

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**SIVILAŞMA ŞİDDET PARAMETRELERİ İLE BİNA DEPREM  
PERFORMANSI İLİŞKİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ VE  
DENEYSEL ZEMİN İYİLEŞTİRME UYGULAMASI**

**DOKTORA TEZİ**

**YASEMİN MANAV**

**DENİZLİ, NİSAN - 2019**

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**SIVILAŞMA ŞİDDET PARAMETRELERİ İLE BİNA DEPREM  
PERFORMANSI İLİŞKİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ VE  
DENEYSEL ZEMİN İYİLEŞTİRME UYGULAMASI**

**DOKTORA TEZİ**

**YASEMİN MANAV**

**DENİZLİ, NİSAN - 2019**

## KABUL VE ONAY SAYFASI

YASEMİN MANAV tarafından hazırlanan “SIVILAŞMA ŞİDDET PARAMETRELERİ İLE BİNA DEPREM PERFORMANSI İLİŞKİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ VE DENEYSEL ZEMİN İYİLEŞTİRME UYGULAMASI” adlı tez çalışmasının 19.04.2019 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman  
Prof. Dr. Mehmet İNEL



Üye  
Prof. Dr. Halil KUMSAR  
Pamukkale Üniversitesi



Üye  
Prof. Dr. Selçuk TOPRAK  
Gebze Teknik Üniversitesi



Üye  
Doç. Dr. Baki ÖZTÜRK  
Hacettepe Üniversitesi



Üye  
Dr. Öğr. Üyesi Engin NACAROĞLU  
Pamukkale Üniversitesi



Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun  
22/05/2019 tarih ve 22/08-b sayılı kararıyla onaylanmıştır.



Prof. Dr. Uğur YÜCEL

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

**Bu tez çalışması Pamukkale Üniversitesi BAP birimi tarafından  
2012FBE001 ve 2014HZL003 nolu projeler ile desteklenmiştir.**

**Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.**



**YASEMİN MANAV**

## ÖZET

**SIVILAŞMA ŞİDDET PARAMETRELERİ İLE BİNA DEPREM  
PERFORMANSI İLİŞKİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ VE  
DENEYSSEL ZEMİN İYİLEŞTİRME UYGULAMASI  
DOKTORA TEZİ  
YASEMİN MANAV  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. MEHMET İNEL)  
DENİZLİ, NİSAN-2019**

Depremlerde karşılaşılan zemin kaynaklı önemli sorunlardan biri olan zemin sıvılaşması, suya doygun kumlu, siltli ve kil oranı az olan zeminlerde karşımıza çıkmakta ve yapılarda ciddi zararlara neden olmaktadır. Bu çalışmada sıvılaşma şiddet parametreleri ile bina deprem performansı arasındaki ilişkiler irdelenmiş ve bu amaçla bilgi karar destek sistemi yazılmıştır. Ayrıca Denizli yerinde zemin örnekleri üzerinde deneysel zemin iyileştirme uygulaması gerçekleştirilmiştir.

Tez kapsamında 2011 Tohoku, Japonya depreminde Itako şehri Hinode bölgesinde deprem sonrası tespit edilen hasarlar ve yapılan 143 adet CPT sondaj verileri değerlendirilmiştir. Analizlerde Japonya, Amerika ve dünyanın diğer bölgelerinde mühendislik uygulamalarında en yaygın olarak kullanılan dört yöntem kullanılmıştır. Bunlar Robertson ve Wride (1998), Idriss ve Boulanger (2008), Boulanger ve Idriss (2014), Japonya Mimarlık Enstitüsü (1988; 2001) tarafından geliştirilen Japonya Mimarlık Enstitüsü (AIJ) yöntemleridir. Verilerle sıvılaşma potansiyeli tespiti yapılmış ve yapılan çalışma sıvılaşma tahminlerinin mevcut hasarlarla uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen hesaplamalar sonucundaki sıvılaşma tahminleri ile hasarlar örtüşmüştür. Sıvılaşma potansiyel indeksi (LPI) ve sıvılaşma şiddeti katsayısı (LSN) değerleri değerlendirmede kullanılan dört sıvılaşma tetikleme yöntemlerinin bazı avantajları ve zayıf yönleri olduğu görülmüş ancak bütünlükleri ile birlikte kullanıldıklarında deprem sonrası gözlemlenen yapı hasarları ile LPI ve LSN sıvılaşma şiddet parametreleri arasında korelasyon olduğu gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada ayrıca sıvılaşmaya karşı zemin iyileştirmesi yöntemlerinden koloidal silika ile zemin iyileştirmesi üzerine bir laboratuvar çalışması yapılmıştır. Gevşek, orta ve sıkı (%40, %60 ve %80) zemini temsil etmek üzere hazırlanan numuneler üzerinde deneyler yapılmıştır. İyileştirilmiş numuneler farklı kür sürelerine (7 gün ve 28 gün) tabi tutulmuştur. Statik üç eksenli yanı sıra dinamik üç eksenli kullanılarak modül deneyleri yapılmıştır. Modül deneylerinde rölatif sıkılık %40 ve %60 kullanılmıştır. Deneyler sonucunda dayanımda ve rijitlikte gözlenen artışlar sunulmuş ve karşılaştırılmıştır.

**ANAHTAR KELİMELER:** Sıvılaşma, LPI, LSN, Sıvılaşmaya Karşı İyileştirme, Koloidal Silika, Itako Şehri (Japonya)

## **ABSTRACT**

### **EVALUATION OF THE RELATIONSHIPS BETWEEN LIQUEFACTION SEVERITY PARAMETERS AND BUILDING SEISMIC PERFORMANCE AND EXPERIMENTAL GROUND IMPROVEMENT APPLICATION**

**PH. D. THESIS**

**YASEMIN MANAV**

**PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE**

**CIVIL ENGINEERING**

**(SUPERVISOR: PROF. DR. MEHMET İNEL)**

**DENIZLI, APRIL-2019**

Soil liquefaction from ground-based damage types encountered in earthquakes is one of the types of damage frequently encountered in sandy soils and fines content soils. In this study, information-decision support software was written to determine the liquefaction potential of soils.

In this study, building damages observed in Hinode region of the city of Itako after the 2011 Tohoku, Japan earthquake and data from 143 CPT sounding conducted in the same area were used. The four of the most commonly used methodologies in engineering applications in Japan, USA and other parts of the world were used herein. These are Robertson and Wride (1998), Idriss and Boulanger (2008), Boulanger and Idriss (2014), and Japan Architecture Institute (AIJ) methodology, developed by the Japan Institute of Architecture (1988; 2001). The liquefaction potential was calculated and it was observed that the liquefaction estimates were consistent with the existing damage. The estimated liquefaction predictions are actually similar to occurred damages in the region. The liquefaction triggering methods used by the LPI and LSN values were found to have some advantages and weaknesses, but when they were used with their integrity, there were correlations between the observed structural damage and the liquefaction intensity parameters LPI and LSN.

Also in this study, a laboratory study was carried out on ground improvement with colloidal silica, which is one of the ground improvement methods against liquefaction. Tests were performed on samples prepared to represent loose, medium and dense (40%, 60% and 80%) ground. The improved samples were subjected to different curing times (7 and 28 days). Static triaxial and dynamic three-axis, using module experiments, were performed. Relative densities of 40% and 60% were used in module tests. As a result of the experiments, the observed changes in strength and stiffness were presented and compared.

**KEYWORDS: Liquefaction, LPI, LSN, Liquefaction Improvement, Collaidal Silica, Itako City (Japan)**

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>v</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b> .....	<b>vii</b>
<b>KISALTMALAR</b> .....	<b>viii</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>xi</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı .....	3
1.2 Organizasyon .....	4
<b>2. SIVILAŞMA ANALİZ YÖNTEMLERİ</b> .....	<b>5</b>
2.1 Deterministik Yöntemlerle Sıvılaşma Olasılığının Belirlenmesi.....	9
2.1.1 SPT Değerlendirme Yöntemleri .....	10
2.1.1.1 Robertson ve Wride (1998) SPT Değerlendirmesi .....	10
2.1.1.1.1 CSR Değerinin Bulunması .....	13
2.1.1.2 Idriss ve Boulanger (2006) SPT Değerlendirmesi .....	13
2.1.2 CPT Değerlendirme Yöntemleri.....	16
2.1.2.1 Robertson ve Wride (1998) CPT Değerlendirmesi .....	17
2.1.2.2 Idriss ve Boulanger (2006) CPT Değerlendirmesi .....	20
2.1.2.3 Idriss ve Boulanger (2008) CPT Dğerlendirmesi .....	21
2.1.2.4 Boulanger ve Idriss (2014) CPT Değerlendirmesi .....	21
2.2 Olasılıksal Yöntemlerle Sıvılaşma Olasılığının Belirlenmesi .....	22
2.2.1 Toprak ve diğ. (1999) Yaklaşımı.....	22
2.2.2 Çetin ve diğ. (2002) Yaklaşımı .....	23
2.2.3 Boulanger ve Idriss (2014) SPT Değerledirmesi.....	24
2.3 Sıvılaşma Şiddet Parametreleri .....	25
2.3.1 Sıvılaşma Potansiyel İndeksi (LPI) Yöntemi .....	25
2.3.2 Sıvılaşma Şiddet Katsayısı (LSN) Yöntemi .....	27
2.1 Program Arayüzü .....	29
<b>3. 2011 TOHOKU JAPONYA DEPREMİNDE ITAKO ŞEHRİNİN BİNA STOĞUNUN SIVILAŞMA ŞİDDET PAREMETRELERİYLE DEĞERLENDİRİLMESİ</b> .....	<b>32</b>
3.1 Çalışma Bölgesi ve Verileri .....	36
3.2 Sıvılaşma Analizi .....	43
3.3 Sıvılaşma Şiddetleri ve Bina Hasar İlişkileri .....	45
3.4 Değerlendirme.....	66
<b>4. SIVILAŞMAYA KARŞI İYİLEŞTİRMEDE LABORATUVAR ÇALIŞMASI: KOLLOİDAL SİLİKA ENJEKSİYONU</b> .....	<b>69</b>
4.1 Zemin Enjeksiyonu ve Kolloidal Silikanın Literatürdeki Yeri .....	72
4.2 Deneylerde Kullanılacak Malzemeler Üzerinde Çalışmalar.....	76
4.2.1 Kürün Belirlenmesi .....	76
4.2.2 Jelleşme Süresi Tayini .....	77
4.2.3 Kullanılacak Kum Özelliklerinin Belirlenmesi .....	78
4.2.3.1 Özgül Ağırılık Deneyi .....	78
4.2.3.2 Elek Analizi .....	80



4.3	Statik ve Dinamik Üç Eksenli Deney Yöntemleri .....	81
4.4	Deney Sonuçları .....	88
4.4.1	Elastisite Modülü Hesaplanması .....	95
4.5	DeneySEL Çalışmanın Değerlendirmesi .....	98
<b>5.</b>	<b>SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>100</b>
5.1	Çalışma Sonuçları .....	100
5.2	Daha Sonra Yapılacak Çalışmalar İle İlgili Öneriler .....	101
<b>6.</b>	<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>103</b>
<b>7.</b>	<b>EKLER.....</b>	<b>116</b>
	EK A: Yazılan Programın Delphi Yazılım Dilinde Kodu .....	116
<b>8.</b>	<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>153</b>

# ŞEKİL LİSTESİ

## Sayfa

Şekil 2.1: 1964 Niigata depremi sonrası sıvılaşma etkisiyle zarar gören yapılar (Japan National Committee on Earthquake Engineering 1965). ....	5
Şekil 2.2: 1999 Kocaeli (İzmit) depremi sırasında Adapazarı, Türkiye. Sıvılaşma etkisi ile hasar görmüş yapı (Manav ve diğ. 2019). .....	6
Şekil 2.3: Christchurch şehrinde 2010 yılında Canterbury depremi sonrası sıvılaşmanın neden olduğu yapılar ve arazide görülen hasarlar (Van Ballegooy ve diğ. 2014 <sup>b</sup> ) .....	7
Şekil 2.4: Deprem etkisi altında zemin sıvılaşma süreci .....	8
Şekil 2.5: Gerilme azaltma katsayısının grafiği (Robertson and Wride, 1998)	13
Şekil 2.6: İnce dane oranı- $\Delta(N_1)_{60}$ değişimi .....	16
Şekil 2.7: CPT hesaplama akış diyagramı .....	19
Şekil 2.8: Yüksek ince dane oranı içeriğine sahip olan uyumsuz zeminler için saha vaka geçmişlerinin karşılaştırılması ve $I_c = 2.59$ (görünür $FC = \% 35$ ) olan zemin için Robertson ve Wride (1998) tarafından önerilen eğri .....	20
Şekil 2.9: CRR ve $(q_{cIN})_{cs}$ 'ye bağlı $P_L = \%15$ , $\%50$ ve $\%85$ eğrileri (Boulanger ve Idriss 2014) .....	25
Şekil 2.10: Arazi hasar gözlemleriyle LSN arasındaki ilişkiler (Tonkin ve Taylor 2015, Van Ballegooy ve diğ. 2015 <sup>b</sup> ) .....	28
Şekil 2.11: Bilgi tabanlı karar-destek sistemi arayüzü .....	29
Şekil 2.12: Excel dosyasından CPT verilerinin aktarılması .....	30
Şekil 2.13: Verilerin arayüzde girilmesi, eklenmesi ve uygun CPT sütunlarının seçilmesi.....	30
Şekil 2.14: Hesaplama verilerinin excell dosyası olarak çıktı halinde sunulması .....	31
Şekil 3.1: Çalışma Alanı Itako Şehri ve Hinode Bölgesi.....	38
Şekil 3.2: Hinode bölgesinde seçilen üç kesit için zemin profili.....	41
Şekil 3.3: Hinode bölgesi bina hasarları .....	42
Şekil 3.4: a) Anakaya ve b) Yüzeyde, CHB013 konumundaki K-Net ivme-zaman kayıtları (Lenart ve diğ. 2012).....	43
Şekil 3.5: CPT bölgelerinde sıvılaşma değerlendirmesi.....	45
Şekil 3.6: Çalışma alanında LPI dağılımı üzerine eklenen bina hasarları .....	52
Şekil 3.7: Tüm bina hasar seviyeleri için kümülatif dağılımlar.....	53
Şekil 3.8: Farklı yöntemlerle hesaplanan LPI değerlerinin hasar seviyelerine göre kutu grafiklerle gösterimi .....	54
Şekil 3.9: LPI'ya göre bina hasarlarının kümülatif dağılımları.....	56
Şekil 3.10: Çalışma alanındaki LSN dağılımına eklenmiş bina hasarları.....	63
Şekil 3.11: Farklı yöntemlerle hesaplanan LSN değerlerinin hasar seviyelerine göre kutu grafiklerle gösterimi .....	64
Şekil 3.12: LSN'ye göre bina hasarlarının kümülatif dağılımları .....	66
Şekil 4.1: Değişik kimyasallar ile değişik sıcaklıklarda oluşacak nem yüzdeleri .....	76
Şekil 4.2: Jelleşme sürelerinin kontrolü.....	77
Şekil 4.3: Farklı oranlarda kimyasal enjekte edilen basit kimyasal iyileştirmelerden görüntüler.....	78

Şekil 4.4: Kullanılan kimyasalın katalog jelleşme süresi grafiği (Dupont 1997)	78
Şekil 4.5: Elek Analizi Sonuçları.....	81
Şekil 4.6: Statik üç eksenli basınç aleti deney düzeneği .....	83
Şekil 4.7: Dinamik üç eksenli basınç aleti deney düzeneği.....	84
Şekil 4.8: Temiz kum numune deney akış diyagramı.....	85
Şekil 4.9: İyileştirilmiş kum numune deney akış diyagramı .....	86
Şekil 4.10: a) Temiz kum numunesinin suya doyurulması işlemi, b) %80 röletif sıkılıkta bir numunenin koloidal silika ile iyileştirilmiş hali .....	87
Şekil 4.11: Temiz kum numunesinin deney sonrası görüntüsü .....	87
Şekil 4.12: Temiz kum numuneleri üzerinde 100 kPa çevre basıncında yapılan deney sonuçları .....	89
Şekil 4.13: İyileştirilmiş kum numuneleri üzerinde 100 kPa çevre basıncında yapılan deney sonuçları .....	91
Şekil 4.14: Temiz kum numuneleri üzerinde 300 kPa çevre basıncında yapılan deney sonuçları .....	92
Şekil 4.15: İyileştirilmiş kum numuneleri üzerinde 300 kPa çevre basıncında yapılan deney sonuçları .....	94
Şekil 4.16: Çevirim alanı kapalıyken çevirim sönüm oranı .....	95
Şekil 4.17: Çevirim alanı açıkken çevirim sönüm oranı.....	96
Şekil 4.18: DR % 40 olan numunelerin eşdeğer elastisite modülü-basit genlik aksenal deplasman-çevirim sönüm oranı grafiği .....	97
Şekil 4.19: DR % 60 olan numunelerin eşdeğer elastisite modülü-basit genlik aksenal deplasman-çevirim sönüm oranı grafiği .....	97

## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

Tablo 2.1: SPT düzeltmeleri (Robertson and Wride 1998) .....	12
Tablo 2.2: LPI Değişim Tablosu .....	26
Tablo 4.1: Zemin iyileştirme yöntemleri ( Day 2004).....	70
Tablo 4.2: Deney prosedüründe kullanılan değişkenler .....	82

## KISALTMALAR

<b>AIJ2001</b>	: Japonya Mimarlık Enstitüsü (1988; 2001) Metodu
<b>AIST</b>	: Ulusal Gelişmiş Endüstriyel Bilimler ve Teknolojiler Enstitüsü
<b>BI2014</b>	: Boulanger ve Idriss (2014) Metodu
<b>BDR</b>	: Bina Hasar Oranı
<b>CBS</b>	: Coğrafi Bilgi Sistemi
<b>CES</b>	: Canterbury Deprem Dizisi
<b>CPT</b>	: Koni Penetrasyon Testi
<b>CR</b>	: Farklı Maliyet Oranları
<b>CRR</b>	: Çevrimsel Kayma Mukavemeti Oranı
<b>CRR<sub>7.5</sub></b>	: Magnitüde 7,5 a göre Çevrimsel Kayma Mukavemeti Oranı
<b>CSR</b>	: Çevrimsel kayma gerilmesi oranı (CRR)
<b>IB2008</b>	: Idriss ve Boulanger (2008) Metodu
<b>kPa</b>	: Kilopascal
<b>LPI</b>	: Sıvılaşma potansiyeli indeksi (Liquefaction Potential Index)
<b>LSN</b>	: Sıvılaşma şiddeti katsayısı (Liquefaction Severity Number)
<b>M</b>	: Moment Magnitude
<b>MSF</b>	: Magnitüd Düzeltme Faktörü
<b>PGA</b>	: En Büyük Yer İvmesi
<b>ROC</b>	: Alıcı-İşletim-karakteristiği (receiver-operating-characteristic)
<b>RW1998</b>	: Robertson ve Wride (1998) Metodu
<b>SPT</b>	: Standart Penetrasyon Testi

## SEMBOL LİSTESİ

$\alpha$ ve $\beta$	: İnce dane oranı düzeltme sayısı
$\delta$	: İki nokta arasındaki toplam yerleşimdeki farkı
$(q_{c1N})_{cs}$	: CPT düzeltilmiş uç direnci
$(N1)_{60}$	: Ölçülen SPT darbe sayısı
$\sigma'_{Vo}$	: Pa 1 atm için referans efektif gerilme
$(N1)_{60cs}$	: İnce Dane Düzeltmesi Yapılmış SPT vuruş sayısı
$\bar{\rho}^2$	: Modifiye olasılık oranı indeksi
$I_c$	: Zemin davranış indeksi
$W$	: Ağırlık
$r_d$	: Gerilme azaltma katsayısı
$\sigma_1, \sigma_3$	: Asal gerilmeler
$\sigma_1', \sigma_3'$	: Efektif asal gerilmeler
$\sigma'_v$	: Efektif düşey gerilme
$\sigma_v$	: Toplam düşey gerilme
$A_c$	: Siltli kil
$a_{max}$	: Yüzeydeki en büyük yatay gerilme
$\beta$	: Oturmaya bağlı açılal değişim
$C_E$	: Şahmerdan enerji oranı
$C_N$	: Efektif gerilme düzeltme faktörü
$C_R$	: Tij Boyu düzeltme faktörü
$C_S$	: Numune alma yöntemi düzeltme faktörü
$\Delta(N1)_{60}$	: $(N1)_{60}$ 'ın FC ile Değişimi (%)
$\Delta W$	: Çevrim başına depolanan enerjisi değişim oranı
$\Delta L$	: Düzeltilmiş eksenel kayma miktarı
$\Delta P$	: Ölçülen eksenel yük
$D_r$	: Rölatif sıkılık
$\epsilon$	: Birim deformasyon oranı
$\epsilon_v$	: Hacimsel yoğunlaştırılmış şekil değiştirme
$e$	: Boşluk oranı
$E_{eq}$	: Elastisite modülü
$FC$	: İnce dane oranı düzeltme katsayısı
$FS$	: Sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısı
$F_s$	: Kum dolgususu
$G_s$	: Özgül ağırlık
$h$	: Çevirim sönümeleme oranı
$K_c$	: Tane özellikleri için düzeltme faktörü
$K_a$	: Statik kayma gerilmesi faktörü
$K_\sigma$	: Örtü yükü faktörü
$L$	: İki nokta arasındaki mesafe
$M$	: Kütle
$M_w$	: Moment Büyüklüğü
$N_m$	: Ölçülen SPT darbe sayısı
$P_a$	: 100 kPa değerindeki referans gerilmesi
$P_L$	: Sıvılaşma olasılığı
$Q$ ve $F$	: Zemin davranış indeksi hesap katsayısı

<b>q<sub>c1N</sub></b>	: CPT uç direnci
<b>Q<sub>L</sub></b>	: Logaritmik sıvılaşma olasılığı
<b>W</b>	: Çevrim başına depolanan enerji
<b>w(z)</b>	: Derinlik ağırlık faktörü
<b>z</b>	: Kesit boyunca derinlik

## ÖNSÖZ

Bu çalışmada zemin sıvılaşması üzerine bilgi-karar destek sistemi yazılmış ve bu programla, 2011 Japonya depremi Itako şehri verileriyle bina deprem performansı değerlendirmeleri sıvılaşma şiddet parametreleri kullanılarak yapılmış ve deneysel olarak sıvılaşmaya karşı kolloidal silika ile iyileştirme yapılmıştır. Alt yapısı olmayan bir Anadolu üniversitesinde deney düzeneğinin kullanılabilir hale gelmesi ve hedeflenen deneylerin yapılması için yeni alet edavatların alımıyla oldukça zaman kaybedilmiştir.

Doktora eğitimim boyunca öğrenimimde bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım tez danışmanım Prof. Dr. Mehmet İNEL'e ve Prof. Selçuk TOPRAK'a teşekkürlerimi sunmaktan mutluluk duyarım. Çalışmalarında benden yardımlarını esirgemeyen jüri üyelerim Prof. Dr. Halil KUMSAR, Prof. Dr. Selçuk TOPRAK, Doç. Dr. Baki ÖZTÜRK ve Doktor Öğretim Üyesi Engin NACAROĞLU'na teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca desteklerini her zaman yanımda hissettiğim Doktor Öğretim Üyesi Engin NACAROĞLU, Öğretim Görevlisi Ertuğrul KARAKAPLAN'a ve diğer beraber çalıştığım arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Son olarak hayatım boyunca bana her konuda her zaman destek olan başta annem ve babam olmak üzere aileme, bana verdiği sonsuz destek için eşim Ramazan MANAV'a ve evlatlarıma şükranlarımı sunarım.

Nisan 2019

Yasemin MANAV



Hayatıma anlam katan sevgili eşim Ramazan Manav ve evlatlarıma

# 1. GİRİŞ

Zeminlerde sıvılaşma potansiyelinin tespiti için geliştirilen deterministik ve olasılık yöntemlerin yanı sıra, sıvılaşma şiddet parametreleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada öncelikle en güncel sıvılaşma yaklaşımlarını kullanan ve farklılıkları da göz önüne alarak olasılık değerlendirmesi gerçekleştiren, böylece hata payını göz önüne çıkaran bir bilgi tabanlı karar-destek sistemi oluşturulmuştur. Böylece tasarımların daha gerçekçi olması için imkân sunulacaktır. Bilgi tabanlı karar-destek sistemi için pilot bölge kullanılarak (Japonya-Tohuko) uygulama örneği sunulmuş, böylece proje ürünlerinin şehir master plan çalışmaları için faydaları gösterilmiştir.

Sıvılaşma potansiyelinin tespit edilmesini amaçlayan farklı birçok araştırma bulunmaktadır. Bu araştırmalardan sıklıkla kullanılan ve son zamanlarda geliştirilen yöntemler delphi yazılım programlama dili kullanılarak bilgi tabanlı karar-destek sistemi yazılmıştır. Kullanılan yöntemler deterministik, olasılık yöntemler ve sıvılaşma şiddeti parametreleri altında toplanmıştır. Bu sayede bilgi tabanlı karar-destek sisteminde farklı yöntem ve yaklaşımlara kolay erişim sağlanmıştır.

Sıvılaşma potansiyel endeksi (LPI) ve sıvılaşma şiddeti katsayısı (LSN) olan iki sıvılaşma şiddeti parametreleri, sıvılaşmanın ciddiyetine ve özellikle sıvılaşma oluşumunun tahmin edilmesinden ziyade bina hasarına (açısal bozulmayla tanımlanan) bağlı olarak değerlendirilir. Bu değerlendirme işlemi sırasında, sıvılaşma tehlikesi değerlendirmelerinin doğruluğuna olan etkilerini değerlendirmek için LPI'yi ve LSN'yi hesaplamak için CPT'ye dayalı basitleştirilmiş dört adet sıvılaşma değerlendirme metodu kullanılmıştır. Kullanılan metodlar sırası ile Robertson ve Wride (1998), Idriss ve Boulanger (2008), Boulanger ve Idriss (2014) ve Japonya Mimari Enstitüsü (AIJ 1988; 2001) metodlarıdır. 2011 yılında Japonya'da meydana gelen Büyük Doğu Depremi sırasında Japonya'nın Itako kentindeki Hinode bölgesinde oluşan sıvılaşma nedenli yapı hasarları ve konik penetrasyon testi (CPT) verileri kullanılmıştır. Elde edilen tahminsel sonuçlar metodların sıvılaşma öngörüsünü doğrulamıştır. Bu çalışmada LPI ve LSN değerlendirmeleri çerçevesinde dört

basitleştirilmiş sıvılaştırma tetikleme yönteminin bazı avantajları ve zayıf yönleri olduğu gösterilmiş ancak bütünlükleri ile birlikte kullanıldıklarında yapı hasarı gözlemleri ile LPI ve LSN sıvılaştırma hassasiyet parametreleri arasında makul korelasyonlar olduğu saptanmıştır. Ayrıca, analizde kullanılan sıvılaştırma tetikleme prosedürünün farklı hasar seviyeleri tarafından temsil edildiği gibi farklı sıvılaştırma seviyelerine karşılık gelen LPI ve LSN eşiklerini etkilediği gösterilmiştir. Bu çalışma ile binalar deprem performanslarıyla ilişkilendirilmiştir.

Sıvılaştırılabilen zeminlerdeki alt ve üst yapılar depremler esnasında ciddi hasarlara maruz kalmaktadır. Son yıllarda yerleşim bölgelerine yakın gerçekleşen depremler bu gerçeği tekrar tekrar göstermiştir. Örnek olarak 2011 Christchurch, Yeni Zelanda, 1999 Kocaeli (İzmit) depremleri verilebilir. Hasarların azaltılması veya olmaması için yapılar inşa edilmeden önce ya da mevcut yapıların güçlendirilmesi esnasında bu tür zeminlerde iyileştirmeler yapılması gerekmektedir. Zemin sıvılaştırmasının olduğu yerde zemin yüzeyinde ve yapılar üzerinde farklı türde hasarlar oluşabilmektedir. Bunlar arasında en belirgin olanları; yüzeye kum ve su fıskırması, büyük oturmalar, büyük genlikli yer hareketleri, binalarda taşıma gücü kaybı, istinat duvarlarında ve rıhtımlarda hasarlar, zeminlerde akma, can damarı sistemlerinde kalıcı ve geçici hasarlar oluşmasıdır.

Sıvılaştırmadan kaynaklanan etkileri ortadan kaldırmak için zemin enjeksiyon yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Zemin iyileştirme yöntemlerinden yaygın olarak kullanılan zemin enjeksiyonu yönteminde farklı kimyasallar kullanılmaktadır (akrilamit, nörotoksik, koloidal silika vs.). Kimyasallar arasında olan koloidal silika ile iyileştirmenin en önemli avantajı kullanılan hızlandırıcı malzeme ile istenilen jelleşme süresinin ayarlanabilmesidir. Koloidal silika partikülleri çok küçük olması sebebiyle zemin boşluklarına çok rahat nüfus edebilmektedir. Bu koloidal silika ile sıvılaştırmaya karşı iyileştirmede iyi sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır. Bu çalışmada Denizli bölgesindeki bir ocaktan alınan doğal zemin numunesi üzerinde gerekli analizler yapılmış, literatürde belirtilen sıvılaştırma aralığında dane boyutları olduğu belirlenmiştir. Temiz kum deneyleri yapıldıktan sonra iyileştirme işlemi yapılan zeminler üzerinde de statik ve dinamik üç eksenli deneyleri yapılmıştır. İyileştirme yapılırken hızlandırıcı ve koloidal silika istenilen oranda ayarlanarak basınçlı enjeksiyon düzeneği ile 7 cm çapında, çapın iki katı

yüksekliğinde hazırlanan numunelere enjeksiyon yapılmıştır. Gevşek, orta ve sıkı (%40, %60 ve %80) zemini temsil etmek üzere hazırlanan numuneler üzerinde deneyler yapılmıştır. İyileştirilmiş numuneler farklı kür sürelerine (7 ve 28 gün) tabi tutulmuştur. Statik üç eksenli deney aletiyle farklı hücre basınçlarında üç eksenli basınç uygulaması yapılmıştır (100 kPa, 300 kPa, 600 kPa). Elde edilen deney sonuçları ayrıntılı olarak karşılaştırılmıştır. Statik üç eksenli deneylerin yanı sıra dinamik üç eksenli aleti kullanılarak modül deneyleri yapılmıştır. Modül deneylerinde rölatif sıkılık %40 ve %60 kullanılmıştır, iyileştirilmiş numuneler 7 günlük küre tabi tutulmuş, 100 kPa hücre basıncında test edilmiştir. Deneyler sonucunda dayanımda ve rijitlikte gözlenen artışlar sunulmuş ve karşılaştırılmıştır.

### **1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı**

Tezin birinci amacı zeminde deprem sırasında karşılaşılan önemli hasar türlerinden olan zemin sıvılaşması değerlendirme yaklaşımlarını kullanan ve farklılıkları da göz önüne alarak olasılık değerlendirmesi gerçekleştiren, böylece hata payını göz önüne çıkararak bir bilgi tabanlı karar-destek sistemi oluşturularak sıvılaşma problemine daha rahat bir pencereden bakabilmektir.

Tezin ikinci amacı son zamanlarda en çok kullanılan sıvılaşmayı tahmin yöntemlerini, yeni veri setleriyle değerlendirip birbiri ile uyumluluklarını karşılaştırıp deprem sırasında meydana gelen ve deprem öncesi tahmin edilen değerlerin uyumluluklarına bakıp literatüre katkı sağlamaktır.

Tezin üçüncü amacı ise literatürde kullanılan zemin iyileştirme yöntemlerinden kolloidal silika ile zemin enjeksiyonu yöntemini, Denizli bölgesinden elde edilen sıvılaşma aralığındaki zemin numunesi kullanılarak deneyler yapmak ve zemin sıvılaşmasına karşı iyileştirmede kullanılabilirliği üzerine literatüre katkı sağlamaktır.

## 1.2 Organizasyon

Tez çalışmasının;

1. bölümünde teze ait genel bilgiler, tezin amacı, kapsamı ve organizasyon bilgileri verilmiştir.

2. bölümünde sıvılaşma analiz yöntemleriyle ilgili ve yazılan sıvılaşma programı ile ilgili bilgiler verilmiştir.

3. bölümünde literatürde yaygın kullanılan sıvılaşma yöntemlerinden en çok kullanılanları ile 2011 Tohoku Japonya depreminde Itako şehrinin bina stoğunu değerlendirilmiş. Literatürde son yıllarda kullanılmaya hız verilen sıvılaşma şiddet parametreleriyle binaların deprem performansları değerlendirilmiştir.

4. bölümünde sıvılaşmaya karşı iyileştirme yöntemlerinden enjeksiyon yöntemi kullanılarak kolloidal silika enjeksiyonu yapılmıştır.

5. bölümünde elde edilen sonuçların genel değerlendirilmesi yapılarak gelecek çalışmalar hakkında önerilerde bulunulmuştur.

## 2. SIVILAŞMA ANALİZ YÖNTEMLERİ

Deprem sonrasında sivilaşma gözlemlenen yerlerde gömülü yapılar ve binalar üzerinde oldukça ciddi hasarların oluşması nedeniyle, sivilaşmaya sebep olan etkenler geoteknik deprem mühendisliği alanında merak konusu olmuştur. Zemin sivilaşmasının etkisinin görüldüğü örnekler; 1964 Niigata, 1920 California Calvers, 1938 Montana Fort Peck, 1948 Fukui, 1964 Alaska Anchorage, 1971 California San Fernando, 1980 Mino-Owari, 2001 Japonya, 2011 Christchurch olarak sıralanabilir. Ülkemizdeki son büyük örnek 1999 Kocaeli (İzmit) ve Düzce depremi sivilaşmalarıdır.

Araştırmacılar sivilaşmaya neden olan faktörler ve sivilaşma tahmin yöntemleri üzerine birçok çalışma yapmıştır (örn., Toprak ve Jinguuji 2006; Yasuda ve diğ. 2012; Yamaguchi ve diğ. 2012; Bray ve diğ. 2014; Toprak ve diğ. 2014; Toprak ve diğ. 2015; Toprak ve diğ. 2016). Sivilaşma sonucu zemin çökmesi, zemin taşıma gücü yetersizliği ve yanal yayılma hasarları oluşabilir. Şekil 2.1’de tüm dünyada sivilaşmanın farkına varılmasını sağlayan 1964 Niigata depremi sonrası sivilaşma nedeniyle ağır hasar gören yapılar görülmektedir (Japan National Committee on Earthquake Engineering, 1965).



**Şekil 2.1:** 1964 Niigata depremi sonrası sivilaşma etkisiyle zarar gören yapılar (Japan National Committee on Earthquake Engineering 1965).

Zemin sıvılaşması zemin yüzeyinde ve yapılarda önemli etkilere neden olur. Sıvılaşma nedeniyle meydana gelen hasarlar, özellikle son yıllarda kentsel alanların yakınında meydana gelen depremler tarafından kanıtlanmıştır. Depremler sonrası binada, yerleşim yerlerinde ve zeminlerde meydana gelen çeşitli hasarlar görülebilmektedir (Şekil 2.2 ve Şekil 2.3).



**Şekil 2.2:** 1999 Kocaeli (İzmit) depremi sırasında Adapazarı, Türkiye. Sıvılaşma etkisi ile hasar görmüş yapı (Manav ve diğ. 2019).

Sıvılaşma kavramı daneli zeminlerde artan boşluk suyu basıncı ve azalan efektif gerilme sonucunda zemin mukavemetinin azalması ve adeta sıvı gibi bir davranış sergilemesidir. Boşluk suyu basıncı artışı deprem etkisine maruz kalan granül zeminin sıkışma eğiliminden kaynaklanmaktadır. Deprem nedeniyle meydana gelen çevrimsel yüklemenin hızlı olmasından kaynaklı olarak boşluk suyu hızla dışarı çıkamamakta ve sıkışmanın etkisiyle suda basınç artışı olmaktadır. Şekil 2.4'te deprem etkisi altında zemin sıvılaşma süreci görülmektedir. Zeminde sıvılaşma geçirimli gevşek-orta sıkı siltli kumlar veya az geçirimli kaplama veya ara katmanlar nedeniyle boşluk suyunun drene olamayan kumlu çakıllı zeminlerde daha hızlı bir şekilde gerçekleştiği gözlemlenmektedir. Sıvılaşma nedeniyle zeminde yumuşamalar meydana gelmekte ve bu nedenle büyük kayma şekil değiştirmeleri görülmektedir.



a) Yerleşim yerlerine yukarıdan bakış



b) Zemin sıvılaşması



c) Zemin sıvılaşması



d) Zemin sıvılaşması



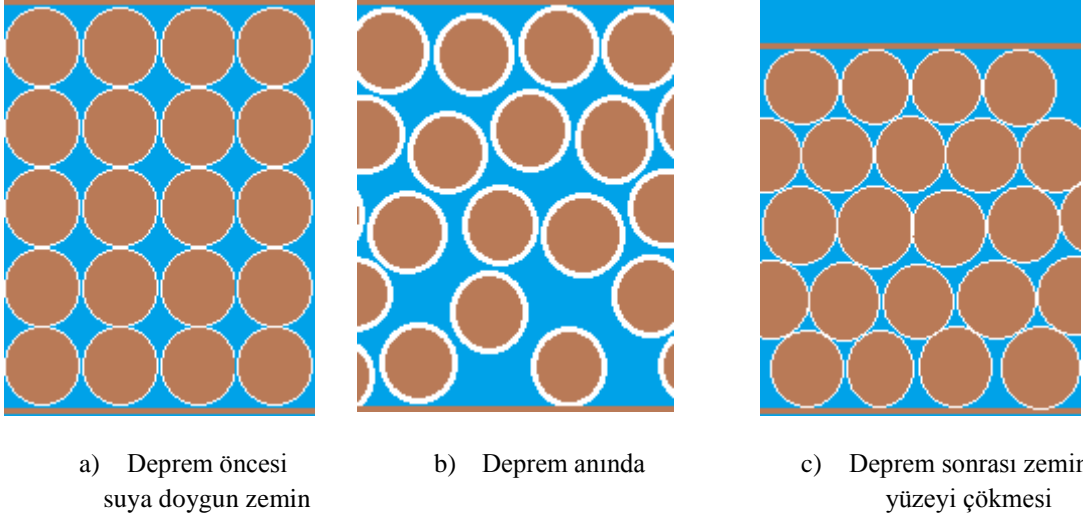
e) Yerleşim yerinde zemin sıvılaşması



f) Bina tabanında zemin sıvılaşması

**Şekil 2.3:** Christchurch şehrinde 2010 yılında Canterbury depremi sonrası sıvılaşmanın neden olduğu yapılar ve arazide görülen hasarlar (Van Ballegooy ve diğ. 2014<sup>b</sup>)





**Şekil 2.4:** Deprem etkisi altında zemin sıvılaşma süreci

Suya doymuş, gevşek kum/kumlu zeminler, tekrarlı yükler etkisinde, sıkışma ve hacim daralması eğilimi gösterirler. Bu eğilim, drenajın olmadığı koşullarda, boşluk suyu basıncını artırır. Tekrarlı yükler kum tabakası içindeki boşluk suyu basıncının artmasını desteklediği zaman, toplam normal gerilme, boşluk suyu basıncına eşit değere ulaşabilir (Das, 1983). Bu durumda, kohezyonsuz zemin kayma direnimini kaybeder ve bir sıvı gibi davranarak büyük yer değiştirmelerine maruz kalır. Böylece sıvılaşma evresine geçilmiş olur (Das, 1983).

Sıvılaşma potansiyelinin tespit edilmesi üzerine birçok çalışma ve yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemler deterministik ve olasılıksal yöntemler olmak üzere iki başlık altında toplanabilmektedir. Bu çalışmada öncelikle en güncel sıvılaşma yaklaşımlarını kullanan ve farklılıkları da göz önüne alarak olasılık değerlendirmesi gerçekleştiren, böylece hata payını göz önüne çıkaran bir bilgi tabanlı karar-destek sistemi oluşturulacaktır. Böylece tasarımların daha gerçekçi olması için imkân sunulacaktır. Bilgi tabanlı karar-destek sistemi için pilot bölge kullanılarak (Japonya-Tohoku) uygulama örneği sunulacak, böylece proje ürünlerinin şehir master plan çalışmaları için faydaları gösterilmiştir.

Sıvılaşma potansiyelinin tespit edilmesini amaçlayan farklı birçok araştırma bulunmaktadır. Bu araştırmalardan sıklıkla kullanılan ve son zamanlarda geliştirilen yöntemler delphi yazılım dili kullanılarak bilgi tabanlı karar-destek sistemi yazılmıştır. Kullanılan yöntemler deterministik, olasılıksal yöntemler ve sıvılaşma şiddeti

parametreleri altında toplanmıştır. Bu sayede bilgi tabanlı karar- destek sisteminde farklı yöntem ve yaklaşımlara kolay erişim sağlanmıştır.

## 2.1 Deterministik Yöntemlerle Sıvılaşma Olasılığının Belirlenmesi

Sıvılaşma tetikleme yöntemleri değerlendirilirken deterministik yöntemler standart penetrasyon (SPT), konik penetrometre (CPT) yöntemleri olarak iki ayrı başlık altında anlatılmıştır.

Bir depremde sismik talep, zeminin talebe dayanma yeterliliğini aşarsa o zeminde sıvılaşma tetiklemesi meydana gelmektedir. Bir deprem tarafından sıvılaşmayı tetiklemek için dayatılan sismik talep, çevrimsel kayma gerilmesi oranı (CSR) ile temsil edilmektedir. Çevrimsel kayma mukavemeti oranı (CRR) ise sismik sarsıntı ile zemin üzerinde uygulanan sıvılaşma talebine karşı zeminin yeterliliğinin bir göstergesi olup zeminin göreceli yoğunluğuna ve ince dane içeriği (FC)'ye bağlıdır. Zemin direnci sismik talebin altında olduğunda sıvılaşma tetiklemesi gerçekleşmektedir ( $CRR < CSR$ ).

- **Çevrimsel kayma mukavemeti oranı (CRR) :** Kritik zemin tabakası için CSR tahmin edilir. CSR, yer sarsıntısı seviyelerinin bir fonksiyonudur (Pik Yer İvmesi (PGA), Moment Büyüklüğü (Mw), ve yer altı su seviyesi yüksekliği).
- **Temiz Kum Eşdeğeri Düzeltmesi:** FC, zeminin içinde ne kadar silt-kil bulunduğunu belirten bir orandır. Daha yüksek FC'ye sahip zeminler, genellikle daha siltlidir ve sıvılaşmaya karşı daha düşük FC'ye ve eşdeğer uç direncine sahip olan zeminlere göre daha yüksek bir dirence sahiptirler.
- **Çevrimsel Kayma Mukavemeti Oranı (CRR):** CRR, sismik zemin talebine karşı zemin direncinin bir ölçütüdür. Daha yüksek CRR'ye sahip olan zeminler, sıvılaşmaya karşı daha büyük direnç gösterdiğinden, bu zeminlerin sıvılaşabilmesi için daha kuvvetli seviyelerde sarsıntıyla karşı karşıya kalmaları gerekmektedir.
- **Deprem Büyüklüğü Ölçeklendirme Faktörü (MSF):** MSF, sıvılaşma tetiklemesi üzerindeki deprem süresinin etkilerini açıklamak için kullanılmaktadır. İdriss ve Boulanger (2008)'de bir MSF değeri hesaplanırken,

Boulangier ve Idriss (2014)'te gevşek ve sıkı zeminler için farklı hesaplamalar mevcuttur.

### 2.1.1 SPT Değerlendirme Yöntemleri

Arazi deneyleri arasında sıkça kullanılan standart penetrasyon deneyi (SPT) ile sınıvlaşma potansiyeli hesaplanması oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu deney özenli yapıldığında zeminin fiziksel ve mekanik özellikleri hakkında bilgi sahibi olunmasını sağlamaktadır. Yaygın olarak kumlu zeminler için kullanılan SPT yumuşak killerden zayıf kayalara kadar değişik zemin sınıflarında farklı amaçlar için uygulanabilmektedir.

Deney numune alıcının zemine 450 mm çakabilmek için belirli bir yükseklikten (76 cm) düşürülen ve ağırlığı belli (63.5 kg) şahmendar tarafından zemine uygulanan darbelerin sayısının (N) belirlenmesi için yapılan arazi deneyidir. Deney sırasında ilk 150 mm'lik kısmı çakmak için vurulan darbe sayıları dikkate alınmamaktadır. İkinci ve üçüncü 150 mm'lik çakma için vurulan darbe sayıları ayrı ayrı kayıt altına alınır. SPT uygulamaları, genel ilkeler doğrultusunda, 1.5 m'de bir ve zemin türünün değiştiği düzeylerde, muhafaza borusunun tabanından itibaren yapılır. Darbeler birbirini izleyen her 150 mm'lik giriş (penetrasyon) için ayrı ayrı kaydedilir, 50 darbeye 150 mm'lik giriş sağlanamadığı durumlarda deney durdurularak 50 darbedeki giriş miktarı (cm) olarak kaydedilir.

#### 2.1.1.1 Robertson ve Wride (1998) SPT Değerlendirmesi

Arazide SPT değerlerine numune alıcısının tipi, tij uzunluğu, hangi tür şahmendar kullanıldığı, efektif gerilmenin büyüklüğü gibi, enerji oranı, kullanılan tijin çapı etkilemektedir. Deneyin yapıldığı derinlikteki ince dane dağılım yüzdesi de SPT verilerini etkilemektedir. Bu yüzden aşağıdaki formüldeki SPT verilerini düzeltme işlemi denklem 2.1 ile yapılmaktadır.

$$(N_1)_{60} = N_m * C_N * C_E * C_B * C_R * C_S \quad (2.1)$$

Burada,  $N_m$  ölçülen SPT darbe sayısı,  $C_N$  efektif gerilmeye göre düzeltme faktörü,  $C_R$ ,  $C_S$ ,  $C_B$  ve  $C_E$  sırası ile tij boyuna göre, standart olmayan numune alıcı için, sondaj kuyusu çapına göre ve tokmak oranına göre düzeltme faktörleridir (Tablo 2.1). Ayrıca zeminin ince dane oranına ( $F_C$ ) göre düzeltmenin yapılması önerilmektedir.

SPT'de  $N$  değerleri örtü yüküyle birlikte artış göstermektedir. Bu sebepten dolayı darbe sayısında örtü yükü düzeltilmesi uygulanır (Seed ve Idriss 1982). Bu düzeltme katsayısı genellikle Liao ve Whitman (1986a) tarafından önerilen eşitlikle hesaplanmaktadır (Denklem 2.2).

$$C_N = \left( \frac{P_A}{\sigma_{v0}} \right)^{0.5} \quad (2.2)$$

$P_a$ = yaklaşık 100 kPa değerindeki referans gerilmesi  $\sigma'_{v0}$   $P_a$  ile aynı birime sahip düşey efektif gerilmedir. Referans alınan bu çalışmaya göre örtü yükü düzeltme katsayısı 1.7 değerini aşmamalıdır.

Elde edilen SPT değerlerine temiz kum eşdeğerini elde etmek için ince dane oranı düzeltilmesi yapılmalıdır(Denklem 2.3).

$$(N_1)_{60cs} = \alpha + \beta(N_1)_{60} \quad (2.3)$$

Burada  $\alpha$  ve  $\beta$  katsayıları ince dane oranına göre aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır(Denklem 2.4, 2.5, 2.6).

$$\alpha = 0 \quad FC \leq 5\% \quad (2.4)$$

$$\alpha = \exp \left[ 1.76 - \left( \frac{190}{FC^2} \right) \right] \quad 5\% < FC < 35\% \quad (2.5)$$

$$\alpha = 5 \quad FC \geq 35\%$$

$$\beta = 1.0 \quad FC \leq 5\%$$

$$\beta = [0.99 + (FC^{1.5}/1,000)] \quad 5\% < FC < 35\% \quad (2.6)$$

$$\beta = 1.2 \quad FC \geq 35\%$$

**Tablo 2.1:** SPT düzeltmeleri (Robertson and Wride 1998)

Faktör	Alet Değişkeni	Terim	Düzeltilme
Üst tabaka yükü	---	$C_N$	$(P_A/\sigma'_{Vo})^{0.5}$
Üst tabaka yükü	---	$C_N$	$C_N \leq 1.7$
Şahmerdan enerji oranı	Donat (makaralı) tipi şahmerdan	$C_E$	0.5-1.0
Şahmerdan enerji oranı	Güvenli Şahmerdan	$C_E$	0.7-1.2
Şahmerdan enerji oranı	Otomatik düşülü- Donut (makara) tipi şahmerdan	$C_E$	0.8-1.3
Kuyu çapı	65-115 mm	$C_B$	1.0
Kuyu çapı	150 mm	$C_B$	1.05
Kuyu çapı	200 mm	$C_B$	1.15
Tij boyu	< 3 m	$C_R$	0.75
Tij boyu	3-4 m	$C_R$	0.8
Tij boyu	4-6 m	$C_R$	0.85
Tij boyu	6-10 m	$C_R$	0.95
Tij boyu	10-30 m	$C_R$	1.0
Numune alma yöntemi	Standart numune alıcı (kılıfı)	$C_S$	1.0
Numune alma yöntemi	Standart numune alıcı (kılıfı)	$C_S$	1.1-1.3

SPT temiz kumlar için;

$$CRR_{7.5} = \left[ \frac{1}{34-(N_1)_{60}} + \frac{(N_1)_{60}}{135} + \frac{50}{(10(N_1)_{60}+45)^2} - \frac{1}{200} \right] \quad (2.7)$$

2.7 eşitliğinden yararlanılarak  $CRR_{7.5}$  hesaplanmaktadır. Bu eşitlik  $(N_1)_{60} < 30$  için kullanılmaktadır.  $(N_1)_{60} \geq 30$  olduğu durumlarda zeminin yüksek sıklığa sahip olduğu kabul edildiği için sıvılaşmaz kabul edilmektedir.

### 2.1.1.1.1 CSR Değerinin Bulunması

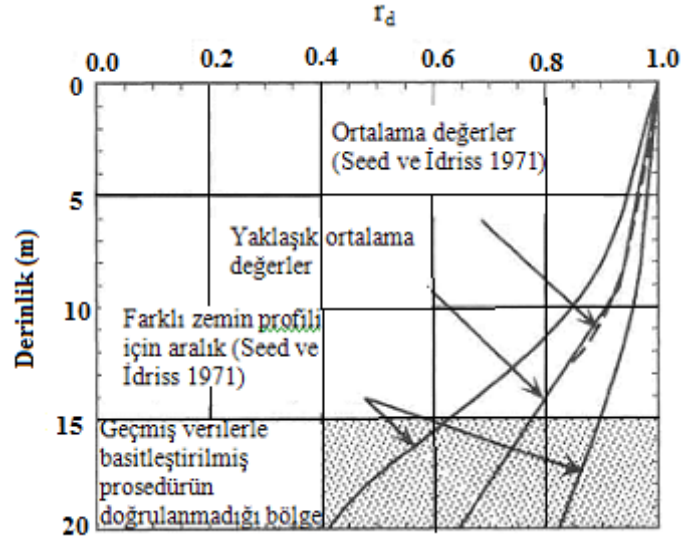
Depremi meydana gelmesiyle hesaplanan çevrimsel kayma gerilmesi uzun yıllardır dikkate alınmaktadır (Seed ve Idriss 1971; Youd ve diğ. 2001). Denklem 2.8, 2.9, 2.10 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$CSR = \left( \frac{\tau_{av}}{\sigma'_{vo}} \right) = 0.65 \left( \frac{a_{max}}{g} \right) \left( \frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \right) r_d \quad (2.8)$$

$$r_d = 1.0 - 0.00765z \quad z \leq 9.15 \text{ m} \quad (2.9)$$

$$r_d = 1.174 - 0.0267z \quad 9.15 \text{ m} < z \leq 23 \text{ m} \quad (2.10)$$

Bu denklemde yer alan ifadeler aşağıda belirtildiği gibidir;  $a_{max}$ : yüzeydeki en büyük yatay gerilme,  $\sigma_v$ : toplam düşey gerilme,  $\sigma'_v$ : efektif düşey gerilme,  $r_d$ : gerilme azaltma katsayısı,  $z$ : metre cinsinden yüzeyden itibaren derinliktir.



Şekil 2.5: Gerilme azaltma katsayısının grafiği (Robertson and Wride, 1998)

### 2.1.1.2 Idriss ve Boulanger (2006) SPT Değerlendirmesi

Idriss ve Boulanger (2006) çalışmasında SPT verileri kullanılarak CSR ve  $CSR_{7.5}$  hesapları sırasıyla Denklem 2.11, 2.12'de verilmiştir.

$$CSR = 0.65 \left( \frac{\sigma_{vo}^{*a_{max}}}{\sigma'_{vo}} \right) r_d \quad (2.11)$$

$$(CSR)_{M=7.5} = \frac{CSR}{MSF} = 0.65 \left( \frac{\sigma_{vo}^{*a_{max}}}{\sigma'_{vo}} \right) \frac{r_d}{MSF K_\sigma} \quad (2.12)$$

Yapılan bu yarı amirik çalışmada efektif örtü yükü  $100 \pm kPa$  için CRR denklem 2.13 ile hesaplanır.

$$CRR = CRR_{\sigma=1, \sigma=0} K_\sigma K_\alpha \quad (2.13)$$

$K_\sigma$  = örtü yükü faktörü 1  $K_\alpha$  statik kayma gerilmesi faktörü olmak üzere düzeltme önermektedir.

Bu çalışmada  $r_d$ ,  $\alpha$  ve  $\beta$  katsayısına bağlı olarak aşağıdaki denklemde görüldüğü gibi hesaplanmaktadır (Denklem 2.14, 2.15, 2.16).

$$L_n(r_d) = \alpha(z) + \beta(z)M \quad (2.14)$$

$$\alpha(z) = -1.012 - 1.126 \sin\left(\frac{z}{11.73} + 5.133\right) \quad (2.15)$$

$$\beta(z) = 0.106 + 0.118 \sin\left(\frac{z}{11.28} + 5.142\right) \quad (2.16)$$

Burada kullanılan  $z$  metre cinsinden derinliği,  $M$  de moment magnitude değerini vermektedir Bu denklem  $z \geq 34$  metre içindir. Derinlik  $z \geq 34$  m ise  $r_d$  denklem 2.17 ile hesaplanır.

$$r_d = 0.12 \exp(0.22M) \quad (2.17)$$

MSF tekrarlayan değerlendirmelerinde Idriss 1971 ilişkisi üzerinde çalışılmıştır (Denklem 2.18, 2.19).

$$MSF = 6.9 \exp\left(\frac{-M}{4}\right) - 0.058 \quad (2.18)$$

$$MSF \leq 1.8 \quad (2.19)$$

Örtü yükü düzeltme katsayısı ile ilgili Boulanger (2003) ve Boulanger ve Idriss (2004) yayınlarında geniş bilgiler bulunmaktadır (Denklem 2.20 ve 2.21).

$$K_{\sigma} = 1 - C_{\sigma} \ln \left( \frac{\sigma'_{vo}}{P_a} \right) \leq 1.0 \quad (2.20)$$

$$C_{\sigma} = \frac{1}{18.9 - 17.3D_R} \leq 0.3 \quad (2.21)$$

Idriss ve Boulanger (2003) da tekrar hesaplanan koralasyonlarda sıvılaşma hesaplamalarında  $(N_1)_{60}$ ,  $q_{c1N}$  ve  $D_R$  arasında temiz kum için;

$$D_R = \sqrt{\frac{(N_1)_{60}}{46}} \quad (2.22)$$

olarak verilmiş Boulanger and Idriss 2004 de bu denklem 2.23'deki şekliyle revize edilmiştir.

$$C_{\sigma} = \frac{1}{18.9 - 2.55\sqrt{(N_1)_{60}}} \quad (2.23)$$

olarak verilmektedir.

Efektif gerilmeye göre düzeltme faktörü ( $C_N$ ) Liao ve Whitman (1986a) tarafından önerilen 2.24 eşitliği ile hesaplanmaktadır.

$$C_N = \left( \frac{P_A}{\sigma'_{vo}} \right)^{0.5} \quad (2.24)$$

Ancak bu çalışmada Boulanger (2003) de için önerilen yaklaşım kullanılmıştır.

$$C_N = \left( \frac{P_A}{\sigma'_{vo}} \right)^m \quad (2.25)$$

Burada üst m doğrusal olarak DR ile bağıntılıdır(Denklem 2.26).

$$m = 0.784 - 0.52D_R \quad (2.26)$$

Boulanger ve Idriss (2004) yılında CN düzeltme faktörünü  $(N_1)_{60}$  bağlı olarak;

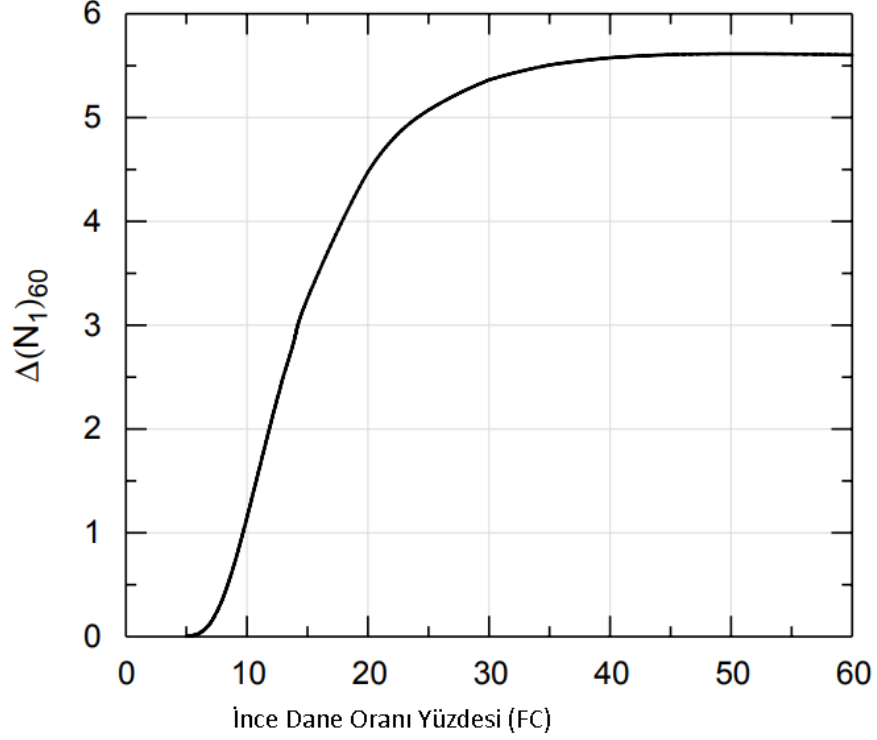
$$C_N = \left( \frac{P_A}{\sigma'_{vo}} \right)^{\alpha} \leq 1.7 \quad (2.27)$$

$$\alpha = 0.784 - 0.0768\sqrt{(N_1)_{60}} \quad (2.28)$$



Bu formül  $(N_1)_{60}$  maksimum 46 olduğu değerler için güvenilirdir.

$$CRR = \exp \left\{ \frac{(N_1)_{60cs}}{14.1} + \left( \frac{(N_1)_{60cs}}{126} \right)^2 - \left( \frac{(N_1)_{60cs}}{23.6} \right)^3 + \left( \frac{(N_1)_{60cs}}{25.4} \right)^4 - 2.8 \right\} \quad (2.29)$$



Şekil 2.6: İnce dane oranı-  $\Delta(N_1)_{60}$  değişimi

$$(N_1)_{60cs} = (N_1)_{60} + \Delta(N_1)_{60} \quad (2.30)$$

$$\Delta(N_1)_{60} = \exp \left( 1.63 + \frac{9.7}{FC+0.1} - \left( \frac{15.7}{FC+0.1} \right)^2 \right) \quad (2.31)$$

Şekil 2.6'da ince dane oranı-  $\Delta(N_1)_{60}$  değişimi değerleri açıkça görülmektedir.

### 2.1.2 CPT Değerlendirme Yöntemleri

Konik penetrometre deneyi (CPT) geoteknik mühendisliğinde yaygın olarak kullanımı görülmektedir. Koni penetrasyon deneyinden (CPT) elde edilen uç direnci sıvılaşma direncinin bir ölçüsü olarak kullanılmaktadır. Gevşek zeminden oluşan ince

damarları yakalamada SPT'ye göre gerçekten çok üstündür. CPT ve SPT dirençleri arasındaki korelasyonlarda destekleyerek, belirli bir CPT direncine sahip temiz kumda sıvılaşma oluşturabilecek minimum devirsel gerilme oranı bulunabilir (Robertson ve Campanella 1985, Seed ve DeAlba 1986).

### 2.1.2.1 Robertson ve Wride (1998) CPT Değerlendirmesi

Koni penetrasyon deneyi uç direncinin, sıvılaşma direncinin belirlenmesinde kullanılmasında da bazı düzeltmeler yapmak gerekmektedir. Bu düzeltmeler için temiz kumlarda denklem 2.32, 2.33, 2.34 ve 2.35 kullanılarak hesaplamalar yapılır (Robertson and Wride, 1998; Youd ve diğ., 2001).

$$\text{if } (q_{c1N})_{cs} < 50 \rightarrow CRR_{7.5} = 0.833 \left[ \frac{(q_{c1N})_{cs}}{1,000} \right] + 0.05 \quad (2.32)$$

$$\text{if } 50 \leq (q_{c1N})_{cs} < 160 \rightarrow CRR_{7.5} = 93 \left[ \frac{(q_{c1N})_{cs}}{1,000} \right]^3 + 0.08 \quad (2.33)$$

$$q_{c1N} = C_Q \left( \frac{q_c}{P_a} \right) \quad (2.34)$$

$$C_Q = \left( \frac{P_a}{\sigma'_{v0}} \right)^n \quad (2.35)$$

n=1.0 (kil zeminler için), n=0.50 (temiz kumlar için), n=0.50-1.00 (silt ve siltli kumlar için) kullanılır.

Zemin cinsini tanımlamak için kullanılan zemin davranış indeksi hesaplanmalıdır. (Denklem 2.36, 2.37 ve 2.38).

$$I_c = [(3.47 - \log Q)^2 + (1.22 + \log F)^2]^{0.5} \quad (2.36)$$

$$Q = \left[ \frac{(q_c - \sigma_{v0})}{P_a} \right] \left[ \left( \frac{P_a}{\sigma'_{v0}} \right)^n \right] \quad (2.37)$$

$$F = \left[ \frac{f_s}{(q_c - \sigma_{v0})} \right] \times 100\% \quad (2.38)$$

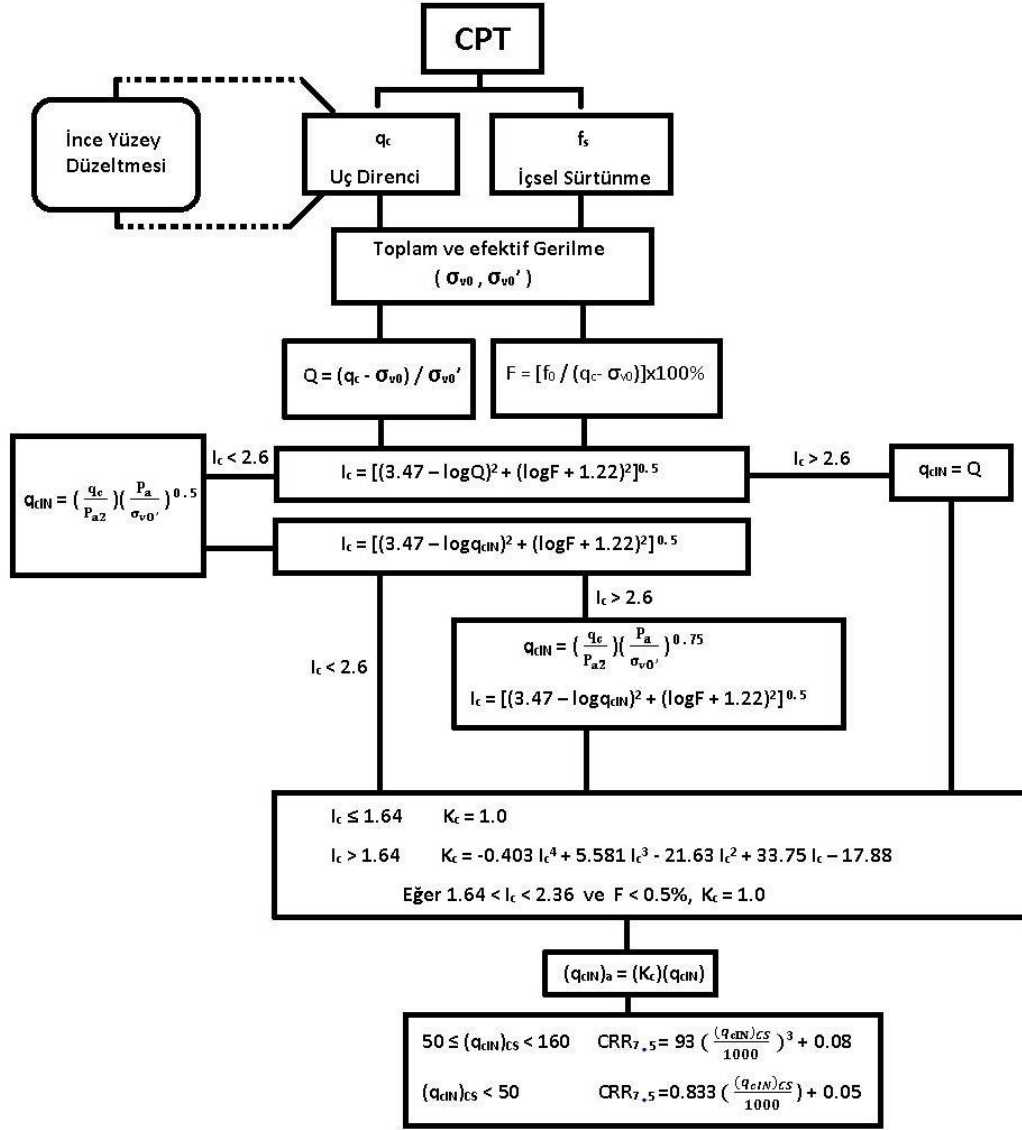
Siltli kumlar için normalize edilmiş penetrasyon direnci ( $q_{c1N}$ ), aşağıdaki ilişkiyle eşdeğer bir temiz kum değerine ( $(q_{c1N})_{cs}$ ) Denklem 2.39, 2.40, 2.41 ile düzeltilebilir:

$$(q_{c1N})_{cs} = K_C q_{c1N} \quad (2.39)$$

$$I_C \leq 1.64 \rightarrow K_C = 1.0 \quad (2.40)$$

$$I_C > 1.64 \rightarrow K_C = -0.403I_C^4 + 5.581I_C^3 - 21.63I_C^2 + 33.75I_C - 17.88 \quad (2.41)$$

Eğer  $n=1$  alınarak hesaplanan  $Q$  kullanılarak hesaplanan  $I_c < 2.6$  ise zemin killi ve sıvılaşmayan zemin olarak kabul edilir. Eğer  $n=1$  alınarak hesaplanan  $Q$  kullanılarak hesaplanan  $I_c > 2.6$  ise,  $C_Q$  ve  $Q$ ,  $n = 0.5$  alınarak tekrar hesaplanır ve  $I_c$  değeri yeniden belirlenir, eğer  $I_c < 2.6$  ise sıvılaşma analizlerinde kullanılır, eğer  $I_c > 2.6$  ise  $n=0.7$  alınarak  $I_c$  tekrar hesaplanır ve sıvılaşma analizlerinde kullanılır (Şekil 2.7).



Şekil 2.7: CPT hesaplama akış diyagramı

M=7.5 büyüklüğünde bir deprem için sıvılaşma direnci denklem 2.42 ve 2.43 eşitlikleri kullanılarak bulunabilmektedir.

$$q_{c1Ncs} < 50 \rightarrow CRR_{7.5} = \frac{0.833 q_{c1Ncs}}{1000} + 0.05 \quad (2.42)$$

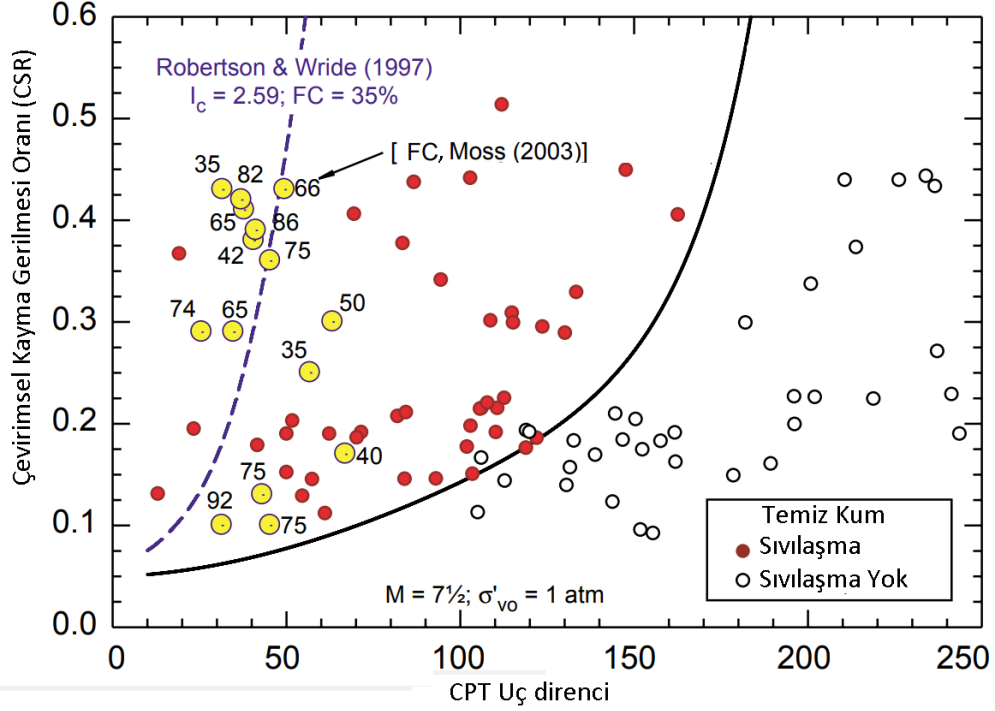
$$50 \leq q_{c1Ncs} < 160 \rightarrow CRR_{7.5} = 93 \left( \frac{q_{c1Ncs}}{1000} \right)^3 + 0.08 \quad (2.43)$$

Yukarıda tanımlanan CRR değerleri, 7.5 büyüklüğünde depremler için geçerlidir.

### 2.1.2.2 Idriss ve Boulanger (2006) CPT Değerlendirmesi

Bu çalışmada CSR hesabı, deprem büyütme katsayısı,  $r_d$  hesabı SPT ile hesaplama kısmında anlatılmıştır. CRR denklem 2.44 kullanılarak hesaplanabilir.

$$CRR = \exp \left\{ \frac{q_{c1N}}{540} + \left( \frac{q_{c1N}}{67} \right)^2 - \left( \frac{q_{c1N}}{80} \right)^3 + \left( \frac{q_{c1N}}{114} \right)^4 - 3 \right\} \quad (2.44)$$



**Şekil 2.8:** Yüksek ince dane oranı içeriğine sahip olan uyumsuz zeminler için saha vaka geçmişlerinin karşılaştırılması ve  $I_c = 2.59$  (görünür  $FC = \% 35$ ) olan zemin için Robertson ve Wride (1998) tarafından önerilen eğri

Boulanger ve Idriss (2004) yılında  $C_N$  düzeltme faktörünü  $(N_1)_{60}$  bağlı olarak denklem 2.45 ile hesaplanmaktadır.

$$C_N = \left( \frac{P_A}{\sigma_{V_0}} \right)^\beta \leq 1.7 \quad \beta = 1.338 - 0.249(q_{c1N})^{0.264} \quad (2.45)$$

Bu formül  $q_{c1N}$  maksimum 254 olduğu değer için yapılabilir.

### **2.1.2.3 Idriss ve Boulanger (2008) CPT Değerlendirmesi**

Idriss ve Boulanger (2008) spesifik laboratuvar test sonuçlarına göre FC'nin düzeltilmesine izin vermektedir. Bu FC-IC profillerinin yalnızca sınırlı bir vaka geçmiş veri tabanından türetilen ampirik bir ilişkiye bağımlı olmak yerine belirli saha koşullarına uyacak şekilde uyarlanabileceği anlamına gelmektedir. Çalışmada FC ve CRR arasındaki ilişki, sıvılaşan ve sıvılaşmayan zeminlerde vaka analizlerine dayanarak ampirik olarak türetilmiştir. Idriss ve Boulanger (2008)'de, MSF hesabında kohezyonsuz zeminler için tek bir formül geliştirilmiştir.

### **2.1.2.4 Boulanger ve Idriss (2014) CPT Değerlendirmesi**

Boulanger ve Idriss (2014) çalışmasında, Idriss ve Boulanger (2008)'de yayınlanan sıvılaşma tetikleme metodu güncellenerek yeni bir çalışma ortaya konmuştur. 2008'de yapılan çalışmadan farklı olarak üç temel değişiklik yapılmıştır.

-FC, Canterbury Deprem Dizisine (CES) dayanan 50 vaka analizi de dahil olmak üzere bu alandaki çalışmalar, Boulanger ve Idriss (2014)'deki ampirik ilişkinin içine dahil edilmiştir. Bu sebeple, temiz kum eşdeğeri düzeltmesi (FC'nin bir fonksiyonu), Canterbury zeminleriyle gelişmiş bir korelasyon oluşturduğuna inanılmaktadır. Bu farklılıklar, kumlu zeminler üzerinde sıvılaşma tetiklemesi için küçük bir etkiye sahip iken Idriss ve Boulanger (2008) yöntemiyle kıyaslandığında yüksek FC'ye sahip Siltli zeminlerde çok daha belirgin bir etkiye sahiptir.

-Boulanger ve Idriss (2014)'te CRR'nin hesaplanma şeklindeki küçük değişiklikler ile CRR değeri için gevşek zeminlerde biraz daha yüksek değerleri, sıkı zeminler içinse biraz daha büyük değerleri öngörmektedir. Bu değişikliklerin yalnızca Idriss ve Boulanger (2008) yöntemine kıyasla sıvılaşma tetiklemesinin tahmini üzerinde küçük bir etkisi olduğu unutulmamalıdır.

-MSF, sıvılaşma tetiklemesi üzerindeki deprem süresinin etkilerini açıklamak için kullanılmaktadır. Idriss ve Boulanger 2008'de bir MSF değeri hesaplanırken, Boulanger ve Idriss (2014)'te gevşek ve sıkı zeminler için farklı hesaplama mevcuttur.

## 2.2 Olasılıksal Yöntemlerle Sıvılaşma Olasılığının Belirlenmesi

Basitleştirilmiş yöntem ile sıvılaşma analizi yaygın olarak kullanılmakla birlikte, son yıllarda benzer yaklaşımlar kullanılarak olasılıksal korelasyonlara dayalı bazı yöntemler geliştirilmiştir (Liao ve diğ. 1988; Youd ve Noble 1997); Toprak ve diğ. 1999; Seed ve diğ. 2001; Seed ve diğ. 2003). Seed ve Idriss (1971) tarafından önerilen çevrimli kayma direnci oranı (CRR) ile düzeltilmiş SPT-N değeri arasındaki deterministik ilişki farklı sıvılaşma olasılıkları için tanımlanmıştır. Bu yöntemlerde daha fazla arazi verisi dikkate alınmakla birlikte, yararlanılan regresyon yöntemine bağlı olarak belirsizlik yüzdesi artabilmektedir. Ayrıca bazı yöntemlerde örneğin ince dane oranı gibi bazı önemli faktörler dikkate alınmamaktadır. Seed ve diğ. (2001) tarafından önerilen olasılıksal yöntem, geniş bir arazi veri tabanı içermesi, sahaya özgü yer hareketlerini etkileyen bazı faktörlerin göz önüne alınması ve yüksek mertebeli olasılıksal yöntemlerin kullanılması nedeni ile, diğer yöntemlere göre bazı üstünlükler taşımaktadır. Çetin ve diğ. (2004) SPT tabanlı olasılıksal zemin sıvılaşması bağıntısının sunulduğu bir başka çalışmadır.

### 2.2.1 Toprak ve diğ. (1999) Yaklaşımı

Toprak ve diğ. (1999) çalışmasında 1989 Loma Prieta, California'da meydana gelen  $M_w=6,9$  büyüklüğündeki deprem sonrası yapılan SPT ve CPT verileri kullanılmıştır. Yapılan bu çalışmada doğal kum yatağı olan Monterey ve San Francisco bölgelerindeki veriler incelenmiştir. Bu çalışmada Seed ve diğ. (1983) çalışmasında kullanılan basitleştirilmiş sıvılaşma analizine ek olarak CPT tabanlı sıvılaşma olasılığı grafiği ve SPT tabanlı sıvılaşma olasılığı grafiğini çizebilmek için logistik regresyon analizi kullanılmıştır.

Toprak ve diğ. (1999) çalışmasında SPT verileri için %50 ve %20 sıvılaşma olasılığı eğrilerinden tabloda verilen değerler hesaplanarak elde edilen denklem;

$$Q_L = \text{logit}(P_L) = [P_L/(1 - P_L)] = 10.0424 - 0.2215(N_1)_{60cs} + 3.9740 \ln(CSR) \quad (2.46)$$

Bu eşitliğin modifiye olasılık oranı indeksi  $\bar{\rho}^2$  0.52 olarak hesaplanmıştır.

1971 San Fernando, 1979 Imperial Valley, 1987 Superstition Hills ve 1994 Northridge depremleride eklenerek;

$$Q_L = \text{logit}(P_L) = [P_L/(1 - P_L)] = 12.8759 - 0.2820(N_1)_{60cs} + 5.3265\ln(CSR) \quad (2.47)$$

Bu eşitliğin modifiye olasılık oranı indeksi :  $\bar{\rho}^2$  0.50 olarak hesaplanmıştır.

Toprak ve diğ. (1999) çalışmasında logistik regresyon kullanarak, genişletilmiş veri seti ile;

$$Q_L = \text{logit}(P_L) = [P_L/(1 - P_L)] = 10.4459 - 0.2295(N_1)_{60cs} + 4.0573\ln(CSR/MSF) \quad (2.48)$$

eşitliği elde edilmiş ve modifiye olasılık oranı indeksi:  $\bar{\rho}^2$  0.98 olarak hesaplanmıştır. Diğer iki denklemde hesaplanan: :  $\bar{\rho}^2$  göre oldukça yüksek değer elde edilmiştir.

Toprak ve diğ. (1999) çalışmasında SPT verileri için %50 ve %20 sınılaşma olasılığı eğrilerinden tabloda verilen değerler hesaplanarak elde edilen denklem;

$$Q_L = \text{logit}(P_L) = [P_L/(1 - P_L)] = 11.6896 - 0.2215(q_{c1N})_{cs} + 4.0817\ln(CSR) \quad (2.49)$$

Bu eşitliğin modifiye olasılık oranı indeksi:  $\bar{\rho}^2$  0.64 olarak hesaplanmıştır.

### 2.2.2 Çetin ve diğ. (2002) Yaklaşımı

Çetin ve diğ. (2002) çalışmasında sismik zemin sınılaşması işleminin başlamasının olasılıksal değerlemesinin yapılması için bayesian sistemi tanımlanmıştır. Yerinde “endeks” test sonuçlarıyla birlikte zemin performansının deprem sonrası alan gözlemlerinden oluşan bir veri tabanı, olasılık temelli sismik zemin sınılaşması tetikleme korelasyonlarının geliştirilmesinde kullanılır. Önerilen stokastik model, tüm ilgili belirsizliklerin tam ve tutarlı bir şekilde temsil edilmesini sağlar. (a) ölçüm / tahmin hataları dahil, (b) model kusurları, (c) istatistiksel belirsizlik ve (d) doğal değişkenlikler parametreleri kullanılır. Sismik zemin sınılaşma başlatma tehlikesi problemi için, problemin özünde yer alan çeşitli belirsizlik kaynaklarını temsil eden farklı olasılıksal sınılaşma sınır eğrileri setleri geliştirilmiştir. Farklı olasılıksal sınılaşma sınır eğrileri setleri çeşitli kaynakları temsil eden sismik zemin



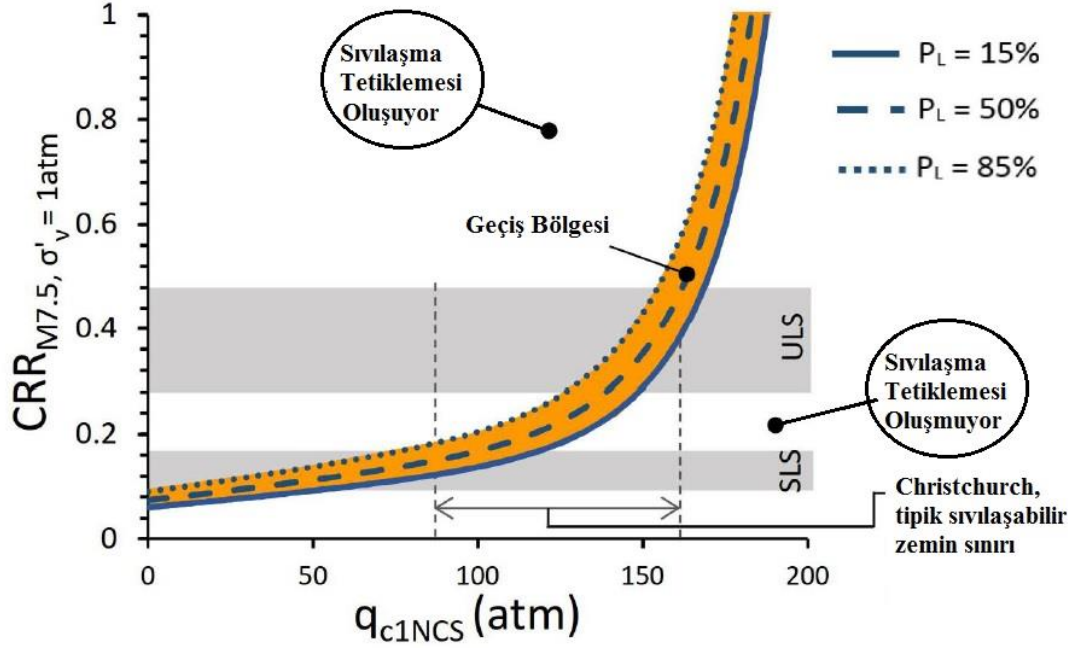
sıvılaşma oluşması analiz problemi için geliştirilmiştir. Sonuçta ortaya çıkan korelasyonlar, önceki çabalara göre anlamlı bir iyileşme, gelişmiş doğrulukla öngörücü ilişkiler üretme ve büyük ölçüde azaltılmış genel model belirsizliğini temsil eder.

### 2.2.3 Boulanger ve Idriss (2014) SPT Değerlendirmesi

Boulanger ve Idriss (2014) çalışmasında, Idriss ve Boulanger (2008) sıvılaşma tetikleme metodu çalışmasını güncelleyerek yeni bir çalışma ortaya koymuştur. Bu çalışma, değerlendirme metodolojisinde üç ana değişiklik göze çarpmaktadır. Bunlar temiz kum eşdeğeri düzeltmesi, çevrimsel kayma mukavemeti oranı (CRR) ve magnitüde düzeltme faktörüdür (MSF).

Metodolojideki bu ana değişikliklere ek olarak, Boulanger ve Idriss (2014), laboratuvar test verilerine dayandırabildiği alanlar için önerilen kalibre edilebilecek bir FC-I<sub>c</sub> korelasyonunu hesaplamıştır. Van Ballegooy ve diğ. (2015<sup>a</sup>) çalışmasında dört basitleştirilmiş sıvılaşma tetikleme yöntemini Canterbury deprem serisindeki üç büyük deprem için (Eylül 2010, Şubat 2011 ve Haziran 2011) değerlendirmiş, arazi hasar gözlemleri ile sıvılaşma şiddeti katsayısı (LSN) ile arasında makul korelasyonlar sağladığını göstermiştir. Bununla birlikte sonuçların detaylı bir şekilde incelenmesiyle BI2014 yöntemiyle hesaplanmış LSN değerlerinin, sıvılaşma gerçekleşmeyen ve az oranda sıvılaşma gerçekleşen bölgelerde sıvılaşmanın neden olduğu arazi hasarıyla en tutarlı dağılımı verdiği gözlenmiştir. Yine aynı şekilde orta seviyeden ciddi seviyeye kadar sıvılaşmadan kaynaklı arazi hasarlarının BI2014 tetikleme metodunda en iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir.

BI2014 metodunda aynı zamanda sıvılaşma tetikleme olasılığı ( $P_L$ ) adı verilen ve CRR tahminindeki belirsizlik sonucunda bir dizi olasılıkla sıvılaşma olasılığını tahmin etmeye imkân veren bir parametre bulunmaktadır. Standardize edilmiş 7.5 deprem büyüklüğü için CRR ve  $(q_{c1N})_{cs}$ 'ye bağlı olmak üzere Şekil 2.9'da üç farklı (%15, %50 ve %85) sıvılaşma olasılığı band genişliği gösterilmektedir. Sıvılaşma olasılığı ( $P_L$ ), CRR tahminindeki belirsizlik sonucunda bir dizi olasılıkla sıvılaşma olasılığını tahmin etmeye imkân veren bir parametredir. ULS ve SLS ise sırasıyla nihai sınır durumu ve servisibilite sınır durum bölgelerini göstermektedir.



Şekil 2.9: CRR ve  $(q_{c1N})_{cs}$ 'ye bağlı  $P_L = 15\%$ ,  $50\%$  ve  $85\%$  eğrileri (Boulangier ve Idriss 2014)

Tonkin ve Taylor (2015) çalışmasında BI-2014 metodunu kullanarak sıvılaşma tetiklemesinin bir değerlendirilmesini yapmak için giriş parametrelerinin kabul edilmesi gerektiğini belirtmiştir.

### 2.3 Sıvılaşma Şiddet Parametreleri

Sıvılaşma potansiyel endeksi (LPI) ve sıvılaşma şiddeti katsayısı (LSN) olan iki sıvılaşma şiddet parametreleri, sıvılaşmanın büyüklüğüne ve özellikle sıvılaşma oluşumunun tahmin edilmesinden ziyade bina hasarına (açısal bozulmayla tanımlanan) bağlı olarak değerlendirilir. Düzeltilen uygulamada bu parametreler oluşum ya da hasar tahmini amacıyla kullanılmıştır.

#### 2.3.1 Sıvılaşma Potansiyel İndeksi (LPI) Yöntemi

Iwasaki ve diğ. (1978, 1982) tarafından geliştirilen LPI metodu araştırmacılar tarafından kullanılan en yaygın metottur. LPI ile sıvılaşma potansiyeli farklı risk seviyelerinde gösterilebilir (Tablo 2.2). LPI metodunda LPI değerleri 0 ve 100 arasında değerler alabilmektedir.

**Tablo 2.2:** LPI Değişim Tablosu

Sıvılaşma Potansiyel İndeksi (LPI)	Sıvılaşma Potansiyel Derecesi
0	Çok Düşük
$0 < LPI \leq 5$	Düşük
$5 < LPI \leq 15$	Orta
$15 < LPI$	Yüksek-Çok Yüksek

LPI metodolojisi ile yapılmış çok sayıda çalışma vardır. Iwasaki ve diğ. (1982) LPI değerinin 15'den yüksek olması durumunda çok yüksek sıvılaşma riskinin olduğunu gösterilirken, Juang ve diğ. (2005<sup>a</sup> ve 2005<sup>b</sup>) LPI değerinin 5'den büyük olan bölgelerin yüksek sıvılaşma riski altında bulunduğunu göstermektedir. Toprak ve Holzer (2003) çalışmasında, 1989 Loma Prieta depreminden elde edilen gözlemlerle LPI değerlerini sunmuş, LPI değerinin 5 ve 15 olduğu durumlarda sıvılaşmanın yüzeyde görülebilme olasılığının sırasıyla %58 ve %93 olduğunu göstermiştir.

Iwasaki ve diğ. (1978, 1982) tarafından çoklu zemin tabakalarından oluşan düşey zemin kolonunun, zemin yüzeyden 20 metre seviyesine kadarki sıvılaşma potansiyelini hesaplamak için geliştirilen;

$$LPI = \int_0^{20} Fw(z) dz \quad (2.50)$$

Eşitlikte;  $F=1-FS$   $FS \leq 1$  için,

$$F=0 \quad FS > 1 \text{ için}$$

Burada, derinlik ağırlık faktörü  $w(z)=10-0.5z$ ,  $z$  ise derinliği ifade etmekte Zeminin kabuk kalınlığının gözlenen önemi ve LPI'nin Yeni Zelanda hasar bölgelerindeki sıvılaşmayla tetiklenen arazi hasarlarının ayırt edilmesindeki göreceli olarak görülen eksikliğini gidermek üzere Tonkin ve Taylor (2013) Sıvılaşma şiddeti katsayısı (LSN) geliştirilmiştir.

### 2.3.2 Sıvılaşma Şiddet Katsayısı (LSN) Yöntemi

Tonkin ve Taylor (2013) tarafından literatüre sunulan Sıvılaşma şiddeti katsayısı (LSN) aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır.

$$LSN = 1000 \int \frac{\varepsilon_v}{z} dz \quad (2.51)$$

Eşitlikte  $\varepsilon_v$ , değerlendirilen tabaka için hacimsel yoğunlaştırılmış şekil değiştirmeyi sembolize etmektedir.  $\varepsilon_v$ , Zhang ve diğ. (2002) tarafından hesaplama metodu kullanılmıştır. “z” ise kesit boyunca derinliktir.

Van Ballegooy ve diğ. (2014<sup>b</sup>) çalışmasında sıvılaşmanın neden olduğu yerleşim yeri hasarlarını belirlerken, LPI ve LSN ile değerlendirme arasındaki farklılıklar ;

LSN, hacimsel şekil değiştirme ampirik formüllerine dayandığından, FS'nin birden büyük değerleri için bile LSN değerleri sürekli olarak hesaplanabilmektedir. Böylece LSN değerleri, Zhang ve diğ. (2002)'de önerilen hacimsel şekil değiştirme fonksiyonu olarak, FS<2 olduğu zaman aşırı boşluk suyu basıncı yükselişi gibi artmaya başlamaktadır ve FS<1 olduğunda sürekli yumuşak bir geçiş içermektedir.

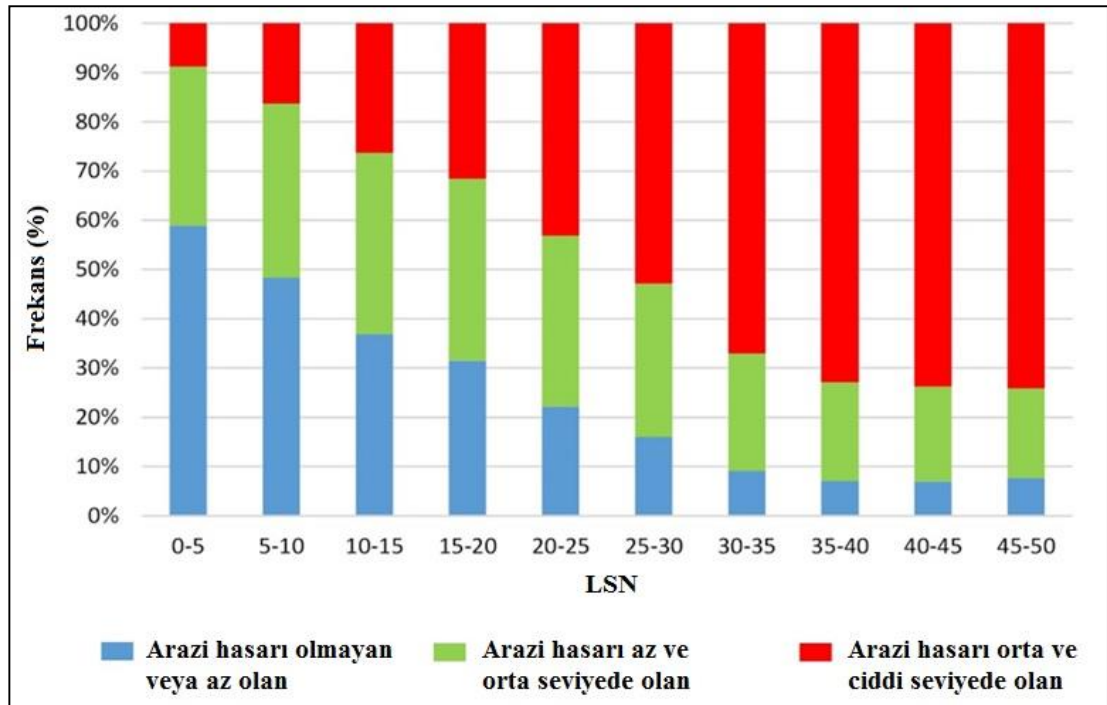
Zhang ve diğ. (2002)'de LSN formülündeki hacimsel şekil değiştirme ilişkileri, sismik talebin fonksiyonu değildir, zemin göreceli yoğunluk fonksiyonu olarak sınırlayıcı bir hacimsel şekil değiştirmeye ulaşır. Aksine, LPI parametresindeki artış, PGA değerinin artmasıyla devam etmektedir. Çünkü LPI, FS'nin doğrudan bir fonksiyonudur, sismik talep arttıkça azalmaktadır.

Göreceli yoğunluğa sahip sıvılaşabilen tabakalarda düşük göreceli yoğunluğa sahip tabakalar yer yüzeyinde daha fazla şekil değiştirme geliştirmeleri beklenmektedir. LSN ile hesaplanmış şekil değiştirme değeri hasar indeksi olarak kullanıldığında sadece oturmaya göre hesaplanmış indekse göre kuvvet kaybının ve zemin püskürme potansiyelinin etkilerini daha fazla içermektedir.

LSN, hiperbolik derinlik ağırlıklı fonksiyonu kullanarak yer altı su tabakası yüzeye yakın olduğunda sıvılaşmayan kabuk kalınlığına daha çok önem vermektedir. LPI'deki sığ ve derin tabakaların katkısıyla karşılaştırıldığında LSN, sığ sıvılaşmanın

yer ve yüzey yapılarına derin sıvılaşmaya göre çok daha büyük zarar verdiğini göstermektedir. Dolayısıyla LSN, sıvılaşmayan kabuğun ince olduğu ve ciddi püskürme sonucunu, kabuğun kalın ve çok daha az miktarda püskürme meydana geldiği zamanla ayırt etme özelliğine sahiptir.

Tonkin ve Taylor (2015) ve Van Ballegooy ve diğ. (2015<sup>b</sup>) çalışmalarında üç depremden sonra gözlenen arazi hasarlarıyla LSN arasında güçlü ilişkiler gözlemlenmiştir. Düşük LSN değerlerinin gözlemlendiği bölgelerde, hasarların düşük olduğu yada hiç hasar olmadığı, LSN değerinin yüksek olduğu yerlerde ise yüksek arazi hasarı gözlemlenmektedir. Şekil 2.10'de gösterildiği gibi LSN değerleriyle arazi hasarları arasında doğru orantı bulunmaktadır (Tonkin ve Taylor 2015, Van Ballegooy ve diğ. 2015<sup>b</sup>).



Şekil 2.10: Arazi hasar gözlemleriyle LSN arasındaki ilişkiler (Tonkin ve Taylor 2015, Van Ballegooy ve diğ. 2015<sup>b</sup>)

## 2.1 Program Arayüzü

Sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesinde literatürde birçok farklı yöntem görülmektedir. Bu çalışma kapsamında en yaygın olanları incelenmiştir. Yapılan bu yazılımda farklı sıvılaşma tetikleme yöntemlerinin yanı sıra sıvılaşma şiddet parametreleri olan LPI ve LSN hesapları yapılabilmektedir.

Bu sıvılaşma tahmin yöntemlerinin hatasız, verimli kullanımı ve hızlı sonuç elde edilmesi için pascal programlama yazılım dili tabanlı delphi arayüzü kullanılarak bilgi tabanlı karar-destek sistemi yazılmıştır. Bu sayede bilgi tabanlı karar- destek sisteminde farklı yöntem ve yaklaşımlara kolay erişim sağlanmıştır.

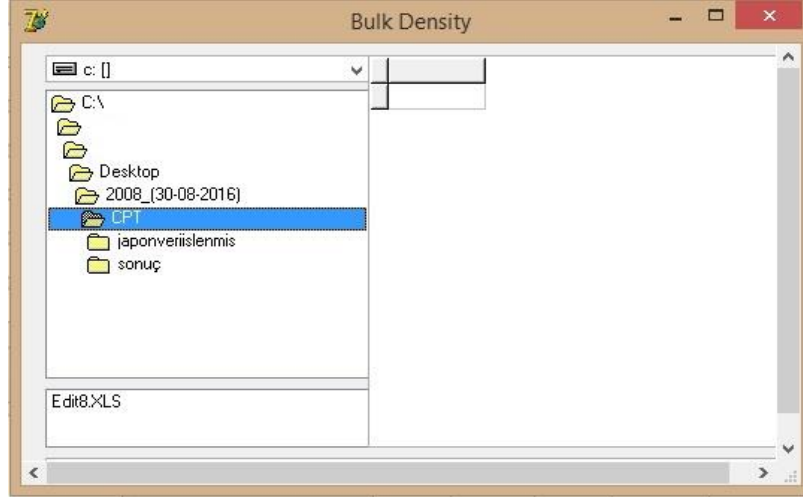
Yazılan programın sade ve kolay kullanılabilir olması amaçlanmış olup tek bir ana ekran üzerinde bahsi geçen hesaplama yöntemleri kolay kullanılabilir hale getirilmiştir. Program arayüzünde hesaplamalar için deney bölgesinin karakteristik özelliklerinin ve bölgeden alınan CPT verilerinin girilmesini gerekli kılan parametreler sol üst tarafta toplanmıştır (Şekil 2.11).

The screenshot displays the CPT program interface. On the left, there are input fields for Water table depth (1.7), Earthquake Magnitude (9), a-max (g) (0.20), g (9.81), Atmospheric Pressure (100), Cone penetration resistance (0), and Exponent That Varies with Soil Type (nsoil) (0). Below these are buttons for 'Import CPT Datas from Excel' and 'Import Bulk Densities from Excel'. The 'Import CPT Datas from Excel' table shows columns for z, qt, and fs. The 'Import Bulk Densities from Excel' table shows columns for DEPTH, BULK DENSITY, and fs. In the center, there are radio buttons for Scaling Factor (Youd and Noble, Andrus and Stokoe, Idriss, 2000, 2014) and checkboxes for 15%, 50%, and 85%. Below this is a section for 'Determine the parameters' with dropdowns for Depth, qt, and fs. On the right, there are two tables: 'Calculate the safety factor for CPT' and 'Calculate LPI'. The safety factor table has columns for DEPTH, fs, lc, q, and qc1n. The LPI table has columns for DEPTH, LPI, and LPI Sum. Both tables show data for various depths and provide a 'Very low possibility of liquefaction' status for each row.

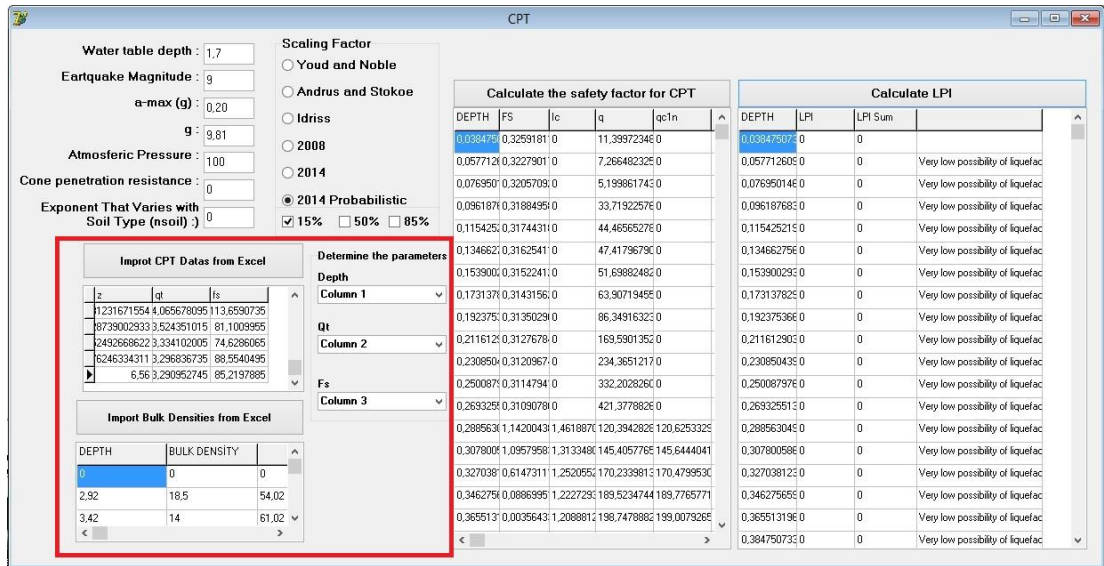
Şekil 2.11: Bilgi tabanlı karar-destek sistemi arayüzü

Gerekli parametrelerin girilmesinin ardından Excel dosyasına aktarılan CPT verilerinin dosyadan programa aktarılması için arayüzdeki “Import CPT Datas ...” ve “Import Bulk Densities...” butanları sırası ile kullanılır (Şekil 2.12). Arayüz ekranındaki sol alt kısma aktarılan CPT ve Bulk Density verilerinin ardından

“Determine the Parameters” segmesinden Depth, Conic Penetration Resisitance, Friction değerleri çağrılan excell verilerinde bu değerlerin olduğu sütunları ile eşleşecek şekilde seçilir (Şekil 2.13).



Şekil 2.12: Excel dosyasından CPT verilerinin aktarılması



Şekil 2.13: Verilerin arayüzde girilmesi, eklenmesi ve uygun CPT sütunlarının seçilmesi

Veri bölgesinden elde edilen verilerin arayüzde girilmesi, eklenmesi ve uygun CPT sütunlarının seçilmesinin ardından kullanılmak istenen sıvılaşma potansiyeli yöntemi seçilerek “Calculate the safety factor for CPT” butonuna tıklanılır ve elde edilen veriler butonun altındaki grid sekmesinde görülür. Sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi için son adım olarak “Calculate LPI” butonu seçilir ve hesaplama sonucu altındaki grid de gösterilir. Tüm bu prosedürler sonunda bölgeden elde edilen CPT

verileri ve uygun görülen yöntem ile bölgenin sınılaşma potansiyeli belirlenmiş olur. Elde edilen tüm hesaplama verileri “Calculate LPI” butonun altındaki grid e çift tıklama sonucu excel dosyası olarak çıktı halinde sunulur (Şekil 2.14). Yazılan delphi kodu ekler kısmında bulunabilir.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
DEPTH	FS	LPI	LPI Sum	lc	q	qc1n	cq	MSF	CRR	CSR	qcncs				
0,038475	0,624796	0	0	0	11,39972	0	0	0,529396	0,102841	0,087138	64,38402				
0,057713	0,6188	0	0	0 Very low	7,266482	0	0	0,529396	0,102841	0,087983	64,38402				
0,07695	0,614545	0	0	0 Very low	5,199862	0	0	0,529396	0,102841	0,088592	64,38402				
0,096188	0,611246	0	0	0 Very low	33,71923	0	0	0,529396	0,102841	0,08907	64,38402				
0,115425	0,608549	0	0	0 Very low	44,46565	0	0	0,529396	0,102841	0,089465	64,38402				
0,134663	0,60627	0	0	0 Very low	47,41797	0	0	0,529396	0,102841	0,089801	64,38402				
0,1539	0,604295	0	0	0 Very low	51,69882	0	0	0,529396	0,102841	0,090094	64,38402				
0,173138	0,602554	0	0	0 Very low	63,90719	0	0	0,529396	0,102841	0,090355	64,38402				
0,192375	0,600996	0	0	0 Very low	86,34916	0	0	0,529396	0,102841	0,090589	64,38402				
0,211613	0,599587	0	0	0 Very low	169,5901	0	0	0,529396	0,102841	0,090802	64,38402				
0,23085	0,5983	0	0	0 Very low	234,3651	0	0	0,529396	0,102841	0,090997	64,38402				
0,250088	0,597117	0	0	0 Very low	332,2028	0	0	0,529396	0,102841	0,091178	64,38402				
0,269326	0,596021	0	0	0 Very low	421,3779	0	0	0,529396	0,102841	0,091345	64,38402				
0,288563	0,139858	0	0	0 Very low	1,461887	120,3943	120,6253	4,328065	-0,04838	2,283758	-0,79008	203,2726			
0,307801	10463,97	0	0	0 Very low	1,313348	145,4058	145,6444	4,190631	-0,74257	687,9527	-0,04882	262,8957			
0,327038	28575371	0	0	0 Very low	1,252055	170,234	170,48	4,065509	-1,3743	513061,3	-0,02468	300,2274			
0,346276	6,75E+10	0	0	0 Very low	1,222729	189,5235	189,7766	3,950965	-1,95405	5,62E+08	-0,01626	327,7952			
0,365513	5,59E+12	0	0	0 Very low	1,208881	198,7479	199,0079	3,845587	-2,26641	3,35E+10	-0,01356	340,9027			
0,384751	2,15E+16	0	0	0 Very low	1,19825	213,8085	214,0752	3,748214	-2,82089	7,73E+13	-0,01014	361,9603			
0,403988	2,52E+21	0	0	0 Very low	1,237997	232,4255	232,6989	3,657883	-3,55309	5,05E+18	-0,00713	386,4816			
0,423226	2,62E+25	0	0	0 Very low	1,262961	245,1882	245,468	3,573782	-4,09977	3,53E+22	-0,00552	402,9419			
0,442463	8,55E+27	0	0	0 Very low	1,282933	252,8114	253,0975	3,495228	-4,42889	9,07E+24	-0,0047	412,2362			
0,461701	4,95E+29	0	0	0 Very low	1,282624	257,2743	257,5665	3,421636	-4,65522	4,51E+26	-0,00424	418,3924			
0,480938	8,26E+30	0	0	0 Very low	1,264524	259,4616	259,7599	3,352505	-4,81063	6,87E+27	-0,004	422,5168			
0,500176	4,72E+29	0	0	0 Very low	1,283607	257,2806	257,5848	3,287401	-4,65365	4,39E+26	-0,00432	418,3505			
0,519413	1,34E+28	0	0	0 Very low	1,301818	254,3578	254,6678	3,225949	-4,45557	1,43E+25	-0,00476	412,9715			
0,529032	8,69E+27	0	0	0 Very low	1,294321	253,4398	253,7527	3,196488	-4,43182	9,53E+24	-0,00486	412,3173			
0,538651	1,45E+27	0	0	0 Very low	1,293372	251,3475	251,6632	3,167819	-4,33132	1,72E+24	-0,00514	409,5247			
0,557889	8,84E+26	0	0	0 Very low	1,289973	250,5974	250,9186	3,112723	-4,30385	1,08E+24	-0,00526	408,7548			
0,577126	2,62E+26	0	0	0 Very low	1,308425	250,246	250,5728	3,060404	-4,23442	3,35E+23	-0,00542	406,796			
0,586745	6,46E+27	0	0	0 Very low	1,296538	253,2411	253,5705	3,035215	-4,41656	7,35E+24	-0,00502	411,8957			
0,596364	6,72E+27	0	0	0 Very low	1,312613	254,2852	254,6173	3,010638	-4,41831	7,57E+24	-0,00497	411,944			
0,615601	4,32E+30	0	0	0 Very low	1,294577	260,2372	260,5747	2,963224	-4,7777	3,85E+27	-0,00425	421,6498			

Şekil 2.14: Hesaplama verilerinin excell dosyası olarak çıktı halinde sunulması



### 3. 2011 TOHOKU JAPONYA DEPREMİNDE ITAKO ŞEHRİNİN BİNA STOĞUNUN SIVILAŞMA ŞİDDET PAREMETRELERİYLE DEĞERLENDİRİLMESİ

Sismik eylemlerden kaynaklanan zemin sıvılaşması, farklı altyapı türleri için önemli bir sorundur (örn., Toprak ve Jinguuji 2006; Yasuda ve diğ. 2012; Yamaguchi ve diğ. 2012; Bray ve diğ. 2014; Toprak ve diğ. 2014; Toprak ve diğ. 2015). Sıvılaşma sonucu zemin çökmesi, zemin taşıma gücü yetersizliği ve yanal yayılma hasarları oluşabilir. Sıvılaşma ve ilgili hasarın tahmini, ünlü 1964 Niigata ve Alaska depremlerinden bu yana mühendisler, şehir plancıları ve bilim adamları için büyük bir ilgi kaynağı olmuştur. Bu çalışma 2011 Japonya Depremi'nden gelen verileri kullanarak zemin sıvılaşmasının görülme şiddetini tahmin etmek için iki sıvılaşma şiddeti parametresini değerlendirmektedir. Bu yöntemler sıvılaşma potansiyel indeksi (LPI) ve sıvılaşma şiddet katsayısı (LSN) parametreleridir (Tonkin ve Taylor 2013; Van Ballegooy ve diğ. 2015<sup>a</sup>, 2015<sup>b</sup>).

2011 Büyük Doğu Japonya Depremi sırasında, merkez üssünden uzakta olmasına rağmen, Tone nehri ve Tokyo Kıyısı kıyılarında geniş sıvılaşma hasarı meydana gelmiştir.  $M_w = 9.0$  büyüklüğündeki 2011 Büyük Doğu Japonya Depremi, 11 Mart 2011 tarihinde 14:46:33 Japonya'nın ana adasının kuzey doğu kıyısından yaklaşık 130 km uzaklıkta, Pasifik Okyanusu'nda meydana gelmiştir. Bu deprem, Pasifik tektonik plakasının Japonya Anakarasının altında Okhotsk plakasında 24 km'lik bir merkez derinlikte olurken çok büyük miktarda enerji salınımı açığa çıkmıştır. Bu deprem Japonya'daki sismik gözlemin başlamasından bu yana geçen 150 yıllık süreçte kaydedilen en büyük depremdir. Ardından oluşan iki büyük ölçekli artçı depremlerden ilki 15:09'da kuzeyde  $M = 7.4$  büyüklüğünde, ikincisi ise 15:15' de güneyde  $M = 7.7$  büyüklüğünde aynı gün içinde gerçekleşmiştir. Bu depremin hiposentral bölgesi yaklaşık 500 km uzunluğunda ve 200 km genişliğindedir. Depremi, birçok şehri yok eden ve Pasifik Kıyısı boyunca birçok insanı öldüren ve yaralayan büyük bir tsunami izlemiştir.

2011 Büyük Doğu Japonya Depremi'nden sonra Ulusal İleri Bilim ve Teknoloji Enstitüsü (AIST), 143 CPT sondajı ile Itako şehrinin Hinode bölgesinde sıvılaşma alanlarında birçok farklı test gerçekleştirmiştir. Tone Nehri ve Kasumigaura Gölü

birleşiminde bulunan Itako kentinin doğu kesiminde bulunan Hinode, 2011'deki büyük depremde sıvılaşma nedeniyle ağır hasar gören bir yerleşim alanıdır. 1970'lerde bu bölge ıslah edilmiş ve yerleşim alanı olarak geri kazanılmıştır. Geri kazanım için kullanılan kum Kasumigaura Gölü'nden temin edilmiş ve kum sıkıştırması gibi herhangi bir sıvılaşma önlemi uygulanmadan doğal halde doldurulmuştur. Sıvılaşma hasarı, ıslah alanında yoğunlaşmış ve arazi çökmesi veya kum kaynaması olayları gibi sıvılaşma belirtileri geri kazanılan Hinode alanının dışında tespit edilmemiştir. Bu nedenle, Kasumigaura Gölü'nden gelen geri kazanılmış kumun sıvılaşmaya neden olduğu bilinmektedir.

Sıvılaşma şiddet parametrelerinden LPI değeri sıvılaşma potansiyeline sahip olmayan bir alan için 0'dan, 20 metrelik derinlik aralığında emniyet faktörünün sıfır olduğu bir alan için en fazla 100'e kadar değişebilir. LPI, emniyet faktörlerini tahmin etmek için basitleştirilmiş prosedüre (Seed ve Idriss, 1971) dayanıyor olsa da, LPI ile tahmin basitleştirilmiş prosedür ile yapılan öngöründen farklıdır. Basitleştirilmiş prosedür, bir zemin elementinin performansını öngörürken, LPI, tüm zemin kolonunun 20 m derinliğe kadar performansını öngörür. Sıvılaşma tehlikesinin coğrafi değişkenliğini tanımlamak için LPI sıvılaşma tehlike haritalaması için öne çıkan bir yöntem olmuştur. Bunun örnekleri (Frost ve diğ. 1997; Papathanassiou ve diğ 2005; Holzer ve diğ. 2006; Lenz ve Baise 2007; Hayati ve Andrus (2008); Yalcin ve diğ. 2008; Chung ve Rogers 2011; Cramer ve diğ. 2008, ve Holzer ve diğ. 2003; 2011) yapılan çalışmalarda görülmektedir.

Iwasaki ve diğ. (1982) ve Toprak ve Holzer (2003) LPI'yi sıvılaşma şiddeti ile karşılaştıran vaka incelemelerini diğer yöntemlerle karşılaştıran çalışmalar yapmışlardır. Iwasaki ve diğ (1982), altı deprem için Japonya'daki 85 yerde standart penetrasyon testi (SPT) verilerini kullanarak, şiddetli sıvılaşmanın LPI'si 15'in üzerinde olduğu bölgelerde muhtemel olduğu ve LPI'si 5'in altında olan bölgelerde şiddetli sıvılaşma olasılığı bulunmadığı sonucuna varmıştır. Toprak ve Holzer (2003), koni penetrasyon testi (CPT) verilerini kullanarak sıvılaşma yüzey belirtilerini korelasyona uğradığı 1989 Loma Prieta, California, depremi için kum kaynaması ve yanal yayılmanın sırasıyla LPI'nin 5 ve 12 olduğu yerde ortaya çıktığı sonucuna varmışlardır. Kaliforniya'daki farklı alanlardaki sıvılaşma çalışmalarında CPT sondajlarına dayanan LPI değerleri ile Iwasaki ve diğ. (1982) tarafından Japon

sıvılaşma alanlarındaki SPT sondajlarına dayanan LPI değerleri arasındaki eğilimlerdeki benzerlik ümit vericidir. Maurer ve diğ. (2014),  $M_w$  7.1 Darfield ve  $M_w$  6.2 Christchurch depremlerinden Yeni Zelanda'daki Christchurch'teki sıvılaşma tehlikesinin değerlendirilmesinde LPI'yi kullanmışlardır. Sıvılaşma oluşmasının ciddiyetinin genellikle LPI arttıkça arttığını ve böylece tüm sondajlar (1173 CPT) dikkate alındığında marjinal, orta ve şiddetli sıvılaşma için medyan LPI değerlerinin sırasıyla 8.4, 13.1 ve 21.0 olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca, Iwasaki kriterinin, sıvılaşma olayından daha çok hasar potansiyelini değerlendirmek için daha uygun olduğunu belirtmişlerdir. Yakın bir tarihte, Jinguuji ve Toprak (2017), 2011'deki Büyük Doğu Japonya Depremi sırasında Itako Şehri'nin Hinode bölgesinde meydana gelen şiddetli sıvılaşma hasarını araştırdılar. 143 tane CPT verisi kullanarak yapılan LPI analizinde, LPI dağılımının çalışma alanında meydana gelen bazı hasarlar ile örtüşüğünü ve bazıları ile ise anlamlılık oluşturmadığını gözlemlemişlerdir.

2010 ve 2011 yıllarında Canterbury Deprem sıralamasını takiben, Sıvılaşma şiddeti katsayısı (LSN) olarak bilinen yeni bir sıvılaşma şiddet parametresi, Christchurch'teki zemin koşullarına daha iyi adapte edilmiş ve mühendislikle tutarlı bir sıvılaşma şiddetinin göstergesi olarak sıvılaşmayla ilgili bilimsel ilkeler eşliğinde geliştirilmiştir (Tonkin ve Taylor 2015). Araştırmacılar, Canterbury Deprem Sıralamasında mevcut sıvılaşma parametrelerinin yerleşim alanlarının altındaki karmaşık ara katmanlı Christchurch zemin profillerinde uygulanmasının pratik olmadığı ve arazi hasarına neden olan mekanizmaları uygun bir şekilde yakalanamamasından dolayı uygun olmadığını düşünmüşlerdir. Yeni geliştirilen LSN parametreleri CPT, kuyu sondajı ve yer altı suyunun derinliği modellerinin sonuçlarını kullanarak hesaplamaktadır, dolayısıyla LSN, gelecekteki bir deprem olayında jeoteknik araştırma verilerinden gelen tahmini sıvılaşma hassasiyetini tahmin etmek için kullanılabilir.

Toprak ve Holzer (2003) ile Maurer ve diğ. (2014), çalışmalarında LPI'ları belirlemek için Robertson ve Wride (1998) 'in Youd ve diğ. (2001) tarafından ortaya konan basitleştirilmiş Konik Penetrasyon Testi (CPT) temelli sıvılaşma tetikleme yöntemlerini kullandı. Öte yandan Jinguuji ve Toprak (2017) yılında Japonya'daki en popüler analiz olan Japonya Mimarlık Enstitüsü (AIJ 1988; 2001) kılavuzlarında verilen sıvılaşma tetikleme yöntemini kullandı. Farklı sıvılaşma değerlendirme

prosedürlerine dayalı olarak LPI hesaplaması, sıvılaşma şiddet gözlemlerine göre ayrı ayrı kalibre edilmelidir. Bu çalışma, LPI çerçevesinde kullanılan seçilmiş sıvılaşma değerlendirme prosedürünün, tehlike değerlendirmelerinin doğruluğu üzerindeki etkisini değerlendirmektedir. Diğer bir deyişle, sıvılaşma değerlendirme prosedürü, bu durumda bina hasarı olan sıvılaşma hasarına karşı değerlendirilir. Bina hasar seviyeleri tanımlamasında, binaların açısız bozulması ( $\beta$ ),  $\delta/L$ ,  $\delta$  iki nokta arasındaki toplam yerleşimdeki farkı temsil eder ve L, iki nokta arasındaki mesafeyi temsil eder. Hasar olmayan ve hasar seviyesi 1, 2 ve 3 olan binalar için  $\beta$  eşik değerleri sırasıyla 1/100, 1 / 100-1 / 60, 1 / 60-1 / 20 ve > 1/20 karşılık gelir.

LSN parametresi LPI'nın bu çalışmada değerlendirilme şekline benzer şekilde değerlendirilmiştir. LSN son zamanlarda önerilen bir parametredir ve Yeni Zelanda depremleri haricindeki verilerle kalibre edilmemiştir. Van Ballegooy ve diğ. (2015<sup>a</sup>), Christchurch genelinde yaklaşık 15.000 CPT için ilgili sıvılaşma şiddeti katsayısını (LSN) hesaplayarak ve bu hesaplanan değerleri, sıvılaşma kaynaklı arazi hasar gözlemleriyle ilişkilendirerek bölgesel olarak dört temel CPT temelli basitleştirilmiş sıvılaşma değerlendirme yöntemini 2010 - 2011 Canterbury Depremleri (CES) ile karşılaştırmıştır. Mühendislik uygulamasında bu yöntemler Robertson ve Wride (1998), Moss ve diğ. (2006), Idriss ve Boulanger (2008) ve Boulanger ve Idriss (2014) tarafından kullanılmıştır. Dört yöntemin hepsinin, gözlenen arazi hasarı ile LSN sıvılaşma hassasiyet parametresi arasında makul korelasyonlar sağladığı gözlenirken Boulanger ve Idriss (2014) sıvılaşma tetikleme yöntemi, CES boyunca ana olayların her biri için gözlemlenen arazi hasarına en iyi uyumu sağlamıştır ve ayrıca zemin yüzeyinde sıvılaşma ile tetiklenen zemin hasarına ve sıvılaşmaya bağlı arazi hasarıyla gözlenen siteler arasında en iyi farklılaşmayı sağlamıştır. Van Ballegooy ve diğ. (2014<sup>a</sup>) ile Chapman ve diğ. (2015) sığ temeller üzerinde yerleşim alanlarındaki sıvılaşma etkileri hakkındaki değerlendirmelerini sunmuş ve sıvılaşmadan kaynaklanan zemin hasarının yerleşim yeri temel deformasyon hasarıyla güçlü bir şekilde ilişkili olduğunu bulmuşlardır. Yapılan çalışmaları, yaklaşık 65.000 sigortalı yerleşim biriminin her birinde sigorta hasar tespiti amacıyla yaklaşık 400 mühendis ekibi tarafından üstlenilen ayrıntılı bir kara hasar kontrol programının sonucudur. Van Ballegooy ve diğ. (2014<sup>a</sup>) tarafından belirlenen kriterlere göre evlerin temelindeki gözle görülür hasarlar kaydedilmiştir. Yedi farklı bina hasarı tanımlanmış ve zararları temel yerleşim miktarlarına göre az, orta ve ağır olmak üzere üç farklı seviyeye

sınıflamışlardır. Bununla birlikte, temel veriler, diferansiyel yerleşimin gerçekleştiği uzunluktan bağımsızdır. Bu, verilerinin bir sınırlamasıdır çünkü üstyapı hasarını etkileyen önemli bir faktör olan açılma bozulma bileşeni mevcut değildir.

Bu çalışmada, LPI ve LSN, sınıflamanın ciddiyetine ve özellikle sınıflama oluşumunu tahmin etmekten ziyade bina hasarına bağlı olarak değerlendirilmiştir. LPI ve LSN'yi hesaplamak için CPI tabanlı basitleştirilmiş dört sınıflama değerlendirme yöntemi kullanılmış ve bunlar 2011 yılında meydana gelen Büyük Doğu Japonya Depremi sırasında Japonya'daki, Itako şehri, Hinode bölgesinde görülen sınıflama kaynaklı yapı hasarı ile ilişkilendirilmiştir. Bu korelasyonlar sınıflama değerlendirme yöntemlerinin LPI ve LSN üzerindeki etkilerini değerlendirmek ve ayrıca LPI ve LSN'yi kalibre etmek için kullanılmıştır. Seçilen dört yöntem şunlardır: Robertson ve Wride (1998), Idriss ve Boulanger (2008), Boulanger ve Idriss (2014), Japonya Mimarlık Enstitüsü (1988; 2001) tarafından geliştirilen Japonya Mimarlık Enstitüsü (AIJ) yöntemidir. Seçilen dört yöntem Japonya, Amerika ve dünyanın diğer bölgelerinde mühendislik uygulamalarında en yaygın olanlardır. Bundan sonra, bu yöntemler sırasıyla RW1998, IB2008, BI2014 ve AIJ2001 olarak adlandırılacaktır.

### 3.1 Çalışma Bölgesi ve Verileri

Ulusal Gelişmiş Endüstriyel Bilimler ve Teknolojiler Enstitüsü (AIST), 2011 Büyük Doğu Japonya Depremi'nden 2012-2014 yılları sonrasında Ton Nehri'nin alt bölgeleri boyunca sınıflama araştırması ve büyük ölçekli araştırmalar gerçekleştirdi (Mitsuata ve diğ. 2014). Hinode alanında bir çok penetrasyon testleri ve jeofizik keşif gibi birçok çalışma gerçekleştirildi. 143 CPT sondajından elde edilen veriler, veri belirsizliğini azaltmak için aynı ekipmanı kullanarak tek bir şirket tarafından toplanmıştır. Bu çalışmada, inceleme için bir paletli tip CPT kamyonu kullanılmıştır. 8 tonluk kamyonu monte edilen CPT, istif aracının kendi kütlesini karşı ağırlık olarak kullanılmıştır. CPT aracı, bir inceleme noktasından diğerine kolaylıkla geçmiş ve gerekli karşı ağırlığı sağlamak için çapa direkleri kurma gibi özel prosedürleri gerektirmeden operasyonu yürütmüştür.

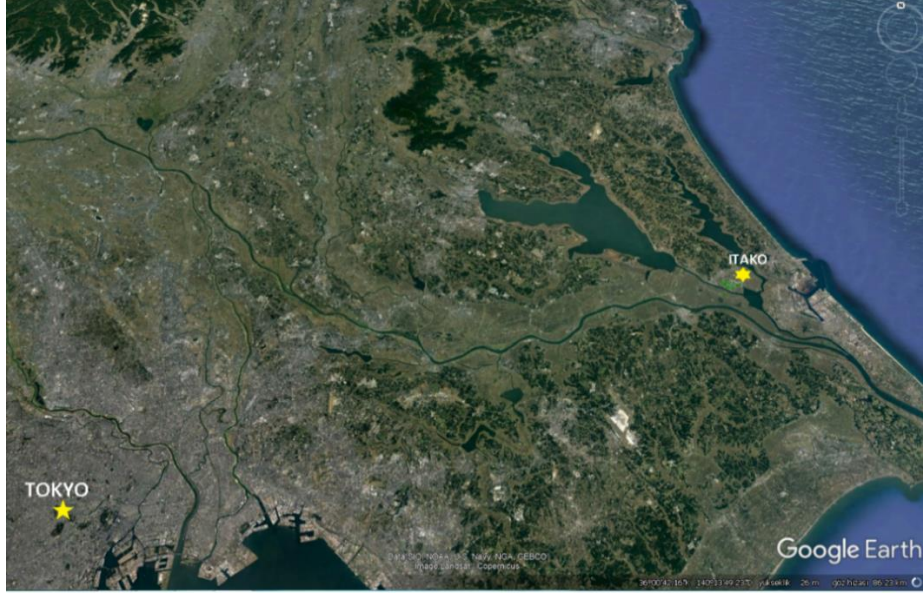
Şekil 3.1'de, çalışma alanı, CPT yerleri ve zemin profilleri için seçilen üç kesit gösterilmektedir. Şekil 3.2, bölgedeki A-A', B-B' ve C-C' çizimleri boyunca zemin

profillerini göstermektedir. Kum dolgusu (Fs) siltli kil ( $A_c$ ) üzerinde yer almaktadır. Kum dolgu kalınlığı yaklaşık 2 m ile 6 m arasında değişir ve siltli kilinin ( $A_c$ ) kalınlığı 0 m ile 14 m arasında değişmektedir. Zemin su tablası seviyeleri zemin profilleri üzerinde gösterilmiştir. Kum dolgusu Hinode bölgesinin güney ve kuzey orta bölümlerinde en kalındır. Siltli kilin ( $A_c$ ) en kalın olduğu yer güneyde, yeraltı suyunun en sık olduğu yerdedir. Su tablası seviyesi 0.5m ve 2.4 m arasında değişmektedir. Kum dolgusu kalınlığı, siltli kil ve bölgedeki yeraltı su derinlikleri gösteren haritalar Jinguuji ve Toprak (2017) 'de bulunabilir.

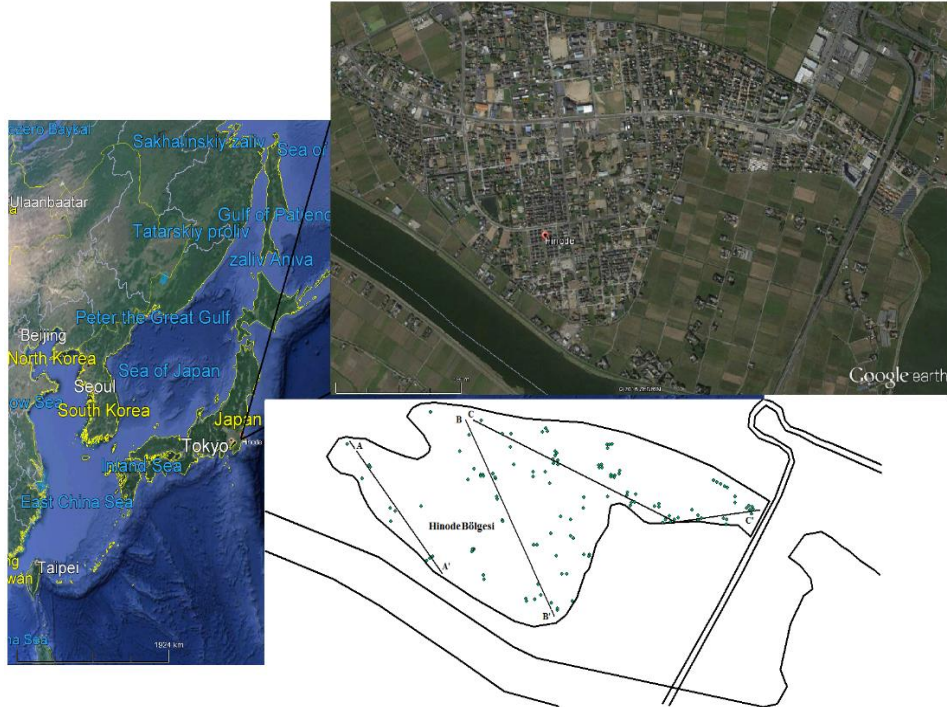
Hinode bölgesindeki sıvılaşma alanında, bina temellerinde yayılmalar ve çökmelere, kazık temellerle destekli olan binalardaki oturmalar, gömülü boru hatlarının ve yolların yükselmesine neden olmuştur. Depremden hemen sonra Hinode bölgesinde su temini ve kanalizasyon sistemleri durmuştur. Sıvılaşma hasarı Kasumigaura Gölü'nden akan Ton Nehri'nin bir kolu olan Hitachi-Ton Nehri'nin bulunduğu alanın güney kesiminde daha büyük olmuştur. Zemin oturması güneyde Itako Kanalizasyon Arıtma Tesisi'nin yakınında 40-50 cm, kuzeyde 10 cm ve daha az olarak gözlemlenmiştir (Tokimatsu ve diğ. 2013). Jinguuji ve Toprak (2017) de sunulan kum kaynaklarının dağılımını (Itako City, 2014) ve binanın yapısal hasarının boyutunu (Japonya Jeoloji Derneği 2013) gösteren iki hasar haritası mevcuttur. Bu haritalardaki bina hasar yerleri coğrafi bilgi sistemleri (CBS) kullanılarak sayısallaştırılmış ve Şekil 3.3'te gösterildiği gibi çalışma alanının haritası üzerine bindirilmiştir.

LPI ve LSN hasarları arasındaki korelasyon analizi için CBS kullanılmıştır. Binaların yapısal hasarının derecesi üç seviyeye ayrılmıştır: 1) hafif eğilme 2) orta derecede eğilme 3) yüksek eğilme. Herhangi bir binanın hasar seviyesi Itako şehir personelinin soruşturmasıyla belirlenmiştir. Bu kategoriler, hükümet tarafından bina sahiplerinin tazminat ücretini hesaplamak için kullanılmıştır. Hinode'da 987, 1064 ve 110'un hasar seviyesi sırası ile az, orta ve ağır olan toplam 2159 hasar görmüş bina bulunmaktadır. Hasar seviyeleri, binaların açılma bozulma ( $\beta$ ) değerleri ile belirlenmiştir.  $\delta/L$ , burada  $\delta$  iki nokta arasındaki toplam yerleşimdeki farkı, L ise iki nokta arasındaki mesafeyi temsil eder. Hasarsız ve hasar seviyesi az, orta ve ağır eşikleri için ,  $\beta$  sırasıyla 1/100, 1/100-1/60, 1/60-1/20 ve  $> 1/20$ 'ya karşılık gelir. Perspektiften bakarsak, 1/150, genel inşaat inşasında pratikte birtakım hasarların

gözlemlenebilmesi için bir sınır olarak kabul edilir (Das, 2014). LSN ve LPI hesaplamaları için kullanılan yer ivmesi 200 Gal ve deprem büyüklüğü 9.0 alınmıştır (Şekil 3.4). Bu değerler, Itako Şehri yakınlarında gözlemlenen zemin ivmesine ve 2011 Büyük Doğu Japonya Depremi'nin büyüklüğüne karşılık gelmektedir (Örneğin .



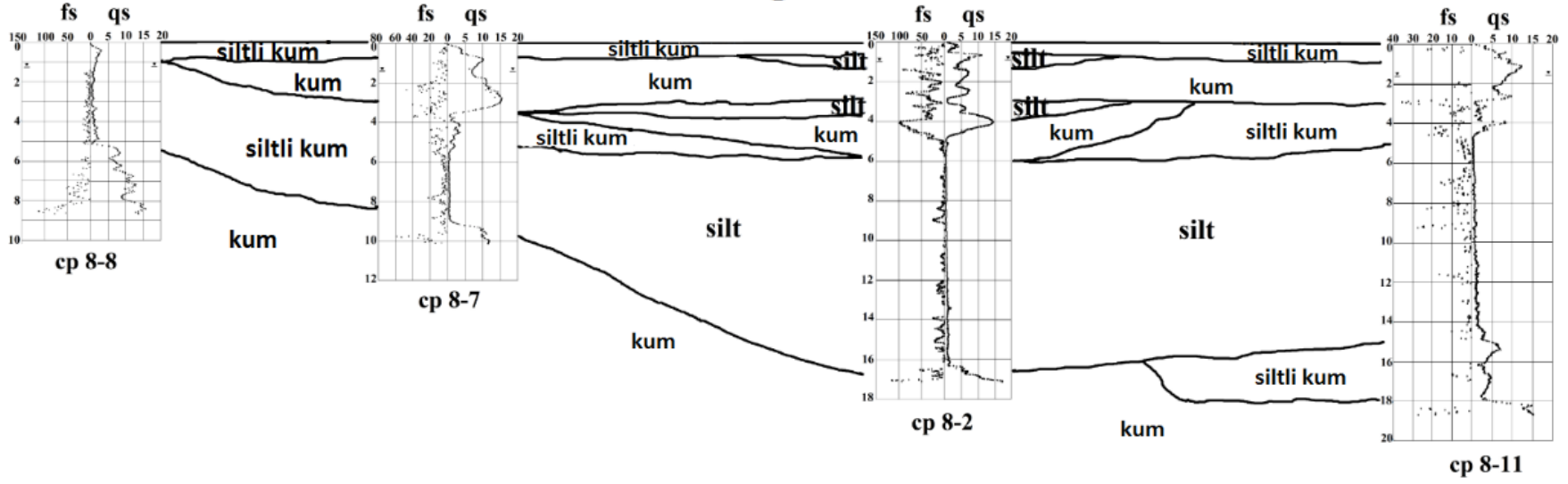
a) Itako Şehri



b) Hinode Bölgesi

Şekil 3.1: Çalışma Alanı Itako Şehri ve Hinode Bölgesi

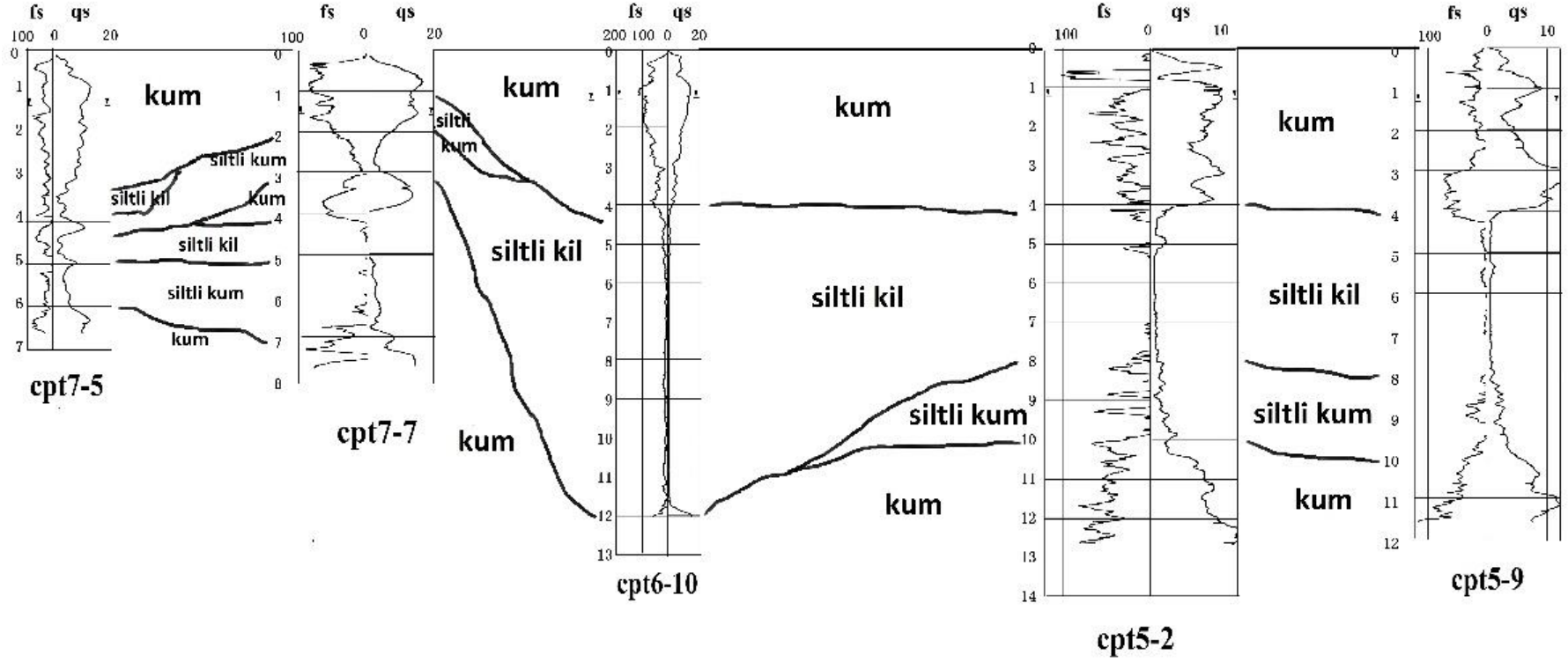
## CPT Değerleri



a) A-A' çalışma alanındaki zemin profili

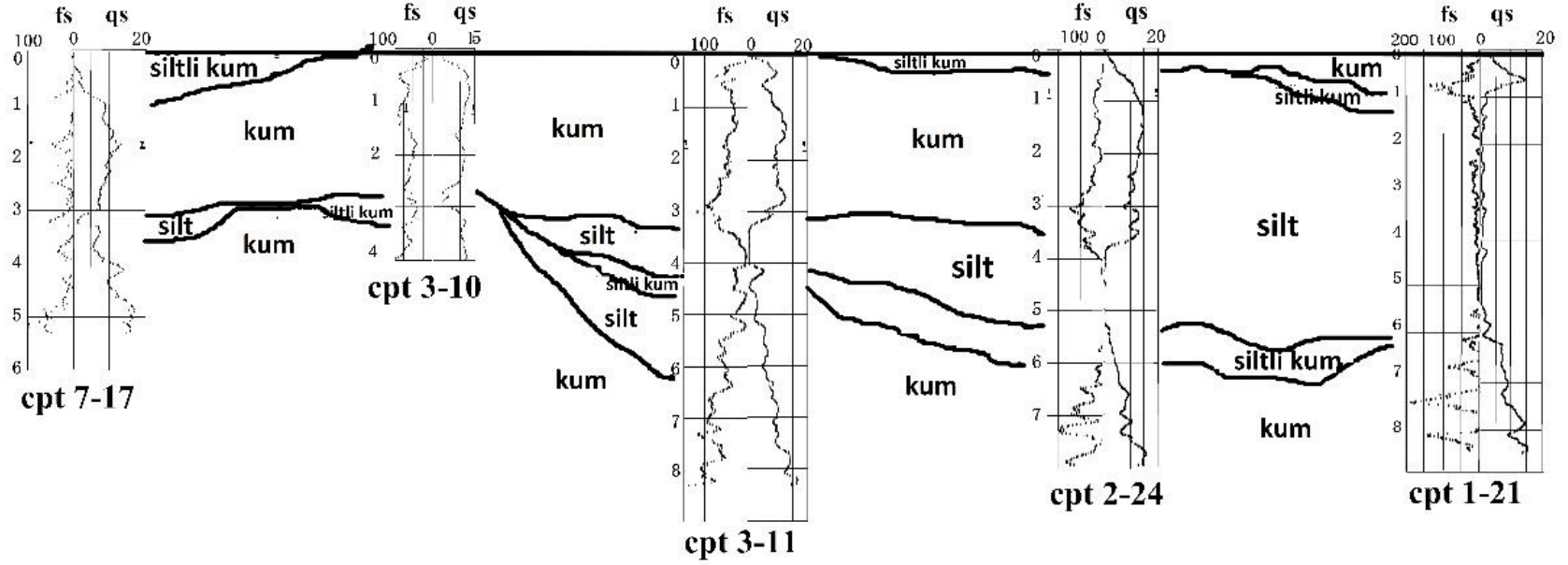


## CPT Değerleri



b) B-B' çalışma alanındaki zeminprofili

## CPT Değerleri

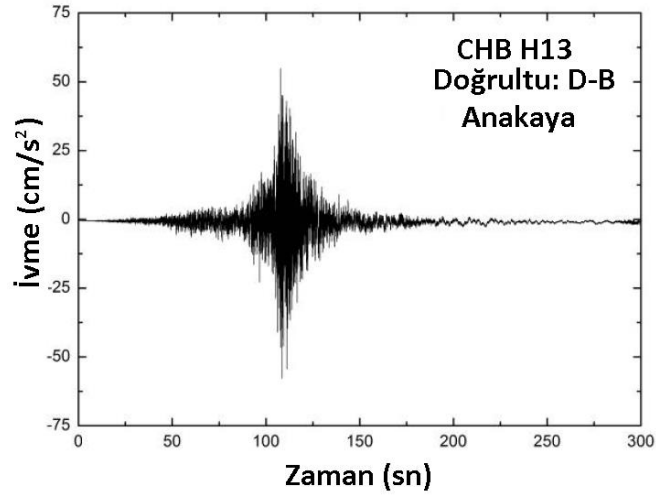


c) C-C' çalışma alanındaki zemin profili

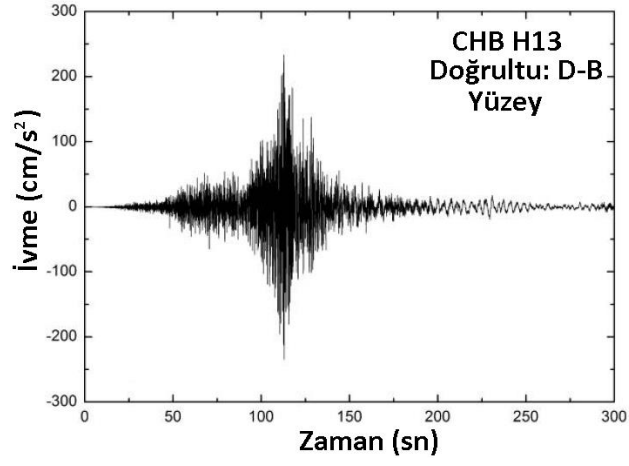
Şekil 3.2: Hinode bölgesinde seçilen üç kesit için zemin profili



Şekil 3.3: Hinode bölgesi bina hasarları



a) Doğu-Batı yönü ivme kaydı (Anakaya)



b) Doğu-Batı yönü ivme kaydı (Yüzey)

**Şekil 3.4:** a) Anakaya ve b) Yüzeyde, CHB013 konumundaki K-Net ivme-zaman kayıtları (Lenart ve diğ. 2012)

### 3.2 Sıvılaşma Analizi

Dünyada en yaygın kullanılan sıvılaşma değerlendirme yöntemi, H. Bolton Seed ve meslektaşları tarafından geliştirilen "basitleştirilmiş prosedür"dür (Seed ve diğ. 1983). Başlangıçta standart penetrasyon testine (SPT) dayanan prosedür, konik penetrometre testini (CPT) içerecek şekilde genişletilmiştir (Robertson ve Campanella 1985). Seed ve İdriss (1971), çevrimsel kayma gerilmesi oranı (CSR) hesaplanması için aşağıdaki denklemi formüle etmiştir:

$$CSR = \left( \frac{\tau_{av}}{\sigma'_{vo}} \right) = 0.65 \left( \frac{a_{max}}{g} \right) \left( \frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \right) r_d \quad (3.1)$$

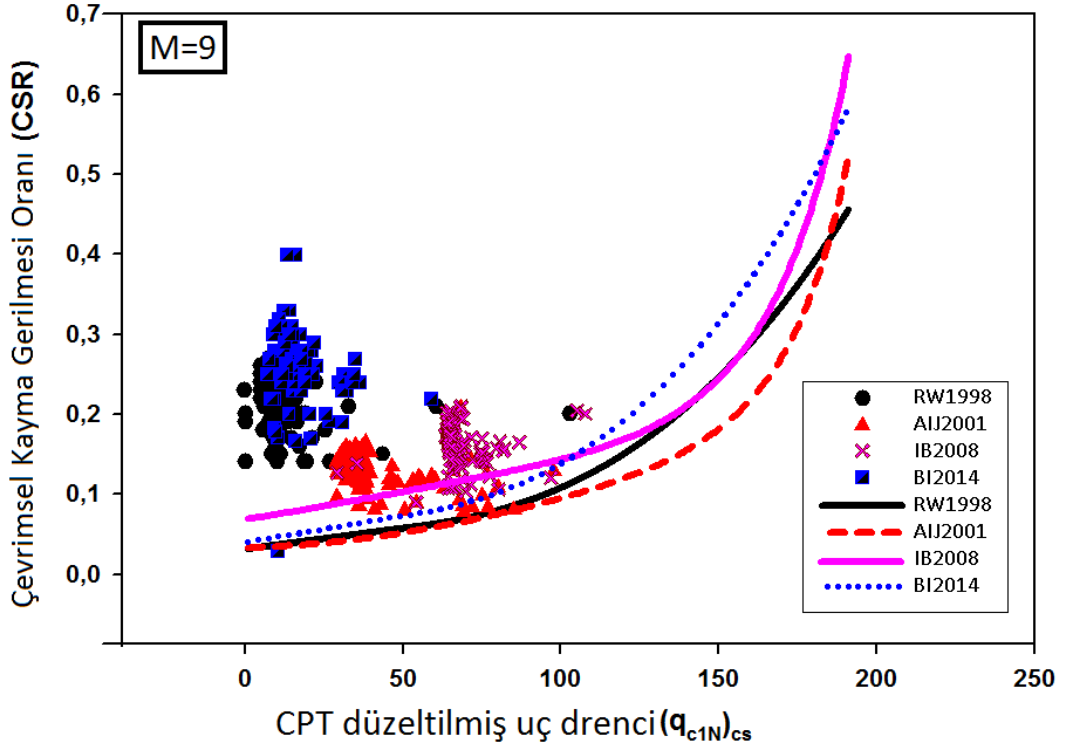
burada,  $a_{max}$  = deprem tarafından üretilen yüzeydeki en büyük yatay ivme,  $g$  = yerçekimi ivmesi;  $\sigma_{vo}$  and  $\sigma'_{vo}$  'sırasıyla toplam ve efektif düşey gerilmeleri; ve  $r_d$  = gerilme azaltma katsayısıdır.

Basitleştirilmiş prosedürü kullanarak, sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısı, çevrimsel kayma mukavemeti oranı (CRR), CSR'ye bölmek suretiyle hesaplanır. Benzer bir prosedürü, farklı araştırmacılar sıvılaşma değerlendirme için bazı katsayılarla birlikte kendi CRR eğrilerini kullanan prosedürler önermişlerdir. Bu çalışmada, bu tür dört CPT tabanlı prosedür kullanılmıştır; RW1998, IB2008, BI2014, AIJ2001. Bunlar, Japonya, Amerika ve dünyanın diğer yerlerinde mühendislik uygulamalarında kullanılan en yaygın yöntemlerdir.

Sıvılaşma analizi, dört metodoloji kullanılarak her CPT sondajı için gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.5, dört prosedür tarafından önerilen CPT-esaslı sıvılaşma sınır eğrilerine göre çizilen sonuçtaki CSR ile  $(q_{c1N})_{cs}$  verilerini göstermektedir. Sınır eğrileri, 2011 Büyük Doğu Japonya deprem büyüklüğü için ilgili prosedürler tarafından önerilen MSF'ler kullanılarak düzenlenmiştir. Şekil 3.4'te görülen her bir CPT için CSR ve  $(q_{c1N})_{cs}$  değerlerini belirlemek için önce zemin profilleri CPT sondajlarından elde edilen ve sonra, ortalama  $q_{c1N}$ , Boulanger ve diğ. (1997)'ni takiben 0.6 m aralıklarla tespit edilmiştir. Kritik katman, minimum ortalama değerdir. Bu 0,6 m ortalama işlemi sırasında, tabakalardaki sıvılaşabilir katman hesaba katılmıştır. Dolayısıyla, sıvılaşma açısından "zincirde en zayıf halka" olan zemin katmanının bulunmasında, uç direncini ve sürtünme oranının hesaba katılması gerekmektedir. Sıvılaşma için kritik tabaka seçimi, zemin profilindeki zayıf tabakayı belirlemek için önemli bir adımdır. Kritik bir tabakayı tanımlamak için ikinci bir yöntem, mevcut korelasyonlara dayanan çevrimsel kayma mukavemeti oranının (CRR) profilini hesaplamak ve kritik tabakayı en küçük CRR'yi olarak almaktır (Moss ve diğ. 2006). Bu, önceden belirli bir sıvılaşma tetikleme prosedürlerinin seçimini gerektirir. Bu nedenle bu yöntem kullanılmamıştır, fakat dört farklı prosedürden  $(q_{c1N})_{cs}$  değerlerinin karşılaştırılması ile seçilen kritik tabakaların dört farklı prosedürden  $(q_{c1N})_{cs}$  değerleri kullanıldığında katmanlarla genel olarak uyumluluk göstermiştir.

Şekil 3.5'te görüldüğü gibi, tüm noktalar ilgili CRR eğrisinin yukarısına düşmektedir ki bu da sınır eğrilerinin tahmin edilen sıvılaşma oluşumunu iyi ayırt ettiğini göstermektedir. RW1998 ve AIJ2001 prosedürünün verileri birbiriyle genel

olarak uyum içindeyken AIJ2001 prosedürünün CSR verileri daha yüksek olduğu belirlenmiştir. IB2008 ve BI2014 verileri diğer değerlendirmele göre birbirinden önemli ölçüde farklıdır. Bu sonuçlar, her prosedürün bütünlüğü ile kullanılması gerektiğini açıkça göstermektedir.



Şekil 3.5: CPT bölgelerinde sıvılaşma değerlendirme

### 3.3 Sıvılaşma Şiddetleri ve Bina Hasar İlişkileri

LPI ve LSN değerleri Robertson ve Wride (1998), Idriss ve Boulanger (2008), Boulanger ve Idriss (2014) ve Architectural Institute of Japan (AIJ, 2001) kullanılarak CPT tabanlı sıvılaşma tetikleme prosedürleri kullanılarak hesaplanmıştır. Boulanger ve Idriss (2014) prosedürüne ilişkin olarak LPI ve LSN hesaplamaları için deterministik ve %15 olasılıklı sıvılaşma sınır eğrileri kullanılmıştır. Deterministik sıvılaşma sınır eğrisi sıvılaşma olasılığına [PL] % 16'ya eşittir. Yani, pratik olarak neredeyse aynıdır.

Şekil 3.6, dört prosedüre karşılık gelen çalışma alanındaki LPI'nın coğrafik dağılımlarını göstermektedir. Şekilde ayrıca Hinode'daki hasar gören bina yerleri ve

bunlara karşılık gelen bina hasar seviyeleri gösterilmektedir. Haritayı hazırlamak ve korelasyonları geliştirmek için coğrafi bilgi sistemleri (CBS) kullanılmıştır. Şekil 3.7a, çubuk grafikler olarak LPI aralıklarına ve bina hasarlarının kümülatif dağılımlarına göre çizgi grafikleri olarak toplam hasar düzeylerini (bütün hasar seviyeleri birleştirilmiş olarak) bina hasar dağılımlarını göstermektedir. Şekilde hasar seviyeleri arasında herhangi bir fark bulunmadığına dikkat edilmelidir. Şekil 3.8, hasar seviyelerine göre LPI değerlerinin istatistiksel dağılımlarını göstermektedir. Şekil 3.9, bina hasar dağılımlarını ve kümülatif dağılımları Şekil 3.7a'ya benzer bir biçimde göstermektedir ancak bu sefer üç farklı bina hasar seviyesi göz önüne alınarak yapılmıştır.

Şekil 3.6'da görüldüğü gibi, Hinode bölgesindeki binaların çoğunda bir miktar hasar vardır. Buna ek olarak, tüm bölgelerde kum kaynamaları gözlenmiştir. Buna göre Iwasaki (1978, 1982) ve Toprak ve Holzer (2003) 'e göre LPI düzeylerinin 5'in üstünde olması beklenmektedir. Toprak ve Holzer (2003) tarafından da doğrulanan Iwasaki kriterleri,  $5 < LPI < 15$  için sıvılaşma riskinin göreceli olarak yüksek olduğunu ve  $15 < LPI$  için sıvılaşma riski son derece yüksek olduğunu belirtmektedir. Darfield ve Christchurch'teki 1173 CPT'yi analiz ettikten sonra, Maurer ve diğ. (2014) hafif, orta ve şiddetli sıvılaşma için medyan LPI değerlerinin sırasıyla 8.4, 13.1 ve 21.0 olduğu sonucuna varmışlardır. Hafif sıvılaşmadan endişe edilirken, altyapıya bağlı hasar (örneğin, yapıların oturması ve eğilmesi, kaldırımların çatlamaları, yeraltı yapıların hasarları), orta veya şiddetli sıvılaşmanın bir sonucudur. Ayrıca, orta sıvılaşma olan alanların % 75'inin LPI değerleri 7.4'den fazla, şiddetli sıvılaşmaya sahip alanların % 75'inde LPI değerleri 15.0'dan büyük olduğu Toprak ve Holzer (2003) ve Maurer ve diğ. (2014) tarafından RW1998 kullanılarak tespit etmişlerdir. Burada kullanılan dört yöntemlerinden sadece IB2008 tetikleme yöntemi bina zararlarının yaklaşık %10'unu 5'ten az LPI bölgesi olarak saptamıştır (Şekil 6b). Buna göre, IB2008 LPI haritası ve hasar dağılımı, yaklaşık 5 LPI eşiğini önermektedir. RW1998 yöntemi LPI haritasındaki  $LPI < 5$  bölgeleri çok az bulunurken izole CPT sondajından kaynaklanmıştır ve önemsizdir (Şekil 6a), RW1998 ise LPI eşiğini 5 olarak kabul eder. Hem BI2014 hem de AIJ2001 yöntemleri, önemsiz bölgeler olan  $5 < LPI < 10$  için 10'un üzerinde LPI bölgeleri saptamıştır (Şekil 3.6a). Bu sonuçlar, IB2008 yönteminin bazı farkları olmakla beraber, yukarıda belirtilen minimum eşikler hariç tutulduğunda LPI değerleri ve yapı hasarları genel olarak uyumlu olduğu belirlenmiştir.

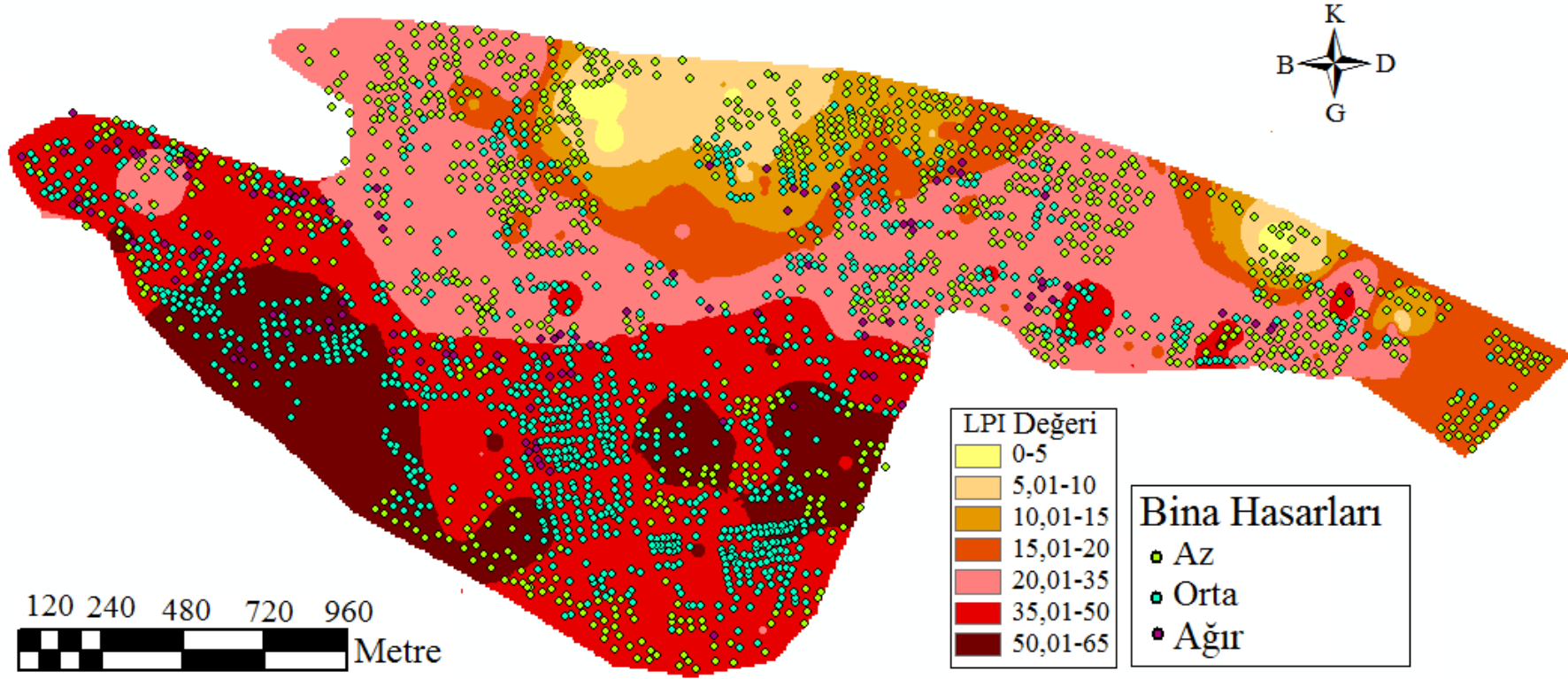
AIJ2001 yöntemi kullanılarak elde edilen LPI değerleri, tüm yöntemler arasında en dar olan LPI aralığıdır ve 8-33 arasında değişmektedir. Sonuç olarak, yapı hasarları nispeten küçük LPI aralıklarında dağıtılır ve hasar seviyelerinin LPI ile ilişkilendirilmesini zorlaştırır. Şekil 3.7'deki AIJ2001 sınıflama tetikleme yöntemi için LPI haritasında, LPI değerleri arttıkça hasar gören binaların sayısının arttığı görülmektedir. Dahası, LPI (Şekil 3.9) ve LPI dağılımlarının kutu çiziminde (Şekil 3.8) yapılan bina hasarlarının birikimli dağılımı, AIJ2001 sınıflama tetikleme prosedürünün LPI'lerinin yapı hasarı seviyeleri arasında ayırt edemediğini açıkça göstermektedir. Örneğin, hasar seviyesi az, orta ve ağıra karşılık gelen LPI'nin medyan değerleri ortalama 19 ile 21 arasında ve ortalama 20'dir. Farklı yerleşim yerlerinden kaynaklanan Hinode'daki binaların hasar düzeyleri, hafifden şiddetli sınıflamaya kadar düşünülebilir. Yapı hasarlarını, farklı hasar düzeylerini hesaba katmak yerine, tüm hasar düzeylerinin bir toplamı olarak görürsek, LPI'nin orijinal Iwasaki tanımıyla ve Hinode'daki sınıflama şiddeti ile genel bir uyum olduğu kabul edilebilir. Böylece 8-33 aralığındaki LPI değerleri, sınıflama şiddeti ve gözlenen yapı hasarlarıyla uyumlu olarak düşünülür.

AIJ2001 LPI haritalarının aksine, RW1998, IB2008 ve BI2014 sınıflama tetikleme yöntemleri için haritalar, yüksek LPI değerlerine sahip alanların genellikle orta ve ağır bina hasarıyla ilişkili olduğunu gösterirken, düşük LPI değerlerine sahip alanlar genellikle az bina hasarları ile ilişkilidir. Bu prosedürler için kümülatif dağılım eğrileri ve kutu çizimleri karşılaştırıldığında, LPI'ların diğer hasar seviyelerine göre belirgin olarak hasar seviyesi azı ayırmada başarılı olduğu görülmektedir. Ancak, üç yöntemden hiçbiri hasar seviyesi orta ile ağır arasında ayırım yapamamıştır. Medyan değerler haricinde, Şekil 3.8'deki hasar seviyeleri orta ve ağır için LPI'ların yüzdeleri neredeyse aynıdır. Buna ek olarak, hasar seviyeleri orta ve ağıra karşılık gelen kümülatif dağılım eğrileri birbirlerini kesmiş ve bir ayırım elde edilememiştir. Bu, kısmen bina hasar seviyelerinin hafifden yüksek hasar seviyelerine ayırma zorluğundan ve kısmen daha yüksek zarar seviyelerini ayırt etmek için LPI'nin yetersizliğinden kaynaklanıyor olabilir. Bununla birlikte, hasar seviyesi az ve orta arasındaki ayırım net olarak tespit edilmiştir.

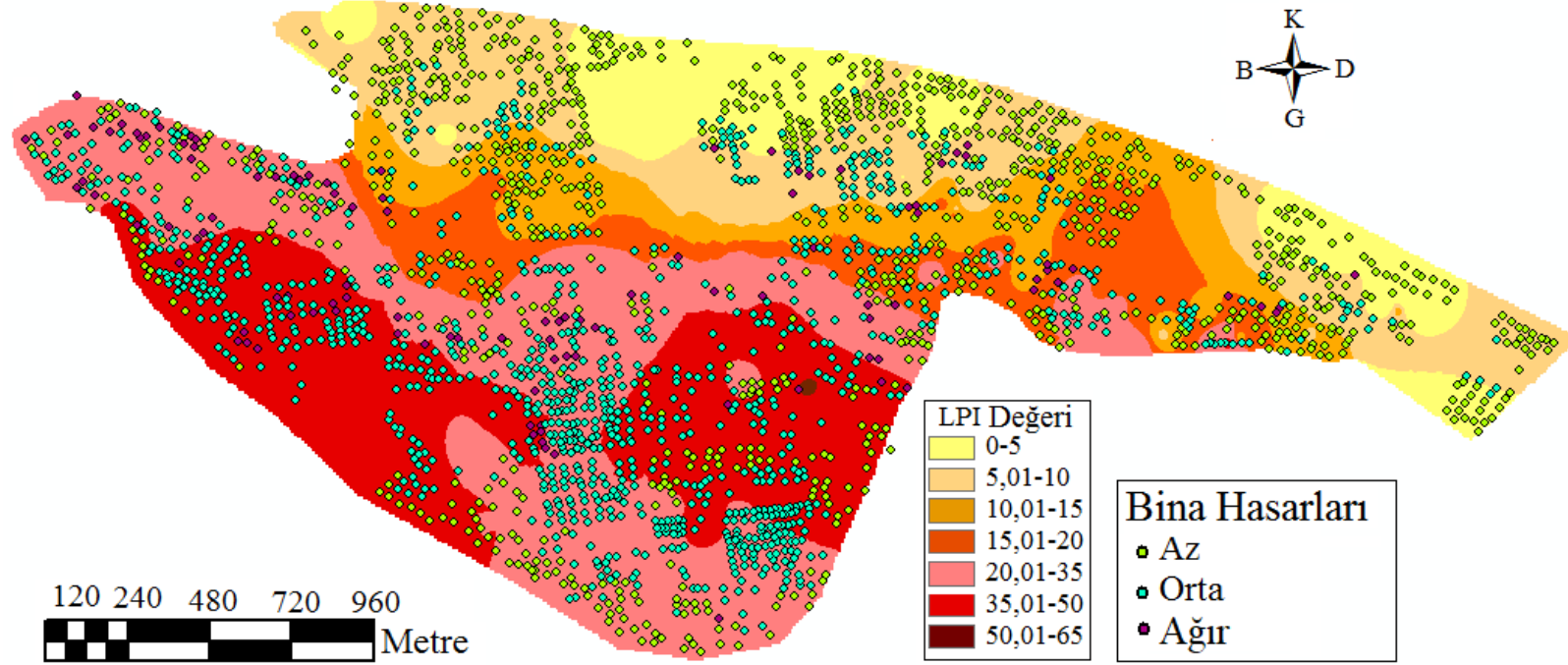
Örneğin, hasar seviyesi az olan binaların % 75'i RW1998, IB2008 ve BI2014 sınıflama tetikleme yöntemleri için sırasıyla 18, 6, 18'den daha yüksek LPI



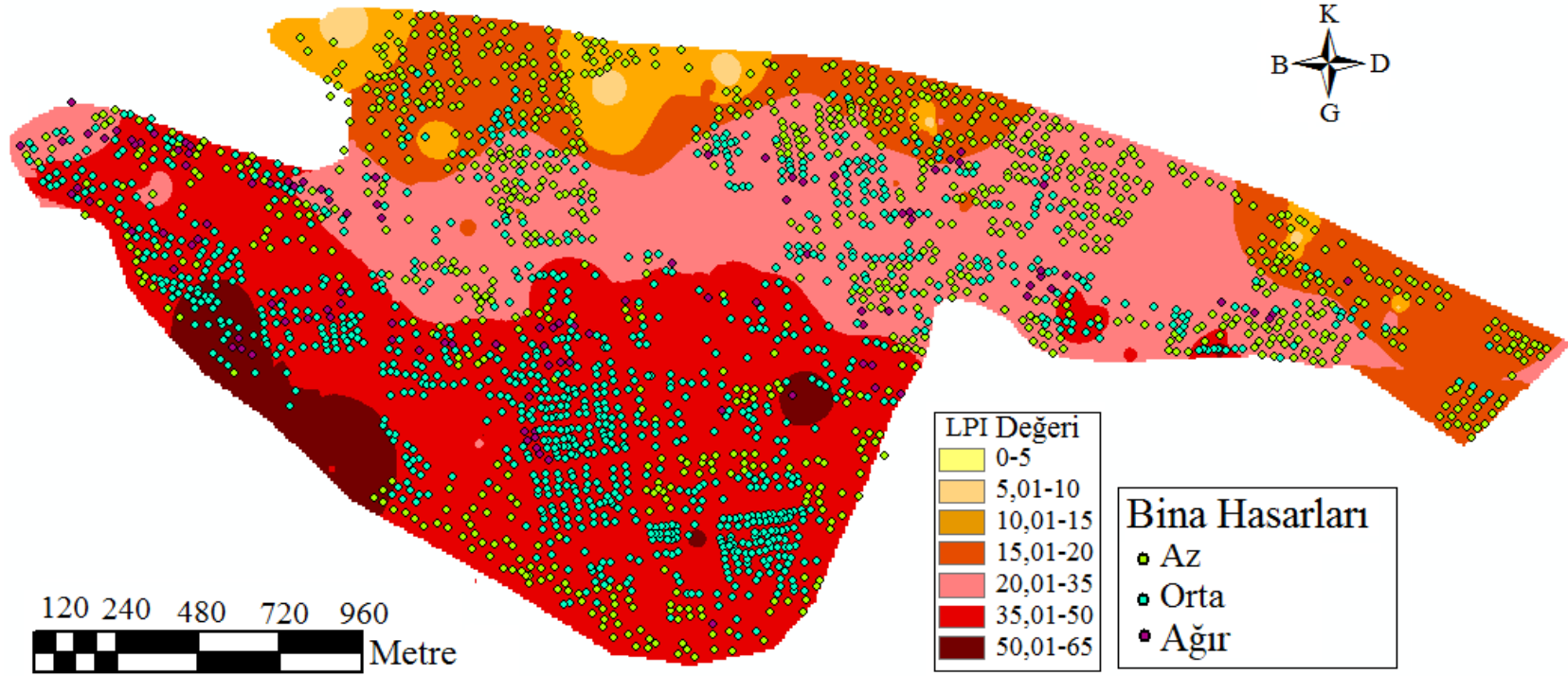
bölgeleridir. Hasar seviyesi az olan binaların % 90'ı, RW1998, IB2008 ve BI2014 sınıvlaşma tetikleme yöntemleri için sırasıyla LPI 11, 4, 16'dan daha yüksek bölgelerdedir. Buna karşılık, hasar düzeyi orta olan binaların % 75'i RW1998, IB2008 ve BI2014 sınıvlaşma tetikleme yöntemleri için sırasıyla 31, 20 ve 32'den yüksek olan LPI bölgelerindedir. Hasar seviyesi orta olan binaların % 90'ı RW1998, IB2008 ve BI2014 sınıvlaşma tetikleme yöntemleri için sırasıyla 20, 9, 22'den yüksek LPI bölgelerindedir. Ayrıca, az ve orta hasar seviyelerine karşılık gelen kümülatif dağılım eğrileri, LPI'nın bu düzeylerdeki ciddiyeti ayırt etmeyi başardığına işaret ederek, açıkça ayırıcıdır. LPI'nin hasar seviyeleri aza karşılık gelen medyan değerleri 25, 12 ve 24'dür ve RW1998, IB2008 ve BI2014 sınıvlaşma tetikleme yöntemleri için sırasıyla kombine hasar seviyeleri orta ve ağır sırasıyla 36, 27 ve 36'dır. Şekil 3.5'de RW1998 ve BI2014'den LPI'ların genel olarak birbirleriyle uyumlu olduğu görülmektedir. Bina hasarının kümülatif dağılım eğrileri ve kutu arasındaki istatistiksel karşılaştırmalar da güçlü benzerliği teyit etmektedir.



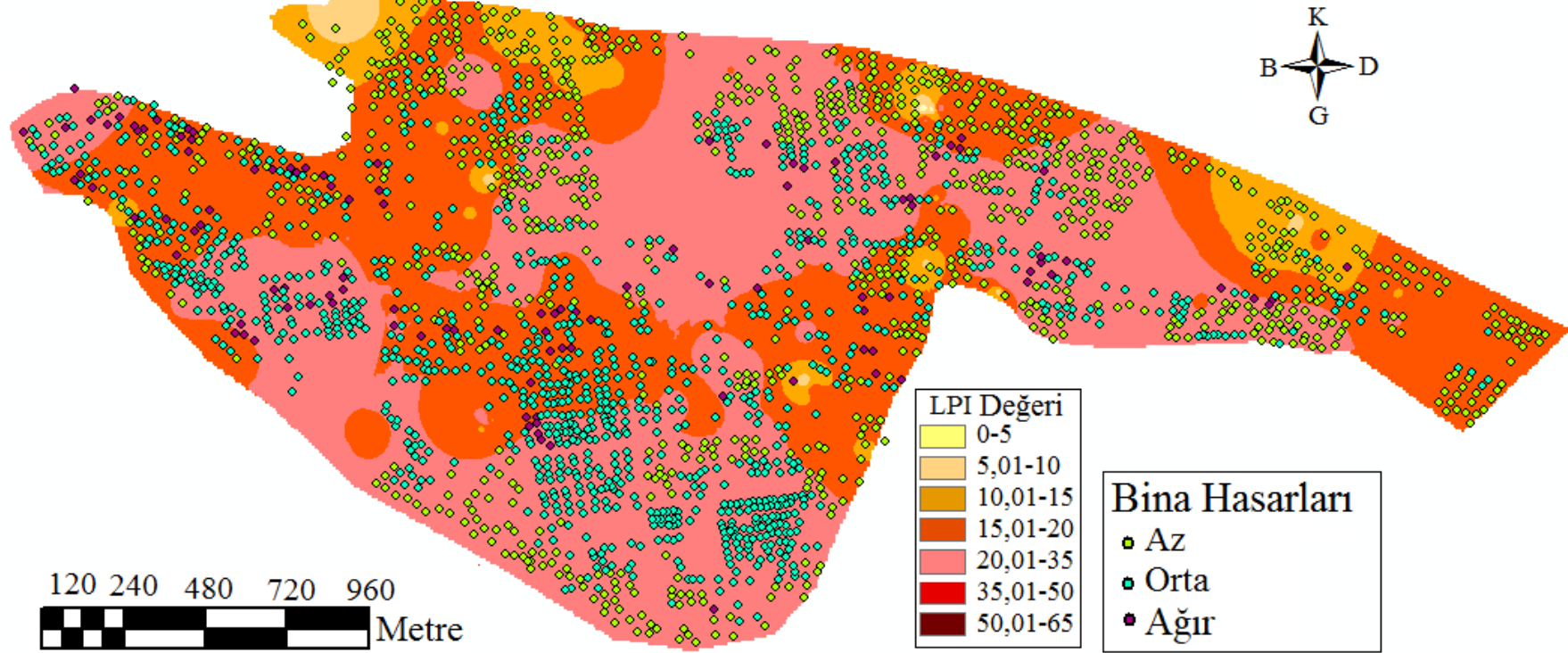
a) Robertson ve Wride (1998) Yöntemi



b) Idriss ve Boulanger (2008) Yöntemi

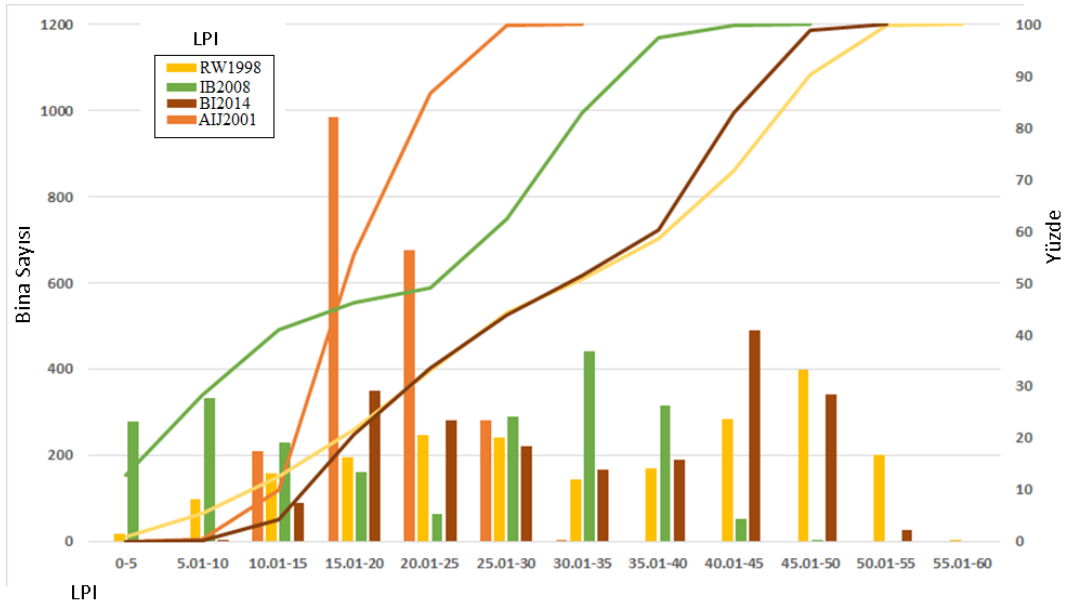


c) Boulanger ve Idriss (2014) Yöntemi

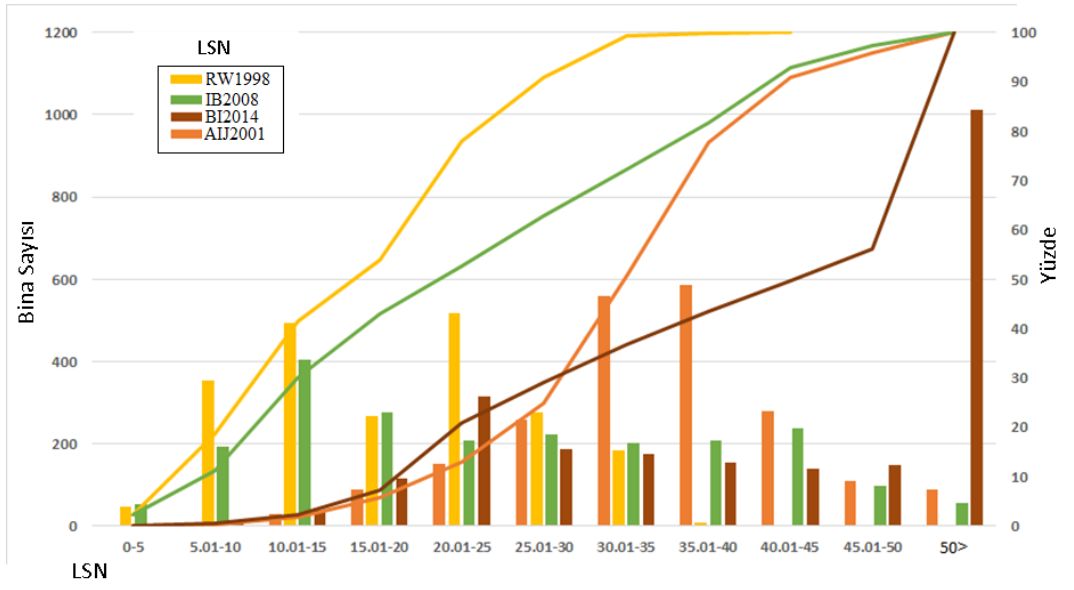


d) Japonya Mimarlık Enstitüsü (2001) Yöntemi

Şekil 3.6: Çalışma alanında LPI dağılımı üzerine eklenen bina hasarları

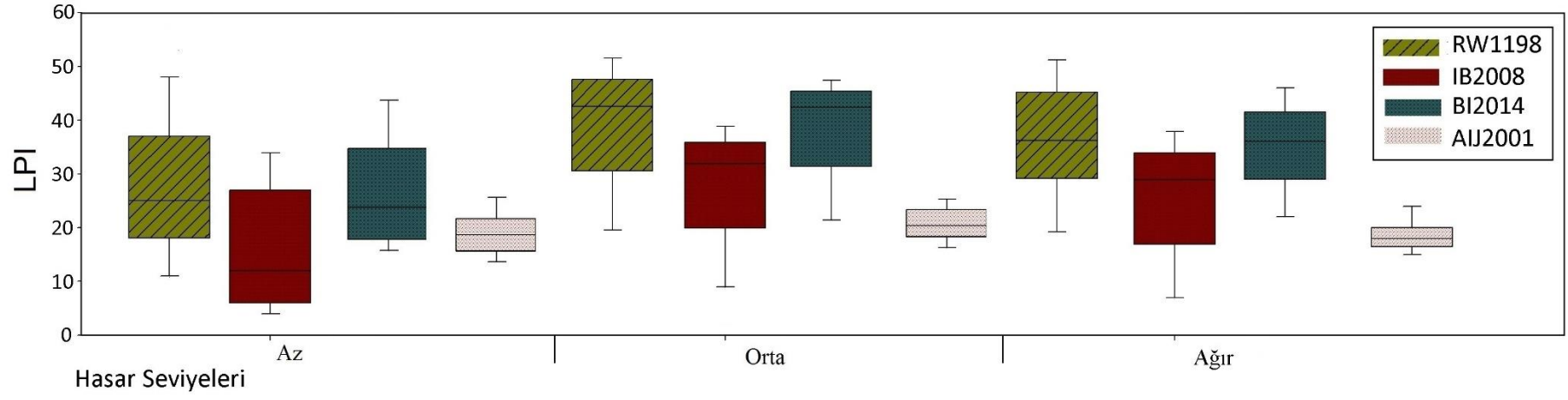


a) LPI

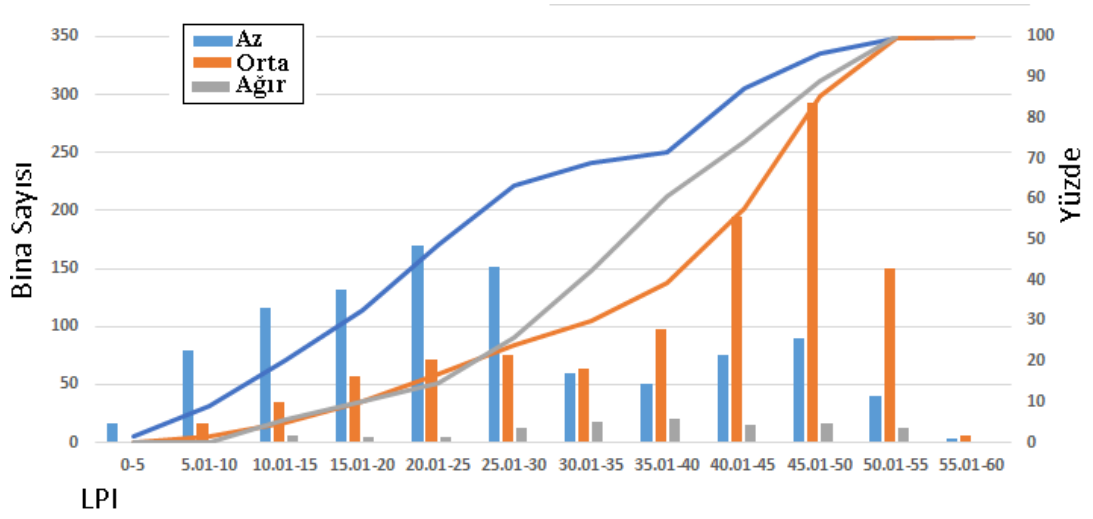


b) LSN

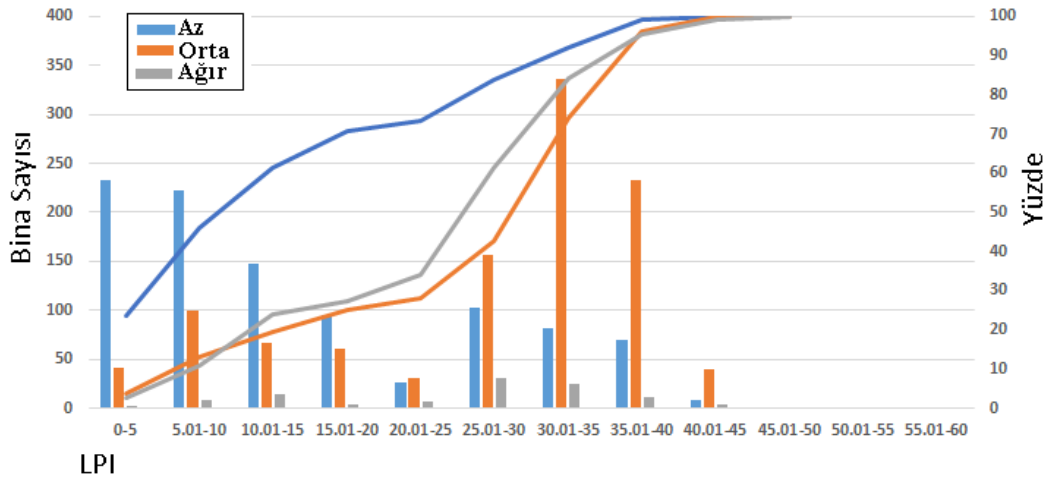
Şekil 3.7: Tüm bina hasar seviyeleri için kümülatif dağılımlar



Şekil 3.8: Farklı yöntemlerle hesaplanan LPI değerlerinin hasar seviyelerine göre kutu grafiklerle gösterimi

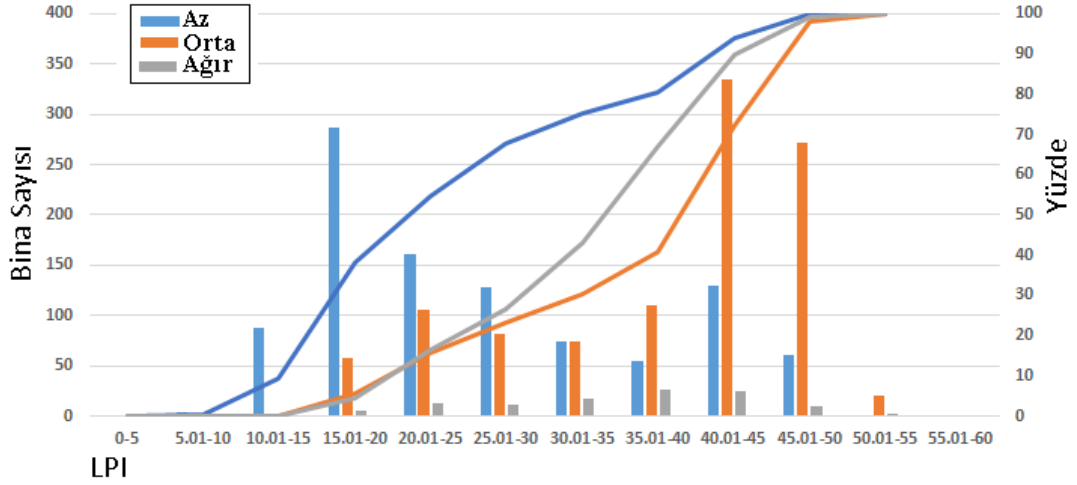


a) Robertson ve Wride (1998) Yöntemi

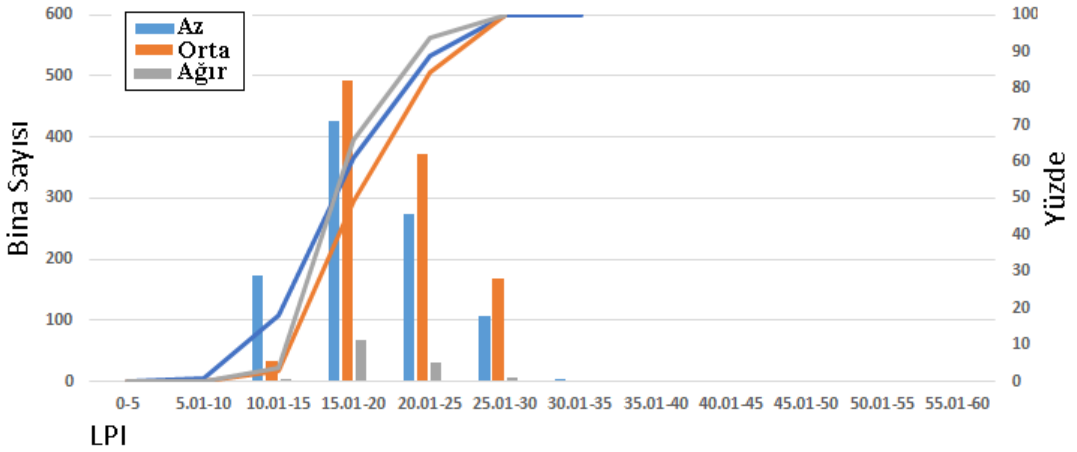


b) Idriss ve Boulanger (2008) Yöntemi





c) Boulanger ve Idriss (2014) Yöntemi



d) Japonya Mimarlık Enstitüsü (2001) Yöntemi

Şekil 3.9: LPI'ya göre bina hasarlarının kümülatif dağılımları

Şekil 3.10, dört sıvılaşma tetikleme prosedürüne karşılık gelen çalışma alanındaki LSN'nin coğrafi dağılımlarını göstermektedir. Haritalarda ayrıca, Hinode'deki hasarlı bina konumları ve bunlara karşılık gelen bina hasar seviyeleri de gösterilmektedir. Şekil 3.7b, çubuk diyagramlar olarak LSN aralıklarına ve dört prosedür için çizgi grafikleri olarak bina hasarlarının kümülatif dağılımlarına göre toplanmış bina hasarını (tüm hasar seviyeleri kombine) göstermektedir. Şekil 3.7b'deki hasar seviyeleri arasında herhangi bir fark bulunmadığına dikkat edilmelidir. Şekil 3.11, kutu olarak hasar seviyelerine göre LSN değerlerinin istatistiksel dağılımlarını göstermektedir. Şekil 3.12, bina hasar dağılımlarını ve kümülatif dağılımları Şekil

3.7b'ye benzer bir biçimde göstermektedir, ancak bu sefer üç ayrı bina hasar seviyesini de göz önüne almaktadır.

Daha önce de belirtildiği gibi, LSN yakın zamanda önerilen bir parametredir ve henüz Yeni Zelanda depremleri haricindeki verilerle kalibre edilmemiştir. CES ile bile, mevcut literatürlerin çoğu, zemin hasarıyla ilgili sınıflama belirtileri ile ilgilidir (örneğin, kum kaynamaları, yanal yayılımlar). LSN'yi yapı hasarı ile ilişkilendiren sınırlı çalışmalar mevcuttur. Bu nedenle, bu parametrenin dünyanın diğer bölgelerindeki hasar ve deprem verileri ile değerlendirilmesi önemlidir. Hinode'dan gelen CPT verilerini kullanarak elde edilen LSN değerleri, farklı sınıflama tetikleme prosedürlerinin kullanılmasında farklı LSN değer aralığı oluşturulması gerektiği görülmektedir. En düşük ve en yüksek LSN değer aralığı sırası ile RW1998 ve BI2014 prosedürlerinde elde edilmiştir. Şekil 3.10'daki LSN harita eğilimlerinin karşılaştırılması, AIJ2001 LSN'nin diğerlerinden önemli ölçüde farklı olduğunu göstermektedir.

Bu gözlem, Şekil 3.11 ve 3.12'de de yansıtılmaktadır: LSN değerlerine göre yapı hasarı seviyeleri arasında herhangi bir fark yoktur. Örneğin, Şekil 3.11'deki hasar seviyeleri az, orta ve ağıra karşılık gelen medyan AIJ2001 LSN değerleri sırasıyla 34, 37 ve 34'tür. Buna ek olarak, Şekil 3.12'de farklı hasar seviyeleri için kümülatif dağılımlar belirgin değildir. Hasar seviyelerine göre LSN değerlerinde açık bir eğilim görülmemektedir. Şekil 3.12a'daki kümülatif dağılımların karşılaştırılmasından görülebileceği gibi, RW1998 LSN değerleri bina hasar seviyesi az diğer iki seviyeden ayırabilmektedir ancak yapı hasarı seviyeleri orta ve ağır arasında ayırım yapamamaktadır. Bu, Şekil 3.11'de, sırasıyla 13, 24 ve 21 gibi hasar seviyeleri az, orta ve ağır hasara karşılık gelen medyan değerlerle gözlemlenebilir. Şekil 3.12b ve c'ye göre, IB2008 ve BI2014 LSN değerleri, bina zarar seviyelerini AIJ2001 ve RW1998 LSN değerlerinden daha iyi yakalamaktadır. Grafiklerde her bina için hasar seviyesi birbirinden açıkça ayrılmıştır. Bununla birlikte, medyan değerler orta ve ağır hasar seviyeleri arasında net bir ayırım göstermemiştir. IB2008 için hasar seviyeleri az, orta ve ağır hasara karşılık gelen medyan LSN değerleri sırasıyla 16, 30 ve 32 ve BI2014 için 32, 53 ve 49'dur.

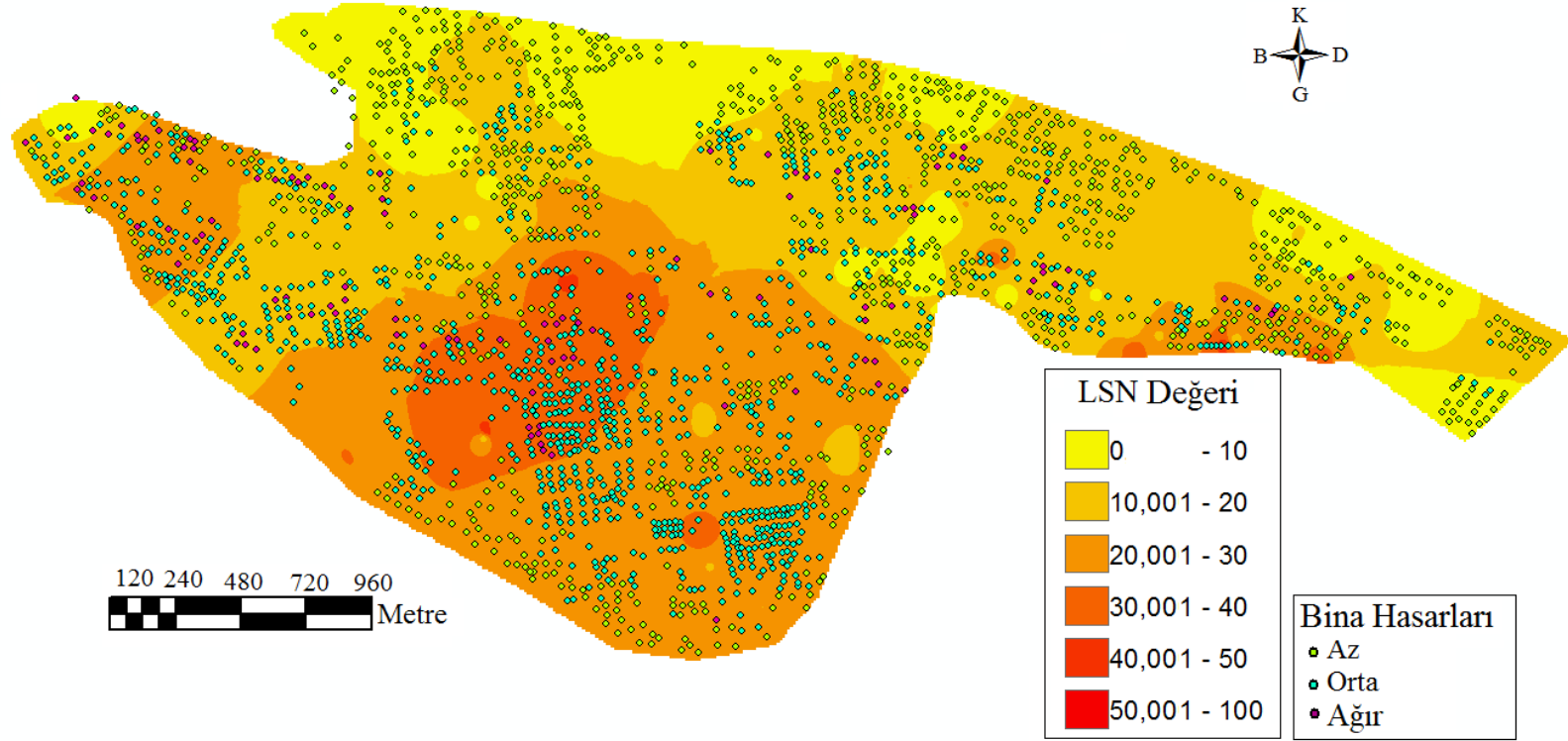
Büyük Doğu Japonya depremi sırasında Hinode bina hasarından elde edilen sonuçların, her iki veritabanındaki bina hasar tanımlarındaki farktan dolayı LSN'ye

göre Canterbury deprem dizisi sırasında Christchurch'den gelen bina hasarı ile doğrudan karşılaştırılması mümkün değildir. Hinode veritabanında, bina hasarları açısız bozulma (bina  $\delta/L$ ) ile tanımlanırken Christchurch veritabanında farklı yerleşim yerleri 60.000 görsel gözlemler temel alınarak hesaplanmıştır. Christchurch'de gözlemler çoğunlukla sıvılaşma zararından etkilenen alanlarda yoğunlaşmıştır ve bu bilgi, DKG (EQC) arazisi hasar talep değerlendirmesi amacıyla sıvılaşmayla ilgili kara hasarının detaylı incelenmesinin bir parçası olarak toplanmıştır. Her yerleşim yeri için üç farklı kategorideki kademeli (diferansiyel) yerleşimi belirlemek için veriler toplanmıştır: 1) Yok / küçük - 20 mm'den az; 2) Orta - 20 ila 50 mm; ve 3) ağır - 50 mm'den büyük; ve 16.000 konutun ise büyük kademeli yerleşime sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu değerlendirme, orta ile şiddetli arasında haritalanmış arazi hasarı olan bölge haritasında uyumluluk göstermektedir. Van Ballegooy (2014) orta ve büyük kademeli yerleşim yerleri için ortalama LSN değerlerini IB2008 tetikleme prosedürünü kullanarak sırasıyla yaklaşık 22 ve 29 (Eylül 2010 ve Şubat 2011 depremlerinin ortalaması) olarak tespit etmiştir. Hasar tanımı arasındaki uyuma net değilde de, bu sonucun bu çalışmanın sonucuyla tutarlı olduğu görülmektedir.

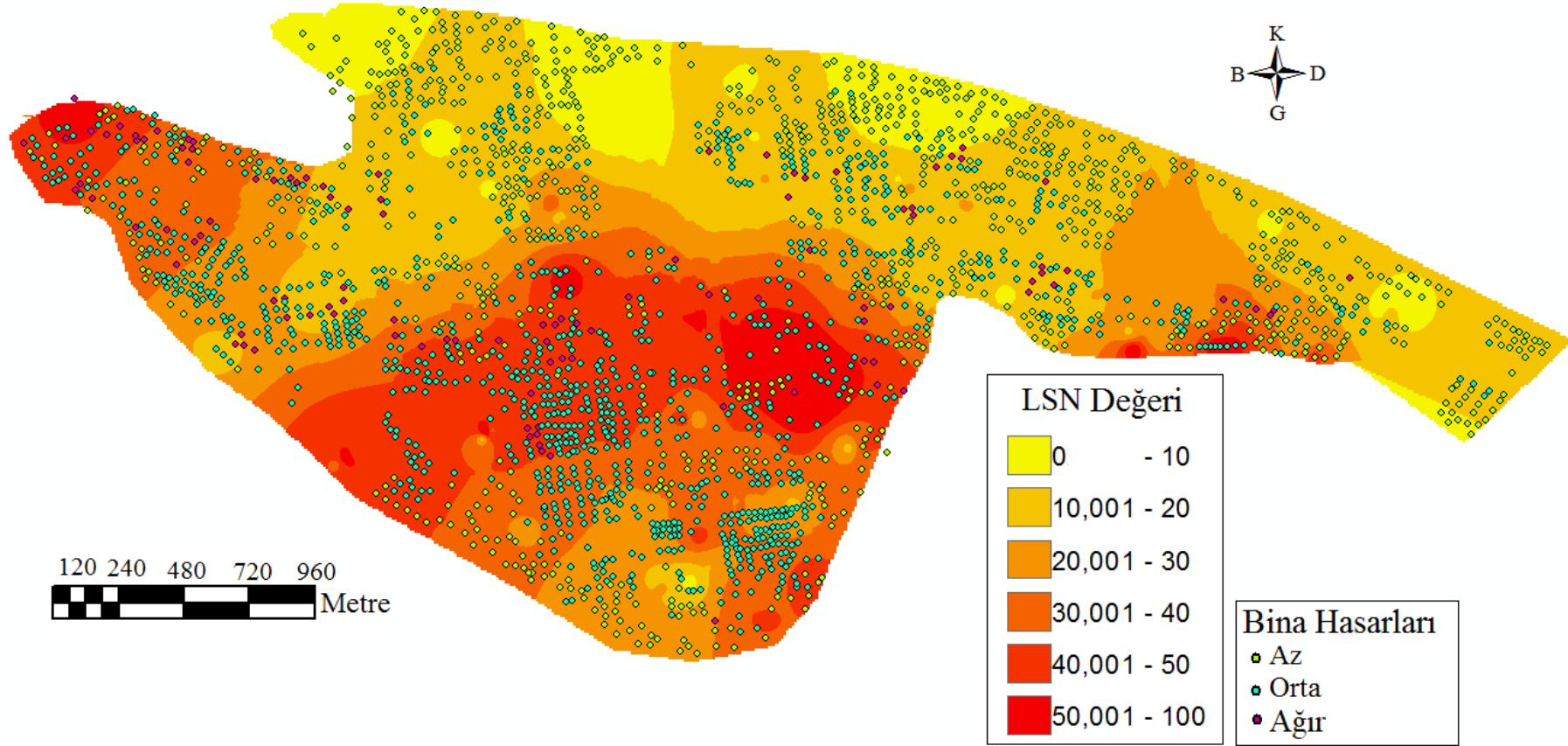
Maurer ve diğ. (2015) eşik tehlike değerlerinin seçimini standartlaştırmak için alıcı-işletim-karakteristiği (receiver-operating-characteristic (ROC) yöntemini önermiştir. Bu yaklaşımı kullanarak, 2010-2011 Canterbury depremlerinden kaynaklanan 7.000 sıvılaşma vaka çalışmasının analizi yoluyla yanlış tahmin ekonomilerini değiştiren optimum LSN karar eşikleri önerilmiştir. Yanlış pozitif ve yanlış negatiflerin maliyeti benzer olduğunda, IB2008 sıvılaşma değerlendirme prosedürü kullanılarak LSN = 15.4 eşikinin optimal olduğunu önermişlerdir. Bu 16 hasar seviyesi 1'e karşılık gelen medyan IB2008 LSN değeri ile karşılaştırılabilir. Bu çalışmanın sonuçları Maurer ve diğ. (2015) farklı maliyet oranları (CR) için vermiş olduğu eşiklerle uyumlu olduğunu göstermektedir.

Tonkin ve Taylor (2015), TC3 ve konut Kırmızı Bölge alanlarındaki yerleşim yerleri için LSN korelasyonlu BDR dağılımını (bina hasar oranı) kutu grafiği ile göstermişlerdir. TC3, gelecekteki büyük depremlerde sıvılaşma hasarının mümkün olduğu bölgeler ve uygun temel onarımını veya yeniden inşa opsiyonunu seçmek için bireysel mühendislik değerlendirmelerinin yapılması gerektiği bölgeleri belirtmektedir. BDR, depreme bağlı hasarın onarım maliyetini bir konut binasına, o

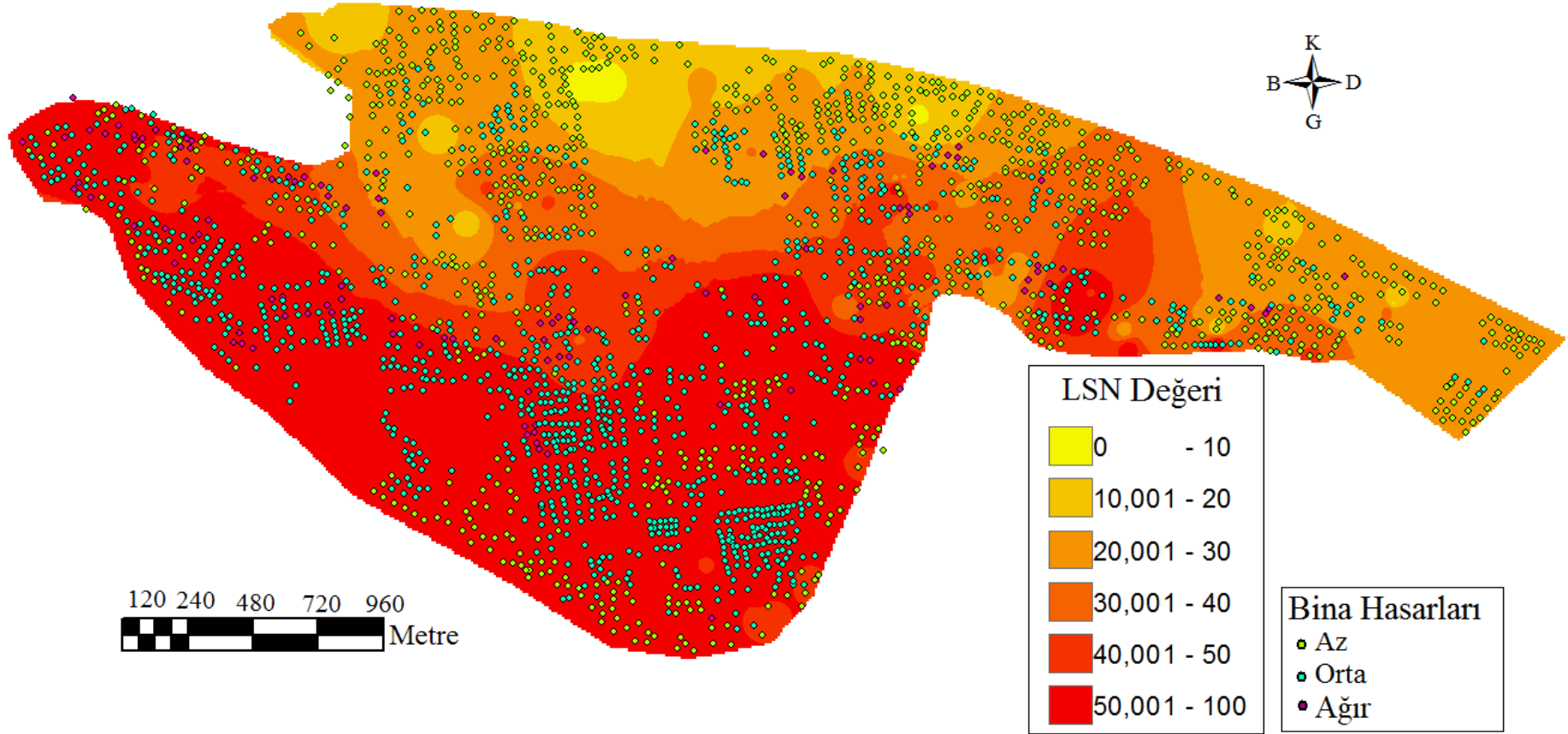
binanın yenileme değerine bölünerek elde edilmektedir. Bir konut binasının BDR'si 0,5'ten büyük olduğunda, o binadaki hasar tipik olarak anlamlıdır. Bu hasar çoğunlukla, onarım için pratik olmayan sınıvılaşma ile ilişkili temel deformasyonundan kaynaklanmaktadır. Çoğu durumda, bina yıkılır ve yeniden inşa edilir; çünkü onarım maliyeti yeniden inşa maliyetini aşar. BDR değeri 0.2 ile 0.5 arasında, tipik olarak, yuzeysel onarımlar ve küçük yapısal onarımlar gibi pratik tamir edilebilir hasarları temsil eder. Genellikle bu aynı zamanda binanın yeniden tesviyesini de içerir. BDR değeri 0.2'den az ise genellikle iç duvar sıvasında evin astarlanması ve yeniden örülmesi gibi çatlaklar onarımı gibi yapısal olmayan hasarları kapsar. Tonkin ve Taylor (2015), 16'dan daha yüksek LSN değerlerinin, daha yüksek BDR değerlerinin dağılımını ile, 16'dan daha düşük LSN değerleri, düşük BDR değerlerinin bir dağılımını ile uyumlu olduğunu belirtmiştir. Bu sonuç zemin karar hasar korelasyonları içinde tutarlılık göstermektedir. Tonkin ve Taylor'ın (2015) BI2014 sınıvılaşma tetikleme prosedürünü kullandığı unutulmamalıdır. Bu LSN değeri, Hinode'daki yapı hasarının geniş olması gerektiğini ve gözlemlerle de iyi uyum sağladığını göstermektedir. Kum kaynaması Hinode bölgesindeki binaların çoğunda hasara sebep olmuştur.



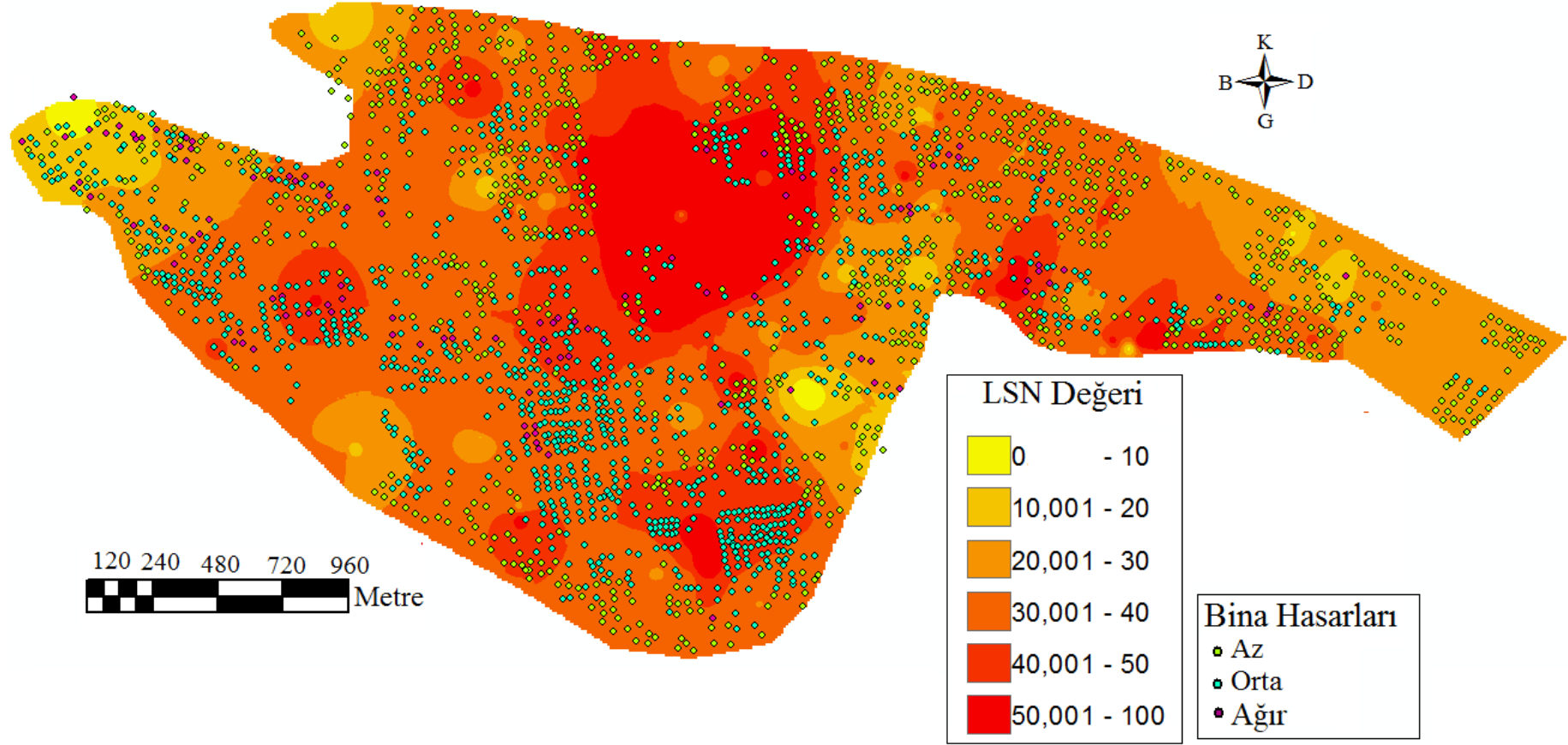
a) Robertson ve Wride (1998)Yöntemi



b) Idriss ve Boulanger (2008) Yöntemi



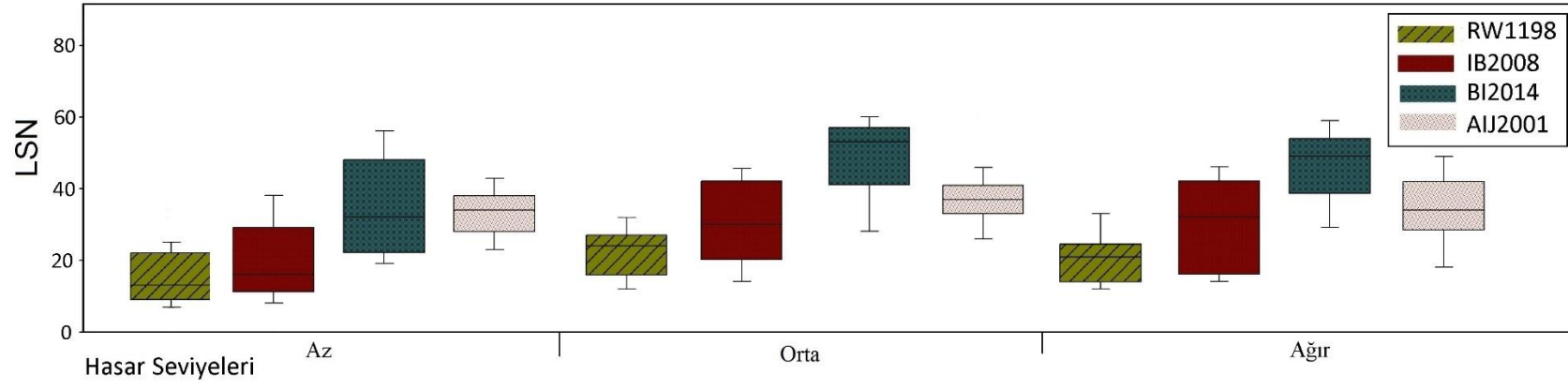
c) Boulanger ve Idriss (2014) Yöntemi



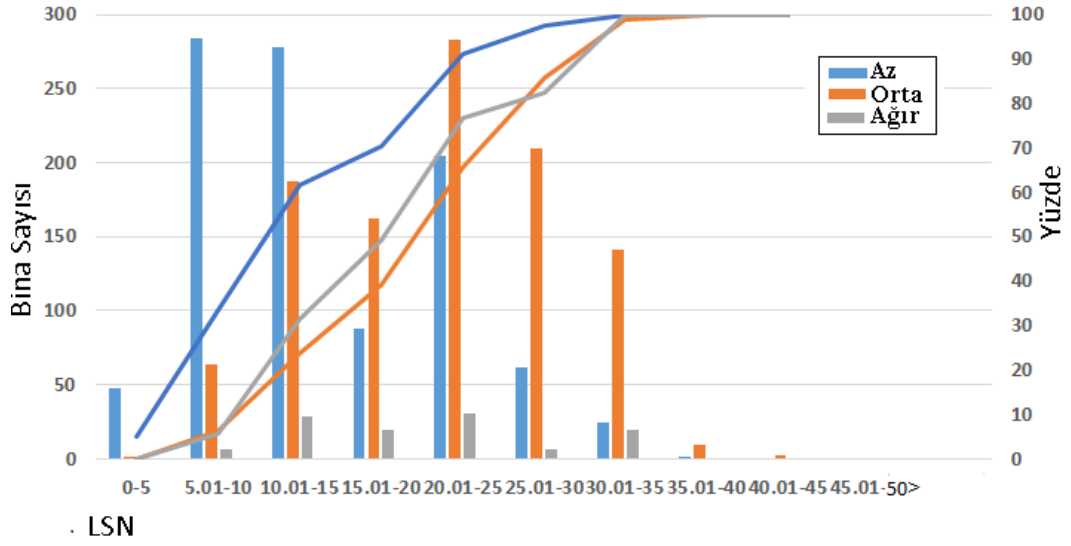
d) Japonya Mimarlık Enstitüsü (2001) Yöntemi

Şekil 3.10: Çalışma alanındaki LSN dağılımına eklenmiş bina hasarları

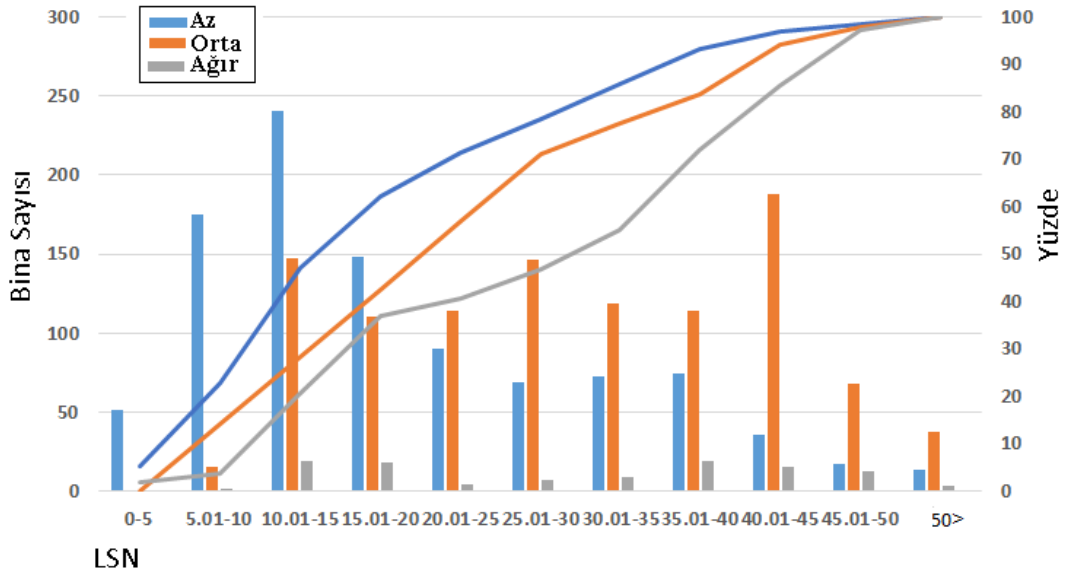




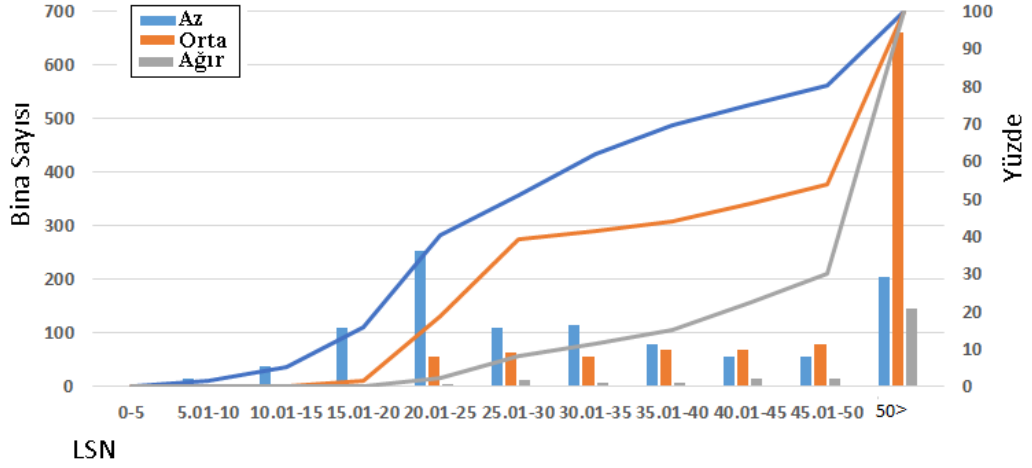
**Şekil 3.11:** Farklı yöntemlerle hesaplanan LSN değerlerinin hasar seviyelerine göre kutu grafiklerle gösterimi



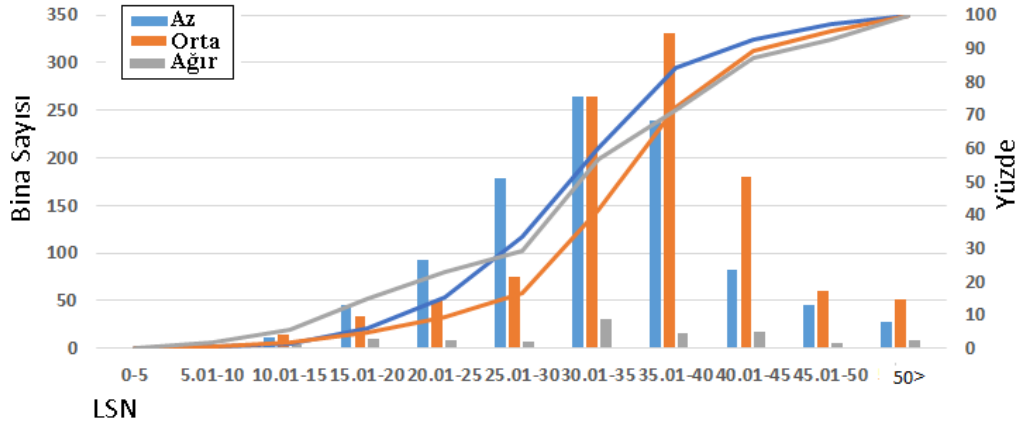
a) Robertson ve Wride (1998) Yöntemi



b) Idriss ve Boulanger (2008) Yöntemi



c) Boulanger ve Idriss (2014) Yöntemi



d) Japonya Mimarlık Enstitüsü (2001) Yöntemi

Şekil 3.12: LSN'ye göre bina hasarlarının kümülatif dağılımları

### 3.4 Değerlendirme

Sıvılaşma oluşumunun öngörülmesi, tehlike analizinin önemli bir bileşenidir, ancak sıvılaşmanın seviyesi, meydana geldiği bölgede yapıların bulunmasından dolayı daha önem arz etmektedir. Bu nedenle, Iwasaki ve diğ. (1978) tarafından orijinal olarak amaçlanan sıvılaşma oluşumunun ciddiyetiyle ilişkilendirilebiliyorsa, LPI ve LSN daha değerli olacaktır. Bu çalışma, Hinode bölgesinde 2011 Büyük Doğu Japonya Depremi'nden kaynaklanan sıvılaşma kaynaklı 143 CPT sondaj ve 2159 konut binasını kullanarak, LPI ve LSN'yi sıvılaşmanın ciddiyeti ve özellikle sıvılaşma oluşumunu tahmin etmek yerine hasarla ilişkili olarak değerlendirmektedir. Yapı hasar seviyeleri,

binaların açılmal bozulması ( $\delta/L$ ) kullanılarak, hasar yok ve hasar seviyesi az, orta ve ağıra karşılık gelen eşikleri sırası ile 1/100, 1/100-1/60, 1/60-1/20 ve > 1/20 olarak tanımlanmıştır. Sıvılaşma değerlendirme yöntemlerinin LPI ve LSN üzerindeki etkilerini değerlendirmek ve ayrıca LPI ve LSN'yi kalibre etmek için LPI ve LSN'yi hesaplamak için dört farklı CPT'ye dayanan sadeleştirilmiş sıvılaşma değerlendirme metodolojisi kullanılmıştır. Bu alışmada LPI ve LSN değerlendirmeleri çerçevesinde dört basitleştirilmiş sıvılaşma tetikleme yönteminin bazı avantajları ve zayıf yönleri olduğu gösterilmiş ancak bütünlükleri ile birlikte kullanıldıklarında yapı hasar gözlemleri ile LPI ve LSN sıvılaşma hassasiyet parametreleri arasında makul korelasyonlar sağladığı gösterilmiştir. Ayrıca, analizde kullanılan sıvılaşma tetikleme prosedürünün farklı hasar seviyeleri tarafından temsil edildiği gibi farklı sıvılaşma seviyelerine karşılık gelen LPI ve LSN eşiklerini etkilediği gösterilmiştir.

Sonuçlar, Iwasaki (1978, 1982), Toprak ve Holzer (2003) ve Maurer ve diğ. (2014) tarafından önerilen LPI'nın genel olarak hariç tutulan minimum eşiğinin, burada değerlendirilen sıvılaşma kaynaklı yapı hasarı ile genel olarak uyutuğunu göstermektedir. AIJ2001 prosedürü kullanılarak elde edilen LPI değerleri, tüm yöntemler arasında en dar LPI aralığını verir ve hasar seviyeleri arasında ayırım yapamaz. RW1998 ve BI2014'ten gelen LPI'lar önemli benzerlik göstermektedir. RW1998, IB2008 ve BI2014'ten gelen LPI'lar, diğer hasar seviyelerine göre belirgin şekilde az hasar seviyesini ayırmada üstünlük göstermişlerdir. Ancak, üç prosedürden hiçbiri hasar seviyesi orta ile ağır arasında ayırım oluşturamamıştır.

LSN analiz karşılaştırmalarının sonuçlarına göre, AIJ2001 yöntemi kullanılarak hesaplanan LSN değerleri diğer üçünden önemli ölçüde farklılık göstermektedir. AIJ2001 LSN değerlerinde hasar düzeylerine göre belirgin bir anlamlılık yoktur. RW1998 LSN değerleri bina hasar seviyesi az diğer iki seviyeden ayırabilirken, orta ve ağır yapı hasar seviyeleri arasında ayırım yapamamıştır. IB2008 ve BI2014 LSN değerleri, bina zarar seviyelerini AIJ2001 ve RW1998 LSN değerlerinden daha iyi yakalamıştır. Bu alışmadaki LSN değerleri, Yeni Zelanda'daki CES'ten gelen (aynı sıvılaşma tetikleme prosedürünü kullanan) ilgili maddelerle genel olarak anlamlıdır.

Çalışma alanı, 1970'lerde konut alanı olarak kullanılmak üzere doldurulmuş ve ışlah edilmiştir. Geri kazanım için kullanılan kum Kasumigaura Gölü'nden temin

edilmiş ve kum sıkıştırması gibi herhangi bir sıvılaşma önlemi uygulamadan doğal halde serilmiştir. Sonuç olarak, kum kaynaması oluşmuş ve 2011 Büyük Doğu Japonya Depremi sırasında Hinode bölgesindeki binaların birçoğu hasar gördü. Bu nedenle, bu veritabanını, sıvılaşma olmayan alanlardan gelen verilerle genişletmek önemlidir. Bununla birlikte, burada sunulan sonuçlar, LPI ve LSN'yi sıvılaşma kaynaklı bina hasarlarına göre kalibre etmek ve farklı basitleştirilmiş sıvılaşma tetikleme prosedürlerinin sıvılaşma hassasiyet parametreleri üzerindeki etkisini değerlendirmek için çok değerlidir. Sıvılaşma zayıflığı parametrelerinin kalibrasyonunu ve değerlendirmesini iyileştirmek için son depremlerden gelen geniş kapsamlı verileri içerecek başka çalışmalara gerek duyulmaktadır.

#### **4. SIVILAŞMAYA KARŞI İYİLEŞTİRMEDE LABORATUVAR ÇALIŞMASI: KOLLOİDAL SİLİKA ENJEKSİYONU**

Zeminler, özellikle doğal tehlikelerin etkisi altında, yapıları ömür boyu destekleyecek uygun mühendislik özelliklerine her zaman sahip olmayabilir. Örneğin zeminlerde deprem sırasında meydana gelebilecek olaylardan en önemlisi zeminin sıvılaşmasıdır. Zemin sıvılaşması, zemin yüzeyinde ve yapılar üzerinde önemli etkilere neden olmaktadır. Bunlar yüzeye kum ve su fışkırması, büyük oturmalar, büyük genlikli yer hareketleri, taşıma gücü kaybı, istinat duvarlarında ve rıhtımlarda hasarlar, zeminde yayılma olarak da adlandırılan kalıcı yatay deformasyonlar ve yeraltı yapılarında oluşan hasarlar olarak sayılabilir.

Karşılaşılan sıvılaşma etkilerini azaltmak veya ortadan kaldırmak için zemin iyileştirmesi uygulamaları yapılabilir veya yapısal önlemler alınabilir. Nitekim iyileştirilmeyen zeminlerde alt ve üst yapılar depremler esnasında ciddi hasarlara maruz kalmıştır. Bu nedenle deprem öncesinde sıvılaşma olabilecek yerleri tahmin edebilme, sıvılaşma sonrası sıvılaşan bölgelerin tespiti ve alınabilecek önlemlerle ilgili pek çok çalışma yapılmıştır (Örneğin, Çelebi ve diğ. 2000, Toprak ve Holzer 2003, Seed ve Idriss 1982, Çetin ve diğ. 2004). Zemin özelliklerinin iyileştirmesi, yapılarda deprem sonrası oluşacak ciddi hasarlara karşı kıyaslanacak olursa ekonomik sınırlarda kalmaktadır. Zemin iyileştirmesinde uygulanacak yöntemin seçiminde bölgenin zemin özellikleri ve hangi özellikler üzerinde iyileştirme yapılacağı doğrudan ilişkilidir.

Zeminlerin sıvılaşmaya karşı direncini artırmak amacıyla uygulanan zemin iyileştirmesinde deprem sırasında aşırı boşluk suyu basıncı oluşumunu önlemek önemli olmaktadır. Bu hedef doğrultusunda zeminin sıkılığı artırılmaya veya zemin içindeki suyun drenajı sağlanmaya çalışılır. Zemin iyileştirmesi yöntemi olarak dinamik kompaksiyon, vibroflotasyon, taş kolonları, sıkıştırma enjeksiyonu, zemin değiştirme, drenaj teknikleri, kimyasal enjeksiyon ve diğ. kullanılmaktadır. Zemin özellikleri göz önünde bulundurarak farklı zemin iyileştirme yöntemlerini uygulamak mümkündür (Tablo 4.1).

**Tablo 4.1:** Zemin iyileştirme yöntemleri ( Day 2004)

Yöntem	Teknik	İlkeler	Uygun zeminler	Düşünceler
Zemin değiştirme	Kaldır ve değiştir	Arzu edilmeyen veya zayıf metaryalı kaz ve daha iyi Zemin ile değiştir	HERhangi	Maliyetin belirleyici olduğu yerde sınırlı derinlik ve alan, genellikle <10m
	Yer değiştirme	Zayıf zeminleri, kaymaya zorlayacak ve daha kuvvetli dolgu ile yerdeğiştirecek şekilde aşırı yükler	Çok yumuşak	Çamur dalgalarından ve dolgu altında kapanlanmış sıkışabilir zeminden dolayı problem söz konusu
Suda arındırma yöntemleri	Hendek kazma	Su drenajına izin verir	Yumuşak, ince taneli zeminler ve hidrolik dolgular	M derinliğe kadar etkili; hız zemine ve hendek aralığına bağlı; sonuçta oluşan çatlamış kabuki Zemin mobilitesini geliştirebilir
	Önceden sıkıştırma	Zemin konsolidasyonuna imkan verecek şekilde inşaat öncesi yük uygulaması	Normal konsolide ince taneli zeminler, organik zeminler, dolgular	Genellikle ekonomik; konsolidasyonu sağlamak için uzun zaman gerekebilir; etkili derinlik sadece gerekli gerilmelere ulaşmayla sınırlı
	Düşey drenajla birlikte önceden sıkıştırma	Konsolidasyonu hızlandırmak için drenaj yolunu kısaltır	Yukardaki ile aynı	Daha maliyetli; etkili derinlik genellikle $\leq 0$ m ile sınırlı
	Elektro-osmoz	Elektrik akımı suyun katoda akmasına neden olur	Normal konsolide siltler ve siltli killer	Pahalı; nispeten hızlı; kısıtlı alanda kullanılabilir; iletken zeminlerde kullanılmaz; küçük alanlar için ideal
Dayanımı artırma yöntemleri	Dinamik kompaksiyon	5 ile 35 ton arasındaki büyük ağırlıkların tekrarlı şekilde düşürülmesi; daha büyük ağırlıklar kullanılmaktadır	Kohezyonsuz zeminler en iyisi; ince tane içerenlerde de kullanılma imkanı, en kötü sonuçları su tablası altındaki kohezyonlu zeminler verir	Basit ve hızlı; su tablası altında ve üstünde kullanılabilir; 20 m'ye kadar etkin derinlikler; maliyet orta düzeyde; komşu yapılara potansiyel hasar
	Vibrokompaksiyon	Titreşimli ekipmanlar zemini sıkılaştırır	İnce tane oranı %20'den az kohezyonsuz zeminler	30 m derinliğe kadar etkili olabilir; iyi bir sıkılık ve üniformluk elde edilebilir; derinlerin grid aralığı kritiktir, nispeten pahalı
	Vibro-değiştirme	Zemine nüfuz etme ve uzaklaştırmada jetleme ve titreşim kullanılır; sonra, örselenmemiş	Yumuşak kohezyonlu zeminler ( $s_u=15$ ile 50 kPa arası)	Nispeten pahalı

		zeminle kuşatılan destek kolonları oluşturmak üzere deliğe yerleştirilir		
	Vibro-yerdeğiştirme	Zeminin kuyudan uzaklaştırılması yerine yanal olarak yerdeğiştirmesi durumu hariç vibro-değiştirmeye benzer	Daha katı kohezyonlu zeminler( $s_u=30$ ile 60 kPa arası)	Nispeten pahalı
Enjeksiyon	Çimento enjeksiyonu	Dayanımı arttırmak ve permabiliteyi azaltmak amacıyla zemin boşluklarının bağlayıcı madde ile doldurulması	İri ve ince taneli zeminlerin geniş bir yelpazesi	Pahalı; daha ince taneli zeminler için daha pahalı enjeksiyon maddesi gerekli; basınç enjeksiyonu, zemin çatlatma veya kompaksiyon teknikleri kullanılabilir
	Derin karıştırma	Stabilize edici ile zemini fiziksel olarak karıştırmada jetler veya burgular kullanılır	İri ve ince taneli zeminlerin geniş yelpaze	İleri derecedekohezyonlu killerde ve bazı çakıllı zeminlerde jetleme zayıftır; derin karıştırma yumuşak zeminlerde 50 m derinliğe kadar iyi sonuçlar verir
Termal	Isı	Geri dönüşü olmayan dayanım artışını sağlamada ve suya duyarlılığı azaltmada ısı kullanılır	Kohezyonlu zeminler	Yüksek enerji gerekliliği; maliyet pratikliği engeller
	Dondurma	Partikülleri bir arada tutmak ve kayma dayanımını artırıp permeabiliteyi azaltmak amacıyla zemindeki nem dondurulur	Su tablası altındaki tüm zeminler; su tablası üstündeki kohezyonlu zeminler	Pahalı; kazılarda ve tünellerde oldukça etkin; fazla yeraltı suyu akışı sorun çıkarır; yavaş bir işlem
Geosentetikler	Geogridler, geotekstilller, geonetler ve geomembranlar	Filtreler, erezyon kontrolü, su bariyerleri, drenler veya zemin güçlendirmesi için geosentetik malzemelerin kullanımı	Tüm zeminler için etkin filtreler; yumuşak zeminler için çoğunlukla donatı kullanılır	Çok değişik amaçlı işlerde genişçe kullanılır; diğer yöntemlerle birlikte (örnek; sürşarjla birlikte şerit drenaj veya saha girişi için platform inşa etmede) yaygınca kullanılır

Statik şartlar göz önüne alındığında bir sorun beklenmeyen kum zeminlerde deprem yüklemesiyle oluşan sıvılaşma ile zeminin taşıma gücü kaybı gerçekleşebilir. Zemini oluşturan dane dağılımı boşlukların durumunu çok etkiler. Enjeksiyon



malzemesi seçiminde dane dağılımı, zemininin kimyasal yapısı ve boşluk büyüklerinin çapı göz önünde bulundurulmalıdır. Enjeksiyon maddeleri ile zeminde bulunan boşluklar doldurulur, kohezyon etkisi olurturulur. Bu durumda geçirimsizlik azalırken, dayanımda artış gözlenir. Son yıllarda kolloidal silikatları ince daneli olması, daneler arasına su gibi süzülebilmesi, jelleşme sürelerinin ayarlanmasındaki kolaylıklar ve daneler arasındaki kohezyonu iyi derecede artırması sebebiyle tercih edilmektedir.

Enjeksiyon yapılmış zeminlerin mukavemetleri laboratuvarında silindirik numuneler üzerinde yapılan serbest basınç deneyleri ile belirlenebilir. Ancak arazideki zemin üç eksenli bir yüklemeye maruz kalacağından üç eksenli deneylerin yapılması daha gerçekçi sonuçlar elde edilmesini sağlayacaktır. Bu çalışmada temiz kum numunelerinin özellikleri kolloidal silika malzemesi ile iyileştirilerek, temiz kum numuneleri ile iyileştirilmiş numunelerin özelliklerinin karşılaştırılması hedeflenmiştir.

Numuneler farklı rölatif sıklıklarda hazırlanmış (%40, %60 ve %80 rölatif sıklıklar), statik üç eksenli deney aletiyle 100 kPa, 300kPa ve 600 kPa hücre basınçlarında deneyler gerçekleştirilmiştir. Statik üç eksenli deneylerin yanı sıra dinamik üç eksenli kullanılarak modül deneyleri yapılmıştır. Modül deneylerinde rölatif sıklık oranlarından %40 ve %60 kullanılmıştır, iyileştirilmiş numuneler 7 günlük küre tabi tutulmuş, 100 kPa hücre basıncında test edilmiştir. Deneysel çalışmanın sonuçları değerlendirilerek gerekli öneriler yapılmıştır.

#### **4.1 Zemin Enjeksiyonu ve Kolloidal Silikanın Literatürdeki Yeri**

Zeminlerin sıvılaşmaya karşı direncini artırmak amacıyla uygulanan zemin iyileştirmesi yönteminin temel hedefi, deprem sırasında aşırı boşluk suyu basıncı

oluşumunu önlemektir. Bu hedef doğrultusunda zeminin sıklığı artırılmaya veya zemin içindeki suyun drenajı sağlanmaya çalışılır. Zemin iyileştirme yöntemi olarak dinamik kompaksiyon, vibroflotasyon, taş kolonları, sıkıştırma enjeksiyonu, zemin değiştirme, drenaj teknikleri, kimyasal enjeksiyon ve diğ. kullanılmaktadır. Son zamanlarda kimyasal yapıları ve bileşen bakımından birbirinden farklı örneğin sodyum silikatlar, akrilamidler, lignosulfonatlar, fenoplastlar, aminoplastlar, su ile temas edince jelleşen veya polimerleşen malzemeler vb. kimyasallar enjeksiyonda kullanılmaktadır.

Enjeksiyon yapılmış zeminlerin mukavemetleri laboratuarda silindirik numuneler üzerinde yapılan serbest basınç deneyleri ile belirlenir. Yüzeyde uygulanan yükler üç eksenli gerilme durumu yaratacağı için numuneleri üç eksenli deneye tabi tutmak daha uygun olacaktır (Nonveiller, 1989). Öte yandan farklı katkı maddelerinin enjeksiyonun mukavemeti üzerindeki etkisini araştırmak ya da farklı enjeksiyonların mukavemetlerini karşılaştırmak için serbest basınç deneyleri çok yararlıdır (Karol, 2003). Silikat enjeksiyonları 70 ile 3500 kPa arasında değişen serbest basınç dayanımı gösterebilirler. Dayanım silikat miktarıyla birlikte, jelleşme süresi, reaktant, tane büyüklüğü ve diğ. faktörler bağlıdır (Henn, 1996).

Zemin enjeksiyonunda kullanılan akrilamid nörotoksik malzemelerdir. Laboratuvar deneyleri akrilamidlerin hayvanlarda kanserojen olduğunu göstermektedir. Deri ile teması deri arasından absorbe edildiği için çok tehlikelidir. Kronik mesleki maruziyet kimyasal bir afettir çünkü kümülatif zehirlilik oranı yüksektir. Arazi deneyleri zararlı olmaması için yerine uygun bir yerleştirme ile % 10 luk bir akrilamid çözeltisinin en fazla % 0.02 oranında serbest akrilamid konsantrasyonunda olması gerektiğini göstermiştir (Karol, 2003).

Zemine kimyasal enjekte edilmesinde öncelikle uygun iyileştirme malzemesi bulunması önemlidir. Uygulanacak enjeksiyon malzemesinin zeminin yapısına uygun, kimyasal yapısıyla ters reaksiyona girmeyecek bir malzeme olması gerekmektedir. Sıvılaşmaya karşı iyileştirmeden aranan ön büyük özellik deprem sırasında artık boşluk suyu basıncının artışını kontrol edebilmek, zemin içindeki boşluk oranını düşürüp, kohezyonu artırabilmektir. Kolloidal silikanın en önemli özelliklerinden biri yoğunluğunun suya yakın olması sebebiyle suyun ulaşabileceği en ince boşluklara bile ulaşabilmesidir. Kum dolu bir kabın üstüne jelleşme süresi ayarlanmış bir karışımı

döktüğümüzde tüm tanelerin arasındaki boşluklara nüfuz ederek kabın altına kadar nüfus edebilmektedir. Jelleşme süresinin hızlandırıcı malzemeye ayarlanabiliyor olması, uygulanma kolaylıkları sağlamaktadır. Enjeksiyon işleminden sonra kullanılan aparatlar ve malzemeler su ile kolaylıkla temizlenebilmektedir. Birimde bulunan koloidal silika oranı düşürülerek maliyet azaltılabilmekte, bu konsantrasyon düşüklüğü dayanımda çok fazla düşüklüklere sebep olmamaktadır. Sıvılaşmaya karşı zemin iyileştirme çalışmalarında enjeksiyon malzemesi olarak koloidal silika kullanılarak farklı bir çok çalışma yapılmıştır.(Gallagher ve Mitchell 2002; Gallagher ve Finsterle 2004; Gallagher ve diğ. 2007; Conlee ve diğ. 2012; Gallagher ve Lin 2009; Gallagher 2000; Hamderi ve Gallagher 2013; Hamderi ve Gallagher 2015; Conlee 2010; Conlee ve diğ. 2008; Manav ve diğ. 2019; Manav ve diğ. 2018; Manav ve diğ.2015<sup>a,b</sup>).

Enjeksiyon malzemesindeki silika konsantrasyonu iyileştirilmiş zemin dayanımını etkileyen ana madde ve yardımcı madde karışımının oranlarıyla kontrol edilebilir. Enjeksiyon malzemenin jel süresi asit hızlandırıcı oranı ile kontrol edilebilir. pH değeri düşürülüp ve karışımdaki asit oranı artırılarak jelleşme süresi uzatılabilir (Iler 1979). Koloidal silika oranının artırılması jelleşme süresini azaltırken jeli meydana getiren partiküllerin sayılarının artması daha kuvvetli bir jel meydana gelmesine sebep olur (Dupont 1997). Ancak Gallagher ve Mitchell (2002) yaptıkları çalışmada enjeksiyon malzemesinin içinde koloidal silikanın ağırlıkça %10'dan fazla kullanılması durumunda ekonomikliğini kaybettiğini belirtmektedir. En kısa jelleşme süresi için 5 ile 6 arasında pH seviyesi gerekmektedir (Dupont, 1997). Bunun üzerindeki ve altındaki pH seviyeleri için daha uzun jelleşme süreleri elde edilmektedir. Gallagher (2000) ve Noll ve diğ. (1992) tarafından yapılan çalışmalarda ortalama tane boyutu 7 nm ve yüzey alanı 342 m<sup>2</sup>/g olan LUDOX SM koloidal silikası kullanılmış ve jelleşme süresinin 49 ve 100 güne kadar uzadığı bildirilmiştir. Noll ve diğ. (1992) bu silikanın jelleşme süresinin tespiti için testler yapmıştır. pH derecesi ve tuz ile silika konsantrasyonu bağlı olmak kaydı ile jelleşme süresinin birkaç dakikadan birkaç bin saate kadar uzanabileceği görülmüştür. Sodyum klorid, kalsiyum ve aliminyum katalizör olarak kullanılmıştır. Dave ve diğ. (2010) yapmış oldukları çalışmada farklı katalizör etkilerini ayrıntılı olarak incelemiştir. Kullandığı malzemeler kalsiyum klorid, magnezyum klorid, potasyum klorür, kalsiyum oksit ve çimentonun etkilerini gözlemlemiştir. Yapılan bu çalışmada kullanılan malzemelerin

ağırlıkça yüzdelerinin dayanıma ve jelleşme süresine oldukça etkili olduğu gözlenmiştir. Aynı oranda karıştırılan malzemelerde ise kür süreleri değişmesine rağmen kendi aralarında dayanım oranlarındaki farklılık oranı değişmemiştir.

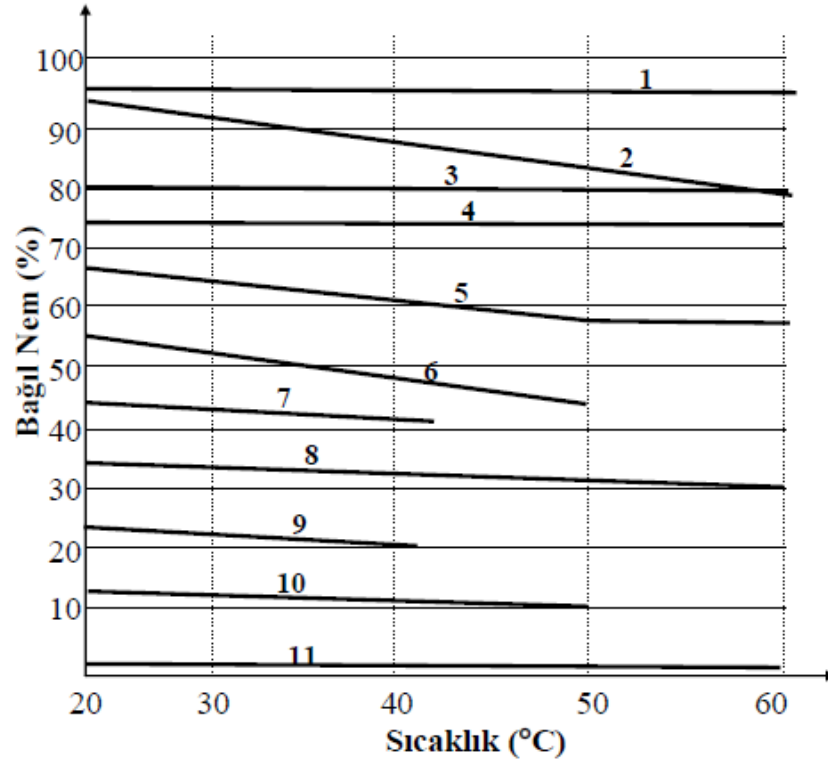
Gallagher ve Mitchell (2002) suya doymuş gevşek kumlarda, koloidal silika ile iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş numuneler hazırlamıştır. Bu numunelerde farklı deformasyon özelliklerine dinamik üç eksenli aleti kullanılarak bakılmıştır. Sıvılaşma karşısında iyileştirilmemiş numunelerde küçük aksenal kuvvetler oluşmuştur. Buna rağmen sıvılaşma başladığında, büyük gerilmeler çok hızlı meydana gelmiş ve az tekrarlı yüklemelerde örnekler yenilmiştir. Diğer taraftan olarak koloidal silika ile iyileştirmiş tüm örneklerde tekrarlı yüklemeler boyunca çok küçük gerilmeler oluşmuştur. Sonuç olarak koloidal silika enjeksiyonu gevşek kumlarda tekrarlı yüklemeler altında önemli derecede deformasyona karşı direnç sağlamaktadır. Kodaka ve diğ. (2003) yaptıkları çalışmada, doğal zeminin artık boşluk suyu basıncı oranını 1 seviyelerinde tespit edilirken, koloidal silika ile iyileştirilmiş zeminde bu oranın 0.70 dolaylarında elde etmişlerdir.

Kutu ve tank modelleri koloidal silikanın permabilite özelliğini azaltmak için kullanılan temel laboratuvar araçları arasında yer almaktadır. Morrison ve diğ. (1996) hidrolik geçirgenliği test etmek amacıyla 81\*5\*30 cm boyutlarında tank modellemiş, bu modellerinde üç tip kum türünü kullanmışlardır (Kuvars, bentonit, graven). Hidrolik geçirgenliği test ederken amorphous ferric oksit moddesini kullanmışlar ve bu maddenin sabit kaldığını elde etmişlerdir. Noll ve diğ.(1992) yılında yaptıkları kum kutusu testinde ise 3.6\*1.8\*1.2 m boyutlarında kutuda yaptıkları koloidal silika iyileştirmesinde permabiliteyi azaltıcı bir madde olduğunu tespit etmişlerdir. Conlee ve diğ. (2008) yaptıkları çalışmada kum kutusunda üç farklı tabaka kullanılmıştır. Kullanılan tabakalarda farklı sıkıştırma teknikleri kullanılarak röleatif sıklıkları ayarlanmıştır. Koloidal silikanın jelleşme zamanı 16 saate kullanılmış 160 saat beklendikten sonra teste tabi tutulmuştur. Yapılan bu çalışmada kum kutusunun bir tarafı iyileştirilirken diğer tarafı iyileştirilmemiştir. Üç derecelik eğime sahip bu kutu sallama tablasına alındıktan sonra iyileştirilmemiş kısmın iyileştirilmiş kısma göre gözle görülür derecede deformasyona uğradığı tespit edilmiştir.

## 4.2 Deneylerde Kullanılacak Malzemeler Üzerinde Çalışmalar

### 4.2.1 Kürün Belirlenmesi

Kür kabininde değişik sıcaklık derecelerine göre ortam bağıl nemi ayarlanması için kimyasallar kullanılmaktadır. Üretici firma tarafından verilen; kimyasallar ile değişik sıcaklıklarda oluşturulabilecek bağıl nem yüzdeleri Şekil 4.1’de verilmiştir.



No	Kimyasal Malzeme
1	Aritilmiş su
2	Doymuş Potasyum Nitrat çözeltisi
3	Doymuş Potasyum Klorid çözeltisi
4	Doymuş Sodyum Klorid çözeltisi
5	Doymuş Potasyum Nitrat çözeltisi
6	Doymuş Potasyum Dikromat çözeltisi
7	Doymuş Potasyum Karbonat çözeltisi
8	Doymuş Magnezyum Klorit Çözeltisi
9	Doymuş Potasyum Asetat Çözeltisi
10	Doymuş Lityum Klorit Çözeltisi
11	Kurutulmuş Silika Jeli

Şekil 4.1: Değişik kimyasallar ile değişik sıcaklıklarda oluşacak nem yüzdeleri

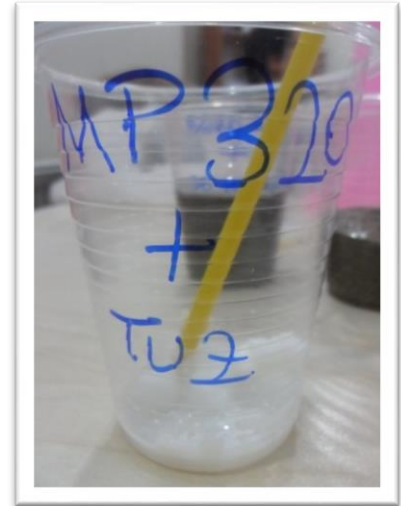
Literatürde farklı kür örnekleri uygulanmıştır. Bu çalışma zeminde su seviyesi yüksek yerlerde uygulandığı düşünülerek %95 bağıl nem uygulaması seçilmiştir. İyileştirilmiş numuneler için 20 °C’de etüve damıtılmış suyla doldurulmuş bir kap konuldu ve % 95 nispi nemde 7 ve 28 gün boyunca dijital nem ölçer ile sürekli olarak ölçülmüştür.

#### 4.2.2 Jelleşme Süresi Tayini

Kimyasalların öncelikli olarak katalogtaki jelleşme sürelerine uyuyor mu diye çeşitli oranlarda kimyasal ve hızlandırıcı kullanılarak test edildi. Yapılan karışımlarının verilen katalog bilgileriyle uyumlu olduğu gözlemlendi (Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4).



a)



b)

**Şekil 4.2:** Jelleşme sürelerinin kontrolü

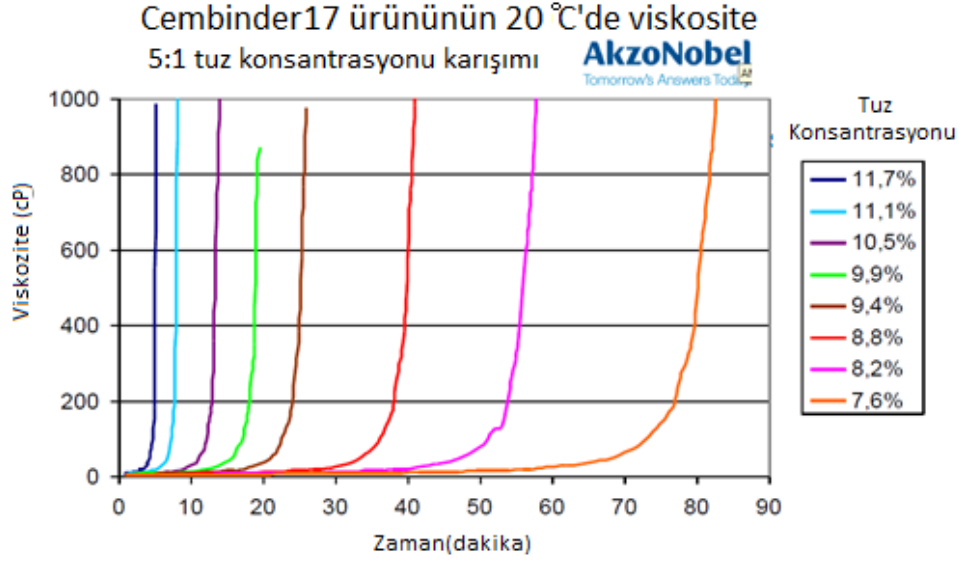


a)



b)

Şekil 4.3: Farklı oranlarda kimyasal enjekte edilen basit kimyasal iyileştirmelerden görüntüler



Şekil 4.4: Kullanılan kimyasalın katalog jelleşme süresi grafiği (Dupont 1997)

### 4.2.3 Kullanılacak Kum Özelliklerinin Belirlenmesi

#### 4.2.3.1 Özgül Ağırlık Deneyi

Özgül ağırlık deneyi üç set halinde yapılmış ve ortalama değer kabul edilmiştir. Deney için gerekli araç ve gereçler:

Vakum aleti, sarsma tablası (vibrasyon aleti),yoğunluk kabı, saf su, terazi, huni, etüvdür.

Özgül ağırlık değerinin bulunması için kullanılan formül:

$$GS = \frac{W_2 - W_1}{(W_4 - W_1) - (W_3 - W_2)} \quad (4.1)$$

$W_1$  : Şişe ağırlığı (yoğunluk kabı),  $W_2$  : Şişe + Numune ağırlığı,  $W_3$  : Havası alınmış numune + su + şişe ağırlığı,  $W_4$  : Havası alınmış su + şişe ağırlığıdır (denklem 4.1).

Kuru numune, 20 °C' de 24 saat etüvde bekletilmeli ve saf suyun sıcaklığı 20 °C olmalıdır. Boş yoğunluk kabının ağırlığı ölçülür. Boş kaba saf su koyulur ve vakum aletinde havası alınır. Havası alınmış saf su ve kabın ağırlığı ölçülür. 100 gr kuru numune ve yoğun kabının ölçüsü alınır.

Kaba bir miktar saf su ilave edilir ve yoğunluk kabının pik değerine kadar kaba saf su ilave edilir. Aynı zamanda numune içinde hava kabarcıklarının olmaması saf suyun boşluklara dolması için su ilave işlemi sarsma tablasının üzerinde yapılır.

- 1- Kap üzerindeki pik değer çizgisine kadar saf su ilave işlemi bitirildikten sonra vakum aleti ile karışımdaki hava kabarcıkları alınır.
- 2- Havası alınan numune, saf su ve kap ağırlığı ölçülür.
- 3- Bu işlem 3 defa tekrarlanır.
- 4- Gerekli olan ağırlıklar elde edildikten sonra yukarıda verilen formül uygulanarak özgül ağırlık değeri elde edilir.

**Çalışmada kullanılacak numune özgül ağırlık değeri:**

$$GS = \frac{W_2 - W_1}{(W_4 - W_1) - (W_3 - W_2)} \quad (4.2)$$

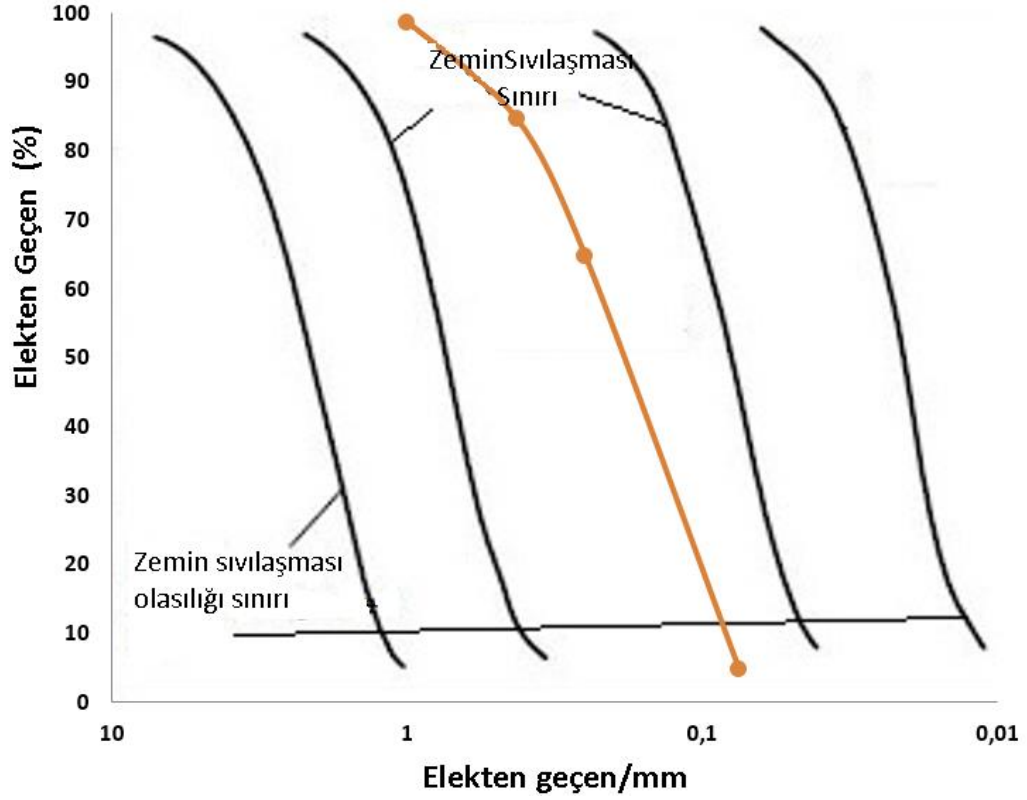


<b>ÖZGÜL AĞIRLIK DENEYİ</b>			
	<b>Set 1</b>	<b>Set 2</b>	<b>Set 3</b>
<b>W<sub>1</sub></b>	83.16	83.16	83.16
<b>W<sub>2</sub></b>	183.16	183.16	183.16
<b>W<sub>3</sub></b>	395.42	395.51	394.92
<b>W<sub>4</sub></b>	332.24	332.24	332.24
<b>G<sub>s</sub></b>	2.715915	2.72257	2.679528
<b>G<sub>s</sub></b>	<b>2.706004591</b>		

Denklem 4.2'den elde edilen özgül ağırlıkların ortalaması alındığında 2.7 elde edilmiştir.

#### **4.2.3.2 Elek Analizi**

Bu çalışmada kullanılacak kumu belirlemek için Denizli çevresindeki çeşitli ocaklardan alınan farklı dereceli kum numuneleri üzerinde elek analizleri yapılmıştır. Elek analizleri sonucunda, numunelerin sınıflandırılabilir zemin için belirlenen sınıflandırma aralığında çalışılmasına karar verilmiştir. Şekil 4.5, bu çalışmada kullanılan kum toprağının tane büyüklüğü dağılımının, genel olarak kabul edilen sınıflandırılabilir zeminler arasında olduğunu göstermektedir. Tane büyüklüğü dağılımına göre, zemin temiz kum olarak sınıflandırılabilir çünkü ince tanelerin içeriği % 5'ten azdır.



Şekil 4.5: Elek Analizi Sonuçları

### 4.3 Statik ve Dinamik Üç Eksenli Deney Yöntemleri

Bu araştırmada kullanılacak kumu kesinleştirmek için Denizli civarından farklı ocaklardan alınmış, farklı gradasyonlu kum numuneleri üzerinde elek analizi yapılmıştır. Yapılan bu elek analizlerinin sonucunda sıvılaşabilen zeminler için belirlenmiş gradasyon aralığı içinde kalan numune ile çalışılmasına karar verilmiştir. Kolloidal silika, ucuz ve kaynağı bol bir kimyasaldan elde edilebilmesi, değişik depolama şartlarında saklanabilmesi, zehirsiz olması, patlayıcı özelliğinin olmaması, suya yakın düşük viskoziteli olması, katalizörünün ucuz ve kolaylıkla bulunması, değişen jelleşme süreleri ile kontrol edilebilmesi, yer altı suyu ile kabul edilebilir seviyede seyrelmesi, yer altı suyunda bulunan kimyasallardan ve tuzdan etkilenmemesi, yüksek dayanımlı olması nedeniyle Akzo Nobel marka kolloidal silika kullanılmıştır.

Yapılan bu çalışmada temiz kum numuneleri ve kolloidal silika ile iyileştirilmiş numuneler statik üç eksenli aleti ve dinamik üç eksenli deneye tabi

tutulmuştur. Numuneler %40, %60 ve %80 rölatif sıklıklarda hazırlanmış, statik üç eksenli deney aletiyle 100 kPa, 300 kPa hücre basınçlarında üç eksenli basınç deneyleri yapılmıştır. Dinamik üç eksenlide %40 ve %60 rölatif sıklık kullanılmış, kullanılan deney aletinin kapasitesinin yeterli olmaması sebebiyle 100 kPa hücre basıncına tabi tutulmuştur. Deneyler altışar set şeklinde Tablo 4.2’de verilen prosedürlerin kullanılan değişkenleri yapılmıştır.

**Tablo 4.2:** Deney prosedüründe kullanılan değişkenler

Hücre Basıncı	Deney Türü	Rölatif Sıklık	Numune Türü	Kür Günü
100 kPa	Statik, Dinamik	%40,%60	Temiz	-
300kPa	Statik	%40, %60, %80	Temiz	-
600kPa	Statik	%40, %60, %80	Temiz	-
100 kPa	Statik, Dinamik	%40,%60	İyileştirilmiş	7 gün
300kPa	Statik	%40, %60, %80	İyileştirilmiş	7 gün ve 28 gün
600kPa	Statik	%40, %60, %80	İyileştirilmiş	7 gün ve 28 gün

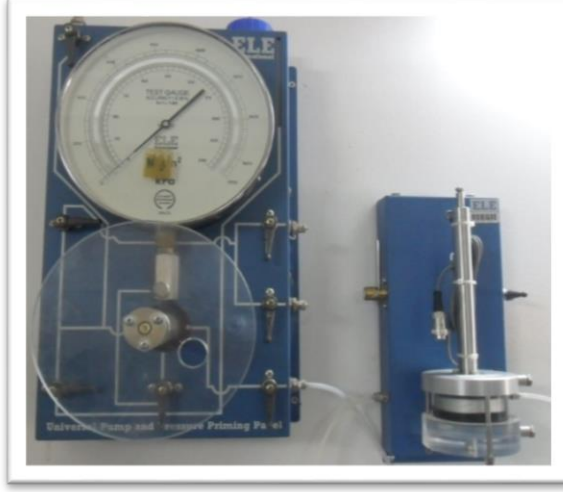
Statik deneylerde Pamukkale Üniversitesi İnşaat Mühendisliği zemin mekaniği laboratuvarında bulunan statik üç eksenli deney aleti, dinamik deneylerde Dokuz Eylül Üniversitesi bünyesinde bulunan dinamik üç eksenli aleti kullanılmıştır (Şekil 4.6 ve Şekil 4.7).



a) Statik üç eksenli basınç aleti



b) Sensörlerin bağlantısından görünüm



c) Vakum ünitesi ve hacim değişim ölçme aleti



d) Yağ/su basınç sistemi



e) 7 cm Numuneler için Yeni Hücre



f) Saf su ve hava alma ünitesi

Şekil 4.6: Statik üç eksenli basınç aleti deney düzeneği

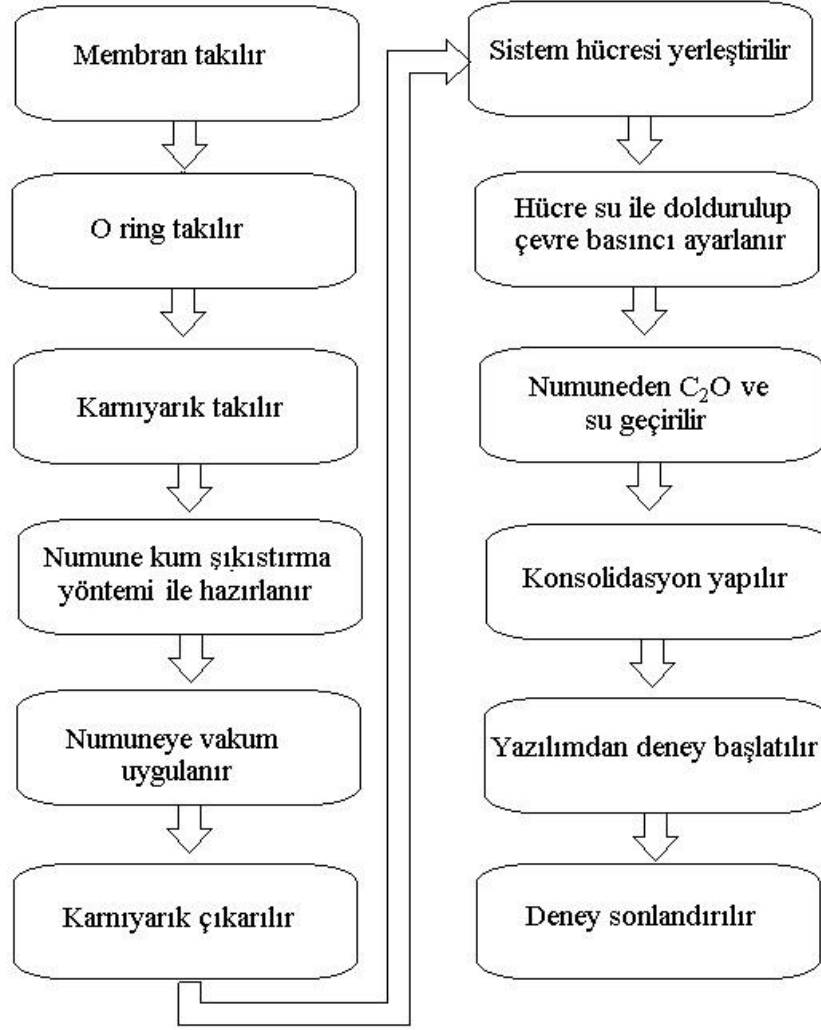


1- Vana ve su dağıtım paneli, 2- Geri ve hücre basınç aleti, 3- Hacim ölçer, 4- Pneumatic actuator, 5- Hava tahliye tankı, 6-CO2 tüpü, 7- Vana ve su dağıtım paneli, 8-Üç eksenli test hücre 9- Veri toplama sistemi ve bilgisayar

**Şekil 4.7:** Dinamik üç eksenli basınç aleti deney düzeneği

Temiz kum numuneleri hazırlanırken alet üzerine membran yerleştirilmiş, o ringler ile alete sabitlenmiştir. Alt poroz taş yerleştirilmiş ve karnıyarık diye isimlendirilen numune hazırlayıcısı yerleştirilmiştir. Vakum edilerek membran düzleştirilmiştir. %40, %60 ve %80 rölatif sıklıktaki kum numuneleri yukarıdan belli bir mesafeden dökülüp kademeli olarak düzelterek 14 cm olacak şekilde hazırlanmıştır. %40'luk numune için ise kum yağmurlama yapılmış daha sonra karnıyarığa yerleştirilmiştir. Temiz kum numune hazırlanış diyagramı Şekil 4.8'de görülmektedir.

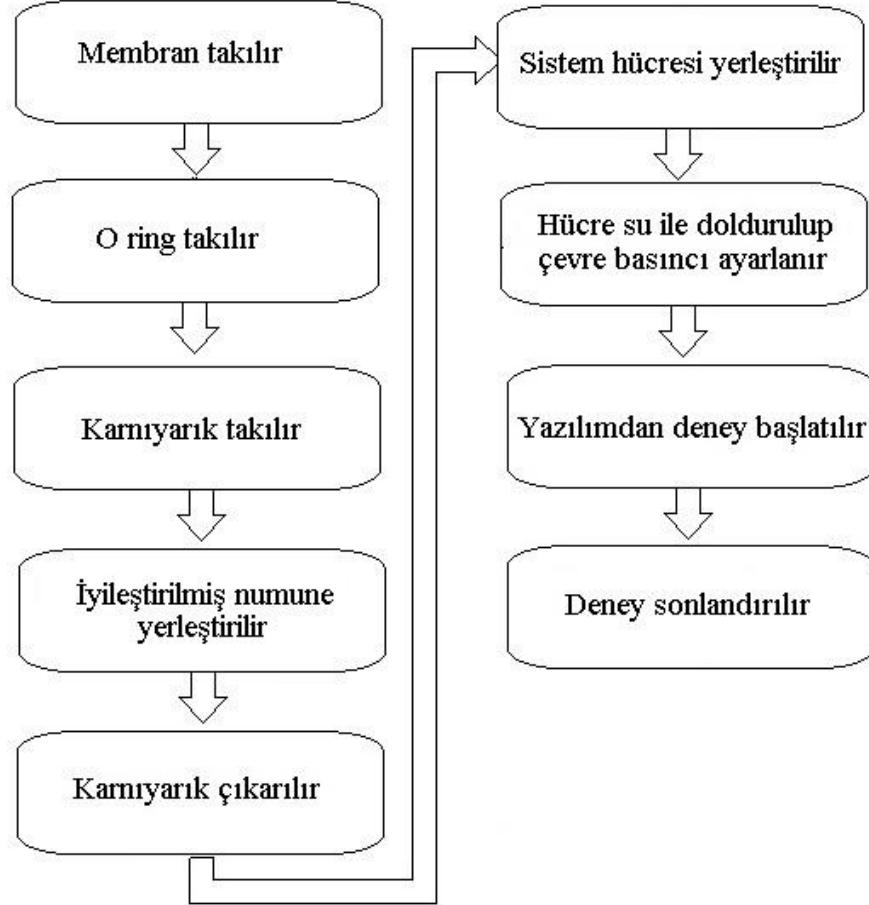
Üst kısma tekrar poroz taş yerleştirilmiştir. Üst başlık ünitesi yerleştirilip membran o ringler kullanılarak sabitlenmiştir. Vakum aletiyle 30 kPa'a kadar vakum uygulanmış. Numunenin bozulmadan ayakta kalması sağlanmıştır. Karnıyarık çıkartılarak, hücre yerleştirilmiş ve ünite saf su ile doldurulmuştur. Bu aşamadan sonra çevre basıncı istenilen miktarda ayarlanıp vakum işlemi bitirilmiştir.



Şekil 4.8: Temiz kum numune deney akış diyagramı

Numune içinden 45 dakika süre karbondioksit geçirilerek numune içindeki hava sürüklenmiş, bu işlem sayesinde numunenin doyurulması daha rahat yapılabilmektedir. Numunenin içinden de belli miktar temiz su geçirilip, ters basınç uygulaması işlemi yapılmıştır. Hücre basıncı ve ters basınç kademeli olarak artırılmıştır. Temiz kum numunelerinde B değeri 0,97 ve üzeri olduğunda bu işlem sonlandırılmıştır. Numune konsolide edilmiştir. Bu aşamadan sonra istenilen hücre basıncı değerinde numuneye yükleme işlemi yapılmıştır. Bu işlemler her bir rölatif sıkılık ve hücre basıncı için tekrarlanmıştır. İyileştirme malzemesi olarak kullanılan koloidal silikada %40 oranında  $\text{SiO}_2$  bulunmaktadır. Bu malzemenin jelleşmesini hızlandırmak için tuzlu su konsantrasyonu kullanılmıştır. Kullanılan tuzlu su oranı ağırlıkça karışımın beşte biri oranındadır. Ayarlanan o oranlarda jelleşme süresi 25 dakika ile 30 dakika arasında değişmektedir. Numunelere koloidal silikaları enjekte

edebilmek için basınç ünitesi bir sistem tasarlanmış olup, bu ünite sayesinde numunelerden öncelikle temiz su geçirilerek numuneler su ile doyurulmaya çalışılmıştır. Daha sonra koloidal silika numunelerin alt kısmından basılmış, üst kısımdan da koloidal silika çıkışı kontrol edilerek zemin iyileştirmeleri gerçekleştirilmiştir. İyileştirilmiş kum numunesi hazırlanış diyagramı Şekil 4.9'de görülmektedir.



Şekil 4.9: İyileştirilmiş kum numune deney akış diyagramı

Hazırlanan iyileştirilmiş numuneler etüvde 20 °C sıcaklık altında, bir kaba saf su konulmuş, %95'in üzerinde nem ortamında 7 günlük küre tabi tutulmuştur. Küre tabi tutulan numuneler hücreye yerleştirilmiştir (şekil 4.9). İyileştirilmiş kum numunelerinden iki gün boyunca su geçirilmeye çalışılmış ancak B değerinde bir artış olmadığı ve geçirgenlik sağlanamadığı için numuneler suya doyurulmadan deneyler yapılmıştır. Numunelerin deney esnasındaki görüntüsü ve iyileştirilmiş numunenin ilk görüntüsü şekilde görülmektedir (Şekil 4.10). Deney sonrası görünüm Şekil 4.11'da verilmiştir.



a) Temiz kum numunesinin suya doyurulması işlemi



b) %80 rölatif sıklıkta bir numunenin koloidal silika ile iyileştirilmiş hali

**Şekil 4.10:** a) Temiz kum numunesinin suya doyurulması işlemi, b) %80 rölatif sıklıkta bir numunenin koloidal silika ile iyileştirilmiş hali



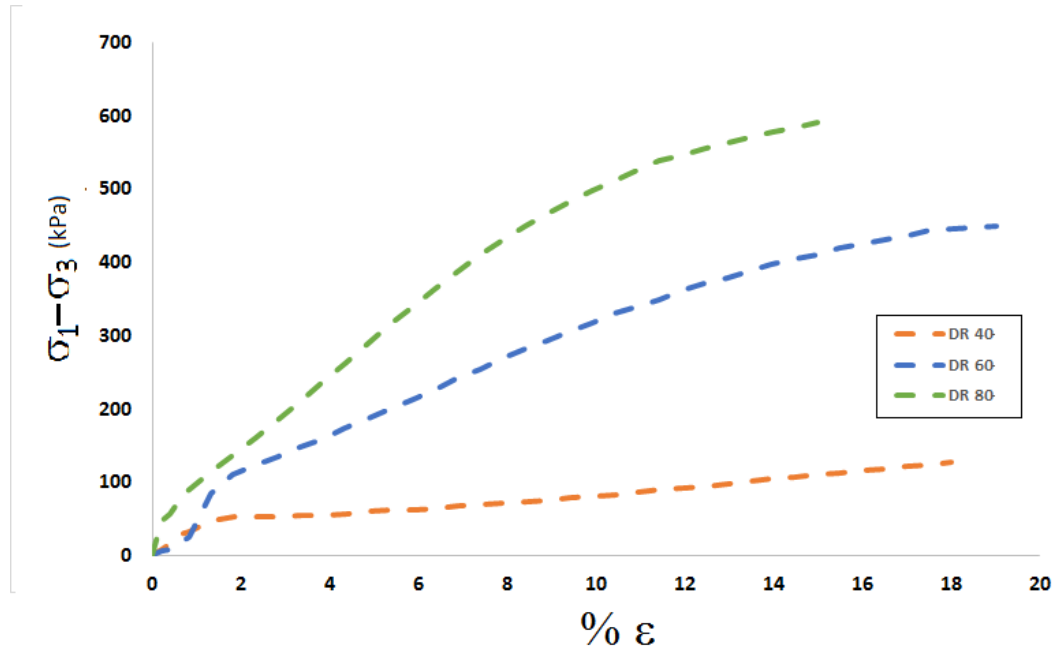
**Şekil 4.11:** Temiz kum numunesinin deney sonrası görüntüsü



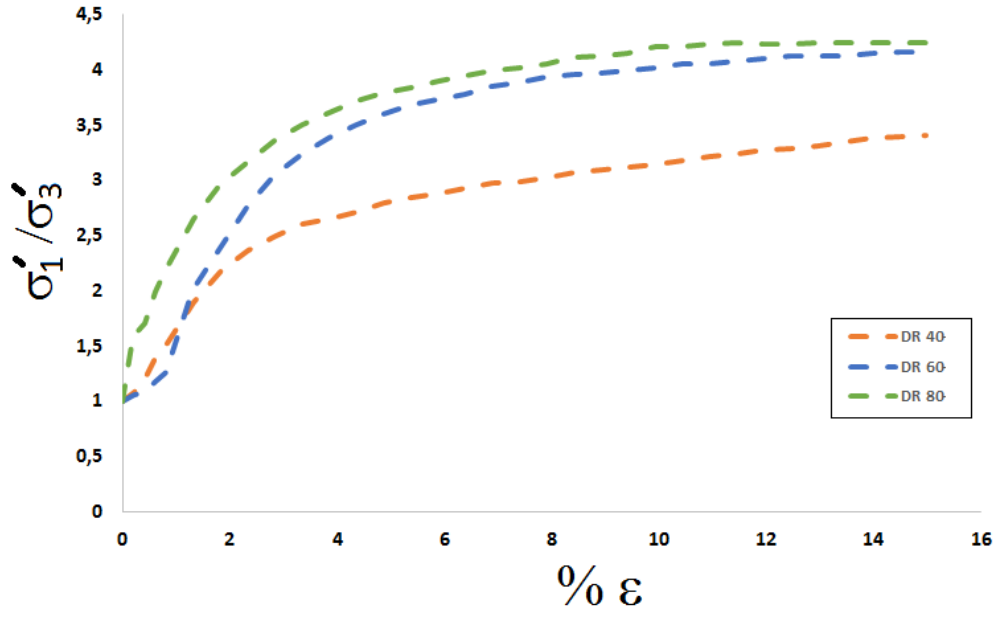
Dinamik üç eksenli deneylerde ASTM D 3999 (Load Controlled Modulus and Damping Test) standardı kullanılarak kademeli olarak yük artırılıp deneyler tekrarlanarak gerçekleştirilmiştir. Temiz kum numuneleri üzerinde sıvılaştırma deneyleri yapılabilmiş, iyileştirilmiş kum numuneleri üzerinde 1000 cycle kadar numuneler yüklenmiş ancak herhangi bir bozulma görülmemiştir.

#### 4.4 Deney Sonuçları

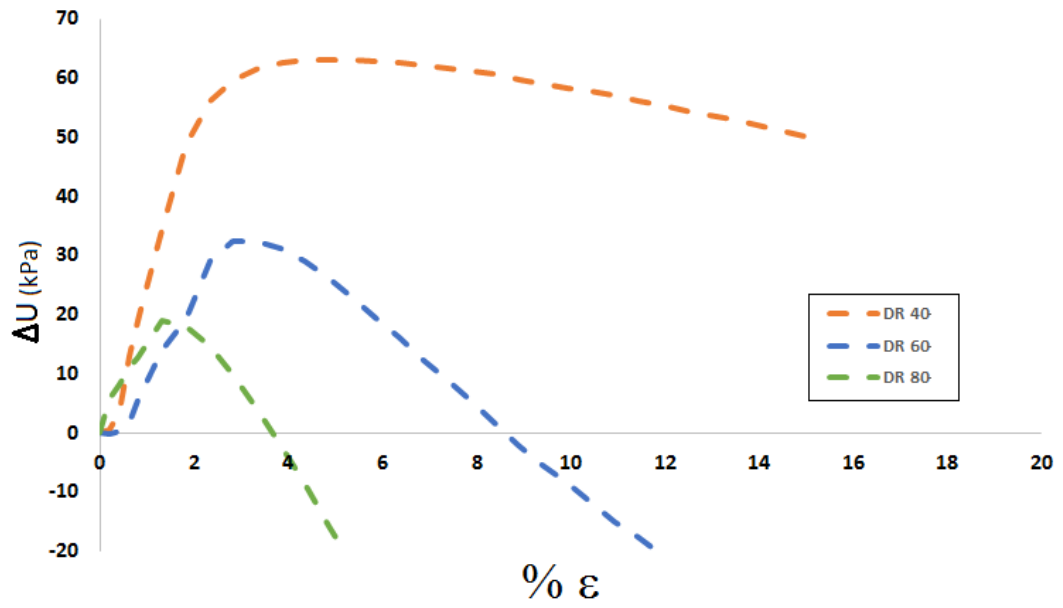
Şekil 4.12'da temiz kum numuneleri üzerinde 100 kPa çevre basıncında yapılan deney sonuçları görülmektedir. Şekil 4.12a ve b de görüldüğü gibi %40 rölatif sıklıktaki kum numunesi en düşük dayanımı almıştır. Şekil 4.12 c'de görüldüğü gibi artık boşluk su basıncı farklarına bakıldığında % 40 rölatif sıklık gevşek numunede artış gözlenirken, %60 ve %80'lik (orta, sıkı kum) rölatif sıklıklarındaki numunelerde artık boşluk suyu basıncında düşüşler gözlenmiştir. Bu temiz kum numuneleri için beklenen bir davranıştır.



a)  $(\sigma_1 - \sigma_3) - \epsilon$  grafiği



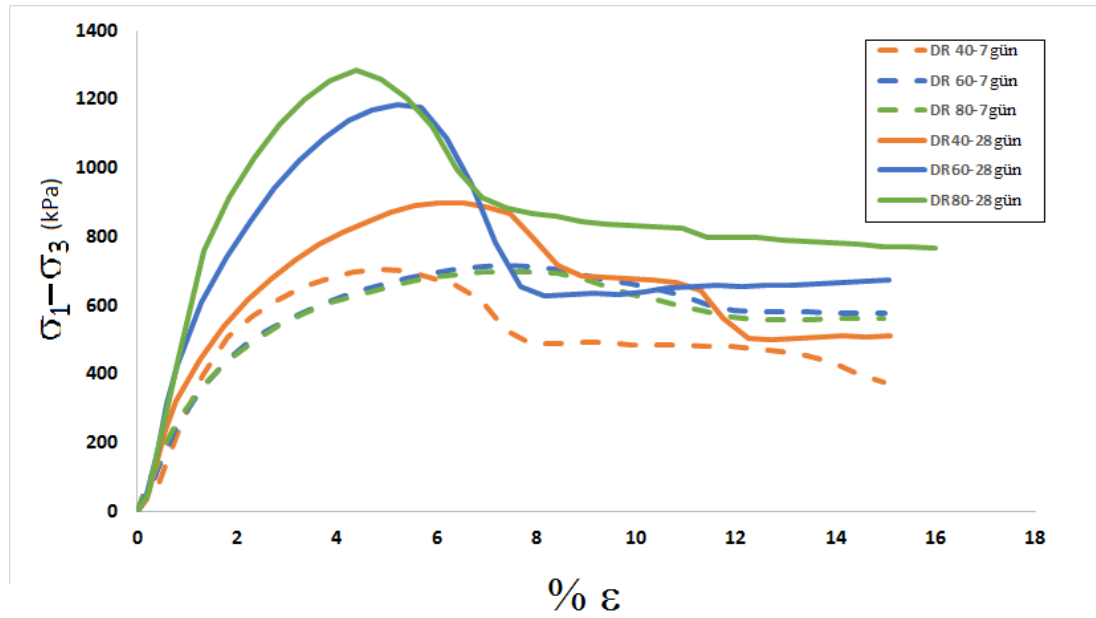
b)  $(\sigma'_1/\sigma'_3)$ -  $\epsilon$  grafiği



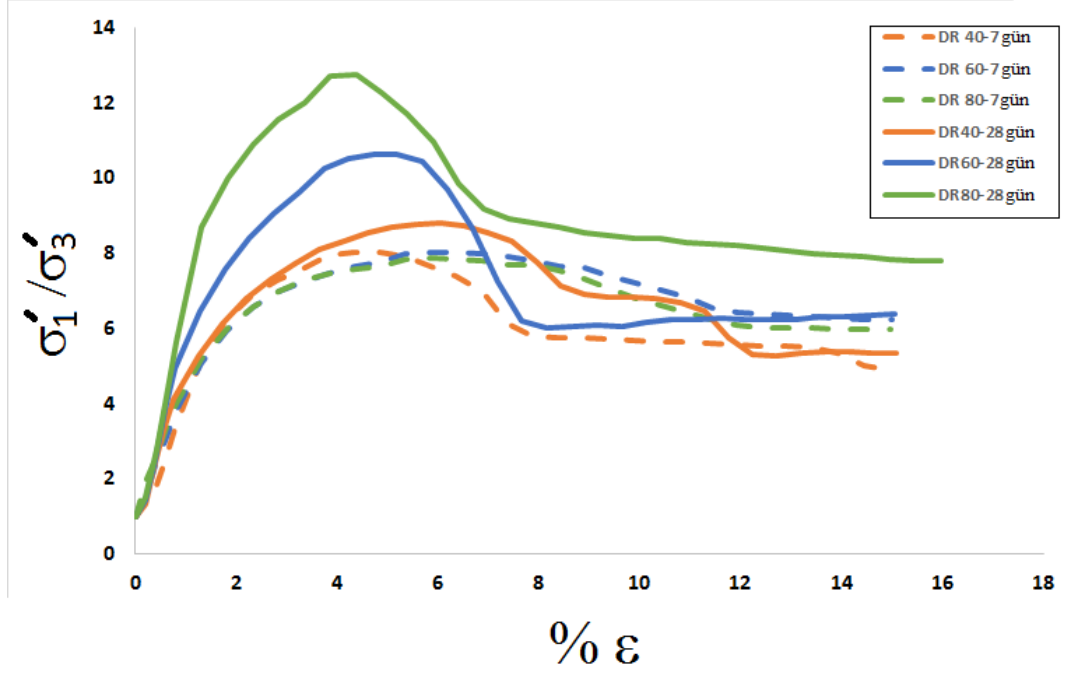
c)  $\Delta u$ -  $\epsilon$  grafiği

Şekil 4.12: Temiz kum numuneleri üzerinde 100 kPa çevre basıncında yapılan deney sonuçları

Şekil 4.13’de ise iyileştirilmiş numuneler üzerinde 100kPa çevre basıncında yapılan deney sonuçları gözlenmektedir. Şekil 4.12 a ve şekil 4.13 a ya bakıldığında dayanımda ciddi artışlar gözlemlenebilmektedir. Şekil4.12 b ve Şekil 4.13b’deki grafikler karşılaştırılacak olursa 7 günlük küre tabi tutulan numunelerde 2 katından fazla dayanım artışı gözlenmiştir. 28 günlük numunelere baktığımızda değerler 3 kattan fazladır. İyileştirilmiş numunelerde taneler arasındaki boşluklar koloidal silika ile dolduğu için suya doymun hale getirilmesi çok zor olmakta ya da çok uzun sürelerde gerçekleştirilmektedir. Benzer gözlemler Gallagher ve Mitchell (2002) rapor edilmiştir. Bu nedenle artık su basınç değerlerini iyileştirilmiş numunelerde verilmemiştir.

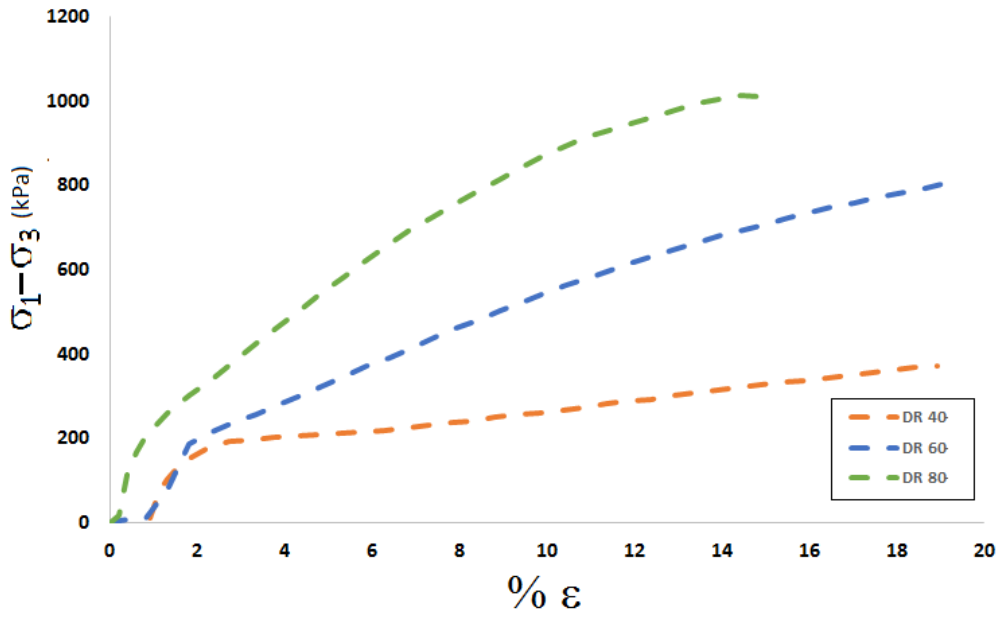


a)  $(\sigma_1 - \sigma_3) - \epsilon$  grafiği

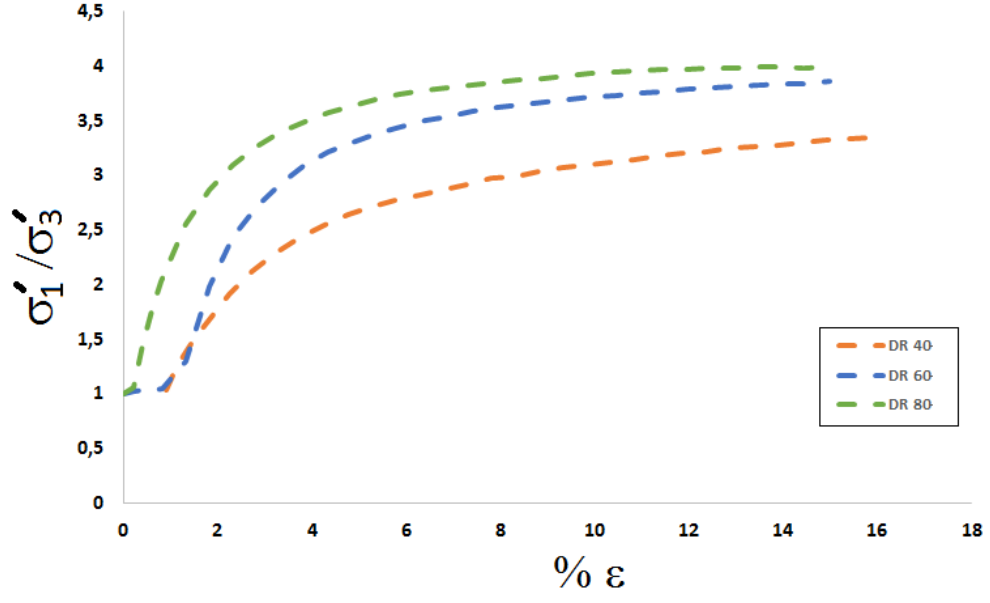


b)  $(\sigma'_1/\sigma'_3)$ -  $\epsilon$  grafiği

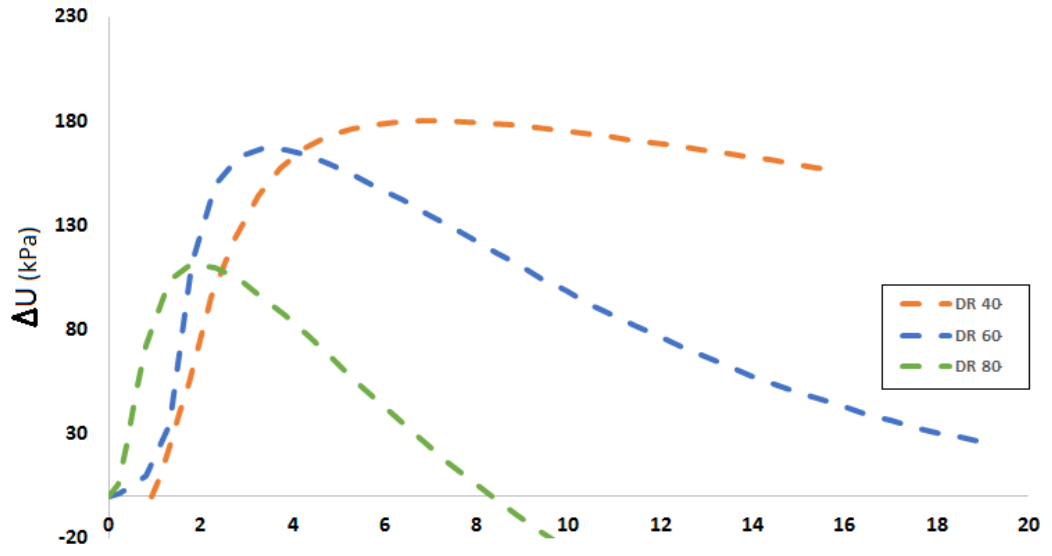
Şekil 4.13: İyileştirilmiş kum numuneleri üzerinde 100 kPa çevre basıncında yapılan deney sonuçları



a)  $(\sigma_1 - \sigma_3)$ -  $\epsilon$  grafiği



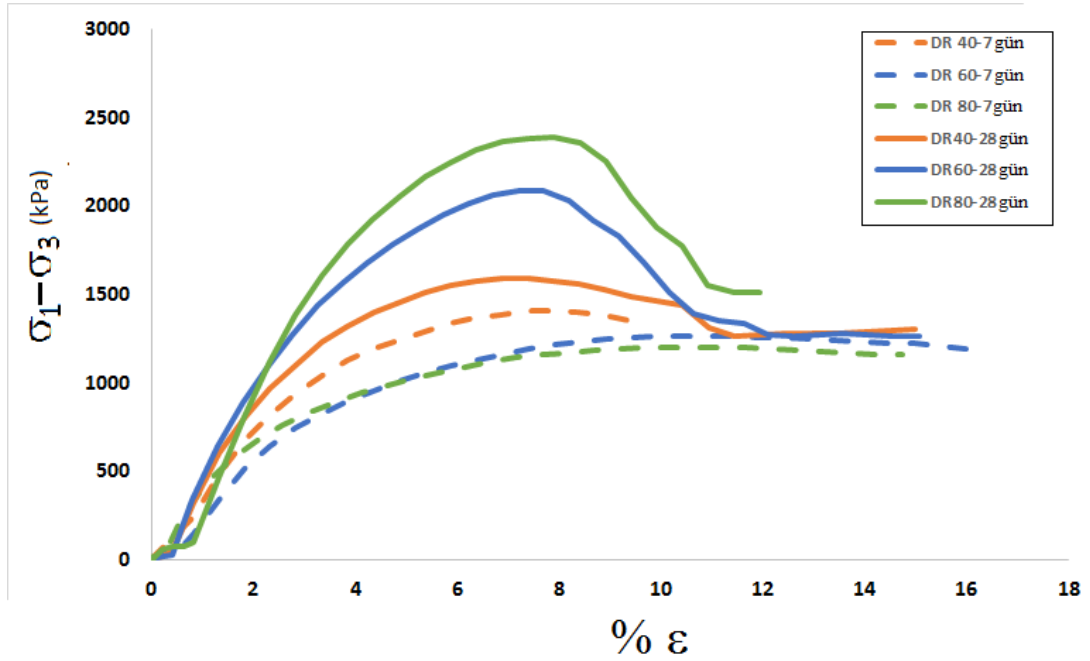
b)  $(\sigma'_1/\sigma'_3)$ -  $\epsilon$  grafiği



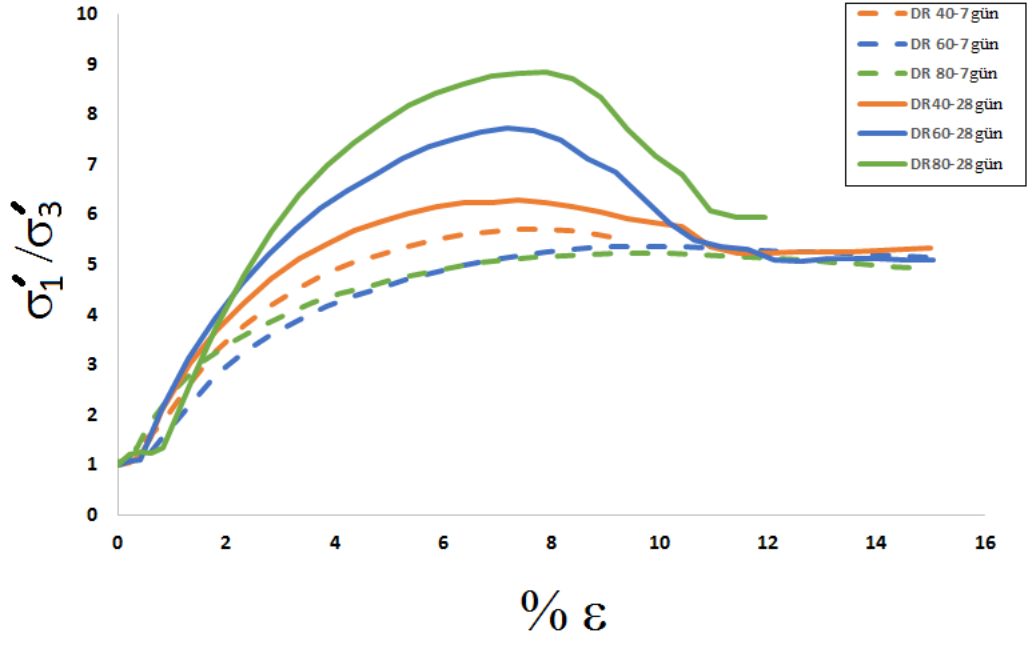
c)  $\Delta u$ -  $\epsilon$  grafiği

Şekil 4.14: Temiz kum numuneleri üzerinde 300 kPa çevre basıncında yapılan deney sonuçları

Şekil 4.14’de yapılan çalışmada temiz kum numuneleri üzerinde 300 kPa çevre basıncı altında statik üç eksenli deneyi yapılmıştır. Şekil 4.15’de iyileştirilmiş numuneler üzerinde yapılan deneyler görülmektedir. 300 kPa çevre basıncında iyileştirilmiş numunelerde yapılan deneylerde %40’lık rölatif sıkılıklı numunelerde daha iyi dayanımlar gözlenmiştir. Bunun başlıca sebebinin boşluk oranının fazla olması ve bu boşlukların tamamen kimyasalla dolmuş olduğu düşünülmektedir. Artık boşluk suyu basıncındaki davranış 100 kPa’da gözlenen davranışın benzeridir.



a)  $(\sigma_1 - \sigma_3) - \epsilon$  grafiği

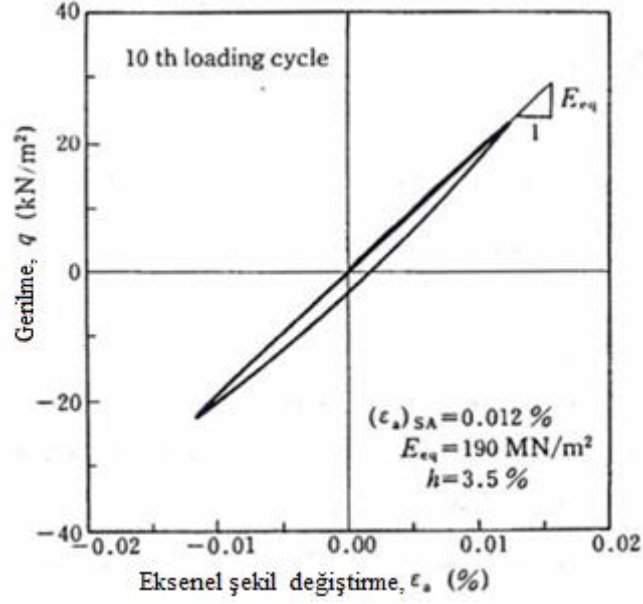


b)  $(\sigma'_1/\sigma'_3)$ -  $\epsilon$  grafiği

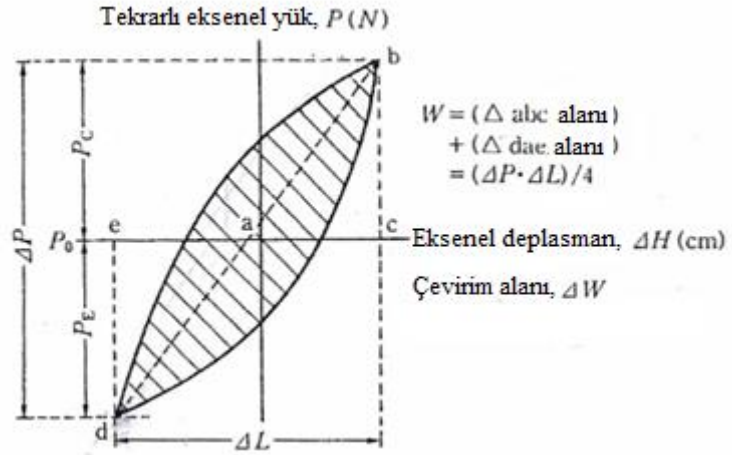
Şekil 4.15: İyileştirilmiş kum numuneleri üzerinde 300 kPa çevre basıncında yapılan deney sonuçları

#### 4.4.1 Elastisite Modülü Hesaplanması

Çalışmaların sonucunun değerlendirilmesinde JGS 0542-2000 standardı kullanılmıştır. Young modül ve histerisis damping ratio hesaplamalarında 5 çevirim ve 10 çevirim verileri kullanılarak hesaplanmış. Hesaplamalarda birbirine çok yakın çıktığı için 10 çevirim değeri için hesaplanan değerler grafiklerde kullanılmıştır.



a) Klasik gerilme-eksenel şekil değiştirme çevrimi



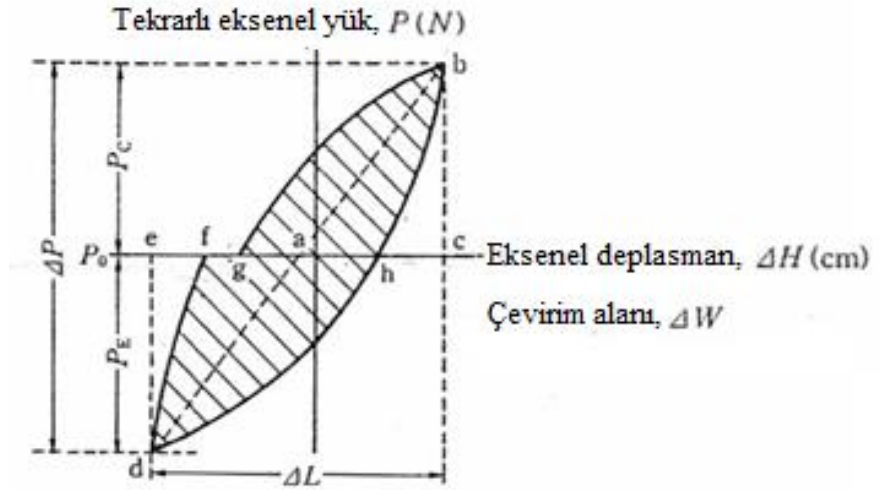
b) Çevirim alanı kapalıyken çevirim sönüm oranı

Şekil 4.16: Çevirim alanı kapalıyken çevirim sönüm oranı



Şekilde çevirimde, elastisite modülü  $E_{eq}(\text{MN/m}^2)$  nin nasıl hesaplandığı görülmektedir (Şekil 4.16, Şekil 4.17). Çevirim sönümeleme oranı  $h \{= (1 / 2\pi) \times \Delta W / W\}$  hesaplamak için kullanılacak çevrim başına depolanan enerjinin ( $W$ ) ve döngü başına sönümlenen enerjinin nasıl belirleneceğini gösterir.

Çevirim sönümeleme oranı  $h \{= (1 / 2\pi) \times \Delta W / W\}$  hesaplamak için kullanılacak çevrim başına depolanan enerjinin ( $W$ ) ve döngü başına sönümlenen enerjinin nasıl belirleneceğini gösterir. Eğer çevirim döngüsü kapalı değilse,  $W$  sıkıştırma tarafında bir alanın  $gbh$  ve uzatma tarafında bir alan  $hdf$  toplamı olabilir (Şekil 4.17).  $W$  değeri aşağıdaki gibi belirlenebilir.

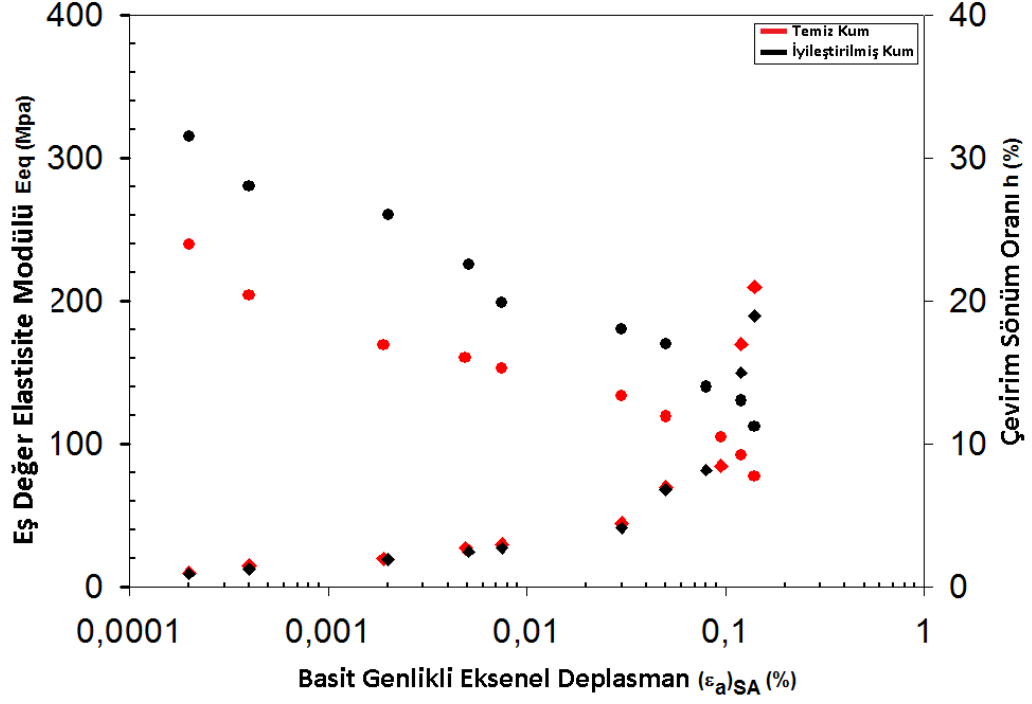


Şekil 4.17: Çevirim alanı açıkken çevirim sönüm oranı

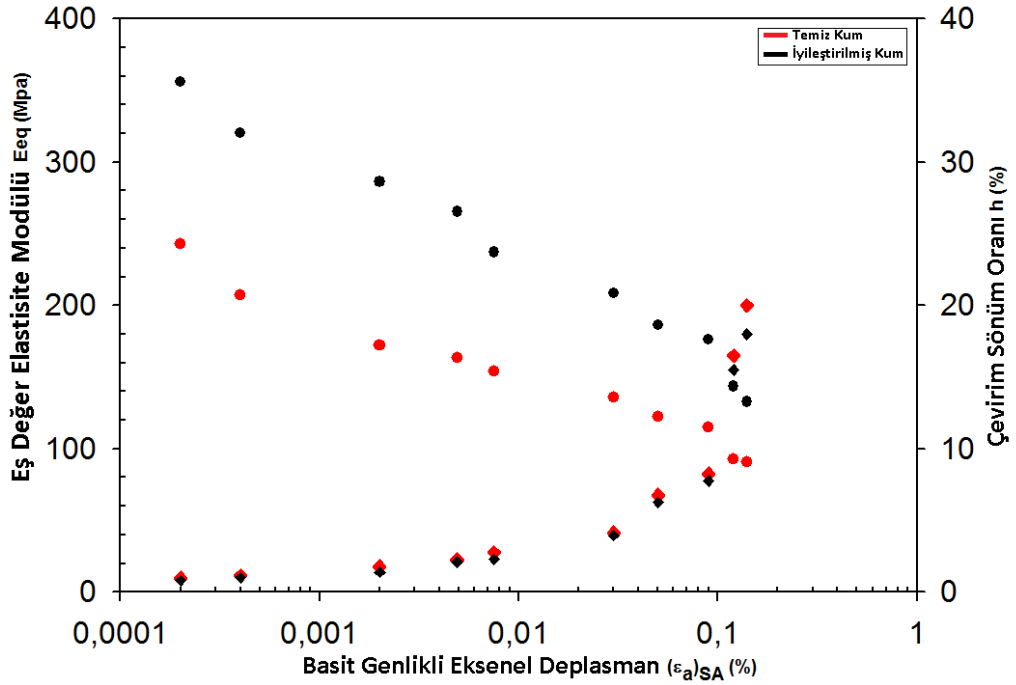
Düzenli sıklık aksel yük genliği olan bir testte ( $\Delta P =$  ölçülen aksel yük, and  $\Delta L =$  metod ile düzeltilmiş aksel kayma miktarı):

$$W = \frac{1}{4} \Delta P \cdot \Delta L \quad (4.3)$$

Yapılan dinamik üç eksenli deneylerinde rölatif sıklık olarak %40 ve %60 kullanılmış 100 kPa hücre basıncı altında modül deneyleri yapılmıştır. Yapılan bu çalışmanın sonuçları Şekil 4.18 ve Şekil 4.19 da görülebilir.



Şekil 4.18: DR % 40 olan numunelerin eşdeğer elastisite modülü-basit genlikli eksenel deplasman-çevirim sönüm oranı grafiği



Şekil 4.19: DR % 60 olan numunelerin eşdeğer elastisite modülü-basit genlikli eksenel deplasman-çevirim sönüm oranı grafiği

Yapılan deneyler sonucunda kolloidal silika ile iyileşme yapılan deneylerde elastisite modülünde ciddi artış gözlenmiştir. Çevirim sönüm oranı oranlarında iyileşmiş numunelerde düşüş gözlenmiş ancak ciddi bir düşüş gözlenmemiştir. Yapılan bu çalışmanın sonucunun farklı çalışmalarda yapılan farklı iyileştirme yöntemleriyle benzer sonuçlar elde edilmiştir (Diğer çalışmalar; Shinoda ve diğ.2003; Umu ve diğ. 2014; Yamashita ve diğ. 1997).

#### 4.5 Deneysel Çalışmanın Değerlendirmesi

Bu çalışmada temiz kum numunelerinin özellikleri koloidal silika malzemesi ile iyileştirilerek, temiz kum numuneleri ile iyileştirilmiş numunelerin özellikleri karşılaştırılmıştır. 7x14 cm boyutlarındaki numuneler farklı rölatif sıklıklarda hazırlanmış (%40, %60 ve %80), statik üç eksenli deney aletiyle 100 kPa ve 300 kPa hücre basınçlarında üç eksenli deneyler gerçekleştirilmiştir. Dinamik üç eksenli deneylerde kullanılan aletin kapasitesinin yeterli olmadığı için %40 ve %60 rölatif sıklıklar ve 100 kPa hücre basıncı kullanılmıştır. Yapılan bu çalışmalar sonucunda temiz kum deneyleri ve iyileştirilmiş kum deneyleri karşılaştırıldığında iyileştirilmiş numunelerin dayanım değerlerinde 100 kPa hücre basıncında temiz kum ve iyileştirilmiş kum numunelerine ( $\sigma_1'/\sigma_3'$ )-  $\epsilon$  grafiği grafiklerine bakıldığında 2 katından fazla artış gözlenmiştir. 300 kPa çevre basıncında iyileştirilmiş numunelerde yapılan deneylerde %40'luk numunelerde daha iyi dayanımlar gözlenmiştir. 300 kPa hücre basıncında temiz kum ve iyileştirilmiş kum numunelerine ( $\sigma_1'/\sigma_3'$ )-  $\epsilon$  grafiği grafiklerine bakıldığında yaklaşık 2 katın artış gözlenmiştir. Dinamik üç eksenli deneyler sonucu elde edilen young modulu ne bakıldığında iyileştirilmiş numunelerde ciddi artış gözlenmiştir. Sönüm oranlarında temiz kum ve iyileştirilmiş numunelerde ciddi farklılık gözlenmemekte ancak iyileşmiş numunelerde hafif düşüşler gözlemlenmektedir.

Denizli civarındaki ocaktan elde edilen temiz kum numunelerine üzerinde yapılan koloidal silika ile zemin enjeksiyonu çalışması sonucunda kullanılan koloidal silika malzemesinin kullanılmasında temiz kum numunelerinin özelliklerinde iyileşmeler gözlenmiştir. Bu malzemenin hızlı penetre olma ve jelleşme süresinin

ayarlanabilir olma özelliği de göz önünde bulundurularak kullanım kolaylıkları gözlenmiştir. Yapılan bu çalışmada statik ve dinamik üç eksenli deneyleriyle elde edilen sonuçlara bakıldığında zemin enjeksiyon metodu olarak kullanılan kolloidal silikanın sıvılaşmaya karşı iyileşmede etkili bir malzeme olduğu gözlemlenmiştir.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

### 5.1 Çalışma Sonuçları

Depremlerin meydana gelmesi beklenen yerlere yakın yerleşimlerde, sıvılaşma oluşumunun ve yapılara zararlarının tahmin edilmesi, ekonomik ve can kayıplarını azaltma bakımından önemlidir. Sıvılaşmanın meydana geldiği yerlerde çok ciddi alt ve üst yapı hasarlarının olduğu geçmişte meydana gelen depremlerde açıkça görülmüştür. Yeni yerleşim yerlerinin belirlenmesinde, varolan yerleşim yerlerinde önlem amaçlı yapılacak zemin çalışmaları için sıvılaşmayı öngörebilmek oldukça önemlidir.

Bu kapsamda bu tezde yapılan çalışmada literatür tarafından kabul görmüş sıvılaşma potansiyelini tespit edebilen farklı yaklaşımlar kullanılarak, Delphi programında sıvılaşma olasılıklarını tespit eden bilgi karar destek sistemi yazılmıştır. Bu program ile deterministik, olasılıksal yöntemler ve sıvılaşma şiddet parametreleri (LSN, LPI) hesaplanabilmektedir. Bu çalışma sayesinde farklı sıvılaşma tahmin yöntemleri bir program altında kullanılabilen, son yıllarda geliştirilen LSN ile LPI kıyaslanabilmektedir. LPI ve LSN, sıvılaşma oluşabilecek bölgelerde sıvılaşma oluşumunun tahmin edilmesinden çok bina hasarlarına bağlı olarak değerlendirilmektedir. Bu çalışmada LSN ve LPI'yi hesaplamak için CPT verilerini kullanan dört adet basitleştirilmiş sıvılaşma tetikleme analizi kullanılmıştır. Kullanılan metodlar şunlardır: Robertson ve Wride (1998), Idriss ve Boulanger (2008), Boulanger ve Idriss (2014) ve Japonya Mimari Enstitüsü (AIJ 1988; 2001).

2011 yılında Japonya'da meydana gelen Tohoku depreminde Itako kentinde Hinode bölgesinde oluşan sıvılaşma nedenli yapı hasarları ve deprem sonrası yapılan 143 CPT sondaj verileri değerlendirilmiştir. Yapılan bu çalışmada elde edilen tahmin metodlarının sıvılaşma öngörüsünü doğrulamıştır. LPI ve LSN değerlendirmeleri çerçevesinde sıvılaşma tetikleme yöntemlerinin bazı avantajları ve zayıf yönleri olduğu gözlemlenmiştir. Basitleştirilmiş sıvılaşma tetikleme yöntemleri ile yapılarda görülen hasarlarla, LSN ve LPI sıvılaşma şiddet parametreleri arasında korelasyon olduğu saptanmıştır. Ayrıca kullanılan sıvılaşma tetikleme yöntemlerinin farklı hasar seviyelerini temsil ettiği görülmüştür.

Sıvılaşabilen zeminlerde alt ve üst yapılarda geçmiş yıllarda karşılaşılan hasarlar oldukça ciddi boyuttadır. Bu nedenle sıvılaşma potansiyeli olduğu düşünülen bölgelerde sıvılaşmaya karşı zemin iyileştirmeleri yapılması gerekmektedir. Sıvılaşmadan kaynaklanan etkileri kaldırmak için çok farklı iyileştirme yöntemlerinden sıklıkla kullanılan zemine kimyasal enjekte etmek üzerine bir laboratuvar çalışması yapılmıştır. Bu çalışmada jelleşme süresi tuzlu su ile kontrol edilebilen koloidal silika enjeksiyonu incelenmiştir.

Yapılan çalışmada Denizli civarından alınan kum üzerinde dinamik ve statik üç eksenli testler yapılarak, temiz kum numuneleri ve iyileştirilmiş kum numunelerinin davranışları kıyaslanmıştır. Dinamik üç eksenli deneyler sonucu elde edilen elastisite modülü değerine bakıldığında iyileştirilmiş numunelerde ciddi artış gözlenmiştir. Sönüm oranlarında temiz kum ve iyileştirilmiş numunelerde ciddi farklılık gözlenmemekte ancak iyileşmiş numunelerde hafif düşüşler gözlemlenmektedir. Yapılan bu çalışmada statik ve dinamik üç eksenli deneyleriyle elde edilen sonuçlara bakıldığında, diğer araştırmalarla uyum içerisinde olarak, zemin enjeksiyon metodu olarak kullanılan koloidal silikanın sıvılaşmaya karşı iyileşmede etkili bir malzeme olduğu gözlemlenmiştir.

## **5.2 Daha Sonra Yapılacak Çalışmalar İle İlgili Öneriler**

Tez kapsamında deprem etkileri sonucunda meydana gelen zemin sıvılaşmasının tahmini ve için yazılan bilgi karar-destek sisteminin görselliği artırılarak kullanım kolaylığının getirilmesi faydalı olacaktır. Ayrıca programda kullanılan yöntemlere ilaveler yapılarak karşılaştırmalı analizlerin gerçekleştirilmesi ve değişkenliklerin somutlaştırılması tasarımlara kolaylık getirecektir.

Tez kapsamında bilgi karar destek sistemi kullanılarak 2011 Japonya Büyük Doğu Depremi'nde Itako şehrinde Hinode Bölgesindeki sıvılaşma meydana gelen bölgedeki CPT verileri kullanılarak örnek bir çalışma yapılmıştır. Bu örnekler Türkiye'deki veriler kullanılarak veya dünyada diğer depremlerdeki CPT, SPT deney verileri kullanılarak yapılabilir. Bilgi karar destek sistemi SPT ve CPT verilerini kullanmaktadır. Zemin sıvılaşmasını belirlemede kullanılan diğer parametrelerinde kullanımı için yazılıma eklemeler yapılabilir.

Sıvılaşma şiddet parametreleri LSN ve LPI kullanılarak daha farklı bölgelerde deprem sırasında meydana gelen hasarlara bakılarak yeni değerlendirmeler yapılabilir ve bu parametrelerin gelişmesine katkı sağlanabilir.

Tez kapsamında deneysel bir iyileşme yöntemi yapılmış kolloidal silika kullanılmıştır. Kolloidal silika ile yapılan deney çalışmalarında daha uzun sürelerde malzemenin arazide nasıl davranış gösterdiği gözlemleri ile donma-çözünme gibi durumlarda nasıl davranıldığına bakılabilir. Su seviyesi yüksek ve sıvılaşma ihtimali olan bir arazide zemin iyileştirme uygulaması yapılabilir ve numuneler alınıp deneyler yapılabilir. Deneysel çalışma ile uyumluluğu kıyaslanabilir. Deneylerle elde edilen zemin ile ilgili parametreler kullanılarak sonlu elemanlar programlarıyla modelleme yapıp, sıvılaşma analizleri yapılabilir. Sonlu elemanlar programında zemin yapı etkileşimi gibi çalışmalar yapılabilir. Yapılan bu çalışmalarla bina deprem performansları geliştirilmeye çalışılabilir. İlaveten yapıların temel davranışları incelenerek performansa bağlı temel davranışına katkılar sağlanabilir.

## 6. KAYNAKLAR

Architectural Institute of Japan (AIJ), Recommendations for Design of Building Foundations, (1988).

Architectural Institute of Japan (AIJ), Recommendations for Design of Building Foundations, (2001).

ASTM D 3999-91, "Standard Test Methods for the Determination of the Modulus and Damping Properties of Soils using the Cyclic Triaxial Apparatus", Annual Book of ASTM standards, 4, 08.

Boulanger, R., Mejia, L., Idriss, I., "Liquefaction at Moss Landing During Loma Prieta Earthquake", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 453-467, (1997).

Boulanger, R.W., "High overburden stress effects in liquefaction analyses", *J Geotech Geoenviron Eng.*, ASCE, 129(12), 1071-82, (2003).

Boulanger, R.W., Idriss, I.M., "State normalization of penetration resistance and the effect of overburden stress on liquefaction resistance", Proc., 11th International Conf. on Soil Dynamics and Earthquake Engineering and 3rd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Univ. of California, Berkeley, CA, (2004).

Boulanger, R. W. and Idriss I. M., "CPT and SPT based liquefaction triggering procedures", Report No. UCD/CGM-14, (2014).

Boulanger, R. W. and Idriss, I. M., "CPT and SPT based liquefaction triggering procedures", Report UCD/CGM-14/01, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, CA, 134, (2014).

Bray, J., Cubrinovski, M., Zupan, J. and Taylor, M., "Liquefaction Effects on Buildings in the Central Business District of Christchurch", *Earthquake Spectra*, 30, 1, 85-109, (2014).

Cetin, K. O., Armen, D. K. and Raymond B. S, "Probabilistic models for the initiation of seismic soil liquefaction", *Structural safety* 24.1, 67-82, (2002).



Chapman, L., van Ballegooy, S., Ashby, G., Lacrosse, V. and Burgess, S., “Correlation of differential building settlement with predicted CPT-based liquefaction vulnerability parameters”, 6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, 1-4 November 2015, Christchurch, New Zealand, (2015).

Chung, J. W. and Rogers, J. D., “Simplified method for spatial evaluation of liquefaction potential in the St. Louis area”, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000450, 505–515, (2011).

Conlee, A., Gallagher, B., Kamai, C., Boulanger, D., RiX, E., “Evaluation of The Effectiveness of Colloidal Silica for Liquefaction Remediation”, Centrifuge Data Report for CTC01, (2008).

Conlee, C., “Dynamic Properties of Colloidal Silica Soils Using Centrifuge Model Tests and a Full-Scale Field Test”, Ph.D Thesis, Drexel Univ., Philadelphia, PA, (2010).

Conlee, C., Gallagher, P. M., Boulanger, R.W., Kamai, R., “Centrifuge modeling for liquefaction mitigation using colloidal silica stabilizer”, *J. Geotech. Geoenviron.Eng.*, 138(11), 1334–1345, (2012).

Cramer, C. H., Rix, G. J. and Tucker, K., “Probabilistic liquefaction hazard maps for Memphis, Tennessee”, *Seismol. Res. Lett.*, 79(3), 416–423, (2008).

Çelebi M., Toprak S., Holzer, T. L., “Strong-Motion, Site-Effects, and Hazard Issues in Rebuilding Turkey: in Light of the 17 August, 1999 Earthquake and Its Aftershocks”, *International Journal for Housing Science and Its Applications*, Special Issue: Kocaeli Earthquake, 1999, 24, 1, 21-38, (2000).

Çetin K. Ö., Seed R. B., Der Kiureghian A., Tokimatsu K., Harder L.F. Jr, Kayen R. E and Moss R. E. S., “SPT Based Probabilistic and Deterministic Assessment of Seismic Soil Liquefaction Potential”, *J. Geotech. Geoenviron.Eng* , 130(12), 1314-1340, (2004).

Das, B. M., “Fundamentals of soil Dynamics”, Elsevier Science Publishing Co. Inc, 353-374, New York, USA, (1983).

Das, B. M., “Principles of Foundation Engineering”, Eighth Edition, Cengage Learning, Boston, USA, (2014).

Dave, K. K., Joshi, N. H., Patel, G. N. and Santwani, P. K., “Development of Colloidal Silica Grout Using Different Reactants”, Indian Geotechnical Conference, GEOTrendz, December 16–18, 2010, IGS Mumbai Chapter and IIT Bombay, (2010).

Day, R. W., “Geoteknik Deprem Mühendisliği El Kitabı”, *Gazi Kitabevi*, Ankara sayfa 376-377, (2004).

Dupont, “Ludox colloidal silica: Properties, uses, storage and handling” Product Information, DuPont, Wilmington DE, 1-19, (1997).

Frost, J. D., Carrol, D. P. and Rockaway, T. D., “Spatial liquefaction analysis”, Geotechnical Special Publication, 67, ASCE, 70–86, (1997).

Gallagher, P.M., “Passive site remediation for mitigation of liquefaction risk”, Philosophy of doctor dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA., 23-33, 96-117, (2000).

Gallagher, P. M. and Mitchell J. K., “Influence of colloidal silica grout on liquefaction potential and cyclic undrained behavior of loose sand”, *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 22, 1017-1026, (2002).

Gallagher, P. M., Conlee, C. T. and Rollins, K. M., “Full-scale field testing of colloidal silica grouting for mitigation of liquefaction risk”, *J.Geotech.Geoenviron.Eng.*, 133(2), 186–196, (2007).

Gallagher, P. M. and Finsterle, S., “Physical and numerical model of CS injection for passive site stabilization”, *Vadose Zone J.* 3, 917–925 (2004).

Gallagher, P.M. and Lin, Y., “Colloidal silica transport through liquefiable porous media”, *J.Geotech.Geoenviron.Eng.*, 135(11), 1702–1712, (2009).

Hamderi, M. and Gallagher, P. M., “An optimization study on the delivery distance of colloidal silica”, *Sci.Res.Essays*, 8 (27), 1314–1323, (2013).

Hamderi, M. and Gallagher, P. M., “Pilot scale modeling of colloidal silica delivery to liquefiable sands”, *Soils Found.*, 55, 1, February, 143-153, (2015).

Hayati, H. and Andrus, R. D. “Liquefaction potential map of Charleston, South Carolina based on the 1886 earthquake”, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 10.1061, ASCE, 1090-0241, 134, 815–828, (2008).

Henn, R., “Practical Guide to Grouting of Underground Structures”, Thomas Telford, London, 169-181, (1996).

Holzer, T. L., Bennett, M. J., Noce, T. E., Padovani, A. C. and Tinsley, J. C., III. “Liquefaction hazard mapping with LPI in the greater Oakland, California, area.”, *Earthquake Spectra*, 22(3), 693–708, (2006a).

Holzer, T. L., Noce, T. E. and Bennett, M. J., “Liquefaction probability curves for surficial geologic units”, *Environ. Eng. Geosci.*, 17(1), 1–21, (2011).

Holzer, T., L., Toprak, S. and Bennett, M. J., “The application of the liquefaction potential index to liquefaction hazard mapping”, Eighth US–Japan Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures against Liquefaction, Tokyo" 161-171, (2003).

Idriss, I. M. and Boulanger, R.W.. “Estimating  $K_a$  for use in evaluating cyclic resistance of sloping ground. Proc”, 8th US-Japan Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures against Liquefaction, Hamada, O’Rourke, and Bardet, eds., Report MCEER-03-0003, MCEER, SUNY Buffalo, N.Y., 449-468, (2003).

Idriss, I. M. and Boulanger, R. W., “Soil liquefaction during earthquakes”, Monograph MNO-12 2, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA, 261, (2008).

Idriss, I. M. and Boulanger, R. W., "Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes", *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 26(2), 115-130, (2006).

Iler, R.K., "The chemistry of silica: Solubility, polymerization, colloidal and surface properties", Wiley, New York, (1979).

Iwasaki, T., Tatsuoka, F., Tokida, K. I. and Yasuda, S., "A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan", In Proc., 2nd Int. Conf. on Microzonation, Washington, DC: National Science Foundation. (pp. 885-896), (1978).

Iwasaki, T., Tokida, K., Tatsuoka, F., Watanabe, S., Yasuda, S. and Sato, H., "Microzonation for soil liquefaction potential using simplified methods", In Proceedings of the 3rd international conference on microzonation, Seattle, 3, 1310-1330, (1982).

Japan National Committee on Earthquake Engineering., "Niigata earthquake of 1964", Proc, Third World Conference on Earthquake Engineering, New Zealand, Feb (1965).

JGS 0542-2000 "Method for Cyclic Triaxial Test to Determine Deformation Properties of Geomaterials".

Jinguuji M. and Toprak S., "A case study of liquefaction risk analysis based on the thickness and depth of the liquefaction layer using CPT and electric resistivity data in the Hinode area, Itako City, Ibaraki Prefecture, Japan", *Exploration Geophysics* 48, Special Section, Geophysical Surveys After the Great Eastern Japan Earthquake, 28-36, (2017).

Juang, C. H., Fang, S. Y. and Li, D. K., "Reliability analysis of soil liquefaction potential", Geotechnical Special Publication, 133, ASCE, Reston, VA, U.S.A., (2005b).

Juang, C.H., Yuan, H., Kun, D., Yang, S. H. and Christopher, R. A., “Estimating severity of liquefaction-induced damage near foundation”, *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 25, 403-411, (2005a).

Karol, R., ”Chemical Grouting and Soil Stabilization”, Marcel Decker Inc, New York, 135-140,145-163,166-239, (2003).

Kodaka, T., Oka, F., Ohno, Y., Takyu, T. and Yamasaki, N., “Modeling of Deformation and Strength Characteristics of Silica Treated Sand”, *Geomechanics, Testing, Modeling, and Simulation*, (2003).

Lenart, S., Koseki, J. and Miyashita, Y., Soil liquefaction in the Tone river basin during the 2011 earthquake off the Pacific coast of Tohoku. *ACTA GEOTECH SLOV.*, 9(2), 4-15, (2012)..

Lenz, A. J. and Baise, L. G., “Spatial variability of liquefaction potential in regional mapping using CPT and SPT data”, *Soil. Dyn. Earthquake Eng.*, 27(7), 690–702, (2007).

Liao, S. S. and Whitman, R. V., “Overburden correction factors for SPT in sand.”, *J. Geotech. Eng*, ASCE, 112(3), 373-377, (1986).

Liao, S. S. C., Veneziano, D. and Whitman, R.V., “Regression Models for Evaluating Liquefaction Probability”, *J. Geotech. Eng*, ASCE, 114, 4, 389-409 (1988).

Manav, Y., Toprak, S., Karakaplan, E.,and Inel, M., Soil improvement to counter liquefaction by colloidal silica grout injection. *Journal of Environmental Protection and Ecology (JEPE)*, 2019.

Manav, Y., Toprak, S., Karakaplan, E., Manav, R., İnel, M.and Nacaroğlu, E., “Soil Improvement study Using colloidal Silica Injection”, GLOREP 2018 conference, Timisoara, Romania, by 15-17th November, (2018).

Manav, Y., Toprak, S. and Karakaplan, E., “Kolloidal Silika İle Sıvılaşımaya Karşı İyileştirmeÇalışması” Sekizinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 11-15 Mayıs, İstanbul, (2015a).

Manav, Y., Toprak, S., Karakaplan, E., and Manav R., “A Laboratory Study On Soil Improvement Against Liquefaction: Colloidal Silica Injection” (Turkish), 5th International Earthquake Symposium, 10-12 June, Kocaeli, (2015b).

Maurer, B. W., Green, R. A., Cubrinovski, M. and Bradley, B., “Evaluation of the liquefaction potential index for assessing liquefaction hazard in Christchurch, New Zealand”, *J Geotech Geoenviron Eng*, 140(7), 04014032, (2014).

Maurer, B. W., Green, R. A., Cubrinovski, M. and Bradley, B. A., “Calibrating the Liquefaction Severity Number (LSN) for Varying Misprediction Economies: A Case Study in Christchurch, New Zealand”, 6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, 1-4 November 2015, Christchurch, New Zealand, (2015).

Mitsuhashi, Y., Mizuno, K., Jinguuji, M. and Matsuoka, M., “Summary of investigation and evaluation study on liquefaction risk in the 2011 Great East Japan Earthquake disaster”, Reports of research and investigation on multiple geological hazards caused by huge earthquakes, GSJ Interim Report, 173–177, (2014).

Morrison, S. J., Spangler, R. R. and Morris, S. A., “Subsurface Injection of Dissolved Ferric Chloride to Form a Chemical Barrier: Laboratory Investigations”, *Ground Water*, 34 (1), 75-83, (1996).

Moss, R. E., Seed, R. B., Kayen, R. E., Stewart, J. P., Der Kiureghian, A. and Cetin, K. O., “CPT-based probabilistic and deterministic assessment of in situ seismic soil liquefaction potential”, *J Geotech Geoenviron Eng*, 132(8), 1032-1051, (2006).

Noll, M. R., Bartlett, C. and Dochat, T.M, “In situ permeability reduction and chemical fixation using colloidal silica”, Proceedings of the 6th National Outdoor Action Conference, National Ground Water Association, Las Vegas, NV, 443-457, (1992).

Nonveiller, E.,” Grouting Theory and Practice”, Elsevier Science Publishers, NewYork, 61-67, (1989).

Papathanassiou, G., Pavlides, S. and Ganas, A. “The 2003 Lefkada earthquake: Field observation and preliminary microzonation map based on liquefaction potential index for the town of Lefkada”, *Eng. Geol.*, 82(1), 12–31, (2005).

Robertson, P. K. and Wride, C. E., “Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test”, *Can. Geotech. J.*, Ottawa, 35(3), 442–459, (1998).

Robertson, P. K., Campanella, R. G., “Liquefaction potential of sands using the CPT”, *J. Geotech. Eng.*, ASCE, 111(3), 384-403, (1985).

Seed, H. B., and De Alba, P., “Use of SPT and CPT tests for evaluating the liquefaction resistance of sands”, In *Use of in situ tests in geotechnical engineering*, ASCE, 281-302, (1986).

Seed, H. B. and Idriss, I. M., “Ground motion and soil liquefaction during earthquakes”, *Earthquake Engineering Research Institute*, Berkeley, California, 134, (1982).

Seed, H .B. and Idriss, I. M., “Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potentia”, *J Soil Mech Found Div.*, ASCE; 97(SM9),1249–73, (1971).

Seed, H. B., Idriss, I. M. and Arango, I.,” Evaluation of liquefaction potential using field performance data”, *J. Geotech. Eng.*, ASCE, 109(3), 458-482, (1983).

Seed, H.B. and Idriss, I.M., “Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential”, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, 97(9) ,1249-1273, (1971).

Seed, H. B., and Idriss, I. M., "Ground motion and soil liquefaction during earthquakes", Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, California, 134, (1982).

Seed, R. B., Cetin, K. O., Moss, R. E. S., Kammerer, A., Wu, J., Pestana, J. M., and Reimer, M. F., "Recent advances in soil liquefaction engineering and seismic site response evaluation", 4th International Conference and Symposium on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Univ. of Missouri, Rolla, SPL-2 (2001).

Seed, R. B., Cetin, K. O., Moss, R. E., Kammerer, A. M., Wu, J., Pestana, J. M. and Faris, A., "Recent advances in soil liquefaction engineering: a unified and consistent framework", In Proceedings of the 26th Annual ASCE Los Angeles Geotechnical Spring Seminar: Long Beach, CA., (2003).

Shinoda, M., Uchimura, T. and Tatsuoka, F., "Increasing the stiffness of mechanically reinforced backfill by preloading and prestressing". *Soils Found.*, 43(1), 75-92, (2003).

Tokimatsu, K., Suzuki, H., Katsumata, K. and Tamura, S., "Geotechnical Problems in the 2011 Tohoku Pacific Earthquakes", International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, 2, <http://scholarsmine.mst.edu/icchge/7icchge/session12/2>, (2013).

Tonkin ve Taylor, Ltd. Liquefaction vulnerability study, report to earthquake commission, Tonkin and Taylor ref. 52020.0200/v1.0, prepared by van Ballegooy S and Malan P; Available at <https://canterburygeotechnicaldatabase.projectorbit.com>), (2013).

Tonkin ve Taylor, Ltd. Canterbury Earthquake Sequence: Increased Liquefaction Vulnerability Assessment Methodology, Tonkin and Taylor ref. 52010.1400/v1.0, prepared by van Ballegooy S and Russell J; Available at <http://www.tonkintaylor.co.nz/publications/>, (2015).



Toprak, S. and Holzer, T. L., “Liquefaction Potential Index: A Field Assessment”, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, ASCE, Vol. 129, No.4, ASCE, USA, (2003).

Toprak, S. and Jinguuji, M., “A new test for Liquefaction Prediction: Electrical Resistivity Vibration Penetration Test”, Eighth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, California, April 18-22, (2006),

Toprak, S., Holzer, T. L., Bennett, M. J. and Tinsley, J. C., “CPT and SPT-based probabilistic assessment of liquefaction potential. In Proc.”, 7 th U. S.-Japan Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures Against Soil Liquefaction, MCEER, Seattle, 69-86, (1999).

Toprak, S., Jinguuji, M., Manav, Y. and Manav, R., "Soil Liquefaction At Hinode Area During 2011 Great East Japan Earthquakes." 4th International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. June 2-4, 2016 Near East University, Nicosia, TRNC, 535-541, (2016).

Toprak, S., Nacaroglu, E. and Koç, A. C., “Seismic response of underground lifeline systems”, Perspectives on European Earthquake Engineering and Seismology Vol. 2 Editors: Ansal, Atilla (Ed.), (2015).

Toprak, S., Nacaroglu, E., O'Rourke, T. D., Koc, A. C., Hamada, M., Cubrinovski, M. and Jeon, S. S., “Pipeline Damage Assesment Using Horizontal Displacements from Air Photo and LIDAR Measurements Avonside Area, Christchurch, NZ”, The Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology (2ECEES), (2014).

Umu, S. U., Okur, D. V., Yılmaz, G. and Fırat, S.,” Dinamik Yükleme Şartlarında Kum/Lastik Karışımlarının Rijitlik ve Sönüm Özelliklerinin İncelenmesi”, *Politeknik Dergisi* 17(1), 13-21, (2014).

Van Ballegooy S., Lacrosse V., Simpson J. and Malan P., “Comparison of CPT-based simplified liquefaction assessment methodologies based on the

Canterbury dataset”, In: Proceedings of the 12th Australia and New Zealand Conference on Geomechanics, (2015a).

Van Ballegooy, S., Wentz F. and Boulanger, R. W., “Evaluation of CPT-based liquefaction procedures at regional scale”, *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, (2015b).

Van Ballegooy, S., Cox, S. C., Thurlow, C., Rutter, H. K., Reynolds, T., Harrington, G., Fraser, J. and Smith, T., “Median water table elevation in Christchurch and surrounding areas after the 4 September 2010 Darfield earthquake version 2”, GNS Science report 2014/18, Institute of Geological and Nuclear Sciences, Lower Hutt, (2014b).

Van Ballegooy, S., Malan, P., Lacrosse, V., Jacka, M. E., Cubrinovski, M., Bray, J. D., O'Rourke, T. D., Crawford, S. A. and Cowan, H., “Assessment of liquefaction-induced land damage for residential Christchurch”, *Earthquake Spectra*: February 2014, 30, 1, 31-55, (2014a).

Yalcin, A., Gokceoglu, C. and Sönmez, H., “Liquefaction severity map for Aksaray city center (Central Anatolia, Turkey)”, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 8(4), 641–649, (2008).

Yamaguchi, A., Mori, T., Kazama, M. and Yoshida, N., “Liquefaction in Tohoku district during the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake”, *Soils Found.*, 52(5), 811–829, (2012).

Yamashita, S., Shibuya, S. and Tanaka, H., “A case study for characterizing undrained cyclic deformation properties in young sand deposit from in-situ and laboratory tests”, *Soils Found.*, 37(2), 117-126, (1997).

Yasuda, S., Harada, K., Ishikawa, K. and Kanemaru, Y., “Characteristics of liquefaction in Tokyo Bay area by the 2011 Great East Japan Earthquake”, *Soils Found.*, 2012;52(5), 793–810, (2012).

Youd, T. L., I. M., Idriss, R. D., Andrus, I., Arango, G., Castro, J. T., Christian, R., Dobry, W. D. L., Finn, L.F., Harder Jr., M. E., Hynes, K., Ishihara, J. P., Koester, S.S.C., Liao, W.F., Marcuson III, G. R., Martin, J. K., Mitchell, Y.,

Moriwaki, M. S., Power, P. K., Robertson, R. B., Seed and K. H. Stokoe II, "Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, ASCE, 127, 10, 817-833, (2001).

Youd, T. L., Noble, S. K., "Liquefaction Criteria Based on Statistical and Probabilistic Analyses", Proceedings of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, December 31, 1997, 201-205 (1997).

Zhang, G., Robertson, P. K., and Brachman, R. W. I. "Estimating liquefaction-induced ground settlements from CPT for level ground", *Can. Geotech. J.*, 39, 1168–1180, (2002).

# **EKLER**

## 7. EKLER

### EK A: Yazılan Programın Delphi Yazılım Dilinde Kodu

```
unit Unit1;
```

```
interface
```

```
uses
```

```
Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms,  
Dialogs, StdCtrls, Grids, ExtCtrls, DBCtrls, DBGrids,DB,ADOODB ,Math, jpeg,  
comobj, XLConst,excel2000;
```

```
type
```

```
TForm1 = class(TForm)
```

```
Label1: TLabel;
```

```
Label2: TLabel;
```

```
Label3: TLabel;
```

```
Label4: TLabel;
```

```
Label5: TLabel;
```

```
Label6: TLabel;
```

```
Label7: TLabel;
```

```
Edit1: TEdit;
```

```
Edit2: TEdit;
```

```
Edit3: TEdit;
```

```
Edit4: TEdit;
```

```
Edit5: TEdit;
```

Edit6: TEdit;  
Edit7: TEdit;  
GroupBox1: TGroupBox;  
RadioButton1: TRadioButton;  
RadioButton2: TRadioButton;  
Button1: TButton;  
Edit8: TEdit;  
DBGrid1: TDBGrid;  
DBNavigator1: TDBNavigator;  
Button2: TButton;  
GroupBox2: TGroupBox;  
ComboBox1: TComboBox;  
ComboBox2: TComboBox;  
ComboBox3: TComboBox;  
StringGrid1: TStringGrid;  
Edit9: TEdit;  
GroupBox3: TGroupBox;  
RadioButton3: TRadioButton;  
RadioButton4: TRadioButton;  
RadioButton5: TRadioButton;  
ComboBox4: TComboBox;  
RadioButton6: TRadioButton;  
Label8: TLabel;  
Edit10: TEdit;  
Label20: TLabel;  
Edit14: TEdit;  
Edit11: TEdit;

Edit12: TEdit;  
Edit13: TEdit;  
Button3: TButton;  
Edit15: TEdit;  
Edit16: TEdit;  
Label11: TLabel;  
Label12: TLabel;  
Label13: TLabel;  
Edit17: TEdit;  
Label14: TLabel;  
Edit18: TEdit;  
Button4: TButton;  
Edit19: TEdit;  
StringGrid2: TStringGrid;  
Edit20: TEdit;  
Button5: TButton;  
StringGrid3: TStringGrid;  
Button6: TButton;  
Edit21: TEdit;  
Edit22: TEdit;  
Button7: TButton;  
Button8: TButton;  
StringGrid4: TStringGrid;  
Button9: TButton;  
RadioButton7: TRadioButton;  
Edit23: TEdit;  
RadioButton8: TRadioButton;

```

RadioButton9: TRadioButton;

GroupBox4: TGroupBox;

CheckBox1: TCheckBox;

CheckBox2: TCheckBox;

CheckBox3: TCheckBox;

procedure Button1Click(Sender: TObject);

procedure Button2Click(Sender: TObject);

procedure StringGrid1DbClick(Sender: TObject);

procedure RadioButton6Click(Sender: TObject);

procedure Button3Click(Sender: TObject);

procedure Button4Click(Sender: TObject);

procedure StringGrid2DbClick(Sender: TObject);

procedure Button5Click(Sender: TObject);

procedure Button6Click(Sender: TObject);

procedure Button7Click(Sender: TObject);

procedure Button8Click(Sender: TObject);

procedure Button9Click(Sender: TObject);

procedure RadioButton9MouseDown(Sender: TObject; Button: TMouseButton;
  Shift: TShiftState; X, Y: Integer);

procedure RadioButton7Click(Sender: TObject);

procedure RadioButton8Click(Sender: TObject);

procedure RadioButton3Click(Sender: TObject);

procedure RadioButton4Click(Sender: TObject);

procedure RadioButton5Click(Sender: TObject);

procedure CheckBox1MouseDown(Sender: TObject; Button: TMouseButton;
  Shift: TShiftState; X, Y: Integer);

procedure CheckBox1MouseUp(Sender: TObject; Button: TMouseButton;

```



```

    Shift: TShiftState; X, Y: Integer);

procedure CheckBox2MouseDown(Sender: TObject; Button: TMouseButton;
    Shift: TShiftState; X, Y: Integer);

procedure CheckBox2MouseUp(Sender: TObject; Button: TMouseButton;
    Shift: TShiftState; X, Y: Integer);

procedure CheckBox3MouseDown(Sender: TObject; Button: TMouseButton;
    Shift: TShiftState; X, Y: Integer);

procedure CheckBox3MouseUp(Sender: TObject; Button: TMouseButton;
    Shift: TShiftState; X, Y: Integer);

private
    { Private declarations }

public
    { Public declarations }

end;

var
    Form1: TForm1;

wt,gd,gw,mw,amax,g,pa,d,rd,nsoil,sigma,sigmaus,fs,crr,qcncs,csr,qc,fnsent,qcn,cq,Ic
,q,f,kc:double;

ksigma,kalpha,pl,msf,ncs,dr,kgamaq,fss, qcc,ll,llt,lltt,u,ut,llttu,dqcn,fc,fi:double;

i,l,kk:integer;

implementation

uses Unit2, Unit3;

{$R *.dfm}

```

```

procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);
begin
form2.show;
end;

procedure TForm1.Button2Click(Sender: TObject);
var
ki,l,isiigma,i:integer;
a,b,c,h,hs:double;
k:integer;
begin
l:=form3.ADODataSet1.RecNo;
stringgrid3.Cells[2,1]:='0';
for i:=2 to l do
begin
a:= strtofloat(stringgrid3.Cells[0,i] );
b:= strtofloat(stringgrid3.Cells[0,i-1] );
c:= strtofloat(stringgrid3.Cells[1,i] );
hs:= strtofloat(stringgrid3.Cells[2,i-1] );
h:=(a-b)*c+hs;
stringgrid3.Cells[2,i]:=floattostr(h);
end;
form2.adodataset1.close;
form2.adodataset1.ConnectionString:='Provider=Microsoft.Jet.OLEDB.4.0;Data
Source='+edit8.text+';Extended Properties=excel 8.0;Persist Security Info=False';
form2.adodataset1.CommandText:='Sayfa1$';
form2.adodataset1.Open ;

```

```

dbnavigator1.BtnClick(nbfirsr);

edit9.Text:=inttostr(form2.ADODataSet1.RecordCount);

stringgrid1.RowCount:=strtoint(edit9.Text);

edit22.Text:=inttostr(form3.ADODataSet1.RecordCount);

while not form2.ADODataSet1.eof do

begin

wt:=strtofloat(edit1.Text);

mw:=strtofloat(edit4.Text);

amax:=strtofloat(edit5.Text);

g:=strtofloat(edit6.Text);

pa:=strtofloat(edit7.Text);

cq:=strtofloat(edit10.Text);

nsoil:=strtofloat(edit14.Text);

if (combobox1.Text='Column 1') then

begin

qc:=dbgrid1.Columns.Grid.Fields[0].Value;

end;

if (combobox1.Text='Column 2') then

begin

qc:=dbgrid1.Columns.Grid.Fields[1].Value;

end;

if (combobox1.Text='Column 3') then

begin

qc:=dbgrid1.Columns.Grid.Fields[2].Value;

end;

if (combobox1.Text='Column 4') then

begin

```

```

qc:=dbgrid1.Columns.Grid.Fields[3].Value;
end;
qc:=qc*1000;
if combobox2.Text='Column 1' then
begin
d:=dbgrid1.Columns.Grid.Fields[0].Value;
end;
if combobox2.Text='Column 2' then
begin
d:=dbgrid1.Columns.Grid.Fields[1].Value;
end;
if combobox2.Text='Column 3' then
begin
d:=dbgrid1.Columns.Grid.Fields[2].Value;
end;
if combobox2.Text='Column 4' then
begin
d:=dbgrid1.Columns.Grid.Fields[3].Value;
end;
edit23.Text:=floattostr(wt*d);
if combobox3.Text='Column 1' then
begin
fs:=dbgrid1.Columns.Grid.Fields[0].Value;
end;
if combobox3.Text='Column 2' then
begin
fs:=dbgrid1.Columns.Grid.Fields[1].Value;

```

```

end;

  if combobox3.Text='Column 3' then
  begin
    fs:=dbgrid1.Columns.Grid.Fields[2].Value;
  end;

  if combobox3.Text='Column 4' then
  begin
    fs:=dbgrid1.Columns.Grid.Fields[3].Value;
  end;
if combobox4.Text='Column 1' then
begin
dr:=dbgrid1.Columns.Grid.Fields[0].Value;
end;

  if combobox4.Text='Column 2' then
  begin
    dr:=dbgrid1.Columns.Grid.Fields[1].Value;
  end;

  if combobox4.Text='Column 3' then
  begin
    dr:=dbgrid1.Columns.Grid.Fields[2].Value;
  end;

  if combobox4.Text='Column 4' then
  begin
    dr:=dbgrid1.Columns.Grid.Fields[3].Value;
  end;
rd:=0;

```

```

if (radiobutton7.Checked=true) or (radiobutton8.Checked=true) or
(radiobutton9.Checked=true) then

begin

rd:=exp((-1.012-
1.126*(sin(degtorad((d/11.73)+5.133))))+(0.106+0.118*(sin(degtorad((d/11.28)+5.1
42))*mw)));

end

else

begin

if d<=9.15 then

begin

rd:=1-0.00765*d;

end

else

begin

if (9.15<d) and (d<=23) then

begin

rd:=1.174-0.0267*d;

end

end

end;

sigma:=0;

sigmaus:=0;

lltt:=0;

llttu:=0;

for isigma:=1 to l do // derinliğin bulk density de nerede olduğunu ve
kaçıncı kayıda kadar gelindiğini bulduk

begin

if d>strtofloat(stringgrid3.Cells[0,isigma]) then

```

```

begin
    lltt:=(d-
strtofloat(stringgrid3.Cells[0,isingma]))*strtofloat(stringgrid3.Cells[1,isingma+1]))+strtofloat(stringgrid3.Cells[2,isingma]);
end;
if d=strtofloat(stringgrid3.Cells[0,isingma]) then
begin
    lltt:=strtofloat(stringgrid3.Cells[2,isingma]);
end;
llttu:=lltt;
if d<=wt then
begin
    llttu:=lltt;
end
else
begin
    u:=9.81*(d-wt);
    llttu:=lltt-u;
end;
end;
sigma:=lltt;
sigmaus:=llttu;
if radiobutton6.Checked=true then
begin
    if d<=34 then
begin
    rd:=exp((-1.012-
1.126*(sin(degtorad((d/11.73)+5.133))))+(0.106+0.118*(sin(degtorad((d/11.28)+5.142))*mw)));

```

```

end
else
begin
  rd:=0.12*exp(0.22*mw);
end;
msf:=6.9*exp(-(mw/4))-0.058;
cq:=power((pa/sigmaus),nsoil);
qcn:=cq*((qc-sigma)/pa);
kgamaq:=1-(1/(37.3-8.27*power(qcn,0.264)))*ln(sigmaus/pa); // according to qc1n
csr:=0.65*(sigma*amax/sigmaus)*(rd/msf)*(1/kgamaq); // according to qc1n
crr:=exp((qcn/540)+(power((qcn/67),2))-(power((qcn/80),3))+(power((qcn/114),4))-3);
fss:=(crr/csr)*msf ;
end
else
begin
f:=0;
q:=0;
Ic:=0;
cq:=0;
qcn:=0;
f:=(fs/(qc-sigma))*100;
q:=(qc-sigma)/sigmaus;
if (q<=0) or (f<=0) then
begin
Ic:=0;
end
end

```



```

else
begin
Ic:=power((power((3.47-log10(q)),2)+power((log10(f)+1.22),2)),0.5); // soil type
clay-rich to liquefy
cq:=power((pa/sigmaus),1);
end;
if (Ic<2.6) and (Ic<>0) then
begin
f:=(fs/(qc-sigma))*100;
q:=((qc-sigma)/pa)*power((pa/sigmaus),0.5);
Ic:=power((power((3.47-log10(q)),2)+power((log10(f)+1.22),2)),0.5); //soil type
nonplastic granular
cq:=power((pa/sigmaus),0.5);
if Ic>2.6 then
begin
f:=(fs/(qc-sigma))*100;
cq:=power((pa/sigmaus),0.7); // soil type very silty and possibly plastic
qcn:=cq*((qc)/pa); //qc1n
Ic:=power((power((3.47-log10(qcn)),2)+power((log10(f)+1.22),2)),0.5);
end
end;
kc:=0;
qcncs:=0;
if Ic<= 1.64 then
begin
kc:=1;
end
else

```

```

begin
    kc:=(-0.403)*power(Ic,4)+5.581*power(Ic,3)-21.63*power(Ic,2)+33.75*Ic-
17.88;
    end;
qcn:=cq*((qc)/pa);
if (radiobutton7.Checked=true) or (radiobutton8.Checked=true) then
    begin
        fc:=Ic*80-137;
        dqcn:=(11.9+qcn/14.6)*exp(1.63-9.7/(fc+2)-power((15.7/(fc+2)),2));
        qcncs:=qcn+dqcn
    end
    else
begin //*****
if radiobutton8.Checked=true then
    begin
        fc:=Ic*80-137;
        dqcn:=(5.4+qcn/16)*exp(1.63-9.7/(fc+0.01)-power((15.7/(fc+0.01)),2));
        qcncs:=qcn+dqcn
    end
    else
        begin
            qcncs:=kc*qcn;
            end;
            end;
crr:=0;
if (radiobutton7.Checked=true) then
begin

```

```

crr:=exp(qcncs/113+power((qcncs/1000),2)-
power((qcncs/140),3)+power(qcncs/137,4)-2.8)

end

else

begin

if (radiobutton9.Checked=true) then

begin

if checkbox1.Checked=true then

begin

fi:=-0.20729

end ;

if checkbox2.Checked=true then

begin

fi:=0.05

end ;

if checkbox3.Checked=true then

begin

fi:=0.28229

end ;

crr:=exp(qcncs/113+power((qcncs/1000),2)-
power((qcncs/140),3)+power(qcncs/137,4)-2.6+0.2*fi)

end ;

if (radiobutton8.Checked=true) then

begin

crr:=exp(qcncs/540+power((qcncs/67),2)-
power((qcncs/80),3)+power(qcncs/114,4)-3)

end ;

if (radiobutton2.Checked=true) then

```

```

begin
  if qcncs<50 then
    begin
      crr:=0.833*(qcncs/1000)+0.05;
    end
  else
    begin
      crr:=93*power((qcncs/1000),3)+0.08;
    end;
  end;
  if (radiobutton1.Checked=true) then
  begin
    if qcncs<50 then
      begin
        crr:=0.833*(qcncs/1000)+0.05;
      end
    else
      begin
        crr:=93*power((qcncs/1000),3)+0.08;
      end;
    end;
  end;
  msf:=0;
  if (radiobutton3.Checked=true) then
  begin
    msf:=(power(10,(2.24)))/(power(mw,(2.56)));
  end;

```

```

if radiobutton4.Checked=true then
begin
msf:=((power((mw/7.5),(-2.56))));
end;

if radiobutton5.Checked=true then
begin
pl:=exp(-7.0351+2.1738*mw-0.2678*ncs+3.0265*ln(crr))/(1+(exp(-
7.0351+2.1738*mw-0.2678*ncs+3.0265*ln(crr))));

if (pl<50) and (mw<7.75) then
begin
msf:=(power(10,4.21))/(power(mw,4.81));
end;

if (pl<32) and (mw<7) then
begin
msf:=(power(10,3.74))/(power(mw,4.33));
end;

if (pl<20) and (mw<7) then
begin
msf:=(power(10,3.81))/(power(mw,4.53));
end;
end;

if radiobutton8.Checked=true then
begin
msf:=6.9*exp(-mw/4)-0.058;
end;

if (radiobutton7.Checked=true) or (radiobutton9.Checked=true) then
begin

```

```

msf:=1+(1.09+power((qcncs/180),3))*(8.64*exp(-mw/4)-1.325);
end;

if (radiobutton7.Checked=true) or (radiobutton8.Checked=true) or
(radiobutton9.Checked=true) then

begin

kgamaq:=0;

csr:=0;

kgamaq:=1-(1/(37.3-8.27*power(qcn,0.264)))*ln(sigmaus/pa);

csr:=0.65*(sigma*amax/sigmaus)*(rd/msf)*(1/kgamaq); // according to qc1n

end

else

begin

csr:=0;

csr:=0.65*(amax)*(sigma/sigmaus)*rd;

end;

if (dr>40) and (dr<60) then

begin

ksigma:=power((sigmaus/pa),(0.75));

end;

if (dr>60) and (dr<80) then

begin

ksigma:=power((sigmaus/pa),(0.65));

end;

fss:=(crr/csr)*msf; // *****ksigma kalpha düzeltmesi yokkkk

k:=form2.ADODataSet1.RecNo;

stringgrid1.Cells[0,0]:='DEPTH';

stringgrid1.Cells[1,0]:='FS';

```

```

stringgrid1.Cells[2,0]:='Ic';
stringgrid1.Cells[3,0]:='q';
stringgrid1.Cells[4,0]:='qc1n';
stringgrid1.Cells[5,0]:='cq';
stringgrid1.Cells[6,0]:='msf';
stringgrid1.Cells[7,0]:='crr';
stringgrid1.Cells[8,0]:='csr';
stringgrid1.Cells[9,0]:='qcncs';
stringgrid1.Cells[10,0]:='kc';
stringgrid1.Cells[11,0]:='qcn';
stringgrid1.Cells[12,0]:='qc';
stringgrid1.Cells[13,0]:='sigma';
stringgrid1.Cells[14,0]:='sigmaus';
stringgrid1.Cells[15,0]:='f';
stringgrid1.Cells[0,k]:=floattostr(d);
stringgrid1.Cells[1,k]:=floattostr(fss);
stringgrid1.Cells[2,k]:=floattostr(Ic);
stringgrid1.Cells[3,k]:=floattostr(q);
stringgrid1.Cells[4,k]:=floattostr(qcn);
stringgrid1.Cells[5,k]:=floattostr(cq);
stringgrid1.Cells[6,k]:=floattostr(msf);
stringgrid1.Cells[7,k]:=floattostr(crr);
stringgrid1.Cells[8,k]:=floattostr(csr);
stringgrid1.Cells[9,k]:=floattostr(qcncs);
stringgrid1.Cells[10,k]:=floattostr(kc);
stringgrid1.Cells[11,k]:=floattostr(qcn);
stringgrid1.Cells[12,k]:=floattostr(qc);

```

```

stringgrid1.Cells[13,k]:=floattostr(sigma);
stringgrid1.Cells[14,k]:=floattostr(sigmaus);
stringgrid1.Cells[15,k]:=floattostr(f);
inc(k);
edit11.Text:=floattostr(msf);
edit12.Text:=floattostr(sigma);
edit13.Text:=floattostr(dr);
edit15.Text:=floattostr(crr);
edit16.Text:=floattostr(csr);
edit17.Text:=floattostr(Ic);
edit18.Text:=floattostr(kc);
form2.ADODataSet1.Next;
end;
end;
end;

procedure TForm1.StringGrid1DbClick(Sender: TObject);
var
xls,wb,Range:OLEVariant;
arrData:Variant;
RowCount, Colcount,i,j:Integer;
begin
RowCount:=StringGrid1.RowCount;
ColCount:=StringGrid1.ColCount;
arrData:=VarArrayCreate([1,RowCount,1,ColCount],varVariant);
arrData[1,1]:='DEPTH';
arrData[1,2]:='FS';

```



```

for i:=2 to RowCount do
  for j:=1 to 2 do
    arrData[i,j]:=strtofloat(StringGrid1.Cells[j-1,i-1]);
xls:=CreateOLEObject('Excel.Application');
wb:=xls.Workbooks.Add;
Range:=wb.WorkSheets[1].Range[wb.WorkSheets[1].Cells[1,1],wb.WorkSheets[1].
Cells[RowCount,ColCount]];
Range.Value:=arrData;
xls.visible:=True;
end;

procedure TForm1.RadioButton6Click(Sender: TObject);
begin
if radiobutton6.Checked=true then
begin
groupbox1.Enabled:=false;
groupbox3.Enabled:=false;
end;
end;

procedure TForm1.Button3Click(Sender: TObject);
var
RowCount, Colcount,i,j,lpik:Integer;
lpix,lpiy,lpixx:double;
begin
RowCount:=strtoint(edit9.Text);
ColCount:=StringGrid1.ColCount;

```

```

for i:=1 to RowCount do
begin
    lpiy:= strtofloat(stringgrid1.Cells[1,2]);
        edit19.Text:=floattostr(lpiy);
        edit20.Text:=inttostr(RowCount);
end;
end;

procedure TForm1.Button4Click(Sender: TObject);
var
    RowCount, Colcount,i,j,lpik,y:Integer;
    lpix,lpiy,lpixx,lpiyy,lpifs,lpid,lpi,lpikk,a,b,h,hs:double;
    lpi:string;
begin
    stringgrid2.RowCount:=stringgrid1.RowCount;
    RowCount:=stringgrid1.RowCount;
    for i:=1 to RowCount do
begin
    if i<>1 then
begin
        lpix:= (strtofloat(stringgrid1.Cells[0,i])+strtofloat(stringgrid1.Cells[0,i-1]));
            end
        else
begin
        lpix:=strtofloat(stringgrid1.Cells[0,i]);
            end;
        lpixx:=lpix/2;

```

```

if i=RowCount then
begin
lpiy:= (strtofloat(stringgrid1.Cells[0,i])+strtofloat(stringgrid1.Cells[0,i]));
end
else
begin
lpiy:= (strtofloat(stringgrid1.Cells[0,i+1])+strtofloat(stringgrid1.Cells[0,i]));
end;
lpiyy:=lpiy/2 ;
lpifs:=strtofloat(stringgrid1.Cells[1,i]);
if lpifs<1 then
begin
lpi:=(1-lpifs)*(lpiyy*(10-0.25*lpiyy)-lpixx*(10-0.25*lpixx));
end
else
begin
lpi:=0;
end;
lpid:= strtofloat(stringgrid1.Cells[0,i]);
stringgrid2.Cells[0,0]:='DEPTH';
stringgrid2.Cells[1,0]:='LPI';
stringgrid2.Cells[2,0]:='LPI Sum';
stringgrid2.Cells[0,i]:=floattostr(lpid);
if lpid<wt then
begin
lpi:=0;
end;

```

```

stringgrid2.Cells[1,i]:=floattostr(lpi);
end;
l:=stringgrid1.RowCount;
stringgrid2.Cells[2,1]:=stringgrid2.Cells[1,1];
for y:=2 to l do
begin
b:= strtofloat(stringgrid2.Cells[2,y-1]) ;
hs:= strtofloat(stringgrid2.Cells[1,y]) ;
h:=b+hs;
stringgrid2.Cells[2,y]:=floattostr(h);
if (15>=h) and (h>5) then
begin
stringgrid2.Cells[3,y]:='High possibility of liquefaction' ;
end;
if (5>=h) and (h>0) then
begin
stringgrid2.Cells[3,y]:='Low possibility of liquefaction' ;
end;
if h=0 then
begin
stringgrid2.Cells[3,y]:='Very low possibility of liquefaction' ;
end;
if h>15 then
begin
stringgrid2.Cells[3,y]:='Very high possibility of liquefaction' ;
end;
end;
end;

```

```

end;

procedure TForm1.StringGrid2Db1Click(Sender: TObject);
var
xls,wb,Range:OLEVariant;
arrData:Variant;
RowCount, Colcount,i,j:Integer;
begin
RowCount:=StringGrid2.RowCount;
ColCount:=StringGrid2.ColCount;
arrData:=VarArrayCreate([1,RowCount+6,1,20],varVariant);
arrData[1,1]:='DEPTH';
arrData[1,2]:='FS';
arrData[1,3]:='LPI ';
arrData[1,4]:='LPI Sum';
arrData[1,6]:='Ic';
arrData[1,7]:='q';
arrData[1,8]:='qc1n';
arrData[1,9]:='cq';
arrData[1,10]:='MSF';
arrData[1,11]:='CRR';
arrData[1,12]:='CSR';
arrData[1,13]:='qcncs';
arrData[1,14]:='qc';
arrData[1,15]:='sigma';
arrData[1,16]:='sigmaus';
arrData[1,17]:='f';

```

```

for i:=2 to RowCount do
begin
arrData[i,5]:=StringGrid2.Cells[3,i-1];
arrData[i,1]:=strtofloat(StringGrid2.Cells[0,i-1]);
arrData[i,3]:=strtofloat(StringGrid2.Cells[1,i-1]);
arrData[i,4]:=strtofloat(StringGrid2.Cells[2,i-1]);
arrData[i,2]:=strtofloat(StringGrid1.Cells[1,i-1]);
arrData[i,6]:=strtofloat(StringGrid1.Cells[2,i-1]);
arrData[i,7]:=strtofloat(StringGrid1.Cells[3,i-1]);
arrData[i,8]:=strtofloat(StringGrid1.Cells[4,i-1]);
arrData[i,9]:=strtofloat(StringGrid1.Cells[5,i-1]);
arrData[i,10]:=strtofloat(StringGrid1.Cells[6,i-1]);
arrData[i,11]:=strtofloat(StringGrid1.Cells[7,i-1]);
arrData[i,12]:=strtofloat(StringGrid1.Cells[8,i-1]);
arrData[i,13]:=strtofloat(StringGrid1.Cells[9,i-1]);
arrData[i,14]:=strtofloat(StringGrid1.Cells[12,i-1]);
arrData[i,15]:=strtofloat(StringGrid1.Cells[13,i-1]);
arrData[i,16]:=strtofloat(StringGrid1.Cells[14,i-1]);
arrData[i,17]:=strtofloat(StringGrid1.Cells[15,i-1]);
end;

xls:=CreateOLEObject('Excel.Application');
wb:=xls.Workbooks.Add;

Range:=wb.WorkSheets[1].Range[wb.WorkSheets[1].Cells[1,1],wb.WorkSheets[1].
Cells[RowCount,13]];

Range.Value:=arrData;

xls.visible:=True;

end;

```

```

procedure TForm1.Button5Click(Sender: TObject);
begin
    form3.show;
end;

procedure TForm1.Button6Click(Sender: TObject);
begin
    Ic:=power((power((3.47-log10(155.416)),2)+power((log10(0.089)+1.22),2)),0.5);
    //soil type nonplastic granular
    edit22.Text:=floattostr(Ic);
end;

procedure TForm1.Button7Click(Sender: TObject);
var
    k,l,lsigma,i:integer;
    a,b,c,h,hs:double;
begin
    l:=form3.ADODataSet1.RecNo;
    stringgrid3.Cells[2,1]:='0';
    for i:=2 to 4 do
        begin
            a:= strtofloat(stringgrid3.Cells[0,i]) ;
            b:= strtofloat(stringgrid3.Cells[0,i-1]) ;
            c:= strtofloat(stringgrid3.Cells[1,i]) ;
            hs:= strtofloat(stringgrid3.Cells[2,i-1]) ;
            h:=(a-b)*c+hs;
        end
    end;

```

```

stringgrid3.Cells[2,i]:=floattostr(h);

end;

form2.adodataset1.close;

form2.adodataset1.ConnectionString:='Provider=Microsoft.Jet.OLEDB.4.0;Data
Source='+edit8.text+';Extended Properties=excel 8.0;Persist Security Info=False';

form2.adodataset1.CommandText:='Sayfa1$';

form2.adodataset1.Open ;

dbnavigator1.BtnClick(nbfirist);

edit9.Text:=inttostr(form2.ADODataSet1.RecordCount);

wt:=strtofloat(edit1.Text);

llt:=0;

u:=0;

while not form2.ADODataSet1.eof do

begin

wt:=strtofloat(edit1.Text);

d:=dbgrid1.Columns.Grid.Fields[0].Value;

for isigma:=1 to 4 do // derinliğin bulk density de nerede olduğunu ve
kaçıncı kayıda kadar gelindiğini bulduk

begin

if d>strtofloat(stringgrid3.Cells[0,isigma]) then

begin

lltt:=((d-
strtofloat(stringgrid3.Cells[0,isigma]))*strtofloat(stringgrid3.Cells[1,isigma+1]))+strt
ofloat(stringgrid3.Cells[2,isigma]);

end;

if d=strtofloat(stringgrid3.Cells[0,isigma]) then

begin

lltt:=strtofloat(stringgrid3.Cells[2,isigma]);

end;

end;

```



```

        llttu:=lltt;
        if d<=wt then
            begin
                llttu:=lltt;
            end
        else
            begin
                u:=9.81*(d-wt);
                llttu:=lltt-u;
            end;
        end;
k:=form2.ADODataSet1.RecNo;
stringgrid4.Cells[0,0]:='DEPTH';
stringgrid4.Cells[1,0]:='Sigma';
stringgrid4.Cells[2,0]:='Sigmaus';
stringgrid4.Cells[0,k]:=floattostr(d);
stringgrid4.Cells[1,k]:=floattostr(lltt);
stringgrid4.Cells[2,k]:=floattostr(llttu);
inc(k);
form2.ADODataSet1.Next;
end;
end;

procedure TForm1.Button8Click(Sender: TObject);
var
    xls,wb,Range,xlschart:OLEVariant;
    arrData,sht,Cell1,Cell2,Cell3,Cell4,range1,range2:Variant;

```

```

RowCount, Colcount,i,j:Integer;

klm:double;

begin

RowCount:=StringGrid2.RowCount;

ColCount:=StringGrid2.ColCount;

arrData:=VarArrayCreate([1,RowCount+6,1,12],varVariant);

arrData[1,1]:='DEPTH';

arrData[1,2]:='FS';

arrData[1,3]:='LPI ';

arrData[1,4]:='LPI Sum';

arrData[1,6]:='Ic';

arrData[1,7]:='q';

arrData[1,8]:='qc 1n';

arrData[1,9]:='CSR';

arrData[1,10]:='MSF';

arrData[1,11]:='CRR';

for i:=2 to RowCount do

begin

arrData[i,5]:=StringGrid2.Cells[3,i-1];

arrData[i,1]:=strtofloat(StringGrid2.Cells[0,i-1]);

arrData[i,3]:=strtofloat(StringGrid2.Cells[1,i-1]);

arrData[i,4]:=strtofloat(StringGrid2.Cells[2,i-1]);

arrData[i,2]:=strtofloat(StringGrid1.Cells[1,i-1]);

arrData[i,6]:=strtofloat(StringGrid1.Cells[2,i-1]);

arrData[i,7]:=strtofloat(StringGrid1.Cells[3,i-1]);

arrData[i,8]:=strtofloat(StringGrid1.Cells[4,i-1]);

arrData[i,9]:=strtofloat(StringGrid1.Cells[8,i-1]);

```

```

arrData[i,10]:=strtofloat(StringGrid1.Cells[6,i-1]);
arrData[i,11]:=strtofloat(StringGrid1.Cells[7,i-1]);
end;

klm:=arrdata[rowcount,4];

xls:=CreateOLEObject('Excel.Application');

wb:=xls.Workbooks.Add;

Range:=wb.WorkSheets[1].Range[wb.WorkSheets[1].Cells[1,1],wb.WorkSheets[1].
Cells[RowCount,12]];

Range.Value:=arrData;

wb.worksheets[1].name:='CPT';//+floattostr(klm);

sht:=wb.worksheets['CPT'];

Cell1:= sht.cells.item[2,1];    //depth
Cell2:= sht.cells.item[RowCount,1];    //depth
Cell3:= sht.cells.item[2,4];        //lp1 sum
Cell4:= sht.cells.item[RowCount,4];        //lp1 sum

range1:=sht.range[Cell1,Cell2];
range2:=sht.range[Cell3,Cell4];

sht.chartobjects.add(10,60,500,280);

sht.chartobjects[1].activate;

sht.chartobjects[1].chart.charttype:=xllinemarkers;

sht.ChartObjects [1].Chart.seriescollection.ADD[range2]; // create a new number of
cases

sht.ChartObjects [1].Chart.seriescollection [1]. values:= Range2; // specify the
number of new cases

sht.ChartObjects [1]. Chart.Axes [xlCategory]. HasTitle:= True;

sht.ChartObjects [1]. Chart.Axes [xlCategory]. AxisTitle.Text:= 'Depth'; // category
axis labels.

sht.ChartObjects [1]. Chart.Axes [xlvalue]. CategoryNames:= Range1;

sht.ChartObjects [1]. Chart.HasLegend:= false; // Show Legend

```

```

xls.visible:=True;

end;

procedure TForm1.Button9Click(Sender: TObject);

var
xls,wb,Range:OLEVariant;

arrData:Variant;

RowCount, Colcount,i,j:Integer;

begin
RowCount:=StringGrid2.RowCount;

ColCount:=StringGrid2.ColCount;

arrData:=VarArrayCreate([1,RowCount,1,ColCount],varVariant);

arrData[1,1]:='DEPTH';

arrData[1,2]:='LPI';

arrData[1,3]:='LPI Sum';

for i:=2 to RowCount do

for j:=1 to 4 do

if j=4 then

begin

arrData[i,j]:=StringGrid2.Cells[j-1,i-1];

end

else

begin

arrData[i,j]:=strtofloat(StringGrid2.Cells[j-1,i-1]);

end;

xls:=CreateOLEObject('Excel.Application');

wb:=xls.Workbooks.Add;

```

```
Range:=wb.WorkSheets[1].Range[wb.WorkSheets[1].Cells[1,1],wb.WorkSheets[1].Cells[RowCount,ColCount]];
```

```
Range.Value:=arrData;
```

```
xls.visible:=True;
```

```
end;
```

```
procedure TForm1.RadioButton9MouseUp(Sender: TObject; Button: TMouseButton;
```

```
Shift: TShiftState; X, Y: Integer);
```

```
begin
```

```
if (radiobutton9.Checked=true) then
```

```
begin
```

```
groupbox4.Visible:=true;
```

```
end
```

```
else
```

```
begin
```

```
groupbox4.Visible:=false;
```

```
end
```

```
end;
```

```
procedure TForm1.RadioButton7Click(Sender: TObject);
```

```
begin
```

```
if (radiobutton9.Checked=true) then
```

```
begin
```

```
groupbox4.Visible:=true;
```

```
end
```

```
else
```

```
begin
```

```

    groupbox4.Visible:=false;
end
end;

procedure TForm1.RadioButton8Click(Sender: TObject);
begin
    if (radiobutton9.Checked=true) then
        begin
            groupbox4.Visible:=true;
        end
    else
        begin
            groupbox4.Visible:=false;
        end
    end;
end;

procedure TForm1.RadioButton3Click(Sender: TObject);
begin
    if (radiobutton9.Checked=true) then
        begin
            groupbox4.Visible:=true;
        end
    else
        begin
            groupbox4.Visible:=false;
        end
    end;
end;

```

```
procedure TForm1.RadioButton4Click(Sender: TObject);
begin
if (radiobutton9.Checked=true) then
    begin
        groupbox4.Visible:=true;
    end
else
    begin
        groupbox4.Visible:=false;
    end
end;
```

```
procedure TForm1.RadioButton5Click(Sender: TObject);
begin
if (radiobutton9.Checked=true) then
    begin
        groupbox4.Visible:=true;
    end
else
    begin
        groupbox4.Visible:=false;
    end
end;
```

```
procedure TForm1.CheckBox1MouseDown(Sender: TObject; Button:
TMouseButton;
```

```

    Shift: TShiftState; X, Y: Integer);

begin
checkbox1.Checked:=true;
end;

procedure TForm1.CheckBox1MouseUp(Sender: TObject; Button: TMouseButton;
    Shift: TShiftState; X, Y: Integer);

begin
checkbox1.Checked:=true;
checkbox2.Checked:=false;
checkbox3.Checked:=false;
end;

procedure TForm1.CheckBox2MouseDown(Sender: TObject; Button:
TMouseButton;
    Shift: TShiftState; X, Y: Integer);

begin
checkbox2.Checked:=true;
end;

procedure TForm1.CheckBox2MouseUp(Sender: TObject; Button: TMouseButton;
    Shift: TShiftState; X, Y: Integer);

begin
checkbox2.Checked:=true;
checkbox1.Checked:=false;
checkbox3.Checked:=false;
end;

```



```
procedure TForm1.CheckBox3MouseDown(Sender: TObject; Button:
TMouseButton;
    Shift: TShiftState; X, Y: Integer);
begin
checkbox3.Checked:=true;
end;
procedure TForm1.CheckBox3MouseUp(Sender: TObject; Button: TMouseButton;
    Shift: TShiftState; X, Y: Integer);
begin
checkbox3.Checked:=true;
checkbox2.Checked:=false;
checkbox1.Checked:=false;
end;
end.
```

## 8. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Yasemin MANAV

Doğum Yeri ve Tarihi : Denizli, 1982

Lisans Üniversite : Pamukkale Üniversitesi

Y. Lisans Üniversite : Pamukkale Üniversitesi

Elektronik posta : ymanav@pau.edu.tr

İletişim Adresi : Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi  
B Blok İnşaat Mühendisliği

**Yayın Listesi** :

- Manav, Y., Toprak, S., Karakaplan, E., Inel, M., Soil improvement to counter liquefaction by colloidal silica grout injection. *Journal of Environmental Protection and Ecology (JEPE)*, 2019.
- Inel M, S. M. Senel, S. Toprak and Y. Manav, "Seismic Risk Assessment Of Buildings İn Urban Areas:A Case Study For Denizli, Turkey", *Natural Hazards*, 46, 265-285 (2008).

**Konferans listesi** :

- Manav, Y., Toprak, S., Karakaplan, E., Manav, R., İnel, M. and Nacaroglu, E., "Soil Improvement study Using colloidal Silica Injection", GLOREP 2018 conference, Timisoara, Romania, by 15-17th November, (2018).
- Toprak, S., Jinguuji, M., Manav, Y. and Manav, R., "Soil Liquefaction At Hinode Area During 2011 Great East Japan Earthquakes." 4th International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. June 2-4, 2016 Near East University, Nicosia, TRNC, 535-541, (2016).

- Manav, Y., Toprak, S. and Karakaplan, E., “Kolloidal Silika İle Sıvılaşıma Karşı İyileştirme Çalışması” Sekizinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 11-15 Mayıs, İstanbul, (2015).
- Manav, Y., Toprak, S., Karakaplan, E., and Manav R., “A Laboratory Study On Soil Improvement Against Liquefaction: Colloidal Silica Injection” (Turkish), 5th International Earthquake Symposium, 10-12 June, Kocaeli, (2015).
- Toprak, S., Manav, Y. and Manav, R., “A Software for Prediction of Building Damages Caused by Earthquake”, 8th International Congress on Advances in Civil Engineering, 15-17 September, Eastern Mediterranean University, Famagusta, North Cyprus, Volume 4, Page 183, (2008).
- Şenel, Ş. M., İnel, M., Toprak, S., Manav Y., “Depremde Oluşacak Bina Hasarlarının Envanter Bilgilerine Dayalı Tahmini”, Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 16-20 Ekim 2007, İstanbul , (2007).
- Şenel, Ş. M., İnel, M., Toprak, S., Aslankara Y., “Depreme Hazırlık Kapsamında Kent Ölçeğinde Mevcut Durum Tespiti: Denizli için Örnek Çalışma,” Yapısal Onarım ve Güçlendirme Sempozyumu, 07-08 Aralık, Denizli, (2006).
- Aslankara, Y., İnel M. ve Toprak, S., “Kent Ölçeğinde Senaryo Depremde Oluşacak Bina Hasarlarının Tahmini,” Deprem Sempozyumu: Kocaeli 2005, 23-25 Mart, Kocaeli, (2005).
- Şenel, Ş. M., Toprak, S. ve Aslankara, Y., “Senaryo Depremlerde Denizli’de Oluşacak Bina Hasarlarının Tahmini,” İnşaat Müh. Odası Denizli Şubesi Bülteni, 44, 34-41 (2005).