

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

**ÇEŞİTLİ SIVILAŞMA PARAMETRELERİNİN  
KARŞILAŞTIRILMASI: AFYONKARAHİSAR VE  
CHRISTCHURCH ÖRNEĞİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**EREN ATAMAN**

**DENİZLİ, OCAK - 2024**

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



**ÇEŞİTLİ SIVILAŞMA PARAMETRELERİNİN  
KARŞILAŞTIRILMASI: AFYONKARAHİSAR VE  
CHRISTCHURCH ÖRNEĞİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**EREN ATAMAN**

**DENİZLİ, OCAK - 2024**

**Bu tez çalışması Pamukkale Üniversitesi - Bilimsel Araştırma Projeleri  
Koordinatörlüğü tarafından 2022FEBE019 nolu proje 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.**

**EREN ATAMAN**

## ÖZET

### ÇEŞİTLİ SIVILAŞMA PARAMETRELERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI: AFYONKARAHİSAR VE CHRISTCHURCH ÖRNEĞİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EREN ATAMAN

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI:DR. ÖĞR. ÜYESİ ENGİN NACAROĞLU)  
DENİZLİ, OCAK - 2024

Doğal afetler arasında depremin en şiddetli sonuçlara neden olmasının önemli bir kısmı zemin koşullarının doğru belirlenememesi ve bu koşullara uygun önlemlerin alınmaması sonucunda oluşmaktadır. Günümüze kadar meydana gelen depremler incelendiğinde bu konunun önemi kanıtlanmakta ve gelecekte oluşabilecek depremler için önlem alınması konusunda yardımcı olmaktadır. Yerel zemin koşullarının doğru bir şekilde belirlenmesi deprem sonucunda oluşabilecek hasarların azaltılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Bundan dolayı çalışma yapılan bölgede yönetmeliklere ve standartlara uygun yapılan arazi, laboratuvar ve jeofizik deneylerinde elde edilen verilerle zemin özellikleri belirlenerek geoteknik hesaplamaların yapılması gerekmektedir.

Deprem sonucunda oluşan hasarlar incelendiğinde, hasarların nedenleri arasında sıvılaşma büyük bir yer tutmaktadır. Sıvılaşmanın gerçekleştiği bölgede yapının dayanımından bağımsız olarak zeminin mukavemetini kaybetmesi sonucunda yapılarda oturma, dönme, eğilme ve devrilme gibi olumsuzluklar meydana gelmektedir. Bu tez çalışmasında Afyonkarahisar ve Christchurch şehirlerinde yapılmış olan standart penetrasyon testi (SPT), konik penetrasyon testi (CPT) ve laboratuvar deney sonuçlarından faydalanılarak sıvılaşma şiddeti indeksi ( $L_s$ ), sıvılaşma potansiyeli indeksi (LPI) ve sıvılaşma şiddeti sayısı (LSN) hesaplanmıştır. Hesaplanan sıvılaşma parametreleri yardımıyla sıvılaşma risk haritaları elde edilerek gerçek deprem sonucu ortaya çıkan hasarlar ile karşılaştırma imkânı elde edilmiştir.

**ANAHTAR KELİMELELER:** Deprem, sıvılaşma, mikrobölgeleme, coğrafi bilgi sistemleri

# **ABSTRACT**

## **COMPARISON OF VARIOUS LIQUEFACTION PARAMETERS: A CASE STUDY OF AFYONKARAHISAR AND CHRISTCHURCH**

**MASTER OF SCIENCE THESIS**

**EREN ATAMAN**

**PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE**

**DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**

**(SUPERVISOR:DR. ENGIN NACAROGLU)**

**DENİZLİ, JANUARY 2024**

Within the realm of civil engineering, it is crucial to recognize that a significant portion of the substantial ramifications associated with seismic events can be attributed to the inadequate characterization of site-specific soil conditions and the subsequent lack of adherence to suitable mitigation measures. As one delves into the comprehensive analysis of historical earthquake events, the paramount importance of this aspect becomes manifest, contributing substantially to the development of proactive measures in anticipation of future seismic occurrences. The meticulous determination of site-specific soil properties, through rigorous compliance with regional regulations and industry standards, facilitated by comprehensive geotechnical investigations encompassing fieldwork, laboratory experimentation, and geophysical surveys, emerges as a pivotal factor in the reduction of seismic-induced structural damage.

When examining the damages resulting from earthquakes, liquefaction stands out as a significant contributing factor among the causes. In regions where liquefaction occurs, adverse effects such as settlement, rotation, bending, and toppling of structures ensue, independent of the structural resistance of the buildings. In this thesis, the liquefaction severity index ( $L_s$ ), liquefaction potential index (LPI), and liquefaction severity number (LSN) were computed using the Standard Penetration Test (SPT), Cone Penetration Test (CPT), and laboratory test results conducted in Afyonkarahisar and Christchurch cities. By means of these calculated liquefaction parameters, liquefaction risk maps were generated, offering a means of comparison with actual earthquake-induced damages.

**KEYWORDS:** Earthquake, liquefaction, microzonation, geographic information system

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
TABLO LİSTESİ.....	viii
SEMBOL LİSTESİ.....	ix
KISALTMA LİSTESİ.....	x
ÖNSÖZ.....	xi
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1 Tezin Amacı .....	1
1.2 Tezin Organizasyonu .....	2
<b>2. LİTERATÜR ÇALIŞMALARI.....</b>	<b>3</b>
<b>3. SIVILAŞMA ve COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMLERİ.....</b>	<b>8</b>
3.1 Sıvılaşma .....	8
3.1.1 Sıvılaşma Kaynaklı Deformasyonlar .....	10
3.1.1.1 Oturma ve Taşıma Gücü Kaybı.....	10
3.1.1.2 Kum Kaynaması .....	10
3.1.1.3 Akma Türü Kaynama .....	11
3.1.1.4 Yanal Yayılma.....	12
3.1.1.5 İstinat Yapılarında Yenilme .....	13
3.1.2 Sıvılaşma Direncine Etki Eden Faktörler .....	13
3.1.2.1 Deprem Şiddeti ve Süresi .....	13
3.1.2.2 Yeraltı Su Seviyesi .....	14
3.1.2.3 Zemin Tipi .....	14
3.1.2.4 Rölaftif Sıklık.....	14
3.1.2.5 Dane Boyu Dağılımı.....	14
3.1.3 Sıvılaşma Analizinde Kullanılan Arazi ve Laboratuvar Deneyleeri.....	15
3.1.3.1 Arazi Deneyleeri .....	15
3.1.3.1.1 Standart Penetrasyon Deneyi (SPT).....	15
3.1.3.1.2 Konik Penetrasyon Deneyi (CPT) .....	16
3.1.3.2 Laboratuvar Deneyleeri.....	17
3.1.3.2.1 Elek Analizi.....	17
3.1.3.2.2 Birim Hacim Ağırlık Deneyi.....	18
3.1.3.2.3 Su İçeriği Deneyi .....	18
3.1.3.2.4 Kıvam Limit Deneyi .....	19
3.1.3.2.5 Üç Eksenli Basınç Deneyi.....	20
3.1.4 Sıvılaşma Potansiyeli .....	21
3.1.4.1 Ham SPT Verilerinin Düzeltilmesi .....	22
3.1.4.2 Sıvılaşma Potansiyelinin Hesaplanması.....	26
3.1.4.2.1 Sıvılaşma Şiddeti Sayısı (LSN) .....	26
3.1.4.2.2 Sıvılaşma Şiddeti İndeksi ( $L_s$ ).....	28
3.1.4.2.3 Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi (LPI).....	29
3.2 Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) .....	30
3.2.1 Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS)'nin Ana Bileşenleri .....	30
3.2.1.1 Veri.....	31

3.2.1.2	Yazılım .....	31
3.2.1.3	Donanım .....	31
3.2.1.4	İnsanlar .....	31
3.2.1.5	Yöntemler .....	32
3.2.2	Kriging Yöntemi .....	32
<b>4.</b>	<b>MATERYAL ve METOT .....</b>	<b>34</b>
4.1	Çalışma Alanlarının Jeolojisi ve Depremselliği .....	35
4.2	Zemin Çalışmaları .....	39
4.2.1	Çalışmada Kullanılan Veriler (SPT ve CPT Verileri) .....	40
4.2.2	Laboratuvar Deneyleri .....	44
4.3	Sıvılaşmanın Değerlendirilmesi .....	45
4.3.1	Sıvılaşma Analizi Sonuçları .....	49
4.3.2	Sıvılaşma Risk Haritaları .....	57
4.3.3	Deprem Hasar Haritası ile Risk Haritalarının Karşılaştırılması ..	63
<b>5.</b>	<b>SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>68</b>
<b>6.</b>	<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>71</b>
<b>7.</b>	<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>77</b>



# ŞEKİL LİSTESİ

## Sayfa

Şekil 3.1: 1964 Alaska depreminde meydana gelen sıvılaşma kaynaklı hasar (Ray, 1964).....	8
Şekil 3.2: 1964 Niigata depreminde meydana gelen sıvılaşma kaynaklı hasar (EERC, 1964).....	9
Şekil 3.3: 2023 Kahramanmaraş Depremi nedeniyle meydana gelen sıvılaşma sonucu binanın geriye doğru devrilmesi (MTA, 2023).....	9
Şekil 3.4: 2023 Kahramanmaraş Depremi nedeniyle Kartalkaya Baraj gölünde meydana gelen kum kaynamaları (MTA,2023). ....	11
Şekil 3.5: Akma türü kayma (Ulusay, 2000).....	12
Şekil 3.6: 2023 Hatay Depremi nedeniyle Asi Nehri'nde gelişen yanal yayılma hasarı (MTA, 2023).....	13
Şekil 3.7: Standart penetrasyon deneyi (SPT) (Kovacs vd., 1981). ....	16
Şekil 3.8: Konik penetrasyon deneyi (CPT) (Uzuner, 2000). ....	17
Şekil 3.9: Atterberg limitleri (Yılmaz ve diğ., 2014). ....	19
Şekil 3.10: Standart üç eksenli basınç deneyi (Kramer, 1996). ....	21
Şekil 3.11: a) $\Delta q_{c1N}$ ve b) $\Delta N_{1,60}$ değerlerinin ince dane içeriğine göre değişimi (Boulanger ve Idriss, 2014). ....	24
Şekil 3.12: Sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı ve sıvılaşma sonrası hacimsel şekil değiştirme oranı (Ishihara ve Yoshimine, 1992). ....	27
Şekil 3.13: Kriging yöntemi (David, 1977).....	33
Şekil 4.1: Afyonkarahisar çalışma sahası. ....	34
Şekil 4.2: Christchurch çalışma sahası. ....	35
Şekil 4.3: Afyonkarahisar ve çevresinin tektonik haritası (Koçyiğit vd., 2012).36	
Şekil 4.4: Afyonkarahisar ve çevresinin olası deprem büyüklüklerinin belli sürelerde aşılma olasılıkları (Utku vd., 2002).....	37
Şekil 4.5: MBIE (2015) geçici $a_{max}$ değerleri ile $M_w=7.5$ 'e göre ölçeklenen Bradley (2014) $a_{max}$ değerlerinin karşılaştırılması. ....	39
Şekil 4.6: Örnek SPT logu 1, SPT no: 39_20_1. ....	41
Şekil 4.7: Örnek SPT logu 2, SPT no: 36_16_2. ....	42
Şekil 4.8: Örnek CPT logu 1, CPT no: Cpt_24075.....	43
Şekil 4.9: Örnek CPT logu 2, CPT no: Cpt_92.....	44
Şekil 4.10: 26_12 no'lu geoteknik raporda bulunan zemin kaya ve agregada deneyleri sonuç formu. ....	45
Şekil 4.11: 2011 Christchurch Depremi sıvılaşma hasar haritası (NZGD, 2013).46	
Şekil 4.12: 39_34_2 no'lu SPT verisi için sıvılaşma analiz ekran görüntüsü...48	
Şekil 4.13: 36_16_2 no'lu SPT verisi için sıvılaşma analiz ekran görüntüsü...48	
Şekil 4.14: 1. deprem senaryosu sıvılaşma şiddeti indeksi ( $L_s$ ) değerlerine göre sondaj sayıları. ....	49
Şekil 4.15: 2. deprem senaryosu sıvılaşma şiddeti indeksi ( $L_s$ ) değerlerine göre sondaj sayıları. ....	49
Şekil 4.16: 1. deprem senaryosu sıvılaşma potansiyeli indeksi (LPI) değerlerine göre sondaj sayıları. ....	50
Şekil 4.17: 2. deprem senaryosu sıvılaşma potansiyeli indeksi (LPI) değerlerine göre sondaj sayıları. ....	50

Şekil 4.18: 1. deprem senaryosu sıvılaşma şiddeti sayısı (LSN) değerlerine göre sondaj sayıları.....	51
Şekil 4.19: 2. deprem senaryosu sıvılaşma şiddeti sayısı (LSN) değerlerine göre sondaj sayıları.....	51
Şekil 4.20: Selçuklu Mahallesi çalışma sahası.....	52
Şekil 4.21: 1. deprem senaryosu sıvılaşma şiddeti indeksi (L <sub>s</sub> ) değerlerine göre Selçuklu Mahallesi sondajlarının sınıflandırılması.....	53
Şekil 4.22: 2. deprem senaryosu sıvılaşma şiddeti indeksi (L <sub>s</sub> ) değerlerine göre Selçuklu Mahallesi sondajlarının sınıflandırılması.....	53
Şekil 4.23: 1. deprem senaryosu sıvılaşma şiddeti sayısı (LSN) değerlerine göre Selçuklu Mahallesi sondajlarının sınıflandırılması.....	54
Şekil 4.24: 2. deprem senaryosu sıvılaşma şiddeti sayısı (LSN) değerlerine göre Selçuklu Mahallesi sondajlarının sınıflandırılması.....	54
Şekil 4.25: 1. deprem senaryosu sıvılaşma potansiyeli indeksi (LPI) değerlerine göre Selçuklu Mahallesi sondajlarının sınıflandırılması.....	55
Şekil 4.26: 2. deprem senaryosu sıvılaşma potansiyeli indeksi (LPI) değerlerine göre Selçuklu Mahallesi sondajlarının sınıflandırılması.....	55
Şekil 4.27: 2011 Christchurch deprem parametreleri ile sıvılaşma şiddeti indeksi (L <sub>s</sub> ) değerlerine göre Christchurch CPT verilerinin sınıflandırılması.....	56
Şekil 4.28: 2011 Christchurch deprem parametreleri ile sıvılaşma şiddeti sayısı (LSN) değerlerine göre Christchurch CPT verilerinin sınıflandırılması.....	56
Şekil 4.29: 2011 Christchurch deprem parametreleri ile sıvılaşma potansiyeli indeksi (LPI) değerlerine göre Christchurch CPT verilerinin sınıflandırılması.....	57
Şekil 4.30: 1. deprem senaryosu sıvılaşma şiddeti indeksi (L <sub>s</sub> ) değerlerine göre Selçuklu Mahallesi sıvılaşma risk haritası.....	58
Şekil 4.31: 2. deprem senaryosu sıvılaşma şiddeti indeksi (L <sub>s</sub> ) değerlerine göre Selçuklu Mahallesi sıvılaşma risk haritası.....	58
Şekil 4.32: 1. deprem senaryosu sıvılaşma şiddeti sayısı (LSN) değerlerine göre Selçuklu Mahallesi sıvılaşma risk haritası.....	59
Şekil 4.33: 2. deprem senaryosu sıvılaşma şiddeti sayısı (LSN) değerlerine göre Selçuklu ahallesi sıvılaşma risk haritası.....	60
Şekil 4.34: 1. deprem senaryosu sıvılaşma potansiyeli indeksi (LPI) değerlerine göre Selçuklu Mahallesi sıvılaşma risk haritası.....	60
Şekil 4.35: 2. deprem senaryosu sıvılaşma potansiyeli indeksi (LPI) değerlerine göre Selçuklu Mahallesi sıvılaşma risk haritası.....	61
Şekil 4.36: Christchurch sıvılaşma şiddeti indeksi (L <sub>s</sub> ) sıvılaşma risk haritası.....	61
Şekil 4.37: Christchurch sıvılaşma şiddeti sayısı (LSN) sıvılaşma risk haritası.....	62
Şekil 4.38: Christchurch sıvılaşma potansiyeli indeksi (LPI) sıvılaşma risk haritası.....	62
Şekil 4.39: Sıvılaşma şiddeti indeksi (L <sub>s</sub> ) sondaj sonuçları ile Christchurch hasar haritası karşılaştırması.....	63
Şekil 4.40: Sıvılaşma şiddeti sayısı (LSN) sondaj sonuçları ile Christchurch hasar haritası karşılaştırılması.....	64
Şekil 4.41: Sıvılaşma potansiyel indeksi (LPI) sondaj sonuçları ile Christchurch hasar haritası karşılaştırılması.....	65
Şekil 4.42: Sıvılaşma şiddeti indeksi (L <sub>s</sub> ) sıvılaşma risk haritası ile Christchurch hasar haritası karşılaştırılması.....	66

Şekil 4.43: Sıvılaşma şiddeti sayısı (LSN) sıvılaşma risk haritası ile Christchurch hasar haritası karşılaştırılması. ....	66
Şekil 4.44: Sıvılaşma potansiyeli indeksi (LPI) sıvılaşma risk haritası ile Christchurch hasar haritası karşılaştırılması. ....	67

# TABLO LİSTESİ

## Sayfa

Tablo 3.1: TS EN ISO 17892-4 standartlarına göre elek numaraları (TS EN ISO 17892-4, 2016). .....	18
Tablo 3.2: SPT düzeltme katsayıları (TBDY, 2018).....	22
Tablo 3.3: Sıvılaşma Şiddeti Sayısı (LSN) değerine göre beklenen riskler (Tonkin and Taylor, 2013). .....	28
Tablo 3.4: Sıvılaşma Şiddeti (Ls) indeksi risk sınıfları (Sönmez ve Gökçeoğlu, 2005).....	29
Tablo 3.5: Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi (LPI) değerlerine göre sıvılaşma (Iwasaki vd., 1982).....	30
Tablo 4.1: MBIE (2015) tarafından Christchurch sıvılaşma analizi için önerilen $a_{max}$ değerleri. ....	38
Tablo 4.2: Bradley (2014) sismik tehlike analizinden elde edilen sonuçlar. ....	38
Tablo 4.3: Afyonkarahisar analiz yapılan deprem senaryoları. ....	46

## SEMBOL LİSTESİ

$a_{max}$	:	Maksimum yatay yer ivmesi
$C_B$	:	Sondaj delgi çapı düzeltme katsayısı
$C_E$	:	Enerji oranı düzeltme katsayısı
$C_N$	:	Derinlik düzeltme katsayısı
$C_R$	:	Tij boyu düzeltme katsayısı
$C_S$	:	Numune alıcı tipi düzeltme katsayısı
$D_r$	:	Zeminin rölatif sıklık değeri
$g$	:	Yerçekimi ivmesi
$K_\sigma$	:	Yük düzeltme faktörü
$M_w$	:	Deprem moment büyüklüğü
$N_{1,60}$	:	Düzeltilmiş SPT darbe sayısı
$N_{1,60cs}$	:	İnce dane düzeltmesi yapılmış SPT darbe sayısı
$N_{30}$	:	Ölçülen SPT darbe sayısı
$P_a$	:	100 kPa değerindeki referans gerilmesi
$P_L(z)$	:	Sıvılaşma olasılığı
$q_c$	:	Ölçülen CPT uç direnci
$q_{c1N}$	:	Düzeltilmiş CPT uç direnci
$q_{c1Ncs}$	:	İnce dane düzeltmesi yapılmış CPT uç direnci
$r_d$	:	Gerilme azaltma katsayısı
$w$	:	Su içeriği (%)
$W(z)$	:	Derinlik ağırlık faktörü
$z$	:	Derinlik
$\alpha$ ve $\beta$	:	İnce dane oranı düzeltme sayısı
$\varepsilon_v$	:	Hacimsel birim deformasyon
$\sigma'_v$	:	Efektif yüzey gerilmesi
$\sigma_v$	:	Toplam yüzey gerilmesi

## KISALTMA LİSTESİ

<b>AFAD</b>	:	Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı
<b>ASFS</b>	:	Akşehir-Simav fay sistemi
<b>CBS</b>	:	Coğrafi bilgi sistemi
<b>CPT</b>	:	Konik penetrasyon deneyi
<b>CRR</b>	:	Çevrimsel kayma mukavemeti oranı
<b>CSR</b>	:	Çevrimsel kayma gerilmesi oranı
<b>FS</b>	:	Sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısı
<b>IDI</b>	:	İnce dane içeriği
<b>LPI</b>	:	Sıvılaşma potansiyeli indeksi
<b>L<sub>s</sub></b>	:	Sıvılaşma şiddeti indeksi
<b>LSN</b>	:	Sıvılaşma şiddeti sayısı
<b>MBIE</b>	:	İş, Yenilik ve İstihdam Bakanlığı
<b>MSF</b>	:	Moment düzeltme katsayısı
<b>NZGD</b>	:	Yeni Zelanda Geoteknik Veri Tabanı
<b>SPT</b>	:	Standart penetrasyon deneyi
<b>TBDY</b>	:	Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği

## ÖNSÖZ

Lisansüstü eğitim hayatım boyunca bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, çalışma boyunca bana verdiği değerli katkılardan dolayı saygıdeğer danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Engin NACAROĞLU'na en içten teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmam boyunca tecrübesi ile yol gösteren Prof. Dr. Selçuk TOPRAK'a ve eğitimim süresince sağlamış olduğu katkılarından dolayı Doç. Dr. Devrim ALKAYA'ya teşekkür ederim. Tezimde konu olan analizleri yapmam ve veritabanı oluşturmam için verilerini paylaşan "3DM Mühendislik Danışmanlık İnş. Tar. ve Mad. San. ve Tic. Ltd. Şti."ne teşekkürlerimi sunuyorum.

Çalışmam boyunca karşılaştığım her problemin çözümünde yardımını ve desteğini esirgemeyen sevgili arkadaşım Berk YAĞCIOĞLU başta olmak üzere sağladığı motivasyon için tüm arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Son olarak beni yetiştiren, her türlü konuda desteklerini hissettiğim babam Tayyar ATAMAN, annem Zehra ATAMAN, abim Furkan ATAMAN ile lisans hayatımdan bu yana her türlü desteği sağlayan Eşe ATAMAN'a sonsuz şükranlarımı sunuyorum. Her zaman yanımda olduğunuz için çok teşekkür ederim.

# 1. GİRİŞ

Doğal afetler, insanlık tarihi boyunca çok sayıda can ve mal kaybına, yaralanmalara neden olmuştur. Doğal afetlerin arasında şüphesiz en çok hasara neden olanlardan bir tanesi de depremlerdir. Depremlerin neden olduğu hasarların büyük bir çoğunluğu zemin kaynaklı problemlerden ortaya çıkmaktadır. Yerel zemin koşullarının bölgeden bölgeye farklılaşması sonucu depremlerin yol açtığı hasarlar değişiklik gösterebilmektedir. Sıvılaşma olayı da özellikle deprem etkisiyle tetiklenen, büyük ölçekli oturmalara, taşıma gücü kayıplarına ve şevlerde kaymalara yol açarak büyük hasarlar meydana getirmektedir. Potansiyel olarak sıvılaşabilir zeminler, yeraltı su tablasının altında yer alan kum, çakıllı kum, siltli killi kum, plastik olmayan silt ve silt-kum karışımları olarak tanımlanmaktadır (TBDY, 2018). Literatürde sıvılaşma kaynaklı hasarlara birçok örnek bulunmaktadır. Bu tezde sıvılaşma potansiyeli riski çeşitli sıvılaşma parametreleri değerlendirilmiş, aynı zamanda sıvılaşma parametreleri yardımıyla coğrafi bilgi sistemleri kullanılarak risk haritaları oluşturulmuştur. Bu çalışmalar bölge depremselliği dikkate alınarak belirlenen senaryo depremlerle Afyonkarahisar ve 2011 Christchurch depremin etkilediği Christchurch şehirlerinden seçilen iki bölgede yapılmıştır. Literatürde 2011 Christchurch depreminden elde edilen kapsamlı sıvılaşma değerlendirmeleri ve gerçek arazi gözlemlerine dayalı sonuçlar bulunmaktadır. Böylece Christchurch'te yapılan çalışmaların, gerçekleşmiş deprem sonuçlarıyla karşılaştırılmasını mümkün kılmıştır.

## 1.1 Tezin Amacı

Geoteknik deprem mühendisliğinde mikrobölgeleme, deprem etkisiyle meydana gelebilecek tehlikelerin belirlenebilmesi amacıyla yerel zemin koşullarının bölge içerisinde değerlendirilmesi olarak tanımlanabilmektedir. Deprem riskinin yüksek olduğu bölgelerde zemin koşullarının araştırılması ve doğru değerlendirilmesi büyük önem arz etmektedir. Yapılaşmanın olduğu bölgelerde mikrobölgeleme yönteminin kullanılması bölge içindeki yerel zemin koşullarındaki değişimin belirlenerek gelecek tehlikelere karşı önlem alınmasını kolaylaştıracaktır.



Afyonkarahisar şehrinin merkez ilçesinde 2014-2021 yılları arasında yapılan 2121 SPT sondaj kuyusu verisi arasından 150 sondaj verisine odaklanılmıştır. Bununla birlikte Christchurch şehir merkezinde bulunan 54 adet CPT sondaj verisinden yararlanılarak başlıca aşağıdaki hususlar amaçlanmıştır:

- Afyonkarahisar ilinde yapılan çok sayıda veri ve geoteknik raporlarında yer alan laboratuvar ve arazi deney sonuçlarının değerlendirilmesiyle bir veri tabanı oluşturulması amaçlanmıştır. Veri tabanının yalnız bu çalışma için değil aynı zamanda ileri çalışmalarda da bir altlık görevi görmesi hedeflenmektedir.
- Afyonkarahisar ve Christchurch'te yer alan iki farklı çalışma bölgesinde yapılan analizler sonucunda hesaplanan sıvılaşma parametreleri arasındaki farkların belirlenmesi amaçlanmıştır.
- Coğrafi bilgi sistemleri kullanılarak sıvılaşma parametrelerine ait haritalar oluşturulmuştur. 2011 Christchurch depremi sonucu meydana gelen sıvılaşma hasarları ile sıvılaşma haritaları birlikte değerlendirilerek en doğru sonucu veren sıvılaşma parametresinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

## **1.2 Tezin Organizasyonu**

Tezin birinci bölümünde, ele alınan konuyla ilgili genel bilgiler ve tezin amacı verilmiştir.

İkinci bölümde, literatür çalışmaları yer almıştır.

Üçüncü bölümde, sıvılaşma konusu anlatılarak, sıvılaşma sonucu ortaya çıkan deformasyonlar, sıvılaşma direncine etki eden faktörler, arazi ve laboratuvar deneyleri ve sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesinde yardımcı olan yöntemler yer almıştır. Ayrıca coğrafi bilgi sistemlerinden kısaca bahsedilmiştir.

Dördüncü bölümde, materyal ve metot anlatılarak çalışma sahalarında bulunan veriler ve yapılan analizlerin sonuçları paylaşılmıştır.

Beşinci bölümde, analiz sonuçları değerlendirilerek, gelecek çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

## 2. LİTERATÜR ÇALIŞMALARI

Zemin mekaniği alanında sıvılaşmayı açıklayan ilk araştırmacılardan olan Casagrande (1936) aynı zamanda sıvılaşmanın gerçekleşebileceği yerler hakkında araştırmalar yapmıştır (1950, 1975). Bu araştırmalardan ikisi 1938 yılında Amerika Birleşik Devletleri Montana'da bulunan Ft. Peck barajının yıkılması ve Mississippi Nehri boyunca akma kaymalarıdır. Kademeli sıvılaşmaya yol açan kıyı erozyonu, yüksek yeraltı suyu seviyelerinden sızma kuvvetleri ve trafik titreşimleri akma kaymalarına neden olan faktörler olarak gösterilmektedir. Casagrande zemin daneleri arasındaki kritik boşluk oranına ( $e_{cr}$ ) kavramı üzerinde durmuştur. Zeminin boşluk oranının, kritik boşluk oranı değerinden daha küçük olması deprem esnasında hacminin azalmaya meyilli olduklarını belirtmiştir. Zeminde drenaj gerçekleşmediği durumda hacimsel azalmadan ya da sıkışmadan dolayı boşluk suyu basıncının artmakta ve sıvılaşma meydana gelmektedir.

Mogami ve Kubo (1953) sıvılaşma terimini ilk olarak drenajsız koşullarda suya doygun kohezyonsuz zeminlerde tekrarlı örselenmeden kaynaklanan zemin deformasyonlarını tanımlamak üzere kullanmıştır.

Seed (1966), doygun kum zeminlerin sıvılaşma olayını açıklayabilmek için kum zeminlerde drenajsız dinamik üç eksenli basınç deneyi yapmıştır. Deney sonucuna göre doygun kum zeminlerde boşluk oranı, çevre basıncı ve çevrimsel gerilme etkisi görülmüştür. Deney sonuçlarına göre büyük boşluk oranı ve düşük çevre basıncında sıvılaşmanın daha hızlı gerçekleşeceği ve çevrimsel gerilmenin büyüklüğü ile sıvılaşmayı başlatan çevrim sayısının o kadar az olacağı sonucuna varmıştır.

Seed ve Idriss (1971) tarafından geliştirilen sıvılaşma analizi, Standart Penetrasyon Demeyi (SPT) verileri kullanılarak yapılmaktadır ve "basitleştirilmiş yöntem" olarak adlandırılmaktadır. 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Seed ve Idriss tarafından yayınlanan SPT verilerine dayanan grafikler ve ampirik denklemleri içeren bu "basitleştirilmiş yöntem" ile zeminlerin sıvılaşma analizlerinin yapılmasını standart yöntem olarak kabul etmektedir.

Ishihara ve Yoshimine (1992) deprem sırasında zeminin sıvılaşma durumunu değerlendirmede kullanılan yöntemlerdendir. Bu yöntem, deprem sırasında su basıncı

kaybı sonucu oluşan hacim değişikliklerini tahmin etmek için kullanılmaktadır. Bu tahminler, sıvılaşmaya neden olan maksimum kayma gerilmesi ile ilgili olarak yapılır ve Niigata'daki 1964 depreminde zarar gören bazı yerlerde yapılmıştır. Yöntemin, sıvılaşmaya neden olan depremler sırasında zeminin oturma miktarını tahmin etmek için kullanılabilmesi gösterilmiştir. Basit kesme test cihazı kullanılarak elde edilen sıvılaşmış kumların sonucuna dayanarak oluşturulan bir eğri ailesiyle ilişkilendirilmiştir. Bu eğri ailesinden, sıvılaşma karşısında güvenlik faktörünün maksimum kesme gerilmesi ile ilişkili olarak elde edilen bir diğer eğri ailesine ulaşılmaktadır. Bu iki eğri ailesi arasında maksimum kesme gerilmesi parametresini ortadan kaldırmak suretiyle, sıvılaşma karşısında güvenlik faktörü ile sıvılaşmadan sonraki hacimsel deformasyon arasında bir ilişki kurulur. Bu ilişkinin grafiksel bir şekilde gösterilmesi, zeminin sıvılaşma sırasında oluşacak hacim değişikliklerini değerlendirmede kullanılmasını kolaylaştırmaktadır.

Sönmez ve Gökçeoğlu (2005) sıvılaşma şiddetinin değerlendirilmesi için yeni bir sıvılaşma şiddeti indeksi ( $L_s$ ) ve sınıflandırması sunmaktadır.  $L_s$ 'nin performansı, 1999 yılında meydana gelen Chi-Chi depremi sırasında geniş ölçüde sıvılaşma gözlenen Yuanlin kasabasında test edilmiştir. Sonuçlar, zemin yüzeyinde sıvılaşma gözlenen alanlardaki sondajların  $L_s$  değerlerinin, sıvılaşma gözlenmeyen alanlardaki sondajlardan daha yüksek olduğunu göstermiştir.  $L_s$  ve sınıflandırması, aşırı yüzey suyu tabakası ve hafif granüler alüvyal deposu olan Marmara bölgesinde bulunan Bursa'nın İnegöl ilçesinde de uygulanmıştır. Oluşan harita, İnegöl'de büyük bir alanın orta ila düşük sıvılaşma ağırlık sınıflarına sahip olduğunu göstermiştir.

Özhan (2021) tarafından yapılan çalışmada, Mersin'in kıyı bölgesine yakın olan Davultepe yerleşim alanının, yeraltı su seviyesinin zemin tabanına yakın olması ve yerleşim alanlarının altında bulunan gevşek kumlu-çakıllı alüvyon zeminleri nedeniyle sıvılaşma riski yüksek olan bölgeler olduğunu belirlemiştir. Sıvılaşma potansiyelini incelemek için, üç farklı deprem senaryosunda tekrarlı gerilmeler simüle edilmiştir. Toplam 33 adet sondaj, sabit bir derinlikte (5 metrede) yapılmış ve elde edilen veriler ile sıvılaşma potansiyeli analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre, sıvılaşma potansiyeline sahip ve sıvılaşmanın oluşabileceği alanların çoğu, sahil bölgesindeki kumlu ve alüvyon zeminlerine yapılmış yerleşim alanlarında bulunmaktadır. Bunun nedeni, bu bölgelerdeki yeraltı su seviyesinin zemin tabanına

yakın olması ve bu bölgelerdeki gevşek kumlu zeminlerdir. Bu çalışma ayrıca, sıvılaşma potansiyeli riski yüksek olan alanlar için önerilen önleyici önlemleri de değerlendirmiştir. Önerilen önlemler arasında, zeminlerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi, yapıların yapısal bileşenlerinin güçlendirilmesi ve yapıların yerleşim şeklinin değiştirilerek zeminlerin daha iyi taşıma kapasitesine uygun hale getirilmesi yer almaktadır. Ayrıca, yeraltı su seviyesi yüksek olan alanlarda suyun drenajı için özel sistemlerin kurulması ve su seviyesi düşürülmesine yönelik çalışmaların yapılması önerilmektedir.

Toprak ve diğerleri (2017, 2019) boru hattı hasarları ile çeşitli sıvılaşma parametreleri arasında ilişkiyi literatüre kazandırmışlardır. 2011 Christchurch depreminden sonraki Christchurch için yaygın CPT ve boru hatları hasar verileri, bu korelasyonların geliştirilmesi için fırsat sağlamıştır. Yanal gerilme/açılı bozulma ve PGV ile karşılaştırıldığında, LSN, SV1D ve LPI ile boru hatları hasarı ilişkileri benzer R-kare değerleri sağlamaktadır. Bu parametrelerin gelecekteki deprem senaryolarında boru hatları hasarı tahmini için iyi bir potansiyel olduğunu gösterir. Bu parametrelerin, yanal gerilme/açılmal bozulma veya PGD'den hesaplaması daha kolaydır ve çoğunlukla şehir içi risk haritaları oluşturmak için kullanılır, böylece şehir içi bir alanın boru hatları veri tabanı ile kullanılabilir. Bu üç sıvılaşma şiddeti parametresinden biriyle oluşturulmuş var olan veya yeni risk haritaları, gelecekteki depremlerden yeni veriler eklendiğinde düzenlenerek, şehir içi risk planlaması için daha geniş bir kullanım alanına sahip olma potansiyeli bulunmaktadır.

Ballegooy ve diğerleri (2013) tarafından yapılan çalışma, Canterbury Deprem Serisi için gözlenen hasar veri kümeleriyle çeşitli dayanıklılık parametrelerinin karşılaştırılmasının sonuçlarını sunmaktadır. Sonuçlar şunlardır: Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi (LPI), her bir deprem veri kümesinde açık trendler gösteren ilişkiler üretir, ancak depremler arasında düzenli değildir. Bu nedenle, LPI'nin gelebilecek olası depremlerin büyüklüğü ve yerleşimine göre değişen hasar gösterici aralıkları nedeniyle tahmin aracı olarak kullanımı sınırlıdır. Hesaplanan LPI değerlerinin aralığı da yayınlanan hasar kategori göstergeleriyle uyumlu değildir. Hesaplanan oturma ile ölçülen sıvılaşma nedeniyle yer hareketi arasında doğrudan bir ilişki gözlenmemiştir. Bununla birlikte, hesaplanan oturma ile zemin hasarı gözlemleri arasında bir ilişki bulunmuştur. Bu nedenle, oturma, sıvılaşma ile ilgili hasarın olasılığını tahmin etmek

için bir yer tutucu olarak kabul edilebilir, ancak gözlenen hasar kategorileri arasında önemli bir örtüşme vardır. Sıvılaşma Şiddeti Sayısı (LSN) analizleri, her bir deprem içinde ve farklı depremler arasında farklı yer hasar gözlemleri için daha düzenli bir ilişki olduğunu göstermektedir. LSN, en ağır hasar gören yerleri en az hasar gören yerdeki risklerden ayırt eder ve yer yüzeyinde sıvılaşma ile ilgili hasarın olasılığını ifade eder. Düşünülen üç dayanıklılık parametresi arasında, LSN, sıvılaşma yer hasarı gözlemleriyle en iyi ilişkileri sağlar ve bu nedenle Canterbury'de gelecekteki yer performansını tahmin etmek için en uygun parametre olarak kabul edilir.

Habibullah ve diğerleri (2012) tarafından yapılan çalışmada şehrinin sıvılaşma potansiyel haritasını çizmek için yaklaşık 50 sondaj verisi incelenir. Mart 2011 Tohoku depremini temsil eden 202 g PGA durumunda, sondaj noktaları orta ve yüksek sıvılaşma riski gösterir. Sondaj sıvılaşma potansiyeli indeksi (LPI) değerleri, şiddeti harita üzerinde görselleştirilmiştir. Kriging enterpolasyon yöntemi uygulandıktan sonra, sürekli sıvılaşma potansiyel haritası üretilir. Elde edilen sıvılaşma tehlike haritası, Mart 2011 depremiyle ilgili jeolojik harita ve sıvılaşma bölgeleriyle uyumludur. Bu harita, sıvılaşma tarafından etkilenebilecek alanları yorumlamak için çok yararlıdır. 300 gal PGA durumunda ise, sondaj noktaları yüksek ve çok yüksek sıvılaşma riski gösterir. Şehrin güney batısında sıvılaşma riskinin daha fazla olabileceğini göstermektedir. Sıvılaşma potansiyeli indeksi değerinin artışıyla hasar şiddetinin artış gösterdiğini gösterir. Bu, PGA değerinin daha fazla olmasının LPI değerini de artırdığı anlamına gelir. Enterpolasyon yapılan sonuç, örneklenen veri sayısı ve dağılımına bağlıdır. Örneklenen veri sayısı artarsa, enterpolasyonun doğruluğu da artar. Su seviyesi de sıvılaşma için önemli bir rol oynar. Su seviyesi çok yüksek olan yerler daha çok sıvılaşmaya uğramaktadır.

Nacaroğlu ve diğerleri (2022) tarafından yapılan çalışma, Afyonkarahisar merkezinde Selçuklu Mahallesi'nde yapılan 138 sondaj yardımıyla yapılan sıvılaşma değerlendirmesi sonucunu sunmaktadır. Çalışmada, iki farklı deprem durumu için sıvılaşma riski ölçülen  $L_s$  ve LPI parametreleri kullanılmıştır. Birinci deprem durumunda,  $L_s$  parametrelerine göre çalışma alanının tamamının çoğunun sıvılaşma riski düşük veya çok düşük iken, LPI parametresine göre yüksek sıvılaşma riskine sahip bir alan tespit edilmiştir. İkinci deprem durumunda ise, sondajlarda sıvılaşma riski önemli ölçüde artmıştır ve özellikle LPI'a göre sondaj dağılımında yüksek veya

çok yüksek sıvılaşma riskine sahip olan sondajlar önemli oranda artmıştır. Zemin profilinde, 0-7 metre aralığında düşük ve yüksek plastisiteli kil bulunmasına rağmen, 7-20 metre aralığında killi kum ve siltli kum tabakası, sıvılaşma yönünden özellikle ikinci deprem durumunda etkilenmiştir. Bu çalışma, risk değerlendirme süreçlerinde hızlı, etkili ve yararlı olabilecek risk haritalarının önemini vurgulamaktadır.

### 3. SIVILAŞMA ve COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMLERİ

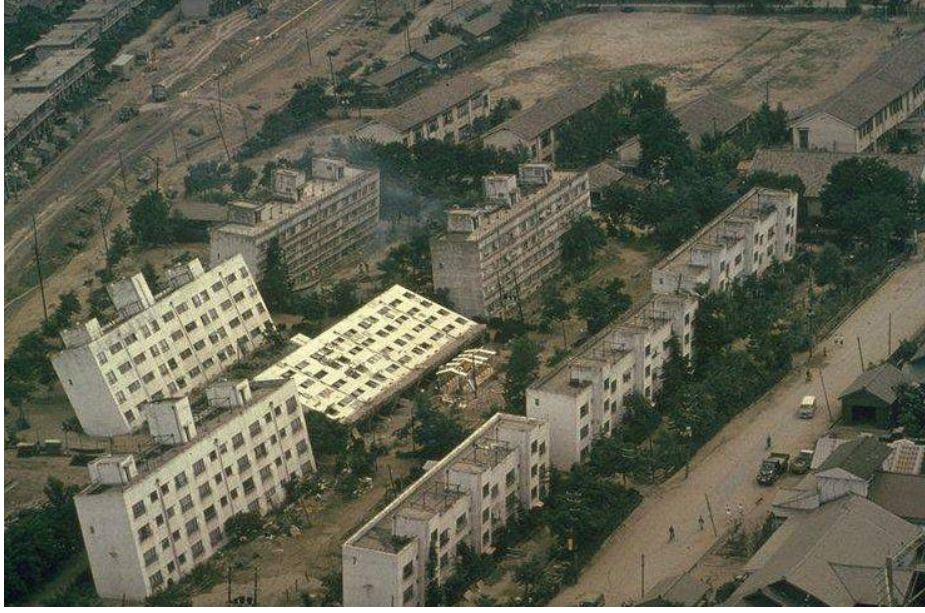
#### 3.1 Sıvılaşma

Zemin sıvılaşması, yeraltı su seviyesinin altında yer alan ve yüzeyden 20 m derinliğe kadar olan kohezyonsuz ya da düşük kohezyonlu ( $PI < 12$ ) zeminlerin deprem sarsıntısı altında, boşluk suyu basıncındaki artışa paralel kayma mukavemeti ve rijitliğindeki önemli oranda azalış olarak tanımlanmaktadır (TBDY, 2018).

1964 yılında Alaska'daki Good Friday depremi ve Japonya'daki Niigata depremi o dönem içinde peş peşe meydana geldiğinde, geoteknik mühendislerinin dikkatini sıvılaşmanın yıkıcı etkileri çekmiştir. Bu etkiler, yamaç yenilmeleri, köprü ve yapı temellerindeki yenilmeler, gömülü yapıların yüzmesi gibi olaylarda da görülmüştür ve bu iki deprem sıvılaşmadan kaynaklanan hasarların önemli örneklerini sergilemiştir (Şekil 3.1 ve 3.2).



Şekil 3.1: 1964 Alaska depreminde meydana gelen sıvılaşma kaynaklı hasar (Ray, 1964).



**Şekil 3.2:** 1964 Niigata depreminde meydana gelen sıvılaşma kaynaklı hasar (EERC, 1964).

Ülkemizin yakın tarihinde meydana gelen 1993 Erzincan Depremi, 1999 Kocaeli Depremi, 2011 Van Depremi ve 6 Şubat 2023 tarihinde gerçekleşen Kahramanmaraş Depremleri ile sıvılaşma sonucu büyük hasarlar meydana gelmiştir (Şekil 3.3). Zeminlerin sıvılaşma riskinin tespiti ve deprem esnasında olası etkilerin önüne geçilmesi oldukça önemli hale gelmiştir.



**Şekil 3.3:** 2023 Kahramanmaraş Depremi nedeniyle meydana gelen sıvılaşma sonucu binanın geriye doğru devrilmesi (MTA, 2023).



### **3.1.1 Sıvılaşma Kaynaklı Deformasyonlar**

Sıvılaşma tipik olarak yüksek yeraltı su seviyesi olan zeminlerde meydana gelir, bu nedenle etkileri genellikle nehirler, göller, körfezler ve okyanuslar gibi su kaynaklarına komşu düşük kotlu alanlarda gözlenmektedir. Sıvılaşmanın neden olduğu farklı hasar tipleri bulunmaktadır. Bu hasarları şu şekilde sıralanabilmektedir:

- Oturma ve Taşıma Gücü Kaybı
- Kum Kaynaması
- Akma Türü Kayma
- Yanal Yayılma
- İstinat Yapılarında Yenilme

#### **3.1.1.1 Oturma ve Taşıma Gücü Kaybı**

Sıvılaşma olayında zemin sıvı hale gelmekte ve böylece zeminin kayma mukavemeti sıfıra düşmektedir. Sıvılaşan kum yüzeye doğru yükselirken, zemin yapısının dayanımı azalmakta ve dolayısıyla yükleri taşıyamayacak kadar zayıflamaktadır. Bu durumda, sıvılaşmış zeminin bina ve köprü temellerini desteklemesi söz konusu değildir. Sıvılaşmanın gerçekleştiği bölgelerde taşıma gücü kaybından dolayı yapılarda oturma, dönme, eğilme ve devrilme gibi olumsuz etkiler meydana gelmektedir (Ulusay, 2000).

#### **3.1.1.2 Kum Kaynaması**

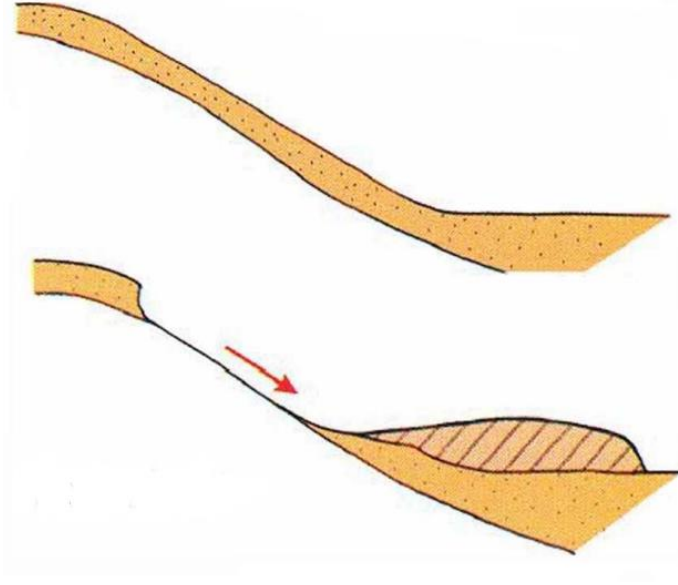
Sıvılaşma olayı genellikle kum kaynamalarının oluşumu ile de görülmektedir. Deprem esnasında, boşluk suyu yükseldiğinde, eski haline dönmek için yukarı doğru hareket etmek istemektedir. Bu hareket zemin danelerini de yukarı yönde iten kuvvetler oluşturmaktadır. Bu kuvvetler, bazı zemin danelerinin su ile hareket ederek yüzeye taşınmasına ve yüzeydeki çatlaklardan dışarı çıkarak kum konilerinin oluşmasına neden olmakta dolayısıyla kum kaynamaları meydana gelmektedir (Şekil 3.4).



**Şekil 3.4:** 2023 Kahramanmaraş Depremi nedeniyle Kartalkaya Baraj gölünde meydana gelen kum kaynakmaları (MTA,2023).

### 3.1.1.3 Akma Türü Kaynama

Bu tür zemin hareketleri, sıvılaşma sonucu meydana gelen etkili duraysızlıklardır. Akma, tamamen sıvılaşmış zeminde gelişebileceği gibi, sıvılaşan zeminin üzerinde yer alan daha sert bir malzemeye ait blokların hareket etmesiyle de meydana gelebilmektedir. Bu tür hareketler, eğimi 3 dereceden daha büyük olan yamaçlar boyunca, gevşek ve suya doymuş kumlarda gelişmektedir (Şekil 3.5). Ayrıca, maden işletmelerindeki atık barajlarında toplanan, suya doymuş ve çok ince cevher atıklarının da depremler sırasında akma davranışı gösterdikleri bilinmektedir. Bu durum, arazide sık karşılaşılmamasına rağmen son derece tehlikeli sonuçlara yol açabilir ve köprü ayaklarında, yüzeysel temele sahip yapılarda ve her türlü altyapı sisteminde ciddi problemlere sebep olabilmektedir (Tonaroğlu, 2006).



Şekil 3.5: Akma türü kayma (Ulusay, 2000).

#### 3.1.1.4 Yanal Yayılma

Sıvılaşma esnasında sıvılaşan zeminin üstünde kalan zemin bloklara ayrılır ve bu bloklar yanıl yönde bir hareket gerçekleştirirler. Bu hareket depremin neden olduğu yer çekimi kuvvetleri ile içsel kuvvetlerin etkileşiminden kaynaklanır. Bu tür zemin duraysızlığı genellikle eğimi son derece düşük olan yamaçlar boyunca ve nehir yatakları, göl kıyıları veya deniz kıyıları gibi harekete engel olmayacak serbest yüzeylere doğru ilerler (Şekil 3.6). Bu yatay yöndeki hareket, birkaç metreden onlarca metreye kadar uzunluklara ulaşabilir. Hareket sırasında zemin bloklara ayrılır ve kayar, bu nedenle zemin üzerinde çatlaklar, kırıklar, küçük çökmeler ve yükselmeler oluşur. (Ulusay ve diğ, 2001).

Büyük ölçekli yanıl yayılmalar, zemin üstünde inşa edilen yapıların her türüne hasar verebilmektedir. Bu yanıl yayılmalar, binaların temellerini parçalayarak, kanalizasyon borularını, diğler tesisatları sökebilir, inşa edilen köprü gibi yapıların sıkıştırılmasına ve kemerlenmesine neden olabilmektedir. Yanıl yayılmalar, yenilme alanı içinde inşa edilen binaları özellikle tehdit etmektedir (Day, 2002).



**Şekil 3.6:** 2023 Hatay Depremi nedeniyle Asi Nehri'nde gelişen yanal yayılma hasarı (MTA, 2023).

### **3.1.1.5 İstinat Yapılarında Yenilme**

Bu tip problemler, dayanma yapısının arkasındaki zeminin taşıma gücünün azalması veya dayanma yapısı gerisinde yer alan zeminin sıvılaşması nedeniyle artan yanal kuvvetlerin istinat yapısının yatay ve/veya düşey yönde yer değiştirmesine sebep olmaktadır. Ayrıca dayanma yapısının arkasındaki malzemenin deprem etkisiyle sıvılaşması veya daha çok eğik yüzeyli zeminlerde görülen daha altta yer alan bir tabakanın sıvılaşması sonucu daha üstteki kütlelerin sıvılaşan tabaka üzerinde aşağı doğru hareket etmesi de ilave yanal yükler oluşturarak dayanma yapısının yıkılmasına neden olmaktadır (Tonaroğlu, 2006).

### **3.1.2 Sıvılaşma Direncine Etki Eden Faktörler**

Zeminin sıvılaşmasını etkileyen çok sayıda faktör bulunmaktadır. Bunlar depremden ve zeminden kaynaklanan faktörler olarak ikiye ayrılmaktadır.

#### **3.1.2.1 Deprem Şiddeti ve Süresi**

Zemin sıvılaşması için bir dinamik bir etki gerekmektedir. Zemin danelerinin kayma deformasyonlarına neden olan şey, deprem sırasında oluşan yer hareketinin ivme ve sarsıntı süresidir. Deprem şiddeti ve süresi artarken, sıvılaşma potansiyeli de

artmaktadır. Büyük depremler hem yüksek yer ivmesi hem de daha uzun süreli yer sarsıntısı üretmektedirler (Day, 2000).

### **3.1.2.2 Yeraltı Su Seviyesi**

Sıvılaşma için en uygun koşullar, yeraltı su seviyesi yüzeye yakın olduğunda ortaya çıkar. Suyu doymun olmayan zeminlerin sıvılaşması söz konusu değildir. Halihazırda yeraltı su seviyesi üzerinde bulunan zeminler, hidrolojik rejimde değişimler göstermiyorsa, sıvılaşma potansiyeli için değerlendirilmez (Day, 2000).

### **3.1.2.3 Zemin Tipi**

Dinamik etki esnasında sıvılaşmanın yoğun olarak ince ve orta kum ile düşük plastisiteli ince daneli kum veya düşük plastisiteye sahip kil-silt karışımlarında karşılaşılabilmektedir (TBDY, 2018).

### **3.1.2.4 Rölatif Sıklık**

Rölatif sıklık, zemin altındaki katmanların sıklığını yüzde cinsinden göstermektedir. Düşük rölatif sıklık, daneler arasındaki boşluk derecesine işaret etmektedir. Bu, deprem sırasında yeraltı suyunun daneler arasına girerek zeminin sıvı gibi davranmasına neden olmaktadır (Lade, 1998).

### **3.1.2.5 Dane Boyu Dağılımı**

Üniform derecelenmiş kohezyonsuz zeminler, iyi derecelenmiş zeminlere göre daha fazla kararsız dane düzenine sahip olduğundan, sıvılaşma potansiyelleri daha yüksektir. İyi derecelenmiş zeminlerde ise, büyük boyutlu taneler arasındaki boşluklarda bulunan küçük boyutlu daneler, deprem sırasında ortaya çıkacak artık boşluk suyu basıncını azaltarak zeminin büzülmesini engeller. Kramer (1996)

tarafından sahada yapılan çalışmalar, üniform derecelenmiş granüler zeminlerde sıklıkla sıvılaşma olgusunun görüldüğünü göstermiştir (Day, 2000).

### **3.1.3 Sıvılaşma Analizinde Kullanılan Arazi ve Laboratuvar Deneyleri**

#### **3.1.3.1 Arazi Deneyleri**

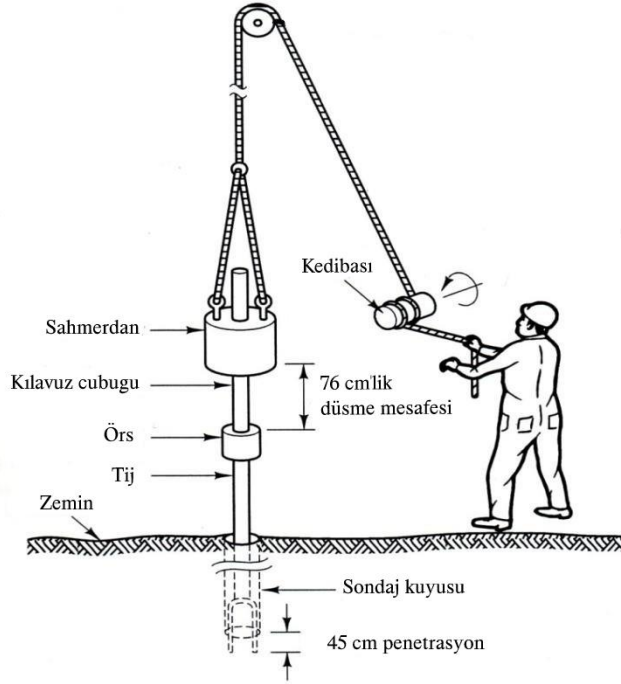
Arazi deneyleri, zemin özelliklerinin yerinde ölçülmesine olanak sağlamaktadır. Dinamik zemin özelliklerini arazide ölçmenin birçok faydası vardır. Arazi deneylerinde numune alınmasına gerek yoktur. Dolayısıyla, numune alımı sırasında karşılaşılan ve numunenin gerilme, kimyasal, fiziksel ve yapısını değiştiren şartlar ortadan kalkmış olur. Arazi deneylerinin çoğu büyük hacimli zemin kütleleri üzerinde yapılır ve böylelikle, ölçülen özelliğin küçük ve temsili olmayan numune üzerinde yapılmasından dolayı meydana gelen hatalar minimuma indirilmiş olur. Çoğu arazi deneyi sırasında oluşturulan zemin deformasyonları, incelenen problemde ve özellikle de temel tasarım problemlerindeki dalga yayılması için söz konusu olan deformasyonlar ile benzerlik arzeder. Ancak, arazi testleri ile arazi şartlarından başka şartların etkisini incelemek kolay değildir ve ayrıca boşluk suyunun drenajı kontrol edilememektedir. Çoğu arazi deneyinde özel bir zemin özelliği ölçülmez, fakat teorik analizden veya ampirik korelasyonlar yardımıyla dolaylı olarak tanımlanabilir. (Kramer, 1996). Günümüzde sıvılaşma analizi yaparken arazi deneyleri arasından yaygın olarak standart penetrasyon deneyi (SPT) ve konik penetrasyon deneyi (CPT) kullanılmaktadır.

##### **3.1.3.1.1 Standart Penetrasyon Deneyi (SPT)**

Standart Penetrasyon Deneyi (SPT), zeminin üzerinde inşa edilen yapıların taşıma gücü ve oturmasını hesaplamak için kullanılan dinamik bir penetrasyon deneyidir. Türkiye'de SPT, hemen hemen her zemin inceleme programının ana kısımlarından biridir. Bu deney, yumuşak killer ve gevşek kumlardan çok sert killer ve sıkı kumlara kadar çeşitli zemin türlerinde uygulanabilir. SPT, 76 cm yükseklikten 63.5 kg ağırlığındaki bir tokmağın düşürülerek standart bir numune alıcının zemine 45

cm sokulması şeklinde uygulanır (Şekil 3.7). Numune kaşığının zemine son 30 cm'lik girmesine karşı gelen toplam darbe sayısı, zeminin penetrasyon direncini ifade eder.

SPT ayrıca zeminin sıvılaştırma potansiyeli ve dinamik bir özellik olan kayma dalgası hızının tahmin edilmesinde de kullanılır. İnce daneli zeminlerde önemli mühendislik parametrelerinin belirlenmesinde SPT kullanılmaktadır (Sivrikaya ve Toğrol, 2003).

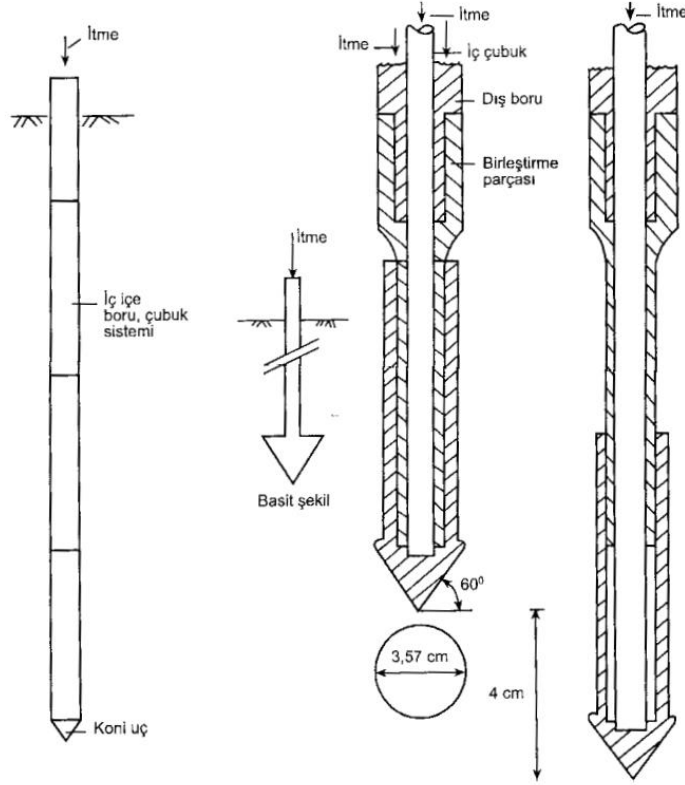


Şekil 3.7: Standart penetrasyon deneyi (SPT) (Kovacs vd., 1981).

### 3.1.3.1.2 Konik Penetrasyon Deneyi (CPT)

Konik penetrasyon deneyi, bir konik başlığın hidrostatik basınç ve sabit bir hızla zemin içine itilerek uygulanmasıdır. Konik başlık 60° açılı ve 10 cm<sup>2</sup> kesit alanına sahiptir (Şekil 3.8). Sondanın zemine penetrasyonu sırasında gördüğü toplam direnç ölçülür. Bu toplam direnç, uç direnci ve çevre sürtünmesi bileşenlerinden oluşmaktadır. Özel bir donanımla boşluk suyu basıncı da ölçülebilir.

Koni penetrasyon deneyi, zemindeki tabaka değişimlerini, kalınlıklarını ve zemin cinsini tanımlamak, tabakaların rölatif sıklık, kayma mukavemeti açısı, drenajsız kayma mukavemeti gibi geoteknik özelliklerini belirlemek için kullanılır.



Şekil 3.8: Konik penetrasyon deneyi (CPT) (Uzuner, 2000).

### 3.1.3.2 Laboratuvar Deneyleri

Zemin tabakalarının sıvılaşıma potansiyelini incelemek için çeşitli laboratuvar deneyleri gerçekleştirilir. Zemin mekaniği laboratuvarında, örselenmemiş ve örselenmiş zemin numuneleri üzerinde standartlara uygun bir şekilde yapılan deneyler sayesinde zeminlerin fiziksel özellikleri belirlenir. Bu deneyler arasında en yaygın olarak kullanılanlar doğal su içeriği, doğal birim hacim ağırlık, elek analizi, kıvam limit deneyi, üç eksenli basınç deneyi ve kesme kutusu deneyi bulunmaktadır.

#### 3.1.3.2.1 Elek Analizi



Elek analizi, bir malzemeden oluşan kırılmış ve/veya öğütülmüş numunenin dane boyutlarının dağılımını saptamak için yapılan bir yöntemdir. Bu dağılım, bir numunedeki danelerin boyutlarının ne kadarının hangi büyüklükte olduğunu gösterir. Bu deneyde, 76,2-0,075 mm arasındaki dane çaplarına sahip olan zemin örnekleri elek analizi ile incelenirken, 0,075 mm'ten daha küçük dane çaplarına sahip olan zeminler ise hidrometre analizi ile incelenmektedir. Bu deneyler sonucunda elde edilen veriler yardımıyla yarı logaritmik analiz kâğıdı üzerinde "dane çapı dağılım eğrisi" çizilir. Bu eğriden zemin içerisindeki çakıl, kum, kil ve silt miktarlarını tespit edebilir ve bu değerler yardımıyla zemin sınıflaması da yapılabilir (TS EN ISO 17892-4, 2016). Analiz yapılırken elek boyutları TS EN ISO 17892-4 standartlarına göre belirlenir. Elek boyutları ve numaralandırılması aşağıda gösterilmiştir (Tablo 3.1).

**Tablo 3.1:** TS EN ISO 17892-4 standartlarına göre elek numaraları (TS EN ISO 17892-4, 2016).

Elek No.	Elek Boyutu (mm)
4	4.75
10	2
20	0.85
40	0.425
60	0.250
100	0.150
140	0.106
200	0.075

### 3.1.3.2.2 Birim Hacim Ağırlık Deneyi

Bir nesnenin bir birim hacme tekabül eden ağırlığı o nesnenin birim hacim ağırlığıdır. Zeminin doğal, kuru ve doymuş olarak farklı durumlar için hesaplanabilir. Genellikle kohezyonlu zeminlerde kullanılır. 0.01 g hassasiyete sahip bir terazi üzerine numune kabı koyularak terazide tartılır ve birim hacim ağırlık elde edilir.

### 3.1.3.2.3 Su İçeriği Deneyi

Su içeriği, zeminde bulunan boşluk ve su miktarının zeminin ağırlığına oranı olarak ifade edilir. Deneyde kullanılan malzemeler etüv, terazi, numune kabı ve desikatördür. Önce numune kabı kuru ve temiz bir şekilde tartılır. Numune kaba koyulan örnek sonra tekrar tartılıp ve 24 saat etüv de kurutulur. Daha sonra 24 saat

sonra numune çıkarılır ve desikatörde soğumaya bırakılır. Bu veriler kullanılarak su içeriği Denklem 3.1 ile hesaplanır:

$$W = (W_2 - W_3 / W_3 - W_1) * 100(\%) \quad (3.1)$$

$$W = \text{Su İçeriği} (\%) \quad (3.2)$$

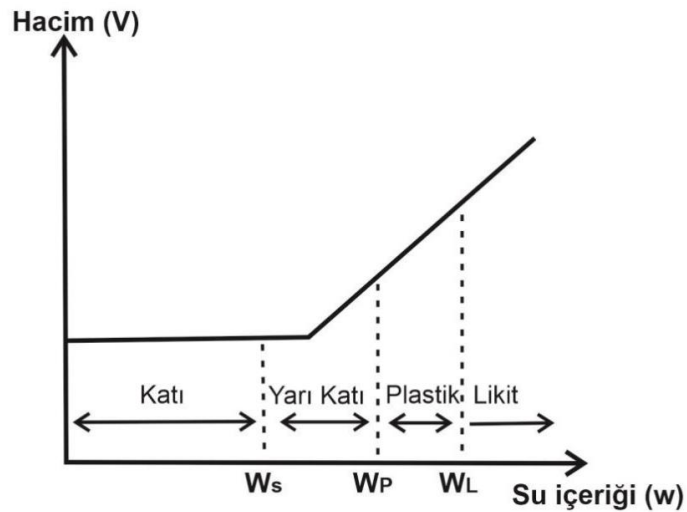
$$W_1 = \text{Kap Ağırlığı} (\text{gr}) \quad (3.3)$$

$$W_2 = \text{Kap} + \text{Yaş Numune Ağırlığı} (\text{gr}) \quad (3.4)$$

$$W_3 = \text{Kap} + \text{Kuru Numune Ağırlığı} (\text{gr}) \quad (3.5)$$

#### 3.1.3.2.4 Kıvam Limit Deneyi

Kıvam limitleri Albert Atterberg tarafından yapılan deneysel çalışmalar sonucunda bulunduğu için “Atterberg limitleri” olarak da adlandırılabilir. Atterberg limitleri, bir zeminde bulunan su miktarının zemindeki mekanik özelliklerini belirleyen bir kavramdır. Atterberg limitleri, bir zeminde bulunan su miktarının zemindeki plastiklik, sıvılık ve kırılabilirlik gibi özellikleri nasıl etkilediğini gösterir (Yılmaz ve diğ, 2014). Bu limitler, katı halindeki zeminde bulunan su miktarının keskin bir ayrımı ile ifade edilir ve bu ayrım sınırları Atterberg limitleri olarak adlandırılır (Şekil 3.9).



Şekil 3.9: Atterberg limitleri (Yılmaz ve diğ, 2014).

Plastik limit: Bu limit, bir zeminde bulunan su miktarının plastik bir yapıya sahip olduğu durumu ifade eder. Plastik hal, zeminde bulunan su miktarının artmasıyla birlikte zeminin plastikliği de artar.

Likit limit: Bu sınır, bir zeminde bulunan su miktarının sıvı bir hal almaya başladığı durumu ifade eder. Bu sınırdan önce zemin plastik bir yapıya sahiptir ve bu sınırdan sonra zemin sıvı bir yapıya dönüşür.,

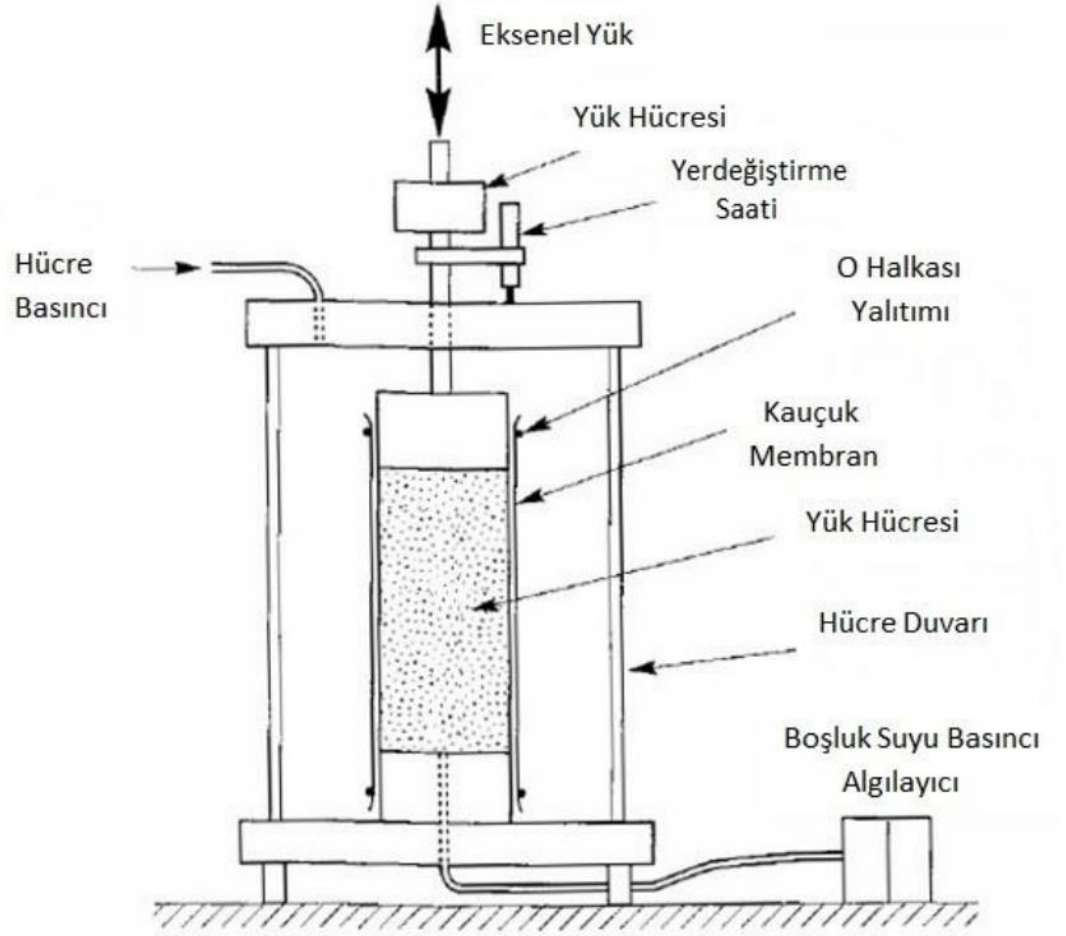
### **3.1.3.2.5 Üç Eksenli Basınç Deneyi**

Silindir şeklinde bir zemine veya kaya numunesine geçirimsiz bir kılıf takılarak hücre basıncına maruz bırakılır ve daha sonra eksenel olarak yüklenir ve yenilir. Bu, laboratuvar deneyi olarak bilinen üç eksenli basınç deneyidir ve yaygın olarak kullanılan çeşitleri anlatılmıştır (Day, 2002):

Konsolidasyonlu Drenajlı Üç Eksenli Basınç Deneyi: Silindir şeklinde bir zemin numunesi önce efektif hücre basıncı uygulanarak konsolide edilir. Daha sonra, numune eksenel olarak artan yüklerle makaslanır. Makaslama sırasında numune içindeki suyu drenajına izin verilir ve makaslama işlemi, boşluk suyu basıncı azaltılarak yavaşça gerçekleştirilir.

Konsolidasyonlu Drenajsız Üç Eksenli Basınç Deneyi: Silindir şeklinde bir zemin numunesi önce efektif hücre basıncı uygulanarak konsolide edilir. Daha sonra, numune eksenel olarak artan yüklerle makaslanır. Makaslama sırasında numune içindeki su drenajı engellenir ve bu nedenle deney drenajsız bir deneydir. Makaslama sırasında oluşan boşluk suyu basıncı ölçülebilir.

Konsolidasyonsuz Drenajsız Üç Eksenli Basınç Deneyi: Silindir şeklinde bir zemin numunesinin su içeriği tüm deney boyunca değişmez (yani, hücre basıncı uygulaması ve makaslama sırasında da su içeriği aynı kalır). Drenajı engelleyerek, numune konsolide olmaz ve makaslama sırasında da drenajsız koşullar söz konusudur.



Şekil 3.10: Standart üç eksenli basınç deneyi (Kramer, 1996).

### 3.1.4 Sıvılaşma Potansiyeli

Zemin sıvılaşmasının olası etkileri deprem ve zemin koşulları dikkate alınarak sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesine yönelik birçok çalışma yapılmıştır (Seed ve Idriss, 1971; Iwasaki vd., 1982; Youd vd., 2001; Toprak ve Holzer, 2003; Holzer vd., 2002; Çetin vd., 2004; Sönmez ve Gökçeoğlu, 2005; Boulanger ve Idriss, 2014; Toprak vd., 2019). Bu çalışmaların birçoğu ekonomik ve pratik olması nedeniyle SPT deneyleri üzerine yoğunlaşmıştır. Bu çalışmalar bizlere sıvılaşma riskinin sınıflandırılması konusunda yardımcı olmaktadır.

### 3.1.4.1 Ham SPT Verilerinin Düzeltilmesi

Zemin sıvılaşması potansiyeli analizleri yapılması için, saha zeminlerinin sıvılaşmaya direnci çevrimsel dayanım oranı CRR; eğimsiz sahalar için geliştirilmiş, standart penetrasyon deneyi sonuçlarından yararlanılarak sıvılaşma direnci hesaplaması yapılacaktır. Deprem sırasında dinamik yükler etkisinde oluşacak gerilmeleri hesaplamak amacıyla da tekrarlı gerilme oranı CSR, Boulanger ve Idriss (2014) yöntemiyle çözümlenecektir.

Çalışma sahasından elde edilmiş ham SPT verileri  $N_{30}$  Denklem 3.6 kullanılarak  $(N_1)_{60}$  değerine düzeltilecektir.

$$N_{60} = N_{30} C_R C_S C_B C_E \quad (3.6)$$

Burada  $C_R$  tij boyu düzeltme katsayısını,  $C_S$  numune alıcı tipi düzeltme katsayısını,  $C_B$  sondaj delgi çapı düzeltme katsayısını,  $C_E$  enerji oranı düzeltme katsayısını göstermektedir.

**Tablo 3.2:** SPT düzeltme katsayıları (TBDY, 2018).

Düzeltilme Katsayısı	Değişken	Değer
$C_R$	3m ile 4m aralığında	0.75
	4m ile 6m aralığında	0.85
	6m ile 10m aralığında	0.95
	10m'den derin	1.00
$C_S$	Standart numune alıcı (iç tüpü olan)	1.00
	İç tüpü olmayan numune alıcı	1.10-1.30
$C_B$	Çap 65mm-115mm arasında	1.00
	Çap 150mm	1.05
	Çap 200mm	1.15
$C_E$	Güvenli tokmak	0.60-1.17
	Halkalı tokmak	0.45-1.00
	Otomatik darbeli tokmak	0.90-1.60

Boulanger ve Idriss (2014)'e göre ince danelerde  $(N_1)_{60cs}$  ve  $q_{c1Ncs}$  Denklem 3.8 ve 3.9 ile elde edilir.

$$(N_1)_{60cs} = (N_1)_{60} + \Delta(N_1)_{60} \quad (3.7)$$

$$q_{c1Ncs} = q_{c1N} + \Delta q_{c1N} \quad (3.8)$$

Kohezyonsuz zeminlerde derinlik düzeltme katsayısı ( $C_N$ ):

Idriss ve Boulanger (2003, 2008) rölatif sıklığa bağlı  $C_N$  ilişkisini aşağıdaki eşitlikle göstermiştir:

$$C_N = \left(\frac{P_a}{\sigma'_v}\right)^m \leq 1.7 \quad (3.9)$$

$$m = 0.784 - 0.0768\sqrt{(N_1)_{60cs}} \quad (3.10)$$

$$m = 1.338 - 0.249(q_{c1Ncs})^{0.264} \quad (3.11)$$

$$(N_1)_{60} = N_{60} C_N \quad (3.12)$$

$$q_{c1N} = C_N q_{cN} = C_N \frac{q_c}{P_a} \quad (3.13)$$

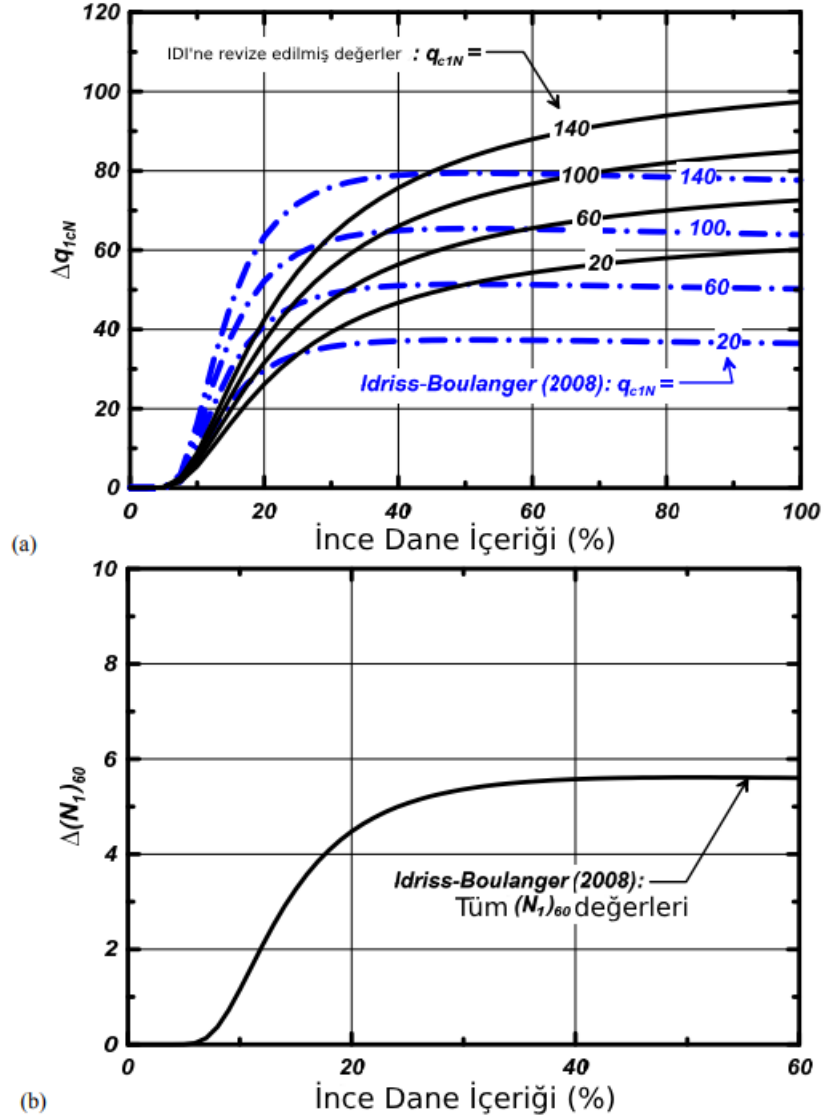
Burada  $q_c$  ölçülen konik uç direnci,  $q_{c1N}$  düzeltilmiş koni uç direnci,  $P_a$  100 kPa değerindeki referans gerilmesi,  $\sigma'_v$  efektif yüzey gerilmesidir. Denklem 3.10 ve 3.11'de  $(N_1)_{60cs}$  değerleri  $\leq 46$  ve  $q_{c1Ncs}$  değerleri 21-254 aralığında sınırlıdır. Denklem 3.10'da iterasyon yapılması gerektiğinden dolayı MS Excel programında bulunan otomatik iterasyon seçeneği ile kolayca yapılabilmektedir.

Temiz kumlarda SPT ve CPT verilerinin ince dane içeriğine göre düzeltilmesi (Denklem 3.15 ve 3.16):

$$\Delta(N_1)_{60} = \exp\left(1.63 + \frac{9.7}{IDI + 0.01} - \left(\frac{15.7}{IDI + 0.01}\right)^2\right) \quad (3.14)$$

$$\Delta q_{c1N} = \left(11.9 + \frac{q_{c1N}}{14.6}\right) \exp\left(1.63 + \frac{9.7}{IDI + 2} - \left(\frac{15.7}{IDI + 2}\right)^2\right) \quad (3.15)$$

Burada IDI ince dane içeriğini ifade etmektedir. Eşitliğimiz SPT ve CPT İÇİN IDI değeri %35'i geçtikten sonra değerlerimiz tekdüzeleşir (Şekil 3.11). Çünkü bu değerden sonra zeminimizin davranışı ince daneli zemin davranışına dönüşür. Ancak yenilenmiş CPT korelasyonunda IDI değeri arttıkça  $\Delta q_{c1N}$  değerinde de artış görülmektedir. CPT tabanlı yenilenmiş korelasyon için eşitlik Denklem 3.22'de verilmiştir.



Şekil 3.11: a)  $\Delta q_{c1N}$  ve b)  $\Delta(N_1)_{60}$  değerlerinin ince dane içeriğine göre değişimi (Boulanger ve Idriss, 2014).

Sıvılaşmayı meydana getirmek için gerekli tekrarlı gerilme oranı Seed ve Idriss (1971) eşitliği ile aşağıda gösterilmiştir;

$$CSR = 0.65 \frac{\sigma_v a_{max}}{\sigma'_v g} \cdot r_d \quad (3.16)$$

Burada  $a_{max}$  deprem sırasında zemin yüzeyinde oluşan maksimum yatay ivme,  $g$  yerçekimi ivmesi,  $\sigma'_v$  efektif yüzey gerilmesi,  $\sigma_v$  toplam yüzey gerilmesi ve  $r_d$  gerilme azaltma katsayısıdır.

Gerilme azaltma katsayısının eşitliği:

$$r_d = \exp[\alpha(z) + \beta(z) \cdot M] \quad (3.17)$$

$$\alpha(z) = -1.011 - 1.126 \sin\left(\frac{z}{11.73} + 5.133\right) \quad (3.18)$$

$$\beta(z) = 0.106 + 0.118 \sin\left(\frac{z}{11.28} + 5.142\right) \quad (3.19)$$

Burada  $z$  derinlik,  $M$  deprem moment büyüklüğüdür.

Zeminin sıvılaşmaya karşı direnci olan çevrimsel direnç oranının hesaplanmasında Idriss ve Boulanger (2014) tarafından önerilen eşitlik SPT için Denklem 3.21 ve CPT için Denklem 3.22'de gösterilmiştir;

$$CRR_{M=7.5, \sigma'_v=1} = \exp\left(\frac{(N_1)_{60cs}}{14.1} + \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{126}\right)^2 - \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{23.6}\right)^3 + \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{25.4}\right)^4 - 2.8\right) \quad (3.20)$$

$$CRR_{M=7.5, \sigma'_v=1} = \exp\left(\frac{q_{c1Ncs}}{113} + \left(\frac{q_{c1Ncs}}{1000}\right)^2 - \left(\frac{q_{c1Ncs}}{140}\right)^3 + \left(\frac{q_{c1Ncs}}{137}\right)^4 - 2.8\right) \quad (3.21)$$

$CRR_{M=7.5, \sigma'_v=1}$  moment büyüklüğü 7.5 olan ve zemin yüzeyinde gerçekleşen depreme karşı gelen çevrimsel dayanım oranıdır.

$$CRR_{M, \sigma'_v} = CRR_{M=7.5, \sigma'_v=1} \cdot MSF \cdot K_\sigma \quad (3.22)$$

$MSF$  depremin moment büyüklüğü ( $M_w$ ) düzeltme katsayısı, bu değer 7.5 büyüklüğündeki bir deprem için 1'e eşittir.  $K_\sigma$  ise yük düzeltme faktörüdür.

Yük düzeltme faktörü ( $K_\sigma$ ):



$$K_{\sigma} = 1 - C_{\sigma} \ln \left( \frac{\sigma_v^1}{p_a} \right) \leq 1.1 \quad (3.23)$$

$$C_{\sigma} = \frac{1}{18.9 - 2.55 \sqrt{(N_1)_{60cs}}} \leq 0.3 \quad (3.24)$$

$$C_{\sigma} = \frac{1}{37.3 - 8.27 (q_{c1Ncs})^{0.264}} \leq 0.3 \quad (3.25)$$

Moment düzeltme katsayısı (MSF):

$$MSF = 1 + (MSF_{max} - 1) \left( \frac{\exp\left(\frac{-M}{4}\right) - \exp\left(\frac{-7.5}{4}\right)}{\exp\left(\frac{-5.25}{4}\right) - \exp\left(\frac{-7.5}{4}\right)} \right) \quad (3.26)$$

$$MSF_{max} = 1.09 + \left( \frac{(N_1)_{60cs}}{31.5} \right)^2 \leq 2.2 \quad (3.27)$$

$$MSF_{max} = 1.09 + \left( \frac{q_{c1Ncs}}{31.5} \right)^3 \leq 2.2 \quad (3.28)$$

Sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısı:

$$FS_L = \frac{CRR}{CSR} \geq 1 \quad (3.29)$$

Sıvılaşmaya karşı zeminin direnci, güvenlik katsayısının ne kadar büyük olduğu ile doğru orantılıdır. Ancak, güvenlik katsayısı 1'den daha az olan zeminler de sıvılaşabilir. Örneğin, daha derin zeminlerde sıvılaşma oluştuğunda, yukarı doğru su akışı, güvenlik katsayısı 1'den az büyük olan zeminlerde sıvılaşmayı tetikleyebilir.

### 3.1.4.2 Sıvılaşma Potansiyelinin Hesaplanması

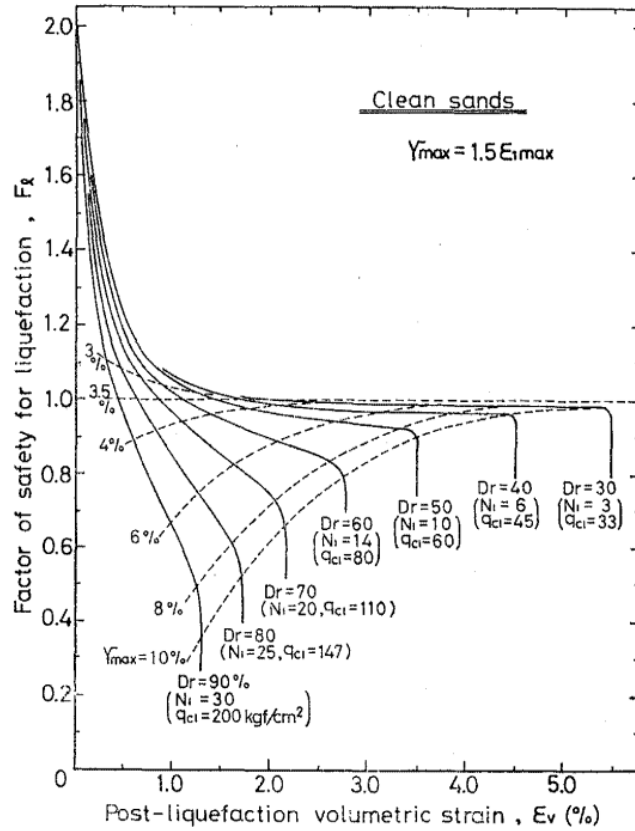
#### 3.1.4.2.1 Sıvılaşma Şiddeti Sayısı (LSN)

Tonkin and Taylor (2013) tarafından Canterbury deprem dizisinden sonra önerilmiştir:

$$LSN = 1000 \int_0^{20m} \frac{\varepsilon_v}{z} dz \quad (3.30)$$

$\varepsilon_v$  Hacimsel birim deformasyon , z derinlik.

Temiz kumda sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısının ( $FS_L$ ) fonksiyonu olarak zemin yüzeyi oturmasını ve yanal deformasyonu bulmada Ishihara ve Yoshimine (1992) tarafından önerilen abak kullanılmaktadır (Şekil 3.12).



Şekil 3.12: Sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı ve sıvılaşma sonrası hacimsel şekil değiştirme oranı (Ishihara ve Yoshimine, 1992).

Burada  $D_r$  zeminin rölatif sıkılık değeri,  $q_{c1}$  düzeltilmiş konik penetrasyon uç direnci,  $N_{1,60}$  düzeltilmiş SPT-N değeri,  $\gamma_{max}$  maksimum kayma birim deformasyonu göstermektedir. Abaktan  $FS_L$  ve  $N_{1,60}$  veya  $q_{c1}$  değerinin kesişim noktası alınarak her bir tabakaya ait hacimsel birim deformasyonu bulmak için kesişim noktasındaki değer ile tabaka kalınlığı çarpılır. Bulunan bu değerler toplanarak sondaj için toplam LSN

değeri bulunur. Elde edilen LSN değerlerine karşılık gelen sıvılaşma riskleri Tablo 3.3'te verilmiştir (Tonkin and Taylor, 2013).

**Tablo 3.3:** Sıvılaşma Şiddeti Sayısı (LSN) değerine göre beklenen riskler (Tonkin and Taylor, 2013).

LSN aralığı	Risk
0 – 10	Sıvılaşma az veya hiç yok
10 – 20	Sıvılaşmanın küçük etkileri oluşur, kum kaynaması
20 – 30	Sıvılaşmanın orta düzeyde etkileri oluşur, kum kaynaması oluşur ve bazı yapılarda hasarlar meydana gelir
30 – 40	Orta ile şiddetli sıvılaşma meydana gelir, oturma yapısal hasara neden olabilir
40 – 50	Sıvılaşma şiddetlidir, zemin yüzeyinde hasarlar meydana gelir, şiddetli ve farklı oturmalar meydana gelir
> 50	Ciddi hasarlar meydana gelir, kapsamlı şekilde yüzeyde sıvılaşma oluşur, şiddetli ve farklı oturmalar meydana gelir, hizmetler kesilebilir

### 3.1.4.2.2 Sıvılaşma Şiddeti İndeksi ( $L_s$ )

Sönmez ve Gökçeoğlu (2005) tarafından önerilen sıvılaşma şiddeti indeksi ( $L_s$ ) eşitliği:

$$L_s = \int_0^{20m} P_L(z) \cdot W(z) \cdot dz \quad (3.31)$$

$$F_L \leq 1.411 \text{ için ; } P_L = \frac{1}{1 + \left(\frac{F_L}{0.96}\right)^{4.5}} \quad (3.32)$$

$$F_L > 1.411 \text{ için ; } P_L(z) = 0 \quad (3.33)$$

$$z < 20m \text{ için ; } W(z) = 10 - 0.5z \quad (3.34)$$

$$z \geq 20m \text{ için ; } W(z) = 0 \quad (3.35)$$

$P_L$  sıvılaşma olasılığı,  $W$  derinlik ağırlık faktörü,  $F_L$  sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısı,  $z$  zemin tabakasının orta noktasına metre cinsinden derinliğidir. Zeminlerin sıvılaşma riskinin sınıflandırılması hesaplanan sıvılaşma şiddeti indeksi Tablo 3.4'te verilmiştir (Sönmez ve Gökçeoğlu, 2005).

**Tablo 3.4:** Sıvılaşma Şiddeti ( $L_s$ ) indeksi risk sınıfları (Sönmez ve Gökçeoğlu, 2005).

$L_s$	Risk
0	Sıvılaşmaz
0 – 15	Çok düşük
15 – 35	Düşük
35 – 65	Orta
65 – 85	Yüksek
85 – 100	Çok Yüksek

### 3.1.4.2.3 Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi (LPI)

Sıvılaşma potansiyeli indeksi Iwasaki vd. (1982) tarafından yüzeyden 20 m derinliğe kadar olan sıvılaşma potansiyelini hesaplamak için geliştirilmiştir.

$$LPI = \int_0^{20m} F(z) \cdot W(z) \cdot dz \quad (3.36)$$

$$F_L < 1 \text{ için; } F(z) = 1 - F_L \quad (3.37)$$

$$F_L \geq 1 \text{ için; } F(z) = 0 \quad (3.38)$$

$$z < 20m \text{ için; } W(z) = 10 - 0.5z \quad (3.39)$$

$$z \geq 20m \text{ için; } W(z) = 0 \quad (3.40)$$

LPI sıvılaşma potansiyeli indeksi,  $F(z)$  güvenlik katsayısının fonksiyonu olan sıvılaşma şiddeti,  $W(z)$  ağırlıklı ortalama fonksiyonu,  $z$  zemin tabakasının orta noktasına metre cinsinden derinliğidir. Sıvılaşma potansiyeli indeksi (LPI) değerlerine göre zeminlerin sıvılaşma riskleri Tablo 3.5'te verilmiştir (Iwasaki vd., 1982). Toprak

ve Holzer (2003) çalışması da CPT verileriyle gerçekleştirdikleri değerlendirmelerde benzer sonuçlara ulaşmıştır.

**Tablo 3.5:** Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi (LPI) değerlerine göre sıvılaşma (Iwasaki vd., 1982).

<b>LPI</b>	<b>Sıvılaşma Potansiyeli</b>
0	Çok düşük
0 – 5	Düşük
5 – 15	Yüksek
> 15	Çok Yüksek

### **3.2 Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS)**

Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS), konum tabanlı coğrafi verileri toplama, analizlerinin saklanması, işlenmesi, yönetimi, mekansal analizi fonksiyonlarının yerine getirilmesini sağlayan bilgisayar tabanlı yazılımlardır. CBS, günümüzde hayatımızı ilgilendiren birçok olayın konum analizini kullanarak, çeşitli teknik ve görsel öğelerle kullanıcıların daha bilinçli karar vermelerini sağlar. Bu sayede, CBS, kullanıcılara daha derin ve boyutlu bir bakış açısı sunar (ESRI, 2008). Zemin mekaniği alanında özellikle son senelerde deprem anında meydana gelebilecek hasarların araştırılması konusunda çok fazla araştırma yapılmıştır (Nacaroğlu, 2010).

#### **3.2.1 Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS)'nin Ana Bileşenleri**

Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) için, konumsal analizleri gerçekleştirilebilmesi için özel bilgisayar programlarına ihtiyaç vardır. Ancak CBS, bir coğrafi veri yönetim sistemi olarak düşünüldüğünde, beş temel bileşenin bütünleşik bir yapıda çalışması gerekir (Aydınöğlü vd., 2010):

- Veri
- Yazılım
- Donanım
- İnsanlar
- Yöntemler

### **3.2.1.1 Veri**

CBS'nin temel bileşeni veridir ve coğrafi veriler grafik ve özniteliklerden oluşur. CBS ortamında çeşitli kaynaklardan sağlanan veriler kullanılabilir ancak veri toplama, en zor ve en maliyetli işlemdir. Veri kaynakları çok çeşitlidir ve farklı yapıda olabilir.

### **3.2.1.2 Yazılım**

Yazılım, coğrafi verilerin elektronik ortamda depolanması, yönetilmesi, işlenmesi, analiz edilmesi ve kullanıcıya sunulması için gerekli programlardır. Bir CBS yazılımının özel sektör tarafından veya üniversite gibi araştırma kurumları tarafından geliştirilebilir. İnternette hizmet veren harita servisleri de CBS sorgulamalarını gerçekleştirme imkânı sağlar. Bir CBS yazılımının beklenen özellikleri; coğrafi veri girişi ve işleme araçları, veri tabanı yönetim sistemi, konumsal sorgulama, analitik analiz ve harita üretimi desteği, ek donanım bağlantıları için arayüz desteğidir.

### **3.2.1.3 Donanım**

Donanım, CBS'nin işlevlerini gerçekleştirmek için ihtiyaç duyduğu bilgisayar ve bunun bağlı olduğu ekipmanlardır. Önemli donanım araçları CBS yazılımlarının çalıştırılacağı ve fonksiyonların yürütüleceği bilgisayarlardır. Bu bilgisayarlar işlemci, bellek ve disk kapasitesine sahip olmalıdır. Günümüzde CBS yazılımları farklı donanım platformlarında çalışabilir. Donanım cihazları arasında yazıcı, çizici, tarayıcı, sayısallaştırıcı ve veri/görüntü kayıt üniteleri de önemlidir.

### **3.2.1.4 İnsanlar**

Kamu kurumları ve özel sektörde çalışan coğrafi veri sağlayıcıları ve kullanıcıları insan bileşenini oluşturur. CBS fonksiyonlarını kullanmayı bilen kullanıcılar gerçek dünya problemlerini çözmek ve etkin karar vermek için gerekli

sistemleri yönetir. CBS'nin gelişimi, çeşitli yetkilerdeki uzman insan gücünün varlığına ve ona sahip çıkılmasına bağlıdır.

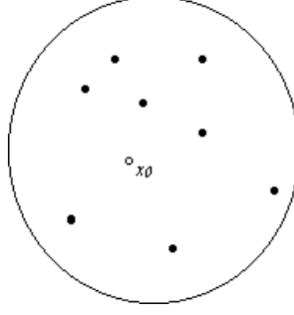
### **3.2.1.5 Yöntemler**

CBS, yönetmelikler doğrultusunda ve iyi tasarlanmış plan ve iş kurallarına göre çalışır. Başarılı bir CBS için, coğrafi bilgi akışı birimler ve kurumlar arasındaki iş akışına uyumlu olmalıdır. Bu amaçla, coğrafi veri yönetiminde ve paylaşımında standartların hazırlanması ve uygulanması için yasal düzenlemelere gidilir.

### **3.2.2 Kriging Yöntemi**

Kriging, verilerin eksik olduğu noktalardaki tahminlerde bulunmak için kullanılan bir enterpolasyon yöntemidir, bu tahminler yakındaki bilinen noktalardan alınan örneklerle oluşturulur. Bu yaklaşım, bölgesel değişkenler teorisine dayanmaktadır ve çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Kriging yöntemi, geniş kullanım alanı ve popülerliği ile kanıtlanmış bir yöntemdir.

Kriging, bir bölgedeki verilerin enterpolasyonunu yaparken, önceden tanımlanmış bir kovaryans modelini kullanarak varyansı minimize eden bir lineer regresyon seti oluşturur. Kriging enterpolasyonunda, incelenen parametrelerin bölgesel bir değişken olduğu kabul edilir ve bu yöntem, yakın noktalardaki verilerin birbirleriyle daha yüksek derecede korelasyona sahip olduğunu varsayar. Bu yaklaşım, bölgesel değişkenin mekânsal olarak sürekli bir çeşitlilik gösterdiği temeline dayanır (İnal ve Yiğit 2003).



Şekil 3.13: Kriging yöntemi (David, 1977).

Kriging kestirim tekniği,  $x_0$  noktasına göre yapılacak kestirimleri üç farklı şekilde uygulama olanağı sunar. Örneğin, bir bölgedeki  $x_0$  noktasının tahmin edilmesi noktasal kriging olarak adlandırılırken,  $x_0$  noktası etrafındaki bir alanın ortalama değerinin tahmin edilmesi alansal kriging yöntemini oluşturur. Ayrıca,  $x_0$  merkezli bir bloğunun ortalama değerinin tahmin edilmesi ise hacimsel kriging olarak adlandırılmaktadır. Kriging yönteminde kullanılan genel denklem şu şekildedir:

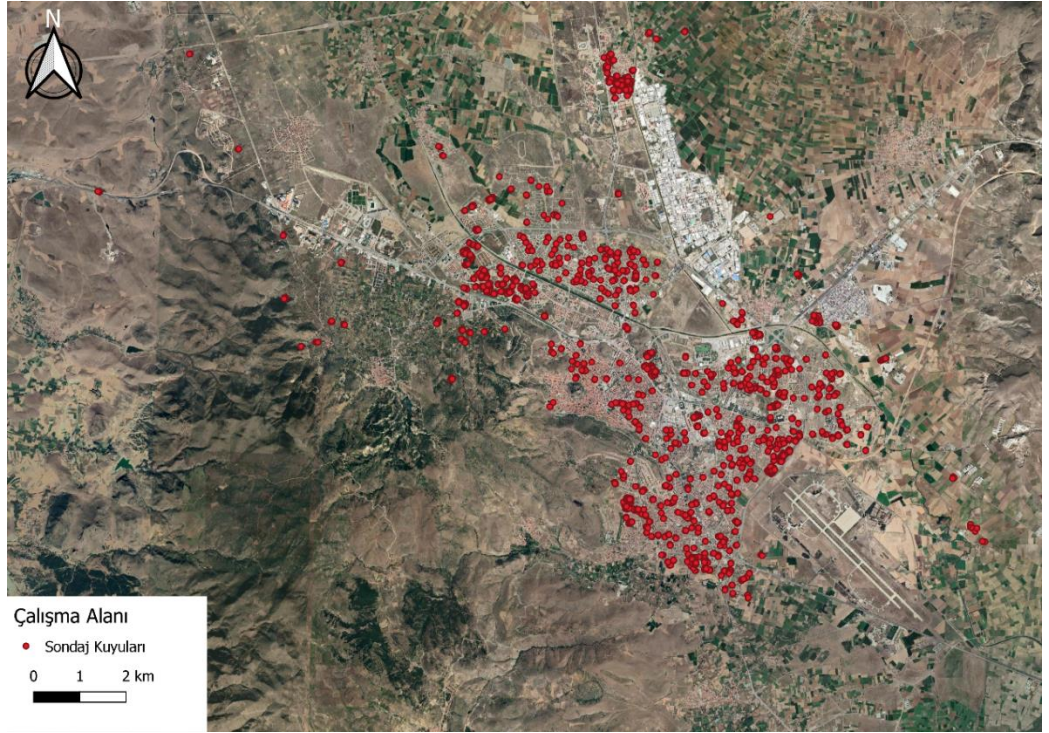
$$N_p = \sum_{i=1}^n P_i N_i \quad (3.41)$$

$N_p$ ; P noktasının aranan ondülasyon değeri,  $P_i$ ;  $N_p$ 'nin hesabında kullanılan her bir  $N_i$ 'ye karşılık ağırlık değerleri,  $N_i$ ;  $N_p$ 'nin hesabına kullanılan noktaların ondülasyon değerleri,  $n$ :  $N_p$ 'nin hesabında kullanılan her bir  $N_i$ 'ye karşılık ağırlık değerler (David, 1977).

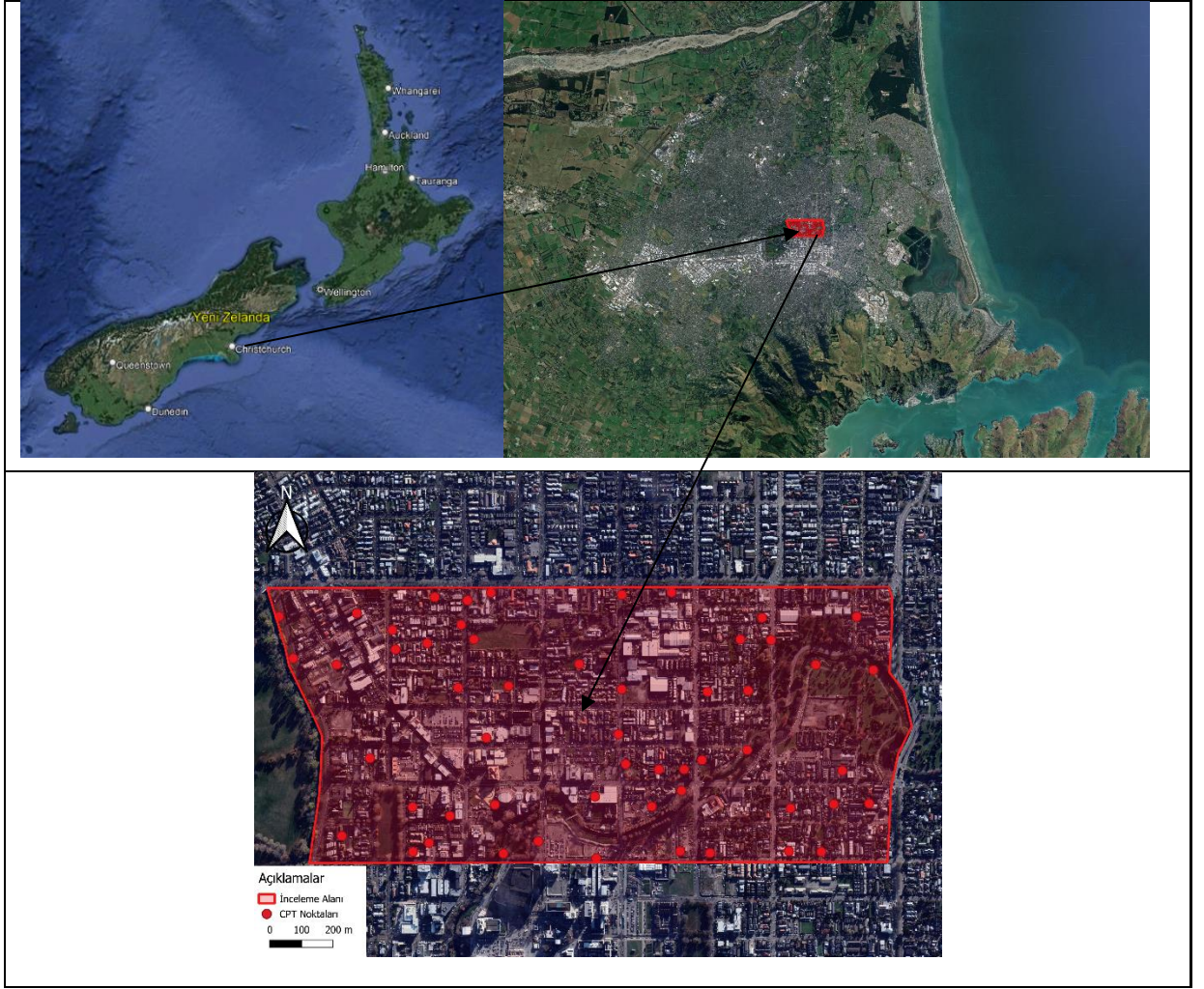


## 4. MATERYAL ve METOT

Tez çalışmasında Afyonkarahisar ilinin Merkez ilçesi ve Yeni Zelanda Güney Adası'nda bulunan Christchurch şehir merkezi çalışma alanları olarak belirlenmiştir. Afyonkarahisar'da bulunan çalışma sahasında 2013 – 2022 yılları arasında yapılan 2121 adet sondaj kuyusu verisi kullanılmıştır. Bu sondaj verileri 45 farklı mahallede “3DM Mühendislik Dan. İnş. Tar. Ve Mad. San. Tic. Ltd. Şti.” tarafından yapılan veri ve geoteknik raporlardan elde edilmiştir. Sondaj kuyularının konumları Şekil 4.1’de verilmiştir. Christchurch’te bulunan çalışma sahasında ise Yeni Zelanda Geoteknik Veritabanı (New Zealand Geotechnical Database) üzerinden elde edilen 54 adet konik penetrasyon verisinden yararlanılmıştır. Christchurch’te bulunan çalışma sahası ve konik penetrasyon testi konumları Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.1: Afyonkarahisar çalışma sahası.



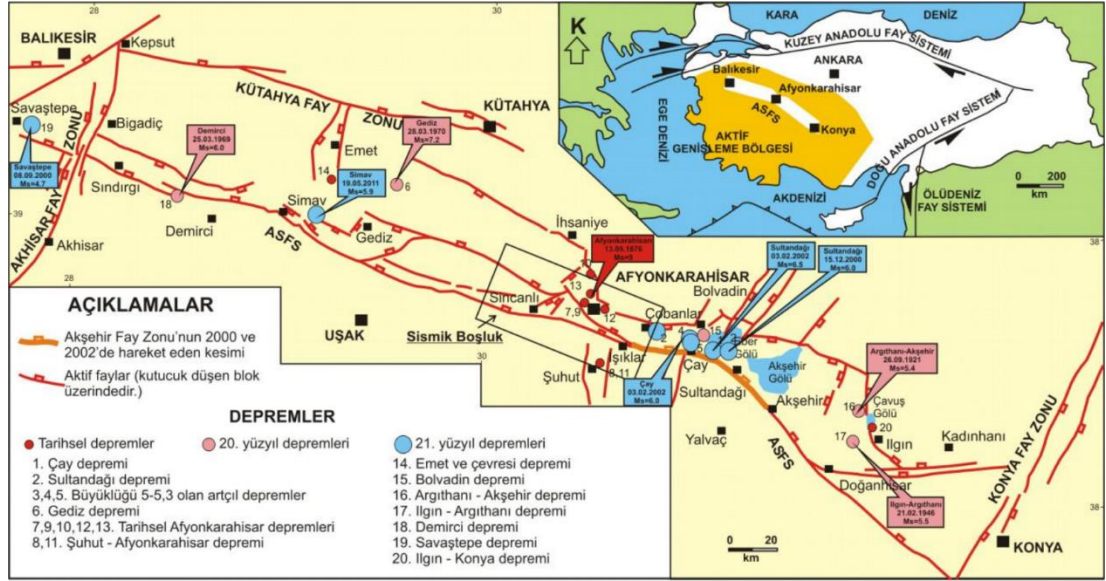
Şekil 4.2: Christchurch çalışma sahası.

#### 4.1 Çalışma Alanlarının Jeolojisi ve Depremselliği

Afyonkarahisar, Güneybatı Türkiye'nin genişlemeli Neotektonik bölgesinin en önemli tektonik öğelerinden olan Akşehir-Simav fay sisteminin (ASFS) orta kısmında yer almaktadır. Koçyiğit (1984) tarafından adlandırılan ASFS, Karaman'ın güneydoğusunda ve Balıkesir'in Sındırgı ilçesinin kuzeybatısında uzanmaktadır ve toplam uzunluğu 420 km'dir. BKB-DKD yönü ile karakterize olan bu sistem, sık aralıklı, birbirine paralel veya yarı paralel, genişliği 1-50 km arasında değişen ve çoğunlukla verem atımlı normal faylarla oluşur. Ayrıca, derinlikle azalan eğim miktarına sahip ve listrik (kürek biçimli) fay niteliği taşıyan bu sistemde, K-G, KD-



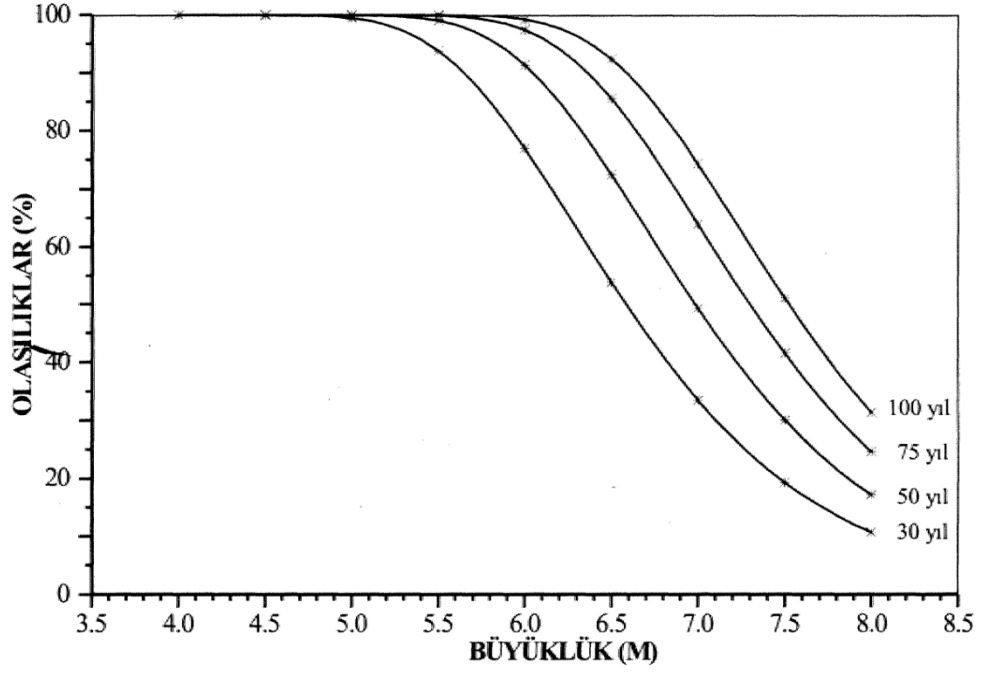
GB ve KB-GD yönlerinde ve daha kısa boyutlu ikincil faylar da bulunmaktadır (Koçyiğit ve diğ. 2012).



Şekil 4.3: Afyonkarahisar ve çevresinin tektonik haritası (Koçyiğit vd., 2012).

Afyonkarahisar ve ilçelerinde tarih boyunca pek çok yıkıcı deprem meydana geldi ve son 20 yıl içinde gerçekleşen en önemli depremler arasında 01.10.1995 Dinar depremi ( $M_w=6.1$ ), 15.12.2000 ( $M_w=6.0$ ) ve 03.02.2002 ( $M_w=6.5$ ) Sultandağı depremleri ve 03.02.2002 ( $M_w=6.0$ ) Çay Depremi yer almaktadır (Koçyiğit ve diğ. 2012).

Şekil 4.4'ten 6.0 büyüklüğündeki deprem için 30 yıllık ve 50 yıllık sürelerde gerçekleşme olasılığı sırasıyla %78 ve %90 olarak hesaplanmıştır. 7.0 büyüklüğünde deprem için ise bu değerler %35 ve %50 olarak tahmin edilmektedir. Bölgede meydana gelebilecek en büyük depremin büyüklüğü 100 yıllık süre içinde 7.3 olarak öngörülmektedir. Bu nedenle, bölge 7.0 - 7.3 arasında depremler yaşayabilecek potansiyele sahiptir. Özellikle, yerleşim alanlarının ve nüfusun büyük bir kısmının gevşek sulu tortullardan oluşan yerlerde bulunması, Afyon ve çevresinde deprem sırasında zemin büyütmesi faktörünün önemli olduğu bir bölge karakteri sergilemektedir (Utku ve diğ. 2002).



Şekil 4.4: Afyonkarahisar ve çevresinin olası deprem büyüklüklerinin belli sürelerde aşılma olasılıkları (Utku vd., 2002)

04.10.2010 tarihinde meydana gelen ve Darfield Depremi ( $M_w = 7.1$ ) olarak bilinen depremin ardından bir dizi büyük deprem ve binlerce artçı sarsıntı yaşanmıştır. Bunun sonucunda Christchurch çevresinde yapı ve insan hayatını ciddi şekilde etkileyen hasarlar meydana gelmiştir. Bu depremler, literatürde Canterbury deprem dizisi olarak adlandırılmaktadır. Canterbury deprem dizisinin ardından, iş, yenilik ve istihdam bakanlığı (MBIE), bina tasarımı ve sivilaşma değerlendirmesi için deprem yükü standartlarında geçici güncellemeler yapmıştır. Bu güncellemeler, yeni belirlenen fay hatları ve artçı şok dizisi ile ilişkilendirilen geçici olarak artan sismik aktivite oranlarını dikkate almıştır. Güncellenmiş sismik tehlike parametreleri, tasarım için pragmatik bir temel sağlamak amacıyla yapılmıştır. Sivilaşma değerlendirmesi için önerilen tasarım değerleri Tablo 4.1'de özetlenmiştir. Devam eden sismik aktiviteler ve devam eden inşaat çalışmalarındaki belirgin belirsizlikler göz önüne alındığında, bu geçici değerlerin muhafazakâr olması tercih edilmiştir (Tonkin and Taylor, 2020).

MBIE tarafından belirlenen en büyük yatay yer ivmesi değerleri, deprem büyüklüğü olarak  $M_w = 7.5$ 'e karşılık gelmektedir. Ancak Christchurch bölgesinde

gerçekleşen sismik hareketlerden dolayı daha küçük  $M_w$  değerinin bölge için daha doğru sonuçlar vereceği belirlenmiştir (Bradley, 2014).

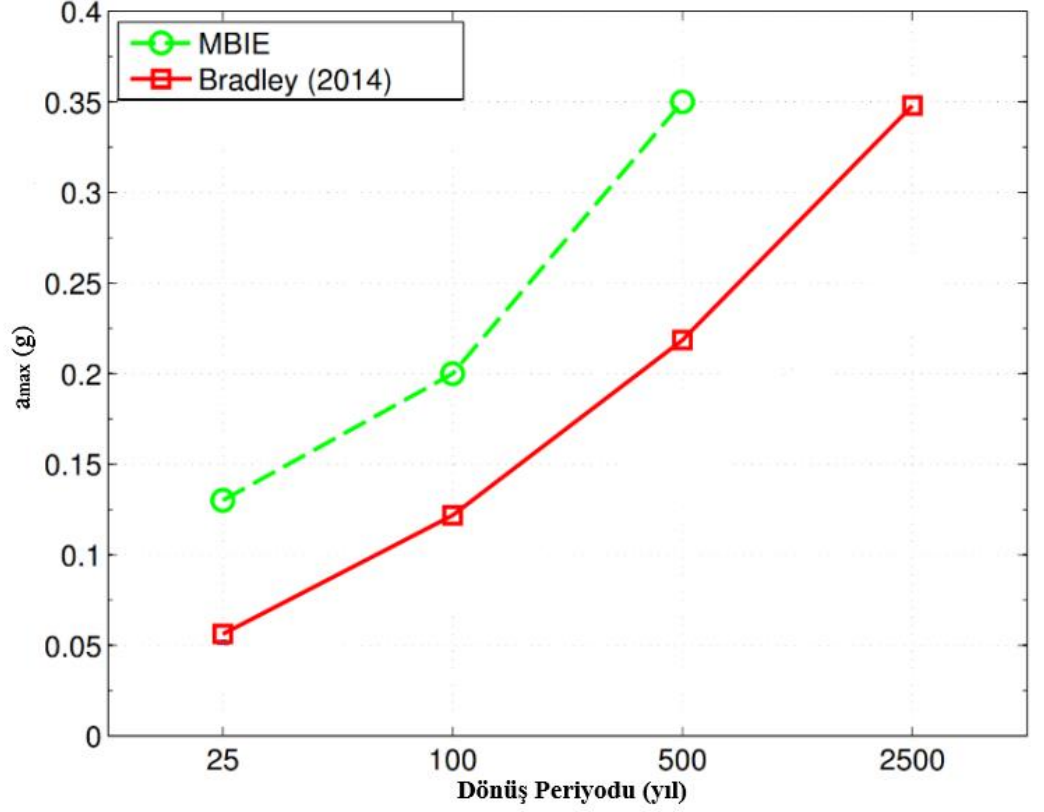
**Tablo 4.1:** MBIE (2015) tarafından Christchurch sınıflama analizi için önerilen  $a_{max}$  değerleri.

<b>Dönüş Periyodu (yıl)</b>	<b>MBIE <math>M_w = 7.5</math> için <math>a_{max}</math> (g)</b>
25	0.13
100	0.20
500	0.35

Bradley (2014), Christchurch için daha katı prensiplere dayalı bir deprem tehlike analizleri gerçekleştirmiştir. Bu analizin temel sonuçları Tablo 4.2’de verilmiştir. Bu analiz, geçici MBIE tasarım  $a_{max}$  değerlerinden daha düşük deprem tehlike parametrelerini göstermektedir (Şekil 4.5). Bu fark, sınıflama değerlendirmesi için kullanılan deprem tehlike parametreleri konusunda ek belirsizlik yaratmaktadır. MBIE tarafından önerilen  $a_{max}$  değerleri deprem şiddetini yüksek kabul etmesine rağmen yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ancak, deprem olasılığı hakkında bilgi edinmek için en iyi tahmin değerleri Bradley (2014) tarafından elde edilmiştir (Tonkin and Taylor, 2020).

**Tablo 4.2:** Bradley (2014) sismik tehlike analizinden elde edilen sonuçlar.

	<b>Dönüş Periyodu (yıl)</b>			
	<b>25</b>	<b>100</b>	<b>5000</b>	<b>2500</b>
$a_{max}$ (g)	0.085	0.19	0.34	0.54
$M_w$	5.92	5.80	5.81	5.82



Şekil 4.5: MBIE (2015) geçici  $a_{max}$  değerleri ile  $M_w=7.5$ 'e göre ölçeklenen Bradley (2014)  $a_{max}$  değerlerinin karşılaştırılması.

## 4.2 Zemin Çalışmaları

Bu tez çalışmasında Afyonkarahisar ili için yapılan analizlerde Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından yayımlanan “Zemin ve Temel Etüdü Uygulama Esasları ve Rapor Formatı”na uygun olarak Afyonkarahisar şehrinin Merkez İlçesinde “3DM Mühendislik Danışmanlık İnş. Tar. ve Mad. San. ve Tic. Ltd. Şti.” tarafından temel sondaj, araştırma çukuru, jeofizik ve laboratuvar çalışmalarından faydalanarak 2013 – 2022 tarihleri arasında hazırlanan 767 adet geoteknik rapordan faydalanılmıştır. Christchurch için yapılan analizlerde ise Yeni Zelanda içerisinde yer alan Ekim 2022 itibariyle 51015 CPT verisi ve 27163 sondaj kuyusu verisini bünyesinde barındıran Yeni Zelanda Geoteknik Veritabanı (New Zealand Geotechnical Database)’ndan ilgili bölge içinde 54 adet CPT verisinden faydalanılmıştır.

#### 4.2.1 Çalışmada Kullanılan Veriler (SPT ve CPT Verileri)

Afyonkarahisar'ın Merkez İlçesinde 767 veri ve geoteknik rapordan alınan 2121 adet sondaj yardımıyla veri tabanı oluşturulmuştur. Bu sondajlar 946 – 1089 metre kotları arasında ve 3,5 – 40,5 metre derinlikleri arasında değişmektedir. Arazi çalışmaları sırasında zeminden örselenmiş ve örselenmemiş zemin örnekleri alınarak laboratuvar deneylerine tabii tutulmuştur. Bunların sonucunda zeminin karakteristik özellikleri belirlenmiştir. Sondajların veri tabanında efektif bir şekilde kullanılması için önce sondajların bulunduğu 47 mahalle ve her mahallede bulunan rapor isimleri alfabetik olarak sıralanmış ve sondaj numaraları eklenmiştir. Örnek SPT sondaj logları Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de verilmiştir.

Christchurch şehir merkezinde bulunan çalışma sahasında 54 adet CPT verisi ile analiz yapılmıştır. CPT verilerine göre bölgenin yeraltı su seviyesi 1-5 metre arasında değişirken sondajların ortalama derinliği 12 metredir. Örnek CPT logları Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da verilmiştir.

3DM		TEMEL SONDAJ LOGU				İşveren	
MÜHENDİSLİK DANIŞMANLIK İNŞ. TAR. ve MAD. SAN. TİC. LTD. ŞTİ.						ERBAŞ SARRAFİYE ve KUYUMCULUK İNŞ.	
Proje Adı		ERBAŞ SARRAFİYE ve KUYUMCULUK İNŞ. TAAH. HIRD. GİD. TAR. HAYV. OTO. PETRAKAR. ENER. JEOT. SERA. TUR. İTH. İHR. LTD. ŞTİ.				Sondaj No	SK-1
İl		AFYONKARAHİSAR		Sondaj Derinliği (mt.)	20 mt.		
İlçe		MERKEZ		Başlama Tarihi	03.12.2018		
Mahalle/Köy		SELÇUKLU		Bitiş Tarihi	03.12.2018		
Pafta		21J-4C		Makine Tipi/Metodu	Hidrolik Sistem-ERS250		
Ada		1518		Şahmerdan Tipi	Otomatik		
Parsel		6		Delgi Çapı	114 mm.		
Sondaj Kotu (mt.)		1003 mt.		Derinlik (mt.)	Tarih		
Koordinat		Y	283 533	Yer Altı Suyu	5 mt.	03.12.2018	
		X	4 295 276		4 mt.	10.12.2018	
Sondaj Derinliği (mt.)		Standart Penetrasyon Testi (SPT) Darbe Sayısı		Presiyometre Deneyi		Kaya Özellikleri	
Mühafaza Borusu Derinliği		0-15		Bünye/Modülü (kg/cm <sup>2</sup> )		TKV %	
Kayın İçi Deneyleri		15-30		Lümit Basınç (kg/cm <sup>2</sup> )		SKV %	
Örnek Derinliği		30-45				RQD %	
Örnek Türü ve No		N				Ayrışma Derece	
						Çatnak Sıklığı	
						Dayanım	
						Zemin Profili	
						Zemin Tanımlaması	
0.0							NEBATİ TOPRAK
0.5							
1.0							
1.5							
2.0							
2.5							DÜŞÜK PLASTİTİTELİ İNORGANİK KİL (KL)
3.0	SPT	3	3	5	8		
3.5							
4.0							
4.5	SPT	4	5	6	11		DÜŞÜK PLASTİTİTELİ İNORGANİK KİL (KL)
5.0							
5.5							
6.0	SPT	3	6	7	13		YÜKSEK PLASTİTİTELİ YAĞLI KİL (CH)
6.5							
7.0							
7.5	SPT	4	6	6	12		DÜŞÜK PLASTİTİTELİ İNORGANİK KİL (KL)
8.0							
8.5							
9.0	SPT	2	2	2	4		SİLTLİ KUM (SK)
9.5							
10.0							
10.5	SPT	2	2	2	4		SİLTLİ KUM (SK)
11.0							
11.5							
12.0	SPT	3	3	3	6		KÖTÜ DERECELENMİŞ KUM (SW)
12.5							
13.0							
13.5	SPT	2	2	2	4		KÖTÜ DERECELENMİŞ KUM (SW)
14.0							
14.5							
15.0	SPT	2	3	3	6		KÖTÜ DERECELENMİŞ KUM (SW)
15.5							
16.0							
16.5	SPT	2	3	3	6		KÖTÜ DERECELENMİŞ KUM-SİLTLİ KUM (SW-SM)
17.0							
17.5							
18.0	SPT	3	3	3	6		KÖTÜ DERECELENMİŞ KUM-SİLTLİ KUM (SW-SM)
18.5							
19.0							
19.5	SPT	3	3	3	6		SİLTLİ KUM (SK)
20.0							
KIVAMDURUMU (İNCE DANELİ)		SIKILIK (İRİ DANELİ)		ORANLAR		KIRIKLAR	
N=0-2 Çok Yumuşak		N=0-4 Çok gevşek		% 0-10 Pek Az / Slight(trace)		<1 Seyrek	
N=3-4 Yumuşak		N= 5-10 Gevşek		% 10-20 Az / Little		1-2 Orta	
N=5-8 Orta Katı		N = 11-30 Orta sıkı		% 20-35 Çok / Adjective		2-10 Sık	
N=9-15 Katı		N = 31-50 Sıkı				10-20 Çok Sıkı	
N=16-30 Çok Katı		N > 50 Çok Sıkı		% 35-50 Ve / And		>20 Parçalı	
N=>30 Sert							
DAYANIMLILIK		AYRIŞMA		KAYA KALİTESİ TANIMI/RQD		AÇIKLAMALAR	
I Çok Zayıf		I Taze		%0-25 Çok Kötu		UD Örselenmiş Örnek	
II Zayıf		II Az Ayrışmış		% 25-50 Kötu		DS Örselenmiş Örnek	
III Orta Zayıf		III Orta D. Ayrışmış		% 50-75 Orta		BST Basınçlı Su Deneyi	
IV Dayanımlı		IV Dayanımlı		% 75-90 İyi		K/C Karot Örnek	
V Çok Dayanımlı		V Çok Dayanımlı		% 90-100 Çok İyi		P Presiyometre Deneyi	

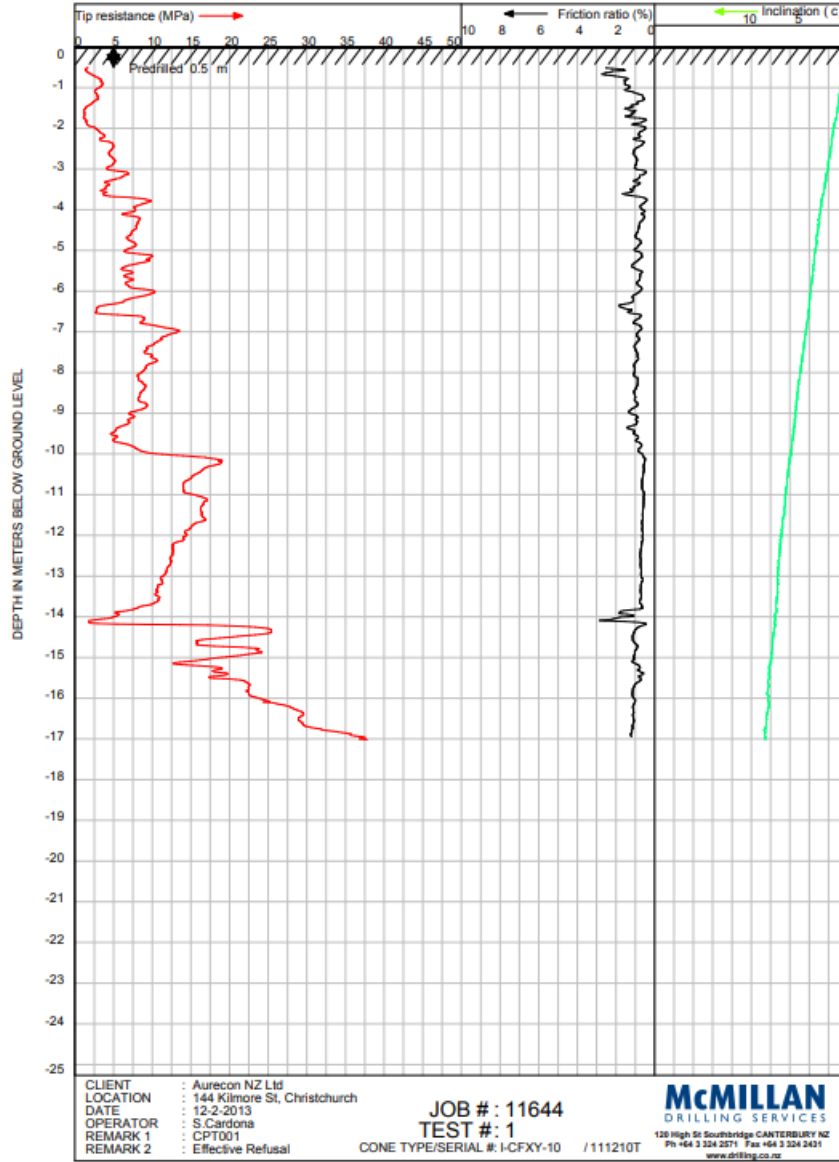
Şekil 4.6: Örnek SPT logu 1, SPT no: 39\_20\_1.



3DM		TEMELE SONDAJ LOGU				İşveren											
MÜHENDİSLİK DANIŞMANLIK İNŞ. TAR. ve MAD. SAN. TİC. LTD. ŞTİ.						MUSA ARDIÇ											
Proje Adı		MUSA ARDIÇ				Sondaj No	SK-2										
İl		AFYONKARAHİSAR	Sondaj Derinliği (mt.)	20 mt.			Sorumlu Jeoloji Mühendisi										
İlçe		MERKEZ	Başlama Tarihi	15.03.2020													
Mahalle/Köy		OSMANGAZI	Bitiş Tarihi	15.03.2020													
Pafta		20K-4D	Makine Tipi/Metodu	Hidrolik Sistem-ERS250													
Ada		3157	Şahmerdan Tipi	Otomatik													
Parsel		1	Delgi Çapı	114 mm.													
Sondaj Kotu (mt.)		1007 mt.	Yer Altı Suyu	Derinlik (mt.)	Tarih												
Koordinat		Y 285 108		4 mt.	04.03.2020			Sondör/Belge No									
		X 4 295 911		3 mt.	11.03.2020			İSMAIL TOSUN									
Sondaj Derinliği (mt.)	Mutarfaza Borusu Derinliği	Kuyu İçi Deneyleri	Örnek Derinliği	Örnek Türü ve No	Standart Penetrasyon Testi (SPT) Darbe Sayısı			Presiyometre Deneyi	Kaya Özellikleri						Zemin Profili	Zemin Tanımlaması	
					0-15	15-30	30-45		N	Elastisite Modülü (kg/cm <sup>2</sup> )	Limit Basınç (kg/cm <sup>2</sup> )	TKV %	SKV %	RQD %			Ayrışma Derece
0.0																NEBATİ TOPRAK	
0.5																	
1.0																YIKINTI	
1.5																MALZEME-DOLGU	
2.0																	
2.5																DÜŞÜK PLASTİSİTELİ	
3.0		SPT	2	3	1	4										İNORGANİK KİL (KL)	
3.5																	
4.0																	
4.5		SPT	4	4	11	15										DÜŞÜK PLASTİSİTELİ	
5.0																İNORGANİK KİL (KL)	
5.5																	
6.0		SPT	5	7	8	15										YÜKSEK PLASTİSİTELİ	
6.5																YAĞLI KİL (CH)	
7.0																	
7.5		SPT	5	7	8	15										DÜŞÜK PLASTİSİTELİ	
8.0																İNORGANİK KİL (KL)	
8.5																	
9.0		SPT	3	4	3	7										SİLTİLİ KUM (SK)	
9.5																	
10.0																	
10.5		SPT	3	4	6	10										SİLTİLİ KUM (SK)	
11.0																	
11.5																	
12.0		SPT	5	6	8	14										KÖTÜ DERECELENMİŞ	
12.5																KUM (SW)	
13.0																	
13.5		SPT	4	4	5	9										KÖTÜ DERECELENMİŞ	
14.0																KUM (SW)	
14.5																	
15.0		SPT	4	5	6	11										KÖTÜ DERECELENMİŞ	
15.5																KUM (SW)	
16.0																	
16.5		SPT	4	5	4	9										KÖTÜ DERECELENMİŞ	
17.0																KUM-SİLTİLİ KUM (SW-SM)	
17.5																	
18.0		SPT	4	4	4	8										KÖTÜ DERECELENMİŞ	
18.5																KUM-SİLTİLİ KUM (SW-SM)	
19.0																	
19.5		SPT	4	4	4	8										SİLTİLİ KUM (SK)	
20.0																	
KIVAMDURUMU (İNCE DANELİ)		SIKILIK (İRİ DANELİ)		ORANLAR		KIRIKLAR											
N=0-2 Çok Yumuşak	N=0-4 Çok gevşek	% 0-10 Pek Az / Slight(trace)	<1 Seyrek														
N=3-4 Yumuşak	N= 5-10 Gevşek	% 10-20 Az / Little	1-2 Orta														
N=5-8 Orta Katı	N= 11-30 Orta sıkı	% 20-35 Çok / Adjective	2-10 Sık														
N=9-15 Katı	N= 31-50 Sıkı	% 35-50 Ve / And	10-20 Çok Sıkı														
N=16-30 Çok Katı	N > 50 Çok Sıkı		>20 Parçalı														
N>=30 Sert																	
DAYANIMLILIK	AYRIŞMA	KAYA KALİTESİ TANIMI/RQD	AÇIKLAMALAR														
I Çok Zayıf	I Taze	%0-25 Çok Kötü	UD Örselenmiş Örnek														
II Zayıf	II Az Ayrışmış	% 25-50 Kötü	DS Örselenmiş Örnek														
III Orta Zayıf	III Orta D. Ayrışmış	% 50-75 Orta	BST Basıncılı Su Deneyi														
IV Dayanımlı	IV Dayanımlı	% 75-90 İyi	K/C Karot Örnek														
V Çok Dayanımlı	V Çok Dayanımlı	% 90-100 Çok İyi	P Presiyometre Deneyi														


Şekil 4.7: Örnek SPT logu 2, SPT no: 36\_16\_2.

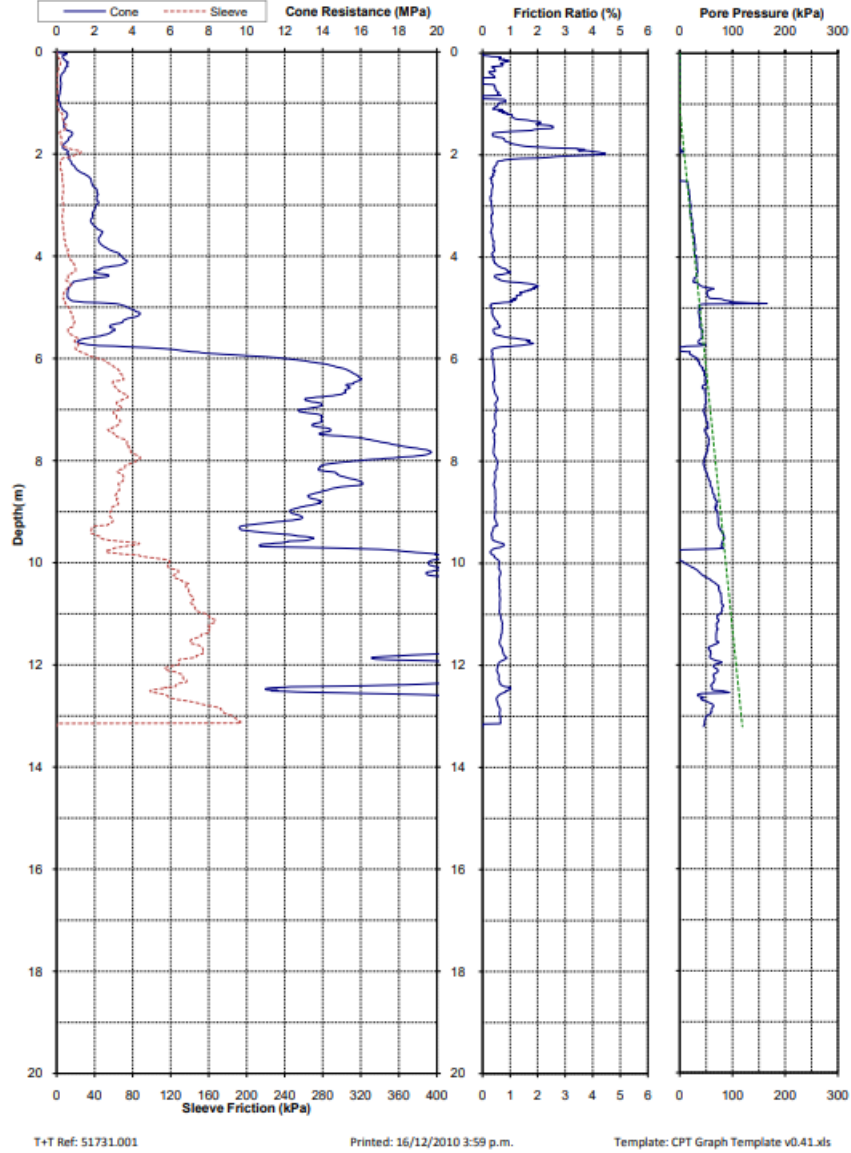
NZGD ID: CPT\_24075



NZGD ID: CPT\_24075

Şekil 4.8: Örnek CPT logu 1, CPT no: Cpt\_24075.

Project: Darfield 2010 Earthquake - EQC Ground Investigations			Page: 1 of 1	CPT-AVL-03	
Test Date: 6-Dec-2010	Location: Avon Loop	Operator: Opus			
Pre-Drill: 1.2m	Assumed GWL: 1.1mBGL	Located By: Survey GPS			
Position: 2481679.6mE	5742615.5mN	2.54mRL	Coord. System: NZMG & MSL	Comments:	
Other Tests: Seismic downhole					



Şekil 4.9: Örnek CPT logu 2, CPT no: Cpt\_92.

## 4.2.2 Laboratuvar Deneyleri

Afyonkarahisar’da yapılan sondaj kuyularından alınan numuneler üzerinde zeminin özelliklerinin belirlenmesi için elek analizi, Atterberg limitleri, su muhtevası, üç eksenli basınç ve kesme kutusu vb. laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Deney ayrıntıları ve sonuçları tüm geoteknik raporlarda bulunmaktadır (Şekil 4.10).



SİSTEM JEOTEKNİK MÜH. LABORATUVAR HİZMETLERİ  
SONDAJ MADENCİLİK TİC. LTD. ŞTİ.

BALGAT MAH. 1417. SOKAK NO:3/C  
ÇANKAYA / ANKARA  
\*TEL: 0312 284 64 64 \*FAX: 0312 284 64 68  
www.sistemjeoteknik.com



SİSTEM  
20-03/0371  
03 - 29

ZEMİN KAYA VE AGREGA DENEYLERİ SONUÇ FORMU																																				
Firma Adı: SİM MÜHENDİSLİK DANIŞMANLIK İNŞ. TAR. VE MAD. SAN. TİC. LTD. ŞTİ.										Numune Geliş Tarihi:					16.03.2020																					
Proje Adı: A.KARAHİSAR MERKEZ KARŞIYAKA MAHALLESİ ÇIKIB PAFTA-2129 ADA-10 PARSEL HALİL İBRAHİM SARAY										Rapor Tarihi:					18.03.2020																					
Laboratuvar No: 20-03/0371										Bakanlık Rapor No:					17284904																					
No	Sondaj No	Numune No	Derinlik (m)	Elek Analizi Yüzde Geçen TS EN ISO 17892-4			Hidrometre TS 1900-1		Atterberg Limitleri TS 1900-1		SİNİF USCS	Özellik Ağırlık TS 1900-1	Birim Hacim Kütle TS 17892-2	Su Muh. TS 1900-1	Serbest Basınc TS 1900-2		Üç Eksenli Kesme (UU) TS 1900-2		Direkt Kesme Testi TS 1900-2	Nokta Yüklü Deneyi TS 699	Kayada Tek Eksenli Basınç Deneyi İSRM (kg/cm <sup>2</sup> )	Standart Proktor TS 1900-1			Konsolidasyon TS 1900-2											
				No:4 katan %	No:200 geçen %	No:40 katan %	K <sub>100</sub>	L <sub>100</sub>	LL	PL					PI	q <sub>v</sub>	C	C				φ	C	φ	I <sub>p</sub> (%)	T <sub>200</sub>	T <sub>100</sub>	W <sub>pi</sub>	Sıvı Yüzdesi TS 1900-1	Plastisite İndeksi TS 1900-1						
1	A.Ç-1	T.N	1,00-2,00	3,8	74,0	16,9								21,8																						
2	SK-1	UD	2,50-3,00	3,3	76,9	15,0							1,89	21,3				0,55	6																	
3	SK-1	SPT	3,00-3,45	3,0	79,3	13,5								22,1																						
4	SK-1	SPT	9,00-9,45	4,7	46,6	44,8								NP	NP																					
5	SK-1	SPT	15,00-15,45	11,5	3,6	73,9								NP	NP																					
6	SK-2	UD	4,00-4,50	3,4	83,9	10,5							1,88	23,4				0,62	5																	
7	SK-2	SPT	4,50-4,95	4,0	80,9	12,5								25,1																						
8	SK-2	SPT	10,50-10,95	2,5	44,4	42,6								NP	NP																					
9	SK-2	SPT	16,50-16,95	3,6	11,3	67,7								NP	NP																					
10	SK-2	SPT	19,50-19,95	3,2	30,0	53,6								NP	NP																					
11	SK-3	UD	5,50-6,00	2,8	77,8	15,2							1,88	25,2				0,57	6																	
12	SK-3	SPT	6,00-6,45	2,5	80,1	13,6								55,9	26,7	29,2																				
13	SK-3	SPT	13,50-13,95	6,4	3,3	74,7								NP	NP																					
14	SK-3	SPT	18,00-18,45	5,9	11,3	68,5								NP	NP																					

Notlar:  
1. Eğer deney sonuç formu ve ekinde verilen deney sonuç grafikleri laboratuvarımızın izni olmadan kütlen veya tamamen kopyalanamaz, değiştirilemez.  
2. Laboratuvarımıza Gelen Numuneler Müşteri Tarafından Alınmaktadır. Numunelerin temali olmasından laboratuvarımız sorumlu değildir.  
3. Numunelerin yer ve derinliği ölçülmesi beyanına göre yapılmalıdır. Sorumluluk, beyan veren kişi ve kuruluşa aittir.  
4. Deney sonuçları sadece deneyi yapan numuneye aittir.  
5. Laboratuvarımız 538 numaralı Çevre ve Şehircilik Bakanlığı izin belgesine sahiptir.  
Mühürler:  
1. Atterberg Limitleri deney numunelerinin kurutulması oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.

Deney Sorumlusu Mühendisi  
Jeolojik Mühendisi  
İsa MİDİSAK  
Oda Sicil No:17609

Denetim Mühendisi  
Serkan PİŞMİŞ  
Belge No:25115

SAYFA NO: 7/18

Şekil 4.10: 26\_12 no'lu geoteknik raporda bulunan zemin kaya ve agregda deneyleri sonuç formu.

### 4.3 Sıvılaşmanın Değerlendirilmesi

Tezde sıvılaşma analizleri çalışma sahalarında yapılan SPT, CPT ve laboratuvar deney sonuçları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sıvılaşma potansiyeli tetikleme yöntemi olarak literatürde en güncel ve doğru yöntemlerin başında gelen Boulanger ve Idriss (2014) tercih edilmiştir. Sıvılaşma şiddeti sayısı (LSN), sıvılaşma şiddeti indeksi ( $L_s$ ) ve sıvılaşma potansiyeli indeksi (LPI) kullanılarak her sondaj için sıvılaşma potansiyelleri incelenmiştir.

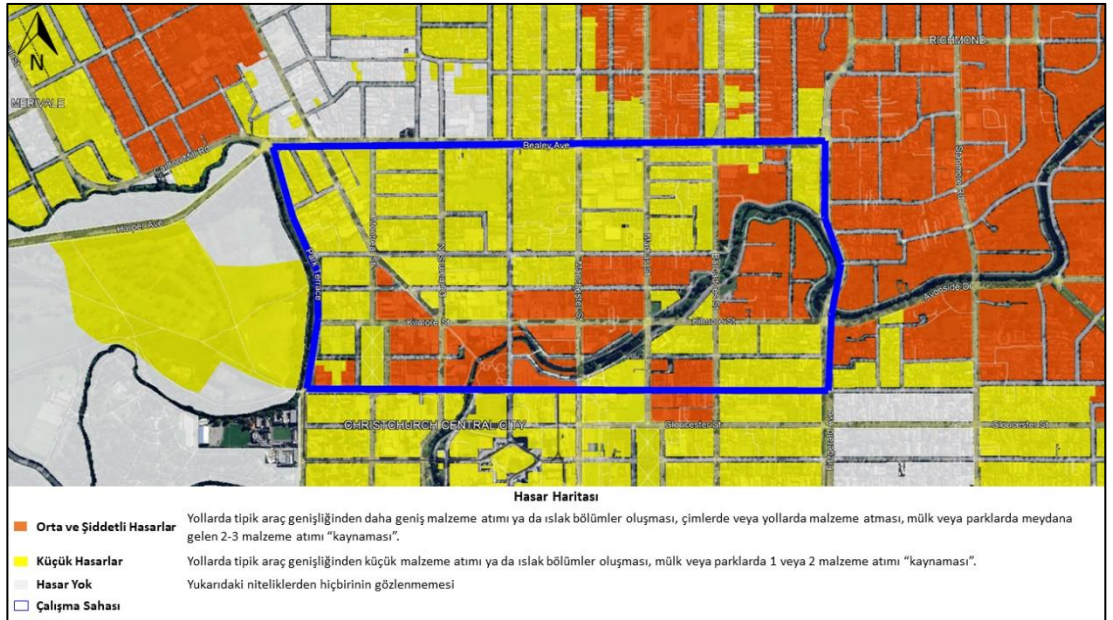
Sıvılaşma analizlerinde Afyonkarahisar'da bulunan tüm sondajlar için deprem büyüklüğü olarak iki senaryoda incelenmiştir. İlk deprem senaryosu, çalışma bölgesine yakın geçmişte gerçekleşen 1995 Dinar Depremi'nde ölçülen  $M_w = 6.5$ , en büyük yatay yer ivmesi ( $a_{max}$ ) = 0.29 g ve ikinci deprem senaryosu Utku vd. (2003) çalışmasında yer alan 100 yıl içerisinde bölgede gerçekleşmesi beklenen maksimum büyüklük  $M_w = 7.3$  ve AFAD Deprem Dairesi Başkanlığı (AFAD,2008) tarafından hazırlanan interaktif ivme haritasından elde edilen standart tasarım deprem yer

hareketi olan DD-2 deprem yer hareketi düzeyine göre en büyük yatay yer ivmesi ( $a_{max}$ ) = 0.33 g parametrelerine göre analizler yapılmıştır (Tablo 4.3).

**Tablo 4.3:** Afyonkarahisar analiz yapılan deprem senaryoları.

DEPREM	M <sub>w</sub>	a <sub>max</sub>
1. Senaryo	6.5	0.29
2. Senaryo	7.3	0.33

Christchurch için yapılan sıvılaşma analizlerinde ise 22 Şubat 2011 tarihinde bölgede gerçekleşen depremde ölçülen parametreler kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Bu parametreler 6.2 M<sub>w</sub> büyüklüğünde ve CPT verilerimizin bulunduğu çalışma sahasında en büyük yatay yer ivmesi 0.43 g – 0.45 g değerlerinde arasında değişmektedir. 2011 Christchurch Depremi sonrası ortaya çıkan sıvılaşma hasarları incelenerek Yeni Zelanda Geoteknik Veritabanı tarafından hasar derecelerine göre bölgesel olarak sınıflandırılmış ve haritalandırılmıştır (Şekil 4.11). Böylece analiz sonuçları ve gerçek hasarlar karşılaştırılarak sıvılaşma riski parametreleri arasındaki ilişki gözlemlenmiştir.



**Şekil 4.11:** 2011 Christchurch Depremi sıvılaşma hasar haritası (NZGD, 2013).

Tezin 2. Bölümünde bulunan sıvılaşma potansiyeli alt başlığı altında yer alan yöntemlere uygun olarak Microsoft Excel programı üzerinde veri girişi yapılarak

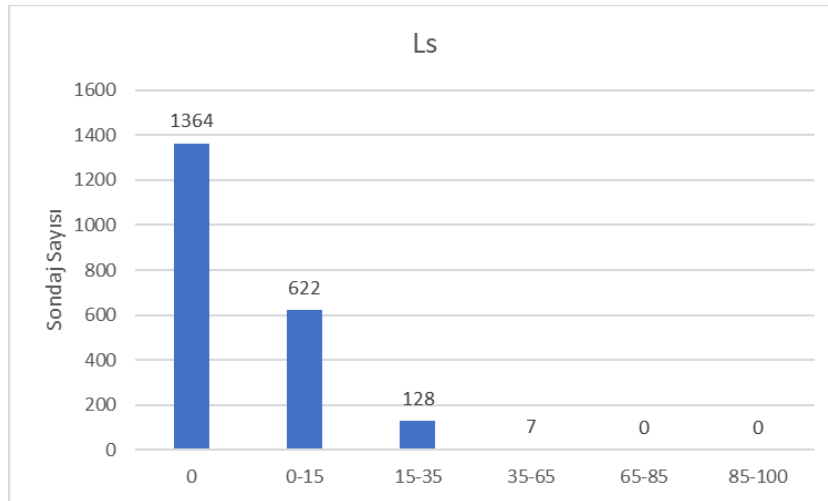
hesaplamalar yapılmıştır. Bu hesaplamalarda elde edilen sonuçların örnekleri Şekil 4.12 ve 4.13'te gösterilmiştir.



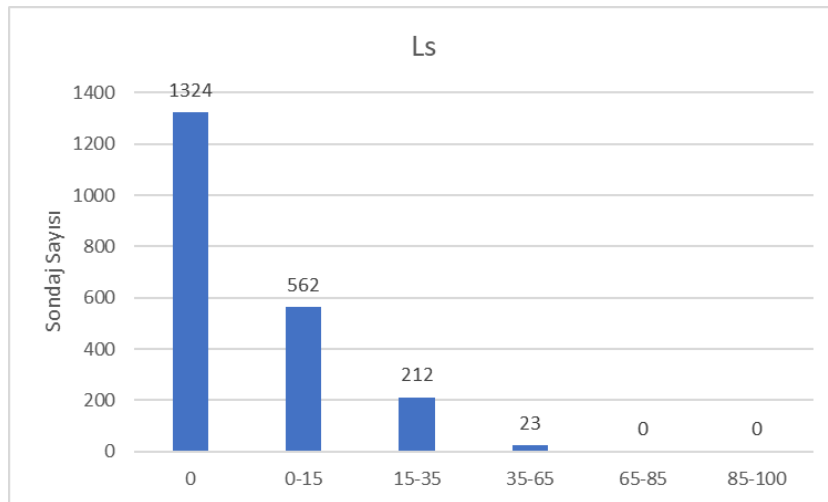


### 4.3.1 Sıvılaşma Analizi Sonuçları

Afyonkarahisar’da bulunan 2121 sondaj kuyusu için yapılan hesaplamalar her iki deprem durumu için ( $M_w=6.5 - a_{max}=0.29g$  ve  $M_w=7.3 - a_{max}=0.33g$ ) sıvılaşma şiddeti indeksi ( $L_s$ ), sıvılaşma potansiyeli indeksi (LPI) ve sıvılaşma şiddeti sayısı (LSN) parametrelerine göre incelenmiştir. Sıvılaşma şiddeti indeksi ( $L_s$ ) parametresine göre ilk deprem senaryosu için (Şekil 4.14) sondaj kuyularının %64.3’ünde sıvılaşma beklenmez, %29.3’ünde çok düşük, %6’sında düşük ve %0.3’ünde orta seviye sıvılaşma riski bulunmuştur. İkinci deprem senaryosu için (Şekil 4.15) ise sondajların %62.4’ünde sıvılaşma beklenmezken, %26.5’inde çok düşük, %10’unda düşük ve %1.1’inde orta seviye sıvılaşma riski beklenir.



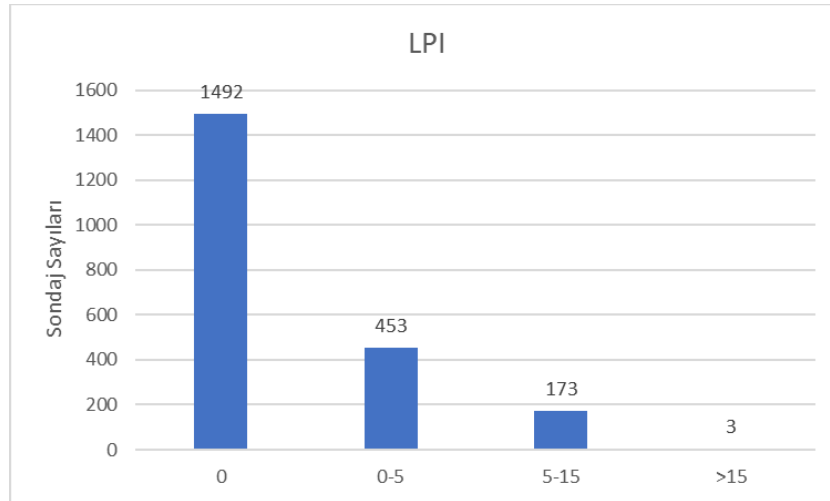
Şekil 4.14: 1. deprem senaryosu sıvılaşma şiddeti indeksi ( $L_s$ ) değerlerine göre sondaj sayıları.



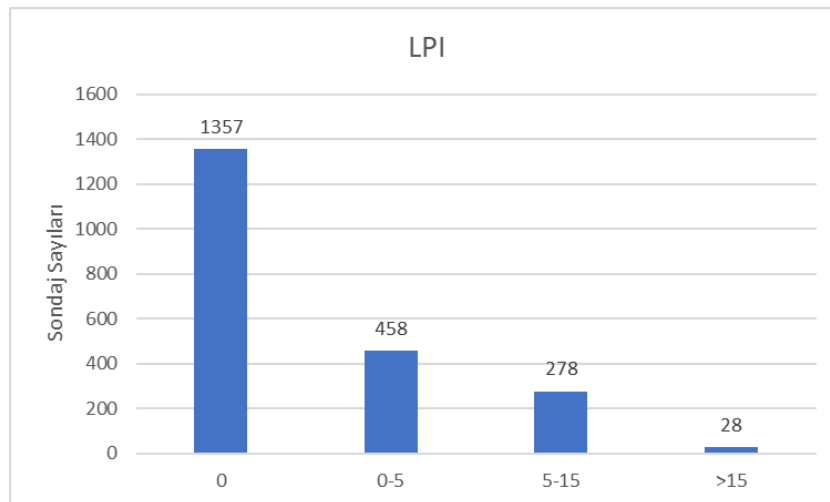
Şekil 4.15: 2. deprem senaryosu sıvılaşma şiddeti indeksi ( $L_s$ ) değerlerine göre sondaj sayıları.



Sıvılaşma potansiyeli indeksi (LPI) parametresine göre ilk deprem senaryosu için (Şekil 4.16) sondaj kuyularının %70.3'ünde çok düşük, %21.4'ünde düşük, %8.2'sinde yüksek ve %0.1'inde çok yüksek seviye sıvılaşma riski bulunmuştur. İkinci deprem senaryosu için (Şekil 4.17) ise sondajların %64'ünde çok düşük, %21.6'sında düşük, %13.1'inde yüksek ve %1.3'ünde çok yüksek seviye sıvılaşma riski bulunur.



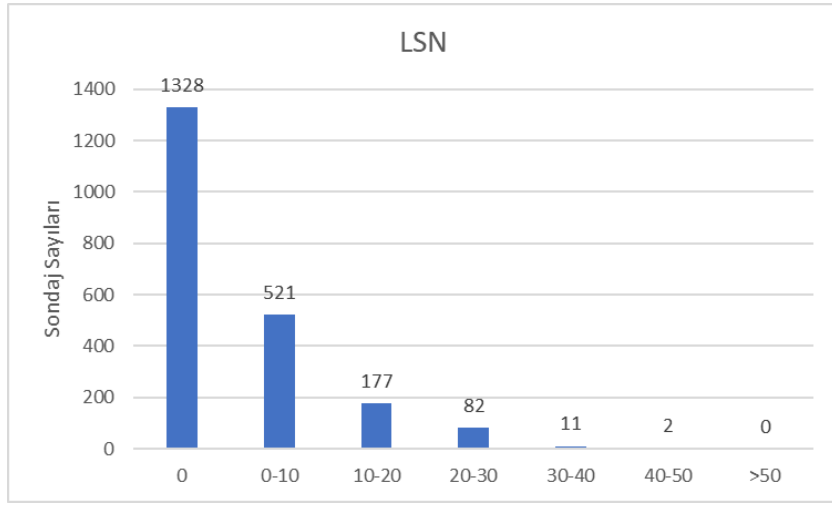
Şekil 4.16: 1. deprem senaryosu sıvılaşma potansiyeli indeksi (LPI) değerlerine göre sondaj sayıları.



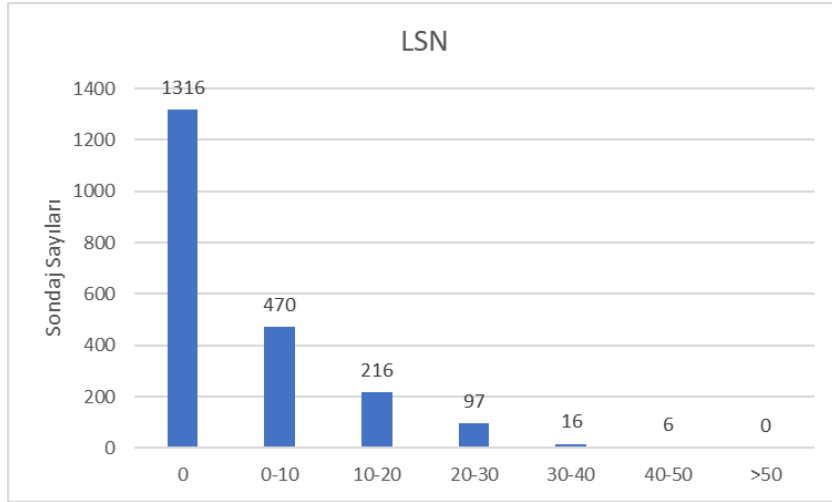
Şekil 4.17: 2. deprem senaryosu sıvılaşma potansiyeli indeksi (LPI) değerlerine göre sondaj sayıları.

Sıvılaşma şiddeti sayısı (LSN) parametresine göre ilk deprem senaryosu için (Şekil 4.18) sondaj kuyularının %62.6'sında sıvılaşma beklenmezken %24.6'sında çok düşük, %8.3'ünde düşük, %3.9'unda orta ve %0.5'inde yüksek seviyede sıvılaşma beklenir. İkinci deprem senaryosu için (Şekil 4.19) ise sondaj kuyularının %62'sinde

sıvılaşma beklenmezken %22.2'sinde çok düşük, %10.2'sinde düşük, %4.6'sında orta, %0.8'sinde yüksek ve %0.3'ünde çok yüksek seviyede sıvılaşma riski bulunmaktadır.



Şekil 4.18: 1. deprem senaryosu sıvılaşma şiddeti sayısı (LSN) değerlerine göre sondaj sayıları



Şekil 4.19: 2. deprem senaryosu sıvılaşma şiddeti sayısı (LSN) değerlerine göre sondaj sayıları

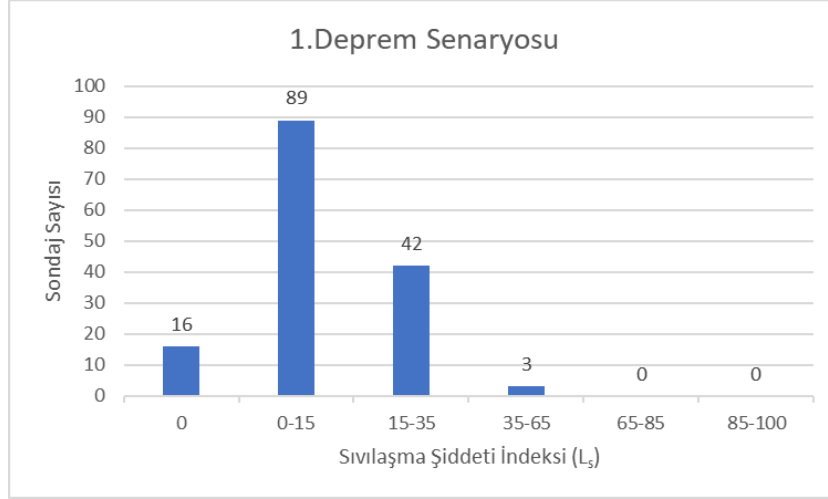
Sıvılaşma riskleri değerlendirilirken çalışma sahasında yer alan 2121 tane sondaj kuyusundan 1316 tanesinde ve bulunduğu 41 mahallenin 35 tanesinde sondaj boyunca yeraltı suyunun bulunmaması veya zeminin kayadan oluşmasından dolayı herhangi bir sıvılaşma riskine rastlanılmamıştır. Bu nedenden dolayı sıvılaşma risk haritası oluşturmak ve risklerin daha iyi incelenmesi açısından çalışma alanında sıvılaşma riskinin yoğun olduğu Selçuklu Mahallesi'ne odaklanılmıştır (Şekil 4.20).



Şekil 4.20: Selçuklu Mahallesi çalışma sahası.

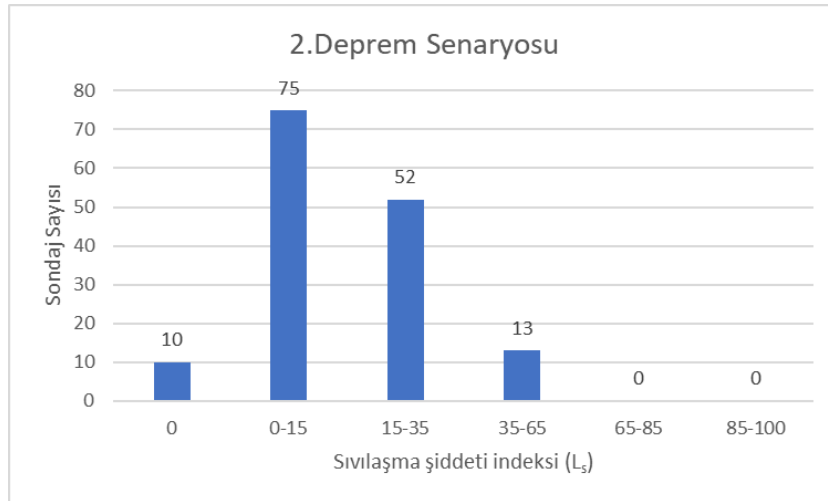
Selçuklu Mahallesi'nde yer alan çalışma sahasında bulunan sondajların 3 sondaj 14 m, 3 sondaj 15.5 m, 128 sondaj 20 m, 10 sondaj 25 m ve 6 sondaj 30 metre derinliğinde olmak üzere toplamda 150 sondaj kuyusu bulunmaktadır. Çalışma alanında genel olarak 0 – 7 metre derinliğinde düşük ve yüksek plastisiteli kil bulunurken 7 – 20 metre aralığında killi kum ve siltli kum bulunurken yeraltı su seviyesi ise 3 – 6 metre derinliği arasında değişmektedir.

Sıvılaşma şiddeti indeksi ( $L_s$ ) parametresine göre ilk deprem senaryosu için analiz yapıldığında (Şekil 4.21) sondajların %10.7'sinde sıvılaşma beklenmezken, %59.3'ünde çok düşük, %28'sinde düşük ve %2'sinde orta seviyede sıvılaşma riski bulunmaktadır.



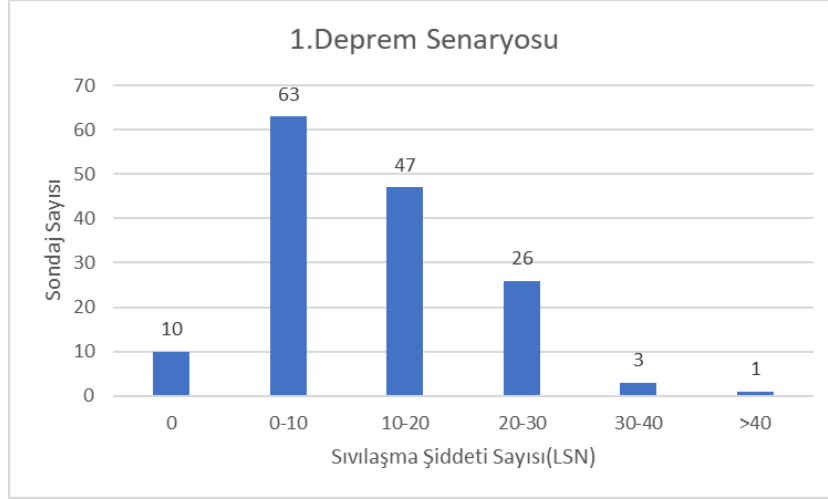
**Şekil 4.21:** 1. deprem senaryosu sıvılaşma şiddeti indeksi (L<sub>s</sub>) değerlerine göre Selçuklu Mahallesi sondajlarının sınıflandırılması.

2. deprem senaryosuna baktığımızda (Şekil 4.22) sondajların %6.7'sinde sıvılaşma beklenmez, %50'sinde çok düşük, %34.7'sinde düşük ve %8.7'sinde orta seviyede sıvılaşma riski bulunmaktadır.



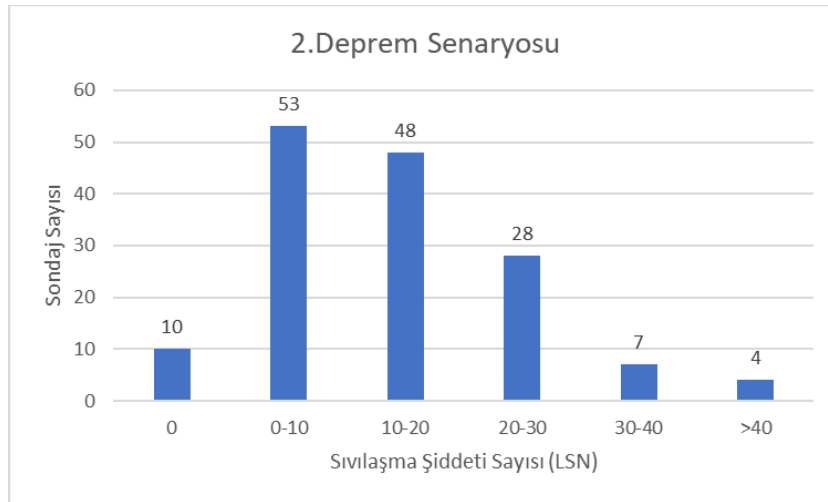
**Şekil 4.22:** 2. deprem senaryosu sıvılaşma şiddeti indeksi (L<sub>s</sub>) değerlerine göre Selçuklu Mahallesi sondajlarının sınıflandırılması.

Sıvılaşma şiddeti sayısı (LSN) parametresine göre 1. deprem senaryosu için analiz yapıldığında (Şekil 4.23) sondajların %6.7'sinde sıvılaşma beklenmezken, %42'sinde çok düşük, %31.3'ünde düşük, %17.3'ünde orta, %2'sinde yüksek %0.7'sinde çok yüksek seviyede sıvılaşma riski bulunmuştur.



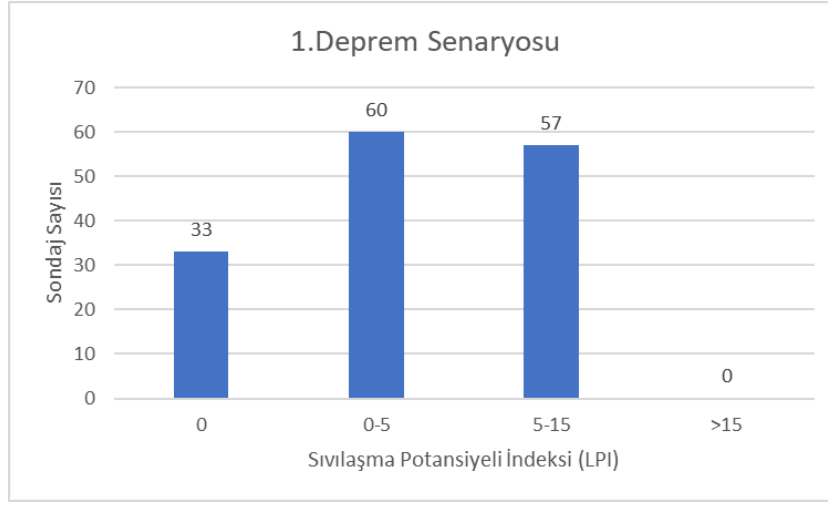
**Şekil 4.23:** 1. deprem senaryosu sıvılaşma şiddeti sayısı (LSN) değerlerine göre Selçuklu Mahallesi sondajlarının sınıflandırılması.

2. deprem senaryosuna göre analiz yapıldığında ise (Şekil 4.24) sondajların %6.7'sinde sıvılaşma beklenmezken, %35.3'ünde çok düşük, %32'sinde düşük, %18.7'sinde orta, %4.7'sinde yüksek ve %2.7'sinde çok yüksek seviyede sıvılaşma riski bulunmuştur.



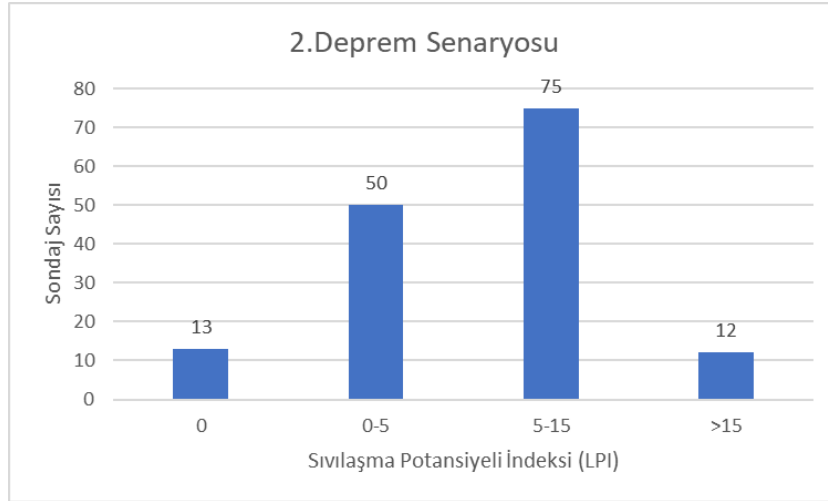
**Şekil 4.24:** 2. deprem senaryosu sıvılaşma şiddeti sayısı (LSN) değerlerine göre Selçuklu Mahallesi sondajlarının sınıflandırılması.

Sıvılaşma potansiyeli indeksi (LPI) parametresine göre 1. deprem senaryosu için analiz yapıldığında (Şekil 4.25) sondajların %22'sinde sıvılaşma beklenmezken, %40'ında düşük ve %38'inde yüksek seviyede sıvılaşma riski bulunmuştur.



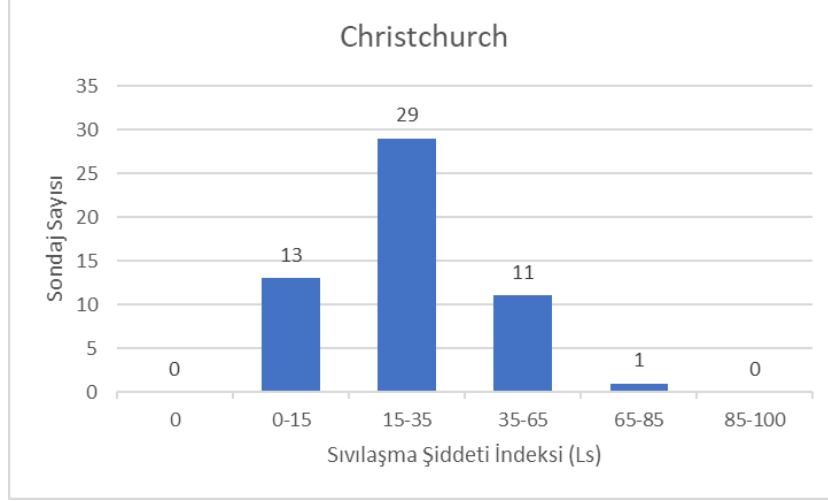
**Şekil 4.25:** 1. deprem senaryosu sıvılaşma potansiyeli indeksi (LPI) değerlerine göre Selçuklu Mahallesi sondajlarının sınıflandırılması.

2. deprem senaryosu için analiz yapıldığında (Şekil 4.26) ise sondajların %8.7'sinde sıvılaşma beklenmezken, %33.3'ünde düşük seviye, %50'inde yüksek ve son olarak %8'inde çok yüksek seviyede sıvılaşma riski bulunmuştur.



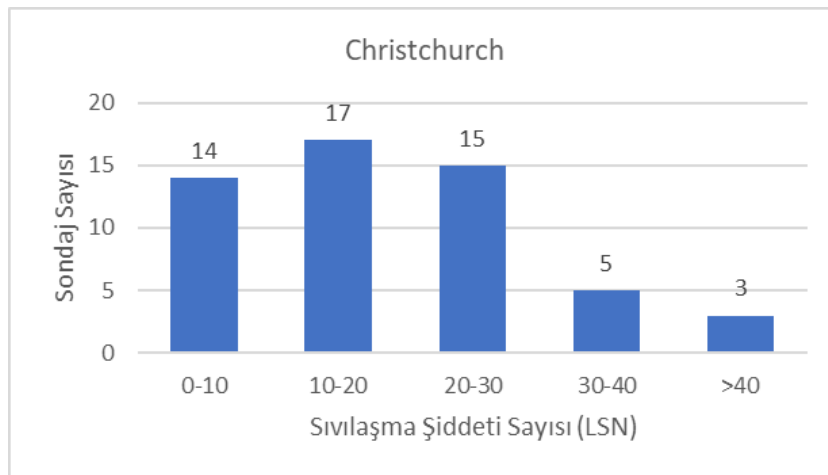
**Şekil 4.26:** 2. deprem senaryosu sıvılaşma potansiyeli indeksi (LPI) değerlerine göre Selçuklu Mahallesi sondajlarının sınıflandırılması.

L<sub>s</sub> parametresine göre sondajlar incelendiğinde (Şekil 4.27) Christchurch'te bulunan sondajların %24'ünde çok düşük sıvılaşma riski belirlenirken sondajların %54'ü düşük, %20'i orta ve %2'sinde yüksek sıvılaşma riski bulunmuştur.



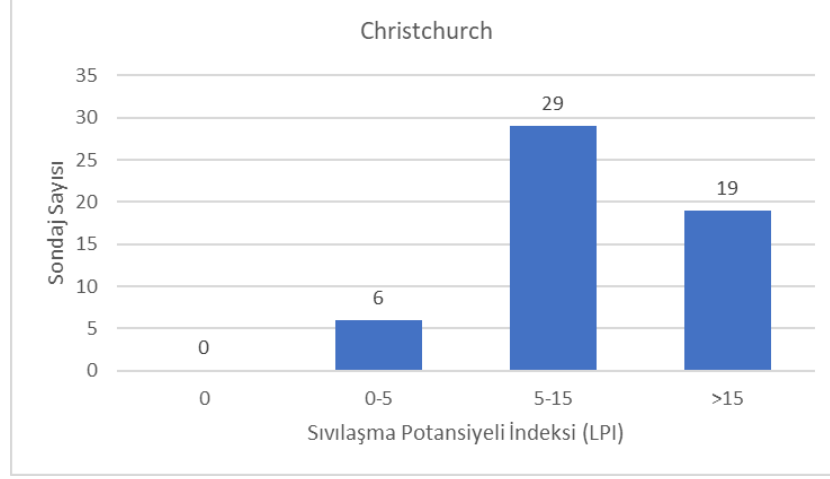
Şekil 4.27: 2011 Christchurch deprem parametreleri ile sıvılaşma şiddeti indeksi (L<sub>s</sub>) değerlerine göre Christchurch CPT verilerinin sınıflandırılması.

LSN parametresine göre Christchurch çalışma sahasında bulunan sondajlar incelendiğinde (Şekil 4.28) sondajların %26'sında çok düşük sıvılaşma riski belirlenirken sondajların %31'i düşük, %28'i orta, %9'u yüksek ve %6'sında çok yüksek sıvılaşma riski bulunmuştur.



Şekil 4.28: 2011 Christchurch deprem parametreleri ile sıvılaşma şiddeti sayısı (LSN) değerlerine göre Christchurch CPT verilerinin sınıflandırılması.

LPI parametresine göre Christchurch'te bulunan sondajlar incelendiğinde (Şekil 4.29) sondajların %6'sında düşük sıvılaşma riski belirlenirken sondajların %11'ü düşük, %54'ü yüksek ve %35'inde çok yüksek sıvılaşma riski bulunmuştur.

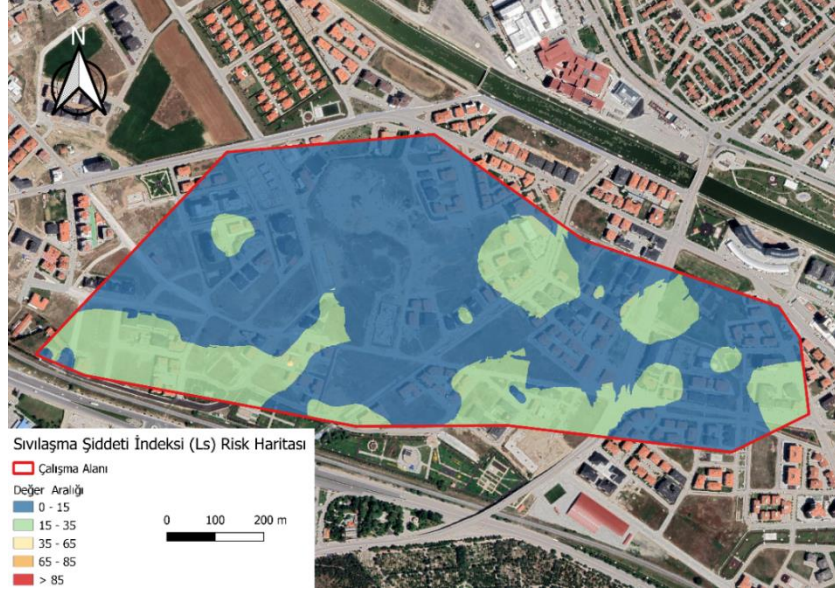


Şekil 4.29: 2011 Christchurch deprem parametreleri ile sıvılaşma potansiyeli indeksi (LPI) değerlerine göre Christchurch CPT verilerinin sınıflandırılması.

### 4.3.2 Sıvılaşma Risk Haritaları

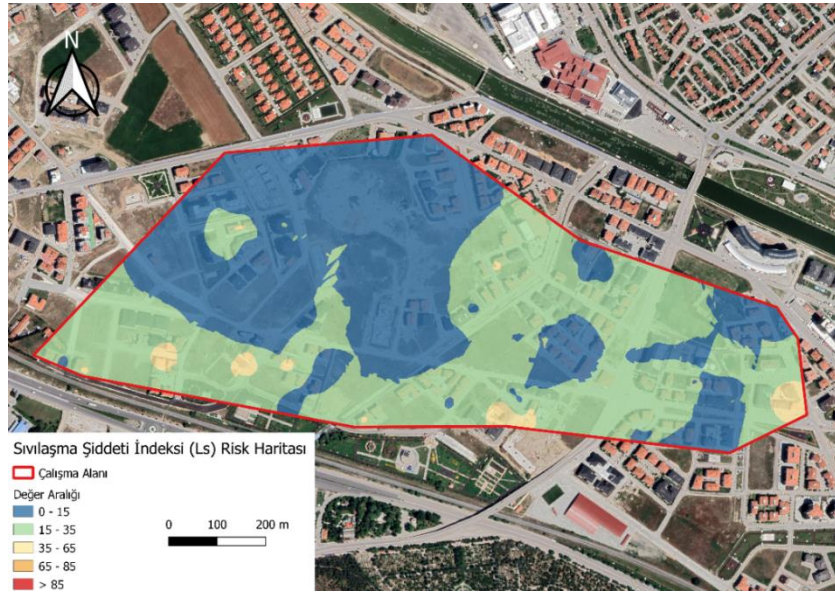
Sıvılaşma şiddeti indeksi (Ls) parametresine göre yapılan analizler sonucunda elde edilen veriler ile coğrafi bilgi sistemi uygulaması olan “QGIS” ile kriging enterpolasyonu yapılmıştır. 1. deprem senaryosu için oluşturulan sıvılaşma risk haritasında (Şekil 4.30) çalışma alanının %71.2'lik kısmında çok düşük, %28.8'inde düşük seviyede sıvılaşma riskine sahip olduğu gözlemlenmiştir.





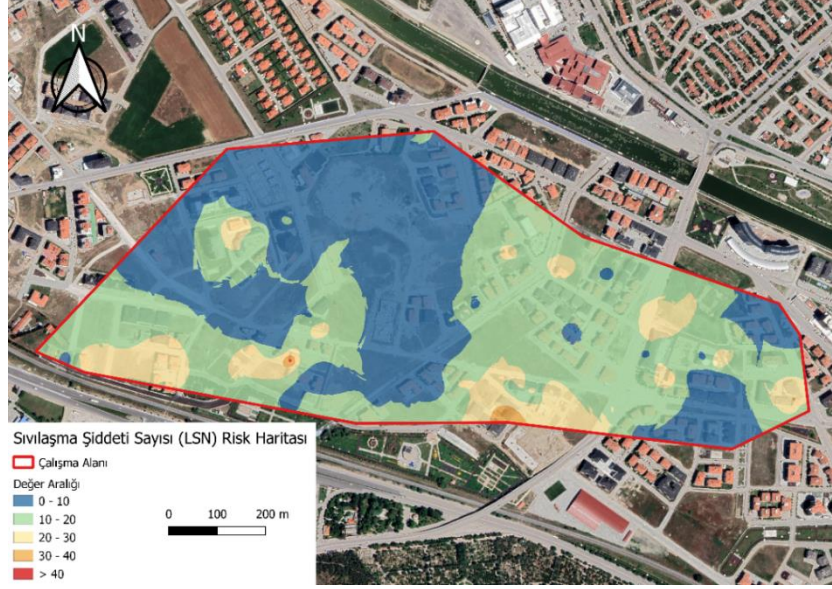
Şekil 4.30: 1. deprem senaryosu sıvılaşma şiddeti indeksi ( $L_s$ ) değerlerine göre Selçuklu Mahallesi sıvılaşma risk haritası.

2. deprem senaryosu için elde edilen sıvılaşma şiddeti indeksi ( $L_s$ ) risk haritasında (Şekil 4.31) çalışma alanının %48.6'sında çok düşük, %49.1'inde düşük ve %2.3'ünde orta seviyede sıvılaşma riski bulunmuştur.



Şekil 4.31: 2. deprem senaryosu sıvılaşma şiddeti indeksi ( $L_s$ ) değerlerine göre Selçuklu Mahallesi sıvılaşma risk haritası.

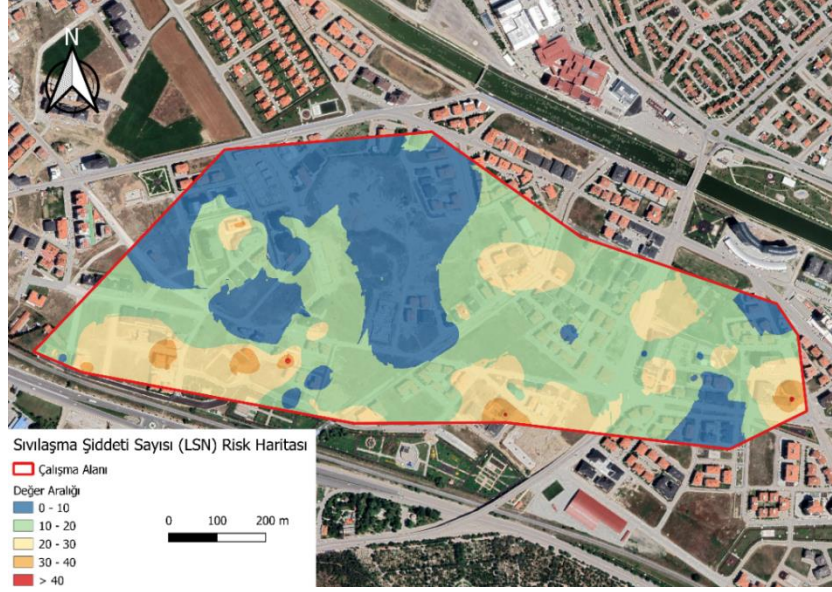
Sıvılaşma şiddeti sayısı (LSN) parametresine göre 1. deprem senaryosu risk haritasında (Şekil 4.32) alanının %42.7'sinde çok düşük, %46.5'inde düşük, %10.4'ünde orta ve %0.4'ünde yüksek seviyede sıvılaşma riski gözlemlenmiştir.



Şekil 4.32: 1. deprem senaryosu sıvılaşma şiddeti sayısı (LSN) değerlerine göre Selçuklu Mahallesi sıvılaşma risk haritası.

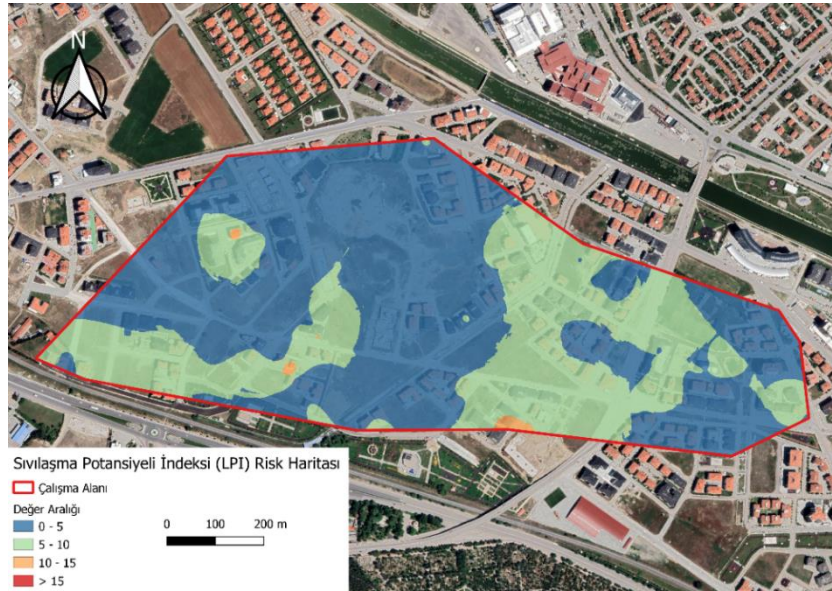
Sıvılaşma şiddeti sayısı (LSN) parametresi 2. deprem senaryosu için elde edilen risk haritasında (Şekil 4.33) çalışma alanının %32.2'sinde çok düşük, %46.4'ünde düşük, %19.2'sinde orta, %2.1'inde yüksek ve çok yüksek sıvılaşma riskinin çalışma alanına oranı sıfıra yakın bulunmuştur.





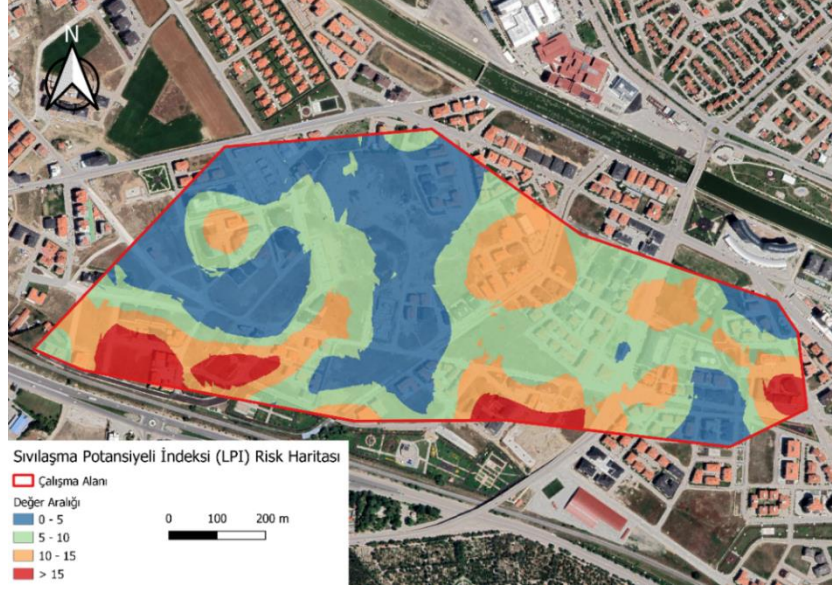
**Şekil 4.33:** 2. deprem senaryosu sıvılaşma şiddeti sayısı (LSN) değerlerine göre Selçuklu ahallesi sıvılaşma risk haritası.

Sıvılaşma potansiyeli indeksi (LPI) parametresine göre 1. deprem senaryosu için (Şekil 4.34) yapılan risk haritasının %62.4'ünün düşük, %37.6'sının yüksek seviyede sıvılaşma riskine sahip olduğu gözlemlenmiştir.



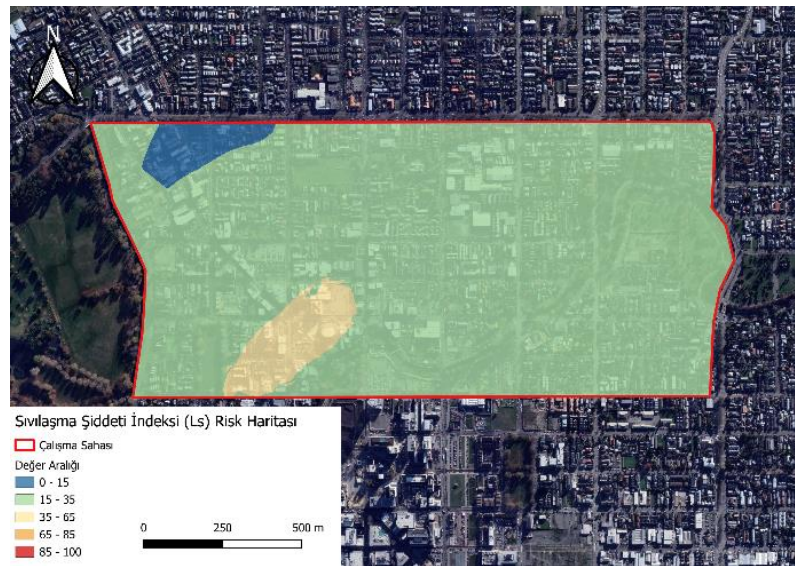
**Şekil 4.34:** 1. deprem senaryosu sıvılaşma potansiyeli indeksi (LPI) değerlerine göre Selçuklu Mahallesi sıvılaşma risk haritası.

2. deprem senaryosuna göre hazırlanan sıvılaşma potansiyeli indeksi (LPI) risk haritasında (Şekil 4.35) çalışma alanının %32.4'ünde düşük, %61.2'sinde yüksek ve %6.4'ünde çok yüksek sıvılaşma riski olduğu bulunmuştur.



Şekil 4.35: 2. deprem senaryosu sıvılaşma potansiyeli indeksi (LPI) değerlerine göre Selçuklu Mahallesi sıvılaşma risk haritası.

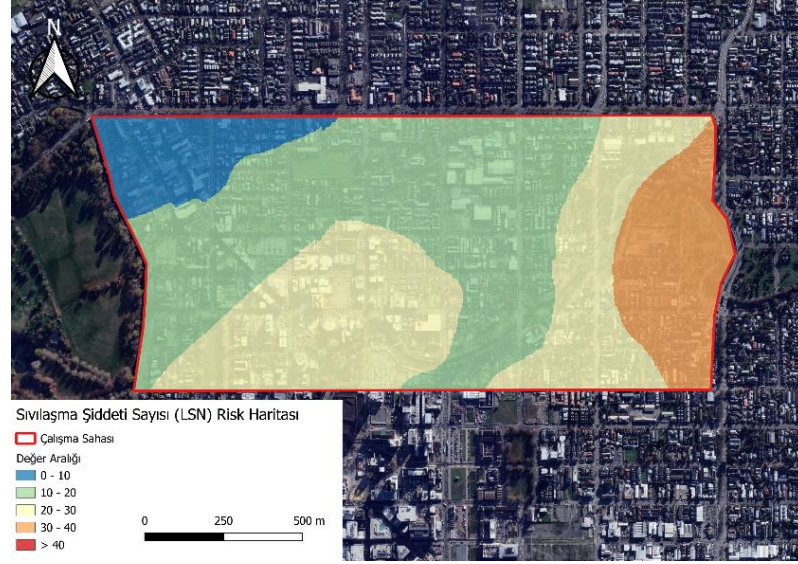
$L_s$  sıvılaşma risk haritasına göre yapılan analizlerin sonucuna göre (Şekil 4.36) bölgenin %3'ünde çok düşük sıvılaşma riski, %92'si düşük ve %5'lik kısmında alanda orta sıvılaşma riskine sahiptir.



Şekil 4.36: Christchurch sıvılaşma şiddeti indeksi ( $L_s$ ) sıvılaşma risk haritası.

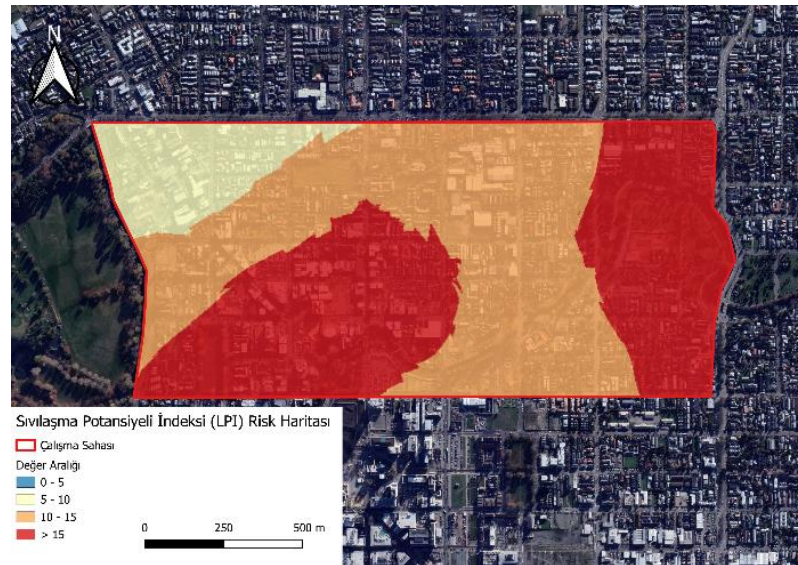


LSN risk haritasında ise yapılan analiz sonuçlarına göre (Şekil 4.37) bölgenin %9'unda çok düşük, %43'ü düşük, %35'i orta ve %13'ünde yüksek sıvılaşma riski bulunmuştur.



Şekil 4.37: Christchurch sıvılaşma şiddeti sayısı (LSN) sıvılaşma risk haritası.

LPI sıvılaşma risk haritasında yapılan analiz sonuçlarına göre (Şekil 4.38) bölgenin %55'inde yüksek sıvılaşma ve %45'inde çok yüksek sıvılaşma riskine sahip olduğu bulunmuştur.

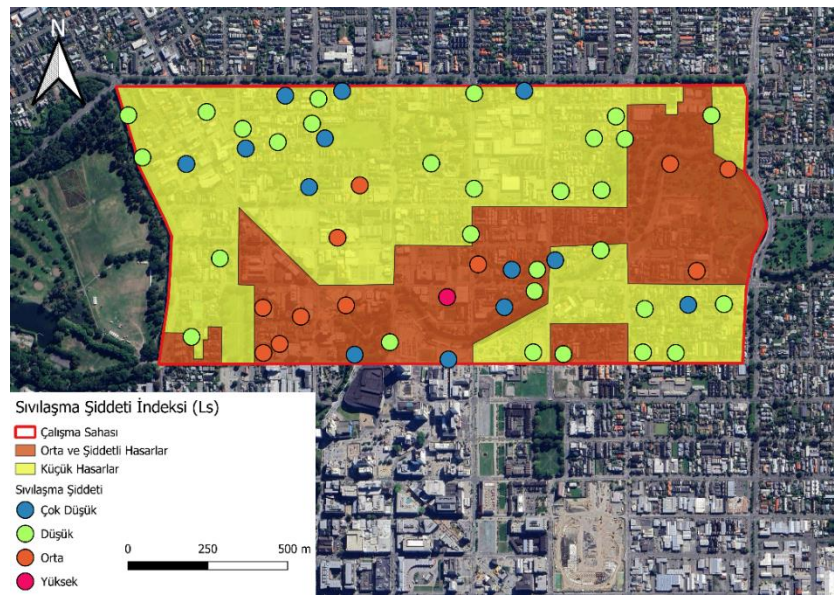


Şekil 4.38: Christchurch sıvılaşma potansiyeli indeksi (LPI) sıvılaşma risk haritası.

### 4.3.3 Deprem Hasar Haritası ile Risk Haritalarının Karşılaştırılması

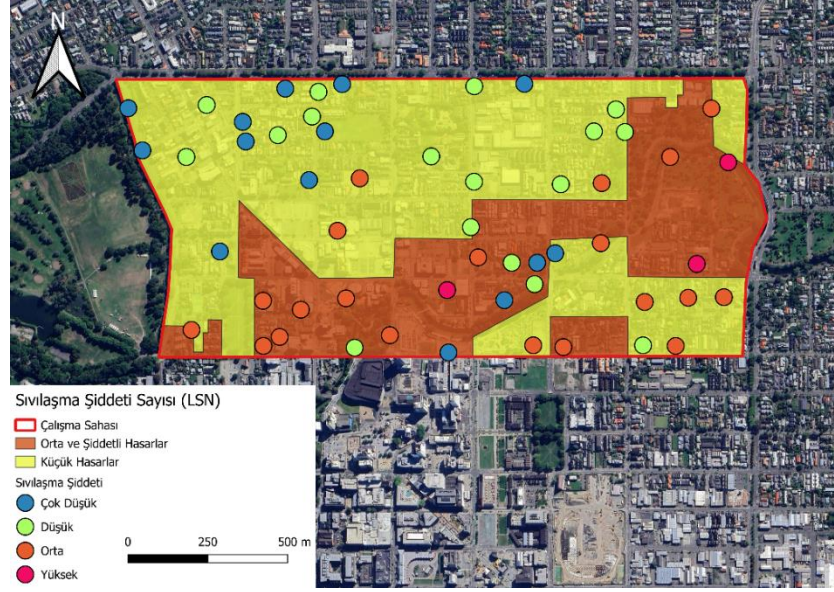
Christchurch çalışma sahasında yapılan analizler sonucunda sıvılaşma parametrelerine göre elde edilen şiddetler ile Şekil 4.11’de gösterilen 2011 Christchurch depremi sonrası ortaya çıkan sıvılaşma hasarları karşılaştırılmıştır. Çalışma sahası alanının %61’inde küçük hasarlar ve %39’unda orta ve şiddetli hasarların meydana geldiği NZGD (2013)’de raporlanmıştır. İncelenen 54 sondajın 35 tanesi küçük hasarların olduğu alanda yer alırken, 19 tanesi orta ve şiddetli hasarların meydana geldiği bölgede yer almaktadır. Gözlenen gerçek hasar seviyeleri ile hesaplanan farklı sıvılaşma şiddet parametreleri karşılaştırılırken ilk aşamada sondaj konumlarının hasar alanlarındaki dağılımına göre değerlendirme yapılmıştır. İkinci aşamada ise sondajlar yardımıyla oluşturulan alansal risk haritaları, gözlenen gerçek hasar seviyeleri ile karşılaştırılmıştır.

Sıvılaşma şiddeti indeksi ( $L_s$ ) parametresine göre (Şekil 4.39) küçük hasarların bulunduğu bölgelerde 33 sondajda çok düşük ve düşük, 2 sondajda orta sıvılaşma şiddeti bulunmuştur. Küçük hasarların gerçekleştiği bölge ile %94 oranında uyum göstermektedir. Orta ve şiddetli hasarların meydana geldiği bölgelerde ise 9 sondajda çok düşük ve düşük, 10 sondajda ise orta ve yüksek sıvılaşma şiddeti bulunmuştur. Orta ve şiddetli hasarların meydana geldiği bölgelerde ise %52 oranda uyumludur.



Şekil 4.39: Sıvılaşma şiddeti indeksi ( $L_s$ ) sondaj sonuçları ile Christchurch hasar haritası karşılaştırması.

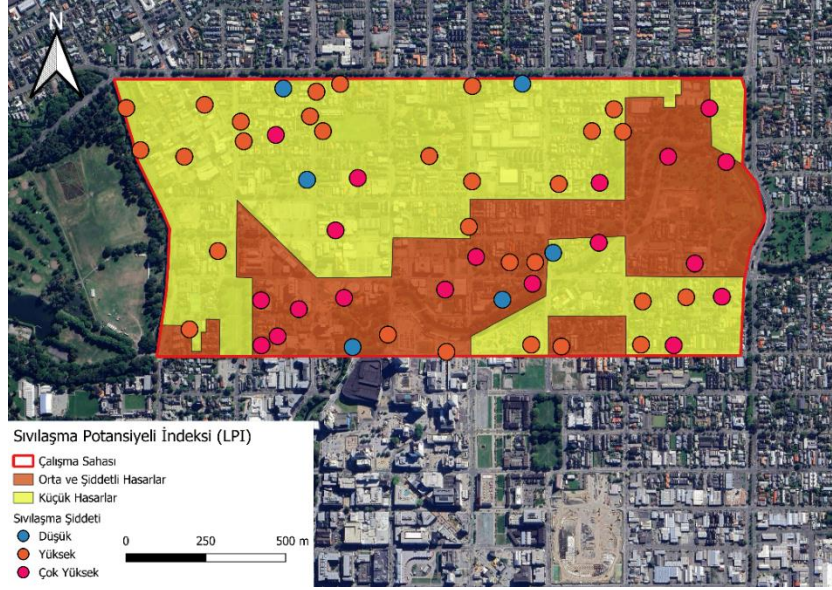
Sıvılaşma şiddeti sayısı (LSN) parametresine göre (Şekil 4.40) yapılan analiz sonuçlarında küçük hasarların bulunduğu bölgelerde 25 sondajda çok düşük ve düşük, 10 sondajda orta sıvılaşma şiddeti bulunmuştur. Küçük hasarların meydana geldiği bölgelerde %71 oranda uyum göstermektedir. Orta ve şiddetli hasarların gerçekleştiği bölgelerde ise 6 sondajda çok düşük ve düşük, 13 sondajda orta ve yüksek şiddet elde edilerek %68 oranda uyumludur.



**Şekil 4.40:** Sıvılaşma şiddeti sayısı (LSN) sondaj sonuçları ile Christchurch hasar haritası karşılaştırılması.

Sıvılaşma potansiyeli indeksi (LPI) parametresine göre (Şekil 4.41) yapılan analizlerde küçük hasarların meydana geldiği bölgelerde 4 sondajda düşük, 31 sondajda yüksek ve çok yüksek şiddet elde edilerek %11 oranda uyumludur. Orta ve şiddetli hasarların bulunduğu bölgede 2 sondajda düşük, 17 sondajda ise yüksek ve çok yüksek sıvılaşma şiddeti bulunmuştur. Böylelikle orta ve şiddetli hasarların meydana geldiği bölgelerde %89 oranında uyum göstermektedir.

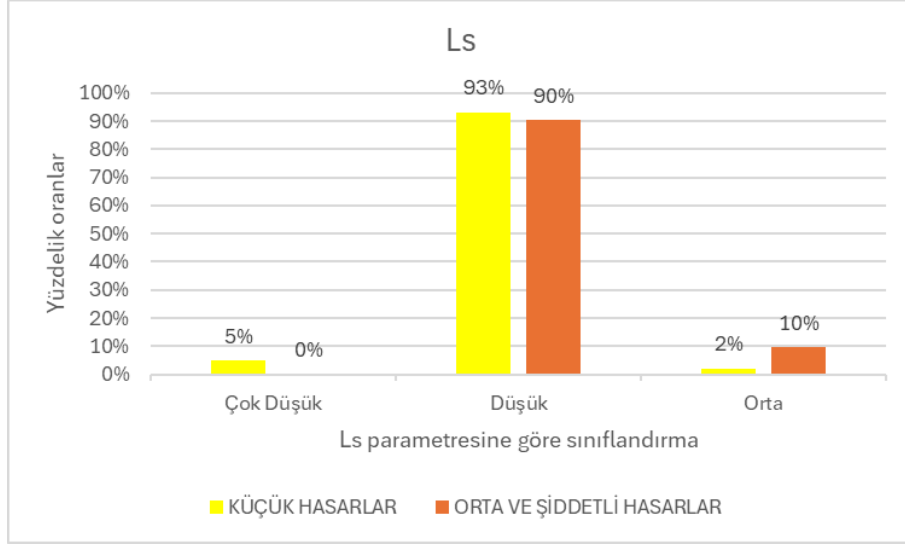




**Şekil 4.41:** Sıvılaşma potansiyel indeksi (LPI) sondaj sonuçları ile Christchurch hasar haritası karşılaştırılması.

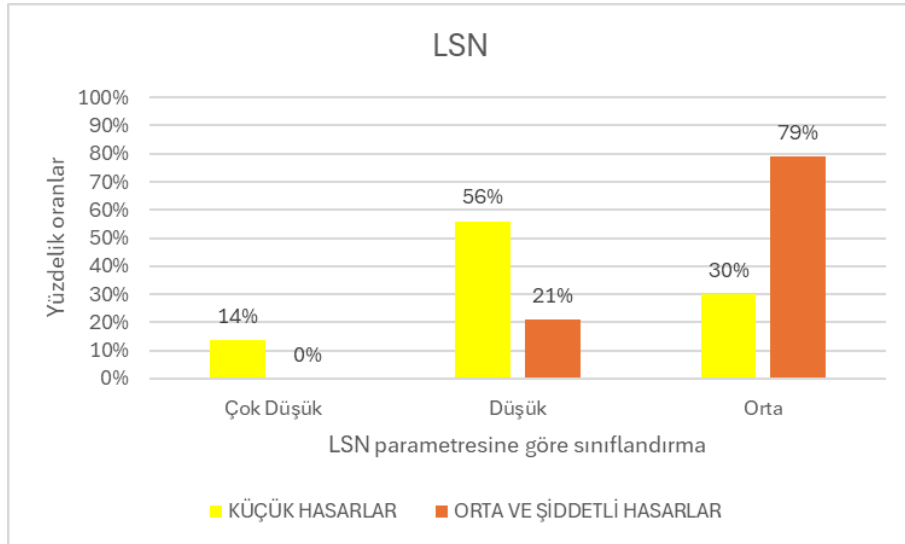
L<sub>s</sub> parametresine göre oluşturulan sıvılaşma risk haritası ve bölgede deprem sonrası oluşan hasarlar incelendiğinde (Şekil 4.42), küçük hasarların meydana geldiği bölgelerin %5'lik alanı çok düşük sıvılaşma riski bulunurken %93'lük alanında düşük ve %2'lik kısmında orta seviyede sıvılaşma riski elde edilmiştir. Orta ve şiddetli hasarların meydana geldiği alanların %90'lık kısmında L<sub>s</sub> parametresi tarafından düşük sıvılaşma riski bulunurken geriye kalan %10'luk alanda orta seviyede sıvılaşma riski elde edilmiştir.





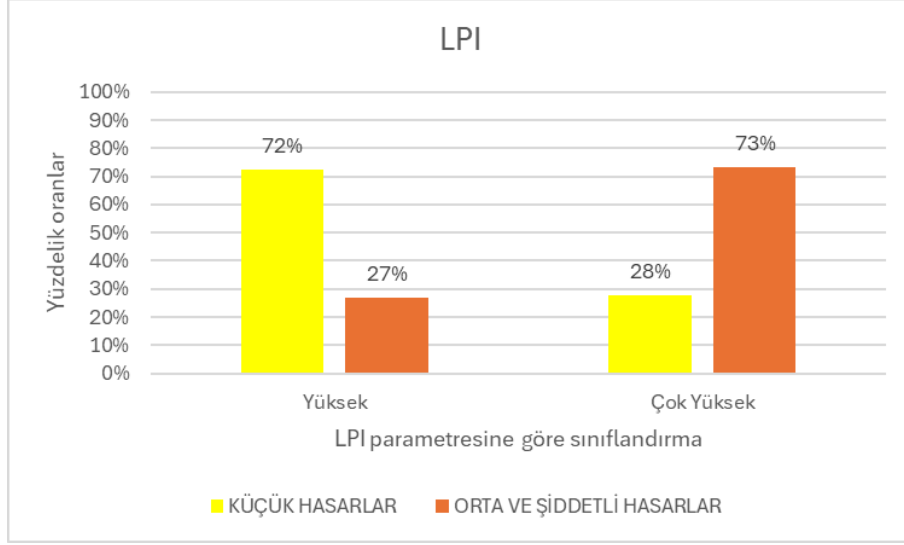
**Şekil 4.42:** Sıvılaşma şiddeti indeksi ( $L_s$ ) sıvılaşma risk haritası ile Christchurch hasar haritası karşılaştırılması.

LSN parametresine göre oluşturulan sıvılaşma risk haritasına göre (Şekil 4.43) küçük hasarların meydana geldiği bölgelerin %14'lük kısmında çok düşük sıvılaşma şiddeti bulunurken %56'lık alanda düşük ve %30'luk alanda orta şiddet elde edilmiştir. Orta ve şiddetli hasarların meydana geldiği bölgelerde ise %21'lik alanda düşük ve %79'luk alanda orta şiddet bulunmuştur.



**Şekil 4.43:** Sıvılaşma şiddeti sayısı (LSN) sıvılaşma risk haritası ile Christchurch hasar haritası karşılaştırılması.

LPI parametresine göre oluşturulan sıvılaşma risk haritası, deprem sonrası oluşturulan hasar haritası ile karşılaştırıldığında (Şekil 4.44) ise küçük hasarların meydana geldiği alanların %72'lik kısmında yüksek, geriye kalan %28'lik alanda çok yüksek şiddet elde edilmiştir. Orta ve şiddetli hasarların ortaya çıktığı bölgelerin %27'lik kısmında yüksek ve %73'lük alanda çok yüksek şiddet bulunmuştur.



**Şekil 4.44:** Sıvılaşma potansiyeli indeksi (LPI) sıvılaşma risk haritası ile Christchurch hasar haritası karşılaştırılması.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında farklı senaryolar çerçevesinde meydana gelebilecek sıvılaşma hasarları üç farklı yöntem ile incelenmiştir.

Afyonkarahisar ilinde gerçekleştirilmiş olan 767 geoteknik raporda 2121 adet sondaj verisi ve Christchurch şehrinde yer alan 54 CPT verisi üzerinde analizler yapılmıştır. Tüm analiz sonuçları coğrafi bilgi sistemleri kullanılarak haritalandırılmış ve mikrobölgeleme çalışması yapılmıştır. Değerlendirmeler tezin 5. bölümünde detaylı haritalar ve tablolar ile gösterilmiştir. Analiz sonuçlarına göre elde edilen bilgiler şu şekilde özetlenebilir:

- Afyonkarahisar şehrinde bulunan 2121 tane sondaj kuyusundan 1316 tanesinde ve bulunduğu 41 mahallenin 35 tanesinde sondaj boyunca yeraltı suyunun bulunmaması veya zeminin kayadan oluşmasından dolayı herhangi bir sıvılaşma riskine rastlanılmamıştır. Sağlam zeminlerde ya da yer altı suyu seviyesinin derinlerde olduğu sahalarda sıvılaşma riski beklenmemektedir.
- Yapılan analizlerin sonucuna göre Afyonkarahisar ilinin büyük kısmında sıvılaşma riski bulunmamaktadır. Bu nedenle sıvılaşma riskinin yoğun olduğu Selçuklu Mahallesi'ne odaklanılmıştır.
- Selçuklu Mahallesi'nde bulunan çalışma alanında 150 sondaj kuyusu ve Christchurch şehir merkezindeki çalışma alanında 54 adet CPT verisi bulunmaktadır. Afyonkarahisar çalışma alanında bulunan sondajlar  $M_w=6.5$  ile  $a_{max}=0.29g$  ve  $M_w=7.3$  ile  $a_{max}=0.33g$  olmak üzere 2 deprem senaryosu, Christchurch şehrinde bulunan sondajlar ise 2011 Christchurch Depremi'nde meydana gelen  $6.2 M_w$  ile  $a_{max}=0.43g-0.45g$  arasında değişen değerleri üzerinde sıvılaşma şiddeti indeksi ( $L_s$ ), sıvılaşma potansiyeli indeksi (LPI) ve sıvılaşma şiddeti sayısı (LSN) parametreleriyle sıvılaşma riskleri hesaplanarak mikrobölgeleme yapılmıştır.
- Afyon bölgesi için 1. ve 2. deprem senaryolarında yapılan üç farklı parametrede analiz sonuçlarına göre deprem şiddeti ve en büyük yatay yer ivmesi artışına bağlı olarak ortalama sıvılaşma riskinde yükselme

görülmüştür. 1. deprem senaryosunda  $L_s$  parametresine göre değerlendirilen bölgenin %71.2'i çok düşük, %28.8'i düşük sivilaşma riskine sahipken 2. deprem senaryosunda bölgenin %48.6'sı çok düşük, %49.1'i düşük ve %2.3'ü orta sivilaşma riskine yükselmiştir. LPI parametresine göre 1. deprem senaryosunda bölgenin %62.4'ü düşük, %37.6'sı yüksek sivilaşma riskine sahipken 2. deprem senaryosunda bölgenin %32.4'ü düşük, %61.2'si yüksek ve %6.4'ü çok yüksek sivilaşma riskine yükselmiştir. LSN parametresinde ise 1. deprem senaryosunda bölgenin %42.7'si çok düşük, %46.5'i düşük, %10.4'ü orta, %0.4'ü yüksek sivilaşma riskine sahipken 2. deprem senaryosunda bölgenin %32.2'si çok düşük, %46.4'ü düşük, %19.2'si orta ve %2.1'i yüksek sivilaşma riskine yükselmiştir.

- Christchurch çalışma sahasında yapılan analizlere göre sivilaşma parametrelerinin sonuçları incelendiğinde ise sivilaşma şiddeti indeksi ( $L_s$ )'ne göre çalışma sahasının %3'ü çok düşük, %92'si düşük ve %5'i orta sivilaşma riski bulunurken, sivilaşma potansiyeli indeksi (LPI)'ne göre yapılan analizde ise sahanın %55'i yüksek ve %45'i çok yüksek sivilaşma riski bulunmuştur. Sivilaşma şiddeti sayısı (LSN)'na göre yapılan analizlerde çalışma sahasının %9'u çok düşük, %43'ü düşük, %35'i orta ve %13'ü yüksek sivilaşma riski bulunmuştur.
- 2011 Christchurch Depremi sonrası oluşturulan hasar haritası ile çalışma sahasında yapılan analizlerin sonuçları karşılaştırılarak sondaj bazında  $L_s$  parametresi küçük hasarların olduğu alanda %94 oranında uyumlu olurken, orta ve şiddetli hasarların meydana geldiği bölgede %52 oranında uyum göstermiştir. LSN parametresi küçük hasarların meydana geldiği bölgelerde %71 oranında uyum gösterirken, orta ve şiddetli hasarların olduğu bölgelerde %68 uyumlu olmuştur. LPI parametresi ise küçük hasarların meydana geldiği alanlarda %11 uyum gösterirken, orta ve şiddetli hasarların olduğu bölgelerde %89 uyumlu olmuştur.
- Christchurch çalışma sahasında oluşturulan sivilaşma risk haritaları, hasar haritası ile karşılaştırıldığında  $L_s$  parametresi ile küçük hasarların olduğu bölgelerin %5'lik kısmında çok düşük, %93'lük kısmında düşük ve %2'lik kısmında orta şiddette sivilaşma riski elde edilirken,

orta ve şiddetli sıvılaşma gerçekleşen bölgelerin %90'ında düşük ve %10'unda orta şiddet bulunmuştur. LSN parametresine göre küçük hasarların meydana geldiği alanların %14'lük kısmında çok düşük, %56'lık kısmında düşük, %30'luk kısmında orta şiddet bulunurken, orta ve şiddetli hasarların meydana geldiği bölgelerin %21'inde düşük ve %79'unda orta şiddet bulunmuştur. LPI parametresine göre ise küçük hasarların meydana geldiği alanlarda %72'sinde yüksek, %28'inde çok yüksek şiddet bulunurken, orta ve şiddetli hasarların olduğu bölgelerin %27'lik kısmında yüksek ve %73'lük kısmında çok yüksek sıvılaşma şiddeti elde edilmiştir.

- Tonkin & Taylor (2013) ve van Ballegooy ve diğerleri (2014, 2015) benzer şekilde LPI ve LSN karşılaştırmaları yapmışlardır. Tez çalışmasında bu çalışmalara paralel şekilde LPI parametresinin hasar seviyesi tahmininde kullanılması durumunda gözlenen hasarlara oranla daha yüksek sıvılaşma şiddeti belirlediği tespit edilmiştir.
- Sıvılaşma riski parametreleri ve deprem hasar haritası karşılaştırıldığında Christchurch bölgesi için LSN parametresinin gerçek hasarlara diğer parametrelerden daha yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Ls ve LPI parametreleri arasında meydana gelen farklılık bölgede yapılacak yapıların tasarım konusunda da büyük farklılıklar meydana getirecektir. Bu nedenle bu iki yöntemden daha güncel ve literatüre görece yeni girmiş olan LSN parametresi bu noktada faydalı olabilir ve gelecek çalışmalarla birlikte daha geniş kullanım alanlarına ulaşabilir.

## 6. KAYNAKLAR

Aydınoğlu, A. ., Yıldız, S. S., Demir, E., ve Serpil, A., “Coğrafi Bilgi Sistemleri Nasıl alışır?” Bilim ve Teknik Dergisi, Sayı:514, 53 – 57, (2010).

Berkeley, U., Seismo Blog. Erişim Adresi: <https://seismo.berkeley.edu/blog/2008/09/24/when-the-ground-gives-way.html>, (2008).

Bill Ray The LIFE Picture Collection/Shutterstock

Boulanger, R. W., Idriss, I. M., “CPT and SPT Based Liquefaction Triggering Procedures”, Report No: UCD/CGM-14/01, (2014).

Bradley, B, “Seismic hazard analysis for urban Christchurch accounting for the 2010-2011 Canterbury earthquake sequence. Technical Report Prepared for the New Zealand Earthquake Commission (EQC) and Tonkin and Taylor Ltd., (2014).

Casagrande, A., "Liquefaction and Cyclic Deformation of Sands, a Critical Review", Proceedings of the Fifth Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, No. 88, 27 pp, (1975).

Casagrande, A., “Characteristics of Cohesionless Soils Affecting the Stability of Slopes and Earth Fills”, Journal of the Boston Society of Civil Engineers, BSCE, 257-276, (1936).

Casagrande, A., “Notes on the Design of Earth Dam”, Journal of the Boston of Civil Engineers, BSCE, 231-255, (1950).

Cetin, K. O., Youd, T. L., Seed, R. B., Bray, D. B., Stewart, J. P., Durgunoglu, H. T., Lettis, W. ve Yılmaz, M. T., “Liquefaction-Induced Lateral Spreading at Izmit Bay During the Kocaeli (Izmit)-Turkey Earthquake” Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol 130(12), 1300-1313, (2004).

David, M., "Geostatistical Ore Reserve Estimation", Elsevier Scientific Publishing Company, 364 p (1977).

Day, R.W., Geotechnical Earthquake Engineering Handbook, McGraw-Hill, (2002).

Desroces, R., Comerio, M., Eberhang, O. M., Mooney, W. D., Rix, G. J., "Overview of the 2010 Haiti Earthquakes", ASCE, Liquefaction Problems in Geotechnical Engineering, p.1-105, (2001).

ESRI, "ArcGIS desktop 9.3 kullanım kitabı", İşlem Coğrafi Bilgi Sistemleri Mühendislik ve Eğitim Ltd. Şti. Yayını, Ankara, (2008).

Habibullah, B. M., Pokhrel, R. M., Kuwano, J., ve Tachibana, S., "GIS-based soil liquefaction hazard zonation due to earthquake using geotechnical data." GEOMATE Journal 2.3, 154-160, (2012).

Holzer, T. L., Toprak, S., Bennett, M. J., "Liquefaction Potential Index and Seismic Hazard Mapping in the San Francisco Bay Area, California", Seventh U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Theme: Urban Earthquake Hazard, Boston, MA, July 21-25, (2002).

Idriss, I. M., ve Boulanger, R. W., "Relating  $K\alpha$  and  $K\sigma$  to SPT blow count and to CPT tip resistance for use in evaluating liquefaction potential", Proceedings of the 2003 Dam Safety Conference, ASDSO, September 7-10, (2003).

Idriss, I. M., ve Boulanger, R. W., "Soil liquefaction during earthquakes", Monograph MNO-12, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA, 261 pp, (2008).

Inal, C. ve Yigit, C.Ö. "Jeodezik uygulamalarda kriging enterpolasyon yönteminin kullanılabilirliği", TUJK 2003 Yılı Bilimsel Toplantısı Coğrafi Bilgi Sistemleri ve Jeodezik Ağlar Çalıştayı 24-25-26 Eylül, Konya, (2003).

Ishihara, K. and Yoshimine, M., "Evaluation of Settlements in Sand Deposits Following Liquefaction During Earthquakes." Soils and Foundations, Vol. 32, No. 1, March, pp. 173-188, (1992).

Ishihara, K., "Stability of Natural Deposits During Earthquakes." Proceedings of the Eleventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol. 1. San Francisco, pp. 321-376, (1985).

Iwasaki T, Tokida K, Tatsuoka F, Watanabe S, Yasuda S, Sato H., Microzonation for soil liquefaction potential using simplified methods. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Microzonation, Seattle, vol 3, pp 1319–1330, (1982).

Kovacs, W.D., Salomone, L.A. and Yokel, F.Y., "Energy Measurements in the Standard Penetration Test", Building Science Series 135, National Bureau of Standards, Washington, D.C., (1981).

Kramer, S.L., "Geotechnical earthquake engineering", Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, (1996).

Lade, P. V. ve Yamamuro, J. A., "Remedial Measures Against Soil Liquefaction from Investigation and Design to Implement", Edited by Japanese Geotechnical Society A.A., (2006).

Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA), "6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremleri ve 20 Şubat 2023 Defne (Hatay) Depremi Sonucu Gelişen Sıvılaşma Yapıları Saha Gözlemleri ve Değerlendirmeler", Ankara, (2023).

MBIE, "Repairing and rebuilding houses affected by the Canterbury earthquakes, NZ Ministry of Business, Innovation & Employment, Version 3a", (2015).

Mogami, T. ve Kubo, K., "The Behaviour of Soil During Vibration", 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, 152-155, (1953).



Mollamahmutoğlu, M. ve Babuğu, F., “Zeminlerde Sıvılaşma Analiz ve İyileştirme Yöntemleri”, Ankara, (2006).

Nacaroğlu, E., “Deprem Etkisiyle Oluşan Boru Hasarlarının Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve Kúmele Analizi ile Değerlendirilmesi” Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2010).

Nacaroğlu, E., Toprak, S., Ataman, E., ve Yağcıoğlu, B., “Sıvılaşma Risk Haritaları ve Karşılaştırılması: Afyonkarahisar Merkezi Örneği” Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği 18. Ulusal Konferansı, Kayseri, (2022).

NZGD, Yeni Zelanda Geoteknik Veritabanı, “Liquefaction Interpreted from Aerial Photography”, Erişim Adresi: <https://www.nzgd.org.nz/Maps>, (2013).

NZGD, Yeni Zelanda Geoteknik Veritabanı, Erişim Adresi: <https://www.nzgd.org.nz/>, (2023).

Özhan, U., “Davultepe ve Tece (Mezitli-Mersin) Yerleşim Alanlarının Sıvılaşma Potansiyelinin Coğrafi Bilgi Sistemi Kullanılarak İncelenmesi”, Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisas Tezi, (2021).

Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California Godden Colection.

Seed, H. B. ve Idriss, I. M., “Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential”, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Vol 97(9), 1249-1273, (1971).

Seed, H. B., “A Method for Earthquake Resistant Design of Earth Dams”, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, Vol. 92, 13-41, (1966).

Sezen, H., Elwood, J.K., Whittaker, A.S., Mosalam, K.M., Wallace, J.W., ve Stanton J.F., “Structural Engineering Reconnaissance of the August 17, 1999 Earthquake: Kocaeli (Izmit), Turkey”, PEER Report 2000/09, (2000).

Sivrikaya, O., ve Toğrol, E., “İnce daneli zeminlerde SPT sonuçlarının düzeltilmesi üzerine bir alışma”, İTÜDERGİSİ/d, 2(6), 59-67, (2003).

Sönmez, H. ve Gökçeoğlu, C., “A liquefaction Severity Index Suggested For Engineering Practice”, *Environmental Geology*, Vol 48, 81-91, (2005).

Tonaroğlu, M., “Sıvılaşmanın nümerik yöntemlerle modellenmesi”, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 180568, (2006).

Tonkin & Taylor Ltd., “Christchurch Liquefaction Vulnerability Study” Report Number: 10000273.v1.2, (2020).

Tonkin & Taylor Ltd., “Liquefaction Vulnerability Study” Report Number:52020.0200/v1.0, (2013).

Toprak, S. ve Holzer, T. L., “Liquefaction Potential Index: Field Assessment”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol 129(4), 315-322, (2003).

Toprak, S., Nacaroglu, E., Van Ballegooy, S., Koc, A. C., Jacka, M., Manav, Y., Torvelainen, E., O'Rourke and T. D., “Segmented Pipeline Damage Predictions Using Liquefaction Vulnerability Parameters” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol 125, (2019).

Toprak, S., Nacaroglu, E., Koç, A., Van Ballegooy, S., Jacka, M., Torvelainen, E., ve O'Rourke, T. “Pipeline damage predictions in liquefaction zones using LSN”, 16th World Conference on Earthquake Engineering, 8-13, (2017).

TS EN ISO 17892-4, “Geoteknik Etüt ve Deneyleyler- Zemin Laboratuvar Deneyleyleri – Bölüm 4: Tane Büyüklüğü Dağılımının Belirlenmesi”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, (2016).

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY), (2018).

Ulusay, R., Zemin Sıvılaşması, *Mavi Gezegen Popüler Bilim Dergisi*, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayını, 1, 34-45, (2000).

Utku, M., Danışman, M. A., Akyol, N., ve Akçığ, Z., “Afyon ve Çevresi’nin Depremselliği: 03 Şubat 2002 Çay Depremi Eş Şiddet Haritası ve Deprem Riski” Jeoloji Mühendisliği Dergisi, Vol 27(2), 18-34, (2003).

Uzuner, B.A., “Temel Mühendisliğine Giriş”, 2. Baskı, Derya Kitabevi, Trabzon, (2000).

van Ballegooy, S., Lacrosse, V., Jacka, M., ve Malan, P., “LSN – a new methodology for characterising the effects of liquefaction in terms of relative land damage severity”, Proc. 19th NZGS Geotechnical Symposium, Ed. CY Chin, Queenstown, (2013).

van Ballegooy, S., Malan, P., Lacrosse, V., Jacka, M. E., Cubrinovski, M., Bray, J. D., & Cowan, H., “Assessment of liquefaction-induced land damage for residential Christchurch”, Earthquake Spectra, 30(1), 31-55, (2014).

van Ballegooy, S., Wentz, F., & Boulanger, R. W., “Evaluation of CPT-based liquefaction procedures at regional scale”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 79, 315-334, (2015).

Yıldız, A., İbrahim, D., Bağcı, M., Ulutürk, Y., Başaran, C., ve Erdoğan, E., “Afyonkarahisar ve çevresinin depremselliği”, Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Vol. 12, 1-7, (2012).

Yılmaz, I., Yıldırım, M. ve Keskin, İ., “Zemin Mekaniği Laboratuvar Deneyleri ve Çözümlü Problemler”, Ankara: 2.Baskı, Ed.; Seçkin Yayıncılık, (2014).

Youd, T. L., Idriss, I. M., Andrus, R. D., Arango, I., Castro, G., Christian, J. T., Dobry, R., Finn, W. D. L., Harder, L. F., Hynes, M. E., Ishihara, K., Koester, J. P., Liao, S. S. C., Marcuson, W. F., Martin, G. R., Mitchell, J. K., Moriwaki, Y., Power, M.S., Robertson, P. K., Seed, R. B. ve Stokoe, K. H., “Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report form the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol 127(10), 817-833, (2001).