

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**FARKLI YER İVMESİ DEĞERLERİNDE ADAPAZARI-ERENLER-
SERDİVAN (SAKARYA) ZEMİNLERİ SIVILAŞMA
ANALİZLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ**

EMEL ATASOY

KOCAELİ 2022

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**FARKLI YER İVMESİ DEĞERLERİNDE ADAPAZARI-ERENLER-
SERDİVAN (SAKARYA) ZEMİNLERİ SIVILAŞMA
ANALİZLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ**

Emel ATASOY

Doç. Dr. Ahmet KARAKAŞ
Danışman, Kocaeli Üniv.

.....

Dr. Öğr. Üyesi Özkan CORUK
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

.....

Dr. Öğr. Üyesi Erkan BOZKURTOĞLU
Jüri Üyesi, İstanbul Teknik Üniv.

.....

Tezin Savunulduğu Tarih:06.06.2022

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez/proje çalışmada,

- Bu tezin/projenin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı
- Tezin/Projenin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez/proje çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

☒ Bu tez/proje çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

☐ Bu tez/proje çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler tarafından no'lu proje kapsamında maddi/alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Emel ATASOY

YAYILMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/projemin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin/projemin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanımı bana ait olacaktır.

Tezin/projenin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin/projenin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan **“Lisanüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge”** kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- ☐ Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- ☐ Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.
- ☒ Tezim/projem ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

Emel ATASOY

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Gevşek ve tutturulmamış alüvyal zemin üzerinde yerleşim ve sanayinin giderek arttığı Adapazarı ve çevresinde, tarihi boyunca meydana gelen depremlerde özellikle de 1999 Gölcük Depremi'nde yaşanan ağır kayıplar zemin özellikleri ve deprem esnasında zemin davranışının önemini işaret etmiştir. Bu alanda yapılan pek çok çalışma olmakla birlikte bu çalışmada da inceleme alanında yapılan analizlerle sivilaşma potansiyeli varlığı incelenmiş ve zeminde oluşması beklenen oturma miktarları hesaplanmıştır. Böylece Kuzey Anadolu Fay Zonu'nda kurulmuş bu şehirde yaşanması beklenen depremlerde oluşabilecek can ve mal kaybını en aza indirmesi için yapılacak çalışmalarda altlık olarak kullanılabilir.

Hazırlamış olduğum bu çalışmada; bilgi ve yönlendirmeleriyle bana destek olan danışman hocam Doç. Dr. Ahmet KARAKAŞ'a, desteklerinden dolayı kıymetli hocam Dr. Öğretim Üyesi Özkan CORUK'a, tez jüri üyesi değerli hocam Dr. Öğretim Üyesi Erkan BOZKURTOĞLU'na, veri sağlamada destek olan Jeoloji Mühendisi Ufuk Fırat YILDIRIM'a ve Jeoloji Mühendisi Kenan ÇOLAK'a, CBS ve haritalama konusunda destek olan Harita Mühendisi Hüseyin Cem İNCE'ye, LiquefyPro programı kullanımına olanak veren FEM İnşaat ve Mühendislik firması Genel Müdürü sayın Fahrettin EMRE'ye, desteklerinden dolayı Jeoloji Mühendisi Oktay CERİT'e, desteklerini ve sabırlarını eksik etmeyen başta değerli eşim İsmail ATASOY olmak üzere aileme teşekkür ederim.

Haziran – 2022

Emel ATASOY

İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ.....	i
YAYILMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI.....	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	ix
ÖZET.....	xi
ABSTRACT.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. İnceleme Alanı.....	1
1.2. İncelemenin Amacı.....	3
1.3. Önceki Çalışmalar.....	3
1.3.1. Ulusal Düzeyde Yapılan Çalışmalar.....	4
1.3.2. Uluslararası Düzeyde Yapılan Çalışmalar.....	5
2. JEOLojİ VE TEKTONİK KONUM.....	7
2.1. Bölgesel Jeoloji.....	7
2.2. İnceleme Alanı Jeolojisi.....	8
2.3. Tektonik Yapı.....	11
2.4. Depremsellik.....	12
3. ZEMİNLERİN DİNAMİK YÜKLER ALTINDAKİ DAVRANIŞI.....	14
3.1. Sıvılaşma.....	14
3.1.1. Sıvılaşmayı Etkileyen Faktörler.....	16
3.1.2. Sıvılaşmanın Sebep Olduğu Zemin Deformasyonları.....	18
4. MALZEME VE YÖNTEM.....	21
4.1. SPT'ye Dayalı Basitleştirilmiş Sıvılaşma Analizi.....	24
4.1.1. CSR Değeri.....	24
4.1.2. CRR Değeri.....	25
4.1.3. Güvenlik Faktörü (FS).....	27
4.2. Oturma Hesabı.....	27
4.2.1. Doygun Kumlarda Oturma Hesabı.....	28
4.2.2. Kuru Zeminlerde Oturma Hesabı.....	30
4.2.3. Toplam Oturma.....	32
4.3. İnce Daneli Zeminlerde Sıvılaşmaya Yatkınlık.....	32
4.4. Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi (PL) Metodu.....	33
4.5. Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS).....	34
4.5.1. CBS Bileşenleri.....	34
4.5.2. CBS'nin Çalışma Aşamaları.....	35
4.5.3. Bu Çalışmada CBS.....	35
5. BULGULAR.....	36
5.1. İri Daneli Zeminlerin Sıvılaşma Analizleri.....	40
5.2. İnce Daneli Zeminlerin Sıvılaşma Analizi.....	54
5.3. Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi.....	56
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	62
KAYNAKLAR.....	66
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER.....	70

ÖZGEÇMİŞ.....	71
---------------	----



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	İnceleme alanı yer bulduru haritası.....	2
Şekil 2.1.	İnceleme alanı da içeren bölge jeolojisi haritası.....	9
Şekil 2.2.	İnceleme alanını da içeren bölgenin stratigrafik kesiti.....	10
Şekil 2.3.	Jeoloji haritası üzerinde A-A' hattı enine jeolojik kesiti.....	11
Şekil 2.4.	Doğu Marmara Bölgesi'nde aletsel dönemde meydana gelen 1943, 1963, 1967 ve 1999 Depremlerinde oluşan yüzey kırıkları.....	12
Şekil 3.1.	Zemini oluşturan tanelerin statik ve dinamik ortamda birbirlerine göre durumu.....	14
Şekil 3.2.	İnce taneli zeminlerde sıvılaşabilirlik özellikleri.....	17
Şekil 3.3.	Sıvılaşmanın yüzeyde meydana getirdiği hasarlardan örnekler.....	20
Şekil 4.1.	İnceleme alanı içinde yer alan sondaj noktaları lokasyon haritası.....	21
Şekil 4.2.	Çalışmanın aşamalarını gösterir şema.....	23
Şekil 4.3.	CSR ve düzeltilmiş SPT değerlerine göre hacimsel deformasyonlar.....	28
Şekil 4.4.	Sıvılaşma sonrası güvenlik katsayısı ve sıklığa bağlı hacimsel deformasyon ilişkisi.....	29
Şekil 4.5.	Kesme deformasyonu grafiği.....	30
Şekil 4.6.	Hacimsel deformasyon grafiği.....	31
Şekil 4.7.	Manyetüd düzeltme faktörü.....	31
Şekil 4.8.	İnce daneli zeminlerde sıvılaşma yatkınlığı grafiği.....	33
Şekil 5.1.	Adapazarı SK A1-SK A12 arası SPT-N ₃₀ değerleri grafiği.....	37
Şekil 5.2.	Adapazarı SK A13-SK A23 arası SPT-N değerleri grafiği.....	37
Şekil 5.3.	SK E1-SK E8 arası SPT-N değerleri grafiği.....	38
Şekil 5.4.	SK S1-SK S9 arası SPT-N değerleri grafiği.....	38
Şekil 5.5.	SK S10-SK S18 arası SPT-N değerleri grafiği.....	38
Şekil 5.6.	Ishara ve Yosmine (1990) yöntemine göre 0,332 g yer ivmesi değerinde toplam oturma miktarı grafiği.....	44
Şekil 5.7.	Tokimatsu ve Seed (1987) yöntemine göre 0,332 g yer ivmesi değerinde toplam oturma miktarı grafiği.....	44
Şekil 5.8.	Ishara ve Yosmine (1990) yöntemine göre 0,415 g yer ivmesi değerinde toplam oturma miktarı grafiği.....	45
Şekil 5.9.	Tokimatsu ve Seed (1987) yöntemine göre 0,415 g yer ivmesi değerinde toplam oturma miktarı grafiği.....	45
Şekil 5.10.	Ishara ve Yosmine (1990) yöntemine göre 0,498 g yer ivmesi değerinde toplam oturma miktarı grafiği.....	46
Şekil 5.11.	Tokimatsu ve Seed (1987) yöntemine göre 0,498 g yer ivmesi değerinde toplam oturma miktarı grafiği.....	46
Şekil 5.12.	Ishihara ve Yoshimine (1990) yöntemine göre 0,332 g değerinde sıvılaşma potansiyeli ve toplam oturma miktarları dağılım haritası.....	48
Şekil 5.13.	Tokimatsu ve Seed (1987) yöntemine göre 0,332 g değerinde sıvılaşma potansiyeli ve toplam oturma miktarları dağılım haritası.....	49

Şekil 5.14.	Ishihara ve Yoshimine (1990) yöntemine göre 0,415 g değerinde sıvılaşma potansiyeli ve toplam oturma miktarları dağılım haritası.....	50
Şekil 5.15.	Tokimatsu ve Seed (1987) yöntemine göre 0,415 g değerinde sıvılaşma potansiyeli ve toplam oturma miktarları dağılım haritası.....	51
Şekil 5.16.	Ishihara ve Yoshimine (1990) yöntemine göre 0,498 g değerinde sıvılaşma potansiyeli ve toplam oturma miktarları dağılım haritası.....	52
Şekil 5.17.	Tokimatsu ve Seed (1987) yöntemine göre 0,498 g değerinde sıvılaşma potansiyeli ve toplam oturma miktarları dağılım haritası.....	53
Şekil 5.18.	Adapazarı İlçesine ait ince daneli zeminlerde sıvılaşma yatkınlığı	55
Şekil 5.19.	Erenler İlçesine ait ince daneli zeminlerde sıvılaşma yatkınlığı.....	55
Şekil 5.20.	Serdivan İlçesine ait ince daneli zeminlerde sıvılaşma yatkınlığı	56
Şekil 5.21.	0,332 g ivme değerinde Iwasaki ve diğ. (1982) Yöntemi ile Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi haritası	58
Şekil 5.22.	0,415 g ivme değerinde Iwasaki ve diğ. (1982) Yöntemi ile Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi haritası	59
Şekil 5.23.	0,498 g ivme değerinde Iwasaki ve diğ. (1982) Yöntemi ile Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi haritası	60
Şekil 5.24.	Adapazarı Şehir Merkezinde Oluşan Yapı Hasarlarının Mahallelere Göre Dağılımı	61

TABLolar DİZİNİ

Tablo 4.1.	Sondaj noktalarına ait ondalık derece koordinat bilgileri	22
Tablo 4.2.	Analizlerde kullanılan yer ivmesi değerleri	23
Tablo 4.3.	SPT-N değerleri için düzeltme katsayıları (Youd ve Idriss, 1997).....	26
Tablo 4.4.	(N ₁) ₆₀ , Dr (%), q _{cl} (kgf/cm ²) arasındaki bağıntı	29
Tablo 5.1.	İnce daneli seviyelerde ölçülen SPT değerleri	36
Tablo 5.2.	İri daneli zeminlerde ölçülen SPT değerleri	36
Tablo 5.3.	İnceleme alanına ait ince taneli zeminlerin mühendislik özellikleri	39
Tablo 5.4.	İnceleme alanına ait iri taneli zeminlerin mühendislik özellikleri	39
Tablo 5.5.	Analizde kullanılan γ_n (kN/m ³) değerleri	41
Tablo 5.6.	IY-Ishihara and Yoshimine (1990) yöntemi ve TS-Tokimatsu and Seed (1987) yöntemleri ve 0,332-0,145-0,498 g değerlerine göre hesaplanan oturma değerleri	42
Tablo 5.7.	Sıvılaşma potansiyeli tespit edilen derinlikler	47
Tablo 5.8.	PI'ne göre sıvılaşmaya yatkın seviyelerin mühendislik bilgileri	54
Tablo 5.9.	Iwasaki ve diğ. (1982) yöntemi ile sıvılaşma potansiyeli indeksi	57

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

CH	:Yüksek Plastisiteli Kil
CL	:Düşük Plastisiteli Kil
Cb	:Kuyu Çapı Düzeltme Faktörü
Ce	:Çekiç Enerji Oranı Düzeltme Faktörü
Cn	:Üst Tabaka Yükü Düzeltme Katsayısı
Cr	:Tij Boyu Düzeltme Katsayısı
Cs	:Numune Alma Metodu Düzeltme Katsayısı
Dr	:Rölatif Sıklık
dz	:Zemin Tabakasının Kalınlığı
FC	:İnce Tane Oranı
FS	:Güvenlik Faktörü
g	:Maksimum Yatay Yer İvmesi (a_{max})
Geff	:Kesme Deformasyonu
Gmax	:Kayma Modülü
GP	:Kötü Derecelenmiş Çakıl
LL	:Likit Limit
Ms	:Yüzey Dalgası Büyüklüğü
Mw	:Moment Manyetüdü
PI	:Plastisite İndisi
PL	:Plastik Limit
qcl	:CPT Düzeltilmiş Uç Direnci
qu	:Serbest Basınç Dayanımı
rd	:Gerilme Azaltım Katsayısı
Sdoygun	:Suya Doygun Zemindeki Oturma
Skuru	:Kuru Zemindeki Oturma
SM	:Siltli Kum
w_n	:Zeminin su muhtevası
γ_n	:Birim Hacim Ağırlığı
σ_v	:Toplam Düşey Gerilme
σ_v'	:Efektif Düşey Gerilme
σ_s	:Statik Durumda Boşluk Suyu Basıncı
σ_d	:Dinamik Durumda Boşluk Suyu Basınç Fazlalığı

Kısaltmalar

ANN	: Artificial Neural Network (Yapay Sinir Ağı)
BAFZ	: Batı Anadolu Fay Zonu
BPT	: Becker Penetration Test (Becker Penetrasyon Deneyi)
CBS	: Coğrafi Bilgi Sistemi
CPT	: Conic Penetration Test (Koni Penetrasyon Deneyi)
CRR	: Cyclic Resistance Ratio (Çevrimsel Dayanım Oranı)
CSR	: Cyclic Stres Ratio (Çevrimsel Gerilme Oranı)
DAFZ	: Doğu Anadolu Fay Zonu
DSİ	: Devlet Su İşleri
GIS	: Geographical Information System (Coğrafi Bilgi Sistemleri)

KAFZ	: Kuzey Anadolu Fay Zonu
MTA	: Maden Tetkik ve Arama
SPT	: Standard Penetration Test (Standart Penetrasyon Deneyi)
SK	: Sondaj Kuyusu
USCS	: Unified Soil Classification System (Birleştirilmiş Zemin Sınıflaması)
YASS	: Yeraltı Suyu Seviyesi



FARKLI YER İVMESİ DEĞERLERİNDE ADAPAZARI-ERENLER-SERDİVAN (SAKARYA) ZEMİNLERİ SIVILAŞMA ANALİZLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

ÖZET

Bu çalışmada; Adapazarı ovasındaki birbirine komşu üç merkez ilçe Adapazarı-Erenler-Serdivan zeminlerinin farklı yer ivmesi büyüklüklerinde davranışları araştırılmıştır. Kuzey Anadolu Fayı denetiminde gelişen Adapazarı ovasında genelde çakıllı, kumlu, siltli ve killi birimlerden oluşan alüvyal çökeller vardır. Sondaj verilerinin de desteklemiş olduğu, kil, silt, kum, çakıl oranları değişken olan ince ve iri daneli sedimentlerden oluşan alüvyon zemin içinde yeraltı suyu seviyesinin yüzeye yakın olması sıvılaşma olayının varlığına işaret etmiştir. İncelemenin ilk aşamasında iri daneli zeminlerde SPT-N30 değerlerine dayalı analiz yöntemi kullanılmıştır. İri daneli zeminlerde sıvılaşma potansiyeli, sıvılaşmaya bağlı oluşan oturma değerleri ve sıvılaşma potansiyeli indeksi araştırılmıştır. Sakarya İlinde faaliyet gösteren özel zemin araştırma firmalarından tenin edilen 49 sondaj delgisinden elde edilen arazi ve laboratuvar deney sonuçları ile yeraltı su seviyesi ölçümlerinden yararlanılmıştır. Bu verilerle 3 farklı yer ivmesinde (0,332 g, 0,415 g, 0,498 g) Seed ve İdriss (1971)'in geliştirdiği yöntem ve bu yöntemin uygulandığı LiquefyPro (v.5.8) programı vasıtasıyla, SPT-N30 değerlerine dayalı sıvılaşma analizi yapılmıştır. sıvılaşma potansiyeli belirlenmiş ve oturma hesaplamaları yapılmıştır. Bu analizler sonucunda sıvılaşma potansiyeli ve sıvılaşmaya bağlı oturma miktarları belirlenmiştir. Standart Sıvılaşma Analizine göre inceleme alanında açılan 49 sondajdan; 0,332 g ivme değerinde 25, 0,415 g değerinde 29, 0,498 g değerinde 30 adedinde sıvılaşma varlığı tespit edilmiştir. Yapılan analizde 0,332 g ivme değerinde 0,01-15,05 cm ortalama 2,77 cm, 0,415 g ivme değerinde 0,03-15,82 cm ortalama 3,28 cm, 0,498 g ivme değerinde ise 0,03-15,86 cm ortalama 3,48 cm oturma miktarı belirlenmiştir. İnce daneli zeminlerde siltli birimler için yeterince veri olmadığından killi birimler için Bray ve Sancio (2006) yöntemi ile sıvılaşmaya yatkınlık analizi yapılmıştır. Toplam 332 veri değerlendirilmiş olup sadece Adapazarı zeminlerine ait 2 sondajda 4 adet veride sıvılaşmaya yatkınlık tespit edilmiştir. Sıvılaşma analizi ile elde edilen F_s değeri ile Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi hesaplanmıştır. Sonuç olarak 49 sondajdan 27 adedinde 3 ivme değerlerinde olmak üzere sıvılaşma potansiyeli indeksi varlığı tespit edilerek sıvılaşmanın yüzeydeki etkisi çok düşük, düşük, yüksek, çok yüksek olarak derecelendirilmiş ve inceleme alanının farklı kesimlerinde bu derecelerin tamamı görülmüştür. Elde edilen sıvılaşma potansiyeli, sıvılaşma kaynaklı oturmalar ve sıvılaşma potansiyel indeksi verileri ArcGIS programı kullanılarak haritalanmıştır. İnceleme alanı genelinde özellikle SM (Siltli Kum) birimlerinde daha fazla sıvılaşma potansiyeli olduğu görülmüştür. İvme değerinin artmasına bağlı olarak oturma miktarlarında artış tespit edilmiştir ayrıca sıvılaşma potansiyel indeksine göre daha geniş alanlar risk altında kalmıştır.

Anahtar Kelimeler: Adapazarı, Erenler, Serdivan, Sıvılaşma Potansiyeli, Zemin Sıvılaşması.

ASSESSMENT OF THE LIQUEFACTION ANALYSIS OF ADAPAZARI-ERENLER-SERDIVAN (SAKARYA) SOILS AT DIFFERENT GROUND ACCELERATION VALUES

ABSTRACT

In this study, the behavior of the three central districts adjacent to each other, Adapazarı-Erenler-Serdivan soils in Adapazarı plain were investigated at different levels of ground acceleration. In Adapazarı plain, which developed under the control of The North Anatolian Fault, there are generally alluvial deposits consisting of gravelly, sandy, silty and clayey units. The fact that the groundwater level is close to the surface in the alluvial soil, which is composed of fine and coarse-grained sediments with variable clay, silt, sand and gravel ratios, which is supported by the boreholes data, indicates the presence of liquefaction. In the first stage of the investigation, analysis method based on SPT-N30 values was used in coarse grained soils. Liquefaction potential, settlement values due to liquefaction and liquefaction potential index were investigated in coarse-grained soils. Field and laboratory test results and groundwater level measurement data obtained from 49 boreholes obtained from private soil research firms operating in Sakarya were used. With these data, liquefaction analysis based on the SPT-N30 values was performed at 3 different ground accelerations (0.332 g, 0.415 g, 0.498 g) using the method developed by Seed and Idriss (1971) and LiquefyPro (v.5.8) program in which this method was applied. As a result of these analyzes, the liquefaction potential and the amount of settlement due to liquefaction were determined. According to the Standard Liquefaction Analysis of the 49 borings in the study area; the presence of liquefaction was detected in 25 borings at value of 0.332g, 29 at a value of 0.415g. In the analysis, 0.01-15.05 cm average 2.77 cm at 0.332 g acceleration value, 0.03-15.82 cm at 0.415 g acceleration value 3.28 cm on average, 0.03-15.86 cm at 0.498 g acceleration value 3.48 cm on average settlements was determined. Since there is not enough data for silty units in fine-grained soils, liquefaction susceptibility analysis was performed for clayey units using the Bray and Sancio (2006) method. A total of 332 data were evaluated, and liquefaction susceptibility was determined in 4 data only in 2 boreholes belonging to Adapazarı soils. The Liquefaction Potential Index was calculated with the F_s value obtained by the liquefaction analysis of coarse-grained soils. As a result, the presence of a liquefaction potential index, including 3 acceleration values, was determined in 27 of 49 boreholes, and the effect of liquefaction on the surface was graded as very low, low, high, very high and all of these degrees were observed in different parts of the study area. The obtained liquefaction potential, the settlement due to liquefaction and liquefaction potential index data were mapped using ArcGIS program. It has been observed that there is more liquefaction potential throughout the study area, especially in the SM (Silty Sand) units. Due to the increase in the acceleration value, an increase in the amount of settlement was detected, and larger areas are at risk according to the liquefaction potential index.

Keywords: Adapazarı, Erenler, Serdivan, Liquefaction Potential, Soil Liquefaction.

1. GİRİŞ

Sıvılaşma genel olarak sismik hareketle oluşan makaslama kuvveti etkisi altında, boşluk suyu basıncının artmasıyla birlikte suya doygun taneli zeminin katı formunu kaybederek sıvı kıvama ulaşması olarak tanımlanmaktadır.

Depremle birlikte ikincil bir afet olarak kendini gösteren, sismik yükler altında zeminde meydana gelen davranış değişikliklerinden biri olan ve depremin yıkıcı etkisini arttırarak can ve mal kayıplarına sebep olan sıvılaşma, uzun dönemler boyunca yapılaşma planlamaları yapılırken konu dışı bırakılmıştır.

Sıvılaşmanın oluşum aşamaları ve sıvılaşma sonucunda meydana gelen değişikliklerin ortaya konmasına yönelik çalışmalar, depreme bağlı sıvılaşma sebebiyle yıkıcı hasara sebep olan 1964 Niigata-Japonya ve Büyük Alaska-A.B.D. depremleri sonrasında hız kazanmıştır (Çetin ve Unutmaz, 2004).

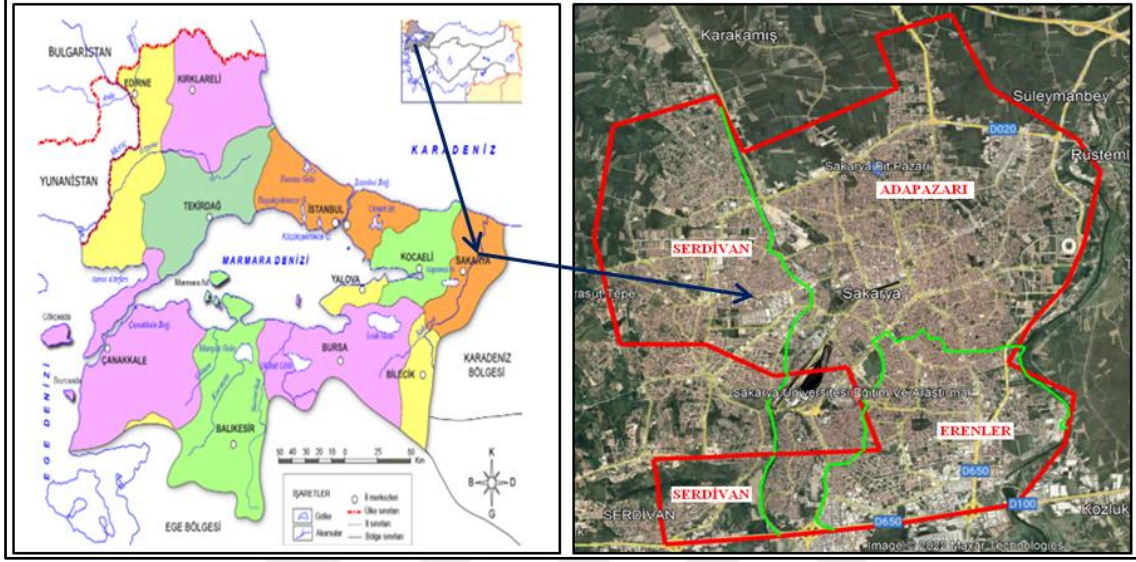
Buna rağmen aletsel dönemde meydana gelen ve büyük hasarlara neden olan Türkiye’de 1999 Gölcük ve Düzce; Tayvan’da 1999 Chi-Chi depremleri zemin sıvılaşmasının hasar verici boyutunu tekrar hatırlatmış ve en az gerçekleşmesi beklenen depremler kadar önem taşıdığını göstermiştir.

Sakarya’da 1943, 1957, 1967, 1999 yıllarında yaşanan yıkıcı depremlerin ardından yapılarda hasar görülen alanlar ve aynı özellikleri taşıyan farklı alanlarda yerleşimin artarak devam ettiği görülmektedir. Son olarak 1999 yılında yaşanan Gölcük ve Düzce Depremleri büyük kayıplardan sonra depremlerden kaynaklı can ve mal kaybının en aza seviyede olması ve risk yönetimi açısından kent içerisinde sıvılaşma potansiyeli belirlenmeli ve kent yapılaşmasında etkin şekilde planlara dâhil edilmelidir.

1.1. İnceleme Alanı

Kuzey Batı Anadolu’da, Marmara Bölgesi’nin Kuzeydoğusunda bulunan inceleme alanı, 30°20’ ve 30°25’ Doğu boylamları ile 40°47’ ve 40°44’ Kuzey enlemleri arasında yer alır ve ortalama 30 metre rakıma sahiptir. İnceleme alanına ait yer bulduru haritası Şekil 1.1’de sunulmuştur. İnceleme alanı; Sakarya İli merkez ilçelerinden üç komşu ilçe olan Adapazarı, Erenler ve Serdivan İlçelerini kapsamaktadır. Adapazarı İlçesi inceleme

alanının kuzeyinde 23.000 m², Erenler İlçesi inceleme alanın güneyinde 9.000 m² ve Serdivan İlçesi ise inceleme alanın batısında iki farklı alan şeklinde 13.400 m²'lik alan kapsamaktadır. Bu üç alanın toplamı 45400 m²'lik bir alan inceleme alanını temsil etmektedir.



Şekil 1.1. İnceleme alanı yer bulduru haritası

Düzce, Bolu, Bilecik, Bursa ve Kocaeli İlleri ile komşu olan Sakarya sınırları içerisinde geçen; D100 Karayolu, Kuzey Marmara Otopanı, İstanbul-Ankara Demiryolu, Adapazarı Bilecik Yolu (D650), Adapazarı-Karasu Yolu (D650) ülke pazarında önemli ithalat ve ihracat merkezleri arasındaki karasal bağlantıyı sağlamaktadır.

İnceleme alanı geneli Karadeniz ve Marmara bölgesinde hakim olan iklim şartlarının etkisi altındadır. Karadeniz kıyısı ve doğusunda Karadeniz iklimi, Batı ve güneyde Marmara bölgesi iklimi görülür. Yılda en çok 40 gün sıcaklık 0°C'nin altında ve en çok 30 günde +30°C üstündedir. Yağış ortalaması 632-900 mm aralığındadır.

Sakarya Nehri, Mudurnu Çayı ve Çark Deresi, Kent merkezine ulaşan ve Adapazarı Ovası'nın şekillenmesine katkıda bulunan 3 önemli akarsudur. Özellikle Sakarya Nehri Geyve boğazını geçer geçmez hızını kaybederek, güneyde bulunan yüksek rakımlı dağlardan taşınmış olduğu yoğun malzemeyi biriktirmeye başlamış ve Adapazarı ovasının oluşumunda en önemli etken olmuştur. İnceleme alanı Sakarya İli'ne ait 1/25.000 ölçekli G24B3-G24B4-G24C1-G24C2 paftaları içerisinde yer almaktadır.

1.2. İncelemenin Amacı

Zeminlerde meydana gelen sıvılaşma olayı deprem esnasında oluşan çevrimsel gerilmelerin etkisiyle oluşmaktadır. Bu gerilmelerin yanı sıra zemini oluşturan malzeminin özellikleri, depremin büyüklüğü, YASS gibi faktörler de sıvılaşma olayında etkindir. Sıvılaşma neticesinde yüzeyde meydana gelen deformasyonlarla birlikte yapılarda yan yatma, çökme, devrilme gibi çeşitli hasarlar meydana gelebilmektedir.

Bu çalışmada inceleme alanı olarak seçilen Adapazarı-Erenler-Serdivan İlçeri'nde özellikle 1999 Gölcük depreminde, nispeten yüksek kesimlerden daha fazla hasar ve kayıpların yaşandığı alüvyon zemin üzerinde sıvılaşma potansiyelini belirlemektir.

Zemin sıvılaşması ve sıvılaşmayı tetikleyecek oluşumlar incelenip değerlendirilmiş ve Özel bir firma tarafından daha önce yapılmış 49 adet sondaj çalışmasından elde edilen SPT-N₍₃₀₎ verileri ve laboratuvar deney sonuçları kullanılarak Sıvılaşma potansiyeli belirlenmiş ve oturma hesapları yapılmıştır.

Dünya'nın en aktif fay hatlarındanbiri olan KAF Zonu'nda kurulmuş bir şehir olan Sakarya'da özellikle de gelecekte olması beklenen depremlerden etkilenme oranı yüksek olan Sakarya'da sıvılaşma potansiyelini belirlemek, yaşanması muhtemel can ve mal kayıplarını en aza indirebilmek açısından büyük önem arz etmektedir.Yapılaşmaya gidilmeden önce sıvılaşma potansiyeli varlığı tespit edilen alanlarda gerekli zemin iyileştirme işlemleri veya yapısal tedbirler alınmalıdır.

1.3. Önceki Çalışmalar

Aletsel dönemde yaşanan büyük ve yıkıcı depremlerin ışığında birçok araştırmacının ilgisini çeken sıvılaşma olayı hakkında hazırlanmış çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Tez konusu ve inceleme alanı ile ilişkili bu çalışmaları ulusal düzeyde yapılan çalışmalar ve uluslararası düzeyde yapılan çalışmalar altında kronolojik olarak aşağıda açıklanmaktadır.

1.3.1. Ulusal Düzeyde Yapılan Çalışmalar

Ündül ve Gürpınar (2003) Çokal Vadisindeki (Gelibolu) alüvyal zeminlerin sıvılaşma potansiyeli üzerine hazırladıkları çalışmada; Çokal vadisinde, inşa edilecek mühendislik yapılarının temel tasarımlarında, alüvyal çökellerin sıvılaşma riski değerlendirilmiştir.

Çetin ve Unutmaz (2004) zemin sıvılaşması ve sismik zemin davranışı başlıklı çalışmalarında; sıvılaşma analizinde takip edilmesi gereken aşamalardan bahsetmiş, zemin türlerinin sıvılaşabilirliği ve sıvılaşma olasılığının belirlenmesine yönelik yöntemleri incelemişlerdir.

Önalp ve diğ. (2006) Adapazarında sıvılaşan ve sıvılaşmayan zeminlerde yaptıkları çalışmalarla siletlerin içerisinde bulunan kil oranı yanısıra sıvılık indisi ve likit limitin de değerlendirilmesi gerektiğini belirtip YASS altındaki ince dane içeriklerinde sıvılaşmaya sebep olabilecek kriterleri belirlemişlerdir. Bunlar;

- Likit limitin %33' den az
- Sıvılık indisinin (IL) veya w_n/w_L oranının 0.9' dan büyük
- Kil oranının %10' dan düşük
- Ortalama dane boyutunun 0.02 mm' den büyük olmasıdır.

Bol ve diğ. (2006) ince taneli zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin konik penetrasyon testi ile değerlendirilmesi çalışmalarında; alüviyal/fluviyal zeminlerinde 1999 depreminde sıvılaşma oluşan ve oluşmayan sitelerde sondaj ve CPTU çalışmaları ile tespit edilen boşluk suyu basıncı artış ve azalışlarının zemin türünü tanımlamada ve sıvılaşma kriteri olarak kullanmada sağlayacağı avantajlar irdelenmiştir.

Karakaş ve Coruk (2010) Batı İzmit Havzası zeminlerinin sıvılaşma analizi, Turkey – Yapay Sinir Ağı (ANN) ve SPT tabanlı sıvılaşma analizleri ile inceleme alanının sıvılaşma potansiyelini belirlemiş ve oturma hesapları yapmışlardır. Elde edilen verileri ArcGIS uygulamasıyla haritalandırmışlardır.

Kavurmacı (2017) Aksaray İli'nde sıvılaşma riskinin belirlenebilmesi için farklı büyüklükte deprem senaryoları oluşturarak maksimum yatay yer ivmeleri hesaplamış ve CBS kullanarak Sıvılaşma risk haritaları oluşturmuştur.

Sert ve diğ. (2017) endüstri yapısı temeline yönelik vaka analizi başlıklı çalışmalarında; Sakarya'da mühendislik yapıları açısından problemlı zeminler üzerinde yapılması planlanan bir endüstri yapısının inşaaıyla zeminde oluşabilecek sorunların tespitine yönelik sıvılaşma analizi ve oturma hesaplamaları sonucunda zemin iyileştirmeye yönelik önerilerde bulunmuşlardır.

Akın (2019) Düzce kent merkezinde, sıvılaşma potansiyel indeksi yöntemi ve sıvılaşma şiddeti indeksi yöntemi kullanarak, farklı deprem senaryolarına göre CBS ortamında sıvılaşma haritaları hazırlamış ve sonuçları karşılaştırmıştır.

Gücek ve Zorluer (2020) Afyonkarahisar il merkezinde üç farklı senaryo deprem büyüklüğünde, SPT verileri kullanarak sıvılaşma analizleri yapmış, çalışma alanında risk durumunu belirleyip sıvılaşma risk haritası oluşturmuşlardır.

1.3.2. Uluslararası Düzeyde Yapılan Çalışmalar

Terzaghi (1925) boşluk suyu basıncının artmasıyla yarı kararlı bir yapıya sahip olan doymuş, kohezyonsuz zeminlerin akma oturmalarından bahsederek, sıvılaşmanın öncül tanımlarından birini yapmıştır.

Youd ve Perkins (1978) bölgesel sıvılaşma potansiyeli ve duyarlılık haritaları üzerinde durmuşlardır. Ishiara (1984, 1985) düşük kohezyonlu siltlerin, Youd ve diğ. (1985); Yegian ve diğ. (1994); Evans ve Seed (1987) çakıllı zeminlerin sıvılaşabileceğini ortaya koymuşlardır.

Killi zeminlerde Çin kriterlerinde killi zeminde $LL < \%35$, Kil Oranı $< \%15$, $w_n > 0.9LL$ ve $LI \leq 0.75$ koşullarının bir araya gelmesi sıvılaşmaya ortam hazırlamaktadır (Wang, 1979).

Tokimatsu ve Yoshimi (1983) SPT-N verilerine dayalı bir çözüm önermiş ve sıvılaşma potansiyelini güvenlik katsayısı ile açıklamıştır.

Bray ve Sancio (2006) Çin Kriterlerinin yetersiz kaldığını, I_p değerinin ince daneli zeminlerde sıvılaşma hassasiyeti için çok daha belirleyici olduğunu belirtmişler ve w_n / w_L değerini de kullanarak yeni bir sınıflandırma yapmışlardır.

Papathanassiou ve diğ. (2011) Yunanistan'da, Larissa kasabesindeki Teselya Ovasında sıvılaşma potansiyelini incelemişlerdir. SPT verileri ile sıvılaşma potansiyeli indeksi yolu ile analizler yapmışlardır. Sıvılaşabilir tabakaları tespit ederek haritalar oluşturmuşlardır.

Sharma ve diğ. (2013) Hindistan- Guwahati şehrinin sıvılaşma potansiyelini inceleyerek $M_w=7.5$ deprem büyüklüğünde sıvılaşma potansiyeli haritaları hazırlamışlardır.

Asad ve diğ. (2015) Bangladeş'te üç farklı ivme değerinde sıvılaşma potansiyeli varlığına yönelik analizler gerçekleştirmiş ve yüksek ivme değerinde sıvılaşma potansiyelinin de arttığını vurgulamışlardır. Zeminleri, sıvılaşabilir, marjinal sıvılaşabili ve sıvılaşamaz olarak sınıflandırıp, ArcGIS programı kullanarak haritalamışlardır.

Hsiao ve Zheng (2019) Tayvan'da The Love Nehri boyunca ince dane oranı, SPT-N, YASS, tabaka kalınlığı değerleri ile sıvılaşma potansiyeli ve sıvılaşma potansiyeli indeksi üzerine analizler gerçekleştirmiş sonuçları haritalandırmıştır.

Hossain ve diğ. (2019) Bangladeş'te dört farklı ivme değerinde sıvılaşma potansiyeli indeksi değerlendirerek zeminleri sıvılaşabili, marjinal sıvılaşabilir ve sıvılaşamaz şeklinde kategorize ederek sıvılaşmaya dayalı risk haritaları oluşturmuşlardır.

2. JEOLojİ VE TEKTONİK KONUM

2.1. Bölgesel Jeolojisi

Adapazarı Ovası jeolojisi ve morfolojisi KAF denetiminde gelişmiş ve şekillenmiştir. KAF etkisi ile bir araya gelen iki tektonik birim arasında kalan tektonik çöküntü, Geyve Boğazından geçerken enerjisini arttıran Sakarya Nehri ve kollarının depolama alanı haline gelmiştir. Bu iki tektonik birim; kuzeyde en üst seviyesinde volkanik ve volkano-sedimanter kayaların olduğu, yaşları Ordovisyen'den Eosen'e kadar uzanan tortul birimler, güneyde ise yaşları Kretase'den Eosen'e kadar uzanan metamorfik ve magmatik birimlerdir (Ulutaş ve diğ., 2010).

İnceleme alanını kapsayan Sakarya bölgesinin jeoloji haritası Şekil 2.1'de, bu alanda gözlenen formasyonlar Şekil 2.3'te stratigrafik olarak sıralanmıştır. İstifin tabanında; alt bölümleri şelf-yamaç, üst bölümleri şelf ortamını temsil eden Yılanlı Formasyonu (DCy), Orta-Üst Devoniyen-Alt Karbonifer yaşlı (Gedik ve Önalın, 2001) olup, kireçtaşı, dolomitik kireçtaşı ve dolomitten oluşur. Bunun üzerine açısız uyumsuz olarak, Üst Kanpaniyen-Alt Eosen yaşlı Çakraz Formasyonu (PTRç) gelir. Sığ denizden, derin denize kadar değişen ortamlarda çökelmiş olan birim; Çamurtaşı, kumtaşı ve konglomeradan oluşur (Akyol ve diğ., 1974). Çakraz Formasyonunu uyumsuz olarak örten Üst Kretase yaşlı Akveren Formasyonu (KTa); derin deniz ortamında çökelmiş marn, kiltası, silttaşı, killi kireçtaşı aralanması ile temsil edilmektedir (Gayle, 1959). Yığılca Formasyonu (Tçy), Alt-Orta Eosen yaşlıdır, mevcut volkanik kayaların aşınması ve taşınan malzeme ve yer yer volkanik aktiviteyle oluşan patlamalarla havzaya ulaşan malzemelerin çökmesiyle meydana gelmiştir. Andezit, bazalt, tuf, aglomera ve volkanojenik kumtaşından oluşmaktadır (Kaya, 1982). Çaycuma Formasyonu (Tç) derin deniz-Şelf ortamında çökelen birim Alt-Orta Eosen yaşlıdır ve kumtaşı, silttaşı, kiltası aralanmasından oluşmuştur (Tokay, 1954). Bölgede rastlanan en genç çökeller olan Örencik Formasyonu (Tör), karasal konglomera, kumtaşı, çamurtaşı aralanması ile temsil edilmektedir (Aydın ve diğ., 1987), Pliosen yaşlıdır ve akarsu ortamını temsil eder. Tüm bu birimlerin üzerini örten Kuvaterner yaşlı alüvyon üç farklı halde bulunur; Eski alüvyon yelpazesi (Qale), çakıl, kum, çamur çökellerinden oluşur. Ve yatak değiştiren akarsuların yakınlarında ve/veya az uzağında tatlı eğimli tepecikler halinde görülürler. Alüvyon yelpazesi (Qaly), akarsu kenarları ve

ovalarda görülen çakıl, kum, çamur çökelleridir. Alüvyon (Qal), akarsu yataklarında, eski çukurlar üzerine gelişmiş düz alanlardaki, çakıl, kum, çamur birikintileridir.

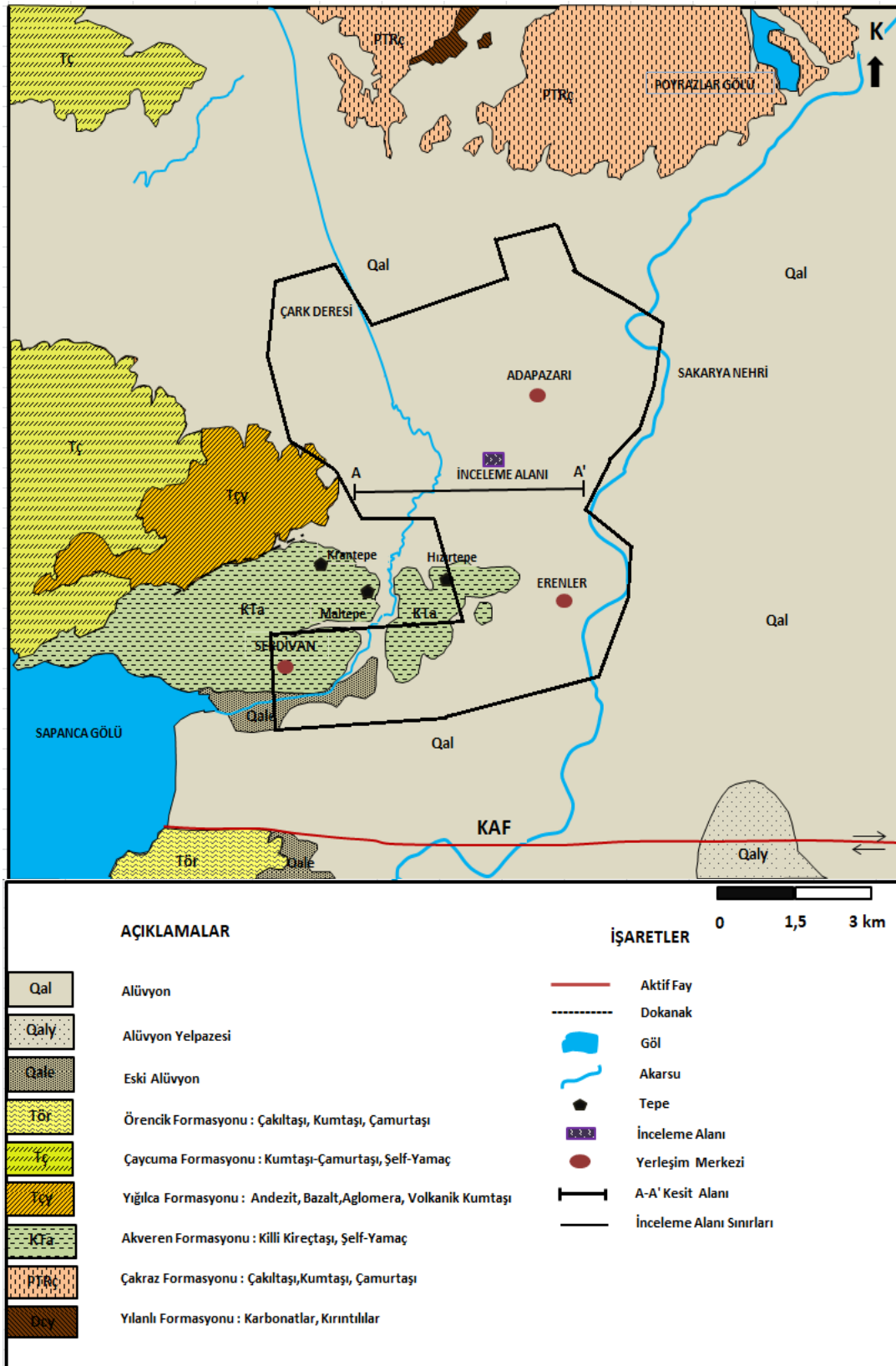
2.2. İnceleme Alanı Jeolojisi

Sakarya il merkezinin de bulunduğu Adapazarı Ovası içerisinde yer alan inceleme alanında jeolojik yapı eski çukurlar üzerine gelişmiş düz alanlardaki, çakıl, kum, çamur birikintilerinden oluşan alüvyon (Qal) olarak ayırtlanmıştır (Şekil 2.1). Bu birim, Sakarya ve Mudurnu nehirlerinin Güneyde bulunan yüksek kesimlerden taşıdığı malzemeyi biriktirmesi sonucu meydana gelmiştir. Tektonik birimlerin üzerini örten Kuvaterner yaşlı genç oluşum yeterince sıkışmamış olup tutturulmamış, gevşek kum, silt, kil ve yer yer çakıl aralanmaları halinde görülür.

Çok geniş alanlara yayılmış olan alüvyon, kalınlığı havza kenarlarından havza ortalarına doğru artar. Kent merkezinin kuzeydoğusunda Devlet Su İşleri (DSİ,1983) tarafından yapılan 200 metrelik sondajda kaya ortamına ulaşamamıştır. Komazawa ve diğ. (2001) yaptıkları jeofizik incelemede alüvyon kalınlığının yaklaşık 1000 m olduğunu ifade etmişlerdir.

Akarsuların havzaya ulaştığı havza kenarlarında çakıl boyutunda daneler daha yoğun iken havzanın ortasına doğru dane boyu kil boyutuna kadar küçültülmektedir. Kısa mesafelerde değişiklik gösteren zemin profilleri havzaya malzeme taşıyan akarsuların gücü doğrultusunda menderesler çizerek ilerlemesi ve rejim değişiklikleriyle açıklanabilir.

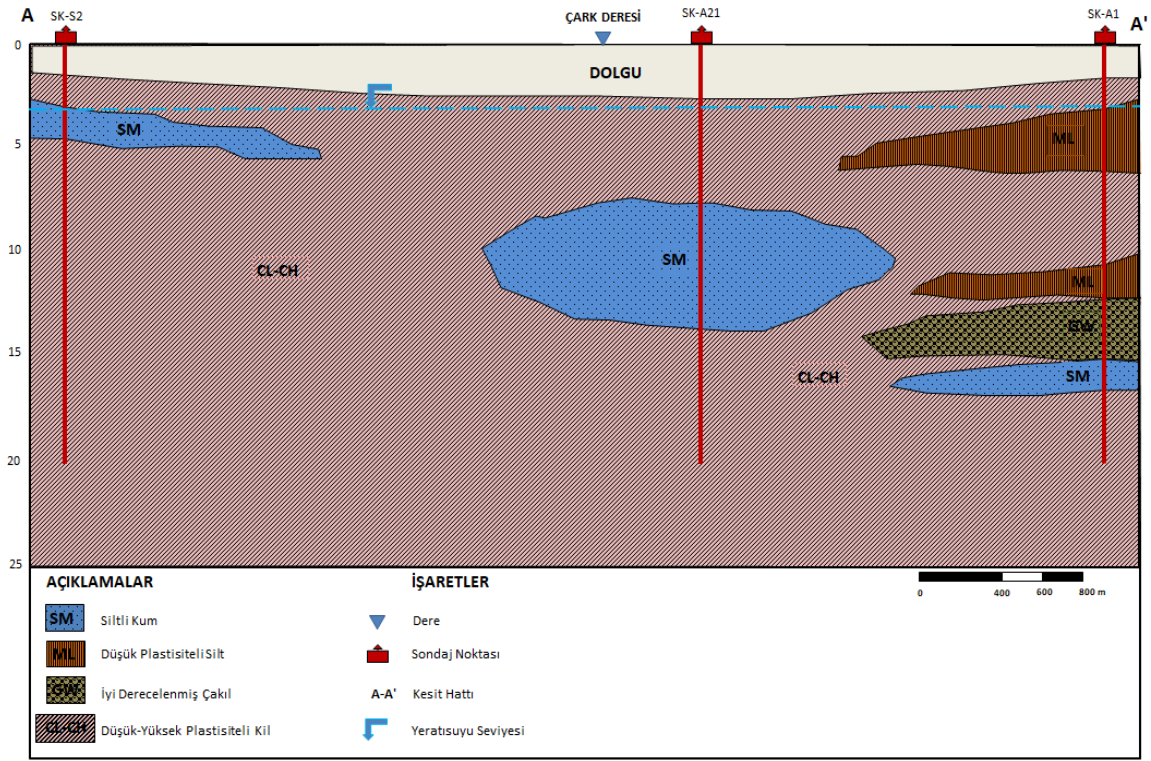
İnceleme alanında yapılan sondajlarda yaygın olduğu görülen ince daneli zeminlerin düşük-yüksek plastisiteli killer olduğu görülmüştür (Şekil 2.3). Bu da ana kayadan türeyen ince daneli zeminlerin uzun mesafede taşınmış olduğunu göstermektedir. Karasal ortamda akarsu tarafından biriktirme ile oluşan alüvyon zeminde iri daneli seviyelerin de bulunması ana kayaya yakın alanları ve suyun taşıma gücündeki değişimleri ifade etmektedir. İnceleme alanında yeraltı suyu seviyesi genel olarak yüzeye yakın olmakla birlikte, Çark Deresi ve Sakarya Nehri'ne doğru akış göstermektedir.



Şekil 2.1. İnceleme alanı da içeren bölge jeolojisi haritası (MTA, 1998'den değiştirilmiştir)

ÜST SİSTEM		SİSTEM		SERİ	FORMASYON	SİMGE	LİTOLOJİ	AÇIKLAMALAR
SENOZOYİK		KUVATERNER	Holosen	Alüvyon, AlüvyonYelpazes	Qal, Qay			Tutturulmamış iri bloklu iyi yuvarlanmış çakıl, kum, silt kil
		TERSİVER	Pliyosen	Örencik Form.	Tplö			Gevşek tutturulmuş, Konglomera, Kumtaşı, Kıltaşı
			Eosen	Yığılca Form.	Tey			Andezit, Bazalt, Tüf, Aglomera ve Volkanik Kumtaşı
MESOZOYİK		KRETASE	Üst Krease	Akveren Form.	KTa			Kireçtaşı, şeyl, kumtaşı, konglomera.
		PERMİYEN	TRIYAS	Çakraz Form.	PTRç			Şeyl, Çamurtaşı, Kumtaşı, Konglomera
PALEOZOYİK		KARBONİFER	Alt Karbonifer	Yılanlı Form.	DÇy			Kireçtaşı, Dolomitik Kireçtaşı Dolomit

Şekil 2.2. İnceleme alanını da içeren bölgenin stratigrafik kesiti



Şekil 2.3. Jeoloji haritası üzerinde A-A' hattı enine jeolojik kesiti

2.3. Tektonik Yapı

Sakarya ve çevresini tektonik gelişimi Paleotektonik ve Neotektonik dönemde kıta çarpışmaları ve dağ oluşumu gerçekleşmiştir (Yılmaz ve diğ., 1997; Yiğitbaş ve diğ., 2004). Su üzerine çıkan bölge karasal aşınım alanı haline dönüşmüştür. (Okay ve Görür, 1995; Görür ve diğ., 1995, 1997) Neotektonik dönemde ise KAF'ın gelişimi ile birlikte bölgenin günümüz morfolojisine dair ilk oluşumlar başlamıştır.

Kuzey Anadolu Fayı'nın doğrultu atımlı sağ yönlü bir fay zone olduğu, ilk kez 27 Aralık 1939 büyük Erzincan depreminden ($M=8$) ve onu izleyen 1942, 1943 ve 1944 depremlerinden sonra anlaşılmıştır (Ketin, 1948). Kuzey Anadolu Fayı da tek bir kırık düzlemi olmayıp birçok fay parçalarından oluşmuş bir fay zone, bir fay sistemi durumundadır (Şekil 2.4).

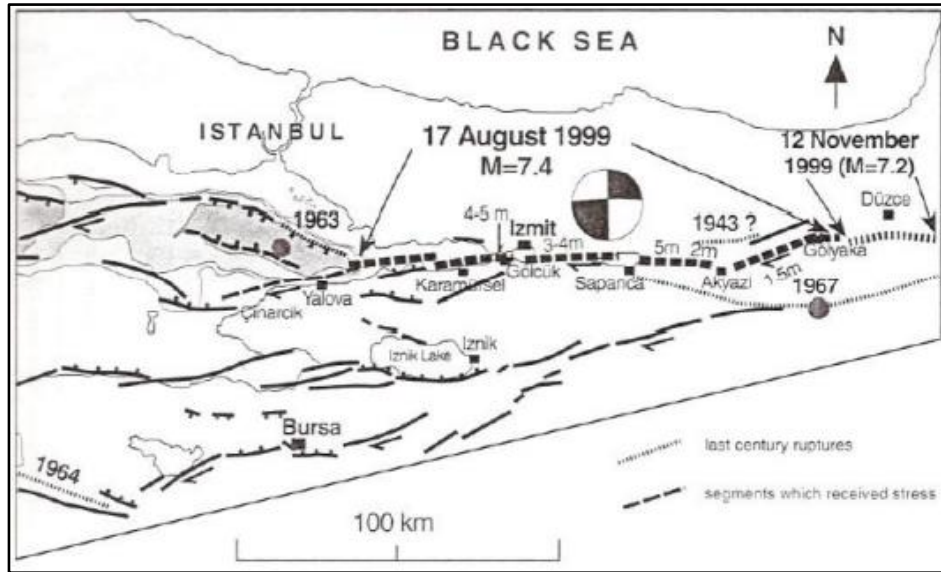
Yaklaşık 1600 km uzunluğunda olan sağ yanal doğrultu atımlı kıta içi transform nitelikli aktif bir levha sınırı (Şengör, 1979, 1980) olan KAF, Mudurnu'dan itibaren kuzey ve güney olmak üzere 2 ana kola ayrılır. Kuzey kol sismik açıdan en hareketli kısımdır. Adapazarı Ovası ile Sapanca Gölü bu kuzey kol üzerindeki segmentler

arasında gelişmiş çek-ayır havzalarıdır. İnceleme alanını da içinde bulunduğu çöküntü havzası Sakarya Nehri'nin ve kollarının biriktirme alanı haline gelmiş ve taşınan sedimentler ile gevşek, tutturulmamış çakıl, kum, kil ardalı ve oldukça kalın bir istifle dolmuştur. KAF denetiminde olan bu zemin üzerinde yeraltısuyu seviyesinin de yüzeye yakın olmasıyla bu araştırmaya konu olan sıvılaşma için ortam oluşmuştur.

2.4. Depremsellik

Alp-Himalaya deprem kuşağı üstünde yer alan Türkiye, aktif fayların kontrolü altında halen oluşumunu devam ettiren genç bir yapıya sahiptir. Sakarya İli de bu sistemin bir parçası olan Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ) içerisinde, halen aktif fayların denetiminde evrimini devam ettiren bir alanda kurulmuştur. İlin kuzey kesimi Avrasya Levhası, orta kesimi KAFZ, güney kesimi ise Anadolu Levhası içerisinde yer alır. İnceleme alanı için Avrasya ve Anadolu levhaları arasında uzun dönem GPS ölçümleri ile tanımlanan hareket yıllık 24.6 ± 2 mm/yıl'dır (Reilinger ve diğ., 2006).

Yakın geçmişte inceleme alanının bulunduğu Sakarya'yı etkilerken can ve mal kaybına yol açan 5 büyük deprem kaydı bulunmaktadır. Bunlar; 20.06.1943 Adapazarı Ovası $M_s=6.6$, 26/05/1957 Mudurnu Vadisi $M_s=7.1$, 22/11/1967 Mudurnu Vadisi $M_s=6.8$, 17/08/1999 Gölcük $M_s=7.4$, 12/11/1999 Düzce $M_s=7.1$ 'dir.



Şekil 2.4. Doğu Marmara Bölgesi'nde aletsel dönemde meydana gelen 1943, 1963, 1967 ve 1999 Depremlerinde oluşan yüzey kırıkları (Barka ve diğ., 2002)

20.06.1943 tarihinde Adapazarı ovasında, Hendek yakınlarında $M_s=6.6$ olan depremde bölgede yer alan köylerin çoğu kısmen ya da tamamen yıkılmıştır. Bu depremde 304 kişi yaşamını yitirmiş, 234 kişi yaralanmış, 10336 yapı zarar görmüştür (Eyidoğan ve diğ., 1991).

26.05.1957 tarihinde Mudurnu vadisinde yaşanan depremin maksimum şiddeti $MKS=IX$, büyüklüğü $M_s=7.1$ 'dir. Deprem 5000 yapının ağır hasar görmesine, 52 kişinin ölümüne ve 101 kişinin ise yaralanmasına neden olmuştur (Gencoğlu, 1986).

22.07.1967 tarihinde Mudurnu Vadisinde meydana gelen $M=6.8$ büyüklüğünde olan depremde 83 kişi ölmüştür. Depremde, çok sayıda ahşap ev tamamen yıkılmıştır. civarında, ana şok sırasında hasar görmüş binlerce ev, izleyen günlerde meydana gelen artçı depremler sonucu tamamen yıkılmıştır.

17 Ağustos 1999 Gölcük'te $M_w=7,4$ büyüklüğündeki oluşan depremde, resmi kayıtlara göre 17.480 ölü, 23.781 yaralı, 505 sakatlanma, 285.211 ev, 42.902 işyeri hasarı bilgilerine ulaşılır.

12.11.1999 Düzce Depremi $M_w=7.1$ büyüklüğündeki depremde, 710 kişi yaşamını yitirmiş, 2679 kişi yaralanmıştır. Can kaybı ve yapısal hasar en çok deprem kırığı üzerinde bulunan yerleşmeler ile Düzce'de meydana gelmiştir.

1999 Gölcük Depremi, en fazla Kocaeli, Sakarya ve Yalova illerini etkilemiş olup, yapılarda görülen ağır hasarın %29'u, orta hasarın %18'i ve hafif hasarın %23'ü Sakarya'da tespit edilmiştir. Bölge genelinde bu depremde hayatını kaybedenlerin %22'si Sakarya'dadır. İl bazında en fazla can ve mal kaybı merkez ilçe olan Adapazarı'nda olmuştur. Depremi olduğu tarihte ~300 bin nüfusuyla %90 oranında alüvyon üzerine yerleşmiş durumda olan Adapazarı İl merkezinde ölü sayısı 3891 olarak belirlenmiştir. Yapı stoğunun %34 oranında değişik derecelerde hasar görmüştür. Bu oranın %40'ı ağır hasar, orta hasar oranı ise %25 civarındadır (Sünbül ve diğ., 2007).

Aktif fayların denetimi altında olan, tarihi boyunca depremlerden etkilenen Sakarya'nın gelecekte olması muhtemel depremlerden mümkün olan en az zararla kurtulması için yapılacak uygulama ve çalışmalarda altlık olabilecek analizler yapılmıştır.

3. ZEMİNLERİN DİNAMİK YÜKLER ALTINDAKİ DAVRANIŞI

İnceleme Alanında yaşanan depremlerde yan yatma, çökme, devrilme vb. hasarlar zemin özelliklerinin de en az sismik hareket kadar önemli olduğunu göstermiş ve özellikle 1999 Gölcük-Düzce ve Tayvan'da 1999 Chi-Chi depremleri Sıvılaşmayı işaret etmiştir. Aynı durum 1964 yılında Niigata/Japonya depreminde de gerçekleşmiş ve araştırmacıları zemin özelliklerini incelemeye yöneltmiştir.

Türkiye tarihinde yaşanan geçmiş depremlerde de sıvılaşma olayı var olduğu bugün anlaşılrsa da ancak 1999 Gölcük depreminde uzmanların dikkatini çekebilmiştir. 1998 Adana Ceyhan depreminde Ceyhan Nehri boyunca ve 1999 Gölcük Depremi sırasında Adapazarı'nda, Sapanca Gölü'nün ve Kocaeli Körfezi'nin güney kıyılarında yaşanan hasarlar sıvılaşma ve etkilerinin tipik örnekleridir (Ulusay, 2010).

Sıvılaşma depremlerle birlikte oluşan çevrimli yüklerin etkisiyle zemin özellikleri arasındaki etkileşimin bir sonucudur.

3.1. Sıvılaşma

Suya doymun kohezyonsuz zeminlerde, dinamik yükler altında zeminde meydana gelen drenajsız deformasyonları tanımlayan sıvılaşma; tekrarlı yükler altında, gözenek suyu basıncının artışı ile zeminin makaslama dayanımını yitirmesi sonucu gelişen bir olaydır (Ulusay, 2000).

Statik ortamda zemini oluşturan tanecikler arasında tanelerin bir arada durmasını sağlayan ve ağırlıklarından kaynaklanan bir kuvvet bulunur. Tanelerin arasındaki boşluklarda da su ve hava bulunur. Ayrıca boşluklarda bulunan su da tanelere basınç yapar.



Şekil 3.1. Zemini oluşturan tanelerin statik ve dinamik ortamda birbirlerine göre durumu

Deprem esnasında açığa çıkan çevrimsel gerilmeler ile gevşek zeminlerde taneler yer değiştirme, yaklaşma eğilimi gösterirler. Böylece taneleri bir arada tutan kuvvet taneler arasında boşlukta bulunan suya aktarılır. Depremle birlikte oluşan bu makaslama gerilmeleri ve etkileri sebebiyle boşluklarda bulunan ve hareket edemeyen suyun basıncı artar. Dinamik ortamda basıncı artan su bu defa tanecikleri birbirinden ayırır ve zemini deforme eder. Tanecikleri bir arada tutan efektif gerilmenin azalması veya yok olması ile katı özellik gösteren zemin sıvı gibi davranarak akışkan hale geçer ve suyla birlikte yüzeye çıkar. Bu davranış biçimi sıvılaşma olarak tanımlanır.

Kohezyonsuz zeminlerde kayma direnci için;

$$s=(\sigma-u) \tan\phi=\sigma'\tan\phi \quad (3.1)$$

σ :toplam gerilme

σ' :efektif gerilme

u: boşluk suyu basıncı

bağıntısı incelendiğinde boşluk suyu basıncı artması ve toplam gerilmeye yaklaştıkça kayma direnci azaldığı görülür. Böylece deformasyon başlar. Suyu doygün kum ya da inorganik silte efektif gerilme sıfır olursa $u=\sigma$ ve kayma direnci sıfır olur, sıvılaşma oluşur.

Kısacası ve en anlaşılır hali ile tekrarlanan makaslama kuvvetleri etkisiyle boşluk suyu basıncının artması ve efektif gerilmenin azalmasıyla zeminin rijitliğini kaybederek katı davranıştan sıvı davranışa geçmesidir.

Zeminde oluşan sıvılaşma sonucu mühendislik yapıları, alt ve üst yapılar zarar görebilir. Yüzeyde meydana gelebilecek deformasyonlara aşağıdaki örnekler verilebilir;

- Karayollarında ve demir yollarında oturma, yanıl deformasyonlar,
- Viyadük ve köprülerde oturma, yıkılma
- Boru hatları, enerji nakil hatları gibi gömülü yapıların yüzeye doğru hareketi, bükülmesi, kopması,
- Heyelan meydana gelmesi
- Üst yapılarda, oturma, yan yatma, devrilme, gömülme, yıkılma, vb.

3.1.1. Sıvılaşmayı Etkileyen Faktörler

Youd (1984)'e göre jeolojik koşullar, zemin özellikleri ile deprem büyüklüğü ve süresi sıvılaşma potansiyeli değerlendirmelerinde etken parametrelerdir.

Jeolojik Koşullar

Sıvılaşma olayı her tür zeminde meydana gelmemekle birlikte, özellikle kum ve silt boyutundaki ince taneli malzemenin akarsu yatakları gibi alanlarda birikmesi ve henüz sıkışma işlemine uğramamasıyla oluşumunu henüz tamamlamamış, yeraltı suyu seviyesinin yüzeye yakın olduğu ortamlar sıvılaşma için uygun ortamlardır. Ayrıca bazı çakıllı kumlarda da sıvılaşma meydana gelebilmektedir (Ishihara, 1985).

Iwasaki ve diğ. (1982) jeomorfolojik özellikler açısından yaptığı sınıflandırmada; Güncel ve eski akarsu yatakları, bataklık bölgeler, su altında iken yeniden kazanılmış alanlar, ovalar Sıvılaşabilir; yelpazeler, kum barları, taşkın düzlükleri, plaj ve diğer düzlükler olası sıvılaşabilir; teraslar, tepeler ve dağlar (kaya zeminler) sıvılaşmaz olarak belirtilmiştir.

Yeraltı suyu seviyesi (YASS) de sıvılaşma potansiyeli açısından önemli bir kriterdir. YASS 20 metreden daha derinde olduğunda artık sıvılaşma beklenmez. Daha sığ derinliklerde özellikle Yüzeyden itibaren 10 metre derinliğe kadar daha fazla sıvılaşma beklenir.

Zemin Özellikleri

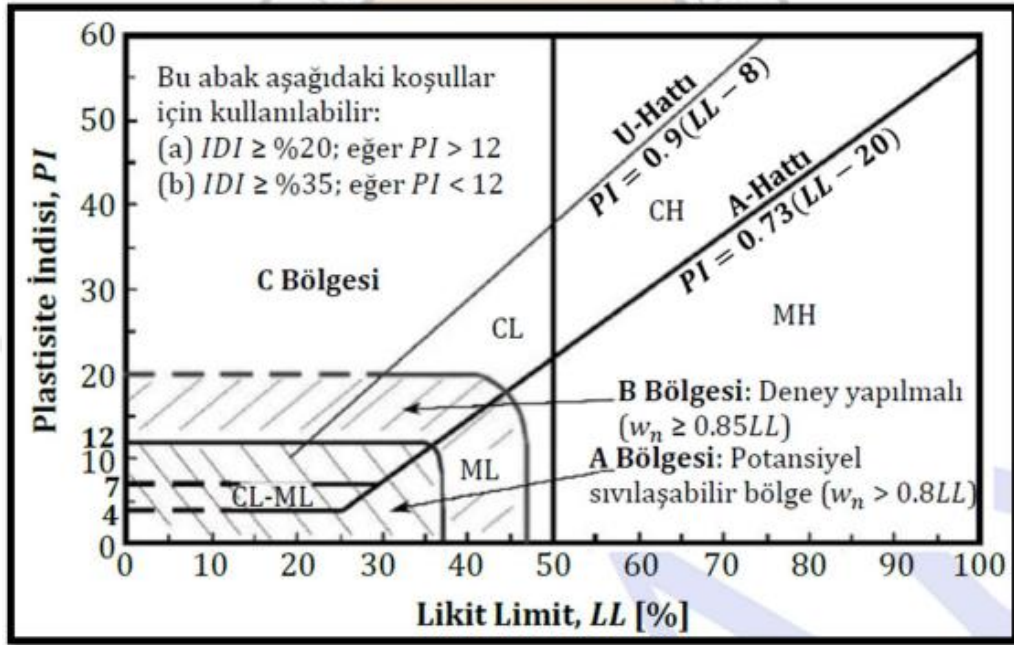
Sıvılaşma meydana gelebilmesi için siltli ya da killi malzemenin plastik olmaması ya da düşük plastisiteli olması ($PI \leq 10 - 12 \%$) koşulu sağlanmalıdır. Düşük plastisiteli silt ve siltli kumlar sıvılaşabilir özellik taşımaları ve boşluk suyu basıncının hızlı dağılımını engelleyebilecek kadar düşük geçirimsizlikleri sebebiyle en tehlikeli zemin türleridir.

Çin kriterlerine göre; Sıvılaşma oluşabilmesi için,

- Tane boyu 0,005 mm den ince < %15,
- Likit limit (W_L) < 35,

- Su içeriği (w_n) > 0,9 LL özelliklerinin bir araya gelmesi gereklidir.

Ancak zamanla sıvılaşma olması beklenmeyen zeminlerde de sıvılaşma yaşanması dolayısıyla Seed ve diğ. (2003) yeni bir diyagram hazırlamıştır.



Şekil 3.2. İnce taneli zeminlerde sıvılaşabilirlik özellikleri (Seed ve diğ., 2003)

Şekil 3.2' de grafik değerlendirildiğinde Seed ve diğ. (2003) yaklaşımına göre; plastisite indisi 12'den ve likit limiti (LL) 37'den küçük zeminler doğal su içerikleri (w_n) likit limitlerinin %80'inden fazla ise ($w_n = 0.8 \cdot LL$) potansiyel olarak sıvılaşabilir; plastisite indisi 12 ile 20, likit limiti 37 ile 47 arasında olan zeminlerde ise doğal su içeriği (w_n) likit limitlerinin %85'inden fazla olması halinde sıvılaşma potansiyeli tespiti için ayrıntılı inceleme gerektiği görülür.

Zamanla meydana gelen depremler ve yapılan araştırmalar sonucu Çin Kriterlerinde çeşitli güncellemeler yapılmıştır. Wang, (1981)'e göre yapılan aşağıda belirtilen değişikliklerle Çin Kriterlerine göre sıvılaşma ölçütleri güncellenmiştir;

- Doğal su içeriği (w_n) $\geq 0,9 LL$
- Likitlik (sıvılık) indeksi (LI) $\leq 0,75$
- SPT darbe sayısı (N_{60}) ≤ 4
- Tek eksenli sıkışma dayanımı (q_u) < 50 kPa

- Duyarlılık (hassasiyet) (S_t) > 4 ($S_t = q_u/q_m$; q_u : örselememiş örneğin tek eksenli sıkışma dayanımı, q_m : aynı su içeriğinde yoğurulmuş (örneğin tek eksenli sıkışma dayanımı).

İyi derecelenmiş zeminlerde farklı büyüklükteki daneler bir arada olduğundan boşluklarda bulunan daha küçük boyutlu daneler boşluk suyu basıncının artmasına izin vermeyerek sıvılaşma ihtimalini azaltmaktadır.

Zemini oluşturan tanelerin yuvarlak ya da köşeli olması da sıvılaşmada etkindir. Yuvarlak taneli zeminler dayanımlarını daha kolay yitirerek sıkışmaya daha yatkın olduklarından tekrarlı yükler altında sıvılaşma oranları köşeli taneli zeminlere göre yüksektir. Bu da alüvyon zeminleri işaret eder.

Sıvılaşmada bir diğer etken de zeminlerin sıklığıdır. Gevşek yapılı malzemeler sıkı malzemelere göre daha kolay yenileceğinden sıvılaşmaya daha yatkındır.

Deprem Büyüklüğü ve Süresi

Sıvılaşabilir özellikleri taşıyan bir zeminde sıvılaşma olabilmesi meydana gelecek tekrarlı ve ani gerilmeye bağlıdır. Bu yüzden ki depremin büyüklüğü ve süresi sıvılaşma için önemli bir diğer kriterdir.

3.1.2. Sıvılaşmanın Sebep Olduğu Zemin Deformasyonları

Sıvılaşmanın sebep olduğu zemin deformasyonları zeminin taşıma gücünü yitirmesi, oturma, zemin salinimi, yanal yayılma, akma sıvılaşması şeklinde gelişir, zemine ve zemin içindeki veya üzerindeki yapılara zarar verirler.

Zeminin Taşıma Gücünü Yitirmesi

Sıvılaşan zemin dayanımını kaybederek yüzeye doğru hareket ederken üzerindeki yükleri karşılayamaz. Böylece yüzeyde yapılarda öne veya geriye yatma, devrilme gibi deformasyonlar gelişir (Şekil 3.3 (a)). Gömülü yapılar da yüzeye doğru yönelir, kırılır ya da bükülür.

Oturma

Sıvılaşılan zemininin yüzeyde düşey yönde yer değiştirmesidir (Şekil 3.3 (b)).

Zemin Salınımı

Sığ zeminin parçalara ayrılması ve bu bölümlerin ileriye geriye salınımı ve sürüklenmesine zemin salınımı denir. Yüzeyde açılıp kapanmalar ve oturmalara sebep olur (Şekil 3.3 (c)).

Yanal Yayılma

Yanal yayılma genellikle düşük eğimli (%0,3-5), su tablasının yüzeye yakın olduğu ve gevşek kumların bulunduğu yamaçlar boyunca veya nehir yatağı, göl veya deniz kıyısı gibi harekete engel olmayacak serbest yüzeylere komşu konumlu yamaçlarda gelişir (Bartlett ve Youd, 1992) (Şekil 3.3 (d)).

Akma Sıvılaşması

Akma sıvılaşması düşük artık (rezidüel) dayanıma sahip bir zeminde statik dengenin dinamik yükler tarafından ortadan kaldırılması sonucu gelişen bir davranış biçimidir. 3'' den daha yüksek eğimli yamaçlarda gevşek ve suya doymuş kumlar veya siltli kumlarda gelişir. Sıvılaşılan zeminde olabileceği gibi sıvılaşılan zemin üzerinde bulunan daha sağlam zeminde de yaşanabilir. Akma heyelanı genellikle kıyı kesimlerde gelişir. Bu harekete örnek olarak 1999 depreminde Değirmendere'de kısmen akma sıvılaşması kısmen depremin tetiklemesiyle su altı heyelanı gelişmiştir (Kiper ve Arel, 2000; Ulusay ve diğ., 2001; Çetin ve diğ., 2004; Aydan ve diğ., 2008) (Şekil 3.3 (e-f)).



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

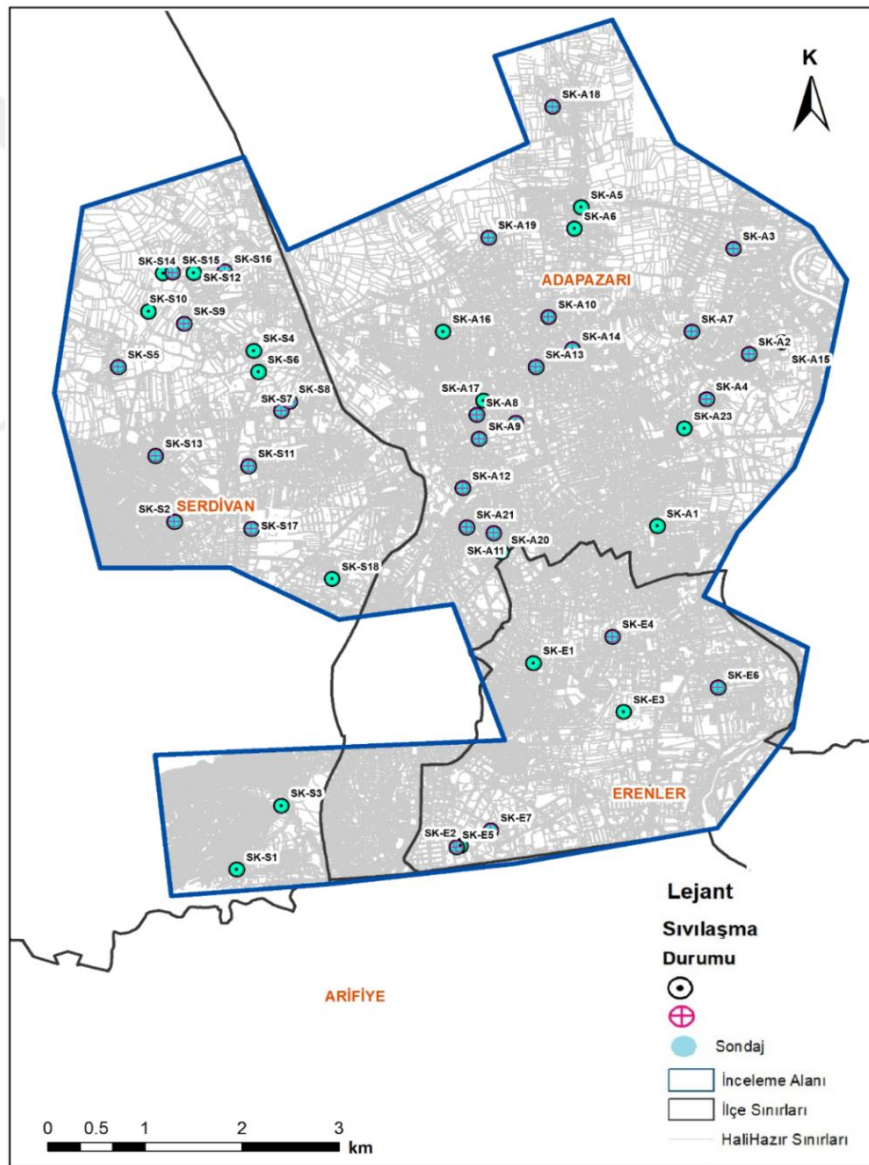


(f)

Şekil 3.3. Sıvılaşmanın yüzeyde meydana getirdiği hasarlardan örnekler

4. MALZEME VE YÖNTEM

İnceleme alanı özellikle 1999 Gölcük depreminde yoğun hasarların yaşandığı, sıvılaşma olayının etkisiyle binalarda ve alt yapıda oturma, devrilme, gömülme gibi olayların yaşandığı, yerleşimin yoğun olduğu alüvyon çökellerden oluşan zeminler seçilmiştir. İnceleme alanı sınırları içinde yer alan ve sıvılaşma analizlerinde kullanılan sondaj noktalarının konumları Şekil 4.1’de görülmektedir. Tez içeriğinde Adapazarı İlçesi sınırlarındaki sondajlar A, Serdivan İlçesi sınırlarındaki sondajlar S ve Erenler İlçesi sınırlarındaki sondajlar ise E harfi ile sembolize edilmiştir.



Şekil 4.1. İnceleme alanı içinde yer alan sondaj noktaları lokasyon haritası (SK-A: Adapazarı sondajları, SK-S: Serdivan sondajları, SK-E: Erenler sondajları)

Bu çalışmada Sakarya İlinde faaliyet gösteren özel zemin araştırma firmalarından temin edilen Adapazarı İlçesi'nde 23, Erenler İlçesinde 8, Serdivan İlçesi'nde 18 olmak üzere toplam 49 adet Jeolojik-Jeoteknik Etüt raporlarına ait sondaj ve laboratuvar verileri kullanılmıştır. Sondaj noktalarına ait koordinat bilgileri Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1. Sondaj noktalarına ait ondalık derece koordinat bilgileri

SK. ADI	KOORDİNATLAR		SK. ADI	KOORDİNATLAR		SK. ADI	KOORDİNATLAR	
	X	Y		X	Y		X	Y
SK-A1	40.768813	30.415270	SK-A18	40.809295	30.402771	SK-S4	40.785874	30.366111
SK-A2	40.785342	30.426563	SK-A19	40.796693	30.394858	SK-S5	40.784375	30.349595
SK-A3	40.795534	30.424745	SK-A20	40.766338	30.396262	SK-S6	40.783838	30.366688
SK-A4	40.781018	30.421352	SK-A21	40.768762	30.392036	SK-S7	40.780051	30.369462
SK-A5	40.799586	30.406182	SK-A22	40.778822	30.398115	SK-S8	40.780963	30.370463
SK-A6	40.797533	30.405346	SK-A23	40.778203	30.418639	SK-S9	40.788520	30.357657
SK-A7	40.787543	30.419605	SK-E1	40.755639	30.400075	SK-S10	40.789735	30.353316
SK-A8	40.779594	30.393311	SK-E2	40.738053	30.391077	SK-S11	40.774753	30.365430
SK-A9	40.777291	30.393594	SK-E3	40.750882	30.411078	SK-S12	40.793394	30.358845
SK-A10	40.789026	30.402134	SK-E4	40.758142	30.409767	SK-S13	40.775766	30.354093
SK-A11	40.768198	30.395323	SK-E5	40.737896	30.390624	SK-S14	40.793380	30.355124
SK-A12	40.772536	30.391560	SK-E6	40.753206	30.422577	SK-S15	40.793463	30.356275
SK-A13	40.784204	30.400565	SK-E7	40.739515	30.394796	SK-S16	40.793557	30.362656
SK-A14	40.785921	30.405064	SK-E8	40.743030	30.414240	SK-S17	40.768721	30.365757
SK-A15	40.786466	30.430608	SK-S1	40.735830	30.363787	SK-S18	40.763838	30.375575
SK-A16	40.787650	30.389260	SK-S2	40.769438	30.356395			
SK-A17	40.780973	30.394142	SK-S3	40.741975	30.369253			

Alüvyon zeminler içinde açılmış sondajlar yardımıyla farklı derinliklerde alınmış örselenmiş (D) ve örselenmemiş (UD) numunelere göre zeminlerin özellikleri belirlenmiştir. Elde edilen verilerle hâkim zeminin jeolojik özellikleri, yeraltı suyu durumu ve zemine ait mühendislik özellikleri incelenmiştir.

LiquefyPro (CivilTech, 2002) programı kullanılarak zeminde sıvılaşma potansiyeli belirlenmiş, (Ishihara/Yoshimine) ve (Tokimatsu/Seed) yöntemlerine göre $M=7.5$ büyüklüğünde deprem ve Tablo 4.2'de verilen 3 farklı yer ivmesi kullanılarak oturma analizleri yapılmıştır. 18 Mart 2018 tarih ve 30364 sayılı Resmî Gazete' de yayımlanarak 1 Ocak 2019 tarihinde yürürlüğe giren Türkiye Deprem Tehlike Haritası'nda, Sakarya ili PGA 475 (yıl) periyodunda en büyük ivme değeri 0.3-0.7 g arasında değişmektedir. Bu durum dikkate alınarak bölgede oluşacak farklı deprem büyüklüklerinde ortaya çıkabilecek farklı ivme değerlerini göz önünde bulundurmak amacıyla 1999 Gölcük Depreminde kaydedilen en büyük yer ivmesi olan 0,415 g değeri

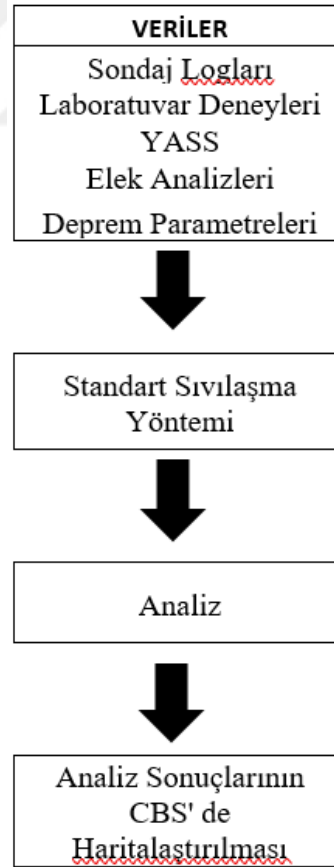
ve bu değerin %20 eksiği 0,332 g ve %20 fazlası 0,498 g olmak üzere 3 farklı senaryo ivme değerlerinde (Tablo 4.2) sıvılaşma analizi yapılmıştır.

Tablo 4.2. Analizlerde kullanılan yer ivmesi değerleri

Yer ivmesi (g)	AÇIKLAMALAR
0,415	1999 Depreminde tespit edilen en yüksek yer ivmesi
0,332	$0,415-(0,415*20/100)$
0,498	$0,415+(0,415*20/100)$

Analizler sonucu elde edilen sıvılaşma potansiyeli ve oturma değerleri CBS ortamında ArcGIS programı vasıtasıyla haritalanmıştır.

Bu çalışma kapsamında; inceleme alanında sıvılaşma analizine yönelik izlenen yol Şekil 4.2' de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Çalışmanın aşamalarını gösterir şema

4.1. SPT'ye Dayalı Basitleştirilmiş Sıvılaşma Analizi

Sıvılaşma analizi için farklı yöntemler geliştirilmiştir. Bunlardan bazıları;

- SPT'ye dayalı analiz yöntemi,
- CPT'ye dayalı analiz yöntemi
- Makaslama dalga hızına dayalı analiz yöntemi,
- Becker Penetrasyon deneyine dayalı analiz yöntemi,
- Örselenmemiş numuneler üzerinde yapılan laboratuvar verilerine dayalı analiz yöntemidir.

Bu çalışmada LiquefyPro (CivilTech, 2002) Programı ile yerel zemin özellikleri, en büyük yer ivmesi ve deprem büyüklüğü verileri de eklenerek Youd ve diğ. (2001) yöntemiyle SPT-N₃₀ verilerine dayalı sıvılaşma analizi yapılmıştır. İlk etapta sondajlardan elde edilen zemin numuneleri üzerinde laboratuvarda yapılmış elek analizi sonuçlarına göre iri daneli zeminler (kum, çakıl) için SPT-N₃₀ vuruş sayıları kullanılarak sıvılaşma analizi yapılmıştır. Bu yöntemde; deprem sırasında meydana gelen bir çevrimsel kayma gerilmesi oranı (CSR) ile zeminin sıvılaşmaya karşı göstereceği direnç (CRR) kullanılarak hesaplanır.

4.1.1. CSR Değeri

Depremi neden olacağı tekrarlı gerilme oranı Denklem (4.1)'de ifade edilmektedir;

$$CSR = 0,65(a_{max}/g)(\sigma_v / \sigma'_v) r_d \quad (4.1)$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır. Bu formül Seed ve Idriss (1971) tarafından oluşturulmuş ve son olarak NCEER 1996 sıvılaşma çalıştayında güncellenmiştir. Burada;

a_{max} : deprem tarafından oluşturulan ve yüzeye en yakın yer ivmesi,

g : yer çekimi ivmesi,

σ_v : toplam düşey (normal) gerilme,

σ'_v : etkin (efektif) düşey gerilme,

rd : gerilme azaltma katsayısını ifade eder.

(rd): Gerilme azaltma katsayısıdır. İncelenen derinliğe (z) bağlı olarak aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$\begin{aligned} rd &= 1.0 - 0.00765 \cdot z & z \leq 9.15 \text{m} \\ rd &= 1.174 - 0.0267 \cdot z & 9.15 \text{m} < z \leq 23 \text{m} \\ rd &= 0.744 - 0.008 \cdot z & 23 \text{m} < z \leq 30 \text{m} \\ rd &= 0.50 & z > 30 \text{m} \end{aligned}$$

4.1.2. CRR Değeri

Burada ifade edilen Çevrimsel kayma mukavemeti oranı olan CRR değeri $M=7.5$ büyüklüğündeki depremler için kullanılmaktadır ve 3 basamaklı hesaplamada elde edilir.

SPT-N Arazi Verilerinde Düzeltme

Arazide elde edilen ham SPT-N vuruş sayıları aşağıda Denklem (4.2) ve Denklem (4.3)'te verilen düzeltme faktörleriyle düzeltilerek $(N1)_{60}$ değeri elde edilir.

$$N_{60} = N \cdot C_R \cdot C_S \cdot C_B \cdot C_E \quad (4.2)$$

$$(N1)_{60} = N_{60} \cdot C_N \quad (4.3)$$

Burada;

N : Araziden elde edilmiş SPT darbe sayısı,

C_N : Örtü yükü düzeltme katsayısı,

C_R : Tij boyu düzeltme katsayısı,

C_S : Numune alıcı düzeltme katsayısı,

C_B : Sondaj delgi çapı düzeltme katsayısı,

C_E : Enerji verimliliği düzeltme katsayısı,

$(N1)_{60}$: Düzeltilmiş SPT vuruş sayısı.

Tablo 4.3. SPT-N değerleri için düzeltme katsayıları (Youd ve Idriss, 1997)

Faktör	Terim	Alet değişkeni	Düzeltilme
Örtü Yükü Basıncı	C_n	σ'_0 = Efektif düşey yük basıncı (ton/ft ²) 100 kpa=1,044 ton/ft ²	$C_n = \sqrt{1/\sigma'_0}$ $0.4 \leq C_n \leq 1.7$
Enerji Oranı	C_e	Güvenli çekiç Donut çekiç Otomatik düşülü	0.60 – 1.17 0.45 – 1.00 0.9 – 1.6
Sondaj Kuyusu Çapı	C_b	65 mm – 115 mm 150 mm 200 mm	1.0 1.05 1.15
Sondaj Tiji Uzunluğu	C_r	3 m- 4 m 4m -6 m 6 m- 10 m 10 m- 30 m > 30 m	0.75 0.85 0.95 1.0 <1.0
Numune Alma Yöntemi	C_s	Standart Numune Alıcı Standart Olmayan Numune Alıcı	1.0 1.2

Zeminin İnce Dane Oranında (FC) Düzeltme

İri taneli zeminler içerisindeki ince dane oranı arttıkça SPT değerleri azalmakta, zeminin tekrarlı yükler altında kayma direnci artmaktadır. Bu nedenle ince dane içeren zeminlerde $(N_1)_{60}$ değerleri Seed ve Idriss (1997) formülü ile ince dane içeriğine göre eşit ölçüde temiz kum değerlerine $(N_1)_{60,cs}$ çevrilir.

$$(N_1)_{60,cs} = \alpha + \beta(N_1)_{60} \quad (4.4)$$

$$(FC) \leq \%5$$

$$\alpha=0; \beta=1.0$$

$$\%5 < FC < \%35$$

$$\alpha = \exp[1.76 - 190/(FC)^2] ; \beta = [0.99 + (FC/1000)]^{1.5}$$

$$FC \geq 35$$

$$\alpha=5.0 ; \beta=1.2$$

$$(N_1)_{60f} = \text{düzeltilmiş SPT-N değeri}$$

FC = ince tane oranı (%)

CRR_{7,5} Değerinin Hesaplanması

Blake (1997)'nin geliştirdiği aşağıdaki formül CRR_{7,5} değerine ulaşılır.

$$CRR_{7,5} = \frac{a + c \cdot x + e \cdot x^2 + g \cdot x^3}{1 + b \cdot x + d \cdot x^2 + f \cdot x^3 + h \cdot x^4} \quad (4.5)$$

x: (N₁)_{60f}

a:0.048

b:-0,1248

c:-0.004721

d:0.009578

e:0.0006136

f:-0.0003285

g:-1.673.10⁻⁵

h:3.714.10⁻⁶

4.1.3. Güvenlik Faktörü (FS)

CRR/CSR değeri ile sınılaşmaya karşı güvenlik katsayısı (FS) hesaplanır.

$$FS = CRR_m / CSR_{fs} \quad (4.6)$$

FS < 1 koşulunda sınılaşma olasıdır. Bu durumda herhangi bir mühendislik uygulaması önesinde iyileştirme çalışması yapılması gereklidir.

FS ≥ 1 koşulunda sınılaşma olası değildir. Bu durum ise mühendislik uygulamalarında aranan ortamdır.

4.2. Oturma Hesabı

LiquefyPro (CivilTech, 2002) Programı ile doygun kumlarda ve kuru kumlarda oturma

hesabı yapılmaktadır. Sonuçta kuru ve doymun kumlarda oluşan oturma miktarının toplamı alınır.

4.2.1. Doymun Kumlarda Oturma Hesabı

Doymun kumlarda farklı iki yöntemle göre oturma hesabı yapılmaktadır.

Tokimatsu ve Seed (1987) Yöntemi

LiquefyPro programında sıvılaşma sonrası suya doymun kumlar için Tokimatsu ve Seed (1987) yöntemine göre yapılan oturma hesabında her tabaka için hacimsel birim deformasyonu ve tabakanın kalınlığı değerleri kullanılır.

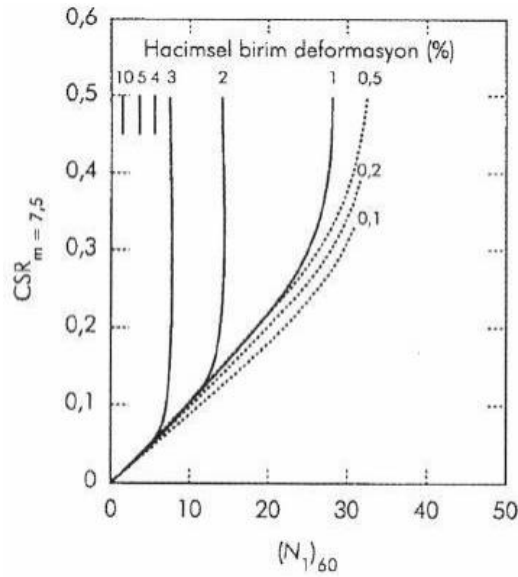
$$S_{\text{doymun}} = (\varepsilon_c / 100) \cdot dz \quad (4.7)$$

S_{doymun} = suya doymun zemindeki oturma (cm)

ε_c = hacimsel deformasyon (%)

dz = zemin tabakasının kalınlığı (cm)

Hacimsel birim deformasyon Burada hacimsel deformasyon CSR ve $(N_1)_{60}$ değerleri kullanılarak grafikten okunur (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. CSR ve düzeltilmiş SPT değerlerine göre hacimsel deformasyonlar

Ishihara ve Yoshimine (1992) Yöntemi

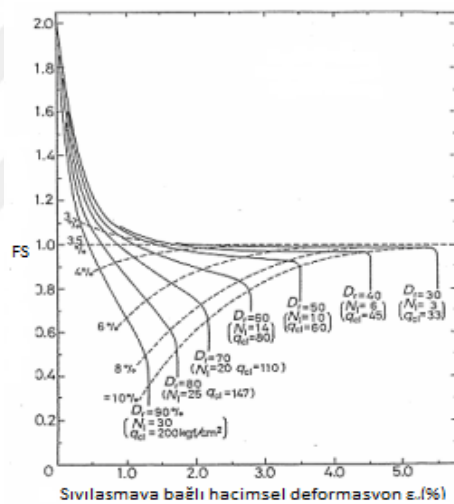
Ishihara and Yoshimine .yöntemine göre yapılan hesaplamada oturma miktarını bulmak için öncelikle $(N_1)_{60}$ değerleri tablo 4.3'e göre (D_r) değerlerine çevrilir. Şekil 4.4'e göre hacimsel deformasyon (ϵ_v) , güvenlik katsayısı (FS) ve zeminin relatif sıkılığı (D_r) kullanılarak bulunur. Hacimsel birim deformasyonun tabakanın kalınlığı ile çarpılmasıyla oturma miktarına ulaşılır.

$$S_{\text{doygün}} = (\epsilon_v / 100).dz \quad (4.8)$$

$S_{\text{doygün}}$ = suya doygün zemindeki oturma (cm)

ϵ_v = Hacimsel deformasyon (%)

dz = zemin tabasının kalınlığı (cm)



Şekil 4.4. Sıvılaşma sonrası güvenlik katsayısı ve sıkılığa bağlı hacimsel deformasyon ilişkisi (Ishihara, 1993)

Tablo 4.4. $(N_1)_{60}$, D_r (%), q_{cl} (kgf/cm²) arasındaki bağıntı

$(N_1)_{60}$	D_r (%)	q_{cl} kgf/cm ²
3	30	33
6	40	45
10	50	60
14	60	80
20	70	110
25	80	147
30	90	200

4.2.2. Kuru Zeminlerde Oturma Hesabı

Kuru zeminlerde, oturma hesaplamalarında 6 aşamalı bir yol izlenir.

1.Aşama:SPT Verisini Kullanılarak Kayma Modülü Hesabı

$$G_{\max}=10 \sqrt[3]{(N1)_{60}} \cdot \sqrt{2000 \cdot \sigma'_m} \quad (4.9)$$

$$\sigma'_m = (1+2 K_0) / 3 \cdot \sigma'_0 = 0,65 \cdot \sigma'_0 \quad (4.10)$$

$G_{\max}$ =Maksimum Kayma Modülü (tsf)

K_0 =Yatay yer Basınç katsayısı (0,47)

σ'_0 =Efektif düşey gerilme (tsf)

σ'_m =Efektif çevre basıncı

2.Aşama: Kayma Deformasyonu-Kayma Modülü Oranı

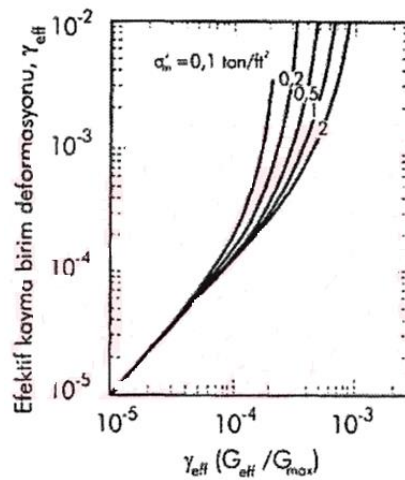
$$\gamma_{\text{eff}}(G_{\text{eff}}/G_{\max}) \cdot f_s = 0,65 \cdot (\sigma'_0 / G_{\max}) \cdot a_{\max} \cdot r_d \cdot f_s = \text{CSR}_{f_s} \cdot (\sigma'_0 / G_{\max}) \quad (4.11)$$

$G_{\max}$ =Maksimum Kayma Modülü (tsf)

f_s = Kullanıcının tarafından belirlenecek güvenlik faktörü

CSR= Çevrimsel gerilme oranı

3.Aşama: Efektif Kesme Deformasyonu

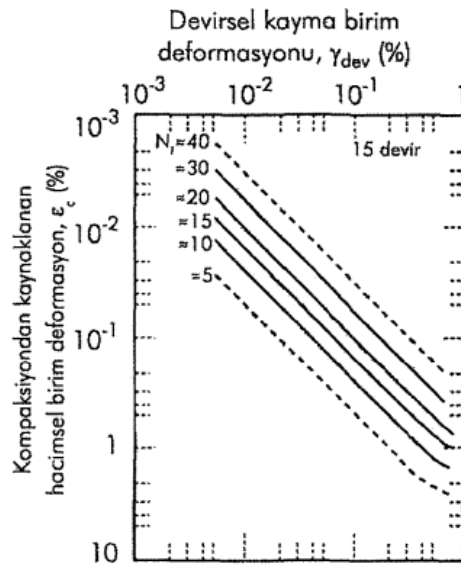


Şekil 4.5. Kesme deformasyonu grafiği (Tokimatsu ve Seed, 1987)

Bu aşamada Şekil 4.5'teki grafikte efektif kesme deformasyonunun, kesme deformasyonu ve kesme modülü kullanılarak kontrolü sağlanır.

4.Aşama: Hacimsel Deformasyon

Bu aşamada γ_{eff} değeri ve düzeltilmiş SPT verileri olan $(N_1)_{60}$ değerleri kullanılarak Şekil 4.6'da yer alan grafik yardımıyla $\epsilon_{c7.5}$ hesaplanır.



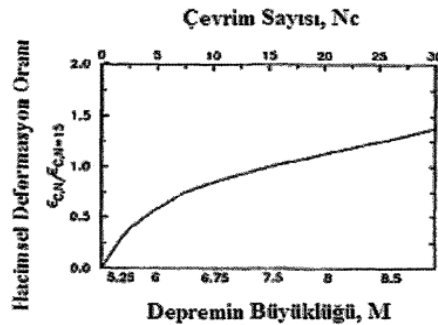
Şekil 4.6. Hacimsel deformasyon grafiği (Tokimatsu ve Seed, 1987)

5.Aşama: Hacimsel Deformasyonun Manyetüd Düzeltmesi

$\epsilon_{c7.5}$ değeri ile manyetüd deformasyon oranı çarpımı ϵ_c değerini verir.

$C_{\epsilon c}$ =Düzeltme Faktörü

$$\epsilon_c = C_{\epsilon c} \epsilon_{c7.5} \quad (4.12)$$



Şekil 4.7. Manyetüd düzeltme faktörü (CivilTech, 2002)

6.Aşama: Kuru Zeminde Deprem Kaynaklı Oturma S_{kuru}

Son olarak tabaka kalınlığı da dikkate alınarak kuru oturma hesabı yapılır.

$$S_{kuru}=(2\varepsilon_c/100).d_z \quad (4.13)$$

ε_c =Hacimsel deformasyon (%)

d_z =Zemin tabakasının kalınlığı (cm)

2= Katsayı

4.2.3. Toplam Oturma

YASS toplam oturma konusunda dikkat edilmesi gereken önemli unsurdur.

YASS altında suya doygun bir tabaka için toplam oturma;

$$\sum_{en alt}^{YAS} S_{doygun} \quad (4.14)$$

YASS üzerinde kuru bir tabaka için toplam oturma hem kuru kısım hem de YASS altında kalan doygun kısım için belirlenen oturma miktarlarının toplamına eşit olacaktır.

$$S_{toplam}=\sum_{en alt}^{YAS} S_{doygun} + \sum_{YAS}^d S_{kuru} \quad (4.15)$$

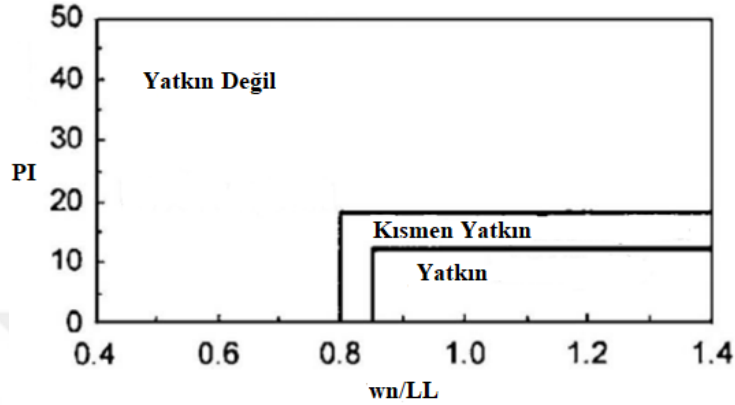
4.3. İnce Daneli Zeminlerde Sıvılaşmaya Yatkınlık

İnceleme alanında kum ve çakıl zeminlerin yanı sıra diğer hâkim zemin türü olan killi birimlerin sıvılaşmaya yatkınlığını değerlendirmek üzere killi zeminlerin fiziksel özellik verileri ışığında Bray ve Sancio (2006) kriterleri kullanılmıştır. Bray ve Sancio (2006) günümüze yakın zamanda gerçekleşen yıkıcı depremlerin özellikle de 1999 Gölcük ve 1999 Chi Chi depremlerinde ince dane zeminler için oluşturulan Çin Kriterlerinin yetersiz kaldığını I_p değerinin ince daneli zeminlerde sıvılaşmaya yatkınlık için çok daha belirleyici olduğunu belirtmişlerdir ve w_n / w_L değeri ile yapmış oldukları sınıflandırmayı;

$$I_p \leq 12 \text{ ve } w_n \geq 0,85 w_L \quad \text{Sıvılaşmaya yatkın}$$

$12 < I_p < 18$ ve $w_n \geq 0,80 w_L$	Sıvılaşmaya kısmen yatkın
$I_p > 18$ ve $w_n < 0,80 w_L$	Sıvılaşmaya yatkın değil

şeklinde ifade etmişler ve Şekil 4.8’de sunulan grafiği oluşturmuşlardır.



Şekil 4.8. İnce daneli zeminlerde sıvılaşma yatkınlığı grafiği (Bray ve Sancio, 2006)

4.4. Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi (PL) Metodu

Zemin sıvılaşmasıyla zemin ve yapıda meydana gelen hasarlar sıvılaşmanın derecesinin şiddetiyle ilişkilidir. Sıvılaşma analiz yöntemleri ile elde edilen güvenlik katsayısı (FS) sıvılaşmaya karşı direnci tanımlayabilmekte ancak geniş alanlar için göreceli bir değerlendirmede yetersiz kalmaktadır (Ulusay, 2010). Bu yüzden Iwasaki ve diğ. (1982) sıvılaşma potansiyeli indeksi sıvılaşma derecesinin şiddetini tanımlayan bir bağıntı oluşturmuşlardır. Bu bağıntı iri daneli zeminlerin sıvılaşma analizi ile elde edilen FS değerleri kullanılarak sıvılaşmanın yüzeydeki etki derecesini çok düşük potansiyel, düşük potansiyel, yüksek potansiyel ve çok yüksek potansiyel aralığında ortaya koyar.

Sıvılaşma Potansiyel İndeksi Iwasaki ve diğ. (1982)’nin yapmış olduğu çalışmada;

$$PL: \int_0^{20} F \cdot w(z) \cdot dz \quad (4.16)$$

$$F=1-F_L \quad F_L < 1,0$$

$$F=0 \quad F_L \geq 1,0$$

$$w(z)=10-0,5 z \quad z \leq 20 \text{ m için}$$

P_L : Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi FL : Sıvılaşmaya karşı Güvenlik Katsayısı

z : Derinlik

$w(z)$: Derinliğe bağlı ağırlık fonksiyonu

olarak hesaplanmaktadır. Sıvılaşabilir tabakaların derinliği ve güvenlik katsayısı dikkate alınarak yüzeyden 20 m derinliğe kadar bu yöntem ile sıvılaşma potansiyeli indeksi hesaplamak mümkün olurken 20 m den fazla derinlikte hesaplama yapılamamaktadır. Çalışma sonucunda P_L sınıflaması yapmışlardır.

$15 < P_L$ Çok Yüksek Potansiyel

$5 < P_L \leq 15$ Yüksek Potansiyel

$0 < P_L \leq 5$ Düşük Potansiyel

$P_L = 0$ Çok Düşük Potansiyel

4.5. Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS)

Coğrafi bilgi sistemleri verilerin bir araya getirilmesi, depolanması, analize tabi tutulması ve sonuçların sunulmasını kapsayan bir sistemdir. Mekânsal konumlarla birlikte farklı birçok verinin birleştirilerek düzenlenmesi, analiz edilmesi yoluyla çok çeşitli alanlarda anlaşılır ve işlevsel haritalar üretilir.

4.5.1. CBS Bileşenleri

CBS'nin oluşturulması için bazı bileşenlere (Şekil 4.9) ihtiyaç duyulur. Bu bileşenlerin bir araya getirilmesi ile işletilebilir bir CBS kurulmuş olur. Bu bileşenler;

Donanım: yazılımları çalıştırabilecek yetenekte olan bilgisayar sistemleridir.

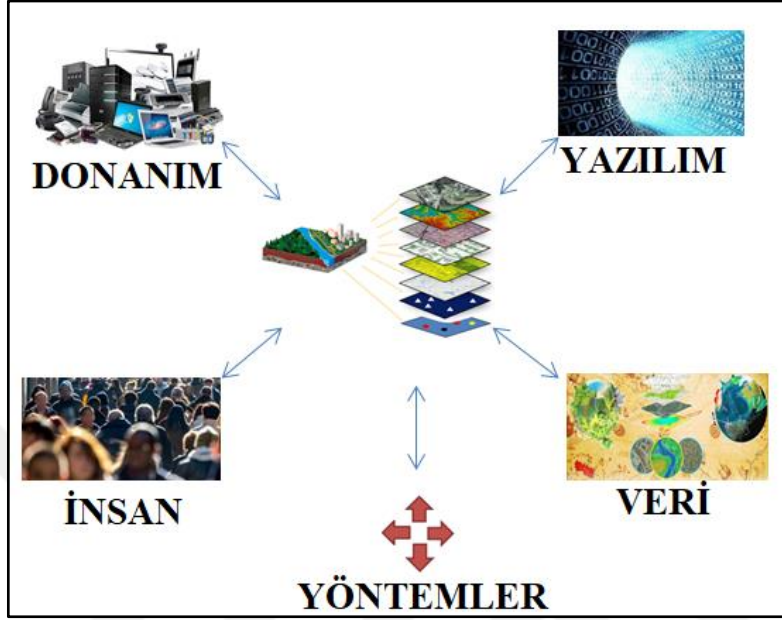
Yazılım: Coğrafi bilgiyi depolama analiz etme ve görüntüleme özelliklerine sahip olan CBS yazılımlarıdır. ArcGIS, Intergraph, MapInfo, Idrisi, Ilwis, Grass yazılıma örnek olarak verilebilir.

İnsan: İhtiyacı ve amacı belirleyen, verileri toplayan ve tüm bu sistemi kuran ve çalıştıran, çözüm odaklı insanlardır.

Veri: Coğrafi veri ve bununla bağlantılı sözel verilerdir.

Metot: Farklı yöntemlerle veriler elde edilebilir ve farklı amaçlara yönelik haritalar üretilir.

Ağ: Bilginin edinilmesi ve paylaşılması aşamalarında ağ (network) önemli bir yer tutar.



Şekil 4.9. CBS ana bileşenleri

4.5.2. CBS'nin Çalışma Aşamaları

Veriyi toplama, depolama ve işleme CBS işleyişinin temelini oluşturur. Sayısal ve sayısal olmayan veriler bir araya getirilerek sisteme aktarılır, dönüşümleri ve düzeltmeleri yapılır ardından analiz edilerek amaca uygun çıktıları alınır.

4.5.3. Bu Çalışmada CBS

Bu çalışmada yapılan sınıflama analizlerine ait verileri toplama, depolama, işleme ve haritalayarak sunma amaçlanmıştır. Oluşturulan zemin oturması haritaları; 1/1000 ölçekli hâlihazır harita, sondaj noktalarının koordinatları, zemin sınıflama potansiyelleri ve sınıflama ile oluşabilecek oturma miktarları kullanılarak oluşturulmuştur.

5. BULGULAR

Her birinin derinliği 20 m olan 49 adet sondaja ait veriler inceleme alanının zeminlerinin mühendislik özelliklerinin belirlenmesinde esas alınmıştır. Önceki çalışmalarda alüvyon (Qal) olarak ayırtlanmış olan inceleme alanı zemininin, sondaj verileri incelendiğinde kil-silt-kum-çakıl ardalı bir yapıya sahip olduğu görülmüştür. Yeraltı suyu seviyesi ortalama 3 metredir. Bu çalışmada sıvılaşma analizinin temelini oluşturan ve sondaj esnasında yerinde yapılan bir deney olan SPT deneyi sonuçları ince daneli ve iri daneli zeminler için olmak üzere Tablo 5.1 ve Tablo 5.2’de sunulmuştur.

Tablo 5.1. İnce daneli seviyelerde ölçülen SPT değerleri

	SPT DEĞERİ	CL	CH	ML
ADAPAZARI	Min. Değer	4	4	6
	Max. Değer	42	27	40
	Ort. Değer	14,7	15,0	17,1
ERENLER	Min. Değer	4	7	8
	Max. Değer	27	15	61
	Ort. Değer	12,5	11,0	22,1
SERDİVAN	Min. Değer	4	4	7
	Max. Değer	30	67	45
	Ort. Değer	14,3	13,6	18,2

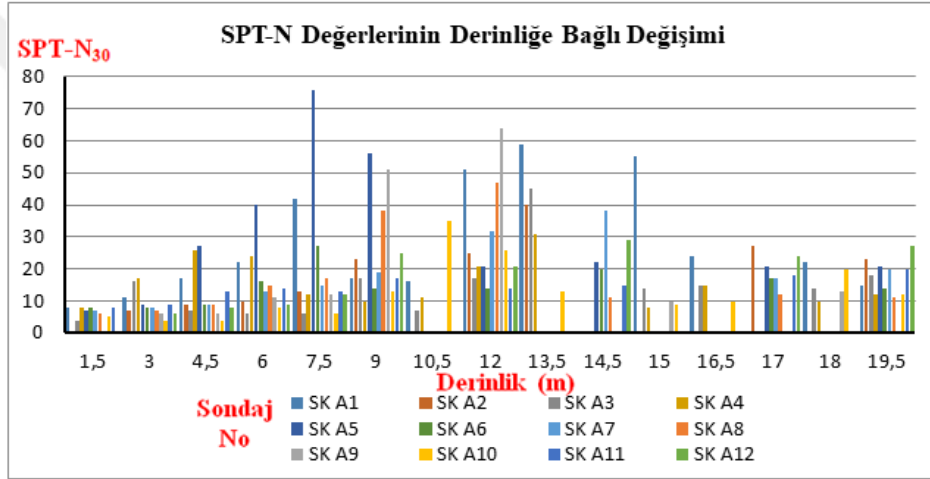
Tablo 5.2. İri daneli zeminlerde ölçülen SPT değerleri

	SPT DEĞERİ	SC	SM	SP	GW
ADAPAZARI	Min. Değer	6	4	13	51
	Max. Değer	40	117	56	59
	Ort. Değer	19,3	35,6	31,6	55,0
ERENLER	Min. Değer	4	13	39	
	Max. Değer	15	61	43	
	Ort. Değer	9,5	35,0	41,0	
SERDİVAN	Min. Değer	6	5	16	
	Max. Değer	44	50	71	
	Ort. Değer	21,7	20,1	43,5	

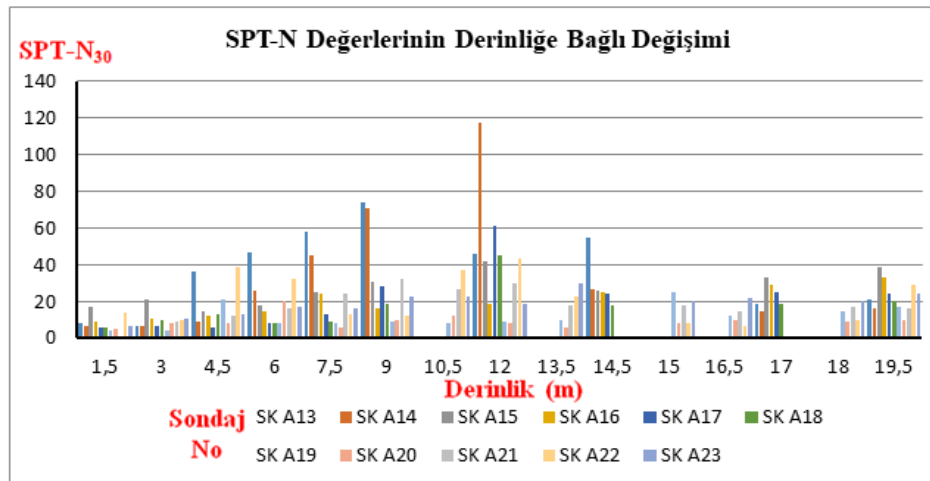
Sondaj esnasında sondaj kuyusunun her 1.5 metre derinliğinde, yerinde deney olarak yapılan SPT deneyleri ile elde edilen vuruş sayıları ile hesaplanan SPT-N₃₀ değerleri bu

çalışmada çok büyük önem taşımaktadır. İri daneli zeminler için SPT-N₃₀ değerleri kullanılarak sınıflama analizi yapılmıştır.

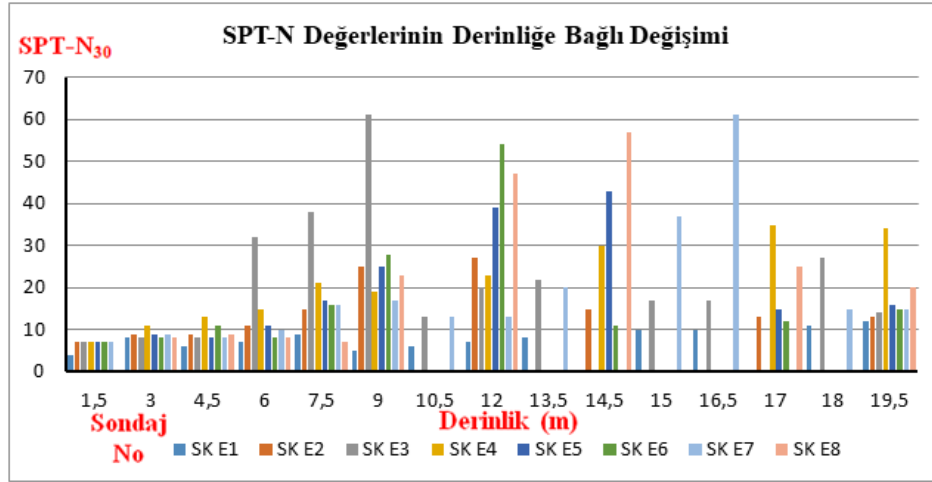
İnceleme alanı içerisinde kalan ilçe sınırlarında SPT-N₃₀ değerleri Adapazarı zeminlerinde minimum 4, maksimum 117 ve ortalama 19,6 olarak belirlenmiştir. Erenler zeminlerinde minimum 4, maksimum 61, ortalama 17,55 olarak belirlenmiştir. Serdivan zeminlerinde ise minimum 4, maksimum 100, ortalama 16,62 olarak belirlenmiştir. SPT değerlerinin çakıllı seviyelerde yüksek değerler verirken zemin sıkılığına bağlı olarak derinlikten bağımsız bir şekilde değişkenlik gösterdiği, artıp azaldığı görülmektedir. (Şekil 5.1, Şekil 5.2, Şekil 5.3, Şekil 5.4, Şekil 5.5).



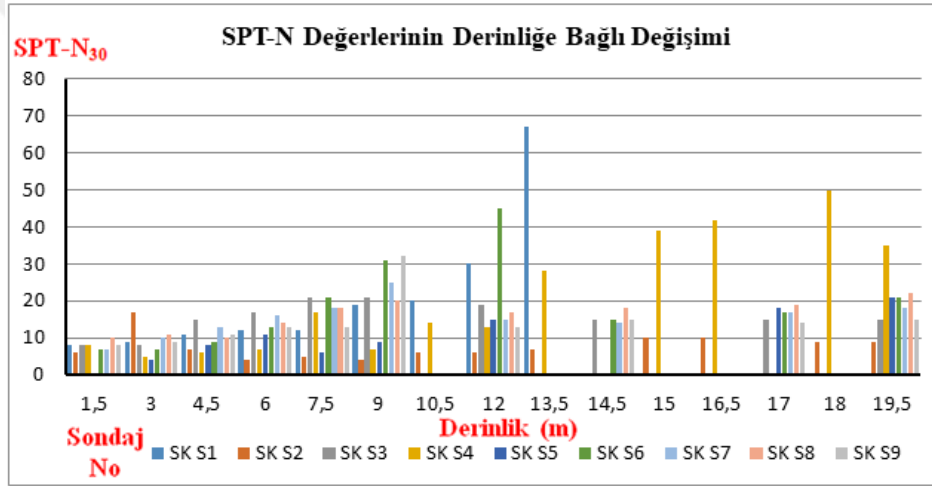
Şekil 5.1. Adapazarı SK A1-SK A12 arası SPT-N₃₀ değerleri grafiği



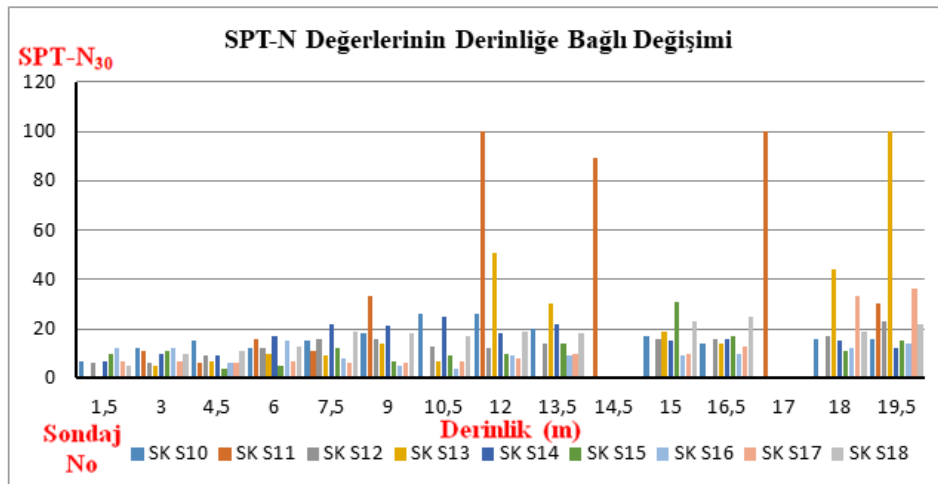
Şekil 5.2. Adapazarı SK A13-SK A23 arası SPT-N değerleri grafiği



Şekil 5.3. SK E1-SK E8 arası SPT-N değerleri grafiği



Şekil 5.4. SK S1-SK S9 arası SPT-N değerleri grafiği



Şekil 5.5. SK S10-SK S18 arası SPT-N değerleri grafiği

Sıvılaşma analizinde sondaj çalışmalarında elde edilen numuneler üzerinde yapılan laboratuvar deneylerinden w_n , γ_n , ve Atterberg Limitleri kullanılmıştır. Analizde USCS zemin sınıflaması kullanılmıştır.

USCS (Birleştirilmiş Zemin Sınıflaması)'ye göre inceleme alanında yapılan sondajlarda CH, CL, ML sınıflamasına dâhil olan ince taneli, SC, SM, SP, GW sınıflamasına dâhil olan iri taneli zeminler görülmüştür. Sondaj verilerine göre elde edilen zemin özellikleri Tablo 5.3 ve Tablo 5.4 de verilmiştir.

Tablo 5.3. İnceleme alanına ait ince taneli zeminlerin mühendislik özellikleri

Mühendislik Özellikleri		CH	CL	ML
LL (%)	Min. Değer	42,1	27,2	NP
	Maks. Değer	77	49,8	NP
PL (%)	Min. Değer	15,3	7,9	NP
	Maks. Değer	29	27,8	NP
PI (%)	Min. Değer	21,5	9	NP
	Maks. Değer	51,6	33,4	NP
w_n (%)	Min. Değer	17,4	15,2	6
	Maks. Değer	62,8	86,1	41

İnceleme alanında ince daneli zeminlerinde CL olarak belirlenen seviyelerde LL değerlerine göre plastiklik dereceleri; Düşük-Orta aralığındadır. SPT N_{30} değerlerine göre kıvam yumuşak-katı aralığındadır. PI değerleri esas alındığında Orta-Yüksek Plastik olarak sınıflanmaktadır.

CH olarak belirlenen seviyelerde ölçülen LL değerlerine göre plastiklik, Orta-Çok yüksek aralığında değişkenlik göstermektedir. PI değerleri esas alındığında yüksek-çok yüksek plastisiteli, SPT N_{30} değerleri dikkate alındığında ise yumuşak-sert aralığında olduğu görülmüştür. ML zemin türü ise NP (none-plastik) olarak belirlenmiştir.

Tablo 5.4. İnceleme alanına ait iri taneli zeminlerin mühendislik özellikleri

Mühendislik Özellikleri		SC	SM	SP
w_n (%)	Min. Değer	15,2	4,8	3,9
	Maks. Değer	25,6	34,1	25,7
Elek Analizi	10	Min. Değer	25,3	0
		Maks. Değer	80,34	91,12
	200	Min. Değer	19,66	6,81
		Maks. Değer	49,63	47,1

İnceleme alanında kohezyonsuz zeminlerde SPT N_{30} değerlerine göre SM olarak belirlenen seviyeler çok gevşek-çok sıkı, SC olarak belirlenen seviyeler çok gevşek-sıkı, SP olarak belirlenen seviyeler orta sıkı-çok sıkı, aralığında olup GW olarak belirlenen seviyeler ise çok sıkıdır. SP, SM, SC kum zeminlerin w_n değerleri %3,9 ile 34,1 aralığındadır.

İnceleme alanında ince daneli zeminlerde yaygın olarak düşük-yüksek plastisiteli killeri görülmüştür. Bu da ana kayadan türeyen ince daneli zeminlerin uzun mesafede taşınmış olduğunu göstermektedir. Karasal ortamda akarsu tarafından biriktirme ile oluşan alüvyon zeminde iri daneli seviyelerin de bulunması ana kayaya yakın alanları ve suyun taşıma gücündeki değişimleri ifade etmektedir.

49 adet zemin sondajına ait laboratuvar ve arazi deney sonuçlarına göre iri daneli zeminlerde sıvılaşma potansiyelini belirlemeye yönelik yapılan analiz sonuçlarında kuyularda deprem büyüklüklerine göre sıvılaşabilirliğin değiştiği görülmüştür. İnce daneli zeminlerden sondaj verilerinde NP olarak ayrılan silt birimler yeterli veri bulunmadığından analiz dışında bırakılmıştır. Killi zeminler için sıvılaşmaya yatkınlık değerlendirmesi yapılmıştır.

5.1.İri Daneli Zeminlerin Sıvılaşma Analizleri

İri daneli zeminlerde standart sıvılaşma analizi aşamasında YASS, sondaj derinliği, arazide ölçülen SPT- N_{30} değerleri, USCS sınıflandırmasına göre belirlenen zemin türlerinin doğal birim hacim ağırlıkları (γ_n) ve ince tane oranları (FC), LiquefyPro (CivilTech, 2002) programına aktarılır. Program SPT- N_{30} değerlerini gerekli düzeltmeleri yaparak SPT-(N_1)₆₀ dönüşümünü otomatik olarak yapar. Kullanıcı tarafından belirlenen deprem büyüklüğü ve ivme ile toplam ve efektif gerilme, σ_v katsayılarını kullanılarak CSR ardından CRR hesaplanır. Program, CSR ve CRR oranı ile güvenlik katsayısını, analizin son bölümünde de sıvılaşma kaynaklı oturmaları hesaplar.

Laboratuvar numunelerinin tamamında γ_n (birim hacim ağırlık) çalışılmadığından, var olan kuyular için kendi değeri, var olmayan kuyular için önceki çalışmalardan elde edilen ortalama değerler alınmıştır ve Tablo 5.5'te gösterilmiştir.

Tablo 5.5. Analizde kullanılan γ_n (kN/m³) değerleri

Zemin Türü	γ_n (kN/m ³)	Zemin Türü	γ_n (kN/m ³)
CH	17,64	SM	15,1
CL	17,92	SP	17,46
MH	17,66	SC	18,79
ML	17,79	SW	18,44

Adapazarı zeminlerinde açılan 23 kuyudan tamamen silt ve kilden oluşan A6-A16-A20-A23 nolu sondajlarda 0,415 g ivme değerinde sıvılaşma potansiyeli 0 olarak hesaplanmıştır. Bu kuyularda zeminlerde oturma meydana gelmemiştir. A1-A5-A15-A17 nolu sondajlarda çakıl ve kumlu seviyeler olmasına rağmen SPT değerlerinin yüksekliği ve tabaka kalınlığı sebebiyle sıvılaşma beklenmemekte ancak sismik yükten ötürü oturma mevcut olduğu görülmüştür. 0,498 g ivme değerinde A6-A16-A20-A23 nolu sondajlarda sıvılaşma potansiyeli 0 olarak hesaplanmıştır. Bu kuyularda oturma olmamıştır. A1-A5-A17 nolu sondajlarda çakıl ve kumlu seviyeler olmasına rağmen SPT değerlerinin yüksekliği ve tabaka kalınlığı sebebiyle sıvılaşma beklenmemekte ancak sismik yükten ötürü oturma mevcut olduğu görülmüştür. Bu ivme değerinde A15 nolu sondajda sıvılaşma ve oturma varlığı tespit edilmiştir. Bu durumda sıvılaşma varlığı deprem büyüklüğünden etkilenmiştir. 0,332 g değerinde ise A6-A16-A20-A23 nolu sondajlarda sıvılaşma potansiyeli 0 olarak hesaplanmıştır. Bu kuyularda oturma olmamıştır. A1-A5-A15-A17 nolu sondajlarda çakıl ve kumlu seviyeler olmasına rağmen SPT değerlerinin yüksekliği ve tabaka kalınlığı sebebiyle sıvılaşma beklenmemekte ancak sismik yükten ötürü oturma mevcut olduğu görülmüştür. Bu ivme değerinde A2-A13-A18-A21 nolu sondajlarda deprem büyüklüğüne bağlı olarak sıvılaşma oluşmamıştır.

Erenler zeminlerinde açılan 8 sondajdan, tamamen silt ve kilden oluşan E1-E3 nolu sondajlarda 0,415 g ivme değerinde sıvılaşma potansiyeli 0 olarak hesaplanmıştır. Bu kuyularda oturma olmamıştır. E2 ve E8 nolu sondajlarda sıvılaşma potansiyeli bulunmamakta ancak yüksek SPT değerleri sebebiyle oturma söz konusudur. 0,498 g ivme değerinde 0,415 g değerinden farklı olarak sadece E8 nolu sondajda sıvılaşma gelişmiştir. 0,332 g ivme değerinde ise 0,415 g ivme değerinden farklı bir durum gözlenmemiştir.

Serdivan zeminlerinde açılan 18 sondajdan tamamen silt ve kilden oluşan S6-S10-S12 nolu sondajlarda 0,415 g ivme değerinde sıvılaşma potansiyeli 0 olarak hesaplanmıştır. Bu sondajlarda oturma olmamıştır. S4 nolu sondajda yüksek SPT değerleri sebebiyle sıvılaşma ve oturma gözlemlenmemiştir. S1-S14 nolu sondajlar tamamen kil içeriklidir ve sismik yükten kaynaklı oturma meydana gelmiştir. S3 kuyusunda oturma mevcut olmakla birlikte tabaka kalınlığının inceliği sebebiyle sıvılaşma görülmemiştir. S18 nolu sondajda yüksek SPT değerleri sebebiyle sıvılaşma oluşmazken deprem yükü etkisiyle oturma gözlemlenmiştir. 0,498 g ivme değerinde 0,415 g değerinden farklı olarak sadece S4 nolu sondajda oturma gelişmiştir. 0,332 g ivme değerinde ise 0,415 g değerinden farklı bir durum gözlemlenmemiştir. Yapılan hesaplamalarda 0,332 g, 0,415 g, 0,498 g, ivme değerlerinde elde edilen tüm sıvılaşma ve oturma değerleri Tablo 5.6'de verilmiştir.

Tablo 5.6. IY-Ishihara and Yoshimine (1990) yöntemi ve TS-Tokimatsu and Seed (1987) yöntemleri ve 0,332-0,415-0,498 g değerlerine göre hesaplanan oturma değerleri [Sıvılaşma yok = $F_s > 1$, Sıvılaşma var = $F_s < 1$ (F_s : Sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısı)]

SK. NO	0,332g		SIVILAŞ MA	0,415g		SIVILAŞ MA	0,498g		SIVILAŞ MA
	Toplam Oturma			Toplam Oturma			Toplam Oturma		
	IY (cm)	TS (cm)		IY (cm)	TS (cm)		IY (cm)	TS (cm)	
SK-A1	0	0,14	yok	0	0,36	yok	0	0,49	yok
SK-A2	0,35	1,67	yok	0,69	3,15	yok	1,15	3,3	var
SK-A3	3,72	5,16	var	4,66	5,6	var	5,19	5,88	var
SK-A4	0,34	1,3	var	0,61	1,68	var	0,78	1,92	var
SK-A5	0,05	0,35	yok	0,06	0,61	yok	0,06	0,72	yok
SK-A6	0	0	yok	0	0	yok	0	0	yok
SK-A7	7,89	10,92	var	10,22	12,53	var	11,33	13,23	var
SK-A8	0,88	1,95	var	1,18	2,32	var	1,36	2,44	var
SK-A9	0,85	1,75	var	1,05	1,94	var	1,14	2,19	var
SK-A10	2,22	2,97	var	3,21	3,2	var	3,35	3,46	var
SK-A11	1,01	2,5	var	2,01	2,59	var	2,6	2,6	var
SK-A12	3,35	5,31	var	3,63	6,11	var	3,65	6,29	var
SK-A13	0,12	0,68	yok	0,18	1	var	0,25	1,16	var
SK-A14	7,74	10,56	var	9,33	11,31	var	9,87	11,5	var
SK-A15	0,1	1,35	yok	0,2	3,45	yok	0,34	4,23	var
SK-A16	0	0	yok	0	0	yok	0	0	yok
SK-A17	0,04	0,25	yok	0,05	0,56	yok	0,05	0,8	yok
SK-A18	0,04	0,76	yok	0,08	1,07	var	0,13	1,2	var
SK-A19	4,94	5,36	var	5,36	5,67	var	5,62	5,88	var
SK-A20	0	0	yok	0	0	yok	0	0	yok

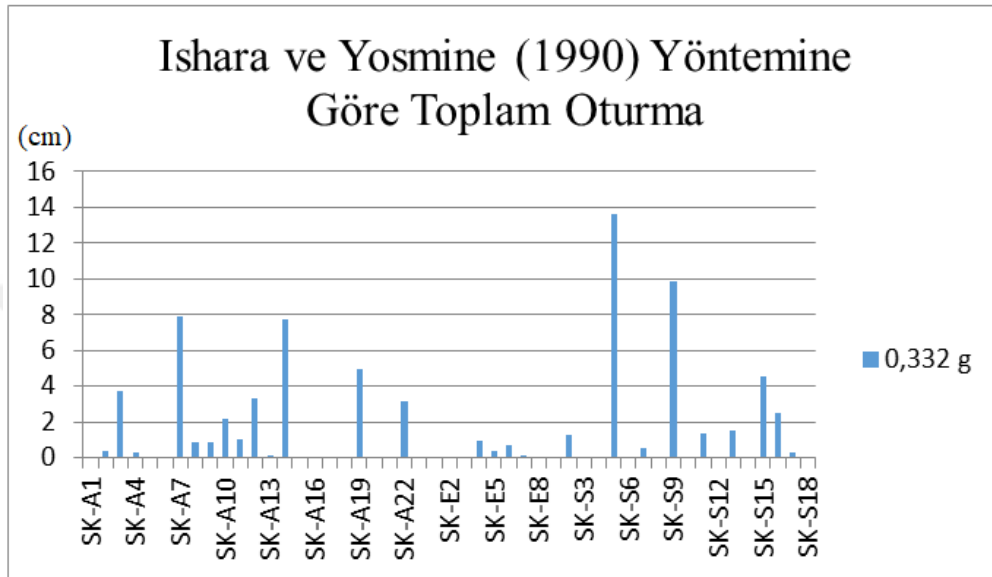
Tablo 5.6. (Devam) IY-Ishihara and Yoshimine (1990) yöntemi ve TS-Tokimatsu and Seed (1987) yöntemleri ve 0,332-0,145-0,498 g değerlerine göre hesaplanan oturma değerleri [Sıvılaşma “yok = $F_s > 1$ ”, Sıvılaşma “var = $F_s < 1$ ” (F_s : Sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısı)]

SK. NO	0,332g		SIVILAŞ MA	0,415g		SIVILAŞ MA	0,498g		SIVILAŞ MA
	Toplam Oturma			Toplam Oturma			Toplam Oturma		
	IY (cm)	TS (cm)		IY (cm)	TS (cm)		IY (cm)	TS-S (cm)	
SK-A21	0,05	1,02	yok	0,11	1,87	var	0,17	2,62	var
SK-A22	3,18	5,25	var	4,41	5,72	var	4,98	5,93	var
SK-A23	0	0	yok	0	0	yok	0	0	yok
SK-E1	0	0	yok	0	0	yok	0	0	yok
SK-E2	0,01	0,06	yok	0,03	1,14	yok	0,04	1,83	yok
SK-E3	0	0	yok	0	0	yok	0	0	yok
SK-E4	0,95	10,35	var	2,05	11,95	var	3,75	12,29	var
SK-E5	0,38	1,4	var	0,69	1,79	var	0,89	1,98	var
SK-E6	0,68	1,33	var	0,9	1,56	var	1,02	1,69	var
SK-E7	0,18	0,58	var	0,33	0,77	var	0,42	0,87	var
SK-E8	0	0,14	yok	0	0,68	yok	0	1,01	yok
SK-S1	0	0,08	yok	0	0,17	yok	0	0,22	yok
SK-S2	1,27	2,12	var	1,88	2,54	var	2,35	2,75	var
SK-S3	0,08	1,5	yok	0,1	1,74	yok	0,11	1,79	var
SK-S4	0	0	yok	0	0	yok	0	0,03	yok
SK-S5	13,64	15,05	var	13,42	15,82	var	13,38	15,86	var
SK-S6	0	0	yok	0	0	yok	0	0	yok
SK-S7	0,55	6,79	var	1,08	7,72	var	1,63	7,85	var
SK-S8	0,1	6,5	var	0,17	6,9	var	0,24	6,93	var
SK-S9	9,86	12,22	var	12,19	13,63	var	12,19	14,23	var
SK-S10	0	0	yok	0	0	yok	0	0	yok
SK-S11	1,33	1,59	var	1,82	1,82	var	1,94	2,1	var
SK-S12	0	0	yok	0	0	yok	0	0	yok
SK-S13	1,51	1,52	var	1,59	1,59	var	1,8	1,8	var
SK-S14	0,04	0,04	yok	0,05	0,05	yok	0,07	0,07	yok
SK-S15	4,58	5,47	var	5,09	5,82	var	5,3	5,96	var
SK-S16	2,54	3,14	var	3,17	3,31	var	3,18	3,62	var
SK-S17	0,28	3,5	var	0,57	3,99	var	0,91	4,13	var
SK-S18	0,04	0,07	yok	0,15	0,15	yok	0,07	0,55	yok

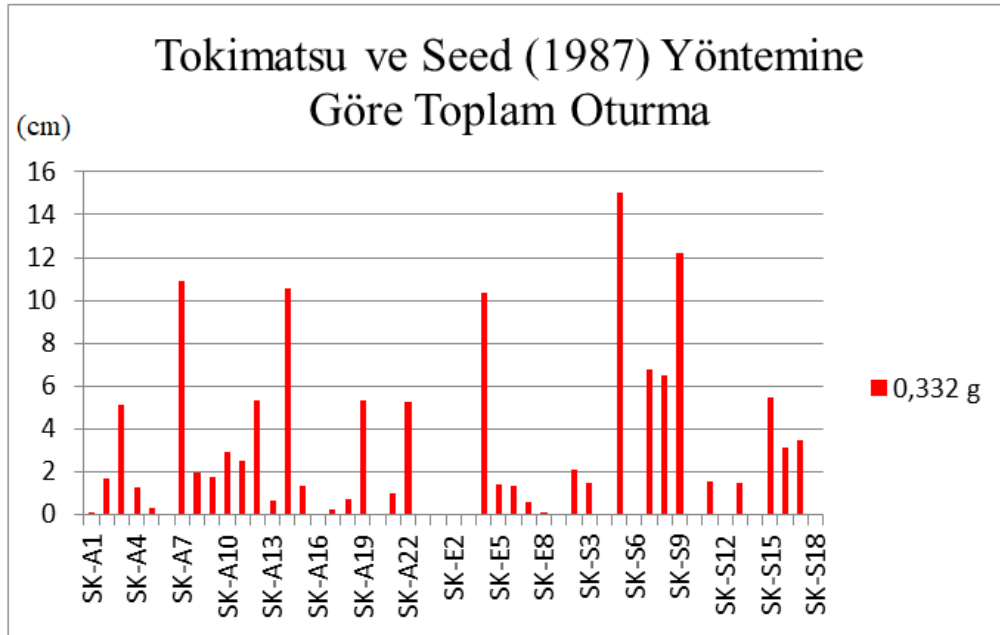
49 lokasyon için yapılan hesaplamalarda; 0,332 g değerinde Ishihara ve Yoshimine (1990) yöntemine göre oturma miktarı 0-13,64 cm aralığında olup ortalama 1,53 cm, Tokimatsu ve Seed (1987) yöntemine göre ise 0-15,05 cm aralığında olup ortalama 2,71 cm’dir. 0,415 g değerinde Ishihara ve Yoshimine (1990) yöntemine göre oturma miktarı 0-13,42 cm aralığında olup ortalama 1,88 cm, Tokimatsu ve Seed (1987) yöntemine göre ise 0-15,82 cm aralığında olup ortalama 3,14 cm’dir. 0,498 g değerinde ise Ishihara ve Yoshimine (1990) yöntemine göre oturma miktarı 0-13,38 cm aralığında

olup ortalama 2,07 cm, Tokimatsu ve Seed (1987) yöntemine göre ise 0-15,86 cm aralığında olup ortalama 3,33 cm'dir (Tablo 5.6).

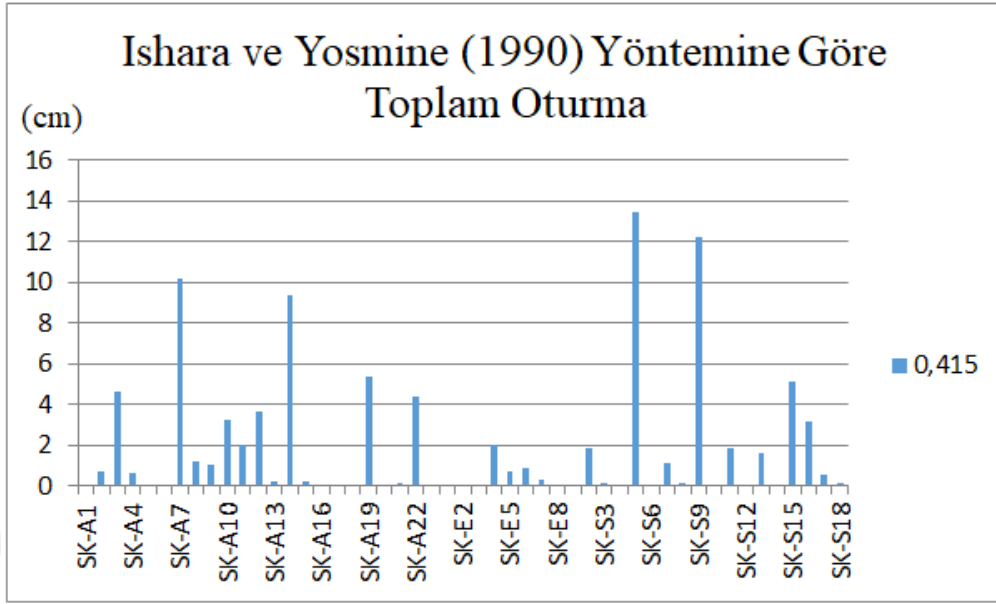
Hesaplanan oturma miktarları grafik halinde Şekil 5.6, Şekil 5.7, Şekil 5.8, Şekil 5.9, Şekil 5.10, Şekil 5.11'de gösterilmiştir.



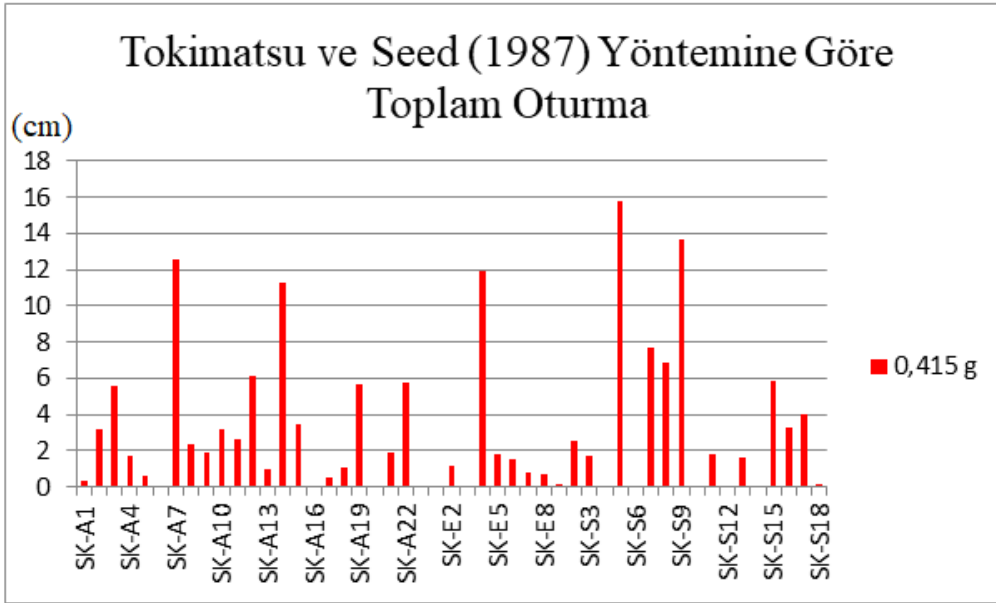
Şekil 5.6. Ishara ve Yosmine (1990) yöntemine göre 0,332 g yer ivmesi değerinde toplam oturma miktarı grafiği



Şekil 5.7. Tokimatsu ve Seed (1987) yöntemine göre 0,332 g yer ivmesi değerinde toplam oturma miktarı grafiği



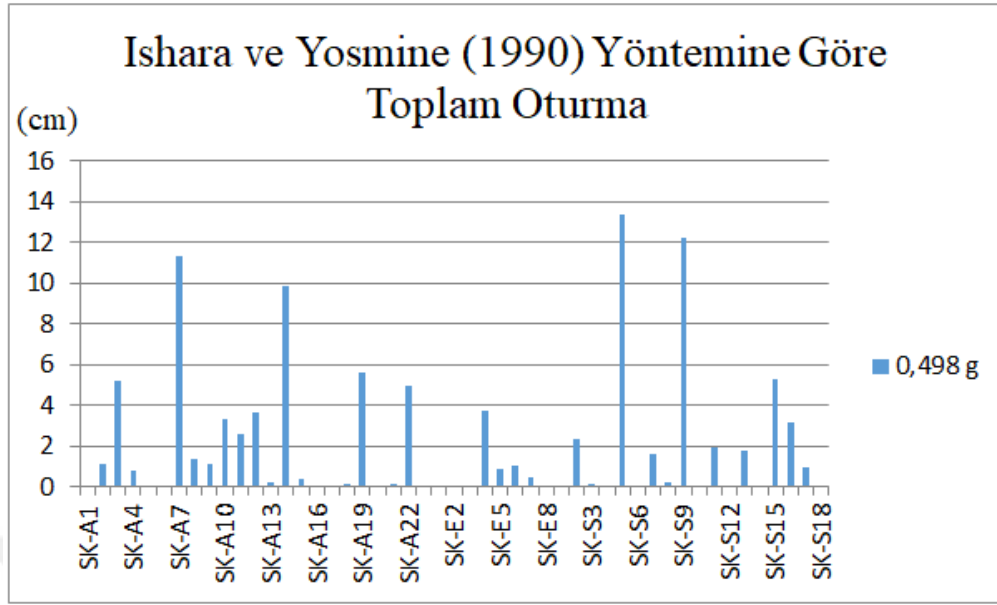
Şekil 5.8. Ishara ve Yosmine (1990) yöntemine göre 0,415 g yer ivmesi değerinde toplam oturma miktarı grafiği



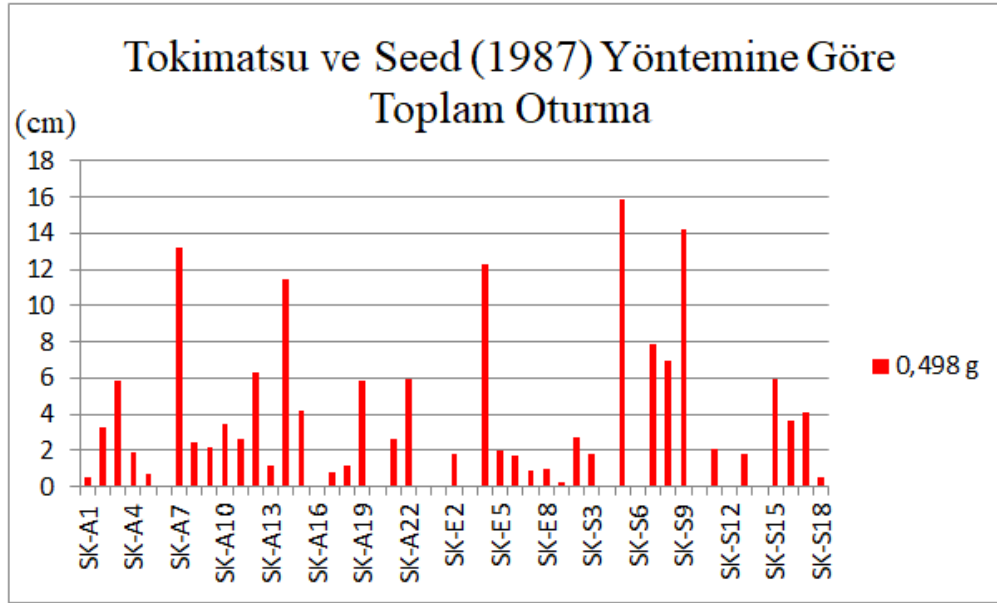
Şekil 5.9. Tokimatsu ve Seed (1987) yöntemine göre 0,415 g yer ivmesi değerinde toplam oturma miktarı grafiği

Adapazarı zeminlerinde ; 332 g, 0,415 g ve 0,498 g değerlerinde de A6-A16-A20-A23 nolu sondajlarda sıvılaşma potansiyeli 0 olarak hesaplanmıştır ve oturma olmamıştır.

Erenler zeminlerinde; 332 g, 0,415 g ve 0,498 g değerlerinde de E1-E3 nolu sondajlarda sıvılaşma potansiyeli 0 olarak hesaplanmıştır ve oturma olmamıştır.



Şekil 5.10. Ishara ve Yosmine (1990) yöntemine göre 0,498 g yer ivmesi değerinde toplam oturma miktarı grafiği



Şekil 5.11. Tokimatsu ve Seed (1987) yöntemine göre 0,498 g yer ivmesi değerinde toplam oturma miktarı grafiği

Serdivan zeminlerinde 0,332 g, 0,415 g ve 0,498g ivme değerlerinde tamamen silt ve S6-S10-S12 sondajlarda sıvılaşma potansiyeli 0 olarak hesaplanmıştır ve oturma olmamıştır.

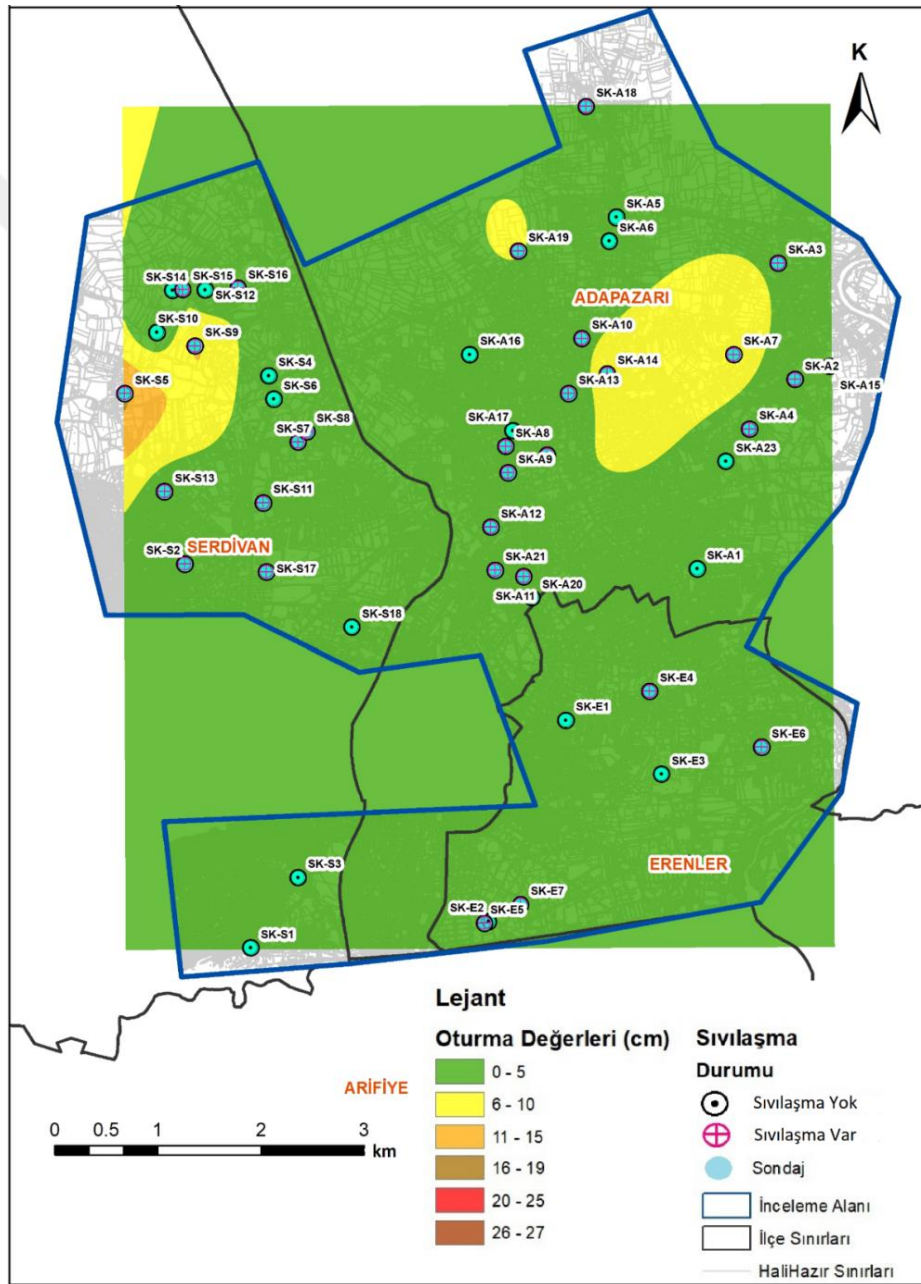
Veri analizleri ve grafikler incelendiğinde her iki yöntemle yapılan analizlerde ivme değerinin artmasıyla oturma miktarlarında artış meydana geldiği görülmüştür. Oturma miktarlarındaki bu artış ivme değerinin artması yanında yeraltı suyunun yüzeye yakın olması, kum zemin tabakasının kalınlığı, SPT değerlerinin düşük olmasına da bağlıdır. Bu parametrelere bağlı olarak oturma miktarlarında artışla birlikte yapılaşma riski bu alanlarda daha yüksek olmaktadır. Yerleşime uygunluk çalışmalarında bu alanlar uygun olmayan alanlar olup ayrıntılı jeoteknik araştırma gerektiren alanlar kapsamına girmektedir.

A2, A15, S3 kuyularında diğer kuyulardan farklı olarak 0,332 g ve 0,415 g değerlerinde sıvılaşma oluşmaz iken 0,498 g değerinde sıvılaşma varlığı görülmüştür. A13, A18, A21 kuyularında ise 0,332 g değerinde sıvılaşma görülmezken 0,498 g değerinde sıvılaşma varlığı görülmüştür. Sıvılaşma potansiyelinin Adapazarı zeminlerinde 4, 7, 15 m derinliklerinde yoğunlaştığı ve genel olarak 10 m'ye kadar olan derinliklerde olduğu, Erenler zeminlerinde genel olarak 10 m'den daha derinde olduğu, Serdivan zeminlerinde ise 6, 7, 12 m derinliklerde yoğunlaştığı ve 20 metrelik derinlikte her seviyede olduğu görülmüştür (Tablo 5.7).

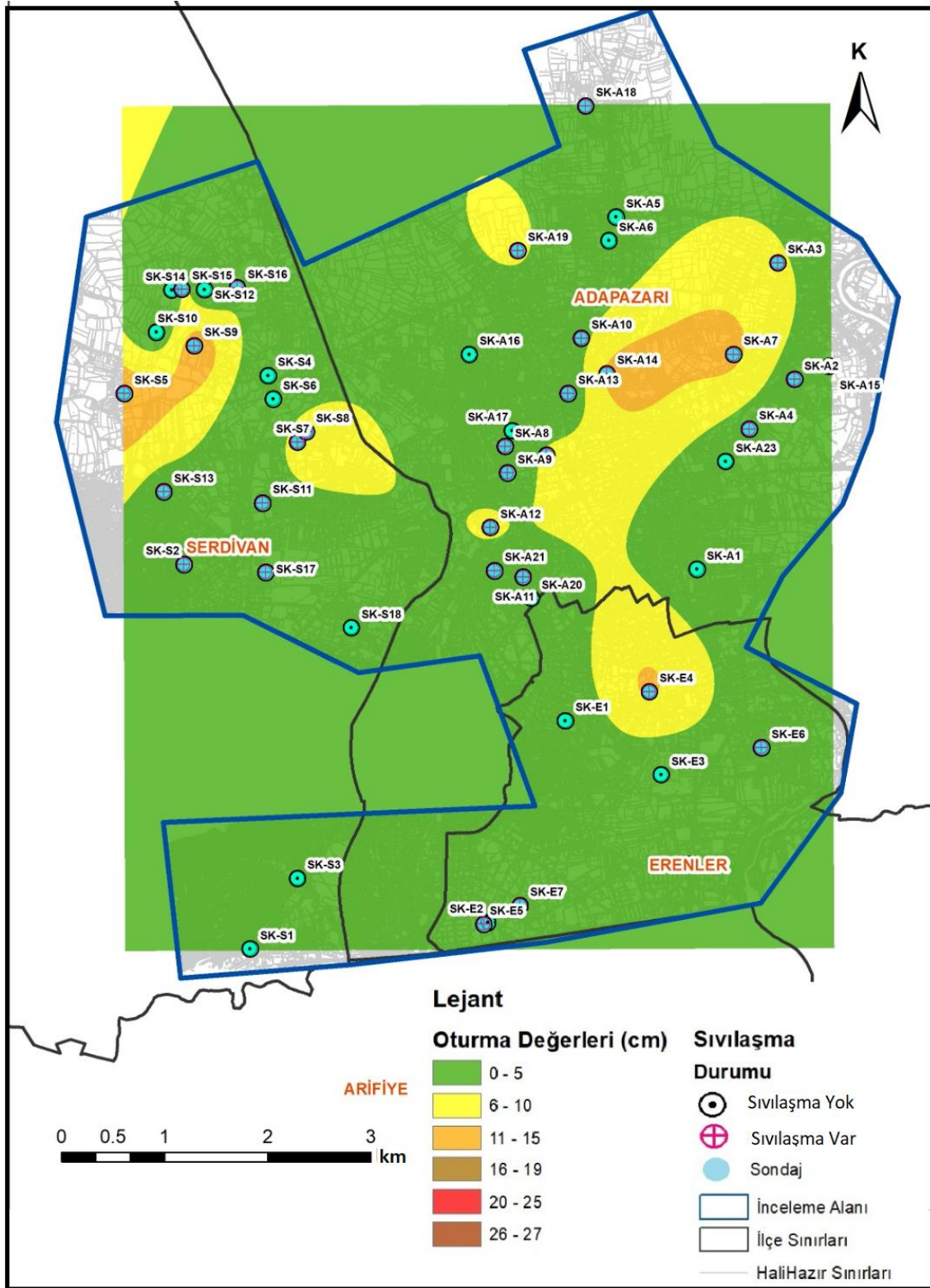
Tablo 5.7. Sıvılaşma potansiyeli tespit edilen derinlikler

Sondaj No	Kuyu Derinliği (m)	Sıvılaşma Derinliği (m)			Sondaj No	Kuyu Derinliği	Sıvılaşma Derinliği (m)		
		0,415g	0,498g	0,332g			0,415g	0,498g	0,332g
SK-A1	20	0	0	0	SK-E3	20	0	0	0
SK-A2	20	11	11	0	SK-E4	20	3,4,5	3,4,5,6	0
SK-A3	20	4,10,15	4,10,15	10,15	SK-E5	20	17	17	17
SK-A4	20	7	7	7	SK-E6	20	14	14	14
SK-A5	20	0	0	0	SK-E7	20	18	18	18
SK-A6	20	0	0	0	SK-E8	20	0	0	0
SK-A7	20	3,4,5,6,7,17	3,4,5,6,7,17	3,4,5,6,17	SK-S1	20	0	0	0
SK-A8	20	7,50,14	7,50,14	7,50,14	SK-S2	20	3,50-4,50	3,50-4,50	4
SK-A9	20	15	15	15	SK-S3	20	0	0	0
SK-A10	20	18,19	18,19	18,19	SK-S4	20	0	0	0
SK-A11	20	6,7	6,7	7	SK-S5	20	6,7,8,12,13,14	6,7,8,12,13,14	6,7,8,12,13,14
SK-A12	20	6,7	6,7	6,7	SK-S6	20	0	0	0
SK-A13	20	17	17	0	SK-S7	20	6,12	6,12	6,12
SK-A14	20	3,4,17	3,4,17	3,4,17	SK-S8	20	6	6	6
SK-A15	20	0	4	0	SK-S9	20	4,50,5,12,13,14,15,16,17	4,50,5,12,13,14,15,16,17	4,50,5,12,13,14,15,16,17
SK-A16	20	0	0	0	SK-S10	20	0	0	0
SK-A17	20	0	0	0	SK-S11	20	7,50,8	7,50,8	7,50,8
SK-A18	20	14,5	14,5	0	SK-S12	20	0	0	0
SK-A19	20	5,50-7,50	5,50-7,50	6,7	SK-S13	20	4	4	4
SK-A20	20	0	0	0	SK-S14	20	0	0	0
SK-A21	20	13,5	13,5	0	SK-S15	20	6,7,13,50	6,7,13,50	6,7,13,50
SK-A22	20	7,50,15	3,7,50,15	7,50,15	SK-S16	20	6,7	6,7	6,7
SK-A23	20	0	0	0	SK-S17	20	18	18	18
SK-E1	20	0	0	0	SK-S18	20	0	0	0
SK-E2	20	0	0	0					

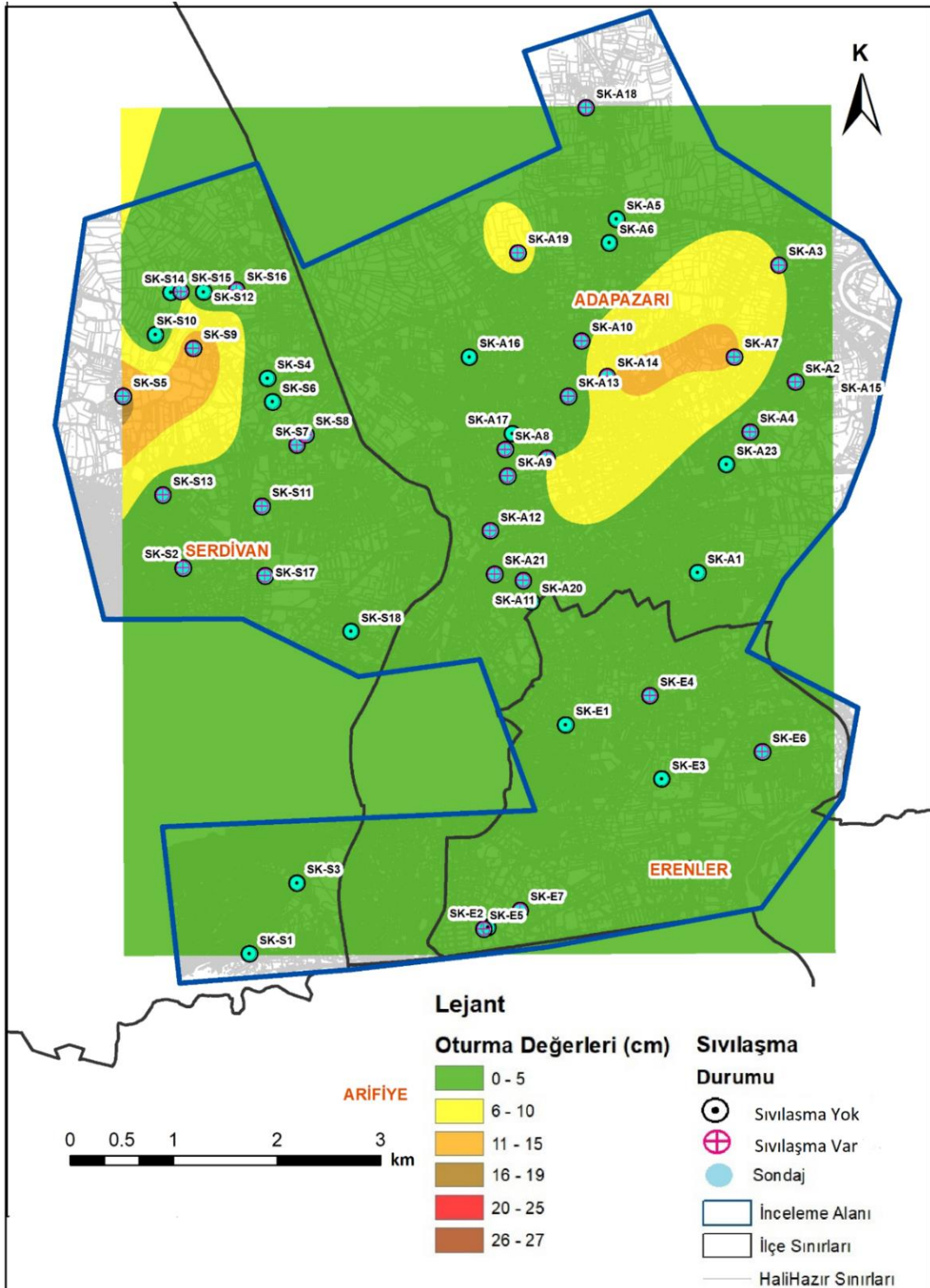
Sıvılaşma analizi sona erdikten sonra elde edilen sonuçlar CBS (Coğrafi Bilgi Sistemi) ortamına aktarılmıştır. Hali hazır harita üzerinde sıvılaşma potansiyeli olan sondajlar işaretlenmiştir. Analiz ile elde edilen Ishihara ve Yoshimine (1990) yöntemine göre ve 0,332-0,145-0,498 g değerleri ile Tokimatsu ve Seed (1987) yöntemine göre ve 0,332-0,145-0,498 g değerlerinde hesaplanan oturma değerleri için derecelendirme yapılarak veriler haritalanmıştır. Oluşturulan haritalar Şekil 5.12, Şekil 5.13, Şekil 5.14, Şekil 5.15, Şekil 5.16, Şekil 5.17’de verilmiştir.



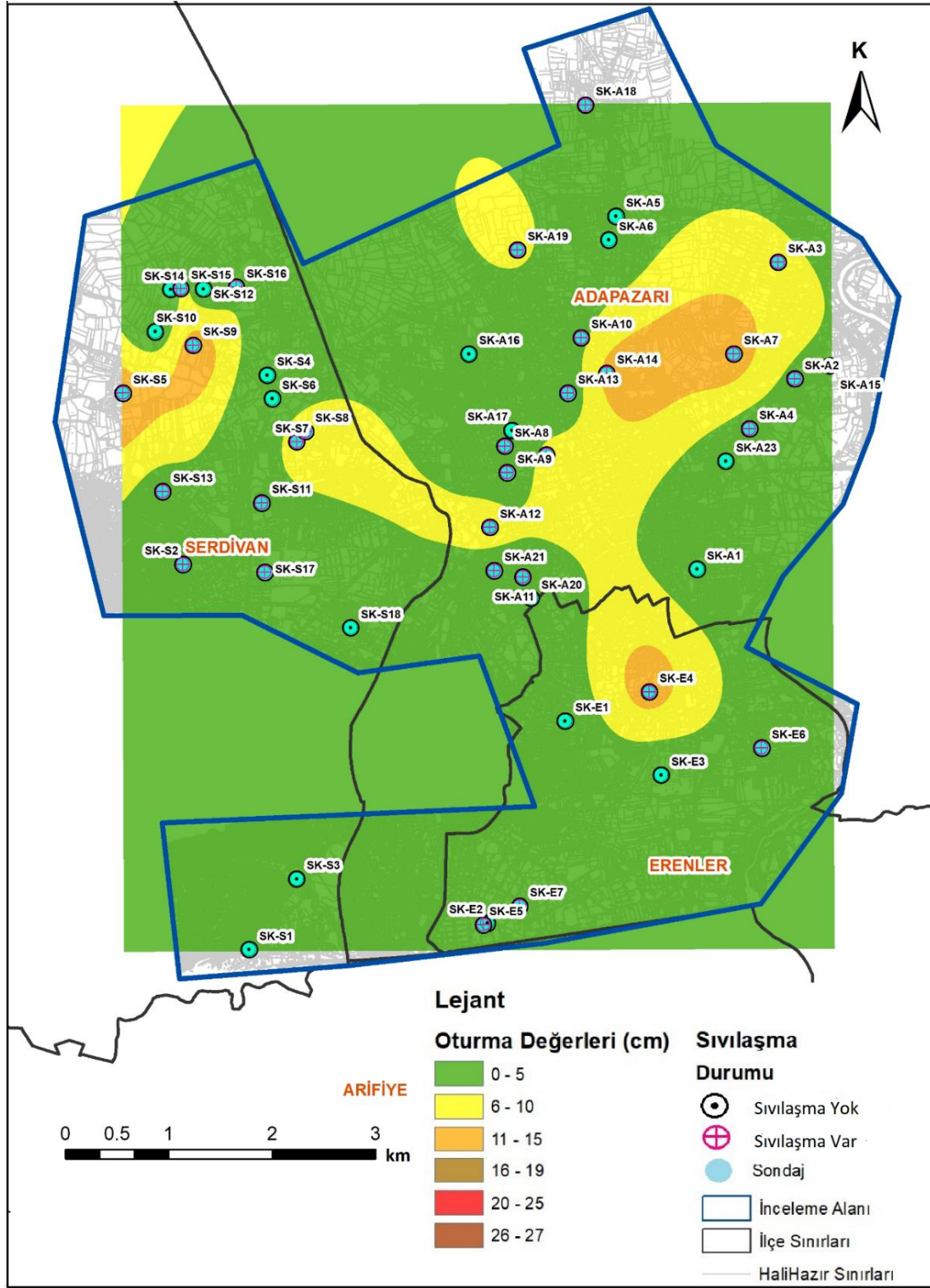
Şekil 5.12. Ishihara ve Yoshimine (1990) yöntemine göre 0,332 g değerinde sıvılaşma potansiyeli ve toplam oturma miktarları dağılım haritası



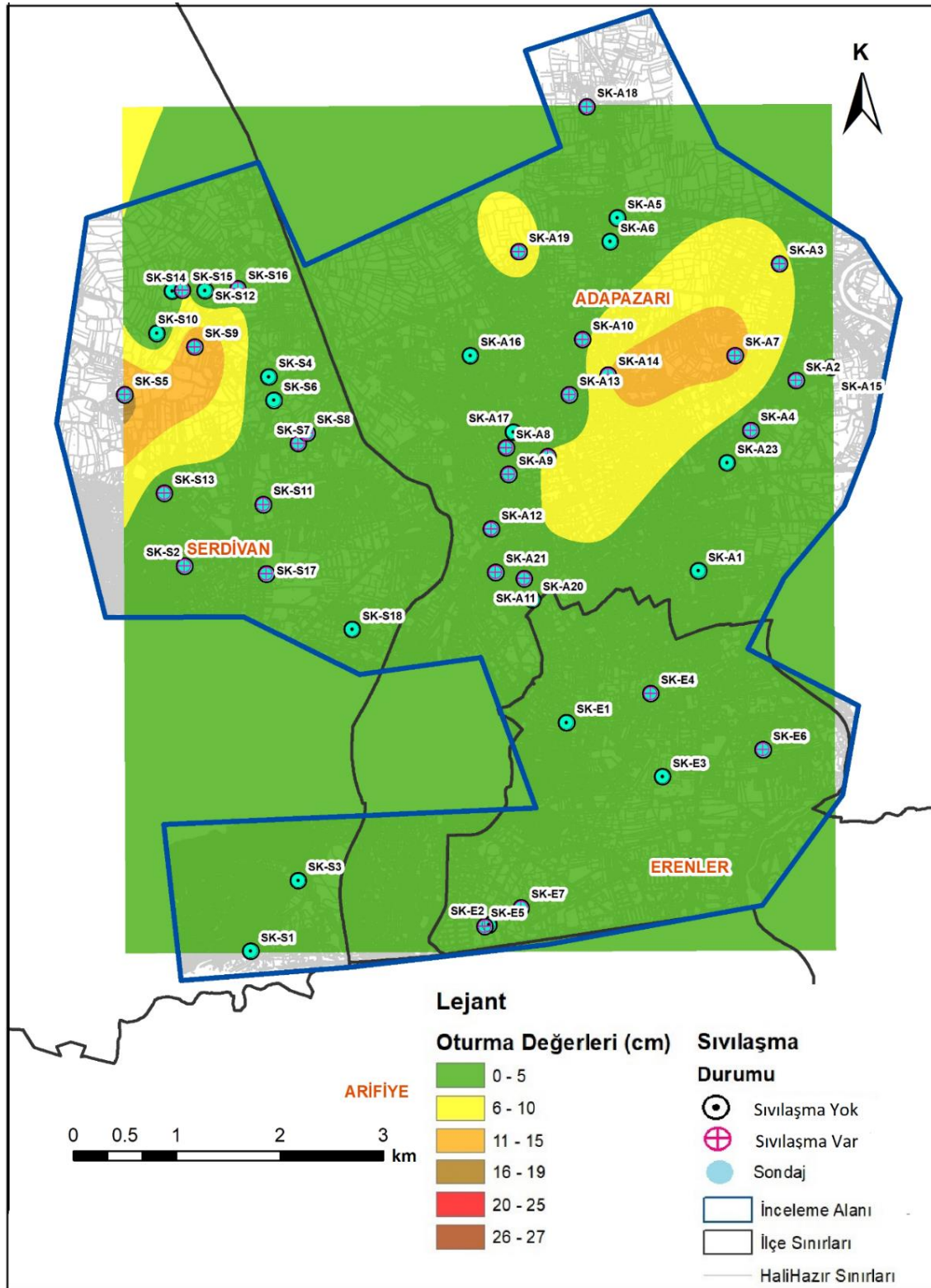
Şekil 5.13. Tokimatsu ve Seed (1987) yöntemine göre 0,332 g değerinde sıvılaşma potansiyeli ve toplam oturma miktarları dağılım haritası



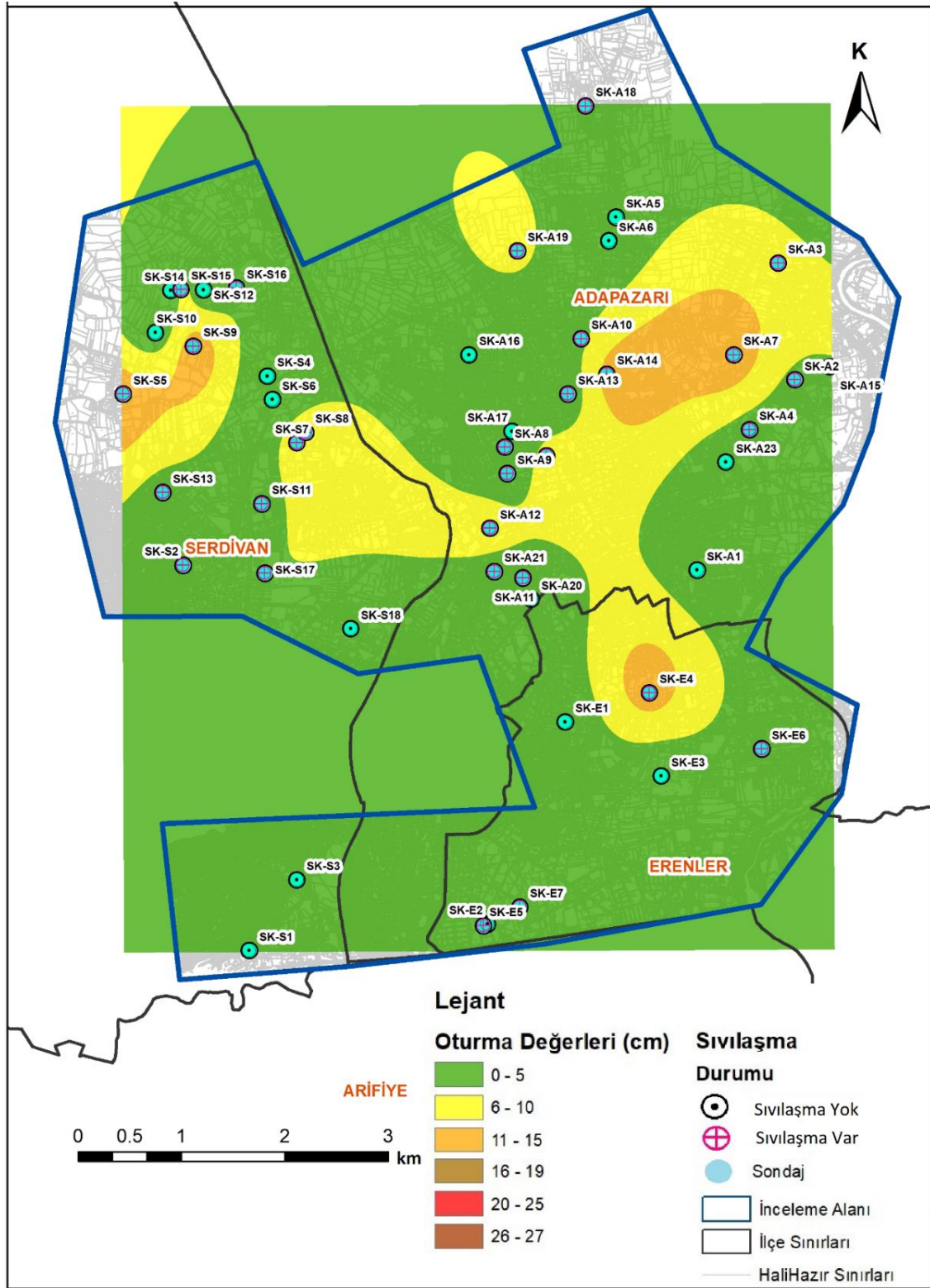
Şekil 5.14. Ishihara ve Yoshimine (1990) yöntemine göre 0,415 g değerinde sıvılaşma potansiyeli ve toplam oturma miktarları dağılım haritası



Şekil 5.15. Tokimatsu ve Seed (1987) yöntemine göre 0,415 g değerinde sıvılaşma potansiyeli ve toplam oturma miktarları dağılım haritası



Şekil 5.16. Ishihara ve Yoshimine (1990) yöntemine göre 0,498 g değerinde sıvılaşma potansiyeli ve toplam oturma miktarları dağılım haritası



Şekil 5.17. Tokimatsu ve Seed (1987) yöntemine göre 0,498 g değerinde sıvılaşma potansiyeli ve toplam oturma miktarları dağılım haritası

5.2. İnce Daneli Zeminlerin Sıvılaşma Analizi

İnce daneli zeminlerin sıvılaşma yatkınlığının tespiti için Bray ve Sancio (2006) yöntemi kullanılmıştır. Bray ve Sancio (2006), 1994 Northridge, 1999 Kocaeli ve 1999 Chi Chi depremlerinden yola çıkarak ince daneli zeminlerde sıvılaşmaya yatkınlığını IP değerinin daha etkin bir değer olduğunu belirterek ince daneli zeminlerde sıvılaşma yatkınlığını ortaya koymak için IP ve w_n/w_L ile yeni bir yöntem ortaya koymuşlardır.

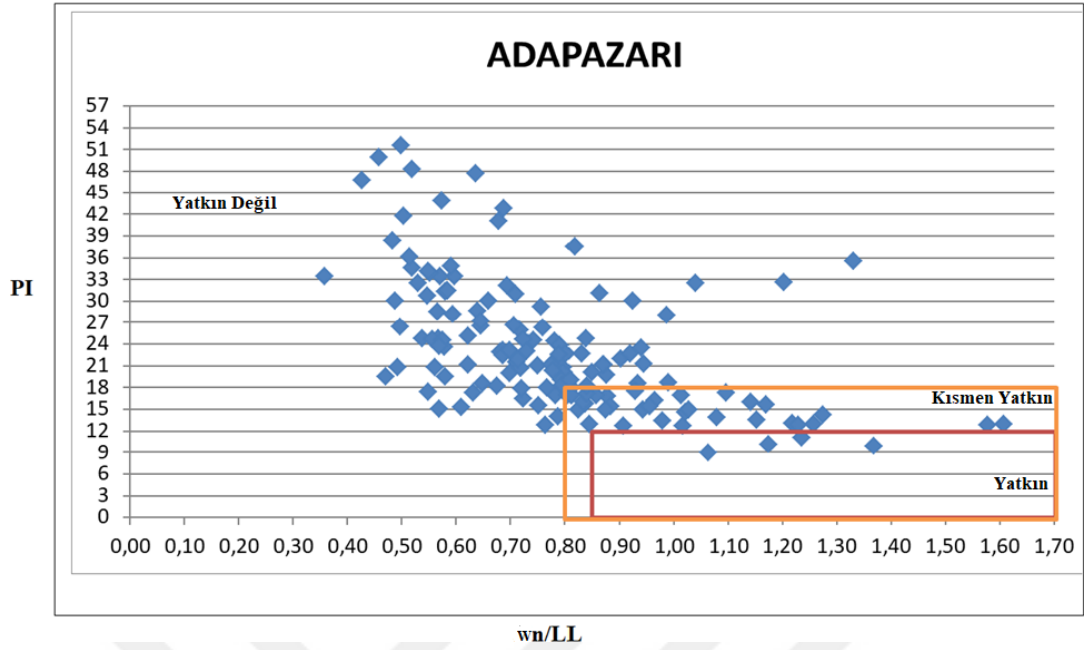
Bray ve Sancio (2006) yöntemi ile her bir kil tabakası için analiz yapılmış ve sonuçlar Şekil 5.18, Şekil 5.19, Şekil 5.20’ deki 2 boyutlu grafiklere işlenmiştir. Sondaj numuneleri üzerinde yapılan laboratuvar deney sonuçlarına göre yapılan analiz sonucu oluşturulan grafiklerde kırmızı hatla sınırlanan alan yatkın, sarı hatla sınırlanan alan kısmen yatkın, diğer alanlar ise yatkın değil olarak tanımlanmıştır.

Adapazarı İlçe sınırlarında kalan zeminlerinde açılan 23 sondaj kuyusundan elde edile 145 veri üzerinde değerlendirme yapılmış ve grafik oluşturulmuştur (Şekil 5.18). 145 veri içerisinde 4 adet CL seviyesinde yatkınlık olduğu tespit edilmiştir. Bu kuyulara ait bilgiler Tablo 5.8’ de verilmiştir.

Tablo 5.8. PI’ne göre sıvılaşmaya yatkın seviyelerin mühendislik bilgileri

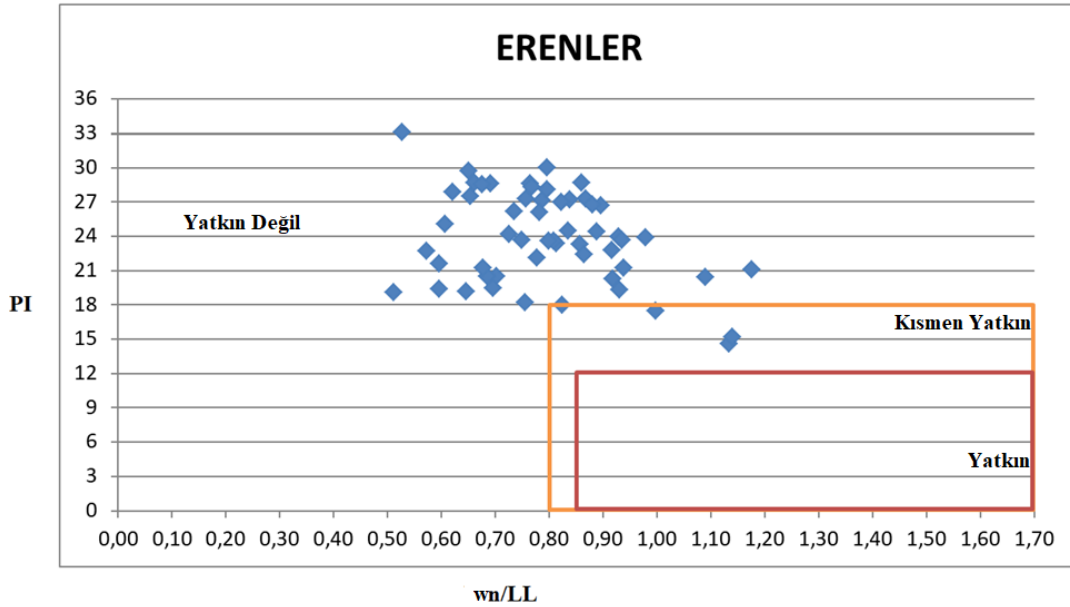
SK No	Derinlik (m)	PI	LL	W _n	SPT N(30)
A3	4,5	10,2	29,4	34	7
A19	10,5	9,9	27,2	37,2	8
A19	12	11,1	28,9	35,7	9
A19	13,5	9	28,6	30,4	10

Sıvılaşma yatkınlığı tespit edilen A3 sondajında 4,5 metrede bulunan zeminde 200 nolu elekten geçen malzeme oranı %99; A19 sondajında 10,5 metrede bulunan zeminin 200 nolu elekten geçen malzeme oranı %99,5, 12 metrede bulunan zeminde 200 nolu elekten geçen malzeme oranı %98,9, 13,50 metrede bulunan zeminde 200 nolu elekten geçen malzeme oranı %99,8 dir. Sıvılaşma yatkınlığı olduğu belirlenen PI değerleri 12’nin altındaki CL seviyelerinde aynı zamanda SPT-N30 değerlerinin de düşük olduğu görülmüştür. Bu zeminler deprem anında dayanımını kaybedebilir.



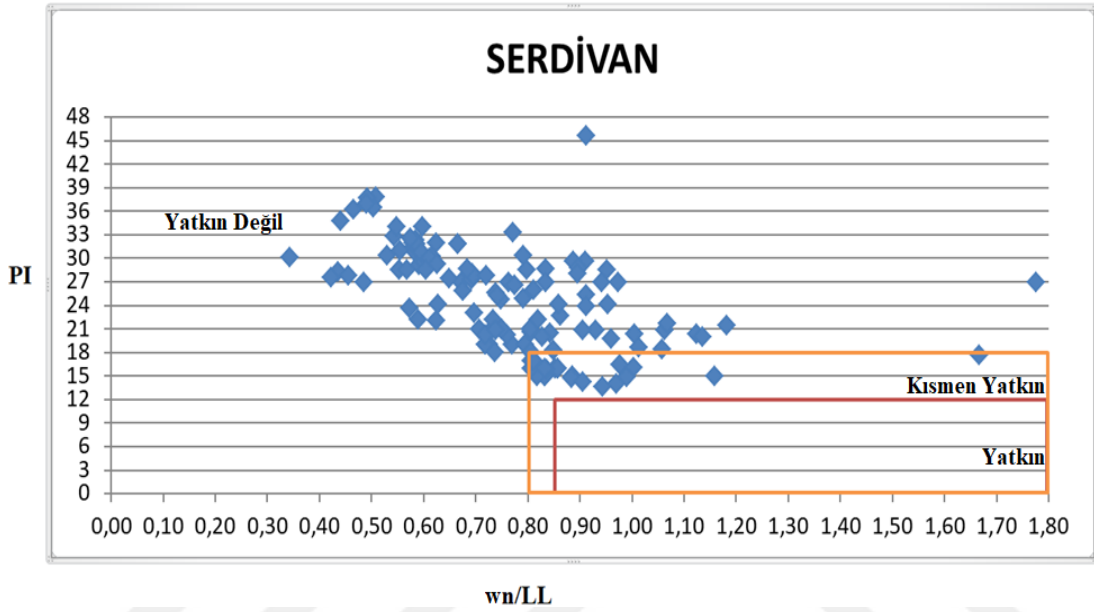
Şekil 5.18. Adapazarı İlçesine ait ince daneli zeminlerde sıvılaşıma yatkınlığı

Erenler İlçe sınırlarında kalan zeminlerinde açılan 8 sondaj kuyusundan elde edilen 55 veri üzerinde değerlendirme yapılmış ve grafik oluşturulmuştur. 55 veri içerisinde sıvılaşıma yatkın alana düşen olmamıştır (Şekil 5.19). Bu nedenle bu alanda bulunan ince daneli zeminler için deprem yükü dayanım kaybına sebep olmayabilir.



Şekil 5.19. Erenler İlçesine ait ince daneli zeminlerde sıvılaşıma yatkınlığı

Serdivan İlçe sınırlarında kalan zeminlerinde açılan 18 sondaj kuyusundan elde edilen 132 veri üzerinde değerlendirme yapılmış ve grafik oluşturulmuştur. 132 veri içerisinde sınılaşmaya yatkın alana düşen olmamıştır (Şekil 5.20). Bu nedenle bu alanda bulunan ince daneli zeminler için deprem yükü dayanım kaybına sebep olmayabilir.



Şekil 5.20. Serdivan İlçesine ait ince daneli zeminlerde sınılaşma yatkınlığı

5.3. Sınılaşma Potansiyeli İndeksi

Yerinde yapılan SPT deneyi sonuçları kullanılarak LiquefyPro (CivilTech, 2002) Programı ile iri daneli zeminlerde sınılaşma potansiyeli varlığı tespit edilen tabakalara ait verilerle sınılaşma potansiyeli analizi yapılmıştır. Bu sınılaşma analizi ile elde edilen sınılaşmaya karşı güvenlik katsayısı (F_s) değeri kullanılarak sınılaşma potansiyeli indeksi (PL) hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 5.9' de gösterilmiştir.

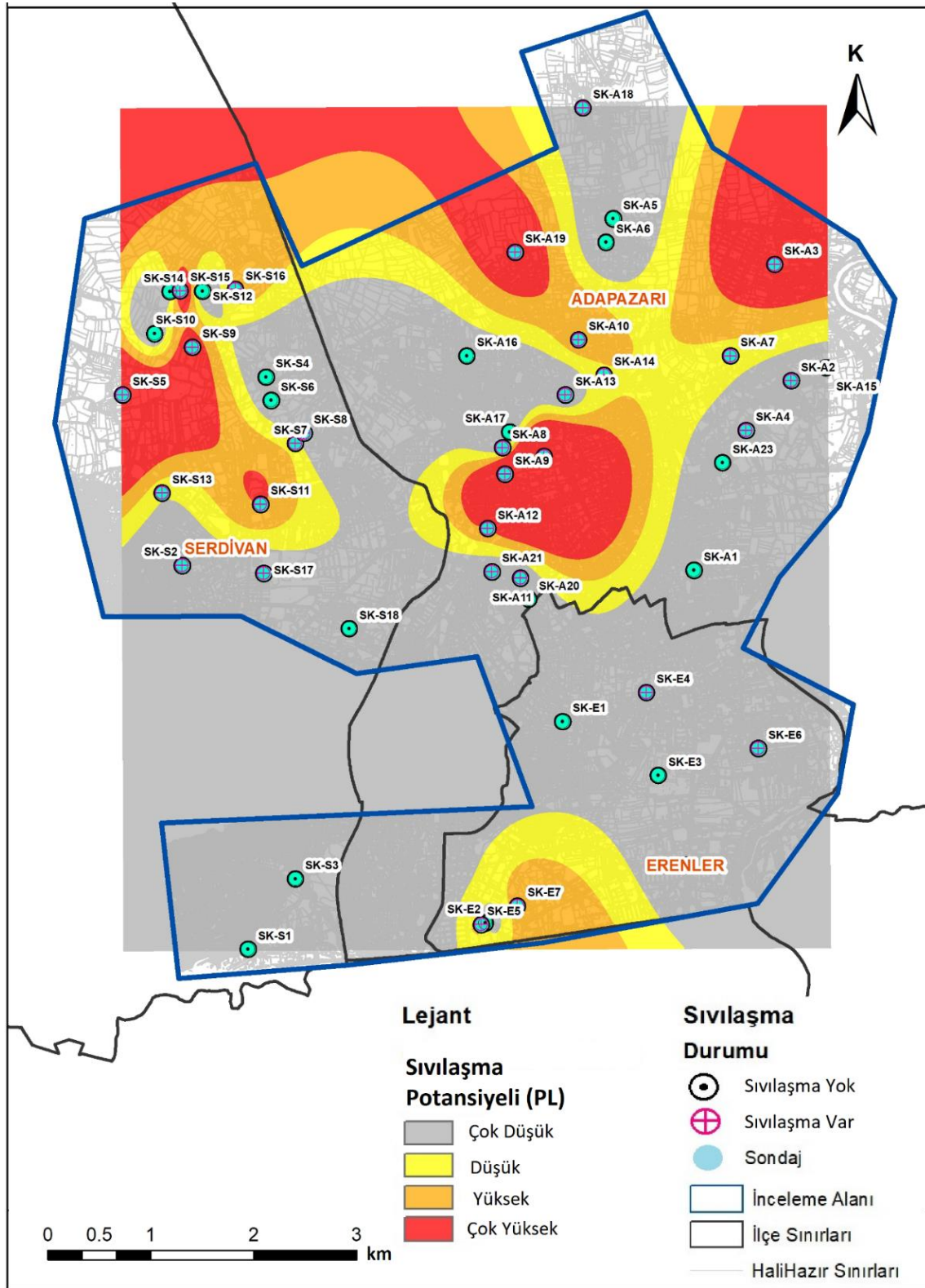
Bu yöntemle göre sınılaşmanın yüzeyde meydana getirdiği etkinin derecesi ortaya konmuş ve hesaplanan sınılaşma potansiyeli indeksi verileri ArcGIS Ver.10.3.1 programı kullanılarak derecelendirilmiş ve 0,332 g-0,415 g-0,498 g ivme değerleri için ayrı ayrı haritalama işlemi yapılmıştır (Şekil 5.21, Şekil 5.22, Şekil 5.23).

Tablo 5.9. Iwasaki ve diğ. (1982) yöntemi ile sıvılaşma potansiyeli indeksi

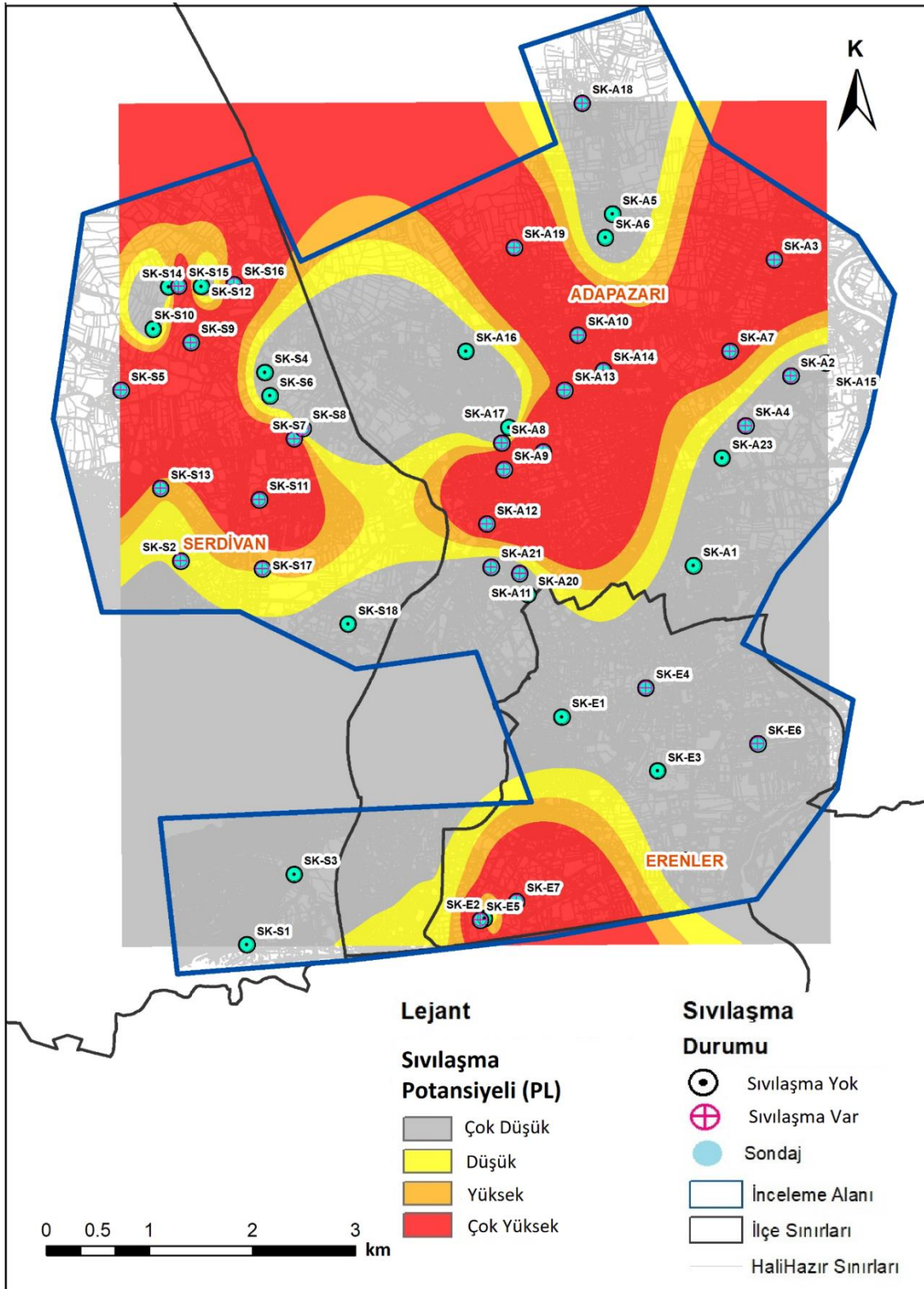
SK. NO	PL			SK. NO	PL		
	415	498	332		415	498	332
SK-A1	0	0	0	SK-E3	0	0	0
SK-A2	0	6,38	0	SK-E4	0,72	6,48	0
SK-A3	33,75	42,2	24	SK-E5	29,3	41	12,71
SK-A4	0	1,7	0	SK-E6	0	10	0
SK-A5	0	0	0	SK-E7	30,69	41,58	13,86
SK-A6	0	0	0	SK-E8	0	0	0
SK-A7	20,5	33,23	8,28	SK-S1	0	0	0
SK-A8	6,37	20,93	0	SK-S2	6,84	11,88	0
SK-A9	49,7	57,19	38,44	SK-S3	0	0	0
SK-A10	31,68	42,89	14,85	SK-S4	0	0	0
SK-A11	1,02	6,18	0	SK-S5	43,68	50,4	33,6
SK-A12	22,54	28,3	15,3	SK-S6	0	0	0
SK-A13	17	23,46	0	SK-S7	22,68	31,08	7,56
SK-A14	21,5	34,21	9,36	SK-S8	0	7,65	0
SK-A15	0	0	0	SK-S9	33,23	43,99	19,32
SK-A16	0	0	0	SK-S10	0	0	0
SK-A17	0	0	0	SK-S11	24,96	31,36	15,36
SK-A18	0	0	0	SK-S12	0	0	0
SK-A19	28,3	32,92	20,79	SK-S13	12,6	16,56	6,84
SK-A20	0	0	0	SK-S14	0	0	0
SK-A21	0	0	0	SK-S15	30,09	33,66	24,99
SK-A22	56,25	62,81	46,9	SK-S15	30,09	33,66	24,99
SK-A23	0	0	0	SK-S16	21,94	28,3	13,28
SK-E1	0	0	0	SK-S17	10,89	25,74	0
SK-E2	0	0	0	SK-S18	0	0	0

Haritalar incelendiğinde 0,332 g ivme değerinde inceleme alanının orta kesimi ile kuzeydoğusu ve kuzeybatısı ile güneyinde sıvılaşma potansiyeli indeksinin düşük, yüksek ve çok yüksek seviyede olduğu, 0,415 g değerinde inceleme alanının orta kesiminden kuzey kesimine gidildikçe ve güney kesimde çok yüksek dereceli sıvılaşma potansiyeli indeksinde artış olduğu ve alan olarak genişlediği, 0,498 g ivme değerinde ise yüksek ve çok yüksek derecede sıvılaşma potansiyeli indeksinin tüm değerler arasında en geniş alana yayılmış olduğu, düşük ve yüksek derecede sıvılaşma potansiyelinin de 0,332 g ve 0,415 g değerlerinden farklı olarak inceleme alanının güneydoğusunda da ortaya çıktığı görülmüştür.

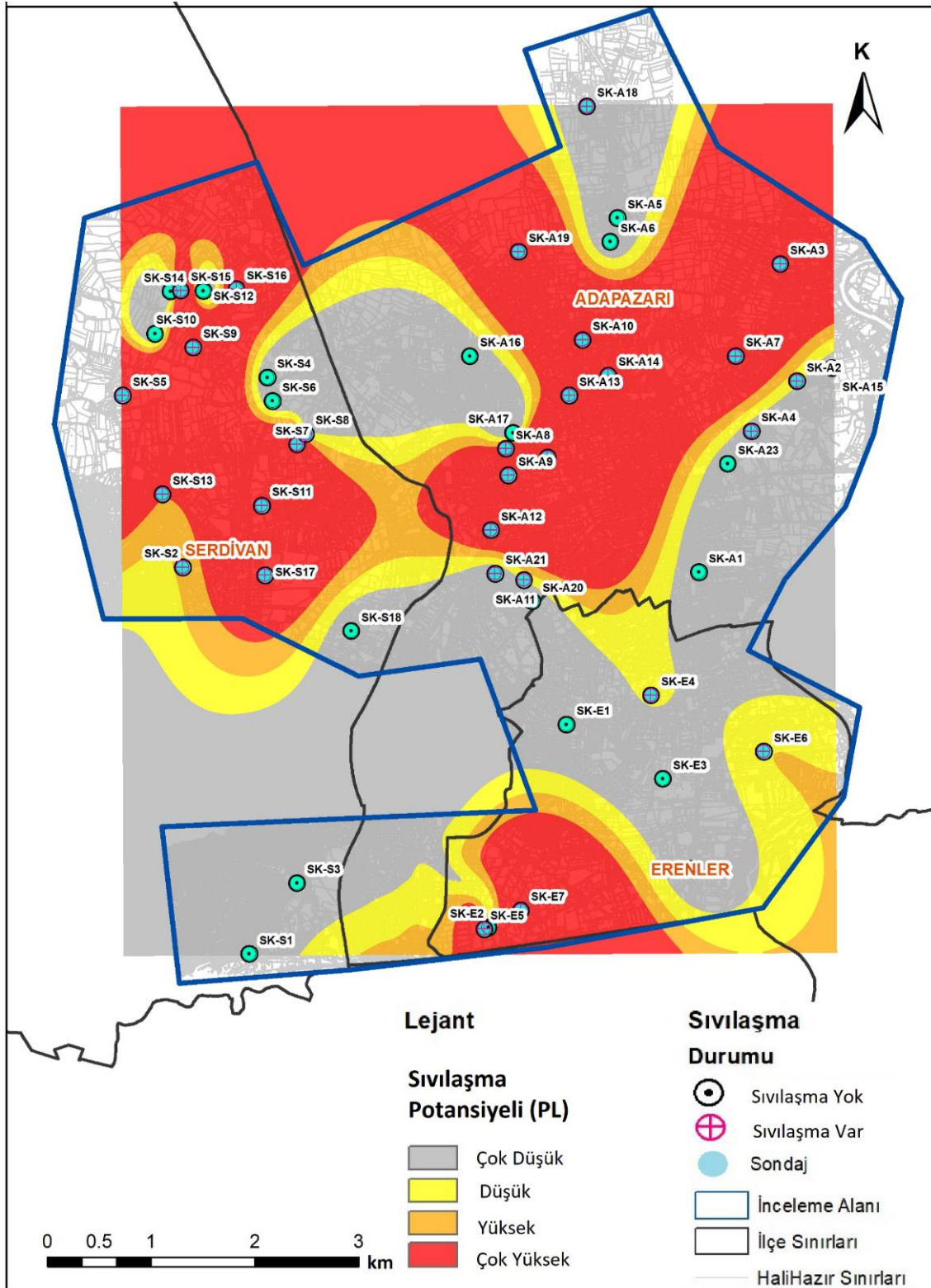
Bu yaklaşımla ivme büyüklüğü arttıkça sıvılaşma potansiyel indeksinin yani sıvılaşmanın yüzeydeki etki alanının çok geniş alanlarda yayılım gösterdiği anlaşılmaktadır.



Şekil 5.21. 0,332 g ivme değerinde Iwasaki ve diğ. (1982) Yöntemi ile Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi haritası



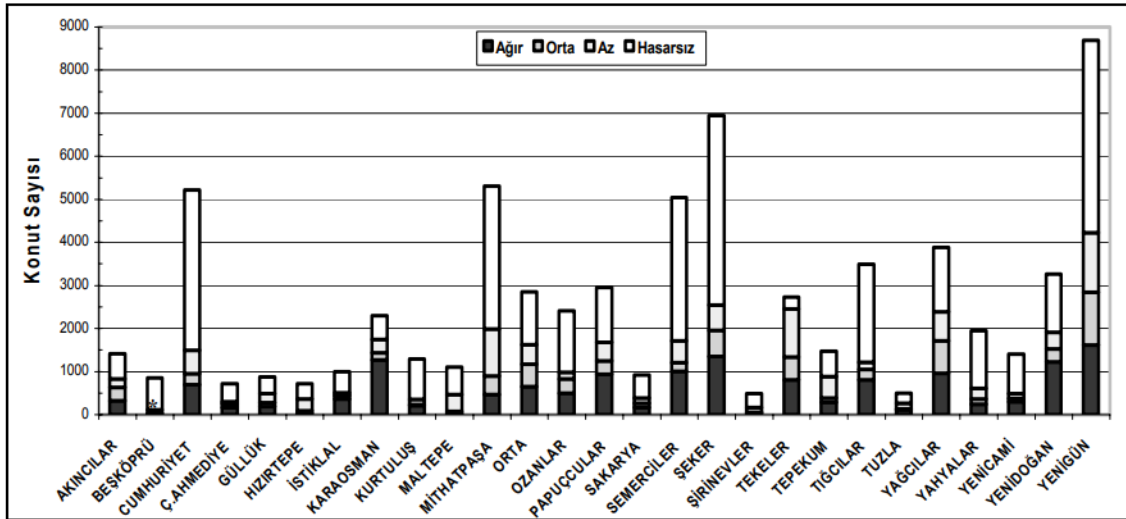
Şekil 5.22. 0,415 g ivme değerinde Iwasaki ve diğ. (1982) Yöntemi ile Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi haritası



Şekil 5.23. 0,498 g ivme değerinde Iwasaki ve diğ. (1982) Yöntemi ile Sivilaşma Potansiyeli İndeksi haritası

Sıvılaşma potansiyeli indeksi değerlerine bakıldığında 49 sondajdan 27 adedinde 3 ivme değerlerinde olmak üzere sıvılaşma potansiyeli indeksi varlığı söz konusudur. Bu 27 sondajlardan sıvılaşma potansiyeli indeksi değerine sahip seviyeler incelendiğinde genel olarak 5-20 aralığında düşük SPT değerleri vermiş olan; 15 sondajda SM (siltli kum), 4 Sondajda SP (kötü derecelenmiş kum-çakıllı kum), 4 Sondajda SC(killi kum), 2 sondajda SW (iyi derecelenmiş temiz kum), 2 sondajda ise SM-SC (siltli kum-killi kum) birimlerinin varlığı tespit edilmiştir. Bu durumda inceleme alanı genelinde özellikle SM (siltli kum) birimlerinde daha fazla sıvılaşma potansiyeli indeksi tespit edilmiştir.

Yapılan analizler ile hazırlanan haritalarda ivme değeri arttıkça sıvılaşma potansiyeli ve oturma miktarlarının ile sıvılaşma potansiyeli indeksinin arttığı tespit edilen, inceleme alanının özellikle kuzeydoğusu ile 1999 Gölcük depreminde kaydedilen hasarlı binaların yoğunlaştığı alanlar örtüşmektedir (Şekil 5.25).



Şekil 5.24. Adapazarı Şehir Merkezinde Oluşan Yapı Hasarlarının Mahallelere Göre Dağılımı (Sünbül ve diğ., 2007)

Bu da hasar ve zemin ilişkisi ile yapılan analizlerin doğruluğunu işaret etmektedir. Bu durumda inceleme alanında sıvılaşma ve oturma haritalarında sarı ve turuncu olarak belirlenen alanlarda deprem ile birlikte sıvılaşma ve oturma ile oluşacak hasarın artacağı ve riskin her üç ivme değerinde de artarak devam ettiği görülmektedir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Morfolojisi Kuzey Anadolu Fay sistemi denetimi altında olan inceleme alanı ova niteliğinde olup, bir çek-ayır havza özelliği sergilemektedir. Kent merkezinde tepe şeklinde yükseltiler olsa da alanın tamamına yakını düz arazilerden oluşmaktadır. Düz alanlar gevşek-tutturulmamış ince ve iri taneli genç çökellerden oluşmaktadır. YASS seviyesi yüzeye yakındır. Özellikle 1999 Gölcük depreminden etkilenen iller arasında hasar boyutu değerlendirildiğinde en çok hasarın Adapazarı kent merkezinde olduğu, hasar dağılımına bakıldığında ise düz alanlarda yüksek alanlara nazaran çok daha fazla hasar olduğu görülmektedir. Bu durum zemin özelliklerinin deprem-zemin özellikleri-hasar durumu arasındaki bağlantıyı işaret etmektedir.

Bu çalışmada; aletsel dönem ve öncesinde yıkıcı depremler sebebiyle can ve mal kayıpları yaşanan Adapazarı kent merkezi ile komşu iki merkez ilçe Erenler ve Serdivan İlçeleri'nde hâkim olan alüvyal zeminin deprem etkisi altında davranışı ortaya koymaya yönelik, iri daneli zeminler için; zeminlerin fiziki ve mühendislik özellikleri, YASS, deprem büyüklüğü parametreleri kullanılarak sıvılaşma analizi yapılmış, zeminde sıvılaşmaya bağlı oturma miktarları belirlenmiş ve sıvılaşma potansiyeli indeksi hesaplanmıştır. İnce daneli zeminlerden siltli birimler için yeterli veri olmadığından çalışma kapsamı dışında bırakılmış olup killi birimler için zeminlerin mühendislik özelliklerinden plastisite indeksi, doğal su muhtevası ve likit limit değerleri kullanılarak, sıvılaşmaya yatkınlıklarına yönelik analiz yapılmıştır.

Basitleştirilmiş sıvılaşma analizinde; inceleme alanında 49 adet sondaj çalışmasından elde edilen verilerde, USCS (Birleştirilmiş Zemin Sınıflama Sistemi)' ye göre iri taneli SC, SM, SW, GW türü zeminlere, ince taneli CH, CL, ML türü zeminler tespit edilmiştir.

İnce taneli zeminlerin; LL değerlerine göre plastiklik dereceleri, CL zemin türü için Düşük-Orta aralığı, CH zemin türü için ise Orta-Çok yüksek aralığında değişkenlik göstermektedir. PI değerlerine göre; CL zemin türü orta-yüksek, CH zemin türü ise yüksek-oldukça yüksek plastisiteli olarak belirlenmiştir. ML zemin türü ise NP (none-plastik) olarak ayırtlanmıştır.

Tüm sondaj delgilerinde en düşük SPT-N değeri 4, en yüksek SPT-N değeri 117 olarak tespit edilmiştir. YASS ortalama 3 metrededir.

Zemin özellikleri yanı sıra deprem büyüklüğü de sıvılaşma analizinde önemli rol oynar. 1999 Gölcük depreminde Adapazarı'nda kayıt edilen en büyük yer ivmesi 0,415 g ve bu değerin %20 eksiği 0,332 g ve %20 fazlası 0,498 g olarak oluşturulan senaryo ivme değerleri kullanılmıştır.

İri daneli zeminler için yapılan standart sıvılaşma analizine göre inceleme alanında yapılmış 49 sondajdan 0,332 g ivme değerinde 25, 0,415 g değerinde 29, 0,498 g değerinde 30 adedinde sıvılaşma varlığı tespit edilmiştir. 49 lokasyon için yapılan hesaplamalarda; 0,332 g değerinde Ishihara ve Yoshimine (1990) yöntemine göre oturma miktarı 0-13,64 cm aralığında olup ortalama 1,53 cm, Tokimatsu ve Seed (1987) yöntemine göre ise 0-15,05 cm aralığında olup ortalama 2,71 cm'dir. 0,415 g değerinde Ishihara ve Yoshimine (1990) yöntemine göre oturma miktarı 0-13,42 cm aralığında olup ortalama 1,88 cm, Tokimatsu ve Seed (1987) yöntemine göre ise 0-15,82 cm aralığında olup ortalama 3,14 cm'dir. 0,498 g değerinde ise Ishihara ve Yoshimine (1990) yöntemine göre oturma miktarı 0-13,38 cm aralığında olup ortalama 2,07 cm, Tokimatsu ve Seed (1987) yöntemine göre ise 0-15,86 cm aralığında olup ortalama 3,33 cm'dir. Her iki analiz yöntemi ile hesaplanan değerlerde diğer tüm veriler aynı iken ivme değerinin artmasıyla oturma miktarı da arttığı görülmüştür.

İnce daneli zeminler için sıvılaşma yatkinliğini belirlemeye yönelik yapılan analizde ise toplam 332 veri değerlendirilmiş olup sadece Adapazarı zeminlerinde 2 sondaja ait 4 adet değerde yatkinlik tespit edilmiştir. Bu analiz sonuçları da 2 boyutlu grafik olarak düzenlenmiştir. Bu tabakalar deprem anında dayanımlarını yitirebilir.

Sıvılaşma analizi ile hesaplanan F_s değeri sıvılaşma potansiyeli indeksi hesaplanmasında kullanılmıştır. Sıvılaşma varlığı ile oturma miktarları ve Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi CBS yönteminden ArcGIS bilgisayar programı kullanılarak haritalanmıştır.

Sıvılaşma potansiyeli indeksi değerlerine göre 49 sondaj kuyusundan 27 adedinde 3 ivme değerlerinde olmak üzere sıvılaşma potansiyeli indeksi varlığı söz konusudur. 27

sondajdan sıvılaşma potansiyeline sahip seviyeler incelendiğinde genel olarak 5-20 aralığında düşük SPT değerleri vermiş olan; 15 sondajda SM (siltli kum), 4 Sondajda SP (kötü derecelenmiş kum-çakıllı kum), 4 Sondajda SC (killi kum), 2 sondajda SW (iyi derecelenmiş temiz kum), 2 sondajda ise SM-SC (siltli kum-killi kum) birimlerinin varlığı tespit edilmiştir. Bu durumda inceleme alanı genelinde özellikle SM (siltli kum) birimlerinde daha fazla sıvılaşma potansiyeli bulunmaktadır.

Haritalar incelendiğinde 0,332 g ivme değerinde inceleme alanının orta kesimi ile kuzeydoğusu, kuzeybatısında ve güneyinde sıvılaşma potansiyeli indeksinin çok yüksek seviyede olduğu, 0,415 g değerinde inceleme alanının orta kesiminden kuzey kesimine gidildikçe ve güney kesimde çok yüksek dereceli sıvılaşma potansiyeli indeksinde artış olduğu, 0,498 g ivme değerinde ise çok yüksek ve yüksek derecede sıvılaşma potansiyeli indeksinin tüm değerler arasında en geniş alana yayılmış olduğu görülmektedir.

Sıvılaşma potansiyelinin Adapazarı zeminlerinde 4, 7, 15 m derinliklerinde yoğunlaştığı ve genel olarak 10 m'ye kadar olan derinliklerde olduğu, Erenler zeminlerinde genel olarak 10 m'den daha derinde olduğu, Serdivan zeminlerinde ise 6, 7, 12 m derinliklerde yoğunlaştığı ve 20 metrelik derinlikte her seviyede olduğu görülmüştür.

Yapılan çalışmaların sonucunda inceleme alanının zemin özellikleri ve YASS yüksekliği, deprem nedeniyle oluşan tekrarlı gerilmeler altında sıvılaşmaya yatkınlık göstermektedir. Yapılan analizlerde ivme değerlerinin artmasıyla sıvılaşma potansiyeli, oturma değerleri ve sıvılaşma potansiyeli indeksini arttığı görülmüştür. Değerlerdeki artışların ivme değerinin artması yanında yeraltı suyunun yüzeye yakın olması, kum zemin tabakasının kalınlığı, SPT değerlerinin düşük olmasına da bağlıdır. Bu parametrelere bağlı olarak oturma miktarlarında artışla birlikte yapılaşma riski bu alanlarda daha yüksek olmaktadır. Yerleşime uygunluk çalışmalarında bu alanlar uygun olmayan alanlar olup ayrıntılı jeoteknik araştırma gerektiren alanlar kapsamına girmektedir. İnceleme alanının kuzeydoğusunda 1999 Gölcük depreminde meydana gelen hasarın yoğunlaştığı alan analizlerde elde edilen sıvılaşma ve oturma potansiyeli tespit edilen alanlar örtüşmüş olup bu alanlarda yapılaşmaya gitmek risklidir. Bu yaklaşımla inceleme alanının güneydoğusu ve kuzeybatısı için de aynı riskten bahsetmek mümkündür. İnceleme alanı genç bir morfolojik yapıya sahiptir ve oluşum

devam etmektedir. KAF Hattı belli zaman aralıklarında yıkıcı depremler üretmiştir, üretmeye de devam edecektir. 1999 yılında meydana gelen Gölcük depremi ile eşdeğer ya da daha büyük bir depremde sıvılaşma ve oturma kaynaklı hasarın artması kaçınılmazdır. Bu durumda KAF Hattı denetiminde şekillenen inceleme alanında meydana gelebilecek depremlerde risk faktörünü en aza indirme, can ve mal kayıplarının önüne geçmek için inceleme alanının özellikle kuzeybatı, kuzeydoğu ve güneydoğu kesimlerinde yerleşimden kaçınılmalı, mevcut yerleşim ile ilgili de çok daha detaylı çalışmalar ile belirlenecek tedbirler alınmalıdır. Adapazarı zeminlerinde özellikle 10 metreden daha sığ, Erenler zeminlerinde 10 metreden daha derin, Serdivan zeminlerinde ise her derinlikte özellikle inceleme alanında sıvılaşabilirliği tespit edilen SM, SP, SC, SW zemin türü zeminler ile karşılaşıldığında detaylı inceleme ve iyileştirme projeleri planlanmalıdır. Tüm şehri kapsayacak şekilde daha ayrıntılı çalışmalar yapılarak sıvılaşma açısından yüksek riskli alanlarda imar planlaması ve kat sayısı düzenlemeleri yapılırken sıvılaşma unsuru dikkate alınmalı, yapılaşma kaçınılmaz ise zemin unsurları detaylı incelenerek öncelikle zemin iyileştirme çalışmaları yapılmalıdır. Ana ulaşım hatlarına uzaklık ve önemli ticaret yolları üzerinde oluşu, büyük ticaret ve sanayi kentlerine yakınlığı vb. sebeplerle inceleme alanı sanayi yatırımları için cazibeli bir hal almış durumdadır ve bu kritik üst yapılar planlanırken ayrıntılı Jeoteknik ve mühendislik jeolojisi incelemeleri ve hesaplamalar yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

- Akın, M.K., (2019). Düzce Kent Merkezi Zeminlerinin Sıvılaşma Potansiyelinin Değerlendirilmesi. *Jeoloji Mühendisleri Dergisi*, 43 (1), 39-56. DOI:10.24232/jmd.572465.
- Aktuna, Z., (2006). Dikmen Köyü (Hendek- Adapazarı) Çevresi Olası Polimetallik Cevherleşmesi ve Ayrışım Zonu Çevresel Etkileri. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 505031321.
- Altın, M.U., (2006). Kuzey Anadolu Fayının Batı Marmara Bölümündeki Hareketlerinin GPS Ölçmeleri ile Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 501041610.
- Asad, Md.A., Islam, S., Siddique, M.N.A., (2015). Effect of High Peak Ground Acceleration on the Liquefaction Behaviour of Subsoil and Impact on the Environment. *Journal of Civil Engineering Research*, 5(4), 83-89, DOI: 10.5923/j.jce.20150504.02.
- Bol, E., (2003). Adapazarı Zeminlerinin Geoteknik Özellikleri. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 136447.
- Bray, J.D., Sancio, R.B. (2006). Assessment of liquefaction susceptibility of fine-grained soils. *J. Geotechnical and Geoenvironmental Eng.*, 132(9), 1165-1177, DOI:10.1061/asce.1090-0241.
- CivilTech 2002, LiquefyPro, Liquefaction and Settlement Analysis, Software Manual Version 4 and Later Civiltech Software, October 2004.
- Çetin, K.Ö., UNUTMAZ, B., (2004). Zemin Sıvılaşması ve Sismik Zemin Davranışı. *TMH-Türkiye Mühendislik Haberleri*, 430 (2), 32-37.
- Çetin, K.Ö., (2019). Sismik Zemin Sıvılaşması, *Yeni Deprem Yönetmeliğinde Geoteknik Hususlar 2 - Semineri*, Ankara, Türkiye, 28 Şubat 2019.
- Emre, Ö., Erkal, T., Tchepalyga, A., Kazancı, N., Keçer, M., Ünay, E., (1998). Doğu Marmara Bölgesinin Neojen-Kuvaternerdeki Evrimi. *MTA Dergisi* 120, 233-258.
- Güler, E., Savaş, H., Afacan K.B., (2021). Adapazarı Kumunun Sıvılaşma Potansiyelinin Farklı Yükler Altında İncelenmesi, *6. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*, Kocaeli, Türkiye, 13-15 Ekim 2021.
- Hitoshi, M., Jumpei, A., Masao, K., Kajuro, N., Kajuro, N., Keiichi, N., Sumi, S., (2002). Bedrock structure in Adapazarı, Turkey, Inferred from Gravity Anomaly and Microseisms, *Proceedings of The 11th Japan Earthquake Engineering Symposium*, 22(9-12), 301-306, DOI:10.1016/S0267-7261(02)00105-7.
- Hsiao, D.H., Zheng, Z.Y. (2019). Simplified Empirical Method for Predicting Liquefaction Potential and Its Application to Kaohsiung Areas in Taiwan. *World*

- Hossain, A., Ashikuzzaman, M., Salan, M.S.A., (2019). Effect of Peak Ground Acceleration on Liquefaction Behavior of Subsoil: A Case Study of Rajshahi City Corporation Proceedings of International Conference on Planning, Architecture and Civil Engineering, Rajshahi, Bangladesh, 07 - 09 February 2019.
- Kalafat, D., (2011). Marmara Bölgesi'nin Depremselliği ve Deprem Ağının Önemi. 1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, Ankara, Türkiye, 11-14 Ekim 2011.
- Karakaş, A., (2005). İzmit Havzası Genç Çökellerinin Deprem Esnasındaki Davranışları. Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 167869.
- Karakaş, A., Coruk, Ö., (2010). Liquefaction Analysis of Soils in the Western İzmit Basin, Turkey. *Environmental & Engineering Geoscience*, 16(4), 411–430, DOI:10.2113/gsegeosci.16.4.411.
- Karavul, C., Kurnaz, T.F., Beyhan, G., Kıyak, A., (2005). Coğrafi Bilgi Sistemleri Kullanılarak Adapazarı Zemin Sıklık Durumunun Haritalanması. *Deprem Sempozyumu*, Kocaeli, Türkiye, 23-25 Mart 2005.
- Kavurmacı, M., (2017). Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) Kullanılarak Sıvılaşma Riskinin Değerlendirilmesi: Aksaray Örneği. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 23(3), 303-311.
- Kaya, Z., Erken, A., (2009). İstanbul-Adapazarı Zeminlerinin Dinamik Davranış Özellikleri. *İTÜ Dergisi* 8 (5), 157-168.
- Ketin, İ., (1976). San Andreas ve Kuzey Anadolu Fayları Arasında Bir Karşılaştırma. *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*, 19, 149-154.
- Koç, G., (2007). Gölcük ve Çevresinin Sıvılaşma Potansiyelinin Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 232692.
- Komazawa, M., Morikawa, H., Nakamura, K., Akamatsu, J., Nishimura K., Sawada, S., et al, (2002). Bedrock Structure in Adapazarı Turkey a Possible Cause of Severe Damage by the 1999 Kocaeli Earthquake. *Journal of SDDE*, 22(9-12), 829-836 DOI:10.1016/S0267-7261(02)00105-7.
- Önalp, A., Bol, E., Ural, N., (2006). Estimation of Undrained Shear Strength from Cone Tip Resistance in Clayey Soils. *Seventh International Congress on Advances in Civil Engineering*, İstanbul, Turkey, 11-13 October, 2006.

- Özalp, S., Emre, Ö., Doğan, A., (2013). Kuzey Anadolu Fayı Güney Kolu'nun Segment Yapısı ve Gemlik Fayının Paleosismik Davranışı, KB Anadolu. *MTA Dergisi*, 147,1-17.
- Özaydın, K., (2007). Zeminlerde Sıvılaşma. *Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, İstanbul, Türkiye, 16-20 Ekim 2007.
- Özocak, A., Sert, S., BOL, E., Arel, E., (2004). Arifiye Belediyesi Zemin İnceleme Raporu. *Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü*, Temmuz 2004.
- Özmen, B., (2000). 17 Ağustos 1999 İzmit Körfezi Depreminin Hasar Durumu (Rakamsal Verilerle), *Türkiye Deprem Vakfı*, TDV/DR 010-53, 1-132.
- Papathanassiou, G., Seggis, K., Pavlides, S., (2011). Evaluating Earthquake-Induced Liquefaction in the Urban Area of Larissa, Greece, *Bulletin of Engineering Geology the Environment* 70 (1), 79-88, DOI:10.1007/s10064-010-0281-3.
- Sakarya Büyükşehir Belediyesi, Sakarya İl Bütünü Kentsel Dönüşüm Strateji Belgesi, Aralık, 2020.
- Seed, H.B., and Idriss, I.M. (1971), Simplified Procedure For Evaluation Soil Liquefaction Potential. *Journal of The Soil Mechanics and Foundations Division*, 97 (9), 1249-1273, DOI:10.1061/jsfeaq.0001662.
- Sert, S., Özocak,A., Arel,E., Bol, E., (2005). Sakarya Bölgesinde Yerel Zemin Özelliklerinin Hasar Büyüklüğüne Etkisi, Arifiye-Geyve-Güneşler Örneği. *Deprem Sempozyumu*, Kocaeli, Türkiye, 23-25 Mart 2005.
- Sert, S., Özocak,A., Arel,E., Bol, E., (2017). Endüstri Yapısı Temeline Yönelik Vaka Analizi. *Akademik Platform-Journal of Engineering and Science* 5(3),101-112 , DOI:10.21541/apjes.319938.
- Sharma, B., Hazarika, P.J.G., Engineering, G., (2013). Assessment of liquefaction potential of Guwahati city: a case study. *Journal of Geotechnical and Geoenviromental Engineering* 31,1437-1452. DOI:10.1007/s10706-013-9667-x
- Sünbül, A.B., Dağdeviren, U., Gündüz, Z., Arman, H. 1999 Marmara Depremi Sonrası Adapazarı Şehir Merkezi Hasar Durumlarının Analizi ve Depremin Ekonomik Boyutu. *TMMOB Afet Sempozyumu*, Ankara, Türkiye, 5-7 Aralık 2007.
- Ulusay, R., B. (2010), *Uygulamalı Jeoteknik Bilgiler* (5.Baskı), TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası, Ankara: TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları.
- Ulutaş, E., Coruk, Ö., Karakas, A., (2010), A Study Of Residuals For Strong Ground Motions in Adapazarı Basin, Nw Turkey, By Ground Motion Prediction Equations (Gmpes). *Studia Geophysica et Geodaetica*, 55(2), 213-240, DOI:10.1007/s11200-011-0013-6.

URL-1: <https://deprem.afad.gov.tr/tarihteBuAy>, (Ziyaret tarihi: 08 Aralık 2021).

Ündül, Ö., Gürpınar, O., (2003). Çokal Vadisindeki (Gelibolu) Alüvyal Zeminlerin Sıvılaşma Potansiyeli. *İstanbul Üniv. Müh. Fak. Yerbilimleri Dergisi* 16(1), 67-80.

Tokimatsu, K., Yoshimi, Y., (1983). Emprical Corralation os Soil Liquefaction based on SPT-N Value and Fines Content. *Soil and Foundations*. 23 (4), 56-74, DOI: 10.3208/sandf1972.23.4_56.

Wang, WS., (1979). Some Findings in Soil Liquefaction, *Water Conservancy and Hydroelectric Power Scientific Research Institute*, Beijing, China.

Zorluer, İ., Gücek, S., (2020) Standart Penetrasyon Testi (SPT) ile Afyonkarahisar Merkez Uydukent Bölgesi Zeminlerinin Sıvılaşma Potansiyelinin Araştırılması. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(2), 118-126, DOI:10.17780/ksujes.654793.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Atasoy, E., Karakaş, A., Liquefaction Potential of Sakarya City Center Soils. 4. *International Symposium on Engineering Natural Sciences and Architecture*, Turkey, 20 – 21 Mayıs 2021.



ÖZGEÇMİŞ

İlkokulu Sinop'un Boyabat İlçesi'nde Atatürk İlkokulu'nda, ortaokulu İstanbul'da Hoca İshak Efendi İlköğretim Okulu'nda, lise öğrenimini İstanbul'da Şişli Yunus Emre Lisesi (Süper Lise)'nde tamamladı. 1999 yılında Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü'nü kazandı. 2000 yılında yatay geçiş yaptığı İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü'nden 2002/2003 yılında Jeoloji Mühendisi olarak mezun oldu. 2012 yılından bu yana AFAD'da jeoloji mühendisi olarak görev yapmaktadır.

