kum	$9,95 \times 10^{-3}$	$7,24 \times 10^{-6}$	$8,57 \times 10^{-6}$	$8,65 \times 10^{-6}$	$9,57 \times 10^{-6}$	$9,46 \times 10^{-6}$	$9,79 \times 10^{-6}$
	%100 Orta Kum	$1,48 \times 10^{-1}$	$1,52 \times 10^{-5}$	$1,73 \times 10^{-5}$	$1,80 \times 10^{-5}$	$1,93 \times 10^{-5}$	$2,02 \times 10^{-5}$	$2,13 \times 10^{-5}$
50%	%100 İnce	$2,11 \times 10^{-3}$	$5,76 \times 10^{-6}$	$6,21 \times 10^{-6}$	$6,41 \times 10^{-6}$	$7,10 \times 10^{-6}$	$7,43 \times 10^{-6}$	$7,89 \times 10^{-6}$
	%50 İnce %50 Orta	$8,89 \times 10^{-3}$	$6,45 \times 10^{-6}$	$7,55 \times 10^{-6}$	$7,74 \times 10^{-6}$	$8,57 \times 10^{-6}$	$8,26 \times 10^{-6}$	$8,98 \times 10^{-6}$
	%100 Orta	$1,11 \times 10^{-1}$	$1,11 \times 10^{-5}$	$1,24 \times 10^{-5}$	$1,28 \times 10^{-5}$	$1,40 \times 10^{-5}$	$1,45 \times 10^{-5}$	$1,54 \times 10^{-5}$
70%	%100 İnce	$1,07 \times 10^{-3}$	$5,33 \times 10^{-6}$	$5,98 \times 10^{-6}$	$6,19 \times 10^{-6}$	$6,88 \times 10^{-6}$	$7,05 \times 10^{-6}$	$7,26 \times 10^{-6}$
	%50 İnce %50 Orta	$6,19 \times 10^{-3}$	$5,81 \times 10^{-6}$	$6,90 \times 10^{-6}$	$6,85 \times 10^{-6}$	$7,30 \times 10^{-6}$	$7,52 \times 10^{-6}$	$7,88 \times 10^{-6}$
	%100 Orta	$9,98 \times 10^{-2}$	$6,93 \times 10^{-6}$	$7,96 \times 10^{-6}$	$8,04 \times 10^{-6}$	$8,68 \times 10^{-6}$	$9,15 \times 10^{-6}$	$9,92 \times 10^{-6}$

Gerçekleştirilen permeabilite deneyleri sonucunda elde edilen tüm değerler Çizelge 3.18., 3.19. ve 3.20.'de verilmiştir.

Çizelge 3.18. E2 ve E3 kimyasal enjeksiyonlu numunelerin permeabilite sonuçları

Numune No	Kimyasal Enjeksiyon	Rölatif Sıklık	Gradasyon	Zaman (Gün)		
				7	28	56
1	E2	30%	%100 İnce	$1,92 \times 10^{-6}$	$5,72 \times 10^{-6}$	$6,35 \times 10^{-6}$
2			%50 İnce %50 Orta	$2,19 \times 10^{-6}$	$6,52 \times 10^{-6}$	$7,24 \times 10^{-6}$
3			%100 Orta	$4,62 \times 10^{-6}$	$1,37 \times 10^{-5}$	$1,52 \times 10^{-5}$
4		50%	%100 İnce	$1,64 \times 10^{-6}$	$5,25 \times 10^{-6}$	$5,76 \times 10^{-6}$
5			%50 İnce %50 Orta	$1,84 \times 10^{-6}$	$5,88 \times 10^{-6}$	$6,45 \times 10^{-6}$
6			%100 Orta	$3,15 \times 10^{-6}$	$1,01 \times 10^{-5}$	$1,11 \times 10^{-5}$
7		70%	%100 İnce	$1,35 \times 10^{-6}$	$4,44 \times 10^{-6}$	$5,33 \times 10^{-6}$
8			%50 İnce %50 Orta	$1,47 \times 10^{-6}$	$4,84 \times 10^{-6}$	$5,81 \times 10^{-6}$
9			%100 Orta	$1,75 \times 10^{-6}$	$5,77 \times 10^{-6}$	$6,93 \times 10^{-6}$
10	E3	30%	%100 İnce	$2,16 \times 10^{-6}$	$6,65 \times 10^{-6}$	$7,37 \times 10^{-6}$
11			%50 İnce %50 Orta	$2,54 \times 10^{-6}$	$7,60 \times 10^{-6}$	$8,57 \times 10^{-6}$
12			%100 Orta	$5,30 \times 10^{-6}$	$1,59 \times 10^{-5}$	$1,73 \times 10^{-5}$
13		50%	%100 İnce	$1,96 \times 10^{-6}$	$5,90 \times 10^{-6}$	$6,21 \times 10^{-6}$
14			%50 İnce %50 Orta	$1,98 \times 10^{-6}$	$7,08 \times 10^{-6}$	$7,55 \times 10^{-6}$
15			%100 Orta	$3,59 \times 10^{-6}$	$1,12 \times 10^{-5}$	$1,24 \times 10^{-5}$
16		70%	%100 İnce	$1,60 \times 10^{-6}$	$5,28 \times 10^{-6}$	$5,98 \times 10^{-6}$
17			%50 İnce %50 Orta	$1,56 \times 10^{-6}$	$5,77 \times 10^{-6}$	$6,90 \times 10^{-6}$
18			%100 Orta	$1,89 \times 10^{-6}$	$6,76 \times 10^{-6}$	$7,96 \times 10^{-6}$

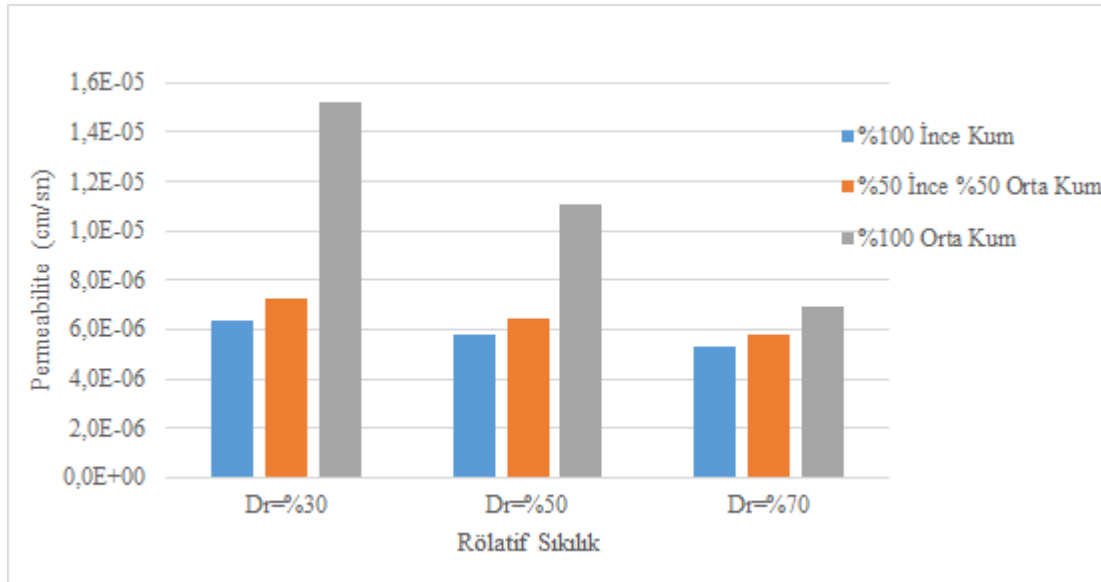
Çizelge 3.19. F1 ve F2 kimyasal enjeksiyonlu numunelerin permeabilite sonuçları

Numune No	Kimyasal Enjeksiyon	Rölatif Sıklık	Gradasyon	Zaman (Gün)		
				7	28	56
19	F1	30%	%100 İnce	$2,28 \times 10^{-6}$	$6,97 \times 10^{-6}$	$7,17 \times 10^{-6}$
20			%50 İnce %50 Orta	$2,46 \times 10^{-6}$	$8,01 \times 10^{-6}$	$8,65 \times 10^{-6}$
21			%100 Orta	$5,29 \times 10^{-6}$	$1,59 \times 10^{-5}$	$1,80 \times 10^{-5}$
22		50%	%100 İnce	$2,00 \times 10^{-6}$	$6,43 \times 10^{-6}$	$6,41 \times 10^{-6}$
23			%50 İnce %50 Orta	$2,17 \times 10^{-6}$	$7,13 \times 10^{-6}$	$7,74 \times 10^{-6}$
24			%100 Orta	$3,80 \times 10^{-6}$	$1,15 \times 10^{-5}$	$1,28 \times 10^{-5}$
25		70%	%100 İnce	$1,65 \times 10^{-6}$	$4,98 \times 10^{-6}$	$6,19 \times 10^{-6}$
26			%50 İnce %50 Orta	$1,67 \times 10^{-6}$	$5,41 \times 10^{-6}$	$6,85 \times 10^{-6}$
27			%100 Orta	$1,97 \times 10^{-6}$	$6,55 \times 10^{-6}$	$8,04 \times 10^{-6}$
28	F2	30%	%100 İnce	$2,48 \times 10^{-6}$	$7,69 \times 10^{-6}$	$7,87 \times 10^{-6}$
29			%50 İnce %50 Orta	$2,69 \times 10^{-6}$	$8,53 \times 10^{-6}$	$9,57 \times 10^{-6}$
30			%100 Orta	$5,69 \times 10^{-6}$	$1,72 \times 10^{-5}$	$1,93 \times 10^{-5}$
31		50%	%100 İnce	$2,26 \times 10^{-6}$	$7,17 \times 10^{-6}$	$7,10 \times 10^{-6}$
32			%50 İnce %50 Orta	$2,27 \times 10^{-6}$	$7,51 \times 10^{-6}$	$8,57 \times 10^{-6}$
33			%100 Orta	$4,07 \times 10^{-6}$	$1,26 \times 10^{-5}$	$1,40 \times 10^{-5}$
34		70%	%100 İnce	$1,68 \times 10^{-6}$	$5,52 \times 10^{-6}$	$6,88 \times 10^{-6}$
35			%50 İnce %50 Orta	$1,80 \times 10^{-6}$	$6,09 \times 10^{-6}$	$7,30 \times 10^{-6}$
36			%100 Orta	$2,04 \times 10^{-6}$	$7,27 \times 10^{-6}$	$8,68 \times 10^{-6}$

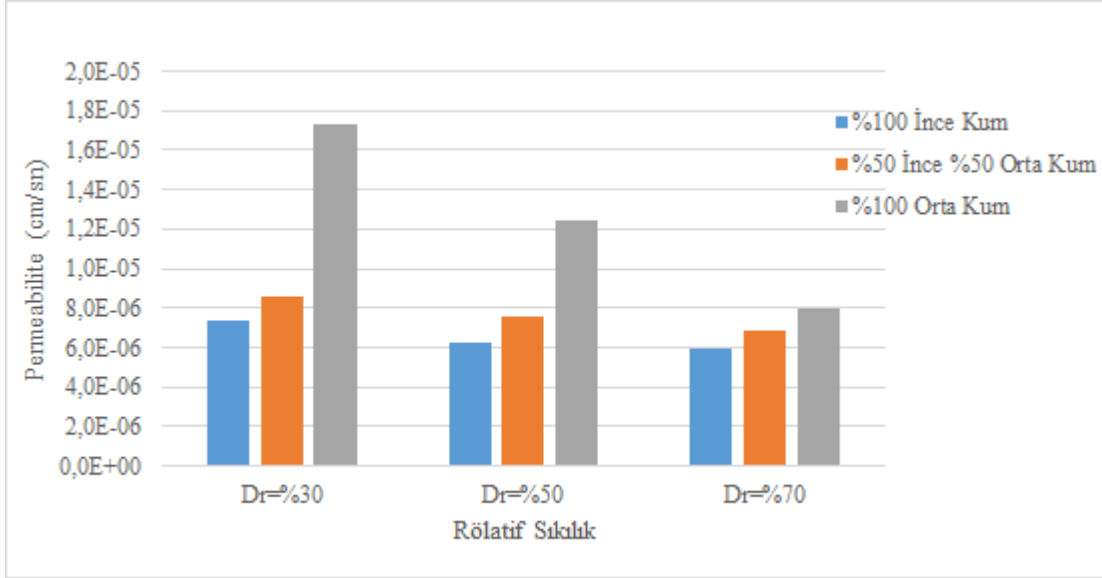
Çizelge 3.20. G1 ve G2 kimyasal enjeksiyonlu numunelerin permeabilite sonuçları

Numune No	Kimyasal Enjeksiyon	Rölatif Sıklık	Gradasyon	Zaman (Gün)			
				7	28	56	
37	G1	30%	%100 İnce	2,45x10 ⁻⁶	7,33x10 ⁻⁶	8,16x10 ⁻⁶	
38			%50 İnce %50 Orta	2,86x10 ⁻⁶	8,36x10 ⁻⁶	9,46x10 ⁻⁶	
39			%100 Orta	6,15x10 ⁻⁶	1,80x10 ⁻⁵	2,02x10 ⁻⁵	
40		50%	%100 İnce	2,17x10 ⁻⁶	6,90x10 ⁻⁶	7,43x10 ⁻⁶	
41			%50 İnce %50 Orta	2,33x10 ⁻⁶	7,83x10 ⁻⁶	8,26x10 ⁻⁶	
42			%100 Orta	4,14x10 ⁻⁶	1,32x10 ⁻⁵	1,45x10 ⁻⁵	
43		70%	%100 İnce	1,88x10 ⁻⁶	5,92x10 ⁻⁶	7,05x10 ⁻⁶	
44			%50 İnce %50 Orta	2,02x10 ⁻⁶	6,54x10 ⁻⁶	7,52x10 ⁻⁶	
45			%100 Orta	2,37x10 ⁻⁶	7,50x10 ⁻⁶	9,15x10 ⁻⁶	
46		G2	30%	%100 İnce	2,59x10 ⁻⁶	7,89x10 ⁻⁶	8,82x10 ⁻⁶
47				%50 İnce %50 Orta	3,02x10 ⁻⁶	8,76x10 ⁻⁶	9,79x10 ⁻⁶
48				%100 Orta	6,53x10 ⁻⁶	1,92x10 ⁻⁵	2,13x10 ⁻⁵
49	50%		%100 İnce	2,24x10 ⁻⁶	7,45x10 ⁻⁶	7,89x10 ⁻⁶	
50			%50 İnce %50 Orta	2,55x10 ⁻⁶	8,29x10 ⁻⁶	8,98x10 ⁻⁶	
51			%100 Orta	4,49x10 ⁻⁶	1,38x10 ⁻⁵	1,54x10 ⁻⁵	
52	70%		%100 İnce	1,94x10 ⁻⁶	6,05x10 ⁻⁶	7,26x10 ⁻⁶	
53			%50 İnce %50 Orta	2,05x10 ⁻⁶	7,03x10 ⁻⁶	7,88x10 ⁻⁶	
54			%100 Orta	2,52x10 ⁻⁶	8,00x10 ⁻⁶	9,92x10 ⁻⁶	

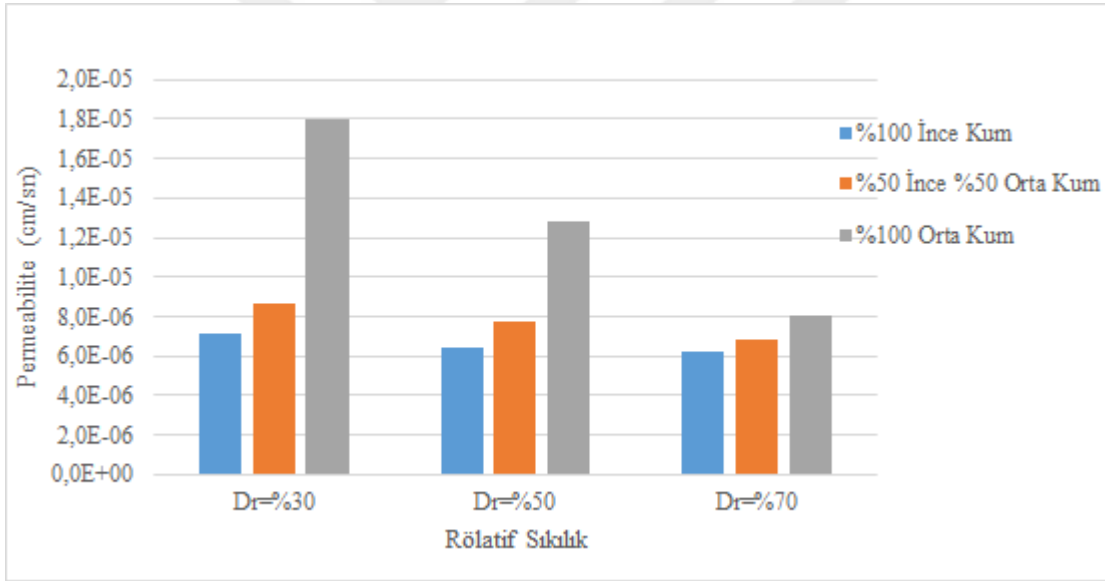
Enjeksiyon işlemleri sonrasında 56. günde gerçekleştirilen permeabilite testi sonuçlarına Şekil 3.42.-3.47.'de verilmiştir.



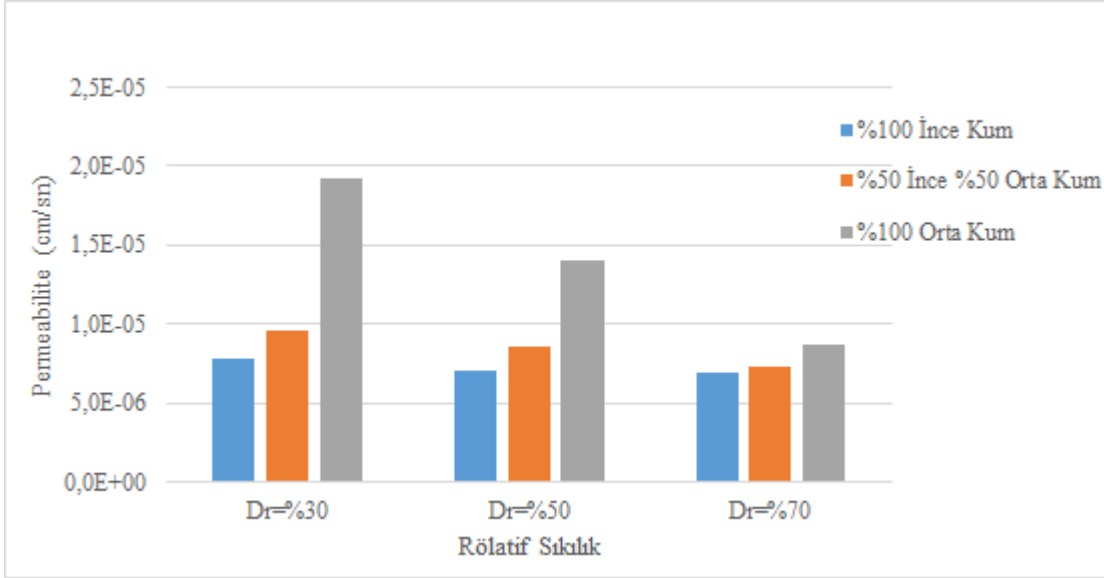
Şekil 3.42. E2 Kimyasal enjeksiyonlu numunelerin 56. gün permeabilite değerleri



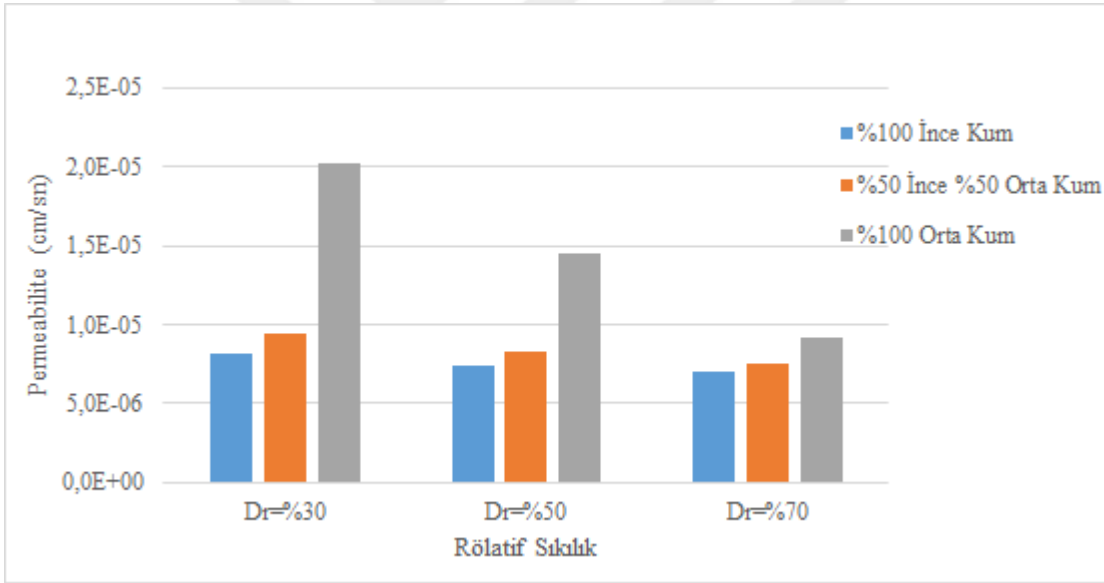
Şekil 3.43. E3 Kimyasalı enjeksiyonları 56. gün permeabilite değerleri



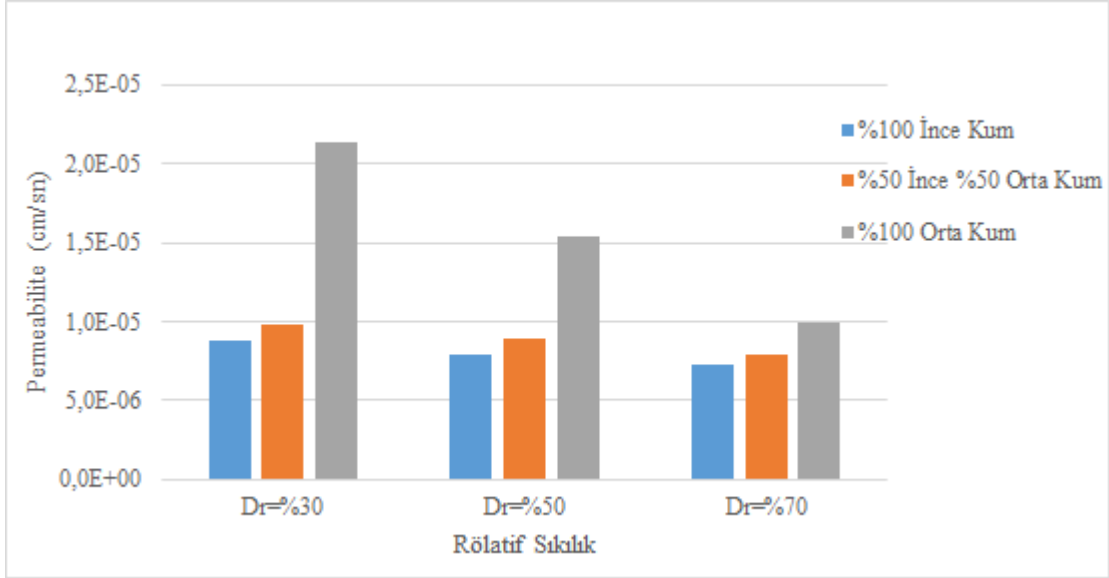
Şekil 3.44. F1 Kimyasal enjeksiyonlu numunelerin 56. gün permeabilite değerleri



Şekil 3.45. F2 Kimyasal enjeksiyonlu numunelerin 56. gün permeabilite değerleri



Şekil 3.46. G1 Kimyasal enjeksiyonlu numunelerin 56. gün permeabilite değerleri



Şekil 3.47. G2 Kimyasal enjeksiyonlu numunelerin 56. gün permeabilite değerleri

4. MALİYET ANALİZİ VE KARŞILAŞTIRMALAR

Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen sodyum silikat enjeksiyonunda reaktant malzeme olarak yerli kaynaklar gözetilmiş ve ilk kez borik asit kullanılmıştır. Borik asit, Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü tarafınca piyasaya arz edilmektedir. 25,0 kg.'lık paketler şeklinde satılan borik asitin bir paketi 70 ₺'den satın alınabilmektedir.

Sodyum silikat serbest piyasada çok sayıda yerli üretici tarafından satışta olup, litre fiyatı ortalama 1.00 ₺ mertebesindedir. Tez kapsamında kullanılan 6 farklı karışım oranına ait 1 lt. üretim maliyeti Çizelge 4.1.'de verilmektedir. Karışımların maliyetinin %80-85'lik bir bölümünü sodyum silikat oluşturmaktadır.

Günümüzde sodyum silikat enjeksiyonlarının bir kısmında reaktant olarak formamid kullanılmakta ve bu karışımların 1 litre üretim maliyetleri 7- 8₺ mertebesinde yer almaktadır [15]. Bu doğrultuda benzer dayanım sonuçlarının sergilendiği borik asit-sodyum silikat enjeksiyonlarının optimizasyonu sonrası, bu tür kimyasal enjeksiyon ile çok daha uygun maliyetli enjeksiyon işlemlerinin gerçekleştirilebileceği anlaşılmaktadır.

Çizelge 4.1. 1 litre solüsyonun maliyet analizi

Karışım	Sodyum Silikat Oranı	Borik Asit Derişimi	Sodyum Silikat Maliyeti	Borik Asit Maliyeti	Toplam Maliyet
E2	38%	28 gr./1 lt.	0,380 ₺	0,078 ₺	0,458 ₺
E3	38%	27 gr./1 lt.	0,380 ₺	0,076 ₺	0,456 ₺
F1	40%	28 gr./1 lt.	0,400 ₺	0,078 ₺	0,478 ₺
F2	40%	27 gr./1 lt.	0,400 ₺	0,076 ₺	0,476 ₺
G1	42%	28 gr./1 lt.	0,420 ₺	0,078 ₺	0,498 ₺
G2	42%	27 gr./1 lt.	0,420 ₺	0,076 ₺	0,496 ₺

Hazırlanmış olan bu tez kapsamında elde edilen sonuçlar Çizelge 4.2'de farklı araştırmacılar tarafından gerçekleştirilen çalışmalar ile kıyaslanmıştır. Reaktantın organik kökenli olması sodyum silikat enjeksiyonlarında basınç dayanımı ve sinerez anlamında nispeten iyi sonuçlar verebilmekte fakat aynı zamanda yüksek maliyetleri ile öne çıkmaktadır.

Çizelge 4.2. Çeşitli sodyum silikat enjeksiyonu çalışmalarından elde edilen sonuçlar

Parametre	İnorganik Reaktantlar		Organik Reaktantlar	
	Sodyum Silikat - Borik Asit	Kolloidal Silika - Tuz [18]	Sodyum Silikat - Formamid [15]	Sodyum Silikat - Dimetil Ester [17]
Jelleşme Süresi (dakika)	35-109	35-120	226-578	37-60
Sinerez Oranı	%78-87	-	%10-36 (180. gün)	%30-%36 (7. gün)
Serbest Basınç Dayanımı (kPa)	110-430 (150. gün)	253-277 (28. gün)	120-780 (150.gün)	773-1497 (7.gün)
Viskozite (cP)	3,56-4,32	≈5	1,67-4,28	-
Permeabilite (cm/sn)	$5,33 \times 10^{-6}$ - $2,13 \times 10^{-5}$	-	$3,22 \times 10^{-5}$ - $2,13 \times 10^{-4}$	-

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, dünya da ilk kez oluşturulan sodyum silikat-borik asit solüsyonunun reolojik özellikleri ve çeşitli gradasyon ve sıklıktaki ince ve orta kum numunelere penetrasyon yetisi araştırılmış, enjekte edilen numunelerin dayanım ve permeabilite gibi geoteknik özellikleri belirlenmiştir.

Sodyum silikatın jel formuna kavuşabilmesi adına, günümüzde çok farklı asit kökenli inorganik ürünler kullanılmaktadır. Hazırlanmış olan bu tez kapsamında, ülke kaynakları ve ekonomiklik gözetilerek borik asitin sodyum silikat ile reaktant olarak kullanılması esas alınmış ve proje Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'nca oluşturulan Sanayi Tezleri (SAN-TEZ) projesi kapsamında, Yapı Merkezi LTD. ŞTİ. ve Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'nca finansal olarak desteklenmiştir.

Laboratuvar deneyleri kapsamında yürütülen ilk çalışmalar, sodyum silikat ve borik asit karışımlarının en uygun oranlarının belirlenmesi olmuştur. Bu doğrultuda 49 farklı karışımda 100 ml. toplam karışım için %30 ile %42 arasında değişen oranlarda yer alan sodyum silikat ve 1,8 ile 3,0 gr arasında da değişen oranlarda borik asit kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda borik asitin 20 °C ortam sıcaklığında, 100 ml. su içerisinde maksimum 4,8 gram çözdürülebildiği belirlenmiş, ve bu değer yapılan tüm çalışmalarda üst limiti oluşturmuştur.

Sodyum silikat ve borik asitin kullanımı sonucunda jelleşmenin sağlanması amacıyla nötr'e yakın pH dengesinin sağlanması gerekmektedir. Kimyasal karışımlarda %42 oranının üzerinde yer alan bazik karakterdeki sodyum silikatın kullanılması durumunda, yapılan deneylerde jelleşme sağlanamamıştır. Borik asitin 20 °C ortam sıcaklığında 100 ml. su içerisinde maksimum 4,8 gram çözdürülebilmesi, %42 nin üzerinde sodyum silikat içeren karışımların jelleştirilebilmesi için yetersiz olduğu belirlenmiştir.

Toplamda 49 farklı karışımın zamana bağlı sinerez ölçümleri alınmıştır. Karışımlarda sodyum silikat oranının artması ile sinerez oranı yükselmiş, borik asit miktarının artması ile sinerez oranı düşmüştür.

Jelleşme süreleri nitel gözlemler sonucunda ölçülen 49 farklı karışımda ise, karışımın asidik pH ortamına sahip olması durumunda jelleşmenin hızlandığı gözlenmiştir. Bu doğrultuda

sabit borik asit içeriğindeki karışımlarda, yükselen sodyum silikat oranının jelleşme süresini artırdığı, sabit sodyum silikat oranı içeren karışımlarda ise yükselen borik asit miktarının jelleşme süresini kısalttığı belirlenmiştir. Yapılan deneylerde 10 ile 570 dk. aralığında değişen ve geniş bir aralıkta yer alan jelleşme süreleri belirlenmiştir.

Yapılan nitel gözlemler sonucunda %30 ile %42 oranları arasında sodyum silikat içeren tüm karışımlarda jelleşmenin gerçekleştiği gözlenmiş ve %30 sodyum silikat içeren karışımlar pilot çalışmalarda kullanılarak kum numunelere enjeksiyonları yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda %30 mertebesinde sodyum silikat içeren karışımların kum numuneler üzerinde yeterli dayanımı sağlamadığı, numunelerin dağıldığı gözlenmiştir.

Sodyum silikat ve borik asit miktarının artması ile doğru orantılı olarak jel formunun nitel gözlemler sonucunda daha dayanıklı olduğu belirlenmiş ve tez kapsamında %38, %40 ve %42 oranlarında sodyum silikat kullanılmıştır. 3 farklı sodyum silikat oranı için ise iki farklı borik asit miktarı (2,7 ve 2,8 gr. / 100 ml.) kullanılmış ve toplamda 6 farklı kimyasal karışım enjeksiyonlarda kullanılmıştır.

Kimyasal karışımların viskozite değerleri yapılan laboratuvar testleri sonucunda %38 Sodyum silikat oranı içeren karışımlar için 3,56 ve 3,65 cP, %40 Sodyum Silikat içeren karışımlar için 3,92 ve 4,01 cP, %42 Sodyum Silikat içeren karışımlar için ise 4,28 ve 4,32 cP olarak belirlenmiştir.

Enjeksiyon deneylerinde kullanılan kum numuneler, %30, %50 ve %70 rölatif sıklık oranlarında ve ince ile orta kumun değişen oranlarındaki karışımını içeren 6 farklı gradasyon gözetilerek hazırlanmıştır.

Enjeksiyon öncesi gerçekleştirilen permeabilite testlerinde %100 orta kumdan hazırlanan numunelerin en yüksek geçirimsiliğe, %100 ince kumdan hazırlanan numunelerin ise en düşük geçirimsiliğe sahip olduğu belirlenmiştir. %30, %50 ve %70 rölatif sıklıkta ve %100 ince kum kullanılarak hazırlanan numunelerde permeabilite $1,07 \times 10^{-3}$ ile $3,22 \times 10^{-3}$ cm/sn aralığında, %100 orta kum kullanılarak hazırlanan numunelerde ise permeabilite değerleri $1,48 \times 10^{-1}$ ile $9,98 \times 10^{-2}$ cm/sn. aralığında belirlenmiştir.

%38 sodyum silikat oranı içeren karışımlar, kum numunelere 0,05 ile 0,30 bar aralığında, %40 sodyum silikat içeren karışımlar, 0,11 ile 0,42 bar aralığında ve son olarak %42 sodyum silikat içeren karışımlar, 0,17 ve 0,54 bar aralığında değişen basınçlar ile numunelere enjekte edilebilmiştir. Kimyasal solüsyonların viskozitesinin, enjekte edilebilirliğe olan etkisi enjeksiyon aşamasında doğrudan gözlenmiş, yüksek viskoziteye sahip karışımlarda daha yüksek enjeksiyon basıncı kullanılmıştır.

Enjeksiyonu yapılan numuneler, laboratuvarında açık havada ve kür tankında su içinde olmak üzere 2 farklı ortamda bekletilmiş ve 7, 14, 28, 56 ve 150. günlerde serbest basınç testine tabi tutulmuştur. Yapılan serbest basınç testleri neticesinde, en yüksek basınç mukavemetlerinin yüksek sodyum silikat, yüksek borik asit, yüksek rölatif sıklık ve iyi derecelenmiş kum numunelere ait olduğu anlaşılmıştır. En yüksek basınç mukavemeti, 28. günde teste tabi tutulan, açık ortamda bekletilen, %70 rölatif sıklığa, %50 ince %50 orta kum gradasyonuna sahip, %42 sodyum silikat ve 2,8 gr./100 ml. yoğunluktaki borik asit içeriğine sahip kimyasal karışım ile enjeksiyonu yapılan numunelere ait olduğu tespit edilmiş ve 0,67 MPa basınç değerine ulaşılmıştır. En düşük mukavemet değeri ise (0,11 MPa), kür tankında bekletilen, 150. günde deneye tabi tutulan, %38 sodyum silikat, 2,7 gr./100 ml. yoğunluktaki borik asit içeriğine sahip kimyasal ile enjeksiyonu yapılan, %100 orta kum gradasyonundaki, %30 rölatif sıklığa sahip olan numuneye ait olduğu tespit edilmiştir.

Kimyasal enjeksiyonu gerçekleştirilen numunelerin zamana bağlı mukavemetlerinin irdelenmesi amacıyla, numuneler 7, 14, 28, 56 ve 150. günlerde serbest basınç testine tabi tutulmuştur. Enjeksiyon sonrasında kür tankında su içinde bekletilen numunelerin en yüksek basınç mukavemeti 7. günde elde edilmiş, sonrasında zamana bağlı olarak 56. güne kadar azalmış ve 150. gün mukavemet verileri dikkate alındığında 56. günden sonra mukavemetinin sabitleştiği belirlenmiştir. Kür tankında bekletilen numunelerin 56. gün ile 150. gün verisi arasında %6 mertebesinde bir dayanım farkı oluşmuştur.

Literatürde yer alan çalışmalarda mukavemet testlerinin çoğunlukla 28. güne kadar sürdürüldüğü belirlenmiş olup, bu çalışmada ise enjeksiyonlu malzeme davranışı çok daha uzun bir süreçte irdelenmiştir. Elde edilen sonuçlar neticesinde, kimyasal enjeksiyonlu numunelerin 28. gün ile 150. gün mukavemet değerleri arasında, 28. gün dayanım değerleri daha yüksek olmak üzere, 1,55 kat mertebesinde bir fark elde edilmiştir. Elde edilmiş olan bu değerler uzun dönem mukavemet testlerinin önemini ortaya çıkarmıştır.

Açık ortamda bekletilen numunelerde ise en yüksek basınç mukavemeti %38 ve %40 sodyum silikat içeriğine sahip karışımlarla enjeksiyonu gerçekleştirilen numunelerde 14. günde, %42 sodyum silikat içeriğine sahip karışımlarla enjeksiyonu gerçekleştirilen numunelerde ise 28. günde elde edilmiştir. Bu farklılığın jelleşme süresi ile doğrudan bağlantılı olduğu yorumu yapılabilir. Laboratuvarında açık hava ortamında bekletilen numuneler üzerinde gerçekleştirilen serbest basınç deneyi sonucunda 56. gün itibari ile dayanımın nihai değerlere ulaştığı, 150. gün verisi ile aralarında %13 mertebesinde farkın oluştuğu belirlenmiştir.

Gradasyon dağılımının numune basınç mukavemetine etkisi irdelendiğinde, tamamen ortadan oluşan numuneler üzerinde yapılan testlerde en düşük mukavemet değerlerinin, %50 ince ve %50 orta kum karışımından oluşan numunelerin ise en yüksek basınç mukavemeti değerini sağladığı belirlenmiştir. Diğer değişkenlerin sabit tutulduğu test verileri incelendiğinde, gradasyon dağılımının mukavemet değerlerine ortalama %14 mertebesinde etkisi olduğu belirlenmiştir.

Rölatif sıklık etkisi dikkate alındığında, en yüksek basınç mukavemeti değerleri %70 rölatif sıklığa bağlı numunelerde, en düşük basınç mukavemeti ise %30 rölatif sıklığa bağlı numunelerde elde edilmiştir. Diğer değişkenlerin sabit tutulduğu test verileri incelendiğinde, %70 ile %30 rölatif sıklığa sahip numuneler üzerinde gerçekleştirilen serbest basınç testleri dikkate alındığında, rölatif sıklığın mukavemet değerlerine ortalama %23 mertebesinde etkisi olduğu belirlenmiştir.

Eşit oranda sodyum silikat içeren kimyasallarla yapılan enjeksiyonlarda, borik asit içeriğinin mukavemete olan etkisi incelendiğinde, 100 ml. toplam karışımdaki borik asitin 2,7 gramdan 2,8 grama çıkarılması ile mukavemette %5 ile %11 arasında değişen artışlar gözlenmiştir.

Sodyum silikat içeriği dışında diğer değişkenlerin sabit tutulduğu test sonuçları gözetildiğinde ise sodyum silikat içeriğinin %38'den %42'ye çıkarılması ile mukavemette ortalama %21 ile %27 oranında artışlar elde edilmiştir.

Numunelerin basınç mukavemetlerinin ortam koşuluna bağlı olarak incelenmesi amacıyla numuneler kür tankında su içinde ve laboratuvarında açık havada bekletilmiştir. Diğer değişkenlerin sabit tutulduğu, 150. günde gerçekleştirilen ortalama serbest basınç testi sonuçları incelendiğinde, laboratuvar ortamında bekleyen numunelerin basınç

mukavemetinin, kür tankında bekleyenlere oranla ortalama 2,07 ile 2,19 kat arasında değişen oranlarda daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Kimyasal enjeksiyonlu numunelerin geçirimsizliğinin belirlenmesine yönelik permeabilite testleri gerçekleştirilmiştir. Permeabilite testleri 7, 28 ve 56. günlerde toplamda 54 adet numune üzerinde gerçekleştirilmiştir. Yapılan testler neticesinde zamana bağlı olarak geçirimsizliğin bir miktar arttığı, 7. gün ile 28. gün permeabilite değerleri arasında ortalama 3 kat mertebesinde bir fark olduğu, 28. gün ile 56. gün permeabilite değerleri arasında ise ortalama 1,12 kat mertebesinde fark olduğu belirlenmiştir. Elde edilen test sonuçları ışığında 28. gün itibari ile geçirimsizlik değerlerinin sabitleştiği belirlenmiştir.

Numunelerin geçirimsizliğine ilişkin bu davranış ayrıca sinerez-zaman ilişkisi ile de uyumludur. Kimyasal karışımların sinerez oranlarının 28. günden sonra sabitleşmesi, permeabilitenin doğrudan sinereze bağlı olduğunu göstermiştir. Permeabilite testlerinde elde edilen bir diğer önemli sonuç, 6 kimyasal karışım içerisinde en yüksek sinerez oranına sahip olan yüksek sodyum silikat ve düşük borik asit oranı içeren kimyasal ile yapılan enjeksiyonlarda en yüksek geçirimsizlik, en düşük sinerez oranına sahip olan düşük sodyum silikat ve yüksek borik asit içeren kimyasal ile yapılan enjeksiyonlarda ise en düşük geçirimsizlik değerleri elde edilmiştir. Sinerez esnasında meydana gelen sıvı çıkışının doğrudan permeabiliteyi etkilediği açıkça belirlenmiştir.

Enjeksiyon öncesi kum numunelere ait geçirimsizlik değerleri, enjeksiyon sonrası 56. gün geçirimsizlik değerleri ile kıyaslanmış, elde edilen değerler neticesinde enjeksiyonu yapılan kum numunelerin permeabilitesi, %100 ince kum gradasyonundaki numuneler için ortalama 300 kat, %50 ince - %50 orta kum gradasyonundaki numuneler için ortalama 1000 kat, %100 orta kum gradasyonuna sahip kum numuneler için ise ortalama 10000 kat azalmıştır. Bu doğrultuda %100 ince kumdan oluşan ve %70 rölatif sıklıkta hazırlanan numunelerde en düşük permeabilite değeri $5,33 \times 10^{-6}$ cm/sn mertebesinde, en yüksek geçirgenlik ise %30 rölatif sıklığa sahip, %100 orta kumdan oluşan numunelerde, $2,13 \times 10^{-5}$ cm/sn mertebesinde belirlenmiştir.

Bu tez kapsamında geniş bir aralıkta değişen oranlarda sodyum silikat ve borik asit çözeltisi çalışılmış ve optimum oranlar belirlenerek kum numunelere olan penetrasyon yetisi de irdelenmiştir. Gerçekleştirilen testler sonucunda kimyasal karışımın içerdiği borik asit ve

sodyum silikat içeriğinin, numunelerin mukavemeti üzerinde yüksek oranda etkisi olduğu gözlenmiştir. Borik asitin 20 °C sıcaklıkta suda çözünebilirliğinin limitlenmesi, yüksek sodyum silikat oranlarının kullanımının önüne geçmiştir. Su sıcaklığının yükseltilmesi sonucu çözünebilen borik asit miktarının artırılmasının pratikte zor olması nedeniyle çalışılması göz ardı edilmiştir. Ancak borik asitin farklı yöntemler ile suda daha yüksek oranlarda çözdürülebilmesi, dayanımı daha yüksek numunelerin elde edilebilmesine katkı sağlayabilecektir.

Elde edilen sinerez verileri, numune içerisinde meydana gelen su kuma miktarının gerek mukavemet gerekse permeabilite değerlerini doğrudan etkilediğini göstermektedir. Kimyasal karışımlarda kullanılacak ilave bir maddenin açığa çıkan suyu hapsedebilecek nitelikte olmasına yönelik gerçekleştirilebilecek çalışmalar, solüsyonun zamana bağlı daha istikrarlı fiziksel özellikler göstermesine yol açabilecektir.

Tez kapsamında enjeksiyonu gerçekleştirilen numunelerin dayanım özellikleri tek eksenli serbest basınç testleri ile belirlenmiştir. Bu kapsamda, borik asit - sodyum silikat enjeksiyonlu numunelerin statik ve dinamik üç eksenli basınç testi çalışmaları, mukavemet davranışının çeşitli koşullarda daha sağlıklı ve güvenilir yorumlanmasını sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

1. Haussman, M.R. (1990). *Engineering Principles of Ground Modification*.(1). New York/USA: Mc Graw Hill, 346-379.
2. Shroff, A.V. and Shah, D.L. (1999). *Grouting Technology in Tunneling and Dam Construction*. (2). Rotterdam/The Netherlands: A.A. Balkema, 230-300.
3. Karol, R.W. (2003). *Chemical Grouting and Soil Stabilization*. (3). New Jersey/USA: Macel Dekker Inc, 130-150.
4. Rowe, R.K. (2001). *Geotechnical and Geoenviromental Engineering Handbook*. New York: Springer Science+Business Media, 429-462.
5. Rawlings, C.G., Hellowell, E.E., and Kilkenny, W.M. (2000). *Grouting for Ground Engineering*. (1). London/UK: CIRIA, 15-74.
6. Nonleiver, E.(1989). *Grouting Theory and Practice*.(1). Amsterdam/The Netherland: Elsevier Science Publishers B.V., 35-70.
7. Gallavresi, F. (1992) Grouting Improvement of Foundation Soils, *Proceeding on Soil Improvement and Geosynthetics*, ASCE, 1-39.
8. Commitee on Grouting of the Geotechnical Engineering Division. (1980). Preliminary Glossary of Terms Relating to Grouting. *Journal of the Geotechnical Engineering Division ASCE*, 106 (7), 803-815.
9. Warner, J. (1982). Compaction Grouting: The First Thirty Years, *Proceeding on Grouting in Geotechnical Engineering*, ASCE, 695-707.
10. Boulanger, R.W., Hayden, R.F. (1995) Aspects of Compaction Grouting of Liquefiable Soil, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 844-855.
11. Baker, K. (1982), Planning and Performing Structural Chemical Grouting, *Proceedings of the Conference on Grouting in Geotechnical Engineering*, ASCE, New Orleans.
12. Naudts, A.M.C. (1996). *Grouting to improve foundation soil, Practical Foundation Engineering Handbook*.(1). New York: McGraw-Hill, 5277-5290.
13. Warner, J. (2004). *Practical Handbook of Grouting Soil Rock and Structures*. (1). New Jersey/USA: John Wiley and Sons., 207-295.
14. Özgürel, H.G., Vipulanandan, C. Effect of Grain Size and Distribution on Permeability and Mechanical Behavior of Acrylamide Grouted Sand, *Journal of Geotechnical and Geoenviromental Engineering*, 2005, 1457-1465.
15. Avcı, E. (2015). *Ultra İnce Taneli (Spinor A6) Süspansiyon Enjeksiyonununö Solüsyon Türü Kimyasal Enjeksiyonlara Alternatifliğinin Araştırılması*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, Ankara.

16. Mollamahmutoğlu, M. (1999). Effect of incremental loading on the creep behaviour of chemically grouted sand. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, (57), 353-358.
17. Gonzalez, H., Vipulanandan, C. (2007). Behaviour of a Sodium Silicate Grouted Sand. ASCE, *Grouting for Ground Improvement*, (4), 1-10.
18. Yıldız, S. (2006). *Kolloidal Silika Enjeksiyonlu İnce-Orta Boyut Dağılımına Sahip Kumun Statik ve Dinamik Y¼kler Altında Davranışı*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, Ankara.
19. Mollamahmutoğlu, M., Avcı, E. (2016). Strength Characteristics of Sand Grouted With Glyoxal Sodium Silicate, *4th International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2016, 543-550.
20. ASTM C136/C136M-14 (2014). *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*, Pennsylvania/USA: ASTM International.
21. ASTM D2487-11 (2011). *Standard Practice for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*, Pennsylvania/USA: ASTM International.
22. ASTM D854-14 (2014). *Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*, Pennsylvania/USA: ASTM International.
23. ASTM D4253-14 (2014). *Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table*, Pennsylvania/USA: ASTM International.
24. ASTM D4254-14 (2014). *Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density*, Pennsylvania/USA: ASTM International.
25. ASTM D5856-15 (2015). *Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Porous Material Using a Rigid-Wall, Compaction- Mold Permeameter*, Pennsylvania/USA: ASTM International.



EKLER

EK-1. Kimyasal karışımların sinerez yüzdeleri

Çizelge 1.1. A, B ve C grubu karışımların zamana bağlı sinerez yüzdeleri

Karışım Kodu	Zamana Bağlı Sinerez Yüzdeleri (%)												
	1. gün	3. gün	5. gün	7. gün	11. gün	15. gün	17. gün	18. gün	22. gün	28. gün	56. gün	66. gün	150. gün
A1	4.9	9.7	13.9	16.8	20.6	22.2	23.2	25.5	28.2	35.5	39.6	40.8	41.1
A2	4.9	10.0	14.3	17.0	21.4	23.7	25.4	27.7	29.7	36.0	40.1	41.3	41.8
A3	4.4	10.9	15.8	19.0	23.7	26.3	28.0	31.0	33.7	42.2	47.0	48.5	49.2
A4	3.9	11.9	17.7	22.2	28.0	31.1	32.6	34.9	38.7	48.1	53.6	55.3	55.9
A5	3.9	12.7	19.8	24.9	32.3	36.4	38.8	42.6	46.3	56.9	63.4	65.4	66.5
A6	2.9	12.1	20.6	27.0	35.5	40.6	43.7	48.7	53.6	62.1	69.2	71.3	72.3
A7	0.0	6.8	14.9	21.6	32.6	37.6	40.1	45.2	49.9	60.0	66.9	69.0	69.0
B1	5.6	9.8	14.5	17.4	21.6	23.8	25.3	28.1	30.5	37.4	41.7	42.9	43.3
B2	5.3	10.8	16.9	20.2	25.7	27.9	30.0	33.1	36.1	43.2	48.1	49.6	50.6
B3	5.6	13.2	19.7	24.2	30.5	33.7	35.0	39.3	42.8	51.7	57.7	59.4	60.4
B4	5.1	14.6	21.9	28.1	36.1	40.5	42.8	46.9	51.3	58.5	65.3	67.3	68.4
B5	3.7	14.8	24.8	31.4	41.2	46.1	48.9	53.6	57.9	63.7	71.1	73.3	73.5
B6	1.1	12.4	21.6	29.0	40.1	45.8	49.4	54.6	59.9	66.9	74.6	76.9	77.5
B7	0.0	5.6	15.1	23.2	37.0	41.8	44.5	49.9	55.3	64.5	71.9	74.1	74.7
C1	5.0	12.0	16.9	21.5	27.4	30.0	32.2	36.2	39.0	46.1	51.4	53.0	53.3
C2	6.0	14.0	20.0	24.2	30.4	33.5	35.5	39.1	42.4	51.0	56.9	58.6	58.7
C3	5.6	17.0	25.4	31.7	40.2	44.5	46.7	50.8	54.6	60.1	67.0	69.1	69.5
C4	5.3	16.4	25.4	31.7	40.6	45.9	48.3	52.9	57.4	63.6	70.9	73.1	73.5
C5	4.2	17.5	27.9	35.5	46.8	52.8	56.7	61.9	66.8	70.5	78.6	81.0	81.1
C6	2.4	14.6	26.8	36.5	49.9	54.7	58.4	63.2	68.1	72.0	80.2	82.7	82.8
C7	0.0	9.9	25.2	35.8	52.4	58.0	60.9	65.9	69.4	74.3	82.8	85.4	85.4

EK-1. (devam) Kimyasal karışımların sinerez yüzdeleri

Çizelge 1.2. D, E, F ve G grubu çözeltilerin zamana bağlı sinerez yüzdeleri

Çözelti	Zamana Bağlı Sinerez Yüzdeleri (%)												
	1. gün	3. gün	5. gün	7. gün	11. gün	15. gün	17. gün	18. gün	22. gün	28. gün	56. gün	66. gün	150. gün
D1	6.6	14.9	21.1	26.0	32.1	35.4	37.4	41.0	44.7	51.4	57.3	59.1	59.4
D2	6.9	16.2	24.4	29.1	36.8	40.7	42.6	46.7	50.5	57.7	64.3	66.3	67.0
D3	6.3	18.0	27.3	33.3	42.2	46.7	49.2	54.2	58.1	63.9	71.2	73.4	73.6
D4	4.6	18.8	28.5	36.2	46.9	52.3	55.1	60.3	64.4	68.2	76.0	78.4	78.6
D5	1.7	16.8	28.8	37.4	50.0	57.3	62.1	68.1	72.9	73.6	82.0	84.6	86.2
D6	0.0	6.9	18.2	27.7	43.4	49.3	52.7	58.8	64.4	70.3	78.4	80.8	82.3
D7	0.0	6.1	17.1	26.8	46.3	51.2	54.8	60.9	67.0	72.1	80.4	82.9	83.6
E1	7.3	20.0	28.1	33.8	42.6	46.8	49.3	53.6	57.7	62.3	69.4	71.6	71.7
E2	7.6	20.2	28.1	33.7	42.7	47.1	49.4	53.7	57.9	63.9	71.2	73.4	74.5
E3	6.8	20.7	29.9	36.4	45.9	50.6	53.0	57.6	61.6	67.6	75.4	77.7	78.3
E4	6.6	20.8	30.5	37.5	47.8	52.8	55.3	60.3	64.5	68.3	76.2	78.5	79.1
E5	4.9	21.3	33.1	41.8	53.4	59.0	61.5	66.5	70.2	71.9	80.2	82.6	83.9
E6	4.7	20.6	33.7	43.2	55.2	61.6	64.4	68.9	72.7	72.3	80.6	83.1	83.1
E7	1.2	16.0	27.5	36.3	49.4	56.5	61.1	67.2	72.2	73.9	82.4	85.0	86.1
F1	7.3	22.3	32.4	39.5	49.5	54.2	56.5	61.1	65.3	68.2	76.0	78.3	78.9
F2	6.2	22.4	31.1	41.1	51.0	56.0	59.8	63.5	68.5	70.4	78.5	80.9	82.1
F3	5.6	22.3	33.2	41.1	53.1	58.7	61.6	66.6	70.7	72.8	81.2	83.7	84.1
F4	3.9	22.0	34.7	44.0	56.9	63.8	66.8	72.2	76.2	76.7	85.5	88.1	89.2
F5	2.1	18.8	31.4	40.8	54.5	62.0	66.1	71.6	76.1	75.7	84.4	87.0	88.2
F6	0.0	14.0	27.1	36.9	52.2	60.1	65.4	71.8	76.9	76.9	85.8	88.4	88.5
F7	0.0	9.4	25.1	36.4	54.5	61.1	64.8	70.2	75.0	76.0	84.8	87.4	88.7
G1	7.3	24.4	35.7	43.9	55.5	60.8	63.0	67.6	71.4	71.9	80.1	82.6	84.0
G2	5.9	24.8	45.8	47.4	60.2	66.1	68.4	73.2	76.7	75.5	84.2	86.8	87.1
G3	3.7	21.3	34.7	44.5	58.1	65.4	68.8	74.5	78.1	77.1	86.0	88.7	90.3
G4	1.2	17.9	31.3	41.4	56.3	64.5	69.0	75.0	78.8	77.5	86.4	89.1	89.2
G5	0.0	11.9	26.0	36.4	54.7	63.3	68.2	75.0	80.4	80.2	89.4	92.2	92.5
G6	0.0	9.5	26.1	39.2	58.4	65.5	69.8	75.9	80.8	78.9	88.0	90.7	92.0

EK-2. Serbest basınç testi sonuçları

Çizelge 2.1. “G1” Kimyasal enjeksiyonlu numunelerin basınç dayanımları (MPa)

Rölatif Sıklık	Bekleme Ortamı	Gradasyon		Kod	Zaman (Gün)				
		İnce	Orta		7	14	28	56	150
%30	Kür tankı	%100	%0	K-1	0,27	0,26	0,25	0,16	0,15
	Kür tankı	%80	%20	K-2	0,26	0,26	0,25	0,16	0,15
	Kür tankı	%60	%40	K-3	0,29	0,28	0,26	0,17	0,16
	Kür tankı	%50	%50	K-4	0,28	0,29	0,27	0,17	0,17
	Kür tankı	%30	%70	K-5	0,3	0,28	0,27	0,17	0,15
	Kür tankı	%0	%100	K-6	0,26	0,25	0,25	0,15	0,14
	Açık hava	%100	%0	A-1	0,38	0,45	0,5	0,42	0,32
	Açık hava	%80	%20	A-2	0,37	0,45	0,49	0,38	0,33
	Açık hava	%60	%40	A-3	0,41	0,47	0,52	0,41	0,33
	Açık hava	%50	%50	A-4	0,42	0,5	0,54	0,43	0,34
	Açık hava	%30	%70	A-5	0,38	0,48	0,55	0,42	0,33
	Açık hava	%0	%100	A-6	0,37	0,45	0,49	0,37	0,32
%50	Kür tankı	%100	%0	K-1	0,3	0,28	0,28	0,17	0,16
	Kür tankı	%80	%20	K-2	0,29	0,29	0,26	0,17	0,16
	Kür tankı	%60	%40	K-3	0,33	0,31	0,3	0,19	0,18
	Kür tankı	%50	%50	K-4	0,33	0,3	0,3	0,18	0,18
	Kür tankı	%30	%70	K-5	0,31	0,3	0,28	0,18	0,17
	Kür tankı	%0	%100	K-6	0,3	0,28	0,27	0,17	0,16
	Açık hava	%100	%0	A-1	0,42	0,51	0,56	0,43	0,34
	Açık hava	%80	%20	A-2	0,4	0,47	0,53	0,42	0,36
	Açık hava	%60	%40	A-3	0,43	0,52	0,58	0,47	0,38
	Açık hava	%50	%50	A-4	0,45	0,53	0,59	0,47	0,37
	Açık hava	%30	%70	A-5	0,42	0,51	0,56	0,44	0,38
	Açık hava	%0	%100	A-6	0,38	0,47	0,54	0,42	0,34
%70	Kür tankı	%100	%0	K-1	0,34	0,32	0,3	0,19	0,18
	Kür tankı	%80	%20	K-2	0,33	0,29	0,3	0,18	0,17
	Kür tankı	%60	%40	K-3	0,34	0,34	0,31	0,2	0,19
	Kür tankı	%50	%50	K-4	0,36	0,34	0,33	0,21	0,19
	Kür tankı	%30	%70	K-5	0,34	0,33	0,31	0,19	0,19
	Kür tankı	%0	%100	K-6	0,3	0,31	0,29	0,19	0,18
	Açık hava	%100	%0	A-1	0,45	0,54	0,6	0,5	0,39
	Açık hava	%80	%20	A-2	0,44	0,53	0,56	0,47	0,37
	Açık hava	%60	%40	A-3	0,49	0,57	0,65	0,51	0,4
	Açık hava	%50	%50	A-4	0,5	0,61	0,67	0,53	0,43
	Açık hava	%30	%70	A-5	0,45	0,58	0,62	0,51	0,4
	Açık hava	%0	%100	A-6	0,42	0,52	0,58	0,47	0,37

EK-2. (devam) Serbest basınç testi sonuçları

Çizelge 2.2. “G2” Kimyasal enjeksiyonlu numunelerin basınç dayanımları (MPa)

Rölatif Sıklık	Bekleme Ortamı	Gradasyon		Kod	Zaman (Gün)				
		İnce	Orta		7	14	28	56	150
%30	Kür tankı	%100	%0	K-1	0,26	0,24	0,24	0,16	0,13
	Kür tankı	%80	%20	K-2	0,26	0,24	0,23	0,14	0,13
	Kür tankı	%60	%40	K-3	0,27	0,27	0,25	0,16	0,15
	Kür tankı	%50	%50	K-4	0,28	0,26	0,26	0,16	0,15
	Kür tankı	%30	%70	K-5	0,27	0,26	0,24	0,16	0,14
	Kür tankı	%0	%100	K-6	0,25	0,25	0,23	0,15	0,14
	Açık hava	%100	%0	A-1	0,33	0,42	0,47	0,37	0,32
	Açık hava	%80	%20	A-2	0,34	0,42	0,42	0,37	0,30
	Açık hava	%60	%40	A-3	0,35	0,45	0,47	0,40	0,33
	Açık hava	%50	%50	A-4	0,35	0,47	0,49	0,41	0,33
	Açık hava	%30	%70	A-5	0,34	0,42	0,48	0,40	0,33
	Açık hava	%0	%100	A-6	0,32	0,41	0,44	0,34	0,30
%50	Kür tankı	%100	%0	K-1	0,29	0,28	0,27	0,17	0,15
	Kür tankı	%80	%20	K-2	0,28	0,26	0,25	0,17	0,15
	Kür tankı	%60	%40	K-3	0,30	0,28	0,29	0,18	0,15
	Kür tankı	%50	%50	K-4	0,32	0,30	0,27	0,18	0,17
	Kür tankı	%30	%70	K-5	0,30	0,27	0,27	0,18	0,15
	Kür tankı	%0	%100	K-6	0,28	0,26	0,25	0,17	0,15
	Açık hava	%100	%0	A-1	0,36	0,45	0,48	0,42	0,33
	Açık hava	%80	%20	A-2	0,36	0,45	0,49	0,39	0,32
	Açık hava	%60	%40	A-3	0,39	0,49	0,52	0,43	0,35
	Açık hava	%50	%50	A-4	0,40	0,48	0,56	0,44	0,36
	Açık hava	%30	%70	A-5	0,39	0,46	0,51	0,43	0,35
	Açık hava	%0	%100	A-6	0,35	0,45	0,47	0,40	0,33
%70	Kür tankı	%100	%0	K-1	0,30	0,30	0,28	0,18	0,16
	Kür tankı	%80	%20	K-2	0,29	0,29	0,29	0,17	0,15
	Kür tankı	%60	%40	K-3	0,34	0,32	0,29	0,19	0,17
	Kür tankı	%50	%50	K-4	0,33	0,32	0,30	0,20	0,18
	Kür tankı	%30	%70	K-5	0,33	0,31	0,29	0,19	0,17
	Kür tankı	%0	%100	K-6	0,30	0,28	0,28	0,18	0,16
	Açık hava	%100	%0	A-1	0,41	0,52	0,56	0,46	0,35
	Açık hava	%80	%20	A-2	0,39	0,50	0,53	0,42	0,37
	Açık hava	%60	%40	A-3	0,42	0,56	0,59	0,47	0,39
	Açık hava	%50	%50	A-4	0,43	0,54	0,60	0,50	0,41
	Açık hava	%30	%70	A-5	0,41	0,53	0,57	0,46	0,36
	Açık hava	%0	%100	A-6	0,39	0,50	0,52	0,43	0,35

EK-2. (devam) Serbest basınç testi sonuçları

Çizelge 2.3. “F1” Kimyasal enjeksiyonlu numunelerin basınç dayanımları (MPa)

Rölatif Sıklık	Bekleme Ortamı	Gradasyon		Kod	Zaman (Gün)				
		İnce	Orta		7	14	28	56	150
%30	Kür tankı	%100	%0	K-1	0,30	0,26	0,24	0,15	0,15
	Kür tankı	%80	%20	K-2	0,29	0,25	0,22	0,15	0,13
	Kür tankı	%60	%40	K-3	0,32	0,28	0,25	0,16	0,14
	Kür tankı	%50	%50	K-4	0,32	0,28	0,25	0,16	0,15
	Kür tankı	%30	%70	K-5	0,31	0,27	0,24	0,16	0,14
	Kür tankı	%0	%100	K-6	0,30	0,25	0,22	0,15	0,14
	Açık hava	%100	%0	A-1	0,38	0,47	0,46	0,34	0,29
	Açık hava	%80	%20	A-2	0,37	0,48	0,43	0,34	0,29
	Açık hava	%60	%40	A-3	0,39	0,52	0,45	0,36	0,31
	Açık hava	%50	%50	A-4	0,42	0,52	0,49	0,38	0,33
	Açık hava	%30	%70	A-5	0,39	0,50	0,46	0,36	0,32
	Açık hava	%0	%100	A-6	0,37	0,44	0,42	0,34	0,28
%50	Kür tankı	%100	%0	K-1	0,33	0,28	0,26	0,17	0,16
	Kür tankı	%80	%20	K-2	0,33	0,26	0,25	0,16	0,15
	Kür tankı	%60	%40	K-3	0,36	0,30	0,28	0,17	0,16
	Kür tankı	%50	%50	K-4	0,37	0,31	0,28	0,17	0,16
	Kür tankı	%30	%70	K-5	0,35	0,30	0,27	0,17	0,16
	Kür tankı	%0	%100	K-6	0,33	0,27	0,26	0,15	0,15
	Açık hava	%100	%0	A-1	0,41	0,52	0,47	0,38	0,32
	Açık hava	%80	%20	A-2	0,41	0,52	0,46	0,36	0,32
	Açık hava	%60	%40	A-3	0,46	0,52	0,50	0,40	0,34
	Açık hava	%50	%50	A-4	0,46	0,55	0,51	0,41	0,35
	Açık hava	%30	%70	A-5	0,43	0,53	0,50	0,39	0,33
	Açık hava	%0	%100	A-6	0,42	0,49	0,49	0,36	0,31
%70	Kür tankı	%100	%0	K-1	0,38	0,30	0,28	0,17	0,17
	Kür tankı	%80	%20	K-2	0,37	0,30	0,28	0,17	0,17
	Kür tankı	%60	%40	K-3	0,39	0,31	0,30	0,19	0,18
	Kür tankı	%50	%50	K-4	0,42	0,33	0,30	0,19	0,18
	Kür tankı	%30	%70	K-5	0,38	0,32	0,30	0,19	0,17
	Kür tankı	%0	%100	K-6	0,36	0,30	0,27	0,17	0,16
	Açık hava	%100	%0	A-1	0,46	0,58	0,54	0,40	0,36
	Açık hava	%80	%20	A-2	0,44	0,55	0,52	0,41	0,33
	Açık hava	%60	%40	A-3	0,49	0,62	0,56	0,43	0,38
	Açık hava	%50	%50	A-4	0,51	0,63	0,57	0,44	0,39
	Açık hava	%30	%70	A-5	0,49	0,57	0,55	0,42	0,37
	Açık hava	%0	%100	A-6	0,46	0,54	0,52	0,39	0,36

EK-2. (devam) Serbest basınç testi sonuçları

Çizelge 2.4. “F2” Kimyasalı enjeksiyonları basınç dayanımları (MPa)

Rölatif Sıklık	Bekleme Ortamı	Gradasyon		Kod	Zaman (Gün)				
		İnce	Orta		7	14	28	56	150
%30	Kür tankı	%100	%0	K-1	0,29	0,24	0,23	0,14	0,12
	Kür tankı	%80	%20	K-2	0,29	0,23	0,22	0,14	0,13
	Kür tankı	%60	%40	K-3	0,32	0,26	0,23	0,14	0,13
	Kür tankı	%50	%50	K-4	0,32	0,26	0,24	0,16	0,13
	Kür tankı	%30	%70	K-5	0,30	0,26	0,24	0,15	0,13
	Kür tankı	%0	%100	K-6	0,29	0,23	0,22	0,13	0,12
	Açık hava	%100	%0	A-1	0,36	0,45	0,39	0,33	0,27
	Açık hava	%80	%20	A-2	0,35	0,41	0,38	0,31	0,26
	Açık hava	%60	%40	A-3	0,37	0,47	0,42	0,34	0,29
	Açık hava	%50	%50	A-4	0,38	0,49	0,44	0,33	0,31
	Açık hava	%30	%70	A-5	0,36	0,45	0,43	0,34	0,29
	Açık hava	%0	%100	A-6	0,33	0,41	0,37	0,31	0,26
%50	Kür tankı	%100	%0	K-1	0,32	0,27	0,25	0,16	0,13
	Kür tankı	%80	%20	K-2	0,31	0,27	0,24	0,15	0,14
	Kür tankı	%60	%40	K-3	0,34	0,28	0,26	0,17	0,15
	Kür tankı	%50	%50	K-4	0,34	0,29	0,27	0,17	0,16
	Kür tankı	%30	%70	K-5	0,34	0,29	0,26	0,16	0,15
	Kür tankı	%0	%100	K-6	0,32	0,26	0,24	0,15	0,13
	Açık hava	%100	%0	A-1	0,40	0,49	0,45	0,36	0,31
	Açık hava	%80	%20	A-2	0,38	0,48	0,43	0,35	0,30
	Açık hava	%60	%40	A-3	0,41	0,50	0,45	0,37	0,31
	Açık hava	%50	%50	A-4	0,42	0,52	0,46	0,38	0,32
	Açık hava	%30	%70	A-5	0,40	0,49	0,45	0,35	0,33
	Açık hava	%0	%100	A-6	0,38	0,45	0,43	0,35	0,29
%70	Kür tankı	%100	%0	K-1	0,34	0,30	0,28	0,17	0,16
	Kür tankı	%80	%20	K-2	0,35	0,28	0,27	0,17	0,14
	Kür tankı	%60	%40	K-3	0,38	0,31	0,28	0,17	0,16
	Kür tankı	%50	%50	K-4	0,39	0,33	0,29	0,19	0,17
	Kür tankı	%30	%70	K-5	0,36	0,30	0,28	0,18	0,15
	Kür tankı	%0	%100	K-6	0,34	0,29	0,27	0,16	0,15
	Açık hava	%100	%0	A-1	0,42	0,52	0,48	0,37	0,34
	Açık hava	%80	%20	A-2	0,39	0,53	0,46	0,37	0,33
	Açık hava	%60	%40	A-3	0,44	0,54	0,52	0,42	0,34
	Açık hava	%50	%50	A-4	0,45	0,56	0,53	0,40	0,37
	Açık hava	%30	%70	A-5	0,44	0,53	0,49	0,39	0,35
	Açık hava	%0	%100	A-6	0,39	0,51	0,47	0,38	0,33

EK-2. (devam) Serbest basınç testi sonuçları

Çizelge 2.5. “E2” Kimyasal enjeksiyonlu numunelerin basınç dayanımları (MPa)

Rölatif Sıklık	Bekleme Ortamı	Gradasyon		Kod	Zaman (Gün)				
		İnce	Orta		7	14	28	56	150
%30	Kür tankı	%100	%0	K-1	0,30	0,26	0,23	0,14	0,12
	Kür tankı	%80	%20	K-2	0,28	0,25	0,21	0,13	0,12
	Kür tankı	%60	%40	K-3	0,31	0,26	0,23	0,14	0,13
	Kür tankı	%50	%50	K-4	0,34	0,29	0,23	0,15	0,13
	Kür tankı	%30	%70	K-5	0,31	0,27	0,22	0,13	0,13
	Kür tankı	%0	%100	K-6	0,29	0,25	0,21	0,14	0,12
	Açık hava	%100	%0	A-1	0,39	0,40	0,36	0,30	0,26
	Açık hava	%80	%20	A-2	0,38	0,42	0,33	0,28	0,25
	Açık hava	%60	%40	A-3	0,40	0,41	0,38	0,31	0,28
	Açık hava	%50	%50	A-4	0,41	0,44	0,38	0,31	0,28
	Açık hava	%30	%70	A-5	0,39	0,43	0,35	0,30	0,27
	Açık hava	%0	%100	A-6	0,37	0,39	0,33	0,28	0,24
%50	Kür tankı	%100	%0	K-1	0,34	0,28	0,24	0,15	0,14
	Kür tankı	%80	%20	K-2	0,34	0,29	0,24	0,14	0,14
	Kür tankı	%60	%40	K-3	0,34	0,29	0,24	0,16	0,14
	Kür tankı	%50	%50	K-4	0,36	0,31	0,26	0,16	0,15
	Kür tankı	%30	%70	K-5	0,33	0,30	0,25	0,15	0,15
	Kür tankı	%0	%100	K-6	0,32	0,28	0,23	0,15	0,13
	Açık hava	%100	%0	A-1	0,43	0,46	0,38	0,32	0,28
	Açık hava	%80	%20	A-2	0,43	0,46	0,38	0,31	0,27
	Açık hava	%60	%40	A-3	0,47	0,46	0,40	0,34	0,31
	Açık hava	%50	%50	A-4	0,46	0,49	0,40	0,35	0,31
	Açık hava	%30	%70	A-5	0,44	0,47	0,38	0,32	0,30
	Açık hava	%0	%100	A-6	0,42	0,42	0,36	0,31	0,27
%70	Kür tankı	%100	%0	K-1	0,36	0,31	0,27	0,16	0,15
	Kür tankı	%80	%20	K-2	0,34	0,31	0,26	0,15	0,15
	Kür tankı	%60	%40	K-3	0,39	0,32	0,27	0,17	0,16
	Kür tankı	%50	%50	K-4	0,39	0,35	0,29	0,18	0,16
	Kür tankı	%30	%70	K-5	0,37	0,32	0,27	0,16	0,15
	Kür tankı	%0	%100	K-6	0,34	0,30	0,25	0,16	0,14
	Açık hava	%100	%0	A-1	0,47	0,49	0,43	0,36	0,30
	Açık hava	%80	%20	A-2	0,45	0,50	0,41	0,34	0,29
	Açık hava	%60	%40	A-3	0,49	0,51	0,46	0,36	0,33
	Açık hava	%50	%50	A-4	0,51	0,53	0,45	0,37	0,32
	Açık hava	%30	%70	A-5	0,48	0,49	0,43	0,36	0,32
	Açık hava	%0	%100	A-6	0,45	0,46	0,41	0,34	0,30

EK-2. (devam) Serbest basınç testi sonuçları

Çizelge 2.6. “E3” Kimyasal enjeksiyonlu numunelerin basınç dayanımları (MPa)

Rölatif Sıklık	Bekleme Ortamı	Gradasyon		Kod	Zaman (Gün)				
		İnce	Orta		7	14	28	56	150
%30	Kür tankı	%100	%0	K-1	0,29	0,24	0,21	0,13	0,11
	Kür tankı	%80	%20	K-2	0,28	0,24	0,21	0,13	0,11
	Kür tankı	%60	%40	K-3	0,29	0,26	0,22	0,13	0,12
	Kür tankı	%50	%50	K-4	0,31	0,25	0,23	0,14	0,12
	Kür tankı	%30	%70	K-5	0,29	0,25	0,22	0,13	0,12
	Kür tankı	%0	%100	K-6	0,28	0,24	0,20	0,12	0,11
	Açık hava	%100	%0	A-1	0,38	0,39	0,34	0,28	0,25
	Açık hava	%80	%20	A-2	0,34	0,39	0,32	0,26	0,24
	Açık hava	%60	%40	A-3	0,39	0,42	0,35	0,28	0,25
	Açık hava	%50	%50	A-4	0,40	0,42	0,36	0,30	0,27
	Açık hava	%30	%70	A-5	0,38	0,39	0,33	0,28	0,25
	Açık hava	%0	%100	A-6	0,37	0,39	0,31	0,26	0,23
%50	Kür tankı	%100	%0	K-1	0,30	0,27	0,23	0,14	0,12
	Kür tankı	%80	%20	K-2	0,29	0,26	0,23	0,14	0,12
	Kür tankı	%60	%40	K-3	0,33	0,26	0,23	0,15	0,13
	Kür tankı	%50	%50	K-4	0,34	0,29	0,25	0,15	0,14
	Kür tankı	%30	%70	K-5	0,32	0,28	0,23	0,15	0,13
	Kür tankı	%0	%100	K-6	0,29	0,25	0,22	0,13	0,12
	Açık hava	%100	%0	A-1	0,41	0,45	0,37	0,29	0,26
	Açık hava	%80	%20	A-2	0,41	0,42	0,34	0,28	0,26
	Açık hava	%60	%40	A-3	0,42	0,47	0,38	0,32	0,27
	Açık hava	%50	%50	A-4	0,46	0,48	0,38	0,32	0,28
	Açık hava	%30	%70	A-5	0,41	0,44	0,37	0,31	0,28
	Açık hava	%0	%100	A-6	0,39	0,42	0,34	0,27	0,25
%70	Kür tankı	%100	%0	K-1	0,34	0,28	0,24	0,16	0,13
	Kür tankı	%80	%20	K-2	0,33	0,29	0,23	0,15	0,14
	Kür tankı	%60	%40	K-3	0,37	0,31	0,26	0,16	0,14
	Kür tankı	%50	%50	K-4	0,36	0,32	0,27	0,17	0,14
	Kür tankı	%30	%70	K-5	0,34	0,30	0,25	0,16	0,14
	Kür tankı	%0	%100	K-6	0,32	0,28	0,24	0,15	0,13
	Açık hava	%100	%0	A-1	0,44	0,49	0,40	0,33	0,30
	Açık hava	%80	%20	A-2	0,43	0,45	0,39	0,31	0,29
	Açık hava	%60	%40	A-3	0,49	0,50	0,42	0,32	0,30
	Açık hava	%50	%50	A-4	0,50	0,51	0,43	0,36	0,31
	Açık hava	%30	%70	A-5	0,47	0,49	0,42	0,33	0,30
	Açık hava	%0	%100	A-6	0,43	0,44	0,38	0,30	0,28

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : TOMAÇ, Sercan Kerem
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 19.05.1989, Ankara
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (532) 373 78 35
 e-mail : sktomac@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi/İnş. Müh.	Devam Ediyor
Lisans	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi/İnş. Müh.	2012
Lise	Fatih Sultan Mehmet Süper Lisesi	2007

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2012-2013	Bezci İnşaat A.Ş.	Saha Mühendisi
2013-2016	Kilci Mühendislik Ltd. Şti.	Geoteknik Mühendisi
2016-Halen	TSGI JV.	Geoteknik Uzman

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Tomaç S.K. ve Nalçakan M.S. (2015). Kademeli Fore Kazık ve Ankrajlı İksa Sistemlerinin Analiz ve Gözlemleri. 6. Geoteknik Sempozyumu, Adana.



GAZİ GELECEKTİR..