

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

LARA YAMANSAZ KIYI ALANINDAKİ (ANTALYA) ZEMİNLERİN
MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

MURAT KARATAŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

2012

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

LARA YAMANSAZ KIYI ALANINDAKİ (ANTALYA) ZEMİNLERİN
MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

MURAT KARATAŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

Bu tez 2011.02.0121.045 numara ile Akdeniz Üniversitesi Araştırma Fonu tarafından
desteklenmiştir.

2012

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

LARA YAMANSAZ KIYI ALANINDAKİ (ANTALYA) ZEMİNLERİN
MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

MURAT KARATAŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

Bu tez 09 / 10 / 2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından (.95..) not takdir edilerek
Oybirliği/Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Mustafa Hilmi ACAR

Yrd. Doç. Dr. Nihat DİPOVA (Danışman)

Yrd. Doç. Dr. Yasemin LEVENTELİ


.....

.....

.....

ÖZET

LARA YAMANSAZ KIYI ALANINDAKİ (ANTALYA) ZEMİNLERİN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Murat KARATAŞ

Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Nihat DİPOVA

Ekim 2012, 92 Sayfa

Bu çalışmada Lara-Yamansaz kıyı alanının hakim zeminleri olan kum, silt, kil ve organik kökenli (turba) zeminlerin indeks, dayanım ve sıkışabilirlik özellikleri laboratuvar ve arazi deneyleri ile araştırılmıştır. Bu amaçla, 10 adet 20 metre derinliğinde sondaj kuyusu açılarak her 1.5 m’de bir alınan numuneler laboratuvar ortamında incelenmiş; zeminin fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiştir. Buna ek olarak arazide SPT (Standart Penetrasyon Deneyi) ve CPT (Koni Penetrasyon Deneyi) gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar sonucunda; bölgede hakim zemin cinsinin sıkı kum olduğu, bazı bölümlerde ise gevşek kum, kil ve turba bulunduğu belirlenmiştir. Zemin profillerindeki gevşek kum katmanlarının sıvılaşma potansiyelinin araştırılması amacıyla olasılıksal sıvılaşma potansiyeli analizi gerçekleştirilmiştir. Bir inceleme noktasındaki tüm katmanlar için belirlenen olasılıksal sıvılaşma potansiyeli değerleri (P_L) kullanılarak sıvılaşma şiddeti indeksi (LSI) değerleri elde edilmiştir. Elde edilen tüm veriler ışığında Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) kullanılarak sıvılaşma potansiyeli (P_L) ve zemin sıvılaşma şiddeti indeksi (LSI) haritaları ile farklı derinliklerdeki SPT, CPT değeri haritaları ve zemin sınıflandırma haritaları oluşturulmuştur.

ANAHTAR KELİMELEER: SPT, CPT, CBS, Lara-Yamansaz, Sıvılaşma

JÜRİ: Prof. Dr. Mustafa Hilmi ACAR

Yrd. Doç. Dr. Nihat DİPOVA (Danışman)

Yrd. Doç. Dr. Yasemin LEVENTELİ

ABSTRACT

INVESTIGATION OF ENGINEERING PROPERTIES OF SOILS IN LARA-YAMANSAZ REGION (ANTALYA)

Murat KARATAŞ

M. Sc. Thesis In Department of Civil Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Nihat DİPOVA

October 2012, 92 pages

In this research, engineering properties of sand, clay and organic soils (peat) in Lara-Yamansaz Region has been investigated by in situ and laboratory tests. For this purpose, samples which were taken at an interval of 1.5 m from 10 boreholes of 20 m depth, were investigated in the laboratory and soil index, strength and compressibility properties were determined. Additionally, in the field, in situ tests which are SPT (Standard Penetration Test) and CPT (Cone Penetration Test) were executed. Investigations show that dense sand is the main soil type of the region and also in some parts loose sand, clay and peat are available too. Probabilistic Liquefaction Potential Analysis was made to search for loose sand's liquefaction potential. LSI (Liquefaction Severity Index) value was calculated with the help of P_L values which were determined for every depth of the searching point. By using all the data and Geographical Information Systems (GIS) technique; soil classification, SPT, CPT, probability of liquefaction (P_L) and liquefaction severity index (LSI) maps of the soils of Lara Yamansaz Region were created.

KEY WORDS: SPT, CPT, GIS, Lara-Yamansaz, Liquefaction

COMMITTEE: Prof. Dr. Mustafa Hilmi ACAR

Asst. Prof. Dr. Nihat DİPOVA (Supervisor)

Asst. Prof. Dr. Yasemin LEVENTELİ

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında Lara-Yamansaz (Antalya) kıyı alanındaki zeminlerin mühendislik özellikleri araştırılmıştır.

İlk aşamada inceleme alanına ait geoteknik veriler arazi ve laboratuvar ortamında yapılan çalışmalarla elde edilerek analizlere hazır hale getirilmiştir.

İkinci aşamada inceleme alanına ait geoteknik veriler coğrafi bilgi sistemleri (CBS) ortamına aktararak, zemine ait geoteknik parametreler için CBS tabanlı bilgi sistemi oluşturulmuştur. CBS' ye ait sorgulama tekniklerinin yardımıyla SPT-CPT değerleri, hakim zemin cinsi, zemin sıvılaşma potansiyeli, zemin sıvılaşma şiddeti indeksi haritaları hazırlanmıştır.

Bu çalışma sırasında hiçbir zaman yardımlarını esirgemeyen danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Nihat DİPOVA'ya, Sayın Arş.Gör. Bülent CANGİR'e, yüksek lisans çalışmalarım süresince yanımda olan aileme, şu an yanımda olmayan ama varlığını her zaman hissettiğim babama ve tezin hazırlanmasında emeği geçen herkese teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Alanı	1
1.2. Çalışmanın Kapsamı	2
2. KURAMSAL BİLGİLER VE KAYNAK TARAMALARI.....	4
2.1. İnceleme Alanının Genel Özellikleri	4
2.2. İnceleme Alanının Jeolojik Özellikleri	4
2.3. Sıvılaşma.....	6
2.3.1. Sıvılaşma ile ilgili terimler	8
2.3.1.1. Akma sıvılaşması	8
2.3.1.2. Devirsel hareketlilik	9
2.3.1.3. Düz yüzey sıvılaşması.....	9
2.3.2. Sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi.....	10
2.4. Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS).....	11
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	19
3.1. Materyal	19
3.2. Yöntem.....	19
3.3. Arazi Çalışmaları	20
3.3.1. Sondaj	20
3.3.2. Standart penetrasyon deneyi (SPT)	22
3.3.2.1. Deney verilerinin düzeltilmesi	24
3.3.2.2. SPT korelasyonları	24
3.3.3. Koni penetrasyon deneyi (CPT)	26

3.4. Laboratuvar Deneyleri	36
3.4.1. Tane boyu dağılımı.....	36
3.4.1.1. Elek analizi.....	37
3.4.1.2. Hidrometre deneyi.....	38
3.4.2. Kıvam (Atterberg Limitleri) deneyleri	39
3.4.2.1. Likit limit deneyi.....	40
3.4.2.2. Plastik limit deneyi.....	40
3.4.3. Zeminlerin kayma direnci	41
3.4.4. Sıkışabilirlik özelliklerinin belirlenmesi	42
3.5 Büro Çalışmaları	44
3.5.1. SPT sonuçları ile sıvılaşma analizi.....	44
3.5.1.1 Olasılıksal sismik tehlike analizi yöntemi ve olasılıksal sıvılaşma hesabı	44
3.5.1.2. Tekrarlı gerilme oranının bulunması (CSR)	45
3.5.1.3. SPT değerlerinin düzeltilmesi	47
3.5.1.4. Sıvılaşma olasılığının hesaplanması	48
3.5.1.5. Sıvılaşma şiddet indeksinin bulunması (LSI)	50
3.5.2 CBS ile veri analizi.....	52
4.BULGULAR	54
4.1. Laboratuvar Deney Sonuçları	54
4.1.1. İndeks özellikleri	54
4.1.2. Sıkışabilirlik özellikleri	64
4.2.1. SPT deney sonuçları.....	65
4.2.2. CPT deney sonuçları.....	68
4.3. Coğrafi Bilgi Sistemleri ile Oluşturulan Tematik Haritalar.....	75
5. SONUÇLAR	87
6. KAYNAKLAR	89
ÖZGEÇMİŞ	

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

a_{maks} :	En büyük yer ivmesi (cm/s^2)
A_0 :	Başlangıçtaki en kesit alanı
C_c :	Birincil sıkışma indisi
CH:	Yüksek plastisiteli kil
CL:	Düşük plastisiteli kil
CPT :	Konik penetrasyon deneyi
CRR:	Cycling resistance ratio (Tekrarlı Dayanım Oranı)
CSR:	Cycling stress ratio (Tekrarlı Gerilme Oranı)
C_u :	Drenajsız Kayma Dayanımı
D_{50} :	Ortalama tane çapı
Dr:	Rölatif sıklık
e :	Boşluk Oranı
F_r :	CPT Deneyinde Sürtünme Oranı (Friction Ratio)
LL :	Likit Limit (%)
LSI:	Sıvılaşma Şiddet İndeksi
N :	SPT deneyinden belirlenen darbe sayısı
N_{60} :	Enerji oranına göre düzeltilmiş darbe sayısı
$(N_1)_{60}$:	İnce tane oranı hariç tüm düzeltmeler dikkate alınarak belirlenmiş darbe sayısı
$(N_1)_{60cs}$:	Sıvılaşma analizi için ince tane oranına göre düzeltilmiş darbe sayısı

N_C :	Normal Konsolide
N_K :	Koni Faktörü
PI :	Plastisite İndisi (%)
PL :	Plastik Limit (%)
r_d :	Gerilme azaltma katsayısı
q_c :	CPT deneyinde zemin uç direnci
q_u :	Tek eksenli basınç dayanımı
SC:	Killi kum
SM:	Siltli kum
SW-SC:	İyi derecelenmiş killi kum
SW-SM:	İyi derecelenmiş siltli kum
SP:	Kötü derecelenmiş kum
SW:	İyi derecelenmiş kum
SPT:	Standart Penetrasyon Deneyi
UD :	Örselenmemiş Numune
UU:	Konsolidasyonsuz-Drenajsız Üç Eksenli Basınç Deneyi
YASS:	Yer altı su seviyesi
α_m :	CPT deneyinde dönüşüm katsayısı
Φ :	Kayma direnci açısı
ϕ :	İçsel sürtünme açısı

γ_k :	Kuru birim hacim ağırlık
γ_n :	Doğal birim hacim ağırlık
σ' :	Efektif gerilme

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Çalışma alanının uydu görüntüsü	2
Şekil 2.1. Antalya ve dolayının jeolojik haritası (Akay vd 1985).....	6
Şekil 2.2. 1964 Niigata depreminde sıvılaşma kaynaklı taşıma gücü kaybı oluşması...	7
Şekil 2.3. Kum kaynaması, 1989 Loma Prieta depremi, ABD (Ecemiş 2011).....	10
Şekil 3.1 Çalışma kapsamında kullanılan sondaj makinesi ve augerler.....	21
Şekil 3.2. SPT deneyinde kullanılan güvenli şahmerdan (safety hammer).....	23
Şekil 3.3. SPT-N değeri ile drenajsız kayma mukavemeti ilişkisi (Terzaghi ve Peck 1967, Sowers 1979).....	26
Şekil 3.4. Konik penetrasyon düzeneğinin şematik gösterimi	27
Şekil 3.5. Çalışmada kullanılan konik penetrasyon deneyi ekipmanları	28
Şekil 3.6. Konik penetrasyon deney düzeneğinin yerleştirildiği kamyon.....	28
Şekil 3.7. q_c - F_r ilişkisi (Robertson vd. 1986, Robertson 2000)	30
Şekil 3.8. Düzeltilmiş koni direnci- düzeltilmiş sürtünme oranı ilişkisi (Robertson 1990).....	32
Şekil 3.9. CPTU deneyinde bulunan Q_t - F_r ilişkisi (Robertson 1990).....	33
Şekil 3.10. Koni faktörünün (N_k) plastisite indisi ile değişimi (Dipova ve Cangir 2005).....	35
Şekil 3.11. Elek analizi deneyinde kullanılan farklı çaptaki elekler ve sarsma makinesi	37
Şekil 3.12. Hidrometre deneyinde kullanılan mezür, kronometre ve mekanik karıştırıcı	38
Şekil 3.13. Likit limit deneyinde kullanılan penetrometre cihazı	40
Şekil 3.14. Üç eksenli basınç deneyi düzeneği	42
Şekil 3.15. Konsolidasyon deney düzeneği ve deney sonrası halka içindeki numuneler.....	43
Şekil 3.16. SPT düzeltme faktörleri (NCEER 1997)	49
Şekil 4.1. SPT-N değerlerinin derinlikle değişimi (SK-01).....	66
Şekil 4.2. SPT-N değerlerinin derinlikle değişimi (SK-02, SK-03, SK-04).....	66

Şekil 4.3. SPT-N değerlerinin derinlikle değişimi (SK-05, SK-06, SK-07)	67
Şekil 4.4. SPT-N değerlerinin derinlikle değişimi (SK-08, SK-09, SK-10)	67
Şekil 4.5. CPT-01 Logu	68
Şekil 4.6. CPT-02 Logu	69
Şekil 4.7. CPT-03 Logu	70
Şekil 4.8. CPT-04 Logu	71
Şekil 4.9. CPT-05 Logu	72
Şekil 4.10. CPT-06 Logu	73
Şekil 4.11. CPT-09 Logu	74
Şekil 4.12. Değerlendirmesi yapılan sondaj kuyuları ile CPT lokasyonları	75
Şekil 4.13. 1 m derinlik için SPT-N değerleri haritası	76
Şekil 4.14. 3 m derinlik için SPT-N değerleri haritası	76
Şekil 4.15. 4 m derinlik için SPT-N değerleri haritası	77
Şekil 4.16. 5.5 m derinlik için SPT-N değerleri haritası	77
Şekil 4.17. 7 m derinlik için SPT-N değerleri haritası	78
Şekil 4.18. 8.5 m derinlik için SPT-N değerleri haritası	78
Şekil 4.19. 10 m derinlik için SPT-N değerleri haritası	79
Şekil 4.20. 11.50 m derinlik için SPT-N değerleri haritası	79
Şekil 4.21. 19 m derinlik için SPT-N değerleri haritası	80
Şekil 4.22. 4 m derinlik için zemin sınıflandırması	80
Şekil 4.23. 19 m derinlik için zemin sınıflandırması	81
Şekil 4.24. Proje sondajlarından elde edilen SPT değerlerine göre hazırlanan PL haritası	81
Şekil 4.25. Bölge zeminine ait LSI haritası	82
Şekil 4.26. LSI değerlerinin yüzde olarak dağılımı	82
Şekil 4.27. Arşiv verilerine göre hazırlanan LSI haritası	83
Şekil 4.28. Arşiv verilerine göre bulunan LSI değerlerinin yüzde olarak dağılımı	83
Şekil 4.29. 1 m derinlikteki CPT koni uç direnci (Q_t) değerleri	84
Şekil 4.30. 2.5 m derinlikteki CPT koni uç direnci (Q_t) değerleri	84
Şekil 4.31. 4 m derinlikteki CPT koni uç direnci (Q_t) değerleri	85

Şekil 4.32. 5.5 m derinlikteki CPT koni uç direnci (Q_t) değerleri.....	85
Şekil 4.33. 3 m derinlik için arşiv verilerinden elde edilen SPT-N değerleri	86
Şekil 4.34. 4 m derinlik için arşiv verilerinden elde edilen SPT-N değerleri	86

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. SPT N'e göre kohezyonlu zeminlerin kıvamı ile q_u arasındaki ilişki	25
Çizelge 3.2. Daneli (Kohezyonsuz) zeminlerin SPT- N_{arazi} ile relatif sıklık ilişkisi (Terzaghi ve Peck 1948)	25
Çizelge 3.3. CPTU Sonuçlarına Göre Zemin Sınıflandırması (Robertson 1990)	31
Çizelge 3.4. Normalize edilmiş CPT- zemin davranış türü İlişkisi (Robertson 1990)	33
Çizelge 3.5 Zeminlerin uç dirençlerine göre sınıflanması (Schultze ve Muhs 1967)..	35
Çizelge 4.1. Zemin numunelerine ait kıvam limitleri deney sonuçları	55
Çizelge 4.2. SK-01 sondajına ait zemin numunelerinin elek analizi deney sonuçları ...	55
Çizelge 4.3. SK-02 sondajına ait zemin numunelerinin elek analizi deney sonuçları ...	56
Çizelge 4.4. SK-03 sondajına ait zemin numunelerinin elek analizi deney sonuçları ...	57
Çizelge 4.5. SK-04 sondajına ait zemin numunelerinin elek analizi deney sonuçları ...	58
Çizelge 4.6. SK-05 sondajına ait zemin numunelerinin elek analizi deney sonuçları ...	59
Çizelge 4.7. SK-06 sondajına ait zemin numunelerinin elek analizi deney sonuçları ...	60
Çizelge 4.8. SK-07 sondajına ait zemin numunelerinin elek analizi deney sonuçları ...	61
Çizelge 4.9. SK-08 sondajına ait zemin numunelerinin elek analizi deney sonuçları ...	61
Çizelge 4.10. SK-09 sondajına ait zemin numunelerinin elek analizi deney sonuçları .	62
Çizelge 4.11. SK-10 sondajına ait zemin numunelerinin elek analizi deney sonuçları .	63
Çizelge 4.12. Örselenmemiş numunelere ait sıkışma indisi (C_c) değerleri	64
Çizelge 4.13. Örselenmemiş numunelere ait C_u ve ϕ değerleri	64
Çizelge 4.14. Sondaj noktalarına ait yer altı suyu seviyeleri	65

1. GİRİŞ

Herhangi bir inşaat mühendisliği tasarımı sürecinden önce tamamlanması gereken geoteknik çalışma; sondaj yapılması, numune alınması, laboratuvar ve arazi deneyleri yapılması işlemlerini kapsayan uygun bir zemin etüdü programını gerekli kılmaktadır. Laboratuvar ve arazi deneyleri geoteknik biliminde zemin özelliklerinin belirlenmesine olanak sağlayan en önemli araçlardır. Laboratuvar deneylerinin yanı sıra zeminin mühendislik özelliklerinin arazide saptanması özellikle örselenmemiş numune almanın zor olduğu durumlar için sürekli gelişen bir yaklaşımdır.

Lara-Yamansaz kıyı alanındaki yapılarda zeminden kaynaklı farklı oturma sorunlarına sıkça rastlanmaktadır. Bunun yanı sıra bölgede suya doygun halde bulunan gevşek kum tabakalarının sıvılaşma potansiyeli merak konusudur. Çalışma alanına ait geoteknik veriler sınırlı sayıda akademik çalışma, yerel yönetim arşivi, özel firmaların mühendislik çalışmalarından oluştuğundan, daha güvenilir verilere ulaşabilmek için çalışılan alanda zemin mekaniği, mühendislik jeolojisi, tektonik ve deprem mühendisliği konularını içeren özel çalışmaların yapılması gerektiği anlaşılmaktadır.

Bu çalışmada araziden alınan örselenmiş ve örselenmemiş numuneler üzerinde zeminin fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesine yönelik olarak laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiş ve arazide yerinde (in-situ) deneyler yapılmıştır, elde edilen zemin parametreleri kullanılarak CBS yardımı ile olasılıksal yöntem kullanılarak bölgeye ait sıvılaşma potansiyeli haritası ile sıvılaşma şiddet indeksi haritaları oluşturulmuştur.

1.1. Çalışmanın Alanı

Tez çalışmasındaki incelemeye konu olan alan doğuda Kopak Çayı, batıda Örnekköy, kuzeyde Ermenek kayalıkları, güneyde ise Akdeniz ile sınırlıdır. Bu alan içindeki ormanlık alanlar ve Yamansaz sulak alanı yapılaşmaya kapalı bölgeler olduğundan inceleme kapsamı dışında tutulmuştur.

Daha önce çalışma alanına yakın bölgelerde sıvılaşma potansiyelinin araştırılmasına yönelik çalışmalar yapılmıştır. Acar ve Budak (2004) çalışmalarında sıvılaşma potansiyelinin araştırılmasında kullanılan sondaj verilerinin tümünü belediye arşivinden temin etmişlerdir. Verileri kullanılan sondajlardan sadece dört adedi bu çalışmada incelenen alan içerisinde bulunmaktadır. Bu sebeple daha güvenilir sonuçlara ulaşılabilmesi için alanda zemin mekaniği ve deprem mühendisliği gibi konularda detaylı çalışmalar yapılması ve özgün veri üretilmesi gerekmiştir. Şekil 1.1’de uydu görüntüsü üzerinde çalışma alanının sınırları gösterilmektedir.



Şekil 1.1. Çalışma Alanının Uydu Görüntüsü

1.2. Çalışmanın Kapsamı

Bu çalışmada on farklı noktada yapılan sondajlar sonucu farklı derinliklerden elde edilen örselenmiş ve örselenmemiş numuneler üzerinde laboratuvarda elek analizi, hidrometre analizi, Atterberg limitleri, üç eksenli basınç deneyi ve konsolidasyon deneyleri

yapılmıştır. Böylece inşaat mühendisliği uygulamalarında sorunlarla karşılaşılan zemin birimlerinin indeks, dayanım, sıkışabilirlik parametreleri elde edilmiştir. Bunun yanı sıra çalışma alanında yerinde deney olarak SPT ve CPT deneyleri yapılmıştır.

Bu çalışma kapsamında çalışılan alanda yapılan arazi ve laboratuvar deneyleri ile çalışmanın amacını oluşturulan zemin modelinin çıkarılması, dayanım ve sıkışma parametrelerin elde edilmesi, ampirik bağıntılar kullanılarak zemine ait mühendislik özelliklerinin belirlenmesi sağlanmıştır. Bölgenin zemin özelliklerinin belirlenerek zemin profilinin çıkarılması ve sıvılaşma potansiyeline ait verilerin CBS (Coğrafi Bilgi Sistemleri) yardımıyla analiz edilmesi çalışmanın kapsamını oluşturmaktadır.

2. KURAMSAL BİLGİLER VE KAYNAK TARAMALARI

2.1. İnceleme Alanının Genel Özellikleri

İnceleme alanı doğuda Kopak Çayı, batıda Örnekköy, kuzeyde Ermenek kayalıkları ve güneyde Akdeniz ile sınırlı olup nüfusu ve sosyal yapısı ile Antalya için önemli bir yere sahiptir. Alanda Akdeniz iklimi görülmekte olup, deniz seviyesinden yüksekliği 5-10 m dolaylarındadır. Lara-Yamansaz kıyı alanındaki yapılarda zeminden kaynaklı farklı oturma sorunlarına sıkça rastlanmaktadır. Bunun yanı sıra bölgede suya doymun halde bulunan gevşek kum tabakalarının sıvılaşma potansiyeli merak konusudur. İleride yapılması planlanan yapılarda, halihazırdaki bir çok yapıda gözlenen zeminden kaynaklı stabilite sorunlarının yaşanmaması için geoteknik açıdan detaylı bir çalışma yapılması gerekli olmaktadır.

2.2. İnceleme Alanının Jeolojik Özellikleri

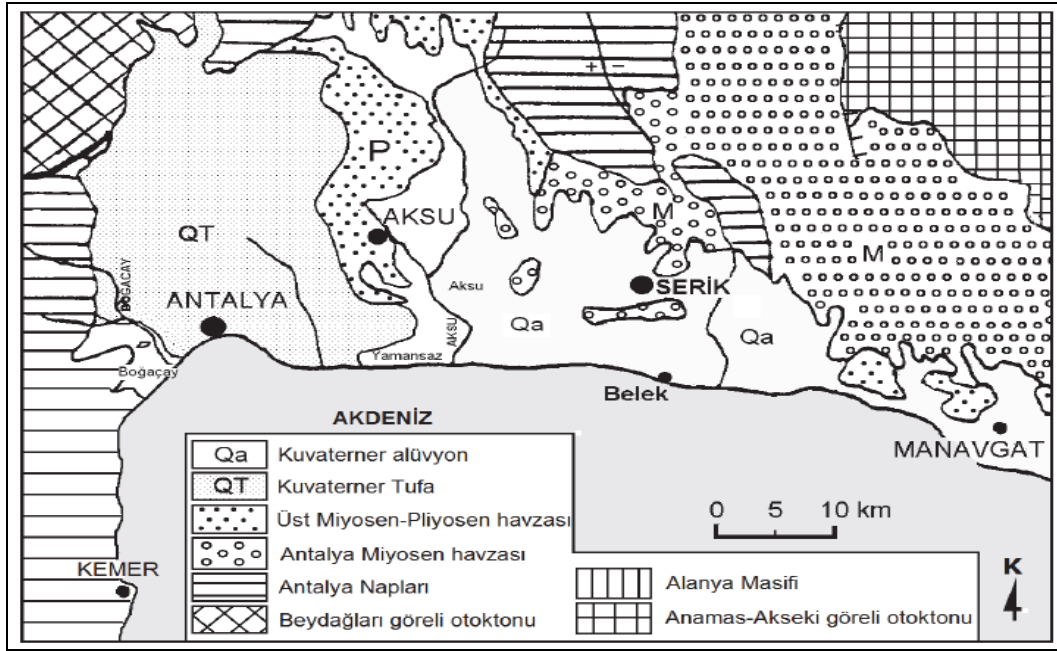
Çalışma alanı, Aksu ve Köprüçay akarsularının jeolojik zaman içinde taşıdığı sedimanlarla dolmuştur. Bu mekanizma içinde ince taneli malzemeler denize kadar taşınarak Lara kıyı şeridini oluşturmuştur. Buna ek olarak denizden esen hakim rüzgarlar ve düşük eğimli taban topoğrafyası koşulları birleşince, “kıyı kumul”u oluşmaya başlamıştır. Kum taneleri rüzgarla içerilere doğru taşınarak kumul tepelerini oluşturmuştur. Kuru ortamda ve herhangi bir ön yüklemeye uğramadan çökdiklerinden bu gibi zeminler “gevşek” yapılıdır. Çeşitli jeolojik evrelerde taşınan malzemede kil ve silt içeriği arttığında ya da gölsel ve bataklıksal çökelim söz konusu olduğunda kum içinde kil, silt ve turba katman yada mercekleri gözlenebilmektedir (Dipova 2002). Kıyı kumullarının oluşturduğu bariyer arkasında lagün oluşmuştur (Yamansaz sulak alanı). Antalya ve çevresinde yürütölen bataklık kurutma çalışmaları dahilinde bu alanda da kanallar açılarak Yamansaz’ın bir kısmı kurutulmuştur. Sulak alanın kuruması sonucu ortaya “turba” sınıfı bir zemin çıkmıştır. Yeraltısuyu seviyesi yüzeye yakındır, kum ve turba zeminler suya doymun durumdadır. Suya doymun ve yer yer gevşek karakterde olan kum zemin sıvılaşma

davranışına eğilimli zeminlerdendir. Turba ve yumuşak kil zeminlerde ise deprem etkisi daha fazla hissedilecektir. Bölgede limitlerin üzerinde oturma ve eğilme yaygın olarak gözlenmektedir. Yüzeyde kuru sert toprak ya da kum olarak görülen inşaat alanlarında temel etki derinliği içinde suya doymuş turba lensleri ve ara katmanları bulunmakta, bunlar da deformasyona neden olmaktadır. Yapı yükleri az da olsa, iki-üç katlı yapılarda bile farklı oturma ve eğilme oluşabilmektedir. Bölgedeki yapılarda zemin kaynaklı stabilite sorunları yaygın olarak gözlenmektedir (Dipova ve Oğuz 1998).

Antalya bölgesinde Prekambriyen'den günümüze kadar oluşmuş kaya birimleri yüzeylenir. Oldukça farklı ortam koşullarında gelişmiş olan bu kaya birimlerinin bir kısmı otokton, bir kısmı ise allokton konumludur. Antalya bölgesinin kuzey doğusunda Anamas-Akseki otoktonu yer alır.

Anamas - Akseki otoktonun yaşlı kaya birimleri üzerinde Orta - Üst Triyas yaşlı kumtaşı, kireçtaşı ve şeyl'ler, bu şeyl'ler üzerinde de genellikle Jura - Kretase yaşlı kireçtaşları bulunur. Paleosen-Eosen, Anamas - Akseki otoktonunda kireçtaşı ve kırıntılı kayalarla temsil edilir. Anamas - Akseki otoktonunu güney kenarında Daniyen'de Antalya napıları ve Alanya napı yerleşmiştir.

Antalya bölgesinde Langiyen'de son allokton kütlelerin yerleşiminden sonra, bölge Orta Miyosen'de deniz istilasına uğramış ve Orta ve Üst Miyosen'de bölgede konglomera, kumtaşı, silttaşı gibi kırıntılı kayalar çökelmiştir. Miyosen sonlarında bölge kuzeydoğu-güneybatı doğrultuda sıkışmalara maruz kalmış ve bu sıkışmalara bağlı olarak bölgedeki kaya birimleri kuzeydoğudan güneybatıya doğru itilmiştir. Pliyosen'de 100-120 metre kotlarına kadar tekrar deniz istilasına uğramış ve bu dönemde kireçtaşı, kiltası, kumtaşı gibi kayalar oluşmuştur. Pliyosen-Kuvaterner'de Antalya bölgesinde büyük çapta normal ve doğrultu atımlı faylar gelişmiştir (Şenel 1986). Şekil 2.1'de Antalya ve dolayının jeoloji haritası görülmektedir.



Şekil 2.1. Antalya ve dolayının jeoloji haritası (Akay vd. 1985)

2.3. Sıvılaşma

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

Efektif gerilme prensibine göre;

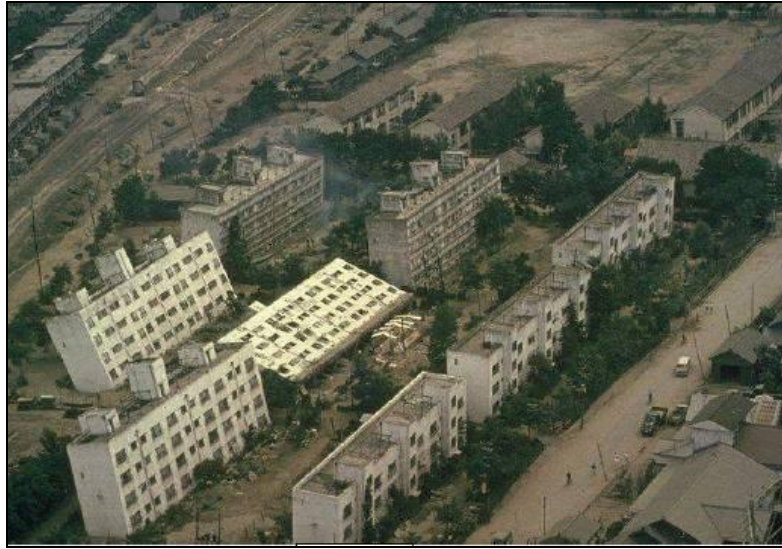
$$\sigma' = \sigma - u$$

$$\sigma = u \rightarrow \sigma' = 0 \text{ olur.}$$

Suya doygun kumlu zemin sıvılaştığı zaman, katı bir malzeme gibi davranmak yerine sıvı gibi davranabilir. Zeminde oturmalar gözlenebilir, kum kaynamaları veya kum volkanları görülebilir. Zemin sıvılaşma analizlerinde ilk yapılması gereken, zemin profilinde sıvılaşabilecek zemin tabakalarının bulunup bulunmadığının belirlenmesidir. Temiz kumların potansiyel olarak sıvılaşabildiği uzun zamandan beri bilinmektedir. Bunun yanı sıra plastik olmayan silt-kum karışımları da sıvılaşma eğilimindedir. Potansiyel sıvılaşmanın olabileceği zemin koşullarını belirlemek amacıyla arazideki zemin koşulları incelenir, arazi ve laboratuvar deneylerinden yararlanılır.

Sıvılaşmaya etki eden çeşitli faktörler bulunmaktadır. Sıvılaşmayı etkileyen faktörler depremden kaynaklı faktörler ve zeminden kaynaklanan faktörler olmak üzere iki ana grupta toplanır.

Kayma dalgası, ivme gibi faktörler depremden kaynaklanan faktörler; porozite, geçirgenlik ise zemin kaynaklı faktörler olup bu faktörler ayrı ayrı şu şekilde listelenebilir. Şekil 2.2’de Niigata depreminde oluşan sıvılaşma kaynaklı taşıma gücü kaybı sebebiyle yan yatmış binalar görülmektedir.



Şekil 2.2. 1964 Niigata depreminde sıvılaşma kaynaklı taşıma gücü kaybı oluşması

Sıvılaşmayı etkileyen deprem kaynaklı faktörler

- Kayma dalgası hızı (V_s)
- İvme
- Deprem büyüklüğüdür.

Sıvılaşmayı etkileyen zeminden kaynaklanan faktörler ise;

- Yer altı su seviyesi ve su içeriği
- Porozite
- Geçirgenlik
- Ortalama tane çapı (D_{50})
- Boşluk oranı
- Efektif basınç
- Likit limit
- Rölatif sıkılıktır.

Sıvılaşma olayı akma sıvılaşması, devirsel hareketlilik ve düz yüzey sıvılaşması olarak üç gruba ayrılır.

2.3.1. Sıvılaşma ile ilgili terimler

2.3.1.1. Akma sıvılaşması

Akma sıvılaşması, bir zemin kütleindeki statik kayma gerilmesinin, zeminin sıvılaşmış haldeki kayma dayanımından büyük olması durumunda gerçekleşir. Burada bahsi geçen statik kayma gerilmesi zemin kütlelerinin statik dengesi için gereklidir. Bu tür bir sıvılaşmada katı parçacıklar arasındaki statik denge, bir şev üzerine inşa edilen yeni binaların zemine ek yük bindirmesi gibi statik bir yükleme veya deprem, patlatma, kazık çakılması gibi tetikleyici bir dinamik yüklemeyle birlikte artan boşluk suyu basıncı ile bozulması sonucu oluşur. Ancak, statik kayma gerilmesi zemin dayanımını azaltarak akma yenilmesi ürettiği durumlarda devirsel gerilmeler zemini dengesiz duruma getirebilmektedir. Akma sıvılaşmasının karakteristik özellikleri aniden ortaya çıkması, hızla gelişmesi ve sıvılaşan malzemenin çoğunlukla büyük mesafede hareketidir. Taşıma gücü

kaybı nedeniyle yapıların taşıyıcı sistemlerinde yapısal hasar almaksızın dönmesi akma sıvılaşmasının ansızın ve hızla gelişmesine örnektir.

2.3.1.2. Devirsel hareketlilik

Devirsel hareketlilik, akma sıvılaşmasının aksine zemin kütleindeki statik kayma gerilmesinin sıvılaşmış zeminin kayma dayanımından küçük olması durumunda gerçekleşir. Ayrıca akma sıvılaşması ile oluşan büyük şekil değiştirmelerin nedeni statik kayma gerilmeleri iken, devirsel hareketlilik ile oluşanlara hem devirsel gerilmeler, hem de statik kayma gerilmeleri neden olur. Çok az eğimli yamaçlar ve su kütlelerine komşu düzlüklerde geliştiği bilinen bu şekil değiştirmeler yanal yayılma olarak anılır.

2.3.1.3. Düz yüzey sıvılaşması

Düz yüzey sıvılaşması, devirsel hareketliliğin bir alt grubu şeklinde düşünülebilir. Bu tip bir sıvılaşma esnasında statik yatay kayma gerilmeleri sıfırdır. Bu nedenle bir deprem esnasında büyük boyutlu ve düzensiz hareket gelişse de çok küçük kalıcı yatay şekil değiştirmeler oluşur. Düz yüzey sıvılaşması türü yenilmelere neden olan faktör, depremin neden olduğu aşırı boşluk suyu basıncının sönmelenmesi sırasında suyun yukarı doğru akışıdır. Hidrolik dengeye ulaşmak için gerekli zamanın uzunluğuna bağlı olarak, düz yüzey sıvılaşması, deprem sona erdikten uzun bir süre sonra da meydana gelebilir. Aşırı düşey oturma ve bunun sonucunda düşük kotlu zeminin akması ve kum kaynamalarının gelişmesi, düz yüzey sıvılaşması türü yenilmenin en belirgin özelliğidir (Kramer 1996). Şekil 2.3'te 1989 Loma Prieta depremi sırasında oluşan kum kaynaması görülmektedir.



Şekil 2.3. Kum kaynaması, 1989 Loma Prieta depremi, ABD (Ecemiş 2011)

2.3.2. Sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi

Sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi için deprem yüklemesi ve sıvılaşma dayanımının birbirine denk ölçütleri kıyaslanmalıdır. Deprem yüklemesine en yakın durum, tekrarlı kayma gerilmelerinin kullanılmasıdır. Başlangıç efektif düşey gerilmesi ile tekrarlı kayma gerilmesi oranının normalize edilmesi ile elde edilen Tekrarlı Gerilme Oranı (CSR), depremin sebep olduğu zeminin farklı derinliklerindeki yükleme seviyelerini belirtir. Tekrarlı kayma gerilmelerini bulmanın farklı yolları vardır. Arazi risk analizleri yapılabilir ya da “basitleştirilmiş” bir yaklaşımla CSR, pik (zirve) zemin yüzeyi ivme genliğinin bir fonksiyonu olarak hesaplanabilir (WEB1 2003).

Sıvılaşma dayanımı genellikle arazi performansının incelenmesi temeline dayanarak tanımlanır. Geçmiş depremlerin ayrıntılı araştırması, yerinde özelliklerin ve her geçmiş deprem için CSR'nin kombinasyonunun bulunması (genellikle SPT veya CPT dayanımı) sağlar. CSR-(N₁)₆₀ veya (CSR-q_c) çiftlerinin sıvılaşma olan veya olmayan durumlar için çizilmesi sıvılaşmanın gözlemlenmeye başladığı sınır eğrinin bulunmasına yardımcı olur. Bu eğri, zeminin sıvılaşmaya karşı koyabilecek penetrasyon dayanımına göre maksimum CSR değeri olarak tahmin edilir ve Tekrarlı Dayanım Oranı (CRR) olarak isimlendirilir (Tokimatsu ve Yoshimi, 1983). Böylece sıvılaşma potansiyeli deprem yüklemesi ile sıvılaşma dayanımı kıyaslanarak bulunur. Bu genellikle sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısı (FS);

$$“FS=CRR/CSR” \quad (2.1)$$

şeklinde ifade edilir. Hesaplanan FS değerleri aşağıdaki aralıklara göre ifade edilmektedir.

- FS≤1 ise sıvılaşma gerçekleşir.
- 1<FS≤1.2 Potansiyel sıvılaşma durumu
- FS>1.2 ise sıvılaşma gerçekleşmez.

NCEER (1997) sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesinde dört değişik arazi deney yönteminin başarıyla kullanılabileceğini belirtmektedir. Bu deneyler:

1. Standart Penetrasyon Deneyi (SPT)
2. Konik Penetrasyon Deneyi (CPT)
3. Arazi kayma dalga hızının ölçülmesi (V_s)
4. Becker Penetrasyon Deneyi'dir.

2.4. Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS)

Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS), coğrafi koordinatlı tüm şekillerdeki verilerin görüntülenmesi, etkili şekilde bulup-çıkarma, kaydetme, güncelleme, analiz ve personel,

bilgisayar donanımı, yazılımı ve coğrafi verilerin organize edilmiş koleksiyonudur (ESRI 1994). Elde edilen verilerin bir bütün halinde değerlendirilmesi, istenilen sonuçlara kolayca ulaşılabilmesi için CBS birçok kolaylıklar sunmaktadır.

1970'lerden beri Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) coğrafya, jeoloji mühendisliği, inşaat mühendisliği, bilgisayar bilimi, arazi kullanım planlaması ve çevre bilimini içeren birtakım akademik disiplinleri kapsayan araştırma ve uygulama alanlarına doğru genişlemiştir. CBS, yerbilimi çalışmalarında kullanılabilecek geniş bir aralığı kapsayan konumsal sorgulamaları desteklemektedir (Church 2002).

CBS, grafik ve grafik olmayan verilerin depolanması, analiz edilmesi, bunların geri alınabilmesi ve haritalanabilmesini sağlamaktadır. CBS'de hem düzlemsel hem de dünya koordinat sistemleri rahatlıkla kullanılabilmektedir. CBS, bilgi akışını hızlandırdığı, veri güncellemede hızlı ve doğru kararlar almada zaman kaybını önlediğinden tercih edilir hale gelmiştir (Karaca 2007).

2.5. Kaynak Özetleri

Iwasaki vd. (1978) sıvılaşma analizlerinde genellikle temel altındaki zeminler için sıvılaşmaya karşı bulunan F_{SL} güvenlik faktörünün tek başına temelde oluşabilecek hasarın tanımlanması için yeterli olmadığını belirtmiş, SPT ile yapılan sıvılaşma hesabındaki tüm etkilerin bir arada değerlendirilmesi gereğinden yola çıkarak bir sıvılaşan tabakadaki sıvılaşma şiddeti, ağırlık ve sıvılaşabilir tabaka kalınlığının fonksiyonu olarak "Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi (I_L)" değeri hesaplamış ve böylelikle temel altında zemin kolonunun bütünsel davranışını yansıtabildiği sonucuna ulaşmışlardır.

Lee vd. (1981) arazi ve laboratuvar deneylerinin genellikle birbirlerini tamamlayıcı özelliklere sahip olduğunu belirtmişlerdir. Yerinde dökme deneylerinin amacının, laboratuvar deneylerinin dezavantajlarının üstesinden gelmek olduğunu açıklamışlardır. Zeminden laboratuvar testleri için numune alındığını ve bazı zeminlerden örselenmemiş

örnek almanın zor olduğunu vurgulamışlardır. Bunların da çok yumuşak ya da hassas killi zeminler veya çakıllı zeminler olduğunu açıklamışlardır. Laboratuvar deneylerinin basit ve önemli olduğunu ancak çatlak zeminlerin tanımlanmasında hata verebileceğini belirtmişlerdir. Arazi deneylerinin önemli bir avantajının da elde edilen verilerin sürekli kaydedilebilmesi olduğunu açıklamışlardır. Bu testlerin zeminin özelliği hakkında çok iyi fikirler vereceğini ve bu nedenle zeminle ilgili ilk verilerin elde edilebileceğini ifade etmişlerdir.

Iwasaki vd. (1982) herhangi bir sahadaki olası sıvılaşma şiddetini, sıvılaşma tehlike indisi (P_L) isimli bir parametre ile ifade etmişlerdir. 0 ile 100 arasında değişen P_L değerlerini Japonya’da sıvılaşma gözlenen 63 ve sıvılaşma gözlenmeyen 22 noktada hesaplayarak P_L değerinin 15’ten büyük olduğu sahalarda sıvılaşmaya bağlı şiddetli etkiler olduğu, P_L değerinin 5’ten küçük olduğu sahalarda ise sıvılaşmaya bağlı hafif etkiler meydana geldiği sonucuna ulaşmışlardır.

Liao vd. (1988) sıvılaşma olasılığının değerlendirilmesinde devirsel kayma gerilmesi yaklaşımına bağlı fakat sonuçları istatistiksel ifade eden bir yaklaşım kullanmışlardır. Sıvılaşma ile ilgili 278 olgudan yola çıkarak zemin cinsine bağlı katsayılar, $(N_1)_{60}$ değeri ve CSR’ye bağlı olarak P_L sıvılaşma olasılığı için bir bağıntı önermişlerdir.

Cernica (1995) zeminin, en eski, belki de en yaygın ve muhtemelen en karışık yapı olduğunu vurgulamıştır. Zeminin, fonksiyonlarından dolayı gerçekte bütün yapılar için belirleyici bir nitelik taşıdığını belirtmiştir. Geoteknik mühendisliğinde genel olarak iki kısımdan söz edildiğini, bunların da zemin mekaniği ve temel mühendisliği olduğunu vurgulamıştır. Arazi deneylerinden SPT, CPT ve plaka yükleme deneylerine değinerek, SPT deneyinin zemin katmanlarının kapasitesini, sıklığını, güçlü veya zayıf özelliklerini belirlemede kullanılan bir deney olduğunu açıklamıştır. CPT deneyinde kullanılan penetrasyon aletinin ise konik bir şekle sahip olduğunu ve deneyin SPT’ye göre daha kolay ve hızlı yapılabildiğini vurgulamıştır. Yükleme deneyinin de zemin özelliklerini yerinde test etmede uygulanan bir deney olduğunu açıklamıştır.

Dipova (2002) Antalya kıyı düzlüklerini incelemiş, jeolojik oluşum modelleri ve jeoteknik özellikleri hakkında bilgiler vermiştir. Lara-Yamansaz Düzlüğü'ndeki çoğu yapının limitlerin üzerinde oturma değerine sahip olduğunu, anılan bölgede yapıların temel etki derinliği içinde suya doygun turba lensleri ve ara katmanları bulunduğundan deformasyona neden olduklarını belirtmiştir.

Adatepe (2002) “Küçükçekmece-Sefaköy yerleşim bölgelerinde yerel zemin koşullarıyla oluşan hasar arasındaki ilişkiyi araştırarak Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ile zemin büyütmesine göre mikro bölgeleme çalışması yapmıştır. Bu amaçla bölgede açılan sondaj kuyularından alınan örnekleri incelemiş, SPT deneyleri yapmıştır. Ayrıca bölgede sismik kırılma deneyleri ve mikrotremor ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen tüm verileri CBS ortamına atarak zemin büyütmelemlerine göre mikro bölgeleme yapmıştır. Sonuçta bölgedeki hasar verileri ile yaptığı mikro bölgelemeyi karşılaştırmış ve doğruluğunu denetlemiştir.

Koca vd. (2003) Armutalanı (Marmaris) beldesinin yerleşim için uygun, önlemleri ve uygun olmayan alanlarının sınırlarının belirlenmesi amacıyla yönelik yaptıkları çalışmada, inceleme alanının jeolojik haritasını çıkartmışlardır. Çalışma kapsamında jeoteknik amaçlı sondajlardan elde edilen SPT deney verilerini sıvılaşma potansiyeli değerlendirmesi ve taşıma gücü hesaplamaları için kullanmışlardır.

Lee vd. (2003) Iwasaki (1978) tarafından tanımlanan sıvılaşma potansiyeli indeksinin (I_L) ,sıvılaşmaya karşı emniyet faktöründen yararlanılarak bulunduğunu; ama sıvılaşma potansiyeli indeksinin sadece sıvılaşmaya karşı emniyet faktörünün 1'den küçük ($F_{SL} < 1$) olduğu durumlar için hesaplanabildiğini belirtmişlerdir. Ayrıca farklı metotlarla bulunan emniyet faktörünün farklı değerler alabildiğini ifade etmişlerdir. Buna ilaveten sıvılaşma potansiyeli indeksinin emniyet faktörü ile lineer orantılı olmamakla birlikte, sıvılaşma olasılığı ile lineer orantılı olduğunu göz önünde bulundurarak sıvılaşma olasılığını tanımlayan ve zeminin sıvılaşma olasılığı, ağırlık fonksiyonu ve analiz yapılan derinliğinin bir fonksiyonu olan sıvılaşma Risk İndeksi (I_R) adında yeni bir indeks tanımlamıştır.

Hesaplanan sıvılaşma risk indeksi sonuçlarına zeminin sıvılaşma olasılığını düşük seviye ile yüksek seviye aralığında tanımlamışlardır.

Celep ve Kumbasar (2004) deprem sırasında yapılarda meydana gelen hasarların en önemli sebeplerinden birinin de zemin sıvılaşmasının ortaya çıkması olduğunu açıklamışlardır. Kumlu zeminlerin, diğer zeminlere göre sıvılaşma yönünden daha hassas ve özellikle suların yığıldığı kumların boyutlarındaki düzgünlük nedeniyle sıvılaşmaya eğilimli olduklarını ifade etmişlerdir. Değişik zemin gruplarına ait normalize edilmiş ortalama ivme spektrum eğrilerini vermişlerdir. Eğer kumlu tabakalarda kumun sıkı ise, yön değiştiren deprem etkisi altında yapısının değiştirme yaparak etkilere karşı koyacak kararlı bir duruma geldiğini belirtmişlerdir. Ancak kararlı duruma gelmek için gereken şekil değiştirmenin, dış etkinin uzun süre devam etmesiyle artabileceğine dikkat çekmişlerdir. Dış etkinin kaybolmasından sonra ise artık bir boşluk suyu basıncının kaldığını, bunun ise boşluk suyunun yukarı doğru hareketine neden olabileceğini vurgulamışlardır.

Çetin vd. (2004) Bursa ili için sismik tehlike analizi yapmışlardır. Bölgeyi tehdit eden diri faylar ile ilgili verileri çalışmışlar, sismik kaynak özellikleri belirlemişler ve uygun sönüm ilişkileri kullanarak 50 yılda %10 aşılma olasılığına sahip zemin için maksimum yer ivmesi ve spektral ivme haritalarını elde etmişlerdir. Bursa ili dahilinde yapılmış olan sondaj verilerini derlemişler ve yapılan zemin sınıflandırmasına göre yerel koşulların ivme değerleri üzerindeki büyütme/küçültme etkilerini göz önüne almışlardır. Bununla birlikte SPT tabanlı sismik sıvılaşma analizi gerçekleştirmişler, şehrin sıvılaşma riski yüksek bölgelerini haritalandırmışlardır. Çalışmalarının neticesinde zemin için sıvılaşma riskini belirlemek amacıyla SPT verilerinden faydalanmışlar ve LSI (Liquefaction Severity Index) dağılımını haritalamışlardır.

Şen (2004) Gümüşler Belediyesi mücavir alanının sıvılaşma analizini gerçekleştirmiş ve coğrafi bilgi sistemleri yardımıyla sonuçları göstermiştir. CBS kullanarak bölgedeki zeminlerin sıvılaşma potansiyel indeksi (SPI) değerlerini hesaplamış ve bu değerleri kullanarak eş sıvılaşma eğrileri elde etmiştir. Çalışmasında Iwasaki vd (1978) tarafından

önerilen sıvılaşma potansiyeli indeksine göre çalışma alanını sıvılaşma potansiyeli bakımından çok düşükten çok yükseğe kadar değişik derecelerle ifade etmiş; çalışma bölgesinin %24'lük kısmının sıvılaşma potansiyeli indeksinin 15'ten büyük riskli bölgeler olduğu sonucuna ulaşmıştır.

Yılmaz (2004) 1999 Kocaeli depreminden sonra Sakarya ilinde gözlemlenen yapı hasarlarını etkileyen geoteknik ve deprem mühendisliği faktörlerinin belirlenmesine yönelik bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmasında zemin karakteristiklerini ve yapıların sismik performanslarını içeren ve Afet İşleri Genel Müdürlüğü tarafından düzenlenen saha etüd programı verilerini kullanarak oluşturduğu yeni veri tabanını coğrafi bilgi sistemleri formatına aktarmıştır. Yapıların sismik performanslarının istatistiksel değerlendirilmesi için maksimum olabilirlik yöntemi seçilmiştir. Yapılan hassasiyet analizleri sonucunda yapı hasarını etkileyen faktörlerin sıvılaşma indeksi, sıvılaşmaya bağlı zemin oturması, maksimum yer ivmesi ve bina periyotlarına denk gelen yer ivme değerleri olduğunu belirlemiştir. Yapılan çalışmaların sonucunda 1999 Kocaeli depremiyle sarsılan Adapazarı İli için bir seri hasar görebilirlik fonksiyonu elde edilmiştir. Bu hasar görebilirlik fonksiyonlarının hepsinin gözlenen yapısal performanslarla yüzde 65 mertebelerinde tutarlı tahminler yapabildiği görülmüştür.

Karavul vd. (2006) CBS kullanarak iki farklı yaklaşımla Adapazarı kentinin SPT haritasını oluşturmuşlar, bu şekilde hem çalışma alanının zemini hakkında yorum yapabilmeyi hem de kullanılan iki farklı metodun karşılaştırılmasını amaçlamışlardır. Çalışmalar sonucunda iki farklı yaklaşımla hazırlanan SPT haritalarının birbiriyle uyumlu olduğu ve bina yapımlarında temellerin inşa edildiği alanlar olan 0-5 m arasındaki zeminlerin gevşek olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Önalp vd. (2006) Adapazarı'nda sıvılaşma meydana gelen veya gelmeyen bölgelerdeki ince taneli zeminleri incelemişler ve YASS altındaki silt ortamlarında ve $M_w > 7$ koşulunda sıvılaşmanın gerçekleşebilmesi için;

- a) Likit limitin %33'ten az

- b) Sıvılık indisinin (I_L) veya w_n/w_L oranının 0.9'dan büyük
- c) Kil oranının %10'dan düşük
- d) Ortalama tane boyutunun 0.02 mm'den büyük olması gerektiğini ortaya koymuşlardır.

Sert vd. (2006) Adapazarı kent merkezinin zemin haritası, SPT-N dağılımı haritası, taşıma gücü haritası ve 1999 depreminden sonra meydana gelen hasar dağılımlarının haritası gibi çeşitli haritaların hazırlanma yöntemleri ve kullanılan verilerin özellikleri hakkında bilgi vermişlerdir. Çalışmalarında CBS ile çok büyük hacimli geoteknik verileri irdemişler, kentin SPT-N haritası, taşıma gücü haritası, sıvılaşma haritası ve hasar dağılım haritalarını çıkartarak hem görsel hem de sayısal olarak kullanışlı bilgiler sunmuşlardır. Coğrafi bilgi sistemleri yardımıyla iki nokta arasında çeşitli yöntemlerle enterpolasyon yapılabildiği için geoteknik açıdan incelenen bir bölgede iki sonda veya sondaj arasındaki zemin özelliklerini tahmin edebilmişlerdir.

Şişman (2006) Türkiye'de birinci derece deprem bölgesinde yer alan Muğla ili Fethiye ilçesi yerleşim alanında, senaryo bir deprem sonucundaki sıvılaşma potansiyelini araştırmıştır. İnceleme alanında SPT-N darbe sayıları ve kayma dalgası hızını ölçerek, sıvılaşma analizi yapmış, sıvılaşma şiddeti indeksine göre sıvılaşma potansiyeli haritaları hazırlamıştır. Yaptığı çalışmada Fethiye yerleşim alanındaki güncel alüvyonda, yüzeye yakın olduğu kesimlerde sıvılaşma olabileceği sonucuna varmış ve alınabilecek önlemleri belirlemiştir.

Karaca (2007) Fethiye ve çevresinin jeoloji, jeoteknik ve depremselliğini araştırmıştır. Çalışmanın sonucunda CBS kullanılarak zemin deprem büyütmesi haritası, sıvılaşma potansiyeli ve zemin taşıma gücü haritaları oluşturmuştur.

Sağlam (2007) Türkiye'de birinci derece deprem bölgesinde yer alan Manisa ili, Saruhanlı ilçesi imar planına esas alanlarında, senaryo bir deprem sonucundaki sıvılaşma potansiyelini irdlemiştir. İnceleme alanında CPT verileri ile sıvılaşma analizi yapmış,

sıvılaşma şiddeti indeksine göre sıvılaşma potansiyeli haritası hazırlamıştır. Çalışmasında Saruhanlı ilçesi yerleşim alanındaki ince taneli güncel alüvyonda özellikle yüzeye yakın kesimlerde sıvılaşma olabileceği sonucuna varmış ve alınabilecek önlemleri belirtmiştir.

Dipova ve Cangir (2011) Antalya il merkezinin depremselliğinin incelenmesi amacıyla Antalya çevresindeki sismotektonik bölgelerde 1900 - 2010 yılları arasında gerçekleşen depremleri dikkate alarak, istatistiksel yöntemlerle tehlike analizi gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada Antalya'nın zayıf zeminleri içinde sıvılaşma potansiyeline sahip olabilecek zemin türlerinin olduğunu belirtmişlerdir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

Geoteknik Mühendisliğinde tasarımda kullanılacak malzeme özelliklerinin belirlenmesi amacıyla bölgede bulunan malzemeler teşhis ve test edilmelidir. Her ne kadar zemin analiz teknikleri bilgisayar ortamında çok ileri seviyede olsa da parametrelerin doğru belirlenmesi için arazi ve laboratuvar incelemeleri geoteknik problemlerin çözümünde en önemli aşama olarak kabul edilmektedir. Çalışmanın tüm aşamalarında Lara-Yamansaz kıyı alanındaki zeminler çalışılmıştır. Çalışmanın amacı doğrultusunda saha, laboratuvar ve büro çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Karmaşık yapıda çökelmiş zeminlerin türlerinin belirlenmesi, zemin profillerinin oluşturulması, analizlere esas parametrelerin belirlenmesi için yeteri sayıda sondaj yapılmış ve sürekli örnekleme yolu ile örselenmiş ve örselenmemiş örnekler alınmıştır.

3.2. Yöntem

Bölge zemininin fiziksel ve mekanik özellikleri ile çalışmaya konu bölgenin sıvılaşma potansiyelinin belirlenebilmesi amacıyla yönelik olarak aşağıdaki araştırmalar ve çalışmalar yapılmıştır.

- Öncelikle daha önceki yıllarda yapılan akademik çalışma, yerel yönetim arşivleri ve özel firmaların mühendislik çalışmalarından olan mevcut zemin etüt çalışmaları incelenmiştir. Bu çalışmalarda elde edilen bölge zeminine ait özellikler CBS' ye aktararak veritabanı oluşturulmuştur.
- Farklı noktalarda sondaj kuyuları açılmış, yerinde deney olarak SPT ve CPT deneyleri yapılmıştır.
- Örselenmiş ve örselenmemiş numuneler alınarak laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler Akdeniz Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Zemin Mekaniği laboratuvarında yapılmıştır.

- Zemin sıvılaşma analizi gerçekleştirilmiştir. Ulaşılan sonuçlar CBS' ye aktarılarak bölgeye ait sıvılaşma şiddeti indeksi tematik haritası oluşturulmuştur.
- SPT, CPT sonuçları ile hakim zemin cinsi ve sıvılaşma olasılığı haritaları oluşturulmuştur.

Bu bölümde çalışmanın yöntemini oluşturan arazi çalışmaları, laboratuvar deneyleri ve büro çalışmaları anlatılacaktır.

3.3. Arazi Çalışmaları

En alt düzeyde örselenme oluşturdıklarından ortam özelliklerinin yerinde (in-situ) ölçümü zemin incelemelerinde öncelik taşır. Günümüzde teknolojinin gelişmesine paralel olarak arazi deney sistemlerinde meydana gelen ilerlemeler yüksek maliyetlerine karşın arazi deneylerini ön plana çıkarmaktadır. Laboratuvar deneyleri kolay yapılabilir olmaları ve düşük maliyetleri nedeni ile çoğunlukla tercih edilmektedir. Ancak gereğince uygulanmadıkları ve araziden gelen numunenin amaca uygun olmaması durumunda sonuçlar yanıltıcı olmaktadır. Arazi çalışmaları kapsamında çalışma bölgesinin farklı noktalarında sondajlar yapılmış, arazi deneyi olarak ise SPT ve CPT gerçekleştirilmiştir.

3.3.1. Sondaj

Ortamın doğru geoteknik modelle temsil edilebilmesi için yeraltı koşullarının iyi bilinmesi gerekir. Bu amaçla yeryüzü ve yeraltındaki bilgiler toplanmalıdır. Bilgi toplama yer yüzünden el numuneleri ile, yeraltından ise sondaj yaparak farklı derinliklerden numune alma ya da bu derinlikte ölçümleme yolu ile yapılır. Bu çalışmalar sonucunda tabakaların dizilimi, kalınlığı, zeminde ana kayaya giriş derinliği, ortamda bulunan süreksizliklerin konumları, sıklığı ve yüzey özellikleri; yeraltı ve tünek su konumları hakkında bilgiler toplanır (Ergün vd. 2005).

Bu çalışmada kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlere uygun içi boş bir gövde çevresinde helisel bir burgudan oluşan mekanik burğu kullanılmıştır. Yüzeye taşıdığı parçacıklardan geçirilen tabakanın niteliği hakkında bilgiler rahatlıkla alınabilir. İçi boş helisel burğu kullanılması ile muhafaza borusu kullanılmasına gerek kalmamakta ve zaman tasarrufu yapılmaktadır. Sulu sistem ve muhafaza borulu ilerlemeye göre en önemli avantajı ise örselenmenin daha az olmasıdır.

Şekil 3.1’de çalışma kapsamında kullanılan sondaj makinesi ile augerler görülmektedir.



Şekil 3.1 Çalışma kapsamında kullanılan sondaj makinesi ve augerler

Sondajlar yapıdan kaynaklanan düşey efektif gerilmedeki artışın başlangıçtaki düşey efektif gerilmenin %10 una eşit olduğu derinliğe kadar sürdürülür. Sahada dolgu olması halinde ise sondajlar bu dolguyu geçmeli ve altındaki doğal zemine ilerlemelidir.

Sondaj çalışmasında temel amaç zeminden olabildiğince örselenmemiş numune almaktır. Bu numuneler, zemin profilini ortaya koymada ve laboratuvar deneylerinin yapımında kullanılmaktadır.

Örselenmiş numune; zeminin doğal yapısını korumak için herhangi bir çabanın sarf edilmediği numunedir. Örselenmemiş numune ise tamamıyla taze ve arazideki yapının ve gerilmelerin hiçbir şekilde değiştirilmeden alındığı numunedir. Bölge zemininde bu işlem kuyu tabanına indirilen örnek alıcı (shelby tüpü) ile gerçekleştirilmiştir.

Genel bir kural olarak numune alıcının konsolidasyon deneyi halkasından minimum 12 mm daha büyük olmasına özen gösterilmiştir. Bu numuneler zeminin yapısına bağlı olan ve laboratuvarda yapılan kayma dayanımı ve konsolidasyon deneylerinde kullanılmıştır. Normal yüklenmiş (çok yumuşak ve yumuşak) killer her tür mekanik etkiye duyarlı olabildiğinden numune örselenmesi alınacak örneğin birçok özelliğini yitirmesine neden olabilir (Bowles 1996). Bunu önlemek için numune alınacak derinliğe inildiğinde kuyunun dibinin çamur ve kırıntıdan tamamen temizlenmiş olması sağlandıktan sonra alan oranı;

$$A_0 = (D^2_{dış} - D^2_{iç}) / D^2_{iç} \quad (3.1)$$

ile tariflenmiş olan dikişsiz çelik, tercihen pirinç boru zemine hidrolik baskı ile itilir. Örselenmenin minimumda tutulması için A_0 'nun 0.12'den büyük olmaması gerekir. Çalışma alanında açılan 10 adet sondaj kuyusundan alınan örselenmiş ve örselenmemiş numuneler kullanılarak zeminin profili oluşturulmuş ve geoteknik özellikler belirlenmiştir.

3.3.2. Standart penetrasyon deneyi (SPT)

SPT geoteknik mühendisliğinde yaygın olarak kullanılan en eski deneylerden birisidir. Pratikte çok kullanılan bu deneyin temel prensibi, zemin tabakalarının penetrometreye gösterdiği dirence bağlı olarak kohezyonsuz zeminlerin yerleşim sıklığından hareketle zeminin zemin birim hacim ağırlığı ile yaklaşık mukavemetinin tahmin edilmesi, ince taneli

zeminlerde ise zeminin kıvamı ve mukavemeti hakkında bilgi sahibi olunmasını sağlamasıdır.

Standart Penetrasyon Deneyi, arazide yapılan bir deney olmasıyla zeminlerin özelliklerinin belirlenmesinde ön plana çıkmaktadır. Dış çapı 50 mm, iç çapı 34.9 mm olan standart yarık tüp, 63.5 kg ağırlığındaki şahmerdanın, 76.2 cm yükseklikten serbest olarak düşürülmesiyle zemine 15'er cm'lik üç giriş (toplam 45 cm) için vurulan darbe sayıları saptanır. Son iki 15 cm'lik ilerleme için darbe sayısı toplamı $SPT-N_{arazi}$ olarak verilir. Şekil 3.2'de çalışma kapsamında yapılan SPT deneyinde kullanılan güvenli şahmerdan görülmektedir.



Şekil 3.2. SPT deneyinde kullanılan güvenli şahmerdan (safety hammer)

Arazide yapılan diğer deneylere göre SPT'nin bazı avantajları bulunmaktadır. Bunlar bu deneyde kullanılan ekipmanın diğerlerine nazaran daha ucuz olması, çoğu zemin sınıfında uygulanabilmesi, istenilen her derinlikten kolaylıkla numune alınabilmesi ve sondaj işlemi sırasında kolay uygulanabilir olması olarak sıralanabilir. Deneyin dezavantajları ise dünyanın farklı kısımlarında farklı şekilde uygulanması, kullanılan ekipman ve prosedürün tam olarak standartlaştırılamamış olması ve sürekli olarak veri alımı sağlayamamasıdır.

Genel olarak kumlu ve çakıllı zeminlerde arazideki göreceli sıkılığın bulunması için kullanılan bu deney, siltli ve killi zeminlerde de kullanılmaktadır.

3.3.2.1. Deney verilerinin düzeltilmesi

Deney sonuçlarının güvenilir ve emin değerler alması için deney üzerinde çeşitli düzeltmeler yapılması gerekmektedir. Bu şekilde farklı özelliklere ait SPT ekipmanı ile yapılan deney sonuçları normalize edilmekte ve farklı ekipmanla yapılan deney sonuçlarının birbiriyle karşılaştırılması mümkün olmaktadır. N değerinin N_{60} değerine dönüştürülmesi ile deney prosedüründeki değişimler en azından kısmen giderilmiş olacaktır (Skempton 1986). Deney verilerin düzeltilmesi konusu sıvılaşma analizi anlatılırken detaylı olarak izah edilecektir.

SPT deneyi sonucu elde edilen değerlerde bir standardın yakalanabilmesi için SPT sonucunu etkileyen faktörlerin düzeltilmesi gerekir. Düzeltilmiş değerler özellikle SPT ile sıvılaşma analizi yapılırken önem arz etmektedir.

3.3.2.2. SPT korelasyonları

Önceki çalışmalarda yapılan korelasyonların çoğu, deney prosedürü ve ekipmanlarının şimdilere göre oldukça eski verilere dayalı olarak yapıldıklarından yaklaşık sonuçlar vermektedir. Ayrıca, SPT'deki birçok belirsizlikten dolayı bu korelasyonlarda geniş hata payı bulunmaktadır. Bu sebeplerden özellikle killerin mühendislik özellikleri arasındaki korelasyonlarda da kullanılacak SPT sonuçları dikkatli kullanılmalıdır.

SPT- N_{arazi} deney sonuçlarına göre kohezyonlu zeminlerin kıvam durumları ile serbest basınç dayanımı değerleri arasında bir ilişki kurmak mümkündür. İlk kez 1948 yılında Terzaghi ve Peck tarafından tanımlanan bu ilişki, daha sonraları bazı araştırmacılar tarafından değiştirilse de temelde aynı kalmıştır. Terzaghi ve Peck (1967) ile Bowles

(1968) bu ilişkiyi Çizelge 3.1’deki gibi tanımlamıştır. Terzaghi ve Peck (1948), $SPT-N_{arazi}$ ile relatif sıkılık arasındaki ilişkiyi Çizelge 3.2’deki gibi tanımlamıştır.

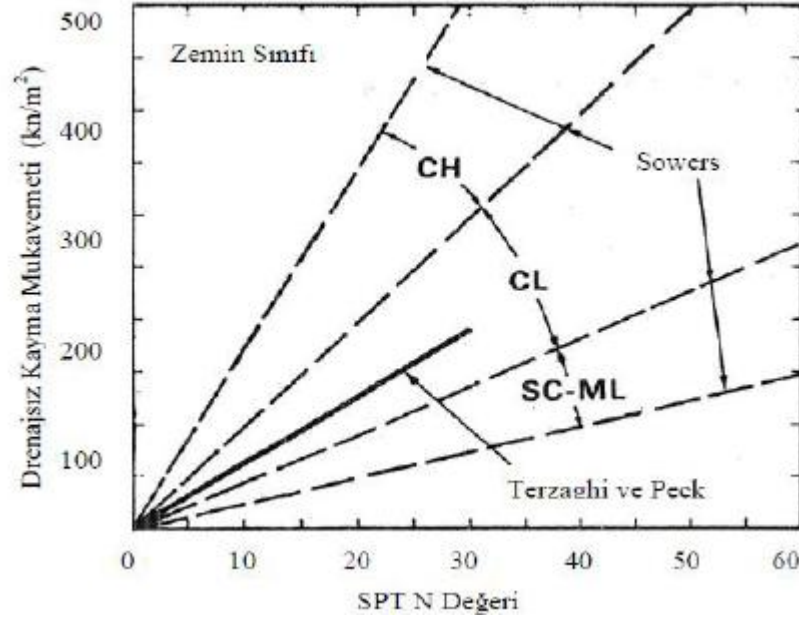
Çizelge 3.1. SPT N’e göre kohezyonlu zeminlerin kıvamı ile q_u arasındaki ilişki

Zemin Kıvamı	Terzaghi ve Peck (1967)		Bowles (1968)	
	SPT- N_{60}	q_u (kPa)	SPT- N_{60}	q_u (kPa)
Çok yumuşak	<2	<25	<2	0 - 25
Yumuşak	2 - 4	25 - 50	2 - 4	25 - 50
Orta Katı	4 - 8	50 - 100	4 - 8	50 - 100
Katı	8 - 15	100 - 200	8 - 16	100 - 200
Çok Katı	15 - 30	200 - 400	16 - 32	200 - 400
Sert	>30	>400	>32	>400

Çizelge 3.2. Daneli (kohezyonsuz) zeminlerin $SPT-N_{arazi}$ ile relatif sıkılık ilişkisi (Terzaghi ve Peck 1948)

SPT-N (darbe/30 cm)	Relatif Sıkılık	Kuru Birim Hacim Ağırlık (kN/m^3)	İçsel Sürtünme Açısı (ϕ)
0-4	Çok gevşek	<14	<30
4-10	Gevşek	14-16	30-32
10-30	Orta sıkı	16-18	32-35
30-50	Sıkı	18-20	35-38
>50	Çok sıkı	>20	>38

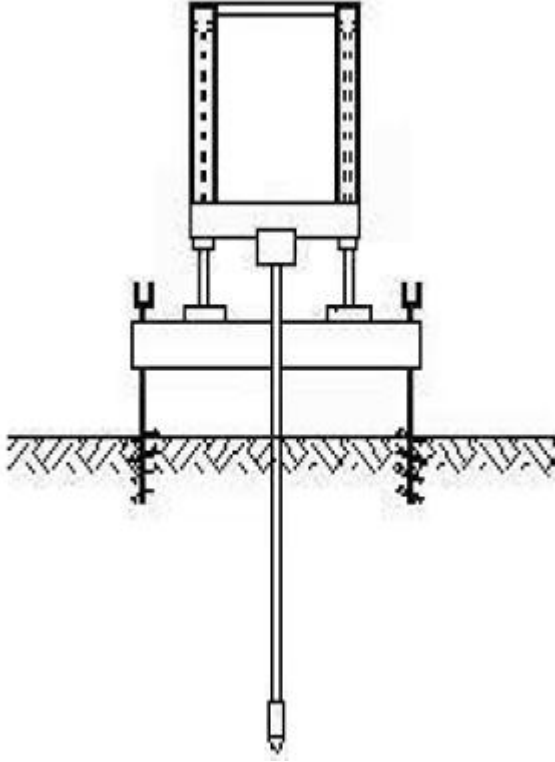
Terzaghi ve Peck, Sowers zemin sınıfına göre SPT deneyinden bulunan N vuruş sayılarından yaklaşık kayma mukavemeti aralığını vermişlerdir. SPT-N ile serbest basınç mukavemeti q_u ($c_u=q_u/2$) arasında Terzaghi ve Peck (1967), Sowers (1979)’ ın önerdiği üzere Şekil 3.3. kullanılabilir.



Şekil 3.3. SPT-N değeri ile drenajsız kayma mukavemeti ilişkisi (Terzaghi ve Peck 1967, Sowers 1979)

3.3.3. Koni penetrasyon deneyi (CPT)

Koni Penetrasyon Deneyi (CPT) ilk kez Hollanda'da 1930'larda kullanılmış olup, teknolojinin ilerlemesi ile günümüzde çok güvenilir ve ekonomik arazi deneyi niteliğini kazanmıştır. Koni Penetrasyon Deneyi, sondaj kuyusu olmaksızın 60° uç açısına ve 10 cm² 'lik kesit alana sahip konik bir başlığın hidrostatik basınç ve sabit bir hız oranında zemine sokularak zeminin gösterdiği direncin ölçülmesi ile gerçekleştirilir. CPT gerek sürati gerekse de derinlikle sürekli veri sağlaması açısından zemin etütlerinde ve temel mühendisliği tasarımlarında kullanılan bir metottur. Günümüzde ise CPT, alüvyon zemin koşullarının hakim olduğu bölgelerde oldukça yaygın bir kullanım alanına sahiptir (Sivrikaya ve Toğrol 2009). Şekil 3.4 'te şematik olarak CPT düzeneği görülmektedir. Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da ise tez kapsamında kullanılan CPT ekipmanları ile düzeneğin yerleştirildiği kamyon görülmektedir.



Şekil 3.4. Konik penetrasyon düzeneğinin şematik gösterimi

CPT ile elde edilen uç direnci (q_c), çevre sürtünmesi (f_s) ve sürtünme oranı (F_r) parametreleri kullanılarak zeminlerin tanımlanması ve sınıflandırılması mümkün olmaktadır. Deney sırasında boşluk suyu basıncı da ölçülebilmektedir.

Deney sırasında tüm derinlik boyunca veri alınabilmesi, test sonuçlarının güvenilir ve tekrarlanabilir olmaları ile operatör hatasının bulunmayışı CPT'nin başlıca avantajlarıdır; ancak çakıl gibi sert zeminlerde ilerleyememesi ve numune alamaması CPT'nin dezavantajlarıdır.



Şekil 3.5. Çalışmada kullanılan konik penetrasyon deneyi ekipmanları



Şekil 3.6. Konik penetrasyon deney düzeneğinin yerleştirildiği kamyon

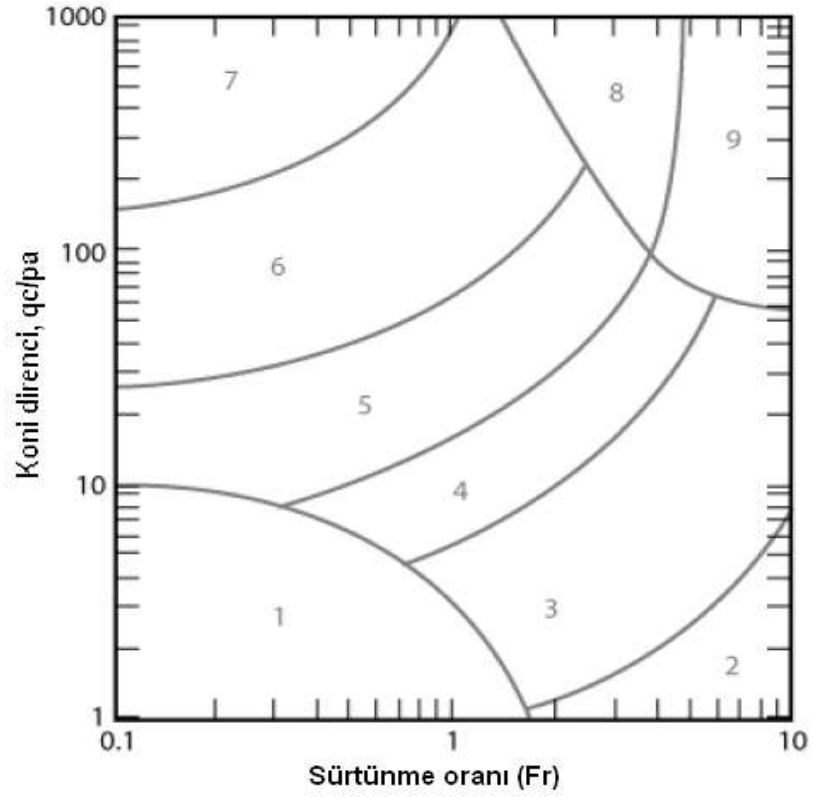
CPT çok yumuşak killerden sıkı kumlara kadar değişen zeminler için uygundur. Bununla birlikte özellikle çakıllar ve kayaç içeren zeminler için ise uygun değildir. Kullanım amaçları 3 ana grupta toplanabilir.

- Zemin tabakalaşmasını belirlemek ve tabakaları tanımlamak (Tabaka değişimleri ve kalınlıkları, zemin cinsi)
- Tabakalardaki zeminlerin rölatif sıkılık ve drenajsız kayma mukavemeti gibi mühendislik özelliklerini belirlemek (D_r , s_u gibi)
- Geoteknik tasarım için doğrudan sonuçlara ulaşmak (Sığ temellerin ve kazık temellerin taşıma gücü ve oturması, kumlu zeminlerde sıvılaşma, zemin iyileştirmesinin kontrolünde vb (Sivrikaya ve Toğrol 2009).

Mekanik ve elektronik olmak üzere iki çeşit CPT vardır. Mekanik CPT’de penetrometre ucu iç tijlere bağlıdır. Önce uç 40 mm kadar zemine itilerek q_c ölçülür. Sonra tijler biraz daha itilerek sürtünme kolunun konik başlık ile teması sağlanır ve birlikte zemine itilir. Bu durumda okunan düşey yük uç direnci ile sürtünme direncinin toplamına eşittir. Toplam okuma ile uç okuması farkı q_s ’e esit olacaktır. Elektronik CPT’de penetrometre ucu tijlerin içinden geçen kablolarla bağlıdır. Uç yaklaşık 20 mm/sn hızla zemine itilir. q_c ve q_s ayrı ayrı veri toplama ünitesine sürekli olarak aktarılır. Diğerinde olduğu gibi toplam ve uç okuması için deney durdurulmaz. Sadece tij ekleme sırasında deneye ara verilir.

Koni penetrasyon deneyinde, penetrasyon sırasında penetrometre etrafında oluşan boşluk suyu basıncı nedeniyle boşluk suyu basıncı düzeltilmesi, tabakalar arasında yataklanmış ince tabakaların mekanik özellikleri tam olarak ölçülmediği için tabakalaşma düzeltilmesi ve SPT deneyinde olduğu gibi CPT sonuçlarında efektif düşey gerilme etkili olduğu için derinlik (düşey yük) düzeltilmesi uygulanır.

Zemin cinsinin kolayca kestirilebilmesi için kullanılan başlıca abak Robetson vd. (1986) tarafından önerilen, Robertson (2010) tarafından güncellenen abaktır (Şekil 3.7). Bu abak koni uç direnci (q_c) ile sürtünme oranını (F_r) arasındaki ilişkiyi göstermektedir.



*Pa: Atmosfer basıncı (100 kPa)

Şekil 3.7. q_c - F_r ilişkisi (Robertson vd. 1986, Robertson 2000)

Şekil 3.7'ye göre bölgelere düşen zemin özellikleri Çizelge 3.3'teki gibidir.

Abaklar grafikler kullanılmaksızın zeminin kum veya kil olması CPT'nin gösterdiği direnç ile tahmin edilebilmektedir.

Deney sırasında;

Kum;

- i) Yüksek uç direnci,
- ii) Düşük sürtünme oranı,
- iii) Düşük boşluk suyu basıncı-yüksek permeabilite verir.

Kil;

i) Düşük uç direnci,

ii) Yüksek sürtünme oranı,

iii) Yüksek boşluk suyu basıncı-düşük permeabilite verir.

Çizelge 3.3. CPTU Sonuçlarına Göre Zemin Sınıflandırması (Robertson 1990)

Bölge	Zemin Davranış Türü
1	Hassas, iyi derecelenmiş
2	Organik zeminler-kil
3	Kil, Siltli kil-kil arası
4	Silt karışımları, Kill silt- siltli kil arası
5	Kum karışımları, Siltli kum, Kumlu silt arası
6	Kum, Temiz kum ile siltli kum arası
7	Çakıllı kum ile sıkı kum arası
8	Çok sıkı kum ile killi kum arası*
9	Çok katı iyi derecelenmiş zemin*

Efektif örtü basıncının (σ_v') derinlikle artması neticesinde gerek koni penetrasyonunun gerekse sürtünme direncinin arttığı göz önünde bulundurulursa özellikle derin deneylerde CPT'den elde edilen parametrelerin düzeltilmesi gerekmektedir. Düzeltmeler göz önüne alınarak Robertson (1990) tarafından hazırlanan abak ise Şekil 3.8'de görülmektedir.

Şekil 3.8'de I_c zemin davranış indeksi olup;

$$I_c = ((3.47 - \log Q_t)^2 + (\log F_r + 1.22)^2)^{0.5} \quad (3.2)$$

formülü ile bulunur. Formülde;

Q_t = düzeltilmiş koni batma direnci (boyutsuz)

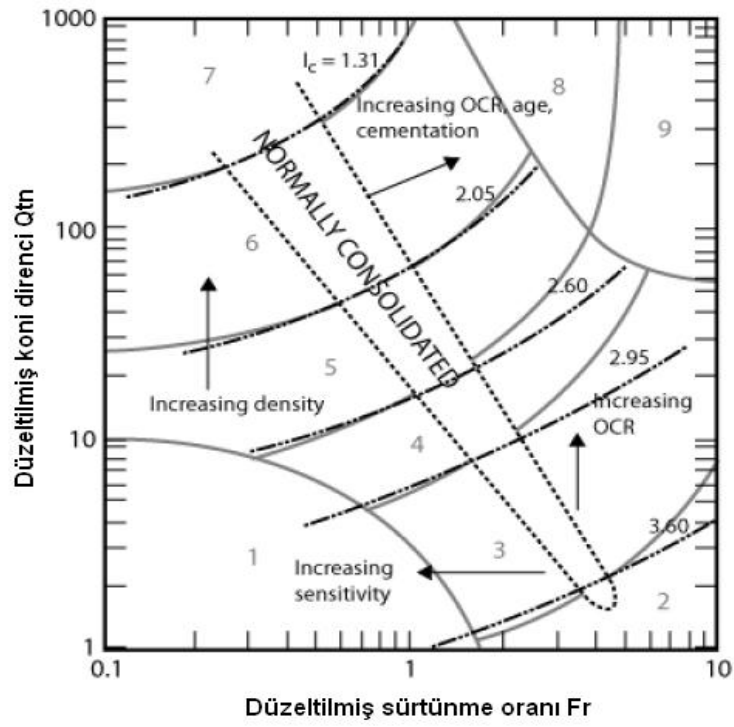
$$= (q_t - \sigma_{v0}) / \sigma_{v0}' \quad (3.3)$$

F_r = düzeltilmiş sürtünme oranı (%)

$$= (f_s / (q_t - \sigma_{v0})) * 100\% \quad (3.4)$$

olarak ifade edilmektedir.

I_c zemin davranış indeksi ve zemin cinsi arasındaki ilişki Çizelge 3.4' teki gibidir.



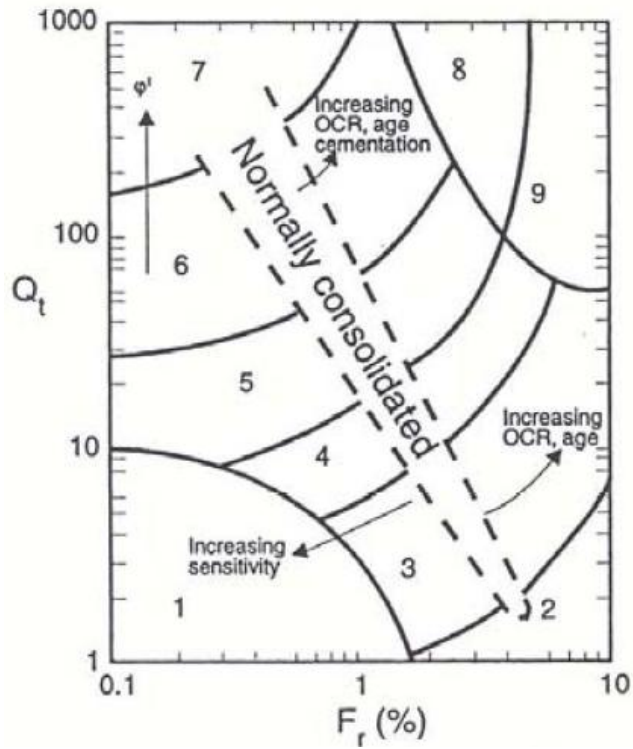
Şekil 3.8. Düzeltilmiş koni direnci- düzeltilmiş sürtünme oranı ilişkisi (Robertson 1990)

CPT'de ölçülen Q_t ile F_r arasındaki ilişki ise Şekil 3.9' daki gibidir.

Çizelge 3.4. Normalize edilmiş CPT- zemin davranış türü ilişkisi (Robertson 1990)

Bölge	Zemin Davranış Türü	I_c
1	Hassas, iyi derecelenmiş	N/A
2	Organik zeminler-kil	>3.6
3	Kil, Siltli kil-kil arası	2.95-3.60
4	Silt karışımları, Kill silt- siltli kil arası	2.60-2.95
5	Kum karışımları, Siltli kum, Kumlu silt arası	2.05.-2.60
6	Kum, Temiz kum ile siltli kum arası	1.31-2.05
7	Çakıllı kum ile sıkı kum arası	<1.31
8	Çok sıkı kum ile killi kum arası*	N/A
9	Çok katı iyi derecelenmiş zemin*	N/A

*Ağır aşırı konsolide ya da çimentolanmış zemin



Şekil 3.9. CPTU deneyinde bulunan Q_t - F_r ilişkisi (Robertson 1990)

Şekil 3.9’da;

$$Q_t = (q_t - \sigma_{v0}) / \sigma'_v \quad (3.5)$$

$$F_r = f_s / (q_t - \sigma_{v0}) \quad (3.6)$$

formülleri ile bulunmaktadır.

Deney sırasında derinliğe bağlı olarak sürekli kayıt yapılabildiği için alınan verilerle sürekli ve ayrıntılı bir şekilde zemin sınıflaması yapılabilmektedir. Deney sırasında SPT- N_{60} değerleri belirlenebilmektedir. CPT genellikle zeminlerin mühendislik özelliklerinin belirlenmesinde ve tipik olarak zeminlerin stratigrafik katmanlarının ortaya çıkarılmasında kullanılır. Bazı korelasyonlar kullanılarak zeminin kohezyon, içsel sürtünme açısı ve sıkışma katsayısı gibi çeşitli parametreleri elde edilebilmektedir.

Kohezyonlu zeminlerin drenajsız kesme mukavemeti, uç direnci değeri kullanılarak elde edilebilir. Aşağıdaki bağıntı bunu göstermektedir .

$$S_u = (q_c - P_0) / N_k \quad (3.7)$$

Bu bağıntıda;

S_u = Tek eksenli dayanım değerini (Kpa)

q_c =Uç direncini (Kpa)

P_0 =Deney derinliğindeki efektif gerilme düzeyini (Kpa)

N_k ise koni faktörünü göstermektedir. (Genelde 15-20 arasında değişen bir değerdir.)

N_k , I_p ’ye bağlı bir parametre olup Şekil 3.11 yardımıyla bulunabilir.

Kohezyonsuz zeminlerin mekanik parametrelerinden birisi olan içsel sürtünme açısı ise Bowles (1996) tarafından geliştirilen formül ile elde edilebilir.

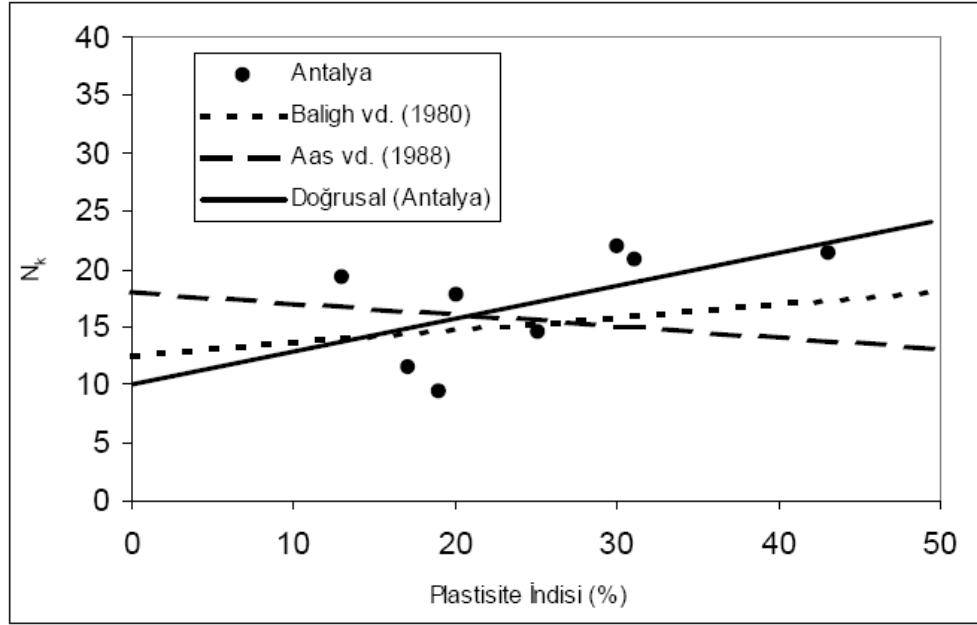
$$\phi = 29^\circ + \sqrt{q_c} \quad (3.8)$$

Burada;

ϕ = İçsel sürtünme açısı

q_c =Uç direnci (MPa)’dir.

Bu bağıntıda 29° yerinde çakıllarda 34° siltli kumlar için ise 24° alınır.



Şekil 3.10. Koni faktörünün (N_k) plastisite indisi ile değişimi (Dipova ve Cangir 2005)

Schultze ve Muhs (1967) zeminleri uç dirençlerine göre Çizelge 3.4'teki gibi sınıflamışlardır.

Çizelge 3.5. Zeminlerin uç dirençlerine göre sınıflanması (Schultze ve Muhs 1967)

Uç Direnci- q_c (MN/m ²)	Zemin Sınıfı
<5	Gevşek
5-10	Gevşek-Orta Sıkı
10-15	Orta Sıkı
>15	Sıkı

3.4. Laboratuvar Deneyleri

Saha incelemelerinin tamamlayıcı bir parçası olan laboratuvar deneyleri zemin mühendislik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak gereği gibi uygulanmadıkları ve araziden gelen numunenin amaca uygun olmayışı yüzünden sonuçları yanıltıcı olabilmektedir. Zemin mekaniği alanında yapılan deneyler TS1900 ve ASTM standartlarına göre gerçekleştirilir. Buna göre alınan örselenmiş numuneler çift katlı plastik torba içerisinde, örselenmemiş numuneler ise benzer biçimde özel tüplerde (shelby tüpü), iki ucu parafinlenmiş olarak ve değişmez sıcaklık ve rutubette laboratuvara ulaştırılmıştır.

Lara-Yamansaz bölgesindeki zeminlerin fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla sondajlardan alınan örselenmiş ve örselenmemiş numuneler üzerinde çeşitli deneyler yapılmıştır. Bunlar zeminin fiziksel özelliklerini belirlemeye yönelik su muhtevası, elek analizi ile hidrometre analizi, kıvam limitleri deneyleri ile zeminin mekanik özelliklerini belirlemeye yönelik olarak yapılan konsolidasyon ve üç eksenli basınç deneyleridir. Bölge zemininin fiziksel, indeks ve mekanik özellikleri araştırılarak, bulunan sonuçlar ile yapılan korelasyonlar yardımıyla bölge zemininin mühendislik parametreleri üretilmiştir.

3.4.1. Tane boyu dağılımı

Bölge zemini ağırlıklı olarak gevşek-sıkı kum, silt-kil ve organik kökenli (turba) zeminlerden oluşmaktadır. Araziden alınan numuneler üzerinde tane boyu dağılımını belirleyebilmek için iri taneli zeminlerde elek analizi deneyi, ince taneli zeminlerde ise hidrometre deneyi yapılmıştır.

3.4.1.1. Elek analizi

İri taneli zeminlerde tane ϕ apı dağılımını belirlemek için kullanılan deney elek analizidir. Araziden alınan zemin numuneleri farklı ϕ aplarda açıklıkları olan bir dizi standart elekten geçirilmekte ve farklı elek boyutları arasından kalan tanelerin ağırlık yüzdeleri (toplam kuru ağırlığına oranı) belirlenmektedir. Zemin sırasıyla en büyük açıklığa sahip elekten en küçük açıklığa sahip eleğe doğru bir dizi elekten geçirilerek, bir elekten geçip diğeri üzerinde kalan tanelerin içinde kaldığı ϕ ap sınırları belirlenmiş olmaktadır. Şekil 3.11’de elek analizi deneyinde kullanılan elekler ile sarsma makinesi görülmektedir.



Şekil 3.11. Elek analizi deneyinde kullanılan farklı ϕ aptaki elekler ve sarsma makinesi

3.4.1.2. Hidrometre deneyi

200 nolu elekten geçen ince taneli zeminlerin tane çaplarının belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen deneydir. Çalışma kapsamında araziden alınan ince taneli zemin numuneleri üzerinde hidrometre analizi yapılarak zemin içerisindeki tane dağılımı belirlenmiştir. Bu deneyin esası, viskoz sıvı içerisinde düşen küreler için Stoke yasasına dayanır. Stoke yasasına göre viskoz sıvı içerisinde düşen tanelerin nihai hızı tanelerin çapına ve süspansiyon halindeki taneler ile sıvının yoğunluğuna bağlıdır. Düşüş mesafesi ve zamanı bilindiği için tane çapı hesaplanabilmektedir. şekil 3.12’de hidrometre deneyi ekipmanları görülmektedir.



şekil 3.12. Hidrometre deneyinde kullanılan mezr, kronometre ve mekanik karıştırıcı

3.4.2. Kıvam (Atterberg Limitleri) deneyleri

Özellikle ince taneli zeminlerde suyun varlığı zeminin mühendislik davranışını etkiler. Bir zeminde bulunan su muhtevasının bilinmesi tek başına yeterli olmamaktadır. Atterberg limitleri ile su içeriğinin bulunması halinde zeminin mühendislik özellikleri hakkında ön fikir edinmiş olunur. İnce taneli zeminlerde kıvam, zeminin sertlik-yumuşaklık durumunu ifade etmektedir. Bu deneyler tane boyutu 0.425 mm'den ince numuneler üzerinde gerçekleştirilir. Atterberg limitleri zeminin su içeriğine bağlıdır. Atterberg limitlerine bağlı olarak ince taneli zeminler kabaca yumuşak, orta sert veya sert gibi isimler alır. İnce taneli zeminler, su katılıp yoğrulduğunda plastiklik özelliği gösterirler. Plastiklik veya plastisite ince taneli zeminlerin bir özelliği olup kırılmadan şekil verilmeyi ifade eder. Bu özellik, kum, çakıl gibi iri taneli ve taneleri arasında yapışma çekme kuvveti olmayan zeminlerde görülmez (Plastik olmayan zeminler, NP). İnce taneli zeminler, su muhtevalarına göre çeşitli durumlarda olabilirler. Kuru bir zemine gittikçe artan bir miktarda su katılıp yoğrulduğunda; hacmi bir miktar artar ve zemin sırasıyla şu durumlara sahip olur: Katı durum (sert), yarı katı durum (orta sert), plastik durum (yumuşak), likit durum (sıvı, süspansiyon). Likit durumda zemin bir sıvı gibi yavaşça akabilir. Plastik durumda; kırılma, çatlama olmaksızın zemine istenilen şekil kolayca verilebilir. Yarı katı durumda zemine istenilen şekil zorlukla verilir; zemin çatlar. Katı durumda zemine şekil verilmek istendiğinde ise zemine şekil verilemez; zemin kırılır (Uzuner 2007).

Katı, yarı katı, plastik ve likit durumları birbirinden ayıran sınır su muhtevalarına Atterberg veya kıvam limitleri denmektedir. Likit limit (w_L veya LL); plastik ve likit durumları birbirinden ayıran sınır su içeriğidir. Plastik limit (w_p veya PL); plastik ve yarı katı durumları birbirinden ayıran sınır su içeriğidir. Plastisite indisi (PI) ise likit limit ile plastik limit değerleri arasındaki farkı ifade etmektedir.

3.4.2.1. Likit limit deneyi

Bu çalışmada likit limitin belirlenmesi için koni batma yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntem zeminin kayma dayanımına dayalı statik bir deney olması ve alternatif Cassagrande yönteminin deneye dinamik etkiler katmasından dolayı, daha elverişlidir. Penetrometre deneyinde zeminin likit limiti, kütlesi 80 g olan konik ucun, bir kap içerisindeki yoğrulmuş zemine 5 saniyede 20 mm battığı durumdaki su içeriğidir. Şekil 3.13'te likit limit deneyinde kullanılan penetrometre cihazı görülmektedir.

3.4.2.2. Plastik limit deneyi

Plastik limit, deneyi zemin numunesinin ip şeklinde yuvarlatılması sırasında çapının 3 mm'ye düşmesi sırasında kopmalar-kırılmalar başladığı durumdaki su içeriğidir.



Şekil 3.13. Likit limit deneyinde kullanılan penetrometre cihazı

3.4.3. Zeminlerin kayma direnci

Zeminde meydana gelen stabilite problemlerinin çözümünde, zeminin kayma dayanımı ile ilgili bilgilere gereksinim vardır. Zemin ortamı yüklendiği zaman, zemin kitlesinde gerilmeler oluşur. Zemin ortamında oluşan kayma (kesme, makaslama) gerilmeleri, zeminin kayma direncine ulaştığı zaman, zemin kitlesinde kırılma (göçme) meydana gelir.. Zeminin kayma direnci (dayanımı, mukavemeti) dayanabileceği en büyük kayma gerilmesi olup kırılma sırasında, kayma yüzeyi boyunca etkiyen kayma gerilmesini temsil etmektedir.

Zeminlerin kayma dayanımını ölçmede yaygın olarak kullanılan birkaç laboratuvar deneyi vardır. Bu deneyler; Serbest basınç deneyi, kesme kutusu deneyi, üç eksenli basınç deneyi ve Vane (Kanatlı Sonda) Deneyidir. Bu deneylerin her birinin avantaj ve dezavantajları olup, bütün durumlara uyan bir deney mevcut değildir. Deney yöntemi seçilirken zemin türü, başlangıçtaki su içeriği ve drenaj şartı dikkate alınmalıdır (Clayton vd 1982).

Arazide kısa vadeli yükleme durumlarında beliren fazla boşluk suyu basıncının sönümlenmesi olanağı bulunmadığından bu koşulu yansıtan deney laboratuvarında drenajsız olarak yapılır. Drenajsız deney serbest basınç veya üç eksenli hücrede konsolidasyonsuz-drenajsız (hızlı) olarak gerçekleştirilir. Ölçülen parametreler (C_u , σ_u) bu durumda toplam gerilmelere göre ifade edilmektedir.

Suya doymun bölge zemininde konsolidasyonsuz-drenajsız üç eksenli basınç deneyi yapılmıştır. Bu deney sırasında bölge zemininden alınan numuneler üzerine yatay ve düşey gerilmeler uygulanarak, konsolidasyona izin vermeden drenajsız şartlar altında drenajsız kayma dayanımı (C_u) elde edilmiştir. Deney sırasında araziden gelen tüplerden boy/çap oranı 2 ile 2.5 arasında olan numuneler lastik membran içine yerleştirilerek alttan ve üstten izole edilmiştir. Üç eksenli hücre içerisine yerleştirildikten sonra, 3 ayrı kademede artan sabit hücre basınçları altında düşey yöndeki gerilmeler arttırılarak numuneler kırılmıştır. Bu işlem sırasında piston yükü ve numune boyundaki azalmalar kaydedilmiştir. Deney

sırasında birim deformasyon %2/dak şeklinde uygulanmıştır. Yeterli sayıda numune olmayışından her numune üç hücre basıncı altında tekrarlı olarak test edilmiştir. Çok aşamalı (multistage) deney olarak bilinen bu teknik Head (1982) ve BS 1377 tarafından tanımlanmıştır. Şekil 3.14’te üç eksenli basınç deneyi düzeneği görülmektedir.



Şekil 3.14. Üç eksenli basınç deneyi düzeneği

3.4.4. Sıkışabilirlik özelliklerinin belirlenmesi

Yapılan sondaj kuyularından alınan örselenmemiş numuneler üzerinde konsolidasyon deneyi yapılmıştır. Arazideki zemin tabakalarının düşey yüklemeler altında sıkışması esas olarak tek boyutlu bir sıkışma olduğu için, bu deney sırasında laboratuvar deney düzleminde zeminin yanal genişlemesine izin verilmemekte ve belirli düşey yükler altında zeminin boyunun kısalması ölçülmektedir; bu da numunenin ödometre aletinde rijit bir

43

3.5 Büro Çalışmaları

Mevcut raporların toplanarak analizlere hazır hale getirilmesi, arazi deneyleri yapılması ve laboratuvar deneyleri ile zemine ait indeks ve mekanik özelliklerinin belirlenmesinin ardından büro çalışmaları ile elde edilen veriler analiz edilmiştir. Bu amaçla sıvılaşma analizi yapılmış, CBS ile tematik haritalar oluşturulmuştur.

3.5.1. SPT sonuçları ile sıvılaşma analizi

Araştırma kapsamında zemin sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesinde en eski ve sıkça kullanılan yöntem olan Standart Penetrasyon Deneyinden elde edilen SPT-N değerlerinden yararlanılmıştır.

3.5.1.1 Olasılıksal sismik tehlike analizi yöntemi ve olasılıksal sıvılaşma hesabı

Olasılıksal sismik tehlike analizi, gerek sismik kaynakların geometrisinde, ilgilenilen sahaya uzaklıklarında, sönüm ilişkilerinde, gerekse beklenen depremlerin büyüklüklerindeki belirsizlik durumlarında, ilgilenilen sahaya seçilen tasarım periyodu içinde gelebilecek ve belli bir aşılma olasılığına sahip yer hareketi parametrelerinin sistematik bir şekilde modellenip, tahmin edilebilmesini sağlar. Jeolojik parametrelerden başlayarak, kaynaktan uzaklığa kadar uzanan birçok ögenin belirsizliğe sahip olabildiği bu doğa olayı karşısında; sahanın maruz kalacağı yer hareketi parametrelerinin tahmininin, deterministik analiz yaklaşımıyla karşılaştırıldığında çok daha fazla başarılı olduğu, yöntemin Cornell (1968) tarafından ortaya atıldığı tarihten beri uygulama alanlarının genişlemesiyle görülmektedir. Cornell'in (1968) geliştirdiği olasılıksal sismik tehlike belirlemesi yöntemi, daha çok parametrenin rastlantısallaştırılması gibi değişikliklere uğradıysa da, günümüze kadar esas olarak aynı çerçeve üzerinde seyretmiştir (Çetin vd 2004). Deterministik yöntemlerle hesaplanan güvenlik sayıları sıvılaşma potansiyelinin bulunmasında tek başına yeterli olmadığı için ve olasılıksal yöntemler belirsizliğe sahip bir çok ögeyi dikkate alıp yer hareketi parametrelerini sistematik bir şekilde modellemeye

olarak sağladığından daha başarılı, daha gerçekçi sonuçlar alınmasını sağlamaktadır. Olasılıksal yöntemin diğer çalışmalardan temel farkı aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

- Analizler neticesinde herhangi bir alanda sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısının 0 ile 1 arasında değişen bir değer olmasından öte, sıvılaşma oluşma olasılığının ne olduğunun belirlenmesi.
- SPT verisini etkileyecek faktörlerin anlaşılmasına yönelik yeni bilgilerin kullanılması
- Araziye özel dinamik zemin davranışının anlaşılmasına yönelik yeni bilgi ve yöntemlerin kullanılması (Deprem fay kırılma yönü, dinamik arazi davranış analizleri vb.)
- Tekrarlı arazi kayma gerilme oranının bulunmasında geliştirilmiş yeni yöntemlerin kullanılması
- Veri kalitesine etkiyen faktörlerin, belirsizliklerin toplanmasına dayanan olasılıksal tabanlı bir veri kalitesi belirleme yönteminin geliştirilmesi

Sonuç ürün sismik arazi tahminlerindeki belirsizliğin büyük bir kısmını ortadan kaldırdığı gibi deprem şiddetiyle bağıntılı süre düzeltme faktörü, ince daneli malzeme muhtevasının sıvılaşma direncine etkisi ve kayma direncinin efektif gerilmeyle olan doğrusal olmayan bağıntısı gibi bazı tartışmalı konuları da açıklığa kavuşturmuştur.

Önceki çalışmalara kıyasla önemli bir ilerleme, maksimum yatay yer ivmesinin hesaplanmasında olmuştur. Diğer önemli gelişme kayma gerilme oranının hesaplanmasında kaydedilmiştir.

3.5.1.2. Tekrarlı gerilme oranının bulunması (CSR)

CSR_{eq} değeri bağıntı 3.9 ile hesaplanmıştır (Seed ve Idriss 1971).

$$CSR_{eq} = \frac{\tau_{ort}}{\sigma_{v'}} = 0.65 * \frac{a_{max}}{g} * \frac{\sigma}{\sigma_{v'}} * rd \quad (3.9)$$

Burada;

- τ_{ort} : Ortalama kayma gerilmesi
 σ_v : Toplam gerilme
 σ_v' : Efektif gerilme
 a_{max} : Zemin yüzeyindeki maksimum yatay yer ivmesi
 g : Yerçekimi ivmesi
 r_d : Doğrusal olmayan kütle kayma katsayısı

Çetin ve Seed (2004) r_d değerinin derinliğe, deprem büyüklüğüne, sarsıntı şiddetine ve arazi rijitliğine bağlı olarak belirlenmesinde bağıntı 3.10 ile 3.11'i önermişlerdir.

$d < 65$ ft (19.8 m) için;

$$r_d(d, M_w, a_{max}, V_{s,40}^*) = \frac{\left[1 + \frac{-23.013 - 2.949a_{max} + 0.999M_w + 0.016V_{s,40}^*}{16.258 + 0.201e^{0.104(-65 + 0.0785V_{s,40}^* + 24.888)}} \right]}{\left[1 + \frac{-23.013 - 2.949a_{max} + 0.999M_w + 0.016V_{s,40}^*}{16.258 + 0.201e^{0.104(0.0785V_{s,40}^* + 24.888)}} \right]} = \pm \sigma_{\sigma_d} \quad (3.10)$$

$d \geq 65$ ft (19.8 m) için ise;

$$r_d(d, M_w, a_{max}, V_{s,40}^*) = \frac{\left[1 + \frac{-23.013 - 2.949a_{max} + 0.999M_w + 0.016V_{s,40}^*}{16.258 + 0.201e^{0.104(-65 + 0.0785V_{s,40}^* + 24.888)}} \right]}{\left[1 + \frac{-23.013 - 2.949a_{max} + 0.999M_w + 0.016V_{s,40}^*}{16.258 + 0.201e^{0.104(0.0785V_{s,40}^* + 24.888)}} \right]} - 0.0014(d-65) \pm \sigma_{\sigma_d} \quad (3.11)$$

Burada;

d : Derinliği ifade etmektedir.

$$d < 40 \text{ ft (12.2 m) için } \sigma_{erd}(d) = d^{0.850} * 0.072 \text{ ve} \quad (3.12)$$

$$d \geq 40 \text{ ft (12.2 m) için } \sigma_{erd}(d) = 40^{0.850} * 0.072 \quad (3.13)$$

a_{max} = yüzeydeki en büyük ivme

M_w = Deprem moment büyüklüğü

$V_{s,40}^*$ = kayma dalgası hızı (ft/sec). İlk 12 m için ortalama kayma dalgası hızı olarak tariflenmektedir.

3.5.1.3. SPT değerlerinin düzeltilmesi

Sıvılaşma analizini SPT değerleri ile yapabilmek için arazide ölçülen SPT değerlerinin düzeltilmesi gerekmektedir.

Düzeltilmemiş SPT darbe sayısını (N) öncelikle düzeltilmiş SPT darbe sayısına (N_1) dönüştürmek gerekir. SPT- N_{60} değeri enerjisi; teorik serbest düşme enerjisinin %60'ı ve efektif düşey basıncın 1 kgf/cm^2 altında bulunan düzeltilmiş darbe sayısıdır. Arazide elde edilen SPT- N_{arazi} değerinde Efektif Düşey Basıncı Düzeltmesi (C_N) yapılmalıdır. SPT, ölçümün yapıldığı derinlikteki efektif gerilmelerden ve bağıl yoğunluktan etkilenmektedir. Aynı bağıl yoğunluğa sahip bir kum, farklı derinliklerde farklı SPT- N_{arazi} değerleri verir.

Bu nedenle farklı derinliklerdeki zemin özellikleri karşılaştırılıyorsa, SPT- N_{arazi} değerinin efektif düşey örtü basıncına (σ_v') bağlı düzeltme gereklidir (Uyanık 2002). Bunun için N efektif düzeltme katsayısı (C_N) ile çarpılır. Liao ve Whitman'a (1986) göre;

$$N_1 = N * C_N \quad (3.14)$$

Burada;

$$C_N = \left(\frac{1}{\sigma_v'} \right)^{0.5} \quad (3.15)$$

σ_v' =efektif düşey örtü basıncı (SPT yapılan derinlikte)

Bu aşamadan sonra N_1 değeri enerji, ekipman ve prosedür etkileri de göz önüne alınarak (N_1)₆₀ değerine standardize edilir.

$$(N_1)_{60} = N_m \cdot C_N \cdot C_E \cdot C_B \cdot C_R \cdot C_S \quad (3.16)$$

Burada;

$(N_1)_{60}$: Düzeltilmiş SPT-N değeri

N_m : Yerinde ölçülmüş standart penetrasyon direnci

C_N : Efektif düzeltme katsayısı

C_B : Kuyu çapı için düzeltme katsayısı

C_E : Şahmerdan enerji oranı için düzeltme katsayısı

C_R : Tij uzunluğu için düzeltme katsayısı

C_S : Numune alıcıya bağlı düzeltme katsayısı

Şekil 3.16'da SPT düzeltme faktörleri görülmektedir.

$(N_1)_{60}$ değeri bulunduktan sonra yapılması gereken son düzeltme ise ince taneli malzeme oranı düzeltmesidir. İnce taneli malzeme oranı düzeltmesi ise;

$$(N_1)_{60CS} = (N_1)_{60} \cdot C_{FINES} \quad (3.17)$$

olarak tanımlanmaktadır. Burada;

$$C_{fines} = (1 + 0.004 \cdot FC) + 0.05 \cdot FC / ((N_1)_{60}) \quad \text{lim } FC \leq 35, FC \geq 5 \quad (3.18)$$

FC, yüzde cinsinden ince tane oranını temsil etmektedir. Bu formül ince tane oranının %5 ile %35 aralığında olduğu durumlarda geçerlidir. C_{fines} ince taneli malzeme miktarı düzeltmesi P_L formülünün içinde direkt olarak yapıldığından söz konusu sıvılaşma hesabında $(N_1)_{60}$ değeri için ayrıca ince taneli malzeme miktarı düzeltmesi yapılmamıştır.

3.5.1.4. Sıvılaşma olasılığının hesaplanması

Her sondaj noktasından alınan numuneler üzerinde elek analizi yapılarak numunelerin ince dane oranı belirlenmiştir. SPT değerleri sıvılaşma analizinde kullanılmak üzere düzeltilmiştir. Tüm sondajların her derinliği için sıvılaşma olasılığı (P_L) bağıntı (3.19) yardımıyla bulunmuştur.

C_N	$C_N = \left(\frac{P_a}{\sigma_v}\right)^{0.5}$ $0.50 \leq C_N \leq 2.00$																
C_R	Tij uzunluğu Düzeltme faktörü 3-4 m 0.75 4-6 m 0.85 6-10 m 0.95 10-30 m 1.00 > 30 m < 1.00																
C_S	Numune alıcıda membran boşluğunun öngörüldüğü ancak membranın kullanılmadığı durumlar için düzeltme: $C_S = 1 + \frac{N}{100}$ $1.10 \leq C_S \leq 1.30$																
C_B	Sondaj delgi çapı 65 to 115 mm 150 mm 200 mm	Düzeltme (C_B) 1.00 1.05 1.15															
C_E	E_R (Enerji oranı) SPT çekicinden numune alıcıya iletilen enerjinin yüzde cinsinden oranı - En iyi yaklaşım her darbeye iletilen enerjiyi doğrudan ölçmektir. Mümkün olduğu yerde doğrudan ölçümler yapılmalıdır. - Bir sonraki yaklaşım daha önceden doğrudan enerji ölçümlerine göre kalibre edilmiş bir çekiç ve mekanik çekiç kaldırma sistemi kullanmaktır. - Aksi halde E_R tahmin edilmeli. İyi arazi uygulaması, ekipman ve izleme koşullarında aşağıdaki ölçütler kullanılabilir: <table border="1"> <thead> <tr> <th>Ekipman</th><th>Tahmini E_R (Not 3'e bakın)</th><th>C_E (Not 3'e bakın)</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>-Emniyet Şahmerdanı¹</td><td>0.4 - 0.75</td><td>0.7 - 1.2</td></tr> <tr> <td>-Simit (Donat) Şahmerdanı¹</td><td>0.3 - 0.6</td><td>0.5 - 1.0</td></tr> <tr> <td>-Simit (Donat) Şahmerdanı²</td><td>0.7 - 0.85</td><td>1.1 - 1.4</td></tr> <tr> <td>-Otomatik Şahmerdan (Simit veya Emniyet)</td><td>0.5 - 0.8</td><td>0.8 - 1.4</td></tr> </tbody> </table> - Daha düşük kalitede arazi çalışması(düzensiz çekiç düşme mesafesi, çekicinin çubuk üzerinde aşırı sürtünmesi, kedi kafasına bağlı ıslak veya yıpranmış halat v.b.) olduğu durumlarda ayarlamalar yapılmalıdır.		Ekipman	Tahmini E_R (Not 3'e bakın)	C_E (Not 3'e bakın)	-Emniyet Şahmerdanı ¹	0.4 - 0.75	0.7 - 1.2	-Simit (Donat) Şahmerdanı ¹	0.3 - 0.6	0.5 - 1.0	-Simit (Donat) Şahmerdanı ²	0.7 - 0.85	1.1 - 1.4	-Otomatik Şahmerdan (Simit veya Emniyet)	0.5 - 0.8	0.8 - 1.4
Ekipman	Tahmini E_R (Not 3'e bakın)	C_E (Not 3'e bakın)															
-Emniyet Şahmerdanı ¹	0.4 - 0.75	0.7 - 1.2															
-Simit (Donat) Şahmerdanı ¹	0.3 - 0.6	0.5 - 1.0															
-Simit (Donat) Şahmerdanı ²	0.7 - 0.85	1.1 - 1.4															
-Otomatik Şahmerdan (Simit veya Emniyet)	0.5 - 0.8	0.8 - 1.4															

Not: (1) Halatlı makara sistemi, halat, makara etrafında iki tur atar, normal düşürme (Japonların "atma" yöntemi değil), halat ıslak veya aşırı yıpranmış değil.

(2) Özel Japon "atma" düşürmeli yöntemi, halatlı makara sistemi. (Not 4'e bakınız.)

(3) Gösterilen aralık için, aralığın üçte birinin ortasına düşen değerler diğerlerinden daha yaygındır, fakat eğer ki ekipman ve/veya izleme metotları iyi değilse E_R ve C_E gösterilen aralıktan daha fazla değişebilir.

(4)Yaygın Japon SPT uygulaması, delik çapı ve SPT vuruş sıklığı için ilave düzeltmeler gerektirir. Tipik Japon halatlı makara sistemi, donut şahmerdanı ve Japon "atma" düşürme yöntemi için toplam $C_B \times C_E$ çarpımı 1.0 ile 1.3 değerleri arasındadır.

Şekil 3.16. SPT düzeltme faktörleri (NCEER 1997)

$$P_L(N_{1,60}, CSR, M_w, \sigma'_v, FC) = \Phi \left(\frac{\left(N_{1,60} \cdot (1 + 0.004 \cdot FC) - 13.32 \cdot \ln(CSR) - 29.53 \cdot \ln(M_w) - 3.70 \cdot \ln(\sigma'_v) + 0.05 \cdot FC + 44.97 \right)}{2.70} \right) \quad (3.19)$$

Burada;

P_L = Sıvılaşma olasılığı (ondalık sayı olarak)

Φ = Standart kümülatif normal dağılım

Ayrıca herhangi bir sıvılaşma olasılığı için tekrarlı dayanım oranı (CRR) bağıntı (3.20) yardımıyla bulunabilir.

$$CRR(N_{1,60}, CSR, M_w, \sigma'_v, FC, P_L) = \exp \left[\frac{\left(N_{1,60} \cdot (1 + 0.004 \cdot FC) - 29.53 \cdot \ln(M_w) - 3.70 \cdot \ln(\sigma'_v) + 0.05 \cdot FC + 44.97 + 2.70 \cdot \Phi^{-1}(P_L) \right)}{13.32} \right] \quad (3.20)$$

Burada;

$\Phi^{-1}(P_L)$ standart kümülatif normal dağılımın tersini ifade etmektedir.

3.5.1.5. Sıvılaşma şiddet indeksinin bulunması (LSI)

Herhangi bir noktada sıvılaşmanın olup olmayacağının bilinmesi ya da sıvılaşma olasılığının hesaplanması araştırılan bölgedeki hasarın tahmin edilmesinde yeterli değildir. Herhangi bir sıvılaşma olayında zeminden kaynaklanan hasarın şiddeti, insanlar ve yapılar üzerindeki etkisi sıvılaşmanın meydana gelip gelmemesinden çok daha önemlidir. İşte bu aşamada sıvılaşma olasılığı bulunan bir zeminde sıvılaşma şiddet indeksinin değer aralığının ne olacağı büyük önem kazanmaktadır. Sıvılaşma şiddet indeksi (LSI); sıvılaşma

olasılığı (P_L), potansiyel olarak sıvılaşabilir tabaka kalınlığı (TH) ve potansiyel olarak sıvılaşabilir tabakaya olan derinliğin (WF) bir fonksiyonudur.

Yapılan tez çalışması kapsamında her sondaj noktasındaki zemine ait indeks ve dayanım özellikleri kullanılarak ve gerekli SPT düzeltmeleri yapılarak tüm sondajların her derinliği için sıvılaşma olasılığı (P_L) Çetin vd (2004) yöntemine göre hesaplanmıştır. Analiz senaryo depreminin büyüklüğü $M_w=6.5$ alınmıştır. Her sondaj noktası için maksimum yüzey ivmesi 0.4 alınmıştır. Her sondaj için sıvılaşabilen tabaka kalınlığı belirlenmiş ve TH ile sembolize edilmiştir. Sıvılaşan tabakanın yüzeyden derinliği arttıkça yaratacağı hasarın azalacağı kanıtından yola çıkarak Yılmaz ve Çetin (2004) tarafından ifade edilen WF etkeni üçüncü bileşen olarak değerlendirilmiş ve yüzeyden 20 m derinliğe kadar azalan bir lineer değişime sahip olduğu belirtilmiştir. Iwasaki (1982) tarafından geliştirilen LSI indeksine (Liquefaction Severity Index) benzeyen, Yılmaz ve Çetin (2004) tarafından tanımlanan yeni bir LSI indeksi kullanılmıştır.

$$LSI = \int_0^{20} PL * TH * WF \quad (3.21)$$

$WF(z) = 1 - 0.05 * z$ ($z < 20$ m olması durumu) olarak ifade edilmektedir. Derinliğin 20 m'nin üzerinde olması durumunda ise sıvılaşabilir tabakaya olan derinlik faktörü 0 alınmaktadır.

LSI' ya göre zeminin sıvılaşma potansiyeli aşağıdaki aralıklardaki gibi ifade edilmektedir (Yılmaz ve Çetin 2004).

- $0 < LSI < 0.35$, sıvılaşma şiddeti çok düşük
- $0.35 < LSI < 1.30$, sıvılaşma şiddeti düşük
- $1.30 < LSI < 2.5$, sıvılaşma şiddeti yüksek
- $2.5 < LSI = 10.0$, sıvılaşma şiddeti çok yüksek

Bahsedilen LSI değer aralıklarının Yılmaz ve etin (2004) tarafından 1999 Kocaeli depremi sonrası Adapazarı'ndaki gözlemlere dayalı olarak belirlendiğini ifade etmekte yarar vardır (etin vd 2004).

3.5.2 CBS ile veri analizi

Çalışma sırasında veri analizlerinin yapılması sırasında ARCGIS 9.3 programı kullanılmıştır. Coğrafi bilgi sistemleri ile işlem yapabilmek için öncelikle çalışma alanını içine alan 1/25.000 ölçekli haritalar ArcMap ile sayısallaştırılmıştır. Daha sonra sondaj noktalarını koordinatlı haritaya yerleştirebilmek için ArcCatalog'da sondaj kuyularını için bir şekil dosyası (shapefile) oluşturulmuştur. Sondaj noktaları nokta (point) olarak tanımlanmıştır. Çalışma alanının sınırlarını belirtmek amacıyla BLGE isimli bir şekil dosyası (shape file) oluşturulmuştur. Çalışma alanı ise polygon (alan) olarak tanımlanmıştır.

Mevcut sondaj noktaları ve çalışma kapsamında yapılan sondajlar ED 1950 6°'lik koordinatlarla nokta olarak ArcMap'e girilmiştir. Her sondaj noktasına ait datalar (SPT değeri, sıvılaşma olasılığı, sıvılaşma şiddet indeksi, zemin cinsi) metin ya da sayısal değer olarak programa girilmiştir.

Sayısal değer olarak girilen SPT değeri, sıvılaşma olasılığı ve sıvılaşma şiddet indeksi gibi değerler için doğrudan analiz yapılarak söz konusu özelliklere ait tematik haritalar oluşturulmuştur. SPT, PL, LSI tematik haritaları oluşturulurken her bir değer için bir renk atanmıştır. Sondaj noktaları arasındaki kısımlara ait değerler ise program tarafından enterpolasyon yapılarak bulunmuş ve ara değerler için de renk atanmıştır.

Zemin cinsi gibi metin içeren özellikler için ise şu yol seçilmiştir:

- Öncelikle zemin sınıfları her sondaj noktası ve sondaj noktasının farklı derinlikleri için metin olarak (SM-SC-SW-SP gibi) girilmiştir.

- Noktaların tamamına ait zemin cinsleri girildikten sonra her bir zemin cinsi için birer sayı tanımlanmıştır; çünkü iki sondaj arasındaki zemin cinsini CBS tabanlı programda yorumlatabilmek için (ara değerleri bulabilmek ya da enterpolasyon yapabilmek için) her sondaj noktasındaki zemin cinslerinin birer sayısal karşılığı olmalıdır. Zemin cinsleri bu şekilde modellendikten sonra her zemin cinsi ve sondajlar arasında kalan bölgeler için renklendirme işlemi yapılarak farklı derinlikler için hakim zemin cinsi tematik haritaları oluşturulmuştur.

4.BULGULAR

Tez kapsamında çalışma alanında yapılan 10 adet 20 m derinliğindeki sondajdan her 1.5 m’de alınan örselenmiş numuneler üzerinde tane boyu dağılımının bulunmasına yönelik olarak elek analizi ve hidrometre analizi deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca ince taneli zeminler üzerinde kıvam limitlerinin belirlenmesine yönelik olarak kıvam limitleri deneyleri gerçekleştirilmiştir. Araziden alınan UD numuneler üzerinde ise konsolidasyon ve üç eksenli basınç deneyleri yapılarak bölge zemininin mekanik özelliklerine ait parametreler elde edilmiştir. Arazi ve laboratuvar deneyleri değerlendirilerek coğrafi bilgi sistemleri tekniği ile tematik haritalar hazırlanmış ve sıvılaşma potansiyeli analizleri gerçekleştirilmiştir.

4.1. Laboratuvar Deney Sonuçları

Araziden alınan örselenmiş ve örselenmemiş numuneler üzerinde yapılan laboratuvar deney sonuçları indeks, dayanım, sıkışabilirlik özellikleri olmak üzere farklı başlıklar altında değerlendirilmiştir.

4.1.1. İndeks özellikleri

Çalışma kapsamındaki sondaj kuyularından farklı derinliklerden alınan örselenmiş ve örselenmemiş numuneler üzerinde gerçekleştirilen Atterberg limitleri deney sonuçları Çizelge 4.1'deki gibidir.

Tüm sondaj kuyularında elde edilen örselenmiş numuneler üzerinde yapılan dane boyu dağılımı analizi sonuçlarına göre bölgedeki hakim zemin cinsinin siltli kum (SM) ve kötü derecelenmiş kum (SP) olduğu görülmüştür.

Yapılan hidrometre deney sonuçlarına göre ise SP ve SW karakterli kumların ince tane oranının % 5-% 12 arasında değiştiği ve ince maddenin çoğunlukla silt (M) olduğu, böylece de hakim zemin cinsinin SP-SM veya SW-SM olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Çizelge 4.1. Zemin numunelerine ait kıvam limitleri deney sonuçları

Sondaj No	Derinlik (m)	WL	PL	IP	Zemin Cinsi	Açıklama
SK-04	1.00-1.45	38	-	-	SM	Siltli kum
SK-04	3.00-3.50	53	-	-	SM	Siltli kum
SK-05	4.00-4.45	65	-	-		Az turbalı siltli kum
SK-05	5.50-6.00	117	-	-		Turba
SK-09	16.00-16.50	51	26	25	CH	Yüksek plastisiteli kil
SK-09	19.00-19.50	43	20	25	CL	Düşük plastisiteli kil

SK-09’da likit limit ve plastisite indisinin derinlik arttıkça azaldığı görülmektedir.

On farklı sondaj kuyusundan farklı derinliklerden alınan numuneler üzerinde yapılan elek analizi deney sonuçları Çizelge 4.2-4.11’de sunulmaktadır.

Çizelge 4.2. SK-01 Sondajına ait zemin numunelerinin elek analizi deney sonuçları

Derinlik (m)	% Çakıl	% Kum	% Silt + Kil	Zemin Cinsi
1.23	1	91	8	SW-SM
3.23	1	71	28	SM
4.23	6	72	22	SM
5.73	18	74	8	SW-SM

Çizelge 4.3. SK-02 sondajına ait zemin numunelerinin elek analizi deney sonuçları

Derinlik (m)	% Çakıl	% Kum	% Silt + Kil	Zemin Cinsi
1.23	7.00	90	3.00	SP
2.73	1.00	97	2.00	SP
4.23	0.00	93	7.00	SP-SM
5.73	0.00	98	2.00	SP
7.23	0.00	99	1.00	SP
8.73	0.00	99	1.00	SP
10.23	0.00	99	1.00	SP
11.73	0.00	98	2.00	SP
13.23	0.00	99	1.00	SP
14.73	0.00	99	1.00	SP
16.23	0.00	98	2.00	SP
17.73	0.00	98	2.00	SP
19.23	2.00	95	3.00	SP
20.73	2.00	93	5.00	SP-SM

Çizelge 4.4. SK-03 sondajına ait zemin numunelerinin elek analizi deney sonuçları

Derinlik (m)	% Çakıl	% Kum	% Silt + Kil	Zemin Cinsi
1.23	0	95	5	SP-SM
2.73	1	93	6	SP-SM
4.23	1	98	1	SP
5.73	0	96	4	SP
7.23	11	85	4	SP
8.73	1	95	4	SP
10.23	1	98	1	SP
11.73	1	96	3	SP
13.23	3	94	3	SP
14.73	5	87	8	SP-SM
16.23	0	96	4	SP
17.73	9	87	4	SP
19.23	1	91	8	SP-SM
20.73	0	95	5	SP-SM

Çizelge 4.5. SK-04 sondajına ait zemin numunelerinin elek analizi deney sonuçları

Derinlik (m)	% Çakıl	% Kum	% Silt + Kil	Zemin Cinsi
1.73	0	87	13	SM-ML
3.73	1	69	30	SM
4.73	0	98	2	SP
6.73	0	87	13.00	SM
9.73	0	87	13.00	SM
10.23	0	97	3.00	SP
13.23	0	93	7.00	SP-SM
14.73	15	76	9.00	SP-SM
16.23	5	80	15.00	SM
17.73	1	93	6.00	SP-SM
19.73	4	75	21.00	SM

Çizelge 4.6. SK-05 sondajına ait zemin numunelerinin elek analizi deney sonuçları

Derinlik (m)	% Çakıl	% Kum	% Silt+ Kil	Zemin Cinsi
1.23	20	74	6	SP-SM
2.73	16	71	13	SM
4.23	15	83	2	SP+Turba
6.23	0	95	5	SP-SM
7.23	0	99	1	SP
9.23	1	89	10	SP-SM
10.23	3	94	3	SP
11.73	4	93	3	SP
13.23	2	96	2	SP
14.73	0	97	3	SP
16.23	0	95	5	SP-SM
17.73	0	99	1	SP
19.23	0	100	0	SP

Çizelge 4.7. SK-06 sondajına ait zemin numunelerinin elek analizi deney sonuçları

Derinlik (m)	% Çakıl	% Kum	% Silt+ Kil	Zemin Cinsi
1.23	0	94	6	SP-SM
2.73	1	94	5	SP-SM
4.23	7	88	5	SP-SM
5.73	8	87	5	SP-SM
7.23	0	96	4	SP
8.73	0	98	2	SP
10.23	3	94	3	SP
11.73	1	92	7	SP-SM
13.23	1	92	7	SP-SM
14.73	0	99	1	SP
16.23	0	99	1	SP
17.73	0	94	6	SP-SM
19.23	1	93	6	SP-SM
20.73	1	90	9	SP-SM

Çizelge 4.8. SK-07 sondajına ait zemin numunelerinin elek analizi deney sonuçları

Derinlik (m)	% Çakıl	% Kum	% Silt+ Kil	Zemin Cinsi
1.23	2	95	3	SP
2.73	5	93	2	SP
4.23	2	96	2	SP
5.73	0	98	2	SP
7.23	0	98	2	SP
8.73	0	100	0	SP
10.23	1	98	1	SP
11.73	3	96	1	SP

Çizelge 4.9. SK-08 sondajına ait zemin numunelerinin elek analizi deney sonuçları

Derinlik (m)	% Çakıl	% Kum	% Silt+ Kil	Zemin Cinsi
1.23	2	93	5	SP-SM
2.73	0	96	4	SP
4.23	1	95	4	SP
5.73	0	93	7	SP-SM
7.23	1	97	2	SP
8.73	0	93	7	SP-SM
10.23	0	97	3	SP
11.73	0	98	2	SP
16.23	2	95	3	SP
17.73	1	94	5	SP-SM
19.23	1	95	4	SP

Çizelge 4.10. SK-09 sondajına ait zemin numunelerinin elek analizi deney sonuçları

Derinlik(m)	%Çakıl	%Kum	%Silt+Kil	Zemin Cinsi
1.23	7	91	2	SP
2.73	3	95	2	SP
4.23	3	96	1	SP
5.73	2	95	3	SP
7.23	3	93	4	SP
8.73	0	97	3	SP
10.23	3	93	4	SP
11.73	3	95	2	SP
13.23	0	97	3	SP
14.73	0	91	9	SP-SM
17.23	0	88	12	SM
17.73	0	90	10	SP-SM
19.23	0	88	12	SM

Çizelge 4.11. SK-10 sondajına ait zemin numunelerinin elek analizi deney sonuçları

Derinlik (m)	% Çakıl	% Kum	% Silt+ Kil	Zemin Cinsi
1.23	5	95	3	SP
2.73	4	93	3	SP
4.23	3	95	2	SP
5.73	2	95	3	SP
7.23	2	96	2	SP
8.73	1	96	3	SP
10.23	0	98	2	SP
11.73	0	97	3	SP
13.23	0	99	1	SP
14.73	0	99	1	SP
16.23	0	97	3	SP
17.73	0	100	0	SP
19.23	0	100	0	SP
20.73	2	96	2	SP

4.1.2. Sıkışabilirlik özellikleri

Konsolidasyon deneyi yapılan numunelere ait C_c parametreleri Çizelge 4.12'deki gibidir.

Çizelge 4.12. Örselenmemiş numunelere ait sıkışma indisi (C_c) değerleri

Sondaj No	Derinlik (m)	C_c
SK-04	3.00-3.50	0.387
SK-05	5.50-6.00	0.637
SK-09	16.00-16.50	0.369
SK-09	19.00-19.50	0.297

4.1.3. Mukavemet özellikleri

Yapılan sondajlar sırasında farklı derinliklerden alınan örselenmemiş numuneler üzerinde yapılan konsolidasyonsuz-drenajsız üç eksenli basınç deneyi sonuçları çizelge 4.13'teki gibidir.

Çizelge 4.13. Örselenmemiş numunelere ait C_u ve ϕ değerleri

Sondaj No	Derinlik (m)	C_u (kN/m ²)	ϕ (°)
SK-04	3.00-3.50	29.04	3
SK-05	5.50-6.00	29.93	3
SK-09	16.00-16.50	132.65	14
SK-09	19.00-19.50	192.43	5

4.2. Arazi Deney Sonuçları

Arazide yapılan sondajlar sırasında ölçülen yeraltı su seviyesi değerleri Çizelge 4.14'teki gibidir.

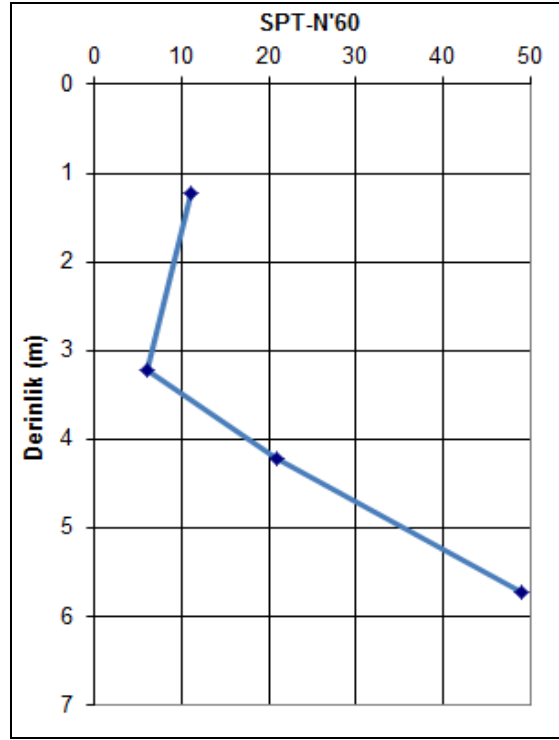
Çizelge 4.14. Sondaj noktalarına ait yeraltı suyu seviyeleri (m)

Sondaj No	Yeraltı su seviyesi (YASS) (m)
01	3.5
02	2.5
03	1.5
04	3.0
05	3.5
06	2.5
07	2.5
08	2.5
09	1.8
10	2.5

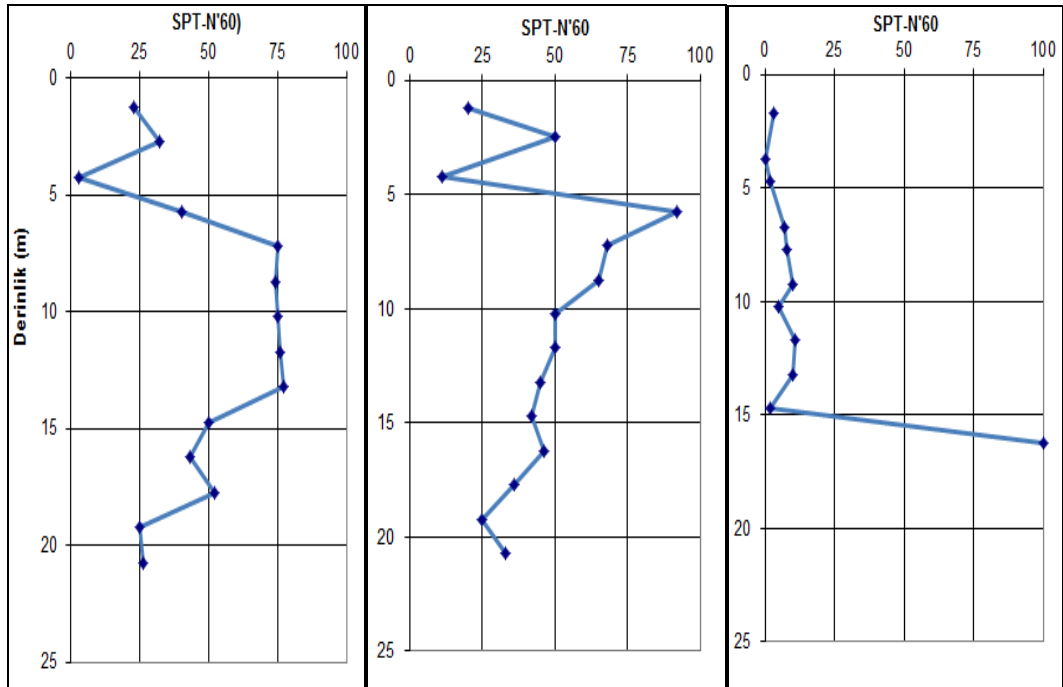
On farklı kuyuda ölçülen yeraltı su seviyesi derinliklerinin 1.5 m ile 3.5 m arasında değiştiği görülmüştür.

4.2.1. SPT deney sonuçları

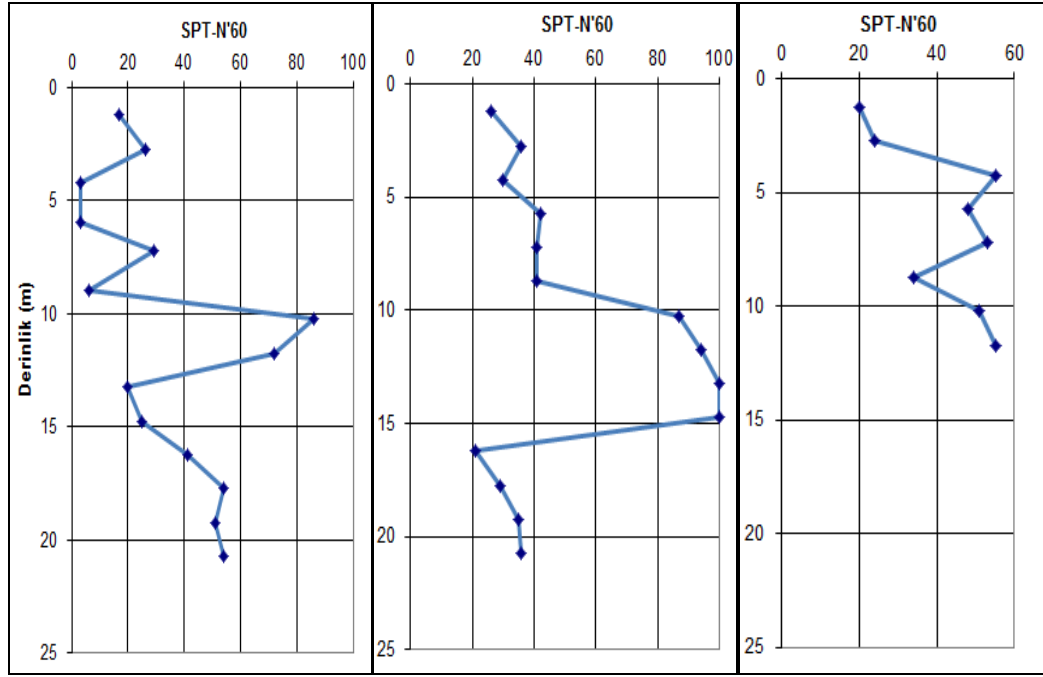
Arazide ölçülen SPT değerlerinin derinlikle değişimi her bir sondaj kuyusu için Şekil 4.2-4.5' te sunulmaktadır.



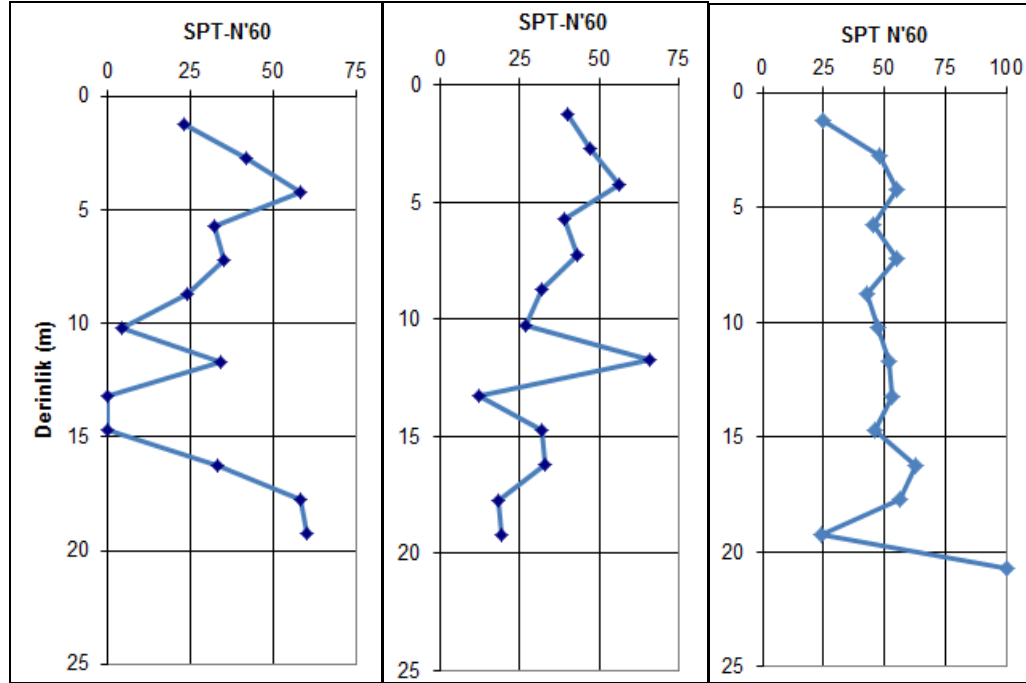
Şekil 4.1. SPT-N değerlerinin derinlikle değişimi (SK-01)



Şekil 4.2. SPT-N değerlerinin derinlikle değişimi (SK-02, SK-03, SK-04)



Şekil 4.3. SPT-N değerlerinin derinlikle değişimi (SK-05, SK-06, SK-07)



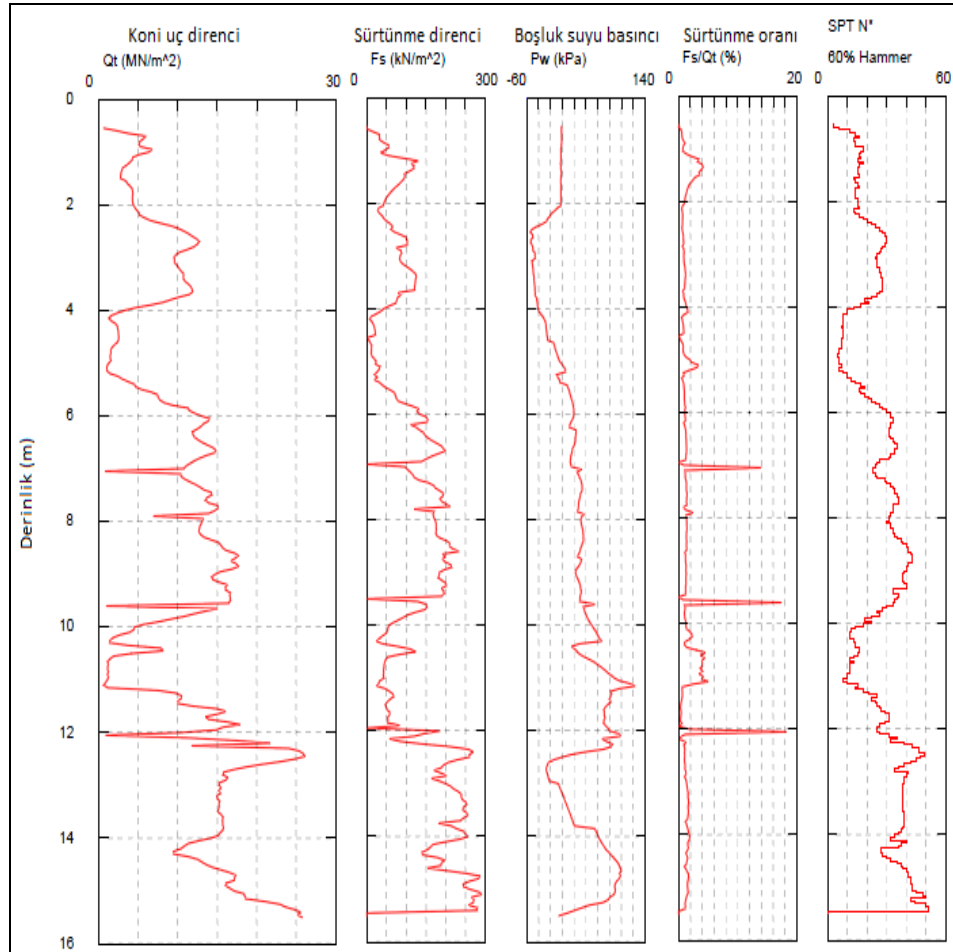
Şekil 4.4. SPT-N değerlerinin derinlikle değişimi (SK-08, SK-09, SK-10)

4.2.2. CPT deney sonuçları

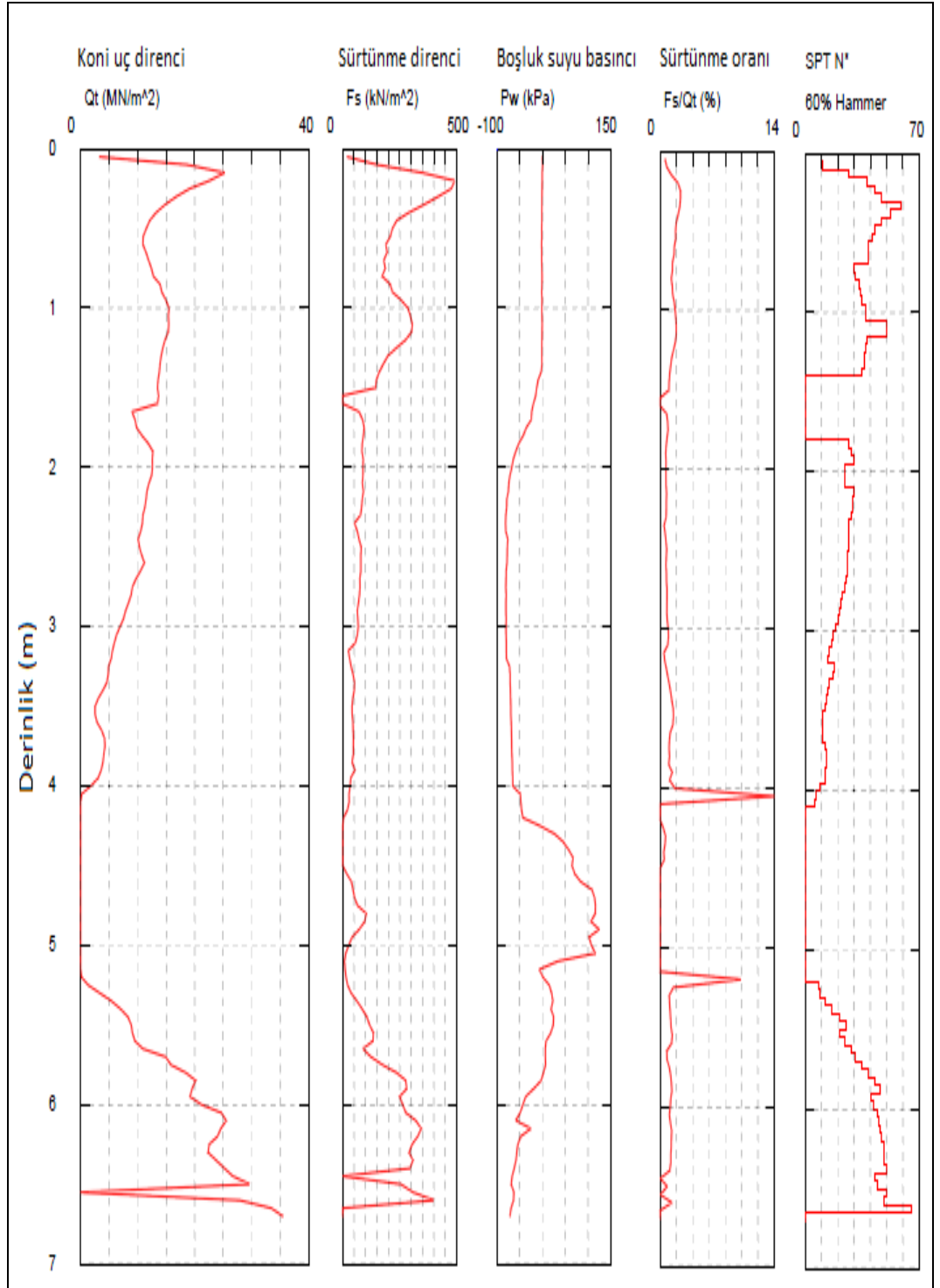
Arazide yapılan CPTU deneyi sonrasında ölçülen değerler sırasıyla;

- ✓ Koni uç direnci (Q_t)
- ✓ Sürtünme direnci (F_s)
- ✓ Boşluk suyu basıncı (P_w)
- ✓ Sürtünme oranı (F_r)
- ✓ SPT-N eşdeğeridir.

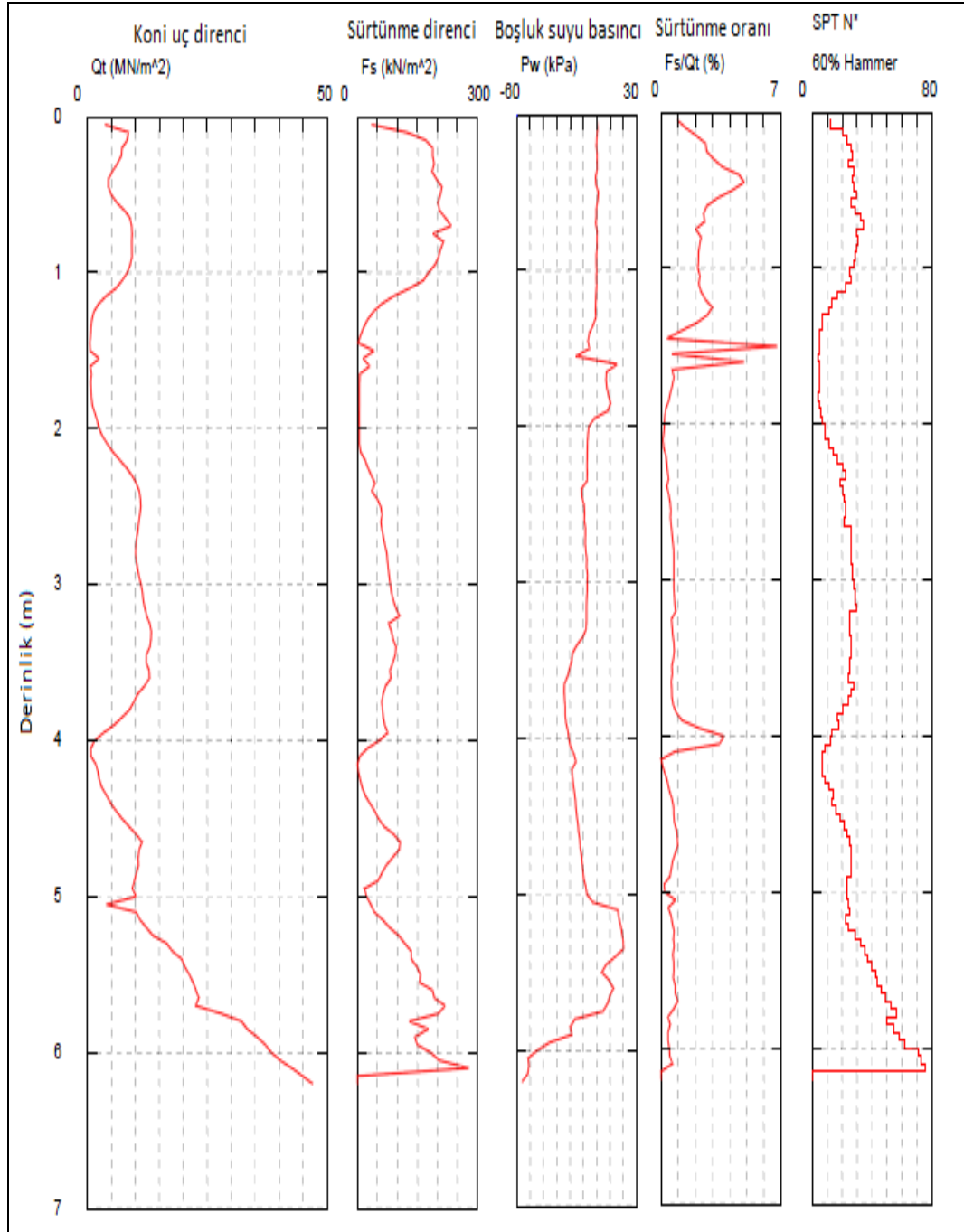
CPT deneylerine ait loglar Şekil 4.5-4.11 arasında sunulmaktadır.



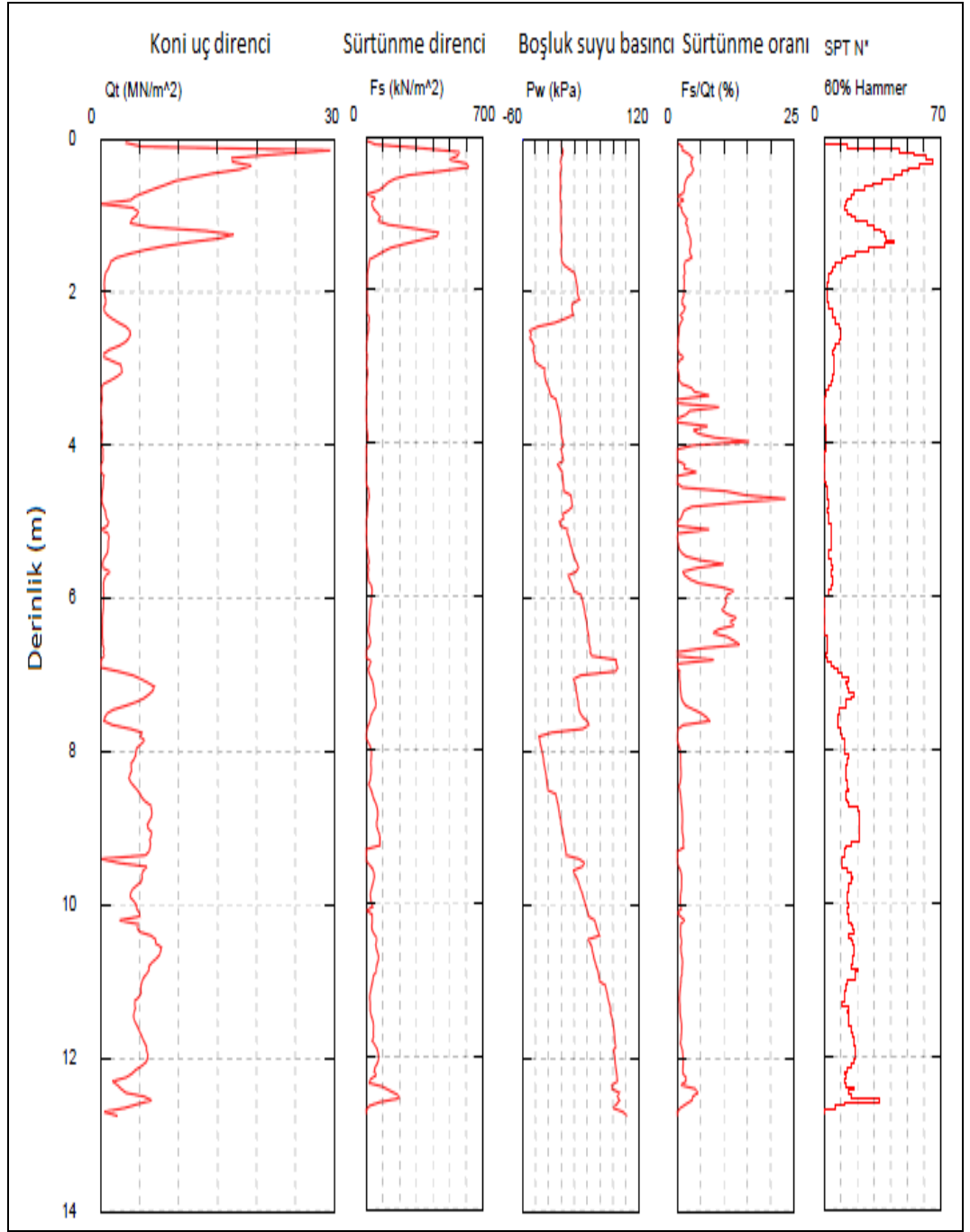
Şekil 4.5. CPT-01 Logu



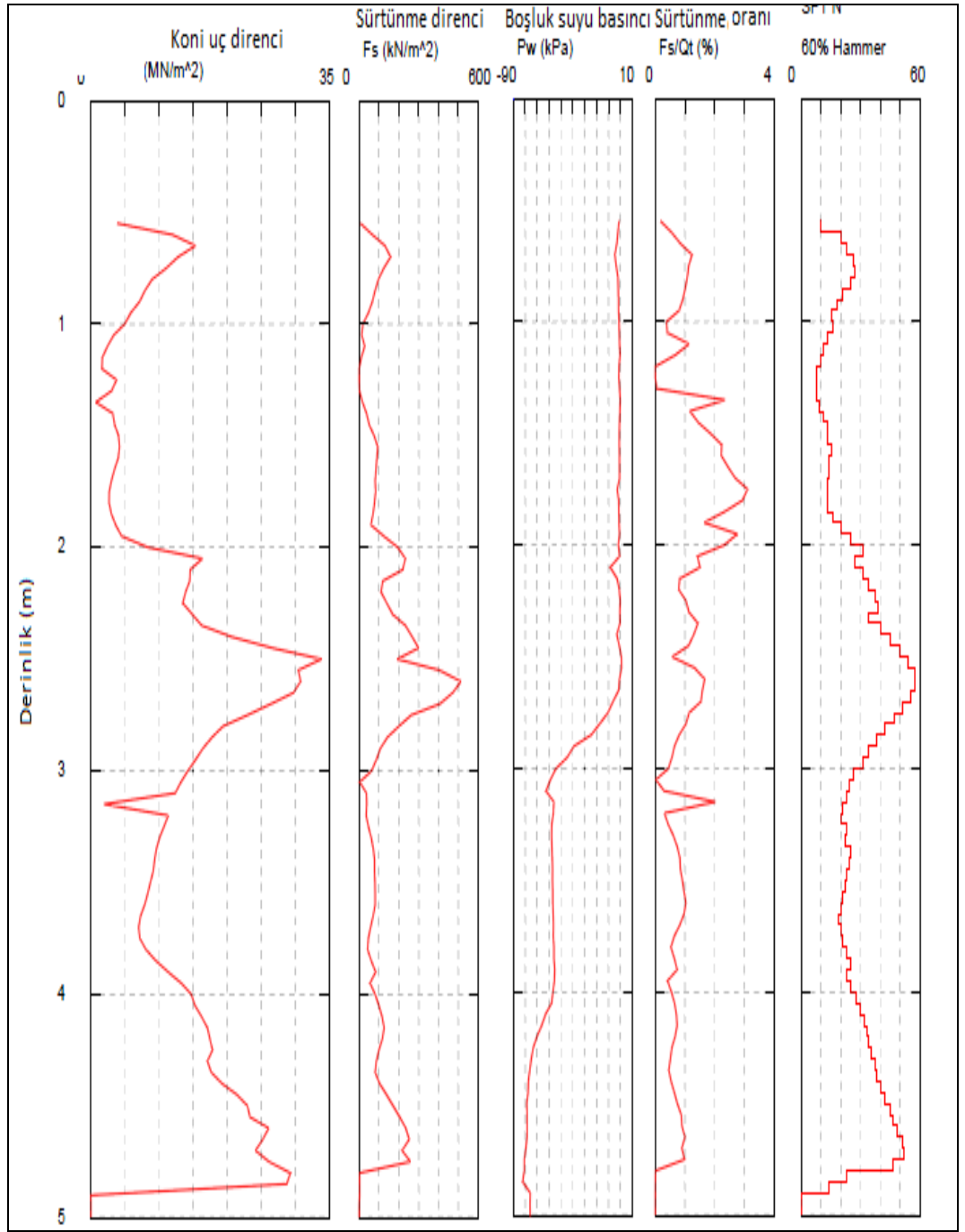
Şekil 4.6. CPT-02 Logu



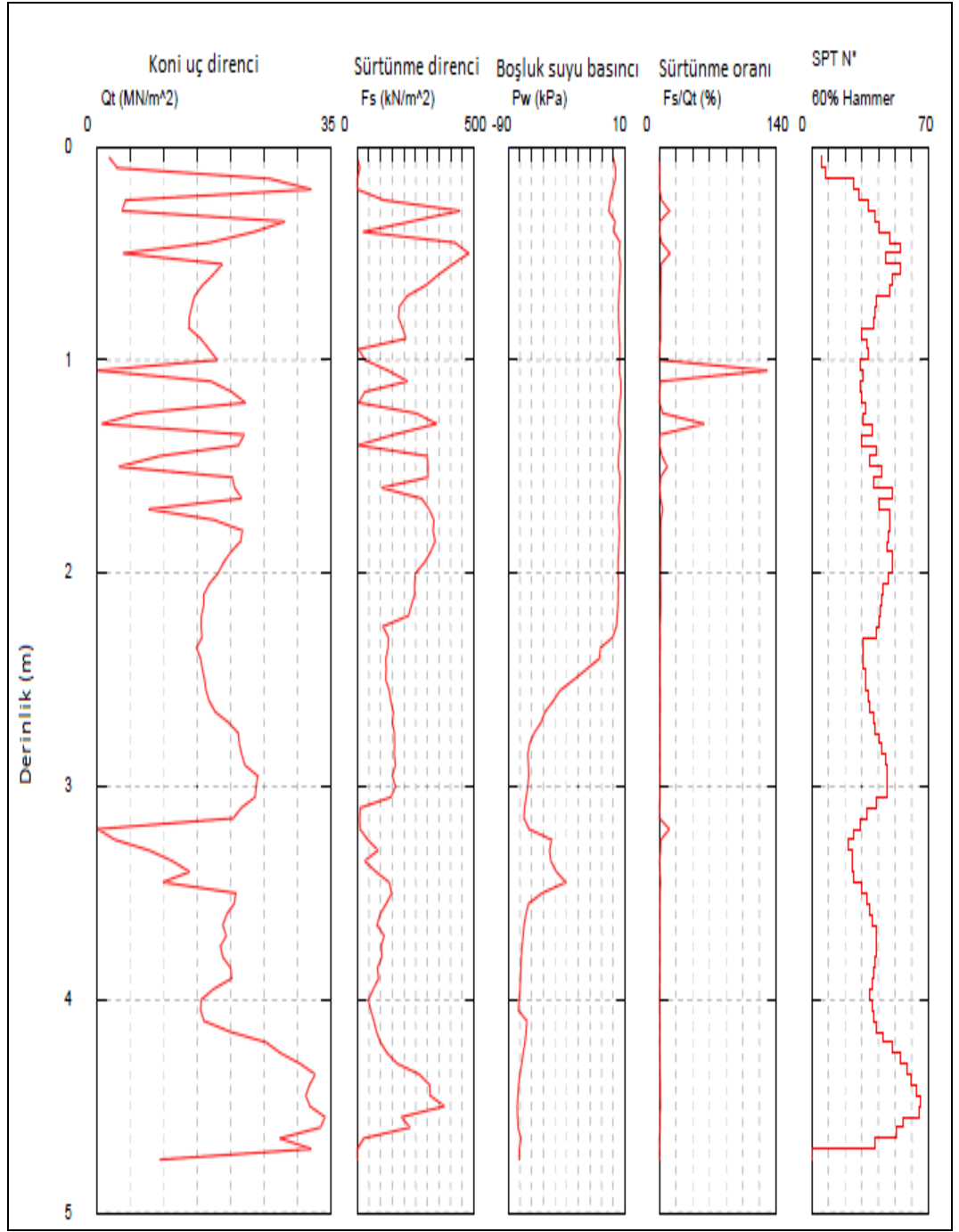
Şekil 4.7. CPT-03 Logu



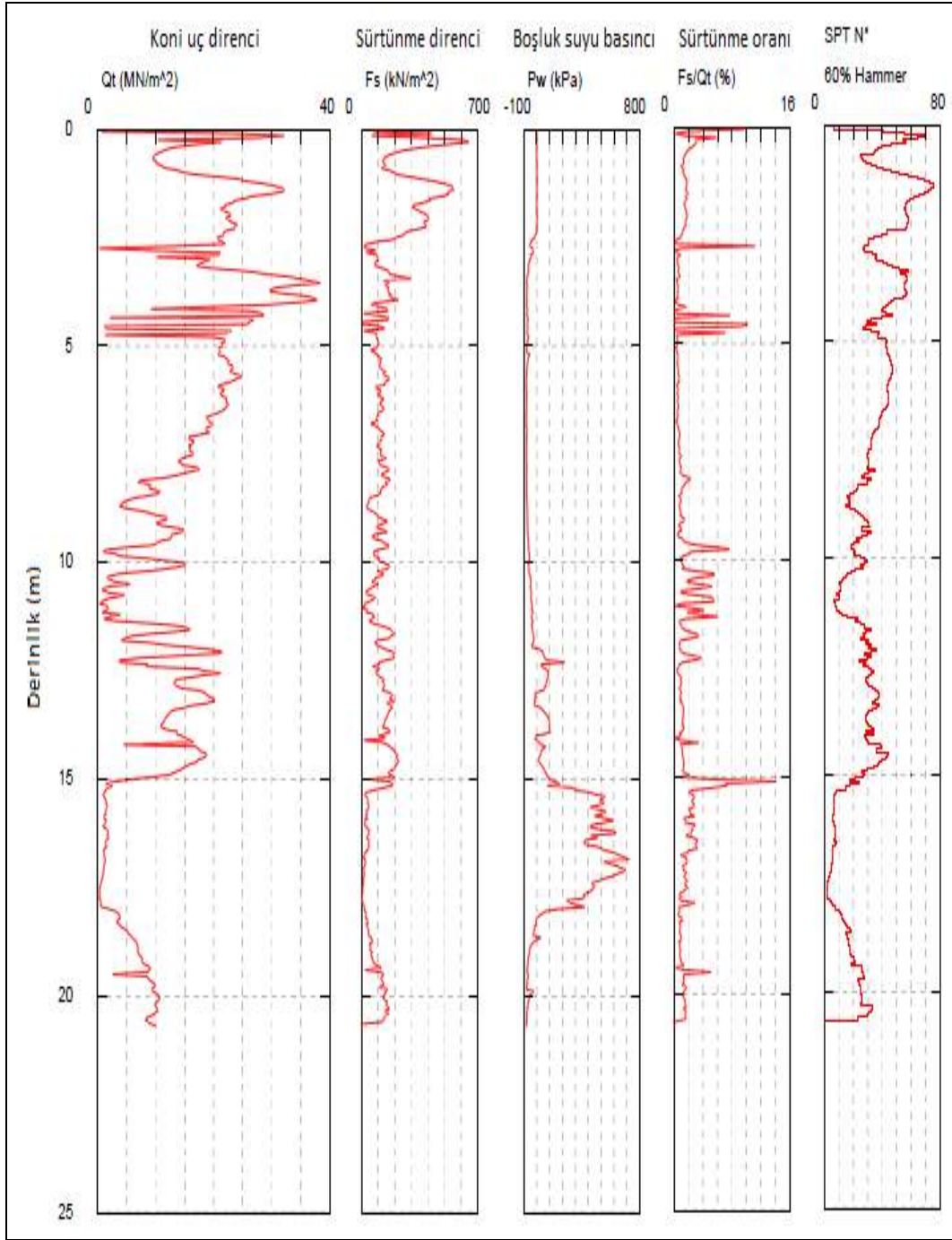
Şekil 4.8. CPT -04 Logu



Şekil 4.9. CPT-05 Logu



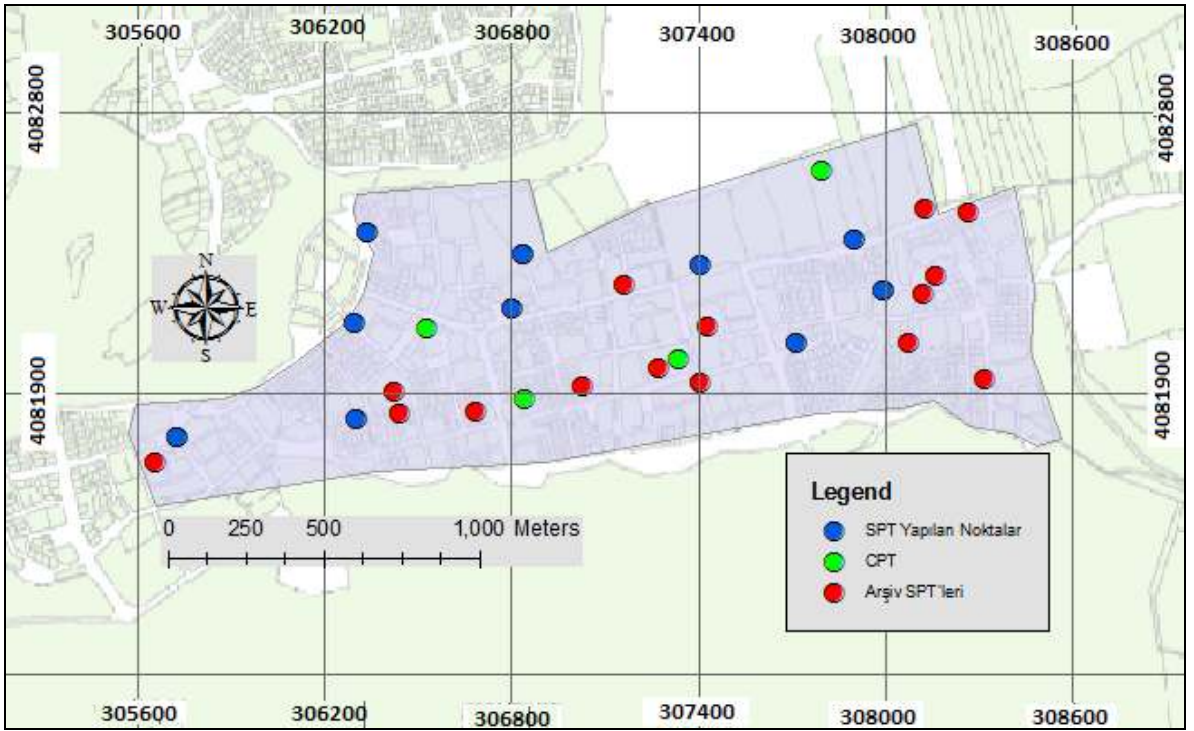
Şekil 4.10. CPT-06 Logu



Şekil 4.11. CPT-09 Logu

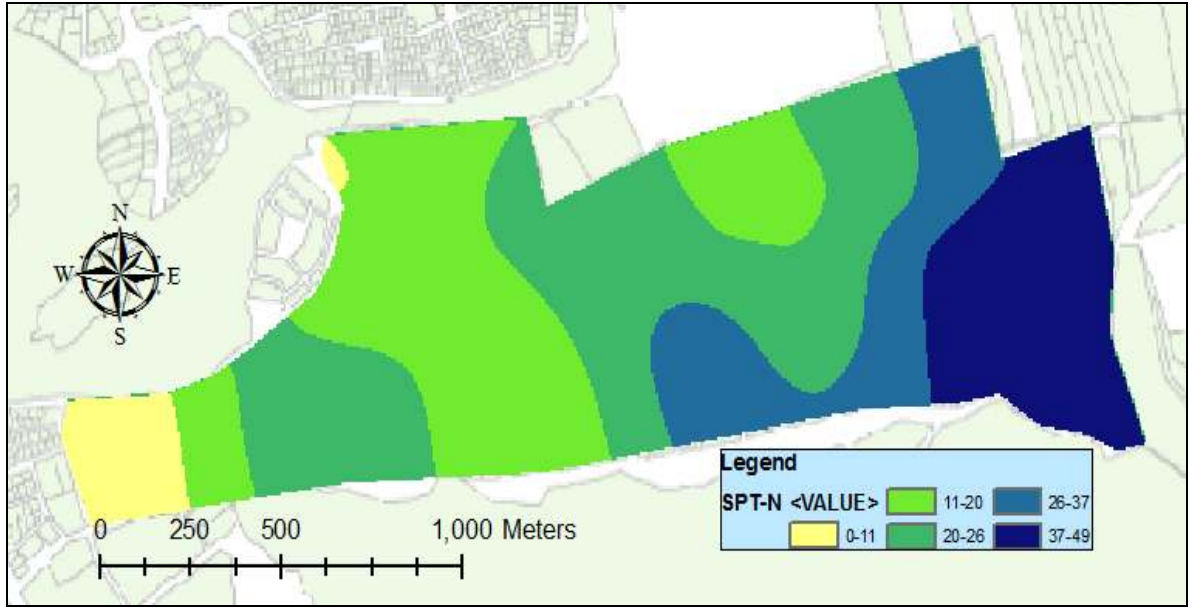
4.3. Coğrafi Bilgi Sistemleri ile Oluşturulan Tematik Haritalar

Tez çalışması kapsamında elde edilen tüm veriler ışığında Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) teknikleri kullanılarak sıvılaşma potansiyeli (P_L) ve zemin sıvılaşma şiddeti indeksi (LSI) haritaları ile farklı derinliklerdeki SPT, CPT değeri haritaları ve zemin sınıflandırma haritaları oluşturulmuştur. Şekil 4.12’de değerlendirmesi yapılan sondaj noktaları ile CPT lokasyonları görülmektedir.



Şekil 4.12. Değerlendirmesi yapılan sondaj kuyuları ile CPT lokasyonları

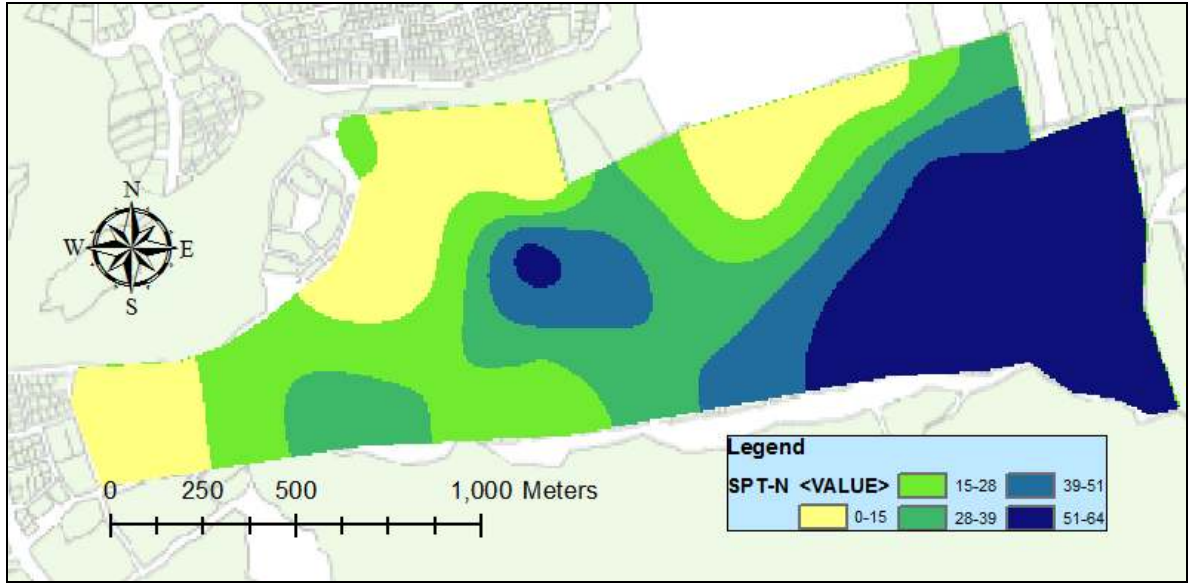
Farklı derinliklere ait SPT değerlerinin çalışma bölgesine dağılımı Şekil 4.13 ile 4.21 arasında sunulmaktadır.



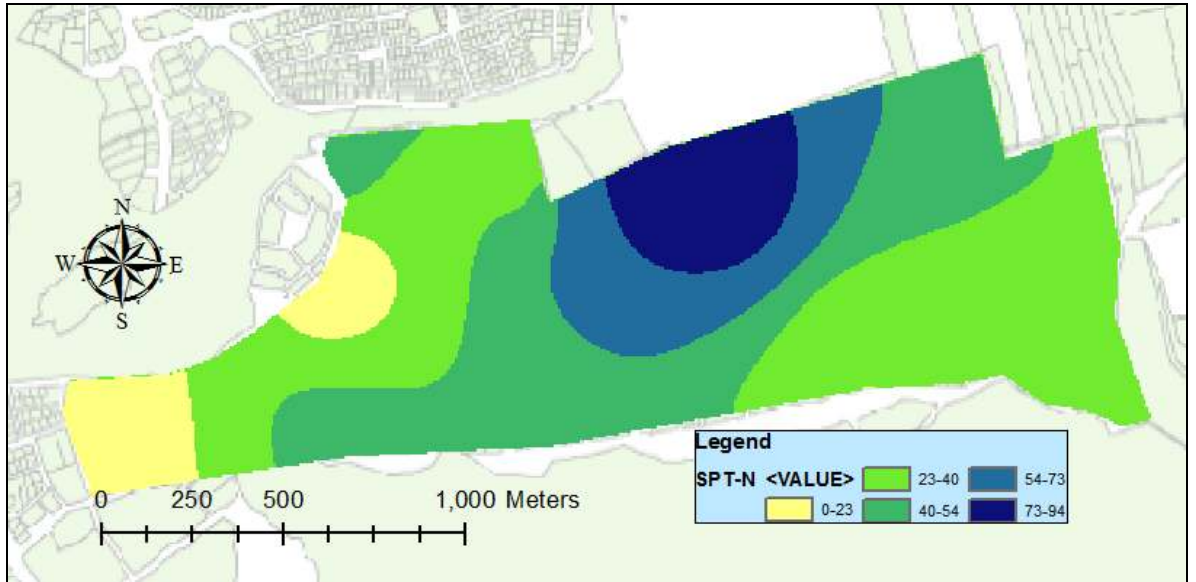
Şekil 4.13. 1 m derinlik için SPT-N değerleri haritası



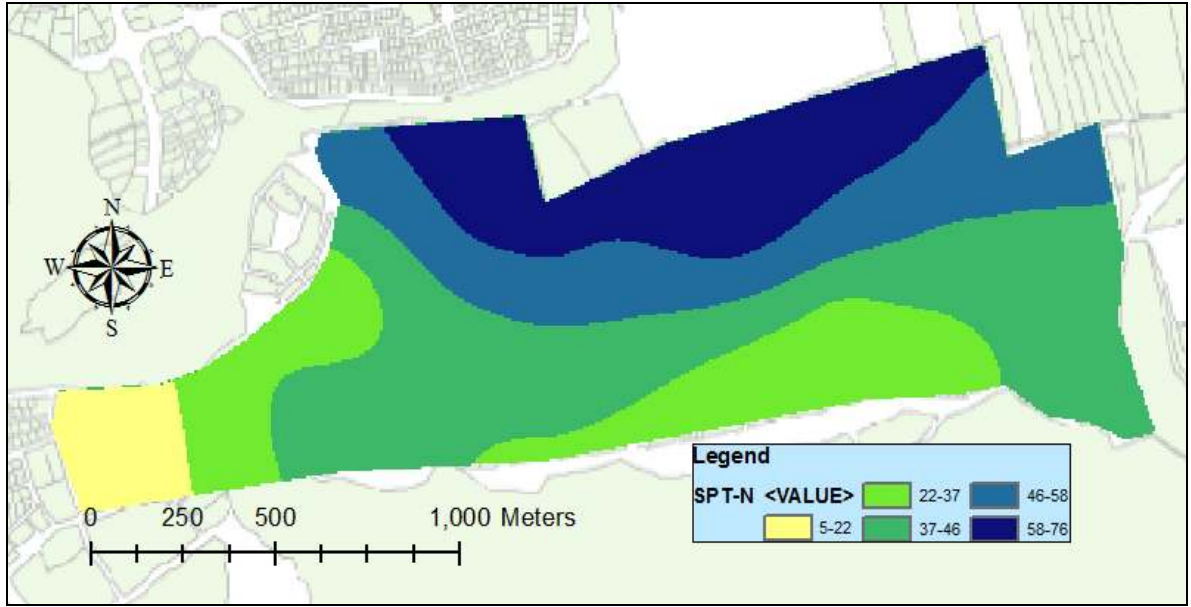
Şekil 4.14. 3 m derinlik için SPT-N değerleri haritası



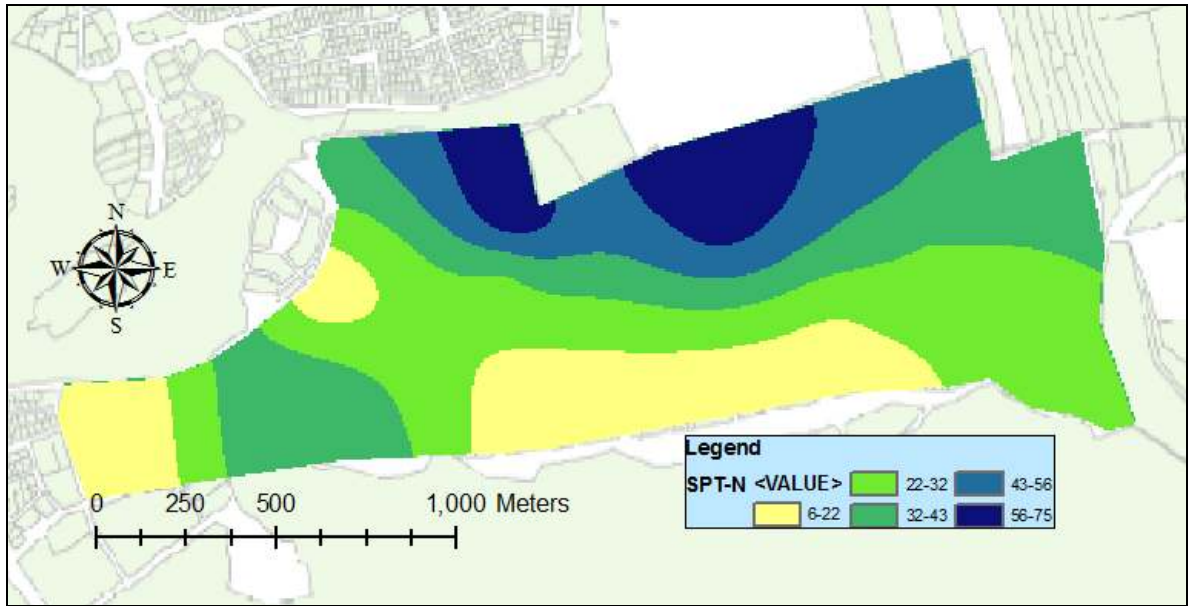
Şekil 4.15. 4 m derinlik için SPT-N değerleri haritası



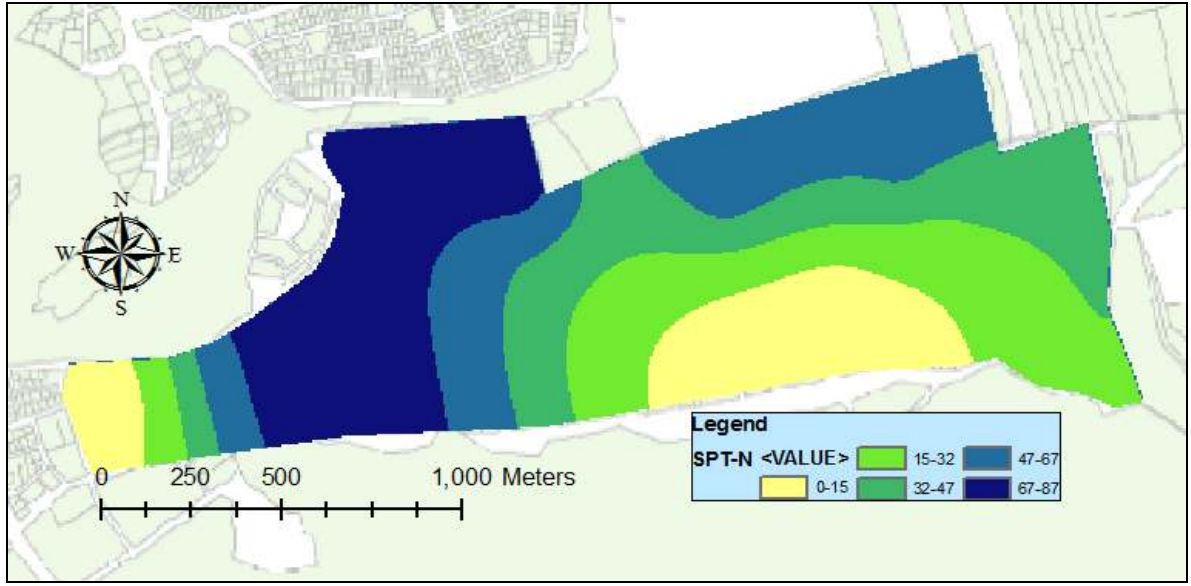
Şekil 4.16. 5.5 m derinlik için SPT-N değerleri haritası



Şekil 4.17. 7 m derinlik için SPT-N değerleri haritası



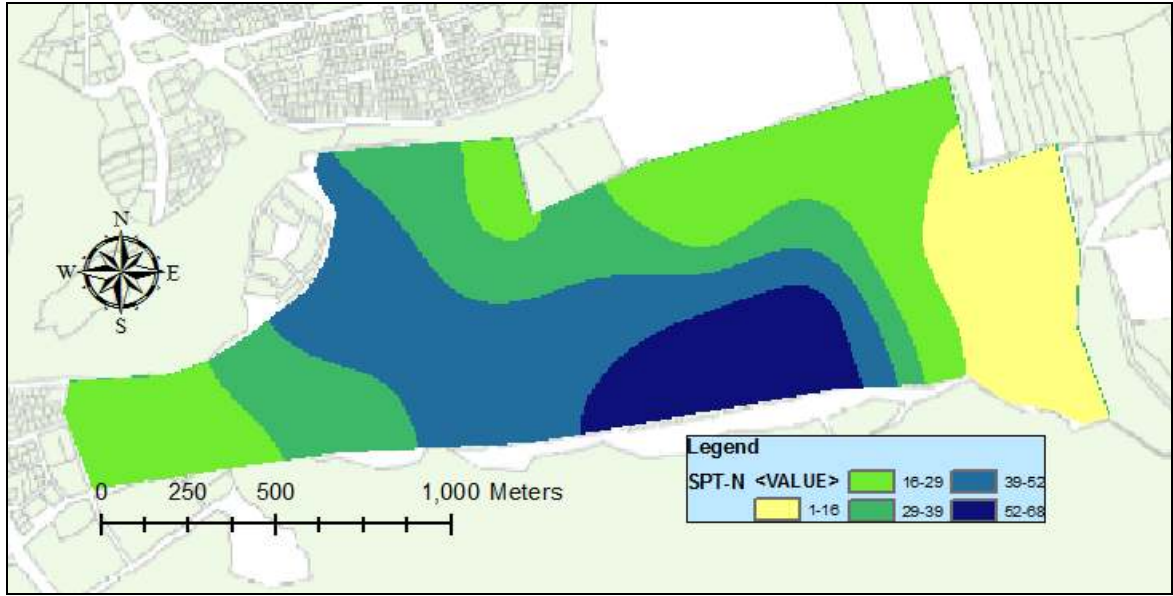
Şekil 4.18. 8.5 m derinlik için SPT-N değerleri haritası



Şekil 4.19. 10 m derinlik için SPT-N değerleri haritası

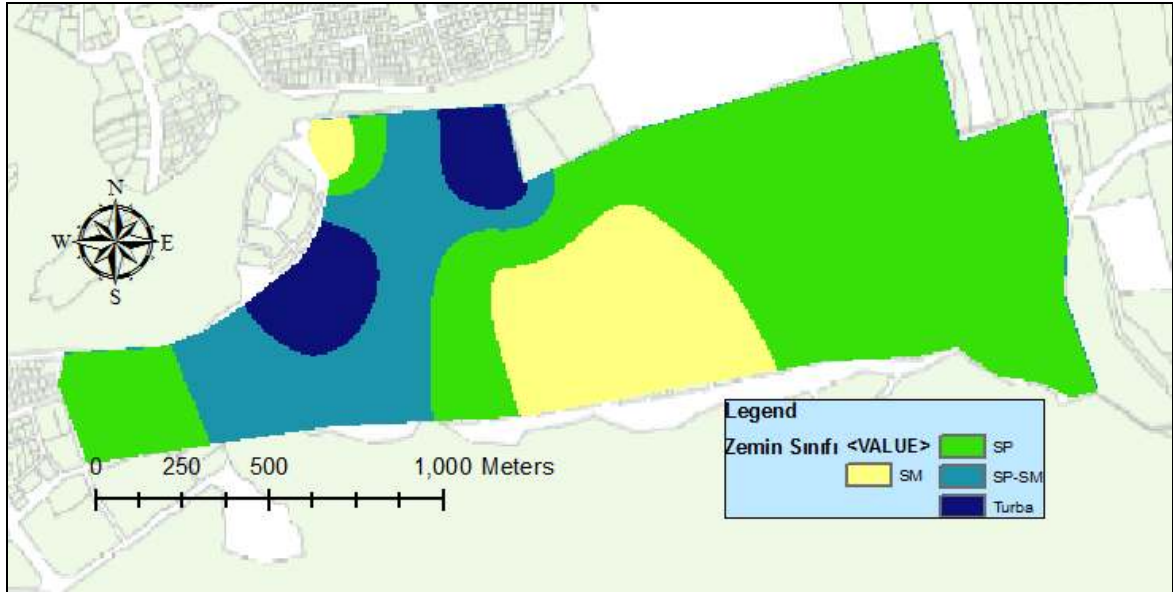


Şekil 4.20. 11.50 m derinlik için SPT-N değerleri haritası

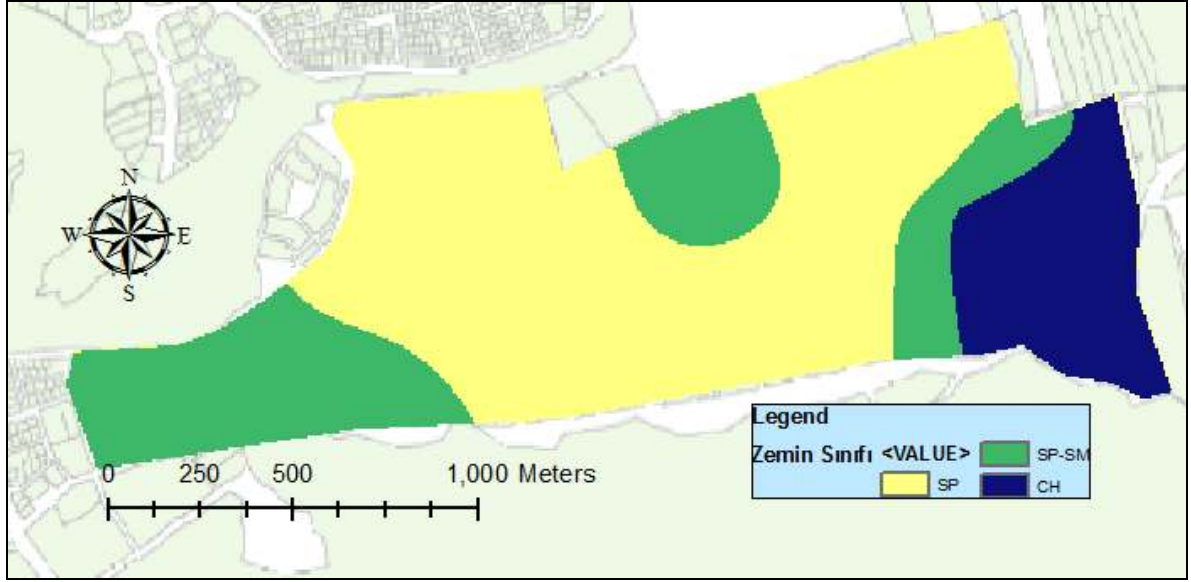


Şekil 4.21. 19 m derinlik için SPT-N değerleri haritası

Bölgede 4 m ve 19 m derinlik için zemin sınıfını gösteren haritalar Şekil 4.22 ile Şekil 4.23'te sunulmaktadır.

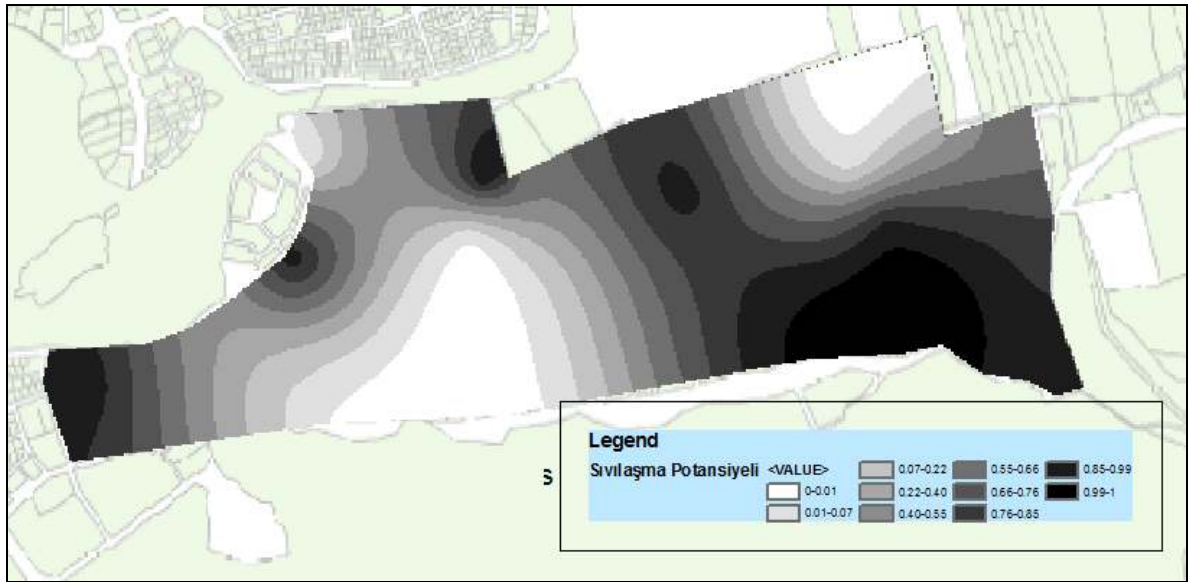


Şekil 4.22. 4 m derinlik için zemin sınıflandırması



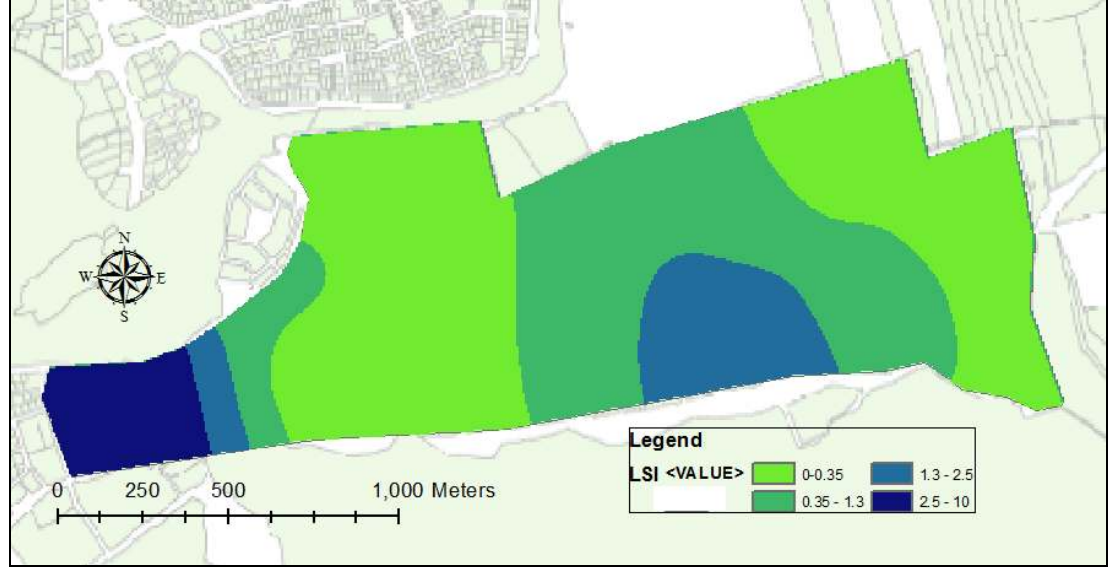
Şekil 4.23. 19 m derinlik için zemin sınıflandırması

Proje sondajlarından elde edilen SPT değerlerine göre hazırlanan sıvılaşma olasılığı haritası Şekil 4.24'te sunulmaktadır.

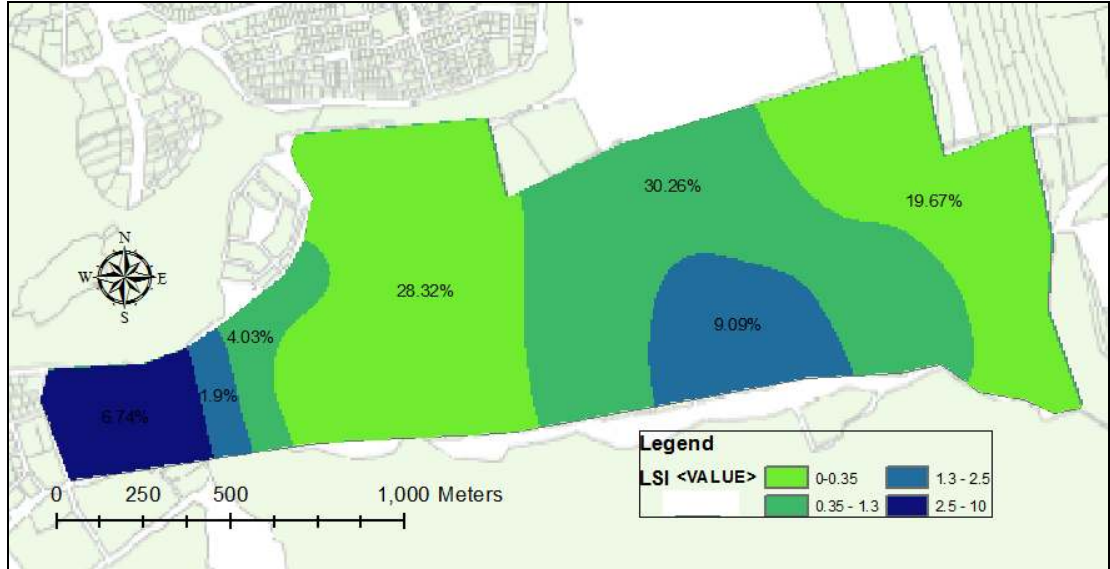


Şekil 4.24. Proje sondajlarından elde edilen SPT değerlerine göre hazırlanan PL haritası

Bölge zeminine ait sıvılaşma şiddet indeksi (LSI) haritası Şekil 4.25'te, LSI değerlerinin bölgeye yüzde olarak dağılımı ise Şekil 4.26'da görülmektedir.

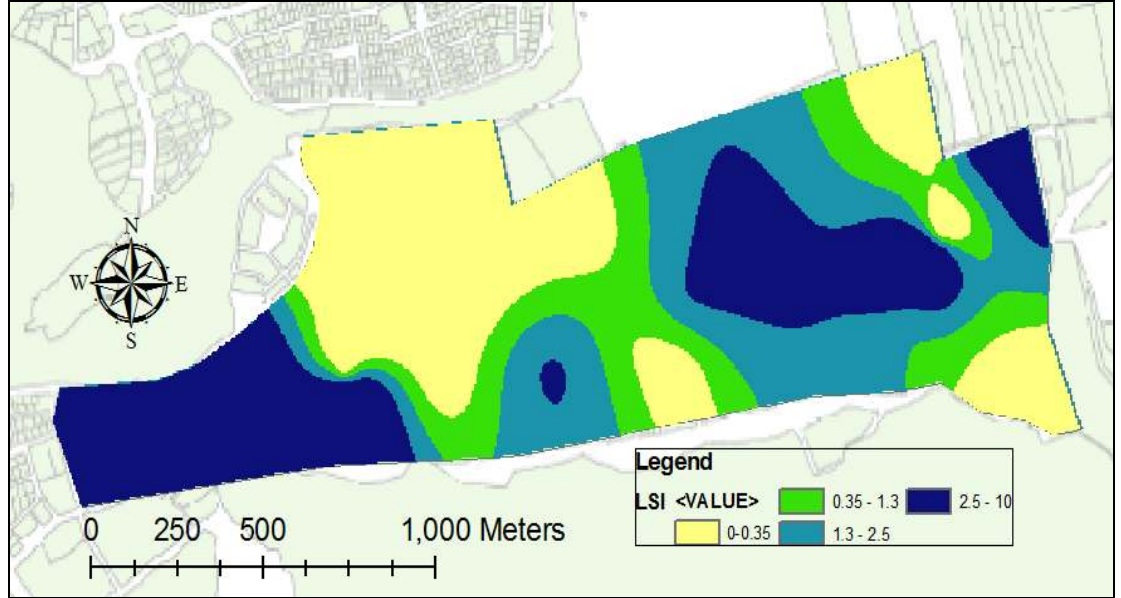


Şekil 4.25. Bölge zeminine ait LSI haritası

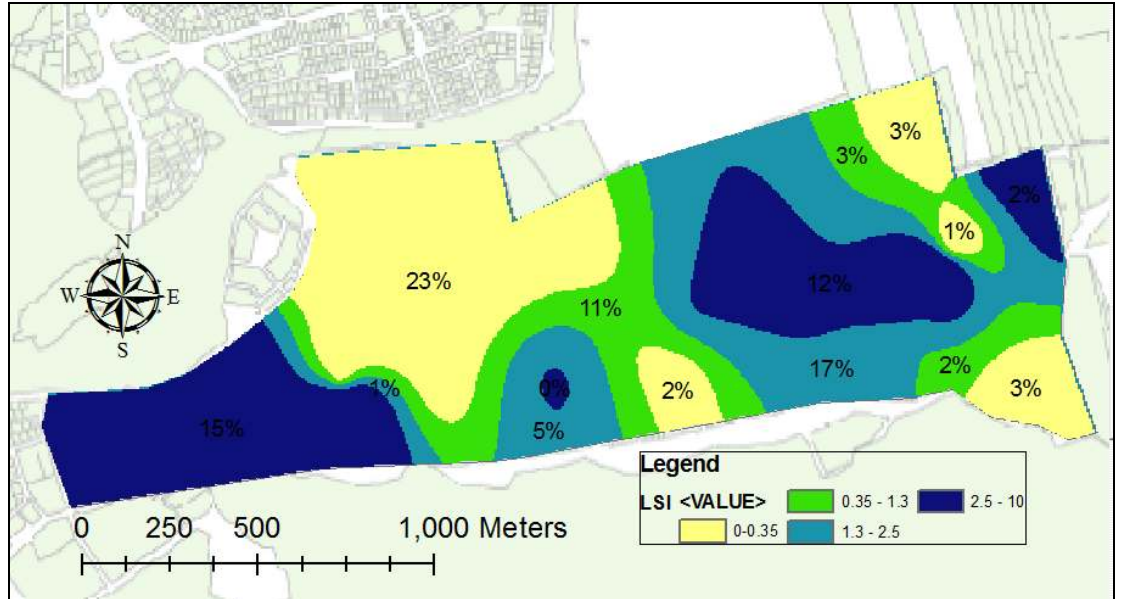


Şekil 4.26. LSI değerlerinin yüzde olarak dağılımı

Arşiv verilerine göre hazırlanan LSI haritası Şekil 4.27’de, arşiv verilerine göre bulunan LSI değerlerinin bölgeye yüzde olarak dağılımı ise Şekil 4.28’de görülmektedir.

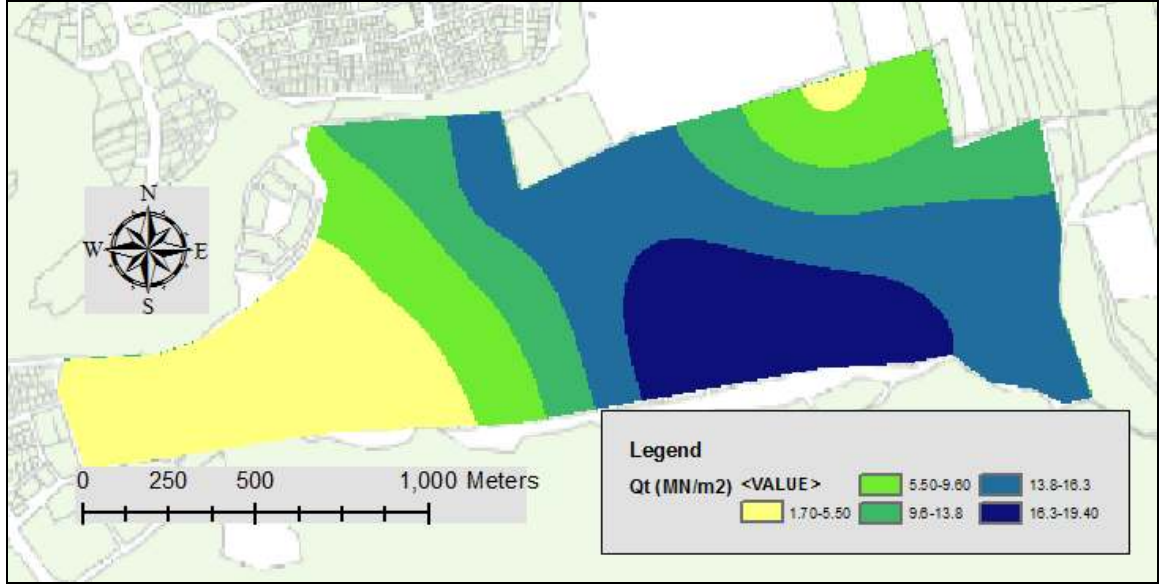


Şekil 4.27. Arşiv verilerine göre hazırlanan LSI haritası

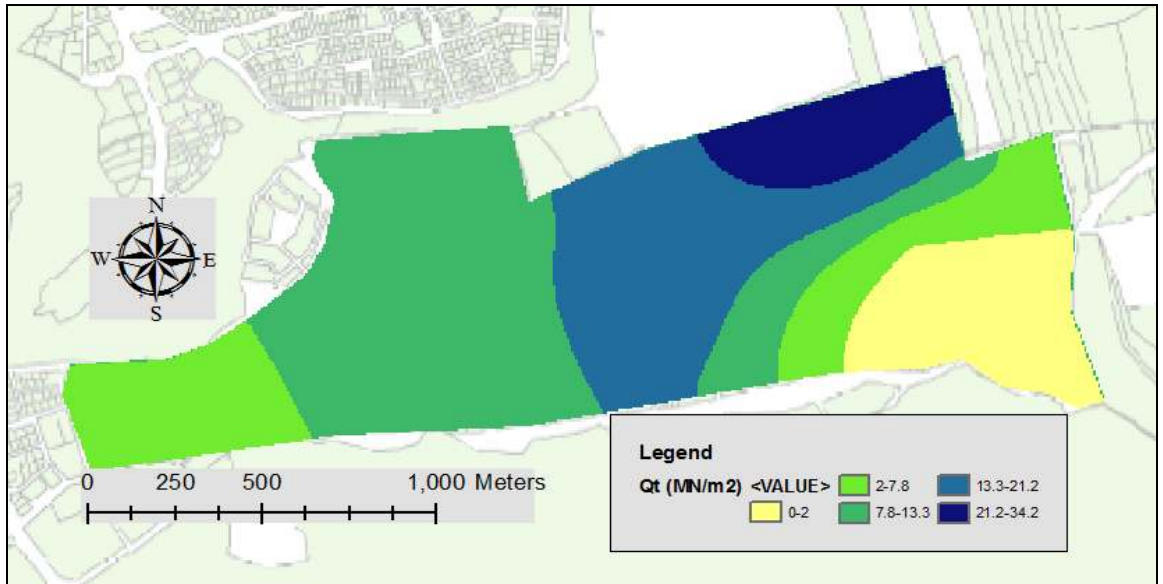


Şekil 4.28. Arşiv verilerine göre bulunan LSI değerlerinin yüzde olarak dağılımı

Farklı derinliklere ait koni uç direnci (Q_t) değerlerinin bölgeye dağılımını gösteren haritalar Şekil 4.29 ile 4.32 arasında sunulmaktadır.



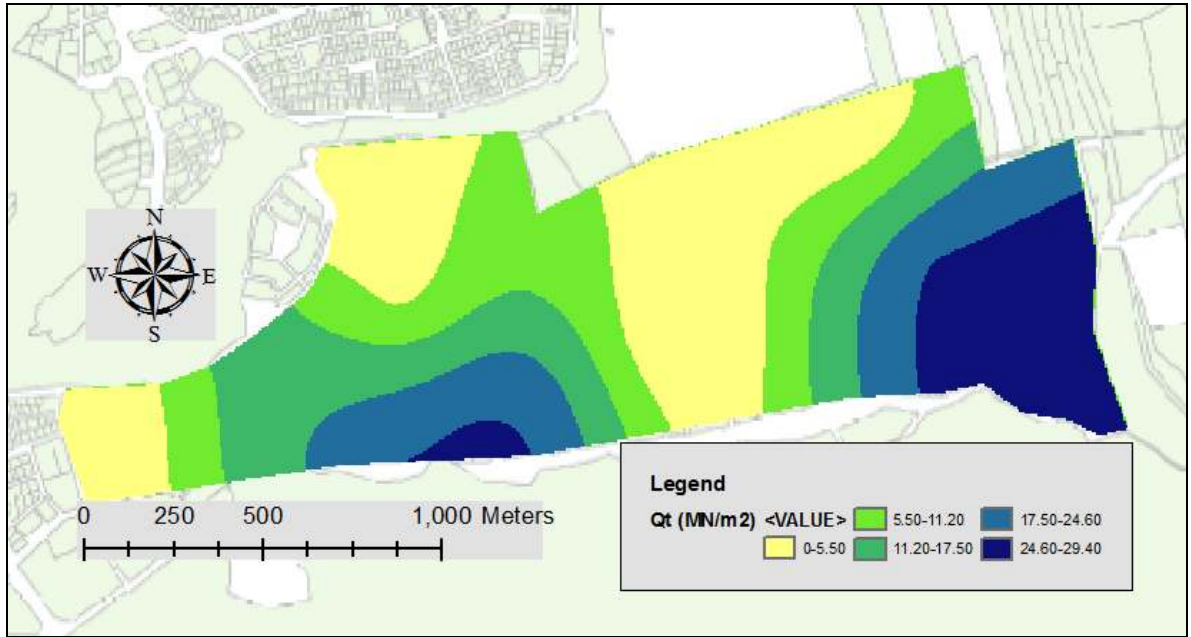
Şekil 4.29. 1 m derinlikteki CPT koni uç direnci (Q_t) değerleri



Şekil 4.30. 2.5 m CPT koni uç direnci (Q_t) değerleri

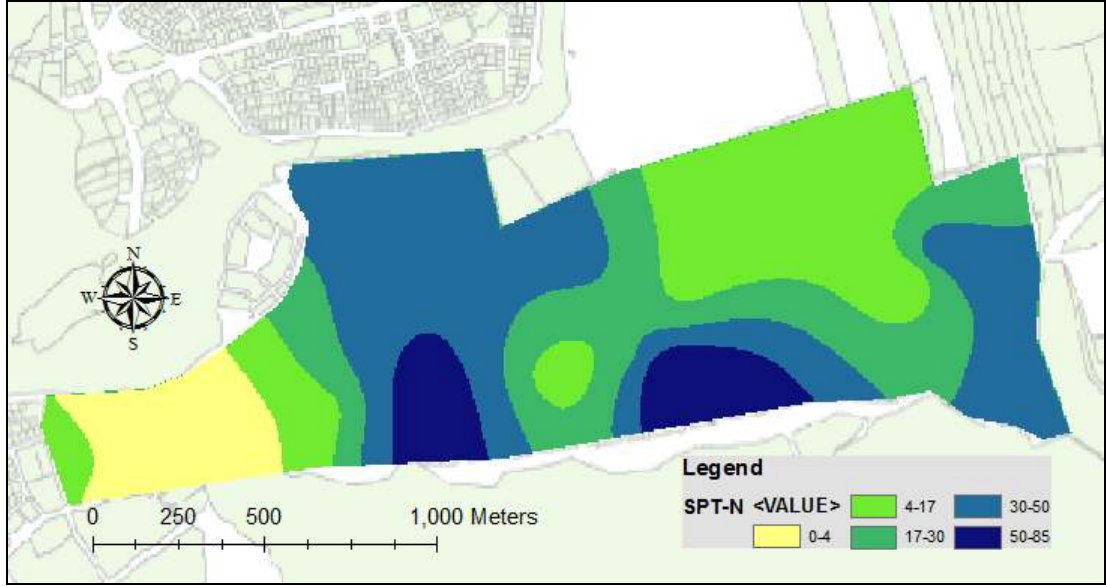


Şekil 4.31. 4 m derinlikteki CPT koni uç direnci (Q_t) değerleri

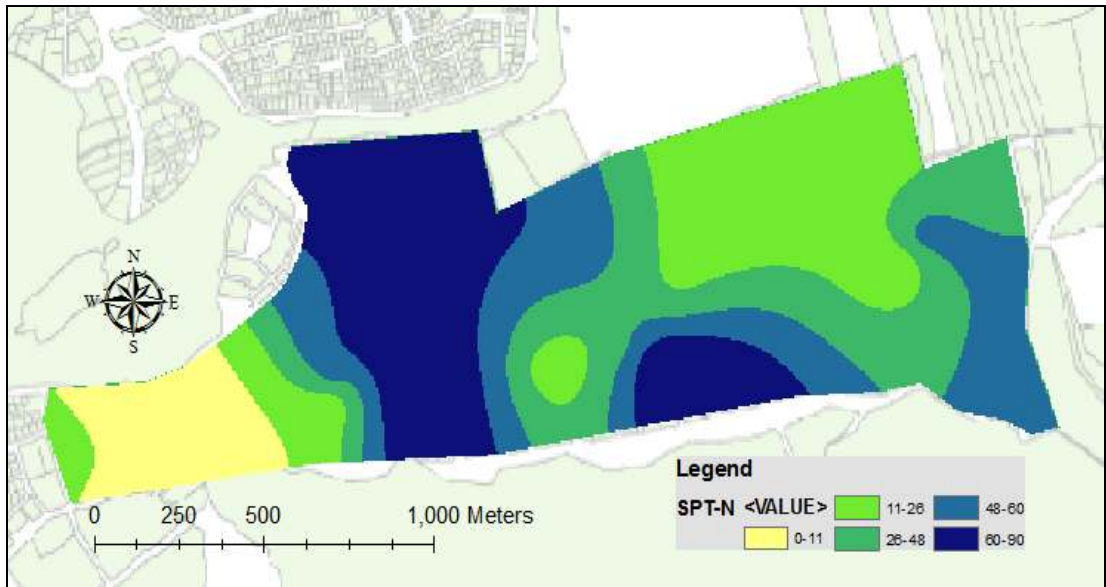


Şekil 4.32. 5.5 m derinlikteki CPT koni uç direnci (Q_t) değerleri

Şekil 4.33 ile Şekil 4.34’te ise arşiv verilerinden elde edilen SPT değerleri ile oluşturulan tematik haritalar görülmektedir.



Şekil 4.33. 3 m derinlik için arşiv verilerinden elde edilen SPT-N değerleri



Şekil 4.34. 4.00 m derinlik için arşiv verilerinden elde edilen SPT-N değerleri

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında Lara-Yamansaz (Antalya) kıyı alanındaki zeminlerin mühendislik özellikleri arazi ve laboratuvar deneyleri ile belirlenmiştir. Bu amaçla on farklı bölgede sondaj kuyusu açılmış, açılan sondajlardan her 1.5 m’de bir alınan numuneler üzerinde elek analizi, hidrometre analizi ve kıvam limitleri deneyi yapılmıştır. Araziden alınan örselenmemiş numuneler üzerinde Atterberg limitleri tayini deneyi, üç eksenli basınç deneyi ve konsolidasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yerinde deney olarak SPT, CPT deneyleri yapılmıştır. Arazi ve laboratuvar deneylerinden elde edilen verilerden faydalanarak çalışma alanına ait çeşitli tematik haritalar oluşturulmuştur. Arazi ve laboratuvar çalışmaları sonrası ulaşılan sonuçlar onbir madde olarak özetlenmiştir.

1. Bölge zemininin indeks özellikleri incelendiğinde egemen zemin tipinin siltli kum (SM) ve kötü derecelenmiş kum (SP) olduğu gözlenmiştir. Çift simgeli kum zeminlerin ise ağırlıklı olarak SM-SP olduğu sonucuna ulaşılmıştır.
2. Çalışma alanının kuzey bölümünde SK-02’de 3.50 m ile 4.80 m arasında ve SK-05’te 3.20 m ile 7.00 m arasında turba zemine rastlanmıştır. Turba zeminler üzerinde yapılan Atterberg limitleri deneyi sonucunda likit limitin %65 ile %117 arasında değiştiği, üç eksenli deneyinde C_u değerinin 29.93 kN/m^2 , ϕ değerinin 3° olduğu, konsolidasyon deneyinde ise C_c değerinin 0.637 olduğu sonucuna ulaşılmıştır.
3. SK-09’da 16.00-16.50 m ile 19.00-19.50 m arasında CH ve CL türü kil zeminlerin olduğu görülmüştür. Bölgede bulunan killi zeminler plastik durumdadır.
4. Yapılan üç eksenli basınç deneyi sonuçlarına göre bölgedeki ince taneli zeminlerin drenajsız kayma dayanımlarının 29 ile 192 kN/m^2 aralığında, içsel sürtünme açısının ise 3° ile 14° arasında değiştiği sonucuna ulaşılmıştır.
5. Konsolidasyon deneyi sonucunda sıkışma indisi değerleri (C_c) 0.297 ile 0.637 arasında değişmektedir. 0.637 değeri turba zemine ait olup zemin sıkışmaya çok eğilimlidir.
6. Araştırma alanında yer altı suyu seviyesi 1.50 m ile 3.50 m arasında değişmektedir.

7. Arazide yapılan SPT sonuçlarına göre SPT-N değerlerinin ağırlıklı olarak 0-5 m arasında 15 ile 30 , 5-10 m arasında ise 20-40 aralığında olduğu sonucuna ulaşılmıştır.
8. Sondaj noktalarının aralarında ve bölgede veri eksikliği bulunan kısımlardaki soru işaretlerini gidermeye yönelik yapılan CPT sonuçlarından ise deney yapılan noktalardaki Q_t değerlerinin bölge hakim zeminine uygun SP ve SM zemin aralıklarına rastladığı belirlenmiştir.
9. Olasılıksal sıvılaşma potansiyeli değeri (P_L)'ye göre bölgenin tamamına yakınında sıvılaşma olasılığı bulunmaktadır.
10. Sıvılaşmaya karşı zemin iyileştirmesi yoluyla sıvılaşma olasılığının ortadan kaldırılması ya da yapısal önlemlerle sıvılaşma etkisinin ortadan kaldırılması gerekmektedir.
11. Tez çalışması kapsamında yapılan SPT sonuçları kullanılarak hazırlanan LSI haritasına göre çalışma alanının % 6.74'lük kısmında sıvılaşma şiddeti çok yüksek, % 10.99'lük kısmında yüksek, % 34.29'lük kısmında düşük, % 47.98' lik kısmında da çok düşük çıkmıştır. Proje SPT değerleri ile yapılan analizlerle, arşiv SPT değerlerine göre yapılan analiz sonuçlarının uyumlu olmadığı gözlenmiştir.

6. KAYNAKLAR

- ACAR, M.H. ve BUDAK, G. 2004. Antalya Yamansaz Bölgesinin Sıvılaşma Potansiyelinin Araştırılması. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onuncu Ulusal Kongresi, 469-478, İstanbul.
- ADATEPE, Ş. 2002. Küçükçekmece ve Sefaköy Yerleşim Bölgelerinin Zemin Büyütmesine Göre Mikrobölgelemesi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, 213 ss.
- AKAY, E., UYSAL, Ş., POISSON, A., CRAVATTE, J., MÜLLER, C. 1985. Antalya Neojen Havzasının Stratigrafisi. T.J.K. Bülteni, 105-121.
- BOWLES, J.E. 1996. Foundation Analysis and Design. Mc Graw Hill, Singapore.
- CELEP, Z. ve KUMBASAR, N. 2004. Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı. Beta Yayınları, İstanbul.
- CERNICA, J.N. 1995. Geotechnical Engineering Soil Mechanics. John Wiley & Sons, New York.
- CHURCH, R.L. 2002. Geographical Information Systems and Location Science. Computers and Operations Research, 541-562.
- CLAYTON, C.R.I., MATHEWS, M.C., SIMONS, N.E. 1982. Site Investigation. Halsted Press, New York.
- CORNELL, C.A. 1968. Engineering Seismic Risk Analysis. Bulletin of Seismological Society of America, 1583-1606, USA.
- ÇETİN, K.Ö., SEED, R.B. 2004. Nonlinear Shear Mass Participation Factor, rd for Cyclic Shear Stress Ratio Evaluation. Soil Dynamics and Eartquake Engineering, Vol. 24, pp. 103-113.
- ÇETİN, K.Ö., YUNATÇI, A.A.,ÇAĞLI, S., GÜLKOKAR, T., AKTAŞ, R., ALTINIŞIK, F., ÇELİK, S., ARABACI, H.M., ÇEKMECELİ, M. 2004. Bursa Şehri için CBS Destekli Olasılıksal Sismik Tehlike Analizi ve Sıvılaşma Risk Haritası Oluşturulması. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onuncu Ulusal Kongresi, 479-489, İstanbul.
- DAS, B.M. 1983. Fundamentals of Soil Dynamics. Elsevier Science Publishing Co. Inc., pp. 353-374, New York, USA.
- DİPOVA, N. ve OĞUZ, C. 1998. Lara (Antalya) Kumulları ve Kıyı Alanı. Türkiyenin Kıyı ve Deniz Alanları II: Ulusal Konferansı Bildiriler Kitabı, ODTÜ, Ankara.

- DİPOVA, N. 2002. Antalya Kıyı Düzlüklerinin Oluşumu ve Geoteknik Özellikleri. IV. Kıyı Mühendisliği Ulusal Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 429-442, Antalya.
- DİPOVA, N. ve CANGİR, B. 2005. Antalya Zeminlerinde CPT (Konik Penetrasyon Deneyi) Uygulamaları. Antalya Yöresinin İnşaat Mühendisliği Sorunları Kongresi, 1: 508, Antalya.
- DİPOVA, N. ve CANGİR, B. 2011. Antalya İli Yerleşim Alanının Depremselliğinin Araştırılması. Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 93-114.
- DOUGLAS, B.J. and OLSEN, R.S. 1981. Soil Classification Using Electrical Cone Penetrometer. American Society of Civil Engineers (ASCE) , Proceedings of Conference on Cone Penetration Testing and Experience, St. Louis, pp. 209-227.
- ECEMİŞ, N. 2011. Deprem Geotekniği: Zemin Sıvılaşması. İzmir Yüksek Teknolojisi Enstitüsü, İmo İzmir Şubesi, 146 ss.
- ERGUN, U., ÖZKAN, Y., ÖNALP, A., KECELİ, A. 2005. Zemin – Temel Etüdları ve Zemin İyileştirmeler Hakkında Yönetmelik Taslağı. Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara, 209 ss.
- HEAD, K.H. 1982. Manual of Soil Laboratory Testing. Permeability, Shear Strength and Compressibility Tests. ELE International Ltd., UK, 435 pp.
- HOLTZ, R.D and KOVACS, W.D. 1981. Introduction to Geotechnical Engineering. Prentice Hall, New Jersey , 733 pp.
- IWASAKI, T., TATSUOKA, F., TOKIDA, K.I., YASUDA S. 1978. A Practical Method for Assessing Soil Liquefaction Potential Based on Case Studies at Various Sites in Japan. Proc. 2nd Int. Conf. On Microzonation for Safer Construction-Research and Application , Vol. II, 885-896, San Francisco.
- IWASAKI T., TOKIDA, K.I., TATSUOKA, F., WATANABE, S. YASUDA, S., SATO, H. 1982. Microzonation for Soil Liquefaction Potential Using Simplified Methods, Proceedings. Third International Earthquake Microzonation Conference, pp. 1319-1330, Seattle.
- KARACA, Ö. 2007. Fethiye Yerleşim Alanı Zeminlerinin Mühendislik Özelliklerinin Belirlenmesi ve Jeoteknik Haritaların Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) Kullanılarak Hazırlanması. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, 456 ss.
- KARAVUL, C., KURNAZ, T.F., KIYAK A. 2006. Coğrafi Bilgi Sistemleri(CBS) Kullanılarak İki Farklı Yaklaşımla Adapazarı SPT (Standart Penetrasyon Testi) Haritalarının Oluşturulması. 4.Coğrafi Bilgi Sistemleri Bilişim Günleri, 151-159, İstanbul.

- KOCA M.Y. ve KINCAL C. 2003. Armutalanı (Marmaris- Muğla) Beldesinin Yerleşim Alanının Jeoteknik Değerlendirilmesi. DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi Cilt:5 Sayı:3, 141-169, İzmir.
- KRAMER, S.L. 1996. Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice Hall, New Jersey.
- LIAO, S.S.C. and WHITMAN, R.V. 1986. Overburden Correction Factor for SPT in Sand. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 112, No. 3, 373-377.
- LIAO, S.S.C., VENEZIANO, D., WHITMAN R.V. 1988. Regression Models for Evaluating Liquefaction Probability. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 114 (4), 389-411.
- LEE, K.L., SEED, H.B. 1981. Cyclic Stres Conditions Causing Liquefaction of Sand. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Divisions, ASCE, 112(3), 373-377, USA.
- LEE, I.K., WHITE, W., OVEN, G.I., 1983. Geotechnical Engineering. All from The University of New Southe Wales, Australia. Pitman Publish Inc., pp.119-125, Boston, London, Melbourne, Toronto.
- LEE, D.H., KU, C.S., YUAN, H. 2003. A Study of the Liquefaction Risk Potential at Yuanlin (Taiwan). Engineering Geology, 71, pp. 97-117.
- NAVFAC 1982. Soil Mechanics Design Manuel 7.1, Dept. of Navy, Alexandria, USA.
- NCEER 1997. Proceedings of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils. Edited by Youd, T.L., Idriss, I.M. Technical Report No, NCEER-97-0022, USA.
- ÖNALP, A., BOL, E., URAL, N. 2006. Siltlerin Sıvılaşılabirliği: Adapazarı Kriteri. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onbirinci Ulusal Kongresi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- ROBERTSON, P.K. 1990. Soil Classification Using The Cone Penetration Test. Canadian Geotechnical Journal, 27, 151-158.
- ROBERTSON, P.K. 2010. Soil Behaviour Type from CPT: an update. Proceedings of the 2nd Internation Symposium on Cone Penetration Testing, CPT'10. Hungtington Beach, CA.
- SAĞLAM, M. 2007. Saruhanlı (Manisa) Belediyesi İmar Planına Esas Alanların Sıvılaşma Potansiyelinin İrdelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, 155 ss.
- SCHULTZE, E. ve MUHS, H. 1967. Bodenunter Suchungen für Ingenieurbauten. 722 s.

- Der Ibbenbürener Karbonscholle. Fortschr. Geol. Rheinld.u. Westf., 18:293-352, 6 Abb., Krefeld.
- SEED, H.B. ve IDRISS I.M. 1971. Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction on Potential. J. Of Geotech. Engrg. Div., ASCE, 1-104, Philadelphia.
- SERT, S., ÖZOCAK, A., URAL, N. 2006. Adapazarında Coğrafi Bilgi Sistemlerinin Geoteknik Amaçlı Kullanımı, 4. Coğrafi Bilgi Sistemleri Bilişim Günleri, 137-145, İstanbul.
- SİVRİKAYA, O., TOĞROL E. 2009. Arazi Deneyleri ve Geoteknik Tasarımda Kullanımları. Birsan Yayınevi, İstanbul, 216 ss.
- SKEMPTON, A.W. 1986. Standard Penetration Test Procedures And Effects In Sands Of Overburden Pressure, Relative Density, Particle Size Aging and Over Consolidation. Geotechnique, Vol 36, No. 3, pp. 425-447.
- SOWERS, G.F. 1979. Introductory Soil Mechanics and Foundations Geotechnical Engineering. 4th Edition, Macmillan, New York.
- ŞEN, G. 2004. Gümüşler Belediyesi Mücavir Alanının Sıvılaşma Analizi ve Coğrafi Bilgi Sisteminde Uygulanması. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, 148 ss.
- ŞENEL, M. 1986. Tahtahdağ (Antalya) ve Dolayının Jeolojisi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, 232 ss.
- ŞİŞMAN, E. 2006. Fethiye Yerleşim Alanındaki Zeminlerin SPT ve Kayma Dalga Hızı Verileriyle Sıvılaşma Potansiyelinin Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, 220 ss.
- TERZAGHI, K. and PECK, R.B. 1948. Soil Mechanics in Engineering Practice. John Wiley & Sons Inc., New York.
- ULUSAY, R. 2001. Uygulamalı Jeoteknik Bilgiler. TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları. 385 ss.
- UZUNER, B.A. 2007. Temel Zemin Mekaniği. Derya Kitabevi, Trabzon, 560 ss.
- UYANIK, O. 2002. Kayma Dalgası Hızına Bağlı Potansiyel Sıvılaşma Analiz Yöntemi. Doktora Tezi (yayımlanmamış) , Dokuz Eylül Üniversitesi, 190 ss.
- YILMAZ, Z. 2004. 1999 Kocaeli Depreminde Sakarya İlinin Yapısal Performansının Geoteknik ve Deprem Mühendisliği Yönünden CBS Tabanlı İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, 121 ss.

ÖZGEÇMİŞ

Murat KARATAŞ 1984 yılında Burdur’da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Isparta’da tamamladı. 2004 yılında girdiği Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nden 2008 yılında mezun oldu. 2010 yılında Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisansa başladı. Nisan 2009 tarihinden beri DSİ 18. Bölge 181. Şube Müdürlüğü’nde (Isparta) inşaat mühendisi olarak çalışmaktadır.