

**BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KİMYASAL ENJEKSİYON YAPILMIŞ SİLTİLİ-İNCE KUM KARIŞIMLARININ  
MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Emre DEVECİ**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**OCAK 2020**



**BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KİMYASAL ENJEKSİYON YAPILMIŞ SİTLİ-İNCE KUM  
KARIŞIMLARININ MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Emre DEVECİ  
(171082901)**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Eyübhan AVCI**

**OCAK 2020**

BTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 171082901 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Emre DEVECİ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "KİMYASAL ENJEKSİYON YAPILMIŞ SİLTİLİ-İNCE KUM KARIŞIMLARININ MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :** **Doç. Dr. Eyübhan AVCI** .....  
Bursa Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :** **Dr. Öğr. Üyesi Yeşim Sema ÜNSEVER** .....  
Bursa Uludağ Üniversitesi

**Dr. Öğr. Üyesi Eray YILDIRIM** .....  
Bursa Teknik Üniversitesi

**Savunma Tarihi :**

**FBE Müdürü :** **Doç. Dr. Murat ERTAŞ** .....  
Bursa Teknik Üniversitesi ...../...../.....





*Aileme,*

## ÖNSÖZ

Tez çalışmalarım boyunca, gece gündüz demeden her zaman yanımda olan, beni yönlendiren, azimli ve disiplinli çalışmayı öğreten çok değerli danışman hocam Doç. Dr. Eyübhan AVCI'ya teşekkürlerimi bir borç bilirim. Ayrıca çalışmalarım esnasında engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım saygıdeğer hocam Prof. Dr. Murat MOLLAMAHMUTOĞLU'na ve deneysel çalışmalarımda desteklerini esirgemeyen Öğr. Gör. Aydın GÖKÇE'ye, son olarak da hep yanımda olan aileme şükranlarımı sunarım.

Ocak 2020

Emre DEVECİ

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>v</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>vi</b>
<b>KISALTMALAR</b> .....	<b>viii</b>
<b>SEMBOLLER</b> .....	<b>ix</b>
<b>ÇİZELGE LİSTESİ</b> .....	<b>x</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>xi</b>
<b>ÖZET</b> .....	<b>xiv</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>xvi</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
2.1 Enjeksiyonun Tarihsel Gelişimi .....	2
2.2 Enjeksiyonun Kullanım Alanları.....	4
2.3 Enjeksiyonun Türleri.....	5
2.3.1 Permeasyon (emdirme) enjeksiyonu .....	6
2.3.2 Çatlatma enjeksiyonu .....	8
2.3.3 Kompaksiyon enjeksiyonu .....	8
2.3.4 Jet enjeksiyonu .....	9
2.4 Kimyasal Enjeksiyonlar .....	10
2.4.1 Kimyasal enjeksiyon malzemesi çeşitleri .....	10
2.4.2 Kimyasal enjeksiyonların reolojik özellikleri .....	15
2.4.3 Kimyasal enjeksiyonların penetrasyon yetileri .....	17
2.4.4 İdeal kimyasal enjeksiyon nasıl olmalı? .....	17
2.5 Literatür Özeti .....	18
<b>3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR</b> .....	<b>21</b>
3.1 Giriş.....	21
3.2 Enjeksiyon Deneylerinde Kullanılan Kum Ve Siltin Özellikleri .....	22
3.2.1 Özgül ağırlık .....	25
3.2.2 Maksimum ve minimum boşluk oranları .....	26
3.2.3 Dane çapı dağılım eğrisi .....	28
3.2.4 Permeabilite katsayıları.....	31
3.3 Enjeksiyon Deneylerinde Kullanılan Kimyasal Malzemelerin Özellikleri.....	33
3.3.1 Sodyum silikat.....	33
3.3.2 Formamid .....	34



3.3.3 Glioksal .....	35
3.4 Kimyasal Solüsyonların Reolojik Özelliklerinin Belirlenmesi .....	36
3.4.1 Jelleşme süresi.....	36
3.4.1.1 Formamid-sodyum silikat solüsyonlarının jelleşme süreleri .....	36
3.4.1.2 Glioksal- sodyum silikat solüsyonlarının jelleşme süreleri .....	41
3.4.2 Sinerez.....	44
3.4.2.1 Sodyum silikat-formamid karışımların sinerez yüzdeleri .....	44
3.4.2.2 Sodyum silikat-glioksal karışımların sinerez yüzdeleri .....	46
3.4.3 Viskozite .....	49
3.4.3.1 Sodyum silikat-formamid karışımlarının viskozite değerleri .....	49
3.4.3.2 Sodyum silikat-glioksal karışımlarının viskozite değerleri .....	49
3.5 Farklı Gradasyonlardaki Numunelerin Moldlara Yerleştirilmesi .....	51
3.6 Enjeksiyon Deneyleri .....	57
3.6.1 Enjeksiyon deney düzeneği.....	57
3.6.2 Enjeksiyonların yapılması.....	58
3.6.3 Farklı oranlarında hazırlanmış kimyasal karışımların farklı gradasyonlardaki silt ve ince kum karışımlarına penetrasyon yetileri.....	60
3.6.4 Enjeksiyon sonrası jelleşmesini sağlamış numunelerin moldlardan çıkartılması.....	62
3.7 Enjeksiyon Yapılmış Numunelerin Serbest Basınç Dayanımlarının Belirlenmesi .....	63
3.7.1 Enjeksiyon yapılmış numunelerin farklı kür ortamlarında bekletilmesi... 63	
3.7.2 Serbest basınç deneyleri öncesinde numunelerin üst ve alt yüzeylerinin düzeltilmesi .....	64
3.7.3 Serbest basınç dayanım testleri .....	65
3.8 Enjeksiyon Yapılmış Numunelerin Permeabilite Katsayılarının Belirlenmesi 73	
<b>4. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>76</b>
<b>5. KAYNAKLAR .....</b>	<b>80</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>83</b>

## **KISALTMALAR**

<b>ASTM</b>	: American Society for Testing and Materials
<b>BAP</b>	: Bilimsel Araştırma Projesi
<b>BTÜ</b>	: Bursa Teknik Üniversitesi
<b>F</b>	: Formamid
<b>G</b>	: Glioksal
<b>NP</b>	: Nonplastic
<b>PA</b>	: Permeabilite
<b>PPRC</b>	: Polipropilen Random Copolimer
<b>S.S/Çöz.</b>	: Sodyum Silikat/Çözelti
<b>SI</b>	: Uluslararası Birimler Sistemi
<b>TS</b>	: Türk Standartı

## SEMBOLLER

<b>A</b>	: Numune kesit alanı
<b>a</b>	: Boru kesit alanı
<b>cP</b>	: centiPoise
<b>D<sub>r</sub></b>	: Rölatif sıklık
<b>e<sub>0</sub></b>	: Boşluk oranı
<b>e<sub>maks</sub></b>	: Maksimum boşluk oranı
<b>e<sub>min</sub></b>	: Minimum boşluk oranı
<b>G<sub>s</sub></b>	: Özgül ağırlık
<b>h</b>	: Su yüksekliği
<b>i</b>	: Hidrolik eğim
<b>k</b>	: Permeabilite katsayısı
<b>L</b>	: Numune uzunluğu
<b>M</b>	: Kütle
<b>Q</b>	: Su hacmi
<b>t</b>	: Zaman
<b>V<sub>m</sub></b>	: Mold hacmi
<b>ρ<sub>w</sub></b>	: Su yoğunluğu
<b>ρ<sub>maks</sub></b>	: Maksimum yoğunluk
<b>ρ<sub>min</sub></b>	: Minimum yoğunluk

## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 2.1 : Zemin dane boyutuna göre kullanılabilen enjeksiyon türleri. ....	7
Çizelge 2.2 : Bazı kimyasal enjeksiyon malzemeleri için karşılaştırmalar. ....	11
Çizelge 3.1 : Özgül ağırlık deney sonuçları.....	26
Çizelge 3.2 : Silt ve ince kum numunelere ait maksimum ve minimum boşluk oranları. .....	28
Çizelge 3.3 : Silt-ince kum karışım yüzdeleri.....	28
Çizelge 3.4 : Zemin türlerine ait tipik hidrolik iletkenlik değerleri.....	31
Çizelge 3.5 : Sodyum silikata ait fiziksel ve kimyasal özellikler.....	33
Çizelge 3.6 : Formamide ait fiziksel ve kimyasal özellikler.....	34
Çizelge 3.7 : Glioksala ait bazı fiziksel ve kimyasal özellikler.....	35
Çizelge 3.8 : Farklı oranlarda jelleşme deneylerine tabi tutulmuş sodyum silikat- formamid karışımları.....	37
Çizelge 3.9 : 25°C ve 30°C sıcaklıklardaki farklı sodyum silikat-formamid karışımlarına ait jelleşme süreleri. ....	39
Çizelge 3.10 : G1 ile G36 arasındaki karışımların jelleşme süreleri. ....	42
Çizelge 3.11 : G37 ile G72 arasındaki karışımların jelleşme süreleri. ....	43
Çizelge 3.12 : Sodyum silikat-formamid karışımlarının sinerez yüzdeleri. ....	45
Çizelge 3.13 : G1-G36 arası sodyum silikat-glioksal karışımları sinerez yüzdeleri. ....	47
Çizelge 3.14 : G37-G72 arası sodyum silikat-glioksal karışımları sinerez yüzdeleri ....	48
Çizelge 3.15 : Sodyum silikat-formamid karışımlarının viskozite değerleri.....	49
Çizelge 3.16 : Sodyum silikat-glioksal karışımlarının viskozite değerleri.....	50
Çizelge 3.17 : Moldlara yerleştirilecek silt-ince kum karışımlarının miktarları.....	52
Çizelge 3.18 : Farklı gradasyon ve kimyasal karışım oranlarındaki numunelerin penetrasyon yetileri. ....	61
Çizelge 3.19 : Sodyum silikat-formamid karışımların SBD değerleri.....	66
Çizelge 3.20 : Sodyum silikat-glioksal karışımların SBD değerleri.....	66
Çizelge 3.21 : Enjeksiyon yapılan numunelerin 14.gün permeabilite katsayıları ....	74

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1 : Berigny'nin "darbe pompası" 1-ahşap silindir, 2-kuyu ile bağlantı mekanizması, 3-ahşap piston, 4- vakumu önlemek için delik ve tapa.....	2
Şekil 2.2 : Enjeksiyonun temel türlerinin şematik gösterimi: (a)permeasyon enjeksiyonu, (b)çatlatma enjeksiyonu, (c)kompaksiyon enjeksiyonu, (d)jet enjeksiyonu .....	6
Şekil 2.3 : Permeasyon enjeksiyonu.....	7
Şekil 2.4 : Jet enjeksiyon tekniği.....	9
Şekil 2.5 : 1.silikat çözeltisi,%50 silikat,%5 formamid, %5 etil asetat, 2. %10 akrilamid çözeltisi, 3. AC400. ....	16
Şekil 2.6 : Farklı türdeki enjeksiyon malzemelerinin penetrasyon yetileri. ....	17
Şekil 2.7 : Çeşitli enjeksiyon malzemelerinin penetrasyon yetileri.....	20
Şekil 3.1 : (a) Saf silte ait görüntü, (b)yıkanmış ve elenmiş ince kuma ait görüntü.	23
Şekil 3.2 : Araziden gelen silt-kum karışımı numunelerin 200 no.lu elekten yıkanması. ....	23
Şekil 3.3 : (a)Yıkama işleminden hemen sonra, (b)yıkama işleminden bir gün sonra. ....	24
Şekil 3.4 : Çökelmiş silt numuneyi elde etmek için üstte kalan suyun süzülme işlemi ve çökelmiş silt numune.....	24
Şekil 3.5 : Çökelmiş silt numunelerin tavalara alınması ve etüve koyularak kurutulma işlemleri.....	24
Şekil 3.6 : Etüvde kurutulmuş silt numunenin ufalanması ve elekten geçirilerek saf silt olarak kullanılmak üzere hazır hale getirilmesi. ....	25
Şekil 3.7 : (a)Özgül ağırlık deney düzeneği, (b)ince kum, (c)silt, (d)numunelerin hava boşluklarının vakum pompası ile alınması,(d)havasız alınmış numunelerin üzerine su eklenerek sıcaklığın sabitlenmesi için beklenilmesi, (e)su eklenen numunelerin havası alınmadan önce su içinde bekletilmesi. ....	25
Şekil 3.8 : (a)Minimum ve maksimum boşluk oranlarının bulunması için gerekli aparatlar, (b)titreşim sehpası. ....	27
Şekil 3.9 : Farklı gradasyonlarda hazırlanmış sil-ince kum karışımı numunelerin maksimum ve minimum boşluk oranlarının bulunması.....	27
Şekil 3.10 : (a)Numunelerin sodyum heksametafosfat çözeltisinin içerisinde bekletilmesi, (b)deney süresi boyunca sıcaklığı sabit tutmak için numunelerin su banyosunda bekletilmesi, (c) standartta belirtilen oranlarda sodyum heksametafosfat çözeltisi hazırlanması, (d) hidrometre mikseri ile karıştırma işlemi, (e) deney okumaları başlatılmadan hemen önce son karıştırma işleminin yapılması. ....	29
Şekil 3.11 : (a)151H ve 152H tipi hidrometreler, (b)hidrometre ölçümünün yapılması. ....	30
Şekil 3.12 : Dane çapı dağılım eğrisi.....	30
Şekil 3.13 : Sodyum Silikat (3 MOD). ....	33

<b>Şekil 3.14</b> : Formamide ait bir görüntü.....	<b>34</b>
<b>Şekil 3.15</b> : Glioksala ait görüntüler. ....	<b>35</b>
<b>Şekil 3.16</b> : Jelleşme deneyleri. ....	<b>37</b>
<b>Şekil 3.17</b> : Jelleşmesini tamamlayan numuneler.....	<b>38</b>
<b>Şekil 3.18</b> : Jelleşme aşamaları sırasındaki renk değişimi.....	<b>38</b>
<b>Şekil 3.19</b> : Jelleşme süresinin S.S/Çöz. oranı ile değişimi.....	<b>40</b>
<b>Şekil 3.20</b> : 25°C'deki jelleşme süresinin formamid miktarına bağlı değişimi.....	<b>40</b>
<b>Şekil 3.21</b> : 30°C'deki jelleşme süresinin formamid miktarına bağlı değişimi.....	<b>41</b>
<b>Şekil 3.22</b> : Glioksal-sodyum silikat karışımların jelleşme deneyleri. ....	<b>44</b>
<b>Şekil 3.23</b> : Sinerez yüzdesinin formamid miktarı ile değişimi.....	<b>45</b>
<b>Şekil 3.24</b> : 56.gün sodyum silikat-formamid karışımlarının sinerez yüzdesinin S.S/Çöz oranı ile değişimi.....	<b>46</b>
<b>Şekil 3.25</b> : Sinerez ölçümleri yapılmış olan sodyum silikat-formamid karışımları. <b>46</b>	
<b>Şekil 3.26</b> : (a)Enjeksiyon deneylerinde kullanılan kestamit alt başlıklar, (b)PPRC moldlar, (c)alt başlıklar. ....	<b>53</b>
<b>Şekil 3.27</b> : Enjeksiyon malzemesinin giriş ve çıkışını sağlayan pnömatik rekor ve hortum, başlıkları sabitlemek için kullanılan kelebek somunlar ve saplamalar. <b>53</b>	
<b>Şekil 3.28</b> : Numune hazırlama işlerinde kullanılan (a)titreşimli tokmak, (b)filtre kağıdı ve (c)ince,orta,iri kum filtre malzemeleri. ....	<b>54</b>
<b>Şekil 3.29</b> : Enjeksiyon numunelerinin hazırlanması: (a)alt başlık ve alt filtre kağıdının yerleştirilmesi, (b)gövde moldunun yerine oturtulması, (c) titreşimli tokmağa ait üst sabitleme başlığın takılması, (d) numunelerin üç tabaka halinde sıkıştırılması, (e) üst filtre kağıdının yerleştirilmesi, (f) üst başlığın yerine oturtulması, (g) üst başlığın kelebek somunlarla sabitlenmesi, (h) pnömatik hortumun takılması... <b>55</b>	
<b>Şekil 3.30</b> : Filtre malzemelerin yerleştirilmesi: (a)alt filtre tabakası iri kum, (b)alt filtre tabakası orta kum, (c) alt filtre tabakası ince kum, (d)üst filtre tabakası ince kum, (e) üst filtre tabakası orta kum, (f) üst filtre tabakası iri kum. ....	<b>56</b>
<b>Şekil 3.31</b> : Enjeksiyon deneyleri için hazırlanmış numuneler. ....	<b>56</b>
<b>Şekil 3.32</b> : Kimyasal enjeksiyonlarda kullanılan deney düzeneği. ....	<b>58</b>
<b>Şekil 3.33</b> : Enjeksiyon deneylerinin yapılması ve sonrasında tanktan alınan örnekler. ....	<b>59</b>
<b>Şekil 3.34</b> : Deney öncesi enjeksiyon moldlarının hazırlanması ve deney sonrası jelleşme sürelerinin tamamlanması için bekletilmesi. ....	<b>60</b>
<b>Şekil 3.35</b> : Jelleşmesini tamamlayan numuneler ve numune krikosu ile moldlardan çıkartılması.....	<b>62</b>
<b>Şekil 3.36</b> : Moldlardan çıkartılan numunelerin farklı kür koşullarında bekletilmek üzere numaralandırılması.....	<b>62</b>
<b>Şekil 3.37</b> : 5 farklı gradasyonda kimyasal enjeksiyonları başarılı olan numuneler. <b>63</b>	
<b>Şekil 3.38</b> : Açıkta ve streçte bekletilen numuneler. ....	<b>63</b>
<b>Şekil 3.39</b> : Kür havuzunda bekletilen numuneler.....	<b>64</b>
<b>Şekil 3.40</b> : Numunelerin alt ve üst yüzeylerinin düzeltilmesi.....	<b>64</b>
<b>Şekil 3.41</b> : Düzeltilmiş numunelerin serbest basınç deneylerine hazır hale getirilmesi. ....	<b>64</b>
<b>Şekil 3.42</b> : Serbest basınç deneylerinde kullanılan cihaz ve yükleme halkası. ....	<b>65</b>
<b>Şekil 3.43</b> : S.S/Çöz. oranı %70 (F1) olan sodyum silikat-formamid karışımı enjekte edilen, (a)açık ortam, (b)streç ve (c) kür tankında bekletilmiş numunelerin zamana bağlı SBD değerleri. ....	<b>67</b>
<b>Şekil 3.44</b> : S.S/Çöz. oranı %50 (F8) olan sodyum silikat-formamid karışımı enjekte edilen, (a)açık ortam, (b)streç ve (c)kür tankında bekletilmiş numunelerin zamana bağlı SBD değerleri.....	<b>68</b>

<b>Şekil 3.45</b> : S.S/Çöz. oranı %53,76 (G49) olan sodyum silikat-glioksal karışımı enjekte edilen, (a)açık ortam, (b)streç ve (c) kür tankında numunelerin zamana bağlı SBD değerleri.....	<b>69</b>
<b>Şekil 3.46</b> : S.S/Çöz. oranı %60 (G56) olan sodyum silikat-glioksal karışımı enjekte edilen, (a)açık ortam, (b)streç ve (c) kür tankında bekletilmiş numunelerin zamana bağlı SBD değerleri. ....	<b>70</b>
<b>Şekil 3.47</b> : Serbest basınç deneyi yapılan numunelerin tipik kırılma biçimleri. ....	<b>72</b>
<b>Şekil 3.48</b> : Düşen seviyeli permeabilite deney düzeneği. ....	<b>73</b>
<b>Şekil 3.49</b> : Permeabilite katsayısının silt yüzdesi ile değişimi.....	<b>75</b>



## KİMYASAL ENJEKSİYON YAPILMIŞ SİLTİ-İNCE KUM KARIŞIMLARININ MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

### ÖZET

Bu çalışmada, sodyum silikat-formamid ve sodyum silikat-glioksal karışımlarının siltli-ince kum karışımlarına enjekte edilebilirliği ile birlikte enjeksiyonda başarılı olan numunelerin mühendislik özellikleri araştırılmıştır. Deneylere ilk olarak silt ve ince kum numuneler üzerinde elek analizi, hidrometre, özgül ağırlık, maksimum-minimum boşluk oranları ve permeabilite katsayısı belirleme deneyleri yapılarak başlanmış ve enjeksiyon deneylerinde kullanılacak olan silt-ince kum karışımı numunelere ait gradasyonlar belirlenmiştir. Daha sonra deneylerde kullanılacak en uygun karışım oranlarının belirlenmesi amacıyla sodyum silikat-formamid ve sodyum silikat-glioksal solüsyonları üzerinde reolojik özellik belirleme (jelleşme süreleri, sinerez yüzdeleri ve viskozite) deneyleri yapılmıştır. Enjeksiyon deneylerinden kullanılacak en uygun karışım oranları olarak; Sodyum silikat-formamid karışımlarında sodyum silikat oranı %70 ve %50 olan solüsyonlar, sodyum silikat-glioksal karışımlarında ise sodyum silikat oranı %53,76 ve %60 olan solüsyonlar seçilmiştir. Yapılan tüm enjeksiyon deneylerinde numunelerin tamamında başarı sağlanmıştır. Sodyum silikat-formamid ile yapılan enjeksiyon deneylerinde minimum enjeksiyon basınç değerleri 0,20 ile 3,00 bar arasında, sodyum silikat-glioksal ile yapılan enjeksiyon deneylerinde minimum enjeksiyon basınç değerleri 0,30 ile 2,90 bar arasında çıkmıştır. Tane çapı küçüldükçe ve sodyum silikat yüzdesi arttıkça minimum enjeksiyon basınç değerleri artmıştır. Enjeksiyon deneyinde başarılı olan tüm numuneler üzerinde farklı kür koşullarında (açık ortam, streçli ve kür tankında bekletilen) 7., 14., 28. ve 56 günlerde zamana bağlı olarak serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Sodyum silikat-formamid ile enjeksiyon yapılmış numunelerde dayanım değerleri 0,26 ile 6,90 MPa arasında, sodyum silikat-glioksal ile enjeksiyon yapılmış numunelerde dayanım değerleri 0,44 ile 2,14 MPa arasında çıkmıştır. Sodyum silikat oranının artması ile dayanım değeri artmıştır. Enjeksiyon yapılmış numunelerde en yüksek dayanım 4 nolu karışımda (%70 ince kum- %30 silt) gözlemlenmekte iken, en düşük dayanımlar 5 nolu karışımda (%100 ince kum) gözlemlenmiştir. Kür koşulları açısından değerlendirildiğinde en yüksek dayanımlar açık ortamda bekletilmiş numunelerde gözlemlenmiş iken en düşük dayanımlar kür tankında bekletilmiş numuneler üzerinde gözlemlenmiştir. Son olarak enjeksiyon deneyinde başarılı olan numuneler üzerinde numuneler molddan çıkarılmadan 14. günde düşen seviyeli permeabilite deneyleri yapılarak permeabilite katsayıları (k) tespit edilmiştir. Sodyum silikat-formamid ile enjeksiyon yapılmış numunelerde permeabilite değerleri  $6,08 \times 10^{-6}$  ile  $4,18 \times 10^{-5}$  cm/sn arasında, sodyum silikat-glioksal ile enjeksiyon yapılmış numunelerde permeabilite değerleri  $2,29 \times 10^{-6}$  ile  $1,48 \times 10^{-5}$  cm/sn arasında çıkmıştır. İnce kum-silt karışımlarında silt yüzdesinin artması ile permeabilite değerleri azalmıştır. İnce kum-silt karışımlarına sodyum silikat-formamid enjeksiyonu yapılması ile permeabilite değerleri  $10^{-3}$  ile  $10^{-2}$  kat arasında, sodyum silikat-glioksal enjeksiyonu yapılması ile permeabilite değerleri  $10^{-4}$  ile  $10^{-2}$  kat arasında azalmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sodyum silikat-formamid



ve sodyum silikat-glioksal karışımlarının saf silt numuneye ve siltli ince kum karışımlarına rahatlıkla enjekte edilebileceğini göstermiştir.

**Anahtar kelimeler:** kimyasal enjeksiyon, enjekte edilebilirlik, permeabilite, sodyum silikat, silt, serbest basınç dayanımı.



# INVESTIGATION OF ENGINEERING PROPERTIES OF CHEMICAL GROUTED SILTY-FINE SAND MIXTURES

## SUMMARY

In this study, the groutability of sodium silicate-formamide and sodium silicate-glyoxal mixtures into the silty-fine sand mixtures and the engineering properties of the taken samples were successfully tested. Firstly, experiments were initiated on the sample of silt and fine sand using sieve analysis, hydrometer, specific gravity, maximum-minimum void ratios and permeability coefficient determination tests together with the gradations of silty-fine sand mixture samples to be used in grouting. Then, rheological property determination (gelling times, syneresis and viscosity) tests were performed on the sodium silicate-formamide and the sodium silicate-glyoxal solutions in order to determine the optimum mixing ratios to be used in the experiments. The most appropriate mixture ratios to be used in grouting experiments were; Sodium silicate-formamide mixtures with 70% and 50% sodium silicate ratios, sodium silicate-glyoxal mixtures with 53.76% and 60% sodium silicate ratios were selected. All grouting experiments, were successful on all samples. In grouting tests with sodium silicate-formamide, the minimum grouting pressure values were between 0.20 and 3.00 bar, and in grouting experiments with sodium silicate-glyoxal, the minimum grouting pressure values were between 0.30 and 2.90 bar. As the particle size decreased and the percentage of sodium silicate increased, the minimum grouting pressure values increased. Unconfined compression tests were performed on 7<sup>th</sup>, 14<sup>th</sup>, 28<sup>th</sup> and 56<sup>th</sup> days under different curing conditions (air dried, stretch wrapped and cured tank). The strength values of the samples grouted with sodium silicate-formamide were between 0.26 and 6.90 MPa, and the strength values of the samples grouted with sodium silicate-glyoxal were between 0.44 and 2.14 MPa. The strength value increased with increasing sodium silicate ratio. In grouted samples, the maximum strength was observed in mixture 4 (70% fine sand - 30% silt), while the minimum strength was observed in mixture 5 (100% fine sand). Considering the curing conditions, the maximum strengths were observed in the samples stored in the air dried environment whilst the minimum strengths were observed in the samples stored in the curing tank. Finally, permeability coefficients (k) were determined on the samples that were successful in the grouting experiments by performing permeability tests on the 14<sup>th</sup> day without taking out the samples from the molds. Permeability coefficients of samples which were grouted with sodium silicate-formamide were between  $6.08 \times 10^{-6}$  and  $4.18 \times 10^{-5}$  cm/sec. Permeability coefficients of samples which were grouted with sodium silicate-glyoxal were between  $2.29 \times 10^{-6}$  to  $1.48 \times 10^{-5}$  cm/sec. Permeability values decreased with increasing silt percentage in fine sand-silt mixtures. Permeability coefficient values decreased between  $10^{-3}$  and  $10^{-2}$  order by grouting the sodium silicate-formamide into the fine sand-silt mixtures, while it decreased between  $10^{-4}$  and  $10^{-2}$  order by grouting of sodium silicate-glyoxal. Experimental studies have shown that the sodium silicate-formamide and the sodium silicate-glyoxal mixtures can easily be grouted into the pure silt samples and silty-fine sand mixtures.

**Keywords:** chemical grouting, groutability, permeability, sodium silicate, silt, unconfined compressive strength



## 1. GİRİŞ

Enjeksiyon, kaya ve zemin formasyonlarındaki boşluk, çatlak ve oyuklara enjeksiyon malzemesinin enjekte edilmesi işlemidir. Enjeksiyon sonrası numunelerin dayanımı artarken, deforme olabilirliği ve geçirgenliğini azaltmaktadır [1].

Enjeksiyon uygulamalarında birçok enjeksiyon malzemesi kullanılmaktadır. Portland çimentosu da bunlardan biridir. Fakat sergiledikleri büyük partikül boyutları sebebiyle küçük boşluklu zeminlere penetre olmaları zordur [2].

Daha küçük boşluklara penetre olabilecek enjeksiyon malzemesi ihtiyacı sebebiyle ortaya ince taneli çimentolar çıkmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar ince taneli çimentolar ile ince kum aralığına kadar enjeksiyon yapılabileceğini göstermiştir [2].

Zemin içindeki daha küçük boşluklara enjeksiyon yapılabilecek malzeme ihtiyacı ile ortaya kimyasal enjeksiyon malzemeleri çıkmıştır. Kimyasal enjeksiyonların çevrede yarattığı toksik etki sebebiyle uygulama alanları kısıtlı kalmıştır. Daha küçük tane boyutu ve boşluğuna sahip zeminler için (özellikle siltler) çevrede toksik etki yaratmayacak enjeksiyon malzemesi arayışı devam etmektedir.

### **Tezin Amacı**

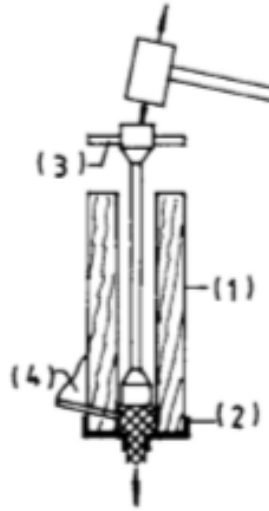
Bu tez kapsamında organik kökenli formamid ve glioksal kimyasallarıyla reakte edilen yerli üretim sodyum silikat çözeltisinin siltli-ince kum karışımı numunelere enjekte edilebilirliği ile enjeksiyon deneylerinde başarılı olan numunelerin serbest basınç dayanımı ve permeabilite katsayıları gibi temel mühendislik özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu çalışma literatürde, siltler üzerinde permeasyon enjeksiyonu uygulamasında başarı sağlanan ilk silikat enjeksiyonu çalışmasıdır.

## 2. ENJEKSİYON

Enjeksiyon, zemin ve/veya kaya içindeki boşluklara veya çatlaklara akışkan enjeksiyon malzemelerinin basınç altında enjekte edilmesi işlemidir [3].

### 2.1 Enjeksiyonun Tarihsel Gelişimi

İnşaat mühendisliğinin gelişimine kıyasla enjeksiyon, yaklaşık 200 yıllık kısa bir geçmişe sahiptir. Enjeksiyon tekniğinin mucidi olarak da bilinen Charles Berigny ilk enjeksiyon uygulamasını, 1802 yılında Dieppe limanında yönetici olarak çalıştığı sırada, çakıllı malzeme üzerine inşa edilmiş gelgit savaklarının temelleri altında, Şekil 2.1’de gösterilen “darbe pompası” adını verdiği alet yardımıyla, bir metre aralıklarla dibe doğru açılan kuyulardan temel plakası ile yeraltı arasındaki boşluklara kil ve puzolan harcını enjekte etmek suretiyle gerçekleştirmiştir [1].



**Şekil 2.1 :** Berigny'nin “darbe pompası” 1-ahşap silindir, 2-kuyu ile bağlantı mekanizması, 3-ahşap piston, 4- vakumu önlemek için delik ve tapa [1].

Dieppe’teki erozyonu önlemek için kullanılan metodun başarı ile sonuçlanmasının ardından kil, puzolan ve su kireci yerine Portland çimentosu kullanılmıştır. 1838’de şev stabilitesi üzerindeki öncü çalışmalarıyla bilinen Collin, Fransa’daki Grosbois barajının duvarın çatlakları doldurmak için, “darbe pompası”nı bir kriko yardımıyla

geliştirerek sabit basınç altında çimento süspansiyonu enjeksiyon uygulamasını yapmıştır [1].

Enjeksiyonun bir diğer ilginç uygulaması Fransa'nın Tours şehrindeki bir köprünün temelini güçlendirmek için Beaudemoulin tarafından yapılmıştır. 1765'te her biri 25 metre açıklıkta 15 kemerli olarak inşa edilen köprünün kesonları altındaki payandalar delinerek büyük boşluklar keşfedilmiş ve temel altındaki boşluklar tamamen doluncaya kadar hidrolik harç enjekte edilmiştir [1]. Beaudemoulin'in bu çalışmadaki gözlemleri başarılı bir enjeksiyonun temel gereksinimlerini ortaya koymuştur:

- Suyun harç bulamacından drenajına izin vermek amacıyla yardımcı delikler delinmelidir;
- Yoğun harç, enjekte edildiği su ile karışmamalı, büzülmemeli ve yavaş sertleşmelidir.
- Kararlı basınç altında yapılan enjeksiyonlar, enjeksiyon harcının sağlamlaşması için daha iyidir.[1]

Amerika Birleşik Devletleri'nde "darbe pompası" ilk kez 1845 yılında W.E.Worthen tarafından bazı yapı temellerinde ve güçlendirme çalışmalarında çimento harcı enjekte edilerek kullanılmıştır [1].

Enjeksiyon uygulamaları Büyük Britanya'da 1850'lerden sonra başlamıştır. W.R.Kinniple "darbe pompası" na benzer bir cihazla kil ve çimento enjeksiyonları üzerinde çalışmıştır ve 1886 yılında Rosetta ve Damietta barajları üzerinde alttan sızmayı önlemek için çalışmalar yapmıştır. Önceden yerleştirilmiş çakılların içerisine çimento harcının enjekte edilmesi prosedürüyle su altı beton üretiminin ilk deneyimi yapılmıştır [1].

P.W.Barlow 1864'te tünellerin inşası için geliştirip patent aldığı yöntem çoğunlukla Londra ve Paris metrosunda yeraltı su seviyesinin altındaki tünel yapıları için kullanılmıştır. Konik basınç kabından sıkıştırılmış hava ile yapılan enjeksiyon sistemi uzun yıllar kullanılmıştır. Ancak 1910 yılında ilk hidrolik membran pompası icat edilmiştir. [1].

1904 yılında Bethune (Fransa)'daki bir sondaj çalışması sırasında yıkama suyu kaybının çok olması gerekçesiyle sondaj yarıda kesilmiştir ve deliğe çimento harcı enjekte edilmiştir. Enjeksiyon işlemi yapılırken bazı deliklere renkli harçlar enjekte edilerek enjeksiyon malzemesinin izlediği yollar incelenmiştir [1].

Enjeksiyon tekniklerinin sistematik olarak gelişimi, Colorado Nehri üzerinde 1932-1936 yılları arasında inşa edilen Hoover Barajı'nda kaya temel in enjeksiyonu ile başlamıştır. Enjeksiyon Fransa'da baraj temelleri üzerine bağımsız olarak gelişmiş ve ilk kez 1934 yılında Chavanon Barajı'nda kullanılmıştır. Fisürlü kayalarda enjeksiyon rahat bir şekilde yapılırken, çakıllı granüler zeminlerde uygulamada güçlükler çekilmiştir. Berighny ve Kinniple çakıllar üzerinde yapılan enjeksiyonlarda tam başarı sağlayamamışlardır. Başarısızlığın sebebi süspansiyonların zemin partikül boşluklarını tıkaması yüzünden enjeksiyon malzemesinin akış yollarının kapanmasıdır. Solüsyon türü enjeksiyon malzemeleri yapılan uygulamalarda zemin daneleri arasındaki akış yollarının tıkanması gibi bir problem yaşanmamıştır. Solüsyon türü enjeksiyon uygulamaları ilk kez Danimarkalı Joosten tarafından su camı olarak da bilinen silika jellerin enjeksiyonu ile yapılmıştır.[1].

Zeminlerin dayanım, permeabilite gibi mühendislik özelliklerini geliştirmek amacıyla yapılan, çok uzun bir geçmişe dayanmayan enjeksiyon yöntemlerinin gelişimi geçmişten günümüze devam etmekte ve bu alanda hala birçok yöntem ve teknik için araştırmalar yapılmaktadır.

## **2.2 Enjeksiyonun Kullanım Alanları**

Enjeksiyon modern inşaat mühendisliği uygulamalarında geniş bir uygulama alanına sahiptir:

- Hidroteknik yapıların temelleri altındaki formasyonların geçirgenliğinin azaltılması, sızıntının ve depolanan su kaybının kontrol edilmesi;
- Ağır yapıların temeli altındaki malzemenin mukavemetinin artırılması ve temeldeki malzemenin deforme olabilirliğinin azaltılması (konsolidasyon enjeksiyonu),
- Beton ağırlık ve kemer barajlarda, farklı yapı elemanlarının arasındaki derzlere enjekte edilerek homojen hale getirilmesi,
- Erozyon tehlikesinin önlenmesi,
- Ön dökümlü ve ön germeli beton yapılarında güçlendirme kablolarının sabitlenmesi,
- Ön germeli ankrajların kayaya sabitlenmesi,
- Eğik yapı ve binaları kaldırılması veya dikleştirilmesi,

- Tünel kaplaması ve kaya arasındaki boşlukların doldurulması (kontak enjeksiyonu),
- Tarihi binalarda eski kusurlu duvarların rehabilitasyonu ve güçlendirilmesi,
- Prepakt prosedürüne göre önceden yerleştirilmiş çakılların arasına malzeme enjekte ederek su altı beton üretimi yapılması,
- Ve daha birçok inşaat mühendisliği uygulamalarında enjeksiyon metodu kullanılmakta ve geliştirilmektedir [1].

### **2.3 Enjeksiyonun Türleri**

Zemin gradasyonu, yeraltı su seviyesi, yapı derinliği ve enjeksiyon ekipmanı gibi faktörler enjeksiyon türü seçiminde önemli rol oynarlar [4].

Kullanılan enjeksiyon malzemesine göre enjeksiyonlar çimento enjeksiyonları ve kimyasal enjeksiyonlar olmak üzere iki gruba ayrılır. Çimento enjeksiyonları ile zemin içine enjekte edilen portland çimentosu zemini daha mukavim bir yapıya kavuşturur. Kimyasal enjeksiyonlar ise silikatlar, reçineler vb. gibi bir çok kimyasal malzeme kullanılarak zeminin fiziksel özelliklerini iyileştirmeyi amaçlar. Kimyasal enjeksiyonlar, çimento enjeksiyonlarının yetersiz kaldığı birçok alan ve uygulamada kullanılabilirler. Ancak, kimyasal enjeksiyonlar daha maliyetlidir. Bazılarının ise toksik ve aşındırıcı özellikleri bulunabilmektedir [5].

Enjeksiyonun temel türleri, zemine veya kayaya giriş şekline göre Şekil 2.2' de gösterildiği gibi 4 ana başlık altında kategorize edilmiştir [3]. Bunlar Permeasyon enjeksiyonu, çatlatma enjeksiyonu, kompaksiyon enjeksiyonu ve jet enjeksiyonudur.

Bileşim türlerine göre kimyasal enjeksiyonlar ise temel olarak süspansiyonlar ve solüsyonlar olarak iki grupta incelenir [3].

#### **Süspansiyonlar**

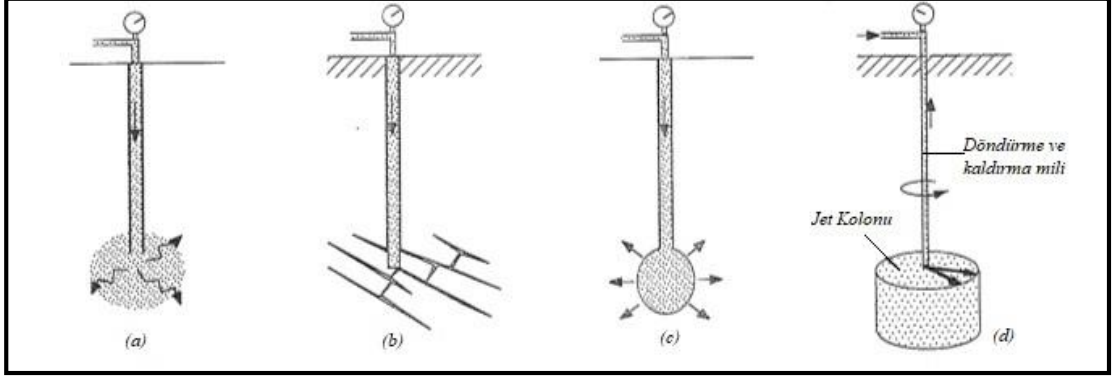
Küçük katı partiküllerin bir sıvı içerisinde heterojen olarak dağılma durumudur. Örneğin; su içinde çimento, kil ve uçucu kül. [3].

#### **Solüsyonlar**

İki veya daha fazla katkı içeren sıvı homojen karışımlardır. [3].



Bunlar ilgili reaksiyonların tamamlanmasına kadar kimyasal dengelerini koruyan özel tek fazlı sistemlerdir. Çözünen maddenin asılı durumda olduğu çözeltiler koloidal çözeltiler olarak bilinirler. Kimyasal enjeksiyonlar bu gruba girer [6].



**Şekil 2.2 :** Enjeksiyonun temel türlerinin şematik gösterimi: (a)permeasyon enjeksiyonu, (b)çatlatma enjeksiyonu, (c)kompaksiyon enjeksiyonu, (d)jet enjeksiyonu [3].

### 2.3.1 Permeasyon (emdirme) enjeksiyonu

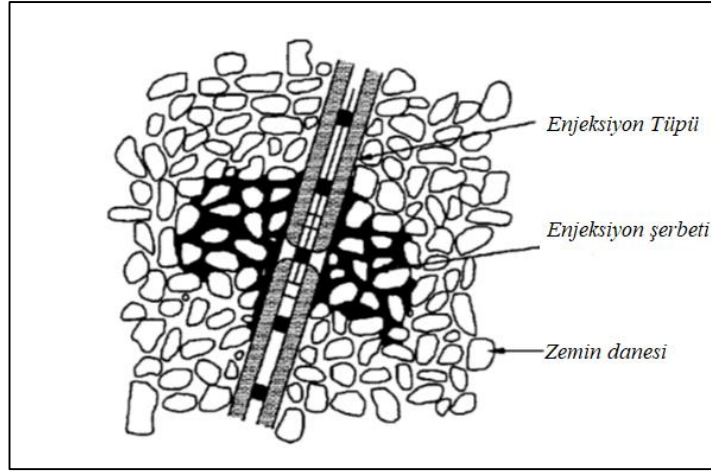
Permeasyon enjeksiyonu, bilinen en eski ve en yaygın kullanılan enjeksiyon tipidir. Enjeksiyon şerbetinin zemin gözeneklerindeki boşluklara düşük basınçlar altında enjekte edilmesi suretiyle uygulanır [4].

Bu teknik öncelikli olarak, zemin geçirgenliğini azaltmak, yeraltı su akışını kontrol altında tutmak, granüler malzemelerin arasında bağlayıcı kuvvet oluşturmak ve dayanımını arttırmak için kullanılır. Enjeksiyonun penetre olabirliği zeminin geçirgenliğine bağlı olduğundan; uygulama alanları, düşük viskoziteli şerbetler ile penetrasyon yapılabilen kumlar ve çakıllar veya zemin içindeki çatlaklarla sınırlandırılmıştır [7].

Çoğunlukla yeraltı suyu problemlerinin önüne geçmek için, kazı ve tünellerde zemini uygun güvenliğe getirmek için kullanılır [5].

Permeasyon enjeksiyonu için iki temel öneri vardır [7]:

1. Enjeksiyon işleminin dizaynı, uygulaması ve başarısı; zeminin geçirgenliğinin, dane boyutu dağılımının ve bunların varyasyonlarının doğru şekilde tanımlanmasıyla mümkündür.
2. Enjeksiyon parametreleri için herhangi bir sorun veya zemin değişikliğinde hızlı geri dönüş sağlayan güvenilir gözlem teknikleri kullanılmalıdır.



**Şekil 2.3 :** Permeasyon enjeksiyonu [7].

Permeasyon Enjeksiyonunun Uygulama Alanları:

- Kazı işlerinde çalışma alanına su girişinin önlenmesi
- Barajlarda sızıntıların kesilmesi
- Dolgu baraj gövde çekirdeğinin geçirimsizliğinin sağlanması
- Yapı temellerinin desteklenmesi
- Zemin güçlendirme
- Kazık oturmalarının azaltılması
- Granüler zeminlerde yeraltı su seviyesi altındaki tünel ve kuyu kazıları gibi alanlarda etkin olarak kullanılmaktadır[7].

**Çizelge 2.1 :** Zemin dane boyutuna göre kullanılacak enjeksiyon türleri [7].

Zemin Tanımı	Seçilen Enjeksiyon Türü
Gevşek çakıl	Çimento-bentonit süspansiyonu
İri kumlu çakıl	Çimento süspansiyonu
Kum	İnce taneli çimento süspansiyonu ve kimyasallar
Belirgin düzeyde silt içeren zeminler	Permeasyon enjeksiyonu ile tam olarak belirlenmemiştir. İnce taneli çimento süspansiyonları, silikat jeller ve reçineler aynı etkiye sahip olarak kullanılabilirler.

### 2.3.2 Çatlatma enjeksiyonu

Çatlatma enjeksiyonu tekniğinde zemin kasten kırılır veya önceden oluşmuş kırıklar açılır. Açılan bu boşluklara enjeksiyon malzemesi basınç altında nüfuz ettirilerek zeminin mühendislik özellikleri iyileştirilir.[7]

Çoğunlukla çimento enjeksiyonları kullanılarak yapılan bu yöntem, zemine itilen borular vasıtasıyla yapılır ve asıl amacı hidrolik iletkenliği azaltmaktır [5].

Birçok zemine uygulanabilen bu yöntem en çok ince taneli zeminlerde uygulanır.

Çatlatma enjeksiyonu uygulamalarına aşağıda yer verilmiştir [7]:

- Zemin geçirgenliğini azaltmak, Örn: baraj çekirdeğini güçlendirmek,
- Binaların oturmalarını durdurmak,
- Oturma yapmış binaları ve zeminleri güçlendirmek,
- Yeraltı çalışmalarının neden olduğu hareketleri önlemek için yaygın olarak kullanılmaktadır.

### 2.3.3 Kompaksiyon enjeksiyonu

Kompaksiyon enjeksiyonu viskozitesi yüksek olan enjeksiyon malzemesinin yüksek basınç altında zemini deforme ederek enjeksiyon yapılması işlemidir. Kompaksiyon enjeksiyonunu diğer enjeksiyon türlerinden ayıran temel fark, dizaynının zemine karışmadan veya zemin boşluklarına nüfuz etmeden yapılmasıdır. Bunun yerine enjekte edildiği zemini sıkıştırarak, zemin boşluklarının azalmasını, zeminin daha yoğun ve sıkı hale gelmesini sağlamaktadır [8].

Kompaksiyon enjeksiyonu, genellikle aşırı oturma yapmış yapıların altındaki zeminleri iyileştirmek ve yapıyı tekrar eski durumuna getirmek amacıyla kullanılır [5].

Aşağıda sıralanan kompaksiyon enjeksiyonunun avantajları ve dezavantajları, Graf (1969)'ın ve Warner ve Brown (1974)'in çalışmaları baz alınarak Shroff ve Shah (1992) tarafından derlenmiştir [6].

#### Avantajları:

- Yapıya ve çevresindeki zemine asgari düzeyde rahatsızlık verir.
- Uygulama esnasında minimum risk içerir.
- Daha ekonomiktir.
- Yapıların tüm elemanlarını destekler.

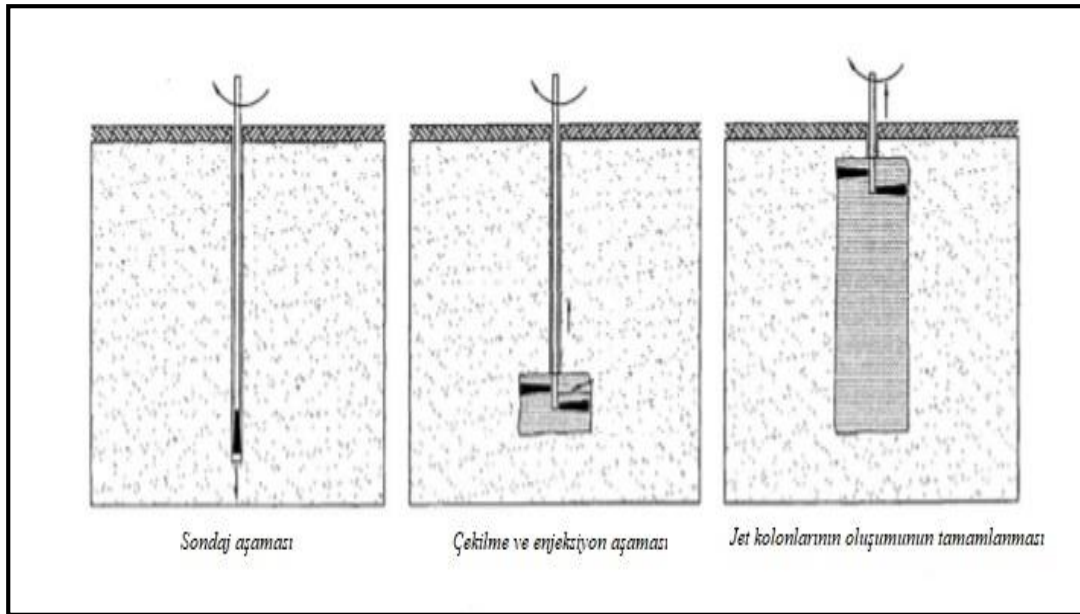
- Daha fazla esneklik gösterir.
- Yeraltı suyunu etkilemez.

#### Dezavantajları:

- Yüzeğe yakın zeminlerde etkinliği zayıftır.
- Derin zeminlerde uygulanması maliyetlidir.
- Sonuçlarının analizi zordur.
- Ayrışmış zeminlerde uygulanması uygun değildir.
- Doygun killerde etkinliği kuşkuludur.
- Yeraltı boru hatlarına sızma ve boruları doldurma riski vardır.

### 2.3.4 Jet enjeksiyonu

Jet enjeksiyonu tekniğinde, yüksek hızlı su jetleri zemine itilir ve aşağıdan yukarı doğru çekilerek yatay deliklerden enjeksiyon şerbeti 70 MPa a varan yüksek basınçlarla pompalanır. Zeminle karıştışılan enjeksiyon şerbeti zeminin daha mukavim olmasını sağlar. Bu teknikte zeminin özelliklerine bağlı olarak enjeksiyon şerbeti zeminin yerini alır ya da doğal haline göre daha sağlam olan çapı 3 metreye varan zemin-şerbet karışımı kolonlar oluşur [3-4]. Bu teknik literatürde enjeksiyon tekniği olarak görölmesine rağmen gerçekte zemin ile imento şerbetininin karıştışılması işlemdir.



Şekil 2.4 : Jet enjeksiyon tekniği [4].

## 2.4 Kimyasal Enjeksiyonlar

Kimyasal enjeksiyonlar, yeraltı yapılarında öncelikli olarak tünel ve maden kazılarında, kohezyonsuz ve akma özelliği gösteren zeminleri kontrol etmek amacıyla kullanılır. Kimyasal enjeksiyonda enjeksiyon malzemesi zemin boşluklarına enjekte edilerek zeminin mühendislik özelliklerini iyileştirmektedir [4].

Kimyasal enjeksiyon malzemelerinin viskoziteleri düşüktür ve genellikle solüsyon karışımları halinde bulunurlar. Bu sebepten dolayı, çimento süspansiyonlarının nüfüs edemeyeceği küçük boşluklar içeren zeminlere rahatlıkla enjekte edilebilirler. Genellikle zeminlerde su akışını kontrol etmek ve zeminin mühendislik özelliklerini iyileştirmek için yaygın olarak kullanılmaktadırlar. İnce taneli zeminlerde boşlukların doldurulmasında esas olarak kimyasal enjeksiyonlar tercih edilmektedir; kayalardaki fisürler veya betondaki ince çatlakların kapatılmasında da etkili bir şekilde kullanılmaktadır [9].

Kimyasal enjeksiyon malzemeleri özellikle süspansiyon enjeksiyonlarının etkili olmadığı ince taneli zeminlerde permeasyon enjeksiyonu malzemesi olarak kullanılır. Çoğu kimyasal enjeksiyon malzemesinin çevre üzerinde toksik etkisi vardır. Sağlık ve çevresel zararları açısından kullanımında gerekli prosedürler izlenmeli, talimatlara uyulmalı ve önlemler alınmalıdır [7].

### 2.4.1 Kimyasal enjeksiyon malzemesi çeşitleri

Son yıllarda birkaç yüz tane farklı kimyasal malzeme patenti alınmasına karşın bunlardan sadece birkaçı ticari olarak kullanılmaktadır. ABD’de silikatlar ve akrilamidler tüm projelerde %90’a varan oranda kullanılan kimyasal enjeksiyon malzemesidir [8].

Başlıca kimyasal enjeksiyon malzemeleri aşağıda listelenmiştir [8]:

1. Silikatlar
2. Akrilamidler
3. Linyosülfonatlar
4. Fenoplastlar
5. Aminoplastlar

Piyasada bulunan bazı kimyasal enjeksiyon malzemeleri için karşılaştırmalar Çizelge 2.2’de verilmiştir [8].

**Çizelge 2.2 :** Bazı kimyasal enjeksiyon malzemeleri için karşılaştırmalar [8].

Kimyasal Enjeksiyonlar	Piyasaki Ürünler	Aşındırıcılık ve Toksikite	Viskozite	Dayanım
Silikatlar	Joosten yöntemi	Düşük	Yüksek	Yüksek
	Siroc	Orta	Orta	Orta
	Silikat-bikarbonat	Düşük	Orta	Düşük
Linyosülfonatlar	Terra Firma	Yüksek	Orta	Düşük
	Blox-all	Yüksek	Orta	Düşük
Fenoplastlar	Terranier	Orta	Orta	Düşük
	Geoseal	Orta	Orta	Düşük
Aminoplastlar	Herculox	Orta	Orta	Yüksek
	Cyanalog	Orta	Orta	Yüksek
Akrilamidler	AV-100	Yüksek	Düşük	Düşük
	Rocagel BT	Yüksek	Düşük	Düşük
	Nitto-SS	Yüksek	Düşük	Düşük
Poliakrilamid	Injectite 80	Düşük	Yüksek	Düşük
Akrilat	AC-400	Düşük	Düşük	Düşük
	Terragel			
	Flexigel			
	Durigel			
Poliüretan	CR-250	Yüksek	Yüksek	Yüksek
	CR-260			
	TACSS			
	CG5610			
	AV202			

## Silikatlar

Silikat türevleri kimyasal malzemelerle ilişkili en geniş tekil grubu oluşturur. Bununla birlikte alkali silikatlar ve özellikle de sodyum silikat kimyasal enjeksiyonun kullanılan tek türevidir [8].

Su camı olarak da bilinen sodyum silikat ortalama  $1,36 \text{ g/cm}^3$  yoğunluğunda solüsyon olarak piyasada bulunabilir. Kimyasal formülü  $n\text{SiO}_2 \cdot \text{Na}_2\text{O}$  olup, silika/alkali oranı(n)

3 ile 7 arasındadır. n değeri 3 ile 4 aralığındaki iken bazı asit veya asit tuzları eklendiğinde jelleşme meydana gelerek enjeksiyon için kullanılabilir bir malzeme haline gelir. Bu amaçla etil asetat (Fransız patenti) veya formamid (ABD patenti) gibi bazı organik bileşikler jelleşme süresini düzenlemek için kullanılmaktadır [1].

Sodyum silikat bazik, silika ise zayıf asittir. Seyreltik bir sodyum silikat çözeltisinin belirli asitlerle veya asit tuzlarıyla karıştırılmasıyla nötrleşme gerçekleşir ve belirli bir zaman aralığından sonra silikat çökelerek jelleşir.[8]

Sodyum silikat bazlı enjeksiyon malzemeleri, öncelikle silikat içeriği ile priz süresine bunların dışında reaktant, zemin dane boyutu ve diğer faktörlere bağlı olarak 70-3500 kPa serbest basınç değerlerine ulaşabilecek şekilde geliştirilebilir [4].

Sodyum silikatın temel bazı özellikleri aşağıda verilmiştir:

- Jelleşme süresi ayarlanabilir. (silikata eklenen reaktant malzemenin kimyası ve miktarına göre birkaç dakika ile 120 dakika arasında olabilir. Sıcaklık da jelleşme süresi üzerinde etkilidir.)
- İyi mekanik dayanıma sahiptir.
- İyi su yalıtım performansı vardır.
- Düşük-orta başlangıç viskozitesine sahiptir.
- Su kusması(sinerez) jelleşme esnasında veya sonrasında olabilir.
- Jelleşmeden sonra çözünmeye karşı dirençlidir [7].

Sodyum silikatlar toksik değildir ve çevreye zararı yoktur. Ancak karışım içinde bazı reaktantlar tehlikeli olabilir ve buna karşı dikkatli olunmalıdır [1].

### **Akrilamidler**

1951'de Amerika'da AM-9 un keşfedilmesiyle kimyasal enjeksiyon teknolojisinde yeni bir dönem başlamıştır. 1953'ten itibaren piyasada bulunabilen AM-9, iki organik monomerin karışımından oluşan, ortam sıcaklığında uzun moleküler zincirlere polimerize edilebilen beyaz renkli toz yapıda bir üründür. %20'ye kadar olan çözeltileri 2 cP'den daha düşük viskoziteye sahiptir. Jel yapısı nemli ortamda ve su altında kararlıdır. Kuruduğu zaman orijinal hacminin %10 una kadar büzülür ancak tekrar suya batırıldığında eski hacmini geri kazanmaya başlar. Amonyum persülfat genellikle katalizör olarak kullanılır. Çoğunlukla aktivatör olarak trietanolamin ve jel süresine kontrol etmek amacıyla inhibitör olarak potasyum ferrosiyanyür kullanılır. Bu

kimyasalın üretimi, nörotoksik olması sebebiyle 1979'da durdurulmuştur. Piyasada yerini akrilik monomer karışımı olan ve tüm özellikleri ile AM-9'a benzeyen AC 400 almıştır [1].

Akrilamid jeller, doğal olarak zeminde bulunmayan çok güçlü asit ve bazlar dışında kimyasallardan etkilenmez ve kalıcı olarak kabul edilir. Birçok arazi uygulaması ve doymuş kum altında 10 yıl boyunca saklanan numuneler üzerinde yapılan testler dayanımında bir kayıp olmadığını, yeterli performansa sahip olduğunu göstermiştir. Buna karşın jeller kuruma ve/veya donma döngülerine maruz kaldığında mekanik bozulmaya uğrarlar. Küçük parçalara ayrılan jellerin mukavemet ve sızdırmazlık özelliklerinde azalma gözlenir. Donma ve kuruma etkilerini azaltmak amacıyla antifriz, gliserin ve kalsiyum klorür gibi katkıları kullanılabilir [8].

Akrilik jeller sodyum silikatlardan daha pahalıdır. Düşük viskozitenin ve iyi kontrollü indüksiyon süresinin önemli olduğu projelerde kullanılır [1].

Birçok özellikleriyle akrilamidler ideal bir kimyasal malzemedir. Diğer birçok toksik ve tehlikeli endüstriyel malzeme gibi uygun güvenlik önlemleri alınmak şartıyla kullanılmalıdır [8].

### **Linyosülfonatlar**

Linyosülfonatlar, kağıt fabrikaları gibi ağaç işletme endüstrilerinin yan ürünlerinden elde edilir. En genel olarak kalsiyum linyosülfonat sodyum dikromat ile birlikte kullanılır. Sodyum, magnezyum ve amonyum sülfonatlar ticari olarak bulunabilir. Bunlardan sodyum bileşiğinin kararsız olduğu kabul edilir [8].

Asit bir ortamda krom iyonu linyosülfonatu oksitleyerek jel yapısı oluşturmasını sağlar. Linyosülfonatin pH'ı 6 veya daha altında ise ilave bir malzemeye ihtiyaç duyulmaz. Eğer değilse asit veya asit tuzları genellikle pH'ı kontrol etmek için kullanılır [8].

Katı madde içeriği 300 gram/litreden 500 gram/litre kadar iken linyosülfonat dayanımı önemli ölçüde (üç-dört katına kadar) artar. Ayrıca dikromat içeriğinin artması, jel süresinin kısılması ve pH'ın düşürülmesi ile de jel kuvveti artmaktadır [8].

Linyosülfonatlar, endüstrilerin yan ürünlerinden elde edilmesi sebebiyle diğer kimyasal malzemelere nazaran daha ucuzdur ve mali açıdan rekabete uygundur. Ancak ürünlerin özellikleri çok değişken olduğu için her yeni malzeme için



mukavemet, jelleşme süresi gibi karakteristikleri belirleyebilmek için laboratuvar veya saha içi tesislerde test alanları kurulması gerekir. En büyük dezavantaj olarak ise dikromat tuzunun ve tüm linyosülfonatlarda bulunan benzen tipi moleküllerin toksik etkiye sahip olması gösterilebilir [8].

### **Fenoplastlar**

Fenoplastlar, bir fenolün aldehit üzerindeki reaksiyonundan kaynaklanan polikondesatlarıdır. Yüksek sıcaklıklarda geniş bir pH aralığında oluşurlar. Bu tür ürünler uzun yıllar boyunca petrol kuyusu sondajlarında kullanılmıştır. Ortam sıcaklığında çoğu fenoller reaksiyon için asit ortamına ihtiyaç duymakla beraber zeminler genelde nötr veya hafif baziktir. Bu yüzden asit ortam gerektiren enjeksiyon malzemesi tercih edilmez. Enjeksiyon için genelde tercihen edilen malzeme, asit ortam gerektirmeden ortam sıcaklıklarında reaksiyona girebilen resorsinoldur. Genellikle formaldehit ile reaksiyona sokulur ve pH'ı kontrol etmek için sodyum hidroksit yaygın bir biçimde katalizör olarak kullanılır [8].

Resorsinol-formaldehit karışımlarının viskozitesi, saha çalışmaları için kullanılan konsantrasyonlarda 1,5-3cP arasında değişir. Jelleşme başlayana kadar tıpkı akrilamid malzemesinde olduğu gibi viskozite değerleri düşük seviyede sabit kalır ve akışkan halden katı hale değişim neredeyse anında gerçekleşir [8].

Fenoplastlar; bir fenol, bir formaldehit ve bir alkali baz içerir. Her üç bileşen de sağlık açısından tehlikeli ve potansiyel bir çevre kirleticisidir. Resorsinol bir fenoldür ve diğer fenoller kadar tehlikeli olmasa da toksik ve yakıcı özelliğe sahiptir. Formaldehit tehlikeli bir madde olmakla birlikte kronik solunum hastalıklarına yol açabilir. Sodyum hidroksit ise kostik (yakıcı) bir malzeme olarak bilinmektedir. Güçlü jeller her zaman kısa jelleşme süreleri ile zayıf jeller ise uzun jelleşme süreleri ile ilişkilidir [8].

### **Aminoplastlar**

Aminoplastlar, ana bileşenleri üre ve formaldehit olan kimyasal malzemelerdir. Bu iki malzemedan bir reçine oluşturmak için ısıya ihtiyaç duyulmaktadır. Fenoplastlarda olduğu gibi aminoplastlar da reaksiyonu tamamlamak için asit bir ortama ihtiyaç vardır ve tüm üre-formaldehit enjeksiyon malzemelerinin katılması için asit koşulları belirgin bir koşul olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu yüzden sadece kömür madenleri

gibi zeminin ve yeraltı suyu pH değerinin 7'nin altında olduğu durumlarda kullanılmalıdır [8].

Üre çözeltileri akriliklere ve fenoplastlara benzer şekilde çok düşük viskozitelere sahiptir. Ayrıca formaldehit reaksiyonunun yüksek sıcaklıklara ihtiyaç duymasının yanı sıra reaksiyon hızlıdır ve kontrol edilmesi zordur. Bununla birlikte, üre suda hala çözünebilir olduğunda reaksiyonda ara aşamalar vardır. Üre-formaldehitlerin büyük miktarlarda kullanılması sebebiyle ön-polimerler olarak da adlandırılan bu malzemeler sanayiden rahatlıkla temin edilebilmektedir. Ön-polimerler başlangıç üre çözeltilerinden daha viskozdur ancak, sonunda 10 ile 20 cP aralığında viskozitelere kullanımına izin veren ürünler elde edilir. Viskozitedeki bu değişim, iyi jel zaman kontrolü ile kullanımı kolay bir ürün elde edilmesini sağlamaktadır [8].

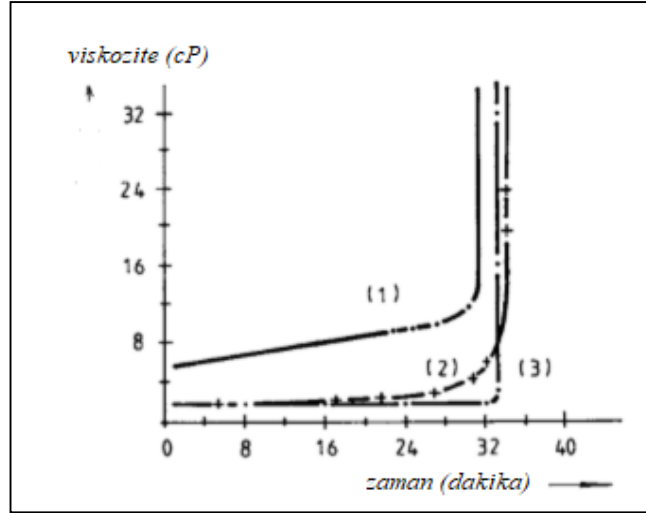
Üre-formaldehit ile stabilize edilmiş zeminlerin dayanımları fenoplastlarla kıyaslanabilir düzeydedir. Döngüsel nemli-kuru ve donma-çözünme koşullarında, nispeten hızlı bir şekilde parçalanması muhtemeldir. Bununla ilgili çok az veri bulunmaktadır. Reçineler iyi stabiliteye sahip ve kalıcı olarak kabul edilir. Üre çözeltileri kullanılan formaldehit ve asit içeriği nedeniyle toksik ve aşındırıcı özelliğe sahiptir [8].

#### **2.4.2 Kimyasal enjeksiyonların reolojik özellikleri**

##### **Jelleşme Süresi**

Kimyasal karışımlar hazırlandıktan sonra akışkan formdadır. Jelleşme süresi, karışımın akışkanlığını yitirip katılaşmaya başladığı ana kadarki geçen süreye denir. Zemin daneleri arasındaki boşlukların tamamına enjeksiyon malzemesinin enjekte edilebilmesi için jelleşme süresinin yeteri kadar uzun olması gerekmektedir [3].

Kimyasal enjeksiyonların jel süresi seçilen reaktanta ve çözeltinin konsantrasyonuna bağlıdır. Bazı kombinasyonlarda viskozite artışı yavaştır. Son jel dayanımına yaklaşınca keskin bir şekilde artar. Bu yüzden enjeksiyon süresi neredeyse jelleşme zamanına karşılık gelir [1]. Şekil 2.5'te %50 silikat,%5 formamid, %5 etil asetat çözeltisi; %10 akrilamid çözeltisi ve AC400'e ait zamana bağlı viskozite değerleri gösterilmiştir. Bu değerlere bakıldığında viskozite değerlerinin, çözeltilerin nihai jel yapısına yaklaştığında (ortalama 32. dakikada) ani bir şekilde arttığı anlaşılmaktadır.



**Şekil 2.5 :** 1.silikat çözeltisi,%50 silikat,%5 formamid, %5 etil asetat, 2. %10 akrilamid çözeltisi, 3. AC400 [10].

### **Sinerez**

Jelleşmesini tamamladıktan sonra silika jeli su kismaya ve büzölmeye başlar. Buna sinerez adı verilir ve sinerez yüzdesi azalan bir oranda artmaya devam eder. Sinerez genellikle silikat içeriği artan oranlarda ve daha kısa jelleşme sürelerinde azalır. Sinerez ayrıca stabilize edilmiş zemin boşluklarında da gerçekleşebilir. Başlangıçta boşlukları tamamen jel ile dolmuş bir zeminde zamana bağlı olarak gerçekleşen büzölme birkaç hafta sonrasında zeminin geçirgenliğinin artmasına sebebiyet verebilir. Kaba daneli zeminlerde başlangıçta su geçirgenliğini önlenirken ilerleyen zamanlarda bu etkinliğin azalmasına kısmen de olsa sebebiyet verebilir. Dane boyutu daha inceye doğru ilerledikçe sinerezin vermiş olduğu bu olumsuz etki orta ve ince kum gibi zeminlerde ihmal edilebilir düzeylere geriler.[8]

### **Viskozite**

Viskozite bir akışkanın akışa karşı veya iç kesme kuvvetlerine karşı direnç göstermesi özelliğidir. Enjeksiyon malzemesinin zemindeki gözenek boşluklarına doğru akma kabiliyeti göstermesi açısından oldukça önemlidir. Permeasyon enjeksiyonu uygulamalarında,  $10^{-4}$  cm/sn lik bir hidrolik iletkenliğe sahip zemin için enjeksiyon sıvısının viskozitesi 2 cP' den az olmalıdır. 5 cP viskoziteli sıvılar,  $10^{-3}$  cm/sn' den daha yüksek hidrolik iletkenliğe sahip zeminler için uygundur ve 10 cP viskozite için, hidrolik iletkenlik  $10^{-2}$  cm/sn' nin üzerinde olmalıdır. [9].

Kimyasal enjeksiyonların penetrasyon yetileri, kimyasal enjeksiyon malzemesinin izafi viskozitesinin bir fonksiyonuna bağlıdır. Viskozite değeri arttıkça malzemenin

zemin boşluklarına penetrasyonu zor olmaktadır. Vizkozite genellikle centipoise (cP) ile ifade edilir ve 1 cP 0,01 poise(P) e eşittir [8].

### 2.4.3 Kimyasal enjeksiyonların penetrasyon yetileri

Çeşitli kimyasal malzemelerin enjekte edilebilirliği Şekil 2.6'da zeminin dane büyüklüğüne bağlı olarak gösterilmiştir. Permeabilite açısından, akrilamid bazlı malzemeler gibi viskozitesi 2 cP'den daha düşük malzemeler,  $10^{-4}$  cm/sn e kadar geçirgenliğe sahip zeminlere sorunsuzca enjekte edilebilmektedir. Kromligninler ve fenoplastlar gibi malzemeler, permeabiliteleri  $10^{-3}$  cm/sn 'den daha yüksek olan zeminler için 5 cP viskozite değerinde sınırlanmıştır.  $k=10^{-2}$  cm/sn değerinin altında geçirgenlik özelliklerine sahip zeminlere silikat bazlı enjeksiyon malzemeleri 10 cP viskozite değerinde penetre olmayabilir. [8].

Silt miktarı, toplam malzeme miktarının %20 sini geçtiği zaman enjeksiyon malzemenin penetrasyonunda zorluklar yaşanabilmektedir. Rölatif sıklığın ve konsantrasyonun yoğunluğunun da penetre olabirlikte etkilerini göz ardı etmemek gerekir [8].

İnce Çakıl	İri Kum	Orta Kum	İnce Kum	İri Silt	İnce Silt (NP)
Akrilamidler					
Akrilatlar					
Fenoplastlar					
Aminoplastlar					
Silikatlar (Düşük Konsantrasyon)					
Silikatlar (Yüksek Konsantrasyon)					
Poliüretan ve Poliakrilamid					
Bentonit					
Çimento					

Şekil 2.6 : Farklı türdeki enjeksiyon malzemelerinin penetrasyon yetileri[8].

### 2.4.4 İdeal kimyasal enjeksiyon nasıl olmalı?

İdealize olarak kimyasal enjeksiyonlar, düşük viskoziteye, kontrol edilebilir jelleşme süresine ve yüksek mukavemete sahip olmalıdır. Ayrıca toksik olmamalı; kalıcı, ucuz ve kolay el edilebilir olmalıdır [3].

İdeal Kimyasal Enjeksiyonlar aşağıdaki özellikleri taşımaktadır [1,8]:

- Taşıma maliyetini düşürebilmek için suda çözünebilmelidir.
- Toksik, aşındırıcı, patlayıcı vb. olmamalıdır.
- Depolama koşullarına karşı uzun raf ömrüne sahip olmalıdır.
- Çözelti düşük viskoziteye sahip ve normal sıcaklıklarda kararlı olmalıdır.
- Ekonomik olmalıdır.
- Yeraltı suyundan etkilenmemeli ve pH>7'de kararlı olmalıdır.
- Yüksek mukavemetli stabil bir jel yapısına sahip olmalıdır.
- Jelleşme süresi kontrol edilebilir olmalıdır.

Tek bir kimyasal, tüm bu gereklilikleri hiçbir zaman karşılamayacaktır, ancak özellikleri, belirli bir projenin kritik gereksinimlerini en optimum şekilde karşılamalıdır [1].

Ülkemizin ekonomisine katkı sağlamak adına gerek yapılan bilimsel çalışmalarda gerekse uygulanan zemin iyileştirme yöntemlerinde yerli üretim kimyasal malzemelere bilhassa önem verilmeli ve bu konuda yatırımcılar teşvik edilmelidir.

## 2.5 Literatür Özeti

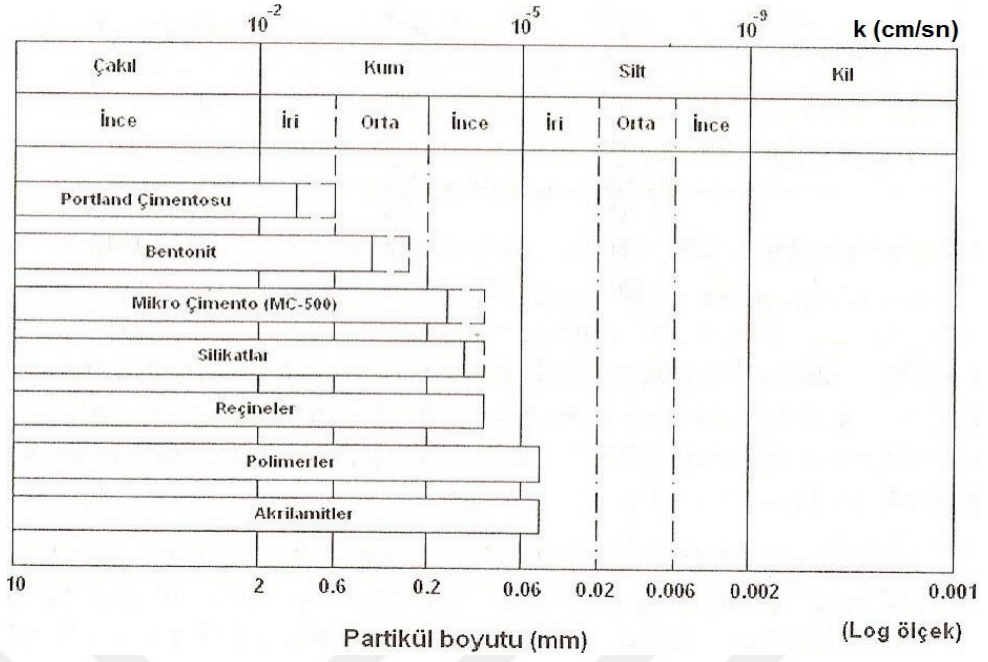
Kimyasal enjeksiyon uygulamaları ile ilgili literatürde birçok çalışma bulunmaktadır bunlardan bazıları aşağıda verilmiştir:

- Warner (1972), Clough vd. (1979), Diefenthal vd. (1979), Kaga, M. and Yonekura (1991), Ata ve Vipulanandan (1998) silikat enjeksiyonları ile kumlar üzerine yaptıkları deneylerde enjeksiyon sonrası kum numunelerin dayanımlarının oldukça iyileştiğinden bahsetmişlerdir [11-15].
- Snuparek ve Soucek (2000) kimyasal enjeksiyon malzemeleri ile laboratuvarında enjeksiyon denemeleri yapmışlar ve oldukça başarılı sonuçlar elde etmişlerdir[16].
- Anagnostopoulos 2005 yılında granüler zeminlere polimer enjeksiyonları uygulamış özellikle ince ve orta kumlara enjeksiyon denemelerinde başarılı sonuçlar elde etmiştir [17].

- Mollamahmutoğlu ve Yıldız (2006) ince ve orta kumlara koloidal silika ile enjeksiyon çalışmaları yapmışlar, başarılı olan numunelerin dinamik ykler altında davranışını incelemişler ve enjekte edilen numunelerin dinamik ykler altındaki dayanımlarının yüksek olduğunu belirtmişlerdir [18].
- Anagnostopoulos vd. (2011) kimyasal enjeksiyonlu kumların mekanik ve fiziksel özelliklerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar yapmışlardır. Yapılan çalışmalarda yüksek dayanım, düşük porozite ve düşük permeabilite elde etmişlerdir. Sonuç olarak numunelerin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin oldukça iyileştiğini görmüşlerdir[19].
- Holmboe vd. (2011) silika sol karışımlı enjeksiyonlara bentonit katarak yaptığı enjeksiyon çalışmalarında bentonitin enjekte edilen numunelerin özelliklerini iyileştirdiğini görmüştür [20].
- Porcino vd. (2015) silikat kökenli enjeksiyonla yaptıkları çalışmada kum numunelerin dayanım ve geçirgenlik özelliklerini araştırmışlardır. Yaptıkları deneylerde kum numunelerin dayanımlarının artığı ve geçirgenliğinin azaldığından bahsetmişlerdir [21].
- Mollamahmutoğlu ve Avcı (2016) silikat enjeksiyonlu kumların geçirgenlikleri üzerine yaptıkları çalışmalarda enjeksiyon sonrası kumların geçirgenlik özelliklerinin oldukça düştüğünden bahsetmişlerdir[22].
- Avcı ve Mollamahmutoğlu (2019) silikat enjeksiyonlu ince ve orta kum karışımlarının kayma mukavemetlerini incelemişler ve enjeksiyon sonrası kayma mukavemeti parametrelerinin oldukça arttığını gözlemlemişlerdir[23].

Kimyasal enjeksiyonlarla yapılan çalışmaların büyük çoğunluğunu silikat kökenli enjeksiyon çalışmaları oluşturmaktadır. Literatürde silikat enjeksiyonlarının siltlere permeasyon enjeksiyonu ile enjekte edilebilirliği hakkında herhangi bir çalışma bulunmamaktadır.

şekil 2.7'de Nonlevier (1989) tarafından çeşitli enjeksiyon malzemelerinin permeasyon enjeksiyonu enjekte edilebilirlik sınır değerleri verilmiştir. şekil 2.7 incelendiğinde silikat kökenli enjeksiyon malzemeleri ile şu zaman kadar ince kumlara kadar enjeksiyon yapılabileceği görülmektedir [1].



Şekil 2.7 : Çeşitli enjeksiyon malzemelerinin penetrasyon yetileri [1].

### 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

#### 3.1 Giriş

Bu deneysel çalışmada, farklı gradasyonlarda hazırlanmış silt-ince kum karışımlarına, sodyum silikat-formamid ve sodyum silikat-glioksal karışımlarının enjekte edilebilirliği ile enjeksiyonda başarılı olan numunelerin mühendislik özellikleri araştırılmıştır. Enjeksiyon deneylerinde zemin numuneleri %30 rölatif sıklıkta hazırlanmıştır. Ana enjeksiyon malzemesi olarak sodyum silikat ve reaktant olarak formamid ve glioksal katkıları kullanılmıştır. Enjeksiyonda başarılı olan numuneler, farklı kür koşullarında bekletilerek 7., 14., 28. ve 56. günlerde serbest basınç dayanımı testlerine tabi tutulmuştur. Ayrıca enjeksiyon yapılmış numuneler üzerinde 14. günde düşen seviyeli permeabilite deneyleri yapılmıştır. Deneysel çalışmalar Bursa Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Laboratuvarı'nda yürütülmüştür.

Deneysel çalışmaların aşamaları aşağıda özetlenmiştir:

- İlk olarak enjeksiyon deneylerinde kullanılacak sodyum silikat ve reaktantlar (formamid ve glioksal) BTÜ BAP desteğiyle temin edilmiştir.
- Deneysel çalışmalarda kullanılacak olan ince kumlar yıkama yöntemi ile elenerek hazırlanmıştır.
- Araziden gelen silt numunelerin öncelikle dane dağılımına bakılmıştır. İçerisinde ince ve orta kum boyutunda malzemelerin tespit edilmesi üzerine numuneler 200 no.lu elekten yıkanarak saf silt elde edilmiştir.
- Farklı gradasyonlardaki silt-ince kum karışımı numunelerin enjeksiyon deneylerinden önce maksimum ve minimum boşluk oranları, özgül ağırlıkları ve dane boyutu dağılım eğrileri tespit edilmiştir. Ayrıca sabit ve düşen seviyeli permeabilite deneyleri ile geçirgenlik katsayıları belirlenmiştir.
- Farklı yüzdelerde hazırlanan sodyum silikat-formamid ve sodyum silikat-glioksal solüsyonlarının jelleşme süreleri, viskoziteleri ve 3., 7., 14., 28. ve 56. günlerdeki sinerez yüzdeleri belirlenerek, enjeksiyon için uygun oranlar



belirlenmiştir. Uygun oranlar belirlenirken reolojik özellikler ve jel yapısı dikkate alınmıştır.

- Tasarımı Prof. Dr. Murat MOLLAMAHMUTOĞLU tarafından yapılan enjeksiyon deney düzeneğinin ve numune hazırlamak için kullanılan titreşimli tokmağın bakımları yapılarak kullanılabilir hale getirilmiştir.
- Bursa Teknik Üniversitesi BAP desteğiyle alınmış olan moldlara farklı gradasyonlarda ve %30 rölatif sıklıkta silt-ince kum karışımları yerleştirilerek numuneler enjeksiyona hazır hale getirilmiştir.
- Moldlara yerleştirilen numuneler enjeksiyona hazır hale getirilmiş ve enjeksiyon deneylerine tabi tutulmuştur.
- Enjeksiyon deneylerinde başarılı olan numuneler moldlardan çıkarılıp farklı kür koşullarında (açıkta, streçte ve kür tankında) bekletilmiş ve numunelere 7., 14., 28. ve 56. günlerde serbest basınç dayanım testleri yapılmıştır.
- Son olarak enjeksiyon deneylerinde başarılı olan numuneler moldlardan çıkarılmadan düşen seviyeli permeabilite deney düzeneğine bağlanmış ve enjeksiyon sonrası 14. günde numunelerin geçirgenlik katsayıları tespit edilmiştir.

### **3.2 Enjeksiyon Deneylerinde Kullanılan Kum Ve Siltin Özellikleri**

Enjeksiyon deneylerinde nehir kumu ve Çorum Osmancık ilçesinden getirilen silt kullanılmıştır. Laboratuvara getirilen kumlar ASTM D 2487-11 standardına göre elenmiş, #40 (0,425 mm) ve #200 (0.075 mm) no.lu elekler arasında kalan numuneler enjeksiyon deneylerinde ince kum olarak kullanılmak üzere ayrılmıştır [24]. İnce kumlar, eleme işleminden sonra içerisinde bulunabilecek silt ve kil partiküllerinden arındırılmak için su ile iyice yıkanmıştır.

Araziden getirilen silt numuneler üzerinde yapılan ASTM D 422-63 ve TS 1900-1 eleme ve hidrometre deneyleri sonucunda numunelerin içerisinde %40 civarında kum olduğu tespit edilmiştir [25-26]. Enjeksiyon için farklı gradasyonlarda hazırlanacak numunelerde hata yapmamak adına tüm numuneler #200 no.lu elekten yıkanarak elenmiş (Şekil 3.2) ve elek altında kalan malzeme büyük bir havuzun içerisine akıtılarak öncelikle çökmesi beklenmiştir (Şekil 3.3). Silt numunenin çökmesi ile

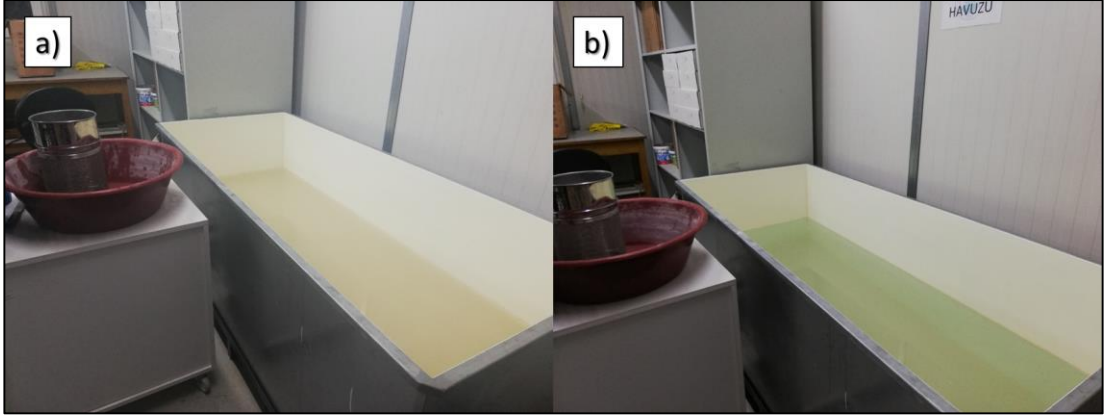
birlikte üstte kalan su şeffaf renge kavuşmuş ve havuz içerisinde silt numuneyi almak için üstte kalan su dikkatli bir şekilde süzölmüştür(Şekil 3.4). Silt numuneler tavalara koyularak etüvde kurutulmuştur(Şekil 3.5). Kurutulan numuneler enjeksiyon deneyleri için hazır hale getirilmiş ve depolanmıştır (Şekil 3.6). Saf silte ve elenmiş ince kuma ait görüntüler Şekil 3.1’de verilmiştir.



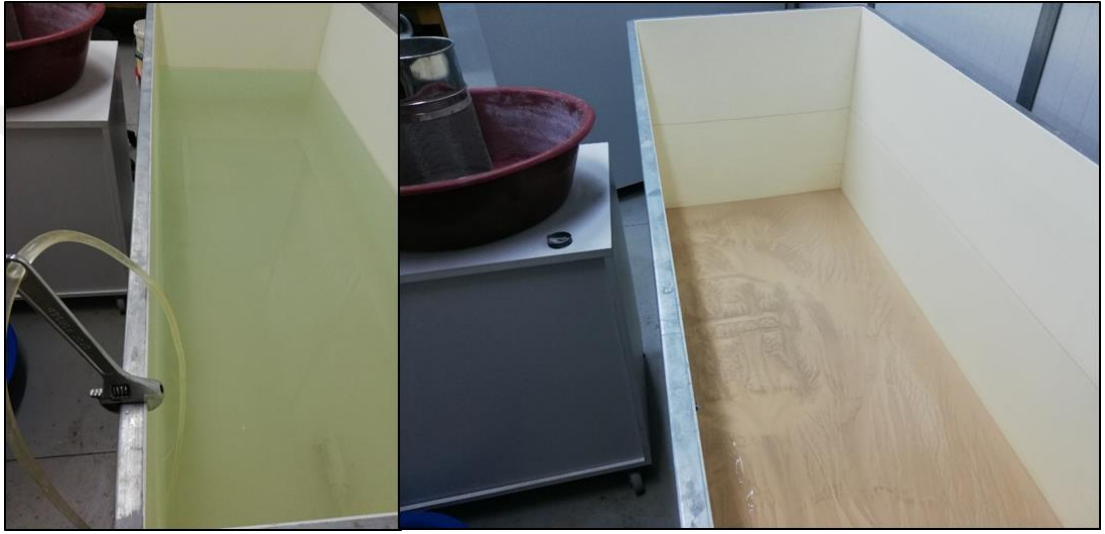
**Şekil 3.1 :** (a) Saf silte ait görüntü, (b) yıkanmış ve elenmiş ince kuma ait görüntü.



**Şekil 3.2 :** Araziden gelen silt-kum karışımını numunelerin 200 no.lu elekten yıkanması.



**Şekil 3.3 :** (a)Yıkama işleminden hemen sonra, (b)yıkama işleminden bir gün sonra.



**Şekil 3.4 :** Çökelmiş silt numuneyi elde etmek için üstte kalan suyun süzülme işlemi ve çökelmiş silt numune.



**Şekil 3.5 :** Çökelmiş silt numunelerin tavalara alınması ve etüve koyularak kurutulma işlemleri.

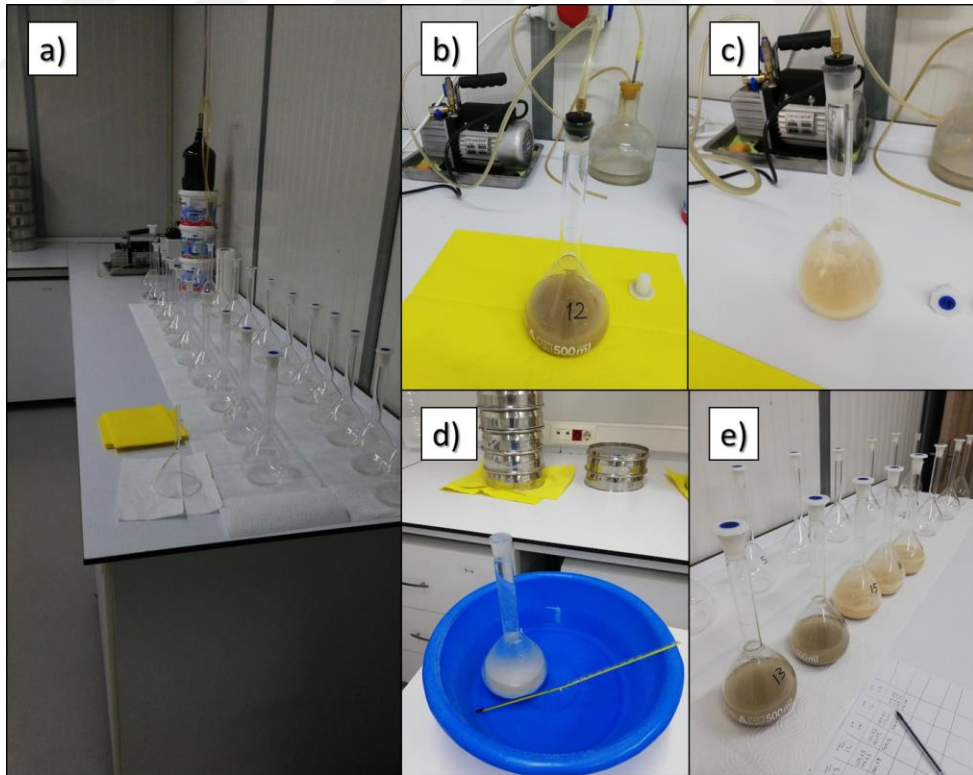


**Şekil 3.6** : Etüvde kurutulmuş silt numunenin ufalanması ve elekten geçirilerek saf silt olarak kullanılmak üzere hazır hale getirilmesi.

### 3.2.1 Özgül ağırlık

Deneylerde kullanılan ince kumun ve siltin özgül ağırlıkları ASTM D 854-02 standardına göre belirlenmiştir [27].

Şekil 3.7’de laboratuvarında bulunan özgül ağırlık deney düzeneği, silt ve ince kum numuneler üzerinde yapılan özgül ağırlık belirleme deneyleri gösterilmiştir. Deneylerde havası alınmış saf su kullanılmıştır ve tartımlar 20°C’de yapılmıştır.



**Şekil 3.7** : (a)Özgül ağırlık deney düzeneği, (b)ince kum, (c)silt numunelerin hava boşluklarının vakum pompası ile alınması,(d)havası alınmış numunelerin üzerine su eklenerek sıcaklığın sabitlenmesi için beklenilmesi, (e)su eklenen numunelerin havası alınmadan önce su içinde bekletilmesi.

Yapılan deney sonuçları Çizelge 3.1’de verilmiştir. Siltin özgül ağırlığı 2,73 ve ince kumun özgül ağırlığı 2,65 olarak belirlenmiştir.

**Çizelge 3.1 : Özgül ağırlık deney sonuçları.**

Malzeme Adı:	Piknometre No	Sıcaklık t °C	Pik. Kütleli m <sub>0</sub> ,g	Pik.+Su Kütleli m <sub>1</sub> ,g	Pik.+Num. Kütleli,g	Pik.+num.+ su kütleli m <sub>3</sub> ,g	Özgül Ağırlık, G <sub>s</sub>	Özgül Ağırlık G <sub>s</sub> (ortalama)
ince kum	12	20	154,72	679,26	252,82	740,43	2,656	<b>2,65</b>
	13	20	159,18	682,17	259,34	744,47	2,646	
	14	20	159,63	681,37	260,58	744,26	2,652	
silt	15	20	151,73	672,05	227,03	719,71	2,724	<b>2,73</b>
	16	20	157,01	679,44	230,28	725,88	2,731	
	17	20	149,02	667,8	224,84	715,89	2,734	

### 3.2.2 Maksimum ve minimum boşluk oranları

Silt ve ince kum numunelerinin minimum ve maksimum boşluk oranları, ASTM D4253 (Standart Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table) ve ASTM D4254 (Standart Test Method for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density) standartlarına göre belirlenmiştir [28-29].

Şekil 3.8’de maksimum ve minimum boşluk oranlarının bulunması için kullanılan aparat ve cihazlar gösterilmiştir. Şekil 3.9’da silt ve ince kum numunelerin alt tarafta minimum boşluk oranı, üst tarafta ise maksimum boşluk oranı olacak şekilde deney aşamaları gösterilmiştir.

Maksimum boşluk oranları bulunurken kalıbın içerisine ince kum ve silt zeminler en gevşek halde yerleştirilmiş ve kütleleri ölçülmüştür. Ölçülen kütle kalıp hacmine bölünerek minimum birim hacim kütle ( $\rho_{min}$ ) hesaplanmış ve gerekli formülasyonlar kullanılarak  $e_{maks}$  değeri bulunmuştur. Minimum boşluk oranları bulunurken ise kalıbın içerisine yerleştirilen ince kum ve silt türü zeminlerin üzerine sürşarj yükü uygulanarak standartlarda belirtilen sürelerde mekanik titreşim sehpası üzerinde bekletilmiştir [28-29]. Yük ve titreşim etkisiyle sıkışan zeminlerin tartımı yapılarak kalıp hacmine bölünmüştür. Hesaplanan maksimum birim hacim kütlelere ( $\rho_{maks}$ ) göre  $e_{min}$  değerleri kayıt altına alınmıştır.



**Şekil 3.8 :** (a)Minimum ve maksimum boşluk oranlarının bulunması için gerekli aparatlar, (b)titreşim sehpası.



**Şekil 3.9 :** Farklı gradasyonlarda hazırlanmış silt-ince kum karışımı numunelerin maksimum ve minimum boşluk oranlarının bulunması.

5 farklı gradasyonda hazırlanmış silt ve ince kum numunelere ait maksimum ve minimum boşluk oranları değerleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

**Çizelge 3.2 :** Silt ve ince kum numunelere ait maksimum ve minimum boşluk oranları

Deney No:	Numune Adı:		$G_s$	$\rho_{maks}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{min}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$e_{maks}$	$e_{min}$
	Silt	İnce Kum					
1	100	0	2,73	1,55	0,98	1,80	0,76
2	80	20	2,71	1,73	1,11	1,44	0,57
3	60	40	2,70	1,86	1,30	1,08	0,45
4	30	70	2,67	1,93	1,45	0,84	0,38
5	0	100	2,65	1,49	1,25	1,12	0,78

### 3.2.3 Dane çapı dağılım eğrisi

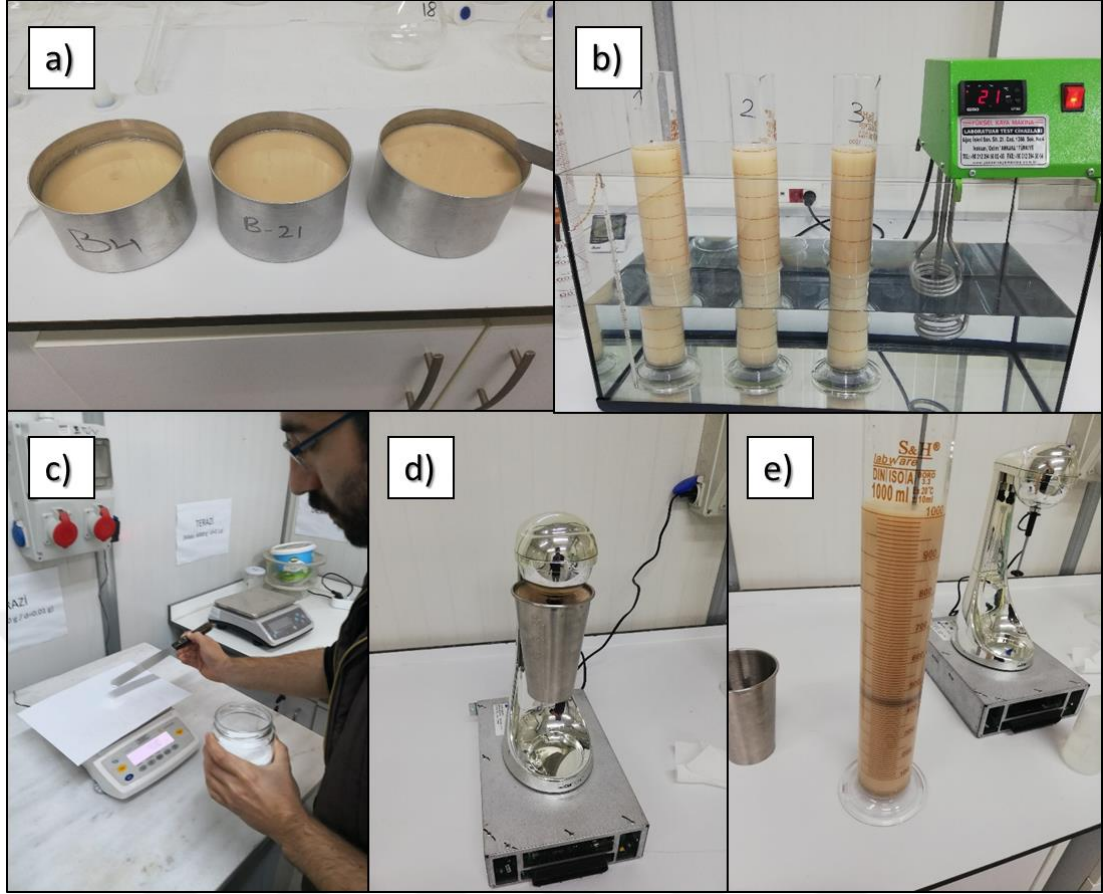
Enjeksiyon deneylerinde kullanılmak üzere 5 farklı gradasyon belirlenmiştir. Belirlenen silt-ince kum karışım yüzdeleri Çizelge 3.3’de verilmiştir.

**Çizelge 3.3 :** Silt-ince kum karışım yüzdeleri.

No	1	2	3	4	5
ince kum (%)	0	20	40	70	100
silt (%)	100	80	60	30	0

Belirlenen silt-ince kum karışımları üzerinde elek analizi ve hidrometre deneyleri ASTM D 422-63 ve TS 1900-1 standartlarına göre yapılmıştır [25-26].

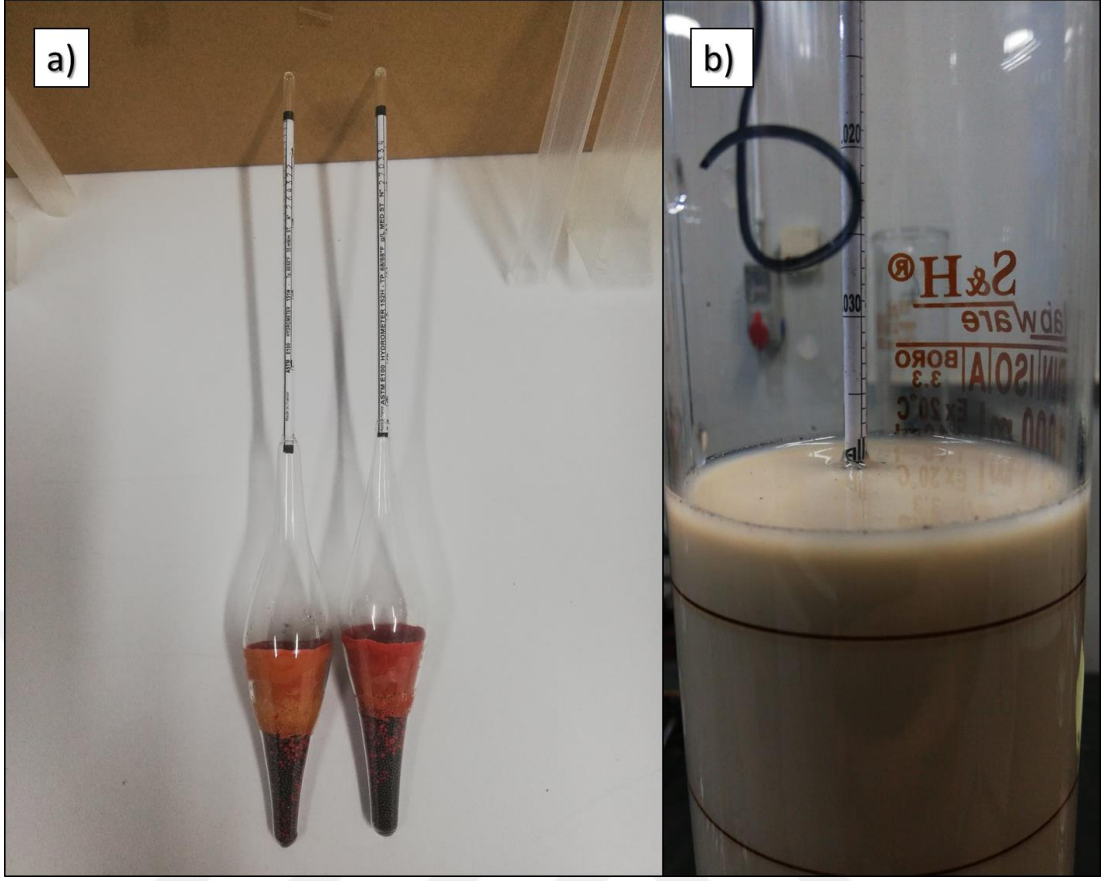
Hidrometre ve elek analizi deneylerinde hidrometre deneyinin bazı aşamaları Şekil 3.10’da gösterilmiştir.



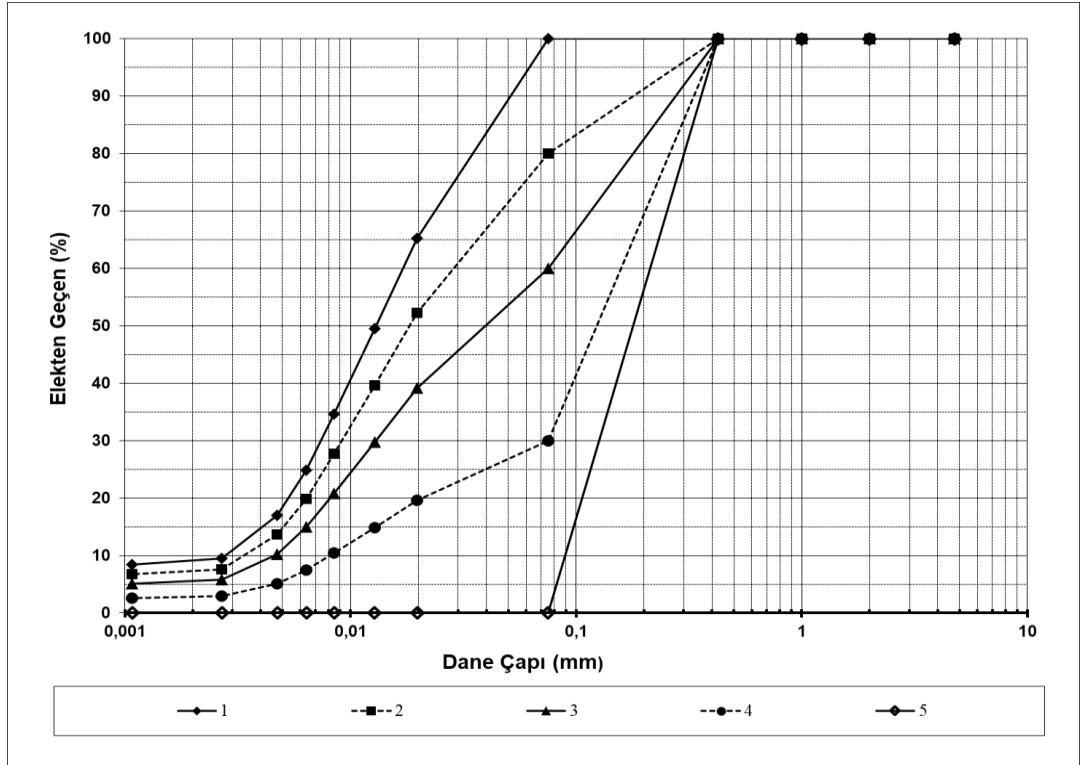
**Şekil 3.10 :** (a)Numunelerin sodyum heksametafosfat çözeltisinin içerisinde bekletilmesi, (b)deney süresi boyunca sıcaklığı sabit tutmak için numunelerin su banyosunda bekletilmesi, (c) standartta belirtilen oranlarda sodyum heksametafosfat çözeltisi hazırlanması, (d) hidrometre mikseri ile karıştırma işlemi, (e) deney okumaları başlatılmadan hemen önce son karıştırma işleminin yapılması.

Hidrometre deneyi belirtilen standartlara göre yapılmadan önce çeyrekleme ve yarılama metoduna göre istenilen miktara ulaşıncaya kadar homojen bir şekilde bölünmüştür. Deney sonuçlarının tutarlı olması için en az 3 defa tekrarlanmıştır. Hidrometre deneyi ASTM D 422-63 standartına göre yürütüldüğü için deneyde #10, #40 ve #200 nolu elekler kullanılmıştır ve malzemenin tamamı araziden ilk geldiğinde #40 nolu elekten elendiği için tekrardan yıkamalı bir eleme metoduna başvurulmamıştır. Deneyler hem 151H hem de 152H tipi ASTM hidrometreleriyle yapılarak sonuçlar teyit edilmiştir. Deneylerde kullanılan 151H ve 152H tipi hidrometreler ve hidrometre ölçümlerinin yapılması Şekil 3.11’de gösterilmiştir. Şekil 3.11’de gösterilen 1,2,3,4,5 nolu numuneler sırasıyla %100 silt-%0 ince kum, %80 silt-%20 ince kum, %60 silt-%40 ince kum, %30 silt-%70 ince kum ve %0 silt-%100 ince kum karışımlarını ifade etmektedir. Bu karışım oranları bir önceki sayfada bulunan Çizelge 3.3’te de ayrıca gösterilmiştir.





Şekil 3.11 : (a)151H ve 152H tipi hidrometreler, (b)hidrometre ölçümünün yapılması  
Yapılan deneylere göre elde edilen dane çapı dağılım eğrisi Şekil 3.12’de verilmiştir.



Şekil 3.12 : Dane çapı dağılım eğrisi.

### 3.2.4 Permeabilite katsayıları

Hidrolik iletkenlik SI birim sisteminde cm/sn veya m/sn olarak gösterilir. Zeminlerin hidrolik iletkenliği; akışkanın viskozitesi, dane boyutu dağılımı, boşluk oranı, gözenek dağılımı, doygunluk derecesi gibi faktörlere bağlıdır. Bazı zemin türlerine ait tipik hidrolik iletkenlik değerleri Çizelge 3.4’de verilmiştir [30].

Laboratuvar ortamında yapılan permeabilite deneyi sırasında zemin içerisinde hava kabarcıklarının hapsolması veya suyla beraber dışarı çıkması, doygunluk derecesinin %100’den az olması deneyin güvenilirliğini etkileyebilir. Ayrıca kum ve silt zeminler üzerinde yapılan deneyler sırasında ince danelerin dışarı atılması da deney sonuçlarını etkileyebilmektedir. Sıcaklık değişimleri de deney verilerini etkileyebilmektedir [31].

**Çizelge 3.4 :** Zemin türlerine ait tipik hidrolik iletkenlik değerleri [30].

<b>Zemin Türü</b>	<b>Hidrolik İletkenlik, k (cm/sn)</b>
Kil	<0,000001
Siltli Kil	0,00001-0,001
İnce Kum	0,001-0,01
İri Kum	0,01-1,0
Temiz Çakıl	1,0-100

Farklı gradasyonlarda hazırlanmış zemin numuneleri modlara yerleştirildikten sonra sabit seviyeli ve düşen seviyeli permeabilite deneylerine tabi tutulmuştur. %100, %80, %60 ve %30 silt içeren numuneler üzerinde yapılan sabit seviyeli permeabilite deneylerinden ince malzeme oranı yüksek olduğu için ölçüm alınamamıştır. Bu numunelere (%100, %80, %60 ve %30 silt içeren) daha sonra düşen seviyeli permeabilite deneyi yapılarak permeabilite katsayısı bulunmuştur. %100 ince kumun permeabilite katsayısı ise sabit seviyeli permeabilite deneyi ile bulunmuştur. Sabit ve düşen seviyeli permeabilite deneyleri ASTM D 5856 – 95 ve ASTM D2434 – 19 standartlarına uygun olarak yürütülmüştür [32-33]. Sabit seviyeli permeabilite deneylerinin hidrolik eğim (i) 13,5 olarak, düşen seviyeli permeabilite deneyinde ise hidrolik eğim (i) 18 olarak belirlenmiştir.

Sabit seviyeli permeabilite katsayısı hesaplamalarında kullanılan formüller Denklem (3.1) ve (3.2)’de gösterilmiştir.

$$i = \frac{h}{L} \quad (3.1)$$

$$k = \frac{Q \times L}{A \times h \times t} \quad (3.2)$$

Formüllerde ifade edilen semboller aşağıda gösterilmiştir:

Q= Su hacmi

L=Numune uzunluğu

A=Numune kesit alanı

t=Zaman

h=Su yüksekliği

i=Hidrolik eğim

Düşen seviyeli permeabilite katsayısı hesaplamalarında kullanılan formüller Denklem (3.3)'te gösterilmiştir.

$$k = 2.303 \frac{a \cdot L}{A \cdot t} \cdot \log_{10} \left( \frac{h_1}{h_2} \right) \quad (3.3)$$

Burada;

k:permeabilite katsayısı,

a:boru kesitinin alanı (iç),

L:numune boyu,

A:numune kesit alanı,

t:zaman,

h<sub>1</sub>: ilk su yüksekliği,

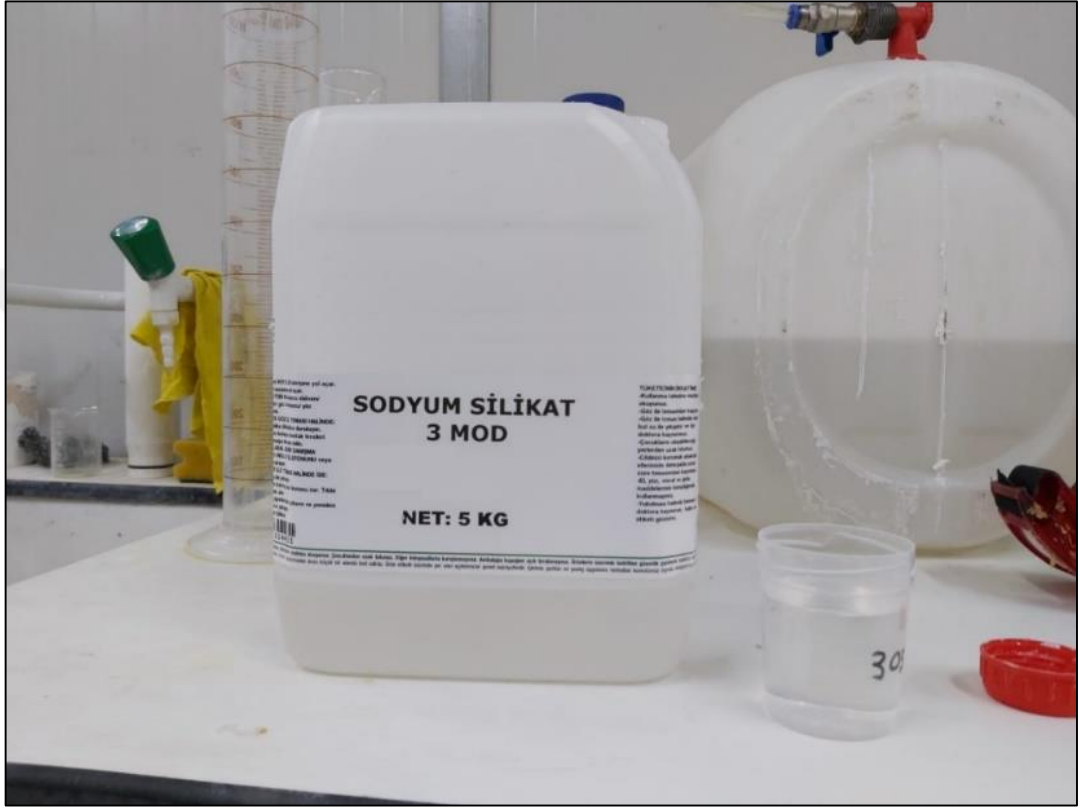
h<sub>2</sub>: son su yüksekliğini ifade etmektedir.

Deneilerin sonucunda 1 (% 100 silt), 2 (% 80 silt-% 20 ince kum), 3 (% 60 silt-% 40 ince kum), 4 (% 30 silt-% 70 ince kum) ve 5 (% 100 ince kum) numaralı numunelere ait geçirgenlik (permeabilite) katsayıları sırasıyla  $1,02 \times 10^{-4}$ ,  $2,69 \times 10^{-4}$ ,  $3,38 \times 10^{-4}$ ,  $1,8 \times 10^{-3}$  ve  $1,1 \times 10^{-2}$  cm/sn olarak hesaplanmıştır. Silt oranının azalmasıyla permeabilite (k) değerleri artmıştır.

### 3.3 Enjeksiyon Deneylerinde Kullanılan Kimyasal Malzemelerin Özellikleri

#### 3.3.1 Sodyum silikat

Kimyasal enjeksiyon deneylerinde su camı olarak da bilinen yerli üretim sodyum silikat malzemesi kullanılmıştır (Şekil 3.13). Sodyum silikata ait bazı fiziksel ve kimyasal özellikler 20°C 'ye göre Çizelge 3.5'de verilmiştir.



Şekil 3.13 : Sodyum Silikat (3 MOD).

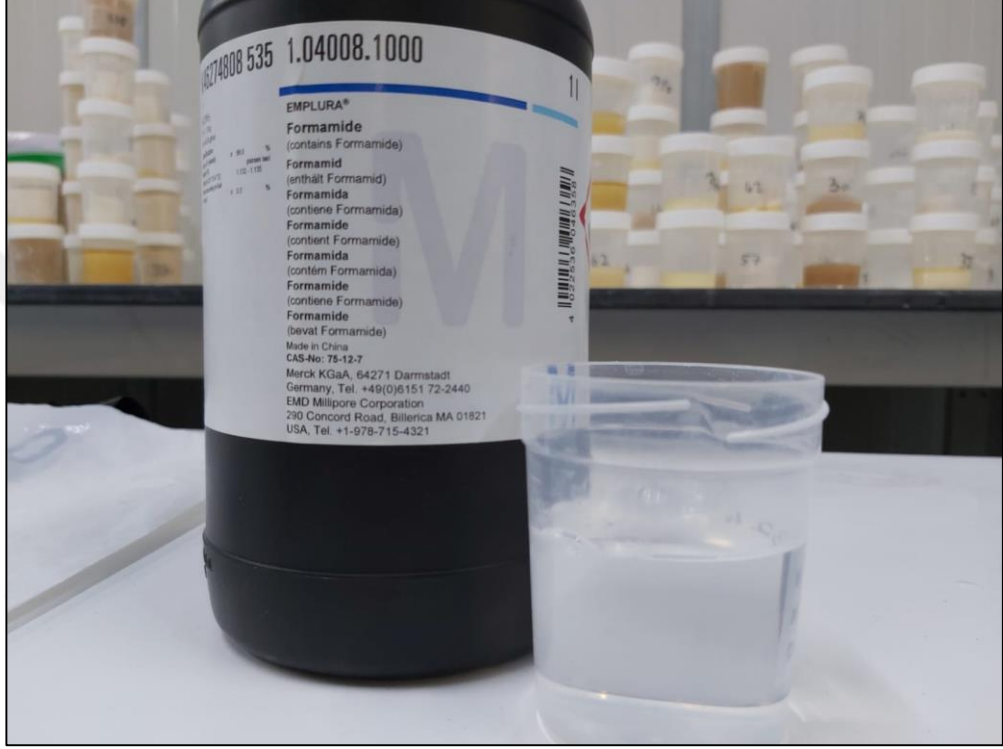
Çizelge 3.5 : Sodyum silikata ait fiziksel ve kimyasal özellikler.

Özellikler	Değerler
Kimyasal Formül	$\text{Na}_2\text{SiO}_3$
Görünüş	Berrak, sıvı
Moleküler Modül( $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ )	3,0-3,4
Be'	38-41
Yoğunluk ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	1,35-1,4
$\text{Na}_2\text{O}$ (%)	8,5-9,0
$\text{SiO}_2$ (%)	25,5-30,5
pH	11,8
Viskozite (cP)	75-150

### 3.3.2 Formamid

Enjeksiyon deneylerinde reaktant olarak kullanılan kimyasal malzemelerden birisi formik asit ve metan amid isimleriyle de bilinen organik bileşik formamiddir (Şekil 3.14).

Deneylede Merck firması tarafından üretilmiş formamid ürünü kullanılmıştır. Formamide ait bazı özellikler Çizelge 3.6’da verilmiştir.



Şekil 3.14 : Formamide ait bir görüntü.

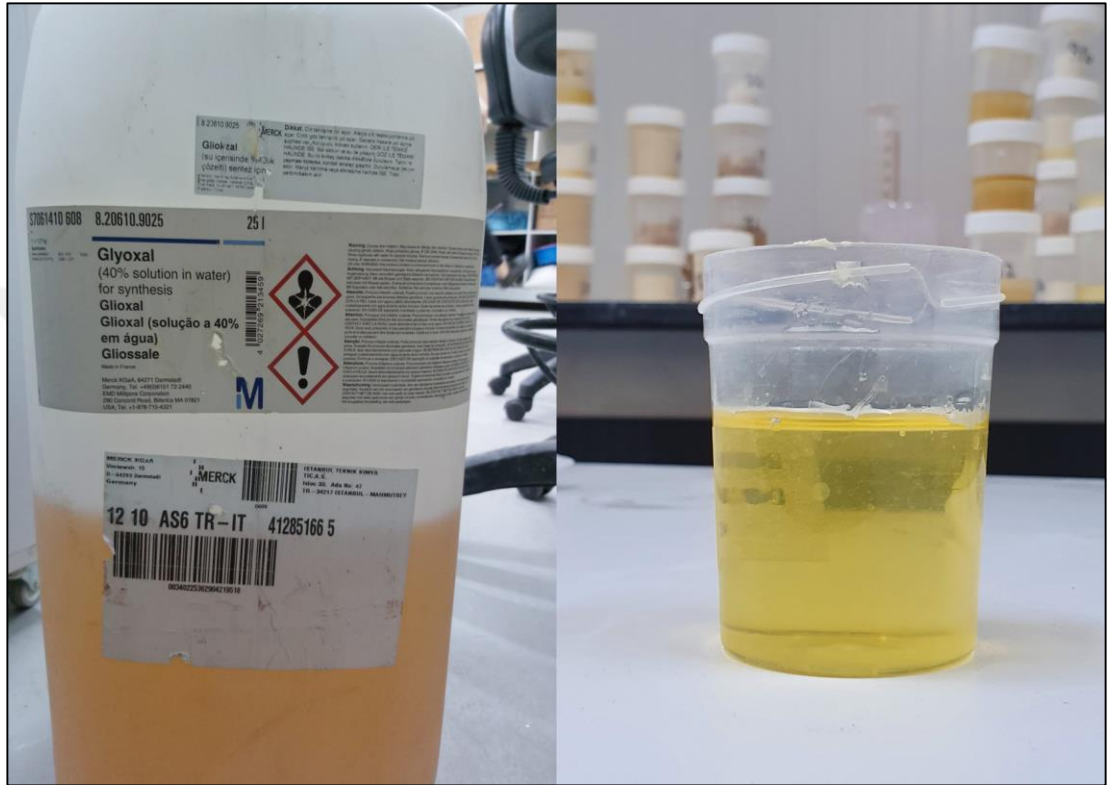
Çizelge 3.6 : Formamide ait fiziksel ve kimyasal özellikler [34].

Özellikler	Değerler
Kimyasal Formül	HCONH <sub>2</sub>
Görünüş	Berrak renksiz sıvı
Molar Kütle (g/mol)	45,04
Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	1,13
pH (200 g/l,20°C)	8-10
Erime noktası (°C)	2
Kaynama noktası (°C)	210

### 3.3.3 Glioksal

Deneysel çalışmalarda kullanılan bir diğer reaktant ise glioksaldır (Şekil 3.15). Merck firması tarafından üretilen organik bileşikli glioksal kimyasal enjeksiyon deneylerinde kullanılmıştır.

Glioksala ait bazı fiziksel ve kimyasal özellikler çizelge 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.15 : Glioksala ait görüntüler.

Çizelge 3.7 : Glioksala ait bazı fiziksel ve kimyasal özellikler[35-36].

Özellikler	Değerler
Kimyasal Formül	OCHCHO
Görünüş	Erime noktası yakınlarında sarı renkli sıvı
Otojenik Ateşleme Sıcaklığı (°C)	285
Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	1,27
pH (20°C)	2-3
Erime noktası (°C)	-14
Kaynama noktası (°C)	104

### **3.4 Kimyasal Solüsyonların Reolojik Özelliklerinin Belirlenmesi**

Deneysel çalışmanın bu aşamasında farklı oranlarda hazırlanmış sodyum silikat-formamid ve sodyum silikat-glioksal solüsyonlarının reolojik özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Karışımda ana malzemeyi sodyum silikat, reaktantları ise formamid ve glioksal oluşturmaktadır. Kimyasal enjeksiyonda kullanılacak en uygun karışım oranının belirlenmesinde reolojik özellikler oldukça önemlidir. Jelleşme süresi, sinerez yüzdesi ve viskozite değerlerine bakılarak en uygun oran belirlenmeye çalışılmıştır. Bunun yanı sıra jel yapısı (dayanımı) da en uygun oranın belirlenmesinde oldukça önemli bir faktördür.

#### **3.4.1 Jelleşme süresi**

Kimyasal enjeksiyonların uygulanabilirliği açısından jelleşme süresi oldukça önemlidir. Jelleşme süresinin laboratuvar ve arazi koşullarında enjeksiyon uygulamaları için yeterli olması gerekmektedir. Bazı durumlarda yeraltı suyunu kesmek için kullanılan kimyasal enjeksiyon çalışmalarında ise sürenin çok uzun olmaması ve ani jelleşmeye uygun olması gerekebilir. Aksi takdirde jel solüsyonu yeraltı suyu etkisiyle seyrelecek ve jel mukavemetini kaybedecektir veya hiç jelleşemeyecektir. Tüm bu etkenler göze alındığında uygun kimyasallar ve kimyasal oranlar belirlenirken jel süresinin ayarlanabilir olması gerekmektedir.

Yapılan deneysel çalışmalarda sodyum silikat-formamid solüsyonlarının jel süresinin karışım oranlarını ve ortam sıcaklığını değiştirerek kontrol edilebildiği görülmüştür. Bu kontrol mekanizması sodyum silikat-glioksal solüsyonları için nispeten daha zor işlemektedir. Burada zor işlemekten kasıt daha hassas olması, ortam şartlarından yüksek ölçüde etkilenmesidir. Bu solüsyonların jelleşme sürelerini belirleyebilmek için laboratuvar ortamında birçok deney yapılmış, veriler ve bulgular aşağıda paylaşılmıştır.

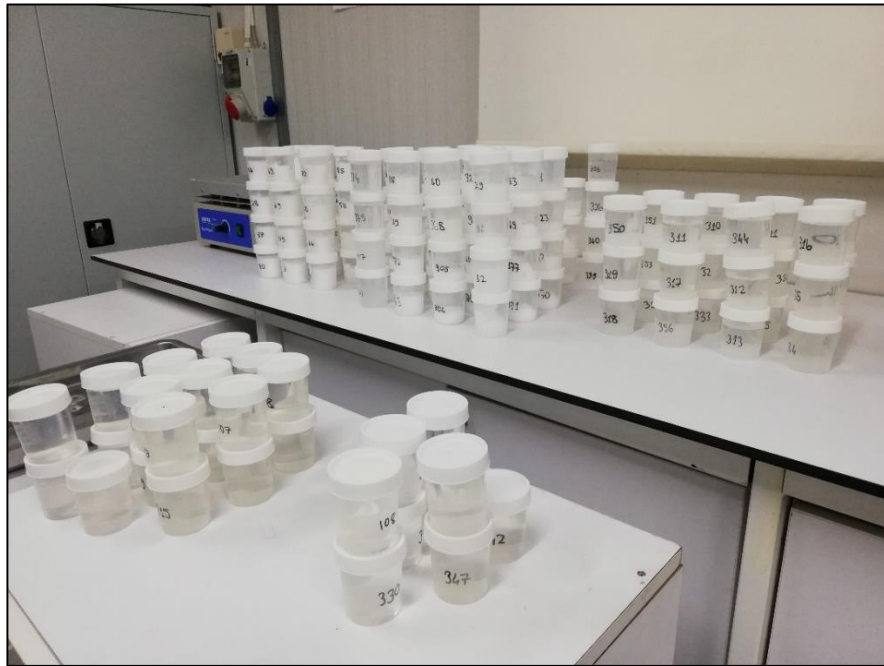
##### **3.4.1.1 Formamid-sodyum silikat solüsyonlarının jelleşme süreleri**

Kimyasal enjeksiyon deneylerinde kullanılmak üzere farklı sıcaklıklar altında (25°C ve 30°C), farklı S.S/Çöz. yüzdeleri ve formamid miktarlarını deneyerek jelleşme deneyleri yapılmıştır (Şekil 3.16).

Belirlenen oranlar Çizelge 3.8’de gösterilmiştir.

**Çizelge 3.8 :** Farklı oranlarda jelleşme deneylerine tabi tutulmuş sodyum silikat-formamid karışımları.

Deney No:	Su (ml):	Formamid (ml):	Sodyum Silikat (ml):	S.S/Çözelti Oranı (%)
F1	20	10	70	70
F2	30	10	60	60
F3	40	10	50	50
F4	50	10	40	40
F5	60	10	30	30
F6	15	15	70	70
F7	25	15	60	60
F8	35	15	50	50
F9	45	15	40	40
F10	55	15	30	30
F11	10	20	70	70
F12	20	20	60	60
F13	30	20	50	50
F14	40	20	40	40
F15	50	20	30	30



**Şekil 3.16 :** Jelleşme deneyleri.



Şekil 3.17’de jelleşmesi henüz tamamlanan numuneler gösterilmiştir. Jelleşmeden önce renksiz şeffaf renkte olan numuneler jelleşmesini tamamladıktan sonra beyaz renge bürünmektedir.



Şekil 3.17 : Jelleşmesini tamamlayan numuneler.

Şekil 3.18’de ise jelleşme aşamaları gösterilmeye çalışılmıştır. Viskozitesi giderek artan numune jelleşerek berrak renksiz kıvamdan, beyaz katı kıvama evrilmiştir.



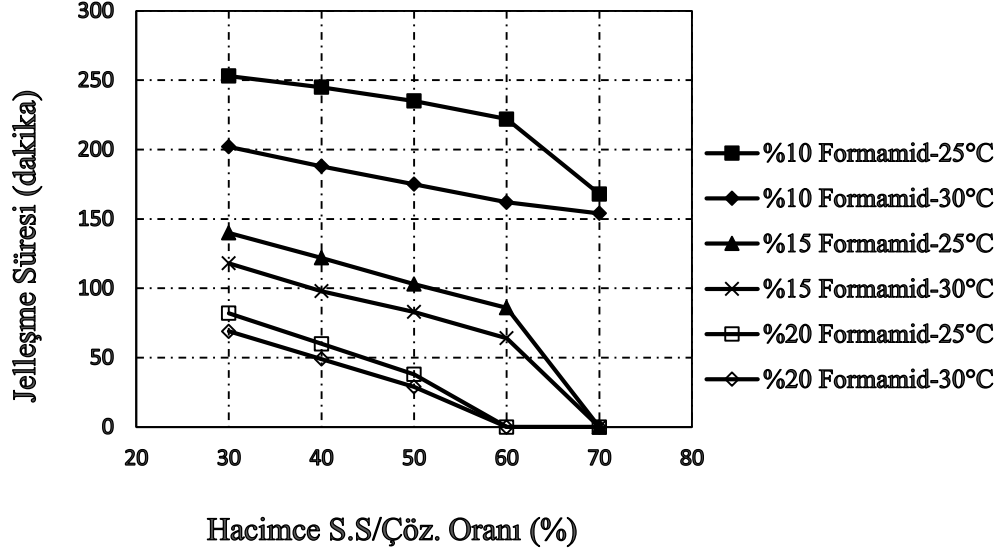
Şekil 3.18 : Jelleşme aşamaları sırasındaki renk değişimi.

Çizelge 3.9’da 25°C ve 30°C olmak üzere iki farklı sıcaklıktaki farklı oranlarda hazırlanmış sodyum silikat-formamid karışımlarına ait jelleşme sürelerine yer verilmiştir. Sıcaklığın artmasıyla jelleşme süreleri kısalmıştır.

**Çizelge 3.9 :** 25°C ve 30°C sıcaklıklardaki farklı sodyum silikat-formamid karışımlarına ait jelleşme süreleri.

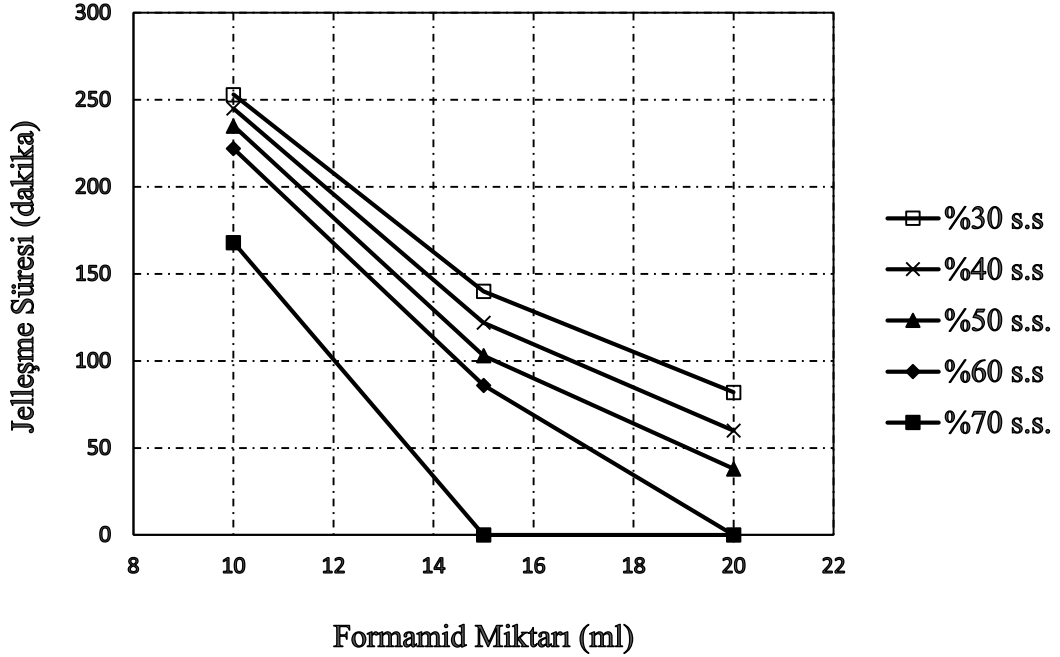
Deney No	Su (ml)	Formamid (ml)	Sodyum Silikat (ml)	S.S/Çöz. Oranı (%)	Jelleşme Süresi (dakika)	Sıcaklık (°C)	Jelleşme Süresi (dakika)	Sıcaklık (°C)
F1	20	10	70	70	168	25	154	30
F2	30	10	60	60	222	25	162	30
F3	40	10	50	50	235	25	175	30
F4	50	10	40	40	245	25	188	30
F5	60	10	30	30	253	25	202	30
F6	15	15	70	70	0	25	0	30
F7	25	15	60	60	86	25	64	30
F8	35	15	50	50	103	25	83	30
F9	45	15	40	40	122	25	98	30
F10	55	15	30	30	140	25	118	30
F11	10	20	70	70	0	25	0	30
F12	20	20	60	60	0	25	0	30
F13	30	20	50	50	38	25	29	30
F14	40	20	40	40	60	25	49	30
F15	50	20	30	30	82	25	69	30

S.S/Çöz. oranının artması ile jelleşme süresindeki değişimler sıcaklığa ve formamid miktarına bağlı olarak Şekil 3.19’da verilmiştir. S.S/Çöz. oranının artması jelleşme süreleri azalmaktadır. Ayrıca sıcaklığın ve formamid miktarının artmasıyla da jelleşme sürelerinin de azaldığı görülmektedir.



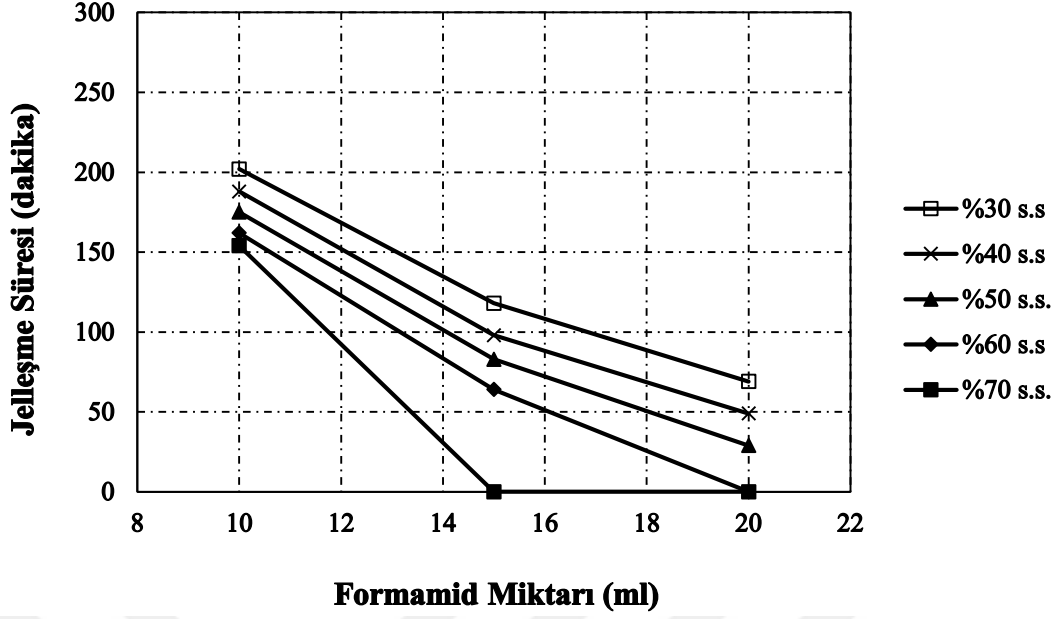
Şekil 3.19 : Jelleşme süresinin S.S/Çöz. oranı ile değişimi.

Şekil 3.20’de 25°C’de yapılmış jelleşme deneylerine göre formamid miktarının artması ile jelleşme sürelerinin kısaldığı görülmektedir. Bunun yanında S.S/Çöz. yüzdesinin artması, jelleşme sürelerini azaltmıştır.



Şekil 3.20 : 25°C’deki jelleşme süresinin formamid miktarına bağlı değişimi.

Şekil 3.21’de 30°C’de yapılmış jelleşme deneylerine göre formamid miktarının artması ile jelleşme sürelerinin kısaldığı görülmektedir. Bunun yanında S.S/Çöz. yüzdesinin artması, jelleşme sürelerini azaltmıştır.



Şekil 3.21 : 30°C’deki jelleşme süresinin formamid miktarına bağlı değişimi.

Sodyum silikat-formamid kimyasal karışım oranları üzerinde yapılan deneyler ışığında, sodyum silikat-formamid karışımlarının sıcaklık, reaktant miktarı ve S.S/Çöz. oranları ile jelleşme sürelerinin ayarlanabilir olduğu sonucuna varılmıştır. Jelleşme süreleri ayarlanırken numunelerin sinerez yüzdeleri ve viskozite gibi diğer reolojik özellikleri değişebilmektedir. Uygun oran seçilirken bu reolojik özellikler ve numunelerin jel yapılarına mutlaka dikkat edilmelidir.

#### 3.4.1.2 Glioksal- sodyum silikat solüsyonlarının jelleşme süreleri

Sodyum silikat-glioksal karışımlarının jelleşme süreleri üzerinde yapılan gözlemler, formamid ile yapılan denemelere nispeten çevresel faktörlerden daha fazla etkilendiği kanısına varılmasına yol açmıştır. Çünkü aynı ortam ve şartlarda yapılan deneyler sonucunda glioksal miktarı ve S.S/Çöz. gibi bağımsız değişkenler ile jelleşme süreleri arasında bir ilişki ortaya konulamamıştır. Genel olarak yapılan deneyler sonucunda reaktant miktarının artması jelleşme sürelerini kısaltmıştır. Çizelge 3.10 ve Çizelge 3.11’de yapılan deneylerde elde edilen veriler paylaşılmıştır. Şekil 3.22’de sodyum silikat-glioksal karışımlarının jelleşme deneyleri gösterilmiştir. Hazırlanırken glioksalın açık sarı rengini alan karışımlar, jelleşmesini tamamladıktan sonra beyaz renge bürünmüştür. Sinerez durumunun başlamasıyla birlikte numuneler zamana bağlı olarak büzülmüş ve dışarıya su kismaya başlamıştır. Kusulan bu su koyu sarı-kahverengi arası renkte iken ana jel yapısı hala beyaz renkte görünmektedir.

**Çizelge 3.10 : G1 ile G36 arasındaki karışımların jelleşme süreleri**

Deney No:	Su miktarı (ml)	Glioksal miktarı (ml)	Sodyum Silikat miktarı (ml)	S.S/Çözelti Oranı (%)	Jelleşme Süresi (dk)	Sıcaklık (°C)
G1	40	5	40	47,06	562	25
G2	45	5	40	44,44	532	25
G3	50	5	40	42,11	507	25
G4	50	5	30	35,29	25	25
G5	55	5	30	33,33	27	25
G6	60	5	30	31,58	31	25
G7	33	7	60	60,00	83	25
G8	38	7	55	55,00	29	25
G9	35	7	50	54,35	26	25
G10	43	7	50	50,00	20	25
G11	27,5	7,5	65	65,00	29	25
G12	32,5	7,5	60	60,00	28	25
G13	37,5	7,5	55	55,00	26	25
G14	15	8	70	75,27	20	25
G15	17	8	75	75,00	13	25
G16	22	8	70	70,00	16	25
G17	27	8	65	65,00	15	25
G18	32	8	60	60,00	16	25
G19	37	8	55	55,00	16	25
G20	35	8	50	53,76	20	25
G21	42	8	50	50,00	14	25
G22	15	9	70	74,47	18	25
G23	35	9	50	53,19	17	25
G24	15	10	75	75,00	8	25
G25	15	10	70	73,68	14	25
G26	20	10	70	70,00	14	25
G27	25	10	65	65,00	9	25
G28	25	10	60	63,16	8	25
G29	30	10	60	60,00	12	25
G30	30	10	50	55,56	10	25
G31	35	10	55	55,00	9	25
G32	35	10	50	52,63	14	25
G33	40	10	50	50,00	12	25
G34	45	10	45	45,00	10	25
G35	40	10	40	44,44	9	25
G36	45	10	40	42,11	10	25

**Çizelge 3.11 : G37 ile G72 arasındaki karışımların jelleşme süreleri**

Deney No:	Su miktarı (ml)	Glioksal miktarı (ml)	Sodyum Silikat miktarı (ml)	S.S/Çözelti Oranı (%)	Jelleşme Süresi (dk)	Sıcaklık (°C)
G37	50	10	40	40,00	14	25
G38	50	10	30	33,33	11	25
G39	55	10	30	31,58	11	25
G40	60	10	30	30,00	16	25
G41	15	11	70	72,92	15	25
G42	35	11	50	52,08	17	25
G43	15	12	70	72,16	14	25
G44	25	12	60	61,86	14	25
G45	30	12	50	54,35	16	25
G46	35	12	50	51,55	16	25
G47	15	13	70	71,43	13	25
G48	25	13	60	61,22	15	25
G49	30	13	50	53,76	15	25
G50	35	13	50	51,02	16	25
G51	15	14	70	70,71	14	25
G52	25	14	60	60,61	17	25
G53	30	14	50	53,19	15	25
G54	35	14	50	50,51	15	25
G55	15	15	70	70,00	10	25
G56	25	15	60	60,00	12	25
G57	30	15	50	52,63	15	25
G58	35	15	50	50,00	10	25
G59	45	15	40	40,00	11	25
G60	55	15	30	30,00	11	25
G61	25	16	60	59,41	14	25
G62	30	16	50	52,08	14	25
G63	25	17	60	58,82	13	25
G64	30	17	50	51,55	14	25
G65	25	18	60	58,25	13	25
G66	30	18	50	51,02	8	25
G67	25	19	60	57,69	13	25
G68	30	19	50	50,51	12	25
G69	20	20	60	60,00	7	25
G70	30	20	50	50,00	9	25
G71	40	20	40	40,00	8	25
G72	50	20	30	30,00	8	25



Şekil 3.22 : Glioksal-sodyum silikat karışımların jelleşme deneyleri

### 3.4.2 Sinerez

Jelleşmede başarılı olan kimyasal karışımların 3., 7., 14., 28. ve 56. günlerdeki sinerez ölçümleri yapılmıştır. Sinerez yüzdesi, belirtilen günlerdeki numunelerin büzülmesiyle dışarı çıkan suyun hacminin numunenin ilk hacmine bölünmesiyle hesaplanır. Sinerez yüzdesinin fazla olması istenmez. Sinerez yüzdesi enjeksiyon malzemesi veya karışım oranı tercihinde tek başına yeterli değildir. Malzeme seçimi ve karışım oranı tercihinde sinerezin yanında jel yapısı ve viskozitede de dikkate alınmalıdır.

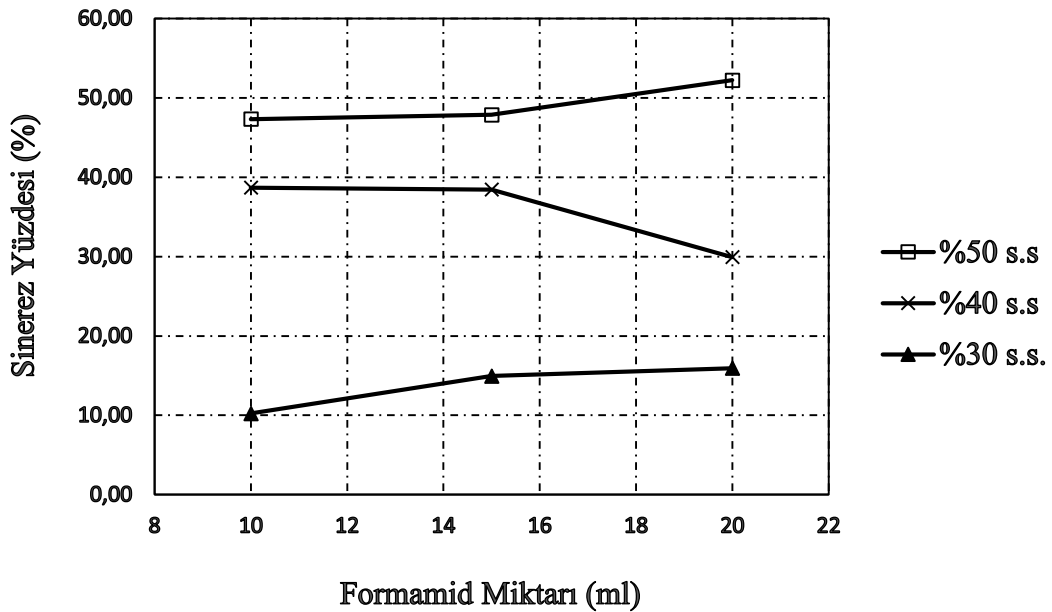
#### 3.4.2.1 Sodyum silikat-formamid karışımların sinerez yüzdeleri

Belirlenen sodyum silikat-formamid karışımlarının sinerez yüzdeleri belirli günlerde ölçülerek Çizelge 3.12’de verilmiştir.

**Çizelge 3.12 : Sodyum silikat-formamid karışımlarının sinerez yüzdeleri.**

Deney No:	Su Miktarı (ml)	Formamid Miktarı (ml)	Sodyum Silikat Miktarı (ml)	S.S/Çözelti Oranı (%)	3.GÜN SİNEREZ (%)	7.GÜN SİNEREZ (%)	14.GÜN SİNEREZ (%)	28.GÜN SİNEREZ (%)	56.GÜN SİNEREZ (%)
F1	20	10	70	70,00	45,95	53,90	57,75	61,13	62,49
F2	30	10	60	60,00	51,42	58,61	61,98	64,55	66,63
F3	40	10	50	50,00	33,20	41,29	44,76	46,78	47,33
F4	50	10	40	40,00	33,93	37,75	38,51	38,68	38,68
F5	60	10	30	30,00	9,64	10,23	10,23	10,23	10,23
F7	25	15	60	60,00	53,49	60,03	63,25	65,25	66,45
F8	35	15	50	50,00	40,56	45,93	47,52	47,88	47,88
F9	45	15	40	40,00	35,94	38,45	38,45	38,45	38,45
F10	55	15	30	30,00	14,13	14,95	14,95	14,95	14,95
F13	30	20	50	50,00	46,77	51,13	52,08	52,22	52,22
F14	40	20	40	40,00	28,65	29,94	29,94	29,94	29,94
F15	50	20	30	30,00	15,48	15,93	15,93	15,93	15,93

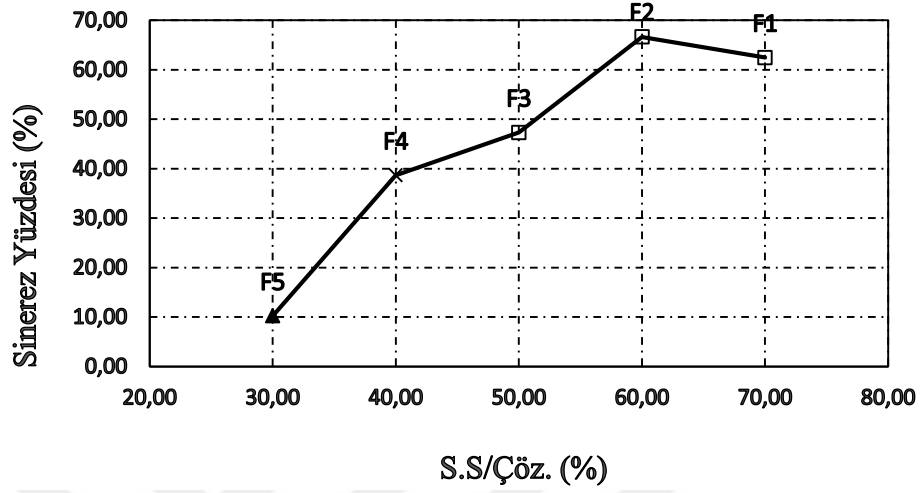
Yapılan deneylerde formamid miktarının sinerez yüzdesi üzerinde fazla bir etkisi olmadığı Şekil 3.23’den anlaşılmaktadır. Reaktant olarak kullanılan formamid miktarı sabit tutulup, S.S/Çöz. oranı arttırıldığı takdirde sinerez yüzdesinin arttığı belirlenmiştir. %30 ve %70 S.S/Çöz. içeriğine sahip numunelerde formamid miktarına bağlı sinerez yüzdeleri artmakta iken %40 S.S/Çöz. oranına sahip numunelerde reaktant miktarı arttıkça sinerez yüzdesi aksine azalmıştır.



**Şekil 3.23 : Sinerez yüzdesinin formamid miktarı ile değişimi.**



S.S/Çöz. oranının artmasıyla sinerez yüzdesi artmış %60 S.S/Çöz. oranında maksimum değere ulaşmış bu değerden (%60 S.S/Çöz. Oranı) sonra sinerez yüzdesi azalmıştır (Şekil 3.24). F1 kimyasal karışımında F2 karışımına göre sinerez yüzdesinde %4 civarında bir azalma gözlemlenmiştir.



Şekil 3.24 : 56.gün sodyum silikat-formamid karışımlarının sinerez yüzdesinin S.S/Çöz oranı ile değişimi.

### 3.4.2.2 Sodyum silikat-glioksal karışımların sinerez yüzdeleri

Sodyum silikat-glioksal karışımları üzerinde 3., 7., 14., 28. ve 56. günlerde sinerez ölçümleri yapılmıştır (Şekil 3.25). Glioksal ile olan sodyum silikat karışımlarında çoğu oranda sinerez yüzdesi epey yüksek çıkmıştır. Karışım oranları ve sinerez yüzdeleri Çizelge 3.13 ve Çizelge 3.14'te verilmiştir.



Şekil 3.25 : Sinerez ölçümleri yapılmış olan sodyum silikat-glioksal karışımları.

**Çizelge 3.13 : G1-G36 arası sodyum silikat-glioksal karışımları sinerez yüzdeleri**

Deney No:	Su Miktarı (ml)	Glioksal Miktarı (ml)	Sodyum Silikat Miktarı (ml)	S.S/Çöz. Oranı (%)	3.GÜN SİNEREZ (%)	7.GÜN SİNEREZ (%)	14.GÜN SİNEREZ (%)	28.GÜN SİNEREZ (%)	56.GÜN SİNEREZ (%)
G1	40	5	40	47,06	53,01	81,43	88,92	92,68	93,60
G2	45	5	40	44,44	52,37	84,15	92,35	96,32	97,94
G3	50	5	40	39,38	55,11	81,57	88,72	92,09	94,15
G4	50	5	30	35,29	63,49	77,04	84,18	87,80	88,52
G5	55	5	30	33,33	62,17	75,55	82,87	87,13	89,18
G6	60	5	30	31,58	59,56	76,20	85,13	89,85	92,44
G7	33	7	60	60,00	4,59	46,60	81,58	87,88	88,69
G8	38	7	55	55,00	28,10	74,72	84,26	86,74	87,37
G9	35	7	50	54,35	47,51	73,64	78,81	79,38	79,45
G10	43	7	50	50,00	53,05	80,15	86,21	86,21	86,21
G11	27,5	7,5	65	65,00	20,85	54,36	75,69	77,87	78,14
G12	32,5	7,5	60	60,00	46,43	67,48	78,20	81,36	82,12
G13	37,5	7,5	55	55,00	62,67	77,50	81,17	81,77	81,94
G14	15	8	70	75,27	15,45	51,03	58,26	59,13	59,67
G15	17	8	75	75,00	0,17	2,33	8,81	55,17	59,43
G16	22	8	70	70,00	8,57	44,81	66,77	69,47	69,72
G17	27	8	65	65,00	13,84	61,66	73,52	74,85	75,11
G18	32	8	60	60,00	34,05	62,50	70,15	75,65	77,27
G19	37	8	55	55,00	54,60	61,76	62,97	70,04	74,64
G20	35	8	50	53,76	54,51	71,70	76,06	76,36	76,64
G21	42	8	50	50,00	57,56	77,90	82,21	82,52	82,52
G22	15	9	70	74,47	39,52	61,23	62,66	63,09	63,35
G23	35	9	50	53,19	46,50	65,44	74,33	74,76	75,17
G24	15	10	75	75,00	11,49	53,26	63,20	65,12	65,57
G25	15	10	70	73,68	20,41	52,25	62,64	64,46	64,75
G26	20	10	70	70,00	34,30	60,56	68,91	69,55	69,87
G27	25	10	65	65,00	30,07	64,70	72,25	72,87	72,95
G28	25	10	60	63,16	49,75	62,06	69,76	73,23	74,16
G29	30	10	60	60,00	46,37	59,24	69,05	75,27	76,56
G30	30	10	50	55,56	57,03	66,05	71,65	74,75	76,29
G31	35	10	55	55,00	55,11	70,54	76,96	79,37	79,64
G32	35	10	50	52,63	41,57	55,65	67,00	74,41	78,60
G33	40	10	50	50,00	52,66	64,60	74,28	77,82	77,82
G34	45	10	45	45,00	28,98	45,39	57,43	67,44	75,77
G35	40	10	40	44,44	16,28	20,63	25,49	32,56	40,81
G36	45	10	40	42,11	14,65	18,82	24,47	31,44	37,83

**Çizelge 3.14 : G37-G72 arası sodyum silikat-glioksal karışımları sinerez yüzdeleri**

Deney No:	Su Miktarı (ml)	Glioksal Miktarı (ml)	Sodyum Silikat Miktarı (ml)	S.S/Çöz. Oran (%)	3.GÜN SİNEREZ (%)	7.GÜN SİNEREZ (%)	14.GÜN SİNEREZ (%)	28.GÜN SİNEREZ (%)	56.GÜN SİNEREZ (%)
G37	50	10	40	40,00	10,29	13,53	20,39	28,39	38,18
G38	50	10	30	33,33	3,58	3,75	3,75	3,75	3,75
G39	55	10	30	31,58	3,55	3,61	3,61	3,76	3,76
G40	60	10	30	30,00	2,41	2,72	2,72	2,72	2,72
G41	15	11	70	72,92	24,33	57,50	66,15	67,44	67,44
G42	35	11	50	52,08	26,60	41,11	53,43	62,80	70,76
G43	15	12	70	72,16	25,24	56,51	68,33	70,14	70,35
G44	25	12	60	61,86	32,14	49,55	62,41	70,85	76,29
G45	30	12	50	54,35	15,47	19,04	24,07	29,21	36,45
G46	35	12	50	51,55	14,91	21,12	28,32	35,12	44,02
G47	15	13	70	71,43	41,13	58,43	67,97	68,96	69,47
G48	25	13	60	61,22	26,20	40,61	52,97	61,78	70,06
G49	30	13	50	53,76	12,51	14,81	17,23	19,83	23,63
G50	35	13	50	51,02	11,94	12,87	15,78	18,33	23,99
G51	15	14	70	70,71	39,52	57,17	66,61	71,33	72,22
G52	25	14	60	60,61	18,84	28,32	37,72	46,14	51,91
G53	30	14	50	53,19	10,93	11,33	12,44	13,80	15,60
G54	35	14	50	50,51	9,31	9,66	9,90	10,55	11,99
G55	15	15	70	70,00	38,31	49,10	59,00	67,04	73,33
G56	25	15	60	60,00	16,74	20,25	24,66	29,66	35,64
G57	30	15	50	52,63	11,49	11,49	11,49	11,51	11,51
G58	35	15	50	50,00	10,38	10,57	10,57	10,62	10,62
G59	45	15	40	40,00	5,89	6,15	6,15	6,15	6,15
G60	55	15	30	30,00	3,62	3,93	3,93	4,33	4,33
G61	25	16	60	59,41	13,68	17,24	19,61	22,59	26,36
G62	30	16	50	52,08	11,05	11,05	11,05	11,05	11,05
G63	25	17	60	58,82	13,46	16,12	18,58	20,33	21,78
G64	30	17	50	51,55	11,25	11,27	11,27	11,27	11,27
G65	25	18	60	58,25	10,73	11,50	12,17	12,78	13,37
G66	30	18	50	51,02	7,79	7,85	7,90	7,93	7,93
G67	25	19	60	57,69	12,46	12,60	12,60	12,60	12,60
G68	30	19	50	50,51	10,11	10,11	10,11	10,11	10,11
G69	20	20	60	60,00	10,66	11,32	11,32	11,32	11,32
G70	30	20	50	50,00	9,18	9,38	9,52	9,52	9,52
G71	40	20	40	40,00	5,82	5,82	5,82	5,82	5,82
G72	50	20	30	30,00	3,37	3,55	3,55	3,55	3,55

### 3.4.3 Viskozite

#### 3.4.3.1 Sodyum silikat-formamid karışımlarının viskozite değerleri

Yapılan sodyum silikat-formamid karışımlarının viskozite deneyleri sonucunda elde edilen ölçüm değerleri Çizelge 3.15'te verilmiştir. S.S/Çöz. oranının artmasıyla viskozite değerlerinin arttığı görülmektedir. Aynı zamanda formamid miktarının artışı viskozite değerlerini, S.S/Çöz. oranının artışına nispeten, daha az da olsa arttırmıştır. F6, F11 ve F12 karışımları karıştırırken jelleştiği için viskozite ölçümleri yapılamamıştır.

**Çizelge 3.15 :** Sodyum silikat-formamid karışımlarının viskozite değerleri

Deney No:	Su (ml):	Formamid (ml):	Sodyum Silikat (ml):	S.S/Çöz. Oranı (%)	Viskozite (cP)
F1	20	10	70	70	7,16
F2	30	10	60	60	4,08
F3	40	10	50	50	3,18
F4	50	10	40	40	1,99
F5	60	10	30	30	1,48
F6	15	15	70	70	-
F7	25	15	60	60	4,35
F8	35	15	50	50	3,42
F9	45	15	40	40	2,19
F10	55	15	30	30	1,49
F11	10	20	70	70	-
F12	20	20	60	60	-
F13	30	20	50	50	3,43
F14	40	20	40	40	2,01
F15	50	20	30	30	1,51

#### 3.4.3.2 Sodyum silikat-glioksal karışımlarının viskozite değerleri

Yapılan sodyum silikat-glioksal karışımlarının viskozite deneyleri sonucunda elde edilen ölçüm değerleri Çizelge 3.16'da verilmiştir.

Yapılan viskozite ölçümlerinde reaktant (glioksal) miktarı aynı olan numuneler üzerinde değerlendirme yapılmış ve S.S/Çöz. oranının artmasıyla viskozite değerleri artmıştır. S.S/Çöz. oranı aynı olan numuneler üzerinde yapılan değerlendirmeler sonucunda da reaktant miktarı arttıkça viskozite değerlerinin arttığı görülmüştür.

**Çizelge 3.16 : Sodyum silikat-glioksal karışımlarının viskozite değerleri.**

Deneç No	Su Miktarı (ml)	Glioksal Miktarı (ml)	Sodyum Silikat Miktarı (ml)	S,S/Çözelti Oranı (%)	Viskozite (cP)	Deneç No	Su Miktarı (ml)	Glioksal Miktarı (ml)	Sodyum Silikat Miktarı (ml)	S,S/Çözelti Oranı (%)	Viskozite (cP)
G1	40	5	40	47,06	3,36	G37	50	10	40	40,00	1,93
G2	45	5	40	44,44	2,95	G38	50	10	30	33,33	1,63
G3	50	5	40	42,11	2,83	G39	55	10	30	31,58	1,58
G4	50	5	30	35,29	1,71	G40	60	10	30	30,00	1,52
G5	55	5	30	33,33	1,59	G41	15	11	70	72,92	5,02
G6	60	5	30	31,58	1,55	G42	35	11	50	52,08	3,89
G7	33	7	60	60,00	4,38	G43	15	12	70	72,16	5,01
G8	38	7	55	55,00	4,02	G44	25	12	60	61,86	4,59
G9	35	7	50	54,35	3,96	G45	30	12	50	54,35	4,02
G10	43	7	50	50,00	3,87	G46	35	12	50	51,55	3,97
G11	27,5	7,5	65	65,00	4,58	G47	15	13	70	71,43	4,96
G12	32,5	7,5	60	60,00	4,41	G48	25	13	60	61,22	4,57
G13	37,5	7,5	55	55,00	4,03	G49	30	13	50	53,76	4,13
G14	15	8	70	75,27	5,32	G50	35	13	50	51,02	4,09
G15	17	8	75	75,00	5,26	G51	15	14	70	70,71	4,89
G16	22	8	70	70,00	4,85	G52	25	14	60	60,61	4,49
G17	27	8	65	65,00	4,61	G53	30	14	50	53,19	3,99
G18	32	8	60	60,00	4,42	G54	35	14	50	50,51	3,92
G19	37	8	55	55,00	4,04	G55	15	15	70	70,00	4,88
G20	35	8	50	53,76	3,91	G56	25	15	60	60,00	4,44
G21	42	8	50	50,00	3,89	G57	30	15	50	52,63	3,93
G22	15	9	70	74,47	5,18	G58	35	15	50	50,00	3,92
G23	35	9	50	53,19	3,9	G59	45	15	40	40,00	1,94
G24	15	10	75	75,00	5,29	G60	55	15	30	30,00	1,53
G25	15	10	70	73,68	5,18	G61	25	16	60	59,41	4,45
G26	20	10	70	70,00	4,87	G62	30	16	50	52,08	3,92
G27	25	10	65	65,00	4,65	G63	25	17	60	58,82	4,28
G28	25	10	60	63,16	4,57	G64	30	17	50	51,55	4,1
G29	30	10	60	60,00	4,43	G65	25	18	60	58,25	4,31
G30	30	10	50	55,56	4,08	G66	30	18	50	51,02	4,1
G31	35	10	55	55,00	4,14	G67	25	19	60	57,69	4,39
G32	35	10	50	52,63	3,89	G68	30	19	50	50,51	3,92
G33	40	10	50	50,00	3,91	G69	20	20	60	60,00	4,45
G34	45	10	45	45,00	3,06	G70	30	20	50	50,00	3,93
G35	40	10	40	44,44	2,96	G71	40	20	40	40,00	1,96
G36	45	10	40	42,11	2,85	G72	50	20	30	30,00	1,55

### 3.5 Farklı Gradasyonlardaki Numunelerin Moldlara Yerleştirilmesi

Enjeksiyon deneylerinde kullanılacak silt-ince kum karışımlarının %30 rölatif sıklıkta hazırlanabilmesi için hesaplanan  $e_{maks}$  ve  $e_{min}$  değerleri kullanılarak boşluk oranları ( $e_0$ ) hesaplanmıştır. Hesaplanan  $e_0$  değerlerine göre hacimleri ( $V_m$ ) belli olan moldlar içerisine yerleştirilecek numune kütleleri 5 farklı gradasyon için aşağıdaki formüller yardımıyla hesaplanmıştır( Denklem 3.4, Denklem 3.5, Denklem 3.6).

$$D_r(\%) = \frac{e_{maks} - e_0}{e_{maks} - e_{min}} \times 100 \quad (3.4)$$

$$e_0 = \frac{G_s \times \rho_w}{\gamma} - 1 \quad (3.5)$$

$$M = \gamma \times V_m \quad (3.6)$$

Yukarıdaki formüllerde;

$D_r$ = Rölatif sıklık

$e_{maks}$ =Maksimum boşluk oranı

$e_{min}$ =Minimum boşluk oranı

$e_0$ =İstenen rölatif sıklıktaki boşluk oranı

$G_s$ =Özgül ağırlık

$\gamma$ = Birim hacim ağırlık

$\rho_w$ =Su yoğunluğu

$V_m$ =Mold hacmi

$M$ =Mold içine yerleştirilecek kütle 'yi ifade etmektedir.

Moldların içerisine 3 tabaka halinde yerleştirilecek numune kütleleri Çizelge 3.17'da verilmiştir.

Enjeksiyon numunelerinin hazır hale getirilmesi için özel imal edilen PPRC enjeksiyon moldları kullanılmıştır (Şekil 3.26). Moldların yükseklikleri 120 mm, iç çapları ise 52 mm olarak dizayn edilmiştir. Enjeksiyon sırasında basınç yüzünden malzeme sızmalarını engellemek amacıyla contalı üst ve alt kestamit başlıklar kullanılmıştır. Başlıklarda, sabitlemek için kelebek somunlar ve saplama milleri, enjeksiyon malzemesinin çıkış ve girişini sağlamak amacıyla da pnömomatik rekorlar takılmıştır ve bunlara uygun 10 mm çaplı pnömomatik bükülebilir hortumlar kullanılmıştır (Şekil 3.27). Enjeksiyon modları permeabilite deneylerinde de rahatlıkla kullanılabilir şekilde dizayn edilmiştir.

**Çizelge 3.17 : Moldara yerleştirilecek silt-ince kum karışımlarının miktarları**

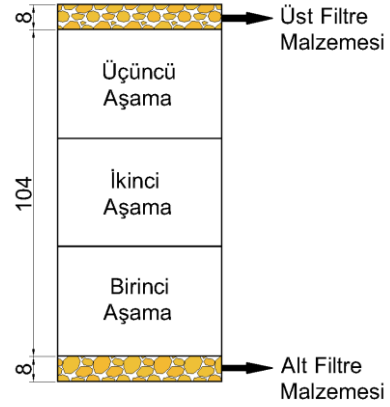
Hazırlanacak rölatif sıklık(%)=30

Mold yüksekliği(mm)=120

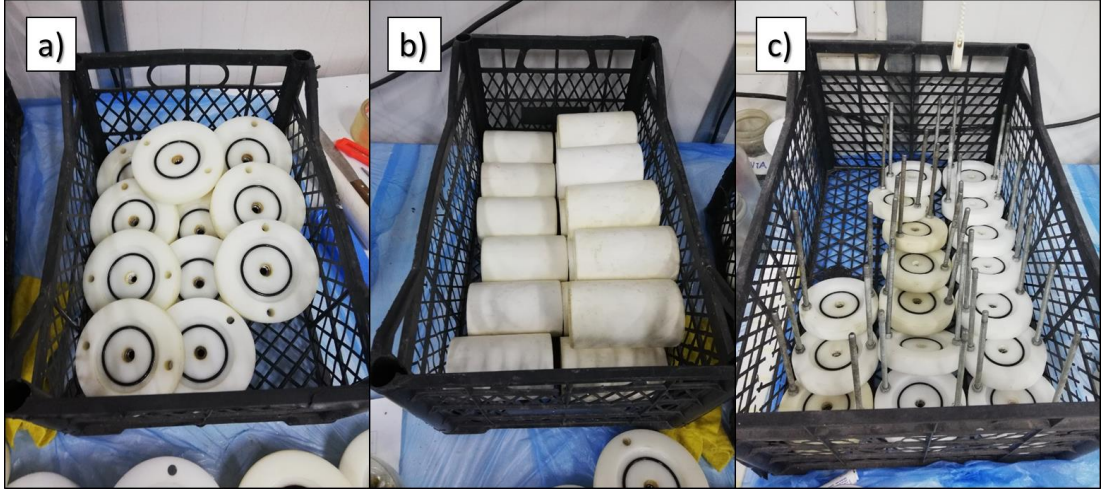
Mold çapı(mm)=52

Alt+üst filtre malz.  
yüksekliği(mm)=16

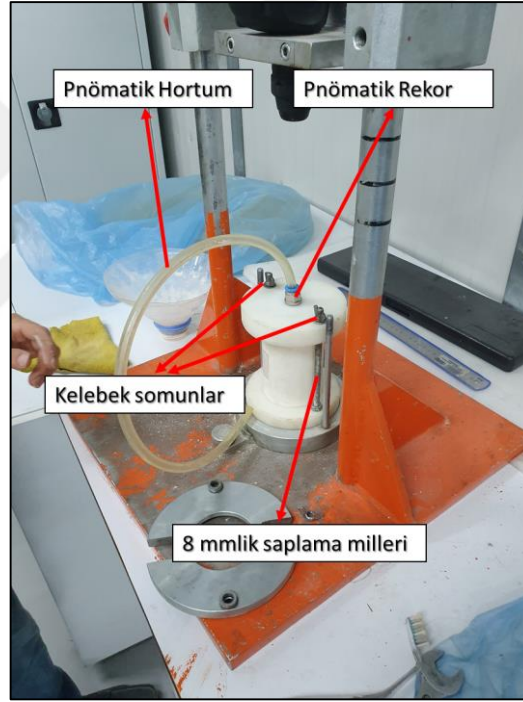
Mold Hacmi(cm<sup>3</sup>)=220,87



<b>Karışım Oranları (%)</b>	<b>silt</b>	100	80	60	30	0
	<b>kum</b>	0	20	40	70	100
<b>Maksimum ve Minimum Boşluk Oranları</b>	<b>e<sub>maks</sub></b>	1,80	1,44	1,08	0,84	1,12
	<b>e<sub>min</sub></b>	0,76	0,57	0,45	0,38	0,78
<b>Özgül Ağırlıklar</b>	<b>G<sub>s</sub></b>	2,73	2,71	2,70	2,67	2,65
<b>Gerekli Boşluk Oranları</b>	<b>e<sub>o</sub></b>	1,48	1,18	0,89	0,70	1,02
<b>Gerekli Toplam Numune Miktarları</b>	<b>M<sub>toplam,g</sub></b>	242,72	274,84	314,91	346,53	290,07
	<b>M<sub>silt,g</sub></b>	242,72	219,87	188,94	103,96	0,00
	<b>M<sub>kum,g</sub></b>	0,00	54,97	125,96	242,57	290,07
<b>Her Bir Aşamada (3 Aşama) Sıkıştırılacak Numune Miktarları</b>	<b>M<sub>silt/3,g</sub></b>	80,91	73,29	62,98	34,65	0,00
	<b>M<sub>kum/3,g</sub></b>	0,00	18,32	41,99	80,86	96,69



**Şekil 3.26 :** (a)Enjeksiyon deneylerinde kullanılan kestamit alt başlıklar, (b)PPRC moldlar, (c)alt başlıklar.

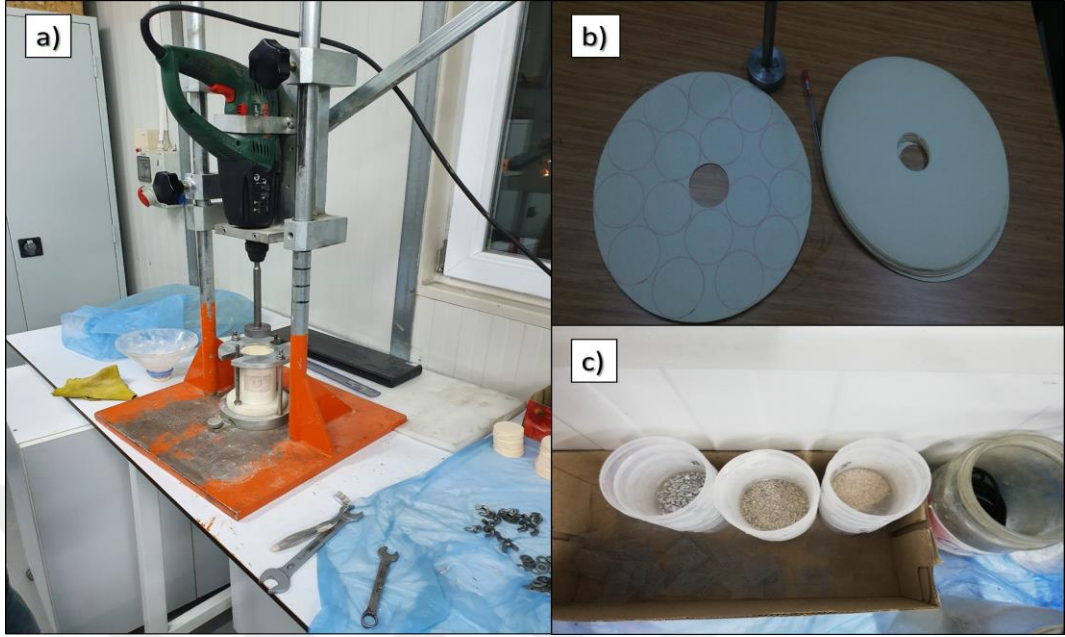


**Şekil 3.27 :** Enjeksiyon malzemesinin giriş ve çıkışını sağlayan pnömatik rekor ve hortum, başlıkları sabitlemek için kullanılan kelebek somunlar ve saplamalar.

Enjeksiyon moldlarına hızlı bir şekilde numuneleri yerleştirebilmek için titreşimli tokmak kullanılmıştır (Şekil 3.28-a). Deneylerinde silt türü ince malzemenin kullanılması, enjeksiyon sırasında basınçlı malzemeyle birlikte dışarı atılması problemini karşımıza çıkarmaktadır. Bu problemin önüne geçmek amacıyla alt ve üst kısımlara zemin numunesinden moldun dışına doğru sırasıyla ince, orta ve iri kum filtre malzemeleri yerleştirilmiştir (Şekil3.28-c) ve ayrıca filtre malzemeleri ile alt ve



üst başlıkların arasına da özel filtre kağıdı (Şekil 3.28-b) yerleştirilerek ince malzemenin enjeksiyon sırasında dışarı çıkmasının önüne geçilmiştir.

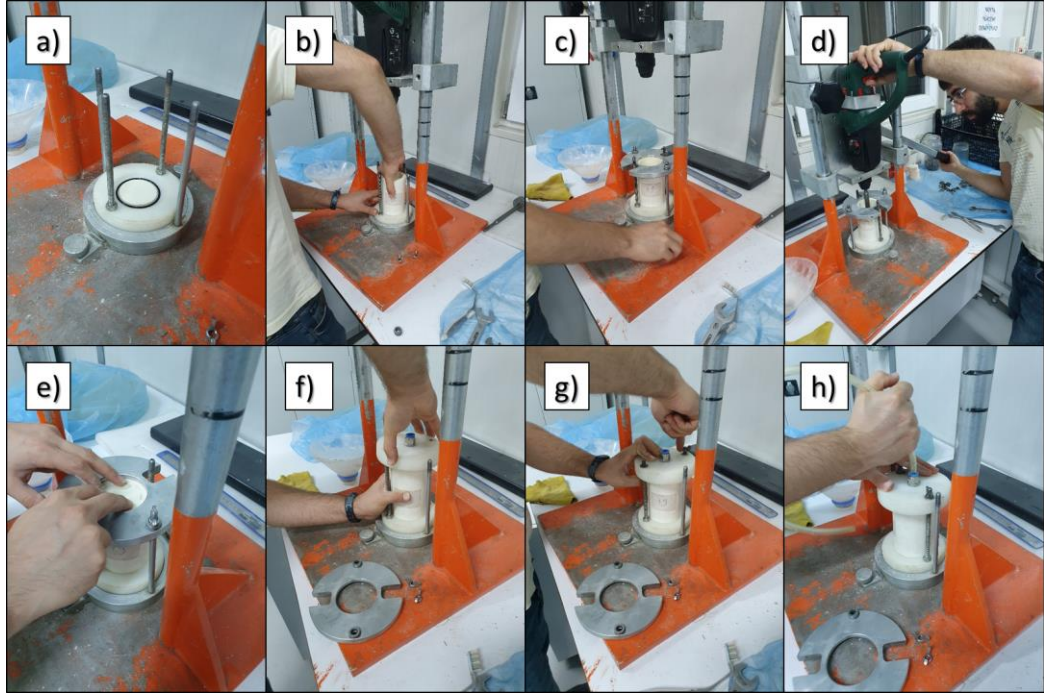


**Şekil 3.28 :** Numune hazırlama işlerinde kullanılan (a)titreşimli tokmak, (b)filtre kağıdı ve (c)ince,orta,iri kum filtre malzemeleri.

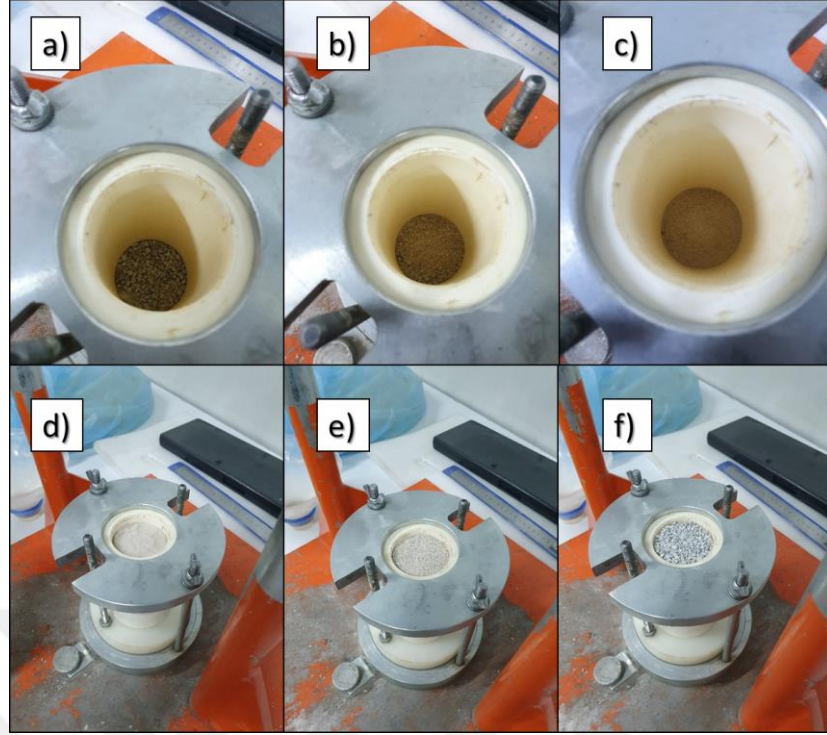
Enjeksiyon numunelerini hazırlanırken şu aşamalar izlenmiştir:

- Hazırlama işleminden önce numune moldlarının iç kısmı enjeksiyon sonrasında numunenin moldlardan rahatça çıkarılabilmesi için makine yağı ile yağlanmıştır. Alt ve üst başlıkların contaları ile pnömatik rekorlarının çalışır olup olmadığı tek tek kontrol edilmiştir. Arızalı durumda olan rekorlar ve contalar yenisiyle değiştirilmiştir.
- Enjeksiyon deneyleri için gerekli miktardaki numune tartımı yapıldıktan sonra özellikle silt-ince kum karışımı numunelerin homojen bir şekilde karışabilmesi için cam kavanozlara konulan numunelerin ağzı sıkıca kapatıldıktan sonra yatay, dikey ve diyagonal olacak şekilde 10'ar defa sayılarak karıştırılmıştır.
- Enjeksiyon numunelerinin hızlı bir şekilde ayarlanabilmesi için tasarlanmış titreşimli tokmağa alt başlık yerleştirilmiştir..(Şekil 3.29-a)
- Alt başlığın üzerine filtre kağıdı konulmuş ve gövde moldu oturtulmuştur (Şekil 3.29-a ve Şekil 3.29-b).

- Moldun yerleştirilmesinin ardından titreşimli tokmağa ait sabitleyici üst başlık takılarak kelebek somunla iyice sıkılmıştır(Şekil 3.29-c)
- Sırasıyla iri, orta ve ince kum filtre malzemeleri alt tabakaya yerleştirilmiştir(Şekil 3.30-a, Şekil 3.30-b ve Şekil 3.30-c).
- Filtre malzemelerinden sonra tartımı yapılan numune önceden belirlenen rölatif sıklıkta mold içerisine yerleştirilmiştir(Şekil 3.29-d). Sıklığın doğru bir şekilde sağlanması için her aşamada numunenin yüksekliği ölçülmüştür.
- Sıkıştırılması tamamlanan zemin numunesinin ardından sırasıyla ince, orta ve iri kum üst filtre malzemesi yerleştirilmiştir(Şekil 3.30-d, Şekil 3.30-e ve Şekil 3.30-f).
- Üst filtre malzemesinin ardından filtre kağıdı dikkatli bir şekilde en üst tabakaya konulmuştur(Şekil 3.29-e).
- Son olarak üst başlık takılarak kelebek somunları iyice sıkılmış ve pnömatrik hortum takılarak numune enjeksiyona hazır hale getirilmiştir(Şekil 3.29-f, Şekil 3.29-g ve Şekil 3.29-h)



**Şekil 3.29** : Enjeksiyon numunelerinin hazırlanması: (a)alt başlık ve alt filtre kağıdının yerleştirilmesi, (b)gövde moldunun yerine oturtulması, (c) titreşimli tokmağa ait üst sabitleme başlığın takılması, (d) numunelerin üç tabaka halinde sıkıştırılması, (e) üst filtre kağıdının yerleştirilmesi, (f) üst başlığın yerine oturtulması, (g) üst başlığın kelebek somunlarla sabitlenmesi, (h) pnömatrik hortumun takılması.



**Şekil 3.30** : Filtre malzemelerin yerleştirilmesi: (a)alt filtre tabakası iri kum, (b)alt filtre tabakası orta kum, (c) alt filtre tabakası ince kum, (d)üst filtre tabakası ince kum, (e) üst filtre tabakası orta kum, (f) üst filtre tabakası iri kum.

Şekil 3.31’de enjeksiyona hazırlanmış numuneler görülmektedir.



**Şekil 3.31** : Enjeksiyon deneyleri için hazırlanmış numuneler.

### 3.6 Enjeksiyon Deneyleri

Enjeksiyon deneylerinde, permeasyon enjeksiyon tekniği kullanılmıştır. Permeasyon enjeksiyonu tekniği dűřük basınçlar altında zemin danelerinin arasındaki boşluklara enjeksiyon malzemesinin enjekte edilmesidir. Bu deneysel çalışmada farklı gradasyonda hazırlanmış silt ve ince kum karışımlarına S.S/Çöz oranları %70 (F1) ve %50 (F8) olan sodyum silikat-formamid karışım oranları ve S.S/Çöz. oranları %53,76 (G49) ve %60 (G56) olan sodyum silikat-glioksal karışım oranları ile permeasyon enjeksiyon deneyleri yapılmıştır.

Enjeksiyon deneylerinde kullanılan kimyasal oranlar, sodyum silikat-formamid, sodyum silikat-glioksal karışımlarının reolojik özellikleri ve jel yapıları göz önünde bulundurularak seçilmiştir. Zemin enjeksiyonları açasından, zeminin mukavemet özelliklerini arttırmak amacıyla jel yapısı kuvvetli karışımlar öznel olarak değerlendirilmiş ve seçilmiştir. Ayrıca enjeksiyonun zamanında yapılabilmesi için yeterli süreye ihtiyaç duyulduğundan jelleşme süreleri ve enjekte edilebilirlik açasından viskozite değerleri dikkate alınmıştır.

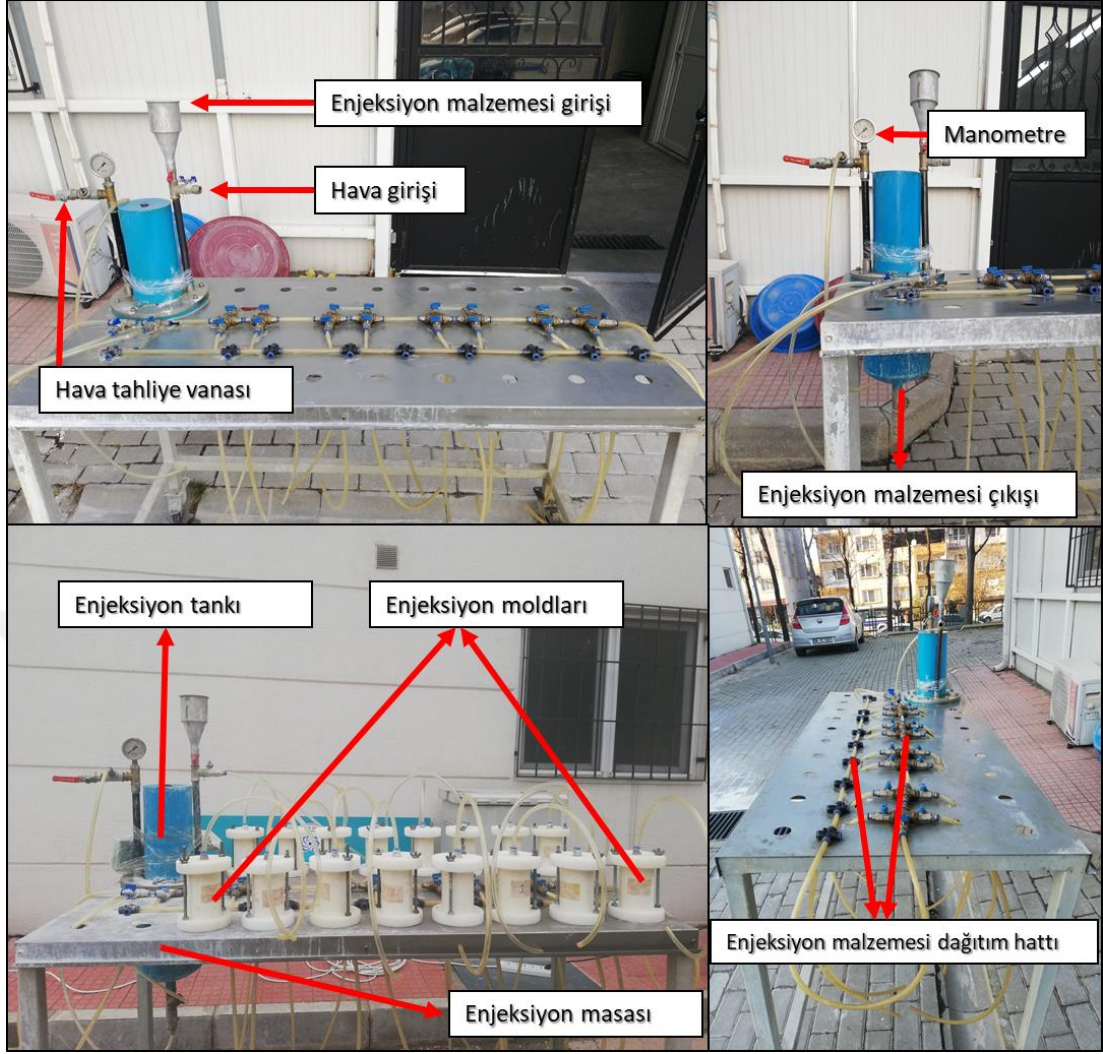
#### 3.6.1 Enjeksiyon deney düzeneği

Laboratuvarında bulunan enjeksiyon düzeneği Prof. Dr. Murat MOLLAMAHMUTOĞLU tarafından tek seferde 18 numuneye enjeksiyon yapılabilecek şekilde tasarlanmıştır.

Yaklaşık 7 litre hacme sahip bir tanktan, enjeksiyon moldlarının rahatlıkla üzerinde durabileceği bir masadan, enjeksiyona yardımcı elemanlardan (pnömatik hortum ve rekor vb.) ve kompresörden oluşan bu düzenek yardımıyla seri bir şekilde enjeksiyon deneyleri yapılabilmıştir.

Enjeksiyon tankı üzerinde bir adet manometre, hava tahliyesi için vana, enjeksiyon malzemesi girişi, enjeksiyon malzemesi çıkışı ve enjeksiyon malzemesinin tanktaki seviyesinin ölçülebildiği bir bağlantı hortumu bulunmaktadır.

Kimyasal enjeksiyon deneylerinde kullanılan deney düzeneği ve yardımcı elemanları şekil 3.32'de gösterilmiştir.



Şekil 3.32 : Kimyasal enjeksiyonlarda kullanılan deney düzeneği.

### 3.6.2 Enjeksiyonların yapılması

Numunelerinin moldlara yerleştirilerek enjeksiyona hazır hale getirilmesinin ardından önceden belirlenmiş sodyum silikat-formamid ve sodyum silikat-glioksal karışımları, laboratuvarında bulunan enjeksiyon düzeneği yardımıyla numunelere enjekte edilmiştir (Şekil 3.33).

Öncelikle suya doymun hale getirilen numunelere alt taraftan verilen enjeksiyon malzemesinin, numunenin silt-ince kum karışım yüzdesine bağlı olarak, belirli bir süre sonra üst taraftaki pnömomatik hortumdan çıkışı gözlemlenmiştir. Üst tarafta çıkışı gözlenen numunelerin enjeksiyonlarının başarılı olduğu ön kanısına varılmıştır.

Tüm deneylerde yapılan gözlemlerde enjeksiyon malzemesinin üstten çıkışı gerçekleştiğinden enjeksiyon deneylerinin tümünde başarı sağlanmıştır. Enjeksiyon

işlemi tamamlanmış numuneler jel sürelerinin tamamlanması için beklemeye alınmıştır (Şekil 3.34).

Tank içerisinden enjeksiyon sonunda ayrıca bir kaba örnek alınmış, jelleşme süreleri ve jel yapıları bu örnekten de takip edilmiştir.



Şekil 3.33 : Enjeksiyon deneylerinin yapılması ve sonrasında tanktan alınan örnekler.



**Şekil 3.34 :** Deney öncesi enjeksiyon moldlarının hazırlanması ve deney sonrası jelleşme sürelerinin tamamlanması için bekletilmesi.

### **3.6.3 Farklı oranlarında hazırlanmış kimyasal karışımların farklı gradasyonlardaki silt ve ince kum karışımlarına penetrasyon yetileri**

Deneysel çalışmanın bu kısmında farklı çözelti oranlarında hazırlanmış sodyum silikat-formamid ve sodyum silikat-glioksal kimyasal karışımların, %30 rölatif sıklık ve farklı gradasyonlarda hazırlanmış ince kum-silt karışımlarına penetrasyon yetileri araştırılmıştır. Deneylerde S.S/Çöz oranları %70 (F1) ve %50 (F8) olan sodyum silikat-formamid karışım oranları ve S.S/Çöz. oranları %53,76 (G49) ve %60 (G56) olan sodyum silikat-glioksal karışım oranları kullanılmıştır. Rölatif sıklık

değerlerinde; modları düzeneğe yerleştirme, taşımaya bağlı sarsma gibi çevresel nedenlerde dolayı  $\pm 5\%$ 'ye kadar sapmalar görülebilmektedir. Deneylerde her numuneye ait minimum enjekte edilebilirlik basınç değerleri belirlenmiş ve bu değerler Çizelge 3.18'de verilmiştir. Yapılan enjeksiyon deneylerinde tüm numunelerde başarı sağlanmıştır. Sodyum silikat-Formamid karışımları ile yapılan enjeksiyonlarda minimum enjeksiyon basınç değerleri 0,20 MPa ile 3,0 MPa arasında değişmekte iken Sodyum silikat-Glioksal karışımları ile yapılan enjeksiyonlarda minimum enjeksiyon basınç değerleri 0,30 MPa ile 2,90 MPa arasında değişmektedir. Sodyum silikat ve silt yüzdesinin artması ile minimum enjeksiyon basınç değerleri artmıştır.

**Çizelge 3.18 :** Farklı gradasyon ve kimyasal karışım oranlarındaki numunelerin penetrasyon yetileri.

Örnek No	Gradasyon yüzdesi (%)		Reaktant adı	S.S/Çöz.Oranı (%)	Minimum enjekte edilebilirlik basıncı (bar)
	Silt	İnce Kum			
1	100	0	Formamid	70	3,00
2	80	20			2,40
3	60	40			1,80
4	30	70			1,10
5	0	100			0,50
1	100	0		50	2,70
2	80	20			2,10
3	60	40			1,50
4	30	70			0,80
5	0	100			0,20
1	100	0	Glioksal	60	2,90
2	80	20			2,30
3	60	40			1,70
4	30	70			1,00
5	0	100			0,40
1	100	0		53,76	2,80
2	80	20			2,20
3	60	40			1,60
4	30	70			0,90
5	0	100			0,30



### 3.6.4 Enjeksiyon sonrası jelleşmesini sağlamış numunelerin moldlardan çıkartılması

Jelleşmesini tamamlayan numunelerin öncelikle üst ve alt başlıkları çıkartılarak bir sonraki enjeksiyon deneyine hazırlanılmak üzere yıkanmış ve temizlenmiştir. Gövde moldlarının içinde jelleşmesini tamamlayan numuneler ve numune krikosuyla çıkartılması işlemleri Şekil 3.35’de gösterilmiştir.



Şekil 3.35 : Jelleşmesini tamamlayan numuneler ve numune krikosu ile moldlardan çıkartılması.

Numune krikosundan çıkartılan numuneler açık ortamda, streçte ve su küründe bekletilmek üzere numaralandırılmıştır (Şekil 3.36).



Şekil 3.36 : Moldlardan çıkartılan numunelerin farklı kür koşullarında bekletilmek üzere numaralandırılması.

Şekil 3.37 ‘de 5 farklı gradasyonda hazırlanarak enjeksiyon yapılmış numuneler gösterilmiştir.



Şekil 3.37 : 5 farklı gradasyonda kimyasal enjeksiyonları başarılı olan numuneler.

### 3.7 Enjeksiyon Yapılmış Numunelerin Serbest Basınç Dayanımlarının Belirlenmesi

#### 3.7.1 Enjeksiyon yapılmış numunelerin farklı kür ortamlarında bekletilmesi

Enjeksiyon deneyleri başarılı olan numuneler üç farklı kür koşulunda (açık ortam, streçe sarılı ve kür havuzunda) bekletilerek zamana bağlı olarak 7., 14., 28. ve 56. günlerde serbest basınç dayanım testlerine tabi tutulmuştur (Şekil 3.38 ve Şekil 3.39).



Şekil 3.38 : Açıkta ve streçe bekletilen numuneler.



**Şekil 3.39** : Kür havuzunda bekletilen numuneler.

### **3.7.2 Serbest basınç deneyleri öncesinde numunelerin üst ve alt yüzeylerinin düzeltilmesi**

Numunelerin alt ve üst taraflarında filtre malzeme kullanılması ve numune krikosundan çıkartılırken meydana gelen pürüzlenmeler yüzünden serbest basınç deneyleri sırasında üniform olarak yük dağılımının gerçekleşmeyeceği problemine karşı numunelerin alt ve üst tarafları numune düzeltme makinesi ile düzeltilmiştir. Şekil 3.40'da numune üst ve alt yüzeylerinin düzeltilme işlemi ve Şekil 3.41'de düzeltilmiş ve deneylere hazır haldeki numuneler gösterilmiştir.



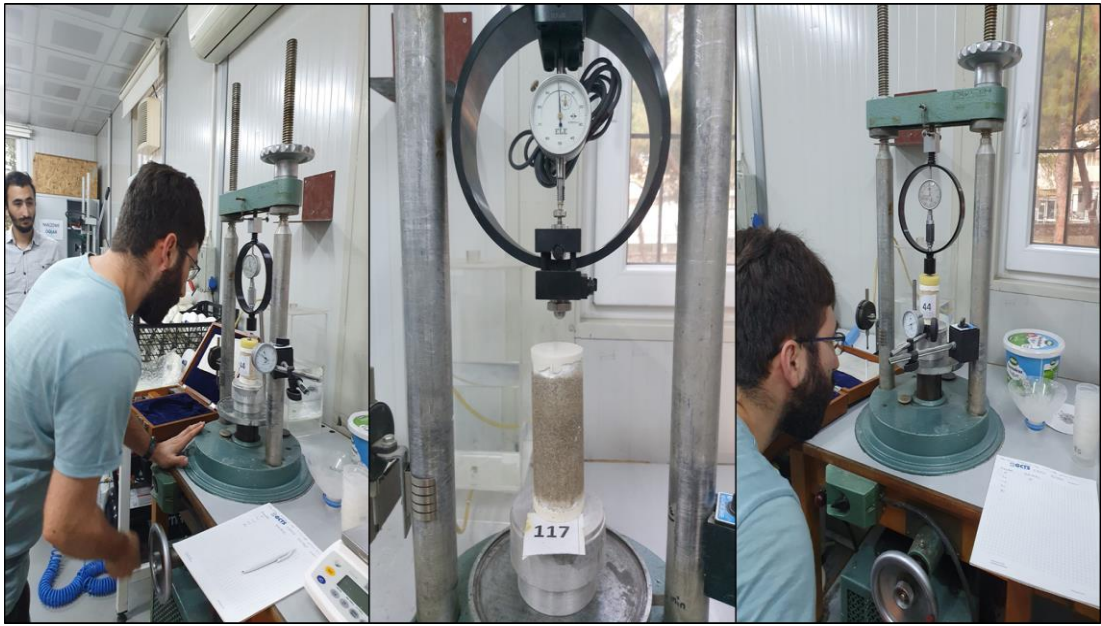
**Şekil 3.40** : Numunelerin alt ve üst yüzeylerinin düzeltilmesi.



**Şekil 3.41** : Düzeltilmiş numunelerin serbest basınç deneylerine hazır hale getirilmesi.

### 3.7.3 Serbest basınç dayanım testleri

Enjeksiyonu başarılı olan numuneler üzerinde yapılan serbest basınç dayanımı deneyleri ASTM C 4219-02 standartlarına göre yapılmıştır [37]. Yapılan deneysel çalışmada, farklı kimyasal karışım oranlarında, farklı gradasyonlarda, farklı gün ve kür koşullarında olmak üzere toplamda 840 adet numune üzerinde serbest basınç dayanım testi yapılmıştır. Tüm deneylerde yükleme hızı 1,00 mm/dk olarak belirlenmiştir. Serbest basınç deneylerinde Bursa Teknik Üniversitesi Geoteknik Laboratuvarı'nda bulunan serbest basınç deney cihazı ve 1 ton kapasiteli ELE markalı yükleme halkası kullanılmıştır (Şekil 3.42).



Şekil 3.42 : Serbest basınç deneylerinde kullanılan cihaz ve yükleme halkası.

Sodyum silikat-formamid ve sodyum silikat-glioksal karışımları ile enjeksiyon yapılmış ve farklı kür koşulunda bekletilmiş (açık ortam, streçe sarılı ve kür havuzunda) olan numunelere zamana bağlı olarak 7., 14., 28. ve 56. günlerde serbest basınç dayanım (SBD) testleri yapılmıştır.

Çizelge 3.19'da sodyum silikat-formamid karışımlarının SBD değerleri, Çizelge 3.20'de ise sodyum silikat-glioksal karışımlarının SBD değerleri verilmiştir.

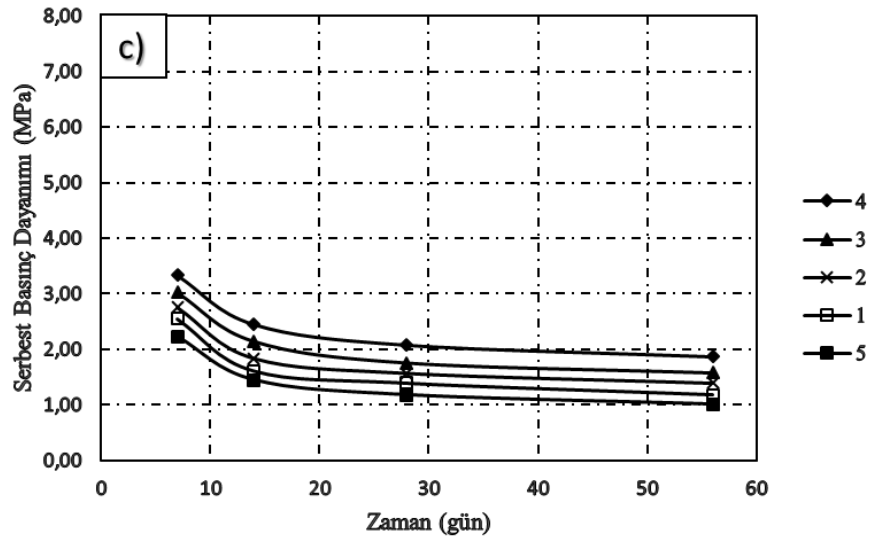
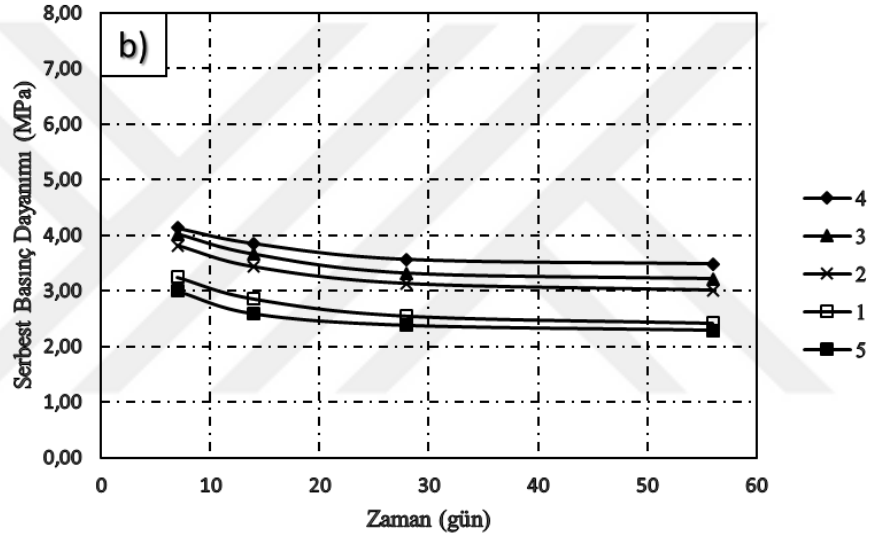
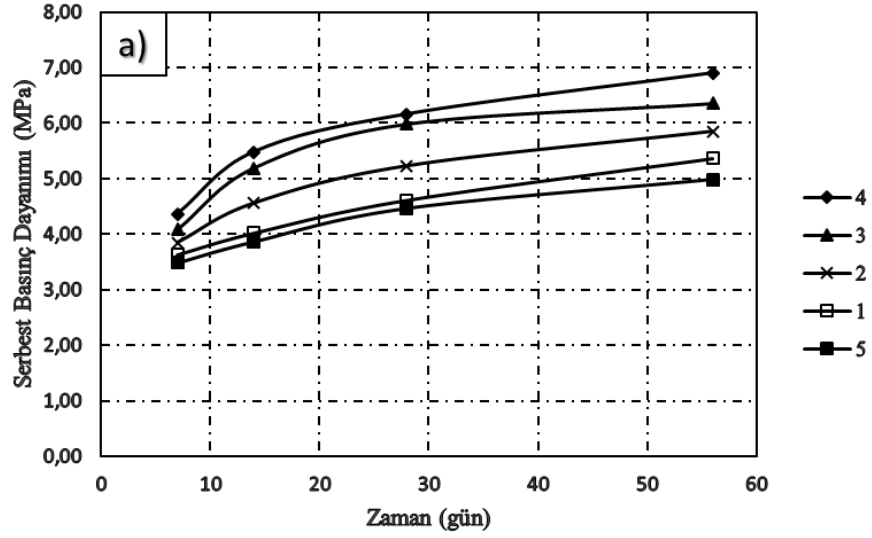
Şekil 3.43, Şekil 3.44, Şekil 3.45 ve Şekil 3.46'da Sodyum silikat-formamid ve sodyum silikat-glioksal karışımları ile enjeksiyon yapılmış ve farklı kür koşullarında bekletilmiş olan numunelerin SBD değerlerinin zamana bağlı olarak değişimleri verilmiştir.

**Çizelge 3.19 : Sodyum silikat-formamid karışımların SBD değerleri.**

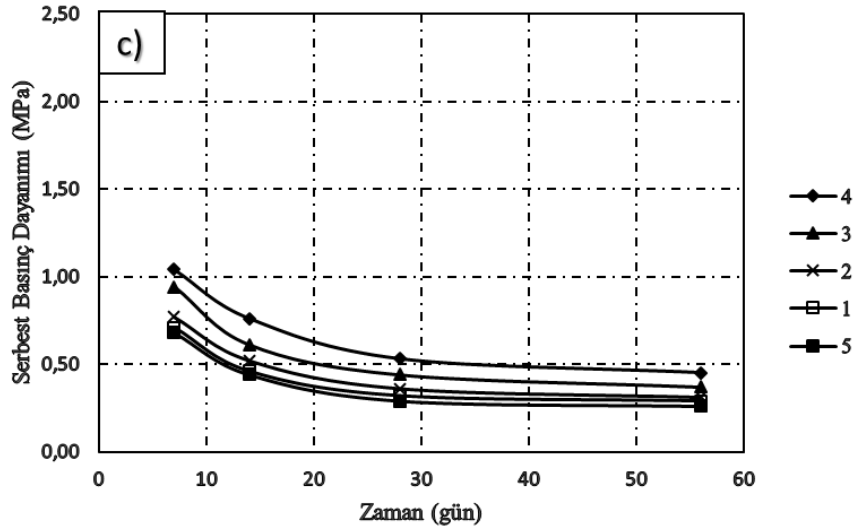
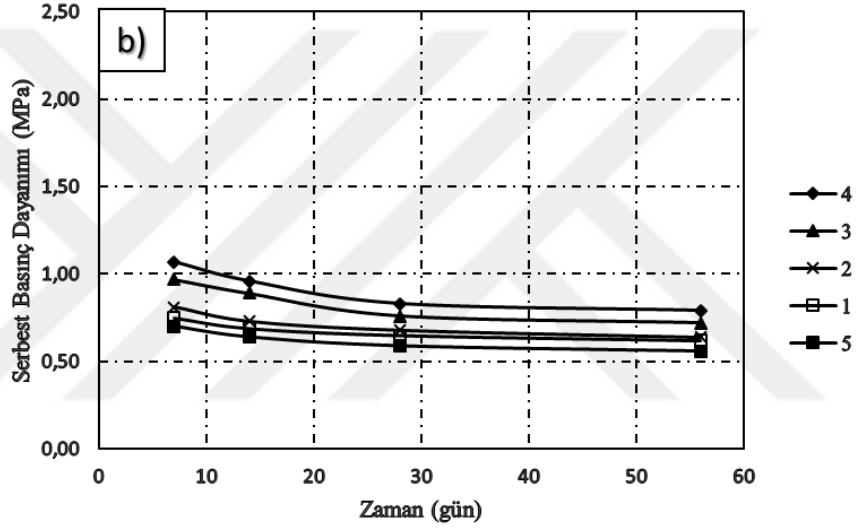
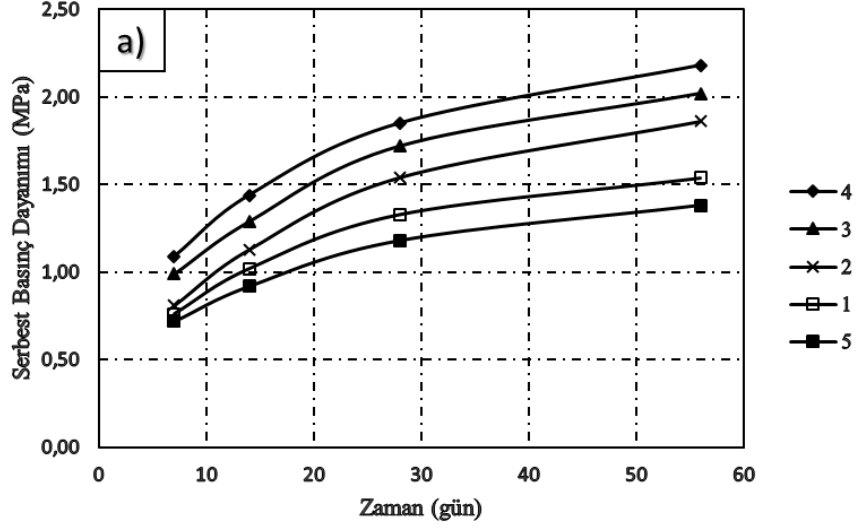
Kür Ortamı	Gradasyon yüzdesi (%)		S.S/Çöz. Oranı (%)=%70				S.S/Çöz. Oranı (%)=%50			
	Silt	İnce Kum	Serbest Basınç Dayanımı (Mpa)				Serbest Basınç Dayanımı (Mpa)			
			7.gün	14.gün	28.gün	56.gün	7.gün	14.gün	28.gün	56.gün
AÇIK	100	0	3,63	4,02	4,61	5,36	0,76	1,02	1,33	1,54
	80	20	3,85	4,56	5,23	5,85	0,81	1,13	1,54	1,86
	60	40	4,08	5,19	5,98	6,35	0,99	1,29	1,72	2,02
	30	70	4,36	5,48	6,16	6,90	1,09	1,44	1,85	2,18
	0	100	3,48	3,86	4,46	4,98	0,72	0,92	1,18	1,38
STREÇ	100	0	3,25	2,86	2,55	2,42	0,75	0,69	0,65	0,62
	80	20	3,81	3,43	3,13	3,01	0,81	0,73	0,68	0,64
	60	40	4,02	3,66	3,32	3,22	0,97	0,89	0,76	0,72
	30	70	4,13	3,85	3,56	3,48	1,07	0,96	0,83	0,79
	0	100	3,00	2,59	2,38	2,29	0,70	0,64	0,59	0,56
KÜR TANKI	100	0	2,55	1,61	1,39	1,18	0,71	0,46	0,32	0,29
	80	20	2,76	1,84	1,57	1,39	0,77	0,52	0,36	0,31
	60	40	3,03	2,15	1,76	1,58	0,94	0,61	0,44	0,37
	30	70	3,33	2,45	2,08	1,87	1,04	0,76	0,53	0,45
	0	100	2,23	1,45	1,18	1,01	0,68	0,44	0,29	0,26

**Çizelge 3.20 : Sodyum silikat-glioksal karışımların SBD değerleri**

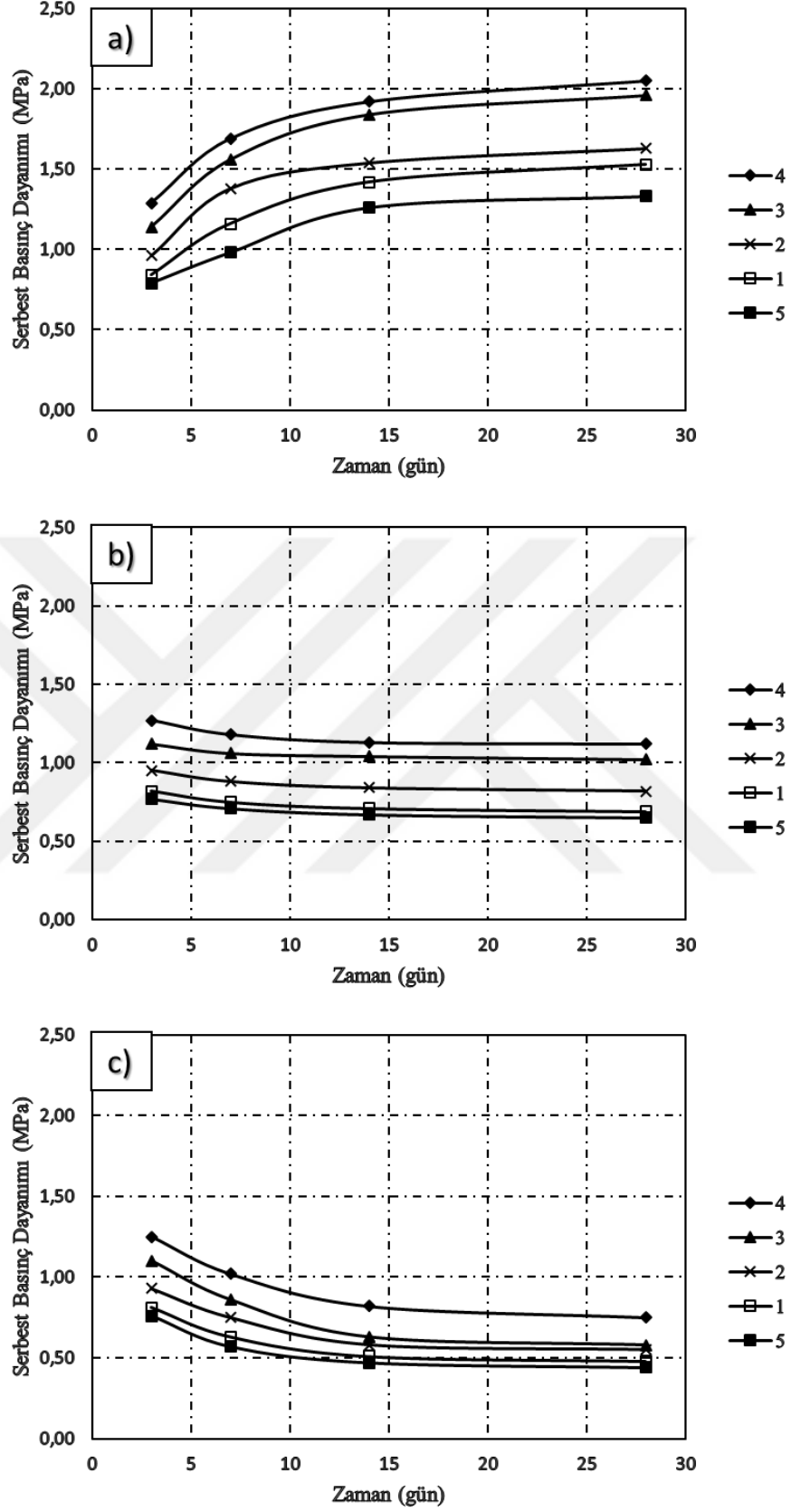
Kür Ortamı	Gradasyon yüzdesi (%)		S.S/Çöz. Oranı (%)=%53,76				S.S/Çöz. Oranı (%)=%60			
	Silt	İnce Kum	Serbest Basınç Dayanımı (Mpa)				Serbest Basınç Dayanımı (Mpa)			
			7	14	28	56	7	14	28	56
AÇIK	100	0	0,84	1,16	1,42	1,53	1,02	1,33	1,56	1,65
	80	20	0,96	1,38	1,54	1,63	1,14	1,47	1,71	1,83
	60	40	1,14	1,56	1,84	1,96	1,27	1,54	1,76	1,89
	30	70	1,29	1,69	1,92	2,05	1,36	1,78	2,03	2,14
	0	100	0,79	0,98	1,26	1,33	0,93	1,21	1,42	1,49
STREÇ	100	0	0,82	0,75	0,71	0,69	1,00	0,96	0,92	0,90
	80	20	0,95	0,88	0,84	0,82	1,12	1,03	0,96	0,94
	60	40	1,12	1,06	1,04	1,02	1,25	1,13	1,02	1,00
	30	70	1,27	1,18	1,13	1,12	1,34	1,23	1,17	1,15
	0	100	0,77	0,71	0,67	0,65	0,91	0,85	0,82	0,81
KÜR TANKI	100	0	0,81	0,63	0,51	0,48	0,98	0,85	0,75	0,72
	80	20	0,93	0,75	0,58	0,55	1,10	0,94	0,82	0,75
	60	40	1,10	0,86	0,63	0,58	1,23	1,02	0,94	0,91
	30	70	1,25	1,02	0,82	0,75	1,31	1,14	1,05	1,02
	0	100	0,76	0,57	0,47	0,44	0,90	0,81	0,70	0,68



Şekil 3.43 : S.S/Çöz. oranı %70 (F1) olan sodyum silikat-formamid karışımı enjekte edilen, (a)açık ortam, (b)streç ve (c) kür tankında bekletilmiş numunelerin zamana bağlı SBD değerleri

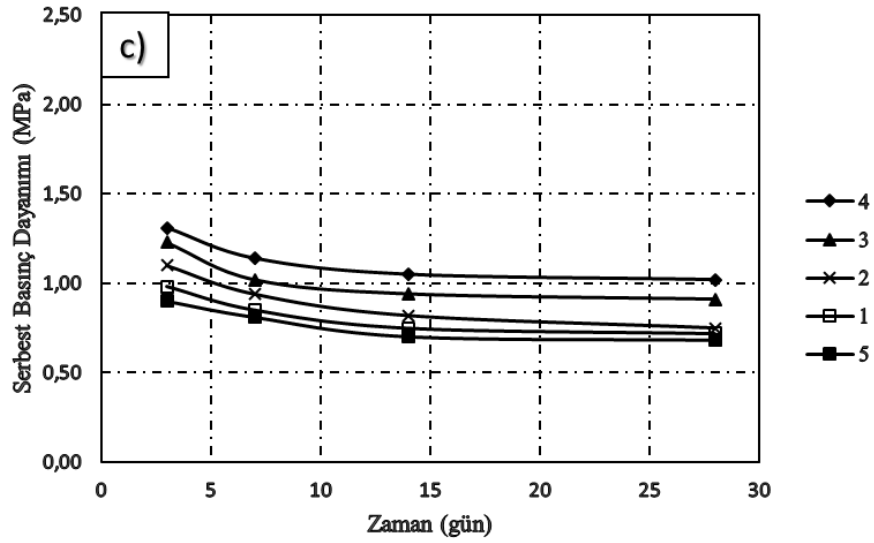
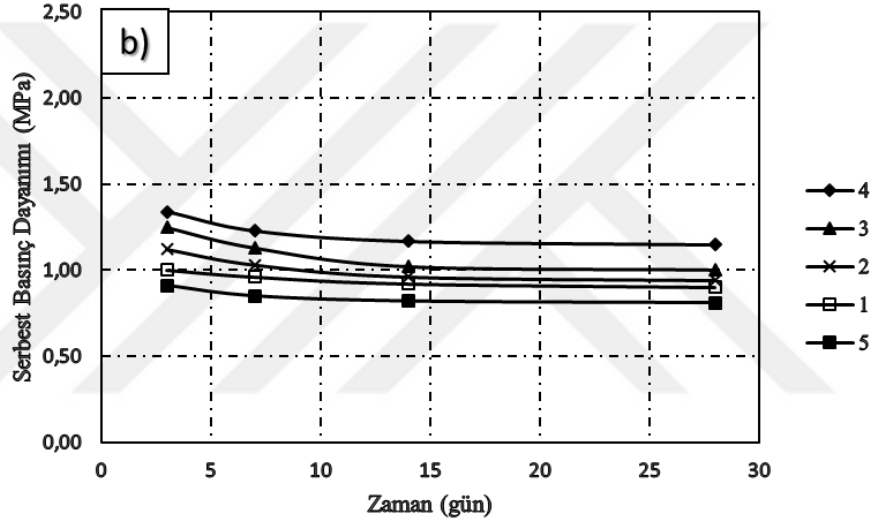
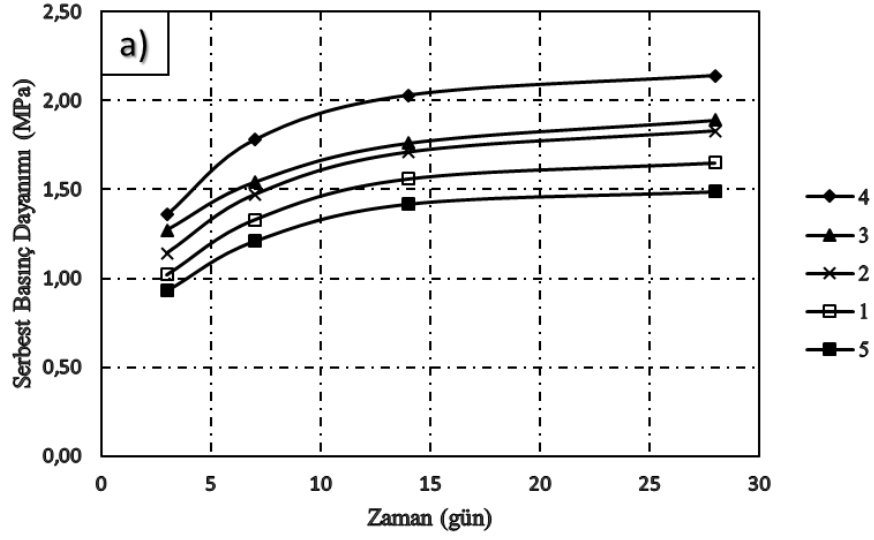


Şekil 3.44 : S.S/Çöz. oranı %50 (F8) olan sodyum silikat-formamid karışımı enjekte edilen, (a)açık ortam, (b)streç ve (c)kür tankında bekletilmiş numunelerin zamana bağlı SBD değerleri



Şekil 3.45 : S.S/Çöz. oranı %53,76 (G49) olan sodyum silikat-glioksal karışımı enjekte edilen, (a)açık ortam, (b)streç ve (c) kür tankında numunelerin zamana bağlı SBD değerleri





Şekil 3.46 : S.S/Çöz. oranı %60 (G56) olan sodyum silikat-glioksal karışımı enjekte edilen, (a)açık ortam, (b)streç ve (c) kür tankında bekletilmiş numunelerin zamana bağlı SBD değerleri

Yapılan serbest basınç dayanımı deneylerine bakıldığında sodyum silikat-formamid karışımı enjekte edilen numunelerde en yüksek SBD değeri (6,90 MPa) S.S/Çöz. oranı %70 (F1) olan %30 silt-%70 ince kum gradasyonuna sahip, açıkta bekletilmiş 56 günlük numunede görülmekte iken, en düşük SBD değeri (0,26 MPa) ise S.S/Çöz. oranı %50 (F8) olan %100 ince kum gradasyonuna sahip, kür havuzunda bekletilmiş 56 günlük numunede görülmüştür.

Sodyum silikat-glioksal karışımı enjekte edilen numunelerde ise en yüksek SBD değeri (2,14 MPa) S.S/Çöz. oranı %60 (G56) olan %30 silt-%70 ince kum gradasyonuna sahip, açıkta bekletilmiş 56 günlük numunede görülmekte iken, en düşük SBD değeri (0,44 MPa) ise S.S/Çöz. oranı %53,76 (G49) olan %100 ince kum gradasyonuna sahip, su havuzunda bekletilmiş 56 günlük numunede görülmüştür.

Şekil 3.43, Şekil 3.44, Şekil 3.45 ve Şekil 3.46 incelendiğinde sodyum silikat-formamid ve sodyum silikat-glioksal kimyasal karışımları enjekte edilmiş, açıkta bekletilmiş numunelerin SBD değerlerinin zamana bağlı olarak arttığı, streçte ve kür tankında bekletilmiş numunelerin SBD'nın ise zamana bağlı olarak azaldığı görülmektedir.

Sodyum silikat-formamid karışımlarından olan F1 (%70 sodyum silikat) oranı ile enjeksiyon yapılmış numunelerde 7.gün ile 56. gün arasında SBD değerlerinde açıkta bekletilmiş numunelerde yaklaşık olarak 1,4 kat artma görülürken streçte bekletilmiş numunelerde 1,3 kat azalma ve kür tankında bekletilmiş numunelerde yine 2 kat azalma gözlemlenmiştir.

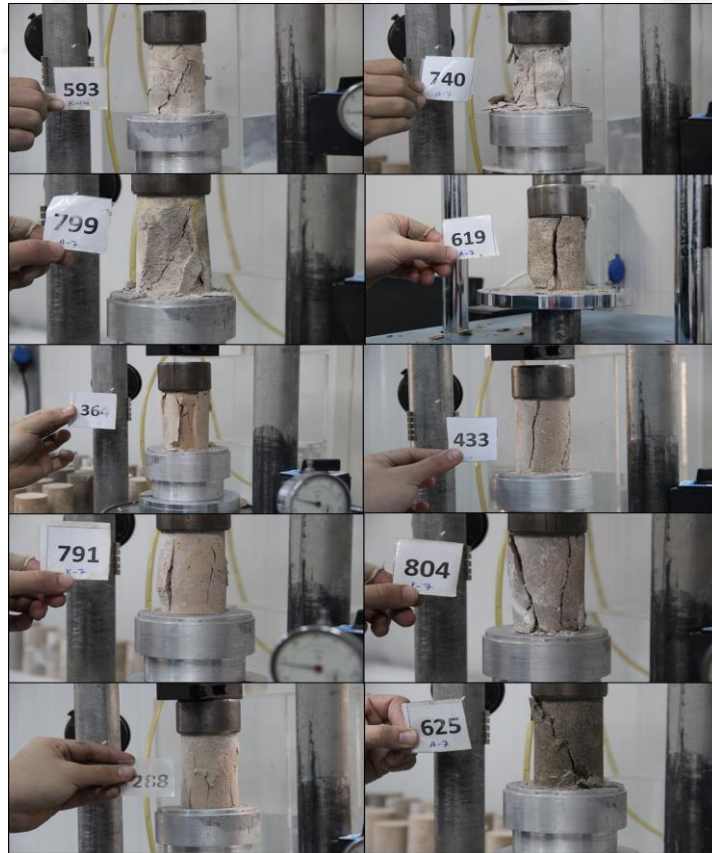
Sodyum silikat-formamid karışımlarından olan F8 (%50 sodyum silikat) oranı ile enjeksiyon yapılmış numunelerde 7.gün ile 56. gün arasında SBD değerlerinde açıkta bekletilmiş numunelerde yaklaşık olarak 2 kat artma görülürken streçte bekletilmiş numunelerde 1,2 kat azalma ve kür tankında bekletilmiş numunelerde yine 2,5 kat azalma gözlemlenmiştir.

Sodyum silikat-glioksal karışımlarından olan G49 (%53,76 sodyum silikat) oranı ile enjeksiyon yapılmış numunelerde 7.gün ile 56. gün arasında SBD değerlerinde açıkta bekletilmiş numunelerde yaklaşık olarak 1,6 kat artma görülürken streçte bekletilmiş numunelerde 1,1 kat azalma ve kür tankında bekletilmiş numunelerde yine 1,7 kat azalma gözlemlenmiştir.

Sodyum silikat-glioksal karışımlarından olan G56 (%60 sodyum silikat) oranı ile enjeksiyon yapılmış numunelerde 7.gün ile 56. gün arasında SBD değerlerinde açıkta bekletilmiş numunelerde yaklaşık olarak 1,6 kat artma görülürken streçte bekletilmiş numunelerde 1,1 kat azalma ve kür tankında bekletilmiş numunelerde yine 1,3 kat azalma gözlemlenmiştir.

Sodyum silikat-formamid ve sodyum silikat-glioksal karışımı ile enjeksiyonu yapılan numunelerde S.S/Çöz. oranının artması ile tüm gradasyon ve kür koşullarında SBD değerlerinin arttığı görülmüştür. En yüksek SBD değerleri, aynı kür koşulu ve kimyasal karışımları göz önünde bulundurularak yapılan karşılaştırmalarda 4 nolu numunelerde (%30 silt-%70 ince kum) görülmekte iken, en düşük SBD değerleri ise 5 nolu numunelerde (%100 ince kum) görülmüştür.

Şekil 3.47’de numunelerin serbest basınç deneylerindeki tipik kırılma şekilleri gösterilmiştir. %100 ince kumda genellikle 45°’lik açı yapacak şekilde kırılma gerçekleşirken % 100 siltte kırılma genellikle eksenel şekilde gerçekleşmektedir. Silt ve ince kum karışımlarında ise kırılma biçimi genellikle hem açılı hemde eksenel biçimde olabilmektedir.



Şekil 3.47 : Serbest basınç deneyi yapılan numunelerin tipik kırılma biçimleri.

### 3.8 Enjeksiyon Yapılmış Numunelerin Permeabilite Katsayılarının Belirlenmesi

Enjeksiyon yapılmış numuneler üzerinde düşen seviyeli permeabilite deneyleri yapılabilmesi için laboratuvarında aynı anda 40 numune üzerinde deney yapabilecek kapasitede deney düzeneği (Şekil 3.49) yapılmıştır. Sodyum silikat-formamid ve sodyum silikat-glioksal ile enjeksiyon yapılmış numuneler jelleşme sonrası moldlardan çıkartılmadan direk düşen seviyeli permeabilite deney düzeneğine bağlanmıştır.



Şekil 3.48 : Düşen seviyeli permeabilite deney düzeneği.

Enjeksiyon yapılarak deney düzeneğine yerleştirilen numunelerin 14. günde düşen seviyeli permeabilite ölçümleri alınmış ve Denklem 3.3'e göre permeabilite katsayıları hesaplanmıştır. Tüm deneyler hidrolik eğim 18 olacak şekilde yapılmıştır. Deneyler ASTM D 5856-95 standartına göre yürütülmüştür [32].

Enjeksiyon yapılmadan önce farklı gradasyonlara ait permeabilite katsayı değerleri belirlenmiş ve değerler Çizelge 3.21'de gösterilmiştir. Enjeksiyon yapılmamış 1 (%100 silt), 2 (%80 silt-%20 ince kum), 3 (%60 silt-%40 ince kum), 4 (%30 silt-%70 ince kum) ve 5 (%100 ince kum) nolu numunelerin permeabilite katsayısı değerleri sırasıyla;  $1,02 \times 10^{-4}$ ,  $2,69 \times 10^{-4}$ ,  $3,38 \times 10^{-4}$ ,  $1,8 \times 10^{-3}$  ve  $1,1 \times 10^{-2}$  cm/sn olarak

belirlenmiştir. Sodyum silikat-formamid ve sodyum silikat-glioksal ile enjeksiyon yapılmış numunelerin permeabilite katsayıları Çizelge 3.21’de verilmiştir.

Çizelge 3.21 incelendiğinde sodyum silikat-formamid karışım oranlarından F1 (Sodyum silikat oranı %70) ile enjeksiyon yapılmış numunelerde permeabilite katsayı değerleri  $8,71 \times 10^{-6}$  ile  $4,18 \times 10^{-5}$  cm/sn arasında değişmekte iken, F8 (Sodyum silikat oranı %50) ile enjeksiyon yapılmış numunelerde permeabilite katsayısı değerleri  $6,08 \times 10^{-6}$  ile  $3,36 \times 10^{-5}$  cm/sn arasında değişmektedir.

**Çizelge 3.21** : Enjeksiyon yapılan numunelerin 14.gün permeabilite katsayıları.

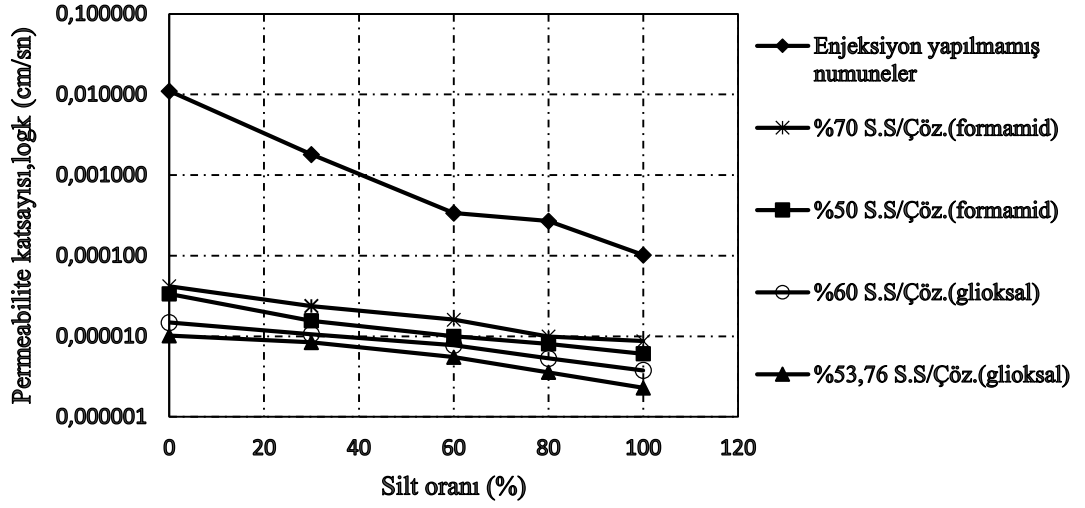
Numune no	Gradasyon (%)		Reaktant	S.S/Çöz. (%)	14. Gün Sinerez (%)	Enjeksiyon öncesi k (cm/sn)	k (cm/sn)
	Silt	İnce Kum					
1	100	0	Formamid	70	57,75	0,0001020	0,00000870533
2	80	20				0,0002691	0,00000994067
3	60	40				0,0003379	0,00001610000
4	30	70				0,0018000	0,00002361677
5	0	100				0,0110000	0,00004181677
1	100	0		50	47,52	0,0001020	0,00000607969
2	80	20				0,0002691	0,00000806962
3	60	40				0,0003379	0,00000998495
4	30	70				0,0018000	0,00001554788
5	0	100				0,0110000	0,00003364788
1	100	0	Glioksal	53,76	17,23	0,0001020	0,00000228969
2	80	20				0,0002691	0,00000356962
3	60	40				0,0003379	0,00000552495
4	30	70				0,0018000	0,00000838495
5	0	100				0,0110000	0,00001020000
1	100	0		60	24,66	0,0001020	0,00000376969
2	80	20				0,0002691	0,00000532962
3	60	40				0,0003379	0,00000775495
4	30	70				0,0018000	0,00001060000
5	0	100				0,0110000	0,00001480000

Sodyum silikat-glioksal karışım oranlarından G49 (Sodyum silikat oranı %53,75) ile enjeksiyon yapılmış numunelerde permeabilite katsayı değerleri  $2,29 \times 10^{-6}$  ile  $1,02 \times 10^{-5}$  cm/sn arasında değişmekte iken, G56 (Sodyum silikat oranı %60) ile enjeksiyon yapılmış numunelerde permeabilite katsayısı değerleri  $3,77 \times 10^{-6}$  ile  $1,48 \times 10^{-5}$  cm/sn arasında değişmektedir.

Silt ve İnce kum karışımlarına Sodyum silikat-Formamid ve Sodyum silikat-Glioksal karışımları ile enjeksiyon yapılması ile zemin numunelerinin geçirgenlik katsayı değerleri yaklaşık  $10^{-4}$  ile  $10^{-2}$  kat arasında azalmıştır.

Sodyum silikat-glioksal karışımları ile enjeksiyon yapılmış numunelerin permeabilite katsayıları değerleri sodyum silikat-formamid karışımları ile enjeksiyon yapılmış numunelerin permeabilite katsayıları değerlerinden daha düşük çıkmıştır.

Permeabilite katsayısının silt yüzdesi ile değişimi Şekil 3.49’da verilmiştir. Şekil 3.49 incelendiğinde hem enjeksiyon yapılmamış numunelerde hem de enjeksiyon yapılmış numunelerde silt yüzdesinin artması ile permeabilite katsayı değerleri düşmüştür.



Şekil 3.49 : Permeabilite katsayısının silt yüzdesi ile değişimi

#### 4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, sodyum silikat-formamid ve sodyum silikat-glioksal karışımlarının silt ve ince kum numune karışımlarına enjekte edilebilirlikleri ve enjeksiyon deneylerinde başarılı olan numunelerin mühendislik özellikleri araştırılmıştır.

Enjeksiyon deneylerinde kullanılmak üzere en uygun kimyasal karışım oranlarını belirlemek amacıyla sodyum silikat-formamid ve sodyum silikat-glioksal karışımları üzerinden jelleşme süresi, sinerez yüzdesi ve viskozite değerleri belirleme deneyleri yapılmıştır. Sodyum silikat-formamid karışımlarında sıcaklığın, sodyum silikat oranının ve reaktant (formamid) miktarının artmasıyla jelleşme süreleri kısalmıştır. Sodyum silikat-glioksal karışımları üzerinde yapılan deneyler sonucunda sodyum silikat ve reaktant (glioksal) miktarının jelleşme süresi üzerinde net bir ilişki vermediği görülmüştür.

Sodyum silikat-formamid ve sodyum silikat-glioksal karışımları üzerinde 3., 7., 14., 28. ve 56. günlerde sinerez ölçümleri yapılmıştır. Sodyum silikat-formamid karışımlarında sodyum silikat oranının artmasıyla %60 sodyum silikat oranına kadar sinerez yüzdesinin arttığı, %60 sodyum silikat yüzdesinden sonra sinerez oranın azaldığı görülmüştür. Reaktant miktarının artmasıyla %30 ve %50 sodyum silikat oranı ile hazırlanmış numunelerin sinerez yüzdeleri artarken, %40 sodyum silikat oranı ile hazırlanmış numunelerin sinerez yüzdeleri azalma eğilimindedir. Sodyum silikat-glioksal kimyasal karışımları ile hazırlanmış oranlarda ise genel anlamda sodyum silikat yüzdesinin artmasıyla sinerez yüzdeleri artmıştır. Reaktant oranının artmasıyla sinerez yüzdeleri azalmıştır.

Sodyum silikat-formamid ve sodyum silikat-glioksal karışımları üzerinde yapılan viskozite ölçümleri sonucunda sodyum silikat oranının artmasıyla viskozite değerleri artmıştır. Ayrıca reaktant oranının artması da nispeten daha az bir artışa sebebiyet vermiştir.

Enjeksiyon deneylerinde sodyum silikat yüzdeleri %70 (F1) ve %50 (F8) olan sodyum silikat-formamid karışım oranları ve sodyum silikat yüzdeleri %53,76 (G49) ve %60 (G56) olan sodyum silikat-glioksal karışım oranları kullanılmıştır. Yapılan

enjeksiyon deneylerinde tüm numunelerde başarı sağlanmıştır. Sodyum silikat-formamid karışımları ile yapılan enjeksiyonlarda minimum enjeksiyon basınç değerleri 0.20 MPa ile 3.0 MPa arasında değişmekte iken sodyum silikat-glioksal karışımları ile yapılan enjeksiyonlarda minimum enjeksiyon basınç değerleri 0.30 MPa ile 2.90 MPa arasında değişmektedir. Sodyum silikat ve silt yüzdesinin artması ile minimum enjeksiyon basınç değerleri artmıştır.

Enjeksiyon deneyleri başarı olan numuneler üç farklı kür koşulunda (açık ortam, streçe sarılı ve kür havuzunda) bekletilerek zamana bağlı olarak 7., 14., 28. ve 56. günlerde serbest basınç dayanım testlerine tabi tutulmuştur. Yapılan serbest basınç dayanımı deneylerine bakıldığında sodyum silikat-formamid karışımı enjekte edilen numunelerde en yüksek SBD değeri (6,90 MPa) S.S/Çöz. oranı %70 (F1) olan %30 silt-%70 ince kum gradasyonuna sahip, açıkta bekletilmiş 56 günlük numunede görülmekte iken, en düşük SBD değeri (0,26 MPa) ise S.S/Çöz. oranı %50 (F8) olan %100 ince kum gradasyonuna sahip, kür havuzunda bekletilmiş 56 günlük numunede görülmüştür.

Sodyum silikat-glioksal karışımı enjekte edilen numunelerde ise en yüksek SBD değeri (2,14 MPa) S.S/Çöz. oranı %60 (G56) olan %30 silt-%70 ince kum gradasyonuna sahip, açıkta bekletilmiş 56 günlük numunede görülmekte iken, en düşük SBD değeri (0,44 MPa) ise S.S/Çöz. oranı %53,76 (G49) olan %100 ince kum gradasyonuna sahip, kür havuzunda bekletilmiş 56 günlük numunede görülmüştür.

Sodyum silikat-formamid ve sodyum silikat-glioksal kimyasal karışımları enjekte edilmiş, açıkta bekletilmiş numunelerin SBD değerlerinin zamana bağlı olarak artmış, streçte ve kür havuzunda bekletilmiş numunelerin SBD'nın ise zamana bağlı olarak azalmıştır.

Sodyum silikat-formamid ve sodyum silikat-glioksal karışımı ile enjeksiyonu yapılan numunelerde S.S/Çöz. oranının artması ile tüm gradasyon ve kür koşullarında SBD değerleri artmıştır.

En yüksek SBD değerleri, aynı kür ve kimyasal karışımları göz önünde bulundurularak yapılan karşılaştırmalarda 4 nolu numunelerde (%30 silt-%70 ince kum) görülmekte iken, en düşük SBD değerleri ise 5 nolu numunelerde (%100 ince kum) görülmüştür.



Sodyum silikat-formamid ile enjeksiyon yapılmış numunelerin SBD değerleri Sodyum silikat-glioksal ile enjeksiyon yapılmış numunelerin SBD değerlerinden daha yüksek çıkmıştır.

Sodyum silikat-formamid ve sodyum silikat-glioksal ile enjeksiyon yapılmış numuneler jelleşme sonrası moldlardan çıkartılmadan direk düşen seviyeli permeabilite deney düzeneğine bağlanmıştır. Enjeksiyon yapılmamış numunelerin permeabilite katsayısı değerleri  $1,02 \times 10^{-4}$  cm/sn ile  $1,1 \times 10^{-2}$  cm/sn arasında çıkmıştır.

Sodyum silikat-formamid karışım oranlarından F1 (Sodyum silikat oranı %70) ile enjeksiyon yapılmış numunelerin permeabilite katsayısı değerlerinin  $8,71 \times 10^{-6}$  ile  $4,18 \times 10^{-5}$  cm/sn arasında değiştiği ve F8 (Sodyum silikat oranı %50) ile enjeksiyon yapılmış numunelerin permeabilite katsayısı değerlerinin  $6,08 \times 10^{-6}$  ile  $3,36 \times 10^{-5}$  cm/sn arasında değiştiği görülmüştür.

Sodyum silikat-glioksal karışım oranlarından G49 (Sodyum silikat oranı %53,75) ile enjeksiyon yapılmış numunelerin permeabilite katsayısı değerlerinin  $2,29 \times 10^{-6}$  ile  $1,02 \times 10^{-5}$  cm/sn arasında değiştiği ve G56 (Sodyum silikat oranı %60) ile enjeksiyon yapılmış numunelerin permeabilite katsayısı değerlerinin  $3,77 \times 10^{-6}$  ile  $1,48 \times 10^{-5}$  cm/sn arasında değiştiği görülmüştür.

Silt ve İnce kum karışımlarına sodyum silikat-formamid ve sodyum silikat-glioksal karışımları ile enjeksiyon yapılması ile zemin numunelerinin geçirgenlik katsayısı değerleri yaklaşık  $10^{-3}$  ile  $10^{-1}$  kat arasında azalmıştır.

Sodyum silikat-glioksal karışımları ile enjeksiyon yapılmış numunelerin permeabilite katsayıları değerleri sodyum silikat-formamid karışımları ile enjeksiyon yapılmış numunelerin permeabilite katsayıları değerlerinden daha düşük çıkmıştır.

Hem enjeksiyon yapılmamış numunelerde hemde enjeksiyon yapılmış numunelerde silt yüzdesinin artması ile permeabilite katsayısı değerleri düşmüştür.

Yapılan deneysel çalışmalarda sodyum silikat-formamid ve sodyum silikat-glioksal karışımlarının silt ve silt ince kum karışımlarına kolaylıkla enjekte edilebildiği görülmüştür. Bu çalışma literatürde silikat enjeksiyonları ile siltler üzerinde enjeksiyonda başarı sağlanan tek çalışmadır. Ayrıca enjeksiyon sonrası numunelerde mühendislik özelliklerinin oldukça iyileştiği de görülmüştür.

Öneri olarak; farklı kimyasal malzemeler araştırılıp uygun görünen malzemeler ile siltler üzerinde enjeksiyon denemeleri yapılabilir.



## 5. KAYNAKLAR

- [1] **Nonlevier, E.** (1989). *Grouting Theory and Practice*. (1). Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Science Publishers B.V.
- [2] **Avcı, E.** (2015). *Ultra İnce Taneli (SPİNOR A6) Süspansiyon Enjeksiyonunun, Solüsyon Türü Kimyasal Enjeksiyonlara Alternatifliğinin Araştırılması*. (Doktora Tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [3] **Haussman, M. R.** (1990). *Engineering Principles of Ground Modification*.(1). New York/USA: Mc Graw Hill.
- [4] **Henn, R.W.** (1996). *Practicle Guide to Grouting of Underground Structures*. (1). London,UK: Thomas Telford.
- [5] **Coduto, D. P.**, (2006). *Geoteknik mühendisliği: ilkeler ve uygulamalar*. (Mollamahmutoğlu, M., Kayabalı, K., Çev.). Ankara, Türkiye:Gazi Kitabevi.
- [6] **Raj, P. P.** (2005). *Ground Improvement Techniques*.New Delhi,India.Firewall Media.
- [7] **Rawlings, C. G., Hellowell, E. E., Kilkenny, W. M.** (2000). *Grouting for ground engineering*. London,UK:Construction Industry Research & Information Assoc.
- [8] **Karol, R. H.** (2003). *Chemical grouting and soil stabilization, revised and expanded* (3). New Jersey,USA: Marcel Dekker Inc.
- [9] **USA Army Corps of Engineers.** (1995). *Engineer Manual 1110-1-3500*. Washington DC: USACE. 1-34.
- [10] **Baker, W. H.** (1982). Planning and Performing Structural Chemical Grouting. *Grouting in Geotechnical Engineering*. (ss.515-539). New Orleans,ASCE.
- [11] **Warner, J.** (1972). Strength Properties of Chemically Solidified Soils, *J. Soil Mech. and Found. Div., ASCE*, 98, 1163–1185.
- [12] **Clough, W., Kuck, M., Kasali, G.** (1979). Silicate-Stabilized Sands, *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 105, 65–82.
- [13] **Diefenthal, D.C., Borden, R.H., Baker, W.H., Krizek, R.J.** (1979). Strength and Stiffness of Silicate Grouted Sand with Different Stress Histories, *Geotech. Testing J.*, 2, 200–205.
- [14] **Kaga, M. & Yonekura, R.** (1991). Estimation of Strength of Silicate Grouted Sand, *Soils and Found*, 31, 43–59.

- [15] **Ata, A. & Vipulanandan, C.** (1998). Cohesive and Adhesive Properties of Silicate Grout on Grouted-Sand Behavior, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 124, 38-44.
- [16] **Snuparek, R., & Soucek K.** (2000). Laboratory Testing of Chemical Grouts, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 15, 175-185.
- [17] **Anagnostopoulos, C. A.** (2005). Laboratory Study of an Injected Granular Soil With Polymer Grouts, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 20, 525-533.
- [18] **Yıldız, S.** (2006), *Koloidal Silika Enjeksiyonlu İnce-Orta Boyut Dağılımına Sahip Kumun Statik Ve Dinamik Yükler Altında Davranışı*. (Yüksek Lisans Tezi), Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [19] **Anagnostopoulos, C. A., Papaliangas, T., Monolopoulou, S., Dimopoulos, T.** (2011). Physical and Mechanical Properties of Chemically Grouted Sand, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 26, 718-724.
- [20] **Holmboe, M., Wold, S., Petterson. T.** (2011). Effects of Injection Grout Silica Sol on Bentonite, *Physics and Chemistry of the Earth*, 36, 1580-1589.
- [21] **Porcino, D., Ghionna, V. N., Granata, R., Marciànò, V.** (2015). Laboratory Determination of Mechanical and Hydraulic Properties of Chemically Grouted Sands, *Geomechanics and Geoengineering*, 11, 164-175.
- [22] **Mollamahmutòđlu, M., & Avci, E.** (2016). Syneresis effect on the permeability of chemically grouted sand. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 49(4), 327-335.
- [23] **Avci, E., & Mollamahmutòđlu, M.** (2019). Syneresis dependent shear strength parameters of sodium silicate grouted sands. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 52(1), 99-109.
- [24] **ASTM D2487-17 Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System).** (2017). West Conshohocken, Pennsylvania, USA:ASTM International.
- [25] **ASTM D422-63 Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils.** (2007). Pennsylvania, USA:ASTM International.
- [26] **TS 1900-1 İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri.** (2007). Ankara, TÜRKİYE: TSE.
- [27] **ASTM D854-14. Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer.** (2010). Pennsylvania,USA: ASTM International.
- [28] **ASTM D4253 Standart Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table.** (2006). Pennsylvania,USA: ASTM International.
- [29] **ASTM D4254 Standart Test Method for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density.** (2006). Pennsylvania,USA: ASTM International.

- [30] **Das, B. M., & Sobhan, K.** (2013). *Principles of Geotechnical Engineering*. Stamford,USA:Cengage Learning.
- [31] **Holtz, R. D., Kovacs, W. D.** (2010). (Kayabalı, K. Çev.). *Geoteknik Mühendisliğine Giriş*. Ankara,Türkiye: Gazi Kitabevi.
- [32] *ASTM D5856-95 Standart Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Porous Material Using a Rigid-Wall, Compaction-Mold Permeameter.* (2002). Pennsylvania,USA: ASTM International.
- [33] *ASTM D2434 -19 Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head).* (2019). Pennsylvania,USA: ASTM International.
- [34] **Formamidin kimyasal özellikleri** (t.y.). Erişim: 15 Aralık 2019, [https://www.merckmillipore.com/TR/tr/product/Formamide,MDA\\_CHEM-104008](https://www.merckmillipore.com/TR/tr/product/Formamide,MDA_CHEM-104008)
- [35] **Glyoxalın fiziksel ve kimyasal özellikleri** (t.y.). Erişim: 15 Aralık 2019, <https://en.wikipedia.org/wiki/Glyoxal>
- [36] **Glyoxalın fiziksel ve kimyasal özellikleri** (t.y.). Erişim: 15 Aralık 2019, [https://www.merckmillipore.com/TR/tr/product/Glyoxal,MDA\\_CHEM-820610](https://www.merckmillipore.com/TR/tr/product/Glyoxal,MDA_CHEM-820610)
- [37] *ASTM C 4219-02 Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength Index of Chemical Grouted Soils.* (2002). Pennsylvania,USA: ASTM International.

## ÖZGEÇMİŞ



**Ad-Soyad** : Emre DEVECİ  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 02/02/1994 ANTALYA  
**E-posta** : emre.deveci@btu.edu.tr

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2017, Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans** : 2017 – Halen, Bursa Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- **Araştırma Görevlisi**: 2018-Halen, Bursa Teknik Üniversitesi, M.D.B.Fak., İnşaat Mühendisliği Bölümü, Geoteknik Anabilim Dalı

### TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Avcı, E., Deveci, E. ve Gökçe, A.** (2019), “Sodyum Silikat Katkılı Süper İnce Taneli Çimento Enjeksiyonunun Reolojik Özellikleri”, *7th International Symposium on Academic Studies in Science, Engineering and Architecture Sciences (ISMS 2019)*, Ankara-Turkey, 15-17 November.

### DİĞER ESERLER, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Avcı, E. ve Deveci, E.** (2018), “Çimento İle Stabilize Edilmiş Düşük Plastisiteli Killerin Permeabilitelerinin Belirlenmesi”, *2nd International Symposium on*

*Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT2018), Kızılcahamam-Ankara-Turkey, 19-21 October.*

- **Avcı, E., Yıldırım,E. ve Deveci, E.** (2019), “Evaluation of Permeability Coefficient Values by using Regression Analysis in Microfine Cement Grouted Sand”, *Internationall Engineering Architecture Conference (ICEARC 2019), Trabzon-Turkey, 17-20 April.*

