

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SİSMİK SIVILAŞMA DENEY NUMUNELERİ İÇİN OTOMATİK HUNİ  
TASARIMI VE DENEY SONUÇLARINA ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Şenay YENİGÜN**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programı**

**HAZİRAN 2018**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SİSMİK SIVILAŞMA DENEY NUMUNELERİ İÇİN OTOMATİK HUNİ  
TASARIMI VE DENEY SONUÇLARINA ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Şenay YENİGÜN  
(501121321)**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programı**

**Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi E. Ece BAYAT**

**Eş Danışman: Doç. Dr. M. Murat MONKUL**

**HAZİRAN 2018**



İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501121321 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Şenay YENİGÜN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "SİSMİK SIVILAŞMA DENEY NUMUNELERİ İÇİN OTOMATİK HUNİ TASARIMI VE DENEY SONUÇLARINA ETKİSİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları bulunan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :** **Yard. Doç. Dr. E. Ece BAYAT** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Eş Danışman :** **Doç. Dr. M. Murat MONKUL** .....  
Yeditepe Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :** **Prof. Dr. Recep İYİSAN** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Doç. Dr. İsmail Hakkı AKSOY** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Doç. Dr. Sadık ÖZTOPRAK** .....  
İstanbul Üniversitesi

**Teslim Tarihi : 04.05.2018**  
**Savunma Tarihi : 07.06.2018**





*Aileme ve Sevdiklerime,*





## ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında bana kendileriyle çalışma olanağı sağlayan, çalışmanın her aşamasında değerli bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan, sabır ve nezaketle beni destekleyen kıymetli hocalarımdan danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Ece ESELLER BAYAT'a ve eş danışmanım Doç. Dr. M. Murat MONKUL'a sonsuz teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Ders döneminde kendilerinden aldığım derslerle bilgi birikimimi geliştiren ve sonrasında da jüri üyeleri olarak çalışmamı destekleyen değerli hocalarım Prof. Dr. Recep İYİSAN ve Doç. Dr. İsmail Hakkı AKSOY'a ve Doç. Dr. Sadık ÖZTOPRAK'a katkılarından dolayı teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışması kapsamında tasarladığımız otomatik huniyi ve numune hazırlama kalıbını hayata geçiren Şevket TEKİN'e (Şevket Hoca) ve 3 G Project Design ekibine ayrıca deneysel çalışmamı tamamlarken her türlü desteği sağlayan Yeditepe Üniversitesi ailesine ve bana duydukları güven ve verdikleri akademik destekle her anlamda beni ve çalışmalarımı destekleyen kurumum Doğu Üniversitesi'ne sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tüm bu çalışmam süresince beni anlayıp yanımda olan, desteklerini esirgemeyen aileme ve tüm sevdiklerime ayrıca çok teşekkür ederim.

Haziran 2018

Şenay YENİGÜN  
(İnşaat Mühendisi)



## İÇİNDEKİLER

	<u>Page</u>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	vii
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	ix
<b>KISALTMALAR</b> .....	xi
<b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....	xiii
<b>ÇİZELGE LİSTESİ</b> .....	xv
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	xvii
<b>ÖZET</b> .....	xxi
<b>SUMMARY</b> .....	xxiii
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Tezin Amacı .....	1
1.2 Literatür İncelemesi.....	3
1.2.1 Numune hazırlama yöntemlerinin deney sonuçlarına etkisi hakkında literatür incelemesi.....	4
1.2.2 Kum numunelerinde göreceli sıklığın sıvılaşma direncine etkisi üzerine literatür incelemesi .....	12
1.3 Hipotez .....	25
<b>2. SABİT HACİM KONTROLLÜ DİNAMİK BASİT KESME DENEY SİSTEMİ</b> .....	<b>27</b>
2.1 Basit Kesme Tanımı .....	27
2.2 Dinamik Basit Kesme Deney Sistemi ve Deney Cihazının Kurulumu .....	29
2.3 Test Prosedürü .....	32
2.3.1 Konsolidasyon aşaması .....	34
2.3.2 Dinamik basit kesme aşaması .....	34
2.4 Sabit Hacim Kontrollü Deney Sisteminde Kumların Sıvılaşma Davranışının Kuru Numunelerden Belirlenmesi.....	35
2.4.1 Temiz kum ve siltli kum için kuru ve doymuş numunelerin sıvılaşma davranışının karşılaştırılması .....	37
<b>3. DİNAMİK DENEY NUMUNELERİ İÇİN KURU HUNİ YÖNTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ</b> .....	<b>43</b>
3.1 Deneysel Çalışmada Kullanılan Zeminlerin Özellikleri .....	43
3.2 Kuru Huni Yöntemi.....	44
3.2.1 Kalıp ve vakum kullanımı .....	46
3.2.2 Otomatik çekiş hunisi tasarımı .....	49
<b>4. KURU KUM NUMUNELERİNİN DİNAMİK BASİT KESME DENEYİNDEN BELİRLENEN SIVILAŞMA DAVRANIŞI</b> .....	<b>53</b>
4.1 Temiz Kum Numunesinin Sıvılaşma Davranışı .....	54
4.2 Siltli Kum Numunesinin Sıvılaşma Davranışı .....	58

<b>5. OTOMATİK KURU HUNİ YÖNTEMİNİN DENEY SONUÇLARI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ.....</b>	<b>65</b>
5.1 Kuru Huni Yönteminde Zemin Döküş Yüksekliği ve Huni Çekiş Hızı Etkilerinin Otomatik ve Manuel Olarak İncelenmesi.....	67
5.1.1 Huni çekiş hızının göreceli sıklık üzerindeki etkisi .....	67
5.1.2 Zemin döküş yüksekliğinin göreceli sıklık üzerindeki etkisi.....	70
5.2 Kuru Huni Yönteminin Sıvılaşma Direnci Üzerindeki Etkilerinin Otomatik ve Manuel Olarak Karşılaştırılması.....	72
5.3 Otomatik Kuru Huni Yönteminin Manuel Yönteme Göre Avantajları.....	74
<b>6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>81</b>
<b>KAYNAKÇA .....</b>	<b>85</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>91</b>



## **KISALTMALAR**

<b>CSR</b>	: Çevrimsel Kayma Gerilmesi Oranı
<b>CRR</b>	: Çevrimsel Direnç Oranı
<b>HÇH</b>	: Huni Çekiş Hızı
<b>CDSS</b>	: Dinamik Basit Kesme Test Cihazı
<b>USCS</b>	: Unified Soil Classification System
<b>NGI</b>	: Norveç Geoteknik Enstitüsü
<b>SGI</b>	: İsveç Geoteknik Enstitüsü





## SEMBOL LİSTESİ

<b>B</b>	: B-değeri
<b>C<sub>u</sub></b>	: Üniformluk katsayısı
<b>C<sub>c</sub></b>	: Eğrilik katsayısı
<b>D<sub>r</sub></b>	: Göreceli sıklık
<b>D<sub>50</sub></b>	: Ortalama dane boyutu
<b>e</b>	: Boşluk oranı
<b>e<sub>maks</sub></b>	: Maksimum boşluk oranı
<b>e<sub>min</sub></b>	: Minimum boluk oranı
<b>G<sub>s</sub></b>	: Özgöl ağırlık
<b>N<sub>L</sub></b>	: Sıvılaşıma çevrim sayısı
<b>Δu</b>	: Aşıırı boşluk suyu basıncı
<b>τ</b>	: Kayma gerilmesi
<b>γ</b>	: Kayma deformasyonu
<b>σ<sub>v</sub></b>	: Düşey gerilme
<b>σ'<sub>v</sub></b>	: Efektif düşey gerilme





## ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Page</u>
<b>Çizelge 1.1 :</b> Numune hazırlama yöntemleri ve yöntemlerin deney üzerine etkileri.....	<b>10</b>
<b>Çizelge 1.2 :</b> Kum numunelerinde farklı çevrimsel kayma gerilmesi oranlarında göreceli sıkılığın sıvılaşma direncine etkisi. ....	<b>20</b>
<b>Çizelge 3.1 :</b> Şile kumu ve siltli kumun özellikleri.....	<b>44</b>
<b>Çizelge 4.1 :</b> Yapılan dinamik basit kesme deneylerinin sayısı. ....	<b>53</b>
<b>Çizelge 4.2 :</b> Denklem 4.1’de verilen katsayıların CSR’a göre değişimi. ....	<b>55</b>
<b>Çizelge 4.3 :</b> Denklem 4.1’de verilen katsayıların CSR’a göre değişimi. ....	<b>60</b>
<b>Çizelge 5.1 :</b> Denklemde verilen katsayıların zemin çeşidi, zemin döküş yüksekliği ve numune hazırlama yöntemine göre değişimi. ....	<b>70</b>



## ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Page</u>
Şekil 1.1 : Literatür CSR=0.12 deneylerinin göreceli sıklık-çevrimsel kayma gerilmesi ilişkisi. ....	23
Şekil 1.2 : Literatür CSR=0.1 deneylerinin göreceli sıklık-çevrimsel kayma gerilmesi ilişkisi. ....	24
Şekil 1.3 : Literatür CSR=0.08 deneylerinin göreceli sıklık-çevrimsel kayma gerilmesi ilişkisi. ....	25
Şekil 2.1 : Zemine etkileyen normal gerilmeler ve kayma gerilmeleri (Das, 1993). ..	28
Şekil 2.2 : Geliştirilen farklı basit kesme deney cihazlarının şematik gösterimi. ..	30
Şekil 2.3 : Bu tez çalışmasında kullanılan, Yeditepe Üniversitesi Zemin Mekaniği Laboratuvarında bulunan ShearTrac-II-DSS basit kesme deney cihazı. ....	31
Şekil 2.4 : Şekil 2.3'deki basit kesme deney sisteminin kesme hücresinin detaylı gösterimi (Zehtab, 2010). ....	31
Şekil 2.5 : CDSS program penceresi. ....	32
Şekil 2.6 : Basit kesme deney cihazında yan kol kısmında bulunan cıvatalar. ....	33
Şekil 2.7 : Basit kesme deney cihazında piston ve düşey yük hücresi. ....	33
Şekil 2.8 : Deney başlatılmadan kalibrasyon ayarının yapılması. ....	34
Şekil 2.9 : Sabit hacim kontrollü basit kesme deneyi a) konsolidasyon ve b) kesme aşamaları (Monkul ve diğ., 2017a). ....	37
Şekil 2.10 : Kuru ve doymuş temiz kum numunelerinde sıvılaşma davranışı (CSR=0.12) (Eseller-Bayat ve diğ., 2017). ....	38
Şekil 2.11 : Kuru ve doymuş %10 IZ siltli kum numunelerinde sıvılaşma davranışı (CSR=0.12) (Eseller-Bayat ve diğ., 2017). ....	39
Şekil 2.12 : Kuru ve doymuş temiz kum numunelerinde sıvılaşma davranışı (CSR=0.1) (Eseller-Bayat ve diğ., 2017). ....	39
Şekil 2.13 : Kuru ve doymuş %10 IZ siltli kum numunelerinde sıvılaşma davranışı (CSR=0.1) (Eseller-Bayat ve diğ., 2017) . ....	40
Şekil 2.14 : Kuru ve doymuş temiz kum numunelerinde sıvılaşma davranışı (CSR=0.08) (Eseller-Bayat ve diğ., 2017). ....	40
Şekil 2.15 : Kuru ve doymuş %10 IZ siltli kum numunelerinde sıvılaşma davranışı (CSR=0.08) (Eseller-Bayat ve diğ., 2017). ....	41
Şekil 3.1 : a) Şile kumu 20/55 b) Şile kumu + %10 siltin dane çapı ve dağılım eğrisi. ....	44
Şekil 3.2 : Kuru huni yönteminin şematik gösterimi (Monkul ve Yamamuro, 2010). ....	45
Şekil 3.3 : Numune hazırlama aşamasında kullanılan alüminyum kalıp. ....	46
Şekil 3.4 : Kalıp ve kalıp altlığının deney düzeneğinde gösterimi. ....	47
Şekil 3.5 : Kalıp ve kalıp altlığının üç boyutlu gösterimi. ....	47
Şekil 3.6 : Kalıba vakum uygulanarak membranın gerdirilmesi. ....	48
Şekil 3.7 : Otomatik çekiş hunisinin teknik çizimi. ....	49

<b>Şekil 3.8 :</b>	Otomatik çekiş hunisinin farklı birkaç yönden görünümü gösteren teknik çizimler. ....	<b>50</b>
<b>Şekil 3.9 :</b>	Bilgisayar kontrollü panel. ....	<b>51</b>
<b>Şekil 3.10 :</b>	Otomatik çekiş hunisinin sisteme monte edilmesi. ....	<b>52</b>
<b>Şekil 4.1 :</b>	Temiz kumun sıvılaşma çevrim sayısının göreceli sıklık ile değişimi (CSR=0.12). ....	<b>54</b>
<b>Şekil 4.2:</b>	Temiz kumun sıvılaşma çevrim sayısının göreceli sıklık ile değişimi (CSR=0.1). ....	<b>55</b>
<b>Şekil 4.3:</b>	Temiz kumun sıvılaşma çevrim sayısının göreceli sıklık ile değişimi (CSR=0.08). ....	<b>55</b>
<b>Şekil 4.4:</b>	Çeşitli sabit göreceli sıklıklarda şile kumu 20/55'in sıvılaşma direncinin çevrimsel kayma gerilmesi oranı ile değişimi. ....	<b>56</b>
<b>Şekil 4.5:</b>	Temiz kumun göreceli sıklıktaki değişimin ( $\Delta D_r$ ) sıvılaşma için gereken çevrim sayısındaki artışa ( $\Delta N_L$ ) etkisinin çevrimsel kayma gerilmesi oranı ile değişimi. ....	<b>57</b>
<b>Şekil 4.6:</b>	Şile kumu 20/55'in çevrimsel direnç oranının ( $CRR_{[NL=15]}$ ) göreceli sıklık ile değişimi. ....	<b>58</b>
<b>Şekil 4.7 :</b>	Siltli kumun sıvılaşma çevrim sayısının göreceli sıklık ile değişimi (CSR=0.12). ....	<b>59</b>
<b>Şekil 4.8 :</b>	Siltli kumun sıvılaşma çevrim sayısının göreceli sıklık ile değişimi (CSR=0.1). ....	<b>59</b>
<b>Şekil 4.9 :</b>	Siltli kumun sıvılaşma çevrim sayısının göreceli sıklık ile değişimi (CSR=0.08). ....	<b>60</b>
<b>Şekil 4.10:</b>	Çeşitli sabit göreceli sıklıklarda siltli kumun sıvılaşma direncinin çevrimsel kayma gerilmesi oranı ile değişimi. ....	<b>61</b>
<b>Şekil 4.11:</b>	%10 Silt içeren siltli kumun göreceli sıklıktaki değişimin ( $\Delta D_r$ ) sıvılaşma için gereken çevrim sayısındaki artışa ( $\Delta N_L$ ) etkisinin çevrimsel kayma gerilmesi oranı ile değişimi. ....	<b>62</b>
<b>Şekil 4.12:</b>	%10 Silt içeren kumun çevrimsel direnç oranının ( $CRR_{[NL=15]}$ ) göreceli sıklık ile değişimi. ....	<b>63</b>
<b>Şekil 4.13:</b>	Temiz kum ve %10 Silt içeren kumun çevrimsel direnç oranının ( $CRR_{[NL=15]}$ ) göreceli sıklık ile değişiminin karşılaştırılması. ....	<b>63</b>
<b>Şekil 5.1:</b>	Otomatik kuru huni yöntemiyle oluşturulan şile temiz kumu 20/55 numunelerinin göreceli sıklık değişiminin huni çekiş hızı ve zemin döküş yüksekliği ile ilişkisi. ....	<b>67</b>
<b>Şekil 5.2:</b>	Manuel kuru huni yöntemiyle oluşturulan şile temiz kumu 20/55 numunelerinin göreceli sıklık değişiminin huni çekiş hızı ve zemin döküş yüksekliği ile ilişkisi. ....	<b>68</b>
<b>Şekil 5.3:</b>	Otomatik kuru huni yöntemiyle oluşturulan siltli kum numunelerinin göreceli sıklık değişiminin huni çekiş hızı ve zemin döküş yüksekliği ile ilişkisi. ....	<b>68</b>
<b>Şekil 5.4:</b>	Manuel kuru huni yöntemiyle oluşturulan siltli kum numunelerinin göreceli sıklık değişiminin huni çekiş hızı ve zemin döküş yüksekliği ile ilişkisi. ....	<b>69</b>
<b>Şekil 5.5:</b>	Alüminyum huni ve zemin döküş yüksekliğini belirleyen aparatları. ..	<b>71</b>
<b>Şekil 5.6:</b>	Sile temiz kum 20/55'in sıvılaşma direncinin otomatik ve manuel olarak karşılaştırılması. ....	<b>73</b>
<b>Şekil 5.7:</b>	Siltli kumun sıvılaşma direncinin otomatik ve manuel olarak karşılaştırılması. ....	<b>73</b>

<b>Şekil 5.7:</b>	Temiz kumun a) otomatik ve b) manuel olarak hazırlanması durumu. ....	<b>75</b>
<b>Şekil 5.8:</b>	Siltli kumun a) otomatik ve b) manuel olarak hazırlanması durumu. ..	<b>75</b>
<b>Şekil 5.9:</b>	Manuel kuru huni yöntemiyle yapılan dinamik basit kesme deney analizi grafikleri (%10 silt içerikli kum, $D_r=48.1$ , $\sigma_{vc}=50$ kPa, CSR=0.1). ....	<b>77</b>
<b>Şekil 5.10:</b>	Otomatik kuru huni yöntemiyle yapılan dinamik basit kesme deney analizi grafikleri (%10 siltli kum, $D_r=41.8$ , $\sigma_{vc}=50$ kPa, CSR=0.1)...	<b>79</b>





## SİSMİK SIVILAŞMA DENEY NUMUNELERİ İÇİN OTOMATİK HUNİ TASARIMI VE DENEY SONUÇLARINA ETKİSİ

### ÖZET

Sıvılaşma, geoteknik deprem mühendisliğinde üzerinde en çok çalışma yapılan, en merak uyandıran konuların başında gelmektedir. Kumlu zeminlerin dinamik yükler altında sıvılaşması hakkında pek çok araştırma yapılmıştır ve hala yapılmaktadır. 1964 yılında üç ay içerisinde meydana gelen Alaska Good Friday ve Japonya Niigata depremleri sonrası sıvılaşma nedeniyle meydana gelen zararlar farkedilmiş olup, geoteknik mühendislerini konuyla ilgili ciddi çalışmaları başlamıştır. Günümüze kadar dünyanın çeşitli yerlerinde çok faydalı çalışmalar yapılmış olup, konunun karmaşıklığına rağmen pek çok şey öğrenilmiştir. Bunun yanında gizemini koruyan ve kafa karıştıran sorunların çözüme kavuşması için çalışmalar devam etmektedir.

Yapılan çalışmalarda tüm sıvılaşma olaylarının en karakteristik özelliği, drenajsız yükleme şartlarında oluşan aşırı boşluk suyu basıncıdır. Kohezyonsuz zeminlerin doymun olduğu durumlarda, drenajsız şartlardaki yükleme çabuk gelişmekte ve zeminlerin sıkılaşma eğilimi aşırı boşluk suyu basıncının artmasına ve efektif gerilmenin sıfıra doğru azalmasına neden olabilmektedir ve tüm bunların sonucunda sıvılaşma olayı meydana gelmektedir.

Geoteknik mühendisliği için bu derece önemli bir konuda araştırma ve çalışmalar gerçekleştirilirken hem hızlı hem de sonuçlarımızdan emin olarak ilerlemek büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle hem numune hazırlama aşamasında hem de deneyler gerçekleştirilirken en güvenilir ve en hızlı yöntemleri seçmek kaliteli çalışmalar için altyapı oluşturacaktır.

Bu çalışmada numunenin hazırlama yönteminden başlayarak deney sonuçlarına kadar birçok parametre (zemin döküş yüksekliği, huni çekiş hızı, CSR, göreceli sıkılık-çevrimsel kayma gerilmesi ilişkisi) ayrıntısıyla incelenmiş olup, dikkat çekici buluşlar ve sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca deney sisteminin kurulmu ve deneyin gerçekleştirilmesi aşamasında nelere dikkat etmemiz gerektiği ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Araziden örselenmemiş numune alınması özellikle kumlu zeminler söz konusu olduğunda oldukça özel ve pahalı yöntemler gerektirmekte ve bu durum tercih edilmediğinden deney numuneleri laboratuvar ortamında oluşturulup doymun hale getirildikten sonra test edilebilmektedir. Deneylerin tekrarlanılabilirliği ve güvenilirliği açısından laboratuvar ortamında oluşturulan numunelerin yapılacak her deney için aynı davranışı gösterecek şekilde hazırlanması ve doymun hale getirilmesi büyük önem taşımaktadır. Oldukça zaman alan ve büyük zahmet gerektiren bu sürecin bir nebze kolaylaştırılması için kuru numunelerle deney yapmak çok avantajlı olmaktadır. Bu çalışmada tamamen kuru numunelerle deneyler yapılmış, drenajlı durumda sabit hacim kontrollü olarak tekrarlı basit kesme yüklerine maruz bırakılan numuneler için eşdeğer boşluk suyu basıncının nasıl hesaplanacağı ve sabit

hacim kontrollü deney sisteminde kumların sıvılaşma davranışının kuru numunelerden belirlenmesi sabit hacim kontrollü basit kesme deney mekanizması anlatılarak açıklanmıştır. Ayrıca kuru ve doymuş numunelerin deney sonuçları karşılaştırılarak temiz ve siltli kum numunelerinde kuru ve doymuş durumda aynı sonuçların bulunduğu kanıtlanmıştır.

Bu tez çalışmasında numune hazırlama yöntemi olarak kuru huni yöntemi uygulanmıştır. Kuru huni yöntemi hem dinamik basit kesme hem de üç eksenli basınç deneylerinde yaygın olarak uygulanan bir numune hazırlama yöntemidir. Fakat bu numune hazırlama yöntemi uygulanırken, tecrübe eksikliği, el titremesi ve deneylerin farklı operatörler tarafından yapılması deney sonuçlarını önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Özellikle el titremesi huninin ekseninden kaymasına sebep olmakta, aynı zamanda huninin çekiş hızı da kontrol edilememektedir. Çalışmada tüm bu etkenlerin ne gibi sonuçlar doğurduğunun belirtilmesinin yanısıra tüm bu olumsuz durumların önüne geçecek bilgisayar kontrollü otomatik bir huni tasarlanmıştır. Huni bilgisayar kontrollü olarak 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135, 150 saniyelerde 4 cm yukarı yükselebilmektedir. Bunun yanında numunenin farklı yüksekliklerden dökülebilmesi için her biri 35 mm yüksekliğinde 6 aparatı bulunmaktadır. Böylelikle farklı zemin döküş yüksekliği ve farklı huni çekiş hızlarında çeşitli kombinasyonlar denenmiş ve bunların göreceli sıklık ve sıvılaşma üzerindeki etkileri açıklanmıştır. Bunun yanında manuel kuru huni yöntemiyle yapılan deneylerle otomatik yöntemle yapılan deneyler her yönden karşılaştırılarak otomatik huninin avantajları ve gerekliliği ortaya konmuştur.

Yeditepe Üniversitesi Zemin Mekaniği Laboratuvarında bulunan Geocomp marka cihazda dinamik basit kesme deneyleri uygulanmış, temiz kum ve %10 silt içerikli siltli kum numuneleri üç farklı çevrimsel kayma gerilmesi oranında ( $CSR=0.12, 0.1, 0.08$ ) deneye tabi tutulmuşlardır. Numuneler 50 kPa altında konsolide edilmiş ve tüm testler için frekans değeri 0.1 Hz olarak uygulanmıştır. Yapılan deneylerle kumlu zeminlerin sıvılaşma davranışı belirlenmiştir.

Hem temiz hem de siltli kum numunelerinde sıvılaşma için gerekli çevrim sayısı ile göreceli sıklık arasında üstel bir ilişki olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca çevrimsel kayma gerilmesi oranı azaldıkça sıvılaşma direncinin arttığı tespit edilmiştir. Bu durum literatürde yapılmış olan diğer çalışmalarla uyumaktadır. Son olarak çevrimsel direnç oranı ile göreceli sıklık arasında temiz kum ve %10 silt içeren siltli kum için üstel bir ilişki olduğu gözlemlenmiştir.



## **DEVELOPMENT OF AUTOMATIC FUNNEL SYSTEM FOR CYCLIC SIMPLE SHEAR TESTS ON SANDY SPECIMENS**

### **SUMMARY**

Liquefaction is one of the most important topics in geotechnical earthquake engineering. Much research has been done and still is being done on the liquefaction of sandy soils under dynamic loads. In 1964, the Alaska Good Friday and the Niigata earthquakes in Japan, the damages caused by liquefaction were noticed and afterwards geotechnical engineers began serious work on the subject.

When sands are considered it is not possible to take undisturbed samples (except very special and expensive methods such as ground freezing), hence specimens are deposited with different techniques in the laboratory and need to be saturated before they could be tested. The mentioned specimen preparation process requires quite challenging working period, besides it is very time consuming. Mistakes, either due to lack of experience and time, that are made through specimen preparation process could affect the test results considerably. Determination of the liquefaction resistance from dry sand specimens is explained in order to simplify the mentioned challenging specimen preparation process. Fully dry specimens of clean sand and silty sand, which were deposited by dry funnel deposition, were subjected to drained constant volume cyclic simple shear loading. Calculation of equivalent excess pore pressures for dry specimens is explained based on the constant volume control mechanism of the simple shear testing.

Laboratory testing of clean, silty and/or clayey sands are still quite important for investigating dynamic soil behavior including liquefaction. Various laboratory research on geotechnical engineering requires reconstitution of sandy soil specimens in such a way that the influence of several factors including density, stress history, loading conditions, fines content, plasticity mineralogy and morphology of soil grains could be investigated in a controlled environment. Several different specimen preparation methods had been employed in the literature to reconstitute specimens in the laboratory, such as moist tamping, slurry deposition, water sedimentation and air pluviation. In addition to the mentioned methods, dry funnel deposition is also a commonly used specimen preparation technique for reconstituting clean, silty and clayey sand specimens. Dry funnel deposition is one of the most commonly utilized specimen reconstitution methods for both triaxial and simple shear testing of sandy soils. The basic procedure of the method is simple, where the dry soil is deposited through a funnel, which is raised gently along the axis of symmetry of the specimen allowing the soil to gradually fill the space encapsulated by a split mold or stack of rings. The specimen can be saturated by CO<sub>2</sub> flushing and de-aired water percolation. During funnel raising process, experimentalists could lose the control of the raising speed, vertical alignment or even could shake the funnel, which could influence the initial fabric and therefore the dynamic response of specimens.

In this study, an automated funnel was designed and developed for an NGI type cyclic simple shear apparatus. The funnel has a control unit which allows various computer controlled funnel raising speed. The funnel has six extensions, each having 35 mm length. This study investigates the influence of funnel raising speed and the height of the funnel (by using extensions) on the relative density and the cyclic liquefaction resistance of a clean and silty sand (with %10 fines content). An equation is developed showing the relationship between the funnel raising speed and the relative density of specimens. The influence of the automatization was discussed by comparing the results of a series of cyclic simple shear tests, in which the specimens were prepared by manual and automatic dry funnel deposition techniques.

The experimental program of this study was done in the Soil Mechanics Laboratory at Civil Engineering Department of Yeditepe University. Two soils were used in the experimental program: a clean sand and a silty sand. The clean sand is named as Sile Sand 20/55 and classified as poorly graded sand (SP) in Unified Soil Classification System (USCS). The silty sand was obtained by thoroughly mixing Sile Sand 20/55 with a non-plastic silt on dry weight basis such that the resulting soil had 10% fines content. The non-plastic silt is called IZ silt.

In order to investigate the cyclic liquefaction behavior of sandy soils, an NGI type cyclic simple shear device was used. All specimens were consolidated to the initial vertical effective stress of 50 kPa (i.e.  $\sigma'_{vc}=50\text{kPa}$ ) and stress-controlled cyclic loading was applied at cyclic stress ratio (CSR= 0.12, 0.1, 0.08) with a frequency of 0.1 Hz. Liquefaction was assumed to occur when the vertical effective stress on a specimen was reduced to zero (i.e.  $\Delta\sigma_v=50\text{kPa}$ ).

Manual dry funnel deposition is the conventional technique, where the funnel is raised manually. In this study, a stopwatch was used during the manual deposition to record the durations of funnel raising periods in order to calculate the funnel raising speeds. Whereas, in automatic dry funnel deposition, the funnel is raised automatically with the help of a specially designed mechanism. The mechanism involves an alignment section to mount the funnel on the simple shear apparatus, a computer controlled motor, which raises the funnel along the vertical axis of specimen at a constant speed, and a control unit, which allows the experimentalist to choose the funnel raising speed depending on the type of the soil and target relative density value. The technical capacity of the motor used in the design allowed the funnel raising times of 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135, 150 seconds for 4 cm stroke.

The typical simple shear specimens in this study have a diameter of 64 mm and height of 20 mm. The lateral confinement was provided by aligning several Teflon coated rings around a conventional latex membrane. The fabricated split mold allowed the rings to be located and aligned inside the mold body before the deposition starts. Such an approach prevented the possible disturbance of specimens during the positioning and alignment of the rings.

It was found that there is a logarithmic relationship between the funnel raising speed and relative density of the clean sand and silty sand specimens prepared either by the manual or the automatic dry funnel deposition techniques. The change of consolidated relative density of clean sand and silty sand specimens with various funnel raising speeds show that the relative density increases with the funnel raising speed.

Different number of funnel extensions were studied to see the influence the of funnel height (pouring height of the dry soil) on the relative density. It was observed that as the number of the extensions on the funnel increased, the achieved relative density also increased. This is an interesting remark which shows that the deposition process in deed starts much earlier than the initial funnel movement, perhaps as soon as the experimentalist starts to deal with the soil. In other words, before any funnel movement, the height from which the dry soil is poured into the funnel could make a difference in the fabric of resulting specimens.

Liquefaction resistance of the manual and the automatic dry funnel deposited specimens were compared. It was observed that the number of cycles to liquefaction increases with the relative density in an exponential manner, and trend curves for automatic and manual dry funnel deposited specimens coincide for both clean and silty sands.





## 1. GİRİŞ

Bu bölümde; tezin amacı açıklanmış, literatürde var olan konu ile ilgili araştırmalar iki kısımda incelenmiştir. İlk kısımda çeşitli numune hazırlama yöntemleriyle yapılan çalışmalardan bahsedilip, numune hazırlama yöntemlerinin dinamik davranışa etkisi irdelenmiştir. İkinci kısımda ise sıvılaşma ile ilgili yapılan çalışma örnekleri ele alınıp, göreceli sıklık parametresinin sıvılaşmaya etkisi farklı çevrimsel kayma gerilmesi oranlarında ( $CSR=\tau_{cyc}/\sigma'_{vc}$ ) incelenmiştir. Son olarak ise tez çalışmasının hipotezi hakkında bilgi verilmiştir.

### 1.1 Tezin Amacı

Çevrimli yüklemeler altında, suya doymun zemin tabakalarında boşluk suyu basıncı artışı sebebiyle meydana gelen sıvılaşma olayı geoteknik mühendisliği açısından büyük önem taşımaktadır. 1964 yılında Japonya ve Alaska'da büyüklüğü 7'den büyük depremlerden sonra sıvılaşma nedeniyle meydana gelen zararlar farkedilmiş olup, geoteknik mühendislerinin konuyla ilgili ciddi çalışmaları başlamıştır. Her ne kadar sıvılaşmanın arazide belirlenebilmesi için standart penetrasyon deneyleri, koni penetrasyon deneyleri ve sismik arazi deneyleri yapıp çeşitli analiz yöntemleri geliştirilse de dinamik zemin parametrelerinin hassas bir şekilde belirlenmesi için laboratuvar ortamındaki deneysel çalışmalarda fazlasıyla dikkat çekmektedir. Dane dağılımı, plastisite, göreceli sıklık, gerilme durumu gibi çeşitli faktörlerin zeminlerin dinamik davranışına etkisi belirlenmek istendiğinde laboratuvar deneylerinin gerekliliği ve ne derece önemli olduğu farkedilmektedir.

Laboratuvar ortamında gerçekçi deney koşullarının oluşturulması kadar önemli olan bir diğer konu da numune hazırlama aşamasıdır. Güvenilir ve tekrarlanabilir sonuçlar elde edilebilmesi için yapılacak deneylerde en uygun numune hazırlama yönteminin seçilmesi, numunelerin çok dikkatli bir şekilde hazırlanması böylelikle değiştirilen bir parametre olduğunda deney sonucuna etkisinin net bir şekilde anlaşılması büyük önem taşımaktadır. Bu durum; zahmetli, vakit alan, titiz bir çalışma sürecini beraberinde getirmektedir.

Bu çalışmada, kuru numunelerle dinamik basit kesme deneyleri yapılmış, numunelerin sıvılaşma davranışı farklı çevrimsel kayma gerilmesi oranlarında incelenmiştir. Numune hazırlama yöntemi olarak uygulanan kuru huni yöntemi her yönüyle ele alınmış, bize sağladığı avantajlardan en doğru şekilde yararlanılması ve olumsuz yönlerinin giderilmesi için yöntemin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Geliştirilen kuru huni yöntemi ve numuneler hazırlandıktan sonra çeşitli sıkılaştırma yöntemleri uygulanarak geniş aralıkta göreceli sıklık değerlerinin elde edilmesi çalışmanın bir diğer amacıdır.

İkinci bölümde, dinamik basit kesme tanımlanıp, dinamik basit kesme deney sistemi hakkında bilgi verilmiştir. Sabit hacim kontrollü olarak kuru numunelerle sıvılaşma deneyleri yapılabilmesinin mantığı ve kuru numunelerden nasıl eşdeğer aşırı boşluk suyu basıncı hesaplanabileceği detaylı olarak açıklanmış, deney aşamaları (konsolidasyon aşaması, dinamik basit kesme aşaması) anlatılmıştır. Ayrıca kuru ve doymuş numunelerin sıvılaşma davranışının karşılaştırılması yapılmıştır.

Üçüncü bölümde, deneyde kullanılan zeminlerin özellikleri ve numune hazırlama yöntemi olarak seçilen kuru huni yöntemi hakkında bilgi verilip, kuru huni yönteminin mükemmelleştirilmesi için uygulanan kalıp ve vakum kullanımı anlatılmıştır. Bunun yanında numune hazırlama aşamasını tamamıyla otomatik hale getirip, güvenilir deney sonuçlarına ulaşmak için Yeditepe Üniversitesi Zemin Mekaniği Laboratuvarında tasarlanıp, 3G Project Design firması tarafından üretilmiş olan ve kuru huni yöntemine yeni bir soluk getiren otomatik çekiş hunisi ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır.

Dördüncü bölümde, temiz kum ve %10 silt eklenen siltli kum numunelerinin dinamik basit kesme deneyinden elde edilen sıvılaşma analizleri sunulup, sıvılaşma direncinin, geniş göreceli sıklık değeri aralığında ve farklı çevrimsel kayma gerilmesi oranlarında değişimi irdelenmiştir.

Beşinci bölümde, otomatik kuru huni yönteminin deney sonuçları üzerindeki etkileri anlatılmaktadır. Kuru huni yönteminde zeminin döküş yüksekliği ve huni çekiş hızının göreceli sıklık üzerine etkileri otomatik ve manuel olarak yapılan deneylerle karşılaştırmalı olarak açıklanmıştır. Ayrıca otomatik ve manuel olarak yapılan deneylerin sıvılaşma davranışına etkisi tartışılmıştır. Otomatik yöntemin manuel yöntemine göre avantajları net bir şekilde belirtilmiştir.

Son bölümde ise yapılan deneysel çalışmadan elde edilen tüm bulgular önemli noktaları vurgulanarak bir arada sunulmuştur.

### **Literatür İncelemesi**

Zeminlerin tekrarlı yükler altındaki davranışı 1960'lı yıllardan bugüne kadar incelenmektedir. Özellikle 1995 Kobe ve 1999 Kocaeli depremlerinden sonra kumlu ve siltli kumlu zeminlerin dinamik özellikleriyle ilgili çalışmalar ülkemiz açısından da özel önem arz etmeye başlamış ve hız kazanmıştır. Böylelikle; sıvılaşma, geoteknik deprem mühendisliğinde son yıllarda üzerinde en çok çalışma yapılan, en merak uyandıran konuların başında gelmiştir. Tekrarlı yüklemeler altında oluşan boşluk suyu basıncı, zeminin efektif gerilmesini sıfıra doğru yaklaştırdığında zemin taşıma gücünü kaybeder ve viskoz bir sıvı gibi davranır. Sıvılaşma olarak adlandırılan bu durumun en karakteristik özelliği, drenajsız yükleme şartlarında oluşan aşırı boşluk suyu basıncıdır. Kohezyonsuz zeminlerin doygun olduğu durumlarda drenajsız şartlardaki yükleme çabuk gelişmekte ve zeminin sıkılaşma eğilimi aşırı boşluk suyu basıncının artmasına ve efektif gerilmenin azalmasına neden olmaktadır. Bunun sonucunda da sıvılaşma meydana gelmektedir.

Uzun yıllar, sıvılaşma üzerine yapılan çalışmalarda kumlu zeminler üzerine yoğunlaşmış, temiz kumların tekrarlı yükler altındaki sıvılaşma davranışı incelenmiştir. Daha sonra ise yapılan çalışmalarda düşük kohezyonlu siltler Ishihara (1984,1985) ve çakıllı zeminlerde de Seed (1987) sıvılaşmanın ortaya çıkabileceği görülmüştür. Ishihara (1993) depremler esnasında, ince ve orta kum ile düşük plastisiteli ince daneler içeren kum çökellerinin sıvılaşmaya çok meyilli olduğunu fakat bununla birlikte sıvılaşmanın zaman zaman çakıllı zeminlerde de görülebildiğini belirtmiştir.

Sıvılaşma olayının gerçekleşmesi için çevrimli kayma gerilmeleri etkisinde boşluk suyu basıncı artışının gerçekleşmesi gerekmektedir. Deprem sırasında oluşan bu çevrimli kayma gerilmelerinin laboratuvar ve arazi deneylerinde karşılaştırılmasını mümkün kılan yaklaşım Seed ve Idriss (1971) tarafından geliştirilmiştir. Böylelikle depremin yol açtığı yer hareketinin etkisi bir çevrimsel kayma gerilmesi oranı (CSR) kullanılarak göz önüne alınmıştır. Tekrarlı basit kesme deneyinde CSR, çevrimsel kayma gerilmesinin ilksel düşey efektif gerilmeye oranı ( $CSR = \tau_{cyc} / \sigma'_{vc}$ ) olarak alınır.

Projelerin geoteknik tasarımında sıvılaşma direncinin belirlenmesi arazi deney sonuçlarına dayanarak yapılırsa da zeminlerin dinamik davranışının belirlenmesinde özellikle depremler sırasında zeminin davranışı ile ilgili arazi kayıtlarına zor ulaşıldığından deneysel çalışmaların çok büyük katkısı olmaktadır. Bunun yanında ince dane yüzdesi, plastisite indeksi, dane dağılımı, dane şekil özellikleri gibi çeşitli faktörlerin zeminlerin sıvılaşma davranışına etkileri de ancak deneysel çalışmalar ile ortaya çıkarılabilmektedir. Zeminlerin dinamik davranışının incelenmesi için dinamik basit kesme, üç eksenli, dinamik burulmalı kesme, sarsma tablası şeklinde deney yöntemleri geliştirilmiştir.

Dinamik basit kesme, dinamik üç eksenli ve dinamik burulmalı kesme deneyleriyle zemin sıvılaşmasına neden olan çevrimsel kayma gerilmesi ve çevrim sayısı deneysel olarak belirlenebilmektedir. Farklı sıklık derecesindeki numunelerde belirli bir çevrimsel kayma gerilmesi ve artan yükleme devir sayısı ile artan boşluk suyu basıncı ve numunenin sıvılaşma davranışı belirlenebilmektedir.

Seed ve Lee, (1965), Yoshimi ve diğ. (1977), Seed (1979) ve Finn (1981) gerçekleştirdikleri çalışmalar neticesinde sıvılaşma direncinin göreceli sıklıkla ilişkili olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca, Ladd (1974), Mulilis ve diğ. (1975), Toki ve diğ. (1986) ve Tatsuoka ve diğ. (1986) yaptıkları çalışmalarda numune hazırlama yöntemlerinden dolayı meydana gelen zemin yapısındaki farklılığın sıvılaşma direncini etkilediğini belirtmişlerdir.

Bu tez çalışmasında, yapılan literatür incelemesinde hem numune hazırlama yönteminden kaynaklanan, zeminin dinamik davranışındaki değişimler hem de farklı çevrimsel kayma gerilmesi oranlarında göreceli sıklık parametresinin sıvılaşma direncine etkisi, konuyla ilgili çalışmaların çizeleştirilmesiyle iki kısımda incelenmiştir.

### **1.1.1 Numune hazırlama yöntemlerinin deney sonuçlarına etkisi hakkında literatür incelemesi**

Numune hazırlama yöntemleri, deney sonuçlarına etkisi olan önemli faktörlerden biridir. Farklı numune hazırlama yöntemleriyle yapılan dinamik deneylerde göze çarpan önemli bulgular saptanmıştır. Zeminlerin davranışının araştırılması için literatürde birçok farklı numune hazırlama yöntemi kullanılmaktadır. Islak yağmurlama, tabakalı ıslak yağmurlama, nemli tokmaktama, suda çökeltme, havadan



yağmurlama, bulamaç çökeltmesi, kuru huni yöntemleri literatürde sıkça karşılaşılan numune hazırlama yöntemlerindedir. Literatür incelemesinde, bu çalışmada da uygulanan kuru huni yöntemi başta olmak üzere diğer numune hazırlama yöntemlerine de değinilmiştir. Devam eden çalışmalar, numune hazırlama yönteminin, hem temiz hem de siltli kum numunelerinde drenajsız davranıştaki pek çok parametreyi önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Vaid ve diğ. (1999), Hoeg ve diğ. (2000), Yamamuro ve Wood (2004). Vaid ve diğ. (1999), havadan yağmurlama, nemli tokmaklama ve bulamaç çökeltmesi yöntemleri uygulanarak elde edilen zemin numuneleriyle, statik ve dinamik davranışı incelemiştir. Nemli tokmaklamayla oluşturulan numunelerde hacimsel azalma eğilimi ve sıvılaşma potansiyeli gözlemlenirken, ıslak yağmurlama yöntemiyle oluşturulan numunelerde hacimsel artış eğilimi görülmüştür. Öte yandan numunelerin farklı sıkılaştırma yöntemlerinin drenajsız kayma dayanımına etkisi hala tam olarak bilinmeyen ve merak edilen konuların başındadır.

Monkul ve Yamamuro (2010), kuru huni yöntemiyle hazırladıkları numunelerde, siltli kumlar için uygulanan şişleme, düşük frekanslı titreşim, vibrasyonlu yükek frekanslı titreşim, numune kalıbı kenarlarına plastik çekiç ile vurma gibi alışlagelmiş birçok sıkılaştırma yönteminin dışında yeni bir teknik uygulamıştır. Böylece tüm bu sıkılaştırma tekniklerinin etkilerinin araştırılması da sağlanmıştır. Bu yeni teknikte, numuneler huninin ucuna değişik uzunluklarda metal borular takılarak modifiye edilen ve “borulu kuru huni tekniği (tubed funnel deposition)” ismi verilen bir teknikte oluşturulmuştur. Numuneler oluşturulduktan sonra kalıp üzerine vurularak herhangi bir darbe uygulanmamıştır, dolayısıyla numunelerin sıklığı huninin ucuna takılan borunun uzunluğunun büyütülmesi ile arttırılmıştır. Bu yöntemle göreceli sıklıktaki değişimin drenajsız kayma mukavemetine etkisinin literatürdeki diğer sıkılaştırma tekniklerine nazaran daha az olduğu gözlemlenmiştir. Bunun nedeni ise bu yeni teknikte silt danelerinin kum danelerinin arasına girerek oluşturduğu yarı kararlı tanecik yapısının korunmuş olmasına bağlı olduğu açıklanmıştır (Monkul ve Yamamuro, 2010). Bu yeni sıkılaştırma yönteminin sınırlılığı ise depozüsyon sonrası vurma, titreştirme, şişleme gibi yöntemler uygulanmadığı için, sınırlı bir göreceli göreceli sıklık aralığı elde edilebilmesidir.

Yamamuro ve Wood (2004), %20 plastik olmayan silt içeren Nevada kumuna beş farklı numune hazırlama yöntemi uygulayarak 101 mm çap ve 101 mm uzunlukta

olan silindirik numuneler elde etmiş ve drenajsız monotonik üç eksenli basınç deneyleri uygulamıştır. Göreceli sıklık ve gerilme şartlarının aynı olmasına rağmen drenajsız davranışta göze çarpan değişimler numune hazırlama yöntemlerinden kaynaklanan zemin dokusundaki farklılıkların, test sonuçlarından sorumlu olduğunu açık bir şekilde göstermiştir. Geçmiş çalışmalarda öncelikli amacın silt içeriğinin temiz kumlar üstündeki etkisinin belirlenmesi olmasından dolayı siltli kumlarda numune hazırlama metodunun etkisinin incelendiği deneysel datalar oldukça kısıtlıdır. Yapılan çalışmada üç farklı göreceli sıklık aralığında (yüksek-orta-düşük) hazırlanan siltli kum numuneleri kullanılmıştır. Mukayeseler eşit oranda kum ve silt içeren aynı göreceli sıklıktaki numuneler arasında yapılmıştır. Ayrıca çalışmada taramalı electron mikroskobu kullanılmış, böylelikle kum daneleri ve çevresindeki boşluk oranının açıkça ayırt edilmesi sağlanmıştır. Siltli kum içinde farklı çeşit tanecik temas yapısını tanımak ve ölçmek için geliştirilen yöntemde %20 plastik olmayan silt içeren üç eksenli Nevada kumu örnekleri epoksi ile doyurulup kuru huni yöntemi ve suda çökeltme yöntemiyle oluşturulmuştur. Numune hazırlama yönteminin drenajsız davranışı sezilebilir bir şekilde etkilediği kanıtlanmıştır. Kuru huni yönteminde hacimsel sıkışma eğilimi daha yüksek ve kararsız davranışların gözlemlendiği durumlarla karşılaştırırken, ıslak depozüsyon metodlarında (suda çökeltme, bulamaç çökeltmesi) hacimsel genleşmeye meyilli ve kararlı davranışın belirtileri gözlemlenmiştir. Etkiler göreceli sıklığı düşük olan deneylerde, göreceli sıklığı yüksek deneylere nazaran daha farkedilebilir bir şekilde gözlemlenmiş olup, bunun nedeni büyük olasılıkla, yüksek göreceli sıklıktaki numunelerin, numune kalıbına oldukça yüksek miktar enerji uygulanarak elde edilmesiyle, numune yapısı benzer olacağı için numune hazırlama metodunun etkisinin azalmasıdır.

Wood ve diğ. (2008), çeşitli numune hazırlama yöntemleri ve çeşitli oranlardaki silt içeriklerinin üç eksenli basınç deneyinde kumun drenajsız davranışını nasıl etkilediğini deney sonuçlarıyla ortaya koymuştur. Drenajsız monotonik üç eksenli basınç deneyleri 25 kPa basınç altında Nevada 50/200 kumuna çeşitli yüzdelerde silt eklenerek yapılmıştır. Karşılaştırmaların sağlıklı yapılabilmesi için aynı konsolide boşluk oranında, aynı kum ve silt kullanılıp, silt içerikleri aynı olan numunelerle deneyler yapılmıştır. Yani tüm parametreler sabit tutularak numune hazırlama yönteminin deney sonuçlarına etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmanın odak noktası farklı tekniklerle elde edilen siltli kum numunelerinin drenajsız üç eksenli

basınç davranışındaki farklılıklarını belirtmektir. Deneyler %10, %20, %40 silt içeriği kullanılarak ve üç farklı göreceli sıklık aralığında (gevşek-orta-sıkı) gerçekleştirilmiştir. Öncelikle kum içerisinde farklı silt içeriklerinin, farklı kritik hal ve kararlı hal durumları meydana getirdiği gözlemlenmiştir. Göreceli sıklık artarken numune hazırlama yönteminin drenajsız davranışa etkisi azalmaktadır. Numune hazırlama yönteminin numune davranışına etkisi silt içeriği arttığında, özellikle düşük göreceli sıklık değerlerinde daha fazla gözlemlenmektedir. Bu buluşlar nedeniyle, numune hazırlama yönteminin özellikle gevşek siltli kumlar üzerindeki etkisi önemsenmiştir. Siltli kumun gevşek durumda hazırlandığı zaman yüksek sıkıştırılabilir parçacık yapısı oluşturduğu bu çalışmada gözlemlenen davranışlarla açıklanabilir. Numune hazırlama yöntemi ne olursa olsun silt miktarı arttıkça daha büyük sıvılaşma eğiliminin olduğu sonuçlarda açıkça görülmektedir. Hem ıslak hem de kuru oluşturulan numunelerde silt yüzdesinin artışının drenajsız davranışta aynı etkiyi gösterdiği görülmüştür. Kuru huni yönteminde kalıba hafifçe vurulmasıyla numunenin sıkılaştırılması sonucu sıvılaşma eğiliminde azalma görülse bile yine de artan silt miktarıyla sıvılaşma eğiliminde artış gözlemlenmiştir. Suda çökeltme, bulamaç çökeltmesi yöntemleriyle gevşek numune elde edilmesinin yetersizliği nedeniyle, gevşek numunelerdeki karşılaştırmalar daha çok kuru huni ve havadan yağmurlama yöntemleriyle yapılmıştır. Bu yöntemlerde numune oluşturma farklı olsa da deney sonuçları benzer davranış göstermektedir. Kuru huni ve havadan yağmurlama yöntemleriyle homojen yapıda numuneler elde edilmektedir. Kuru huni yönteminde az da olsa kum silt dağılımında ayrışmalar söz konusu olmasına rağmen deney sonuçlarındaki davranışlar, homojen dağılım gösteren havadan yağmurlama yöntemi ile aynıdır. Kuru huni yönteminde deney sonuçları kararlı ve güvenilir bir eğilim göstermektedir. Buna karşılık suda çökeltme ve havadan yağmurlama yöntemlerinde kum ve silt daneciklerinin numune içerisinde ayrılarak çökeldiği gözle görülür bir şekilde gözlemlenmiştir (Wood ve diğ., 2008). Böylelikle, suda çökeltme, havadan yağmurlama gibi metodların sadece temiz kum için uygun olduğu, siltli kumlarda kullanılmaması gerektiği kanıtlanmıştır. (Vaid ve Negusse, 1984), (Rad ve Tumay, 1987). Yapılan çalışmalarda siltli kumlarda numune hazırlama yönteminin drenajsız üç eksenli davranışta önemli etkileri olduğu açıkça görülmüştür. Bu etkiye göre yapılacak deneylerde numune hazırlama yöntemine karar verilmelidir. Bu durum özellikle siltli kumların gevşek durumlarında özel önem taşımaktadır.

Yamamuro ve Lade (1997), gevşek kumların davranışını drenajlı ve drenajsız yüklemeler altında belirlemiştir. Deneysel çalışmanın sonuçları, Nevada ve Ottawa kumlarına uygulanan drenajlı ve drenajsız üç eksenli basınç deneyleriyle ortaya çıkmıştır. Tüm testler monotonik yükleme altında yapılmıştır. Gevşek göreceli sıklıklarda çelişkili zemin davranışı gözlemlenmiştir. Tüm drenajsız üç eksenli testlerde düşük basınç altında tamamen statik sıvılaşma gözlemlenirken, basınç arttığında genleşme eğiliminden kaynaklanan sıvılaşmaya karşı direnç görülmüştür. Bu davranış normal zemin davranışının tam tersidir. Normalde basınç arttığında genleşme eğilimi azalmaktadır. Zemin içindeki ince danelerin varlığı bu durumun muhtemel nedenidir. İnce daneli silt danelerinin, göreceli olarak kendilerinden oldukça büyük olan kum danelerinin arasına yerleşerek, birlikte düşük çevre basınçlarında dahi alışılmadık şekilde yüksek sıkıştırılabilirlik gösteren parçacık yapısı yarattığı varsayılmaktadır. Drenajlı test sonuçları doğası gereği büyük hacimsel deformasyonlar gösterirken, drenajsız testlerde ise statik sıvılaşmayı sağlayacak yeterince büyük aşırı boşluk suyu basınçları gözlemlenmiştir. Ayrıca göreceli sıklığın artmasıyla, zeminin sıvılaşmaya karşı direncinin arttığı ve zeminin daha genleşen bir durumda bulunduğu anlaşılmıştır. Yamamuro ve Lade bir çok temiz kumun siltli kumla karşılaştırıldığında sıvılaşmaya daha büyük direnç gösterdiğini kanıtlamış ve yüksek miktarda silt içeren bazı kumların monotonik yükleme altında %60'tan daha büyük göreceli sıklıklarda dahi sıvılaşabildiğini göstermişlerdir.

Eski araştırmalarda kum dokusu ile ilgili sınırlı çalışmalar yapılabilirken, genellikle numune dokusunun anizotropisi üzerine yoğunlaşmıştır. Ek olarak çalışmalarda dokusal parametrelerle, kum numunelerinin mekanik özellikleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Sonrasındaki araştırmalar Glibert ve Marcuson (1988), Clayton ve diğ. (1994), mikroskobik seviyelerde boşluk oranı dağılımını içermektedir. Bu çalışmaların çoğunda optik mikroskoptan elde edilen parçacık şekilleriyle, 2-D boşluk oranı dağılımları; uniform, yarı yuvarlak kumların meydana getirdiği genel boşluk oranlarıyla karşılaştırılmıştır.

Zlatovic ve Ishihara (1995), Toyoura kumuna çeşitli oranlarda plastik olmayan silt ekleyerek ve silt miktarını devamlı arttırarak deneyler yapmışlardır. Nemli tokmaktama, kuru huni ve suda çöktirme numune hazırlama yöntemleri uygulanmış ve gevşek durumda numune oluşturmaya gayret edilmiştir. Gevşek durumda

oluşturulan numunelerin, numune hazırlama yöntemine bağlı olarak boşluk oranı ve zemin davranışı incelenmiştir. Silt oranı %30'lara yaklaştığında en düşük boşluk oranı, nemli tokmaktama veya suda çökeltme yöntemiyle kıyaslandığında kuru huni yöntemiyle hazırlanıp doyurulan numunelerde gözlenmiştir. Buna karşılık silt oranı %30'un yukarısına çıkarıldığında (Toyoure kumu+%40 silt gibi) trend eğiliminde değişme olduğu farkedilmiştir. Kuru huni yöntemiyle hazırlanıp sonrasında doyurulan numunelerde silt oranının %30'dan %40'a çıkarılmasıyla boşluk oranında da kısmen artış görülmüştür. Kuru huni yöntemiyle hazırlanan numunelerde silt oranı istikrarlı bir şekilde arttırıldığında maksimum boşluk oranına ulaşılmaktadır. Fakat numunelerin doyurulmasıyla meydana gelen hacim değişimi sonucunda, gevşek durumda boşluk oranı önemli derecede azalmakta, silt oranı %30 değerine yaklaştığında boşluk oranı minimal düzeyde bulunmaktadır. Göreceli sıklığın artması ve boşluk oranının azalmasına rağmen %30 silt içeriğinde numuneler daha fazla çekme gücüne sahip hale gelmektedirler.

Bahadori ve diğ. (2008), kumun asıl anizotropik davranışını ve farklı miktarlarda silt eklendiğinde meydana gelen etkileri incelemiştir. Firoozkuh kumuna geniş aralıkta yüzdelerle silt ekleyerek drenajsız silindirik burulmalı kesme deneyleri gerçekleştirilmiş ve numuneler kuru huni yöntemiyle hazırlanmıştır. Anizotropinin ihmal amaçlı ile tüm deneylerde numunelerin konsolidasyonu izotropik yapılmıştır. Yapılan deney sonuçlarına göre, kumun doğal anizotropik davranışının numune hazırlama yöntemiyle önemli derecede bağlantılı olduğu gözlemlenmiştir. Meydana gelen asal gerilmelerin doğrultusu ve eğim açısının da numune hazırlama yönteminden etkilendiği görülmüştür. Siltin suya yüksek duyarlılığının gerçek anizotropik dokuyu başkalaştırmasından dolayı su çökeltme yöntemi uygulanmamış, tüm deneyler kuru huni yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Kuru huni yöntemiyle daha uniform siltli kum numuneleri oluşturulabildiği görülmüştür. Kum içine farklı miktarlarda silt eklenmesi, yüksek göreceli sıklık durumunda bile ani gerilmelere neden olmaktadır. Siltli kumlar temiz kumlarla karşılaştırıldığında, yükselen trend eğiliminde olduğu görülmektedir. Deney sonuçları, silt eklenmesinin anizotropinin etkisini belirli bir silt içeriğine kadar azalttığını daha sonra arttırmaya başladığını göstermektedir. Bu durum karışımın kararsız yapısından kaynaklanmaktadır. Silt ve kumun birbirine temas etmesi yarı kararlı ya da kararsız bir zemin dokusuna sebep olmaktadır.

Sitharam ve Dash (2008), 50 mm çaplı, 100 mm yüksekliğinde numuneleri kuru huni yöntemiyle oluşturup, farklı çevrimsel kayma gerilmesi oranlarında gerilme kontrollü dinamik üç eksenli deneyler yapmışlardır. 0.1 Hz frekansa tabi tutularak yapılan deneylerde, temiz kum ve çeşitli oranlarda silt içeren kumun sabit boşluk oranında çevrimsel direnci değerlendirilmiştir. Boşluk oranı belirlenirken iri ve ince daneler arası boşluk oranları dikkate alınmıştır. Etüvde kurutulmuş zemin, iki parçalı kalıbın kullanıldığı membran içerisine 12 mm açıklıklı bir huni kullanılarak dökülmüştür. Numune beş katmanda oluşturulup kalıp üzerine nazikçe vurularak sıkıştırılması sağlanmıştır. Alt katmanları daha düşük göreceli sıklıkta oluşturulan numunedan CO<sub>2</sub> geçirilip, su ile doyurulmasından sonra konsolidasyon basıncı 100 kPa olacak şekilde deneyler gerçekleştirilmiştir. Silt içeriği sınır miktarına ulaşana kadar sıvılaşma direncinde azalma gözlemlenirken, silt içeriğinin sınır miktarının ötesine geçmeye başlamasıyla hakim olan kum yapısı davranışı, yavaş yavaş karışım yapısının davranışına dönüşmekte ve silt oranı %50 civarına ulaştığında çevrimsel direnç artmaktadır. Aynı boşluk oranında, silt miktarı %75'e ulaştığında görülen çevrimsel direnç, temiz kumun gösterdiği çevrimsel dirençle karşılaştırıldığında iki katı olduğu gözlemlenmiştir.

**Çizelge 1.1 : Numune hazırlama yöntemleri ve yöntemlerin deney üzerine etkileri.**

Referans	Test Tipi	Kullanılan Numune ve Fiziksel Özellikleri	Numune Hazırlama Yöntemi	Numune Hazırlama Yönteminin Deney Sonucuna Etkileri
Ishihara, 1993	Üç Eksenli Basınç Deneyi	Toyoura Kumu G <sub>s</sub> =2.65	Kuru Huni -Nemli Tokmıklama -Suda Çökeltme	Numune hazırlama yöntemi zeminin dokusunu etkilemekte ve bu nedenle farklı boşluk oranlarında numuneler elde edilebilmektedir.  Farklı numune hazırlama metotlarından gevşek numuneler elde edilmiş, silt oranı %30'lara yaklaştığında en düşük boşluk oranı, nemli tokmıklama ve suda çökeltme yöntemiyle kıyaslandığında kuru huni yöntemiyle hazırlanıp doyurulan numunelerde gözlenmiştir.
Zlatovic & Ishihara, 1995	Drenajsız Üç Eksenli Basınç Deneyi	Toyoura Kumu G <sub>s</sub> =2.65 Non-plastik silt %30-%40	-Kuru Huni -Nemli Tokmıklama -Suda Çökeltme	

**Çizelge 1.1 (devamı) : Numune hazırlama yöntemleri ve yöntemlerin deney üzerine etkileri.**

Referans	Test Tipi	Kullanılan Numune ve Fiziksel Özellikleri	Numune Hazırlama Yöntemi	Numune Hazırlama Yönteminin Deney Sonucuna Etkileri
Yamamuro & Lade, 1997	Drenajlı ve Drenajsız Üç Eksenli Basınç Deneyi	Nevada Kumu $G_s=2.68$ $e_{max}=0.87$ $e_{min}=0.55$ Ottawa Kumu $G_s=2.65$ $e_{max}=0.83$ $e_{min}=0.51$	-Kuru Huni -Nemli Tokmaktama	Numune hazırlama yöntemlerinin katkısıyla gevşek ve sıkı numunler oluşturulmuş ve birçok temiz kumun siltli kumla karşılaştırıldığında sıvılaşmaya daha büyük direnç gösterdiği kanıtlanmıştır. Göreceli sıklık ve gerilme şartlarının aynı olmasına rağmen drenajsız davranışta göze çarpan farklılıklar görülmüştür. Numune hazırlama yönteminin drenajsız davranışı sezilebilir bir şekilde etkilediği kanıtlanmıştır.
Yamamuro & Wood, 2004	Drenajsız Üç Eksenli Basınç Deneyi	Nevada Kumu $G_s=2.68$ Non-plastik silt %20 $G_s=2.73$	-Kuru Huni -Suda Çökeltme -Bulamaç Çökeltmesi -Havadan yağmurlama	Numune hazırlama yönteminin numune davranışına etkisi silt içeriği arttığında özellikle gevşek durumda daha fazla gözlemlenmiştir.
Wood ve diğ. 2008	Drenajsız Üç Eksenli Basınç Deneyi	Nevada Kumu $G_s=2.68$ Non-plastik silt %10-%20-%40 $G_s=2.71$	-Kuru Huni -Suda Çökeltme -Bulamaç Çökeltmesi -Havadan yağmurlama	Kuru huni yöntemiyle hazırlanan numunelerde kararsız tanecik yapısının su çökeltme yöntemine kıyasla çok daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Kuru huni yöntemiyle daha uniform siltli kum numuneleri oluşturabildiklerini savunmuşlardır. Deney sonuçları, silt eklemesinin anizotropinin etkisini belirli bir silt içeriğine kadar azalttığını daha sonra arttırmaya başladığını göstermiştir. Bu durumun karışımın kararsız yapısından kaynaklandığı belirtilmiştir.
Yamamuro ve diğ. 2008	Drenajsız Üç Eksenli Basınç Deneyi	Nevada Kumu $G_s=2.68$ Non-plastik silt $G_s=2.71$	-Kuru Huni -Suda Çökeltme	
Bahadori ve diğ. 2008	Drenajsız Silindirik Burulmalı Kesme Deneyi	Firoozkuh Kumu $G_s=2.65$ $e_{max}=0.874$ $e_{min}=0.548$ Non-plastik silt	-Kuru Huni	

**Çizelge 1.1 (devamı) : Numune hazırlama yöntemleri ve yöntemlerin deney üzerine etkileri.**

Referans	Test Tipi	Kullanılan Numune ve Fiziksel Özellikleri	Numune Hazırlama Yöntemi	Numune Hazırlama Yönteminin Deney Sonucuna Etkileri
Sitharam & Dash, 2008	Üç Eksenli Basınç Deneyi	Temiz Kum $G_s=2.65$ Non-plastik silt %50-%75	-Kuru Huni	Boşluk suyu basıncının oluşmasında iri ve ince daneler arası boşluk oranlarının etkileri ve kumlu numunelerin sıvılaşma direnci gerilme kontrollü testlerle belirlenmiştir. Silt içeriği sınır miktarına ulaşana kadar sıvılaşma direncinde azalma gözlemlenirken, silt içeriğinin sınır miktarının ötesine geçmeye başlamasıyla kum yapısı davranışının yerini karışım yapısının davranışına bıraktığı belirtilmiştir. Kuru huni yöntemiyle hazırlanan numunelere farklı bir sıkılaştırma tekniği uygulanmış, bu teknikle zemin dokusu ve drenajsız davranış daha az etkilenirken sıkı numuneler de elde edilebilmiştir.
Monkul & Yamamuro, 2010,2011	Drenajsız Üç Eksenli Basınç Deneyi	Nevada Kum $G_s=2.68$ Loch Raven Silt %20 $G_s=2.73$	Kuru Huni	

### 1.1.2 Kum numunelerinde göreceli sıklığın sıvılaşma direncine etkisi üzerine literatür incelemesi

Arazide gerçekleştirilen sıvılaşma tehlikesi analizlerinde birçok koşul dikkate alınmakta ve incelenmektedir. İncelenen en önemli koşul deprem büyüklüğü ve merkezine uzaklık olmakla beraber zemin tabakasının durumu, jeolojik tarihçesi ve göreceli sıklık durumları da incelenen önemli faktörlerdendir. Sıvılaşma, çevrimli yüklemeler altında oluşan artan boşluk suyu basınçları sonucunda meydana geldiği için, zeminin hacim değişim potansiyeli ve su geçirgenliği üzerinde etkili olduğu bilinen dane boyutu ve dağılımı sıvılaşma için incelenmesi gereken önemli özelliklerdir. Zemini meydana getiren danelerin boyut, biçim ve dağılım gibi özellikleri, zemin deformasyonunda oldukça etkilidir. Deformasyon da aşırı boşluk suyu basıncı oluşumunda etkili olduğundan, göreceli sıklık parametresi sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesinde büyük önem taşımaktadır. Literatürde göreceli



sıklığın sıvılaşma direncine etkisini belirten birçok çalışma yapılmıştır. Polito ve Martin (2001), deney sonuçlarındaki farklılıkların, göreceli sıklık ve boşluk oranı faktörleriyle açıklandığını ileri sürmüşlerdir.

Peacock ve Seed (1968), doygun kum numuneleri üzerinde dinamik basit kesme deneyleri uygulamışlardır. Göreceli sıklığın %80'in altında olduğu durumlarda göreceli sıklık ve çevrimsel gerilme arasında aşağı yukarı doğrusal bir ilişki görüldüğü ve bu durumun sıvılaşmaya sebep olduğu, buna karşılık göreceli sıklığın %80'in üstüne çıktığı durumlarda sıvılaşmaya sebep olan çevrim sayısında önemli bir artış görüldüğü gözlemlenmiştir. Bu çalışmada varılan en önemli bulgu, aynı göreceli sıklıktaki numuneler için dinamik basit kesme deneylerinde sıvılaşma için gereken çevrimsel kayma gerilmesinin dinamik üç eksenli deneylerde elde edilenin yaklaşık üçte birine denk gelmesidir.

Finn ve Vaid (1977), kuru ve doygun numunelerle dinamik basit kesme deneyleri gerçekleştirmiş ve kuru numuneler kullanarak sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesini sağlamışlardır. Kohezyonsuz zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi için, drenajsız durumda suya doygun numunelerin çevrimsel yükleme deneylerinin de olduğu bir çok laboratuvar metodu mevcuttur. Deneyler sabit hacim kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir. Sabit hacim kontrollü basit kesme deney sistemi drenajlı doygun numuneler veya kuru numunelerin sıvılaşma potansiyelinin belirlenebilmesi için geliştirilmiştir. Sabit hacim kontrolü için gereken düşey gerilme değişimi, drenajsız bir deneydeki aşırı boşluk suyu basıncına eşittir. Sabit hacim kontrollü deney sisteminde genleşmeyi engelleyecek şekilde bir düşey gerilme artışı uygulanmakta ve bu gerilme artışı eşdeğer bir drenajsız deneydeki negatif aşırı boşluk suyu basıncı değişimine tekabül etmektedir. Tüm deneyler Ottawa kumu üzerinde 200 kPa, 300 kPa ve 400 kPa efektif düşey gerilme altında ve 2 Hz frekansında gerçekleştirilmiştir. Bu testlerin sonucunda sabit hacimli testlerin uygulanmasının kolay ve hızlı olduğu ayrıca, drenajsız testlerde mevcut olan zorluklardan hiçbirine sahip olmadığı gözlemlenmiştir. Ayrıca göreceli sıklık değeri %35-%72 arasında ve farklı çevrimsel kayma gerilmesi oranlarında yapılan deneylerde, çevrimsel kayma gerilmesinin artmasıyla sıvılaşma direncinin düştüğü, göreceli sıklığın artmasıyla ise sıvılaşma direncinin yükseldiği gözlemlenmiştir.

Ishihara ve Yamazaki (1980), Doygun kum numunelerine çok yönlü drenajsız dinamik basit kesme deneyleri uygulamışlardır. Yer seviyesinde bir zemin elemanı

deprem esnasında kayma dalgalarının artan yayılmasıyla sarsıldığı zaman, yatay düzlemde zemin elemanına aktarılan kayma gerilmesinin kararsız etkisi sadece genliğin değil, yönün etkisini de kapsamaktadır. Laboratuvarlarda karmaşık gerilime benzer uygunlukta olan test cihazlarının çok zor şekilde ayarlanmasından dolayı genelde bir yönlü çevrimsel testler uygulanmıştır. Çok yönlü dinamik basit kesme deneyleriyle ilgili ilk girişimler Seed ve Chan (1975) tarafından yapılmıştır. Bu deneylerle tek yönlü yapılan testlerde gerçekleşen oturmanın çok yönlü testlere göre daha az olduğu gözlemlenmiştir. Aynı kumda sıvılaşma direnci üzerinde yapılan karşılaştırmada çok yönlü yüklemeye sıvılaşma direncinin %15 daha azaldığı gözlemlenmiştir.

Vaid ve Sivathayalan (1996), Fraser Delta kumunun drenajsız statik ve dinamik davranışını dinamik basit kesme deneyleriyle belirlemiştir. Çalışmanın temel amacı dinamik basit kesme davranışının, üç eksenli deney sonuçlarıyla karşılaştırılmasıdır. Kumun sıvılaşma potansiyelinin gerilme durumundan fazlasıyla etkilendiği gözlemlenmiştir. Dinamik basit kesme deneyleriyle, kumun deprem yükleri altındaki davranışı daha gerçekçi betimlenirken, üç eksenli sonuçlarıyla da basit kesme direncine eşdeğer düzeltme faktörleri elde edilmektedir. İlk durumda mevcut boşluk oranı ve efektif gerilme, sıvılaşma potansiyelini yükleme boyunca etkilemektedir. Tipik deprem şartları altında zemin davranışının doğrudan ölçülmesiyle çok büyük ekonomik fayda sağlanacağı da unutulmamalıdır.

Wijewickreme ve diğ. (2005), gevşek Fraser River kumuna ilk statik kayma gerilmesinin uygulandığı ve uygulanmadığı şartlarda sabit hacimli basit kesme deneyleri uygulamışlardır. Gerilme ve deformasyon için gözlemlenen eğilimlerin benzer olmasına rağmen, havadan yağmurlama yöntemiyle hazırlanan numunelerin ıslak yağmurlama yöntemiyle hazırlanan numunelere nazaran sıvılaşmaya daha yatkın olduğu tespit edilmiştir. Bu fark numune hazırlama yönteminin, numune yapısında meydana getirdiği etkilerden ve farklılıklardan kaynaklanmaktadır. Sıkılaştırma etkisi incelendiğinde ise, ıslak yağmurlama ile hazırlanan numunelerde öne çıkan büyük bir fark olmadığı görülmüştür.

Porcino ve diğ. (2006), NGI tipi cihazı modifiye edip otomatik kontrollü bir sistem geliştirmiş, tek yönlü monotonik ve çevrimsel basit kesme deneylerinin otomatik ve elektromekanik bir sistemle uygulanmasına olanak vermişlerdir. Düşük frekanslı çevrimsel deneylere uygun kademeli motor sistemi kullanılmış ve bilgisayar kontrol

yazılımlarıyla iki algoritma uygulanmıştır. Bunlardan ilki drenajsız kesme evresinde sabit yükseklik kontrolü, diğeri ise deneyler esnasında yatay yük ve yatay yer değiştirmenin kontrolüdür. Drenajsız koşullar altında dinamik basit kesme deneyleri doygun kohezyonsuz zeminlerin ve doygun killerin sıvılaşma direncinin belirlenmesinde kapsamlı olarak uygulanmaktadır. Bu amaç için zeminlerin sıvılaşma davranışının belirlenmesinde sabit hacimli drenajsız basit kesme deneyleri Bjerrum ve Landva, (1966), Finn (1985), normal konsolide killer üzerinde basit kesme deneyleri Dyvik ve diğ. (1987) ve kumlar üzerinde basit kesme deneyleri Finn ve Vaid, (1977), Finn (1985) uygulanmıştır. Bu çalışmada kabul edilen otomatik ve elektromekanik kontrol sisteminin sabit hacim şartları altında düşük frekanslı çevrimli basit kesme testleri için geğerli bir çözüm olduğu görölmektedir. Silindirik zemin numunesi kauçuk membranla sarılmıştır. Böylelikle yanal deformasyonun sınırlı olması garanti altına alınmıştır ve bu şekilde düşey yerdeğiştirme de önlenerek, sabit hacim şartları sağlanabilmiştir. Sabit hacim tekniğiyle yapılan deneylerin birçok avantajı bulunmaktadır. Bu yöntemle, numune hazırlama ve test prosedürünün uygulanması daha kolay olduğundan vakitten kazanç sağlanmaktadır. Özet olarak numune yüksekliğinin korunması ve yanal yerdeğiştirmenin uygulanan genlik ve frekansta kontrol edilmesiyle Ticino kumu üzerinde 100 kPa efektif düşey gerilme ve 0.02 Hz frekansta %40 göreceli sıklıktaki numunelerin suda çökeltme metodu ile oluşturulmasıyla deneyler gerçeleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlarla, değişmez yükseklik kontrolü ile tutarlı deneyler yapılabileceği gözlemlenmiştir.

Porcino ve Caridi (2007), silisli kumun sıvılaşma davranışını, iki temel özelliği göz önünde bulundurarak incelemiştir. Boşluk suyu basıncı sonucunda oluşan hacimsel deformasyon ve ilk yükleme altında önceden sıvılaşmış kumun özellikleri ayrı ayrı ele alınmıştır. Depremler sırasında hasarın asıl nedeninin zemin sıvılaşması olduğu bilinmektedir. Bu çalışma için gevşek ve sıkı olarak hazırlanan numuneler drenajsız şartlarda ilk çevrimsel yükleme altında teste tabi tutulmuştur. Tekrar konsolide edildikten sonra aynı genlikte ikinci çevrimsel kayma gerilmesi uygulanmıştır. Böylelikle önceden sıvılaşmış numunelerin sıvılaşma direnci üzerinde kapsamlı bir şekilde inceleme yapılabilmıştır. Drenajsız çevrimsel yüklemeyi takip eden yeniden konsolide edilme esnasında belirlenen hacimsel değişimler diğer araştırmacıların eşdeğer çalışmalar üzerindeki öngörülerıyla karşılaştırılmıştır. Çalışmada bilhassa, sismik sıvılaşma direnci, ön sıvılaşma, sıkılaştırma özellikleri ve önceden sıvılaşmış

kumun yeniden sıvılaşma direnci üzerinde durulmuş, ilk statik kayma gerilmesinin sıvılaşma üzerindeki etkilerini belirlemek ve çevrimsel kayma gerilmesi ile faz dönüşüm kuvveti yani faz dönüşümü esnasındaki gerilme durumu arasındaki ilişkiyi tespit etmek için drenajsız simetrik ve simetrik olmayan dinamik basit kesme deneyleri uygulanmıştır. Sonuçlarda göze çarpan bulgulara göre çevrimsel direnç oranı ile faz dönüşümü sırasındaki gerilme oranı arasında yakın bir ilişki olduğu görülmüştür. Bu ilişki test edilen kumun göreceli sıkılığında bağımsızdır. Daha önce Ishihara ve Yoshimine (1992) de belirtildiği gibi sonradan sıvılaşma davranışı farklı göreceli sıkılık durumundaki numuneler için incelendiğinde, tekrardan konsolide edilme evresinde hacimsel deformasyon gözlenmektedir. Daha önce sıvılaşmış sıkı kum numunelerinin yeni çevrimsel yüklemelerde çevrimsel direncinin aynı olduğu, gevşek kumlar içinse sıvılaşma direncinin düştüğü gözlemlenmiştir. Bu durum yapılmış olan önceki çalışmalarla tutarlıdır. Böylelikle sıvılaşmış kum üzerinde yapılan testlerde göreceli sıkılığın sıvılaşma direncinde değişime sebep olduğu kanıtlanmıştır.

Chang ve Hong (2008), çeşitli kil içeriklerinde doymun numunelere 0.1 Hz frekansta drenajsız basit kesme deneyleri yapmışlardır. Killi kumlarda sıvılaşma davranışı farklı oranlardaki kil içeriklerine göre kum davranışı ya da kil davranışı gösterme durumuna göre gruplanmıştır. Aynı iri daneler arası boşluk oranında çevrimsel direnç oranı ve kil içeriği arasında bir ilişki olduğu belirlenmiştir. Yapılan deneylerde çevrimsel direnç oranı iki duruma göre incelenmiştir. Öncelikle daneler arası boşluk oranı göz önünde bulundurularak kumun direnci incelenmiştir. İkinci durumda ise farklı oranlardaki kil içeriklerine göre çevrimsel direnç oranında meydana gelen artış incelenmiştir. Kil partiküllerinin özellikleri nedeniyle çevrimsel dirençte meydana gelen artış oranının çeşitli olduğu gözlemlenmiştir.

Sivathayalan ve Ha (2011), ilk statik kayma gerilmesinin kumlarda drenajsız basit kesme üzerindeki etkisini belirlemek için, farklı iki kum üzerinde geniş göreceli sıkılık aralığında ve farklı efektif gerilmeler altında deneyler yapmışlardır. Silisli kum ve Fraser River kumu üzerinde yapılan dinamik basit kesme deneyi sonuçlarıyla  $K_a$  düzeltme faktörünü elde etmek için göreceli sıkılık değeri ve gerilme durumu göz önünde bulundurularak kumların çevrimsel direnci değerlendirilmiştir. Dinamik basit kesme yüklemesi altında sınırlayıcı gerilme efektif düşey gerilme ile temsil edilirken, statik kesme de yatay düzlemdeki kayma gerilmesiyle temsil edilmektedir. Statik

kayma gerilmesi deprem yüklemesi altındaki öncelikli kayma gerilmesini temsil etmektedir. Belli bir göreceli sıklıkta kum numunelerinde statik kayma gerilmesinin çevrimsel direnç üzerine etkisi yükleme esnasında gerilme deformasyon tepkisine bağlı olarak ortaya çıkmıştır. Yazarların deneysel bulgularındaki genel eğilim ilk statik kayma gerilmesinin kumlarda çevrimsel direnci arttırdığı yönündedir.

Fonesco ve diğ. (2015), çevrimsel yükleme altında göreceli sıklığın ve çevrimsel direnç oranının sıvılaşma üzerine etkisini belirlemişlerdir. Deneyler Cezayir'in Ain Beniam bölgesinden ve Portekiz'in Coimbra bölgesinden getirilen iki farklı kum üzerinde gerçekleştirilmiştir. Algeria kumu 2003 yılında Bourmedes depremiyle sıvılaşma olayları yaşanan bölgeden getirilmiş bir zemindir. Bu kum üzerinde 100 kPa ve 300 kPa efektif düşey gerilme uygulanarak dinamik basit kesme deneyleri yapılmıştır. Coimbra kumu ise 1755 Lisbon depreminin yaşandığı Portekiz bölgesinden getirilmiştir. Kumun getirildiği bölge alüvyonal kumlu bir bölge olup, sıvılaşmaya yatkındır. Bu kumla geniş göreceli sıklık aralığında efektif düşey gerilmenin 100 kPa, 300 kPa ve 500 kPa olarak uygulandığı deneyler yapılmıştır. Sıvılaşma, boşluk oranı, göreceli sıklık, konsolidasyon, gerilme, arazide hakim olan statik kayma gerilmesi vs. bakımından çok hassas parametrelerle ilişkili olduğundan, hala pek çok sır barındıran konuların başında gelmektedir. Bu faktörlerin çoğu zeminden zemine farklılık göstermektedir. Kendine özgü tanecik şekli ve granülometri eğrisi bulunan kumlara farklı efektif gerilmeler altında, farklı çevrimsel kayma gerilmesi oranlarında ve geniş göreceli sıklık aralığında deneyler yapılarak tüm bu parametrelerin sıvılaşma davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. 72 mm çaplı, 38 mm uzunluğundaki numuneler nemli tokmaktama yöntemiyle hazırlanmıştır (Fonesco ve diğ, 2015). Nemli tokmaktama yöntemini seçmelerinin nedenini, çeşitli boşluk oranlarında ve yeterli üniformlukta numuneler elde edilebilmesi olarak belirtmişlerdir. Testler sabit hacim kontrollü olarak gerçekleştirildiğinden kuru kum numunelerinin sıvılaşma direnci belirlenebilmiştir. Söz konusu testlerde, ilk numune yüksekliği kumpasla ölçülmüş olup, daha sonra teflon ringlerle çevrelenmiş membran içindeki numune üstüne başlık yerleştirilmiştir. Sistem kapatılıp deney başladıktan sonra, konsolidasyon aşamasındaki düşey yer değiştirme ölçülüp, kesme aşamasında ise sabit hacim şartı sağlanmıştır. Yapılan dinamik basit kesme deneyleri sonuçlarında göreceli sıklık değerleri, numune hazırlandıktan sonra ilk boşluk oranı ve konsolidasyon sonundaki boşluk oranı değerleri gösterilmiştir. Gevşek, orta sıkı

ve sıkı olarak hazırlanmış numunelerde, numune sıkılaştırma etkisinin, numune hazırlama yönteminden kaynaklandığı gözlemlenmiştir. Farklı göreceli sıklıklardaki bu numunelerde konsolidasyon sonrası boşluk oranı değişimlerine bakılmış ve konsolidasyon sonrası boşluk oranı değişimlerinin aynı olmadığı belirlenmiştir. İlk statik kayma gerilmesi ihmal edilerek yapılan deneylerde başlıca varılan sonuç, efektif düşey gerilme arttırıldıkça sıvılaşma direncinde azalma gözlemlenmesidir. Yüksek göreceli sıklık değerlerinde bu etki daha belirgin bir şekilde kendini göstermektedir. (Fonesco ve diğ, 2015).

Eseller-Bayat ve diğ. (2017), plastik olmayan silt, düşük plastisiteli kaolin ve yüksek plastisiteli kilin, temiz kum içerisine %5 ve %10 oranında eklenmesiyle elde edilen kumlu zeminler üzerinde CSR, ince dane oranı, plastisite ve göreceli sıklığın zeminlerin sismik sıvılaşma direncine bütünlük etkisini incelemişlerdir. Çalışmada tüm testler dinamik basit kesme düzeneği ile gerçekleştirilmiş ve deney numuneleri suya doygun bir şekilde hazırlanmıştır. Plastik olmayan silt, yüksek plastisiteli ve düşük plastisiteli kil içeren kum numunelerinin sıvılaşma davranışı 0.12, 0.1 ve 0.08 çevrimsel kayma gerilmesi oranlarında incelenmiştir. Deney sonuçları; ince dane oranı, plastisite, göreceli sıklık, çevrimsel kayma gerilmesi oranı gibi parametreler açısından karşılaştırılmış ve çeşitli parametrelerin sıvılaşma davranışı üzerindeki etkisi bundan önceki çalışmaların aksine bütünlük olarak ele alınmıştır. Deney sonuçlarına bakıldığında çevrimsel kayma gerilmesi oranının artmasıyla zeminin daha kolay sıvılaştığı gözlemlenmiştir. İnce dane oranının artmasıyla yine sıvılaşma direncinin düştüğü gözlemlenmiştir. Plastisitenin etkisinin belirlenebilmesi için düşük plastisiteli kil olarak plastisite değeri 11 olan kaolin, yüksek plastisiteli kil olarak ise plastisite değeri 45 olan başka bir zemin kullanılmış, ayrıca plastik olmayan siltte kullanılarak plastisitenin etkisinin tam anlamıyla anlaşılması için çalışmalar yapılmıştır. Buna karşılık düşük plastisiteli kilin yapısından kaynaklanan bir problem olduğu düşünülüp silt ve yüksek plastisiteli kil arasında karşılaştırmalar yapılmış, deney sonuçları ayrıntılı bir şekilde değerlendirilmiştir. Yapılan değerlendirmeler neticesinde, aynı göreceli sıklık değerinde yapılan karşılaştırmada temiz kumun siltli kum ve killi kuma göre daha yüksek sıvılaşma direnci gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu durumun literatürde önceden yapılmış çalışmalarla uzlaştığı belirtilmiştir. İnce dane oranı %5 olan numunelerin deney sonuçları incelendiğinde tüm CSR değerlerinde eğilimlerin birbirine yakın olduğu ve %5 gibi düşük ince dane

oranlarında plastisitenin sıvılaşma direncine etkisi olmadığı görülmektedir. Ancak ince dane oranı %10'a çıktığında plastisitenin sıvılaşma direnci üzerindeki etkisi hem göreceli sıklık hem de CSR'a bağlı olarak net bir şekilde gözlemlenmiştir.

Plastisite, ince dane içeriği, göreceli sıklık ve CSR parametrelerinin hepsinin biraraya geldiğinde sıvılaşma direncini etkilediği saptanmış, bu nedenle tüm bu parametrelerin bütünleşik etkisinin, ayrı ayrı etkilerine göre daha etkili olduğu belirtilmiştir. Plastisite etkisinin ince dane oranı ve göreceli sıklık artıp, CSR azaldıkça önemli ölçüde arttığı gözlemlenmiştir. Orta göreceli sıklık ve düşük CSR değerlerinde eklenen %10 yüksek plastisiteli siltin plastik olmayan siltlerle karşılaştırıldığında kumu daha sıvılaşabilir bir hale getirdiği gözlemlenmiş, bu durumun geoteknik deprem mühendisliği için şaşırtıcı bir durum olduğu belirtilmiştir. Çünkü literatürde plastisitenin sıvılaşma direncini arttıran pozitif bir faktör olduğu bilinmektedir. Bu durumun aksi çıkmasının nedenleri arasında killerin su tutma özelliklerinden kaynaklanan yağlanma etkisi nedeniyle kum taneleri etrafında tabakalanmasından olduğu belirtilmiştir.

Her üç göreceli sıklık aralığında (gevşek-orta-yüksek) ince dane oranının %5'ten %10'a yükselmesiyle siltli kumda sıvılaşma direncinin değişmediği gözlemlenmiştir. Benzer şekilde killi kumlar içinde gevşek göreceli sıklık değerlerinde kil içeriğinin değişimi sıvılaşma direncinde önemli bir değişime sebep olmamıştır. Fakat killi kumlar için aynı anda göreceli sıklık yükselip, CSR azaldığında ince dane içeriğinin sıvılaşma direnci üzerindeki etkisi farkedilir bir şekilde gözlemlenmeye başlamıştır. CSR değeri 0.08 olduğunda kil içeriğinin %5'ten %10'a yükselmesiyle killi kumlu numunelerin sıvılaşma direncinde kayda değer bir azalma görülmüştür. Göreceli sıklığın artmasıyla birlikte artan sıvılaşma direncinin, ince dane oranının %10'a yükselmesiyle zayıfladığı gözlemlenmiştir. Sıvılaşma direncine göreceli sıklığın etki ettiği gibi aynı anda plastisitenin de etki ettiği görülmektedir. Özellikle ince dane plastik özelliğe sahip olduğunda, göreceli sıklığın etkisini önemli derecede azalttığı dikkat çekmektedir.

**Çizelge 1.2 : Kum numunelerinde farklı çevrimsel kayma gerilmesi oranlarında göreceli sıklığın sıvılaştırma direncine etkisi.**

Referans	Kullanılan Numune ve Fiziksel Özellikleri	Efektif Düşey Gerilme (kPa)	CSR	Dr	N <sub>L</sub>
Peacock & Seed, 1968	Monterey California Kumu	200 kPa	0.05	50	100
	G <sub>s</sub> =2.64	200 kPa	0.1	50	8
	e <sub>max</sub> =0.83 e <sub>min</sub> =0.53	300 kPa	0.08	50	8
Finn & Vaid, 1977	Ottawa Kumu	200 kPa	0.13	51	10
	e <sub>max</sub> =0.82	200 kPa	0.1	35	5
	e <sub>min</sub> =0.59	200 kPa	0.1	50	15
Ishihara & Yamazaki, 1980	Tokyo Fuji River Kumu	200 kPa	0.1	49	45
	G <sub>s</sub> =2.728 e <sub>max</sub> =1.032 e <sub>min</sub> =0.481				
Vaid & Sivathayalan, 1996	Fraser River Kumu	50 kPa	0.13	50	10
	G <sub>s</sub> =2.72 e <sub>max</sub> =1.00 e <sub>min</sub> =0.68		0.15	64	10
Wijewickreme ve diğ. 2005	Fraser River Kumu	50 kPa	0.12	38	2
	G <sub>s</sub> =2.72 e <sub>max</sub> =1.00 e <sub>min</sub> =0.68		0.08	38	15
Hazırbaba, 2005	Monterey Kumu	100 kPa	0.11	56	30
Porcino ve diğ. 2006	Ticino Kumu	100 kPa	0.15	40	8
	G <sub>s</sub> =2.68 e <sub>max</sub> =0.905 e <sub>min</sub> =0.559				

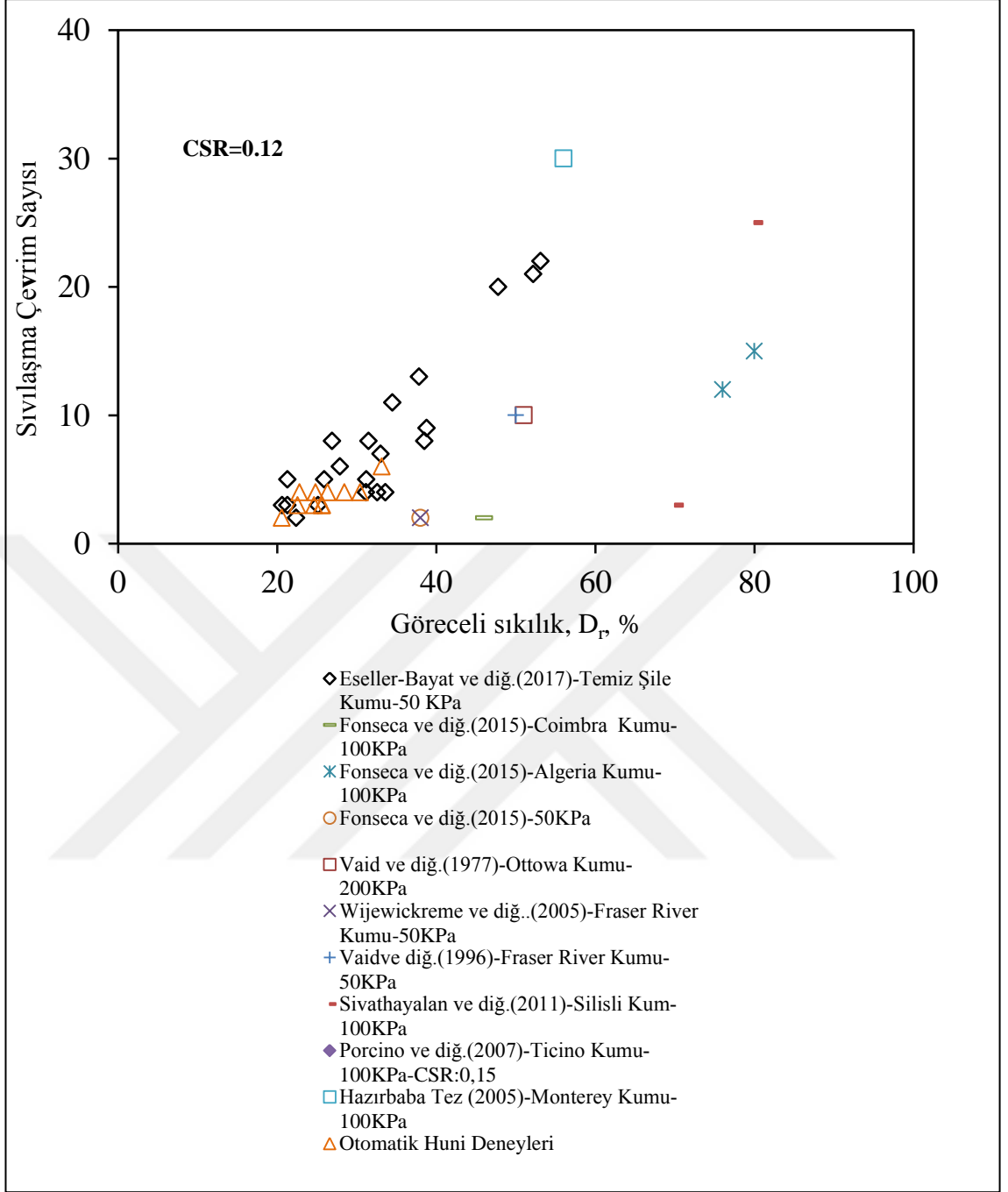


**Çizelge 1.2 (devam) : Kum numunelerinde farklı çevrimsel kayma gerilmesi oranlarında göreceli sıklığın sıvılaştırma direncine etkisi.**

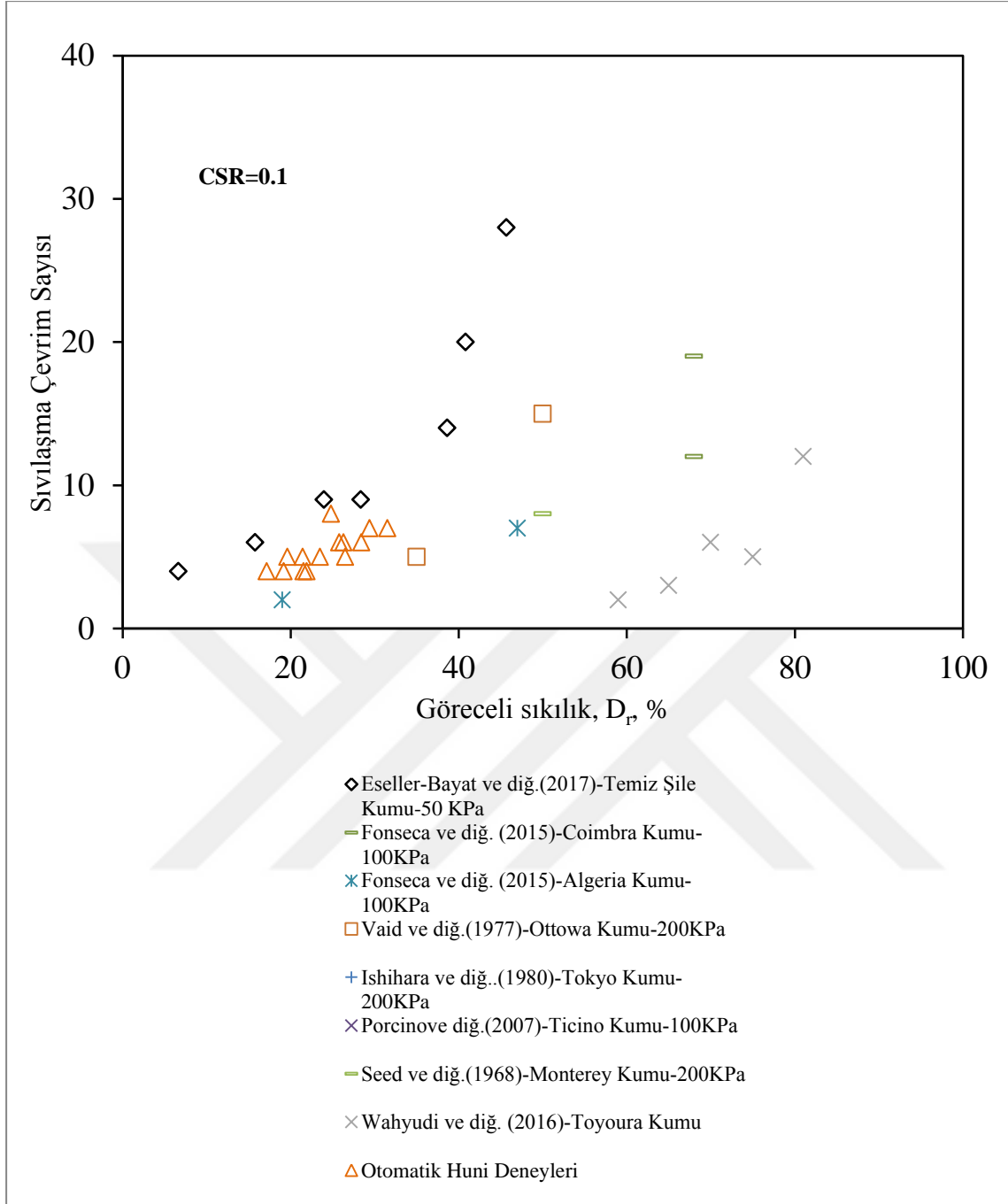
Referans	Kullanılan Numune ve Fiziksel Özellikleri	Efektif Düşey Gerilme (kPa)	CSR	Dr	N <sub>L</sub>
Porcino & Caridi, 2007	Ticino Kumu G <sub>s</sub> =2.68 e <sub>max</sub> =0.905 e <sub>min</sub> =0.559	100 kPa	0.1	40	90
		100 kPa	0.15	75	70
Chang & Hong, 2008	Vietnam Kumu G <sub>s</sub> =2.65 e <sub>max</sub> =0.92 e <sub>min</sub> =0.61	100 kPa	0.17	Çeşitli Dr aralıklarında	11
		100 kPa	0.15		25
		100 kPa	0.13		47
		100 kPa	0.11		258
		100 kPa	0.15		60
		100 kPa	0.17		22
		100 kPa	0.21		6
		100 kPa	0.18		142
Sivathayalan & Ha, 2011	Silisli Kum G <sub>s</sub> =2.66 e <sub>max</sub> =0.723 e <sub>min</sub> =0.478 Fraser River Kumu e <sub>max</sub> =0.806 e <sub>min</sub> =0.509	100 kPa	0.12	70	3
		100 kPa	0.12	80	25
		100 kPa	0.08	65	4
		100 kPa	0.08	70	25
Fonseca ve diğ. 2015	Ain Beniam Kumu G <sub>s</sub> =2.69 e <sub>max</sub> =0.89 Coimbra Kumu G <sub>s</sub> =2.66 e <sub>max</sub> =0.81 e <sub>min</sub> =0.48	100 kPa	0.1	52	16
		100 kPa	0.1	55	27
		100 kPa	0.09	49	22
		100 kPa	0.12	76	12
		100 kPa	0.12	80	15
		50 kPa	0.12	38	2
		50 kPa	0.08	38	11
		100 kPa	0.1	68	12
		100 kPa	0.1	68	19
		100 kPa	0.06	15	8
		100 kPa	0.06	41	36
		100 kPa	0.06	42	13
		100 kPa	0.07	42	25
		100 kPa	0.07	44	11
		100 kPa	0.08	40	10
100 kPa	0.08	47	7		
100 kPa	0.08	19	2		
100 kPa	0.08	65	54		
100 kPa	0.1	46	2		

**Çizelge 1.2 (devam) : Kum numunelerinde farklı çevrimsel kayma gerilmesi oranlarında göreceli sıkılığın sıvılaşma direncine etkisi.**

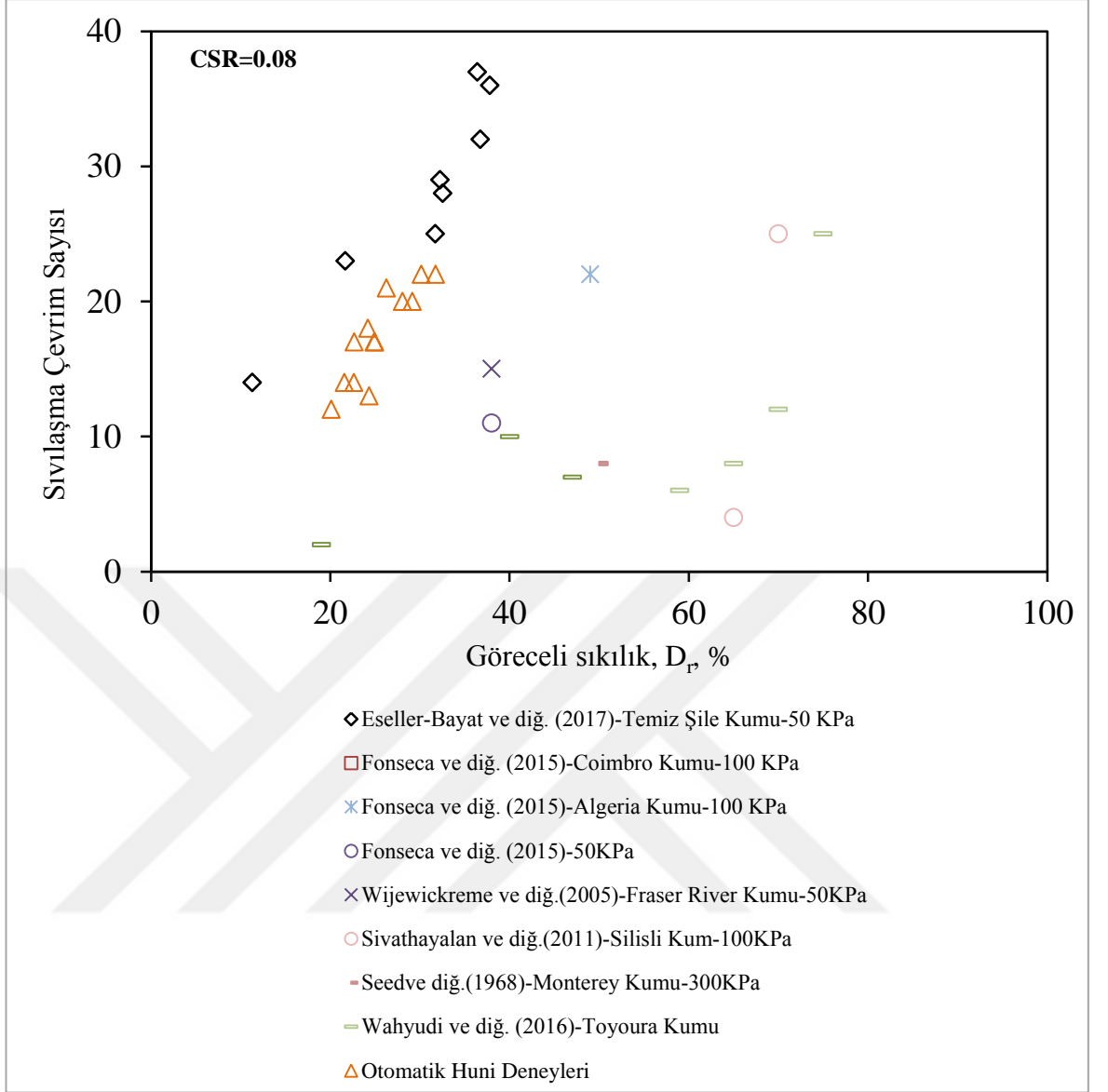
Referans	Kullanılan Numune ve Fiziksel Özellikleri	Efektif Düşey Gerilme (kPa)	CSR	Dr	N <sub>L</sub>
Wahyudi ve diğ. 2016	Toyoure Kumu G <sub>s</sub> =2.656 e <sub>max</sub> =0.992 e <sub>min</sub> =0.632	50 kPa	0.1	59	2
			0.1	65	3
			0.1	70	6
			0.1	75	5
			0.1	81	12
			0.07	59	6
			0.07	65	8
			0.07	70	12
			0.07	75	25
			0.12	32.57	4
			0.12	47.79	20
			0.12	53.09	22
			0.12	37.85	13
			0.12	21.27	5
Eseller-Bayat ve diğ. 2017	Şile Kumu 20/55 G <sub>s</sub> =2.65 e <sub>max</sub> =0.784 e <sub>min</sub> =0.482	50 kPa	0.12	25.91	5
			0.12	20.61	3
			0.12	25.15	3
			0.12	26.90	8
			0.12	21.30	3
			0.12	22.38	2
			0.12	27.90	6
			0.12	33.61	4
			0.12	31.18	4
			0.12	31.20	5
			0.12	31.50	8
			0.12	33.00	7
			0.12	34.50	11
			0.12	38.50	8
			0.12	38.80	9
			0.12	52.20	21
			0.1	28.36	9
			0.1	23.98	9
			0.1	15.77	6
			0.1	38.6	14
0.1	40.8	20			
0.1	45.7	28			
0.08	32.25	29			
0.08	31.73	25			
0.08	11.29	14			
0.08	21.66	23			
0.08	36.4	37			
0.08	32.5	28			
0.08	36.7	32			
0.08	37.81	36			



**Şekil 1.1** : Literatür CSR=0.12 deneylerinin göreceli sıklık-çevrimsel kayma gerilmesi ilişkisi.



**Şekil 1.2 :** Literatür CSR=0.1 deneylerinin göreceli sıklık-çevrimsel kayma gerilmesi ilişkisi.



**Şekil 1.3 :** Literatür CSR=0.08 deneylerinin göreceli sıklık-çevrimsel kayma gerilmesi ilişkisi.

## 1.2 Hipotez

Tekrarlı yükler altında zeminlerde sıvılaşmaya neden olan faktörler ve sıvılaşan zeminlerin özellikleri, üzerinde kapsamlı çalışmaların yapıldığı önemli araştırma konularını kapsamaktadır. Araziden örselenmemiş numune alınması çok zor olduğundan, bunun yanında sıvılaşma ve dinamik parametrelere etki eden çeşitli faktörlerin hassas bir şekilde ve kontrollü bir ortamda incelenebilmesi için numune hazırlanması ve laboratuvar deneylerinin gerçekleştirilmesi çok büyük önem taşımaktadır. Deneylerin tekrarlanabilir olması için, yapılan tüm deneylerde numunelerin tıpatıp aynı şekilde hazırlanması gerekli ve zorunludur. Yapılan literatür

incelemede numune hazırlama yönteminin deney sonuçlarını önemli bir şekilde etkilediği açıkça görülmektedir. Numune hazırlama yöntemlerinden kuru huni yöntemi yalnızca basit kesme deneyleri için değil, üç eksenli basınç deneyleri için de hem temiz hem de siltli kumların test edilmesi için yaygın olarak kullanılan bir numune hazırlama yöntemidir. (Monkul ve diğ. 2016, 2017b). Deney düzeneğinde zeminin özel bir kalıp içerisine oturtulmuş bir huni içerisine dökülmesinden sonra, huni düşey ekseni boyunca dikkatlice yukarı çekilmektedir. Hem dinamik basit kesme hem de üç eksenli deneyler için kullanılan bu numune hazırlama yönteminde son derece dikkatli olunması gereken hususlar söz konusudur. Bu hususlardan en önemlisi huninin sabit bir düşey eksen doğrultusunda çekilmesidir. Bunun yanında zeminin huniye döküş yüksekliği ve huninin simetri ekseni boyunca yukarı çekiş hızının göreceli sıklığı ve zeminin dinamik davranışını nasıl etkilediği bilinmemektedir. Yapılan literatür çalışmasında göreceli sıklığın da sıvılaşma davranışı üzerinde çok önemli rol oynadığı gözlemlenmiştir. Yani hem numune hazırlamanın hem de hazırlanan numunenin göreceli sıklık durumunun sıvılaşma davranışı üzerinde çok önemli etkileri bulunmaktadır. İnsan eliyle gerçekleştirilirken bu sürecin tam olarak kontrol edilebilmesi mümkün değildir. Çekiş sırasında elde oluşan titremler huninin ekseninden kaymasına sebep olmakta, aynı zamanda göreceli sıklık üzerinde etkisi bulunan huni çekiş hızı da kontrol edilememektedir. Yapılan çalışmada numune hazırlama aşamasının mükemmelleştirilmesi ve farklı göreceli sıklık aralığında numunelerin elde edilebilmesi için bilgisayar kontrollü otomatik bir huni tasarlanmıştır. Sonuç olarak bu tez kapsamında şimdiye kadar etkileri bilinmeyen 1) huni çekiş hızının numunelerin göreceli sıklığına etkisi, 2) kumlu zeminlerin huniye döküş yüksekliğinin numunelerin göreceli sıklığına etkisi, 3) insani kusurların (el titremsi, huni çekişindeki hız değişimi ve süreksizlikler, çekiş sırasındaki eksen kayması vs.) oluşturulan numunelerin sıvılaşma dirençlerine muhtemel etkileri araştırılmıştır. Temiz kum ve %10 silt kullanılarak farklı çevrimsel kayma gerilmesi oranlarında yapılan basit kesme deneyleriyle sıvılaşma davranışı ve otomatik huninin sıvılaşma davranışı üzerindeki etkisi her yönüyle karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

## **2. SABİT HACİM KONTROLLÜ DİNAMİK BASİT KESME DENEY SİSTEMİ**

Bu bölümde Dinamik Basit Kesme deney sistemi hakkında bilgi verilmiş olup, deney düzeneği ayrıntılı açıklanmıştır. Deney düzeneği hazırlanırken dikkat edilmesi gereken ve aksi takdirde deney sonuçlarını olumsuz yönde etkileyecek durumlar üzerinde özenle durulmuş ve aydınlatıcı açıklamalar yapılmıştır. Ayrıca kumların sıvılaşma davranışının kuru numunelerden nasıl belirlenebileceği sabit hacim kontrollü basit kesme deney mekanizması anlatılarak açıklanmış, aynı deney mekanizmasında suya doymuş ve kuru numunelerle yapılmış olan deney sonuçları karşılaştırılmıştır.

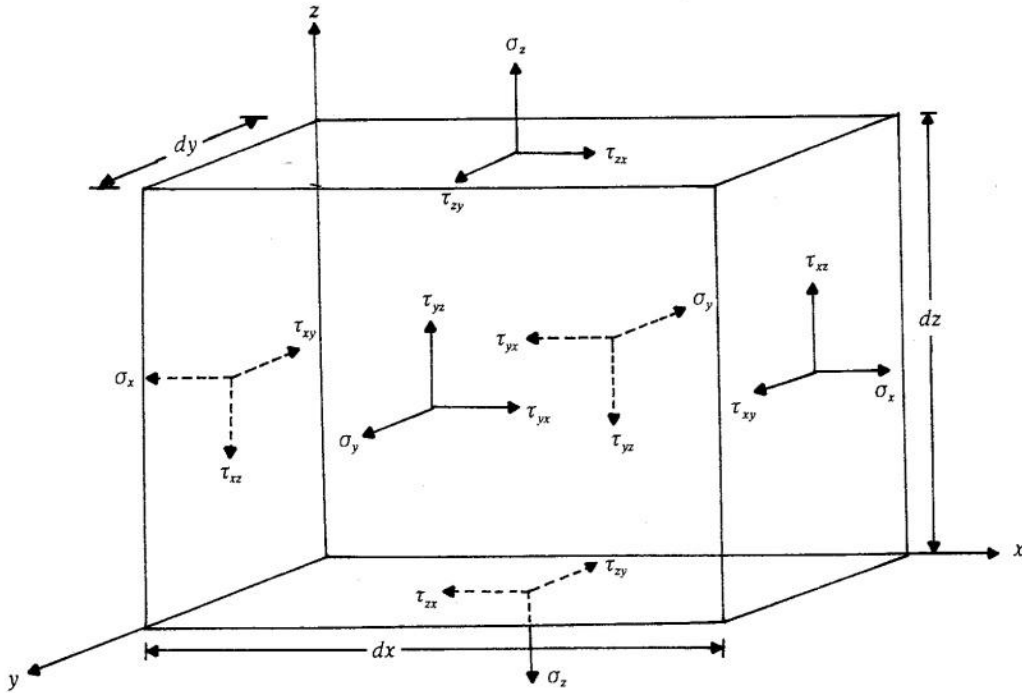
### **2.1 Basit Kesme Tanımı**

Depremlerde meydana gelebilecek hasarlara karşı önlem alınabilmesi için dinamik zemin özelliklerinin önceden ölçülmesi büyük önem taşımaktadır. Projelerin geoteknik tasarımında çok çeşitli arazi ve laboratuvar yöntemleri uygulanmakla beraber bunların her birinin çeşitli problemler açısından üstünlük ve sınırlamaları mevcuttur. Buna karşılık dinamik zemin parametrelerinin hassas bir şekilde belirlenebilmesi ve bu parametrelerin dinamik zemin davranışına etkisinin araştırılması için laboratuvar deneylerinin ayrı bir yeri bulunmaktadır. Bunun en önemli sebebi laboratuvar ortamında drenaj koşulları ve yükleme koşulları da dahil olmak üzere tüm parametrelerin hassas bir şekilde kontrol edilebilmesidir. Bu yüzden ki, büyük ve önemli projelerde geoteknik tasarımın iyi dengelenmiş bir arazi ve laboratuvar deney programına dayanması gerekmektedir. Zeminlerin dinamik davranışı araştırılırken, dinamik üç eksenli ve dinamik basit kesme deneylerinin literatürde çok fazla öne çıktığı görülmekte, buna karşılık ülkemizde basit kesme deneyi üniversiteler, kamu kuruluşları ve özel sektörün Zemin Mekaniği Laboratuvarlarında direk kesme ve üç eksenli basınç deneyleri kadar yaygın kullanılmamaktadır. (Monkul ve diğ., 2017a).

Basit kesme deneyi, zeminlerin dinamik özelliklerini ve sıvılaşma şartlarını göreceli olarak en iyi temsil eden laboratuvar deneylerinden birisidir. Bu deneyle zeminlerin gerilme-deformasyon davranışları statik (Monkul ve Dacic), 2017 veya dinamik Monkul ve diğ. (2015); Eseller-Bayat ve diğ. (2017) yükler altında incelenebilmektedir.

Bir katı içinden geçen herhangi bir düzlem üzerindeki bir noktadaki gerilmenin konumu, o düzleme genellikle dik olmak yerine, normal ve kayma olarak iki bileşene ayrılmış şekildedir. Bir köşesi x-y-z kartezyen koordinat sisteminin merkezinde olan küçük bir zemin elemanı göz önüne alındığında (Şekil 2.1) bu elemanın yüzeylerinde toplam olarak onsekiz adet bileşenin olduğu görülmektedir. Basit kesme durumunda zeminde düşey deformasyon ve kayma deformasyonu mevcuttur, diğer deformasyon değerleri sıfıra eşittir.

Drenajlı bir basit kesme deneyinde zemine etkiyen normal gerilmeler ve kayma gerilmeleri neticesinde, zeminde düşey deformasyon ve kayma deformasyonu meydana gelirken, sabit hacimli deney sisteminde düşey deformasyon oluşmamaktadır. Deneyde zemin numunesine uygulanan kesme kuvveti sebebiyle zemin yer değiştirmekte ve deforme olmaktadır.



Şekil 2.1 : Zemine etkiyen normal gerilmeler ve kayma gerilmeleri (Das, 1993).



Çok karmaşık olan arazi gerilme şartlarının laboratuvar ortamında gerçekleştirilen deney sistemleri ile oluşturulup modellenmesi oldukça zordur. Buna karşılık zeminlerin dinamik yükler altında davranışı incelenirken dinamik basit kesme deneyinin diğer deneylere nazaran daha avantajlı olduğu durumlar söz konusudur. Özellikle arazi koşulları göz önüne alındığında arazi koşullarına en yakın durumun basit kesme deney sistemi ile gerçekleştirilebildiği gözlemlenmiştir. Kesme sırasında numunenin düzlem deformasyon altında sabit tutulup, böylelikle asal gerilmelerin dönmesine olanak vermesi, basit kesme deneyinin daha gerçekçi yükleme durumu oluşturmasına imkan vermiştir. Basit kesme deneyi esnasında oluşan deformasyonların direk kesme deneyine göre daha muntazam olması ve depremler esnasındaki yükleme koşullarının dinamik üç eksenli deneyine göre daha sağlıklı modellenmesi, daha küçük boyutlu numunelerle çalışılabilmesi ve daha uniform dalga üretebilmesi basit kesme deneyinin çeşitli avantajlarından. 1950'lerin ilk yarısında Birleşik Krallık ve İsveç'te ortaya çıkan basit kesme deneyi en başta killi zeminlerin gerilme-deformasyon davranışını incelemeye kullanılırken, 1960'lı yılların sonlarında kumlu zeminlerin sıvılaşma davranışının belirlenmesinde de kullanılmaya başlamıştır.

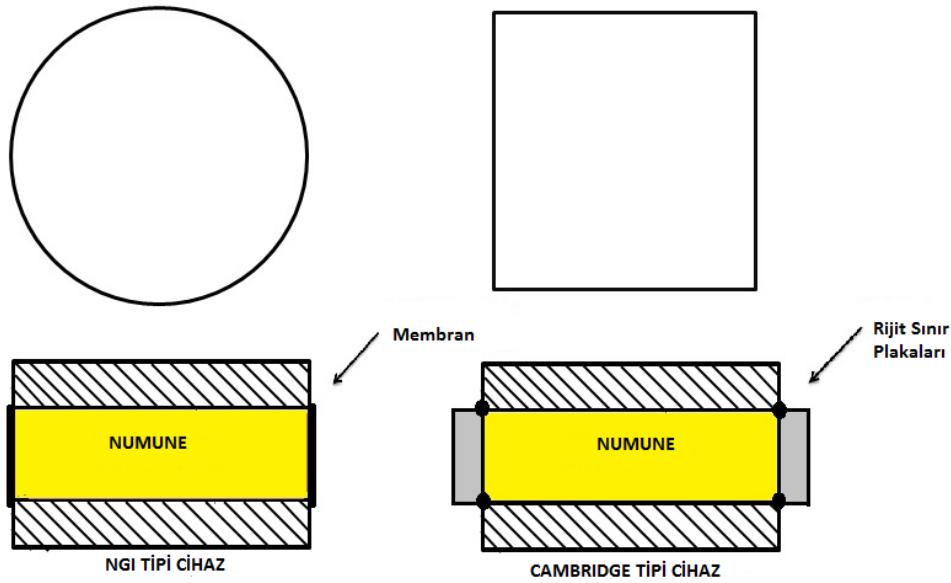
## **2.2 Dinamik Basit Kesme Deney Sistemi ve Deney Cihazının Kurulumu**

Tekrarlı yükler altında zeminlerin gerilme-şekil değiştirme davranışları ve mukavemet özelliklerinin belirlenmesinde çevrimsel kayma gerilmesi oranı ve çevrim sayısının büyük rolü bulunmaktadır. Bu özelliklerin belirlenebilmesi ve ideal basit kesme durumunun elde edilebilmesi için çeşitli dinamik basit kesme deney cihazı tipleri geliştirilmiştir. Bu cihazlardan en bilinenleri NGI (Norveç Geoteknik Enstitüsü) tipi, SGI (İsveç Geoteknik Enstitüsü) tipi ve Cambridge tipi olarak üretilenlerdir.

Dinamik basit kesme deneyinde kısa ve silindirik bir numune, rijit sınır plakaları ile (Cambridge tipi cihaz), tel takviyeli membran ile (NGI tipi cihaz) veya üstüste yığılmış halkalar ile (SGI tipi cihaz) sınırlandırılmıştır. Tekrarlı yatay kayma gerilmelerini numunenin tabanına veya tepesine uygulamak suretiyle deney numunesi, düşey olarak yayılan S dalgalarının maruz kaldığı arazideki zemine çok benzer bir şekilde deforme edilir. (Kramer, 2003).

Geoteknik mühendisliğinde büyük önem taşıyan basit kesme deneyinde arazide zemin tabakalarında meydana gelen kayma dalgalarının yayılımı esnasındaki durum çok benzer şekilde temsil edilebilmektedir. Dinamik yükler altındaki bir zeminin davranışının dinamik basit kesme deneyleriyle anlaşılabilmesi için geliştirilen deney cihazlarından en çok Cambridge tipi ve NGI tipi cihazlar kullanılmaktadır. (Erman, 2012). Cambridge tipi deney sisteminde dikdörtgen numune kullanılıp, yanal deformasyonlar alt ve üst başlıktaki rijit sınır plakaları ile önlenirken, NGI tipi deney sisteminde dairesel numune kullanılıp, yanal deformasyonlar tel takviyeli membran ile önlenmektedir.

Dinamik basit kesme deneyinde zemin numunesi  $K_0$  koşullarında konsolide olduğundan basit kesme deneyi arazi koşullarını laboratuvarında gerçeğe en yakın uygulayabilen ve deprem şartlarını en sağlıklı modelleyebilen deney sistemlerinden biridir.

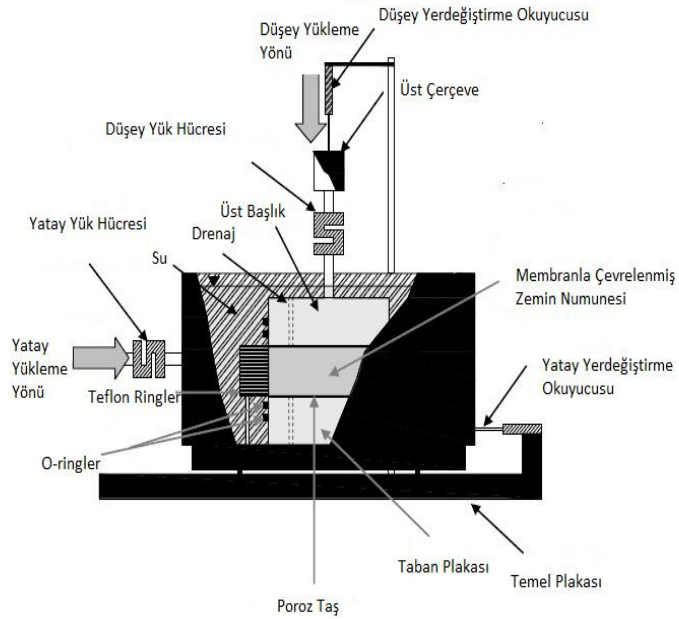


**Şekil 2.2 :** Geliştirilen farklı basit kesme deney cihazlarının şematik gösterimi.

Bu tez çalışması kapsamında yapılan tüm dinamik deneyler Geocomp firması tarafından geliştirilmiş olan elektronik kontrollü, NGI tipi ve sabit hacim kontrollü Dinamik Basit Kesme deney sistemi ile gerçekleştirilmiştir. Yeditepe Üniversitesi Zemin Mekaniği Laboratuvarında gerçekleştirilen deneyler için uygulanan frekans değeri 0.1 Hz olmakla beraber, deneyler farklı çevrimsel kayma gerilmesi oranlarında yapılmıştır.



**Şekil 2.3 :** Bu tez çalışmasında kullanılan, Yeditepe Üniversitesi Zemin Mekaniği Laboratuvarında bulunan ShearTrac-II-DSS basit kesme deney cihazı.



**Şekil 2.4 :** Şekil 2.3'deki basit kesme deney sisteminin kesme hücresinin detaylı gösterimi (Zehtab, 2010).

Bu deney sisteminde sabit hacim kontrollü olarak statik veya dinamik basit kesme deneyleri yapılabilmektedir. Deney sisteminde kesme aşamasında numune üzerindeki düşey gerilme bilgisayar kontrollü olarak arttırılıp azaltılarak numunenin hacminin kesme boyunca sabit kalması sağlanmaktadır. Yani deney, numunenin boyu ve çapı sabit tutularak gerçekleştirilebilmekte, efektif düşey gerilme sıfır olduğunda numune sıvılaşmaktadır. Ayrıca numune boyutu, çapı, efektif

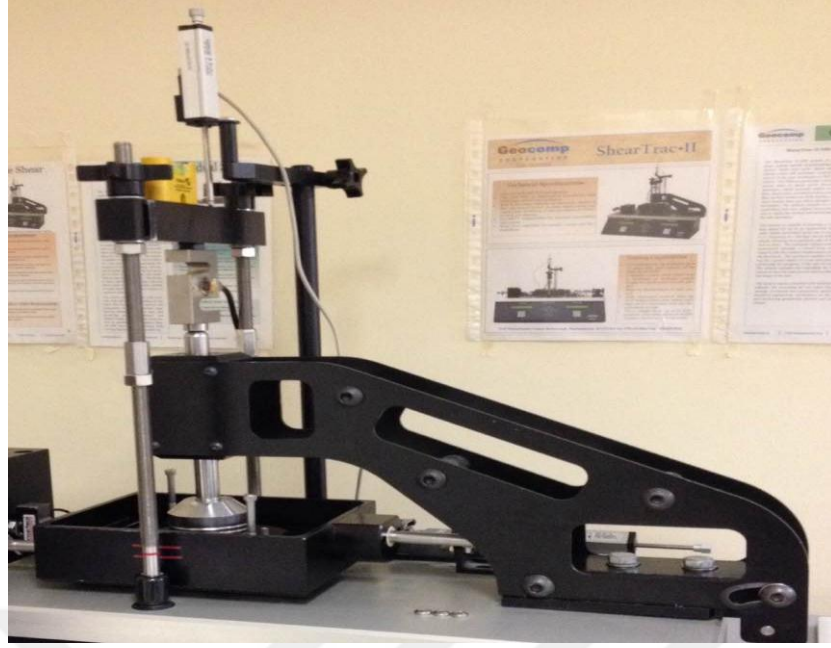
konsolidasyon basıncı ve çevrimsel kayma gerilmesi oranı değerleri deney başlatılmadan önce bilgisayara girildiğinden, deneye başladıktan sonraki aşamalarda operatör dikkatsizliğinden kaynaklanan hatalar engellenmektedir.

The screenshot shows the SHEAR:CYCLIC software interface. The window title is 'SHEAR:CYCLIC' and it has a menu bar with 'File', 'View', 'Run', 'Calibrate', 'Control', 'Report', 'Options', and 'Help'. The main area is divided into three sections: 'Consolidation Table', 'Cyclic Table', and 'Shear Table'. Below these are sub-sections: 'Project', 'Specimen', 'Water Content', 'Read Table', and 'Test Parameters'. The form contains several input fields: Project Number, Project Name, Location, Date of Test, Tester, Checker, Description, Remarks, Boring Number, Test Number, Sample Number, Depth, Elevation, and Sample Type.

Şekil 2.5 : CDSS program penceresi.

### 2.3 Test Prosedürü

Deneye başlamadan önce cihazın kurulumu esnasında çok dikkatli olunması gereken ve dikkat edilmediği takdirde deney sonuçlarını fazlasıyla etkileyen durumlar söz konusudur. Öncelikle cihazın çok iyi bir şekilde konumlandırılması sağlanmalı, bulunduğu düzlem üzerinde hafif de olsa bir eğim olmamasına özen gösterilmelidir. Ayrıca deney düzeneği hazırlanırken civata ve vidaların doğru biçimde sıkıştırılması eksen kaymalarının engellenmesi, yatay düzlemde oluşabilecek hataların oluşmaması ve deney sonuçlarının doğruluğu açısından büyük önem taşımaktadır. Deneyin hazırlanması sırasında her aşamada çok özenli davranılması deneylerin tekrarlanılabilirliği açısından önemlidir.



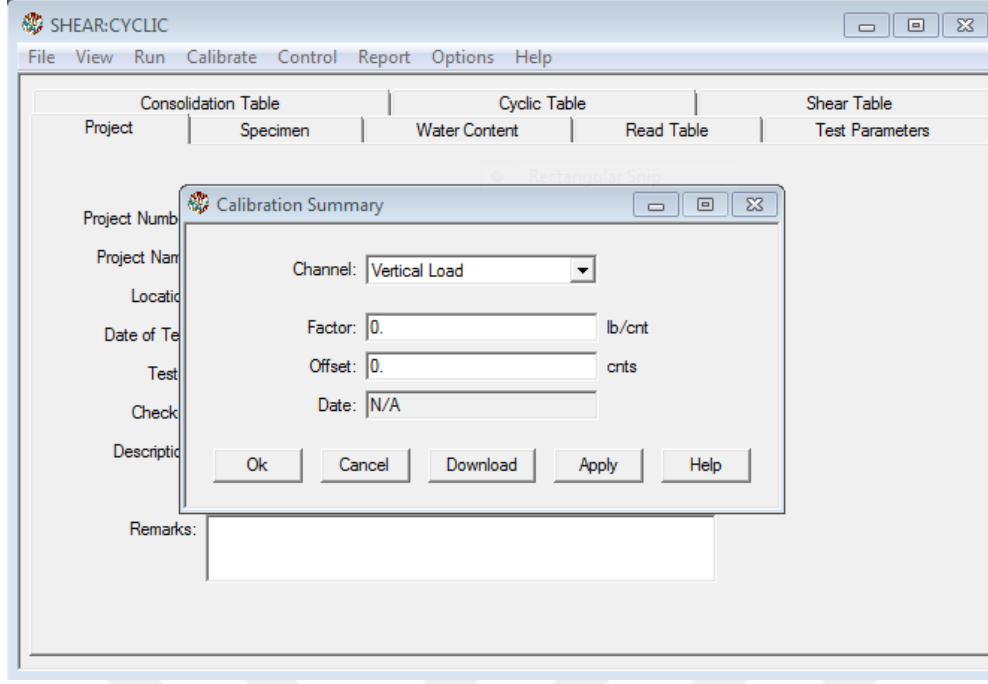
**Şekil 2.6 :** Basit kesme deney cihazında yan kol kısmında bulunan civatalar.

Ayrıca deney esnasında düşey yük hücresi ile pistonun düşey ekseninde birbirine tam denk gelmesi ile doğru yükleme yapılacağından cihazın ayarlamaları yapılırken düşey yük hücresi ile pistonun düşey eksen hizalarının birebir örtüşmesine çok dikkat edilmelidir.



**Şekil 2.7 :** Basit kesme deney cihazında piston ve düşey yük hücresi.

Deneye başlamadan önce kalibrasyon ayarının tamamlanması, yatay ve düşey panelin başlangıç konumuna getirilmesi gerekir. Deney başlatıldıktan sonra konsolidasyon aşaması ve kesme aşaması olmak üzere iki temel aşamada tamamlanmaktadır.



Şekil 2.8 : Deney başlatılmadan kalibrasyon ayarının yapılması.

### 2.3.1 Konsolidasyon aşaması

Numune hazırlama aşaması tamamlanıp deney başlatıldıktan sonra konsolidasyon aşaması başlamaktadır. Bu çalışmada tüm numuneler 50 kPa düşey gerilme altında konsolide edilmiştir. Konsolidasyon aşamasında test monitöründe düşey yer değiştirme değerinden numunenin ne kadar oturma yaptığı konsolidasyon aşaması boyunca eşzamanlı olarak takip edilebilmektedir. Sistem konsolidasyon aşamasını bilgisayar kontrollü çizilen T100 grafiğine göre tamamlayıp sonrasında herhangi bir uyarı vermeden kesme aşamasına geçmektedir.

### 2.3.2 Dinamik basit kesme aşaması

Konsolidasyon aşaması tamamlandıktan sonra otomatik olarak başlayan sabit hacim kontrollü dinamik basit kesme aşaması da aynı konsolidasyon aşamasında olduğu gibi test monitörü ekranından takip edilebilmektedir.

Kesme aşamasının en başında test monitöründe okunan düşey yer değiştirme değeri, konsolidasyonun son aşamasında okunan değerle aynıdır. Kesme aşamasında düşey yer değiştirme okuması alınmaya devam etmekte ve bu aşamada yer değiştirme sıfıra yakın durumda olmaktadır.

Deney programında sıvılaşma kriteri efektif düşey gerilme değerinin sıfıra inmesi olarak kabul edilmiştir. Bu aşamada çevrimsel kayma gerilmesi oranının 0.1'den

yüksek olduğu durumlarda efektif düşey gerilme sıfıra indiği an cihaz deneyi otomatik olarak bitirmekte, çevrimsel kayma gerilmesi oranının 0.1'den düşük olduğu durumlarda ise efektif düşey gerilme sıfıra inip sıvılaşma gerçekleşse bile deney maksimum çevrim sayısına kadar devam etmektedir. Bu durumun yazılımsal bir hata olabileceği düşünülmektedir. Böyle bir durumda istenildiği takdirde deney manuel olarak bitirilebilmektedir. Kesme aşaması tamamlandıktan sonra deney verileri otomatik olarak bilgisayara kaydedildiğinden manuel olarak yeniden kaydetmek gerekmemektedir. Aksi durumda (manuel kayıt yapılırsa) veri kayıpları yaşanmaktadır.

#### **2.4 Sabit Hacim Kontrollü Deney Sisteminde Kumların Sıvılaşma Davranışının Kuru Numunelerden Belirlenmesi**

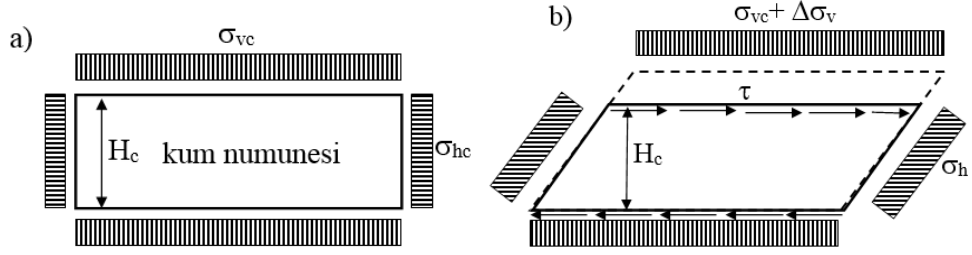
Araziden örselenmemiş kumlu zemin numunesi alınması zemin dondurma gibi özel ve pahalı yöntemler dışında gerçekleştirilemediğinden deney numuneleri çeşitli yöntemlerle laboratuvar ortamında oluşturulup doymun hale getirildikten sonra test edilebilmektedir. Söz konusu numune hazırlama aşaması, oldukça zahmetli ve titiz bir çalışma süreci gerektirmesinin yanısıra numune hazırlanması esnasında gerek zaman, gerekse tecrübe eksikliğinden kaynaklanan pek çok hata deney sonuçlarını önemli ölçüde etkileyebilmektedir (Monkul ve diğ., 2017a). Numune hazırlama aşaması, kum numunelerinin çeşitli yöntemlerle oluşturulması (kuru huni, nemli tokmıklama, ıslak yağmurlama vs.) ve oluşturulan kum numunelerinin arazi şartlarına uygun olarak doymun hale getirilmesi olmak üzere oldukça uzun vakit alan iki ana kısımdan oluşmaktadır. Monkul ve Yamamuro (2011), kuru huni tekniğini kullanarak üç eksenli numuneler oluşturdukları ve sonrasında içerisinde CO<sub>2</sub> ve havası alınmış su geçirmek suretiyle doyurma işlemini gerçekleştirdikleri çalışmalarında her bir numuneyi doymun hale getirmenin 19 saat sürdüğünden bahsetmişlerdir. Aynı şekilde Hazırbaba (2005), ıslak tokmıklama yöntemiyle oluşturduğu siltli kum numunelerinin kabul edilebilir bir doymunluğa ulaşmasının 48 saat süren geri basınç uygulamasından sonra gerçekleştiğini belirtmiştir. Bahsedilen süreçte sadece doyurma aşamasının bu kadar uzun süre aldığı düşünüldüğünde, ayrıca numune oluşturma aşamasının da bu sürece dahil edilmesiyle birlikte sürecin iyice uzayacağı unutulmamalıdır (Monkul ve diğ., 2017a).

Basit kesme deneyinde konsolidasyon aşamasında numuneler, telle güçlendirilmiş veya sürtünmesiz teflon kaplama ringler ile çevrelenmiş bir membranın içerisinde anizotropik olarak konsolide edilir. Basit kesme aşamasında ise su çıkış durumu drenajlı ve drenajsız olacak şekilde kontrol edilebilmektedir. Buna karşılık Skempton'un B parametresinin hesaplanması, doyunluk derecesinin artırılması ve genişleyen zeminlerde kesme aşamasında kavitasyon oluşumunun engellenmesi amacıyla geri basınç kullanılabilmesi için numune üzerinde gerçek anlamda drenajsız durumun sağlanması gerekmektedir. Bu anlamda drenajsız deney geoteknik mühendisleri ve araştırmacılar bakımından büyük önem taşımaktadır. Basit kesme cihazlarında drenajsız durum ya drenajsız üç eksenli kesme deneyinde olduğu gibi kesme aşamasında numuneye su giriş çıkışının vanalar yardımıyla tamamıyla engellenmesiyle ya da drenajın serbest bırakılıp numune üzerindeki düşey gerilmenin bilgisayar kontrollü artırılıp azaltılması sayesinde numune hacminin kesme boyunca sabit kalmasının sağlanmasıyla gerçekleştirilmektedir (Monkul ve diğ., 2017a).

(Dyvik ve diğ. 1987), normal konsolide Drammen kili ile gerçekleştirdikleri çalışmada vanalar yardımıyla su giriş çıkışının önlendiği drenajsız ve sabit hacim kontrollü yaptıkları deneylerde, her iki alternatifin de aynı gerilme-deformasyon davranışını sağladığını göstermişlerdir.

Bjerrum ve Landva, (1966)' da belirttiği, Dyvik ve diğ. (1987)'de ispatladığı üzere sabit hacim kontrolü için gereken düşey gerilme değişimi, drenajsız bir deneydeki aşırı boşluk suyu basıncına eşittir:  $\Delta\sigma_v = -\Delta u$ . Buradaki eksi işareti aralarında ters bir orantı olduğunu göstermektedir. Şekil 2.9'da gösterildiği üzere normalde klasik drenajlı durumda olsaydı kesikli çizgilerle belirtildiği gibi genişlemeye çalışacak olan bir kum numunesine, sabit hacim kontrollü deney sistemi genişlemeyi engelleyecek şekilde bir düşey gerilme artışı uygulamakta ( $\Delta\sigma_v$ ) ve bu gerilme artışı, eşdeğer bir drenajsız deneydeki negatif aşırı boşluk suyu basıncı değişimine tekabül etmektedir. Hacimsel sıkışma eğiliminin olduğu durumlarda ise tam tersi bir tepki beklenmekte yani düşey gerilme azalışı pozitif aşırı boşluk suyu değişimine eşit olmaktadır (Monkul ve diğ., 2017a).





**Şekil 2.9** : Sabit hacim kontrollü basit kesme deneyi a) konsolidasyon ve b) kesme aşamaları (Monkul ve diğ., 2017a).

Bu çalışmada, sabit hacim kontrollü deney sistemi ile kumların sıvılaşma davranışının kuru numunelerden belirlenmesi sağlanmış böylelikle daha önce bahsedilmiş olan zahmetli numune hazırlama süreci daha kolay hale getirilebilmiştir. Drenaj durumunun kontrol edilmediği hatta bu yüzden boşluk suyu basınç ölçerlerin bile bulunmadığı bu sistemde drenajsız basit kesme deney sonuçlarıyla aynı sonuca varmak merak konusu uyandıran bir durumdur (Monkul ve diğ., 2017a). Buna karşılık sabit hacim kontrollü deney mekanizması yukarıda anlatıldığı ve Şekil 2.9'da gösterildiği üzere tam olarak anlaşıldığında bu durum çok net bir şekilde aydınlanmaktadır. Sabit hacim kontrollü deney sistemiyle drenaj serbest bırakılıp, boşluk suyu basıncının düşey gerilme değişiminden hesaplanmasıyla, deney sırasında boşluk suyuna ihtiyaç olmadığı görülmektedir. Bu sayede kumların sıvılaşma davranışı kuru olarak da test edilebilmektedir. Finn ve Vaid, (1977) Ottawa kumu ile yaptıkları çalışmada bu durumun mümkün olduğunu belirtmişlerdir. Daha sonra ise Monkul ve diğ. (2015) yaptıkları çalışmada temiz, siltli ve killi kumlar için doymun ve kuru numuneleri sabit hacim kontrollü dinamik basit kesme deneyleri ile kıyaslamış, sıvılaşma direncinin temiz ve siltli kumlar için tamamen kuru numuneler ile belirlenebileceğini, ancak killi kumlar için bunun mümkün olmadığını göstermişlerdir.

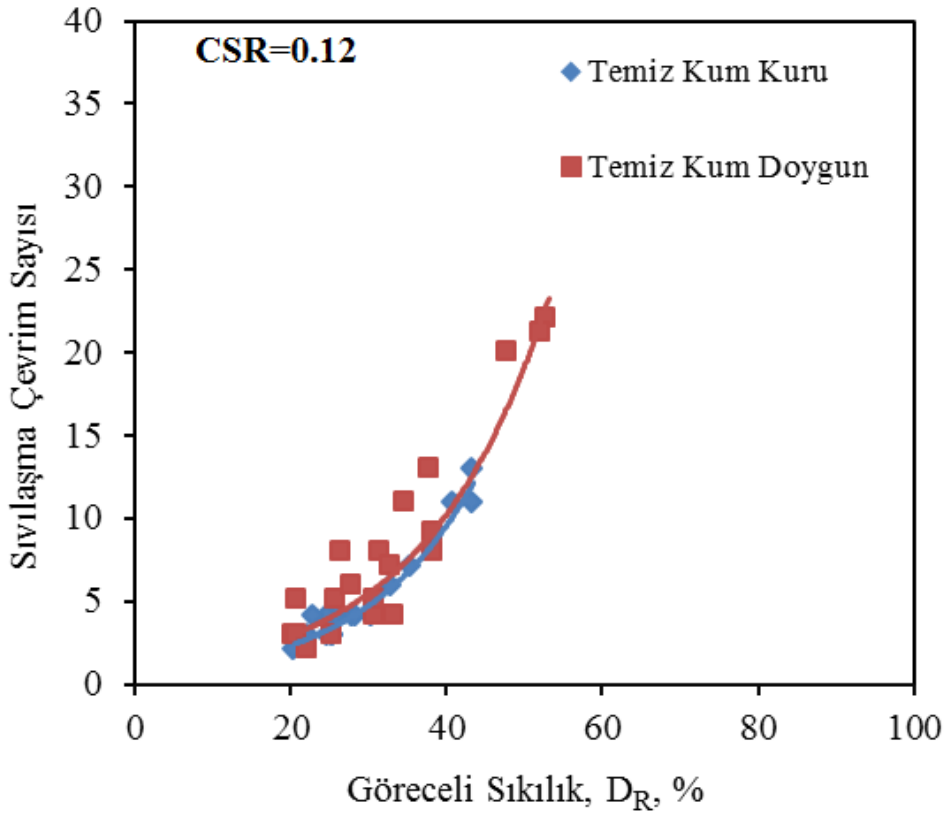
#### **2.4.1 Temiz kum ve siltli kum için kuru ve doymun numunelerin sıvılaşma davranışının karşılaştırılması**

Sabit hacim kontrollü basit kesme deney sistemiyle numune üzerindeki düşey gerilme bilgisayar kontrollü olarak artırılıp azaltılarak kesme boyunca numune hacminin sabit kalması sağlanmış ve drenajsız durumda hesaplanan aşırı boşluk suyu basıncı düşey gerilme değişiminden hesaplanmıştır. Düşey gerilme değişiminden aşırı boşluk suyu basıncının hesaplanması kumların sıvılaşma davranışının kuru

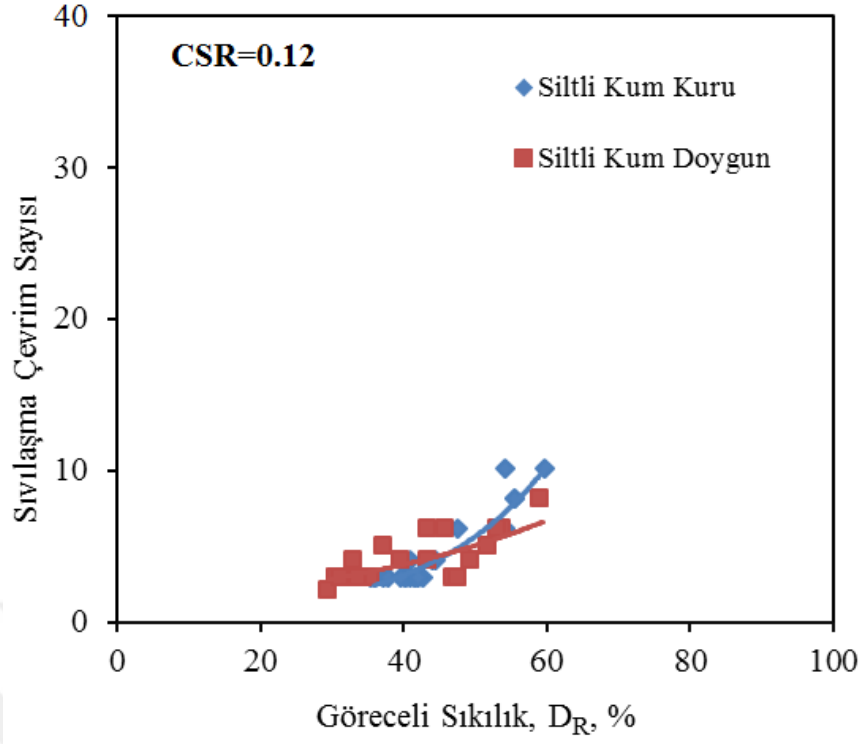
numunlerden elde edilmesi fikrini doğurmuş bu konuda literatürde yapılan çalışmalar bu fikrin doğruluğunu kanıtlamıştır.

Çalışmanın bu kısmında kuru huni depozisyon yöntemiyle hazırlanan temiz Şile Kumu 20/55 ve içerisinde %10 IZ Silt bulunan siltli kum numuneleri 50 kPa düzey gerilme altında konsolide edilip hem kuru hem de içerisinde önce CO<sub>2</sub> daha sonra havası alınmış su geçirilmek suretiyle oluşturulan doymun numunelerin sıvılaşma davranışları karşılaştırılmıştır.

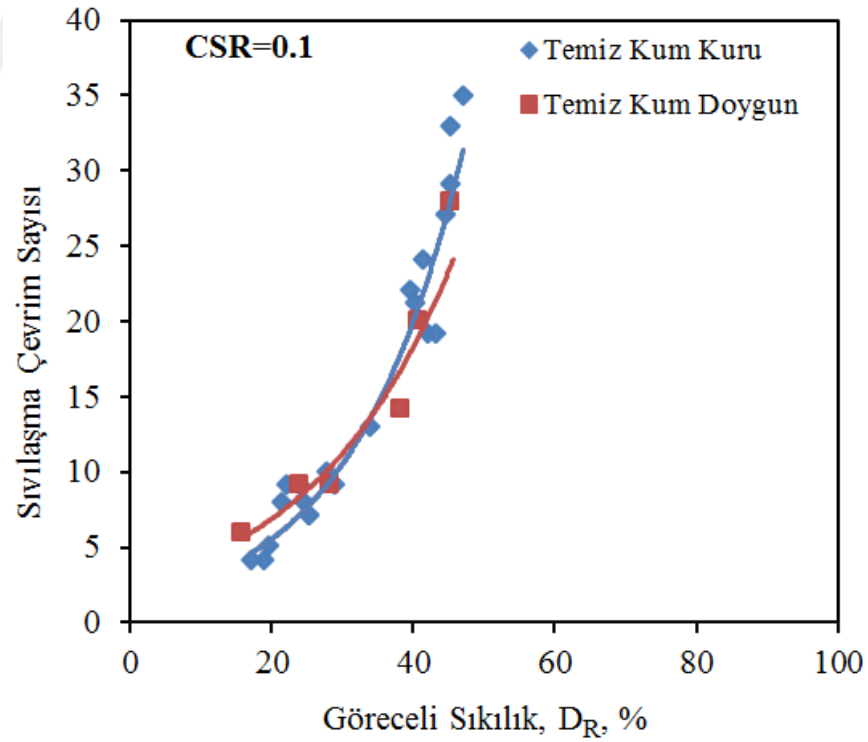
Şekil 2.10, Şekil 2.11, Şekil 2.12, Şekil 2.13, Şekil 2.14 ve Şekil 2.15'te farklı çevrimsel kayma gerilmesi oranlarında temiz ve siltli kum numunelerde kuru ve doymun olarak yapılmış deneylerin sonuçları karşılaştırmalı gösterilmiştir (Eseller-Bayat ve diğ., 2017). Yapılan kıyaslamada temiz ve siltli kumlar için sıvılaşma direncinin hem kuru hem de suya doymun numunelerde aynı olduğu görülmüştür.



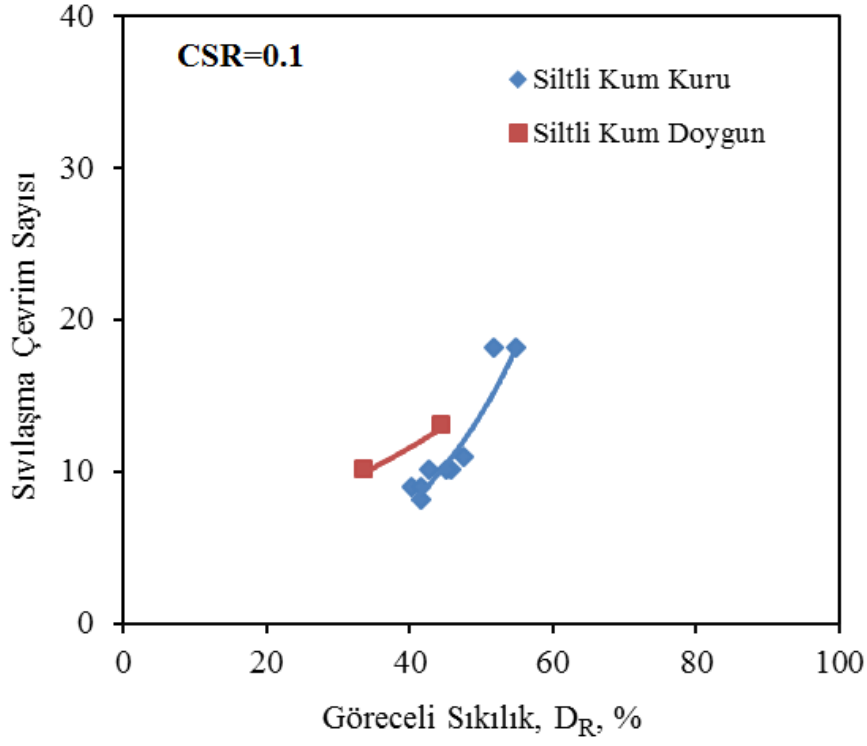
Şekil 2.10 : Kuru ve doymun temiz kum numunelerinde sıvılaşma davranışı (CSR=0.12) (Eseller-Bayat ve diğ., 2017).



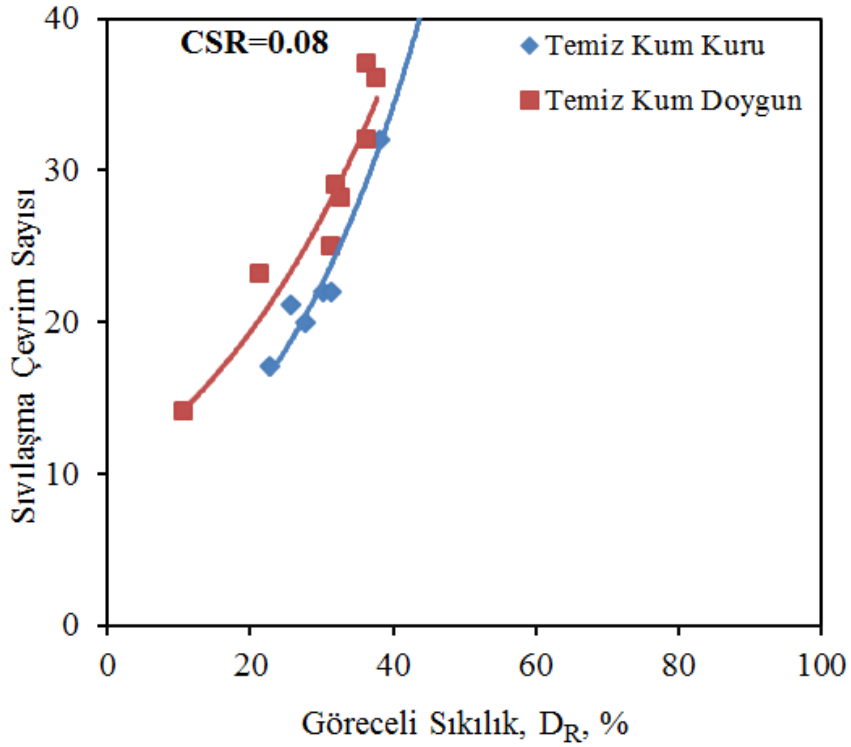
**Şekil 2.11** : Kuru ve doymun %10 IZ siltli kum numunelerinde sıvılaşma davranışı (CSR=0.12) (Eseller-Bayat ve diğ, 2017).



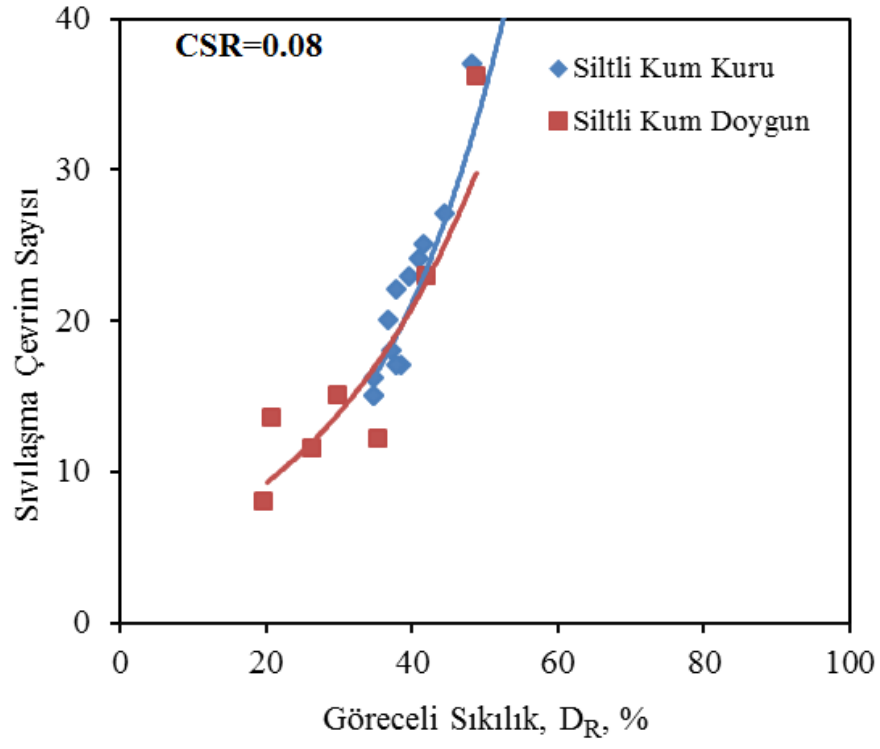
**Şekil 2.12** : Kuru ve doymun temiz kum numunelerinde sıvılaşma davranışı (CSR=0.1) (Eseller-Bayat ve diğ, 2017).



**Şekil 2.13** : Kuru ve doymun %10 IZ siltli kum numunelerinde sıvılaşma davranışı (CSR=0.1) (Eseller-Bayat ve diğ, 2017) .



**Şekil 2.14** : Kuru ve doymun temiz kum numunelerinde sıvılaşma davranışı (CSR=0.08) (Eseller-Bayat ve diğ, 2017).



**Şekil 2.15** : Kuru ve doymun %10 IZ siltli kum numunelerinde sıvılaşma davranışı (CSR=0.08) (Eseller-Bayat ve diğ, 2017).



### **3. DİNAMİK DENEY NUMUNELERİ İÇİN KURU HUNİ YÖNTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

Bu bölümde deneyde kullanılan zeminlerin özellikleri anlatılmış, numune hazırlama yöntemi olan kuru huni yöntemi avantaj ve dezavantajlarıyla ayrıntılı açıklanmıştır. Kuru huni yönteminin dezavantajlarının giderilmesi ve numune hazırlama yönteminin mükemmelleştirilmesi için uygulanan kalıp ve vakum kullanımı anlatılmıştır. Bunun yanısıra numune hazırlama esnasında yapılan hataları en aza indirmek, deneyleri tekrarlanabilir hale getirmek ve farklı göreceli sıkılık değerlerinde numunelerin elde edilmesini sağlamak adına Yeditepe Üniversitesi Zemin Mekaniği Laboratuvarında tasarlanan, 3G Project Design firması tarafından üretilen otomatik çekiş hunisi ayrıntılı açıklanmıştır. Otomatik çekiş hunisinin tasarlanması ve kuru huni yönteminde kullanılması deneysel zemin mekaniğinde bir ilk olup, tasarım için patent başvurusu yapılmıştır.

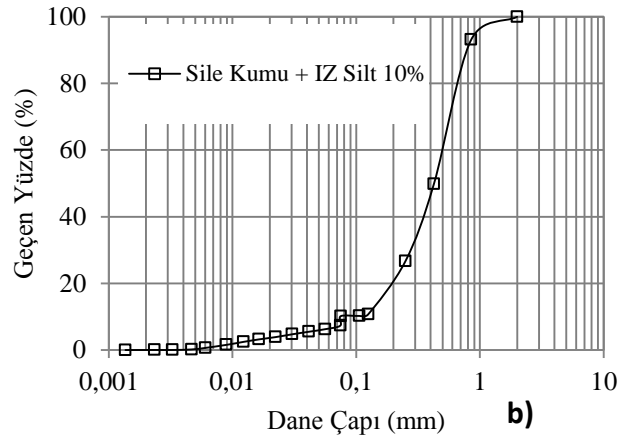
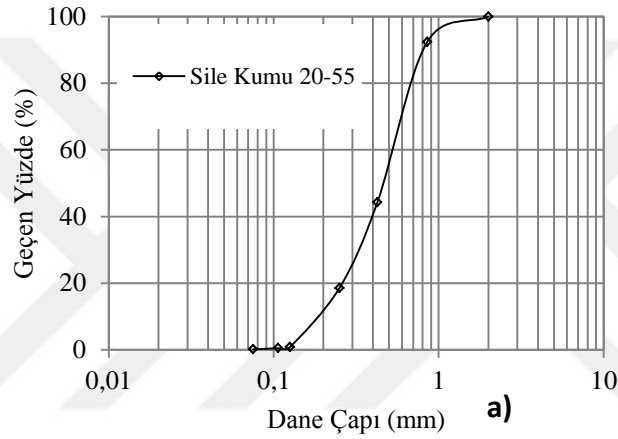
#### **3.1 Deneysel Çalışmada Kullanılan Zeminlerin Özellikleri**

Deneysel programda kum ve silt olmak üzere iki zemin tipi kullanılmıştır. Kullanılan Şile Kumunu 20/55 dane boyutu ( $D_{50}$ ) 0.465 mm, ünifomluk katsayısı ( $C_u$ ) 2.79, eğrilik katsayısı ( $C_c$ ) 1.08 olan Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırmasına göre kötü derecelendirilmiş temiz kumdur (SP). Yapılan deneyler neticesinde özgül ağırlığı ( $G_s$ ) 2.65 olarak bulunmuştur. Şile Kumunun maksimum ve minimum boşluk oranları ise sırasıyla 0.784 ve 0.482 olarak elde edilmiştir. Kullanılan IZ Silt ise plastik olmayan (non-plastik) silt olmakla beraber yapılan deneyler neticesinde özgül ağırlığı ( $G_s$ ) 2.65 olarak bulunmuştur. Kullanılan IZ Silt temiz kuma %10 oranında katılmış ve bu durumda maksimum ve minimum boşluk oranları sırasıyla 0.82 ve 0.43 olarak elde edilmiştir. Çizelge 3.1 'de Şile Kumunu ve siltli kumun özellikleri yer almaktadır.

**Çizelge 3.1 : Şile kumu ve siltli kumun özellikleri.**

Zemin Özellikleri	Şile Kumu 20/55	Siltli Kum
$D_{50}$	0.465	-
$C_u$	2.79	-
$C_c$	1.08	-
Zemin Tipi	SP	Non-plastik silt
$\gamma_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.65	2.65
$e_{max}$	0.78	0.82
$e_{min}$	0.48	0.43

Deneylerde kullanılan Şile Kumunun ve %10 IZ silt eklenmiş siltli kumun granülometri eğrisi Şekil 3.1’de gösterilmektedir.



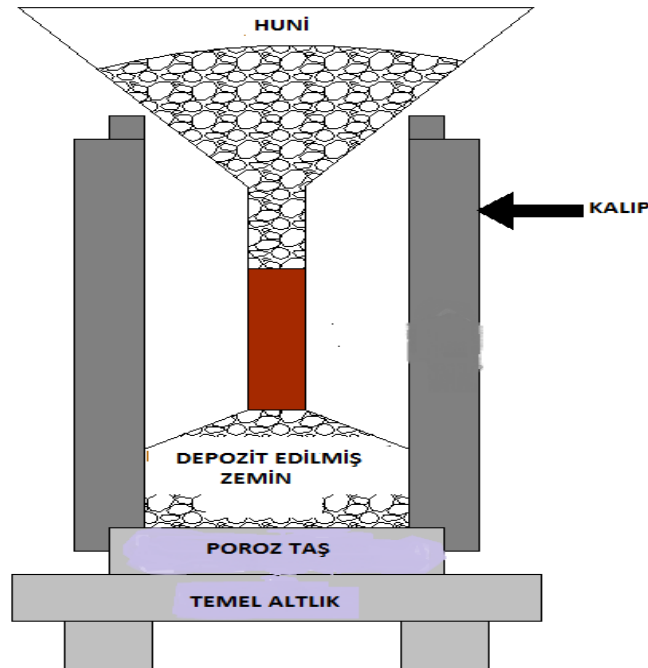
**Şekil 3.1 : a) Şile kumu 20/55 b) Şile kumu + %10 siltin dane çapı ve dağılım eğrisi.**

### 3.2 Kuru Huni Yöntemi

Tekrarlı yükler altında sıvılaşmaya neden olan faktörler ve sıvılaşan zeminlerin özellikleri, üzerinde kapsamlı çalışmaların yapıldığı önemli araştırma konularını



kapsamaktadır. Bu çalışmalar gerçekleştirilirken laboratuvar ortamında deney koşullarının oluşturulması kadar önemli olan bir diğer konu da numune hazırlama aşamasıdır. Güvenilir sonuçlar elde edilebilmesi için yapılacak deneylerde uygun numune hazırlama yönteminin seçilmesi gerekmektedir. Numunelerin çok dikkatli bir şekilde hazırlanması, değiştirilen herhangi bir parametre olduğunda deney sonucuna etkisinin net bir şekilde anlaşılması büyük önem taşımaktadır. Deneyleerin tekrarlanılabilir olması için, yapılan tüm deneylerde numunelerin tıpatıp aynı şekilde hazırlanması gerekli ve zorunludur. Bu çalışmada numune hazırlama yöntemi olarak uygulanmış olan kuru huni yöntemi hem temiz hem de siltli kumlar için yaygın olarak kullanılmaktadır. Kuru huni yönteminde öncelikle deneyde kullanılacak zemin bir kap içerisinde homojen olarak karıştırılmıştır. Hazırlanan temiz kum ve bu çalışmada kullanılmış olan ve %10 ince dane oranına sahip siltli kum, özel bir kalıp tabanına oturtulmuş bir huni içerisine dökülmüş ve huni düşey eksen boyunca yukarı kaldırılarak deney numuneleri oluşturulmuştur. Hem dinamik basit kesme hem de üç eksenli deneyler için kullanılan bu numune hazırlama yönteminde hazırlanan kuru numuneler istenildiğinde içerisinden CO<sub>2</sub> ve havası alınmış su geçirilmek suretiyle doymun hale getirilebilmektedir. Şekil 3.2’de Monkul ve Yamamuro (2010)’dan alınıp modifiye edilen çizimle klasik kuru huni yöntemi şematik gösterimle açıklanmıştır.



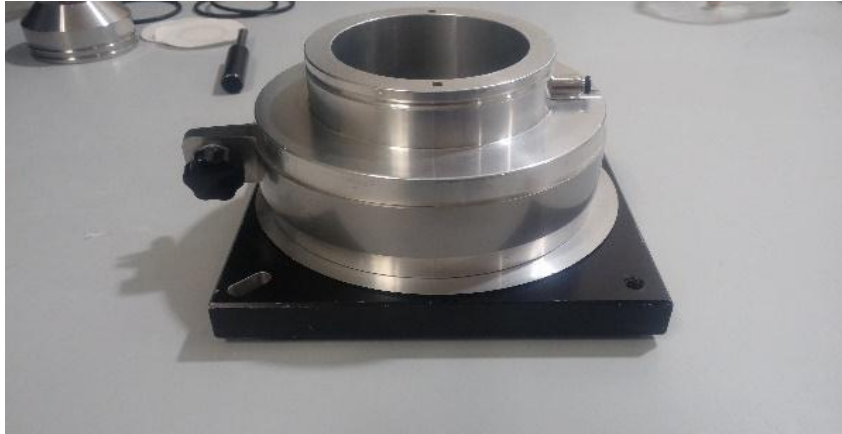
Şekil 3.2 : Kuru huni yönteminin şematik gösterimi (Monkul ve Yamamuro, 2010).

Bu şekilde oluşturulan basit kesme numunelerinin yüksek doygunluk yüzdesi değerine ulaşabildiği ve istenilen ince dane oranının korunabildiği belirlenmiş, ayrıca bu yöntemle yüksek tekrarlanabilirlikte deneylerin yapılabilirdiği belirtilmiştir. (Akın ve diğ, 2013).

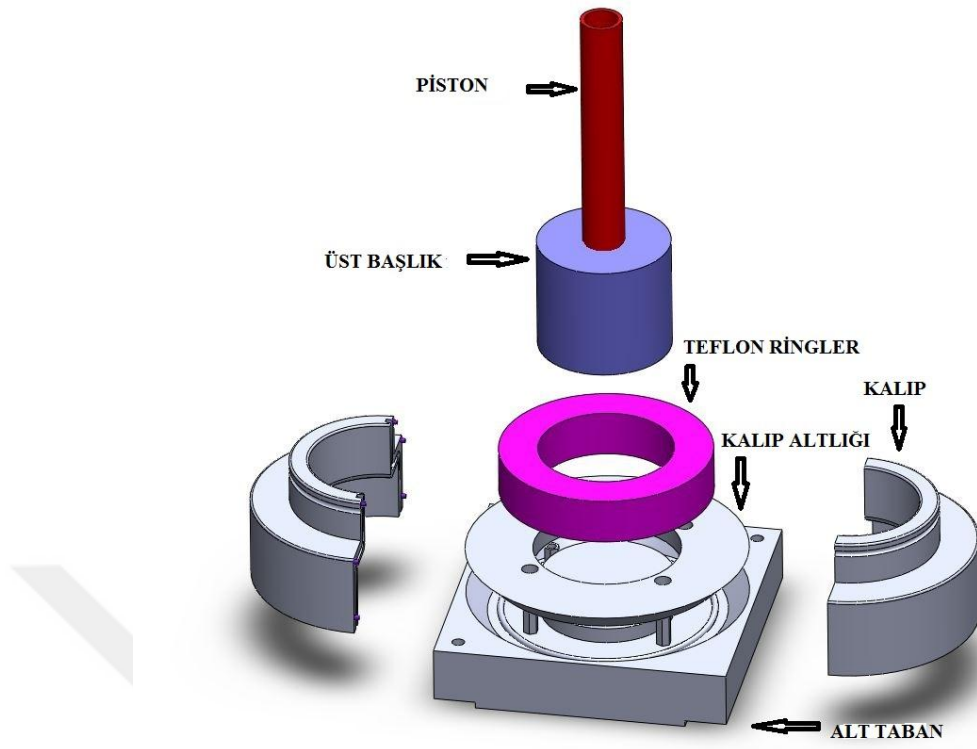
Buna karşılık kuru huni yöntemiyle numune hazırlama aşamasında bir takım aksaklıklar da farkedilmiştir. Bu aksaklıklardan ilki kullanılan kalıpla alakalıdır. Membran dış kalıba gerdirildiğinde tam gerilmediğinden hem huni düşey eksen boyunca yukarı kaldırılırken hem de numune hazırlama aşamasından sonra üst başlık numune üzerine yerleştirilirken zorlanmalar yaşanmaktadır. Bir diğer aksaklık ise numune oluşturma aşamasında huninin düşey eksen boyunca yukarı çekilmesi esnasında yaşanmaktadır. Numune oluşturulurken huninin hiç oynamadan düşey simetri eksenini doğrultusunda çekilmesi gerekmektedir. Bunun yanında zemin döküş yüksekliği ve huni çekiş hızının da oluşturulan numunelerin boşluk oranını / göreceli sıklıklarını etkilediği gözlemlenmiştir. İnsan eliyle gerçekleştirilirken bu sürecin tam olarak kontrol edilebilmesi mümkün değildir. Çekiş sırasında elde oluşan titremler huninin ekseninden kaymasına sebep olmakta, aynı zamanda huni çekiş hızı da kontrol edilememektedir. Tüm bu durumların oluşturulan numunelerin kalitesini ve tekrarlanabilirliğini etkileyebileceği dolayısıyla deney sonuçlarına da yansıtılabileceği düşünülmüş ve yapılan çalışma sürecinde bunların çözüm yoluna gidilmiştir.

### 3.2.1 Kalıp ve vakum kullanımı

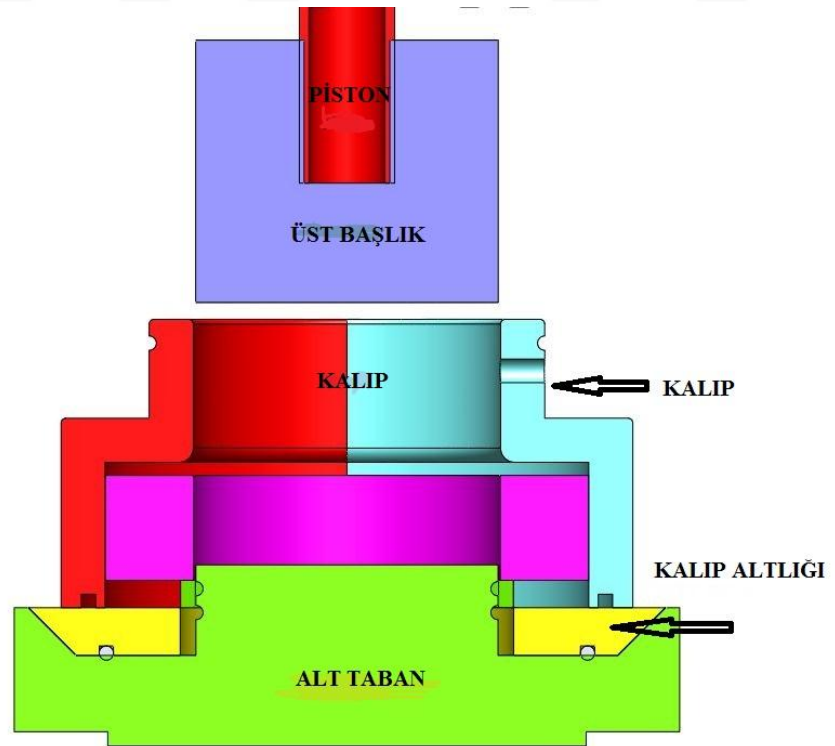
Kuru huni yöntemiyle deney yapılırken fark edilen aksaklıkların giderilmesi adına yapılan ilk girişim 3G Project Design firması tarafından üretilen kalıp ve kalıp altlığının kullanımı olmuştur.



**Şekil 3.3 :** Numune hazırlama aşamasında kullanılan alüminyum kalıp.

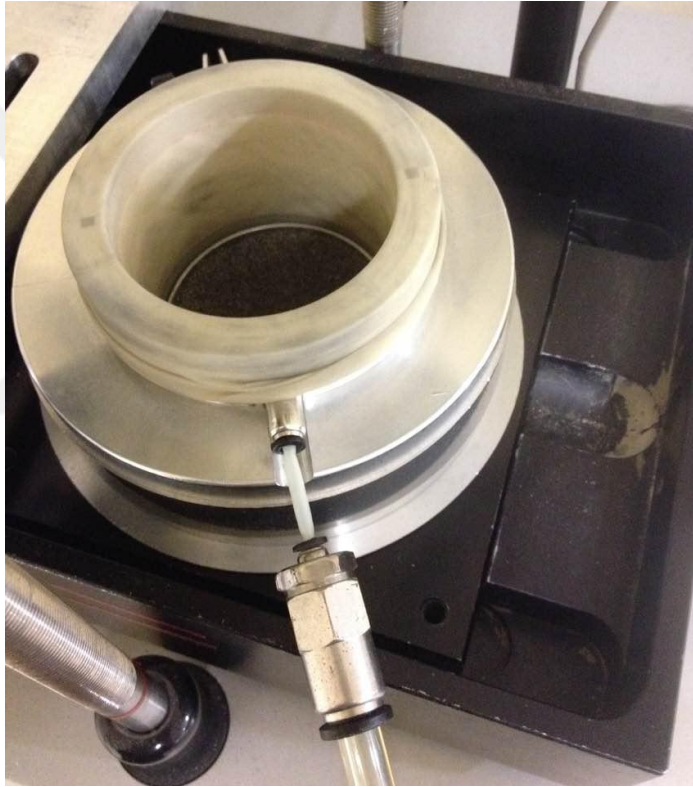


Şekil 3.4 : Kalıp ve kalıp altlığının deney düzeneğinde gösterimi.



Şekil 3.5 : Kalıp ve kalıp altlığının üç boyutlu gösterimi.

Membran uygun çaptaki contalarla poroz taşa geçirildikten sonra kalıp altlığı takılır. Kalıp altlığı sayesinde kalıbın alt plakanın üzerine düzgün yerleştirilmesi ve vakum sırasında herhangi bir sorunun yaşanmaması sağlanmış olur. Kalıp altlığının yerleştirilmesinden sonra birbirine kenetlenmiş şekilde monte edilmiş ve kelepçe yardımıyla sıkıştırılmış kalıp yerleştirilir. Kalıp hem teflon ringlerin düzgün yerleşmesini sağlamakta hem de sahip olduğu vakum deliği sayesinde vakumun harici boru aracılığıyla uygulanmasını ve membranın kalıba iyice gerdirilmesini sağlamaktadır. Bu sırada kalıbın iç tarafındaki deliğin membrana zarar verip delmemesi ve vakumun kalıp iç yüzeyi boyunca dağılımının sağlanması için kalıp iç yüzeyi ile membran arasında filtre kağıdı kullanılmaktadır.



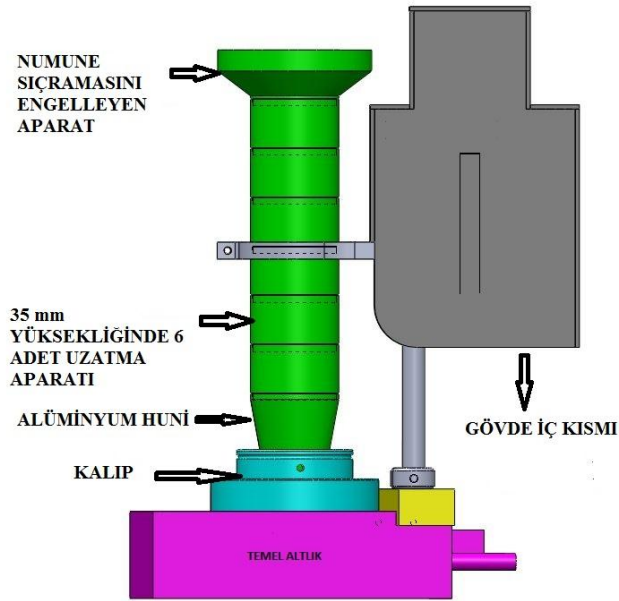
**Şekil 3.6 :** Kalıba vakum uygulanarak membranın gerdirilmesi.

Kullanılan yeni kalıp ve vakum uygulaması sayesinde membran kalıp iç yüzeyine iyi bir şekilde yapışmakta ve numune hazırlama aşamasında huninin çekişini engelleyecek şekilde bollaşmamaktadır. Membran bollaşmasının engellenmesi, aynı zamanda numune çapının azda olsa küçülmesini ve numune çapının düşey eksenle değişmesinin de önüne geçmiştir. Ayrıca numune hazırlandıktan sonra üst başlık

numune üstüne yine hiçbir sorun yaşanmadan yerleştirilebilmektedir. Böylece ilk durum aşılmıştır.

### 3.2.2 Otomatik çekiş hunisi tasarımı

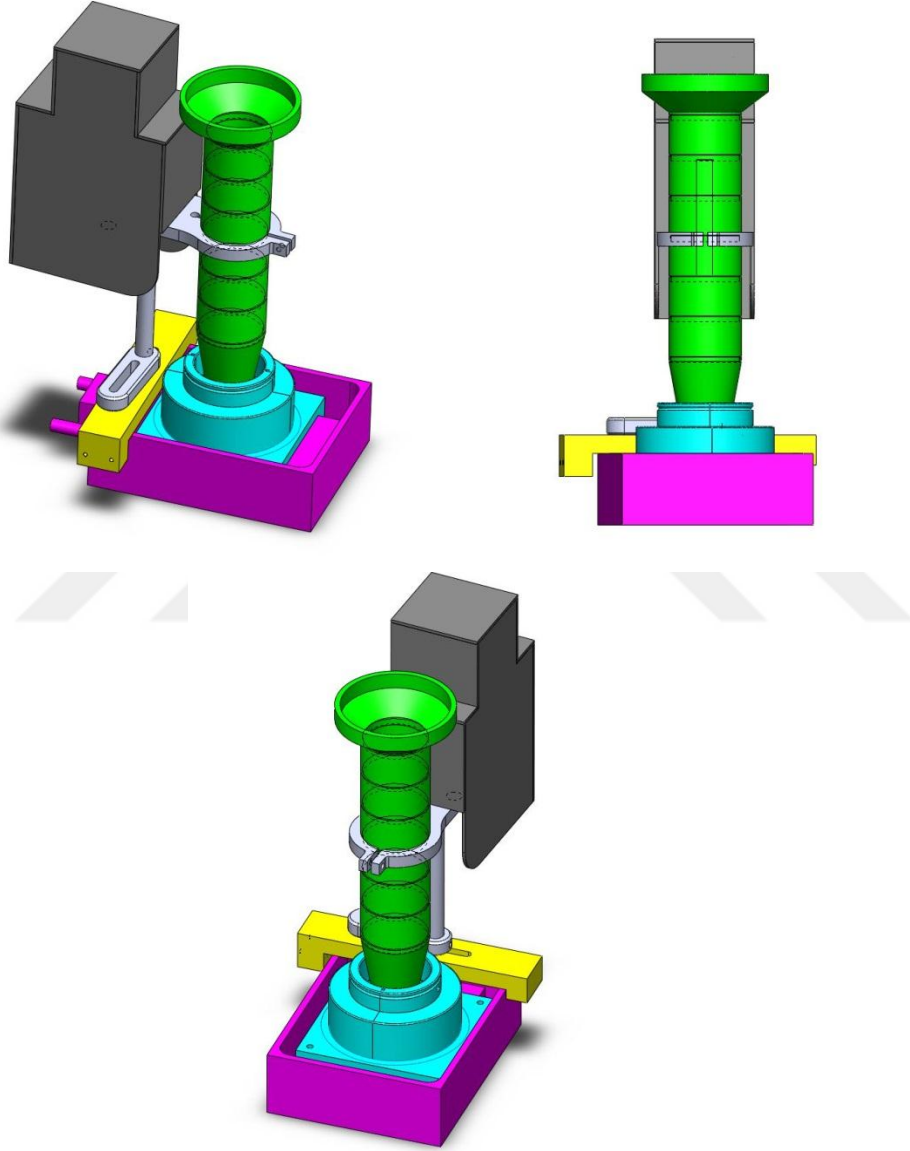
Literatürde kullanılan klasik kuru huni yönteminin doğasında var olan ve daha önceki kısımlarda bahsedilen çeşitli aksaklıkların (düşey eksenden kayma, el titremesi, huni çekiş hızındaki değişiklikler vs.) numune kalitesini ve deney sonuçlarını nasıl etkilediği bilinmemektedir. Bu kısımda bahsedilen aksaklıkların giderilmesi adına dinamik yükler altındaki davranış deneysel çalışmalarla incelenirken, deney numunesi hazırlayan huni özel bir tasarım geliştirilerek otomatik hale getirilmiştir. Yeditepe Üniversitesi Zemin Mekaniği Laboratuvarında tasarlanan ve 3 G Project Design firması tarafından üretilen otomatik çekiş hunisi bilgisayar kontrollü panel, alüminyum huni ve her biri 35 mm yüksekliğinde 6 adet alüminyum aparatтан oluşmaktadır.



Şekil 3.7 : Otomatik çekiş hunisinin teknik çizimi.

Sistem step motor kullanılarak motora bağlı bulunan 1 mm adımlı vida sistemine bağlanarak istenilen hızlar elde edilmiştir. Motoru kumanda etmek için uygun sürücü ve gerekli elemanlar kullanılmıştır. Sistemin istenilen hareketleri istenilen süre ve miktarlarda hassas bir şekilde tekrarlanabilir yapabilmesi için bilgisayar

programından faydalanılarak özel program yazılmış olup istenilen değerlere ancak bu şekilde ulaşılabilmektedir. Sistemin hassasiyeti  $\pm 0.05$  mm'dir. Sistemde kullanılan elektrik 220 vAc olup, sistemin kumandası 24 vDc 5 Amp akımla kontrol edilmiştir. Kullanılan parça ve elemanlar TSE ve uluslararası normlara uygundur. Sistem eğitim kurumunda kullanılacağına dikkat edilerek eğitim kurumlarında uygulanan tüm iş güvenliği kurallarına uygun olarak tasarlanmış ve üretilmiştir.



**Şekil 3.8 :** Otomatik çekiş hunisinin farklı birkaç yönden görünümü gösteren teknik çizimler.

Otomatik çekiş hunisi bilgisayar kontrollü olarak 15 ile 150 saniye arasında değiştirilebilen zaman aralıklarında 4 cm yukarı yükselebilmekte böylelikle deney numunesi el değmeden oluşturulabilmektedir. Ayrıca her biri 35 mm yüksekliğinde olan 6 uzatma aparatı sayesinde huni yüksekliği dolayısıyla zemin döküş yüksekliği

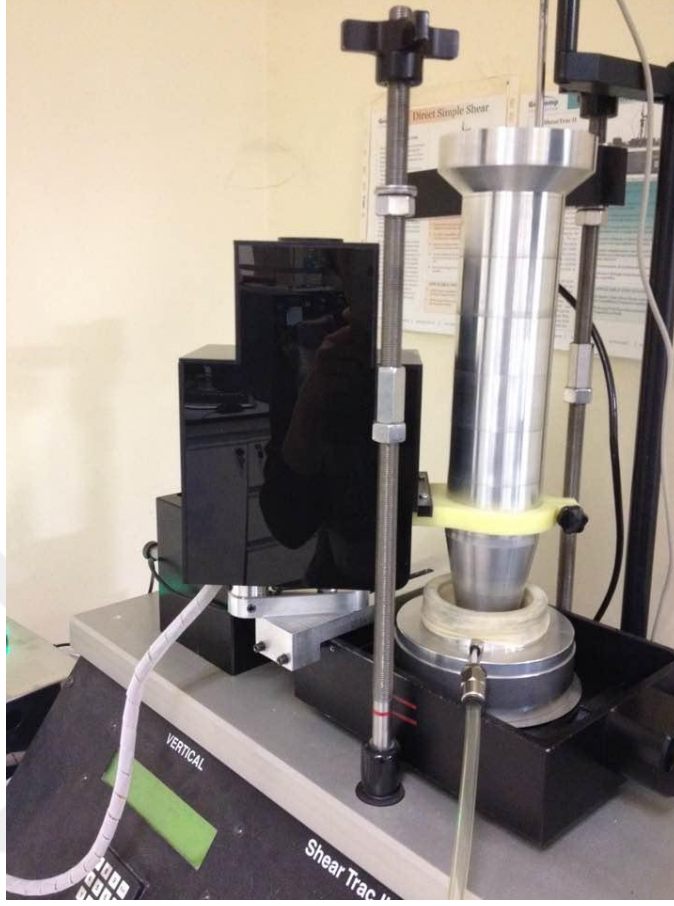
istediğimiz gibi ayarlanabilmektedir. Böylelikle oluşacak zemin numunelerinin göreceli sıklığına etki eden zemin döküş yüksekliği ve numune çekiş hızı istediğimiz gibi kontrol edilebilmektedir. Yukarıda bahsedildiği gibi otomatik çekiş hunisi bilgisayar kontrollü bir panele sahiptir. Panel üzerinde 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135, 150 saniyelere göre ayarlama yapabileceğimiz 10 kademeli bir anahtar bulunmaktadır. Böylelikle numunenin göreceli sıklığına etkisi bulunan huni çekiş hızı kontrol altına alınmaktadır.



**Şekil 3.9 :** Bilgisayar kontrollü panel.

Deney cihazına monte edilecek düzenek öncelikle üzerinde bulunan vidalar yardımıyla uygun bir şekilde ayarlanıp yerleştirilir. Vidalar uygun alyanlar yardımıyla sıkıştırılır. Deney sonuçlarının güvenilir ve tekrarlanılabilir olması açısından alüminyum huninin tam merkeze yerleştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Bunun için kullanılan kontrol aparatı numunenin hazırlanacağı poroz taşının üstüne yerleştirilir ve böylelikle alüminyum huninin tam merkezde olduğundan emin olunur. Bundan sonra deney sistemini hazır hale getirecek aşamalar tamamlanır. Huni poroz taşını başlangıç noktası olarak kabul etmektedir. Huni yüksekliği belirlenip, kullanılacak zemin huninin içine boşaltıldıktan sonra kontrol panelinden numune çekiş saniyesi belirlenir ve başlat komutuyla birlikte huninin 4 cm yukarı çekilmesi

suretiyle, numune kontrollü bir şekilde herhangi bir örselenmeye uğramadan oluşturulmuş olur.



**Şekil 3.10 :** Otomatik çekiş hunisinin sisteme monte edilmesi.

Otomatik çekiş hunisi sayesinde deney aşamasının zahmetli, titiz olması zorunlu ve çok uzun zaman alan numune hazırlama sürecinin ilk kısmı kolaylıkla tamamlanmakta ve birbirinin tıpatıp aynı numuneler hazırlanabilmektedir. Böylece deney sonuçları güvenilir ve tekrarlanabilir olmaktadır.



#### 4. KURU KUM NUMUNELERİNİN DİNAMİK BASİT KESME DENEYİNDEN BELİRLENEN SIVILAŞMA DAVRANIŞI

Bu bölümde, temiz kum ve siltli kum (İnce Dane Oranı, İDO:10%) numunelerinin dinamik basit kesme deneyinden elde edilen sıvılaşma analizleri sunulmuştur. Dinamik basit kesme deneyleri Yeditepe Üniversitesi Zemin Mekaniği Laboratuvarında, Geocomp marka, NGI tipi ve sabit hacim kontrollü cihaz ile gerçekleştirilmiş olup, sabit hacim kontrollü deney sisteminde kumların sıvılaşma davranışının kuru numunelerden belirlenmesi sağlanmıştır. Temiz kum ve siltli kum numuneleri kuru huni yöntemiyle hazırlanmış olup, numune hazırlama yönteminin geliştirilmesi ve mükemmelleştirilmesi için kalıp ve vakum kullanımı uygulanmış ayrıca numune hazırlama aşamasının el değmeden gerçekleştirilmesi için bilgisayar kontrollü otomatik bir huni tasarlanmıştır. Hazırlanan numuneler yaklaşık 20 mm yüksekliğinde ve 64 mm çapındadır. Çeşitli göreceli sıklıklarda oluşturulan numuneler 50 kPa düşey gerilme altında konsolide edilmişlerdir ( $\sigma_{vc}= 50$  kPa). Konsolidasyon aşaması tamamlandıktan sonra otomatik olarak başlayan dinamik basit kesme aşamasında ise bütün numuneler 0.1 Hz frekansında olacak şekilde üç farklı çevrimsel kayma gerilmesi oranına denk gelecek ( $CSR=0.08, 0.1, 0.12$ ) sinus formunda tekrarlı kayma gerilmelerine maruz bırakılmışlardır. Temiz kum ve %10 IZ silt içeren siltli kumla gerçekleştirilen 145 adet deney Çizelge 4.1’de ayrıntılı bir şekilde gösterilmiştir. Sabit hacim kontrollü gerçekleştirilen deneylerde eşdeğer aşırı boşluk suyu basıncının düşey konsolidasyon gerilmesine eşit olduğu durumda numunelerin sıvılaştığı kabul edilmiştir ( $\Delta u= \sigma_{vc}= 50$  kPa).

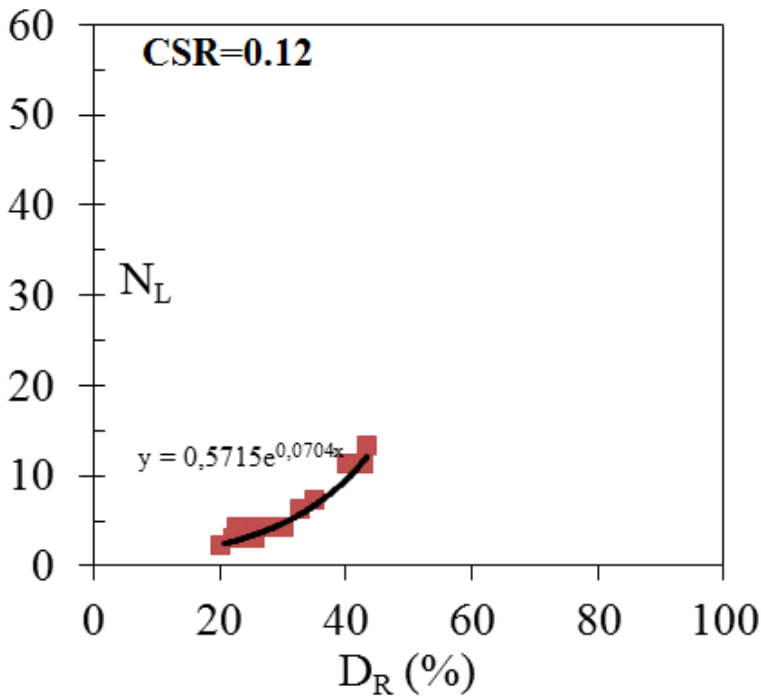
**Çizelge 4.1 :** Yapılan dinamik basit kesme deneylerinin sayısı.

Zemin Tipi	CSR=0.12	CSR=0.1	CSR=0.08
Temiz Kum	16	40	16
Siltli Kum (İDO:10%)	20	35	18

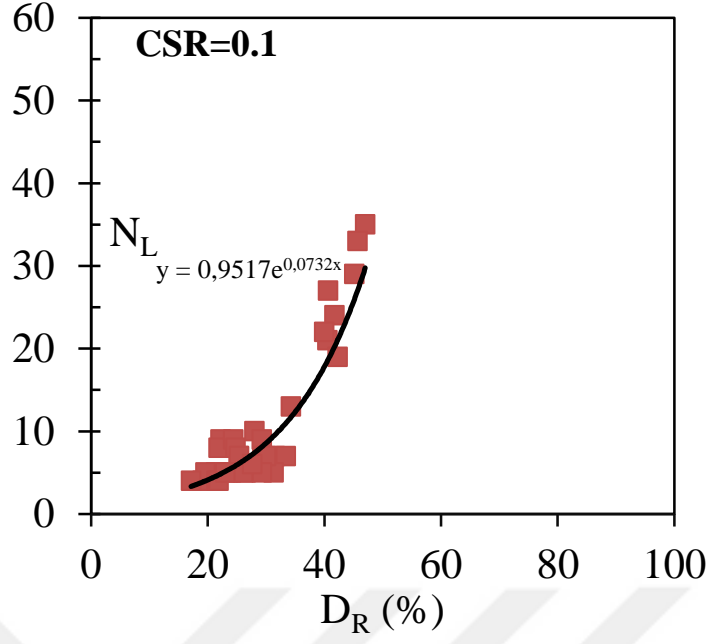
#### 4.1 Temiz Kum Numunesinin Sıvılaşma Davranışı

Çalışmanın bu kısmında temiz bir kum olan şile Kumu 20/55'in sıvılaşma davranışı kuru numuneler kullanılarak dinamik basit kesme deneyi ile belirlenmiştir. Deneyler üç farklı çevrimsel kayma gerilmesi oranında (CSR=0.12, 0.1, 0.08) yapılmış ve çevrimli kayma gerilmeleri altında şile temiz kum numuneleri üzerinde yapılan deneylerde numunelerin sıvılaşması için gereken çevrim sayısının ( $N_L$ ) göreceli sıklık ile değişimi araştırılmıştır. Farklı çevrimsel kayma gerilmesi oranlarında (CSR) yapılan 72 adet deneyde sıvılaşma direnci göreceli sıklık yükseldikçe artmıştır. Her üç CSR değeri içinde sıvılaşma için gereken çevrim sayısı ile göreceli sıklık arasında genel olarak denklem 4.1'de ifade edildiği gibi üstel bir ilişki olduğu gözlemlenmiştir.

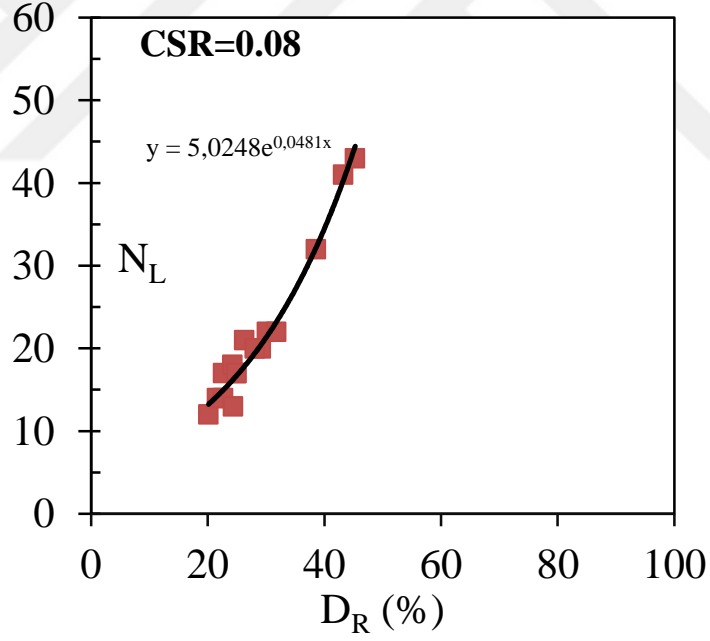
$$N_L = A \cdot e^{B \cdot D_R} \quad (4.1)$$



**şekil 4.1** : Temiz kumun sıvılaşma çevrim sayısının göreceli sıklık ile değişimi (CSR=0.12).



**Şekil 4.2:** Temiz kumun sıvılaşıma çevrim sayısının göreceli sıkılık ile değişimi (CSR=0.1).



**Şekil 4.3:** Temiz kumun sıvılaşıma çevrim sayısının göreceli sıkılık ile değişimi (CSR=0.08).

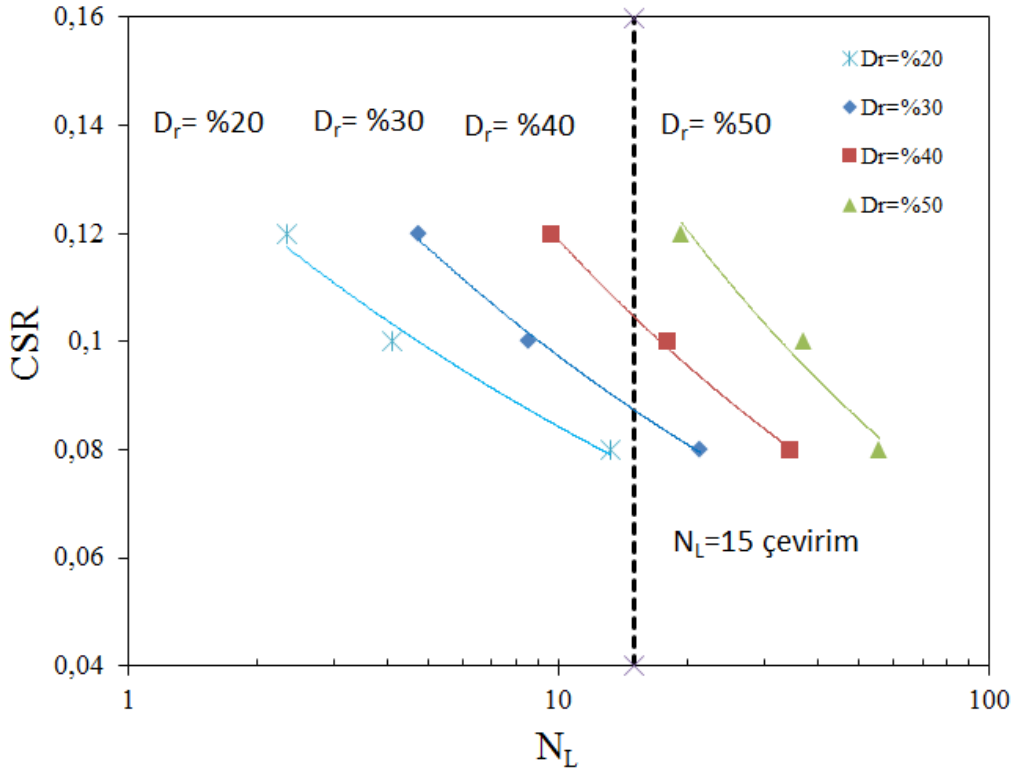
**Çizelge 4.2 :** Denklem 4.1’de verilen katsayıların CSR’a göre değişimi.

CSR	A	B
0.12	0.5715	0.0704
0.1	0.9517	0.0732
0.08	5.0248	0.0481

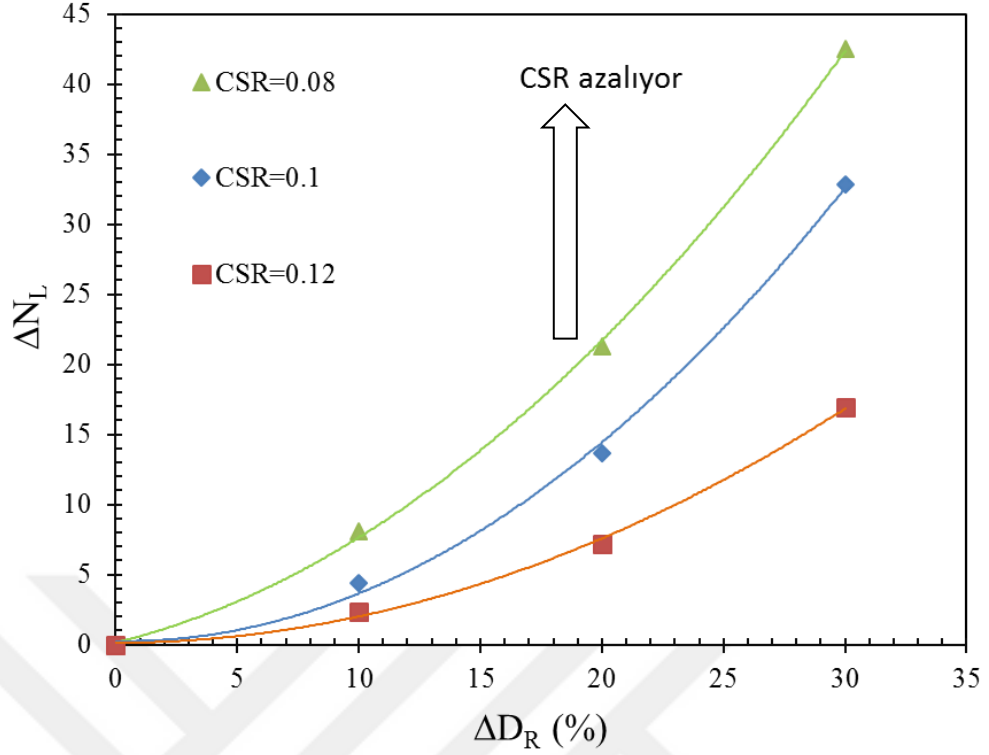
Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'ten elde edilen denklem 4.1'den bulunan A ve B katsayılarının CSR'a göre değişimi Çizelge 4.2'de verilmiştir. Çizelge dikkatlice incelendiğinde CSR yükseldikçe A katsayısının düştüğü gözlemlenmektedir.

Sabit bir göreceli sıklık değeri referans alındığında sıvılaşma direncinin çevrimsel kayma gerilmesi oranı ile değişimi üç farklı çevrimsel kayma gerilmesi oranına göre belirlenmiştir. Göreceli sıklık değerinin %20, %30, %40 ve %50 olduğu durumlarda belirlenmiş olan sıvılaşma direnci- çevrimsel kayma gerilmesi ilişkisine göre çevrimsel kayma gerilmesi oranı düştükçe sıvılaşma direnci artmaktadır. Bu durum literatürdeki bulgularla uyumaktadır.

Şekil 4.4'de sıvılaşmanın 15 çevrimde gerçekleştiği yer  $N_L=15$  çizgisi ile vurgulanmıştır. Bunun nedeni Seed ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada arazi deneyleriyle laboratuvar deneylerini karşılaştırırken arazideki güçlü yer hareketlerini laboratuvar deneylerindeki muntazam kayma gerilmelerine uyarlamak adına moment büyüklüğü 7.5 olan bir depremin laboratuvar ortamında yaklaşık 15 çevrimlik muntazam kayma gerilmesine denk geldiğini belirtmeleridir (Seed ve diğ., 1968).



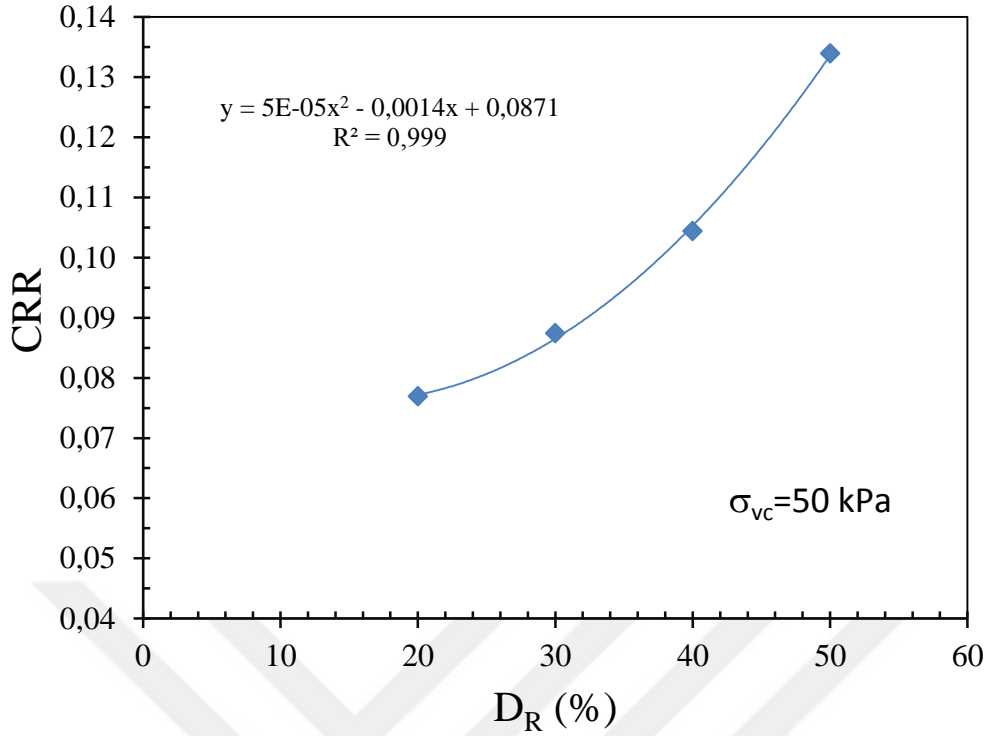
**Şekil 4.4:** Çeşitli sabit göreceli sıklıklarda şile kumu 20/55'in sıvılaşma direncinin çevrimsel kayma gerilmesi oranı ile değişimi.



**Şekil 4.5:** Temiz kumun göreceli sıkılıktaki değişimin ( $\Delta D_r$ ) sıvılaşma için gereken çevrim sayısındaki artışa ( $\Delta N_L$ ) etkisinin çevrimsel kayma gerilmesi oranı ile değişimi.

Numunelerin 15 çevrimde sıvılaştığı kayma gerilmesi oranı, çevrimsel direnç oranı (CRR) olarak adlandırılmaktadır. Buna göre temiz Şile Kumu 20/55'in çevrimsel direnç oranının göreceli sıkılık ile değişimi Şekil 4.6'da gösterilmiş ve verilen denklem 4.2'de de açıkça görüldüğü üzere temiz kum için çevrimsel direnç oranı ile göreceli sıkılık arasında ikinci dereceden polinom şeklinde bir ilişki olduğu kanıtlanmıştır.

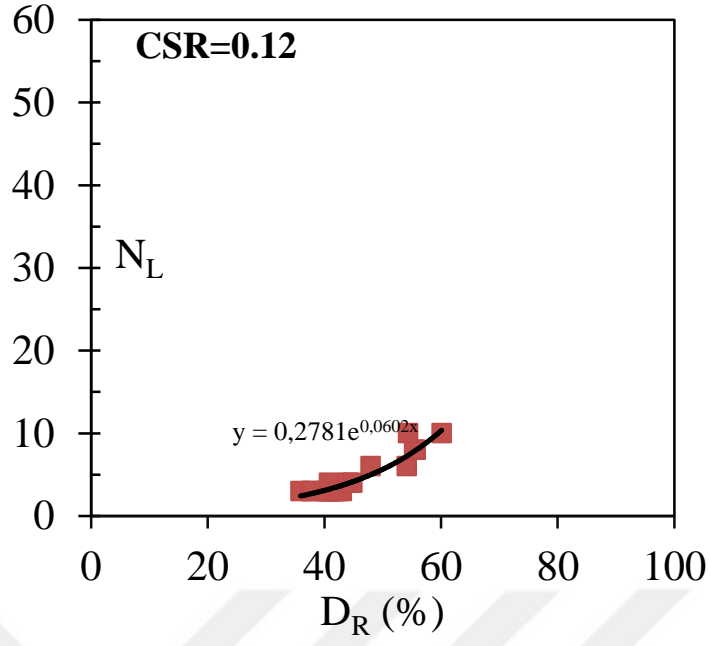
$$\mathbf{CRR = 5E - 05Dr^2 - 0.0014Dr + 0.0871} \quad (4.2)$$



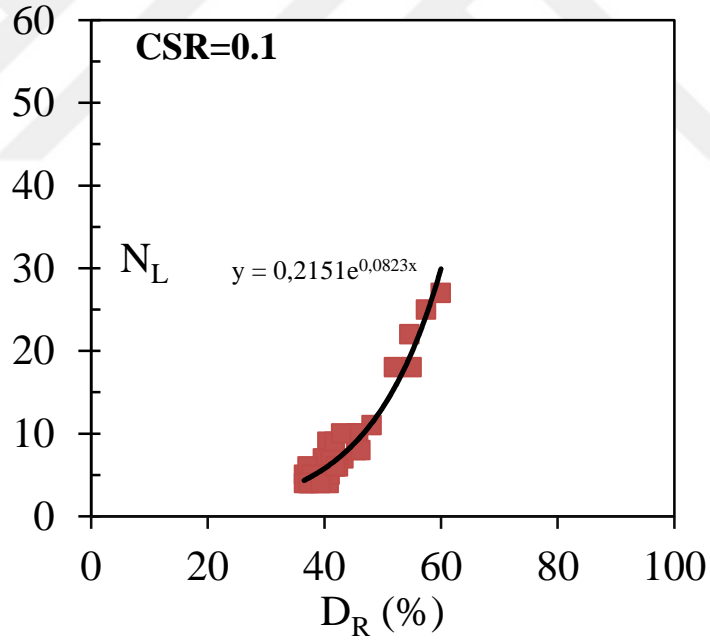
**Şekil 4.6:** Şile kumu 20/55'in çevrimsel direnç oranının ( $CRR_{[N_L=15]}$ ) göreceli sıklık ile değişimi.

#### 4.2 Siltli Kum Numunesinin Sıvılaşma Davranışı

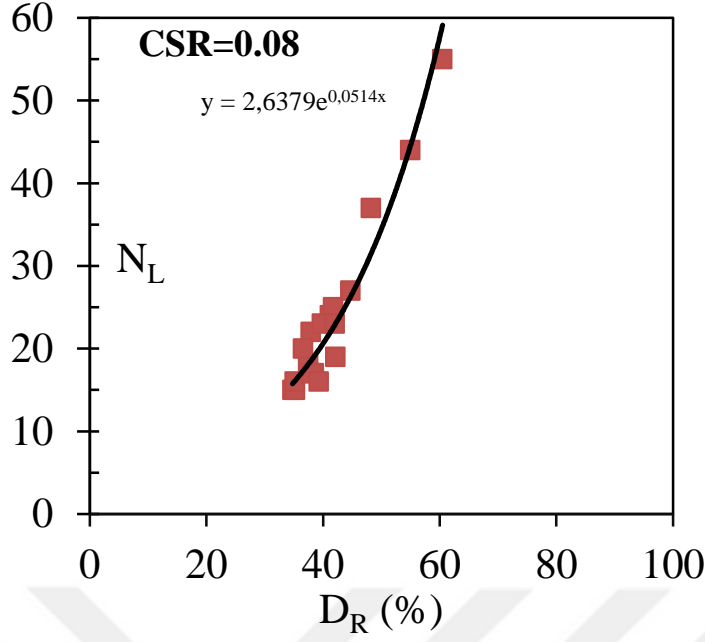
Çalışmanın devamında, basit kesme koşullarında temiz kumun sıvılaşma davranışının yanısıra kum içerisine %10 oranında plastik olmayan IZ Silt katılarak siltli kumun sıvılaşma davranışı da incelenmiştir. Deneyler temiz kumda olduğu gibi üç farklı çevrimsel kayma gerilmesi oranında ( $CSR=0.12, 0.1, 0.08$ ) yapılmış ve siltli kum numunelerinin sıvılaşması için gereken çevrim sayısının ( $N_L$ ) göreceli sıklık ile değişimi araştırılmıştır. Deneyde kullanılan %10 silt içeren numuneler 50 kPa altında konsolide edilmiş,  $CSR=0.12, 0.1$  ve  $0.08$  için sırasıyla 6 kPa, 5kPa ve 4 kPa çevrimsel kesme kuvvetine tabi tutulmuşlardır. Her üç  $CSR$  değeri için yapılan 73 adet deneyde sıvılaşma direncinin göreceli sıklık arttıkça yükseldiği ve sıvılaşma direnci ile göreceli sıklık arasında üstel bir ilişki olduğu gözlemlenmiştir.



**Şekil 4.7 :** Siltli kumun sıvılaşma çevrim sayısının göreceli sıkılık ile değişimi (CSR=0.12).



**Şekil 4.8 :** Siltli kumun sıvılaşma çevrim sayısının göreceli sıkılık ile değişimi (CSR=0.1).



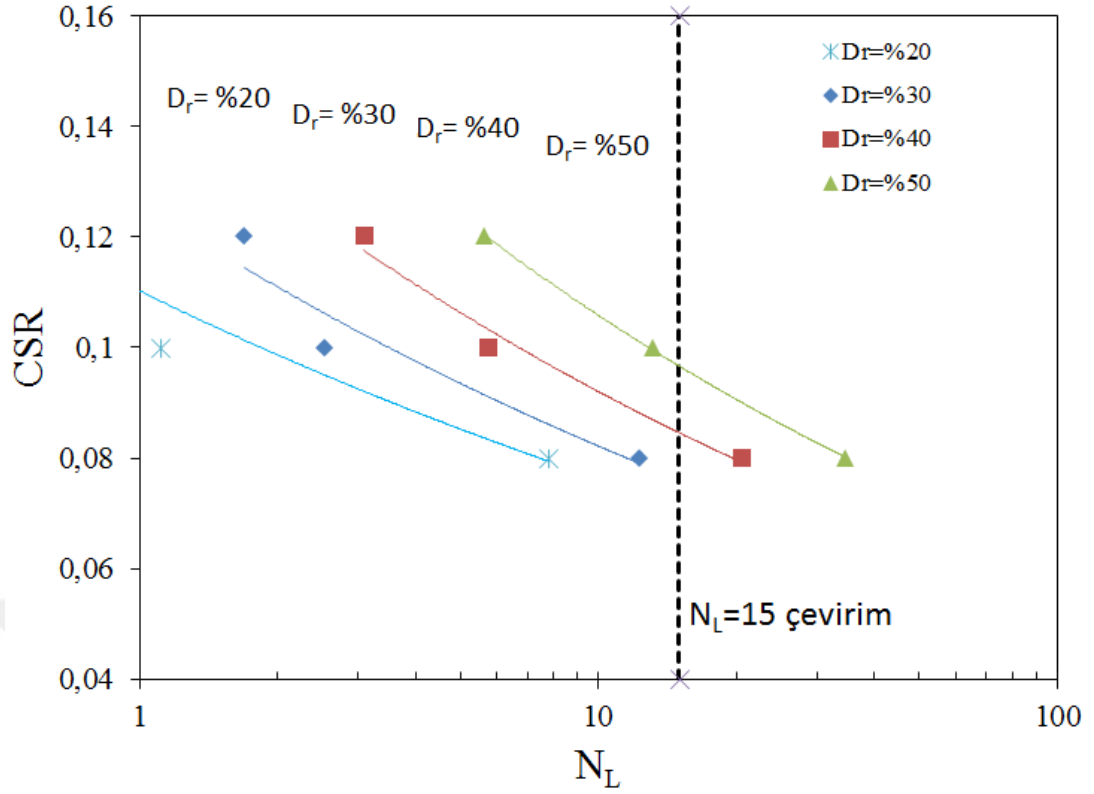
**Şekil 4.9 :** Siltli kumun sıvılaşma çevrim sayısının göreceli sıkılık ile değişimi (CSR=0.08).

**Çizelge 4.3 :** Denklem 4.1’de verilen katsayıların CSR’a göre değişimi.

CSR	A	B
0.12	0.2781	0.0602
0.1	0.2151	0.0823
0.08	2.6379	0.0514

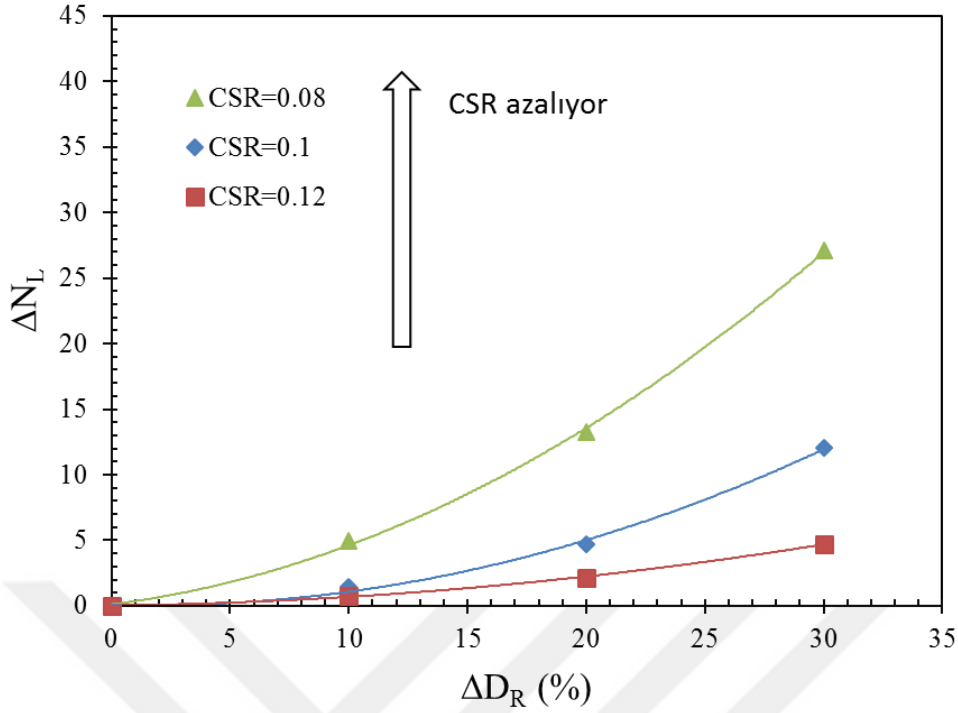
Sabit bir göreceli sıkılık değeri referans alındığında sıvılaşma direncinin çevrimsel kayma gerilmesi oranı ile değişimi üç farklı çevrimsel kayma gerilmesi oranına göre belirlenmiştir. Yapılan deneylerde düşük çevrimsel kesme kuvvetlerinin uygulanmasıyla, numunenin sıvılaşma noktasına gelmesi için daha yüksek sıvılaşma çevrim sayısına ulaşması gerektiği görülmüştür. Yani çevrimsel kayma gerilmesi oranı düşükçe sıvılaşma direnci artmaktadır. Göreceli sıkılık değerinin %30, %40 ve %50 olduğu durumlarda belirlenmiş olan sıvılaşma direnci-çevrimsel kayma gerilmesi ilişkisi Şekil 4.10’da gösterilmiş ve bulunan deney sonuçlarının literatürle uyumlu olduğu gösterilmiştir.





**Şekil 4.10:** Çeşitli sabit göreceli sıklıklarda siltli kumun sıvılaşma direncinin çevrimsel kayma gerilmesi oranı ile değişimi.

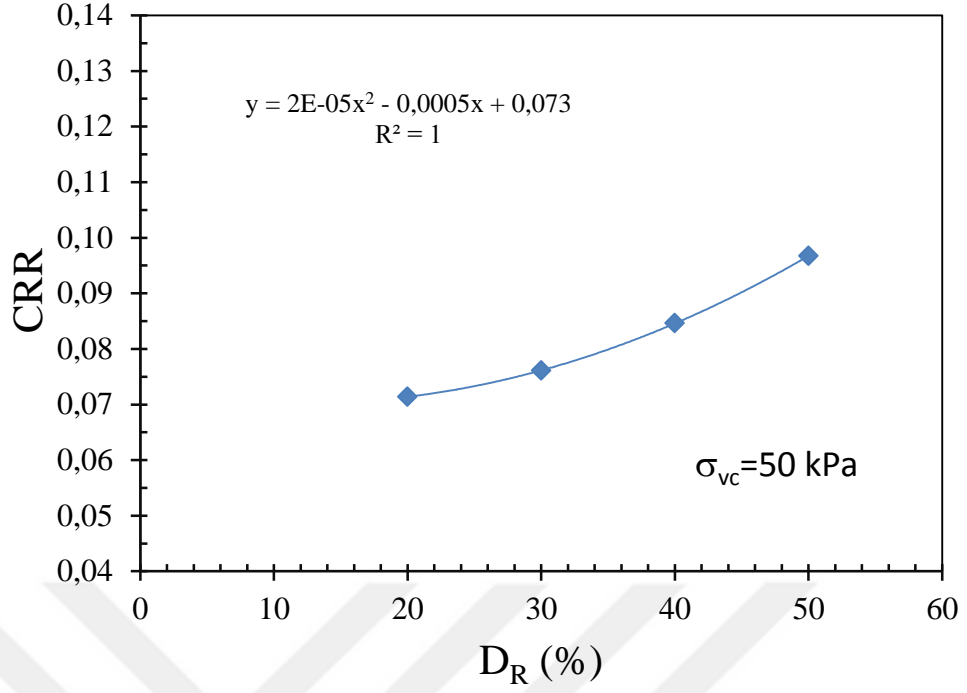
Şekil 4.10 dikkatli bir şekilde incelendiğinde farklı göreceli sıklık değerleri için belirlenmiş olan sıvılaşma direnci eğrilerinin çevrimsel kayma gerilmesi oranı düştükçe birbirine yaklaştığı görülmektedir. Çevrimsel kayma gerilmesi oranı düştüğünde göreceli sıklığın sıvılaşma direncine etkisinin daha doğru bir şekilde yorumlanması için temiz kum için çizdirilen göreceli sıklıktaki değişimin ( $\Delta D_r$ ) sıvılaşma için gereken çevrim sayısındaki artışa etkisi ( $\Delta N_L$ ) siltli kum için de çizdirilmiştir. Çizdirilen grafikte göreceli sıklıktaki değişimin siltli kumun sıvılaşma direncine etkisinin CSR düştükçe arttığı açıkça görülmektedir.



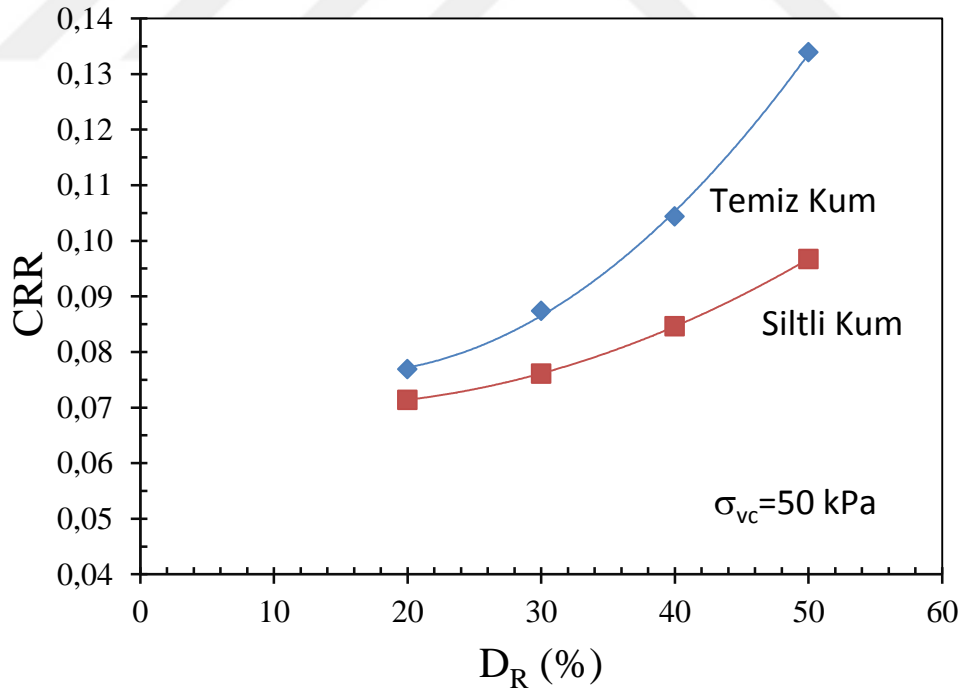
**Şekil 4.11:** %10 Silt içeren siltli kumun göreceli sıkılıktaki değişimin ( $\Delta D_r$ ) sıvılaşma için gereken çevrim sayısındaki artışa ( $\Delta N_L$ ) etkisinin çevrimsel kayma gerilmesi oranı ile değişimi.

Şekil 4.10'da sıvılaşmanın 15 çevrimde gerçekleştiği yer  $N_L=15$  çizgisi ile özellikle vurgulanmıştır. Numunelerin 15 çevrimde sıvılaşığı kayma gerilmesi oranının çevrimsel direnç oranı olarak belirtildiğini daha önce söylemiştik buna göre siltli kumunun çevrimsel direnç oranının göreceli sıkılık ile değişimi Şekil 4.12'de gösterilmiş ve verilen denklemde de açıkça görüldüğü üzere siltli kum için çevrimsel direnç oranı ile göreceli sıkılık arasında ikinci dereceden polinom şeklinde ilişki olduğu kanıtlanmıştır.

$$\mathbf{CRR = 2E - 05Dr^2 - 0.0005Dr + 0.073} \quad (4.3)$$



Şekil 4.12: %10 Silt içeren kumun çevrimsel direnç oranının ( $CRR_{[NL=15]}$ ) göreceli sıkılık ile değişimi.



Şekil 4.13: Temiz kum ve %10 Silt içeren kumun çevrimsel direnç oranının ( $CRR_{[NL=15]}$ ) göreceli sıkılık ile değişiminin karşılaştırılması.



## 5. OTOMATİK KURU HUNİ YÖNTEMİNİN DENEY SONUÇLARI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Bu bölümde sıvılaşma deneyleri için kuru huni yöntemi ile oluşturulan numunelerde otomatizasyonun önemi anlatılmış, manuel ve otomatik kuru huni yöntemiyle yapılan deneyler ayrıntılı bir şekilde karşılaştırılmıştır. Kuru huni yöntemi hem üç eksenli hem de dinamik basit kesme deneylerinde kumlu numunelerin hazırlanmasında yaygın bir şekilde uygulanan numune hazırlama yöntemleri arasında yer almaktadır. Kuru huni yöntemiyle hazırlanan kum numuneleri basit kesme cihazı için özel tasarlanmış olan ve özel bir kalıp tabanına oturtulmuş olan alüminyum huninin düşey eksen boyunca yukarı kaldırılmasıyla oluşturulmaktadır. Huni içerisine dökülen numune huninin simetri eksenini boyunca yavaşça yukarı kaldırılması aracılığıyla kalıp ve teflon ringler tarafından sarmalanmış olan boşluğa doldurulmaktadır. Bu yöntemle oluşturulan numuneler istenildiğinde içerisinden CO<sub>2</sub> ve havası alınmış su geçirilmek suretiyle doyurulabilmektedir. Ancak her deneysel teknikte olduğu gibi kuru huni yönteminde de çeşitli zorluklar yaşanmakta, çok dikkatli olunması gereken hususlar bulunmaktadır. Bu hususlardan en önemlisi huninin titretilmeden aynı düşey eksen doğrultusunda yukarı çekilmesidir. Özellikle gevşek numuneler elde etmek istendiğinde huninin yukarı kaldırılırken sarsılmaması büyük önem taşımaktadır. Ayrıca deney sonuçlarını etkileyen huninin çekiş hızında çok iyi bir şekilde kontrol edilmesi gerekmektedir. Fakat deneyi gerçekleştiren operator huni yükseltme sürecinde ilk ve son hızları çok farklı olacak şekilde huni çekiş hızının kontrolünü kaybedebilir. İnsan eliyle gerçekleştirilirken bu sürecin tam olarak kontrol edilebilmesi mümkün değildir. Huninin çekilişi sırasında elde oluşan titremler huninin ekseninden kaymasına sebep olabilmekte, bu durum numune yapısının bozulmasına sebep olabilmektedir. Bugüne kadar kuru huni yöntemi uygulanarak yapılan çalışmalarda bu tarz sorunların numunenin sıvılaşma direncini etkileyip etkilemediği bilinmemektedir. Tüm bu durumların numunelerin sıvılaşma direncini etkileyip etkilemediğini belirlemek ve tüm sorunları çözüme ulaştırmak amacıyla bu çalışmada otomatik bir huni dizayn edilmiş ve NGI tipi dinamik basit

kesme cihazına uygun olacak şekilde geliştirilmiştir. Huni, çekiş hızının ayarlanmasını sağlayan bilgisayar kontrollü bir panele ve ayrıca zeminlerin huniye döküş yüksekliğinin ayarlanmasına yardımcı olacak 35 mm yüksekliğinde 6 adet alüminyum aparata sahiptir. Bu çalışmada zeminin huniye döküş yüksekliğinin ve huninin simetri eksenini boyunca çekiş hızının göreceli sıklığına ve çevrimsel sıvılaşma direncine etkisi temiz kum ve %10 IZ silt içeren siltli kum üzerinde incelenmiştir. Huni çekiş hızı ile göreceli sıklık arasındaki ilişkiyi gösteren bir denklem geliştirilmiş ve tüm prosedürü otomatik hale getirmenin etkisi kuru huni yöntemiyle manuel ve otomatik olarak oluşturulan numunelerle yapılan deneylerin sonuçlarının karşılaştırılmasıyla ayrıntılı olarak araştırılmıştır. Yeditepe Üniversitesi Zemin Mekaniği Laboratuvarında gerçekleştirilen deney programı kapsamında yaklaşık 20 mm yüksekliğinde ve 64 mm çapında temiz kum ve siltli kumlu zeminlerin dinamik basit kesme numuneleri kuru huni yöntemiyle oluşturulmuştur. Herbiri 35 mm yüksekliğinde 6 aparata ve numune sıçramaması için en üste yerleştirilen 37 mm yüksekliğindeki aparata sahip alüminyum huni, yine alüminyumdan üretilmiş numune hazırlama kalıbının içine yerleştirilmektedir. Kullanılan kalıp, membran etrafındaki teflon ringlerin düzgün bir şekilde hizalanmasını sağlamış ve oluşturulan numunelerin zarar görmesini engellemiştir. Zeminlerin huniye döküş yüksekliğinin numunelerin yoğunluğuna etki etmesinden dolayı huni yüksekliğini istenilen şekilde ayarlanması istenmiş ve bu nedenle aynı yükseklikte 6 adet aparat tasarlanmıştır. Zemin döküş yüksekliği belirlenip, huni içerisine döküldükten sonra, huni manuel ve otomatik olarak yukarı kaldırılarak kuru huni yöntemi uygulanmıştır. Huninin simetri eksenini boyunca yukarı çekiş hızının göreceli sıklığı etkilemesinden dolayı manuel kuru huni yönteminde kronometre kullanılırken, otomatik kuru huni yönteminde ise otomatik olarak yükseltilecek mekanizma bilgisayar kontrollü panelinde bulunan anahtar sayesinde 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135, 150 saniyelere ayarlanarak 4 cm yukarı yükseltilmiştir. Böylelikle farklı zemin döküş yüksekliği ve farklı huni çekiş hızlarının uygulandığı kombinasyonlar denemiş bunların göreceli sıklık ve sıvılaşma üzerindeki etkileri manuel ve otomatik olarak ayrı ayrı incelenmiş ve karşılaştırılmıştır.

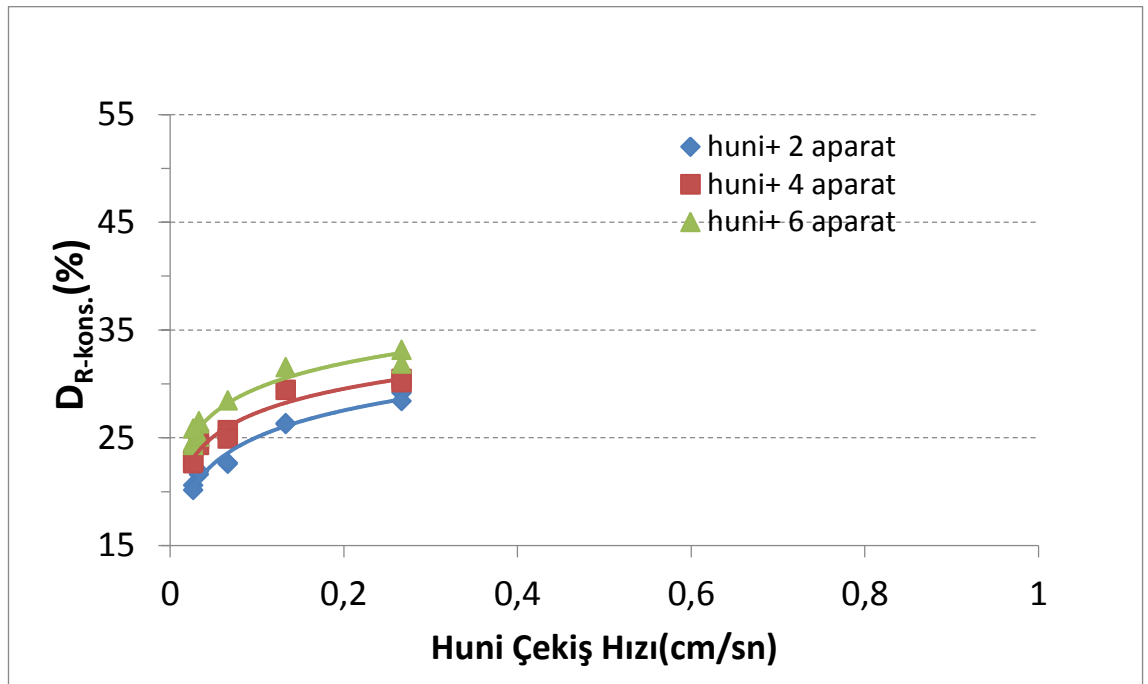
## 5.1 Kuru Huni Yönteminde Zemin Döküş Yüksekliği ve Huni Çekiş Hızı Etkilerinin Otomatik ve Manuel Olarak İncelenmesi

Yapılan deneylerin sonuçları incelendiğinde zeminin huninin içerisine döküldüğü yükseklik (bundan sonra döküş yüksekliği olarak bahsedilecektir) ve huni çekiş hızının göreceli sıklığa ve sıvılaşma direncine etki ettiği tespit edilmiş ve bu durum hem manuel kuru huni yöntemi hem de otomatik kuru huni yöntemiyle yapılan deneylerle ayrı ayrı incelenmiştir.

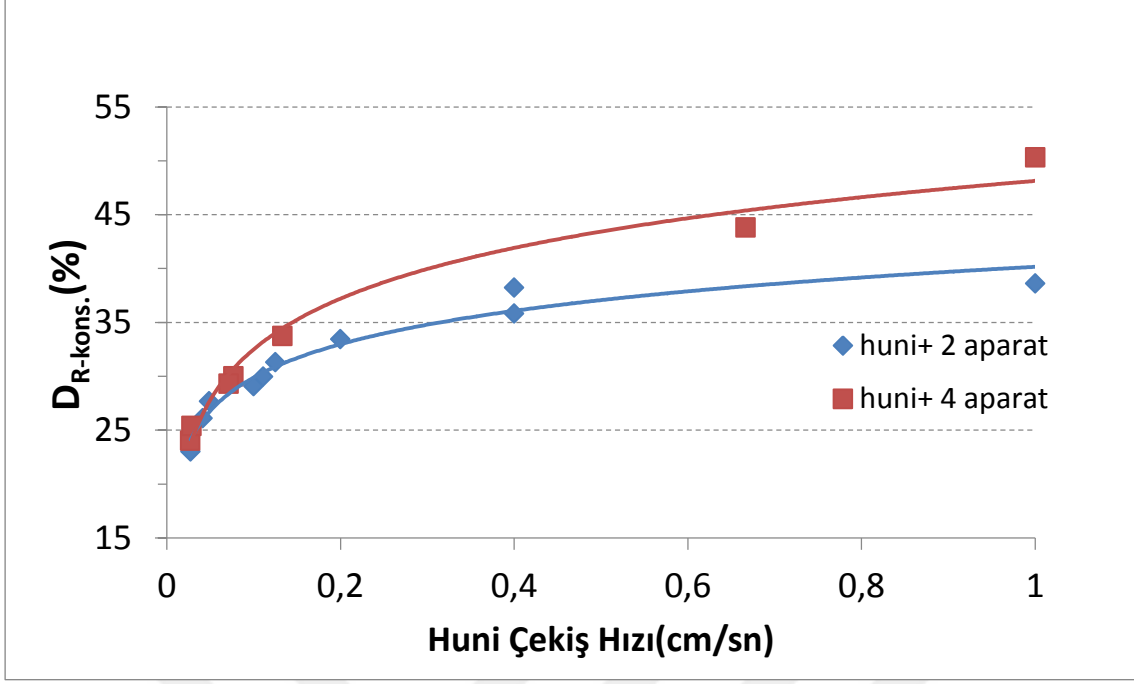
### 5.1.1 Huni çekiş hızının göreceli sıklık üzerindeki etkisi

Hununin farklı çekiş hızlarında yukarı çekilmesiyle Şile temiz kumu 20/55 için meydana gelen konsolidasyon sonrası göreceli sıklık değişimi hem otomatik (Şekil 5.1) hem de manuel (Şekil 5.2) kuru huni yöntemi için ayrı ayrı gösterilmiştir.

Şekil 5.1 ve Şekil 5.2 incelendiğinde huni çekiş hızının yükselmesinin göreceli sıklığı arttırıcı yönde etki ettiği görülmektedir. Buna karşılık huni çekiş hızının göreceli sıklık üzerindeki etkisi nispeten düşük olan huni çekiş hızlarında daha belirgin olarak gözlemlenmektedir. ( $h.ç.h < 0.2 \text{ cm/sn}$ ).

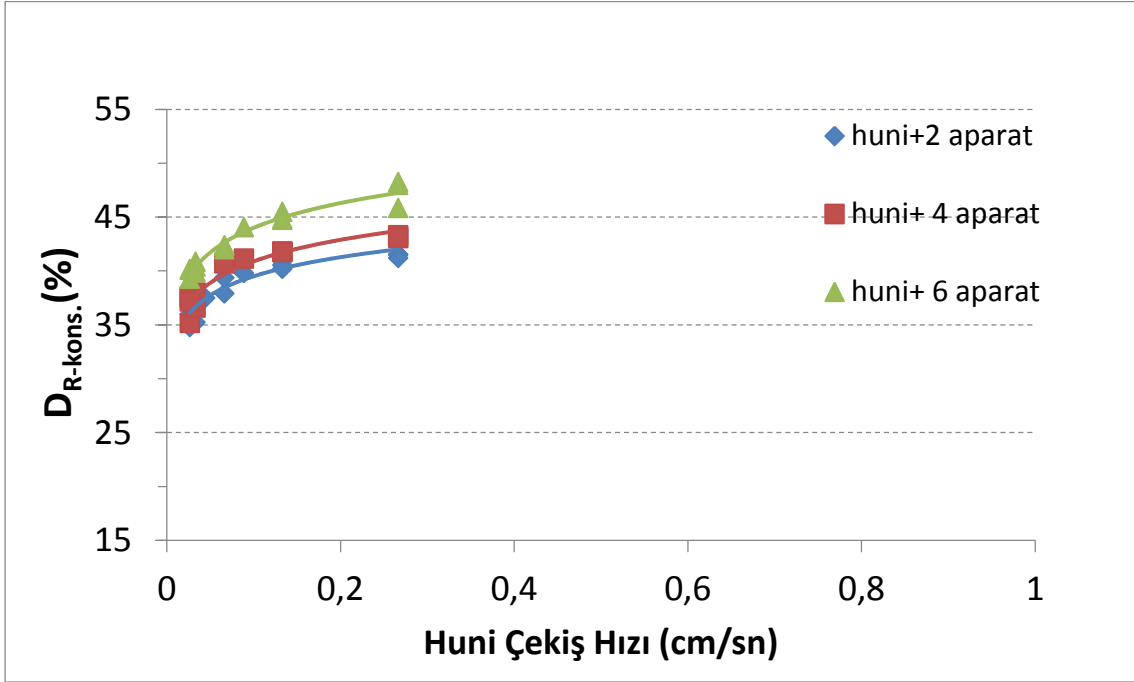


Şekil 5.1: Otomatik kuru huni yöntemiyle oluşturulan şile temiz kumu 20/55 numunelerinin göreceli sıklık değişiminin huni çekiş hızı ve zemin döküş yüksekliği ile ilişkisi.



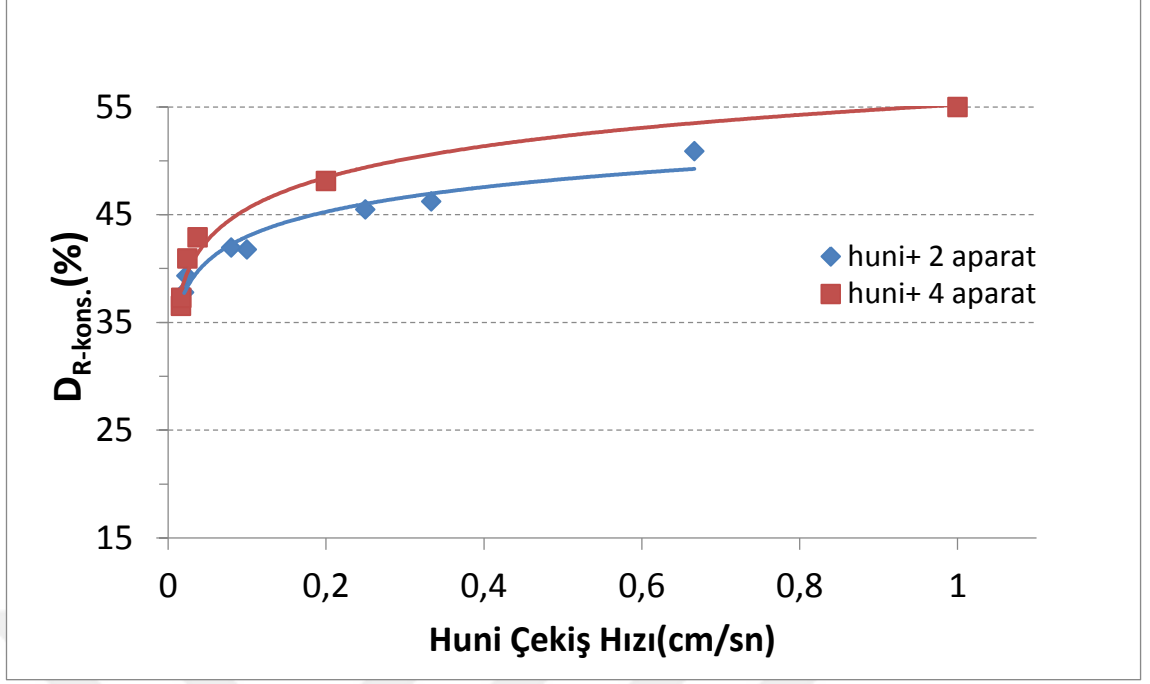
**Şekil 5.2:** Manuel kuru huni yöntemiyle oluşturulan şile temiz kumu 20/55 numunelerinin göreceli sıklık değişiminin huni çekiş hızı ve zemin döküş yüksekliği ile ilişkisi.

Hununin farklı çekiş hızlarında yukarı çekilmesiyle siltli kumda meydana gelen konsolidasyon sonrası göreceli sıklık değişimi Şekil 5.3 ve Şekil 5.4’ de otomatik ve manuel kuru huni yöntemi için ayrı ayrı gösterilmiştir.



**Şekil 5.3:** Otomatik kuru huni yöntemiyle oluşturulan siltli kum numunelerinin göreceli sıklık değişiminin huni çekiş hızı ve zemin döküş yüksekliği ile ilişkisi.





**Şekil 5.4:** Manuel kuru huni yöntemiyle oluşturulan siltli kum numunelerinin göreceli sıkılık değişiminin huni çekiş hızı ve zemin döküş yüksekliği ile ilişkisi.

Hem temiz kum hem de siltli kum grafikleri incelendiğinde eğilimlerin benzer olduğu huni çekiş hızı yükseldikçe konsolidasyon sonrası göreceli sıkılığın da arttığı fakat bu artışın huni çekiş hızınının 0.2 cm/sn'den daha yüksek olduğu durumlarda nispeten daha zayıf bir şekilde görüldüğü gözlemlenmiştir.

Temiz kum ve siltli kum için verilen grafikler ayrı ayrı incelendiğinde huni çekiş hızı ile konsolidasyon sonrasındaki göreceli sıkılık değerleri arasında bir ilişki olduğu açıkça görülmektedir. Aşağıdaki denklemde bu ilişkiyi gösteren E ve F katsayıları ve bunlar arasındaki logaritmik bağıntılar açıkça görülmektedir.

$$D_{R-kons.} (\%) = E \cdot \ln [h\dot{c}h(\text{cm/sn})] + F \quad (5.1)$$

Temiz kum ve siltli kum için çizilen grafiklerde numune çeşidi, zemin döküş yüksekliğinin belirlenmesi için kullanılan aparat sayısı ve uygulanan kuru huni yöntemine (otomatik veya manuel) bağlı olarak değişiklik gösteren E ve F katsayı değerleri Çizelge 5.1'de gösterilmiştir.

**Çizelge 5.1 :** Denklemden verilen katsayıların zemin çeşidi, zemin döküş yüksekliği ve numune hazırlama yöntemine göre değişimi.

Aparat Sayısı	Temiz Kum						Siltli Kum					
	Otomatik			Manuel			Otomatik			Manuel		
	E	F	R <sup>2</sup>	E	F	R <sup>2</sup>	E	F	R <sup>2</sup>	E	F	R <sup>2</sup>
2	3.575	33.3	0.97	4.464	40.2	0.96	2.553	45.4	0.85	3.309	50.6	0.95
4	3.194	34.7	0.94	6.790	48.1	0.98	2.881	47.5	0.91	4.193	55.2	0.97
6	3.365	37.3	0.95	-	-	-	3.308	51.6	0.95	-	-	-

Çizelge dikkatlice incelendiğinde huni için kullanılan aparat sayısı yani zemin döküş yüksekliği arttıkça F katsayısının da arttığı görülmektedir. Benzer şekilde diğer tüm koşullar sabit tutulup numune temiz kumdan siltli kuma değiştiğinde F değerinin arttığı gözlemlenmektedir. Çizelgeden kuru huni tekniği incelendiğinde ise E ve F katsayısının manuel durumda daha yüksek olduğu, manüelden otomatikte geçildiğinde ise azaldığı görülmektedir. Bunun yanında konsolidasyon gerilmesi ve huninin boyutları gibi faktörlerinde söz konusu E ve F katsayılarını etkileyeceği unutulmamalıdır. Çizelgede gösterilen R<sup>2</sup> parametresi denklemin huni çekiş hızı ile konsolidasyon sonrası göreceli sıkılık arasında denklem 5.1’de ifade edildiği üzere oldukça kuvvetli bir ilişki olduğunu göstermektedir. Temiz kum ve siltli kum için çizdirilen grafikler ayrı ayrı incelendiğinde aynı huni çekiş hızı için oluşturulan numunelerden siltli kumun hem manuel hem de otomatik durumda temiz kuma göre daha yüksek göreceli sıkılık değerine sahip olduğu gözlemlenmiştir.

### 5.1.2 Zemin döküş yüksekliğinin göreceli sıkılık üzerindeki etkisi

Temiz kum ve siltli kum için çizilen grafikler incelendiğinde göreceli sıkılığın sadece huni çekiş hızına bağlı olmadığı huniye eklenen aparatlarla değiştirilen zemin döküş yüksekliğinin de göreceli sıkılığı etkilediği görülmektedir



**Şekil 5.5:** Alüminyum huni ve zemin döküş yüksekliğini belirleyen aparatları.

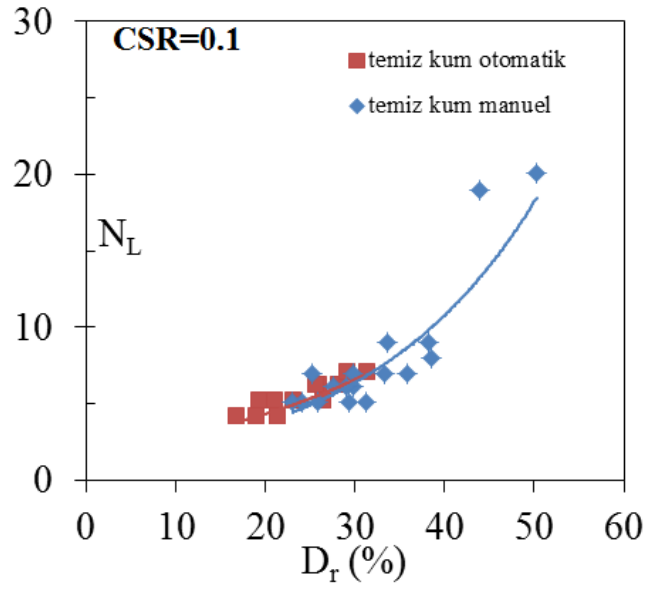
Grafiklerin eğilimlerine göre huniye aparat eklenip yüksekliği arttırıldıkça yani zeminin huninin içerisine döküş yüksekliği arttırıldıkça göreceli sıklığında arttığı gözlemlenmiştir. Depozisyon sürecinin huninin hareket ettirilerek yükseltilmesiyle başladığı düşünüldüğünde bu durum ilginç bir gözlemdir. Buna karşılık bu çalışmayla birlikte depozisyon sürecinin huninin yükseltilmesinden çok daha erken başladığı, yani ilk huni hareketinden önce zeminin huniye dökülmesiyle beraber depozisyon sürecinin de başlamış olduğu anlaşılmaktadır. Zeminin huniye döküldüğü yüksekliğin yani huninin alt ve üst kısmı arasındaki mesafenin göreceli sıklığa etki ettiği açıkça görülmektedir. Örnek vermek gerekirse denklem 5.1'den elde edilen katsayılar incelendiğinde otomatik kuru huni yöntemiyle 0.2 cm/sn huni çekiş hızıyla elde edilen siltli kum numunelerinde hunideki aparat sayısının 2'den 6'ya çıkarılmasına bağlı olarak göreceli sıklık değerinde %5 oranında artış gözlemlenmiştir. Ayrıca yine temiz kum ve siltli kum grafikleri incelendiğinde hunideki aparat sayısının artışına bağlı olarak gerçekleşen göreceli sıklık değerindeki yükselmenin manuel yöntemde otomatik yöntemde göre daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun dışında hem temiz hem de siltli kum grafikleri için, huni aparat sayısındaki farklılıklara göre çizdirilmiş eğriler huni çekiş hızı arttıkça otomatik yöntem için oldukça paralelken manuel yöntem için nispeten farklı bir eğilim göstermektedir.

Temiz kum için huni çekiş hızının 0.27 cm/sn olduğu durumlarda hem otomatik hem de manuel durum ayrı ayrı incelenmiş, göreceli sıklık değerinin otomatik durumda manuel duruma göre daha düşük olduğu, huninin 2 aparatlı ve 4 aparatlı durumlarında sırasıyla %5.7 ve %8.7 düşüş meydana geldiği saptanmıştır. Aynı şartlarda siltli kum grafikleri incelendiğinde, yine otomatik yöntemde daha düşük göreceli sıklık değerlerinin olması dikkat çekerken, huninin 2 aparatlı ve 4 aparatlı durumlarında sırasıyla %4.2 ve %5.9 oranlarında düşüş meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte zemin döküş yüksekliği ve huni çekiş hızı arttırıldığında otomatik ve manuel durumda göreceli sıklık değerinin hem temiz hem de siltli kum numunelerinde artış göstereceği unutulmaması gereken bir durumdur. Yine grafikler incelendiğinde hem temiz hem de siltli kum grafiklerinde otomatik kuru huni yönteminde manuel yöntemde göre daha gevşek numuneler elde edildiği tespit edilmiştir. Bu durum manuel yöntemde huni düşey eksenini boyunca yukarı doğru çekilirken elde oluşan titreşimler sonucunda yapılan hatalardan ve numunenin yamuk bir şekilde depozisyonundan kaynaklanmaktadır. Numunenin yamuk bir şekilde oluşturulması durumu, ortada oluşup üst başlık üstüne getirildiğinde dümdüz olması gereken küçük bombenin yamuk olmasına hatta kimi zaman üst başlığında yamuk olarak yerleşmesine sebep olmaktadır. Üst başlık yamuk olduğunda ise üst başlığa yerleştirilmesi gereken piston zorlanılarak bağlanmakta ve bu durum piston bağlanırken yapılan el baskısı neticesinde numunenin örselenmesine ve dolayısıyla göreceli sıklık değerinin yükselmesine sebep olmaktadır. Manuel yöntemde kontrol edilemeyen ve göreceli sıklık durumunu etkileyen bir diğer etken ise huni çekiş hızının tam olarak kontrol edilememesi ve huni çekiş sırasında yaşanan muhtemel kontrolsüz hız kesintileridir.

## **5.2 Kuru Huni Yönteminin Sıvılaşma Direnci Üzerindeki Etkilerinin Otomatik ve Manuel Olarak Karşılaştırılması**

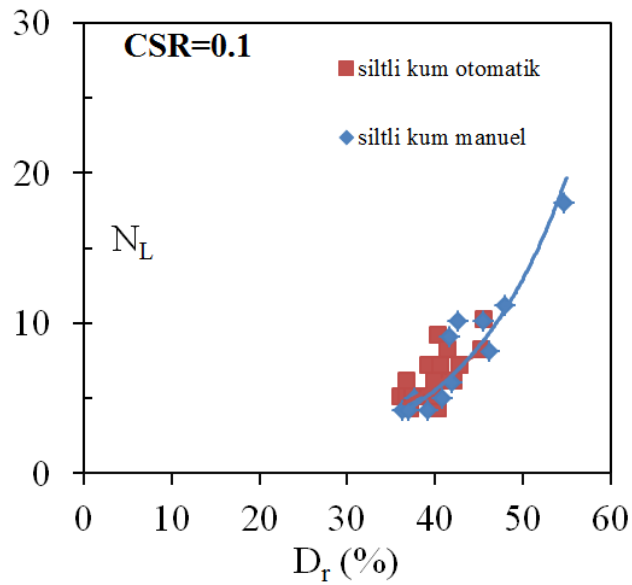
Kuru huni yönteminin otomatik ve manuel olarak uygulanmasının sıvılaşma direnci üzerinde nasıl bir farklılığa sebep olduğu da üzerinde durulması gereken önemli konulardan biridir. Şekil 5.6'da temiz kum numunelerinin sıvılaşma direnci hem otomatik hem de manuel yöntem için gösterilmiştir. Aynı CSR değeri için hem otomatik hem de manuel yöntemle gerçekleştirilmiş deneylerde benzer sonuçların

elde edildiği, göreceli sıklık değeri arttıķa sıvılaşma direncinin de arttığı üstel eğilim görülmüştür.



şekil 5.6: Sile temiz kum 20/55'in sıvılaşma direncinin otomatik ve manuel olarak karşılaştırılması.

şekil 5.7'de ise siltli kum numunelerinin otomatik ve manuel durum için sıvılaşma direnci incelenmiştir. Aynı temiz kumda olduğu gibi göreceli sıklık değeri arttığında sıvılaşma direncinin de yükseldiği üstel bir eğilim gözlenmektedir. Aynı CSR değerinde otomatik ve manuel durum için sıvılaşma davranışı karşılaştırıldığında ise aynı eğilim çizgisi üzerinde data ların elde edildiği açıkça görülmektedir.

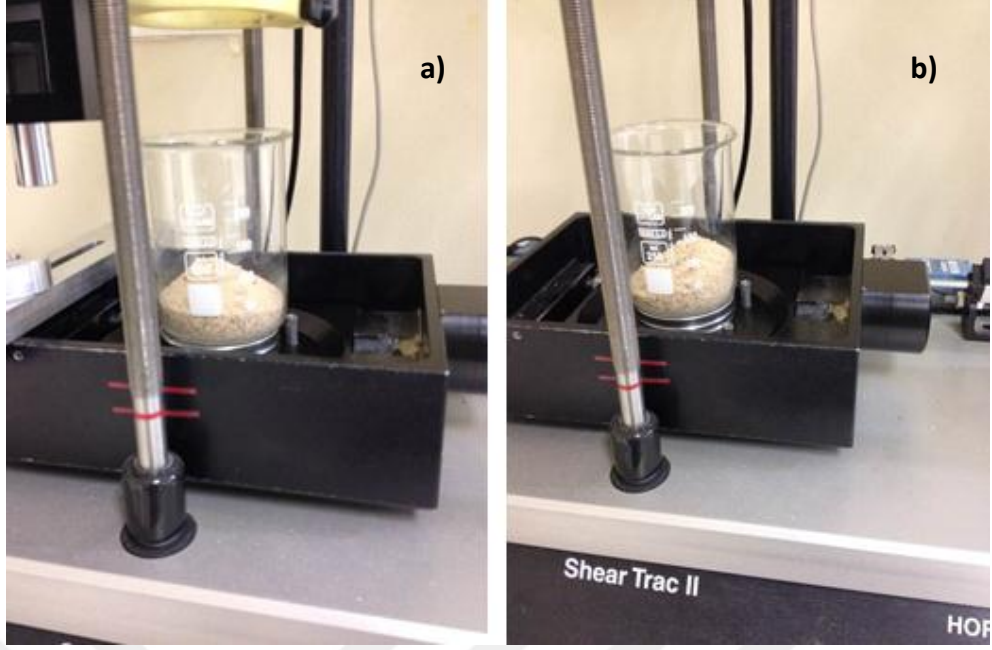


şekil 5.7: Siltli kumun sıvılaşma direncinin otomatik ve manuel olarak karşılaştırılması.

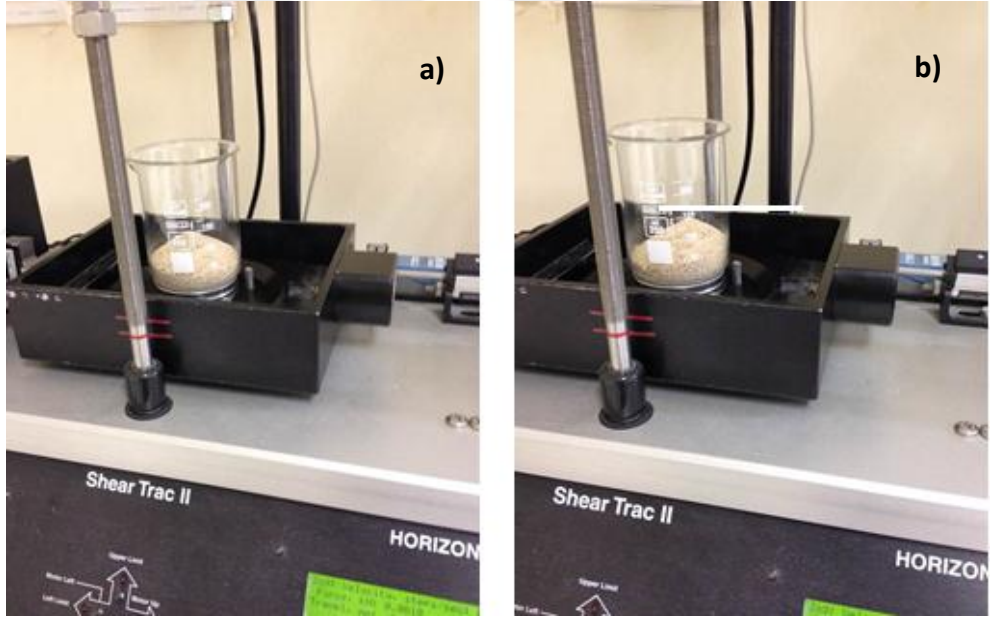
### 5.3 Otomatik Kuru Huni Yönteminin Manuel Yönteme Göre Avantajları

Kuru huni yöntemi otomatik ve manuel olarak incelendiğinde sıvılaşma direncinin aynı olduğu görülmüş üst üste çakışan üstel eğilim çizgileriyle bu durum kanıtlanmıştır. İlk bakışta iki yöntemin birbirinden farksız olduğu düşünülse de detaylı bir şekilde incelendiğinde otomatik kuru huni yönteminin manuel yönteme göre daha sağlıklı sonuçlar verdiği anlaşılmaktadır.

Manuel yöntemde kontrolün tamamıyla operatörde olması, özellikle el melekесinin mükemmelleşemediği ve tecrübenin eksik olduğu durumlarda hataları kaçınılmaz kılmaktadır. Elde oluşan titremeler neticesinde çekiş sırasında huni sarsılmakta ve numune yamuk bir şekilde oluşturulmaktadır. Numunenin yamuk bir şekilde oluşturulmasıyla, huni çekışı sırasında normalde tam merkezde oluşup üst başlığın üstüne yerleştirilmesiyle dümdüz bir hal alması gereken küçük bombe yanlara kaymakta ve üst başlık numunenin üstüne yerleştirildiğinde bombe tam olarak düzelmemektedir. Bu da üst başlığın yamuk durmasına sebep olmaktadır. Bu aşamadan sonra üst başlık yamuk olduğundan o-ring zor yerleştirilmekte ve nihayetinde piston üst başlığa bağlanırken çok büyük zorluk yaşanmakta bu esnada üst başlığın fazlaca oynatılıp pistonun bağlanması için aşırı baskı yapılmak zorunda kalınmaktadır. Tüm bu durumlar numunenin örselenmesine ve bu örselenme sebebiyle olması gerekenden daha yüksek göreceli sıklığa sahip olmasına sebep olmaktadır. Yani manuel yöntemde bu anlattığımız sebeplerden dolayı otomatik huni yöntemindeki kadar gevşek numune elde edilmesi oldukça güçtür. Temiz kum ve siltli kum için yapılan deneylerde numunenin oluşturulmasıyla temiz kumda siltli kuma göre daha belirgin bir bombe oluşmaktadır. Bu nedenle manuel deneylerle otomatik deneyler karşılaştırıldığında temiz kum numunelerinin göreceli sıklık değerinde daha büyük farklılık gözlemlenmektedir.

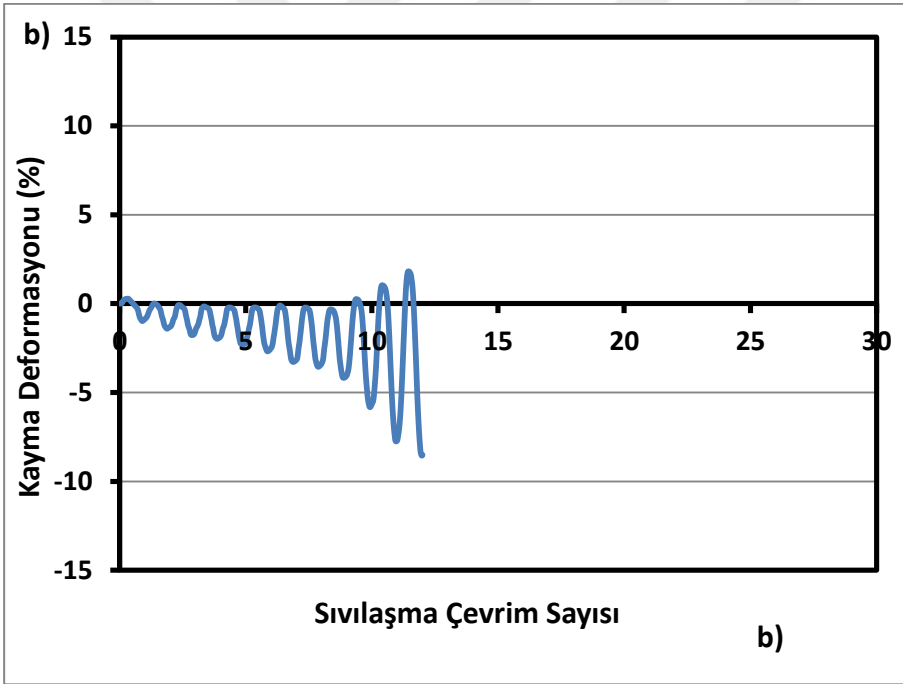
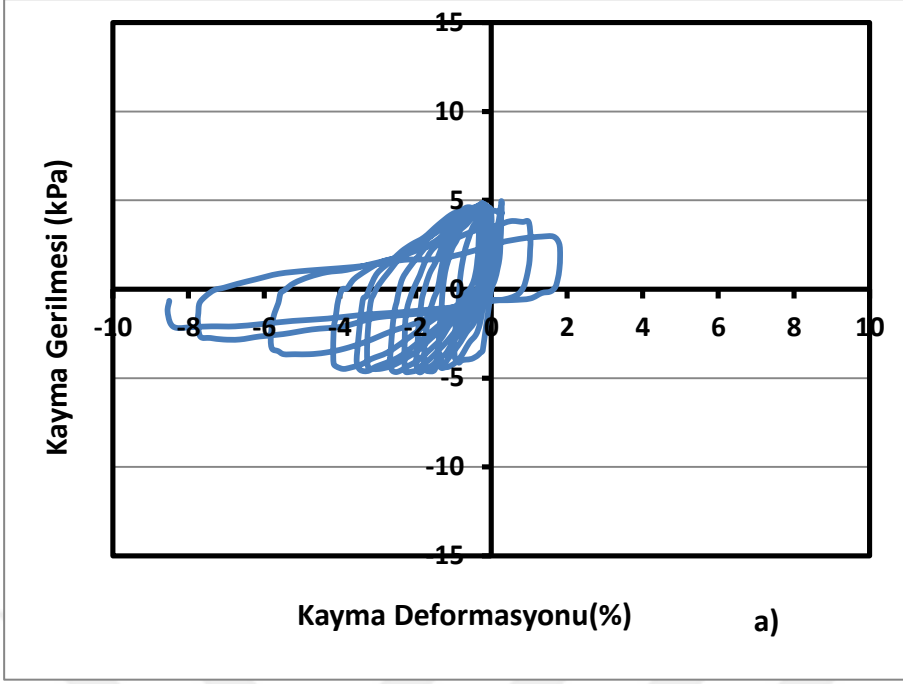


**Şekil 5.7:** Temiz kumun a) otomatik ve b) manuel olarak hazırlanması durumu.

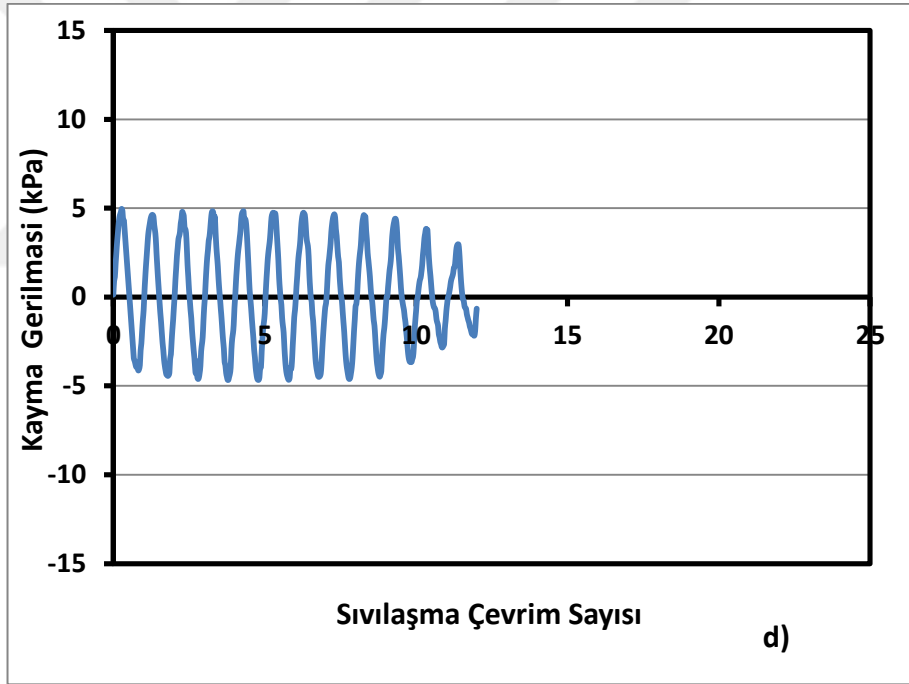
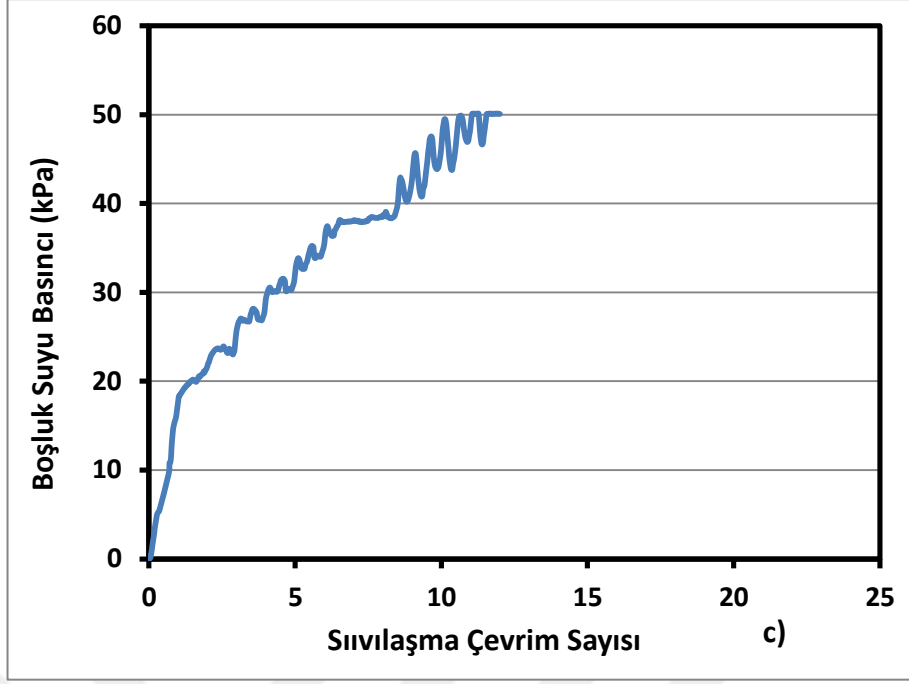


**Şekil 5.8:** Siltli kumun a) otomatik ve b) manuel olarak hazırlanması durumu.

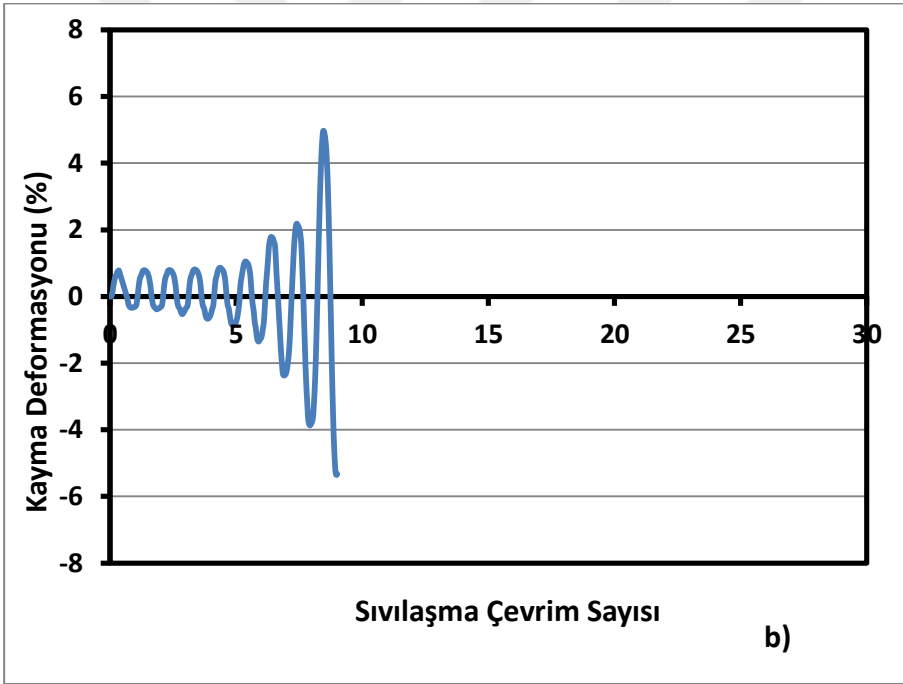
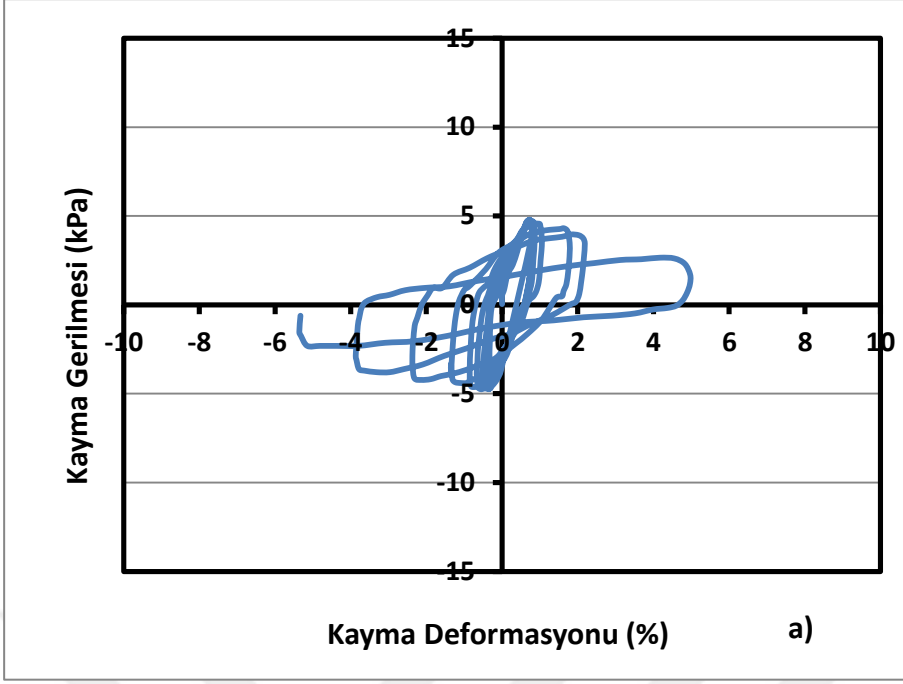
Numunenin yamuk olmasının bir diğer büyük olumsuz etkisi deney sonunda sonuçların çizdirildiği grafiklerde çeşitli eksenlerde kaymalar gözlemlenmesidir. Şekil 5.9'da söz konusu eksenel %10 IZ Silt içerikli siltli kumun deney sonuçları verilmiş olup söz konusu eksenel kaymalar gözlemlenebilir. Eksenel kayma deney sonuçlarının sağlıklı bir şekilde değerlendirilmesine engel olmaktadır.

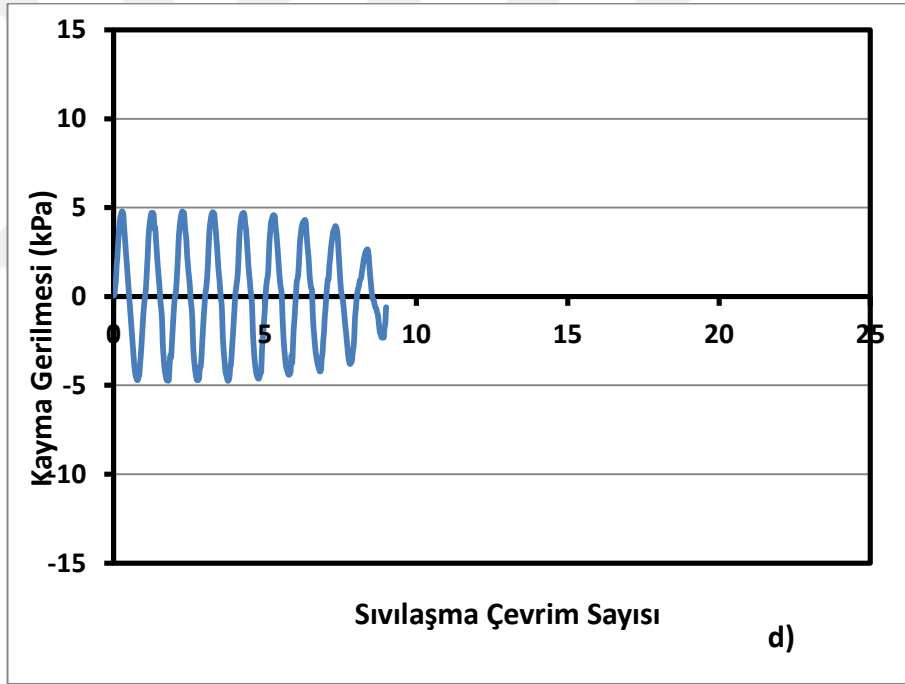
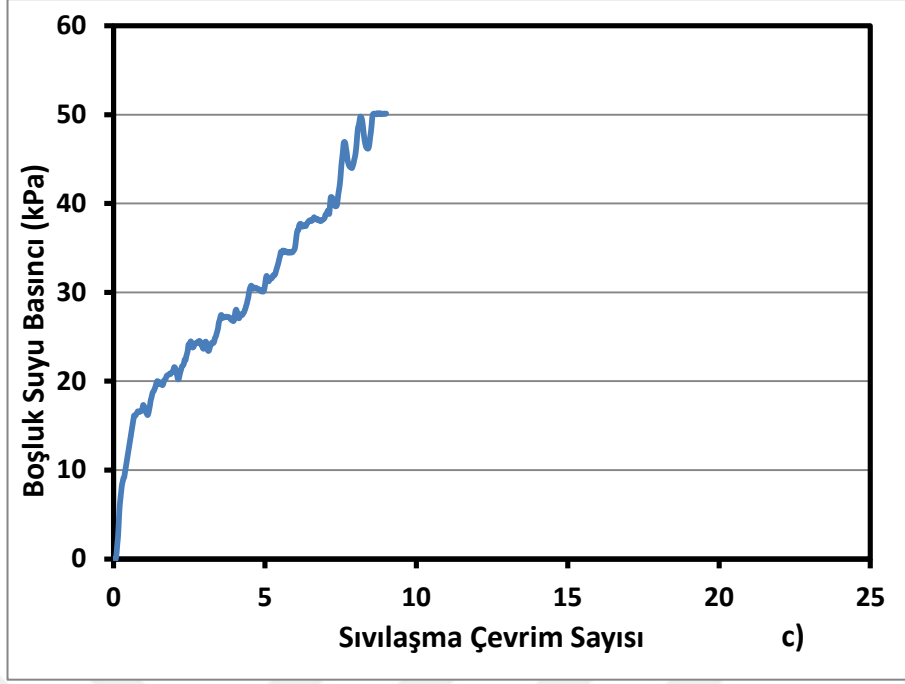






Şekil 5.9: Manuel kuru huni yöntemiyle yapılan dinamik basit kesme deney analizi grafikleri (%10 silt içerikli kum,  $D_r=48.1$ ,  $\sigma_{vc}=50$  kPa,  $CSR=0.1$ ).





**Şekil 5.10:** Otomatik kuru huni yöntemiyle yapılan dinamik basit kesme deney analizi grafikleri (%10 siltli kum,  $D_r=41.8$ ,  $\sigma_{vc}=50$  kPa,  $CSR=0.1$ ).

Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'daki grafikler incelendiğinde manuel yöntemle yapılan deneyin analiz grafiklerinde aksenal kaymalar dikkat çekmektedir. Bu durum numunenin simetrik bir şekilde depozüsyonunun önemini anlatmaktadır. Hem numunenin simetrik bir şekilde depozüsyonunun gerekliliği hem de numunenin örselenmesinden dolayı olması gerekenden daha yüksek göreceli sıkılığa sahip

numuneler elde edilmesi ve dolayısıyla gevşek numune elde edilememesi otomatik yöntemin manuel yöntemle göre avantajlı olduğunu ve bu tez kapsamında geliştirilen otomatik kuru huni yönteminin önemli bir avantajını kanıtlamaktadır.



## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Zeminlerin tekrarlı yükler altındaki davranışı geoteknik deprem mühendisliğinde merak uyandıran konuların başında gelmektedir. Kumlu zeminlerin davranışı önemli projelerin zemin etüdü programlarında arazi deneyleriyle incelenirken laboratuvar deneyleriyle de desteklenip tamamlanmaktadır. Ayrıca konunun derinine inip araştırma yapmak ve dinamik zemin parametrelerini hassas bir şekilde belirlemek için laboratuvar deneyleri yeri doldurulmaz bir şekilde ön plana çıkmaktadır.

Bu çalışmada kumlu zeminlerin sıvılaşma davranışı sabit hacim kontrollü dinamik basit kesme deney sistemi kullanılarak tamamen kuru numunelerden belirlenmiştir. Bilgisayar kontrollü sabit hacimde gerçekleştirilen bu deney sisteminde, dinamik basit kesme deneyi esnasında numune hacminin sabit kalması için gerekli olan düşey gerilme değişimi, eşdeğer drenajsız bir deneydeki aşırı boşluk suyu basıncına eşittir.  $\Delta\sigma_v = -\Delta u$ . Bu durumdan yola çıkılarak eşdeğer aşırı boşluk suyu basınçları hesaplanabilmekte ve kuru numunelerle dinamik basit kesme deneyleri gerçekleştirilebilmektedir. Çalışma kapsamında kuru numunelerle gerçekleştirilen deneyler, doymuş numunelerle yapılmış olan deneylerle karşılaştırılmış temiz kum ve %10 silt içerikli siltli kum numunelerinde kuru ve doymuş durumda aynı sonuçların bulunduğu tespit edilmiştir.

Temiz kum ve siltli kum numunelerinde sıvılaşma davranışı üç farklı çevrimsel kayma gerilmesi oranında (CSR=0.12, 0.1, 0.08) ve 50 kPa altında konsolide edilerek incelenmiştir. Yapılan 145 deney neticesinde, her üç CSR değeri için hem temiz hem de siltli kum numunelerinde sıvılaşma için gereken çevrim sayısı ( $N_L$ ) ile göreceli sıklık arasında üstel bir ilişki olduğu çizdirilen grafiklerde açıkça gözlemlenmiş ve söz konusu ilişkinin denklemi verilmiştir (Denklem 4.1).

Hem temiz hem de siltli kum için  $D_r =$  %30, %40 ve %50 olacak şekilde sabit bir göreceli sıklık değeri referans alınarak yapılan incelemelerde çevrimsel kayma gerilmesi oranı azaldıkça sıvılaşma direncinin arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum literatürde yapılmış olan çalışmalarla uyusmaktadır.

Göreceli sıklıktaki değişimin ( $\Delta D_r$ ) sıvılaşma çevrim sayısındaki artışa etkisi ( $\Delta N_L$ ) CSR düştükçe artmıştır. Bu eğilim, sahadaki davranış açısından düşünüldüğünde örneğin zemin iyileştirmesi ile göreceli sıklığı ( $\Delta D_r$ ) miktarında arttırılmış olan bir kum tabakasının sıvılaşma direncindeki artış sahaya etki edecek deprem yükü küçüldükçe daha belirgin hale gelecektir.

Numunelerin 15 çevrimde sıvılaştığı kayma gerilmesi oranı, çevrimsel direnç oranı (CRR) olarak adlandırılmaktadır. Temiz kum ve %10 silt içeren siltli kum için çevrimsel direnç oranı ile göreceli sıklık arasında ikinci dereceden polinom bir ilişki bulunmuş ve sözkonusu ilişkinin denklemi verilmiştir. Bununla beraber saha koşullarında gerçekleşen yaşlanma, çimentolaşma, üç boyutlu statik ve dinamik yükleme koşulları gibi etkenler de sıvılaşma direncini değiştireceğinden laboratuvar ortamında oluşturulup test edilen numunelerin sahada laboratuvarda öngörülenden farklı sıvılaşma direnci gösterebileceği unutulmamalıdır.

Deneyler yapılırken oluşturulan numuneler yaklaşık 20 mm yüksekliğinde ve 64 mm çapında olmakla beraber numune hazırlama yöntemi olarak kuru huni yöntemi uygulanmıştır. Kuru huni yöntemi kumların gerilme-deformasyon davranışının, statik ve dinamik yükler altındaki tepkisinin araştırılmasında yaygın olarak kullanılan bir numune hazırlama yöntemidir. Bu numune hazırlama yönteminin klasik uygulama şekli manuel bir biçimde el yordamı ile gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada ise otomatik çekiş hunisi diye adlandırılan yeni numune oluşturma sistemi tasarlanmış ve tasarlanan bu huni ile kuru huni yönteminin otomatikleştirilmesi sağlanmıştır. Cihaz, numune hazırlanması için özel olarak üretilmiş bir alüminyum huni, zemin döküş yüksekliğinin ayarlanması için üretilmiş herbiri 35 mm yüksekliğinde 6 aparat ve hunin farklı hızlarda yukarı yükseltilmesini sağlayan bilgisayar kontrollü bir panelden oluşmaktadır. Dizayn edilen bu sistem ile numune hazırlama yönteminin otomatikleştirilmesi sayesinde kuru huni yönteminde kontrol edilemeyen huni çekiş hızı, el titremesinden kaynaklanan çekiş sırasında huninin sarsılması gibi deney sonuçlarını olumsuz etkileyen birçok durum giderilebilmiştir.

Manuel ve otomatik kuru huni yöntemiyle hazırlanan temiz ve siltli kum numunelerinin deney sonuçları incelendiğinde huni çekiş hızı ile göreceli sıklık arasında logaritmik bir ilişki olduğu bulunmuş ve huni çekiş hızı ile göreceli sıklık arasındaki ilişkiyi gösteren bir denklem önerilmiştir. Deneyde kullanılan zemin çeşidi, zemin döküş yüksekliği ve numune hazırlama yönteminin otomatik ve manuel

olması durumuna göre denklemde yer alan E ve F katsayıları belirlenmiştir. Bununla birlikte uygulanan efektif düşey gerilme değeri ve huninin boyutları gibi faktörlerinde söz konusu E ve F katsayılarını etkileyebileceği unutulmamalıdır.

Zemin döküş yüksekliğinin göreceli sıklığa etkisinin değerlendirilebilmesi için huninin yüksekliğini ayarlayabileceğimiz aparatlar farklı sayılarda kullanılarak çalışılmıştır. Elde edilen sonuçla huninin yüksekliği yani zemin döküş yüksekliği arttıkça göreceli sıklık değerinin yükseldiği tespit edilmiştir. Bu durum depozisyon sürecinin huninin çekilmesinden çok daha önce başladığını gösteren ilginç ve ilgi çekici bir durumdur. Başka bir deyişle ilk huni hareketinden önce zeminin huniye dökülmesiyle beraber depozisyon sürecinde aslında başlamış olduğu anlaşılmaktadır. Zeminin huniye döküldüğü yüksekliğin yani huninin alt ve üst kısmı arasındaki mesafenin numunenin yapısında farklılığa yol açtığı ve göreceli sıklığa etki ettiği açıkça ortaya konmuştur.

Manuel ve otomatik kuru huni yöntemiyle elde edilen temiz kum ve siltli kum numunelerinin sıvılaşma davranışı karşılaştırıldığında çizilen grafiklerde göreceli sıklığın artmasıyla sıvılaşma direncinin yükseldiği üstel bir eğilim gözlemlenmiştir. Hem temiz kum hem de siltli kum için çizdirilen grafiklerde otomatik ve manuel olarak oluşturulan numunelerin aynı eğilim çizgisi üzerinde olması dikkat çekmiştir.

Son olarak otomatik kuru huni yöntemiyle oluşturulan numunelerin manuel yöntemle göre daha gevşek olarak elde edildiği tespit edilmiştir. Numune hazırlama yöntemi, deneyde kullanılan zemin çeşidi, zemin döküş yüksekliği ve huni çekiş hızı gibi faktörlerin etkisi de göz önüne alındığında göreceli sıklık değerinde %9'lara kadar varan farklılıklar göze çarpmaktadır. Otomatik kuru huni yöntemi ile manuel kuru huni yönteminde göreceli sıklık değerinin farklı olması manuel yöntemde karşılaşılan ve kontrol edilemeyen durumlardan kaynaklanmaktadır. Kontrol edilemeyen bu durumlar numunenin simetrik bir şekilde oluşturulmasını engellemekte ve tam ortada oluşup üst başlık numune üstüne yerleştiğinde tamamıyla yok olup düzleşmesi gereken bombenin yamuk bir şekilde oluşmasına sebep olmaktadır. Numunenin yamuk bir şekilde oluşturulması üstüne yerleştirilen üst başlığında yamuk durmasına sebebiyet vermektedir. Üst başlık yamuk olduğunda piston üst başlığa rahat bir şekilde bağlanamadığından pistonu bağlarken istemeyerek yapılan el baskısı numunenin örselenmesine ve göreceli sıklık değerinin olması gerekenden daha büyük değerlere ulaşmasına neden olmaktadır. Böylelikle gevşek

numunelerin elde edilmesi zorlaşmaktadır. Ayrıca deney sonuçlarında çizdirilen analiz grafikleri incelendiğinde manuel yöntemle yapılan deneylerin grafiklerinde aksel kaymalar dikkat çekicidir. Numunenin yamuk bir şekilde oluşturulması deney sonuçlarını da etkilemektedir. Tüm bu durumlar otomatik yöntemin manuel yönteme göre avantajlı olduğunu ve otomatik huninin önemli avantajlar sağladığını kanıtlamaktadır.





## KAYNAKÇA

- Akın, O.** (2014). *Influence of plasticity and fines content on cyclic behavior of sands*. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fenbilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Akın, O., Monkul, M.M., Eseller-Bayat, E.** (2013). Basit kesme deneyi için homojen veya suya doymun numune hazırlama yöntemleri, 5<sup>th</sup> Geoteknik Sempozyumu, Adana, Türkiye.
- ASTM** (2016). *Standard Test Method for Consolidated Undrained Direct Simple Shear Testing of Cohesive Soils* (ASTM 6528-07). ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007.
- Bahadori, H., Ghalandarzadeh, A., Towhata, I.** (2008). Effect of non plastic silt on the anisotropic behavior of sand. *Soils and Foundations* (Vol. 48, No.4, pp. 531–545).
- Bjerrum, L., Landva, A.** (1966). Direct simple shear tests on a Norwegian quick clay, *Geotechnique*, (Vol. 16 No,1, pp. 1–20).
- Ulker, B.C** (2004). *Siltli ve killi zeminlerin tekrarlı yükler altındaki davranışı*. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fenbilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Chang, W.J. and Hong, M.L.** (2008). Effects of clay content on liquefaction characteristics of gap-graded clayey sands. *Soils and foundations*. (Vol. 48, No.1, pp. 101–114).
- Clayton, C.R.I., Bica, A.V.D. and Moore, S.R.**(1994). A resin impregnation technique for the determination of the density variations in completed specimens of dry cohesionless soil, *Geotechnique* (Vol.44,No.1,pp:165-173)
- Das, M.B.,** (1993). *Principles of Soil Dynamics*, PWS-KENT Publishing Company. Boston.
- Dyvik, R. Berre, T. Lacasse, S. and Raadim, B.** (1987). Comparison of truly undrained and constant volume direct simple shear tests. *Geotechnique*, 37(1),3-10.
- Erken, A., Ozay, R., Kaya, Z., Ulker, B.C. and Elibol, B.** (2004). Depremler sırasında zeminlerin sıvılaşması ve taşıma gücü kayıpları. *Türkiye MÜhendislik Haberleri*. Sayı 431-2004/3
- Erman, A.** (2012). *Tekrarlı yükler altında kohezyonlu zeminlerin davranışı*. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fenbilimleri Enstitüsü, İstanbul

- Eseller-Bayat, E., Monkul, M.M., Akın, O., and Yenigun, S.** (2017). The coupled influence of relative density, CSR, Plasticity and content of fines on cyclic liquefaction resistance of sands. *Journal of Earthquake Engineering*. DOI:10.1080/13632469.2017.1342297
- Eseller-Bayat, E., Monkul, M.M., Akın, O., and Yenigun, S.** (2018). Evaluation of the effect on relative density on liquefaction assessment of sands with plastic and non-plastic fines, *5<sup>th</sup> Geotechnical Engineering and Soil Dynamics V2018 Conference*, Austin, USA.
- Finn W.D. L., Byrne P. M., Martin G.R.** (1976). Seismic response and liquefaction of sands. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 102(8), 841–856.
- Finn, W. D. L., Pickering, D. J., and Bransby, P. L.** (1971). Sand Liquefaction in Triaxial and Simple Shear Tests. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 97, No. SM4, pp. 639-659.
- Finn, W and Vaid, Y.** (1977). Liquefaction potential from drained constant volume cyclic simple shear tests, *Proceedings of the 6<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, New Delhi, India, pp.10-14.
- Fonseca, A. V., Soares, M., Fourie, A.B.** (2015). Cyclic DSS Tests for the Evaluation of Stress Densification Effects in Liquefaction Assessment. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 75, 98–111.
- Gilbert, P.A. and Marcuson, W.F.**(1988).Density variation in specimens subjected to cyclic and monotonic loads. *Journal of Geotechnical Engineering*, (Vol.114,No.1,pp:1-20).
- Hazirbaba, K.** (2005). *Pore Pressure Generation Characteristics of Sands and Silty Sands: A Strain Approach*. (Doctoral dissertation). The University of Texas at Austin, TEXAS.
- Hoeg, K., Dyvik, R., and Sandbaekken, G.** (2000).Strength of undisturbed versus reconsituted silt and silty sand specimens, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. (Vol.126,No.7,pp:606-617)
- Ishihara K.** (1984).Post-earthquake failure of a tailings dam due to liquefaction of the pond deposit, *Proceedings of International Conference of Case Histories in Geotechnical Engineering*, University of Missouri, St. Louis, (Vol.3, 1129-1143).
- Ishihara K.** (1985). Stability of natural deposits during earthquakes. *Proceedings of 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, (Vol.1, 321-376).
- Ishihara, K., Yoshmine, M.**(1992).Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes, *Soils and Foundations*, 32: 173-188.
- Ishihara, K.** (1993). Liquefaction and flow failure during earthquakes. *Geotechnique*. (Vol. 43, No.3, pp. 351–415).
- Ishihara, K.** (1996). *Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics*, 1<sup>st</sup> Ed., Oxford, Clarendon Press, 350 pp.

- Ishihara, K., Yamazaki F.** (1980). Cyclic simple shear tests on saturated sand in multi-directional loading. Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering. (Vol. 20, No.1, pp. 45–59).
- Kramer, S.L.** (1996). Geotechnical Earthquake Engineering. *Prentice Hall, Inc.*, Upper Saddle River, New Jersey, pp.653.
- Ladd, R.S.**(1974).Specimen preparation and liquefaction of sands, *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, (Vol. 100, No.10 pp: 1180-1184).
- Monkul, M.M. and Yamamuro, J.A.** (2010). Influence of densification method on some aspects of undrained silty sand behavior, *5<sup>th</sup> International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, San Diego, California
- Monkul, M.M. and Yamamuro, J.A.** (2011). Influence of silt size and content on liquefaction behavior of sands. *Canadian Geotechnical Journal*. (Vol. 48, No.6, pp. 931–942).
- Monkul, M.M., Gultekin, C., Gulver, M., Akın, O., Eseller-Bayat, E.** (2015). “Estimation of liquefaction potential from dry and saturated sandy soils under drained constant volume cyclic simple shear loading”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Elsevier, 75, 27-36.
- Monkul, M.M., Etminan E., Senol, A.** (2016). “Influence of coefficient of uniformity and base sand gradation on static liquefaction of loose sands with silt”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Elsevier, 89, 185-197
- Monkul, M.M., Yenigun, S., Eseller-Bayat, E.** (2017). Kuru kum numunelerinin sismik sıvılaşma potansiyelinin dinamik basit kesme deneyinden belirlenmesi, *7<sup>th</sup> Uluslararası Geoteknik Sempozyumu*, İstanbul, Türkiye
- Monkul, M.M., Dacic, A.** (2017). Effect of grain size distribution on stress-strain behavior of lunar soil simulants, *Advances in Space Research*. Elsevier, 60, 636- 651.
- Monkul, M.M., Etminan , E., Senol, A.** (2017). “Coupled influence of content, gradation and shape characteristics of silts on static liquefaction of loose silty sands”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Elsevier, 101, 12-26.
- Mulilis, J.P., Chan, C.K., Seed, H.B.** (1975).The effects of method of sample preparation on the cyclic stress-strain behavior of sands, Report EERC 75-18, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- Ozaydın, K.** (2007). Zeminlerde sıvılaşma, *6<sup>th</sup> Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, İstanbul, Türkiye
- Ozmen, C.A** (2004). *Zeminlerin sıvılaşabilirliğine ince dane oranı ve plastisitenin etkisi.* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fenbilimleri Enstitüsü, İstanbul

- Peacock, W.H. and Seed, H.B.** (1968). Sand liquefaction under cyclic loading simple shear conditions. *Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, (Vol. 94, No.3, pp. 689–708).
- Polito, C.P. and Martin II, J.R.** (2001). Effect of nonplastic fines on the liquefaction resistance of sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, (Vol. 127, No.5, pp. 408–415).
- Porcino, D., Caridi, G., Malara, M., and Morabito, E.** (2006). An automated control system for undrained monotonic and cyclic simple shear tests, *GeoCongress 2006: Geotechnical Engineering in the information Technology Age*.
- Porcino, D., Caridi, G.** (2007). Pre- and post,liquefaction response of sand in cyclic simple shear, *Dynamic Response and Soil Properties, ASCE*.
- Pyke, R.M., Seed, H.B. and Chan, C.K.**(1975).Settlement of sands under multi-directional shaking, *Proc,ASCE*, (Vol.101,pp:370-398)
- Rad, N.S. and Tumay, M.T.** (1987). Factors affecting and specimen preparation by raining. *Geotechnical Testing Journal*, (Vol.10,No.1,pp:31-57).
- Seed, H.B and Lee, K.L.** (1965). Studies of liquefaction of sands under cyclic loading conditions, Report TE-65-65, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley.
- Seed, H.B., and Idriss, I.M.**(1971).Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division,ASCE*, (Vol.97,No. 9, pp. 1249-1273).
- Seed, H.B.** (1987). Design problems in soil liquefaction, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, (Vol.113, No. 8, pp.827-845.)
- Sivathayalan, S., Ha, D.** (2011). Effect of static shear stress on the cyclic resistance of sands in simple shear loading. *Canadian Geotechnical Journal*, 48, 1471–1484.
- Tatsauka, F., Ochi, K., Fujii, S. and Okamoto, M.** (1986).Cyclic undrained triaxial and torsional shear strength of sands for different sample preparation methods, *Soil and Foundations*, (Vol.26,No.3,pp:23-41)
- Ural, N.** (2011). Zemin dinamiği deneylerinde bilgisayar kontrollü sistemlerin kullanılması, *6<sup>th</sup> International Advanced Technologies Symposium*, Elazığ, Türkiye
- Vaid, Y.P. and Negussey, D.** (1984). Relative density of air and water pluviated sand. *Soils and Foundations*, (Vol.24,No.2,pp:101-105)
- Vaid, Y.P. and Sivathayalan, S.** (1996). Static and cyclic liquefaction potential of fraser delta sand in simple shear and triaxial tests . *Canadian Geotechnical Journal*. 33. 281-289.
- Vaid, Y.P. and Sivathayalan, D.S. and Stedman, D.** (1999).Influence of specimen reconsitituting method on the undrained response of sand. *Geotechnical Testing Journal*. (Vol.22,No.3,pp:187-195)
- Wahyudi, S.; Koseki, J.;Sato,T.; Chiaro,G.**(2016). Multiple-liquefaction behavior of sand in cycle simple stacked-ring shear tests, *International Journal of Geomechanics*, pp:1-10

- Wijewickreme, D., Sriskandakumar, S., Byrne, P.** (2005). Cyclic loading response of loose air-pluviated Fraser River sand for validation of numerical models simulating centrifuge tests. *Canadian Geotechnical Journal*, 42, 550-561
- Wood, F.M., Yamamuro, J.A., Lade P.V.** (2008). Effect of depositional method on microstructure of silty sand. *Canadian Geotechnical Journal*, 45, 1538-1555
- Yamamuro, J.A. and Lade, P.V.** (1997). Static liquefaction of very loose sands. *Canadian Geotechnical Journal*. 34, 905-917
- Yamamuro, J.A. and Wood, F.M.** (2004). Effect of depositional method on the undrained behavior and microstructure of sand with silt. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 24, 751-760
- Yamamuro, J.A., Wood, F.M., Lade P.V.** (2008). Effect of depositional method on microstructure of silty sand. *Canadian Geotechnical Journal*, 45, 1538-1555
- Youd, T.L., Idriss, I.M., (2001).** Liquefaction Resistance of Soils, *Journal of Geotechnical Geoenvironmental Engineering*, (Vol.127, No.10, pp: 817-833).
- Yuksel, Z.T.** (2010). *Kumların dinamik davranışının basit kesme deneyleri ile incelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Zehtab, K.H.** (2010). *An assessment of the dynamic properties of Adapazarı soils by cyclic direct simple shear tests*. (Doktora Tezi). Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara
- Zlatovic, S. and Ishihara, K.** (1995). On the influence of non-plastic fines on residual strength., *1<sup>st</sup> International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Tokyo pp.239-244.



## ÖZGEÇMİŞ

**Adı Soyadı** : Şenay YENİGÜN  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : İstanbul, 1988  
**E-Mail** : syenigun@dogus.edu.tr

### ÖĞRENİM DURUMU :

- **Lisans** : 2012, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2015-2018, Yeditepe Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Araştırma Görevlisi
- 2017-2018, Doğu Üniversitesi, İnşaat Teknolojisi Bölümü, Öğretim Görevlisi

### YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Monkul M.M., Yenigun S.**, (2018). Otomatik Huni Kontrol Cihazı başlıklı Başvuru Numarası: 2018/07765, Dosya Numarası: 25418.79 olan buluşun patent başvurusu yapılmıştır.
- **Eseller-Bayat E., Monkul M.M., Akın O., Yenigun S.**, (2017). The Coupled Influence of Relative Density, CSR, Plasticity and Content of Fines On Cyclic Liquefaction Resistance of Sands, Journal of Earthquake Engineering, Taylor & Francis, <http://dx.doi.org/10.1080/13632469.2017.1342297>.
- **Monkul M.M.,Yenigun S., Eseller-Bayat E.**, (2017). Kuru Kum Numunelerinin Sismik Sıvılaşma Potansiyelinin Dinamik Basit Kesme Deneyinden Belirlenmesi, 7. Uluslararası Katılımlı Geoteknik Sempozyumu-İTÜ, Kasım 22-24, 2017 İstanbul, Türkiye.
- **Eseller-Bayat E., Monkul M.M., Akın O., Yenigun S.**, (2018). Evaluation of the Effect of Relative Density on Liquefaction Assesment of Sands with Plastic and Non-Plastic Fines, Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics Conference, June 10-13, 2018 Austin Texas, USA.
- **Yenigun S., Monkul M.M., Eseller-Bayat E.**, (2018). Kuru Huni Yöntemiyle Geniş Aralıkta Göreceli Sıklık Değerlerinin Elde Edilmesi, Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği 17. Ulusal Kongresi, Eylül 26-28, 2018 İstanbul, Türkiye (değerlendirme aşamasında)