



**T.C.  
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**SODYUM SİLİKAT-BORİK ASİT KARIŞIMI İLE ENJEKSİYON YAPILAN  
ORGANİK ZEMİNLERİN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN  
BELİRLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

Melih UYSAL

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**KASIM 2022**

**BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**SODYUM SİLİKAT-BORİK ASİT KARIŞIMI İLE ENJEKSİYON YAPILAN  
ORGANİK ZEMİNLERİN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN  
BELİRLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Melih UYSAL  
(19262821006)**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

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

**KASIM 2022**



BTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 19262821006 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Melih UYSAL, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "SODYUM SİLİKAT-BORİK ASİT KARIŞIMI İLE ENJEKSİYON YAPILAN ORGANİK ZEMİNLERİN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ" 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

**Teslim Tarihi**      :  
**Savunma Tarihi**    : **08.11.2022**



20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, Bursa Teknik Üniversitesi’nin aboneliği olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

## İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Melih UYSAL

İmzası:

*(Faint signature watermark)*



*Aileme,*

## ÖNSÖZ

Tez çalışmam boyunca her zaman yanımda olan, bilgi ve tecrübesiyle beni yönlendiren, bana yol gösteren çok değerli danışman hocam Doç. Dr. Eyübhan AVCI'ya sonsuz teşekkür ederim. Ayrıca deneysel çalışmalarım sırasında bana her türlü yardımı gösteren ve desteklerini benden esirgemeyen Arş. Gör. Emre Deveci'ye teşekkürü bir borç bilirim. Son olarak beni bu günlere getiren, üzerimde büyük emeği olan aileme şükranlarımı sunuyorum.

Kasım 2022

Melih UYSAL  
İnşaat Mühendisi

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER .....	viii
KISALTMALAR .....	x
SEMBOLLER .....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xvi
SUMMARY .....	xvii
<b>1. GİRİŞ...</b>	<b>1</b>
1.1 Tezin Amacı .....	2
<b>2. ORGANİK ZEMİNLER .....</b>	<b>4</b>
2.1 Organik Zeminlerin Özellikleri .....	5
2.1.1 Organik zeminlerin fiziksel ve kimyasal özellikleri .....	6
2.2 Organik Zeminlerin Sınıflandırılması .....	9
<b>3. ENJEKSİYON.....</b>	<b>14</b>
3.1 Enjeksiyonun Tarihsel Gelişimi .....	14
3.2 Enjeksiyonun Kullanım Alanları.....	16
3.3 Enjeksiyon Türleri.....	17
3.3.1 Kullanılan malzeme açısından enjeksiyon türleri .....	17
3.3.2 Uygulama yöntemi açısından enjeksiyon türleri.....	18
3.3.2.1 Çatlatma enjeksiyonu .....	18
3.3.2.2 Kompaksiyon enjeksiyonu .....	19
3.3.2.3 Permeasyon enjeksiyonu .....	20
3.3.2.4 Jet enjeksiyonu .....	22
3.4 Kimyasal Enjeksiyon.....	24
3.4.1 Kimyasal enjeksiyonun tarihi.....	24
3.4.2 Kimyasal enjeksiyonda kullanılan malzemeler.....	25
3.4.2.1 Silikatlar .....	26
3.4.2.2 Akrilamidler .....	26
3.4.2.3 Linyosülfatlar .....	27
3.4.2.4 Fenoplastlar .....	28
3.4.2.5 Aminoplastlar .....	29
3.4.2.6 Diğer malzemeler .....	29
3.4.3 Kimyasal enjeksiyonun reolojik özellikleri .....	30
3.4.3.1 Viskozite .....	30
3.4.3.2 Jelleşme süresi.....	31
3.4.3.3 Sinerez.....	32
3.4.3.4 Toksisite .....	32
3.4.4 Kimyasal enjeksiyonun penetrasyon özelliği.....	33
3.4.5 İdeal kimyasal enjeksiyon malzemesi.....	34

3.4.6 Literatür özeti .....	35
<b>4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....</b>	<b>38</b>
4.1 Giriş .....	38
4.2 Enjeksiyon Deneylerinde Kullanılan Organik Zeminin Özellikleri.....	39
4.2.1 Su içeriğinin belirlenmesi .....	40
4.2.2 Özgül ağırlık .....	41
4.2.3 Dane çapı dağılım eğrisi .....	43
4.2.4 Atterberg limitleri .....	44
4.2.5 Organik madde tayini.....	46
4.2.6 Standart proctor deneyi .....	47
4.2.7 Organik zeminin permeabilitesi .....	49
4.3 Enjeksiyon Deneylerinde Kullanılan Kimyasal Malzemelerin Özellikleri.....	50
4.3.1 Sodyum silikat.....	50
4.3.2 Borik asit .....	51
4.4 Kimyasal Solüsyonların Reolojik Özelliklerinin Belirlenmesi .....	52
4.4.1 Jelleşme süresi.....	53
4.4.1.1 Sodyum silikat-borik asit solüsyonlarının jelleşme süreleri .....	54
4.4.2 Sinerez.....	58
4.4.2.1 Sodyum silikat-borik asit solüsyonlarının sinerez miktarları.....	58
4.4.3 Viskozite .....	65
4.4.3.1 Sodyum silikat-borik asit solüsyonlarının viskozite değerleri.....	65
4.5 Numunelerin Moldlara Yerleştirilmesi .....	66
4.6 Enjeksiyon Deneyleri .....	70
4.6.1 Enjeksiyon deney düzeneği.....	70
4.6.2 Enjeksiyon uygulaması .....	71
4.6.3 Enjeksiyon sonrası numunelerin moldlardan çıkarılması .....	73
4.7 Enjeksiyon Yapılmış Numunelerin Serbest Basınç Dayanımlarının Belirlenmesi .....	74
4.7.1 Enjeksiyon yapılmış numunelerin farklı kür koşullarında bekletilmesi ...	74
4.7.2 Serbest basınç deneyleri öncesinde numunelere başlık yapılması.....	76
4.7.3 Serbest basınç dayanımı deneyleri.....	77
4.8 Enjeksiyon Yapılmış Numunelerin Permeabilite Katsayılarının Belirlenmesi	83
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>86</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>90</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>95</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>Hata! Yer işareti tanımlanmamış.</b>

## **KISALTMALAR**

**ASTM** : American Society for Testing and Materials

**PPRC** : Polipropilen Random Copolimer

**SI** : Uluslararası Birimler Sistemi

**S.S/Çöz.** : Sodyum Silikat/Çözelti

**TS** : Türk Standartı



## SEMBOLLER

<b>A</b>	: Numune kesit alanı
<b>a</b>	: Borunun iç kesit alanı
<b>cP</b>	: centiPoise
<b>G<sub>s</sub></b>	: Özgül ağırlık
<b>h<sub>1</sub></b>	: İlk su yüksekliği
<b>h<sub>2</sub></b>	: Son su yüksekliği
<b>i</b>	: Hidrolik eğim
<b>k</b>	: Permeabilite katsayısı
<b>L</b>	: Numune boyu
<b>M</b>	: Moldun içerisine yerleştirilecek malzeme kütlesi
<b>t</b>	: Zaman
<b>V<sub>m</sub></b>	: Mold hacmi
<b>γ<sub>k</sub></b>	: Malzemenin kuru birim hacim ağırlığı

## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 2.1 : Turba zeminlerin bazı ülkelerde kapladığı alanlar [10]. .....	5
Çizelge 2.2 : Turba zeminlerin buldukları bölgeye göre fiziksel özellikleri [17]. ..	6
Çizelge 2.3 : Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi [21].....	12
Çizelge 3.1 : Zemin tane boyutuna göre kullanılacak enjeksiyon malzemeleri [4]. .....	22
Çizelge 3.2 : Malzemelerinin viskozitesine göre zeminin sınır permeabilite değerleri [3].....	34
Çizelge 3.3 : Kimyasal enjeksiyon malzemelerinin özellikleri [2].....	35
Çizelge 4.1 : Özgül ağırlık deney verileri.....	43
Çizelge 4.2 : Atterberg limitleri deney sonuçları.....	46
Çizelge 4.3 : Zeminlerin tipik permeabilite katsayıları[76].....	49
Çizelge 4.4 : Sodyum silikatın fiziksel ve kimyasal özellikleri [79].....	51
Çizelge 4.5 : Borik asitin fiziksel ve kimyasal özellikleri [80]. .....	52
Çizelge 4.6 : Borik asitin suda çözünürlüğü [80]. .....	52
Çizelge 4.7 : 20 °C Ve 30 °C sıcaklıklarda solüsyonların jelleşme süreleri. ....	56
Çizelge 4.8 : Solüsyonların sinerez yüzdeleri.....	59
Çizelge 4.9 : Solüsyonların viskozite değerleri. ....	65
Çizelge 4.10 : Enjeksiyonlarda kullanılacak kimyasal oranalar.....	72
Çizelge 4.11 : Numunelerin serbest basınç dayanımı değerleri. ....	78
Çizelge 4.12 : Numunelerin permeabilite katsayıları. ....	84
Çizelge A.7.1 : Solüsyonlarda Tercih Edilen Oranlar. ....	96

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1 : Organik zemine ait şematik gösterim [8].	4
Şekil 2.2 : Özgül ağırlık ile organik içerik arasındaki ilişkiyi gösteren grafik [16].	7
Şekil 2.3 : Organik içerik ile birim hacim ağırlık arasındaki ilişkiyi gösteren grafik [16].	7
Şekil 2.4 : Plastik limit ile organik içerik arasındaki ilişkiyi gösteren grafik [18].	8
Şekil 2.5 : Likit limit ile organik içerik arasındaki ilişkiyi gösteren grafik [18].	9
Şekil 2.6 : Plastisite indisi ile organik içerik arasındaki ilişkiyi gösteren grafik [18].	9
Şekil 3.1 : Berigny'nin "darbe pompası" [3].	15
Şekil 3.2 : Enjeksiyon çeşitleri [32].	18
Şekil 3.3 : Permeasyon enjeksiyonu [4].	21
Şekil 3.4 : Jelleşme süresi boyunca viskozite değişimi [2].	31
Şekil 3.5 : Sinerezin zamanla değişimi [2].	32
Şekil 4.1 : Yarılama işlemi.	39
Şekil 4.2 : Organik zeminin su içeriğinin belirlenmesi.	40
Şekil 4.3 : Piknometreye yerleştirilen zemin numuneleri.	42
Şekil 4.4 : Vakum ile hava alma işlemi.	42
Şekil 4.5 : Elek analizi ve hidrometre deneyi aşamaları.	43
Şekil 4.6 : Dane çapı dağılım eğrisi.	44
Şekil 4.7 : Casagrande deney cihazıyla likit limit deneyinin yapılması.	45
Şekil 4.8 : Casagrande 5 nokta yöntemine göre çizilen grafik.	46
Şekil 4.9 : Plastisite kartında zemin sınıfının gösterilmesi.	46
Şekil 4.10 : Organik madde tayini kütle ölçümü ve etüv sıcaklığı.	47
Şekil 4.11 : Proctor deneyi aşamaları	48
Şekil 4.12 : Kompaksiyon eğrisini gösteren grafik.	48
Şekil 4.13 : Kimyasal enjeksiyonda kullanılan sodyum silikat.	50
Şekil 4.14 : Kimyasal enjeksiyonda kullanılan borik asit	51
Şekil 4.15 : Sodyum silikat ve borik asit arasında gerçekleşen reaksiyon.	53
Şekil 4.16 : Sodyum silikat-borik asit solüsyonları.	54
Şekil 4.17 : Solüsyonların jelleşme sırasındaki renk değişimi.	55
Şekil 4.18 : Jelleşme sürelerinin SS/Çöz. oranına göre değişimi.	55
Şekil 4.19 : Jelleşme sürelerinin borik asit miktarına göre değişimini gösteren grafik.	57
Şekil 4.20 : Jelleşme süresinin ortam sıcaklığına bağlı olarak değişimini gösteren grafik.	57
Şekil 4.21 : Solüsyonlarının sinerez ölçümü.	58
Şekil 4.22 : Sinerezini tamamlamış solüsyonlar.	59
Şekil 4.23 : %28 SS/Çöz oranına sahip solüsyonların sinerez yüzdesi -zaman grafiği.	60
Şekil 4.24 : %30 SS/Çöz oranına sahip solüsyonların sinerez yüzdesi -zaman grafiği.	60

<b>Şekil 4.25</b> : %32 SS/Çöz oranına sahip solüsyonların sinerez yüzdesi -zaman grafiği. .....	<b>61</b>
<b>Şekil 4.26</b> : %34 SS/Çöz oranına sahip solüsyonların sinerez yüzdesi -zaman grafiği. .....	<b>61</b>
<b>Şekil 4.27</b> : %36 SS/Çöz oranına sahip solüsyonların sinerez yüzdesi -zaman grafiği. .....	<b>61</b>
<b>Şekil 4.28</b> : %38 SS/Çöz oranına sahip solüsyonların sinerez yüzdesi -zaman grafiği. .....	<b>62</b>
<b>Şekil 4.29</b> : %40 SS/Çöz oranına sahip solüsyonların sinerez yüzdesi -zaman grafiği. .....	<b>62</b>
<b>Şekil 4.30</b> : %42 SS/Çöz oranına sahip solüsyonların sinerez yüzdesi -zaman grafiği. .....	<b>62</b>
<b>Şekil 4.31</b> : 2,2 g/100 ml borik asit içeren solüsyonların sinerez yüzdesi-zaman grafiği.....	<b>63</b>
<b>Şekil 4.32</b> : 2,4 g/100 ml borik asit içeren solüsyonların sinerez yüzdesi-zaman grafiği.....	<b>63</b>
<b>Şekil 4.33</b> : 2,6 g/100 ml borik asit içeren solüsyonların sinerez yüzdesi-zaman grafiği.....	<b>64</b>
<b>Şekil 4.34</b> : 2,8 g/100 ml borik asit içeren solüsyonların sinerez yüzdesi-zaman grafiği.....	<b>64</b>
<b>Şekil 4.35</b> : 3,0 g/100 ml borik asit içeren solüsyonların sinerez yüzdesi-zaman grafiği.....	<b>64</b>
<b>Şekil 4.36</b> : Enjeksiyon moldu boyutları.....	<b>66</b>
<b>Şekil 4.37</b> : a) Enjeksiyonda kullanılan kestamit üst başlıklar, b) PPRC moldlar, c) alt başlıklar.....	<b>67</b>
<b>Şekil 4.38</b> : Kestamit başlıkları sabitlemek amacıyla yerleştirilen kelebek somunlar ile saplama milleri ve kimyasal solüsyonun molda giriş-çıkışını sağlayan pnömatik rekor ile hortum.....	<b>67</b>
<b>Şekil 4.39</b> : Numune hazırlamada kullanılan a) titreşimli tokmak, b) filtre kağıdı, c) orta ve iri kum malzemeleri.....	<b>68</b>
<b>Şekil 4.40</b> : Enjeksiyon malzemesinin molda yerleştirilme aşamaları.....	<b>69</b>
<b>Şekil 4.41</b> : Filtre malzemesinin mold içine yerleştirilme aşamaları.....	<b>70</b>
<b>Şekil 4.42</b> : Kimyasal enjeksiyonlarda kullanılan deney düzeneği.....	<b>71</b>
<b>Şekil 4.43</b> : Enjeksiyon deneylerinin yapılması.....	<b>72</b>
<b>Şekil 4.44</b> : Enjeksiyon deneyi sonrası jelleşmenin beklenmesi.....	<b>73</b>
<b>Şekil 4.45</b> : Jelleşmesini tamamlayan numunelerin moldlardan çıkarılması ve numaralandırılması.....	<b>73</b>
<b>Şekil 4.46</b> : Farklı oranlarda solüsyonlar ile hazırlanan numuneler.....	<b>74</b>
<b>Şekil 4.47</b> : Jelleşmesini tamamlamış enjeksiyon malzemesinin numune içindeki görüntüsü.....	<b>74</b>
<b>Şekil 4.48</b> : Açık ortamda ve streçte bekletilen numuneler.....	<b>75</b>
<b>Şekil 4.49</b> : Kür havuzunda bekletilen numuneler.....	<b>75</b>
<b>Şekil 4.50</b> : Kür havuzunda bütünlüğünü koruyamayan numuneler.....	<b>76</b>
<b>Şekil 4.51</b> : Numunelere başlık yapılması.....	<b>76</b>
<b>Şekil 4.52</b> : Numune başlıkları.....	<b>77</b>
<b>Şekil 4.53</b> : Serbest basınç dayanımı deneyinde kullanılan cihaz ve deneyin yapılışı. .....	<b>78</b>
<b>Şekil 4.54</b> : Açık ortamda bekletilen ve streçli halde bekletilen numunelerin serbest basınç dayanımlarının zamana göre değişimini gösteren grafik.....	<b>79</b>

<b>Şekil 4.55</b> : Numunelerin 90. gündeki serbest basınç değerlerini SS/Çöz. oranına bağlı olarak gösteren grafik.....	<b>79</b>
<b>Şekil 4.56</b> : Oran A ile enjeksiyonu yapılan numunelerin serbest basınç dayanımlarını gösteren grafik. ....	<b>80</b>
<b>Şekil 4.57</b> : Oran B ile enjeksiyonu yapılan numunelerin serbest basınç dayanımlarını gösteren grafik. ....	<b>80</b>
<b>Şekil 4.58</b> : Oran C ile enjeksiyonu yapılan numunelerin serbest basınç dayanımlarını gösteren grafik. ....	<b>Hata! Yer işareti tanımlanmamış.</b>
<b>Şekil 4.59</b> : Oran D ile enjeksiyonu yapılan numunelerin serbest basınç dayanımlarını gösteren grafik. ....	<b>Hata! Yer işareti tanımlanmamış.</b>
<b>Şekil 4.60</b> : Serbest basınç dayanımı deneyi yapılan numunelerin tipik kırılma şekilleri.....	<b>Hata! Yer işareti tanımlanmamış.</b>
<b>Şekil 4.61</b> : Düşen seviyeli permeabilite deney düzeneği ve numuneler. ....	<b>Hata! Yer işareti tanımlanmamış.</b>
<b>Şekil 4.62</b> : Permeabilite katsayılarının SS/Çöz. oranına göre değişimini gösteren grafik.....	<b>82</b>
<b>Şekil 4.63</b> : Permeabilite katsayılarının zamana bağlı olarak değişimini gösteren grafik.....	<b>83</b>

# SODYUM SİLİKAT-BORİK ASİT KARIŞIMI İLE ENJEKSİYON YAPILAN ORGANİK ZEMİNLERİN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

## ÖZET

Bu çalışmada sodyum silikat ve borik asit karıştırılarak hazırlanan solüsyonların reolojik özellikleri ve seçilen solüsyonlar kullanılarak organik zemine yapılan permeasyon enjeksiyonu sonucunda numunelerin mühendislik özellikleri araştırılmıştır. Çalışmada ilk olarak sodyum silikat ve borik asit malzemeleri çeşitli oranlarda karıştırılmış ve reolojik özellikleri (jelleşme süresi, sinerez, viskozite) belirlenmiştir. Belirlenen reolojik özelliklerin sonucunda en uygun dört oran (%28 SS/Çöz. ve 2,1 g borik asit, %30 SS/Çöz. ve 2,4 g borik asit, %34 SS/Çöz. ve 2,4 g borik asit ile %42 SS/Çöz. ve 2,9 g borik asit) enjeksiyon deneylerinde kullanılmak üzere seçilmiştir.

Yapılan enjeksiyonların tamamında başarı sağlanmıştır ve enjeksiyon malzemesi numunenin içerisine 1,90-2,30 bar arasında değişen basınçlarda uygulanmıştır. Enjeksiyonu tamamlanan numuneler açık, streçli ve kür havuzunda olarak üç farklı kür koşulunda bekletilmiştir. Kür havuzunda bekletilen numuneler bütünlüğünü koruyamadığı için serbest basınç dayanımı deneyi yapılamamıştır. Açıkta ve streçli olarak bekletilen numunelere 3., 7., 14., 28., 56. ve 90. günlerde serbest basınç dayanımı deneyi yapılmıştır. Numunelerin serbest basınç dayanımlarının 162,520 kPa ile 572,337 kPa arasında değiştiği tespit edilmiştir. Serbest basınç dayanımı en yüksek olan numune açık ortamda 90 gün bekletilen ve %42 SS/Çöz. oranı ile hazırlanan numunedir. Serbest basınç dayanımı en düşük olan numune ise streçli olarak 3 gün bekletilen ve %28 SS/Çöz. oranı ile hazırlanan numunedir. Numunelerin açık ortamda bekletilmiş olanları streçli olarak bekletilenlere göre yaklaşık iki kat daha fazla dayanım vermiştir.

Enjeksiyonları tamamlanmış numunelere ve doğal haldeki organik zemine düşen seviyeli permeabilite deneyi yapılmıştır. Numunelerin 3., 28., 56., ve 90. günlerde düşen seviyeli permeabilite ölçümü yapılmıştır. Doğal haldeki organik zeminin permeabilite katsayısı  $4,79 \times 10^{-5}$  cm/sn olarak belirlenmiştir. Enjeksiyon yapılmış olan numunelerin permeabilite katsayıları  $4,34 \times 10^{-6}$  cm/sn ile  $4,32 \times 10^{-5}$  cm/sn arasında değişmektedir. Organik zemine yapılan permeasyon enjeksiyonu sonucunda permeabilite katsayısı yaklaşık 10 kat azaltılmıştır.

Yapılan çalışmalar sonucunda sodyum silikat-borik asit solüsyonlarının organik zemine permeasyon enjeksiyonunun başarılı olduğu ve organik zemine enjekte edilen sodyum silikat-borik asit solüsyonlarının zeminin mühendislik özelliklerini iyileştirdiği belirlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Organik Zemin, Permeasyon, Kimyasal Enjeksiyon, Serbest Basınç Dayanımı, Permeabilite

# DETERMINATION OF ENGINEERING PROPERTIES OF ORGANIC SOILS WITH SODIUM SILICATE-BORIC ACID MIXTURE

## SUMMARY

In this study, the rheological properties of the solutions prepared by mixing sodium silicate and boric acid and the engineering properties of the samples prepared as a result of permeation grouting into organic soil using the selected mixture were investigated. First of all, sodium silicate and boric acid were mixed in different ratios and their rheological properties (gelling time, syneresis, viscosity) were determined. Solutions used in grouting were identified as Ratio A, in which 2,1 g of boric acid was mixed into a solution with a ratio of 28% SS/Sol., Ratio B, in which 2,4 g of boric acid was mixed into a solution with a ratio of 30% SS/Sol., Ratio C, in which 2,4 g boric acid was mixed into a solution with a ratio of 34% SS/Sol., Ratio D, in which 2,4 g of boric acid was mixed into a solution with a ratio of 42% SS/Sol.

All grouting tests were successful, and the mixture was performed on the samples in grouting pressure values changing from 1,90 to 2,30 bar. The samples whose grouting processes had been completed were stored under three different curing conditions, namely air dried, stretch wrapped, and water-cured environments. Since the samples stored in water-cured environment could not stay integrated, unconfined compression tests were not performed on them. Unconfined compression tests were performed on the samples stored under air dried and stretch wrapped conditions on the 3<sup>rd</sup>, 7<sup>th</sup>, 14<sup>th</sup>, 28<sup>th</sup>, 56<sup>th</sup>, and 90<sup>th</sup> days. It is ascertained that the strength values of the samples vary between 162,520 kPa and 572,337 kPa. The strength values of the samples increased with the time of their storage. The sample with the maximum strength value is the one prepared with %42 SS/Sol. ratio and stored for 90 days. The sample with the minimum strength value is the one prepared with %28 SS/Sol. ratio and stored for 3 days. Compared to the ones stored in stretch wrapped environment, the samples stored in air dried environment have almost twice the strength value.

Permeability test was carried out on the grouted and ingrouted samples. Permeability coefficients of the samples were determined on the 3<sup>rd</sup>, 28<sup>th</sup>, 56<sup>th</sup>, and 90<sup>th</sup> days. The permeability coefficient of the ingrouted organic soil was  $4,79 \times 10^{-5}$  cm/sec. The permeability coefficients of the grouted samples vary between  $4,34 \times 10^{-6}$  cm/sec and  $6,83 \times 10^{-5}$  cm/sec. The permeability coefficient of the organic soil used in this test was reduced 10 times by performing permeation grouting procured through sodium silicate and boric acid mixture. The permeability coefficient reaches its maximum value when the SS/Sol. ratio is %34.

As a result of this study, it is determined that the permeation grouting of sodium silicate-boric acid solutions into organic soil is successful and that the sodium silicate-boric acid solutions grouted into organic soil improve the engineering properties of the soil.

**Keywords:** Organic Soil, Permeation, Chemical Grouting, Unconfined Compressive Strength, Permeability

## 1. GİRİŞ

Son yıllarda nüfusun artması, ekonomilerin büyümesi ve ihtiyaçların çeşitlenmesi nedeniyle daha yüksek düzeyde mühendislik gerektiren yapılara ve bunun sonucu olarak daha iyi zemin koşullarına ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak zeminlerin mühendislik özellikleri her zaman istenilen düzeyde olmamaktadır. Gelişmekte olan şehirlerde yeni imara açılacak alanlar ve sanayi bölgeleri için ihtiyaca yanıt verecek büyük arazilerin sayısı gün geçtikçe azalmaktadır. Bunun sonucu olarak, kötü mühendislik özelliklere sahip alanlar istenirse de kullanıma açılmakta, uygun olmayan zeminler üzerindeki yapılaşmayla birlikte birçok mühendislik problemi ortaya çıkmaktadır. Bu mühendislik problemlerinin giderilebilmesi için geliştirilen çeşitli zemin iyileştirme yöntemleri mevcuttur [1].

Zemin iyileştirme, zeminlerin seçilen özelliklerinin bir mühendislik uygulamasına yönelik olarak daha iyi hale getirilmesi olarak tarif edilmektedir. Zeminler mühendislik özellikleri iyileştirilerek yapılaşmaya uygun hale getirilmektedir. Zemin davranışı ve geoteknik tehlikeler üzerine yapılan çalışmalardan elde edilen bilgiler birçok zemin iyileştirme tekniğinin gelişmesine yol açmıştır [2].

Geoteknik mühendisliğinde, zeminin sergilediği olumsuz mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesinde yaygın olarak kullanılan zemin iyileştirme tekniklerinden biri olan enjeksiyon, zemin veya kaya formasyonundaki boşluklara basınç altında süspansiyon veya solüsyon türü malzemelerin enjekte edilmesi işlemidir. Enjeksiyon yapılan numunelerin dayanımında artma meydana gelirken, deformasyon gerçekleştirme olasılığı ve geçirgenliği azalmaktadır [3].

Permeasyon enjeksiyonu yaygın olarak kullanılan enjeksiyon türlerinden biridir. Bu enjeksiyon türünde enjeksiyon malzemesi zemin içerisindeki boşluklara, zeminde herhangi bir değişikliğe neden olmadan yerleştirilir [4].

Permeasyon enjeksiyonu yönteminde enjeksiyon malzemesi olarak çeşitli malzemeler kullanılmaktadır. Portland çimentosu bu malzemelerden biridir, fakat partikül boyutunun büyük olması nedeniyle daha küçük boşluklu zeminlere nüfuz etmesi

zordur. Bu sebeple daha küçük boşluklara sahip olan zeminler için daha küçük çaplı malzemelere ihtiyaç duyulmuştur. Bu ihtiyaç sonucunda ortaya kimyasal enjeksiyon malzemeleri çıkmıştır [5].

Kimyasal enjeksiyon malzemelerinin yüksek maliyetli olması, yetersiz dayanım vermesi ve toksik etkiye sahip olması gibi nedenler araştırmacıları yeni malzeme arayışına yöneltmiştir. Bu arayış ile istenilen verimlilikte malzeme elde etme çalışmaları devam etmektedir.

### **1.1 Tezin Amacı**

Bu tez kapsamındaki deneysel çalışmalarda, reaktant olarak kullanılan yerli üretim borik asitin sodyum silikat ile karıştırılmasıyla hazırlanan çözeltinin sabit rölatif sıklıktaki organik zemin numunelerine enjeksiyonunun gerçekleştirilmesi ve enjeksiyon deneyleri sonucunda belirli kür koşullarında bekletilen numunelerin serbest basınç dayanımı değerleri ile permeabilite katsayıları gibi mühendislik özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu çalışma organik zemin kullanılarak permeasyon enjeksiyonu yöntemi uygulanan literatürdeki ilk silikat enjeksiyonu çalışmasıdır.

Planlanan ve gerçekleştirilen çalışmalar şöyle sıralanabilir;

1-) Deneylerde kullanılacak sodyum silikat, reaktant(borik asit) ve organik zemin temin edilmiştir.

2-) Deneylerde kullanılacak olan organik zeminin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi amacıyla organik zemin üzerinde özgül ağırlık, elek analizi, hidrometre, organik madde tayini, standart Proctor deneyi ve Atterberg limitleri deneyleri yapılmıştır.

3-) Farklı karışım oranlarında hazırlanmış 136 adet sodyum silikat-borik asit karışımlarının reolojik özellikleri (jelleşme süresi, viskozite ve sinerez) belirlenmiştir ve sinerez miktarları için 3., 7., 14., 28., 56., 90. ve 150. günlerde ölçüm alınmıştır.

4-) Reolojik özellik belirleme deneyleri sonrası deneylerde kullanılacak en uygun karışım oranları belirlenmiştir.

5-) Belirlenen karışım oranları kullanılarak hazırlanan solüsyonlar, pilot çalışma kapsamında zemin numunelerine enjekte edilmiş ve enjeksiyon sonrası numunelerin yapısı incelenmiştir.

6-) Borik asit ve sodyum silikat kullanılarak elde edilen dört farklı solüsyonun, uzun dönemde numunelerin mukavemet ve permeabilite özelliklerine olan etkisinin incelenmesine karar verilmiştir.

7-) Enjeksiyon deneylerinde kullanılan düzeneğin tasarımı Prof. Dr. Murat MOLLAMAHMUTOĞLU tarafından yapılmıştır. Numuneleri sabit rölatif sıklıkta hazırlamak için titreşimli tokmak kullanılmıştır. Organik zemin malzemesine daha önce belirlenen dört farklı solüsyonla enjeksiyon yapılmış ve moldlara yerleştirilmiştir.

8-) Enjeksiyonu yapılan numunelerin, enjeksiyondan sonraki gün başlıkları sökülmüştür ve üç gün moldlarda bekletildikten sonra üçüncü gün moldlarından çıkarılmıştır.

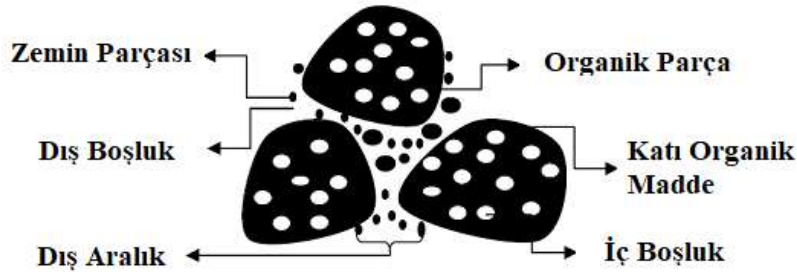
9-) Moldlardan çıkarılan numuneler; açık ortamda, streçli olarak ve kür tankında olmak üzere üç farklı kür koşulunda bekletilmiştir. Numunelere 3., 7., 14., 28., 56. ve 90. günlerde serbest basınç dayanım testleri yapılmıştır.

10-) Son olarak numunelerin geçirgenlik katsayıları belirlenmesi amacıyla enjeksiyon deneyleri tamamlanan numuneler moldlardan çıkarılmadan düşen seviyeli permeabilite deney düzeneğine bağlanmıştır ve deneyler tamamlanmıştır.

## 2. ORGANİK ZEMİNLER

Organik ve/veya turba zeminler farklı iklim ve coğrafi koşullar altında özellikle sulak alanlarda, bitki ve diğer kalıntıların çürümesi, kimyasal yapısının değişmesi veya fosilleşmesiyle oluşmaktadır. Zemin içindeki organik madde miktarını belirleyen birçok parametre bulunmaktadır. Bunlar; arazinin topoğrafyası, bitki örtüsü, iklimi ve oluşum zamanıdır. İçinde organik malzeme miktarına göre bu zeminler organik zemin ve turba zemin olarak iki gruba ayrılmaktadır. ASTM standartlarına göre zemin içinde organik malzeme miktarı %75 den büyük zeminler turba, %75 den küçük ise zeminler organik zemin olarak adlandırılmaktadır [6,7].

Organik zeminleri hacminin büyük bir kısmını içerisindeki boşluklar oluşturmaktadır. Bu boşluklar Şekil 2.1’de gösterildiği gibi zeminlerin içerisindeki fiberlerde bulunmaktadır. Bu nedenle organik zeminler yüksek oranda su tutma kapasitesine ve yüksek sıkışma eğilimine sahiptirler. Suyun bir kısmı zemin taneleri arasındaki boşluklarda tutulsa da, önemli miktardaki su fiberlerin içerisinde tutulmaktadır. Bu zeminler üzerine inşa edilen yapılar yüksek sıkışma potansiyeli nedeniyle büyük konsolidasyon oturmalarına maruz kalmaktadır [8].



Şekil 2.1 : Organik zemine ait şematik gösterim [8].

İçerisinde %75’den daha fazla organik madde içeren zeminler, su altında yüzlerce yıl birikmiş ölü bitki kalıntılarının tamamının veya bir kısmının kimyasal yapısının değişmesi ve fosilleşmesi sonucu oluşmuştur. Bu zeminlerin çoğu buzul çağında oluşmuştur ve yerkürenin kara yüzölçümünün yaklaşık %8’ini oluşturmaktadır [9]. Organik zeminler genellikle ince tabakalar halinde ve sınırlı alanlarda bulunmaktadır [10].

Dünyanın birçok bölgesinde bulunan organik zeminler, ABD, Kanada ve Rusya’da sırasıyla 30 milyon, 170 milyon ve 150 milyon hektarlık alanı kaplamaktadır [11].

Malezya’da ise yaklaşık 2,5 milyon hektar turba zemin bulunmaktadır ve bunlar ülkenin yüzölçümünün yaklaşık %7’sini oluşturmaktadır [12]. Ülkemizde ise yaklaşık 25 bin hektarlık alan organik zeminlerden oluşmaktadır ve bu alanlar daha çok Kayseri, Yüksekova, Trabzon Ağaçaşlı Yaylası, Abant Gölü, Yeşilirmak Deltası ve Yeniçağa (Bolu) çevresinde bulunmaktadır [13]. Çizelge 2.1’de turba zeminlerin bazı ülkelerde kapladığı alanlar verilmiştir.

**Çizelge 2.1 : Turba zeminlerin bazı ülkelerde kapladığı alanlar [10].**

Ülke	Organik Zemin (km <sup>2</sup> )	Ülkenin Yüzölçümüne Oranı (%)
Kanada	1.500.000	18
ABD	600.000	10
Endonezya	170.000	14
Finlandiya	100.000	34
İsveç	70.000	20
Norveç	30.000	10
İrlanda	14.000	17

## 2.1 Organik Zeminlerin Özellikleri

Organik zeminler farklı iklim ve coğrafi koşullar altında özellikle sulak alanlarda, bitki ve diğer kalıntıların çürümesi, kimyasal yapısının değişmesi sonucunda oluşmaktadır. Zemin içinde arazinin topografyası, bitki örtüsü, iklimi ve oluşum zamanı gibi organik madde miktarını belirleyen birçok parametre bulunmaktadır. İçinde organik malzeme miktarına göre bu zeminler organik zemin ve turba zemin olarak iki gruba ayrılmaktadır. ASTM standartlarına göre zemin içinde organik malzeme miktarı zeminin kuru kütlelerinin %75’den büyük ise bu zeminler turba, %75’den küçük ise zeminler organik zemin olarak adlandırılmaktadır [6].

Zeminin organik tabakasının kalınlığı ve minimum organik madde miktarı konusunda henüz fikir birliği olmasa da ABD Tarım Bakanlığının zemin sınıflandırmasına göre içerisinde minimum %20 oranında organik madde bulunduran zeminler turba olarak isimlendirilmektedir. Uluslararası turba topluluğu da (IPS) bu sınıflandırmayı

kullanılmaktadır ve zemin içerisindeki organik madde oranı %20'den fazla ise zemini turba olarak isimlendirmektedir [14,15].

### 2.1.1 Organik zeminlerin fiziksel ve kimyasal özellikleri

Organik zeminler binlerce yıl su altında birikerek kısmen ya da tamamen ayrılmış bitki kalıntılarından oluşmaktadır. Yıllar süren bu ayrışma sürecinde zemin içerisinde organik madde miktarının artması fiziksel yapının ortadan kalkması ve kimyasal yapının değişmesiyle sonuçlanmaktadır [16].

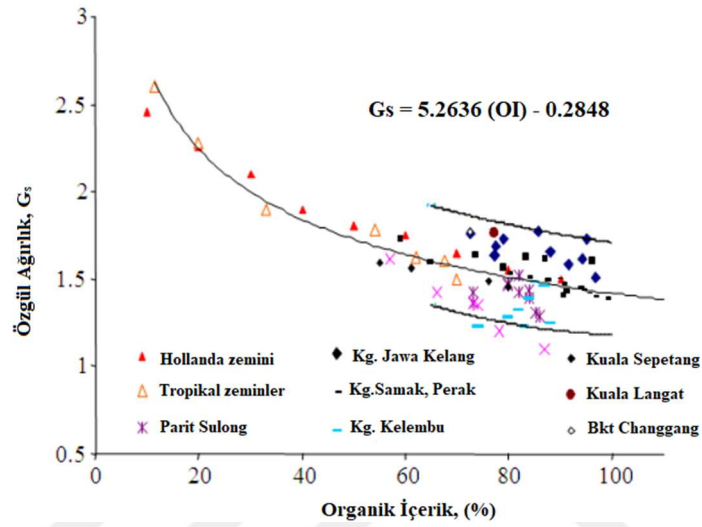
Organik zeminlerde bulunan suyun büyük bir kısmı liflerin içerisinde tutulmaktadır. Buna ek olarak zemindeki su zemin daneleri arasındaki boşluklarda ve organik malzemede bulunabilir. Bu özelliği nedeniyle organik zeminlerin su muhtevası %500 değerine kadar ulaşabilmektedir. Turba olarak isimlendirilen ve içerdiği organik madde miktarı fazla olan zeminlerde bu değer %700, silt ve özellikle killerde %70'e kadar çıkabilmektedir [17]. İçerdiği organik madde miktarı yüksek olan turba zeminlerin bulunduğu bölgeye bağlı olarak özelliklerinin değişimi Çizelge 2.2'de gösterilmiştir.

**Çizelge 2.2 :** Turba zeminlerin buldukları bölgeye göre fiziksel özellikleri [17].

Bölge	Doğal su muhtevası $W_{opt}$ (%)	Birim hacim ağırlık $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Organik içerik (%)	Özgül ağırlık ( $G_s$ )
Lifli turba, Quebec, Kanada	370–450	8,7–10,4	-	-
Lifli turba, Antoniny, Polonya	310–450	10,5–11,1	65–85	-
Amorf turba, Cork, İrlanda	450	10,2	80	-
Massachusetts	759–946	10,1–10,4	60–77	-
Avusturya	200–800	9,8–13,0	-	-
Japonya	334–1320	-	20–98	-
İtalya	200–300	10,2–14,3	70–80	-
ABD	178–600	-	-	-
Kanada	223–1040	-	17–80	-
Batı Malezya	200–700	8,3–11,5	65–97	1,38-1,70
Doğu Malezya	200–2207	8,0–12,0	76–98	-
Merkez Kalimantan	467–1224	8,0–14,0	41–99	1,50-1,77

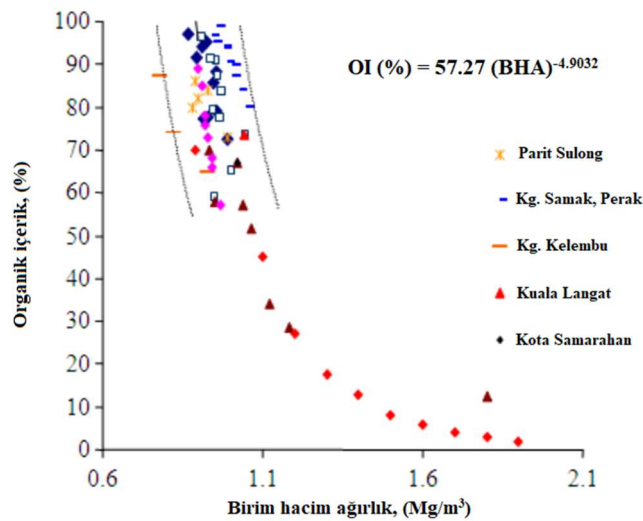
Organik zeminlerin birim hacim ağırlık değeri içerdiği organik madde miktarına, boşluk oranına ve özgül ağırlığına bağlıdır. Bu zemin türünün lifli yapıda olması ve

liflerin zemin içerisinde boşluklara sebep olması birim hacim ağırlık değerini oldukça etkilemektedir. Organik zeminlerin özgül ağırlık değeri ise diğer zeminlere kıyasla oldukça düşük olabilmektedir. Huat ve arkadaşları (2009), yaptıkları çalışmada farklı bölgelerden temin ettikleri ve içerdiği organik madde miktarı %50-95 arasında değişen organik zeminlerin özgül ağırlık değerinin 1,05 ile 1,9 arasında değiştiğini göstermişlerdir [16]. Zemindeki organik madde miktarı arttıkça özgül ağırlık değerinin azalmakta olduğu Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2 : Özgül ağırlık ile organik içerik arasındaki ilişkiyi gösteren grafik [16].

Yapılan çalışmada birim hacim ağırlık değerinin 0,8-1,2 Mg/m<sup>3</sup> aralığında değiştiği gözlenmiştir [16]. Zeminin organik madde miktarının artmasının birim hacim ağırlığı düşürdüğü Şekil 2.3’de gösterilmiştir.

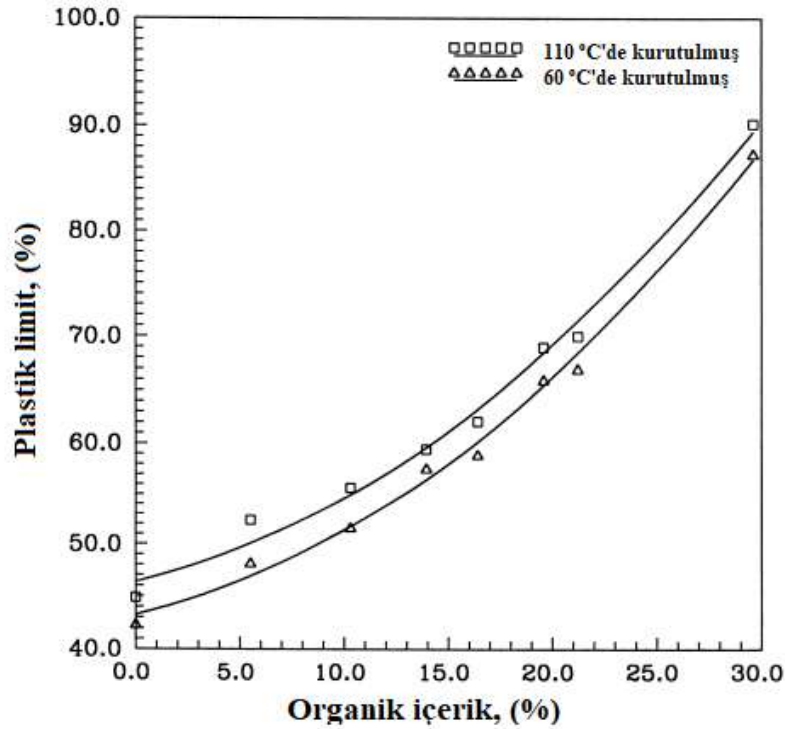


Şekil 2.3 : Organik içerik ile birim hacim ağırlık arasındaki ilişkiyi gösteren grafik [16].

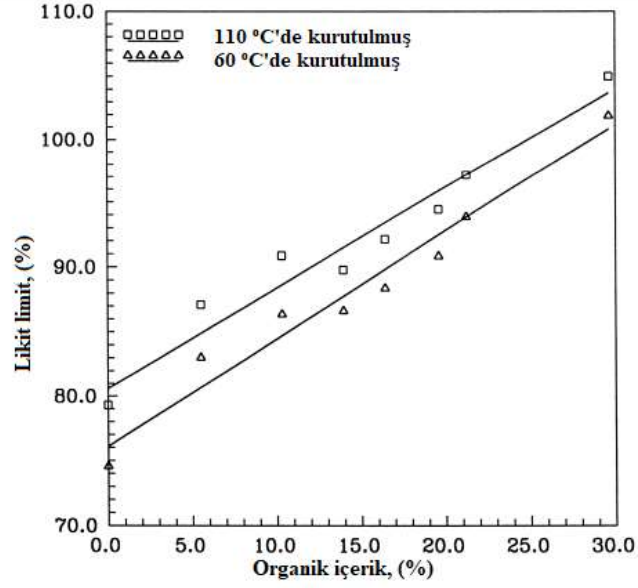
Organik partiküllerin su tutma kapasitesi killere göre oldukça fazladır. Organik zeminlerin kıvam limitlerini etkileyen iki önemli faktör mevcuttur. Birincisi organik içerikten etkilenen su tutma kapasitesindeki artış, ikincisi ise organik madde kaynaklı agregasyondur. Birinci faktör kıvam limitlerini arttırma eğilimdeyken ikinci faktör partiküllerin toplam yüzey alanını azalttığı için kıvam limitlerini azaltma eğilimindedir. Her iki faktör de zeminin organik içeriğine bağlıdır [18].

Başka bir çalışmada Malkawi ve arkadaşları (1999), Hollanda'nın Nevama firmasından temin ettikleri organik zemin üzerinde deneyler yapmışlardır. Bu çalışmada zemin içerisindeki organik madde miktarının zeminin fiziksel özellikleri olan likit limit, plastik limit, plastisite indisi ve serbest basınç dayanımı gibi faktörlere olan etkisini incelemişlerdir.

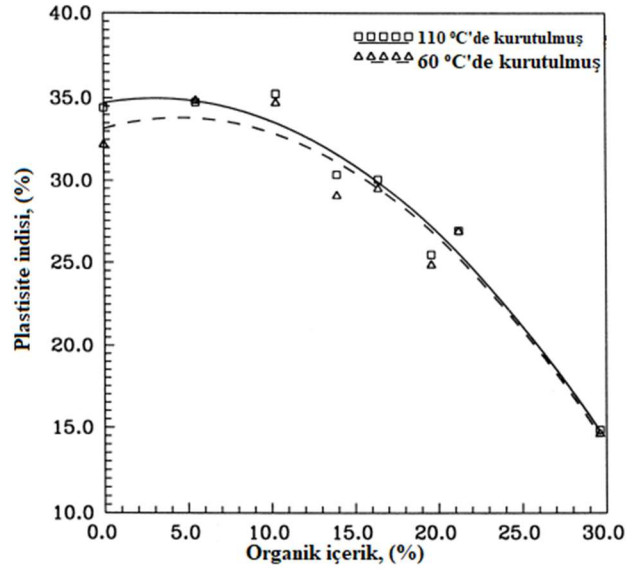
Plastik limitin organik içeriğe bağlı değişimi Şekil 2.4'te, likit limitin organik içeriğe bağlı değişimi Şekil 2.5'de ve plastisite indisinin organik içeriğe bağlı değişimi Şekil 2.6'da verilmiştir. Zemin numuneleri iki farklı sıcaklıkta (110 °C ve 60 °C) kurutulmuştur. İki farklı sıcaklıkta eşit süre boyunca kurutulmuş zemin bünyesinden ayrılan serbest su miktarı farklı olduğundan grafiklerde değerlerin kurutulma sıcaklığından da etkilendiği gözlenmektedir [18].



Şekil 2.4 : Plastik limit ile organik içerik arasındaki ilişkiyi gösteren grafik [18].



Şekil 2.5 : Likit limit ile organik içerik arasındaki ilişkiyi gösteren grafik [18].



Şekil 2.6 : Plastisite indisi ile organik içerik arasındaki ilişkiyi gösteren grafik [18].

Zeminin organik içeriğinin %20 olduğu düzeyde plastik ve likit limitin miktarında sırasıyla %50 ve %20 oranlarında artış gözlenmektedir. Plastisite indisinde, %10 organik içeriğe kadar %2,4 artış görülürken, organik içerik %20'ye çıktığında %22 oranında düşüş gözlenmektedir [18].

## 2.2 Organik Zeminlerin Sınıflandırılması

Organik zeminlerin sınıflandırılma işleminde diğer zeminlere kıyasla daha dikkatli olunması gerekmektedir. Bu zeminlerin sınıflandırılmasında tam bir görüş birliği

bulunmamaktadır. Farklı disiplinler çeşitli ülkelerde birçok sınıflandırma sistemini kullanmaktadır [19].

Organik zeminlerin sınıflandırılması sadece inşaat mühendisleri tarafından değil, farklı amaçlara yönelik olarak ziraat mühendisleri ve botanistler tarafından da yapılmıştır. İnşaat mühendislerinin oluşturduğu sınıflandırma sistemi mühendislik sınıflandırma sistemi, ziraat mühendislerinin oluşturduğu sınıflandırma sistemi tarımsal sınıflandırma sistemi, botanistlerin oluşturduğu sınıflandırma sistemi botaniksel sınıflandırma sistemi olarak isimlendirilmektedir [20].

Tarımsal sınıflandırma sistemleri Kanada, Avustralya, Yeni Zelanda, Rusya, Danimarka ve İngiltere gibi ülkelerde farklı gruplandırmalar yapılarak oluşturulmuştur. Genellikle zeminin içerdiği organik madde türü ve yapısı dikkate alınarak oluşturulan bu sistemlerde zemin yüzeyine yakın olan kısımdaki zeminler dikkate alınmıştır [20].

Botaniksel sınıflandırma sisteminde turba zeminler, lifli ve taneli olmak üzere iki farklı gruba ayrılarak oluşturulmuş. Burada iki ana sınıflandırma sistemi bulunmaktadır: Radforth Sınıflandırma Sistemi ve The Von Post Sınıflandırma Sistemi. Bu iki sınıflandırma sistemi arasındaki temel fark: The Von Post Sınıflandırma Sistemi bitki yetiştirmeye elverişli bütün organik zeminleri kapsarken, Radforth Sınıflandırma Sistemi sadece turba zeminleri sınıflandırmaktadır [20].

Mühendislik sınıflandırma sisteminde ise dünya genelindeki çeşitli kuruluşların sınıflandırma sistemleri kullanılmaktadır. Bunların en çok kabul görenleri ASTM, AASHTO ve ISO'nun oluşturduğu sınıflandırma sistemleridir. Bu kuruluşların oluşturduğu sınıflandırma sistemleri genellikle zeminlerin kıvam limitlerine ve tane boyutlarına bağlıdır [20].

ASTM, zeminleri Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi (USCS) aracılığıyla tane boyutu dağılımı ve Atterberg limitlerine göre sınıflandırmaktadır. Bu sınıflandırma sistemi zeminleri ince taneli ve iri taneli olarak iki grupta incelemektedir. ASTM 2487'ye göre zeminin %50'sinden daha az miktarı 0,075 mm'den (#200 elek) küçük ise iri taneli, %50 ve daha fazla miktarı 0,075 mm'den fazla ise ince taneli zemin olarak isimlendirilmektedir [21]. Organik zeminler ince taneli zeminlerin alt grubunda yer almaktadır. Zeminin etüvde kurutulmuş haldeki likit limit değerinin, kurutulmamış haldeki likit limit değerine oranı 0,75'den küçük ise zemin organik olarak

isimlendirilir. Bu durum sağlanmadığında zemin inorganiktir ve plastisite kartındaki konumuna göre silt yada kil olarak isimlendirilir [20].

ASTM sınıflandırma sistemine göre yüksek miktarda organik madde içeren zeminler turba olarak isimlendirilmektedir. Bu zeminler isimlendirilirken belirli deneylerden ziyade içerisindeki organik maddenin yaygınlığına, zeminin kokusuna ve rengine dikkat edilmektedir [20].

ASTM D2487'ye göre zeminler grup isimlerine ve grup sembollerine göre ayrılmaktadır. Bu gruplar Çizelge 2.3'de gösterilmiştir [21]. Organik zeminlerde grup sembolleri iki harfle gösterilmektedir. Birinci harf her zaman organik zemini sembolize eden 'O' harfidir. İkinci harf ise zeminin LL değerine göre değişmektedir. Eğer zeminin LL değeri %50'den küçük ise düşük plastisiteyi sembolize eden 'L' harfi, LL değeri %50'ye eşit veya daha fazla ise yüksek plastisiteyi sembolize eden 'H' harfi ikinci harf olmaktadır. Dikkat edilmesi gereken buradaki harfler zeminin kil veya silt olduğunu göstermez [20].

Başka bir ASTM standardı olan ASTM D4427-18 turba zeminleri daha detaylı olarak gruplandırmaktadır. Bu standart turba zeminleri içerdikleri lif ve kül miktarına göre, asitlik derecesine göre ve su tutma kapasitelerine göre gruplandırmaktadır [6]. Zemin %67'den fazla lif bulunduruyorsa fibrik, %33 ile %67 arasında lif bulunduruyorsa hemik, %33'den daha az lif bulunduruyorsa saprik olarak isimlendirilmiştir. Bu gruplara ayırma işlemi Van Post'un belirlediği humuslaşma derecesi gruplarıyla oldukça uyumludur ve H<sub>1</sub>-H<sub>3</sub> grupları fibrik, H<sub>4</sub>-H<sub>6</sub> grupları hemik, H<sub>7</sub>-H<sub>10</sub> saprik olarak belirlenmiştir. Zemin, ASTM D2974'te tanımlanan deney metotlarına göre kül miktarı belirlendiğinde %5'den daha az kül barındırıyor ise düşük kül, %5 ile %15 arasında kül barındırıyor ise orta kül, %15'den fazla kül barındırıyor ise yüksek kül olarak isimlendirilmektedir [7]. ASTM D2976-71'de tanımlanan deney metotlarıyla incelendiğinde belirlenen pH değerine göre gruplandırma yapıldığında zeminler dört gruba ayrılmaktadır [22]. Zeminin pH değeri 4,5'ten az ise yüksek asidik, 4,5-5,5 arasında ise kısmen asidik, 5,5-7 arasında ise düşük asidik ve 7'den fazla ise bazik olarak gruplandırılmaktadır. ASTM D2980-04'te tanımlanan deney metotları aracılığı ile belirlenen su tutma kapasitesi; %1500'den fazla ise aşırı absorban, %800 ile %1500 arasında ise yüksek absorban, %300 ile %800 arasında ise kısmen absorban ve %300'den az ise düşük absorban olarak isimlendirilmektedir [23].

**Çizelge 2.3 : Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi [21].**

Ana Gruplar	Grup Sembolü	Zemin Cinsi	
İri Daneli Zeminler (No 200 Elekten Geçen <%50)	Çakıllar	GW İyi derecelendirilmiş temiz çakıllar, çakıl-kum karışımları	
		GP Kötü derecelendirilmiş temiz çakıllar, çakıl-kum karışımları	
		GM Siltli ve Killi Çakıllar (No 200 elek altı >%12)	
		GC Killi çakıllar, çakıl-kum-kil karışımları	
	Kumlar	SW İyi derecelendirilmiş temiz kumlar, çakıllı kumlar karışımları	
		SP Kötü derecelendirilmiş temiz kumlar, çakıllı kumlar karışımları	
		SM Siltli ve Killi Kumlar (No 200 elek altı >%12)	
	İnce Daneli Zeminler (No 200 Elekten Geçen >%50)	Siltler ve Killer	ML Düşük plastisiteli inorganik siltler ve killi siltler
			CL Düşük plastisiteli inorganik killer ve siltli killer
			OL Düşük plastisiteli inorganik siltler ve siltli killer
Organik Zeminler		MH Yüksek plastisiteli inorganik siltler ve killi siltler	
		CH Yüksek plastisiteli inorganik killer ve siltli killer	
		OH Yüksek plastisiteli inorganik siltler ve killer	
Pt Turba zeminler ve diğer organik zeminler			

AASHTO zeminleri çeşitli ulaşım projelerinde yapıların ihtiyaçlarına uygun olarak sınıflandırmaktadır. AASHTO M 145-91 standardı zeminleri dane boyuna ve Atterberg limitlerine göre A-1 ile A-7 arasında değişen yedi gruba ayırmaktadır [24]. Sekizinci grup olan A-8 yüksek derecede organik olan zeminleri içermektedir ve bu zeminler sınıflandırılırken görsel incelemeler dikkate alınmaktadır [20].

Uluslararası Standardizasyon Kuruluşu (ISO) zeminleri sınıflandırmak için ISO 14688-1 (2002) ve ISO 14688-2 (2004) olmak üzere iki standart oluşturmuştur. Bu

sınıflandırma sisteminde de zeminlerin dane boyutu ve Atterberg limitleri dikkate alınmaktadır. Bu sistemde organik içerek zemin sınıflandırmada dikkate alınan bir başka parametredir ve organik içeriği %2 ile %6 arasında değişen zeminler düşük organik içerikli, %6 ile %20 arasında değişen zeminler orta organik içerikli, %20'den fazla olan zeminler yüksek organik içerikli olarak isimlendirilmektedir [20].



### 3. ENJEKSİYON

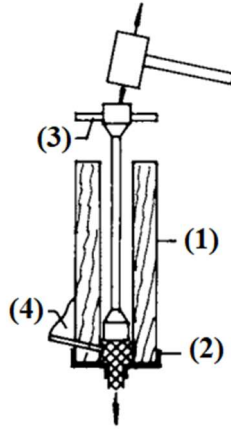
Enjeksiyon, zeminin mühendislik özelliklerini ve/veya davranışını değiştirmek ya da iyileştirmek için akışkan malzemelerin zemine basınç altında enjekte edilmesi olarak tanımlanmaktadır [25].

Enjeksiyonun genel hedefleri, stabiliteyi arttırmak ve permeabiliteyi azaltmak veya kontrol etmektir. Tarihte genellikle iyileştirici bir önlem olarak kullanılsa da enjeksiyonun artık daha geniş bir uygulama yelpazesi vardır. Taşıma kapasitesinin ve mukavemetin artırılması, geçirgenliğin ve/veya yeraltı su akışının azaltılması, kazı destekleme, tünel açma için stabilizasyon ve hatta sıvılaşmanın azaltılması için yoğunlaştırma gibi enjeksiyonla elde edilebilen çeşitli iyileştirme türleri mevcuttur. Zemin tipi, zeminin enjekte edilebilirliği ve porozite gibi sahaya özgü değişkenlere ve ihtiyaçlara bağlı olarak değişen birçok enjeksiyon çeşidi vardır [25].

#### 3.1 Enjeksiyonun Tarihsel Gelişimi

Enjeksiyon yönteminin, inşaat mühendisliğinin tarihi ile kıyaslandığında 200 yıl gibi kısa bir tarihi vardır. Enjeksiyon tekniğinin mucidi Fransız inşaat mühendisi Charles Berigny'dir. 1802'de Dieppe limanının inşası sırasında yeraltı suyu çakıllı zemini aşındırmış ve yapının güvenliğini tehlikeye atmıştır. Berigny oluşan problemleri gidermek için enjeksiyon yöntemini kullanmaya karar vermiştir ve zemine bir metre aralıklarla açtığı kuyulardan kil ve puzolan harcını "darbe pompası" olarak isimlendirdiği alet yardımıyla enjekte etmiştir [3] (Şekil 3.1).

Dieppe limanında kullanılan metot, 1809 yılında yine Dieppe'de başka bir gelgit savağı inşaatında erozyonu önlemek için kullanılmıştır. Dieppe'de erozyonu önlemek için gerçekleştirilen enjeksiyonların başarılı sonuçlanmasından sonra su kireci, kil ve puzolan yerine portland çimentosu enjeksiyonda kullanılmıştır [3].



**Şekil 3.1** : Berigny'nin “darbe pompası” [3].

Şev stabilitesiyle ilgili çalışmalarıyla bilinen Collin, 1838 yılında bir kriko aracılığıyla “darbe pompası” kullanılarak gerçekleştirilen enjeksiyon metodunu geliştirmiştir ve sabit basınç altında gerçekleştirdiği enjeksiyon ile Grosbois Barajı'nın duvarındaki çatlakları doldurmuştur. Bu uygulamadan bir yıl sonra (1839) Beaudemoulin Tours şehrindeki bir köprünün temelini enjeksiyon yöntemini kullanarak güçlendirmiştir [3]. Beaudemoulin bu çalışmadan elde ettiği sonuçlar ile başarılı bir enjeksiyon için temel gereksinimleri belirlemiştir. Bunlar [3];

- Suyun enjeksiyon bulamacından tahliye edilebilmesi için yardımcı delikler açılmalıdır.
- Enjekte edilen yoğun harç su ile karışmamalı ve yavaş priz almalıdır.
- Sabit basınç ile gerçekleştirilen enjeksiyonlar, kullanılan enjeksiyon harcının sertleşmesi için daha faydalıdır.

ABD'de “darbe pompası” adı verilen alet ilk kez 1845'de W.E. Worthen tarafından dolusavak kanalında ve 1854'de kagir yapının güçlendirilmesinde çimento enjekte edilerek kullanılmıştır [3].

Knippel, İngiltere'de 1856-1858 yılları arasında yaptığı deneysel çalışmalarda çatlakları doldurmak ve deniz yapılarında oluşan hasarları gidermek için enjeksiyon yönteminin uygunluğunu kanıtlamayı amaçlamıştır [26]. İngiltere'deki iki barajın alttan sızmalarını engellemek için 1876 ve 1877 yıllarında çimento enjeksiyonu kullanılmıştır [27].

Enjeksiyon, ABD'de 1930'a kadar 19 büyük baraj inşaatında kullanılmıştır ancak enjeksiyon tekniklerinin sistematik gelişimi, 1932-1936 yılları arasında Arizona-Colorado sınırında inşa edilen Hoover barajının kaya temelinde uygulanan

enjeksiyonla başlamıştır. Enjeksiyonun Avrupa'daki gelişimi ABD'deki uygulamalarından bağımsız olarak Fransa'da 1934'de Chavanon barajının temelindeki uygulamayla başlamıştır [3].

Solüsyon türü enjeksiyon malzemelerinin kullanımından önce fisürlü kayalar üzerine uygulanan enjeksiyonda başarı sağlanırken, granüler zeminlerdeki enjeksiyonda problemler yaşanmaya devam edilmektedir. Berigny ve Kinniple granüler zeminlere yaptıkları enjeksiyonda problem yaşamışlar ve tam başarı sağlayamamışlardır. Yaptıkları enjeksiyonda yaşadıkları problem enjeksiyon malzemesindeki büyük partiküllerin zemin taneleri arasındaki akış yollarını tıkaması ve enjeksiyon malzemesinin yayılmasını sınırlandırması nedeniyle ortaya çıkmıştır. Zemin taneleri arasındaki boşlukların tıkanması problemi solüsyon türü enjeksiyon malzemelerinin kullanılmasıyla giderilmiştir. Hollandalı Joosten bir su camı çözeltisini zemine enjekte etmiş ve daha sonra zemin boşluklarında silikat jeli oluşmasına neden olan bir tuz çözeltisini zemine enjekte etmiştir. Böylece zeminin geçirgenliği azalmış ve mukavemeti artmıştır. Daha sonra bu iki çözelti yöntemi yerini zemin içine enjekte edildikten sonra jelleşen tek solüsyonlu enjeksiyonlara bırakmıştır [3].

Geçmişten günümüze zeminlerin mukavemet ve permeabilite gibi özellikleri enjeksiyon yöntemi kullanılarak iyileştirilmektedir. Enjeksiyon yönteminin geliştirilmesi üzerine birçok farklı çalışma yapılmıştır ve günümüzde de yeni enjeksiyon malzemesi bulma, enjeksiyonu daha etkili gerçekleştirebilme üzerine çeşitli çalışmalar yapılmaktadır.

### **3.2 Enjeksiyonun Kullanım Alanları**

Enjeksiyon yöntemi yapılarda karşılaşılan problemleri azaltmak ve zemini iyileştirmek için kullanılmaktadır. Son yıllarda enjeksiyonun kullanım alanları oldukça çeşitlenmiştir [28]. Bunlar aşağıda sıralanmıştır [3]:

- Hidroteknik yapıların temelleri altındaki formasyonların geçirgenliğinin azaltılması,
- Temelin erozyondan korunması,
- Ağır yapıların temel altı malzemenin dayanımının artırılması ya da deforme olabilirliğinin azaltılması,

- Kemer barajlarında olduğu gibi farklı yapısal elemanların aralarına enjeksiyon malzemesi enjekte ederek birbirine bağlanması,
- Prekast ve öngermeli beton yapılarda güçlendirme kablolarının sabitlenmesi,
- Öngermeli ankrajların kayaya sabitlenmesi,
- Eğimli yapıların kaldırılması ve dikleştirilmesi,
- Tünel kaplamaları ve zemin arasındaki boşlukların doldurulması,
- Eski binalardaki hasarlı duvarların güçlendirilmesi,
- Ve bunlar gibi birçok farklı amaca yönelik kullanımı mevcuttur.

### **3.3 Enjeksiyon Türleri**

İlk olarak sadece bir enjeksiyon yöntemi kullanılmıştır. Kullanılan bu yöntem de zemin içindeki boşlukları doldurarak yeraltı suyunu kontrol etmeyi ya da sızıntıyı engellemeyi amaçlayan permeasyon enjeksiyonu yöntemidir ancak artık zeminin güçlendirilmesi ve mukavemetin artırılmasını amaçlayan pek çok çalışma mevcuttur. Daha farklı ihtiyaçları karşılayabilmek için çeşitli enjeksiyon yöntemleri geliştirilmiştir [29].

#### **3.3.1 Kullanılan malzeme açısından enjeksiyon türleri**

Enjeksiyon yönteminde zeminin özelliklerine ve enjeksiyonun amacına göre değişen birçok malzeme kullanılmıştır. Kullanılan malzeme çimento süspansiyonlarından kimyasal solüsyonlara, reçinelerden bitüm emülsiyonlarına kadar farklılık göstermektedir [3].

En sık kullanılan enjeksiyon malzemesi su ile priz alan çimentodur fakat neredeyse sonsuz çeşitlilikte bağlayıcı ile birlikte kullanılabilen birçok farklı çimento çeşidi vardır. Bunlara ek olarak çok farklı kimyasallardan oluşan solüsyonlar ve reçineler mevcuttur. Dahası, yeraltı suyu hareketinin kontrol edilmesi gibi bazı özel durumlarda çimentolar ile kimyasal solüsyonlar birlikte kullanılabilir [29].

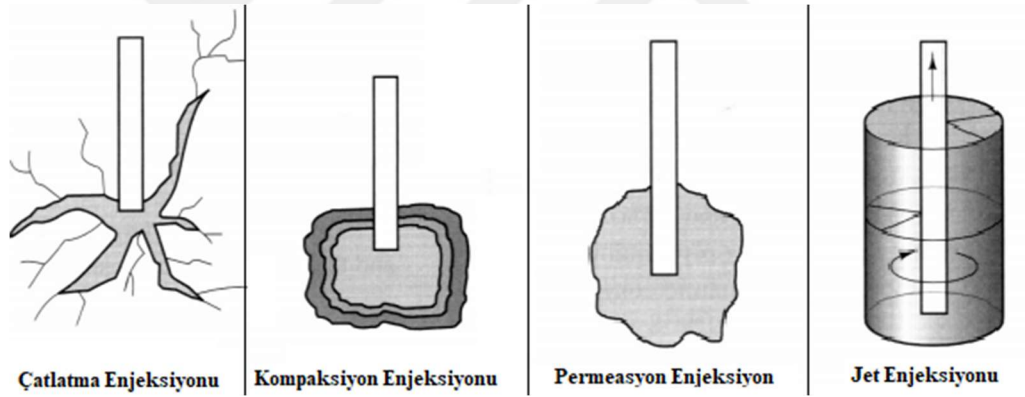
Kullanılan malzeme açısından çimento enjeksiyonları ve kimyasal enjeksiyonlar olmak üzere iki temel enjeksiyon yöntemi vardır. Çimento enjeksiyonları, su ile reaksiyona giren Portland çimentosu kullanılarak enjeksiyon sonrasında zemin içerisinde katı bir kütle oluşturmayı hedeflemektedir. Kimyasal enjeksiyonlar ise

zemin içine enjekte edildikten sonra katılaştıran çok farklı çeşitleri bulunan kimyasallar kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Kimyasal enjeksiyonlar, çimento enjeksiyonlarının etkisiz olduğu bazı uygulamalarda kullanılabilir fakat kimyasal enjeksiyonlar oldukça maliyetli ve hatta bazıları zehirlidir [30].

### 3.3.2 Uygulama yöntemi açısından enjeksiyon türleri

Başarılı bir enjeksiyonun tasarımı, sadece uygun enjeksiyon malzemesinin seçilmesine değil aynı zamanda doğru ekipmanların ve prosedürlerin kullanılmasına da bağlıdır. Uygulanacak enjeksiyonun amacı zeminin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi veya yeraltı suyunun kontrolü olabilmektedir. Enjeksiyon yönteminin seçiminde en önemli faktör uygulanan enjeksiyonla neyin amaçlandığıdır [31].

Uygulama yöntemi açısından yaygın olarak kullanılan dört farklı enjeksiyon yöntemi vardır. Bunlar Şekil 3.2’de gösterildiği gibi çatlatma enjeksiyonu, kompaksiyon enjeksiyonu, permeasyon enjeksiyonu ve jet enjeksiyonudur [32].



Şekil 3.2 : Enjeksiyon çeşitleri [32].

#### 3.3.2.1 Çatlatma enjeksiyonu

Çatlatma enjeksiyonu, yer altındaki çatlaklara ve boşluklara partiküllü akışkan malzemenin basınç altında enjekte edilmesidir. ABD’de yaygın olarak kullanılan bu yöntemin amacı barajların altındaki kayaların geçirgenliğinin azaltılmasıdır. Kullanılan enjeksiyon malzemeleri çimento, kil(bentonit), kum, microfine çimento, uçucu kül, kireç ve sudur [31].

Bu yöntemde enjeksiyon malzemesi basınçla zeminle zemine enjekte edildiği için zemin içinde gerilmeye neden olur ve yeni çatlaklar oluşturur veya mevcut kapalı çatlakların açılmasını sağlar. Enjeksiyon malzemesi çatlakları doldurur ve minimum

direncin olduğu yönde yayılır. Enjeksiyonun devamında zeminin gerilme durumu veya zemin özellikleri değişmiş olabilir ve çatlaklar farklı yönlerde ilerleyebilir. Aşırı konsolide zeminlerde ilk kırılma genellikle yatay yönde gerçekleşir. Enjeksiyon malzemesi ya ilk kırılma ile aynı yönde çatlak üretme eğilimindedir ya da enjekte edilen harç koyulaşır ve mevcut çatlakları büyütür. Hidrolik kırılmalar sonucunda, zemin boyunca enjeksiyon malzemesiyle doldurulmuş çatlaklardan oluşan bir ağ oluşur [4].

Genellikle ince taneli zeminlerde kullanılan çatlatma enjeksiyonu uygulamaları şöyledir [4]:

- Zeminin geçirgenliğinin azaltmak
- Yapıların oturmalarını engellemek
- Oturma yapmış zeminleri iyileştirmek
- Yeraltı çalışmalarının neden olduğu hareketleri önlemek

Teoride oldukça etkili olan bu yöntemin, pratikte çatlakların yönünün ve boyutunun kontrol edilmesinin neredeyse imkansız olması nedeniyle bazı zorlukları vardır. Enjeksiyonun kontrollü bir şekilde yapılması oldukça önemlidir çünkü kontrolsüz şekilde gerçekleştirilen çatlatma enjeksiyonu hem zemine hem de çevredeki yapılara zarar verebilir. Kontrol, delik aralıklarının kısaltılmasıyla birlikte bir delikten çıkacak enjeksiyon malzemesinin sınırlandırılmasıyla sağlanabilmektedir. Çatlatma enjeksiyonu her derinliğe, hemen hemen her zemin cinsinde uygulanabilir, en avantajlı kullanımı diğer enjeksiyon yöntemleriyle iyileştirilemeyen killerdeki uygulamalarıdır [29].

### **3.3.2.2 Kompaksiyon enjeksiyonu**

Kompaksiyon enjeksiyonu, yüksek viskoziteli enjeksiyon harcının yüksek basınç ile zemine enjekte edilmesiyle gerçekleştirilir. Bu yöntemde harç, zemin gözeneklerine nüfuz etmez bunun yerine enjeksiyon borusunun ucunda “harç balonları” oluşturur. Bu uygulama en çok oturmaların iyileştirilmesinde, tünel yapımındaki oturmaların engellenmesinde ve temellerin veya döşemelerin seviyelerinin yeniden ayarlanmasında kullanılır. Bunlara ek olarak obrukların iyileştirilmesinde, mevcut yapıların altındaki sıvılaşma potansiyelinin azaltılmasında ve titreşimle yapılacak iyileştirmelerin kullanılmadığı yerleşim yerlerinde başarıyla kullanılmaktadır [33-35].

Enjeksiyon, birçok iyileştirme yöntemine kıyasla daha maliyetli olsa da, bazı özel durumlar için kompaksiyon enjeksiyonu daha avantajlı olabilmektedir. Örneğin, yoğun tabakaların altında ince, gevşek ve derin zemin tabakalarının olduğu bölgelerdeki yapılarda [25].

Bu yöntemin başarısının temeli, enjeksiyon malzemesinin zemin içinde küresel bir kütle içinde birikmesidir. Gerçekten en önemli avantajı, enjeksiyon malzemesinin biriktiği yerin tam olarak belirlenebilmesidir [29].

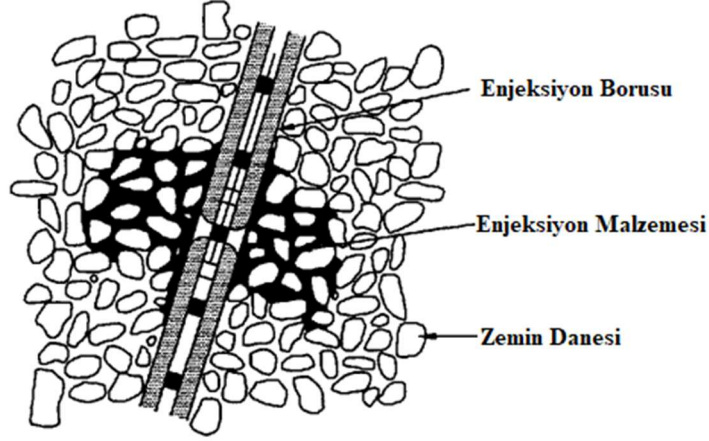
Bütün kompaksiyon enjeksiyonu çalışmaları başarıyla sonuçlanmamaktadır. Birçok durumda sergilenen performans sınır değerlerinin altında kalmaktadır. Başarısızlıkla sonuçlanan her enjeksiyonda hatalar beş ana başlıkta toplanmaktadır [29]:

1. Zeminin iyileştirilmesinde başarısızlık; enjeksiyon malzemesi iyileştirilen bölgenin ağırlığında önemli bir artışa neden olur, bu nedenle iyileştirilmiş zemini taşıyamayacak bölgelerde kompaksiyon enjeksiyonu yapılmaması çok önemlidir.
2. Yanlış enjeksiyon sıralaması; zemin oturmaları genellikle yatay olarak yayılırlar ve bu zemin yüzeyinde çatlaklara neden olur. Bunun gerçekleştiği yerde enjeksiyon her zaman yüzeye en uzak yerde başlamalı ve zemin yüzeyine doğru devam etmelidir. Doğru sıralama ile gerçekleştirilen enjeksiyon sonucunda zemin bu çatlakları kapatmaktadır.
3. Düşük viskoziteye sahip enjeksiyon malzemesi; eğer kompaksiyon enjeksiyonunda viskozitesi düşük harç kullanılırsa tercih edilen yöntem çatlatma enjeksiyonuna dönüşmektedir.
4. Çok hızlı enjeksiyon yapılması; zemin deformasyonu zamana bağlı olarak gerçekleşmektedir. Enjeksiyonu çok hızlı bir şekilde gerçekleşmeye zorlamak, zeminde parçalanmalara ve çatlakların oluşmasına neden olmaktadır.
5. Zemin yüzeyinde aşırı yükselme; enjeksiyon sırasında yüzeyi ve gelişmeleri izlemek, herhangi bir hareket algılandığında enjeksiyonu durdurmak zorunludur.

### **3.3.2.3 Permeasyon enjeksiyonu**

Permeasyon enjeksiyonu, düşük viskoziteli solüsyonların veya süspansiyonların gevşek kum, çakıl gibi zemin türlerinin içerisine zeminin yapısını bozmadan enjeksiyon yapılmasıdır [36].

Bu yöntem en eski ve üzerinde en çok araştırma yapılmış enjeksiyon yöntemidir. Bu yöntemin amacı, Şekil 3.3’de gösterildiği gibi enjeksiyon malzemesinin zemin içerisindeki boşluklara zeminin yapısında bir değişiklik meydana getirmeden enjekte edilmesidir. Zeminin özellikleri, zemin içindeki gözeneklerin geometrisi ve kullanılacak malzeme bu yöntemin en önemli unsurlarıdır [35].



Şekil 3.3 : Permeasyon enjeksiyonu [4].

Bu yöntem zeminin güçlendirilmesi, yeraltı suyu akışını durdurulması veya aynı anda her ikisi için de kullanılmaktadır. Permeasyon enjeksiyonu yöntemi, harcın tüm zemin türlerinde enjekte edilebileceği tek yöntemdir [29].

Permeasyon enjeksiyonu yönteminin uygulama alanları aşağıda verilmiştir [4]:

- Kazılarda su girişinin engellenmesi
- Barajlarda sızıntıların engellenmesi
- Baraj gövde çekirdeklerinin iyileştirilmesi
- Temellerin desteklenmesi
- Zeminlerin mukavemetinin artırılması
- Kazıkların oturma probleminin azaltılması
- Kohezyonsuz zeminlerde yeraltı su seviyesinin altında olan tünel çalışmalarında sık sık kullanılmaktadır.

Başarılı bir permeasyon enjeksiyonu, zemin içindeki boşlukların, zeminin tane boyutu dağılımının ve geçirgenliğin doğru bir şekilde belirlenmesine bağlıdır. Öncelikli olarak enjeksiyon malzemesi en küçük boşluklara nüfuz edecek şekilde tasarlanmalıdır. Genellikle permeasyon enjeksiyonunda bir harç kombinasyonu kullanılmaktadır. Başlangıçta daha büyük boşlukları doldurmak için daha az maliyetli çimento-bentonit

harcı kullanılır ve daha sonra daha küçük boşlukları doldurabilmek için kimyasal enjeksiyon malzemelerinden faydalanılır. Kullanılan harç tipinin veya kombinasyonların seçiminde dikkat edilecek parametreler şöyledir [4]:

- Enjeksiyon malzemesinin viskozitesi
- Enjeksiyon malzemesinin partikül boyutu
- Enjeksiyon malzemesinin vereceği dayanım
- Yeraltı suyunun kimyasal içeriği

Permeasyon enjeksiyonunda en önemli parametre geçirgenliktir ancak enjeksiyon malzemesinin fiziksel ve kimyasal kararlılığı, sahada yapılan incelemenin kapsamı ve kalitesi, kimyasal enjeksiyonun toksisitesi ve çevreye verebileceği hasar, gerekli olan malzemeler ve maliyet gibi faktörler de enjeksiyonun uygulamasında önemli rol oynamaktadır [4]. Çizelge 3.1’de zemin tane boyutuna göre kullanılacak enjeksiyon malzemeleri verilmiştir.

**Çizelge 3.1** : Zemin tane boyutuna göre kullanılacak enjeksiyon malzemeleri [4].

Tane Boyutu	Kullanılacak Enjeksiyon Malzemesi
Gevşek çakıl	Çimento-bentonit süspansiyonu
İri kumlu çakıl	Çok ince taneli çimento süspansiyonu
Kum	Yumuşak jel oluşturan kimyasallar
Belirli seviyede silt içeren zeminler	Permeasyon enjeksiyonu ile tam olarak belirlenmemiştir. Çimento süspansiyonları, silika jeller ve reçinelerin tamamı aynı etkiyle kullanılabilir.

#### 3.3.2.4 Jet enjeksiyonu

İngiltere’de icat edilip Japonya’da geliştirilen jet enjeksiyonu yöntemi, zemin içerisine enjeksiyon malzemesini yüksek basınçla enjekte ederek zeminin doğal yapısının değiştirilmesi ve zemin tanelerinin yeri değiştirilerek zeminin harçla doldurulması işlemidir. Zemin içerisinde birbirinin içine geçen harç kolonları oluşturularak nispeten geçirimsiz yüzeyler elde edilmektedir [4]. Bu yüzeyler;

- Geçirimsizliğin azaltılması, dayanımın artırılması gibi zeminin fiziksel özelliklerini iyileştirmektedir.
- Yeraltı suyu akışını engelleyecek setler oluşturmaktadır [4].

Jet enjeksiyonu yönteminin belirgin avantajları bulunmaktadır. Bunlar [37]:

- Enjeksiyon sırasında yapılacak olan bütün çalışma arazide tamamlanmaktadır.
- Çeşitli geometriye sahip kolonlar oluşturulmaktadır.
- Temellerin desteklenmesinde başarı sağlanmaktadır.
- Tarihi binalar gibi yapılar çok küçük oturmalar ile alttan desteklenmektedir [38].
- Çok problemlili zemin türleri süper jet enjeksiyonu yöntemiyle ekonomik bir şekilde iyileştirilmektedir.

Jet enjeksiyonu yönteminin birçok uygulama alanı vardır. Bunlar dört ana başlıkta belirtilmiştir [39]:

- Yeraltı suyu kontrolü
- Zemin hareketi kontrolü
- Yapıları destekleme
- Çevresel uygulamalar

Yeraltı suyu kontrolü uygulamaları [39]:

- Kazı çalışmalarında su akışını engelleme
- Tünel çalışmalarında yeraltı suyunu kontrol etme
- Baraj gibi su tutma yapılarında sızıntıları önleme
- Zemindeki atık suyu engelleme ya da azaltma olarak açıklanmaktadır.

Zemin hareketi kontrolü uygulamaları [39]:

- Kazı çalışmalarındaki zemin hareketini engelleme
- Tünel inşası sırasındaki zemin stabilitesini destekleme
- Toprak dolgularda ve setlerde güvenliği artırma
- Kazık ya da duvarlarda yatay hareketi engelleme olarak belirtilmektedir.

Yapıları destekleme uygulamaları [39]:

- Kazı ve tünel çalışmalarında yapıların desteklenmesi
- Yetersiz taşıma durumunda zeminin iyileştirilmesi
- Taşıma kapasitesi yetersiz zemin tabakalarına gelen yüklerin daha iyi özelliklere sahip tabakalara aktarılması gibi uygulama örnekleri vardır.

Çevresel uygulamalar [39]:

- Atık su akışına yatay veya dikey bariyer temin etmek

- Geçirgen reaktif bariyerler inşa ederek belirli atıkları işlemek için zemin içerisinde reaktif malzeme karıştırmak gibi uygulamaları bulunmaktadır.

### **3.4 Kimyasal Enjeksiyon**

Kimyasal enjeksiyon, enjeksiyondan önce sıvı olan ancak belirli bir süre sonra katı, yarı katı veya jel haline dönüşen kimyasallar kullanılarak gerçekleştirilen enjeksiyon yöntemidir [40].

İçerisindeki boşlukların çok küçük olduğu zeminlerde, dayanımın artırılması veya yeraltı suyunun kontrolü gibi ihtiyaçların çimento süspansiyonları ile giderilememesi sonucu kimyasal enjeksiyon malzemeleri geliştirilmiştir [40].

Kimyasal enjeksiyon malzemeleri; düşük viskozite, jelleşme sürelerinin kontrol edilebilirliği ve zemin içerisindeki daha küçük boşluklara nüfuz edebilmesi nedeniyle çimento süspansiyonlarına göre daha avantajlıdır. Ancak kimyasal enjeksiyon malzemelerinin daha karmaşık bir teknolojiye sahip olması ve daha maliyetli olması gibi negatif özellikleri de bulunmaktadır [31].

#### **3.4.1 Kimyasal enjeksiyonun tarihi**

İlk kimyasal enjeksiyon, 1886 yılında Jeziorsky tarafından birbirine bitişik iki delginin birine sodyum silikat diğereine reaktant enjekte edilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Lemaire ve Dumont, 1909 yılında seyreltik silikat ve asit çözeltilerini kullanarak gerçekleştirdikleri enjeksiyonla “single-shot” yönteminin patentini almıştır. A. Francois, 1913 yılında sodyum silikat ve alüminyum sülfat solüsyonlarını birlikte enjekte etmiştir. Francois, silikat solüsyonunun çimento enjeksiyonunu kolaylaştırmak için kullanılabileceğini belirtmiş ve sodyum silikatın kayganlaştırıcı olarak davrandığı sonucuna varmıştır. Aslında bu yöntemle, solüsyon enjeksiyonu aracılığıyla zemindeki daha küçük boşlukların doldurulması ve solüsyonun jelleşmesiyle çimento şerbetindeki suyun sızmasının engellenmesi daha muhtemeldir [2].

Lemaire ve Dumont’un 1909 yılında “single-shot” yönteminin patentini almış olmasına rağmen, 1922 yılında Durnerin arazide reaksiyonun gerçekleşmesi için iki tane reaktanta ihtiyaç olduğunu belirtmiştir ancak pratikte bunu başaramamıştır. Bundan üç yıl sonra Hollandalı mühendis Joosten pratikteki problemleri çözmüştür ve zemine yüksek basınçla sodyum silikat ve kalsiyum klorit enjekte etmiştir [27].

İlk kez kullanıldığı yıllar olan 1800'lerin başından 1950'lere kadar uygulanan tüm kimyasal enjeksiyonlar sodyum silikat esaslıdır. Diğer silikat formasyonları Joosten'in çalışmasından sonra geliştirilmiştir. Sodyum bikarbonat, sodyum alüminat, hidroklorik asit ve bakır sülfat 1930 ile 1940 yılları arasında reaktant olarak kullanılmıştır [2].

Yirminci yüzyılın ortalarından itibaren AM-9 ile başlayan kimyasal enjeksiyon uygulamaları silikat esaslı SIROC'un bulunmasıyla devam etmiştir. Yeni ve daha az zararlı malzeme arayışı uzun yıllar sürmüştür. Bu arayışın sonucu olarak 1979'un ortalarında konsantre metil-akrilamid çözeltisi olan Terragel piyasaya çıkmıştır [2].

Kimyasal enjeksiyonun gelişiminde ilk olarak sodyum silikat esas alınmıştır ve tarih boyunca birçok reaktant sodyum silikatla birlikte kullanılmıştır. Kimyasal enjeksiyonun günümüzdeki uygulamalarının büyük bir kısmı halen silikat esaslı kimyasallardan oluşmaktadır.

#### **3.4.2 Kimyasal enjeksiyonda kullanılan malzemeler**

Piyasaya yüzlerce farklı kimyasal malzemesi ortaya çıkmıştır ancak bunlardan sadece bir kısmı piyasada kalıcı olabilmıştır. ABD'de 1970 yılından itibaren uygulanan projelerin yaklaşık %90'ında silikat ve akrilamid esaslı enjeksiyon malzemeleri kullanılmıştır. Belirli aralıklarla piyasaya yeni ürünlerin çıkması beklense de şu an kullanılmakta olan kimyasal enjeksiyon malzemeleri, yeni ürünler büyük bir etki oluşturmadıkça değişmeyecektir [2].

Günümüzde kullanılan enjeksiyon malzemelerini tamamen değiştirmekten ziyade onların toksik etkisinin azaltılması ve maliyetinin düşürülmesi üzerine çalışmalar yapılmaya devam edilmektedir.

Kimyasal enjeksiyon malzemeleri altı başlıkta aşağıda sıralanmıştır [2]:

- Silikatlar
- Akrilamidler
- Linyosülfatlar
- Fenoplastlar
- Aminoplastlar
- Diğer malzemeler

### 3.4.2.1 Silikatlar

Silikat türevleri kimyasal enjeksiyonda en yaygın kullanılan gruptur. Alkali silikatlar ve özellikle sodyum silikat kimyasal enjeksiyonda herhangi bir miktarda kullanılabilen tek silikat türevidir [2].

Sodyum silikat harçları güvenlik ve çevreye verdiği zararın az olması gibi özellikleri nedeniyle en yaygın kullanılan silikat türü enjeksiyon malzemesidir. Sodyum silikat harçlarının hemen hemen hepsi silikat çözeltisinin reaksiyonu sonucunda zemin partiküllerini birbirine bağlamayı veya boşlukları doldurmayı temel almaktadır [40].

Kimyasal formülü  $n\text{SiO}_2 \cdot \text{Na}_2\text{O}$  olan sodyum silikat, piyasada ortalama yoğunluğu  $1,36 \text{ g/cm}^3$  olarak bulunmaktadır. Silika/alkali oranı(n) 3-7 arasında değişmektedir. Bu oran 3-4 arasında ise bazı asit veya asit tuzları eklenerek jelleşebilen enjeksiyon malzemesi elde edilmektedir. Bu amaç için etil asetat ve formamid gibi bazı organik malzemeler kullanılmaktadır [3].

Silika zayıf asit, sodyum silikat ise baziktir. Seyreltik sodyum silikat çözeltisine belirli asit veya asit tuzları karıştırılarak nötrleşme gerçekleştirilmekte ve silikat çökeltilmektedir. Bunun sonucu olarak belirli bir zaman sonra jel oluşmaktadır [2].

Jelleşmenin gerçekleşmesi için gerekli olan zaman kontrol edilebilir ve sodyum silikat ile reaktantın solüsyon içerisindeki miktarına bağlıdır [41]. Reaktantlar organik ya da inorganik olabilirler. Yaygın türler arasında monoesterler, diesterler, triesterler ve aldehitler bulunurken daha nadir kullanılan reaktantlar arasında organik asitler ve esterler bulunmaktadır [42].

Sodyum silikat enjeksiyonları kalıcı bir çözüm olarak görülse de kalıcılığına dair şüphe oluşturan bir şey vardır. Zemine enjekte edilen sodyum silikat çözeltisi zamanla su kusar ve büzülür. Bu olaya sinerez denir ve zamanla azalan bir şekilde gerçekleşir. Toplam sinerez miktarı, kullanılan sodyum silikat oranı arttıkça ve jelleşme süresi kısaldıkça azalmaktadır [2].

### 3.4.2.2 Akrilamidler

Kimyasal enjeksiyon teknolojisinde yeni bir dönem 1951'de AM-9'un ABD'de gerçekleştirilen keşfiyle başlamıştır. Piyasada 1953'den beri kullanılabilen AM-9, ortam sıcaklığında uzun moleküler zincirlere polimerize olabilen iki organik maddenin karışımından oluşan beyaz bir tozdur. Solüsyonların %20'ye kadar katı içerik

bulunduranlarının viskozitesi 2 cP'nin altındadır. Oluşan jel %80-97 oranında su içermektedir ve jel yapısı su altında kararludur [3].

Akrilamid harçlar nemli ortamlarda ya da su altında mukavemeti kaybı yaşamamaktadır. Bu nedenle akrilamid harçlar kalıcı olarak nitelendirilmektedir ancak yeryüzünde doğal olarak bulunmayan birçok alkaline kullanımında, harcın bir kısmı polimerize olsa da su ayrışabilir ve harç su içerisinde çözünebilir. Böyle bir durumda iyileştirilmiş zeminin özellikleri kötü etkilenmektedir. Buna ek olarak, harcın kuru ya da dondurucu dönemlere maruz kalması kimyasal parçalanmaya sebep olmaktadır [2,43]. Bu problem harca gliserin, kalsiyum klorid gibi antifiriz katkı maddeleri eklenerek çözülmektedir [44].

Japonya'da akrilamidin suda toksik etki oluşturduğuna dair birkaç olayın görülmesi üzerine toksik katkı maddesi içermeyen sodyum silikat esaslı harçlar dışında bütün kimyasal enjeksiyon malzemelerinin kullanımı yasaklanmıştır. Akrilamid üretimi ABD'de de 1979 yılında durdurulmuştur [45].

Akrilamidin yerine geçecek daha az toksik madde arayışı sonucunda piyasaya 1980'lerin başında poliakrilamid (I-80) ve akrilit (AC-400) çıkmıştır. Poliakrilamid (I-80) düşük molekül ağırlıklı ve aktif klorid içeren tamamen farklı bir katalizör sistemi kullanan polimer akrilamid çeşididir. Poliakrilamid, viskozitedeki artışa rağmen toksisiteyi ortadan kaldırmaktadır [2,46]. Akrilit (AC-400) ise triethanomil (TEA) ve amonyum persulfat (AP) ile katalize edilmiş akrilit monomerlerinin karışımından meydana gelmektedir. Akrilit harçlar; düşük viskozite, su içerisinde az miktarda çözünebilirlik, mükemmel jelleşme süresi kontrolü ve düşük toksisite gibi avantajlara sahiptir [3,47-48].

AC-400 ve I-80'in çok yüksek maliyeti onları maliyeti daha düşük ve daha fazla alanda kullanılabilen sodyum silikat harçlarla kıyaslanamaz duruma getirmektedir [43].

### **3.4.2.3 Linyosülfatlar**

Linyosülfatlar ağaç işleme endüstrisinin yan ürünlerinden üretilmektedir. Linyosülfat harçlar, linyosülfonat ve katalizörün faaliyet göstermesiyle jelleşmeye başlayan heksavalent krom tuzundan oluşmaktadır. Genellikle kalsiyum sülfat ile sodyum dikromat birlikte kullanılmaktadır. Sodyum, magnezyum ve amonyum linyosülfatlar da piyasada bulunmaktadır. Asidik ortamda krom iyonu linyosülfatı oksitleyerek jelleşmesini sağlamaktadır. Oksitlenmenin asidik ortamda gerçekleşmesinin nedeni

oksidasyon reaksiyonunun sülfürik asit veya kalsiyum klorid gibi asitlere ihtiyaç duymasidir [2,43].

Linyosülfatlar endüstrilerin yan ürünlerinden elde edilmesi nedeniyle düşük maliyete sahiptirler. Düşük maliyetin ek olarak düşük viskozite ve kolaylıkla ayarlanabilen jelleşme süresi gibi avantajları bulunmaktadır. Bu avantajlarına karşın linyosülfatlar çok değişkendir ve kullanılacak her malzeme için dayanım ve jelleşme süresi gibi özelliklerin belirlenmesi adına arazi ve laboratuvar deneylerinin yapılması gerekmektedir. En büyük dezavantajı ise dikromat tuzu ve tüm linyosülfatlarda bulunan benzen türü molekülün sebep olduğu toksisitedir [2,43].

#### **3.4.2.4 Fenoplastlar**

Fenoplastlar fenol ve aldehitin kimyasal reaksiyonu sonucunda oluşmaktadır. Geniş bir pH aralığında yüksek sıcaklık altında meydana gelmektedir. Bu tür ürünler asidik ortama ihtiyaç duyarlar ancak çoğu zemin nötr ya da hafif baziktir. Ortam sıcaklığında asidik ortama ihtiyaç duymayan birkaç tane malzeme bulunmaktadır. Bunlardan biri genellikle formaldehit ile reaksiyona sokulan rezorsinoldür. Bu reaksiyonda asıl görevi pH'ı kontrol etmek olan bir katolizör gereklidir. Genellikle katolizör olarak sodyum hidroksit kullanılmaktadır [2].

Fenoplastlar her zaman fenol, formaldehit ve alkalın içermektedir. Her üç bileşen de insan sağlığı için zararlıdır ve çevreyi kirletme özellikleri vardır. Rezorsinol diğer fenoller kadar zararlı olmayan bir fenol türüdür ancak yine de toksik etkisi bulunmaktadır. Formldehit ise atmosferik konsantrasyonlarda kronik solunum problemlerine neden olabilen tehlikeli bir malzemedir. Sodyum hidroksit de yakıcı bir malzeme olarak bilinmektedir [2].

Bileşenlerin değişmeyen ilişkisi nedeniyle dayanımı fazla olan jel yapıları her zaman kısa jel süreleri ile, düşük dayanım veren jeller ise uzun jelleme süreleri ile elde edilmektedir. Harcın bu özelliği istenmeyen bir durumdur. Jelleşme süresinin kısa olması problemini çözenin yöntemi, fenoplast harcını silika harcı gibi başka bir harc ile birlikte kullanmaktır. Uzun jelleşme süresi problemi ise inhibitör kullanarak çözülebilmektedir. Fenoplastların problemlerine çözüm getirebilecek ticari ürün arayışı 1960'lı yıllarda başlamıştır. Piyasada fenoplastların olumsuz özelliklerini çözüp onlardan faydalanabilmek için Rocagil 3555, Geoseal, Terranier gibi ürünler bulunmaktadır [2].

### 3.4.2.5 Aminoplastlar

Aminoplastlar ana bileşeni üre ve formaldehit olan malzemelerdir. Aminoplastlar da fenoplastlar gibi reaksiyonu tamamlamak için asidik bir ortama ve yüksek sıcaklığa ihtiyaç duymaktadırlar. Bu nedenle enjeksiyon yapılacak zeminde pH'nın yedinin altında olması gerekmektedir [2].

Normal sıcaklıklarda zemini güçlendirecek enjeksiyon malzemesinin elde edilmesinin imkansızlığı nedeniyle, aminoplastların kullanımı sınırlıdır. Ancak yapılan testlerde zeminin aminoplastlardan elde edilen enjeksiyon malzemeleri ile iyileştirilebileceği tespit edilirse, aminoplastlar düşük maliyeti nedeniyle oldukça avantajlıdır [43].

Üre solüsyonları, akrilikler ve fenoplastlar gibi çok düşük viskoziteye sahiptir. Ürenin formaldehit ile reaksiyonu yüksek sıcaklık gerektirmesinin yanında çok hızlı gerçekleşmektedir ve kontrol etmesi zordur. Fakat üre hala su içinde çözülebilir durumdayken reaksiyonda gerçekleşen ara aşamalar bulunmaktadır. Ön-polimerler üre solüsyonlarından daha viskoz bir yapıya sahiptirler ama üretilen malzemeler, harcın 10-20 cP aralığındaki viskoziteyle kullanılmasına izin vermektedir Viskozitedeki bu değişim kolay elde edilebilen ve iyi jelleşme süresine sahip ürünler elde edilmesini sağlamaktadır [2].

### 3.4.2.6 Diğer malzemeler

Su ile reaksiyonu sonucunda jelleşen ya da polimerize olan malzemeler dışında belirli amaçlar için kullanılabilen köpük enjeksiyon malzemeleri de bulunmaktadır. Birçok köpük malzeme enjeksiyon malzemesi olma potansiyeli nedeniyle 1960'lı yılların sonunda araştırılmaya başlanmıştır. Bu araştırmalar sonucunda köpük malzemeler dört ana başlıkta(silikon, fenolik, epoksi ve poliüretan) derlenmiştir [2].

Poliüretanlar, bir poliizosiyonat ile bir poliölün(veya poliester, polieter, glikoller gibi diğer kimyasal malzemelerle) reaksiyona sokulması sonucunda oluşan, en iyi mekanik özelliklere sahip ve en geniş kullanım alanına sahip malzemelerdir [2].

Üretan formülasyonları için 2000'li yıllara kadar çok sayıda gelişme kaydedilmiştir. Bu gelişmelerin neredeyse tamamı Avrupa'da gerçekleşmiştir ve ürünler yaygın olarak kullanılmıştır ancak aynı ürünler ABD piyasasında yer edinememiştir. Üretanlar kullanım sırasında ciddi problemler oluşturmaktadır. Malzeme buharlaştığında yanıcıdır ve solunum sistemine ciddi hasarlar verebilmektedir [2].

### 3.4.3 Kimyasal enjeksiyonun reolojik özellikleri

Piyasada mevcut olarak kullanılan çok sayıda enjeksiyon malzemesi bulunmaktadır. Bu malzemelerin farklı viskozite ve mukavemet özellikleri bulunmaktadır. Enjeksiyon uygulamalarında başarılı olunabilmesi için doğru enjeksiyon malzemesinin seçilmesi ve doğru oranlarda kullanılması oldukça önemlidir. Tercih edilen kimyasalın türüne göre ürünlerin zeminde oluşturduğu permeabilite, mukavemet ve kalıcılık gibi faktörleri değişiklik göstermektedir. Bunların belirlenmesinde ise enjeksiyon malzemesinin reolojik özelliklerinden yararlanılmaktadır. Kimyasal bir enjeksiyon malzemesinin reolojik özellikleri; viskozite, jelleşme süresi, sinerez ve toksisite olarak verilmiştir. Bunların dışında ekonomik faktörlerde kimyasal seçiminde etkilidir [2].

#### 3.4.3.1 Viskozite

Viskozite, moleküller arası sürtünmenin sonucu olarak akışa karşı oluşan direnci ifade etmektedir. Belirli bir sıcaklıktaki kayma gerilmesinin kayma hızına bölünmesiyle belirlenmektedir [29].

Bir katı malzeme, kayma kuvvetine maruz kaldığında deforme olmaktadır ve statik denge durumuna ulaşana kadar iç gerilmeler oluşmaktadır. Malzemenin elastik sınırı içerisinde, iç gerilmeler maruz kalınan kayma kuvvetiyle orantılıdır. Malzemenin statik dengeye ulaşabilme özelliği, sürekli olarak deforme olmaktan ziyade kayma dayanımı adı verilen özelliğinden kaynaklanmaktadır. Akışkan malzemeler bu şekilde kayma dayanımına sahip değildir. Sıvı malzemeler moleküller arası sürtünme nedeniyle deformasyona karşı bir direnç gösterir ancak kayma kuvveti altında süresiz deformasyon gösterir. Kayma kuvvetine karşı direnç gösteren iç gerilme özelliği viskozite olarak tanımlanmaktadır. Sıvı malzemelerin viskozitesi doğrudan belirlenemez. Bunun yerine viskoziteye bağlı bir parametre belirlenmekte ve gerçek değere ulaşmak için belirli bir ilişki kullanılmaktadır [2].

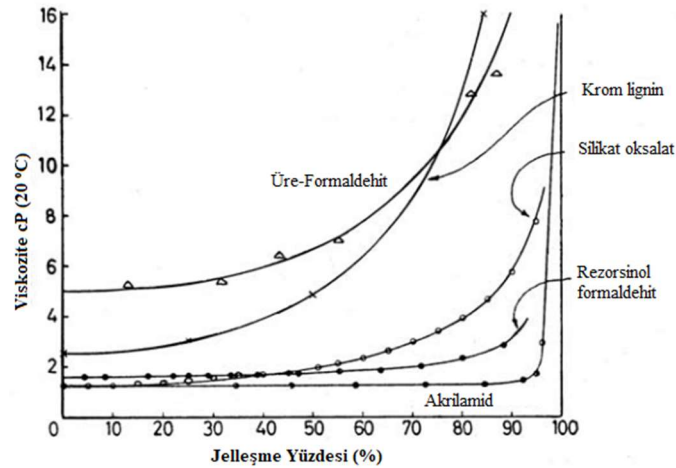
Viskozite, enjeksiyon malzemesinin zemin içindeki boşluklara yerleşme özelliğinin belirlenebilmesi açısından önemlidir. Bu nedenle hidrolik iletkenlik (geçirgenlik) harcın akışkanlığı ile ilişkilendirilmektedir. Genel bir kural olarak hidrolik iletkenliği  $10^{-4}$  cm/sn olan bir zeminde kullanılan enjeksiyon malzemesinin viskozitesi 2 cP'den az olmalıdır. Viskozitesi 5 cP olan enjeksiyon malzemeleri, hidrolik iletkenliği  $10^{-3}$  cm/sn olan zeminlerde, viskozitesi 10 cP olan harçlar ise geçirgenliği  $10^{-2}$  cm/sn olan zeminlerde kullanılmalıdır [40].

### 3.4.3.2 Jelleşme süresi

Jelleşme süresi, harcı oluşturan bileşenlerin ilk karıştırıldığı andan jelin oluşumuna kadar geçen zaman olarak açıklanmaktadır. Jel süresinin kontrolü, malzemenin enjekte edilebilirliği açısından önemlidir. Jel süresi harcın bileşenleri olan aktivatör, inhibitör ve katalizörün bir fonksiyonudur ve bileşenlerin oranını değiştirmek jel süresini değiştirmektedir [40].

Kimyasal enjeksiyon malzemelerinin jelleşme süresi dakikalardan saatlere kadar değişiklik gösterebilmektedir. Jelleşme süresi sıcaklığa bağımlı olarak değişmektedir. Jelleşme süresi geleneksel olarak, kullanılan akışkanların yoğunluğuyla kontrol edilmektedir. Daha yoğun akışkanlarda jelleşme süresi azalmaktadır ancak yeraltı suyunun harcı seyreltmesi gibi durumlarda süre uzamaktadır. Normal şartlarda 45-90 dakika aralığındaki jelleşme süresi karıştırma ve enjeksiyon için yeterlidir. Jelleşme süresinin 30 dakikanın altında olduğu ya da ortam sıcaklığının 30 °C'den yüksek olduğu durumlarda, enjeksiyonda kullanılan malzemelerin zemin içerisindeki yerine kadar karışmasını engelleyen dozaj enjeksiyon sistemleri tercih edilmektedir [49].

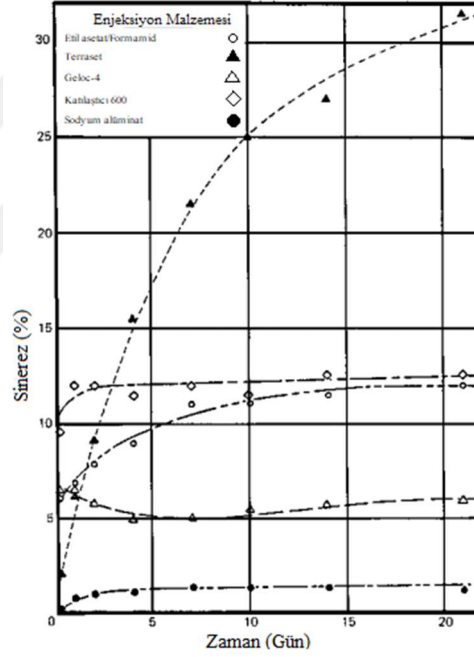
Bazı enjeksiyon malzemeleri için viskozite sabit ilerlerken aniden jelleşme gerçekleşebilirken, bir kısmında jelleşme süresi içinde sürekli viskozite artışı görülmektedir. Şekil 3.4'te rezorsinol formaldehit ve akrilamidlerin sabit viskozite ile ilerlerken aniden jelleştiği gösterilmiştir. Üre-formaldehit ve silikat oksalat gibi kimyasal enjeksiyon malzemelerinin viskozitelerinin zamana bağlı olarak değişim gösterdiği gözlenmiştir. Zaman içerisinde sürekli olarak artış gösteren viskozite nedeniyle bu tür kimyasalların arazide enjeksiyonu bazen mümkün olmamaktadır [2].



Şekil 3.4 : Jelleşme süresi boyunca viskozite değişimi [2].

### 3.4.3.3 Sinerez

Jelleşmesini tamamlayan silika jeli içerisindeki suyu kasmaya başlamakta ve büzülmektedir. Bu hadise sinerez olarak isimlendirilmiştir ve zamanla azalarak gerçekleşmektedir. Toplam sinerez miktarı oluşan jelin özellikleri ile ilişkilidir, genellikle artan silikat miktarıyla ve kısa jelleşme süreleri ile azalmaktadır. Boşlukları tamamen jelleşmiş enjeksiyon malzemesi ile doldurulmuş zeminde gerçekleşen sinerez sonucunda meydana gelen büzülme nedeniyle geçirgenlikte artış olmaktadır [2]. Sinerez genellikle harcın sertleşmesinden sonraki 30-40 günde gerçekleşmektedir. Sinerezin meydana getirdiği etkiler kabul edilebilir olabilmektedir [50]. Şekil 3.5’de bazı enjeksiyon malzemelerinin sinerezlerinin zaman içerisindeki değişimi gösterilmiştir.



Şekil 3.5 : Sinerezin zamanla değişimi [2].

### 3.4.3.4 Toksikite

Kimyasal enjeksiyon malzemelerinin insan sağlığına ve çevreye etkisi oldukça hassas bir konudur ve bu hassasiyet sonucunda bazı malzemelerin kullanımı yasaklanmıştır. Geçmişte kullanılan ve günümüzde halen kullanımda olan ürünler nörotoksik, kanserojen, toksik, aşındırıcı ve son derece tahriş edici gibi sınıflara ayrılmıştır. Malzemelerden olumsuz etkilenen kişiler üzerinde yapılan bir çalışmalarda, zararların genellikle üreticinin tavsiyelerine uyulmamasından kaynaklandığı belirlenmiştir [2].

Toksisite iki açıdan ele alınmaktadır. Bunlar kullanılan kimyasalların insan sağlığına olan etkisi ve çevreye olan etkisidir. Zararlı etkileri olabilecek kimyasallar tercih edildiğinde üreticinin talimatlarına tam anlamıyla uyulmalı ve çalışma alanı temiz tutulmalıdır. Yeraltı suyu yavaş yavaş sızabilir ve kimyasallar yeraltı suyunu kirletebilir [3].

Enjeksiyonda kullanılan ürünler kullanıldıkları ülkelerdeki düzenlemelere tabi olmaktadır. Sonuç olarak, üreticiler herhangi bir tehlike hakkında alınması gereken önlemleri ve kullanım hakkında güvenlik bilgisi sağlamakla yükümlüdür. Bu bilgiler, temel kimyasal ve fiziksel özellikleri, ürünlerin taşınması ve depolanması hakkında alınacak önlemleri belirtmelidir. Ayrıca bu bilgiler patlayıcı, yanıcı, tahriş edici, aşındırıcı gibi olası riskleri belirtmelidir. Her tür olası tehlike standartlarla belirlenmiştir ve ülkeden ülkeye değişiklik gösterebilir. Örneğin; yanıcılık ve patlama riskleri, ürünlerin parlama noktası ve kendiliğinden yanma özelliği ile anlaşılmaktadır [50].

#### **3.4.4 Kimyasal enjeksiyonun penetrasyon özelliği**

Penetrasyon, bir enjeksiyon malzemesinin zemin gözeneklerine nüfuz etme, ince kırıkları veya küçük boşlukları doldurma özelliği olarak tanımlanmaktadır. Penetrasyon, viskozite ve vetabilite kombinasyonuna bağlıdır. Vetabilite, bir sıvının katı bir yüzey ile temas edebilme becerisidir ve yüzey gerilimi olarak tanımlanmaktadır. Solüsyon türü enjeksiyon malzemelerinin viskozite aralığında, vetabilite viskoziteden çok daha önemli ve etkili bir faktördür [29].

Kimyasal enjeksiyon malzemelerinin fiziksel olarak zemine penetre olması veya olamaması enjekte edilebilirlik olarak tanımlanmaktadır. Enjekte edilebilirlik, zemin tanelerinin dağılımı ve boyutu ile solüsyon partiküllerinin boyutuyla ilişkilidir [51].

Kimyasal enjeksiyon malzemelerinin viskozitesine göre zeminin sınır permeabilite değerleri Çizelge 3.2’de verilmiştir. Permeabilite açısından incelendiğinde, akrilamid bazlı malzemeler gibi 2 cP’den daha az viskoziteye sahip enjeksiyon malzemelerinin,  $10^{-4}$  cm/s değerinden daha düşük permeabiliteye sahip zeminlere kolaylıkla enjekte edilebildiği görülmektedir. Kromlignin ve fenoplastlar gibi malzemeler,  $10^{-3}$  cm/s değerinden daha yüksek permeabiliteye sahip zeminlerde 5 cP viskozite değeri ile sınırlandırılmaktadır. Silika bazlı solüsyonlar 10 cP viskozitede,  $k=10^{-2}$  cm/s’den daha düşük zeminlere penetre olmayabilir [2].

**Çizelge 3.2** : Malzemelerinin viskozitesine göre zeminin sınır permeabilite değerleri [3].

Viskozite (cP)	Permeabilite (cm/s)
2	$10^{-4}$
5	$10^{-3}$
10	$10^{-2}$

### 3.4.5 İdeal kimyasal enjeksiyon malzemesi

Yeni bir kimyasal enjeksiyon malzemesi geliştirme araştırmasının hedefleri listelenecek olsaydı, aşağıdaki liste yapılırdı [2]:

- Suda kolaylıkla çözünebilen bir kimyasal olmalıdır.
- Maliyeti düşük olmalı ve kolaylıkla tedarik edilebilen bir malzeme olmalıdır.
- Tüm depolama koşullarına dayanıklı olmalıdır.
- Toksik, aşındırıcı ve patlayıcı olmayan bir malzeme olmalıdır.

Enjeksiyon malzemesinden elde edilen solüsyonun özellikleri aşağıdaki gibi olmalıdır [2]:

- Düşük viskoziteye sahip olmalıdır.
- Tüm normal sıcaklıklara dayanıklı olmalıdır.
- Toksik, aşındırıcı ve patlayıcı olmamalıdır.
- Yeraltı suyunda bulunabilecek minerallere karşı duyarsız olmalıdır.
- Jelleşme süresi kolaylıkla kontrol edilebilir olmalıdır.

En sonda elde edilen ürünün özellikleri ise şöyle olmalıdır [2]:

- Kalıcı bir jel oluşmalıdır.
- Yeraltı suyunda bulunabilen kimyasallara duyarlı olmamalıdır.
- Toksik, aşındırıcı ve patlayıcı olmamalıdır.
- Yüksek mukavemet vermelidir.

İdeal bir kimyasal enjeksiyon malzemesinin özellikleri; kimyasal, fiziksel, biyolojik ve ekonomik faktörler olarak sınıflandırılmaktadır. Elbette özelliklerin tümünü karşılayan bir malzeme bulunmamaktadır ancak listelenen her özellik piyasadaki malzemelerde bulunabilmektedir. Burada önemli olan, yapılacak olan projede hangi

özelliklerin önemli olduğunu belirlemek ve o özelliklere uygun olan malzemeyi seçmektir [2].

Enjeksiyon yapılmış zeminin ekonomik ve fiziksel özellikleri kullanılan malzemeye göre değişiklik göstermektedir. Bu nedenle iki malzeme arasında karşılaştırma yapmak oldukça zordur ve genellikle kesin bir sonuca ulaşılamaz. Ancak birçok faktör göz önüne alınarak yapılan karşılaştırmalar bulunmaktadır ve bu araştırmalar çok kullanışlıdır. Piyasadaki bazı kimyasal malzemelerin özellikleri Çizelge 3.3'de karşılaştırılmıştır [2].

**Çizelge 3.3 : Kimyasal enjeksiyon malzemelerinin özellikleri [2].**

Enjeksiyon Malzemesi		Viskozite	Mukavemet	Toksisite
Silikalar	Joosten Prosesi	Yüksek	Düşük	Yüksek
	Siroc	Orta	Orta	Orta
	Silikat-bikarbonat	Düşük	Düşük	Orta
Akrilamidler	AV-100	Düşük	Yüksek	Düşük
	Rocagel BT	Düşük	Yüksek	Düşük
	Nitto-SS	Düşük	Yüksek	Düşük
Poliakrilamid	Injectite 80	Düşük	Düşük	Yüksek
Linyosülfatlar	Terra Firma	Düşük	Yüksek	Orta
	Blox-all	Düşük	Yüksek	Orta
Fenoplastlar	Terranier	Düşük	Orta	Orta
	Geoseal	Düşük	Orta	Orta
Aminoplastlar	Herculox	Yüksek	Orta	Orta
	Cyanalog	Yüksek	Orta	Orta
Akrilit	AC-400	Düşük	Düşük	Düşük
Poliüretan	CR-250	Yüksek	Yüksek	Yüksek

#### 3.4.6 Literatür özeti

Literatürde enjeksiyon yapılan birçok çalışma mevcuttur. Çeşitli zemin türlerine yapılan enjeksiyon çalışmalardan bazıları aşağıda verilmiştir.

- Warner (1972), yaptığı çalışmada 2500 adet numuneye yapılan deneyler sonucunda enjeksiyon yapılan numunelerin mukavemetinin arttığını tespit

etmiştir. Clough vd. (1979) ve Diefenthal vd. (1979), yaptıkları çalışmalarda silikat enjeksiyonun kum numuneler üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Kaga, M. ve Yonekura (1991) ve Ata ve Vipulanandan (1998) ise silikat enjeksiyonu sonrası kumların mukavemetinin arttığından bahsetmişlerdir [52-56].

- Anagnostopoulos, 2005 yılında yaptığı çalışmada kohezyonsuz zeminlere polimer enjeksiyonu uygulamıştır ve bu yöntemin ince ve orta kumlarda başarılı olduğu belirlenmiştir [57].
- Mollamahmutoğlu ve Yıldız (2006), yaptıkları çalışmada ince ve orta kum malzemelerine koloidal silika enjekte etmişlerdir ve başarı sağlanan numunelerin dinamik yükler altında davranışını incelemiştir. Numunelerin dinamik yükler etkisindeki mukavemetinin fazla olduğunu belirlemiştir [58].
- Holmboe vd. (2011), silika sol kolloidlerin enjeksiyonunun bentonit üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmanın sonucunda, bentonit ve montmorillonit partiküllerinin doğru oranda silika sol ile karıştırıldığında dehidrasyon ve yüksek iyonik etki sayesinde modifiye edilebileceği belirlenmiştir [59].
- Porcino vd. (2015), yaptıkları çalışmada silikat solüsyonlarını kullanarak gerçekleştirdikleri enjeksiyon ile kum numunelerin mukavemet ve geçirgenlik gibi özelliklerini iyileştirmeyi hedeflemiştir. Enjeksiyonun sonucunda, daha yüksek mukavemet, daha yüksek başlangıç kayma modülü ve daha düşük geçirgenlik elde edilmiştir [60].
- Mollamahmutoğlu ve Avcı (2016), farklı gradasyon ve yoğunluklara sahip sodyum silikat solüsyonu enjekte edilmiş kum numunelerin geçirgenliklerini araştırmışlardır. Sodyum silikat enjeksiyonunun çeşitli derecelerdeki kum numunelerinin geçirgenliğini azalttığı belirtilmiştir [61].
- Avcı ve Mollamahmutoğlu (2019), sinerezin hem sodyum silikat-formamid hem de sodyum silikat-glioksal harçlı kumların kayma dayanımı parametreleri üzerindeki etkisini, hem su tankında hem de açıkta bekletilmiş koşullar altında araştırılmışlardır. Sinerezin etkisiyle, su tankında bekletilen numunelerin zamanla kayma dayanımı parametrelerinin azaldığı ancak açıkta bekletilen numunelerin kayma dayanımı parametrelerinin arttığı gözlenmiştir [62].

Literatürde organik zeminler üzerinde enjeksiyon yapılan herhangi bir çalışma tespit edilememiştir. Aşağıda literatürde organik zeminlerin iyileştirilmesi üzerine yapılan çalışmalardan bazıları verilmiştir.

- A. Arman ve George A. Munfakh (1970), yaptıkları çalışmada içerisinde %20'den fazla organik madde olan Louisiana zemininin kireç kullanılarak yapılan stabilizasyon ile mühendislik özelliklerinin iyileştirilebildiğinden bahsetmişlerdir [63].
- Kazemian S. vd. (2010), sodyum silikat, çimento ve kalsiyum klorürün tropikal organik zeminlerin iyileştirilmesine etkisini araştırmışlardır. Çimento ve sodyum silikatın (belirli oranlarda) kesme dayanımına oldukça etkili olduğunu ve kalsiyum klorür miktarının artmasıyla da kesme dayanımının ve nem içeriğinin kararsız bir hal aldığını belirtmişlerdir [64].
- Tastan E. vd. (2011), organik zeminlerin stabilizasyonunda kullanılan uçucu külün miktarının artmasıyla iyileştirmenin verimliliğinin de arttığını göstermişlerdir [65].
- Kazemian S. vd. (2011), kalsiyum klorür ve kaolinit ilave edilmiş çimento-sodyum silikat karışımlarının sabrik turba üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Yapılan çalışma sonucunda kaolinitin kesme dayanımını arttırmada ve su içeriğini azalmanda önemli bir etkiye sahip olduğunu, kalsiyum klorürün ise kesme dayanımına pozitif etki gösterirken eklenen malzeme miktarının belli bir seviyenin üzerine çıkmasıyla negatif etki göstermeye başladığını belirtmişlerdir [66].
- Moayedi H. vd. (2012), organik zeminlerin stabilizasyonunda sodyum silikat ile birlikte reaktant olarak alüminyum sülfat ve kalsiyum klorür kullanmışlardır. Yüksek oranlarda alüminyum sülfat kullanımının önemli bir etki göstermediğini belirtmişlerdir [67].
- Thamer N. vd. (2015), kalsiyum klorür, formamid ve alüminyum klorürün çimento-sodyum silikat karışımına dahil edilmesinin turba zeminlerin stabilizasyonuna etkisini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda formamid ve alüminyum klorür yüzdesinin artmasının dayanımı arttırdığı gözlemlenmiştir [68].

## 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 4.1 Giriş

Bu deneysel çalışmanın amacı; Bilecik ili, Söğüt ilçesinden alınan organik zemin numunelerinin farklı oranlarda hazırlanan sodyum silikat-borik asit solüsyonları kullanılarak enjekte edilebilirliğini test etmek ve başarı sağlanan numunelerin mühendislik özelliklerini belirlemektir. Çalışmanın ilk bölümünde farklı oranlarda hazırlanan sodyum silikat-borik asit solüsyonlarının reolojik özellikleri (jelleşme süresi, sinerez ve viskozite) belirlenmiştir. Solüsyonların içerisinde en iyi reolojik özelliklere sahip dört oran enjeksiyonda kullanılmak üzere seçilmiştir ve solüsyonların organik zemine enjekte edilebilirliği incelenmiştir. İkinci bölümünde ise enjeksiyonda başarı sağlanan numuneler farklı kür koşullarında bekletilmiş ve bu numunelerle serbest basınç dayanımı ve permeabilite deneyleri yapılmıştır.

Çalışmanın tamamında deneyler Bursa Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Laboratuvarında yapılmıştır. Yapılan bütün deneyler ASTM ve TS' ye göre gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar aşamaları aşağıda verilmiştir:

- Deneylerde kullanılacak sodyum silikat, reaktant(borik asit) ve organik zemin temin edilmiştir.
- Farklı karışım oranlarında hazırlanmış sodyum silikat-borik asit karışımlarının reolojik özellikleri (jelleşme süresi, sinerez, viskozite) belirlenmiştir.
- Reolojik özellik belirleme deneyleri sonrası enjeksiyonda kullanılacak en uygun karışım oranları belirlenmiştir.
- Deneylerde kullanılacak olan organik zeminin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi amacıyla organik zemin üzerinde doğal su içeriğinin belirlenmesi, özgül ağırlık, dane çapı dağılım eğrisi, Atterberg limitleri, organik madde tayini, standart proctor deneyi, serbest basınç deneyi ve permeabilite deneyleri yapılmıştır.
- Enjeksiyon deneylerinde kullanılan düzeneğin tasarımı Prof. Dr. Murat

MOLLAMAHMUTOĞLU tarafından yapılmıştır. Numuneleri sabit rölatif sıkılıkta hazırlamak için titreşimli tokmak kullanılmıştır. Organik zemin malzemesine daha önce belirlenen dört farklı solüsyonla enjeksiyon yapılmış ve moldlara yerleştirilmiştir.

- Enjeksiyonu tamamlanan numuneler moldlardan çıkarılıp açıkta, streçte ve kür tankında olmak üzere üç farklı kür koşullarında bekletilmiştir ve numunelere 3., 7., 14., 28., 56. ve 90. günlerde serbest basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır.
- Enjeksiyon deneyleri tamamlanan numuneler moldlardan çıkarılmadan düşen seviyeli permeabilite deney düzeneğine yerleştirilmiştir ve numunelerin geçirgenlik katsayıları belirlenmiştir.

#### 4.2 Enjeksiyon Deneylerinde Kullanılan Organik Zeminin Özellikleri

Bilecik ili, Söğüt ilçesinden temin edilen zeminin özelliklerini belirlemek amacıyla Bursa Teknik Üniversitesi Geoteknik Laboratuvarına getirilmiştir. Laboratuvara getirilen zeminin homojen dağılması hedeflenerek zemin üzerinde yarılama işlemi yapılmıştır (Şekil 4.1). Yarılama işleminin yapılmasında amaç, deneylerde kullanılacak zemin numunelerinin bütün zemini yansıtacak özellikte olmasını sağlamaktır. Burada zeminin ihtiyaç duyulan özelliklerini belirlemek için örselenmiş zemin numuneleri üzerinde çeşitli deneyler yapılmıştır. Bu deneylerin yapılması işlemi ve deneyler sonucunda elde edilen veriler bu bölümde gösterilmiştir.



Şekil 4.1 : Yarılama işlemi.

#### 4.2.1 Su içeriğinin belirlenmesi

Zemin içerisindeki su miktarının belirlenmesi hedeflenmektedir. Zeminin su içeriği (w) kuru zemin ağırlığının yüzdesi olarak hesaplanır. Zemin üzerinde yapılan deneyler arasında en sık yapılan ve uygulaması en kolay olan deneylerden bir tanesidir. Bu deneyde zemin numunesinin içerdiği su ağırlığının, aynı zemin numunesinin kuru ağırlığına oranı yüzde olarak belirlenmektedir. Deneylerde etüvde kurutma yöntemi tercih edilmiştir. Deneyler, ASTM D2216-19 ve TS 1900-1 standartlarında belirtilen hususlar dikkate alınarak yapılmıştır [69,70].

İlk olarak deneyde kullanılacak olan kaplar temizlenip kurulandıktan sonra 0,01 g hassasiyetle ölçüm yapabilen terazide tartılır. Bu aşamadan sonra yeterli miktarda organik zemin, numune kabına koyulur ve tekrar tartılır. Bu tartım sonuçları deney föyüne kaydedilir. Numune kabına koyulan organik zemin (80±5) °C sıcaklıktaki etüvde 24 saat boyunca ağzı açık bir şekilde bekletilir. Zeminin 80 °C'de kurutulmasının sebebi zeminin organik madde içermesidir. Kumlu, çakıllı zeminler 110 °C'de kurutulurken organik zeminler ayrışmayı engellemek için daha düşük sıcaklarda kurutulur. Etüvde 24 saat boyunca bekletilen zemin numunesi etüvden çıkarılarak desikatöre koyulur ve soğuması beklenir. Sıcaklığı oda sıcaklığına düşen zemin numunesi tartılır. Ölçümler arasındaki fark % 0,1 olunca numunenin değişmez ağırlığa ulaştığı kabul edilir. Numune değişmez ağırlığa ulaşmışsa en az iki saat daha kurutma işlemi tekrar edilir. Zeminin su içeriğinin belirlenmesi Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2 : Organik zeminin su içeriğinin belirlenmesi.

#### 4.2.2 Özgül ağırlık

Özgül ağırlık, zeminin dane birim hacim ağırlığının suyun 20 °C sıcaklıktaki birim hacim ağırlığına oranıdır. Özgül ağırlık  $G_s$  sembolü ile gösterilir ve boyutsuzdur. Bu çalışmada organik zeminin özgül ağırlığının tespiti ASTM D854-14 standardına uygun olarak yapılmıştır [71].

Deneyde ilk olarak piknometre ağırlığı ( $M_1$ ) tartılır. Piknometrenin tamamı havası alınmış saf su ile doldurulur ve tartılır ( $M_2$ ). Daha sonra piknometre içerisine yaklaşık 100 g malzeme konulur ve tekrar tartılır ( $M_3$ ). Özgül ağırlığın tespitinde kullanılacak zemin numuneleri #4 nolu eleğin altında kalan kısımdan seçilir. Piknometre içerisine yarısını dolduracak kadar saf su eklenir. Saf su ve zemin numunesinin içerisinde hava kabarcıkları kalmaması için vakum pompası ile iki saat boyunca vakuma tabi tutulur. Vakumlama işleminden sonra piknometrenin tamamı saf su ile doldurulur, kapağı kapatılır ve tartılır ( $M_4$ ). Belirlenen tüm ağırlıklar Denklem 4.1’de yerleştirilerek hesaplama yapılır.

$$G_s = \frac{M_3 - M_1}{[(M_2 - M_1) - (M_4 - M_3)]} \times \frac{\gamma_L}{\gamma_{su}} \quad (4.1)$$

Yukarıdaki formülde;

$M_1$  = piknometre kütlesi, g

$M_2$  = piknometre+su kütlesi, g

$M_3$  = piknometre+kuru zemin kütlesi, g

$M_4$  = piknometre+kuru zemin kütlesi +su, g

$\gamma_L$  = deneyde kullanılan sıvının yoğunluğu, g/cm<sup>3</sup>

$\gamma_{su}$  = saf suyun yoğunluğu, g/cm<sup>3</sup>

Şekil 4.3’te piknometreye yerleştirilen zemin numuneleri ve Şekil 4.4’te zeminin vakum ile havasının alınması işlemi gösterilmiştir.



**Şekil 4.3 :** Piknometreye yerleştirilen zemin numuneleri.



**Şekil 4.4 :** Vakum ile hava alma işlemi.

ASTM D854-14 standardına göre yürütülen özgül ağırlık deneyi için altı adet numune üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Deneyler sonunda hesaplanan özgül ağırlıkların

ortalaması hesaplanarak ( $G_s$ ) 2,31 olarak belirlenmiştir. Deney verileri Çizelge 4.1’de gösterilmiştir.

**Çizelge 4.1 : Özgül ağırlık deney verileri.**

Piknometre No	Sıcaklık, t (°C)	Pik. Kütlesi, $M_1$ (g)	Pik.+su kütlesi, $M_2$ (g)	Pik.+kuru zemin kütlesi, $M_3$ (g)	Pik.+kuru zemin kütlesi+su, $M_4$ (g)	$G_s$	$G_s$ Ortalama
1	20	150,36	675,49	250,28	731,73	2,29	2,31
5	20	157,08	674,87	257,06	731,41	2,30	
6	20	147,18	672,47	247,15	729,21	2,31	
7	20	156,91	677,06	256,91	734,16	2,33	
8	20	146,47	672,88	246,47	729,47	2,30	
9	20	148,75	674,78	248,73	731,79	2,33	

#### 4.2.3 Dane çapı dağılım eğrisi

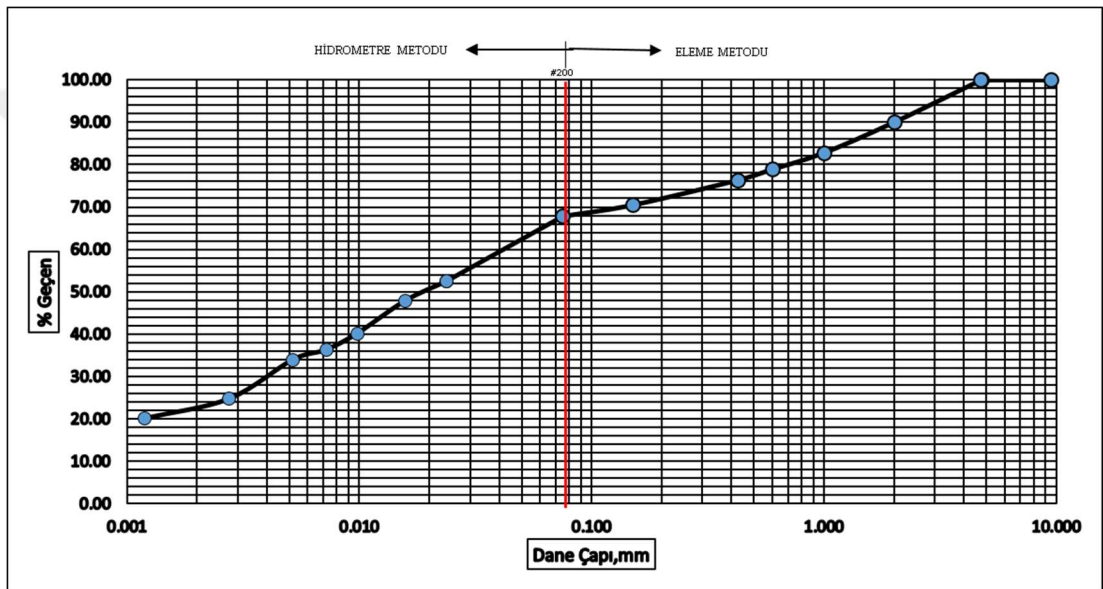
Organik zeminin dane çapı dağılım eğrisi ASTM D422-63 standardına uygun olarak yapılmıştır [72]. Deneyler elek analizi ve hidrometre deneyi olmak üzere iki aşamada yürütülmüştür. Hidrometre deneyinin bazı aşamaları Şekil 4.5’te gösterilmiştir.



**Şekil 4.5 : Elek analizi ve hidrometre deneyi aşamaları.**

Deneyde kullanılacak malzeme çeyrekleme metodu ile istenilen miktara kadar düşürülür. Malzeme #10 nolu elekten elendikten sonra 80 °C etüvde 24 saat boyunca kurutulmuştur. Bir litre suya 40 gram sodyum hekza meta fosfat karıştırılarak solüsyon hazırlanmıştır. Etüvden çıkarılan malzemeye hazırlanan solüsyondan 125 ml

karıştırılarak 24 saat boyunca bekletilmiştir. Daha sonra malzeme hiç kayıp yaşanmadan mikser yardımıyla karıştırılmıştır. Karışım, 152H tipi hidrometreye alınarak üzerine 1000 ml olacak şekilde 20 °C saf su eklenmiştir ve karıştırılmıştır. Karıştırmayla birlikte süre başlatılmıştır ve 2-5-15-30-60-250-1440 dakikalarda ölçümler kaydedilmiştir. Daha sonra malzemeye #200 nolu ve #40 nolu eleklerde yıkamalı eleme yapılmıştır. Eleklerin üzerinde kalan malzemeler hiç numune kaybı yaşanmadan 24 saat boyunca 80°C etüvde bekletilmiştir. Etüvden çıkarılan malzemenin kütleleri ölçülüp gerekli hesaplamalar yapılmıştır. Hesaplamalar sonucunda dane çapı dağılım eğrisi çizilmiştir ve Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.6 : Dane çapı dağılım eğrisi.

#### 4.2.4 Atterberg limitleri

Zeminlerin çeşitli su içeriklerinde gösterdikleri davranışlar farklılık göstermektedir. Atterberg limitleri de zeminlerin bu davranışlarının anlaşılabilmesi ve sınıflandırılabilmesi açısından oldukça önemlidir. Bu çalışmada organik zeminin Atterberg limitlerinin belirlenmesi için yapılan deneyler ASTM D4318 standardına uygun olarak yürütülmüştür [73].

Organik zemin numunesinin likit limit değerini bulmak amacıyla Casagrande likit limit deneyi (5 nokta) yapılmıştır. Bu deneyde kullanılacak malzeme #40 nolu elekten elenir ve 200 g olacak şekilde tartılır. Malzemeye likit limit seviyesinden daha az miktarda su verilir ve kapalı bir kaptan 24 saat boyunca bekletilir. Bu süre boyunca suyun malzemeye homojen olarak dağılması beklenmektedir. Süre sonunda

malzemeden ceviz büyüklüğünde bir parça alınır ve plastik limit deneyi yapmak üzere ayırılır. Hazırlanan malzemeden gerekli miktarda Casagrande deney cihazına alınır ve bir yarık açılır (Şekil 4.7). Açılan yarığın saniyede iki düşüş yapılarak 10-50 vuruş arasında kapanması beklenir. Her defasında bir miktar daha su eklenerek deney beş tekrar halinde yapılır. Her tekrarın sonunda kap+yaş numune kütleleri kaydedilir ve numuneler 80 °C etüvde 24 saat boyunca bekletilir. Daha sonra kap+kuru numune kütleleri tartılır ve numunelerin su içerikleri hesaplanır. Hesaplamalar sonucunda oluşturulan grafik kullanılarak 25 vuruşa karşılık gelen su içeriği bulunur ve bu içerik likit limit değeridir.

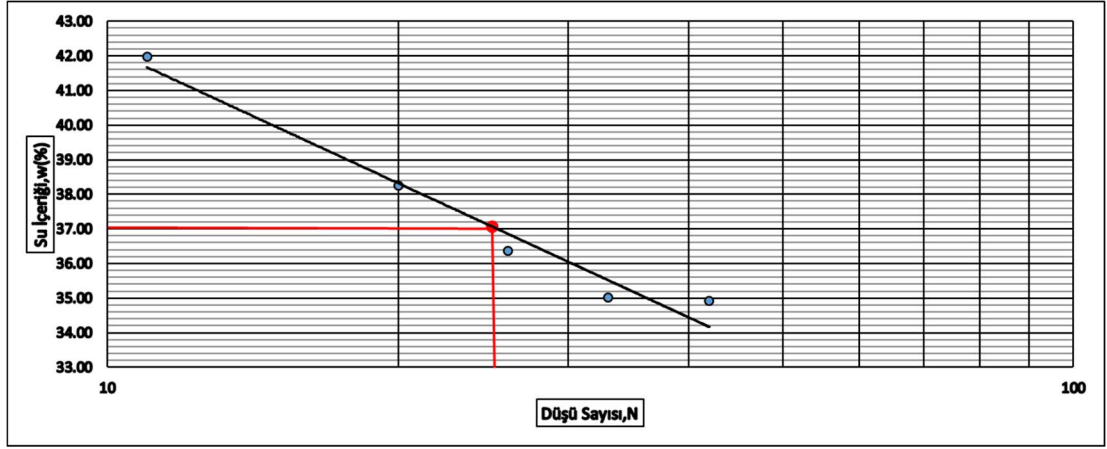


**Şekil 4.7 :** Casagrande deney cihazıyla likit limit deneyinin yapılması.

Plastik limit değeri belirlenirken ise en başta alınan ceviz büyüklüğünde numune düz ve temiz bir yüzey üzerinde elin iç kısmıyla veya parmakla yuvarlanır. Burada amaç numuneye el ısıyla su kaybettirmektir. Yuvarlanan numune 0,3 cm kalınlığında bir silindir şeklini aldığı anda üzerinde kırılmalar veya çatlamlar oluşuyorsa malzeme plastik limit değerine ulaşmıştır. Plastik limit değerine ulaşan malzeme bir kaba alınır ve kap+yaş kütlesi belirlenir. Daha sonra 80 °C etüvde 24 saat boyunca bekletilen numunenin kap+kuru kütlesi belirlenir ve su içeriği hesaplanır.

Yapılan deneyler sonucunda organik zemin malzemesinin likit limit değerinin belirlenmesi için Casagrande 5 nokta yöntemine göre çizilen grafik Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Likit limit ve plastik limit değerlerine bağlı olarak hesaplanan plastisite indisi de belirlenmiş ve Çizelge 4.2’de gösterilmiştir. Deney sonuçları

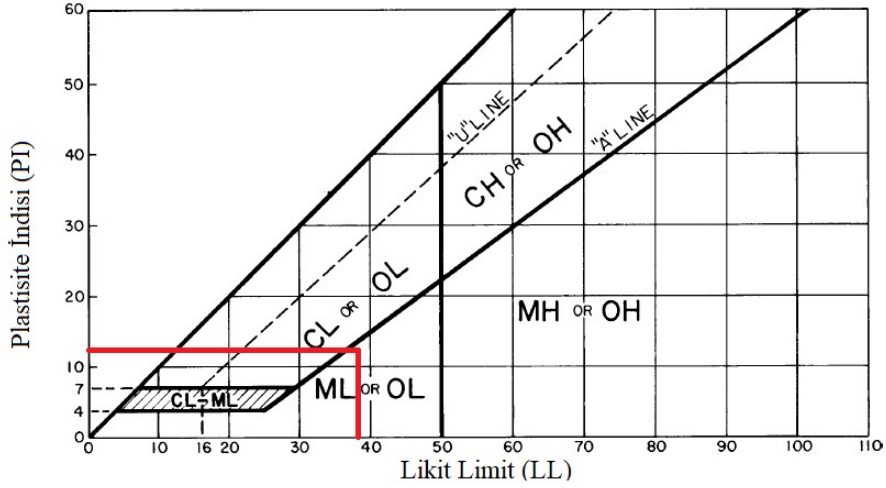
değerlendirildiği zaman organik zemin malzemesinin plastisite kartında düşük plastisiteli silt aralığında olduğu Şekil 4.9’da gösterilmiştir.



Şekil 4.8 : Casagrande 5 nokta yöntemine göre çizilen grafik.

Çizelge 4.2 : Atterberg limitleri deney sonuçları.

Atterberg Limitleri	Likit Limit (%)	Plastik limit (%)	Plastisite indisi(%)
Organik Zemin	37,07	23,34	13,73



Şekil 4.9 : Plastisite kartında zemin sınıfının gösterilmesi [21].

#### 4.2.5 Organik madde tayini

Organik madde tayini ASTM D2974-87 standardına uygun olarak yürütülmüştür [74]. Deney, standart gereği 80 °C’de kurutulan ham malzemeyle yapılmıştır. Deneye başlarken ısıya dayanıklı porselen kapların kütleleri belirlenmiştir. Daha sonra bu kaplara kuru malzeme konularak tekrar kütleleri belirlenmiştir. Kaplar 440 °C etüve

koyulup her iki saatte bir kütlesi ölçülmüştür. Bu işlem kap+malzeme kütlesi sabitleninceye kadar sürdürülmüştür. Numunelerin kütlesi 24 saat sonunda sabit kaldığı tespit edilmiş ve deney sonlandırılmıştır. Deneyden elde edilen veriler sonucunda malzemenin içerdiği organik madde miktarı belirlenmiştir. Şekil 4.10'da malzemenin kütle ölçüm işlemi ve etüvün sıcaklığı gösterilmiştir.

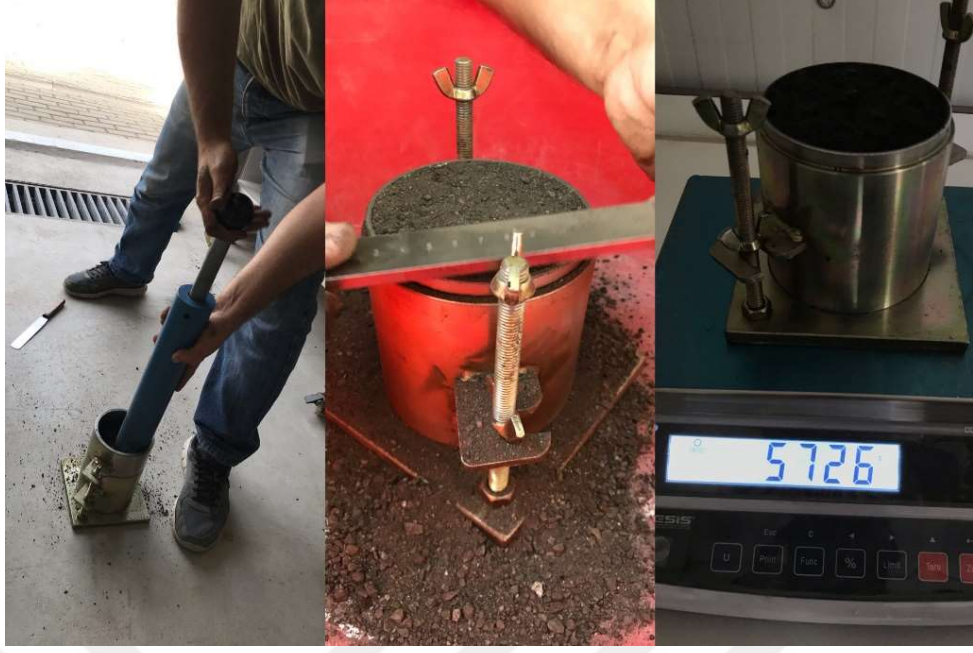


**Şekil 4.10 :** Organik madde tayini kütle ölçümü ve etüv sıcaklığı.

Yapılan hesaplamalar sonunda ham malzemenin organik madde yüzdesi %51 olarak belirlenmiştir. Bilecik ili, Söğüt ilçesinden alınan zemin ASTM D4427-18 standardına göre %75'ten daha az organik madde içerdiği için organik zemin sınıfına girmektedir.

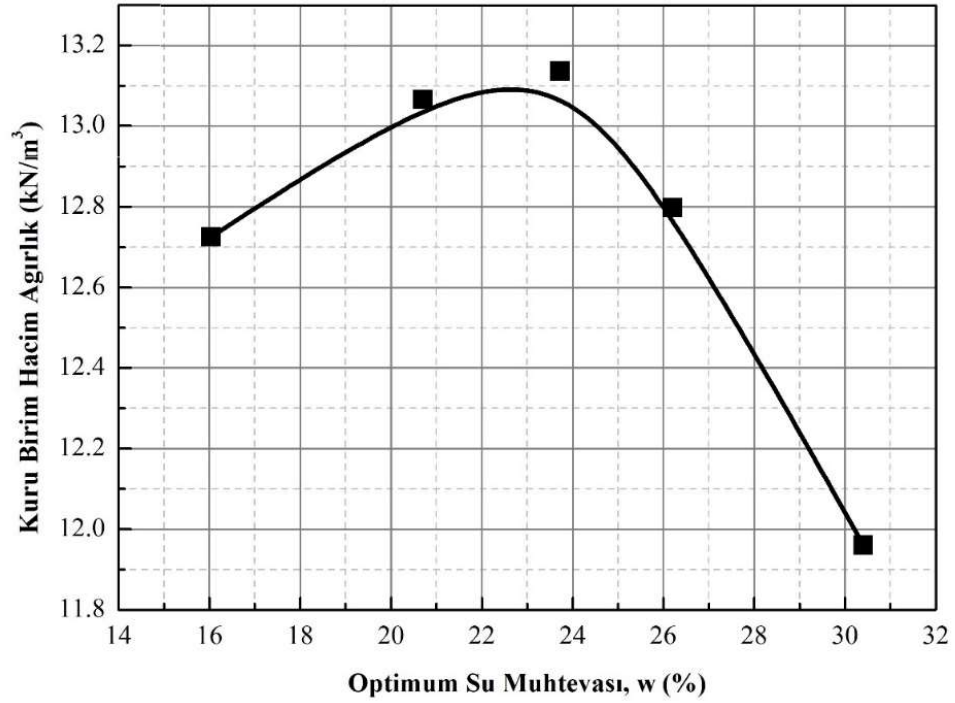
#### **4.2.6 Standart proctor deneyi**

Bu deneyde amaç optimum su muhtevası ( $w$ ) ve maksimum kuru birim ağırlığı ( $\gamma_k$ ) belirlemektir. Deney, ASTM D698-12e2 standardına uygun olarak yürütülmüştür [75]. Deneyde kullanılan malzemenin dane çapı dağılım eğrisi incelendiğinde #4 nolu eleğin üstünde kalan malzeme miktarı %20'den daha az olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle deneyde standart proctor deneyi molduna üç eşit kademede malzeme koyulmuş ve her kademeye 30,5 cm yükseklikten düşen tokmakla 25 vuruş yapılarak sıkıştırma gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.11'de malzemenin sıkıştırılması, tıraşlanması ve tartılması gösterilmiştir.



Şekil 4.11 : Proctor deneyi aşamaları

Denyede organik zeminin optimum su muhtevası ( $w$ ) %22,75 ve maksimum kuru birim ağırlığı ( $\gamma_k$ )  $13,10 \text{ kN/m}^3$  olarak belirlenmiştir. Yapılan Proctor deneyine ait kompaksiyon eğrisi Şekil 4.12’de gösterilmiştir.



Şekil 4.12 : Kompaksiyon eğrisini gösteren grafik.

#### 4.2.7 Organik zeminin permeabilitesi

Permeabilite, malzemenin içinden akışkanların geçebilme yeteneğine verilen isimdir. SI birim sisteminde birimi m/sn veya cm/sn olarak gösterilmektedir. Zeminlerin geçirgenliği; malzemenin dane çapı dağılımı, gözenek dağılımı, doygunluk derecesi, boşluk oranı ve akışkanın viskozitesi gibi faktörlerle ilişkilidir. Dolayısıyla malzemenin permeabilite katsayıları zemin türlerine göre farklılık göstermektedir ve Çizelge 4.3'te zeminlerin tipik permeabilite katsayıları gösterilmiştir [76].

**Çizelge 4.3 : Zeminlerin tipik permeabilite katsayıları[76].**

Zemin Türü	Permeabilite Katsayısı, k (m/sn)
Kil	<0,00000001
Siltli Kil	0,0000001-0,00001
İnce Kum	0,00001-0,0001
İri Kum	0,0001-0,01
Temiz Çakıl	0,01-1,0

Laboratuvarında yapılan permeabilite deneylerinin sonuçlarını etkileyebilecek faktörler mevcuttur. Numune içerisinde hava kabarcıkları oluşması ve doygunluk derecesinin %100'den küçük olması, ince danelerin suyla birlikte numune dışına çıkması ve sıcaklık değişimi gibi faktörler deney sonuçlarını etkileyebilmektedir [77].

Proctor sıkılığı olan  $\gamma_k=13,10$  kN/m<sup>3</sup> ile moldlara yerleştirilen organik zemin düşen seviyeli permeabilite deneyine tabi tutulmuştur. Bu deney ASTM D5084-03 standardına uygun olarak yürütülmüştür [78]. Organik zemine uygulanan düşen seviyeli permeabilite deneyinde hidrolik eğim (i) 18,0 olarak belirlenmiştir. Deney sonucunda hesaplanan permeabilite katsayıları için kullanılan formül Denklem 4.2'de gösterilmiştir.

$$k = 2,303 \times \frac{a \times L}{A \times t} \times \log_{10} \frac{h_1}{h_2} \quad (4.2)$$

Yukarıdaki formülde;

k = permeabilite katsayısı

L = numune boyu, (cm)

A = numune kesit alanı, (cm<sup>2</sup>)

a = borunun iç kesit alanı, (cm<sup>2</sup>)

t = zaman, (sn)

$h_1$  = ilk su yüksekliği, (cm)

$h_2$  = son su yüksekliği (cm) olarak verilmiştir.

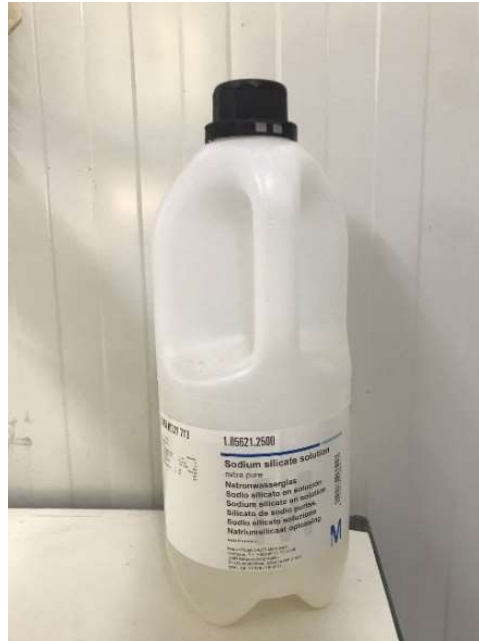
Yapılan deneyler organik zeminin doğal halde permeabilite katsayısı  $4,79 \times 10^{-5}$  cm/sn olarak bulunmuştur.

### 4.3 Enjeksiyon Deneylerinde Kullanılan Kimyasal Malzemelerin Özellikleri

#### 4.3.1 Sodyum silikat

Genel formülü  $Na_2(SiO_2)_nO$  olan kimyasal bileşiklerin ortak adı olan sodyum silikat, su camı veya sıvı cam olarak da bilinmektedir. Saf bileşimleri genellikle renksiz ya da beyaz renklidir ancak ticari olarak üretilen örnekleri yeşilimsi veya mavidir. Bu bileşikler suda çeşitli miktarlarda çözünmektedirler ve çimento sektöründe, tekstilde, yapıştırıcı ve deterjan üretiminde, zemin enjeksiyonu malzemelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Enjeksiyon malzemesi olarak kullanılan sodyum silikatların silika/alkali oranının ( $SiO_2/Na_2O$ ) 3 ile 4 arasında olması gerekmektedir [5].

Kimyasal enjeksiyon deneylerinde kullanılan sodyum silikat, Alman firması olan Merck tarafından üretilen 105621 kodlu kimyasaldır (Şekil 4.13). Kullanılan sodyum silikata ait fiziksel ve kimyasal özellikler Çizelge 4.4'te gösterilmiştir [79].



Şekil 4.13 : Kimyasal enjeksiyonda kullanılan sodyum silikat.

**Çizelge 4.4 : Sodyum silikatın fiziksel ve kimyasal özellikleri [79].**

Fiziksel Ve Kimyasal Özellikler	Değerler
Kimyasal Formül	$\text{Na}_2\text{SiO}_3$
Görünüş	Renksiz, Sıvı
Moleküler Modül ( $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ )	3,35 – 3,4
Yoğunluk (20 °C, g/ml)	1,296 – 1,396
$\text{SiO}_2$ (%)	25,5 – 28,5
$\text{Na}_2\text{O}$ (%)	7,5 – 8,5
pH (20 °C, 50 g/L in $\text{H}_2\text{O}$ )	11,0 – 11,5
Viskozite (20 °C, cP)	130

#### 4.3.2 Borik asit

Deneyleerde kimyasal formülü  $\text{H}_3\text{BO}_3$  olan borik asit kullanılmıştır. Kullanılan borik asit Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü'nden tedarik edilmiştir (Şekil 4.14).



**Şekil 4.14 : Kimyasal enjeksiyonda kullanılan borik asit**

Borik asit, kolemanit cevheri ile sülfürik asidin ya da boraks ile bir mineral asidin reaksiyona girmesi ile elde edilmektedir. Borun zayıf bir asidi olarak suda çözünebilir formda bulunmaktadır. Borik asit; cam ve seramik sektöründe, nükleer enerji santrallerinde, tıpta ve tarımda farklı amaçlarla yaygın olarak kullanılmaktadır. Organik zeminlerin enjeksiyon yöntemiyle iyileştirilmesinde ilk defa bu çalışma ile borik asit kullanılmıştır. Borik asitin fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 4.5'de gösterilmiştir [80].

**Çizelge 4.5 :** Borik asitin fiziksel ve kimyasal özellikleri [80].

Fiziksel Ve Kimyasal Özellikler	Değerler
Görünüm	Beyaz,katı
Özgül Ağırlık (20 °C , g/cm <sup>3</sup> )	1,51
Molekül Ağırlığı (g/mol)	61,83
Erime Noktası (°C)	450
Kaynama Noktası (°C)	1860
Safiyet (%)	Min 99,92
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Min 56,25
SO <sub>4</sub> (ppm)	Maks. 300
Cl (ppm)	Maks. 5
Fe (ppm)	Maks. 4

Kullanılan borik asitin en önemli özelliği suda çözünürlük derecesidir. Çizelge 4.6'da üreticiden alınan verilere göre borik asitin sıcaklığa bağlı olarak değişimi gösterilmiştir [80].

**Çizelge 4.6 :** Borik asitin suda çözünürlüğü [80].

Sıcaklık (°C)	Çözünürlük (g/100g su)
100	37,90
90	30,26
80	23,70
70	18,97
60	14,90
50	11,41
40	8,73
30	6,78
25	5,74
20	4,94
10	3,64
0	2,59

#### 4.4 Kimyasal Solüsyonların Reolojik Özelliklerinin Belirlenmesi

Deneysel çalışmanın bu aşamasında hazırlanan solüsyonların reolojik özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Solüsyonlarda ana malzeme olarak sodyum silikat, reaktant olarak da borik asit kullanılmıştır. Sodyum silikat ve bork asitin karıştırılması sonucu elde edilen reaksiyon Şekil 4.15'de gösterilmiştir. Reolojik özellikler enjeksiyonda kullanılacak olan solüsyonun belirlenmesinde oldukça önemlidir. En



#### 4.4.1.1 Sodyum silikat-borik asit solüsyonlarının jelleşme süreleri

Kimyasal enjeksiyonda kullanılacak solüsyonlar hazırlanırken borik asit 40-60 °C aralığındaki sıcaklığa sahip suda çözdürülmüştür. Su sıcaklığının yüksek tercih edilmesinin sebebi borik asidin suda tam çözünmesini sağlamaktır. İçinde borik asit bulunan su, daha sonra sodyum silikat ile karıştırılmıştır ve karışımın jelleşme süresi takip edilmiştir. Jelleşme sürelerini belirleme çalışmasında sodyum silikat ve reaktant miktarları değiştirilerek bunların jelleşme süresine ve jel yapısına etkisi incelenmiştir. Çalışmaya düşük sodyum silikat oranlarından başlanmış ve sodyum silikat miktarı giderek arttırılmıştır. Bu şekilde ilk olarak farklı oranlara sahip 48 adet karışım hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımların jelleşme süreleri dikkate alınarak 42 adet daha karışım hazırlanmıştır. Toplamda 90 adet karışım, farklı sodyum silikat ve reaktant miktarları tercih edilerek 20 °C’de hazırlanmıştır. Hazırlanan solüsyonların bir kısmı Şekil 4.16’da gösterilmiştir ve oranlar EK-A’da verilmiştir.



**Şekil 4.16 :** Sodyum silikat-borik asit solüsyonları.

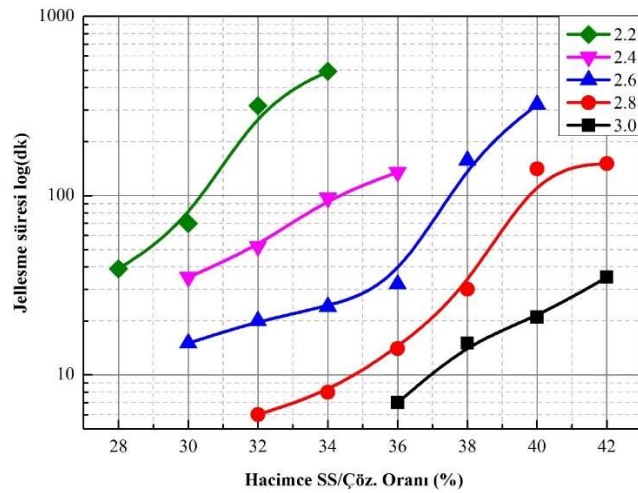
Hazırlanan karışımlar ilk başta berrak bir görünüme sahip sıvı iken zamanla beyaz katı maddelere dönüşmektedir. Şekil 4.17’de solüsyonların jelleşme aşamaları gösterilmiştir.



**Şekil 4.17** : Solüsyonların jelleşme sırasındaki renk değişimi.

Hazırlanan 90 adet karışımın jelleşme süreleri, 90. gündeki sinerez miktarları ve jel yapıları dikkate alınarak en uygun olan 35 adet karışım seçilmiştir. Daha önceki karışımlar 20 °C’de hazırlandığı için seçilen karışımlar aynı oranda tekrardan 30 °C’de hazırlanmıştır. Böylece sıcaklığın jelleşme süresine olan etkisi incelenmiştir. Çizelge 4.7’de sodyum silikat-borik asit solüsyonlarının iki farklı ortam sıcaklığındaki jelleşme süreleri gösterilmiştir. Sıcaklığın artmasıyla jelleşme süreleri kısalmıştır.

Yapılan deneylerde sodyum silikat oranının hacimce %42’ye kadar olan solüsyonların jelleşebildiğine, bunun üzerindeki değerlerde ya karıştırırken jelleşme gerçekleştiği ya da hiç jelleşme gerçekleşmediği gözlenmiştir. Şekil 4.18’de 20°C ortam sıcaklığında hazırlanan karışımların hacimce sodyum silikat oranına bağlı olarak jelleşme süresinde gerçekleşen değişim gösterilmiştir. Grafikte jelleşme süresinin gösteren eksen logaritmik olarak verilmiştir. Karışımlarda hacimce SS/Çöz. oranının artmasıyla jelleşme süresinin uzadığı gözlemlenmiştir.

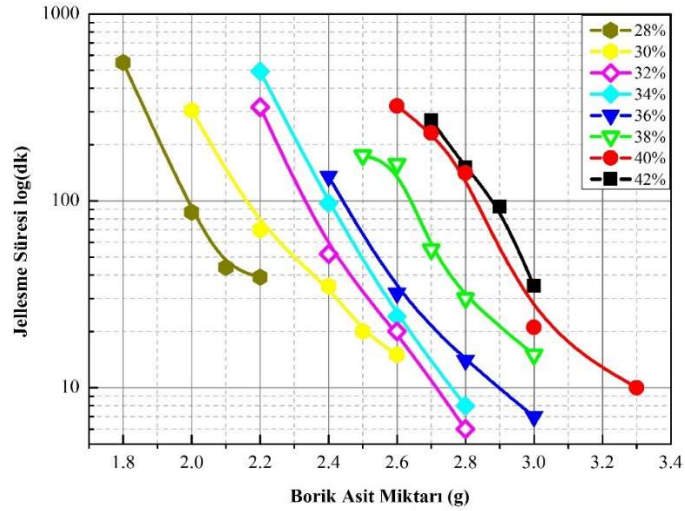


**Şekil 4.18** : Jelleşme sürelerinin SS/Çöz. oranına göre değişimi.

**Çizelge 4.7 : 20 °C Ve 30 °C sıcaklıklarda solüsyonların jelleşme süreleri.**

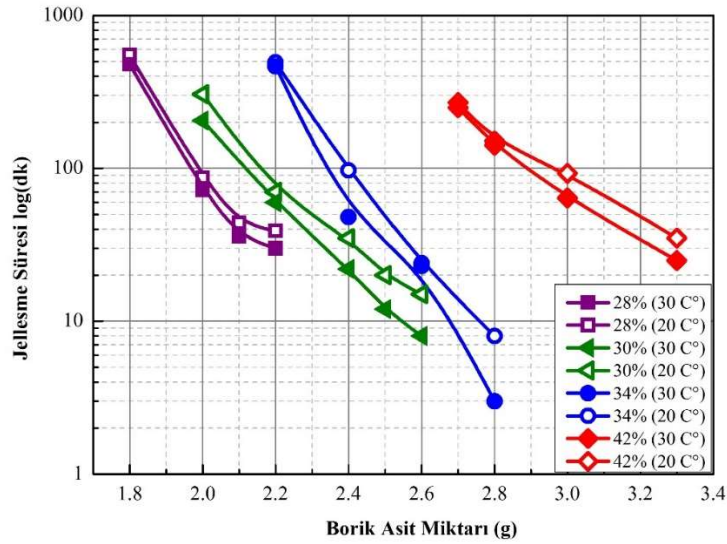
Deney No	Sodyum Silikat (ml)	Su (ml)	Borik Asit (g)	Sıcaklık (°C)	Jelleşme Süresi (dk)	Sıcaklık (°C)	Jelleşme Süresi (dk)
K1	28	72	1,8	20	550	30	478
K2	28	72	2,0	20	87	30	72
K3	28	72	2,1	20	44	30	36
K4	28	72	2,2	20	39	30	30
K5	30	70	2,0	20	305	30	206
K6	30	70	2,2	20	70	30	60
K7	30	70	2,4	20	35	30	22
K8	30	70	2,5	20	20	30	12
K9	30	70	2,6	20	15	30	8
K10	32	68	2,2	20	317	30	173
K11	32	68	2,4	20	52	30	32
K12	32	68	2,6	20	20	30	10
K13	32	68	2,8	20	6	30	3
K14	34	66	2,2	20	493	30	465
K15	34	66	2,4	20	97	30	48
K16	34	66	2,6	20	24	30	23
K17	34	66	2,8	20	8	30	3
K18	36	64	2,4	20	135	30	85
K19	36	64	2,6	20	32	30	26
K20	36	64	2,8	20	14	30	11
K21	36	64	3,0	20	7	30	3
K22	38	62	2,5	20	175	30	146
K23	38	62	2,6	20	157	30	95
K24	38	62	2,7	20	55	30	49
K25	38	62	2,8	20	30	30	15
K26	38	62	3,0	20	15	30	10
K27	40	60	2,6	20	322	30	284
K28	40	60	2,7	20	231	30	177
K29	40	60	2,8	20	141	30	47
K30	40	60	3,0	20	21	30	11
K31	40	60	3,3	20	10	30	4
K32	42	58	2,7	20	270	30	250
K33	42	58	2,8	20	151	30	142
K34	42	58	2,9	20	93	30	64
K35	42	58	3,0	20	35	30	25

Şekil 4.19'da 20°C ortam sıcaklığında hazırlanan karışımların borik asit miktarına bağlı olarak değişimleri gösterilmiştir. Jelleşme süresini gösteren grafik logaritmik olarak verilmiştir. Grafik analiz edildiği zaman borik asit miktarındaki artışın jelleşme süresini önemli ölçüde azalttığı gözlemlenmiştir. Karışımlarda tek bir sodyum silikat miktarında belirli sınırlar içerisinde borik asit çözdürülebildiği için her iki grafikte de gösterimler o sınırlar içerisinde kalmıştır.



**Şekil 4.19** : Jelleşme sürelerinin borik asit miktarına göre değişimini gösteren grafik.

Şekil 4.20'de karışımların hazırlandıkları ortam sıcaklığına bağlı olarak jelleşme sürelerindeki değişim gösterilmiştir. Jelleşme sürelerini gösteren eksen logaritmik olarak verilmiştir. Gerekli incelemeler sonucunda 30°C ortam sıcaklığında hazırlanan karışımların, 20°C ortam sıcaklığında hazırlanan karışımlara kıyasla daha kısa sürede jelleştiği gözlemlenmiştir. Ortam sıcaklığının artması jelleşme süresini azaltmaktadır.



**Şekil 4.20** : Jelleşme süresinin ortam sıcaklığına bağlı olarak değişimini gösteren grafik.

Sodyum silikat ve borik asit kullanılarak hazırlanan karışımlar ile grafikler incelenmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda karışımların jelleşme sürelerinin sodyum silikat yüzdesi, borik asit miktarı ve ortam sıcaklığı değiştirilerek ayarlanabilir olduğu sonucuna varılmıştır. Fakat jelleşme süresini etkileyen bu faktörler aynı

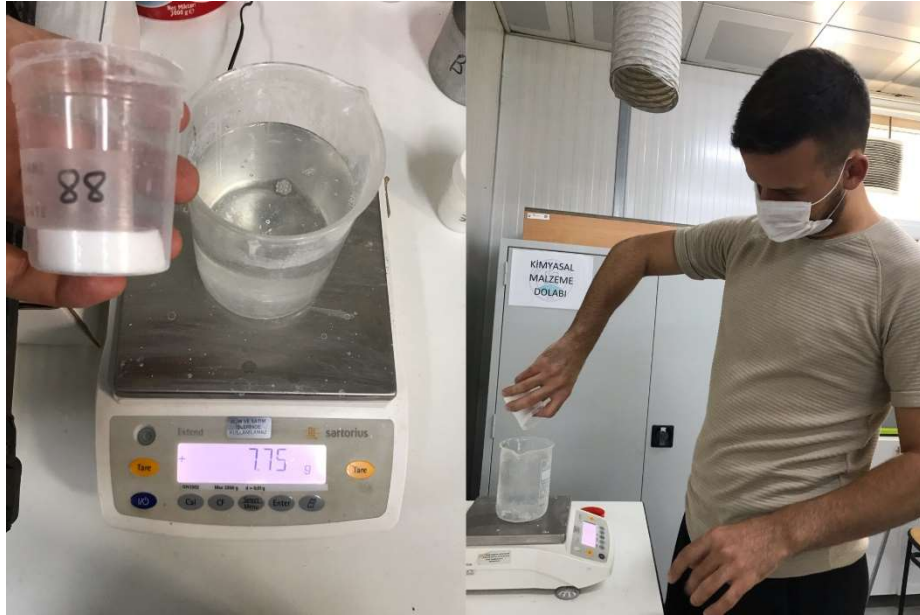
zamanda sinerez miktarını, viskoziteyi ve jel yapısını da etkilemektedir. Dolayısıyla en iyi karışım oranı belirlenirken tüm bu etkenler bir bütün olarak dikkate alınmalıdır.

#### 4.4.2 Sinerez

Sinerez, karışımın jelleşmesini tamamlamasının ardından içindeki akışkanı dışarı salması ve hacimce küçülmesi olayıdır. Bu çalışmada hazırlanan karışımların sinerezleri 3., 7., 14., 28., 56., 90. ve 150. günlerde ölçülmüştür. Sinerezi reaktant malzeme miktarı ve karışım içerisindeki sodyum silikat miktarı etkilemektedir. Sinerez miktarının çok fazla olmaması istenmektedir ancak sadece gerçekleşen sinerez miktarı dikkate alınarak karışımın uygunluğuna karar verilmez. Sinerez miktarıyla birlikte jelleşme süresi, viskozite ve jel yapısı da dikkat edilen diğer faktörlerdir.

##### 4.4.2.1 Sodyum silikat-borik asit solüsyonlarının sinerez miktarları

Hazırlanan 35 farklı kimyasal solüsyonun sinerezleri belirli günlerde ölçülmüştür. Şekil 4.21’de sinerez ölçümüne ait fotoğraf gösterilmiştir. Çizelge 4.8’de karışımların sinerez yüzdeleri gösterilmiştir. Sinerez yüzdesi, solüsyonun dışarı saldığı sıvının hacminin karışımın tamamının hacmine oranı hesaplanarak belirlenmektedir. Sinerezini tamamlamış solüsyonlar Şekil 4.22’de gösterilmiştir.



Şekil 4.21 : Solüsyonlarının sinerez ölçümü.

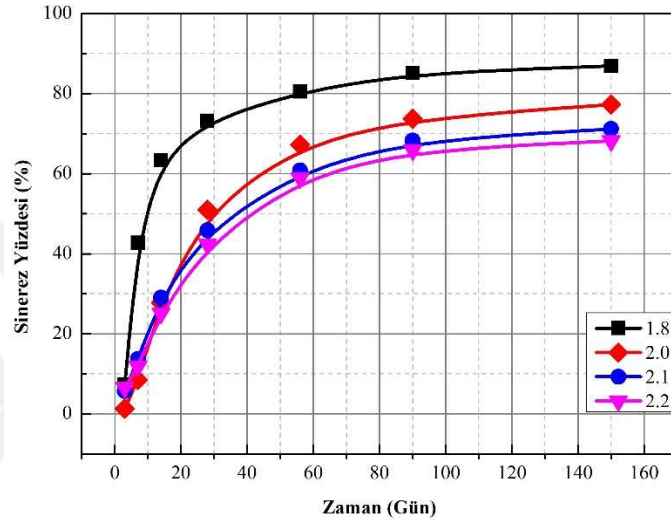


Şekil 4.22 : Sinerezini tamamlamış solüsyonlar.

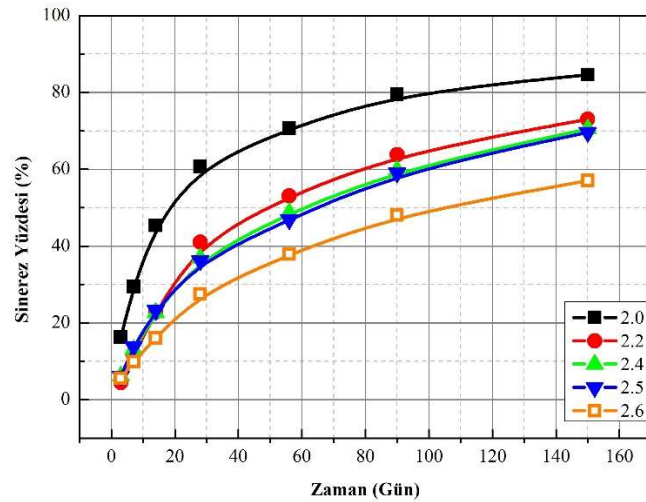
Çizelge 4.8 : Solüsyonların sinerez yüzdeleri.

Deney No	Sodyum Silikat (ml)	Su (ml)	Borik Asit (g)	3.Gün Sinerez (%)	7.Gün Sinerez (%)	14.Gün Sinerez (%)	28.Gün Sinerez (%)	56.Gün Sinerez (%)	90.Gün Sinerez (%)	150.Gün Sinerez (%)
K1	28	72	1,8	7,27	42,75	63,38	73,23	80,50	85,10	86,89
K2	28	72	2,0	1,33	8,48	27,80	51,01	67,22	73,70	77,28
K3	28	72	2,1	5,70	13,71	29,01	45,88	60,80	68,28	71,15
K4	28	72	2,2	6,55	11,88	25,08	42,37	58,92	65,91	68,16
K5	30	70	2,0	16,24	29,40	45,38	60,69	70,70	79,54	84,60
K6	30	70	2,2	4,47	11,57	22,86	41,04	53,09	63,84	73,03
K7	30	70	2,4	6,12	13,03	22,66	36,88	48,66	59,73	70,49
K8	30	70	2,5	6,12	13,81	23,24	36,15	46,91	59,06	69,61
K9	30	70	2,6	5,58	9,89	16,07	27,53	37,95	48,10	57,01
K10	32	68	2,2	7,57	22,59	41,41	58,82	70,50	79,26	83,94
K11	32	68	2,4	1,94	15,61	36,03	52,16	64,43	74,57	80,04
K12	32	68	2,6	6,85	12,95	22,21	37,50	48,58	60,23	69,59
K13	32	68	2,8	3,61	9,18	18,31	31,48	40,51	51,41	62,27
K14	34	66	2,2	33,01	49,58	63,18	73,53	79,77	84,02	86,06
K15	34	66	2,4	7,42	20,83	40,59	58,56	69,26	77,50	82,14
K16	34	66	2,6	1,74	6,70	25,02	44,97	56,45	68,31	76,24
K17	34	66	2,8	1,34	3,30	14,23	30,65	43,00	56,70	69,04
K18	36	64	2,4	7,98	21,75	41,63	59,90	71,44	80,01	84,60
K19	36	64	2,6	4,26	15,86	36,32	54,61	65,30	73,94	79,07
K20	36	64	2,8	7,69	18,23	32,06	49,14	60,91	72,17	79,84
K21	36	64	3,0	9,27	17,55	28,98	43,48	53,63	65,04	73,64
K22	38	62	2,5	15,35	33,43	53,30	69,36	78,51	83,77	86,45
K23	38	62	2,6	14,09	25,19	40,97	57,02	68,10	77,83	83,91
K24	38	62	2,7	8,31	23,02	48,47	66,91	77,22	83,83	86,91
K25	38	62	2,8	5,68	22,69	42,58	60,37	70,87	78,52	82,44
K26	38	62	3,0	9,76	19,90	35,90	53,09	64,14	73,71	78,58
K27	40	60	2,6	9,29	26,08	50,85	67,74	77,58	84,32	87,46
K28	40	60	2,7	14,31	34,08	55,42	70,89	79,96	85,48	88,24
K29	40	60	2,8	4,53	28,44	47,95	64,14	73,76	80,55	83,97
K30	40	60	3,0	10,08	30,62	48,08	63,38	71,68	78,79	81,86
K31	40	60	3,3	2,17	11,58	27,72	45,43	57,12	68,12	74,67
K32	42	58	2,7	8,78	30,01	53,67	69,49	78,43	84,38	87,56
K33	42	58	2,8	13,09	32,89	53,55	69,40	78,37	83,26	85,51
K34	42	58	2,9	22,13	44,74	65,35	77,47	83,82	85,09	85,26
K35	42	58	3,0	8,18	37,91	62,54	75,85	82,50	83,44	83,53

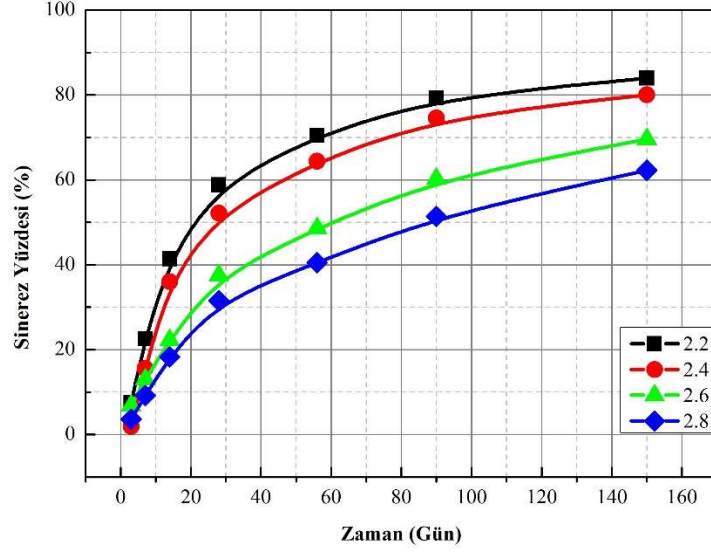
Yapılan ölçümler sonucunda reaktant (borik asit) miktarının sinerez yüzdesini etkilediği tespit edilmiştir. Aynı sodyum silikat yüzdesine sahip karışımlarda borik asit miktarının artmasıyla sinerezin azaldığı belirlenmiştir. Zamana bağlı olarak sinerez yüzdesi grafikleri Şekil 4.23-4.30 arasında gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde sinerez yüzdesinin artış hızının 56. günden sonra oldukça azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca artan SS/Çöz. oranıyla birlikte borik asit miktarının da sinerez yüzdesine olan etkisinin azaldığı belirlenmiştir.



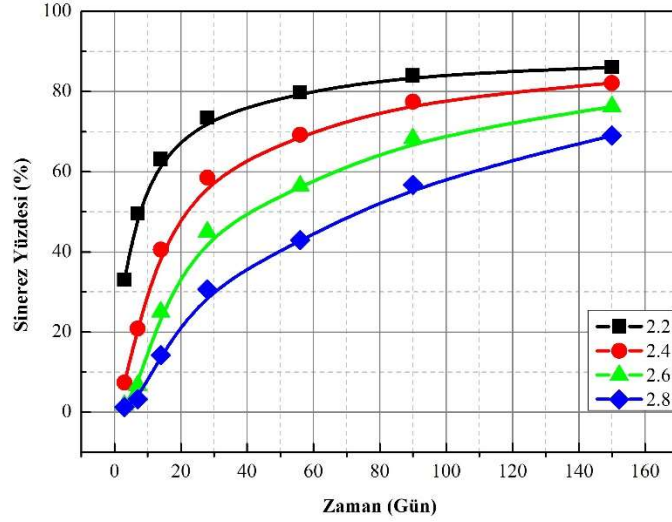
Şekil 4.23 : %28 SS/Çöz oranına sahip solüsyonların sinerez yüzdesi-zaman grafiği.



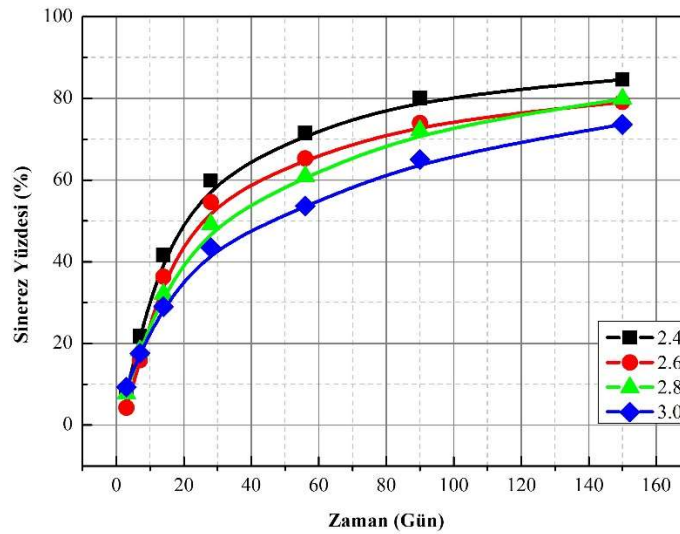
Şekil 4.24 : %30 SS/Çöz oranına sahip solüsyonların sinerez yüzdesi-zaman grafiği.



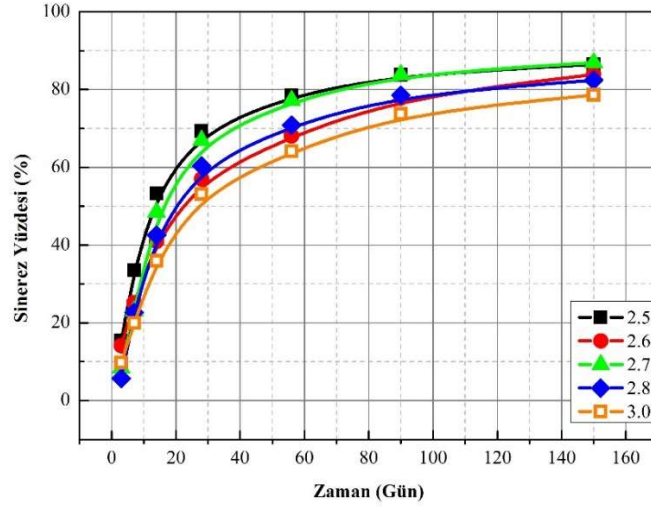
Şekil 4.25 : %32 SS/Çöz oranına sahip solüsyonların sinerez yüzdesi-zaman grafiği.



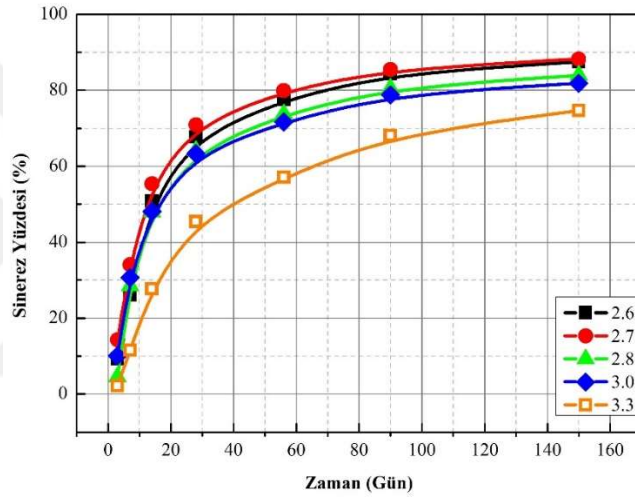
Şekil 4.26 : %34 SS/Çöz oranına sahip solüsyonların sinerez yüzdesi-zaman grafiği.



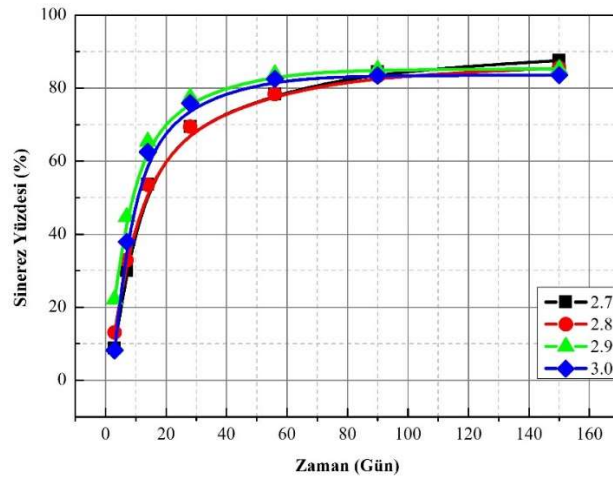
Şekil 4.27 : %36 SS/Çöz oranına sahip solüsyonların sinerez yüzdesi-zaman grafiği.



Şekil 4.28 : %38 SS/Çöz oranına sahip solüsyonların sinerez yüzdesi-zaman grafiği.



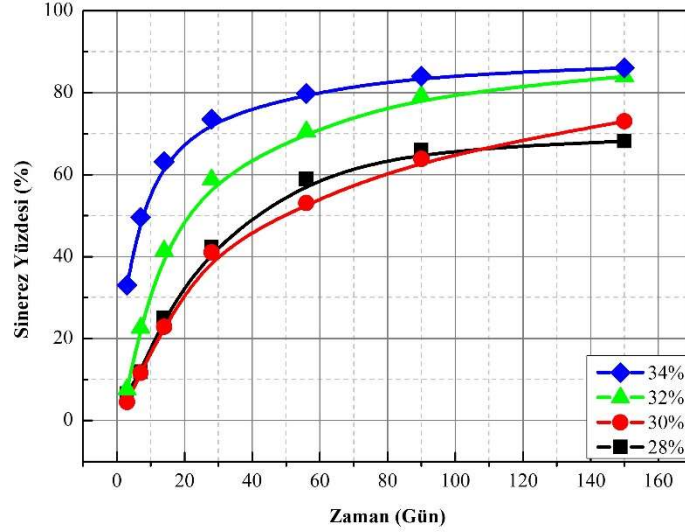
Şekil 4.29 : %40 SS/Çöz oranına sahip solüsyonların sinerez yüzdesi-zaman grafiği.



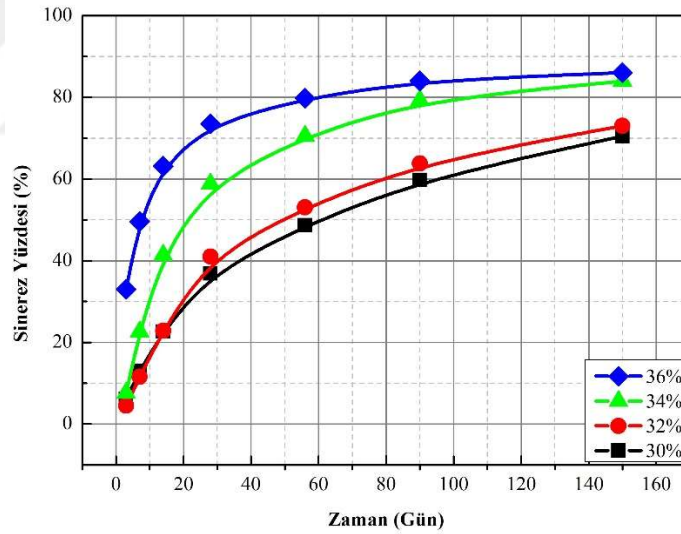
Şekil 4.30 : %42 SS/Çöz oranına sahip solüsyonların sinerez yüzdesi-zaman grafiği.

Deney verileri değerlendirilirken aynı zamanda sodyum silikat yüzdesinin de sinereze etkisi incelenmiştir. Karışımın SS/Çöz. oranının sinerez yüzdesine direkt olarak etkili

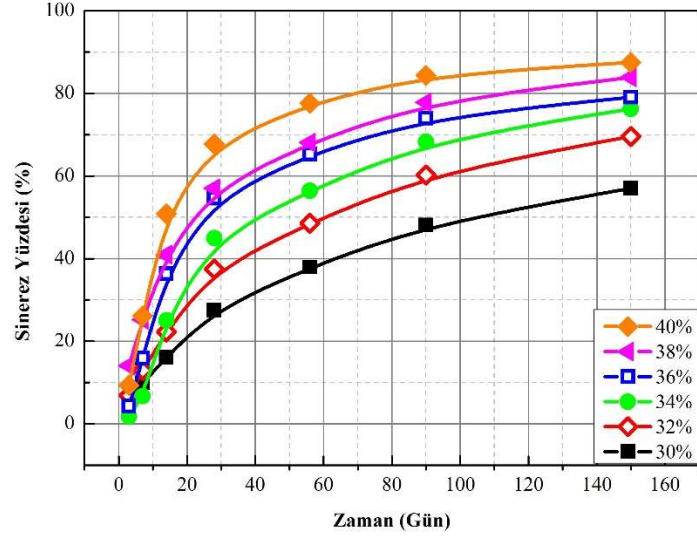
olduğu tespit edilmiştir. Solüsyondaki sodyum silikat miktarının artmasıyla sinerez yüzdesinin de arttığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.31-4.35’de belirli borik asit miktarlarında SS/Çöz. oranının sinerez yüzdesine etkisi gösterilmiştir.



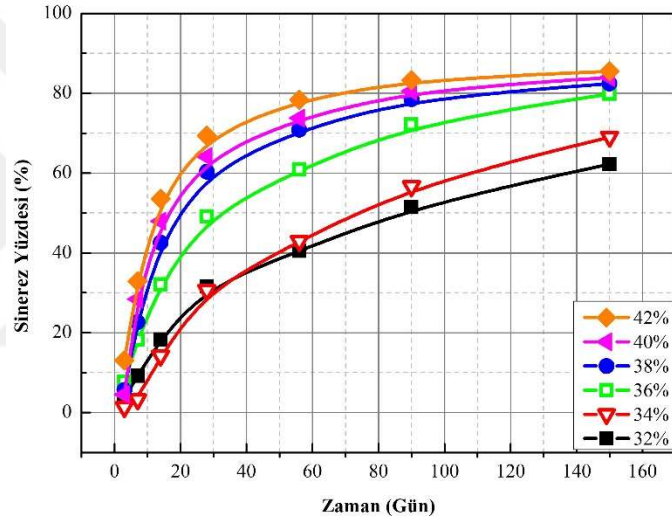
Şekil 4.31 : 2,2 g/100 ml borik asit içeren solüsyonların sinerez yüzdesi-zaman grafiği.



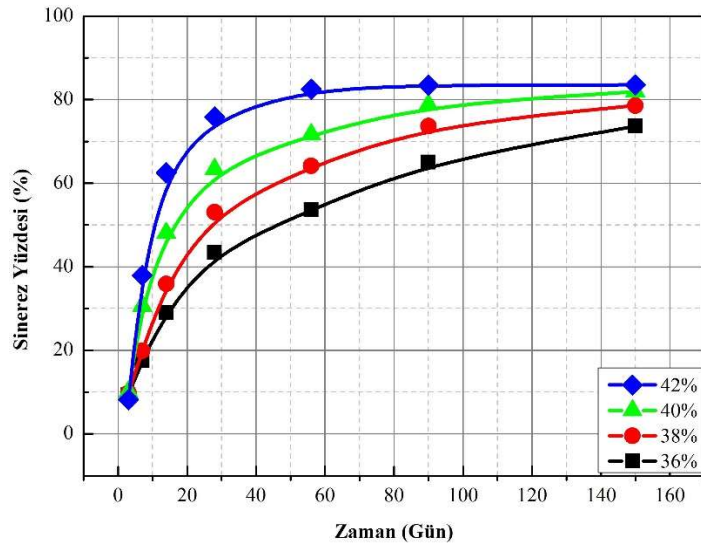
Şekil 4.32 : 2,4 g/100 ml borik asit içeren solüsyonların sinerez yüzdesi-zaman grafiği.



Şekil 4.33 : 2,6 g/100 ml borik asit içeren solüsyonların sinerez yüzdesi-zaman grafiği.



Şekil 4.34 : 2,8 g/100 ml borik asit içeren solüsyonların sinerez yüzdesi-zaman grafiği.



Şekil 4.35 : 3,0 g/100 ml borik asit içeren solüsyonların sinerez yüzdesi-zaman grafiği.

#### 4.4.3 Viskozite

Viskozite, bir akışkanın yer değiştirmeye karşı gösterdiği dirençtir. Kuvvet ile zamanın çarpımının alana bölünmesiyle hesaplanır ve birimi  $N.sn/m^2$  olarak gösterilmektedir. Kimyasal enjeksiyonlarda viskozite değeri, enjeksiyon malzemesinin penetrasyonunu doğrudan etkilediği için önemli bir parametredir. Sadece viskozite değerine bakılarak malzemenin uygunluğu belirlenemez ancak viskozitenin de belirlenip analizlerde dikkate alınması gerekmektedir.

##### 4.4.3.1 Sodyum silikat-borik asit solüsyonlarının viskozite değerleri

Bu çalışmada solüsyonların viskozite değerlerinin belirlenebilmesi için rheometre cihazı kullanılmıştır. Çizelge 4.9’da viskozite değerleri verilen solüsyonlar üzerinde incelemeler yapılmıştır ve karışım içerisindeki sodyum silikat yüzdesinin artmasıyla viskozite değerinin de arttığı gözlemlenmiştir. Aynı sodyum silikat yüzdesine sahip solüsyonlarda reaktant (borik asit) miktarı arttıkça viskozite değerinin de arttığı belirlenmiştir.

**Çizelge 4.9 : Solüsyonların viskozite değerleri.**

Deney No	Sodyum Silikat (ml)	Su (ml)	Borik Asit (g)	Viskozite ( $N.sn/m^2$ )	Viskozite (cP)
K1	28	72	1,8	0,0022	2,22
K2	28	72	2,0	0,0023	2,29
K3	28	72	2,1	0,0023	2,34
K4	28	72	2,2	0,0024	2,39
K5	30	70	2,0	0,0027	2,74
K6	30	70	2,2	0,0028	2,79
K7	30	70	2,4	0,0029	2,85
K8	30	70	2,5	0,0029	2,88
K9	30	70	2,6	0,0030	2,93
K14	34	66	2,2	0,0031	3,06
K15	34	66	2,4	0,0031	3,13
K16	34	66	2,6	0,0032	3,18
K17	34	66	2,8	0,0032	3,21
K22	38	62	2,5	0,0034	3,35
K23	38	62	2,6	0,0035	3,48
K24	38	62	2,7	0,0036	3,56
K25	38	62	2,8	0,0037	3,65
K26	38	62	3,0	0,0037	3,69
K27	40	60	2,6	0,0039	3,86
K28	40	60	2,7	0,0039	3,92
K29	40	60	2,8	0,0040	4,01
K30	40	60	3,0	0,0041	4,05
K31	40	60	3,3	0,0041	4,09
K32	42	58	2,7	0,0043	4,28
K33	42	58	2,8	0,0043	4,32
K34	42	58	2,9	0,0044	4,38
K35	42	58	3,0	0,0044	4,42

#### 4.5 Numunelerin Moldlara Yerleştirilmesi

Enjeksiyon deneylerinde kullanılacak olan organik zeminin moldlara yerleştirilirken sıklığının belirlenebilmesi için gözlemler yapılmıştır. Yapılan gözlemler sonucunda sıklığın standart Proctor deneyinde belirlenen sıklık olan  $\gamma_k=13,10 \text{ kN/m}^3$ 'ten daha düşük olması permeasyon enjeksiyonunun gerçekleşebilmesi için gerekli olduğu belirlenmiştir. Bu sonuca göre organik zeminin Şekil 4.36'da boyutları verilen molda yerleştirilirken sıklığının  $\gamma_k=12,22 \text{ kN/m}^3$  olmasına karar verilmiştir. Hacmi ( $V_m$ ) belli olan moldun içerisine koyulacak malzeme miktarı belirlenirken aşağıda verilen formülden (Denklem 4.3) yararlanılmıştır.

$$M = \gamma_k \times V_m \quad (4.3)$$

Yukarıdaki formülde;

$M$  = Moldun içerisine yerleştirilecek malzeme kütlesi (g)

$\gamma_k$  = Malzemenin kuru birim hacim ağırlığı ( $\text{g/cm}^3$ )

$V_m$  = Mold hacmi ( $\text{cm}^3$ )

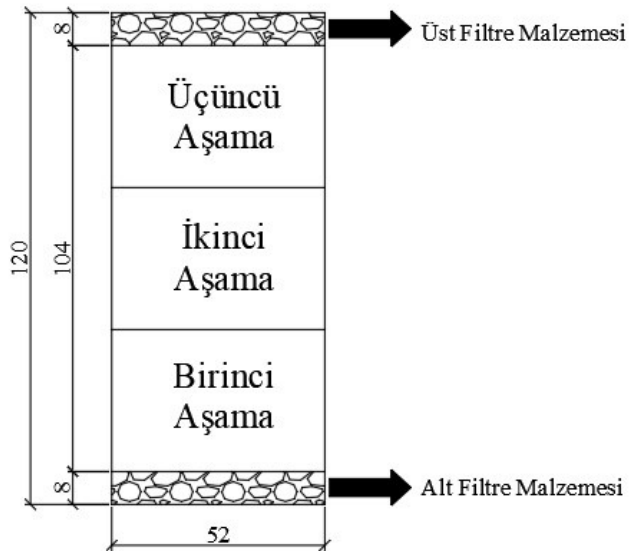
Yapılan hesaplama sonucunda her bir numune için moldun içerisine 270 g organik zemin koyulacağı belirlenmiştir. Organik zemin moldun içerisine üç tabaka halinde sıkıştırılacağı için her tabakada 90 g malzeme yerleştirilmiştir.

Mold çapı(mm)=52

Mold yüksekliği(mm)=120

Alt+üst filtre malzemesi yüksekliği(mm)=16

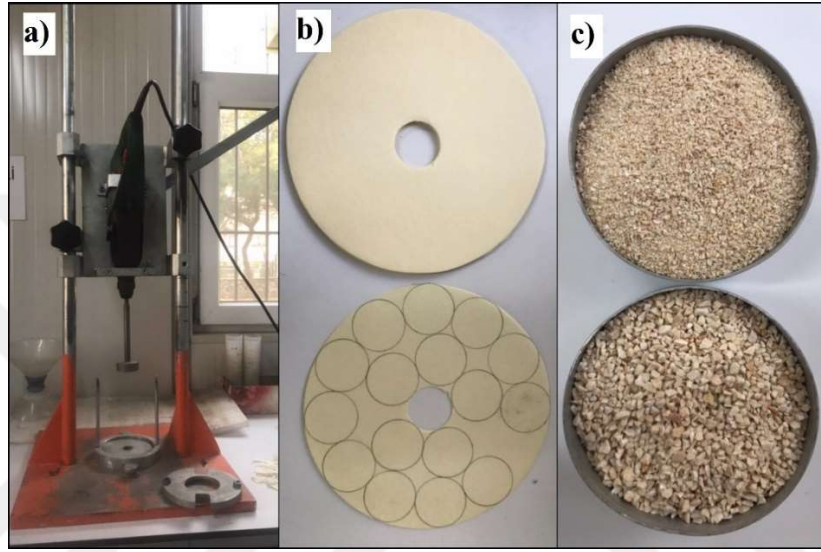
Mold hacmi( $\text{cm}^3$ )=220.87



Şekil 4.36 : Enjeksiyon moldu boyutları.



Enjeksiyon için moldlara koyulan organik zeminin daha hızlı yerleşmesi için titreşimli tokmak kullanılmıştır. Deneyde kullanılan organik zemin içerisinde #200 nolu elek altında kalan ince malzeme bulunması ve enjeksiyon sırasında oluşan basınçla bu malzemenin moldun dışına çıkmasını önlemek amacıyla alt ve üst kısımlara iri ve orta kum filtre malzemesi olarak serilmiştir. Ayrıca filtre malzemesiyle başlıklar arasında da özel filtre kağıdı yerleştirilmiştir (Şekil 4.39). Böylece ince malzemenin moldun dışına çıkmasının önüne geçilmiştir.

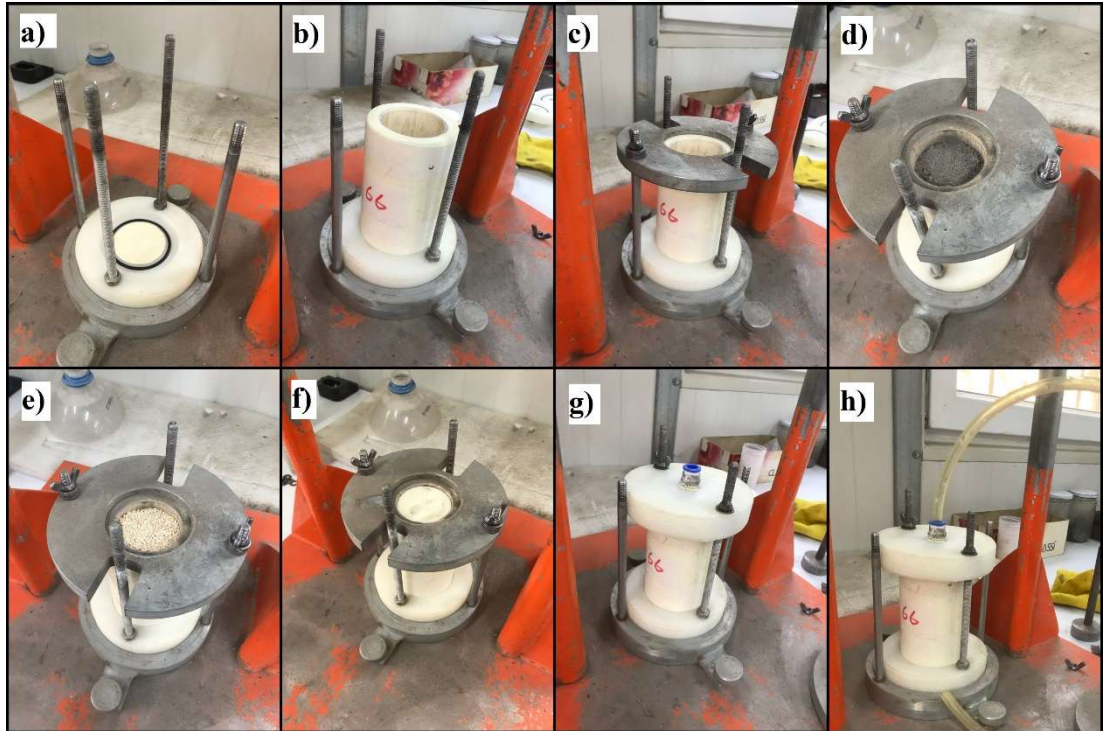


**Şekil 4.39** : Numune hazırlamada kullanılan a) titreşimli tokmak, b) filtre kağıdı, c) orta ve iri kum malzemeleri.

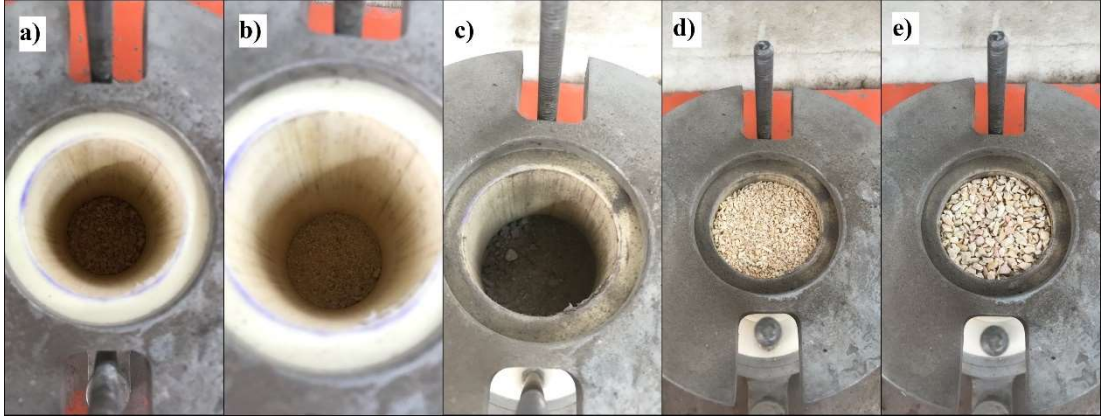
Enjeksiyon numuneleri hazırlanırken izlenen aşamalar şu şekildedir;

- Numune hazırlamaya başlamadan önce moldların iç yüzeyi, enjeksiyon sonrası numuneleri rahatça moldun dışına çıkarabilmek amacıyla yağlanmıştır. Ayrıca başlıklardaki contalar ile pnömatik rekorlar tek tek kontrol edilip enjeksiyona uygun durumda olduğu tespit edilmiştir.
- Organik zemin malzemesi ile filtre malzemesi olarak kullanılan iri ve orta kumun gerekli tartımları yapılmıştır.
- Enjeksiyonda kullanılacak organik zemin malzemesinin moldun içerisine daha hızlı yerleşmesi için tasarlanan titreşimli tokmak düzeneğine alt başlık yerleştirilmiştir (Şekil 4.40-a).
- Alt başlık yerleştirildikten sonra filtre kağıdı yerine oturtulmuş ve ana gövde moldu yerleştirilmiştir (Şekil 4.40-b).

- Ana gövde moldunun üzerine sabitleyici üst başlık yerleştirildikten sonra kelebek somunlarla iyice sıkılmıştır (Şekil 4.40-c).
- Sırayla önce iri kum sonra orta kum moldun içerisine belirlenen miktarda yerleştirilmiştir (Şekil 4.41-a ve Şekil 4.41-b).
- Önceden tartılan organik zemin malzemesi moldun içerisine yerleştirilmiştir (Şekil 4.40-d). Yerleştirilen malzemenin sıkılığının doğruluğunu sağlamak için her kademedede mold iç yüksekliği ölçülmüştür.
- Mold içerisine üç kademedede yerleştirilen organik zemin malzemesinden sonra sırayla önce ince kum sonra iri kum filtre malzemesi olarak yerleştirilmiştir (Şekil 4.40-e ve Şekil 4.41-c,d,e).
- Mold içine malzeme yerleştirme işleminin tamamlanmasından sonra filtre kağıdı dikkatlice en üste koyulmuştur (Şekil 4.40-f).
- En son adım olarak moldun üst bağılığı yerleştirilip kelebek somunlarla iyice sıkılmıştır (Şekil 4.40-g). Enjeksiyon malzemesinin dışarı çıkışını sağlayan pnömatik hortum üst başlığa yerleştirilmiştir (Şekil 4.40-h).



Şekil 4.40 : Enjeksiyon malzemesinin molda yerleştirilme aşamaları.



Şekil 4.41 : Filtre malzemesinin mold içine yerleştirilme aşamaları.

#### 4.6 Enjeksiyon Deneyleri

Yapılan enjeksiyonlarda permeasyon enjeksiyonu yöntemi tercih edilmiştir. Permeasyon enjeksiyonu yönteminde enjeksiyon malzemesi, zemin daneleri arasındaki boşluklara zeminin yapısını değiştirmeden yerleştirilmektedir. Zeminin yapısının değişmemesi için düşük basınçlarda (max 5 bar) enjeksiyon yapılmaktadır. Bu deneysel çalışmada enjeksiyon deneyleri kapsamında organik zeminlere enjekte edilmek üzere farklı S.S./Çöz oranına sahip dört adet karışım seçilmiştir. Bunlar S.S./Çöz oranları sırasıyla %28, %30, %34 ve %42 olan K3, K7, K15 ve K34 karışımlarıdır. Seçilen karışım oranları ile organik zeminlere permeasyon enjeksiyonu yapılmıştır.

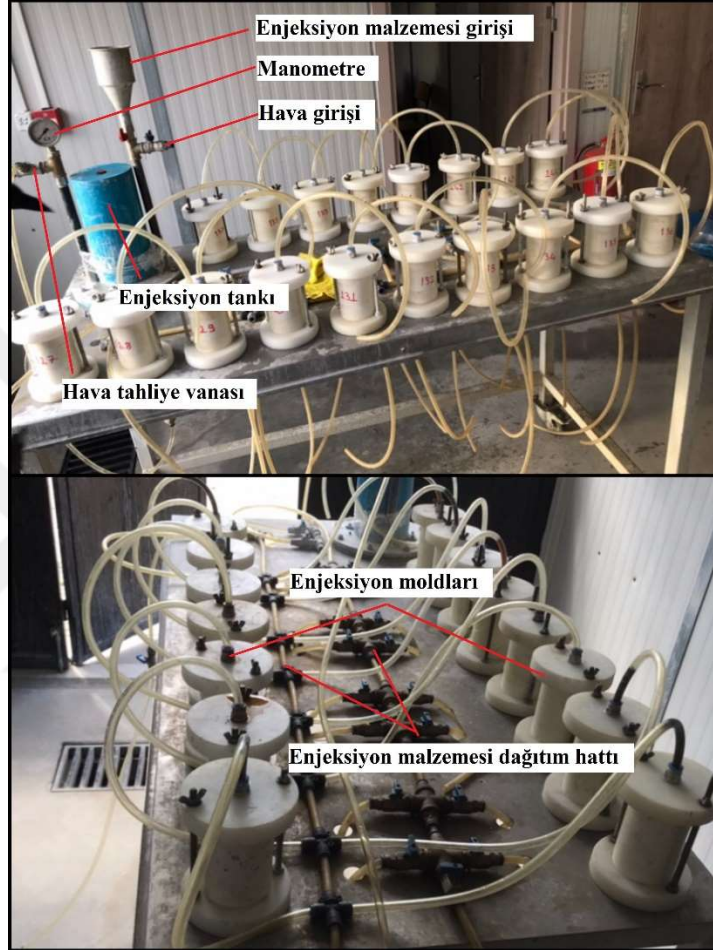
Enjeksiyon deneylerinde kullanılacak karışım oranları belirlenirken solüsyonların reolojik özellikleri dikkate alınmıştır. Yapılacak olan uygulamada zemin dayanımının artırılabilmesi için mukavemeti iyi olan solüsyonlar öznel olarak seçilmiştir. Mukavemet özelliğine ek olarak enjeksiyonun uygulanabilir olabilmesi için solüsyonun jelleşme süresi ve viskozite özelliklerine dikkat edilmiştir.

##### 4.6.1 Enjeksiyon deney düzeneği

Bütün enjeksiyon çalışmalarında kullanılan enjeksiyon deney düzeneği tasarımı, tek seferde 18 adet numuneye enjeksiyon yapabilme imkanı verecek şekilde Prof. Dr. Murat MOLLAMAHMUTOĞLU tarafından yapılmıştır.

Bu deney düzeneği enjeksiyon moldlarının üzerinde dik durabildiği bir masadan, pnömatik hortum, rekor vb. gibi yardımcı elemanlardan, enjeksiyon malzemesinin boşaltıldığı yaklaşık yedi litre hacime sahip tanktan ve enjeksiyon basıncının

sağlandığı kompresörden oluşmaktadır. Enjeksiyon tankının üzerinde uygulanan basıncı gösteren bir manometre, enjeksiyon malzemesinin girişi, enjeksiyon malzemesinin çıkışı, basıncın düşürülebildiği hava çıkışı ve enjeksiyon malzemesinin tank içindeki seviyesini gösteren bir hortum bulunmaktadır. Deneylerde kullanılan enjeksiyon deney düzeneği ve yardımcı elemanlar Şekil 4.42’de gösterilmiştir.



Şekil 4.42 : Kimyasal enjeksiyonlarda kullanılan deney düzeneği.

#### 4.6.2 Enjeksiyon uygulaması

Moldlara yerleştirilerek enjeksiyona hazır hale getirilen numuneler enjeksiyon deney düzeneğine yerleştirilmiştir. Jelleşme süresi, sinerez, viskozite ve görsel olarak değerlendirilen jel yapıları dikkate alınarak dört farklı oran belirlenmiştir. Belirlenen oranlar Çizelge 4.10’da gösterilmiştir. Farklı oranlarda hazırlanmış olan sodyum silikat-borik asit solüsyonları vakit kaybetmeden enjeksiyon deney düzeneğine boşaltılmıştır. Daha sonra düzeneğe bağlı kompresörden basınç istenilen seviyeye ayarlanmıştır. Enjeksiyon deneylerinin tamamında permeasyon enjeksiyonunun üst sınırı olan 5 bar basınçtan daha yüksek bir değere çıkılmamıştır. Deneylerde uygulanan

enjeksiyon basıncı Çizelge 4.10'da verilmiştir. Basınçlar belirlenirken düzenekteki manometreden faydalanılmıştır.

**Çizelge 4.10 :** Enjeksiyonlarda kullanılacak kimyasal oranalar.

Belirlenen Oranlar	Sodyum Silikat (ml)	Su (ml)	Borik Asit (g)	Uygulanan Enjeksiyon Basıncı (bar)
Oran A (K3)	28	72	2,1	1,90
Oran B (K7)	30	70	2,4	2,00
Oran C (K15)	34	66	2,4	2,10
Oran D (K34)	42	58	2,9	2,30

Moldların içindeki numuneye alt taraftan verilen enjeksiyon malzemesinin üst taraftaki şeffaf pnömatik hortumdan çıkışı gözlenmiştir (Şekil 4.43). Pnömatik hortumdan çıkış gerçekleşen numunelerin enjeksiyonunun başarılı olduğu ön değerlendirmesi yapılmıştır. Enjeksiyon deneylerinin tamamında üst taraftan solüsyon çıkışı gözlenmiştir. Enjeksiyonun başarı durumu solüsyonun jelleşmesi tamamlandıktan sonra numunelerin moldlardan çıkarılmasıyla kesinleşmiştir. Enjeksiyon işleminden sonra düzenekten sökülen moldların iki ucu pnömatik hortumla başlanmıştır. İki ucun bağlanmasıyla enjeksiyon malzemesinin jelleşmeden önce dışarı çıkışı engellenmiştir. Bu şekilde toplamda 216 adet numuneye enjeksiyon yapılmıştır. Deneyin tamamlanmasıyla tank içinde kalan solüsyondan kaplara numune alınarak jelleşme süresi ve jel yapıları takip edilmiştir (Şekil 4.44).



**Şekil 4.43 :** Enjeksiyon deneylerinin yapılması.



Şekil 4.44 : Enjeksiyon deneyi sonrası jelleşmenin beklenmesi.

#### 4.6.3 Enjeksiyon sonrası numunelerin moldlardan çıkarılması

Numuneler jelleşmesini tamamlaması için 24 saat boyunca mold içinde bekletildikten sonra moldlardan çıkarma işlemine geçilmiştir. İlk olarak moldların alt ve üst başlıkları sökülmüştür ve bir sonraki enjeksiyona hazır olması için temizlenmiştir. Bu aşamadan sonra moldların içindeki numuneler numune krikosu yardımıyla moldlardan çıkarılmıştır. Moldlardan çıkarılan numuneler açık ortamda, streçte ve kür havuzunda bekletilmek üzere numaralandırılmıştır (Şekil 4.45).



Şekil 4.45 : Jelleşmesini tamamlayan numunelerin moldlardan çıkarılması ve numaralandırılması.

Şekil 4.46’da farklı oranlarda solüsyonlar kullanılarak enjeksiyon yapılmış numuneler gösterilmiştir.



**Şekil 4.46 :** Farklı oranlarda solüsyonlar ile hazırlanan numuneler.

Şekil 4.47’de ise enjeksiyon malzemesinin organik zeminin boşluklarında jelleşmesini tamamlamış olduğu gösterilmiştir.



**Şekil 4.47 :** Jelleşmesini tamamlamış enjeksiyon malzemesinin numune içindeki görüntüsü.

## **4.7 Enjeksiyon Yapılmış Numunelerin Serbest Basınç Dayanımlarının Belirlenmesi**

### **4.7.1 Enjeksiyon yapılmış numunelerin farklı kür koşullarında bekletilmesi**

Enjeksiyon işleminde başarı sağlanan numuneler açık ortam, streçli ve kür havuzunda olmak üzere üç farklı kür koşulunda bekletilmiştir (Şekil 4.48 ve Şekil 4.49).

Numunelerin 3., 7., 14., 28., 56. ve 90. günlerde serbest basınç dayanımları ölçülmüştür. Kür havuzunda bekletilen numuneler bütünlüğünü koruyamadığı için bu numuneler üzerinde sebest basınç deneyi yapılamamıştır (Şekil 4.50).



Şekil 4.48 : Açık ortamda ve streçte bekletilen numuneler.



Şekil 4.49 : Kür havuzunda bekletilen numuneler.



Şekil 4.50 : Kür havuzunda bütünlüğünü koruyamayan numuneler.

#### 4.7.2 Serbest basınç deneyleri öncesinde numunelere başlık yapılması

Serbest basınç deneyinden önce numunelere başlıklar yapılmıştır (Şekil 4.51). Numuneler hazırlanırken filtre malzemesi kullanılması ve numunelerin moldlardan çıkarılması aşamasında meydana gelen pürüzlenmeler nedeniyle numunelerin alt ve üst yüzeyine başlık yapılması gerekmektedir. Yapılan başlıklar sayesinde serbest basınç deneyinde uygulanan basıncın tüm yüzeye üniform dağılması sağlanarak kırılma esnasında istenmeyen başlık çekme gerilmeleri engellenmiştir.



Şekil 4.51 : Numunelere başlık yapılması.

Başlıklar yapılırken kartonpiyer alçısı kullanılmıştır. Kartonpiyer alçısının seçilme sebepleri hızlı priz alması, kolay şekil alması ve priz aldıktan sonra istenilen mukavemeti sağlıyor olmasıdır. Kartonpiyer alçısının numuneye düzgün ve istenilen seviyede konumlanabilmesi için özel başlık aparatları kullanılmıştır. Bu aparatlar numuneye kolay bir şekilde yerleşmekte ve alçı priz aldıktan sonra kolaylıkla sökülebilmektedir (Şekil 4.52).



Şekil 4.52 : Numune başlıkları.

#### 4.7.3 Serbest basınç dayanımı deneyleri

Öncelikle doğal haldeki organik zemin ile hazırlanmış 36 adet numuneye serbest basınç dayanımı deneyi yapılmıştır. Doğal haldeki organik zeminle hazırlanan numunelere optimum su muhtevasında su karıştırılmıştır. Belirli miktarlarda sodyum silikat ve borik asit katılarak hazırlanan solüsyonlar ile toplamda 216 adet enjeksiyon yapılmıştır ve bu numunelerin 144 tanesine serbest basınç dayanımı deneyi yapılmıştır. Kür havuzunda bekletilen numuneler bütünlüğünü koruyamadığı için deneye tabi tutulamamıştır. Serbest basınç dayanımı deneyleri Bursa Teknik Üniversitesi, Geoteknik Laboratuvarında yapılmıştır. Enjeksiyon yapılan 144 numuneye ve doğal haldeki zemine 3., 7., 14., 28., 56. ve 90. günlerde serbest basınç dayanımı (SBD) deneyi yapılmıştır. Her oranda açıkta ve streçte bekletilmek üzere aynı kür süresi için üçer tane numune hazırlanmış ve bu numunelerin serbest basınç dayanımlarının ortalaması alınmıştır. Deneylerin tamamı ASTM C4219-02 standardına uygun olarak yürütülmüştür [81]. Şekil 4.53'te serbest basınç dayanımı deneylerinde kullanılan cihaz ve deneylerin yapılması aşaması gösterilmiştir.



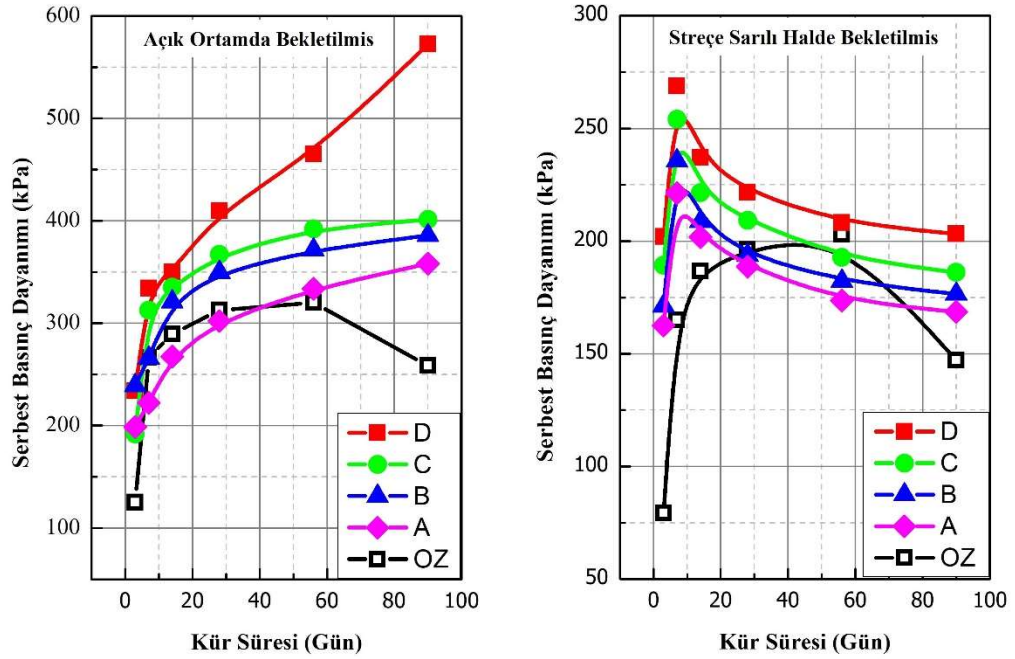
**Şekil 4.53 :** Serbest basınç dayanımı deneyinde kullanılan cihaz ve deneyin yapılışı.

Çizelge 4.11’de doğal haldeki zeminin (OZ) ve enjeksiyon yapılmış numunelerin serbest basınç dayanımı (SBD) değerleri gösterilmiştir. Serbest basınç dayanımı değerleri kırım günlerine göre ve bekletildikleri kür koşullarına göre ayrı ayrı verilmiştir.

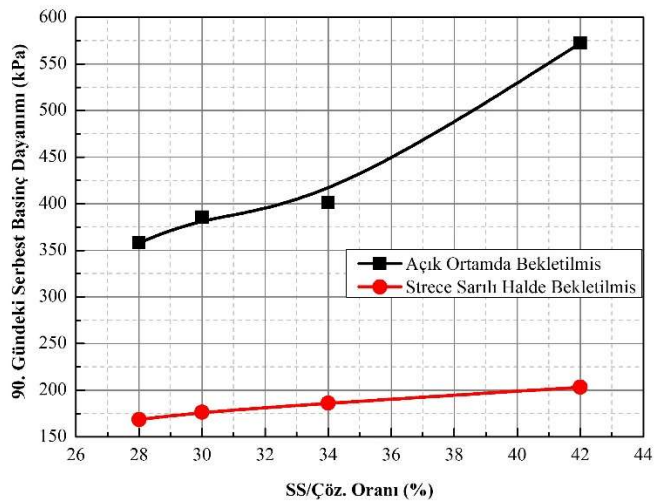
**Çizelge 4.11 :** Numunelerin serbest basınç dayanımı değerleri.

Oranlar	Kür Koşulu	Serbest Basınç Dayanımı (kPa)					
		3. Gün	7. Gün	14. Gün	28. Gün	56. Gün	90. Gün
OZ	Açık	125,140	266,251	289,541	312,832	320,187	258,405
	Streçli	79,330	165,152	186,804	196,250	203,130	147,100
Oran A	Açık	198,585	222,332	267,366	302,149	333,654	358,147
	Streçli	162,520	221,246	201,843	188,647	173,680	168,621
Oran B	Açık	239,031	265,833	320,961	349,652	371,594	385,624
	Streçli	171,200	235,624	208,704	193,651	182,265	176,489
Oran C	Açık	191,822	312,637	335,226	367,356	392,145	401,265
	Streçli	189,265	253,985	221,453	209,145	192,732	186,146
Oran D	Açık	233,871	334,133	350,024	409,618	465,125	572,337
	Streçli	201,976	268,807	237,127	221,677	208,245	203,157

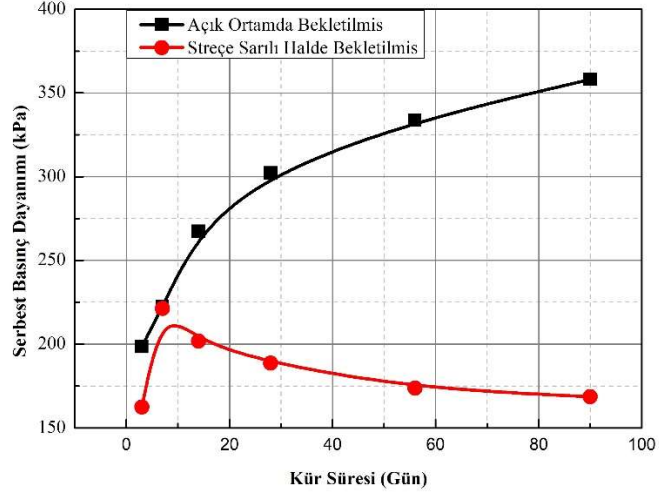
Şekil 4.54’de doğal haldeki zemin ile dört farklı kimyasal solüsyonla enjeksiyonu yapılmış olan numunelerinin serbest basınç değerleri açık ortamda bekletilmiş ve streçe sarılı halde bekletilmiş olarak ayrı ayrı gösterilmiştir. Şekil 4.55’de numunelerin 90. gündeki serbest basınç değerleri SS/Çöz. oranına bağlı olarak gösterilmiştir. Şekil 4.56’da Oran A, Şekil 4.57’de Oran B, Şekil 4.58’de Oran C, Şekil 4.59’da ise Oran D için açık ortamda ve streçli olarak bekletilen numunelerin serbest basınç dayanımları zamana bağlı olarak karşılaştırılmıştır.



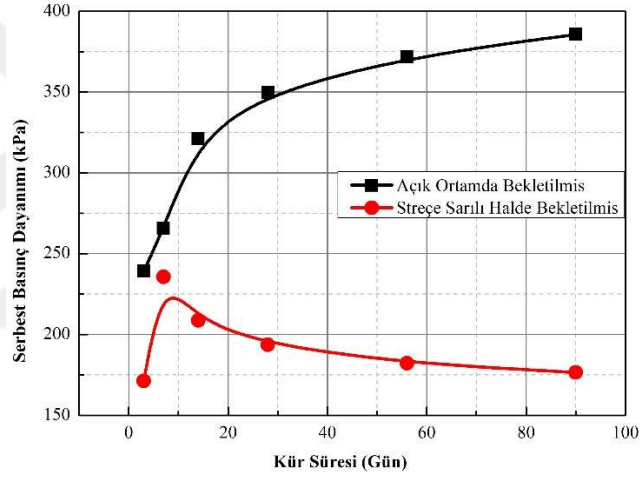
Şekil 4.54 : Açık ortamda bekletilen ve streçli halde bekletilen numunelerin serbest basınç dayanımlarının zamana göre değişimini gösteren grafik.



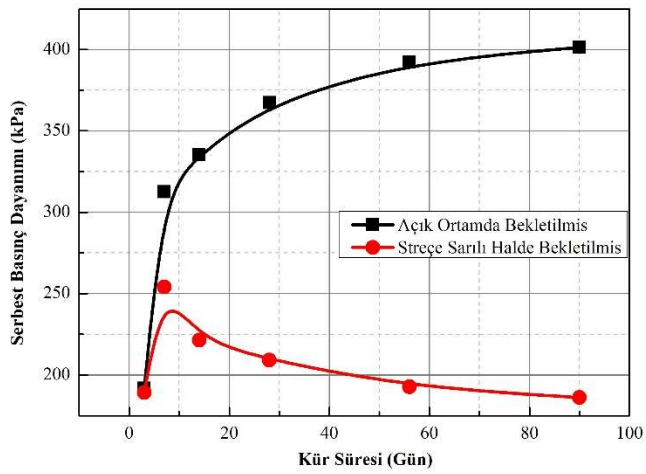
Şekil 4.55 : Numunelerin 90. gündeki serbest basınç değerlerini SS/Çöz. oranına bağlı olarak gösteren grafik.



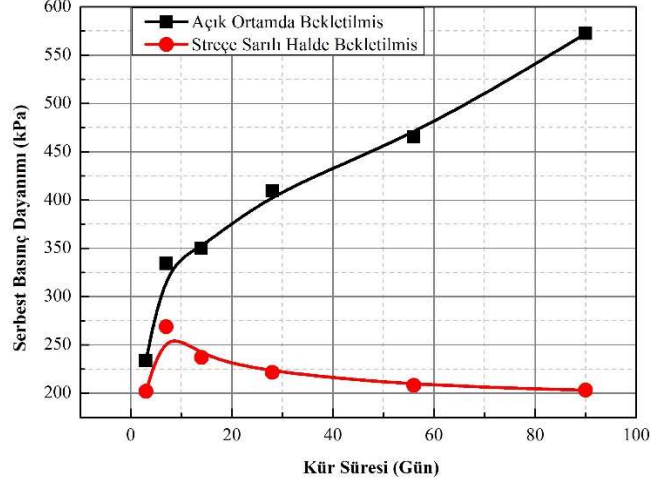
Şekil 4.56 : Oran A ile enjeksiyonu yapılan numunelerin serbest basınç dayanımlarını gösteren grafik.



Şekil 4.57 : Oran B ile enjeksiyonu yapılan numunelerin serbest basınç dayanımlarını gösteren grafik.



Şekil 4.58 : Oran C ile enjeksiyonu yapılan numunelerin serbest basınç dayanımlarını gösteren grafik.



**Şekil 4.59** : Oran D ile enjeksiyonu yapılan numunelerin serbest basınç dayanımlarını gösteren grafik.

Yapılan serbest basınç dayanımı deneylerinin sonuçları değerlendirildiğinde en yüksek SBD değeri (572,337 kPa) açık ortamda bekletilen ve Oran D ile hazırlanan numunenin 90. gününde elde edildiği gözlenmiştir. En düşük SBD değeri (162,520 kPa) ise streçli olarak bekletilen ve Oran A ile hazırlanan numunenin 3. gününde elde edilmiştir.

Doğal haldeki organik zemine yapılan serbest basınç dayanımı deneyleri sonucunda açık ortamda bekletilen numunelerin 90. günde SBD değeri 258,405 kPa olarak belirlenmiştir. Streçli olarak bekletilen doğal haldeki organik zeminin SBD 90. günde 147,100 olarak belirlenmiştir. Doğal organik zeminin SBD değerleri 56. Güne kadar artış göstermiş daha sonra 90. güne kadar azalma eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir.

Enjeksiyonu %28 SS/Çöz. oranıyla yapılan numuneler arasında en yüksek değer (358,147 kPa) açık ortamda bekletilen numunenin 90. gününde, en düşük değer (162,520 kPa) ise streçli olarak bekletilen numunenin 3. gününde tespit edilmiştir.

Enjeksiyon yapılırken %30 SS/Çöz. oranıyla hazırlanan solüsyon kullanılan numuneler arasında en yüksek değer (385,624 kPa) açık ortamda bekletilen numunenin 90. gününde, en düşük değer (171,200 kPa) ise streçli olarak bekletilen numunenin 3. gününde tespit edilmiştir.

Enjeksiyon yapılırken %34 SS/Çöz. oranıyla hazırlanan solüsyon kullanılan numuneler arasında en yüksek değer (401,265 kPa) açık ortamda bekletilen numunenin 90. gününde, en düşük değer (186,146 kPa) ise streçli olarak bekletilen numunenin 90. gününde elde edilmiştir. Enjeksiyonu %42 SS/Çöz. oranıyla yapılan numuneler arasında en yüksek değer (572,337 kPa) açık

ortamda bekletilen numunenin 90. gününde, en düşük değer (201,976 kPa) ise streçli olarak bekletilen numunenin 3. gününde tespit edilmiştir.

Açıkta bekletilen numunelerin tamamında geçen zamanla birlikte serbest basınç dayanımlarında artış gerçekleştiği belirlenmiştir. SBD’da gerçekleşen bu artış ilk 28 gün oldukça hızlı iken 28. günden sonra serbest basınç dayanımının artış hızı azalma eğilimindedir. Streçli olarak bekletilen numunelerde ise ilk yedi gün SBD değerleri arttıktan sonra 14. günden itibaren sürekli olarak bir düşüş gerçekleşmektedir. Açık ortamda ve streçli olarak bekletilen numuneler kendi içinde kıyaslandığında, her oran için (Oran A, Oran B, Oran C, Oran D) açıkta bekletilen numunelerin serbest basınç dayanımlarının streçli olarak bekletilen numunelere göre yaklaşık iki kat daha fazla dayanım verdiği belirlenmiştir.

Şekil 4.60’da numunelerin serbest basınç dayanımı deneyindeki tipik kırılma şekilleri gösterilmiştir. Tüm oranlarda 90. ve 56. günde kırılan numunelerde 45° açıyla kırılma gerçekleşirken 28., 14., 7. ve 3. günde gerçekleştirilen serbest basınç dayanımı deneylerinde 90° açıyla kırılma gerçekleştiği gözlemlenmiştir.



**Şekil 4.60** : Serbest basınç dayanımı deneyi yapılan numunelerin tipik kırılma şekilleri.

#### 4.8 Enjeksiyon Yapılmış Numunelerin Permeabilite Katsayılarının Belirlenmesi

Sodyum silikat ve borik asit ile hazırlanan dört farklı solüsyon kullanılarak enjeksiyonları tamamlanmış numunelere permeabilite deneyleri yapılmıştır. Deneyler Bursa Teknik Üniversitesi, Geoteknik Laboratuvarında bulunan ve 40 adet numuneye aynı anda deney yapma imkanı sağlayan deney düzeneğinde yapılmıştır. Deneylerin tamamı hidrolik eğim 18 olacak şekilde tamamlanmıştır. Deneyler ASTM D 5856-95 standardına uygun olarak yürütülmüştür [82].

Permeabilite deneylerinde doğal haldeki zemin ve her bir solüsyon ile enjeksiyonu tamamlanmış numunelerden hazırlanmıştır. Numunelerin enjeksiyondan sonra jelleşmelerini tamamlaması beklenmiş sonra moldlardan çıkarılmadan düşen seviyeli permeabilite deney düzeneğine bağlanmıştır (Şekil 4.61).



Şekil 4.61 : Düşen seviyeli permeabilite deney düzeneği ve numuneler.

Numunelerin 3., 28., 56. ve 90. günlerde düşen seviyeli permeabilite ölçümleri alınmış ve alınan ölçümler Denklem 4.2'ye yerleştirilmiştir. Hesaplamalar sonucunda numunelerin permeabilite katsayıları (k) belirlenmiştir. Aynı solüsyondaki her üç solüsyonun permeabilite katsayılarının ortalamaları alınmıştır. Enjeksiyon yapılmadan

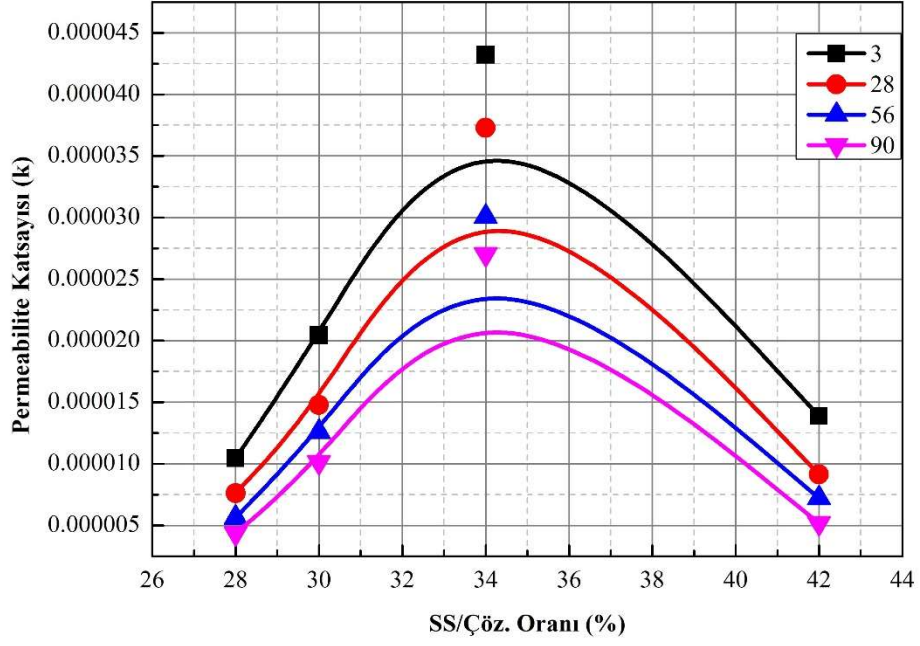
deney düzeneğine bağlanan numuneler ile enjeksiyonu tamamlanmış numunelerin permeabilite katsayısı (k) değerleri Çizelge 4.12’de verilmiştir.

**Çizelge 4.12 :** Numunelerin permeabilite katsayıları.

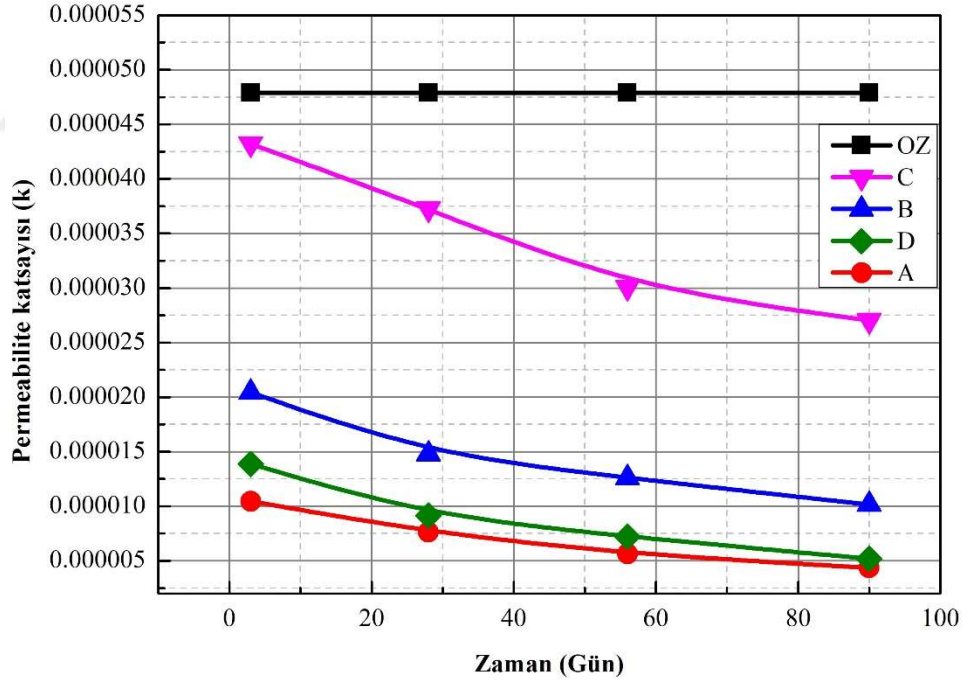
Numune Türü	3. Gün	28. Gün	56. Gün	90. Gün
Doğal zemin	0,000047883	0,000047883	0,000047883	0,000047883
Oran A	0,000010458	0,000007617	0,000005628	0,000004358
Oran B	0,000020422	0,000014772	0,000012591	0,000010140
Oran C	0,000043207	0,000037277	0,000030070	0,000027029
Oran D	0,000013859	0,000009138	0,000007219	0,000005185

Çizelge 4.12 incelendiğinde enjeksiyon yapılmamış olan doğal haldeki organik zeminin permeabilite katsayısı (k)  $4,79 \times 10^{-5}$  cm/sn, %28 SS/Çöz. oranına sahip (Oran A) solüsyonda permabilite katsayısı (k)  $4,36 \times 10^{-6}$  ile  $1,05 \times 10^{-5}$  arasında, %30 SS/Çöz. oranına sahip (Oran B) solüsyonda permabilite katsayısı (k)  $1,01 \times 10^{-5}$  ile  $2,04 \times 10^{-5}$  arasında, %34 SS/Çöz. oranına sahip (Oran C) solüsyonda permabilite katsayısı (k)  $2,70 \times 10^{-5}$  ile  $4,32 \times 10^{-5}$  arasında ve %42 SS/Çöz. oranına sahip (Oran D) solüsyonda permabilite katsayısı (k)  $5,19 \times 10^{-6}$  ile  $1,39 \times 10^{-5}$  arasında değiştiği görülmektedir.

Organik zemin malzemesine permeasyon enjeksiyonu yapılarak permeabilite katsayısı (k) yaklaşık 10 kat azaltılmıştır. Organik zemine enjekte edilen kimyasal solüsyonların sodyum silikat yüzdesi en az olan Oran A permeabilite deneyinde en etkili olan karışım olmuştur. Permeabilite katsayıları, SS/Çöz. oranı %34 olduğunda en yüksek değerine ulaşmaktadır. Şekil 4.62’de permeabilite katsayılarının (k) SS/Çöz. oranına bağlı olarak değişimi gösterilmiştir. Permeabilite katsayıları zamana bağlı olarak incelenirse enjeksiyon yapılan numunelerin permeabilite katsayılarının ilk 28 gün daha hızlı bir azalma gösterdiği, 28. günden sonra nispeten daha yavaş bir azalma ile ilerdiği tespit edilmiştir. Permeabilite katsayılarının (k) zamana bağlı olarak değişimi Şekil 4.63’te gösterilmiştir.



Şekil 4.62 : Permeabilite katsayılarının SS/Çöz. oranına göre değişimini gösteren grafik.



Şekil 4.63 : Permeabilite katsayılarının zamana bağlı olarak değişimini gösteren grafik.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneylerde, reaktant olarak tercih edilen yerli üretim borik asitin Merck firması tarafından üretilen sodyum silikat ile karıştırılmasıyla elde edilen solüsyonun aynı rölatif sıklıktaki organik zemin numunelerine enjeksiyonunun gerçekleştirilmesi ve enjeksiyon deneyleri sonucunda numunelerin serbest basınç dayanımı ve permeabilite katsayıları gibi mühendislik özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Deneysel çalışmalarda solüsyonların jelleşme süresi, sinerez, vizkozite gibi reolojik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla farklı oranlarda karışımlar 20 °C ortam sıcaklığında hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımların jel yapıları incelenmiştir ve jel yapıları uygun olan oranlardaki karışımlar 30 °C ortam sıcaklığında tekrar hazırlanmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda jelleşme süresinin reaktant miktarı, SS/Çöz. oranı ve ortam sıcaklığı ile doğrudan ilişkili olduğu belirlenmiştir. Solüsyonların içerisindeki sodyum silikat yüzdesi arttıkça jelleşme süresinin uzadığı, reaktant olarak kullanılan borik asit miktarının artmasıyla jelleşme süresinin önemli ölçüde azaldığı ve ortam sıcaklığının artmasıyla da jelleşme süresinin kısaldığı tespit edilmiştir.

Hazırlanan karışımların sinerez miktarları 3., 7., 14., 28., 56., 90. ve 150. günlerde ölçülmüştür. Sinerez yüzdesini, reaktant malzeme miktarı ve karışım içerisindeki sodyum silikat yüzdesi etkilemektedir. Çalışmalarda sinerez yüzdesinin 56. güne kadar hızlı bir şekilde arttığı 56. günden sonra artış hızında azalma olmasına rağmen artışın devam ettiği gözlenmiştir. Karışımlardaki reaktant malzeme olan borik asit miktarının artmasıyla sinerez yüzdesinin azaldığı ve aynı borik asit miktarına sahip karışımlarda artan SS./Çöz. oranıyla borik asit miktarının sinerez yüzdesine olan etkisinin azaldığı belirlenmiştir. Solüsyonlardaki sodyum silikat yüzdesinin artması sonucunda da sinerez yüzdesinin arttığı tespit edilmiştir. Karışımların viskozite değerlerinin incelenmesiyle, karışım içerisindeki borik asit miktarının ve sodyum silikat yüzdesinin artmasıyla viskozitenin arttığı sonucuna varılmıştır.

Enjeksiyon deneylerinde kullanılacak solüsyonlar belirlenirken, hazırlanan karışımların reolojik özellikleri ve jel yapıları dikkate alınmıştır. Enjeksiyonda kullanılmak üzere dört farklı oran belirlenmiştir. Bu oranlar; %28 SS/Çöz. oranına sahip Oran A, %30 SS/Çöz. oranına sahip Oran B, %34 SS/Çöz. oranına sahip Oran C

ve %42 SS/Çöz. oranına sahip Oran D'dir. Enjeksiyonlar yapılırken permeasyon enjeksiyonu üst sınırı olan 5 bar geçilmemiştir. Numunelerin tamamında enjeksiyon başarılı bir şekilde tamamlanmıştır. Solüsyon içerisindeki sodyum silikat yüzdesinin artmasıyla viskozite de arttığı için daha yüksek basınçta enjeksiyon yapılmıştır.

Enjeksiyon işlemi başarılı bir şekilde tamamlanan numuneler açık, streçli ve kür havuzunda olmak üzere üç farklı kür koşulunda bekletilmiştir. Enjeksiyonu tamamlanmış numunelere 3., 7., 14., 28., 56. ve 90. günlerde serbest basınç dayanımı deneyi yapılmıştır. Yapılan serbest basınç dayanımı deneyleri sonucunda en yüksek SBD değeri, açık ortamda bekletilen ve Oran D ile hazırlanan numunenin 90. gününde 572,337 kPa olarak elde edilmiştir. En düşük SBD değeri ise streçli olarak bekletilen ve Oran A ile hazırlanan numunenin 3. gününde 162,520 kPa olarak belirlenmiştir.

Doğal haldeki organik zemine yapılan serbest basınç dayanımı deneyleri sonucunda en yüksek SBD değerinin açık ortamda bekletilen numunelerin 56. gününde 320,187 kPa olduğu belirlenmiştir. Streçli olarak bekletilen doğal haldeki organik zeminin en yüksek SBD değeri 56. günde 203,130 olarak belirlenmiştir. Doğal organik zeminin SBD değerlerinin 28. güne kadar hızlı bir şekilde olmak üzere 56. güne kadar artış gösterdiği daha sonra 90. güne kadar azalma eğiliminde olduğu tespit edilmiştir.

Enjeksiyon yapılırken %28 SS/Çöz. oranında solüsyon kullanılan numuneler arasında açık ortamda bekletilen numunenin 90. gününde en yüksek değer olan 358,147 kPa elde edilmiştir. En düşük değer ise streçli olarak bekletilen numunenin 3. gününde 162,520 kPa olarak tespit edilmiştir. Enjeksiyonu %30 SS/Çöz. oranıyla hazırlanan solüsyon kullanılan numuneler arasında en yüksek değer 385,624 kPa olarak açık ortamda bekletilen numunenin 90. gününde, en düşük değer ise 171,200 kPa streçli olarak bekletilen numunenin 3. gününde tespit edilmiştir. Enjeksiyon yapılırken %34 SS/Çöz. oranıyla hazırlanan solüsyon kullanılan numuneler arasında en yüksek değer, açık ortamda bekletilen numunenin 90. gününde 401,265 kPa olarak belirlenmiştir. En düşük değer ise streçli olarak bekletilen numunenin 90. gününde 186,146 kPa elde edilmiştir. Enjeksiyonu %42 SS/Çöz. oranıyla yapılan numuneler arasında en yüksek değer açık ortamda bekletilen numunenin 90. Gününde 572,337 kPa olarak tespit edilmiştir. En düşük değer ise streçli olarak bekletilen numunenin 3. gününde 201,976 kPa olarak belirlenmiştir.

Açık ortamda bekletilmiş numunelerin tümünde geçen zamanla birlikte serbest basınç dayanımlarında artış gerçekleşmiştir. SBD’da gerçekleşen artış ilk 28 gün oldukça hızlı iken 28. günden sonra serbest basınç dayanımının artış hızı azalmıştır. Streçli olarak bekletilmiş numunelerin SBD değerleri ise ilk yedi gün arttıktan sonra 14. günden itibaren SBD değerlerinin 90. güne kadar sürekli olarak azalma gösterdiği tespit edilmiştir. Enjeksiyonu dört farklı oranda solüsyon kullanılarak yapılan numunelerin açık ortamda ve streçli olarak bekletilmiş olanları kıyaslandığında açıkta bekletilen numunelerin serbest basınç dayanımlarının streçli olarak bekletilen numunelerin serbest basınç dayanımlarından yaklaşık iki kat daha fazla olduğu belirlenmiştir.

Doğal haldeki organik zemin ile enjeksiyonu yapılmış numunelerin 90. gündeki SBD değerleri karşılaştırıldığında Oran A için SBD değerinin permeasyon enjeksiyonu sonucunda yaklaşık %40, Oran B için yaklaşık %50, Oran C için yaklaşık %55 ve Oran D için ise yaklaşık %120 artış gösterdiği tespit edilmiştir. Bu değerlendirmeler sonucunda sodyum silikat-borik asit karışımlarının kullanıldığı permeasyon enjeksiyonu yönteminin organik zemin üzerinde dayanıma pozitif etkisinin olduğu ve solüsyon içerisindeki sodyum silikat yüzdesinin artmasıyla SBD değerinin daha fazla arttığı belirlenmiştir.

Permeabilite deney sonuçları incelendiğinde enjeksiyon yapılmamış olan doğal haldeki organik zeminin permeabilite katsayısının (k)  $4,79 \times 10^{-5}$  cm/sn olduğu belirlenmiştir. Dört farklı solüsyonla enjeksiyonu yapılmış olan numunelerde ise %28 SS/Çöz. oranına sahip solüsyonda permabilite katsayısı (k)  $4,36 \times 10^{-6}$  ile  $1,05 \times 10^{-5}$  arasında, %30 SS/Çöz. oranına sahip solüsyonda permabilite katsayısı (k)  $1,01 \times 10^{-5}$  ile  $2,04 \times 10^{-5}$  arasında, %34 SS/Çöz. oranına sahip solüsyonda permabilite katsayısı (k)  $2,70 \times 10^{-5}$  ile  $4,32 \times 10^{-5}$  arasında ve %42 SS/Çöz. oranına sahip solüsyonda permabilite katsayısı (k)  $5,19 \times 10^{-6}$  ile  $1,39 \times 10^{-5}$  arasında olduğu tespit edilmiştir.

Organik zemine enjekte edilen kimyasal solüsyonların arasında sodyum silikat yüzdesi en düşük olan Oran A (%28 SS/Çöz.) permeabilite deneyinde en iyi sonucu veren karışım olmuştur. Permeabilite katsayıları %34 SS/Çöz. oranında en yüksek değerine ulaşmıştır. Organik zemin malzemesine permeasyon enjeksiyonu yapılarak permeabilite katsayısı (k) yaklaşık 10 kat azaltılmıştır. Permeabilite katsayıları zamana bağlı olarak incelendiğinde enjeksiyon yapılan numunelerin permeabilite

katsayılarının ilk 28 gün daha hızlı bir azalma gösterdiği, 28. günden sonra nispeten daha yavaş bir azalma ile ilerdiği tespit edilmiştir.

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda sodyum silikat-borik asit karışımları kullanılarak organik zemin malzemesine kolaylıkla permeasyon enjeksiyonu yapılabildiği görülmüştür. Bu çalışma literatürde organik zemin malzemesine silikat enjeksiyonu yapılan ilk çalışma olmuştur. Öneri olarak; organik zemin malzemesine permeasyon enjeksiyonu yapılmak üzere farklı kimyasal malzemeler araştırılıp uygun özelliklere sahip olan malzemeler ile enjeksiyon denemeleri yapılabilir. Böylece hem malzeme maliyetinden tasarruf edilebilir hem de enjeksiyonların doğaya olan negatif etkisi azaltılabilir.



## KAYNAKLAR

- [1] **Akpila, S., & Jaja, G.** (2019). Reliability of Soil and Ground Improvement Techniques on Peaty Clay Soil—A Review. *Int. J. Trend Sci. Res. Dev*, 3, 682-690.
- [2] **Karol, R. H.** (2003). *Chemical grouting and soil stabilization, revised and expanded (Vol. 12)*: Crc Press.
- [3] **Nonveiller, E.** (2013). *Grouting theory and practice. (1)*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Science Publishers B.V.
- [4] **Rawlings, C., Hellowell, E., & Kilkenny, W.** (2000). *Grouting for ground engineering*. London,UK:Construction Industry Research & Information Assoc.
- [5] **Avcı, E.** (2015). *Ultra İnce Taneli (SPİNOR A6) Süspansiyon Enjeksiyonunun,Solüsyon Türü Kimyasal Enjeksiyonlara Alternatifliğinin Araştırılması. (Doktora Tezi), Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.*
- [6] **ASTM.** (2018). *Standard Classification of Peat Samples by Laboratory Testing ASTM, D4427-18*. Pennsylvania,USA: ASTM International.
- [7] **ASTM.** (2020). *Standard Test Methods for Determining the Water (Moisture) Content, Ash Content, and Organic Material of Peat and Other Organic Soils ASTM, D2974-20e1*. Pennsylvania,USA: ASTM International.
- [8] **Hanifi Çanakçı, F. Ç.** (2011). *Organik zemin içerisindeki kum oranının kompaksiyon parametreleri üzerine etkisinin incelenmesi. Paper presented at the 4. Geoteknik Sempozyumu, Çukurova Üniversitesi, Adana.*
- [9] **Mesri, G., Stark, T., Ajlouni, M., Chen, C. J. J. o. G., & Engineering, G.** (1997). Secondary compression of peat with or without surcharging. *123(5)*, 411-421.
- [10] **Mesri, G., Ajlouni, M. J. J. o. G., & Engineering, G.** (2007). Engineering properties of fibrous peats. *133(7)*, 850-866.
- [11] **Hartlén, J., & Wolski, W.** (1996). *Embankments on organic soils*: Elsevier.
- [12] **Mutalib, A. A.** (1992). *Characterization, distribution and utilization of peat in Malaysia. Paper presented at the Proceedings of the International Symposium on Tropical Peatland. Kuching, Sarawak, Malaysia, 6-10 May 1991.*
- [13] **Çayabatmaz, Ş.** (2012). *Organik Zeminlerin İyileştirilmesi Ve Kayseri Bölgesi Organik Zeminlerinin İncelenmesi. (Yüksek Lisans Tezi), Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.*
- [14] **Soil Survey Staff.** (1960). *Soil Classification, A Compherensive System*. SCS USDA. Washington DC. U.S. Government Printing Office, Seventh Approximation.
- [15] **Soil Survery Staff.** (2010). *Keys to Soil Taxonomy*. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, Eleventh Edition.

- [16] **Huat, B. B., Asadi, A., Kazemian, S. J. A. J. o. E., & Sciences, A.** (2009). Experimental investigation on geomechanical properties of tropical organic soils and peat. 2(1), 184-188.
- [17] **Huat, B. K.** (2004). Organic and peat soils engineering: Penerbit Universiti Putra Malaysia.
- [18] **Malkawi, A. I. H., Alawneh, A. S., & Abu-Safaqah, O. T. J. A. C. S.** (1999). Effects of organic matter on the physical and the physicochemical properties of an illitic soil. 14(5-6), 257-278.
- [19] **Myślińska, E. J. G. Q.** (2003). Classification of organic soils for engineering geology. 47, 39-42.
- [20] **Huang, P.-T., Patel, M., Santagata, M. C., & Bobet, A.** (2009). Classification of organic soils.
- [21] **ASTM.** (2006). Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System) ASTM D 2487. West Conshohocken, Pennsylvania, USA: ASTM International.
- [22] **ASTM.** (1998). Standart Test Method for pH of Peat Materials ASTM D2976-71. Pennsylvania,USA: ASTM International.
- [23] **ASTM.** (2010). Standart Test Method for Volume Mass, Moisture-Holding Capacity, and Porosity of Saturated Peat Materials ASTM D2980-04. Pennsylvania,USA: ASTM International.
- [24] **AASHTO.** (2004). Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes M 145-91: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- [25] **Nicholson, P. G.** (2014). Soil improvement and ground modification methods: Butterworth-Heinemann.
- [26] **Houlsby, A. C.** (1990). Construction and design of cement grouting: a guide to grouting in rock foundations (Vol. 67): John Wiley & Sons.
- [27] **Glossop, R.** (1961). The invention and development of injection processes Part II: 1850–1960. 11(4), 255-279.
- [28] **Winterkorn, H. F., & Pamukcu, S.** (1991). Soil stabilization and grouting Foundation engineering handbook (pp. 317-378): Springer.
- [29] **Warner, J.** (2004). Practical handbook of grouting: soil, rock, and structures: John Wiley & Sons.
- [30] **Coduto, D. P., Mollamahmutoglu, M., & Kayabali, K.** (2006). Geoteknik mühendisliği: ilkeler ve uygulamalar: Gazi Kitabevi.
- [31] **Mitchell, J. K.** (1981). Soil improvement-state of the art report. Paper presented at the Proc., 11th Int. Conf. on SMFE.
- [32] **Welsh, J.** (1986). Construction Consideration for Ground Modification Projects. Paper presented at the International Conference on Deep Foundations, Beijing.
- [33] **Boulanger, R. W., & Hayden, R. F. J. J. o. g. e.** (1995). Aspects of compaction grouting of liquefiable soil. 121(12), 844-855.
- [34] **Wakeman, R. C., Evenson, A., Morgan, T., Pastore, J., & Blackburn, J. T.** (2010). Compaction Grouting for Seismic Mitigation of Sensitive Urban Sites.
- [35] **Xanthakos, P. P., Abramson, L. W., & Bruce, D. A.** (1994). Ground control and improvement: John Wiley & Sons.
- [36] **Littlejohn, S.** (2003). The development of practice in permeation and compensation grouting: a historical review (1802–2002): part 1 permeation grouting Grouting and Ground Treatment (pp. 50-99).

- [37] **Brill, G. T., Burke, G. K., & Ringen, A. R.** (2003). A ten-year perspective of jet grouting: advancements in applications and technology *Grouting and Ground Treatment* (pp. 218-235).
- [38] **Drooff, E. R., Furth, A. J., & Scarborough, J. A.** (1995). Jet grouting to support historic buildings. Paper presented at the Foundation Upgrading and Repair for Infrastructure Improvement.
- [39] **Essler, R., & Yoshida, H.** (2004) *Jet grouting*. 2, 160-196.
- [40] **USA Army Corps of Engineers.** (1995). *Engineer Manual 1110-1-3500*. Washington DC: USACE, 1-34.
- [41] **Henn, R. W.** (1996). *Practical guide to grouting of underground structures*: Thomas Telford.
- [42] **Bruce, D.** (1994). Small-diameter cast-in-place elements for load-bearing and in situ earth reinforcement. *Ground control and improvement*, PP Xanthakos, LW Abramson, and DA Bruce, eds., Wiley Interscience, New York.
- [43] **Tallard, G., & Caron, C.** (1977). *Chemical Grouts for Soils: Vol. I Available Materials: United States*. Federal Highway Administration. Offices of Research & Development.
- [44] **Haji-Bakar, I.** (1990). Mechanical properties and behaviour of silicate and acrylamide grouted sand. University of Bradford.
- [45] **Krizek, R. J., Michel, D. F., Hetal, M., & Borden, R. H.** (1992). Engineering properties of acrylate polymer grout. 1(30), 712-724.
- [46] **Berry, R., & Magill, F.** (1992). Chemical grouting: what's new and what's being done this decade. 58.
- [47] **La Penta, B. A., Karol, R. H., & Arnold, C. H.** (1992). Tunnel Seepage Control by the Interior Grouting Method. Paper presented at the Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics.
- [48] **Clarke, W. J.** (1982). Performance characteristics of acrylate polymer grout. Paper presented at the Grouting in Geotechnical Engineering.
- [49] **Thorburn, S., & Littlejohn, G. S.** (1992). *Underpinning and retention*: CRC Press.
- [50] **en Souterrain, A. F. D. T.** (1991). Recommendations on grouting for underground works. 6(4), 383-461.
- [51] **Schwarz, L. G.** (1997). Roles of rheology and chemical filtration on injectability of microfine cement grouts. (Doktora Tezi), Northwestern university, Illionis.
- [52] **Warner, J.** (1972). Strength properties of chemically solidified soils. 98(11), 1163-1185.
- [53] **Clough, G. W., Kück, W. M., & Kasali, G.** (1979). Silicate-stabilized sands. 105(1), 65-82.
- [54] **Diefenthal, D., Borden, R., Baker, W. H., & Krizek, R.** (1979). Strength and stiffness of silicate grouted sand with different stress histories. 2(4), 200-205.
- [55] **Kaga, M., & Yonekura, R.** (1991). Estimation of strength of silicategrouted sand. 31(3), 43-59.
- [56] **Ata, A. V., Kumaraswamy.** (1998). Cohesive and adhesive properties of silicate grout on grouted-sand behavior. 124(1), 38-44.
- [57] **Anagnostopoulos, C. A.** (2005). Laboratory study of an injected granular soil with polymer grouts. 20(6), 525-533.

- [58] **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.
- [59] **Holmboe, M., Wold, S., & Petterson, T.** (2011). Effects of the injection grout Silica sol on bentonite. 36(17-18), 1580-1589.
- [60] **Porcino, D., Ghionna, V. N., Granata, R., & Marciànò, V.** (2016). Laboratory determination of mechanical and hydraulic properties of chemically grouted sands. 11(2), 164-175.
- [61] **Mollamahmutoğlu, M., & Avcı, E.** (2016). Syneresis effect on the permeability of chemically grouted sand. 49(4), 327-335.
- [62] **Avci, E., & Mollamahmutoğlu, M.** (2019). Syneresis dependent shear strength parameters of sodium silicate grouted sands. 52(1), 99-109.
- [63] **Arman, A. M., George A.** (1970). Stabilization of organic soils with lime.
- [64] **Kazemian, S., Prasad, A., Huat, B. B., Ghiasi, V., & Ghareh, S.** (2012). Effects of cement–sodium silicate system grout on tropical organic soils. 37(8), 2137-2148.
- [65] **Tastan, E. O., Edil, T. B., Benson, C. H., & Aydilek, A. H.** (2011). Stabilization of organic soils with fly ash. 137(9), 819-833.
- [66] **Kazemian, S., Prasad, A., Huat, B. B., Bazaz, J. B., Abdul Aziz, F. N., & Mohammad Ali, T. A.** (2011). Influence of cement–sodium silicate grout admixed with calcium chloride and kaolinite on sapric peat. 17(3), 309-318.
- [67] **Moayedi, H., Huat, B. B., Kazemian, S., & Daneshm, S.** (2012). Stabilization of organic soil using sodium silicate system grout. 7(9), 1395-1402.
- [68] **Thamer, N., Huat, B. B., Aburkaba, E., Mohamed, T. A., & Kazemian, S.** (2015). Effect of Formamide, calcium chloride and aluminum chloride on stabilization of peat with cement-sodium silicate grout. 31(S4), 202-206.
- [69] **ASTM.** (2019). Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass ASTM D2216-19. Pennsylvania,USA: ASTM International.
- [70] **TSE.** (2007). İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuar Deneyleleri TS 1900-1. Ankara,Türkiye: TSE.
- [71] **ASTM.** (2002). Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solid by Water Pycnometer ASTM D854-14. Pennsylvania,USA: ASTM International.
- [72] **ASTM.** (2007). Standard Test Method for Particle Size Analysis of Soils ASTM D422-63. Pennsylvania,USA: ASTM International.
- [73] **ASTM.** (2010). Standart Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit and Plasticity Index of Soils ASTM D4318-10e1. Pennsylvania,USA: ASTM International.
- [74] **ASTM.** (1993). Standard Test Methods for Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Other Organic Soils ASTM D-2974-87. Pennsylvania,USA: ASTM International.
- [75] **ASTM.** (2012). Standart Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standad Effort (12400 ft-lbf/ft<sup>3</sup>- 600 kN-m/m<sup>3</sup>) ASTM D698-12e2. Pennsylvania,USA: ASTM International.
- [76] **Das, B. M., & Sobhan, K.** (2013). Principles of Geotechnical Engineering. Stamford,USA: Cengage Learning.

- [77] **Holtz, R. D., Kovacs, W. D.** (2010). Geoteknik Mühendisliğine Giriş (K. Kayabalı, Trans.). Ankara,Türkiye: Gazi Kitabevi.
- [78] **ASTM.** (2003). Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter D5084-03. Pennsylvania,USA: ASTM International.
- [79] **Sodyum silikatın fiziksel ve kimyasal özellikleri** (t.y.). Erişim: 20.06.2022, from [https://www.merckmillipore.com/TR/tr/product/msds/MDA\\_CHEM-105621?Origin=PDP](https://www.merckmillipore.com/TR/tr/product/msds/MDA_CHEM-105621?Origin=PDP)
- [80] **Borik asit fiziksel ve kimyasal özellikleri** (t.y.). Erişim : 20.06.2022, from <https://www.etimaden.gov.tr/storage/pages/March2019/1-borik-asit1.pdf>
- [81] **ASTM.** (2002). Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength Index of Chemical Grouted Soils ASTM C 4219-02. Pennsylvania,USA: ASTM International.
- [82] **ASTM.** (2002). Standart Test Methods for Measurement of Hyraulic Conductivity of Porous Material Using a Rigid-Wall, Compaction-Mold Permeameter ASTM D5856-95. Pennsylvania,USA: ASTM International.

## **EKLER**

**EK A:** Hazırlanan sodyum silikat-borik asit solüsyonlarındaki oranlar



## EK A

Çizelge A.0.1 : Solüsyonlarda Tercih Edilen Oranlar.

Deney No	Sodyum Silikat (ml)	Su (ml)	Borik Asit (g)	Borik Asidin Su İçerisindeki Kütlece Yüzdesi (%)	20 °C'de Jelleşme Süresi (dk)
1	28	72	1.8	2.50	550
2	28	72	2.0	2.79	87
3	28	72	2.1	2.92	44
4	28	72	2.2	3.06	39
5	28	72	2.3	3.19	24
6	30	70	1.8	2.57	3 gün sonra jelleşti
7	30	70	2.0	2.86	305
8	30	70	2.2	3.14	70
9	30	70	2.3	3.29	49
10	30	70	2.4	3.43	35
11	30	70	2.5	3.57	20
12	30	70	2.6	3.71	15
13	30	70	2.8	4.00	7
14	30	70	3.0	4.29	3
15	30	70	3.3	4.71	Karıştırırken jelleşti
16	32	68	1.8	2.65	Jelleşme gözlenmedi
17	32	68	2.0	2.94	3 gün sonra jelleşti
18	32	68	2.2	3.24	317
19	32	68	2.4	3.53	52
20	32	68	2.5	3.68	30
21	32	68	2.6	3.82	20
22	32	68	2.8	4.12	6
23	32	68	3.0	4.41	5
24	34	66	1.8	2.73	Jelleşme gözlenmedi
25	34	66	2.0	3.03	3 gün sonra jelleşti
26	34	66	2.2	3.33	493
27	34	66	2.4	3.64	97
28	34	66	2.5	3.79	44
29	34	66	2.6	3.94	24
30	34	66	2.8	4.24	8
31	34	66	3.0	4.55	4
32	36	64	1.8	2.81	Jelleşme gözlenmedi
33	36	64	2.0	3.13	Jelleşme gözlenmedi
34	36	64	2.2	3.44	3 gün sonra jelleşti
35	36	64	2.4	3.75	135
36	36	64	2.6	4.06	32
37	36	64	2.8	4.38	14
38	36	64	3.0	4.69	7
39	38	62	2.3	3.71	1076
40	38	62	2.4	3.87	1078
41	38	62	2.5	4.03	175
42	38	62	2.6	4.19	157
43	38	62	2.65	4.27	85
44	38	62	2.7	4.35	55

**Çizelge A.7.1 (devam) : Solüsyonlarda Tercih Edilen Oranlar.**

45	38	62	2.8	4.52	30
46	38	62	3.0	4.84	15
47	40	60	2.3	3.83	3 gün sonra jelleşti
48	40	60	2.4	4.00	3 gün sonra jelleşti
49	40	60	2.5	4.17	3 gün sonra jelleşti
50	40	60	2.6	4.33	322
51	40	60	2.7	4.50	231
52	40	60	2.8	4.67	141
53	40	60	3.0	5.00	21
54	40	60	3.3	5.50	10
55	40	60	3.5	5.83	1
56	40	60	2.2	3.67	Jelleşme gözlenmedi
57	42	58	2.2	3.79	Jelleşme gözlenmedi
58	42	58	2.3	3.97	Jelleşme gözlenmedi
59	42	58	2.4	4.14	Jelleşme gözlenmedi
60	42	58	2.5	4.31	3 gün sonra jelleşti
61	42	58	2.6	4.48	978
62	42	58	2.7	4.66	270
63	42	58	2.8	4.83	151
64	42	58	2.9	5.00	102
65	42	58	3.0	5.17	26
66	44	56	3	5.36	74
67	44	56	3.1	5.54	51
68	44	56	3.2	5.71	Karıştırırken jelleşti
69	44	56	3.3	5.89	Karıştırırken jelleşti
70	46	54	2.8	5.19	Jelleşme gözlenmedi
71	46	54	3	5.56	Karıştırırken jelleşti
72	48	52	3	5.77	Jelleşme gözlenmedi
73	48	52	3.1	5.96	Karıştırırken jelleşti
74	48	52	3.3	6.35	Karıştırırken jelleşti
75	50	50	2	4.00	Jelleşme gözlenmedi
76	50	50	2.5	5.00	Jelleşme gözlenmedi
77	50	50	2.6	5.20	Jelleşme gözlenmedi
78	50	50	2.7	5.40	Jelleşme gözlenmedi
79	50	50	2.8	5.60	Karıştırırken jelleşti
80	50	50	3	6.00	Karıştırırken jelleşti
81	50	50	3.3	6.60	Karıştırırken jelleşti
82	60	40	1.8	4.50	Jelleşme gözlenmedi
83	60	40	2	5.00	Jelleşme gözlenmedi
84	60	40	2.4	6.00	Karıştırırken jelleşti
85	60	40	2.5	6.25	Jelleşme gözlenmedi
86	60	40	2.6	6.50	Karıştırırken jelleşti
87	60	40	2.8	7.00	Karıştırırken jelleşti
88	60	40	3	7.50	Karıştırırken jelleşti
89	70	30	2	6.67	Karıştırırken jelleşti
90	70	30	2.5	8.33	Karıştırırken jelleşti

