

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SIVILAŞMA ANALİZİ VE SIVILAŞMA SONUCU OLUŞAN YANAL  
YAYILMA HESAP YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Mert ALTINDIŞ**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programı**

**MAYIS 2020**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SIVILAŞMA ANALİZİ VE SIVILAŞMA SONUCU OLUŞAN YANAL  
YAYILMA HESAP YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Mert ALTINDIŞ  
501161317**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ayfer ERKEN**

**MAYIS 2020**



İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501161317 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Mert ALTINDIŞ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "SIVILAŞMA ANALİZİ VE SIVILAŞMA SONUCU OLUŞAN YANAL YAYILMA HESAP YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :** **Prof. Dr. Ayfer ERKEN** .....

İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :** **Dr. Öğr. Üyesi Berrak TEYMÜR** .....

İstanbul Teknik Üniversitesi

**Prof. Dr. Ayşe Edinçliler** .....

Boğaziçi Üniversitesi

**Teslim Tarihi** : 13 Mart 2020  
**Savunma Tarihi** : 7 Mayıs 2020





*Aileme,*





## ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca bilgi birikimini, deneyimini ve desteğini esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Ayfer ERKEN'e teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca gerekli imkan ve olanakları sunarak bana destek olan Enar Müh. Mim. ve Dan. Ltd. Şti.'ye, süreç boyunca değerli yardımlarını esirgemeyen İnş. Yük. Müh. Tolga ARIKOLER'e, İnş. Müh. Kadir ATLIOĞLU'na, İnş. Müh. Yağmur ERBAŞ'a, İnş. Müh. Osman SEZGİN'e ve İnş. Müh. Emrah YILMAZ'a teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak tez çalışmalarım ve hayat boyu, her zaman yanımda olan anneme, babama ve abime bana göstermiş oldukları destekten ötürü teşekkürlerimi sunarım.

Mart 2020

Mert ALTINDIŞ  
İnşaat Mühendisi



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖNSÖZ .....	vii
İÇİNDEKİLER .....	ix
KISALTMALAR .....	xi
SEMBOLLER .....	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ .....	xv
ŞEKİL LİSTESİ .....	xvii
ÖZET .....	xix
SUMMARY .....	xxiii
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1 Çalışmanın Amacı .....	2
1.2 Çalışmanın Kapsamı .....	3
<b>2. ZEMİNLERDE SIVILAŞMA .....</b>	<b>5</b>
2.1 Sıvılaşmanın Tanımı .....	5
2.2 Sıvılaşma Tarihsel Süreç .....	7
2.3 Tanımlayıcı Kavramlar .....	8
2.4 Sıvılaşma Mekanizması .....	10
2.5 Sıvılaşma-Efektif Gerilme İlişkisi .....	11
2.6 Sıvılaşma Türleri .....	12
2.6.1 Akma türü sıvılaşma .....	12
2.6.2 Çevrimsel hareketlilik .....	13
2.7 Sıvılaşmaya Etki Eden Faktörler .....	13
2.7.1 Zemin cinsi .....	14
2.7.2 Zeminin dane özellikleri ve şekli .....	15
2.7.3 Zeminin sıklık derecesi .....	16
2.7.4 Zeminin drenaj koşulları .....	17
2.7.5 Yer altı su seviyesi .....	18
2.7.6 Deprem büyüklüğü ve süresi .....	18
2.7.7 Sismik geçmiş .....	18
2.7.8 Yapı yükü .....	19
2.7.9 Yerleşim koşulları veya çökme ortamı .....	19
2.7.10 Yanal basınçlar .....	19
2.7.11 Yaşlanma ve çimentolanma .....	20
2.8 Sıvılaşmaya Sebebiyle Meydana Gelen Problemler .....	20
2.8.1 Taşıma gücü kaybı .....	20
2.8.2 Kum kaynaması .....	21
2.8.3 Akma göçmesi .....	22
2.8.4 İstinat yapısı yenilmesi .....	22
2.8.5 Gömülü yapı yüzeylenmesi .....	23
2.8.6 Yanal yayılma .....	24

<b>3. SIVILAŞMA ANALİZ YÖNTEMLERİ.....</b>	<b>27</b>
3.1 Basitleştirilmiş Yöntem.....	28
3.1.1 Çevrimli gerilme oranının belirlenmesi .....	28
3.1.2 Çevrimli direnç oranının belirlenmesi.....	29
3.1.3 Düzeltme faktörü ve sivilaşmaya karşı güvenlik katsayısı .....	32
<b>4. YANAL YAYILMA HESAP YÖNTEMLERİ.....</b>	<b>33</b>
4.1 Giriş.....	33
4.2 Yanal Yayılma Hesap Yönteminde Deneysel Modeller .....	34
4.2.1 Youd ve Perkins (1987)'in LSI (Sivilaşma Şiddeti İndeksi) modeli .....	34
4.2.2 Hamada (1986)'nin ampirik modeli.....	36
4.2.3 Bartlett ve Youd (1992)'un MLR (Çoklu Doğrusal Regresyon) modeli ..	37
4.2.4 Shamoto (1998) modeli.....	38
<b>5. SIVILAŞMA RİSKİNİN BELİRLENMESİ.....</b>	<b>41</b>
5.1 İnceleme Alanında Bulunan Sondaj Kuyuları.....	42
5.2 Arazi Araştırmaları ve Laboratuvar Deney Sonuçları.....	45
5.2.1 Standart penetrasyon testi (SPT).....	45
5.2.2 Laboratuvar Deneyleri.....	45
5.3 Zeminlerin Dinamik ve Elastik Parametreleri.....	45
5.4 İnceleme Alanındaki Sivilaşma Analiziyle İlgili Bilgiler .....	46
5.5 İnceleme Alanının Depremselliği.....	46
5.6 İnceleme Alanındaki Zemin Profilleri.....	48
5.7 Basitleştirilmiş Yöntem İle Sivilaşma Analizi .....	48
5.8 Sonuçlar.....	49
<b>6. YANAL YAYILMALARIN BELİRLENMESİ .....</b>	<b>51</b>
6.1 Giriş.....	51
6.2 Bölgenin Yerel Zemin Koşulları .....	51
6.3 Yanal Yayılmada Yatay Deplasmanların Belirlenmesi.....	59
6.3.1 Hamada (1986)'nin ampirik modeli.....	59
6.3.2 Bartlett ve Youd(1992)'un MLR (Çoklu Doğrusal Regresyon) modeli ...	62
6.3.3 Shamoto (1998)'nin modeli .....	64
6.4 Sonuçlar.....	67
<b>7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>	<b>71</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>75</b>
<b>EKLER .....</b>	<b>83</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>97</b>

## KISALTMALAR

<b>AFAD</b>	: Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı
<b>ASCE</b>	: American Society of Civil Engineers – Amerikan İnşaat Mühendisliği Birliği
<b>BM</b>	: Birleşmiş Milletler
<b>cm</b>	: Santimetre
<b>CRR</b>	: Cyclic Resistance Ratio – Çevrimli Direnç Oranı
<b>CSR</b>	: Cyclic Stress Ratio – Çevrimli Gerilme Oranı
<b>DSM</b>	: Deep Soil Mixing – Derin Karıştırma Yöntemi
<b>EEDMI</b>	: Earthquake Engineering and Disaster Management Institute – Deprem Mühendisliği ve Afet Yönetimi Enstitüsü
<b>FEMA</b>	: Federal Emergency Management Agency – Federal Acil Durum Yönetim Kurumu
<b>FS</b>	: Factor of Safety – Güvenlik Katsayısı
<b>GC</b>	: Clayey Gravel – Killi Çakıl
<b>GM</b>	: Silty Gravel – Siltli Çakıl
<b>GP</b>	: Poorly-graded Gravel – Kötü Derecelenmiş Çakıl
<b>GW</b>	: Well-graded Gravel – İyi Derecelenmiş Çakıl
<b>g/cm<sup>3</sup></b>	: Gram/Santimetreküp
<b>İDO</b>	: İnce Dane Oranı
<b>km</b>	: Kilometre
<b>kPa</b>	: Kilopascal
<b>LL</b>	: Likit Limit
<b>LSI</b>	: Liquefaction Severity Index – Sıvılaşma Şiddeti İndeksi
<b>m</b>	: Metre
<b>MLR</b>	: Multi Linear Regression – Çoklu Doğrusal Regresyon
<b>mm</b>	: Milimetre
<b>MSF</b>	: Magnitude Scaling Factor – Büyüklük Ölçeklendirme Düzeltmesi
<b>MTA</b>	: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü
<b>m/s</b>	: Metre/Saniye
<b>NCEER</b>	: National Center for Earthquake Engineering Research – Ulusal Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi

<b>NP</b>	: Non Plastic – Plastik Olmayan
<b>PI</b>	: Plastik İndeks
<b>PL</b>	: Plastik Limit
<b>SEM</b>	: Sonlu Eleman Modelleri
<b>SC</b>	: Clayey Sand – Killi Kum
<b>SM</b>	: Silty Sand – Siltli Kum
<b>SP</b>	: Poorly-graded Sand – Kötü Derecelenmiş Kum
<b>SPT</b>	: Standart Penetrasyon Testi
<b>SW</b>	: Well-graded Sand – İyi Derecelenmiş Kum
<b>TBDY</b>	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği



## SEMBOLLER

<b>a<sub>maks</sub></b>	: Pik yer ivmesi
<b>C<sub>B</sub></b>	: Kuyu çapı düzeltme faktörü
<b>C<sub>E</sub></b>	: Enerji oranı düzeltme faktörü
<b>C<sub>h</sub></b>	: Gözlenen ve tahmin edilen yatay deplasmanlar arasındaki düzeltme faktörü
<b>C<sub>N</sub></b>	: Üst tabaka yükü düzeltme faktörü
<b>C<sub>R</sub></b>	: Tij boyu düzeltme faktörü
<b>C<sub>S</sub></b>	: Numune alma metodu düzeltme faktörü
<b>C<sub>U</sub></b>	: Drenajsız kayma dayanımı
<b>D</b>	: Yatay yönde yer değiştirme
<b>D<sub>r</sub></b>	: Relatif sıklık
<b>D<sub>h</sub></b>	: Yatay yönde yer değiştirme
<b>(D<sub>h</sub>)<sub>max</sub></b>	: Tahmin edilen yatay sismik zemin deplasman potansiyeli
<b>D50<sub>15</sub></b>	: Suya doyguni kaba daneli tabakaların SPT değerlerinin 15'den küçük olduğu zemin tabakalarındaki ince dane yüzdesi
<b>g</b>	: Yerçekimi ivmesi
<b>H</b>	: Sıvılaştan tabaka derinliği
<b>M<sub>L</sub></b>	: Depremin lokal büyüklüğü
<b>M<sub>w</sub></b>	: Depremin moment büyüklüğü
<b>(N<sub>1</sub>)</b>	: Enerji oranına göre düzeltilmiş SPT darbe miktarı
<b>(N<sub>1</sub>)</b>	: İnce dane oranına göre düzeltilmiş SPT darbe miktarı
<b>P<sub>a</sub></b>	: Sabit referans gerilmesi
<b>r<sub>d</sub></b>	: Gerilme azaltma katsayısı
<b>R*</b>	: Değiştirilmiş sismik kaynağa olan mesafe
<b>S</b>	: Şev eğimi
<b>SPT-N</b>	: Sahada ölçülen standart penetrasyon testinin darbe sayısı
<b>T<sub>15</sub></b>	: Suya doygun, kaba daneli tabakaların SPT değerlerinin 15'den küçük olduğu zemin tabakalarının kalınlığı
<b>u<sub>s</sub></b>	: Statik durumdaki boşluk suyu basıncı
<b>u<sub>d</sub></b>	: Dinamik durumdaki boşluk suyu fazlalığı

$V_s$	: Zeminin kayma hızı
$W$	: Serbest yüzey oranı
$W_a$	: Zeminin su içeriği
$z$	: Derinlik
$\alpha, \beta$	: İnce dane düzeltme faktörleri
$\gamma_{maks}$	: En büyük makaslama birim deformasyonu
$(\gamma_r)_{maks}$	: En büyük artık makaslama birim deformasyonu
$\Delta u$	: Boşluk suyu basınç artışı
$\sigma_v$	: Toplam düşey gerilme
$\sigma'_v$	: Efektif düşey gerilme
$\tau/\sigma'$	: Kayma gerilmesi oranı
$\nu$	: Poisson oranı
$\Phi$	: İçsel sürtünme açısı



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

<b>Çizelge 2.1:</b> Siltli ve killi kumların sıvılaştırma özelliği (Andrew ve Martin, 2000). ..	15
<b>Çizelge 2.2:</b> Relatif sıkılık oranına göre zemin sınıflandırması (Uzuner, 2012).....	17
<b>Çizelge 2.3:</b> Sıvılaştırmaya relative sıkılık ve pik yer ivmesinin etkisi (Seed ve Idriss, 1971). .....	17
<b>Çizelge 3.1:</b> Farklı ülkeler için SPT enerji oranı düzeltme faktörü (Seed vd., 1985). .....	30
<b>Çizelge 3.2:</b> Farklı kuyu çaplarında SPT için düzeltme faktörleri (Youd vd., 2001a). .....	30
<b>Çizelge 3.3:</b> Farklı tij boylarında SPT için düzeltme faktörleri (Youd vd., 2001a)..	30
<b>Çizelge 3.4:</b> İnce dane düzeltme faktörleri (Youd vd., 2001a).....	32
<b>Çizelge 5.1:</b> İnceleme alanındaki sondaj bilgileri.....	42
<b>Çizelge 5.2:</b> Deney sonuçlarına göre zemin kabul değerleri .....	45
<b>Çizelge 6.1:</b> Oluşturulan kesitlerde sıvılaştırılan zemin tabakalarının taban eğimleri....	59
<b>Çizelge 6.2:</b> Çalışma alanındaki sondajlarda sıvılaştırılan tabaka kalınlıkları.....	61
<b>Çizelge 6.3:</b> Hamada (1986)'nin metoduna göre sondajlardaki yatay deplasmanlar	61
<b>Çizelge 6.4:</b> Bartlett ve Youd(1992)'un MLR metodu için kullanılacak parametreler .....	63
<b>Çizelge 6.5:</b> Bartlett ve Youd(1992)'un MLR metoduna göre yatay deplasmanlar..	63
<b>Çizelge 6.6:</b> Shamoto (1998) modeline göre yatay deplasman – KSK7 .....	65
<b>Çizelge 6.7:</b> Shamoto (1998) modeline göre yatay deplasman – GSK20 .....	65
<b>Çizelge 6.8:</b> Shamoto (1998) modeline göre yatay deplasman – GSK15 .....	65
<b>Çizelge 6.9:</b> Shamoto (1998) modeline göre yatay deplasman – GSK14 .....	65
<b>Çizelge 6.10:</b> Shamoto (1998) modeline göre yatay deplasman – GSK17 .....	66
<b>Çizelge 6.11:</b> Shamoto (1998) modeline göre sondajlardaki yatay deplasman değerleri .....	66
<b>Çizelge A.1:</b> GSK20-GSK17-GSK18-GSK15 sondajları düzeltilmemiş SPT verileri .....	83
<b>Çizelge A.2:</b> KSK7-KSK8-EKGDSK1-GSK22 sondajları düzeltilmemiş SPT verileri .....	83
<b>Çizelge A.3:</b> GSK14-EKGDSK2-EKSK1-GDSK6 sondajları düzeltilmemiş SPT verileri .....	84
<b>Çizelge A.4:</b> GSK2-GSK8-GDSK2-GDSK13 sondajları düzeltilmemiş SPT verileri .....	84
<b>Çizelge A.5:</b> GDSK3-GDSK10-EKGDSK3-EKSK3 sondajları düzeltilmemiş SPT verileri .....	84
<b>Çizelge A.6:</b> GDSK16-GDSK19-GDSK22-GYSK2 sondajları düzeltilmemiş SPT verileri .....	85
<b>Çizelge A.7:</b> GSK5-GSK1-GDSK9 sondajları düzeltilmemiş SPT verileri.....	85
<b>Çizelge B.1:</b> GSK1-GSK2-GSK5-GSK8-GSK14 sondajları laboratuvar verileri ....	86
<b>Çizelge B.2:</b> GSK15-GSK17-GSK18-GSK20 sondajları laboratuvar verileri.....	87

<b>Çizelge B.3:</b> GSK22-GDSK2-GDSK3-GDSK6-GDSK9-GDSK10 sondajları laboratuvar verileri .....	<b>88</b>
<b>Çizelge B.4:</b> GDSK13-GDSK16-GDSK19-GDSK22-EKGDSK1-EKGDSK2- EKGDSK3-EKSK1 sondajları laboratuvar verileri .....	<b>89</b>
<b>Çizelge B.5:</b> EKSK3-GYSK2-KSK7-KSK8 sondajları laboratuvar verileri.....	<b>90</b>



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

<b>Şekil 2.1</b> : San Fernando (1971) depreminde sıvılaşma sonucu oluşan hasarlar (Kramer, 1996).....	7
<b>Şekil 2.2</b> : Alaska (1964) depreminde sıvılaşma sonucu köprüde oluşan hasar (Kramer, 1996).....	8
<b>Şekil 2.3</b> : Van (2011) depreminde sıvılaşma ve yatay deformasyon örneği (İTÜ/EEDMI, 2011).....	8
<b>Şekil 2.4</b> : Sıvılaşmaya neden olan çevrimsel yükleme şartlarının oluşması (Obermeier, 1996).....	9
<b>Şekil 2.5</b> : Zemin mekaniğinde kullanılan yükleme şekilleri (Ishihara, 1996).....	9
<b>Şekil 2.6</b> : Sıvılaşma oluşum mekanizması (Tosun, 2002).....	10
<b>Şekil 2.7</b> : Mino-Owari depremi esnasında artık boşluk suyu basıncının değişimi (Ishihara,1981). ....	11
<b>Şekil 2.8</b> : Yeraltı su seviyesinin altında, gevşek zeminin drenajın yeterli olmadığı durumlarda davranışı (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006). ....	12
<b>Şekil 2.9</b> : Yeraltı su seviyesinin altında sıkı zeminin drenajın yeterli olmadığı durumlardaki davranışı (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006). ....	13
<b>Şekil 2.10</b> : Geliştirilmiş Çin kriteri (Finn vd.,1994). ....	14
<b>Şekil 2.11</b> : Sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilme grafiği (Seed vd.,2003). ....	15
<b>Şekil 2.12</b> : Sıvılaşmaya duyarlı dane boyut aralığı (Iwasaki, 1986). ....	16
<b>Şekil 2.13</b> : Sismik geçmişin sıvılaşma direncine etkisi (Seed, 1976). ....	19
<b>Şekil 2.14</b> : Adapazarı'nda sıvılaşma nedeniyle oluşan taşıma gücü kaybı ve farklı oturma nedeniyle devrilen yapı (Yasuda, 2004). ....	21
<b>Şekil 2.15</b> : 1964'de Niigata'da yaşanan depremde sıvılaşma kaynaklı taşıma gücü kaybı sonucu yapıların devrilmesi (Day, 2002). ....	21
<b>Şekil 2.16</b> : Kum kaynaması oluşumu (Ulusay, 2000). ....	22
<b>Şekil 2.17</b> : Sıvılaşmanın neden olduğu akma türü kayma örneği (Uyanık, 2002)..	22
<b>Şekil 2.18</b> : İstinat yapısı yenilmesi (Lai, 1998).....	23
<b>Şekil 2.19</b> : 1995 Kobe depremi sıvılaşmaya bağlı istinat duvarı yenilmesi (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006). ....	23
<b>Şekil 2.20</b> : Sıvılaşma nedeniyle gömülü yapıların yüzeylenmesi (Ulusay, 2000). ..	24
<b>Şekil 2.21</b> : 2004 Niigata depreminde sıvılaşma nedeniyle oluşan hasar (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006). ....	24
<b>Şekil 2.22</b> : Yanal yayılma; (a) az eğimli zemin durumunda, (b) serbest zemin durumunda (Rauch, 1997).....	25
<b>Şekil 2.23</b> : Haiti'de 2010 yılında yaşanan deprem sonucu oluşan yanıl yayılma (Desroces vd., 2011). ....	25
<b>Şekil 3.1</b> : Değişken ince dane oranı ve $M_w = 7,5$ için çevrimli direnç oranı ile $(N_1)_{60}$ arasındaki ilişki (Youd vd., 2001a). ....	31
<b>Şekil 4.1</b> : LSI modeli grafiği (Youd ve Perkins, 1987). ....	35
<b>Şekil 4.2</b> : $\dot{I}DO=\%0$ zeminler için en büyük artık makaslama birim deformasyonunun belirlenmesi ( Shamoto vd., 1998b). ....	39

<b>Şekil 4.3</b> : İDO=%10 zeminler için en büyük artık makaslama birim deformasyonunun belirlenmesi ( Shamoto vd., 1998b). .....	<b>40</b>
<b>Şekil 4.4</b> : İDO=%20 zeminler için en büyük artık makaslama birim deformasyonunun belirlenmesi ( Shamoto vd., 1998b). .....	<b>40</b>
<b>Şekil 5.1</b> : İnceleme alanının lokasyonu .....	<b>41</b>
<b>Şekil 5.2</b> : Proje alanında seçilmiş sondajların yerleşimi (Kısım-1).....	<b>43</b>
<b>Şekil 5.3</b> : Proje alanında seçilmiş sondajların yerleşimi (Kısım-2).....	<b>44</b>
<b>Şekil 5.4</b> : Güncel Türkiye Deprem Tehlike Haritaları uygulamasından inceleme alanına ait maksimum yer ivmesi ( <a href="https://tdth.afad.gov.tr/TDTH/main.xhtml">https://tdth.afad.gov.tr/TDTH/main.xhtml</a> ). .....	<b>46</b>
<b>Şekil 5.5</b> : Türkiye Deprem Tehlike Haritası – 2019 ( <a href="https://deprem.afad.gov.tr/deprem-tehlike-haritasi">https://deprem.afad.gov.tr/deprem-tehlike-haritasi</a> ). .....	<b>47</b>
<b>Şekil 5.6</b> : MTA tarafından oluşturulan diri fay hatları haritasının inceleme alanına ait kısmı ( <a href="http://yerbilimleri.mta.gov.tr/anasayfa.aspx">http://yerbilimleri.mta.gov.tr/anasayfa.aspx</a> ). .....	<b>48</b>
<b>Şekil 5.7</b> : GSK17 ve GSK15 sondajlarının güvenlik faktörü-derinlik grafiği .....	<b>49</b>
<b>Şekil 6.1</b> : Seçilen inceleme alanının lokasyonu.....	<b>51</b>
<b>Şekil 6.2</b> : İnceleme alanında oluşturulan kesitlerin yerleşimi .....	<b>52</b>
<b>Şekil 6.3</b> : Yanal yayılma kesit-1 .....	<b>53</b>
<b>Şekil 6.4</b> : Yanal yayılma kesit-2 .....	<b>54</b>
<b>Şekil 6.5</b> : Yanal yayılma kesit-3 .....	<b>55</b>
<b>Şekil 6.6</b> : Yanal yayılma kesit-4 .....	<b>56</b>
<b>Şekil 6.7</b> : Yanal yayılma kesit-5 .....	<b>57</b>
<b>Şekil 6.8</b> : Yanal yayılma kesit-6 .....	<b>58</b>
<b>Şekil 6.9</b> : Kesit-2 için oluşturulan sıvılaştıran tabaka taban eğimi .....	<b>60</b>
<b>Şekil 6.10</b> : Hamada (1986) metoduna göre tahmin edilen yatay deplasman değerleri .....	<b>62</b>
<b>Şekil 6.11</b> : Seçilen sondajların Barlett ve Youd (1992)'un MLR metoduna göre yatay deplasman tahminleri.....	<b>64</b>
<b>Şekil 6.12</b> : Seçilen sondajların Shamoto (1998) modeline göre yatay deplasman tahmin değerleri.....	<b>66</b>
<b>Şekil 6.13</b> : Belirlenmiş 4 sondajın Hamada (1986) ile Barlett ve Youd (1992) MLR metodunun karşılaştırılması .....	<b>68</b>
<b>Şekil 6.14</b> : Belirlenen 3 sondajın Hamada (1986) ve Shamoto (1998) metoduna göre karşılaştırılması .....	<b>69</b>
<b>Şekil 6.15</b> : GSK20 ve KSK7 sondajlarında 3 farklı metotla tahmin edilen yatay deplasman miktarları .....	<b>70</b>
<b>Şekil C.1</b> : EKGDSK1-EKGDSK2 güvenlik katsayısı-derinlik grafiği .....	<b>91</b>
<b>Şekil C.2</b> : EKSK1-EKSK3 güvenlik katsayısı-derinlik grafiği.....	<b>91</b>
<b>Şekil C.3</b> : GDSK2-GDSK3 güvenlik katsayısı-derinlik grafiği.....	<b>92</b>
<b>Şekil C.4</b> : GDSK6-GDSK9 güvenlik katsayısı-derinlik grafiği.....	<b>92</b>
<b>Şekil C.5</b> : GDSK10-GDSK13 güvenlik katsayısı-derinlik değişim grafiği .....	<b>93</b>
<b>Şekil C.6</b> : GDSK16-GDSK22 güvenlik katsayısı-derinlik değişim grafiği.....	<b>93</b>
<b>Şekil C.7</b> : GSK1-GSK2 güvenlik katsayısı-derinlik değişim grafiği.....	<b>94</b>
<b>Şekil C.8</b> : GSK8-GSK14 güvenlik katsayısı-derinlik değişim grafiği.....	<b>94</b>
<b>Şekil C.9</b> : GSK18-GSK20 güvenlik katsayısı-derinlik değişim grafiği.....	<b>95</b>
<b>Şekil C.10</b> : GSK22-GYSK2 güvenlik katsayısı-derinlik değişim grafiği.....	<b>95</b>
<b>Şekil C.11</b> : KSK7-KSK8 güvenlik katsayısı-derinlik değişim grafiği.....	<b>96</b>
<b>Şekil C.12</b> : GDSK19-EKGDSK3 güvenlik katsayısı-derinlik değişim grafiği.....	<b>96</b>

## SIVILAŞMA ANALİZİ VE SIVILAŞMA SONUCU OLUŞAN YANAL YAYILMA HESAP YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

### ÖZET

Türkiye yer aldığı coğrafya neticesinde tarih boyunca birçok doğal afete uğramıştır. Yapılan araştırmalar sonucunda etkilenen kişi sayısı ve zarara uğrayan yerleşim noktası sayıları baz alındığında ülkemizde en çok etkili olan doğal afetin deprem olduğu ortaya konmuştur.

Büyük maddi ve manevi kayıplara sebep olan deprem tehlikesine karşı güvenlik tarifi 2 başlıca maddede toplanabilir. Birinci madde potansiyel şiddetli dinamik yüklere karşı yapı güvenliği, ikinci madde ise yapı ve oturduğu zeminin deprem gibi çevrimli gerilmelerin oluşturduğu dinamik kuvvetler etkisindeki davranışdır. Deprem sebebiyle oluşan tehlikeyi minimuma indirmek ve dinamik yükler altında yapıların güvenliğini arttırmak için suya doymuş zeminlerde oluşan sıvılaşma olgusunu bilmek son derece önemlidir.

Sıvılaşma, depremin neden olduğu dinamik kuvvetlerin etkisiyle, yeraltı su seviyesinin altında yer alan gevşek özelliklere sahip, kohezyonsuz ve yeterli drenaj imkanı bulunmayan şartlardaki zeminlerde, yükselen boşluk suyu basıncı ve düşen efektif gerilme sonucunda kayma mukavemetinin belli bir kısmını veya tamamını kaybetmesi, adeta sıvı gibi davranması şeklinde açıklanabilir.

Terzaghi'nin İstanbul'da geçirdiği yıllarda (1916-1925) yaptığı araştırmalar sonucu efektif gerilme ile boşluk suyu basıncı arasındaki bağıntıyı ilk olarak ortaya konduğu bilinse de ilk sıvılaşma tabiri 1950'li yıllarda Mogami ve Kubo tarafından ortaya konmuştur.

Tarihte yaşanan 1920 yılında California, 1938 yılında Montana Fort Peck, 1964 yılında Niigata, 1971 yılında California San Fernando, 1948 yılında Fukui, 1964 yılında Alaska depremleri sıvılaşma kaynaklı hasarların görüldüğü ilk örnekler olarak kabul edilirler. Bu depremler sonucunda hastane, nükleer tesis, askeri yapılar, barajlar vb. hayati yapıların tasarımında sıvılaşma ihtimali önemli bir mühendislik problemi olarak yer bulmaya başlamıştır. Ülkemizde de 1993 Erzincan, 1999 Gölcük ve Düzce ve 2011 Van depremleri yapılarında sıvılaşma kaynaklı birçok hasarın oluşabileceği hususunda sıvılaşma olgusunun önemini bir kez daha ortaya koymuştur.

Zeminlerin statik durumdaki davranışı dinamik durumdaki davranışından farklılık gösterebilmektedir. Sismik hareketler nedeniyle oluşan kayma dalgalarının farklı formlarda zemine etkimesiyle, sıvılaşma potansiyeli mevcut zeminlerde sıvılaşma görülmesine neden olabilecek farklı özelliklere sahip kayma gerilmeleri oluşabilmektedir.

Sıvılaşma mekanizması incelendiğinde, efektif gerilme ve boşluk suyu basıncı tanımları sıkça görülmektedir. Eğer zeminin geçirgenlik katsayısı düşük ve yüklenme hızı yüksek ise deprem anındaki dinamik kuvvetlerden dolayı oluşan kısa süreli ve ani hareketler nedeniyle danecikler arasındaki boşluk suyunun drene olması için yeterli

süre olmaz. Böyle bir durum zeminde hızlı ve ciddi miktarlarda boşluk suyu artışına sebep olur. Efektif gerilme olarak tanımlanan olgu ise zemine etkiyen total basıncın, zeminde tanecikler arasında oluşan efektif gerilme ile su basıncının birleşimiyle karşılanacağı şeklinde ifade edilebilir.

Sıvılaşmaya etki eden parametreler zemin cinsi, dane özellikleri ve şekli, zeminin sıklık derecesi, zeminin drenaj koşulları, zemindeki mevcut yeraltı su seviyesi, deprem büyüklüğü ve süresi, sismik geçmiş, yapı yükü, yerleşim koşulları ve çökme ortamı, yanal basınçlar, yaşlanma ve çimentolanma olarak sıralanabilir. Kum muhteva eden ve/veya kumlu, yuvarlak daneli, gevşek özellikli, drenajın yetersiz olduğu, yeraltı su seviyesinin yüksek olduğu zeminler diğer özelliklerdeki zeminlere göre sıvılaşma riski daha yüksek olan zeminlerdir. Deprem büyüklüğündeki artış, deprem süresindeki artış ve yapı yükündeki artış da sıvılaşma duyarlılığı ile doğru orantılı parametrelerdir. Yanal basınç miktarlarındaki artış ise sıvılaşma duyarlılığını azaltan bir parametredir. Yeni zemin çökellerinin eskilerine göre, su altında yapılan hidrolik dolguların da diğer koşullardaki dolgulara göre sıvılaşma duyarlılığı fazladır.

Sıvılaşma nedeniyle meydana gelen problemlere örnek olarak; akma göçmesi, taşıma gücü kaybı, kum kaynaması, istinat yapısı yenilmesi, gömülü yapı yüzeylenmesi ve yanal yayılma verilmektedir.

Sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısının bulunmasında kullanılan yöntemler analitik, fiziksel modellemeye bağlı ve ampirik yöntemler olmak üzere 3 ana başlıkta incelenmektedir. Analitik ve fiziksel modellemeye bağlı yöntemlerdeki kullanım zorlukları nedeniyle mühendislik uygulamalarındaki sıvılaşma potansiyelinin tayininde ampirik yöntemler çokça kullanılan yöntem haline almıştır. Çeşitli araştırmacılar tarafından birçok değişik ampirik yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden en bilinen Seed ve Idriss (1971) tarafından ortaya atılan ve daha sonra Youd vd. (2001a) tarafından geliştirilip güncel halini alan “Basitleştirilmiş Yöntem” yaklaşımıdır. Bu tez çalışmasında “Basitleştirilmiş Yöntem” yaklaşımı ile seçilen inceleme alanının sıvılaşma potansiyeli hesaplanmıştır.

Tez çalışması kapsamında seçilen çalışma alanında daha önce yapılmış sondaj çalışmaları, oluşturulmuş geoteknik rapor, saha ve laboratuvar deneylerinden elde edilen veriler ışığında sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısı hesaplanmıştır. Saha deneyi olarak Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) sonuçları kullanılmıştır.

“Basitleştirilmiş Yöntem” yaklaşımı zeminin sıvılaşması için zaruri çevrimli direnç oranının (CRR), sismik hareketin meydana getirdiği çevrimli gerilme oranına (CSR) oranlanması sonucu zeminin sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısının (FS) bulunması temeline dayanır.

Çevrimli gerilme oranı (CSR); yerçekimi ivmesi, zemindeki mevcut maksimum yatay yer ivmesi, efektif gerilme, toplam gerilme ve gerilme azaltma katsayısına bağlı olarak hesaplanır. Bu parametreler derinliğe bağlı parametrelerdir. Çevrimli direnç oranı (CRR) ise SPT ile belirlenen darbe sayısının numune alma metodu, üst tabaka yükü, tij boyu, enerji oranı, kuyu çapı düzeltme faktörleri ile düzenlenmiş şekli yardımıyla bulunabilmektedir. Çevrimli direnç oranına (CRR) etki eden bir diğer faktör de zeminin ince dane oranıdır. Deprem düzeltme faktörünün de hesaplanmasıyla çevrimli direnç oranının çevrimli gerilme oranına oranlanması sıvılaşmaya karşı güvenlik faktörünü oluşturur. Sıvılaşmaya karşı güvenlik faktörü,  $FS \leq 1$  olması durumunda zeminin sıvılaşabilme riski bulunduğuna bilinirken sıvılaşmaya karşı güvenlik faktörü,  $FS > 1$  olması durumunda zemin sıvılaşabilme riskinin görülmediği söylenebilmektedir.

Sıvılaşma sonucu oluşan hasar tiplerinden biri olan yanal yayılma, hafif eğimli zeminlerde görülen yatay yer değiştirmeler olarak tanımlanabilir. Eğimler çoğaldıkça eğim yönündeki yatay yer değiştirmeler de çoğalmaktadır. Yanal yayılmalar sonucu oluşan yer değiştirmeler birkaç santimetrelerden birkaç metre boyutlarına kadar oluşabilir. Kayma işlemi sonucu zeminde oluşan çatlak ve yarıklar eğim yönüne dik bir şekilde meydana gelmektedir.

Yanal yayılma sonucu oluşan yer değiştirmelerin büyüklüğünü hesaplamak için önerilen yöntemler; bünye modelleri (sonlu eleman modelleri), deneysel modeller, basit analitik modeller ve fiziksel modeller olarak 4 başlıkta gruplanmaktadır. Hangi modelin daha doğru ve güvenilir sonuçlar vereceği inceleme alanının şartlarına göre değişmektedir. Bu tez çalışmasında ampirik modeller üzerinden yanal yayılma sonucu oluşan yatay yer değiştirme tahmin metotları kullanılmıştır.

Tez kapsamında yanal yayılma sonucu oluşan yatay deplasmanları tahmin etmek için Youd ve Perkins(1987)'in LSI metodu, Hamada vd.(1986)'nin metodu, Bartlett ve Youd(1992)'un MLR metodu ve Shamoto vd.(1998)'nin metodu açıklanmıştır.

Bu tez çalışmasının analiz bölümünün ilk kısmında seçilen inceleme alanında belirlenen 12 tanesi deniz, 15 tanesi kara sondajı olmak üzere 27 adet sondaj noktasının "Basitleştirilmiş Yöntem" yaklaşımı ile sıvılaşma potansiyeli belirlenmiştir. Bu 27 sondajın güvenlik faktörü-derinlik grafikleri oluşturulmuştur. Yapılan analiz sonucunda inceleme alanının büyük bölümünün sıvılaşma potansiyeli bulundurduğu belirlenmiştir. Tezde verileri kullanılan çalışma alanının tamamı alanın üzerine yapılan proje kapsamında sıvılaşma riskine karşı jet grout, deep soil mixing(DSM) ve turbo grouting ile iyileştirilmiştir. Bu tez kapsamında sıvılaşma analizi için kullanılan veriler bahsedilen zemin iyileştirme işlemleri yapılmadan önceki verilerdir.

Analiz kısmını diğer bölümünde ise çalışma alanında seçilen sondaj noktaları kullanılarak yanal yayılmadaki yatay deplasman miktarını tahmin etmek amacıyla 3 farklı deneysel model kullanılmıştır. Kullanılan bu 3 model Hamada vd.(1986)'nin ampirik modeli, Bartlett ve Youd(1992)'un MLR model ve Shamoto vd.(1998)'nin modelleridir. Bu 3 farklı metot kullanılarak bulunan sonuçlar grafiklerle gösterilmiştir ve karşılaştırma yapılmıştır. Bulunan sonuçların da gösterdiği üzere hangi yöntemin daha doğru ve güvenilir sonuçlar vereceği uygulama yapılacak inceleme alanının şartlarına göre değişmektedir. Tezde verileri kullanılan çalışma alanının tamamı alanın üzerine yapılan proje kapsamında kesişen kazık ve diyafram duvar ile tamamen çevrelenmiş ve yanal yayılma sınırlandırılmıştır. Bu tez kapsamında yatay yer değiştirme tahmini için kullanılan veriler bahsedilen yanal yayılmayı sınırlandıran işlemler yapılmadan önceki verilerdir.

Bu tez çalışması kapsamında genel olarak sıvılaşmanın tanımı, tarihi ve oluşumu, sıvılaşmaya etki eden faktörler, sıvılaşma kaynaklı hasar tipleri, sıvılaşma analizi ve yanal yayılma tahmin yöntemlerinin karşılaştırılması ele alınmıştır. Seçilen çalışma alanındaki veriler kullanılarak sıvılaşma potansiyeli hesaplanmış ve yanal yayılmada yatay deplasman tahmin metotları ve sonuçları karşılaştırılmıştır.

Bu tez çalışmasında hedef; ülkemizin büyük bir kısmında mevcut olan deprem tehlikesinin neden olabileceği sıvılaşma ve sıvılaşma sonucunda oluşacak yanal yayılma tahmin yöntemlerini incelemektir. Sıvılaşma güvenlik faktörlerinin hesaplanması ve yanal yayılma tahmin yöntemlerinin karşılaştırılmasıyla mühendislik yapılarında gerekli zemin iyileştirmelerinin ve geoteknik imalatların daha sağlıklı projelendirilmesi sağlanacaktır. Bu durum doğal afetler içerisinde ülkemizi en çok etkileyen depremin yıkıcı sonuçlarını minimize etmeye yardımcı olabilir.





# **LIQUEFACTION ANALYSIS AND COMPARISON OF LATERAL SPREAD CALCULATION METHODS RESULTING FROM LIQUEFACTION**

## **SUMMARY**

Turkey has suffered many natural disasters due to its geography throughout history. As a result of the researches, considering the number of affected people and the number of damaged residential areas, it was revealed that the most effective natural disaster in our country is earthquake.

Against the earthquake hazard that causes major materials and moral losses, safety description can be explained in two main matters. The first is the safety of the structure against potentially severe dynamic loads and the second is the behavior of the ground on which the building sits under the influence of dynamic forces caused by cyclic stresses such as earthquakes. In order to minimize the danger caused by the earthquake and increase the safety of structures under dynamic loads, it is extremely important to know the liquefaction phenomenon that occurs on saturated soils.

Liquefaction in the ground can be explained as losing some or all of the shear strength or even acting as a liquid due to the dynamic forces caused by the earthquake on the soils with loose properties located below the groundwater level, without cohesion and enough drainage.

Although Terzaghi's studies in Istanbul between 1916 and 1925 were accepted to reveal the relationship between effective stress and pore pressure, the first liquefaction term was introduced by Mogami and Kubo in the 1950s.

1920 California, 1938 Montana Fort Peck, 1948 Fukui, 1964 Niigata, 1971 California San Fernando, 1964 Alaska earthquakes in history are considered to be the first examples of damage caused by liquefaction. As a result of these earthquakes, the possibility of liquefaction in the design of vital structures such as hospitals, nuclear facilities, military structures and dams etc. has begun to take place as an important engineering problem. In our country, 1993 Erzincan, 1999 Gölcük-Düzce and 2011 Van earthquakes once again demonstrated the importance of the liquefaction phenomenon that many damages can occur in structures.

The behavior of soils in the static state may differ from the behavior in the dynamic state. As the shear waves caused by seismic movements may act on the ground in different forms, the liquefaction potential can create shear stresses with different properties that may cause liquefaction in existing soils.

When the liquefaction mechanism is examined, definitions of effective stress and pore water pressure are frequently seen. If the soil has a low permeability coefficient and a high loading speed, short-term and sudden movements caused by the dynamic forces at the time of the earthquake do not give enough time to drain pore water between the particles. This situation causes rapid and serious amount of pore water increase on the soil.

The phenomenon defined as effective stress can be expressed as the total pressure affecting the soil will be met by total of the effective stress and water pressure occurring between the particles in the soil.

The parameters affecting liquefaction can be listed as soil type, grain characteristics and shape, degree of soil dense, soil drainage conditions, current groundwater level in the soil, earthquake magnitude, earthquake duration, seismic history, building load, placement conditions or depositional environment, confining pressure, aging and cementation. The soils which are sand-containing or sandy, round grained, loose, insufficient drained and having high groundwater levels have a higher liquefaction risk than those with other properties. Increase in building load and earthquake magnitude and duration are also parameters directly proportional to liquefaction sensitivity. The increase in confining pressure is a parameter that decreases liquefaction sensitivity.

Examples of problems arising from liquefaction include runoff collapse, loss of bearing strength, sand boiling, retaining structure collapse, embedded structure surfacing and lateral spreading.

The methods used in finding the safety coefficient against liquefaction can be examined under three main titles: analytical, physical modeling and empirical methods. Empirical methods are widely used in the determination of liquefaction potential in engineering applications due to usage difficulties in analytical and physical modeling methods. Many different empirical methods have been developed by various researchers. The most known of these methods is the “Simplified Method” approach, which was put forward by Seed and Idriss (1971) and later developed as well as updated by Youd (2001a). In this thesis, the liquefaction potential of the selected area was analyzed with the “Simplified Method” approach.

Within the scope of the thesis study, the potential of liquefaction has been calculated in the light of previous drilling studies, geotechnical report, field and laboratory experiments. Standard Penetration Test (SPT) results were used as the field test. The “Simplified Method” approach is based on the basis of finding the factor of safety coefficient (FS) of the ground against liquefaction as a result of the proportion of the essential cyclic resistance ratio (CRR) created by the seismic movement to the cyclic stress ratio (CSR).

The cyclic stress ratio (CSR) is calculated based on the parameters of the maximum horizontal ground acceleration, gravity acceleration, total stress, effective stress and strain reduction coefficient available on the ground. These parameters depend on depth. The cyclic resistance ratio (CRR) can be found as a regulated function of the top layer load of the pulses number measured by SPT, energy ratio, well diameter, rod length, sampling method correction factors. Another factor affecting the cyclic resistance ratio (CRR) is fine grain rate of the soil. Calculating the earthquake correction factor and dividing the cyclic resistance ratio by the cyclic stress ratio constitutes the safety factor against liquefaction. It is concluded that if the value of the factor of safety (FS) against liquefaction is 1 or less than 1, the soil has a potential of liquefaction.

Lateral spreading, one of the types of damage, can be defined as horizontal displacements seen on slightly inclined soils. As the slopes increase, the direction of the slopes horizontal displacements are also increasing. Displacements caused by lateral spreads may occur from a few centimeters to several meters. Cracks and crevices formed in the soil as a result of sliding occur perpendicular to the slope direction.

The suggested methods to calculate the magnitude of displacements resulting from lateral spreading can be grouped under 4 headings: body models (finite element models), simple analytical models, experimental models, and physical models. Which model will give more accurate and reliable results depends on the conditions of the examination area. In this thesis, displacement estimation methods resulting from lateral spreading over experimental models are used.

Within the scope of the thesis, Youd and Perkins(1987) LSI method, Hamada et al. (1986) experimental method, Barlett and Youd(1992) MLR (Multi Linear Regression) method and Shamoto et al. (1998) method which are among the methods of estimate the values of displacements resulting from lateral spreading are explained.

In the first part of the analysis section of this thesis study, liquefaction analysis was carried out with "Simplified Method" to 27 points in the selected study area, 12 of them were offshore drilling and 15 of them were land drilling. Safety factor-depth graphics of these 27 drillings was formed. As a result of the analysis, it was determined that there is a liquefaction potential in most of the study area. The field used in the thesis was improved with jet grout, deep soil mixing (DSM) and turbo grouting against the liquefaction potential within the scope of the project on the field. The data used for liquefaction analysis within the scope of this thesis are the data prior the mentioned soil improvement operations.

In the other part of the analysis section, 3 different experimental models were used to estimate lateral displacement in the lateral spread using drilling points selected in the field. These 3 models used are Hamada et al. (1986) experimental model, Bartlett and Youd(1992) MLR model and Shamoto et al. (1998). The results compared with the graphics. As the results show, which method will give more accurate and reliable results depends field conditions to be applied. All field used in the thesis, completely surrounded by secant piles and diaphragm walls. Lateral spreads is limited. The data used for lateral displacement within the scope to this thesis are the data prior the mentioned geotechnical operations.

In the scope of this thesis, definition of liquefaction, history and formation of liquefaction, factors affecting liquefaction, liquefaction damage types, liquefaction analysis and comparison of lateral spread estimation methods are discussed. Using data in the selected field, liquefaction potential was calculated and horizontal displacement estimation methods and results were compared in lateral spread.

In the thesis, the goal is; is to introduce lateral spreading estimate methods that may occur as a result of liquefaction and liquefaction that may be caused by the earthquake hazard present in a large part of our country. By calculating the liquefaction safety factors and comparing the lateral spread estimation methods, the necessary soil improvements and geotechnical productions in engineering structures can be better projected. It may help minimize the destructive consequences of the earthquake that affects Turkey the most among natural disasters.



## 1. GİRİŞ

Birleşmiş Milletler'in (BM) yayınladığı "Dünya Nüfus Beklentisi" başlıklı raporda bulunan bilgilere göre Temmuz 2019 tarihinde yaklaşık 7,7 milyar olan dünya nüfusunun 2050 yılına kadar 2 milyar artarak 9,7 milyara yükselmesi beklenilmektedir (<https://www.dw.com/tr/2050de-d%C3%BCnya-n%C3%BCfusu-97-milyar-olacak/a-49245966>).

Son zamanlarda artarak devam eden nüfusun sonucu olarak yeni yerleşim alanlarına olan ihtiyacın artması, birçok yeni yerleşim bölgelerinin oluşturulması veya birçok insanın hizmet göreceği devasa yapıların oluşturulmasını gerekli kılmaktadır. Gelişen bilim ve teknolojinin yardımıyla var olan mevcut alanların daha efektif kullanılarak daha önce sorunlu olarak kabul edilen veya tercih edilmeyen bölgelerin gerekli iyileştirmeler yapılarak kullanılmaya başlanmasına sebep olmuştur. Sorunlu kabul edilen bu alanların hangi nedenden dolayı üzerine yapı inşası için çok tercih edilmediği, kullanılmadığı konusunu irdelendiğinde ise en önemli sorunlardan biri olarak suyun varlığından kaynaklanan bazı sorunlar olduğu görülebilir.

Nitekim zemin mekaniği alanının öncüsü kabul edilen Terzaghi (1939)'nin bu konu üzerine "... mühendislik uygulamasında, zeminde olan güçlükler hemen hemen yalnızca zeminlerin kendisinden değil fakat boşluklarında içerilen sudan kaynaklıdır. Hiç su olmayan gezegende zemin mekaniğine de ihtiyaç olmazdı." sözü mevcuttur.

Üzerinde yaşadığımız gezegen Dünya'da bulunan suyun varlığı tüm canlı formlarının enerji seviyelerinin korunması, vücut ısısı, metabolizma ve solunum vb. birçok hayati aktiviteleri için önemli bir yere sahipken beraberinde üzerinde yaşayan ve belirli yapılar oluşturan insanlık için bazı sorunlar da meydana getirmiştir. Bu sorunlardan bir tanesi olarak da zeminlerde yaşanan sıvılaşma konusu kabul edilebilir. Suyu doymuş zeminde tekrarlı dinamik yükler altında oluşan sıvılaşmanın akma göçmesi, yanıl yayılma, kum kaynaması, istinat yapısı yenilmesi, taşıma gücü kaybı, gömülü yapı yüzeylenmesi vb. hasarlara yol açtığı görülmüştür. Sıvılaşmanın gerçekleşmesi için olmazsa olmaz koşullardan biri suya doymuş zemin şartlarıdır.

Ülke coğrafyamız geçtiğimiz 100 yıl içerisinde maddi manevi ciddi kayıplarına sebep olan birçok deprem ile karşılaşmıştır. En yakın tarihli olandan başlayarak; 2020 Elazığ depremi, 2011 Van depremi, 2003 Bingöl depremi, 1999 Gölcük ve Düzce depremleri, 1998 Adana-Ceyhan depremi, 1992 Erzincan depremi ve 1983 Erzurum depremi ülkemizde son yıllarda yaşanan depremlere örnek verilebilir. Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesinin verilerine göre ülkemiz ve yakın çevresinde 2008-2017 yılları arasında büyüklüğü 6,0 ve 6,0'dan büyük ( $M \geq 6,0$ ) toplam 17 adet deprem yaşanmıştır (<http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/deprem-verileri/yillik-deprem-haritalari/>).

Sıvılaşma üzerine etkili bir diğer unsur da deprem gibi çevrimli dinamik yükler altındaki zeminlerin gösterdiği davranışların çok iyi ortaya konması gerekliliğidir. Dünya'da ve Türkiye'de son yıllarda yaşanan birçok büyük depremin yapısal hasarların oluşması üzerindeki etkisi dolayısıyla da bu önemli konu bir kez daha ortaya çıkmıştır (Erken vd., 2004).

Yapının sağlamlığı, kullanım süresini ve kalitesini etkileyen bir çok parametre mevcuttur. Tüm parametrelerden en önemlilerinden biri de yapı temellerinin oturduğu zemindir. Çünkü, yapının diğer bileşenleri ne kadar ince ayrıntısına kadar hesap yapıp oluşturulsa da yapı temelinde oluşacak zemine bağlı hasarlar yapının sağlamlığını, kullanılabilirliğini, kullanım süresini doğrudan etkileyecektir. Yapıların tekrarlı dinamik yükler altında aldığı zararın, yapının mevcut zemin şartlarından ciddi düzeyde etkilendiği açıktır. Bu bağlamda en olumsuz özelliklere sahip zemin türü, yer altı su seviyesinin altında yer alan suya doymun olarak tabir edilen yüksek miktarda kum muhteva eden birimler veya kum tabakalardır. Bu tür zeminler deprem gibi çevrimli dinamik yükler altında sıvılaşarak ciddi can ve mal kayıplarına sebebiyet verebilecek zararlara yol açabilmektedir (Mollamahmutoglu ve Babuçu, 2006).

## **1.1 Çalışmanın Amacı**

Bu tez çalışmasının amacı tekrarlı dinamik yüklemeler esnasında zemin tabakalarında oluşabilecek sıvılaşma ve sıvılaşma sebebiyle meydana gelebilecek hasar tiplerinden olan yanal yayılmanın tahmin yöntemlerini incelemek, karşılaştırmak ve bu unsurların zemine olan etkilerini ortaya koymaktır. Seçilen inceleme alanındaki zemin koşulları ve inceleme alanına ait saha ve laboratuvar deney verileri doğrultusunda "Basitleştirilmiş Yöntem" yaklaşımı kullanılarak sıvılaşma analizi yapılmıştır. Ayrıca sıvılaşma sebebiyle meydana gelebilecek hasar tiplerinden olan yanal yayılma ile ilgili

daha önce yapılmış çalışmalar incelenmiştir. Seçilen inceleme alanına ait saha ve laboratuvar deney verileri kullanılarak 3 farklı model ile yanal yayılmada yatay deplasman miktarı tahmini yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar grafiklerle karşılaştırılmıştır.

## **1.2 Çalışmanın Kapsamı**

Bu tez çalışması 7 ana bölümden oluşmuştur.

İlk bölümde ilgili konuya genel giriş yapılmış, çalışmanın amaç ve kapsamı hakkında bilgi verilmiştir.

İkinci bölümde sıvılaşmanın tanımı, sıvılaşma ile ilgili önemli kavramlar, sıvılaşma mekanizması, sıvılaşmaya etki eden faktörler ve sıvılaşma nedeniyle meydana gelen problemler hakkında bilgi verilmiştir.

Üçüncü bölümde çalışmada kullanılacak “Basitleştirilmiş Yöntem” yaklaşımı ile sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi ile ilgili bilgi verilmiştir.

Dördüncü bölümde sıvılaşma sonucu oluşabilecek hasar tiplerinden olan yanal yayılma ve yanal yayılmada yatay deplasman miktarının tahmin edilmesinde kullanılan modeller hakkında detaylı bilgi verilmiştir.

Beşinci bölümde tez kapsamında seçilmiş bir çalışma alanında daha önce yapılan saha ve laboratuvar deney sonuçlarına bağlı zemin koşulları ortaya konulmuştur. Tez çalışması kapsamında seçilen alan ile ilgili jeolojik yapı ve geoteknik özellikler açıklanmıştır. Bu bölümde tüm bu verilen veriler kullanılarak “Basitleştirilmiş Yöntem” yaklaşımıyla sıvılaşma güvenlik katsayısı hesaplama çalışması yapılmıştır.

Altıncı bölümde yanal yayılmada yatay deplasman miktarlarının tahmin edilmesi konusunda 3 farklı deneysel metoda ait hesaplamalar bulunmaktadır. Hesaplanan değerler grafik halinde gösterilmiş ve ulaşılan değerler karşılaştırılmıştır.

Yedinci bölümde çalışma kapsamında ulaşılan sonuçlar ve konu ile ilgili ilerleyen zamanlarda yapılacak çalışmalar için görüş ve öneriler bulunmaktadır.

En son bölümde ise çalışmada kullanılan her türlü veri, şekil ve çizelgeler ekler halinde sunulmaktadır.





## 2. ZEMİNLERDE SIVILAŞMA

Türkiye'nin yer aldığı coğrafya tarih boyunca coğrafi konumu sebebiyle birçok doğal afete maruz kalmıştır. Ülkemiz coğrafyasında yaşayan insanların büyük bir bölümü Türkiye'nin deprem kuşağında yer alması nedeniyle halen büyük bir risk altındadır. Çalışmalar sonunda etkilenen kişi sayısı ile zarar gören yaşam birimi sayısı baz alındığında ülkemizde en çok etki eden doğal afetin deprem olduğu ortaya konmuştur. Yapılan araştırmada doğal afet mağduru afetzedelerin %58'ini depremden etkilenenlerin oluşturduğu görülmektedir (Kundak ve Kadioğlu, 2011).

Büyük can ve mal kayıplarına neden olan deprem tehlikesine karşı güvenlik tanımı 2 ana madde de toplanabilir; ilki potansiyel şiddetli dinamik yüklere karşı yapı güvenliği, ikincisi ise yapı ve oturduğu zeminin deprem gibi oluşumların oluşturduğu dinamik kuvvetler etkisindeki davranışdır. Üst yapıda oluşturulan sistem ne kadar statik açıdan sağlam olursa olsun yapının oturduğu zeminde oluşabilecek problemlere önlem alınmazsa yapının zarara uğraması olasıdır. Bu sebeple deprem sebebiyle oluşan tehlikeyi minimuma indirmek ve dinamik yükler altında yapıların güvenliğini arttırmak için suya doygun ince daneli zeminlerde oluşan sıvılaşma davranışını bilmek son derece önemlidir (Esin ve Ceryan, 2015).

Sıvılaşma olgusu ciddi bir zemin problemi olması neticesinde geoteknik deprem mühendisliğinde üzerinde birçok araştırma yapılan ve ilgilenilen alanlardan birisi olmuştur.

### 2.1 Sıvılaşmanın Tanımı

Zeminde sıvılaşma, deprem nedeniyle oluşan çevrimli kayma gerilmesinin etkisi ile yer altı su seviyesinin altında, gevşek özelliğe sahip, kohezyonsuz ve yeterli drenaj imkanı bulunmayan şartlarda zeminlerde, yükselen boşluk suyu basıncı ve düşen efektif gerilme sonucu kayma mukavemetinin belli bir kısmını veya tamamını kaybetmesi adeta katı faz durumundan sıvı faz durumuna dönüşmesi olarak açıklanmaktadır (Mert, 2018). Yükleme çevrimlerinin boşluk suyunun drene olamayacak kadar çabuk olmasından dolayı boşluk suyu drene olamamakta ve bu durum da sıkışmaya zorlanan suda basınç artışlarının yaşanmasına sebebiyet vermektedir.

Sıvılaşma kavramı ile ilgili şu tanım mevcuttur.

Yeraltı su seviyesinin yüzeye yakın olduğu, suya doymun kum tabakalarında, sismik hareketler sırasında boşluk suyu basınçlarının yükselmesi sıvılaşma olarak tanımlanan bir olaya sebebiyet vermektedir. Bu durumda kum tabakası, kısa bir süre için viskoz bir sıvı haline dönmekte ve bu tabakaya oturan yapılarda ciddi boyutlarda oturmalar, tabaka içinde bulunan su ve yakıt depoları gibi yapılarda ise yüzeye doğru hareketler, şevlerde ise kaymalar meydana gelmektedir (Erken ve Ansal,1994).

Bir diğer tanım ise “Sıvılaşma, suyun zemin ortamından uzaklaşmadığı koşullar altında geçici veya tekrarlamalı şekilde örselenmesi nedenli zemin deformasyonlarını içine alan davranış biçimlerinin tümü için kullanılır.” şeklindedir (Ulusay,2000).

Zemin sıvılaşması sonucu boşluk suyu basıncı artışı ve efektif gerilme azalışı ve bu iki olgunun karşılıklı değişimi ani mukavemet kaybına neden olur. Boşluk suyu basıncı artışı zeminin sıkışma isteğinden kaynaklanmaktadır. Zemindeki ani rijitlik kaybı ve dayanım azalması taşıma gücünün düşmesine dolayısıyla zeminde ciddi yer değiştirmeye ve zeminin üzerinde yer alan yapıda hasarlara yol açabilir. Sıvılaşma olarak tanımlanan bu olgu geoteknik mühendisliğinin üzerinde çalışılması gereken en önemli konularından birisidir.

Zemin mekaniği kurucusu sayılan Terzaghi (1925)'e göre “sıvılaşma, suya doymun zeminin çökmesi sırasında zemini oluşturan katı parçacıkların ağırlığının zemini çevreleyen suya aktarılması durumunda oluşabilir. Bu olay sonunda zeminin herhangi bir derinliğinde hidrostatik su basıncı artarak büyüklüğü suya batan zeminin birim ağırlığına yaklaşır.” (Castro, 1969).

Terzaghi ve Peck (1948) çok gevşek kumların birden bire güç kaybı yaşaması ve az örselenmeyle kayma akışına “kendinden sıvılaşma” tabirini kullanmışlardır. Ancak “sıvılaşma” tabiri ilk defa Mogami ve Kubo (1953) tarafından ortaya atılmıştır.

NCEER (1997) ise sıvılaşma için, “Sıvılaşma, granüler zeminde artan boşluk suyu basıncı ve azalan efektif gerilme sonucu katı durumdan sıvı duruma dönüşme olarak açıklanabilir. Bahsedilen dönüşüm, düşük geçirimli, gevşek yerleşimli, kum muhteva eden zeminlerde ortaya çıkmaktadır. Bu durum büyük kayma şekil değişikliklerine sebebiyet vermektedir.” tanımını yapmıştır.

## 2.2 Sıvılaşma Tarihsel Sürec

Tüm dünyada zemin mekaniğinin kurucusu olarak kabul edilen Karl Terzaghi hayatının belli dönemini geçirdiği (1916-1925) İstanbul'da önemli araştırmalar yapmış, bu araştırmalar sonucu bazı teoriler geliştirmiştir. Terzaghi'nin araştırmalarında diğer birçok bulgunun yanında en önemli sonuçlardan bir tanesi zeminlerde efektif gerilme ve boşluk suyu basıncı arasındaki bağlantıyı ortaya çıkarması kabul edilir. Tarihte ilk olarak Terzaghi tarafından ortaya konan efektif gerilme ve boşluk suyu basıncı kavramları, sıvılaşma mekanizmasının temelinde önemli yer alır.

1938 tarihli Montana Fort Peck, 1920 tarihli California Calvers, 1948 tarihli Fukui, 1964 tarihli Niigata, 1971 tarihli California San Fernando, 1964 tarihli Alaska depremleri sıvılaşma kaynaklı hasarların görüldüğü örnekler olarak sıralanabilir (Çetin ve Unutmaz, 2004). Bu depremlerde sismik kaynak nedeniyle oluşan sıvılaşmanın çok ciddi örnekleri gözlenmiştir. Hastane, nükleer santral, askeri yapılar, barajlar vb. hayati yapıların tasarımında sıvılaşma ihtimali önemli bir mühendislik problemi olarak yer bulmaya başlamış ve hesaplamalarda yer almaya başlamıştır (Tezcan ve Özdemir, 2004).



**Şekil 2.1** : San Fernando (1971) depreminde sıvılaşma sonucu oluşan hasarlar (Kramer, 1996).



**Şekil 2.2 :** Alaska (1964) depreminde sıvılaşma sonucu köprüde oluşan hasar (Kramer, 1996).

Ülkemizde sıvılaşma olayının öneminin farkedilmesi ise 1993 yılında yaşanan Erzincan depremiyle birlikte olmuştur (Aydan vd., 2000). Daha sonra yaşanan 1999 tarihli Gölçük ve Düzce depremleri, 2011 tarihli Van depremi ile birlikte yapılarda sıvılaşma kaynaklı birçok hasar görülmüş olması bu olgunun önemini bir kez daha gözler önüne sermiştir.

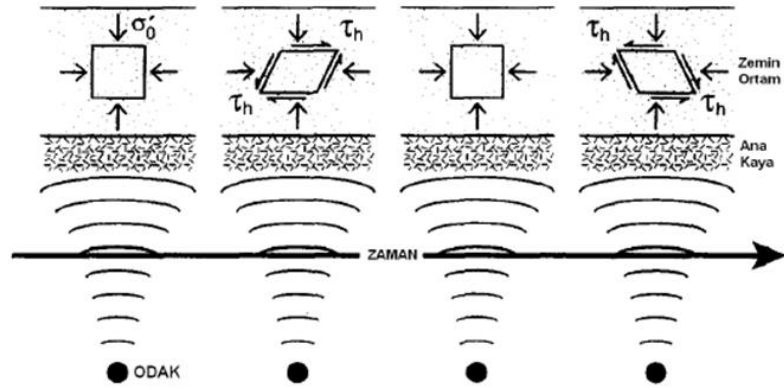


**Şekil 2.3 :** Van (2011) depreminde sıvılaşma ve yatay deformasyon örneği (İTÜ/EEDMI, 2011).

### 2.3 Tanımlayıcı Kavramlar

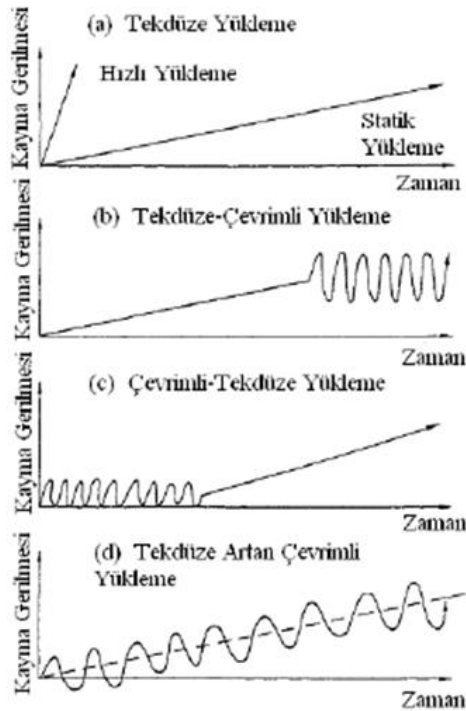
Zeminlerin statik yükleme altındaki davranışlarının dinamik yükleme altındaki davranışlarından farklı olabileceği sıvılaşma ile ilgili tanımların yapılmasında kullanılan temel argümanlardan birisidir. Çevrimli yükleme altında bulunan zeminin yükleme durumu statik koşullarda yükleme durumunda olan zemin durumuna göre farklılık göstermektedir (Nas, 2013).

Yer kabuğundaki deprem nedeniyle oluşan kayma dalgalarının farklı formlarda zemine etkilemesiyle birbirinden farklı özelliklere sahip kayma gerilmeleri oluşmaktadır. Bu oluşan kayma gerilmeleri sonucu sıvılaşma potansiyeli mevcut zeminlerde sıvılaşma görülmektedir.



**Şekil 2.4 :** Sıvılaşmaya neden olan çevrimsel yükleme şartlarının oluşması (Obermeier, 1996).

Zeminlerin farklı yük altındaki davranışlarını daha iyi anlamak için kullanılan farklı yükleme şekilleri Şekil 2.5'te görülmektedir. Farklı yükleme ve zaman parametrelerinde zeminde kayma gerilmeleri değişmekte ve buna bağlı olarak şekil değiştirme oranları da değişmektedir (Ishihara, 1996).



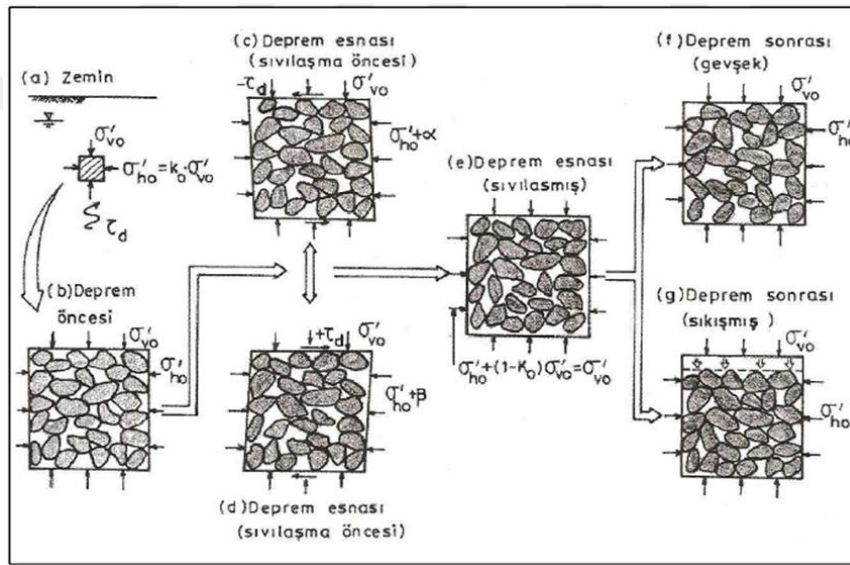
**Şekil 2.5 :** Zemin mekaniğinde kullanılan yükleme şekilleri (Ishihara, 1996).



Bir zeminin sıvılaşma potansiyeli olması herhangi bir depremin meydana gelmesiyle bu zeminde sıvılaşma yaşanacağı anlamına gelmemektedir. Sıvılaşmanın gerçekleşebilmesi için yeterince güçlü bir tetikleme gerekir. Sıvılaşma potansiyel tehlike hesaplarının en önemli bölümlerinden biri bu tetikleme yapısının değerlendirilmesidir (Kramer, 1996).

## 2.4 Sıvılaşma Mekanizması

Deprem öncesinde; suya doygun, gevşek kum muhteva eden zemine, düşey basınç ( $\sigma'v$ ) ve yatay basınç ( $\sigma'h$ ) gerilmeleri Şekil 2.6'da gösterildiği gibi etkimektedir.



Şekil 2.6 : Sıvılaşma oluşum mekanizması (Tosun, 2002).

Sismik hareketlerden dolayı oluşan kısa süreli ve ani hareketler nedeniyle danecikler arasındaki su kısa zamanda dışarı çıkamamaktadır. Böylece drene olamayan boşluk suyu basıncı bir anda artmaktadır. Boşluk suyundaki bu ani artış zemin danelerini beraber tutan kuvvetleri yok eder ve daneleri birbirinden ayırır. Bu durumda dayanımını yitiren zemin viskoz bir sıvı gibi davranmaya, hareket etmeye başlar.

Statik şartlarda;

$$\sigma'v = \sigma v - u_s \quad (2.1)$$

Dinamik şartlarda;

$$\sigma'v = \sigma v - (u_s + u_d) \quad (2.2)$$

$$(u_s + u_d) = \sigma v \Rightarrow \sigma'v = 0 \quad (2.3)$$

$\sigma_v$  : toplam gerilme

$\sigma'_v$  : efektif gerilme

$u_s$  : statik durumda boşluk suyu basıncı

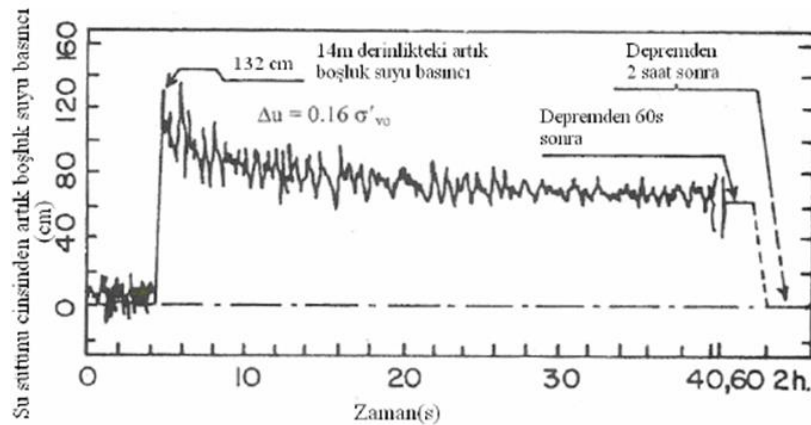
$u_d$  : dinamik durumda boşluk suyu basınç fazlalığı

## 2.5 Sıvılaştırma-Efektif Gerilme İlişkisi

Hem deneysel hem de teorik zemin mekaniği açısından önemli konulardan biri drenaj imkanı olmayan ortamda ve farklı yükleme şartlarında zemindeki boşluk suyu basınç artışıdır. Eğer zeminin geçirgenlik katsayısı düşük ve yükleme hızı yüksek ise boşluk suyunun drene olması için yeterli süre olmaz. Bu durumda zemindeki hızlı ve ciddi miktarlarda boşluk suyu artışlarına neden olur. Yüklemin yeterince uzun zamana yayıldığı durumda ise boşluk suyu zeminden tahliye olur (Das, 2008).

Efektif gerilme olarak tabir edilen prensip genel olarak zeminin etkileyen toplam basıncın, zeminde tanecikler arasında meydana gelen efektif gerilme ile su basıncının toplanmasıyla karşılanacağı şeklinde söylenebilir (Özudoğru, 2003).

Suya doymun sıvılaştırılabilir zeminlerde sismik hareketler sebebiyle boşluk suyu basınç artışı yaşanabilir. Şekil 2.7’de Mino-Owari (Japonya) depremine ait zemindeki boşluk suyu basıncının zaman ile gelişimi görülmektedir. Deprem sırasında ölçülen maksimum boşluk suyu basıncı 132 cm su sütunu ve ölçülen pik ivme ise 0,10g’dir. Ölçülen bu boşluk suyu basıncı değeri, ölçülen derinlikteki düşey efektif gerilmenin %16’sı olup, sismik hareket süresince azalan boşluk suyu basıncının sismik hareketin bitmesinden ancak 2 saat sonra sönümlendiği görülmektedir (Ishihara, 1981).



Şekil 2.7 : Mino-Owari depremi esnasında artık boşluk suyu basıncının değişimi (Ishihara,1981).

Dayanımını ciddi oranda kaybeden zeminin, artık boşluk suyu basınçlarının 2 saate varan uzun sürede sönümlenmesiyle birlikte daha fazla deformasyonlara maruz kalmasına neden olarak zemin üzerindeki yapıların hasar görmesine sebep olmaktadır.

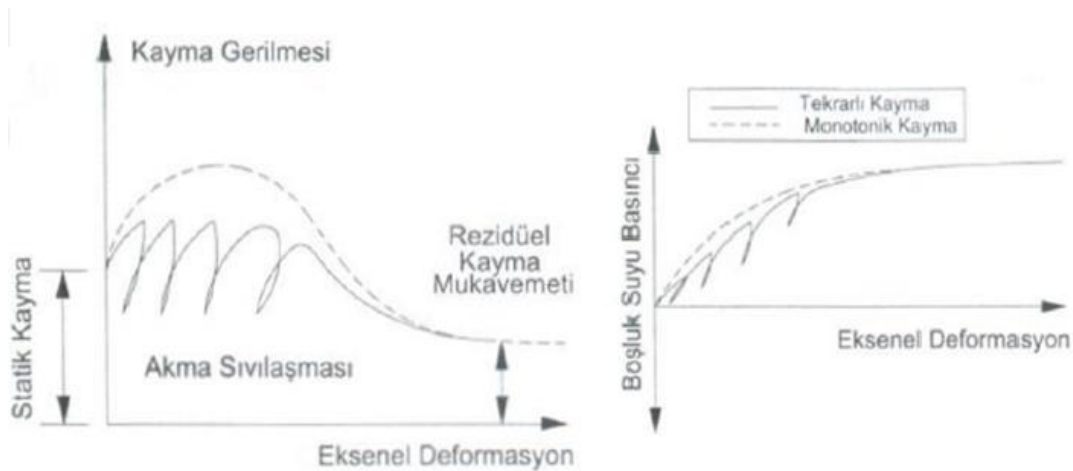
Sıvılaşma olgusu temelinde sismik hareketin nedeniyle zemin efektif gerilmesinin azalarak sıfıra yaklaşması ve belli bir süre içerisinde boşluk suyu basıncının normal duruma dönmesiyle efektif gerilmenin tekrar yükselmesi esasına dayanır. Sıvılaşma esnasında boşluk suyu basıncını ve efektif gerilme değerini etkileyecek olan her değişken sıvılaşma direncine ve düzeyine etkidiği düşünülmektedir (Emiroğlu, 2018).

## 2.6 Sıvılaşma Türleri

Sıvılaşmanın sebep olduğu hasarların çeşitlerine bakıldığında, sıvılaşma türlerinin “akma türü sıvılaşma” ve “çevrimsel hareketlilik” olmak üzere 2 başlık altında toplandığı görülmektedir.

### 2.6.1 Akma türü sıvılaşma

Ciddi hasarların görüldüğü akma türü sıvılaşma, sıvılaşmış zeminin rezidüel dayanımının zeminin statik dengesi için zarüri kayma gerilmelerinden daha düşük olduğu şartlardan oluşur. Genel olarak çok hızlı bir şekilde ortaya çıkan, çabuk gelişen ve büyük zemin kütlelerinin ciddi miktarda şekil değiştirme yapması biçiminde oluşan sıvılaşma türü, bir kez başladıktan sonra tümüyle statik kayma gerilmeleri tarafından devam ettirilir. Bu tür sıvılaşma sonucu oluşan büyük şekil değiştirmelerinin nedeninin statik kayma gerilmeleri olduğu ifade edilebilir (Kramer, 1996).

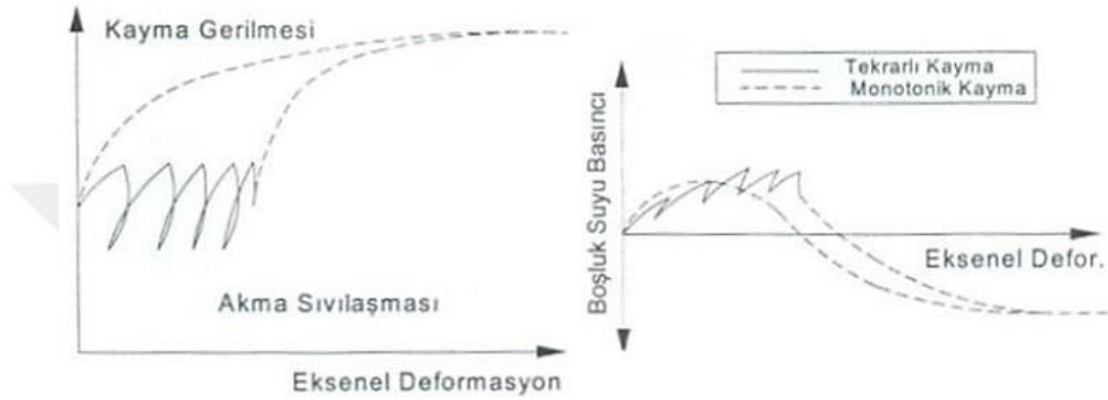


**Şekil 2.8 :** Yeraltı su seviyesinin altında, gevşek zeminin drenajın yeterli olmadığı durumlarda davranışı (Mollamahmutoglu ve Babuçu, 2006).



## 2.6.2 Çevrimsel hareketlilik

Sismik hareketler nedeniyle oluşan, çevrimsel hareketlilik olarak adlandırdığımız bu sıvılaşma türünde devasa ve kalıcı deformasyonlar, buna bağlı yıkıcı hasarlar meydana gelmektedir. Bu tür sıvılaşma, sıvılaşmış zeminin rezidüel dayanımının zeminin statik dengesi için zaruri kayma gerilmelerinden büyük olduğu durumda oluşmaktadır. Çevrimsel hareketlilik tipi sıvılaşmada büyük şekil değiştirmelerin sebebi çevrimsel gerilmeler ve statik kayma gerilmeleridir.



**Şekil 2.9 :** Yeraltı su seviyesinin altında sıkı zeminin drenajın yeterli olmadığı durumlardaki davranışı (Mollamahmutoglu ve Babuçcu, 2006).

Zeminde ciddi hasarlara neden olabilen akma sıvılaşması ve çevrimsel hareketlilik türlerinin sıvılaşma potansiyellerinin ayrı ayrı ele alınması sıvılaşma tehlikesinin kusursuz şekilde değerlendirilmesi için gereklidir. Zeminde deprem hareketi kaynaklı en çok görülen sıvılaşma çeşidi çevrimsel hareketliliktir. Bu nedenle zeminin sıvılaşması çalışmalarında çevrimsel hareketlilik konusunda sıvılaşmayı tetikleyen sebeplerin bulunması için çalışmalar yapılmaktadır (NCEER, 1997).

## 2.7 Sıvılaşmaya Etki Eden Faktörler

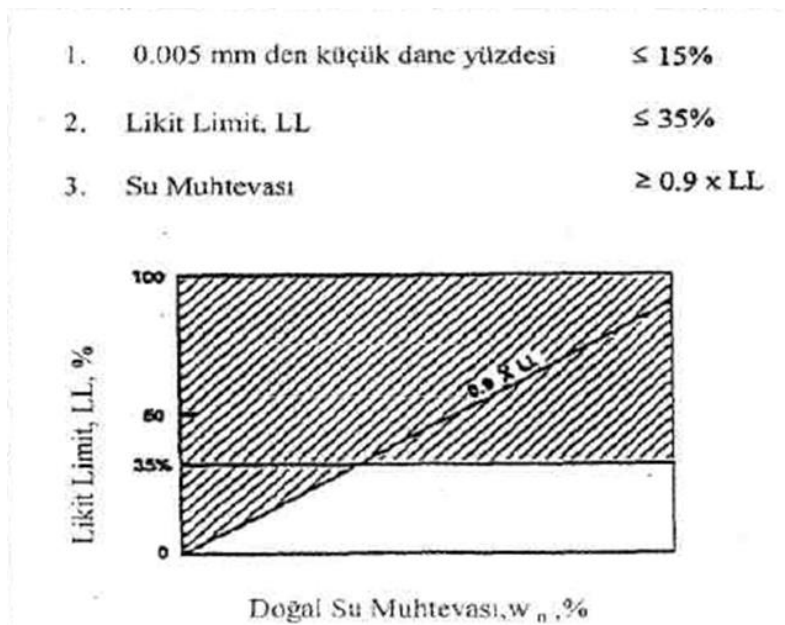
Bir zeminin sıvılaşabilirlik durumunu belirleyen ve zeminin sıvılaşma kabiliyetine karar verirken değerlendirilen çeşitli araştırmacılar tarafından yapılan laboratuvar ve arazi çalışmalarına bağlı bazı parametreler mevcuttur. Bu parametreleri genel olarak zemin özelliklerine bağlı faktörler ve sismik harekete bağlı faktörler olmak üzere 2 gruba ayrılabilir. Zemin özelliklerine bağlı faktörleri zemin cinsi, dane özellikleri ve şekli, zeminin sıklık derecesi, zeminin drenaj koşulları ve yer altı su seviyesi olarak sıralanabilir. Sismik harekete bağlı faktörleri ise sismik geçmiş, deprem büyüklüğü ve süresi olarak sayılabilir.

### 2.7.1 Zemin cinsi

Zeminde sıvılaşma analizinde yapılacak başlangıç adımı söz konusu zemin profilinde sıvılaşma potansiyeli olan zemin gruplarının olup olmadığının tespit edilmesidir. Bunun için tüm bu zemin gruplarının sıvılaşma kabiliyetlerinin bilinmesi gerekir (Çetin ve Unutmaz, 2004).

Çeşitli araştırmacıların yaptığı birçok tanımda da belirtildiği gibi kohezyonsuz zeminlerin sıvılaşmaya daha yatkın zeminler oldukları uzun yıllardır bilinmektedir. Kohezyonsuz zeminlerin sıvılaşma potansiyellerini en çoktan en aza doğru sıralamak gerekirse; temiz kumlar, plastik olmayan siltli kumlar, plastik olmayan silt ve çakıllar olduğu söylenebilir (Day, 2002; Özaydın, 2007).

Kohezyonlu, ince daneli, silt ve kil karışımlarının sıvılaşma potansiyelleri ile ilgili konu gerek ulusal gerekse uluslararası toplantılarda birçok defa tartışılmış ve henüz net bir sonuca ulaşılmamış olup tartışmalı durum devam etmektedir. Sıvılaşma olgusunun tanımındaki farklılıklar bu konudaki görüş ayrılıklarının temelini oluşturur (Çetin ve Unutmaz, 2004). Düşük plastisiteli, ince daneli zeminlerin sıvılaşma potansiyelleri hususunda birçok bilim insanı tarafından kullanılan geliştirilmiş Çin kriterine (Wang, 1979) göre, zeminin likit limit (LL) değerinin %35'den küçük olması, zeminin kil yüzdesinin %15'ten küçük olması ve su muhtevasının ( $w_n$ ) likit limit değerinin %90'ından daha küçük olmaması durumunda zeminlerin sıvılaşabileceği söylenmiştir (Şekil 2.10).



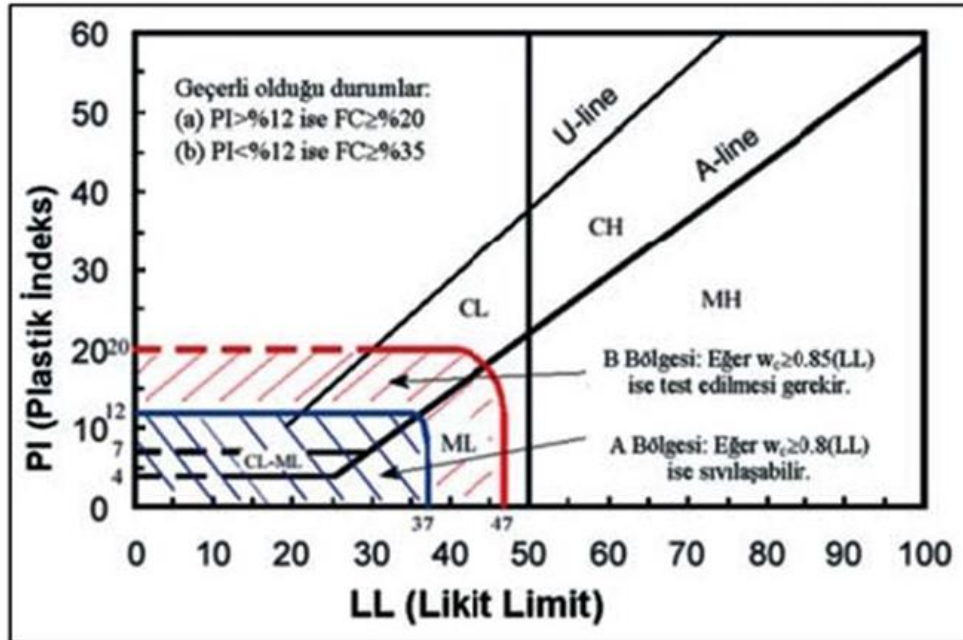
Şekil 2.10 : Geliştirilmiş Çin kriteri (Finn vd.,1994).

Kum, silt ve kil karışımlarının sıvılaştırma potansiyellerinin belirlenmesi hakkında Andrew ve Martin (2000) tarafından yapılan çalışma sonucunda ulaşılan sonuçlar Çizelge 2.1’de gösterilmiştir.

**Çizelge 2.1:** Siltli ve killi kumların sıvılaştırma özelliği (Andrew ve Martin, 2000).

	Kil içeriği < %10	Kil içeriği ≥ %10
LL < 32	Sıvılaştırabilir	İleri çalışma gerekir
LL ≥ 32	İleri çalışma gerekir	Sıvılaştırmaz

Yapılan tüm çalışmalar sonunda elde edilen sonuçları kullanarak, Seed vd. (2003) tarafından ince daneli zeminlerin sıvılaştırabilirliği ile ilgili Şekil 2.11’de gösterilen çalışma ortaya konmuştur.

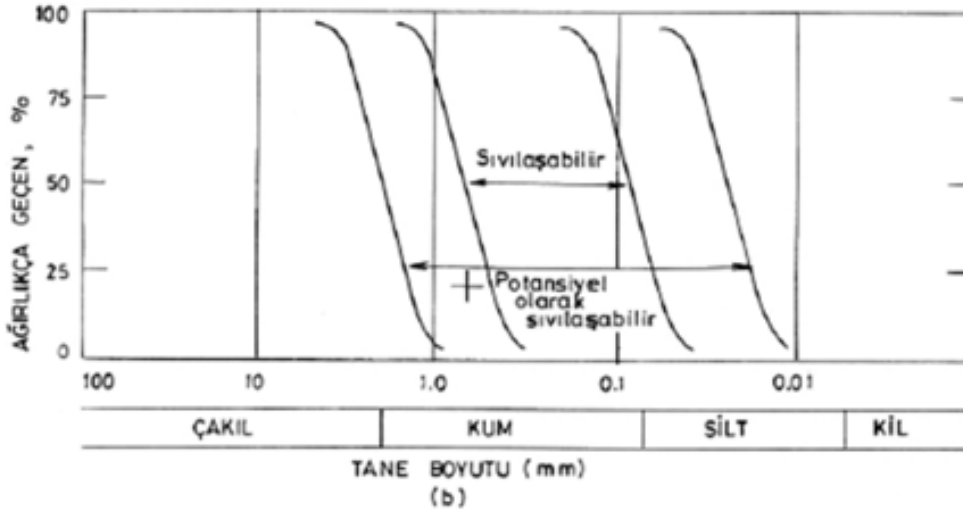
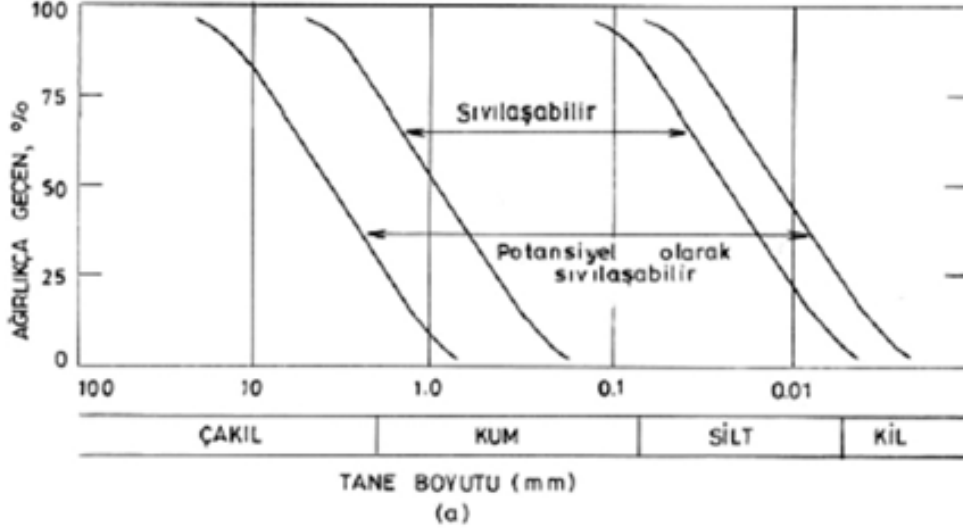


**Şekil 2.11 :** Sıvılaştırma potansiyelinin değerlendirilme grafiği (Seed vd.,2003).

### 2.7.2 Zeminin dane özellikleri ve şekli

Çevrimli yüklemeler sonucu artık boşluk suyu basıncının oluşması sebebiyle meydana gelen sıvılaştırmanın değerlendirilmesinde hacim değişimi ve su geçirgenliği üzerinde etkisi kabul edilen dane özellikleri ve şeklinin etkisi mevcuttur (Özaydın, 2007).

Sıvılaştırmaya müsait zeminler olarak gevşek durumda bulunan, temiz (herhangi kil, silt veya bağlayıcı madde muhteva etmeyen), kohezyonsuz kumlar gösterilebilir. Şekil 2.12’de iyi derecelenmiş ve kötü derecelenmiş zeminler için sıvılaştırmaya müsait dane boyutu aralıkları gösterilmektedir.



**Şekil 2.12** : Sıvılaşmaya duyarlı dane boyutu aralığı (Iwasaki, 1986).

Köşeli zemin danelerini muhteva eden zeminler yuvarlak zemin daneleri muhteva eden zeminlere göre daha zor sıkışma özelliğine sahiptir. Bu sebeple yuvarlak zemin daneleri muhteva eden zeminler köşeli zemin daneleri muhteva eden zeminlere göre sıvılaşmaya karşı daha duyarlı olduğu söylenebilir (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006). Temiz kuma yuvarlak şekilli tozlar ilave edildiğinde sıvılaşma potansiyelinde ciddi bir artışın yaşandığı ve artışın nedeninin danelerin sertliğinden çok şeklinden kaynaklandığı görülmüştür (Wei ve Yang, 2014).

### 2.7.3 Zeminin sıklık derecesi

Boşluk suyu oluşumunda ve sonrasında zeminin sıvılaşma potansiyeli hususunda önemli etkilerden biri de zemin danelerinin sıklık derecesidir.

Relatif sıklık oranı – zemin sınıflandırması ilişkisi Çizelge 2.2’de gösterilmiştir.

**Çizelge 2.2:** Relatif sıklık oranına göre zemin sınıflandırması (Uzuner, 2012).

Relatif Sıklık (Dr)	Zemin Sıklık Durumu
0-15	Çok gevşek
15-35	Gevşek
35-65	Orta Sıkı
65-85	Sıkı
85-100	Çok sıkı

Seed ve Idriss (1971) çalışmalarında zeminin relatif sıklığı ile sıvılaşabilirliği arasında, pik yer ivmesinin büyüklüğüne göre bir bağıntı ortaya koymuştur. Bu bağıntıya ait sınıflandırma Çizelge 2.3’de gösterilmiştir. Bu bağıntıya göre zeminler az riskli, orta riskli, yüksek riskli ve çok yüksek riskli olmak üzere 4 bölgede değerlendirilmiştir.

**Çizelge 2.3:** Sıvılaşmaya relative sıklık ve pik yer ivmesinin etkisi (Seed ve Idriss, 1971).

Pik Yer İvmesi	Sıvılaşabilirlik			
	Az	Orta	Yüksek	Çok Yüksek
0,10 g	Dr > %54	%33<Dr<%54	%17<Dr<%33	Dr < %17
0,15 g	Dr > %73	%48<Dr<%73	%22<Dr<%48	Dr < %22
0,20 g	Dr > %85	%60<Dr<%85	%28<Dr<%60	Dr < %28
0,25 g	Dr > %92	%70<Dr<%92	%37<Dr<%70	Dr < %37

#### 2.7.4 Zeminin drenaj koşulları

Suya doymuş, kohezyonsuz, gevşek zeminlerde sıvılaşma potansiyeline sebep olan unsur, drenajın yetersiz olduğu şartlarda boşluk suyu basıncının artması sonucunda efektif gerilmenin azalması durumudur. Boşluk suyu basıncındaki artışın ivedi şekilde sönmelenmesi zeminde sıvılaşmanın oluşmamasını sağlayabilir. Ancak zemin grubunun üzerinde daha az geçirimli başka zeminin olması sismik hareket sırasında artan boşluk suyu basıncının eski haline dönmesi için gerekli drenaj süresini uzatacağından zemindeki sıvılaşabilirliği arttıracaktır (Çavuş, 2015).

### 2.7.5 Yer altı su seviyesi

Yer altı su seviyesinin zemin üst yüzeyine yakın olması sıvılaşma potansiyelini arttırmaktadır. Eğer yer altı su seviyesi, zamana bağlı değişken bir hale sahipse zeminin sıvılaşma riski de aynı paralellikte değişkenlik gösterir. Bu tip durumlarda genel olarak zeminin en sık durumdaki yer altı su seviyesine göre potansiyel sıvılaşma analizi yapılır (Kumar,2008).

Obermeier (1996), yer altı su seviyesinin zemin yüzeyinden sık olduğu olduğu şartta, sıvılaşabilirlik için 2 m-4 m arasında optimum şartların bulunduğunu ifade etmiştir. Yer altı su seviyesinin üstünde bulunan zeminlerde sıvılaşma mümkün olmadığı için bu zeminler sıvılaşma potansiyeli hesabında değerlendirilmemektedir.

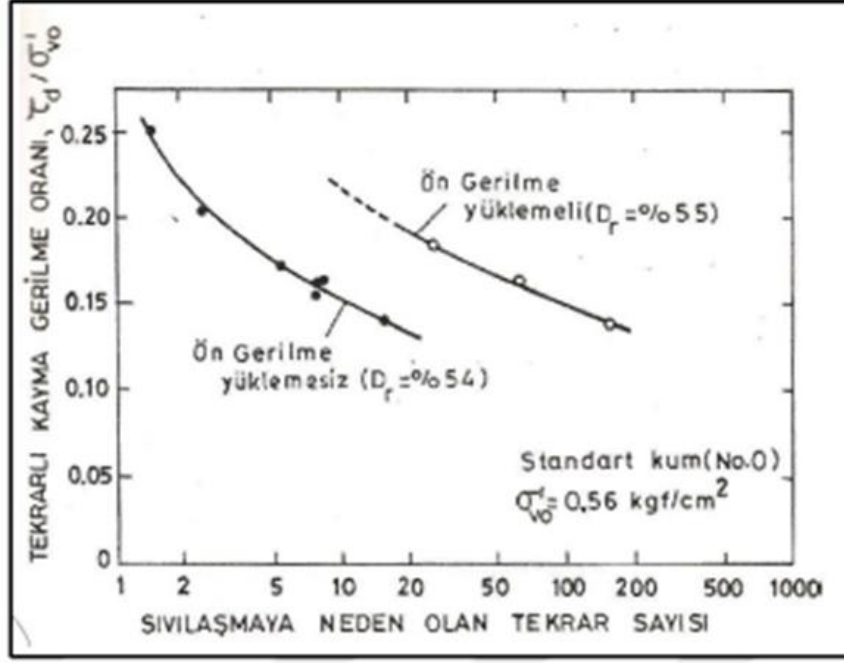
### 2.7.6 Deprem büyüklüğü ve süresi

Sıvılaşmanın temelinde yer alan tekrarlı kayma gerilmeleri sonucu artan boşluk suyu basıncı deprem esnasında meydana gelen sismik enerji nedeniyle gerçekleşir. Deprem büyüklüğü pik yer ivmesi meydana getirmesiyle doğru orantılıdır. Maksimum yer ivmesinin büyük oluşu da sıvılaşma riskini arttıran bir parametre olduğundan dolayı sıvılaşma ile deprem büyüklüğünün doğru orantılı olduğu aşıkardır. Dere (2009), yaptığı çalışmada deprem süresinin uzamasının zemine etkileyen tekrarlı gerilmelerin süresini arttıracığından sıvılaşma tehlikesi üzerinde ciddi derecede bir etken olduğunu belirtmiştir.

Deprem süresinin sıvılaşma üzerindeki en çarpıcı örneği 1964 Alaska depremi kabul edilmektedir ( $M_W = 9,2$  ;  $M_L = 8,4$  ; süre: 240 s). Sıvılaşmanın bu depremin son 150 saniyesinde meydana geldiği belirlenmiştir. Sismik hareketlerin oluşturduğu çevrimsel hareketliliğin sıvılaşmayı tetikleyecek hale gelmesi ancak son 150 saniyede olmuştur. Eğer deprem süresi 90 saniye ve altında olsaydı, böylesine büyük bir depremde teorik olarak herhangi bir sıvılaşma gözlenemeyebilirdi (Tezcan ve Özdemir, 2004).

### 2.7.7 Sismik geçmiş

Daha önce yapılan çalışmalar, her yönüyle aynı özelliklere sahip zeminlerden, titreşime maruz kalma geçmişi olanların yeni sismik hareketlerle birlikte diğer gruba göre daha fazla sıvılaşma direncini barındırdığını göstermiştir. Şekil 2.13'de çevrimli kuvvetler altında yüklenen kum tabakalarının sıvılaşmaya gösterdiği direncin, yüklemesiz duruma kıyasla daha büyük olduğunu göstermektedir (Tosun, 2002).



Şekil 2.13 : Sismik geçişin sıvılaşma direncine etkisi (Seed, 1976).

### 2.7.8 Yapı yükü

Yapının sıvılaşma direncini azaltabilen etkenlerden biri de yapı yükünün fazla olduğu bir yapının bir kum çökeli zemin birimi üzerine yapılması olarak kabul edilir. Büyük yükler oluşturan yapı nedeniyle temelin oturduğu zemine kayma gerilmeleri etkileyecektir. Zemin üzerine tesir eden kuvvetler nedeniyle zemin sıvılaşmaya hususunda daha hassas hale gelebilmektedir. Bunun nedeni olarak zeminin hacimsel kaybı ve buna bağlı olarak sıvılaşma için gerekli sismik kaynaklı ek gerilmelerin daha az olması söylenebilir (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006).

### 2.7.9 Yerleşim koşulları veya çökme ortamı

Su altında yerleşim yapılan yani hidrolik dolgular olarak tabir edilen dolgular su içerisinde düşen zemin parçacıklarının oluşturduğu kayıp ile genellikle gevşek ve dağınık zemin yapısı oluşturur. Bu durum nedeniyle bu tip dolguların sıvılaşmaya daha yatkın olduğu söylenebilir (Yıldız, 2011).

### 2.7.10 Yanal basınçlar

Yanal basıncın yüksek olması zeminin sıvılaşmaya daha az hassas olmasına neden olur. Daha büyük yanal basınç teşkil edebilecek koşullar; sıvılaşabilir zeminin çok derinde olması, daha derin yer altı su seviyesi ve zemin yüzeyine etkiyen sürşarj

yükleri olarak belirtilebilir (Day, 2002). Sıvılaşma olgusunun efektif gerilme kavramı ile bağlantılı olduğu bilinmektedir. Günümüze kadar yapılan arazi çalışmalarının gösterdiği bilgilere göre 15 m'yi geçen derinliklerde sıvılaşmış bir zemine rastlanmamıştır (Derinöz, 2004). Ancak bu durum 15 m derinliğin altında kalan zeminler için sıvılaşma analizinin yapılmasına gerek olmadığı sonucunu oluşturmaz. Özellikle kritik yapılarda daha derin zeminler için sıvılaşma analizi yapmak önemlidir.

### **2.7.11 Yaşlanma ve çimentolanma**

Sıvılaşmaya duyarlılık hususunda bir diğer etken zeminlerin yaşı ve çökme durumudur. Eski zemin çökellerinin sıvılaşmaya duyarlılığı, yeni çökelmiş zeminlerin sıvılaşmaya duyarlılığından daha azdır. Başka bir deyişle, genç zemin çökellerinin sıvılaşma hassaslığı, eski zemin çökellerine kıyasla daha büyüktür (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006). Yoshimi vd. (1989), uzun süre çevre basıncının etkilediği zeminlerin zamanla sıvılaşma direncinin artırdığını göstermiştir.

## **2.8 Sıvılaşmaya Sebebiyle Meydana Gelen Problemler**

Sıvılaşma nedeniyle oluşan büyük şekil değiştirmeler ve kayma mukavemeti kaybı bina, baraj, yol, köprü, istinat yapıları, boru hattı vb. yapılarda çeşitli problemlere sebep olabilir. Sıvılaşma sonucu oluşan problemleri taşıma gücü azalması, kum kaynaması, akma göçmesi, istinat yapısı yenilmesi, gömülü yapı yüzeylemesi ve yanal yayılma olmak üzere 6 ana başlıkta toplanabilir.

### **2.8.1 Taşıma gücü kaybı**

Boşluk suyundaki yükseliş nedeniyle zeminin mukavemetinin azalması ve sıvılaşma sırasında oluşan zemin yumuşamasından kaynaklanan problemler genel olarak taşıma gücü kaybı olarak adlandırılır (Cooke,2000). Bu duruma bağlı olarak zemin üzerindeki yapılarda batma, oturma, yan yatma veya devrilme gibi hasarlar ortaya çıkabilir. Şekil 2.14'de Adapazarı'ndaki bir yapının Gölcük depremi sırasında oluşan sıvılaşma nedeniyle oluşan taşıma gücü kaybına bağlı farklı oturmalar nedeniyle yapının devrildiği görülmektedir. Şekil 2.15'de ise 1964 Niigata depreminde sıvılaşma etkisiyle zeminde taşıma gücü kaybına bağlı olarak yapının devrildiği görülmektedir.





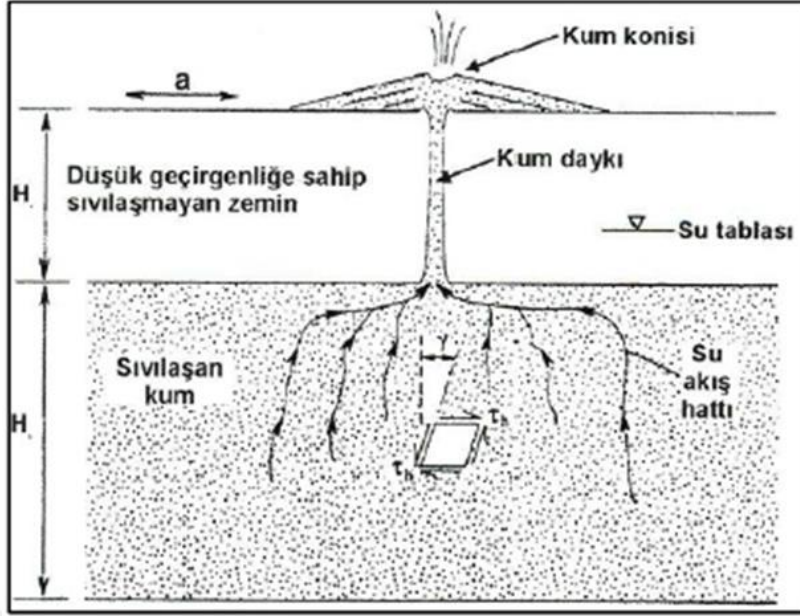
**Şekil 2.14 :** Adapazarı'nda sıvılaşma nedeniyle oluşan taşıma gücü kaybı ve farklı oturma nedeniyle devrilen yapı (Yasuda, 2004).



**Şekil 2.15 :** 1964'de Niigata'da yaşanan depremde sıvılaşma kaynaklı taşıma gücü kaybı sonucu yapıların devrilmesi (Day, 2002).

### 2.8.2 Kum kaynaması

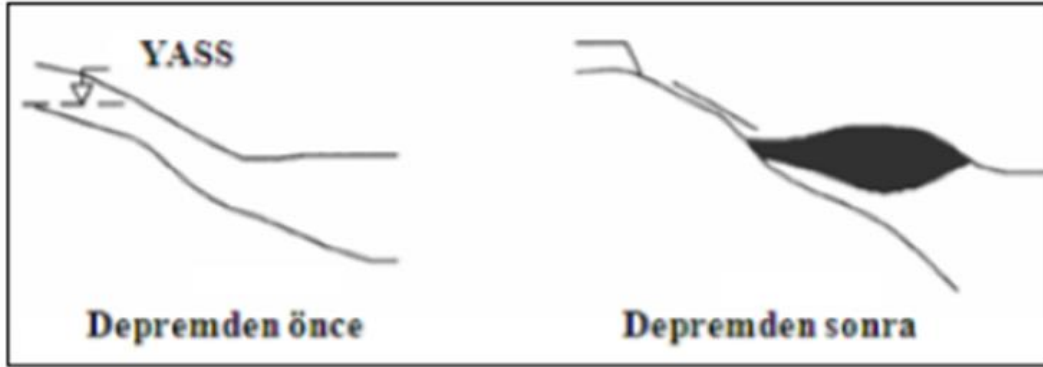
Deprem esnasında yükselen boşluk suyu basıncının tekrar eski haline dönme ihtiyacından dolayı boşluk suyu yukarıya doğru hareket etmektedir. Bu hareket zemin danelerini de yukarı yönde itmek isteyen kuvvetler oluşturur. Bu kuvvetler neticesinde, bir takım zemin danelerinin su ile birlikte hareket ederek yüzeye kadar taşınmasına ve yüzeyde bulunan çatlaklardan dışarı çıkarak yüzeyde kum konilerinin oluşmasına neden olur. Oluşan bu olaya da kum kaynaması adı verilir (Şekil 2.16).



Şekil 2.16 : Kum kaynaması oluşumu (Ulusay, 2000).

### 2.8.3 Akma göçmesi

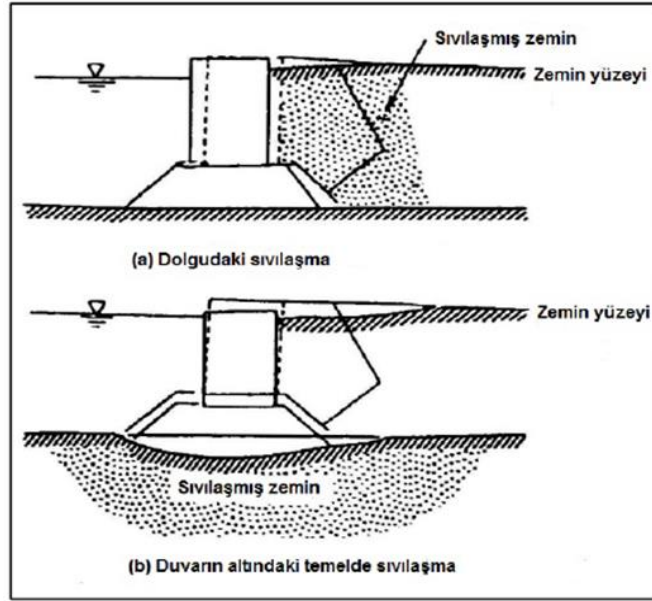
Sivilaşma nedeniyle ansızın ortaya çıkan büyük zarara yol açan göçme tipi olan akma göçmesi büyük zemin kütlelerinin çok kısa zaman periyodu içerisinde kayarak yer değiştirmesi olarak tanımlanabilir. Bu tipteki hasarlar büyük oranda eğimi 3 dereceden fazla olan alanlarda gerçekleşir (Şekil 2.17).



Şekil 2.17 : Sivilaşmanın neden olduğu akma türü kayma örneği (Uyanık, 2002).

### 2.8.4 İstinat yapısı yenilmesi

Bu tip problemler, istinat yapısının oturduğu zeminin taşıma gücünün azalması veya istinat yapısı gerisinde yer alan zeminin sivilaşması ve dolayısıyla artan yanal kuvvetler nedeniyle istinat yapısının yatay ve/veya düşey yönde yer değiştirmeler oluşturması sebebiyle oluşur (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006).



Şekil 2.18 : İstinat yapısı yenilmesi (Lai, 1998).



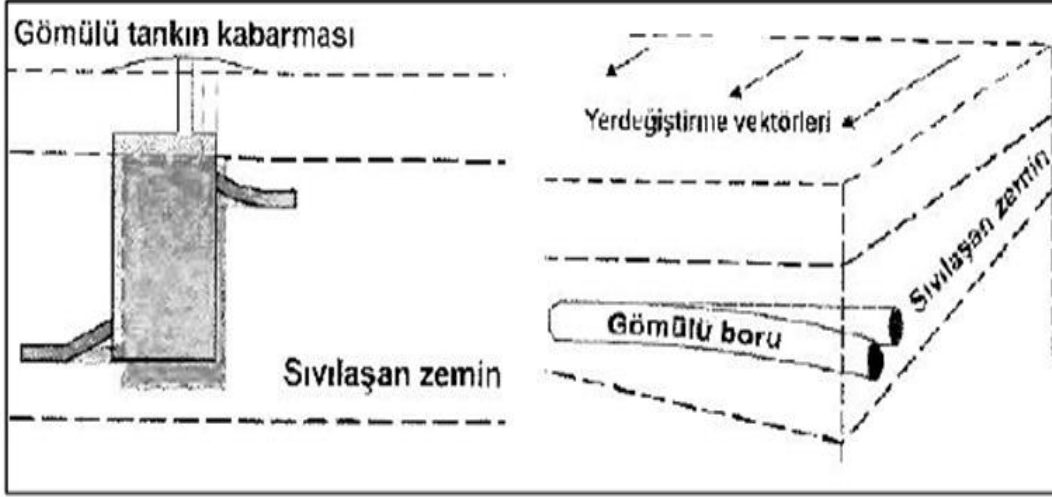
Şekil 2.19 : 1995 Kobe depremi sıvılaşmaya bağlı istinat duvarı yenilmesi (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006).

### 2.8.5 Gömülü yapı yüzeylemesi

Özellikle nüfus yoğunluğunun yüksek olduğu bölgelerde zemin içerisindeki şebekelerin ve diğer yapıların kullanılmaz hale gelmesi sismik kaynaklı sıvılaşma problemlerinden biri olarak hayatı negatif yönde etkileyen unsurlardan biridir.

Sıvılaşma sırasında meydana gelen kaldırma kuvveti nedeniyle, zemin içerisinde bulunan su, benzin, mazot gibi tanklar, doğalgaz, çeşitli muayene bacaları, internet gibi boru hatları vb. hafif alt yapı elemanları zemin yüzeyine yükselerek çeşitli problemlere neden olmaktadır (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006).





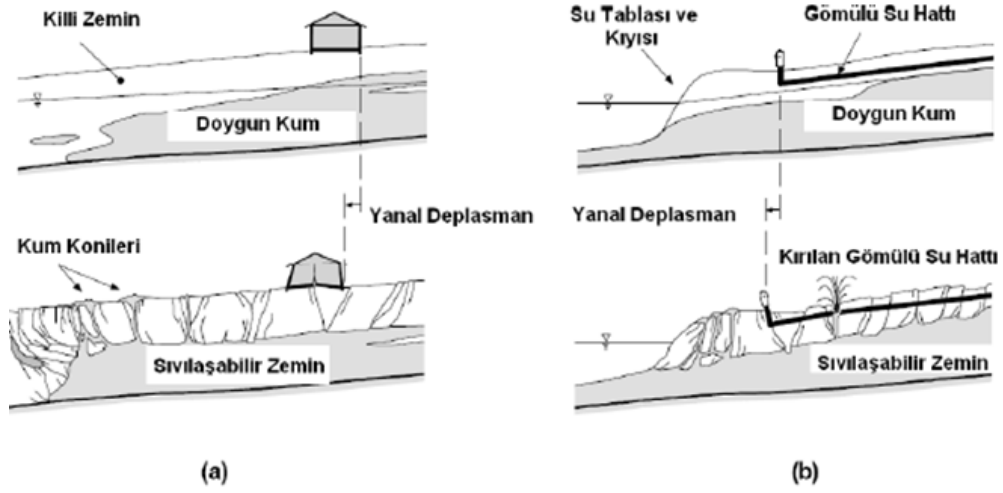
Şekil 2.20 : Sıvılaşma nedeniyle gömülü yapıların yüzeylemesi (Ulusay, 2000).



Şekil 2.21 : 2004 Niigata depreminde sıvılaşma nedeniyle oluşan hasar (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006).

### 2.8.6 Yanal yayılma

Sıvılaşma sonucu meydana gelen bu tip problemler deprem sırasında çoğunlukla yüze yakın yer altı su seviyesi durumunda, zemin yüzeyinin 0,3 derece ile 3 derece arasında hafif eğikliğe sahip, gevşek, kumlu vb. kohezyonsuz zemin tabakası bulunduran alanlarda görülür. Bu hasarlarda zemin boşluk suyu basıncı yükselmesine ve sıvılaşmaya maruz kaldığında, sıvılaştan tabakanın üzerinde bulunan doymamış zemin kütlesi kütle halinde sıvılaşmış alt tabaka üzerinde kayarak yanar yayılmayı oluşturur. Şekil 2.22’de sıvılaşma nedenli yanar yayılmaların şekilleri verilmiştir.



**Şekil 2.22 :** Yanal yayılma; (a) az eğimli zemin durumunda, (b) serbest zemin durumunda (Rauch, 1997).

Bu tip hasarlar yapılar için izin verilen yer değıştirme değerlerinin üzerine çıkarak üst yapıda hasar oluşturabileceği gibi çok küçük yer değıştirmelerle sınırlı olabilir (Nas, 2013).



**Şekil 2.23 :** Haiti'de 2010 yılında yaşanan deprem sonucu oluşan yanar yayılma (Desroces vd., 2011).



### 3. SIVILAŞMA ANALİZ YÖNTEMLERİ

Bir alandaki olası sıvılaşma risk potansiyeli genellikle bir güvenlik katsayısı (FS) ile tarif edilir. Bu katsayı tanımını için çoğunlukla zemindeki sıvılaşmaya karşı mevcut direncin zeminde sıvılaşmaya sebep olabilecek yeterli çevrimsel gerilmeye oranlanması kullanılır. Sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısının bulunmasında kullanılan yöntemleri analitik, fiziksel modellemeye bağlı ve ampirik yöntemler olmak üzere 3 başlıkta incelenebilir (FEMA 303, 1997).

Sıvılaşabilir zeminlerde zemin şartlarının analitik ve fiziksel modellemeye bağlı yöntemlerdeki kullanım zorlukları nedeniyle mühendislik uygulamalarındaki sıvılaşma potansiyelinin tayininde ampirik yöntemler çokça kullanılan yöntem haline almıştır. Bununla beraber değişik deney ve analizleri temel alan birçok ampirik yöntem geliştirilmiştir (FEMA 303, 1997). Bu geliştirilen ampirik yaklaşımlardan en bilineni ilk defa Seed ve Idriss (1971) tarafından ortaya atılan ve daha sonra Youd vd. (2001a) çalışmasıyla geliştirilen ve en güncel halini alan ‘Basitleştirilmiş Yöntem’ yaklaşımıdır.

2019 yılında yenilenen TBDY’de basitleştirilmiş yöntem ile ilgili şu yaklaşımlar mevcuttur.

- Zemin sıvılaşması “suya doygun durumda bulunan ve yüzeyden 20 m derinliğe kadar plastik indeksi %12’den az olan zeminlerin sismik hareketler altında, boşluk suyu basıncındaki yükselmeye paralel kayma mukavemeti ve rijitliğindeki ciddi orandaki azalma” olarak söylenmiştir. (TBDY Madde 16.6.2)
- TBDY(2019)’ye göre sıvılaşabilme riski olan zeminler, suya doygun kalan kum, çakıllı kum, siltli killi kum, plastik olmayan silt ve silt-kum karışımları olarak bahsedilmiştir. (TBDY Madde 16.6.4).
- Zemin sıvılaşma analizine yönelik olarak yapılan hesaplarda SPT verileri kullanılmaktadır. Sıvılaşabilir zemin birimlerinde düzeltilmiş SPT vuruş sayısının 30 sayısından az olması durumunda zemin sıvılaşması riski hesabı yapılır. (TBDY Madde 16.6.5)

Tez çalışmasının bu kısmında “Basitleştirilmiş Yöntem” ile ilgili bilgiler verilecektir.

### 3.1 Basitleştirilmiş Yöntem

Sıvılaşabilir özellikteki zeminlerin sıvılaşma riski araştırılmasında arazi ve laboratuvar deneylerinin kullanıldığı birçok analiz yöntemi bulunmaktadır. Bu yöntemler içerisinde en çok kullanılan ise ilk olarak Seed ve Idriss (1971) tarafından ortaya konan ve “Basitleştirilmiş Yöntem” olarak adlandırılan yöntemdir. Bu yöntemde Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) sonuçları kullanılır. “Basitleştirilmiş Yöntem” üzerine birçok araştırmacı tarafından çalışmalar yapılmış ve bu çalışmalar Youd vd. (2001a) ile toplanarak güncel halini almıştır.

Bu yöntem zeminin sıvılaşması için zaruri çevrimli direnç oranının (CRR), sismik hareketin oluşturduğu çevrimli gerilme oranı (CSR) ile kıyaslanması sonucu zeminin sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısının (FS) bulunması temeline dayanır (Seed ve Idriss, 1971).

#### 3.1.1 Çevrimli gerilme oranının belirlenmesi

Çevrimli gerilme yaklaşımı, zemindeki aşırı boşluk suyu basıncının asıl olan çevrimli gerilmelerle ilişkisi olduğu temeline dayanır (Kramer, 1996).

Sismik hareketin oluşturduğu çevrimli gerilme oranı (CSR), Seed ve Idriss (1971) tarafından çalışmalarında gösterilen Eşitlik 3.1 kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$CSR = 0,65 \frac{a_{maks}}{g} \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} r_d \quad (3.1)$$

Bu eşitlikte;

$a_{maks}$  = zemindeki pik yatay yer ivmesi,

$g$  = yerçekimi ivmesi (9,81 m/s<sup>2</sup>),

$\sigma_v$  = toplam düşey gerilme,

$\sigma'_v$  = efektif düşey gerilme,

$r_d$  = gerilme azaltma katsayısı,

olarak kullanılmıştır.

Gerilme azaltma katsayısı, Seed vd. (2003) tarafından önerilen ( $z \leq 9,15$  m) için Eşitlik 3.2a ve ( $9,15 \text{ m} \leq z \leq 23$  m) için Eşitlik 3.2b yardımıyla bulunabilmektedir.

$$r_d = 1 - 0,00765z \quad (3.2a)$$

$$r_d = 1,174 - 0,0267z \quad (3.2b)$$

Bu eşitliklerde  $z$  = derinlik (m) olarak kullanılmıştır.



### 3.1.2 Çevrimli direnç oranının belirlenmesi

Zeminin sıvılaşmaya karşı dayanma miktarını gösteren çevrimli direnç oranı (CRR), Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) ile ölçülen darbe sayısının bir işlevi olarak bulunabilmektedir.

Deney düzeneğindeki farklılık nedeniyle sahada ölçülen darbe sayısını (SPT-N) etkilemekte ve bu sebeple sahada elde edilen deney verilerinin değerlendirilmeden önce, SPT-N değerlerinde Eşitlik 3.4'de verilen düzeltmelerin uygulanması zaruridir.

$$(N_1) = N * C_N * C_E * C_B * C_R * C_S \quad (3.4)$$

Bu eşitlikte;

$(N_1)$  = Enerji oranına göre düzeltilmiş SPT darbe miktarı

$N$  = Sahada ölçülen SPT darbe miktarı

$C_N$  = Üst tabaka yükü düzeltme faktörü

$C_E$  = Enerji oranı düzeltme faktörü

$C_B$  = Kuyu çapı düzeltme faktörü

$C_R$  = Tij boyu düzeltme faktörü

$C_S$  = Numune alma metodu düzeltme faktörü

Üst tabaka yükü düzeltme faktörü, Liao ve Whitman (1986) tarafından bulunan Eşitlik 3.5 ile bulunabilmektedir.

$$C_N = \sqrt{\frac{P_a}{\sigma'_v}} \leq 1,7 \quad (3.5)$$

Bu eşitlikte,  $P_a = 100$  kPa değerinde sabit referans gerilmesi ve  $\sigma'_{vo}$ ,  $P_a$  ile benzer birime sahip efektif düşey gerilmedir. Youd vd. (2001a)'e göre  $C_N$  değeri 1,7'ye eşit veya daha küçük olmalıdır. Bir diğer çalışmada, 1,7 değeri geçilmemek şartıyla,  $C_N$  değeri için Kayen vd. (1992) tarafından Eşitlik 3.6 ortaya konmuştur (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006).

$$C_N = 2,2 / (1,2 + \frac{\sigma'_v}{P_a}) \quad (3.6)$$

Youd vd. (2001a) çalışmalarında, 200 kPa'a eşit ve daha düşük efektif düşey gerilme değerlerinde Eşitlik 3.5'nin daha tutarlı sonuçlar verdiğini, 200 kPa'dan daha büyük efektif düşey gerilmelerde sonucun güvensiz olduğunu belirtmiştir. 300 kPa'a eşit

veya daha küçük efektif düşey gerilme değerleri için Eşitlik 3.6 ile daha güvenilir sonuçlar elde edileceğini ifade etmiştir. Efektif düşey gerilmenin 300 kPa'ı geçtiği durumlarda ise  $C_N$  değerinin farklı yöntemlerle bulunması gerektiği ortaya konmuştur (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006).

Yapılan SPT deneyinde ülkeden ülkeye kullanılan şahmerdan tipleri ve düşürme metotları farklı olmasından dolayı deney sırasında zemine iletilen enerji düzeyinde farklılıklar fark olmaktadır. Bu farklılıkları bertaraf etmek hedefiyle, SPT-N değerlerinin %60 standart enerji verimine göre Çizelge 3.1'de verilen düzeltme sayıları hesaba katılmaktadır.

**Çizelge 3.1:** Farklı ülkeler için SPT enerji oranı düzeltme faktörü (Seed vd., 1985).

Ülke	Şahmerdan Tipi	Düşürme Yöntemi	Tahmin Edilen Enerji Oranı	%60 Enerji Oranına Göre Düzeltme
ABD	Güvenlikli	Halat ve makara	60	$60/60 = 1$
		Halat ve makara	45	$45/60 = 0,75$
		Serbest düşüş	78	$78/60 = 1,30$
Japonya	Donut	Özel bırakma yöntemine sahip halat ve makara	67	$67/60 = 1,12$
Çin	Donut	Serbest düşüş	60	$60/60 = 1$
		Halat ve makara	50	$50/60 = 0,83$
Arjantin	Donut	Halat ve makara	45	$45/60 = 0,75$

Skempton (1986) tarafından ortaya konan, daha sonra Robertson ve Wride (1998) tarafından yeniden çalışılan kuyu çapı düzeltme faktörü ( $C_B$ ) ve tij boyu düzeltme faktörü ( $C_R$ ) miktarları Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3'de gösterilmiştir.

**Çizelge 3.2:** Farklı kuyu çaplarında SPT için düzeltme faktörleri (Youd vd., 2001a).

Kuyu Çapı (mm)	Kuyu Boyu Düzeltme Faktörü ( $C_B$ )
65-115	1
150	1,05
200	1,15

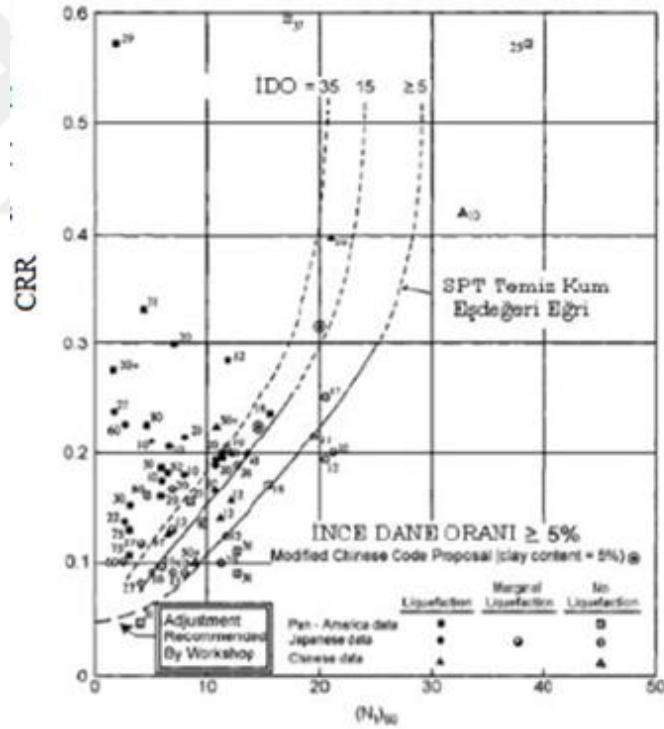
**Çizelge 3.3:** Farklı tij boylarında SPT için düzeltme faktörleri (Youd vd., 2001a).

Derinlik (m)	Tij Boyu Düzeltme Katsayısı ( $C_R$ )
0-3	0,75
3-4	0,80
4-6	0,85
6-10	0,95
10-30	1,00
> 30	1,00

Numune alma metodu düzeltme faktörü olan ( $C_s$ ) ise; numune alma metodunun kılıfsız olma numune alıcı olması halinde 1,1-1,3 değerlerinde değişen bir değer olarak alınırken, kılıflı olması durumunda 1 değerine sahip olmaktadır (Youd vd., 2001a).

Seed vd.(1985), moment büyüklüğü 7,5 olan deprem etkisinde kalmış kum muhteva eden zeminlerde, sıvılaşmanın oluşmadığı ve oluştuğu yerlerde SPT sonuçları üzerine çalışmış ve belirli SPT sonuçlarında sıvılaşma gerçekleşebilmesi için, gerekli minimum çevrimli gerilme oranını grafiksel ortaya koymuştur. Daha sonra bu çalışma NCEER (1997) tarafından tekrar düzenlenerek, Şekil 3.1'deki son şeklini almıştır (Savaş vd., 2012).

Şekil 3.1'de eğriler 3 değişik ince dane oranını göstermektedir. Temiz kum olarak isimlendirilen ince dane oranı %5'e eşit veya daha az olduğu zeminler grafikte en sağdaki eğride gösterilmiştir. Grafikteki yatay kısım ise çeşitli katsayılarla düzeltilmiş SPT darbe sayısını göstermektedir.



**Şekil 3.1 :** Değişken ince dane oranı ve  $M_w = 7,5$  için çevrimli direnç oranı ile  $(N_1)_{60}$  arasındaki ilişki (Youd vd., 2001a).

Şekil 3.1'de çevrimli direnç oranı (CRR) hesabı için deprem büyüklüğü  $M_w = 7,5$  için çizilen ampirik eğrinin matematiksel ifadesi aşağıda verilmiştir. (Youd vd.,2001a).

$$CRR = \frac{1}{34 - (N_1)_{\text{eotk}}} + \frac{(N_1)_{\text{eotk}}}{135} + \frac{50}{(10(N_1)_{\text{eotk}} + 45)^2} - \frac{1}{200} \quad (3.7)$$

Bu eşitlik düzeltilmiş SPT sayısı 30 değerinden küçük değerler için kullanılır. Çünkü  $(N_1)_{60} \geq 30$  değerine sahip temiz kumlar (ince dane oranı sifıra yakın) çok sıkı kabul edilirler ve sıvılaşma olmayan zeminler sınıfında kabul edilirler.

İnce dane oranı ile sıvılaşma direnci doğru orantılı büyüklükler olduğu yani birinin artarken diğerinin de arttığı, birinin azalırken diğerinin de azaldığı Seed vd. (1985) tarafından ifade edilmiştir. Bu iki büyüklük Eşitlik 3.8 ile ortaya konmuştur (Youd vd., 2001a).

$$(N_1)_{60tk} = \alpha + \beta (N_1)_{60} \quad (3.8)$$

$(N_1)_{60tk}$  = ince dane oranına göre düzeltilmiş SPT darbe sayısı

$\dot{I}DO$  = ince dane oranı

$\alpha$  ve  $\beta$  = ince dane düzeltme faktörleri

$\alpha$  ve  $\beta$  aşağıdaki eşitlikler ile hesaplanmaktadır.

**Çizelge 3.4:** İnce dane düzeltme faktörleri (Youd vd., 2001a).

	$\alpha$	$\beta$
$\dot{I}DO \leq \%5$	$\alpha = 0$	$\beta = 1,0$
$\%5 < \dot{I}DO < \%35$	$\alpha = \exp[1,76 - (190/\dot{I}DO^2)]$	$\beta = [0,99 + (\dot{I}DO^{1.5}/1000)]$
$\dot{I}DO \geq \%35$	$\alpha = 5,0$	$\beta = 1,2$

### 3.1.3 Düzeltme faktörü ve sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısı

Önceki kısımlarda verilen eşitliklerde kullanılan tüm CRR değerleri moment büyüklüğü 7.5 olan depremler için kullanılabilir değerlerdir. Youd vd. (2001a), moment büyüklüğü 7.5'den farklı depremler için Eşitlik 3.9'da verilen büyüklük ölçeklendirme düzeltmesine (MSF) göre değerlendirmeyi önermiştir (Mert, 2018).

$$MSF = 10^{2.24} / M_w^{2.56} \quad (3.9)$$

Bu eşitlikte,  $M_w$  moment büyüklüğü olarak ifade edilmiştir.

Sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısı (FS) Eşitlik 3.10'da gösterildiği şekilde SPT sonuçları kullanılarak oluşturulan çevrimli direnç oranının (CRR), deprem tarafından oluşturulan çevrimli gerilme oranına (CSR) oranlanmasıyla bulunur. Zeminin çevrimli direnç oranının (CRR) değeri çevrimli gerilme oranından (CSR) küçük olması durumunda sıvılaşma potansiyeli mevcuttur (Seed ve Idriss, 1971).

$$FS = (CRR_{7.5} / CSR) * MSF \quad (3.10)$$

## 4. YANAL YAYILMA HESAP YÖNTEMLERİ

Sıvılaşma sonucu gerçekleşen hasar tiplerinden olan yanal yayılma hafif eğimli zeminlerde gözlenen yatay yer değiştirmeler olarak açıklanabilmektedir. Sismik hareket anında zeminin alt kısımlarında görülen boşluk suyu basıncının yükselmesi sıvılaşmaya sebep olur. Sismik hareket esnasında büyük ve yüzeysel zemin bloklarının yüzeye yakın kısımlarındaki sıvılaşma, yanal yayılmanın nedeni olarak görülebilir. Eğimler çoğaldıkça eğim yönündeki yatay yer değiştirmeler de çoğalmaktadır (Önder, 2010).

Bartlett ve Youd (1992a,1992b), eğimi az arazilerin gevşek durumda bulunan alt katmanlarının kum ve boşluk suyu ihtiva etmesi durumunda yanal yayılmanın oluştuğunu ifade etmiştir. Sıvılaşma gerçekleştiğinde üst kısımda bulunan suya doymamış zeminler büyük kuvvetler altında alt tabakalarda bulunan sıvılaşan tabakanın üstüne çöker. Bu şekilde zeminde yer değiştirmeler sürer ve eğimin sonlandığı ırmak, deniz, göl gibi bölgelere doğru yarıklar ve kaymalar oluşur. Yanal yayılmayı belirleyen şartlar düşük eğime sahip zeminler, yüzeye yakın su seviyesi ve sıvılaşabilir kohezyonsuz zeminlerdir (Youd ve Hoose, 1976).

Yanal yayılmalar sonucu oluşan yer değiştirmeler birkaç santimlerden birkaç metre boyutlarına kadar oluşabilir. Kayma işlemi sonucu zeminde oluşan çatlak ve yarıklar eğim yönüne dik bir şekilde meydana gelir.

### 4.1 Giriş

Yanal yayılma sonucunda oluşan yer değiştirmelerin büyüklüğünü tahmin etmek için önerilen yöntemleri 4 ana grupta ifade edebiliriz.

1. Sonlu Eleman Modelleri (SEM)
2. Ampirik Modeller
3. Basit Analitik Modeller
4. Fiziksel Modeller

Yanal yayılma tahmini için hangi modelin daha doğru ve güvenilir sonuçlar vereceği sahadaki vaka analizine göre değerlendirilebilir.

Yanal yer değiştirmelerin tahmin edilmesinde basitleştirilmiş gösterim kullanılabilir. şu yüzdedir ki, yanal yayılmada st düzey zemin koşullarıyla alakalı bilgiler bazı zamanlarda eksiksiz olmayabilir (Kaya, 2008).

Esasen sıvılaşma sonucu oluşan yatay yer değiştirme tahmini için var olan pratik durum deneysel metotlara gvenilmektedir (Glaser, 1994). Ancak yanal yayılma ile alakalı en güvenilir deneysel modeller sadece deplasmanların sınırlı tahmini hakkında bize bilgi verebilir.

Sarsma tablası ve santrifüj deney sistemleri gibi fiziksel modeller ile elde edilen datalar yardımıyla sıvılaşma ve sıvılaşma sonrası zemin davranışlarıyla alakalı yararlı bilgilere ulaşılmıştır (Kaya, 2008).

Bu tez çalışmasında ampirik modeller üzerinden yanal yayılma deplasman tahmini üzerine bilgiler verilmiştir. Tezin ilerleyen bölümlerinde de bu kısımda bahsedilen ampirik modeller kullanılarak yanal yayılmada yatay deplasman tahmini yapılmıştır.

## **4.2 Yanal Yayılma Hesap Yönteminde Deneysel Modeller**

Yanal yayılma hesabında kullanılan deneysel modeller zemin davranışlarını ve geometrisini tarif etmek için ciddi bir data girişi gereklidir. Bu modellerin temelinde yer değiştirmeler ve çeşitli saha parametreleri arasındaki araştırılmış bağlantılar mevcuttur.

### **4.2.1 Youd ve Perkins (1987)'in LSI (Sıvılaşma şiddeti İndeksi) modeli**

Sıvılaşma sonucu oluşan yanal yayılma kaynaklı yer değiştirmelerin tahmini için epey kompleks olmayan deneysel yöntem olan yöntem sismik hareket kaynaklı parametreleri ve şiddetli yer hareketleri arasındaki bağıntıyı temel alır. Bu bağıntı sıvılaşma risklerinin geniş alandaki kullanımı için elverişlidir. Youd ve Perkins (1987) yanal yayılma kaynaklı deformasyonların şiddetini ortaya koymak için ‘‘Sıvılaşma şiddeti İndeksi’’ (LSI) denilen ifadeyi ortaya atmışlardır. LSI özellikle jeolojik olarak derin olmayan, sürekli lik gösteren, iri taneli, sıvılaşma riski olan zeminler muhteva eden hafif eğimli alanların deformasyonları ve yanal yayılmaları için tarif edilmiştir. Ayrıca bu modelde büyük yer değiştirmeler hesaba katılarak 2.5m deplasman miktarı, İngiliz birim sisteminde uzunluk ls olarak kullanılan in değerinde yaklaşık 100 değerine karşılık geldiği için bu modelde yatay yer değiştirme st limiti 100 değeridir.

Youd ve Perkins (1987) tarafından deprem magnitüdü ve mesafesine göre LSI ilişkisini gösteren Eşitlik 4.1 aşağıda verilmiştir.

$$\log LSI = -3,49 - 1,86 * \log R + 0,98 * M_w \quad (4.1)$$

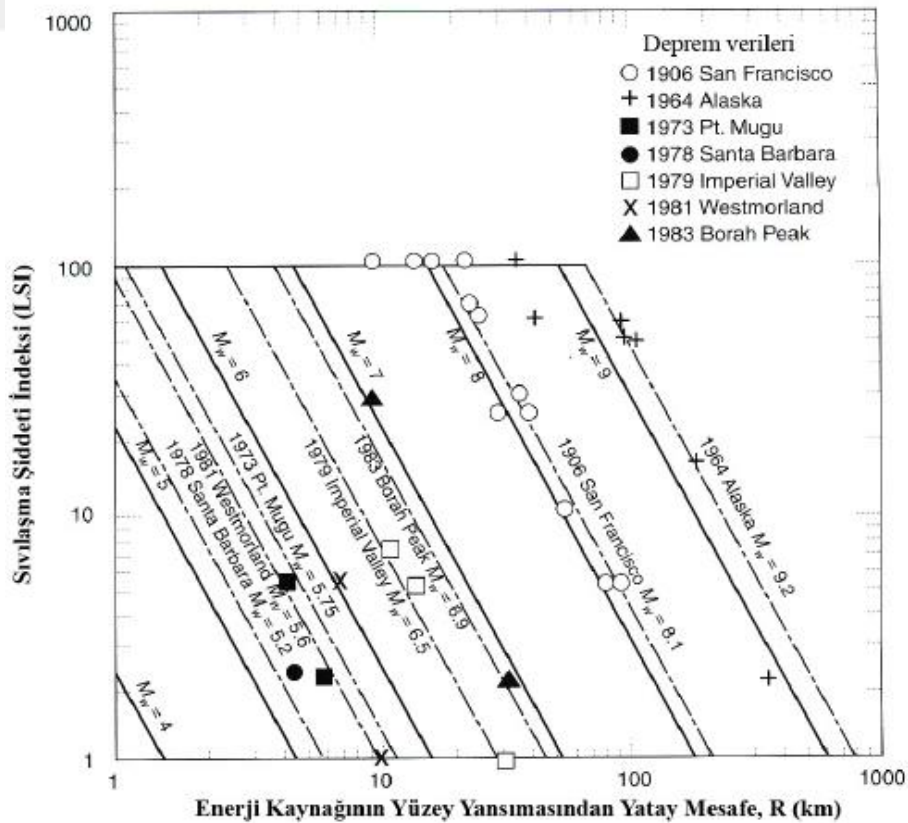
Eşitlikte;

LSI = maksimum yanal deformasyon miktarı (inç)

R = sismik kaynağa olan mesafe (km)

$M_w$  = depremin moment büyüklüğü

Deneysel LSI modeli, sıvılaşmaya bağlı yanal yayılma sonucu oluşan deformasyonların maksimum tahminini sağlar. Herhangi bir deprem anında oluşan yanal yayılmalardaki yer değiştirmeler muhtemel olarak Eşitlik 4.1'de hesaplanan değerden daha az olabilir. LSI modeli sıvılaşma risk haritalanmasında etkili bir modeldir ancak sahaya ait özel şartlar bu model içerisinde düşünülmediği için bu model bireysel yanal yayılma çalışmalarında emniyetli olarak kabul edilmez (Kaya, 2008). Youd ve Perkins (1987), LSI modeli ile ilgili grafiksel olarak Şekil 4.1'deki grafiği ortaya koymuşlardır.



Şekil 4.1 : LSI modeli grafiği (Youd ve Perkins, 1987).

#### 4.2.2 Hamada (1986)'nin ampirik modeli

Hamada vd. (1986), 1964'de yılında yaşanan Niigata, 1971 yılında yaşanan San Fernando ve 1983 yılında yaşanan Nihonkai-Chubu depremlerinde yaşanan sıvılaşmaya bağlı yanal yayılma çalışmalarından sahada görülen deplasmanlar için ampirik bir bağıntı üzerine çalışmışlardır (Önder, 2010). Çoğunluğu Nihonkai-Chubu depreminden 60 adet veri kullanılarak, kompleks olmayan bir regresyon bağıntısı ortaya koymuşlardır (Hamada vd.,1994). Hamada vd. (1994) tarafından ortaya konulan çalışmada kalıcı deformasyonlara tesir eden değişkenlerin sıvılaşmış katman kalınlığı, zemin yüzeyinin eğimi ve sıvılaştırılan katmanın alt sınırının eğimi olduğu ifade edilmiştir. Bu deneysel model, kalıcı yatay yer değiştirme hesabını aşağıda verilen Eşitlik 4.2 ile ortaya koymuştur.

$$D = 0.75 H^{0.5} Q^{0.33} \quad (4.2)$$

Bu eşitlikte;

D = yatay yönde yer değiştirme (m)

H = sıvılaştırılan zemin tabakasının kalınlığı (m)

Q = zemin yüzey eğimi ile sıvılaştırılan zeminin taban eğiminden fazla olanı (%)

Bu metotta birden çok zemin katmanını sıvılaşması durumunda, H değeri olarak tüm ara zemin tabakalarını içine alacak şekilde en alttaki sıvılaşmış zeminden en üst zemine olan değer alınır. (Kaya, 2008).

Metot eş dağılımlı orta dane çapına sahip kumlu zemin tabakaları üzerindeki çalışmalar neticesinde ortaya konmuştur. Bu sebeple farklı zemin tabakalarına uygulandığı takdirde daha emniyetli olunması gerekir (Kaya,2008).

Metoda göre yanal yayılma deformasyonu sıvılaştırılan zemin tabakasının kalınlığı ve zemin şevinin eğimi ile doğru orantılıdır. Sıvılaştırılan zemin tabakasının kalınlığı arttığında ve zemin şevinin oldukça dik olduğu durumda yanal yayılma tahmini daha fazla olma yönelimindedir. Sıvılaştırılan tabakanın daha ince olduğu zemin şevinin daha dik olmadığı olduğu alanlarda ise yanal yayılma tahmini daha küçük olur (Kaya,2008).

Hamada vd. (1986)'e göre yanal yayılma miktarını etkileyen faktörler şunlardır;

- Sıvılaştırılan zemin katmanının kalınlığı
- Zeminin yüzey eğimi



- Sıvılaşan zemin katmanının eğimi (üst-alt sınırının eğimi)
- Sıvılaşan zemin tabakasının zeminin normal kotundan derinliği (üst-alt sınırının derinliği)

#### 4.2.3 Bartlett ve Youd (1992)'un MLR (Çoklu Doğrusal Regresyon) modeli

Bartlett ve Youd (1992a,1992b,1995), Youd (2001b) ve Youd vd. (2002) yanal yayılma tahmini için ampirik bir model ortaya koymuşlardır. Bu model Amerika'da ve Japonya'da yaşanan birçok depremin sebep olduğu yanal yayılma çalışmalarının toplanması sonucunda oluşmuştur. Bartlett ve Youd düşük eğimli arazi şartları ve serbest yüzey arazi şartları olmak üzere 2 farklı denklem ortaya koyulmuştur. Bu denklemlere daha sonra Youd vd. (2002) tarafından bazı düzenlemeler yapılarak güncel halini almıştır (Kaya,2008). Güncel denklemler aşağıda Eşitlik 4.3 ve Eşitlik 4.4 olarak verilmiştir.

- Serbest yüzey şartlı araziler için;

$$\log D = -16,713 + 1,532M_w - 1,406\log R^* - 0,012R + 0,592\log W + 0,540\log T_{15} + 3,413 \log(100 - F_{15}) - 0,795\log(D50_{15} + 0,1mm) \quad (4.3)$$

- Düşük eğimli araziler için;

$$\log D = -16,213 + 1,532 M_w - 1,406 \log R^* - 0,012R + 0,338\log S + 0,540\log T_{15} + 3,413 \log(100 - F_{15}) - 0,795\log(D50_{15} + 0,1mm) \quad (4.4)$$

Bu eşitliklerde;

D = Yatay yer değiştirme (m)

M<sub>w</sub> = Depremin moment büyüklüğü

R = Sismik kaynağa uzaklık (km)

T<sub>15</sub> = Suya doymun kaba daneli tabakaların düzeltilmiş SPT değerlerinin 15'den küçük olan zemin tabakalarının kalınlığı (m) / (20m'den daha derin olan zemin katmanları hesaba katılmaz)

F<sub>15</sub> = T<sub>15</sub> içindeki ince dane yüzdesi

D50<sub>15</sub> = T<sub>15</sub>'de ortalama dane çapı (mm)

S = Şev eğikliği (%)

W = Serbest yüzey oranı (%) / (W=H/L)

$R^*$  = Değiştirilmiş sismik kaynağa uzaklık (km)

$R^*$  değeri  $R < 0,5$  km için devasa yer değiştirmelere sebep olduğu için geliştirilmiştir.

$R^*$ , değiştirilmiş sismik kaynağa uzaklık aşağıda verilen Eşitlik 4.5 ve Eşitlik 4.6 kullanılarak hesap edilebilir.

$$R^* = R_0 + R \quad (4.5)$$

$$R_0 = 10^{(0,89M_w - 5,64)} \quad (4.6)$$

Bartlett ve Youd (1995), serbest yüzey oranı  $W < \%1$  olan bölgeler için Eşitlik 4.4'ü, serbest yüzey oranı  $\%5 < W < \%20$  olan bölgeler için ise Eşitlik 4.3'ün kullanılmasını önermiştir. Serbest yüzey oranının  $\%1 < W < \%5$  olan bölgeler için duraysızlığın serbest yüzey oranı ve şev eğim şartlarından hangisi tarafından denetlendiğinin anlaşılması oldukça zordur. Ayrıca bu modelin kullanılması için uygun olan koşullar Barlett ve Youd (1992) tarafından şu şekilde ifade edilmiştir;

- Moment magnitudü:  $6,0 \leq M_w \leq 8,0$
- Serbest yüzey oranı:  $\%1 \leq W \leq \%20$
- Şev eğimi:  $\%0.1 \leq S \leq \%6$
- SPT değeri 15'den küçük olan zemin tabakalarının kalınlığı:  $1m \leq T_{15} \leq 15m$
- İnce dane oranı:  $F_{15} < \%50$
- Ortalama tane çapı:  $0,075mm \leq D_{50} \leq 1,0mm$

Bu model sınıvlaşmanın geniş bir alanda meydana geldiği zaman daha kullanışlıdır. Bartlett ve Youd'un MLR modelinin temelinde bulunan iki etmenli eşitlik (serbest yüzeyli ve düşük eğimli zemin) ile tahmin edilen sonuçların, Japonya ve Amerika'da yapılan çalışmada gözlemlenen verilerle oldukça oranında uyduğunu ifade edilmiştir. Bununla birlikte, bu modelde kaymanın büyüklük değeri, sınır kenarlarına yakın olması ve kayan kütle kesitinin ortalama eğimi vb. olası sonuca tesir edebilecek etkiler üzerine herhangi bir çalışma ortaya konmamıştır (Kaya, 2008).

#### 4.2.4 Shamoto (1998) modeli

Shamoto vd. (1998) Japonya'da 12 farklı deprem yaşamış bölgelerden temin edip inceledikleri ince dane oranı sıfır olan ( $I_{DO} = \%0$ ) temiz kum örnekleri üzerine laboratuvarında tayin ettikleri makaslama gerilmeleri ile bu bölgelerde gözlenen

makaslama gerilmelerini karşılaştırarak, yatay yer değıştirme değeri tahmin etmeye yönelik çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu modelde çalışma sonunda oluşturulan denklem aşağıda verilmiştir.

$$D_h = C_h \times (D_h)_{\max} = C_h \times \int_0^H (\gamma_r)_{\max} dz \quad (4.7)$$

Denklemdede;

$D_h$  = Zeminin yatay yer değıştirmesi (m)

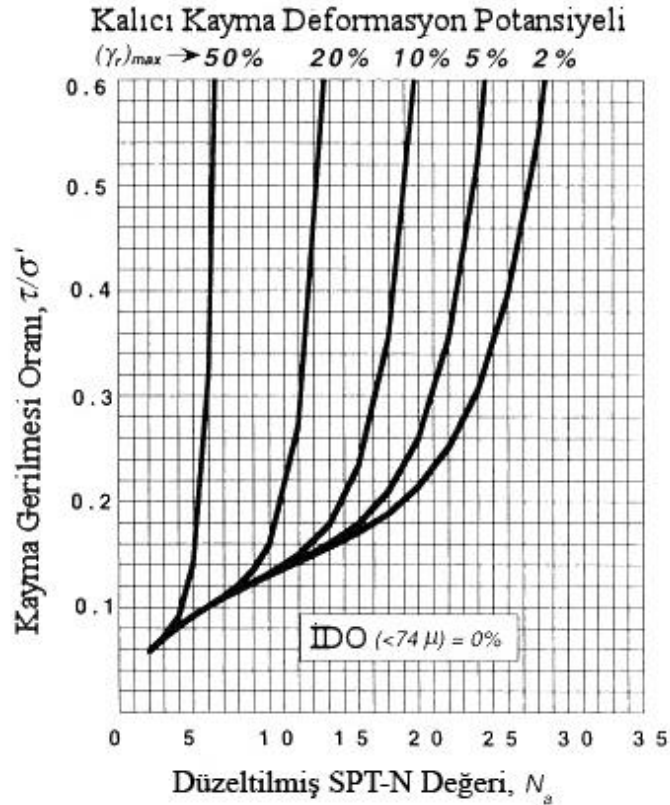
$C_h$  = Görülen ve hesap edilen yatay yer değıştirmeler arasındaki düzeltme faktörü

$H$  = İncelenen tabaka derinliği (m)

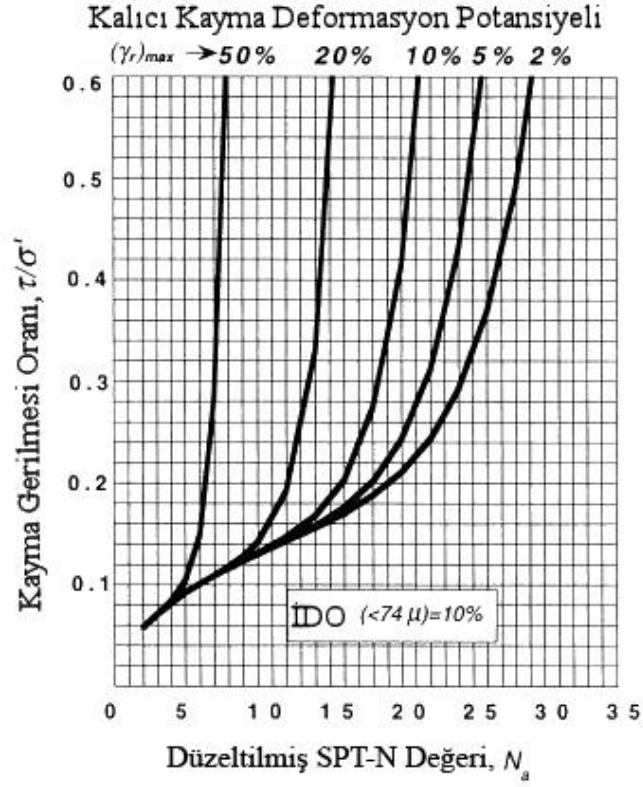
$z$  = Yüzeyden itibaren derinlik (m)

$(\gamma_r)_{\max}$  = En büyük artık makaslama birim deformasyonu

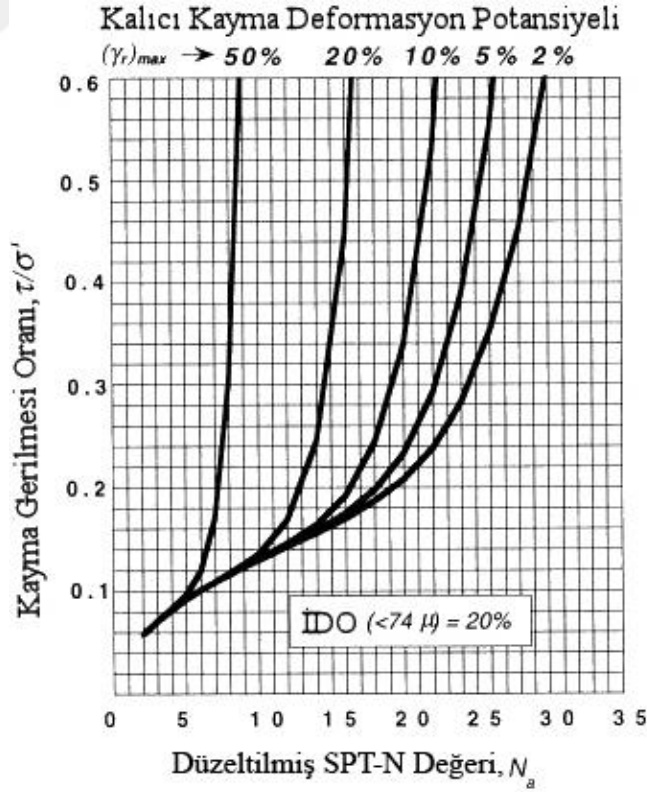
Ayrıca denklemde yer alan  $C_h$  faktörü değeri; hafif eğimli ve/veya serbest yzeeye sahip alanlarda 1,00; düz alanlarda ise 0,16 olarak kullanılmaktadır.  $(\gamma_r)_{\max}$  ise zemin katmanlarının ince dane oranına bağlı olarak Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5 kullanılarak bulunmaktadır (Hasançebi, 2011).



**Şekil 4.2 :** İDO=0% zeminler için en büyük artık makaslama birim deformasyonunun belirlenmesi (Shamoto vd., 1998b).



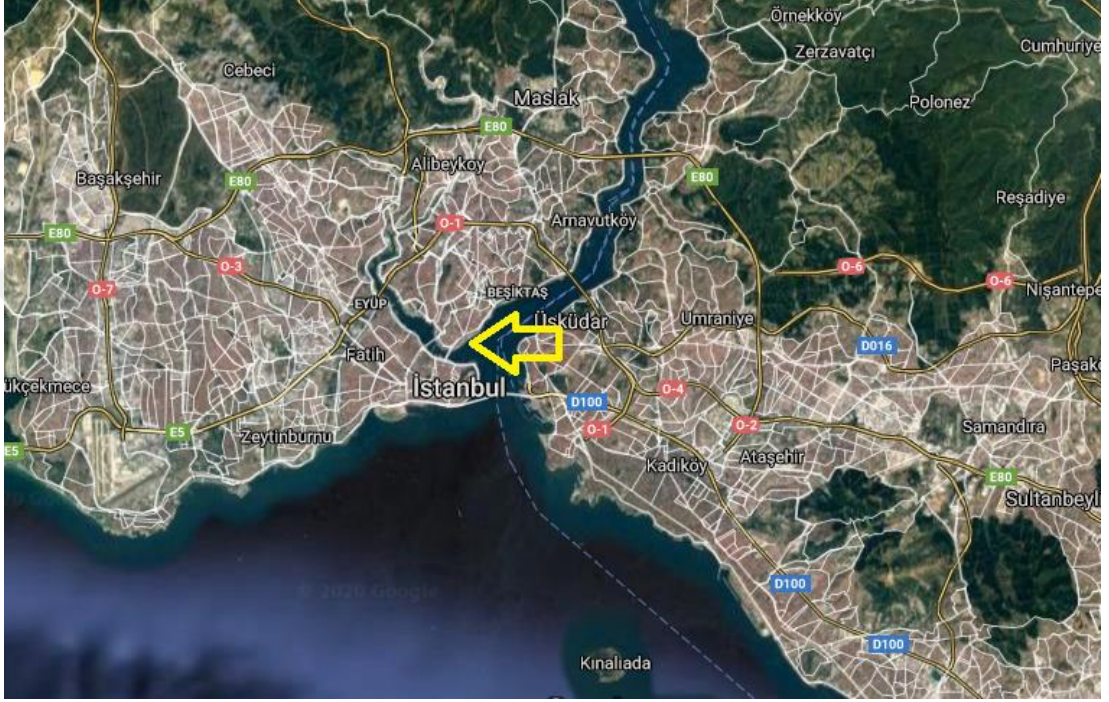
**Şekil 4.3 :** İDO=%10 zeminler için en büyük artık makaslama birim deformasyonunun belirlenmesi ( Shamoto vd., 1998b).



**Şekil 4.4 :** İDO=%20 zeminler için en büyük artık makaslama birim deformasyonunun belirlenmesi ( Shamoto vd., 1998b).

## 5. SIVILAŞMA RİSKİNİN BELİRLENMESİ

Çalışmanın bu bölümünde İstanbul'da bulunan bir proje ile ilgili yapılan geoteknik araştırmalar, sondaj raporları, saha ve laboratuvar çalışmaları kapsamında elde edilen veriler kullanılarak Şekil 5.1'de gösterilen inceleme alanında sıvılaşma analizi yapılmıştır.



Şekil 5.1 : İnceleme alanının lokasyonu

Seçilen inceleme 170 000 m<sup>2</sup> büyüklüğünde, yaklaşık 1200 m'lik bir kıyı şeridinde sahiptir. Alan yer yer değişmekle birlikte deniz seviyesinden yaklaşık 2 m yükseklikte yer almaktadır.

İnceleme alanı alüvyon ve yapay dolgu birimlerinin yer aldığı deniz kıyıları boyunca yer alan ve topografik eğimi % 0-10 arasında alanlar içerisinde kalmaktadır. Alanın büyük bir kısmında dolgu kalınlığı 3,0 metreden fazla olduğu sondaj loglarında görülmüştür. Ayrıca yapılan sondajlarda 0,75 m ile 2,20 m arasında değişen derinliklerde yeraltı su seviyeleri belirlenmiştir.

İnceleme alanının genel jeolojisini ele aldığı anda ise alanın Paleozoyik yaşlı anakaya ile bunu örten yapay dolgu ve kıyı alüvyonları üzerinde bulunduğu görülmektedir. İnceleme alanında yer alan zeminlerin özellikleri çalışmanın ilerleyen aşamalarında detaylı olarak verilecektir.

## 5.1 İnceleme Alanında Bulunan Sondaj Kuyuları

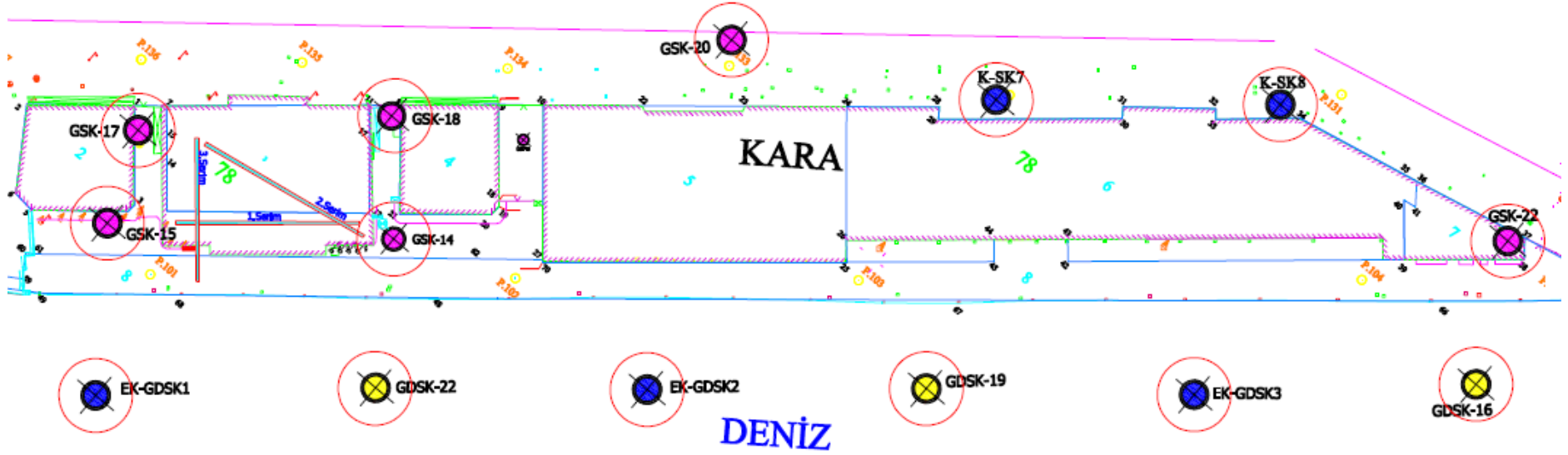
İnceleme alanındaki sondajlarda yer altı su seviyesi derinliği ölçülmüş, yerinde deneyler uygulanmıştır.

Bu çalışmada seçilen inceleme alanındaki sıvılaştırma analizi için 27 adet sondajın verileri kullanılmıştır. Kullanılan 27 sondaj ile ilgili bilgiler Çizelge 5.1’de verilmiştir.

**Çizelge 5.1:** İnceleme alanındaki sondaj bilgileri

Sondaj No	Yeraltı Su Derinliği	Sondaj Derinliği
GSK1	2,10 m	17,00 m
GSK2	2,18 m	32,50 m
GSK5	2,20 m	25,50 m
GSK8	2,15 m	30,00 m
GSK14	0,85 m	48,00 m
GSK15	1,00 m	39,00 m
GSK17	0,90 m	40,50 m
GSK18	0,75 m	41,00 m
GSK20	0,85 m	42,00 m
GSK22	0,95 m	40,00 m
GDSK2	0,00 m	29,00 m
GDSK3	0,00 m	30,50 m
GDSK6	0,00 m	27,50 m
GDSK9	0,00 m	29,20 m
GDSK10	0,00 m	29,00 m
GDSK13	0,00 m	29,00 m
GDSK16	0,00 m	21,50 m
GDSK19	0,00 m	27,50 m
GDSK22	0,00 m	26,00 m
EKSK1	1,50 m	24,00 m
EKSK3	2,00 m	24,00 m
GYSK2	2,00 m	31,00 m
EKGDSK1	0,00 m	44,00 m
EKGDSK2	0,00 m	44,00 m
EKGDSK3	0,00 m	44,00m
KSK7	2,00 m	45,00 m
KSK8	2,00 m	37,50 m

İnceleme alanında kullanılan sondajların alandaki yerleşimi Şekil 5.2 ve Şekil 5.3’de gösterilmektedir. Çalışmanın ilerleyen kısımlarında kullanılan 27 adet sondaj kuyusu ile ilgili detaylı bilgiler verilmiştir.



Şekil 5.2 : Proje alanında seçilmiş sondajların yerleşimi (Kısım-1)



Şekil 5.3 : Proje alanında seçilmiş sondajların yerleşimi (Kısım-2)



## 5.2 Arazi Araştırmaları ve Laboratuvar Deney Sonuçları

Proje kapsamında zemin tabakalaşmasını ve zemin tabakalarının özelliklerini belirlemek için detaylı geoteknik araştırma yapılmıştır. İnceleme alanında seçilen 27 adet sondajın derinlikleri 17,00 m ile 48,00 m arasında değişmektedir. Sondajlara ait yerinde deneyler ve laboratuvar deney sonucuşları mevcuttur.

### 5.2.1 Standart penetrasyon testi (SPT)

Çalışma kapsamında sıvılaşma analizlerinde SPT sonucuşları kullanılmıştır.

İnceleme alanındaki zemin profilini oluşturan tabakalar tür, kıvam ve yerleşim sıklılığına bağlı olarak 5 bölümde ayrılmıştır. Bunlar; Dolgu, ok Gevşek/Gevşek Kum, Orta Sıkı/Sıkı Kum, Kil ve Anakaya'dır.

Çalışma kapsamında kullanılan 27 adet sondajda yapılan SPT sonucuşlarının düzeltilmemiş haldeki değerleri EK-A'da mevcuttur.

### 5.2.2 Laboratuvar Deneyleri

Çalışma kapsamında kullanılan sondajlar ile ilgili laboratuvar deney sonucuşları mevcuttur. Bu deney sonucuşlarının değerleri EK-B'de mevcuttur.

## 5.3 Zeminlerin Dinamik ve Elastik Parametreleri

Türüne, kıvamına, yerleşim sıklılığına ve SPT değerlerine göre zemin tabakaları için analizlerde kullanılmak üzere önerilen zemin parametreleri izelge 5.2'de verilmiştir.

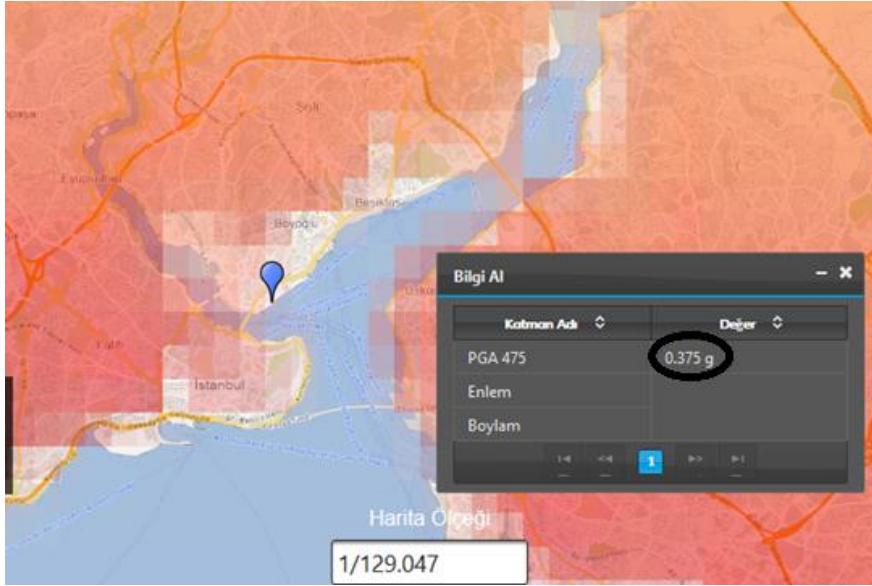
**Çizelge 5.2:** Deney sonucuşlarına göre zemin kabul değerleri

Zemin Tabakası	İçsel Sürtünme Açısı, $\phi$	Drenajsız Kayma Dayanımı, $c_u$	Kayma Dalgası Hızı $V_s$ (m/s)	Seçilen Poisson Oranı $\mu$	Birim Hacim Ağırlık $\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )
Dolgu	26	0	200	0,36	1,8
Çok Gevşek / Gevşek Kum	26	0	150	0,34	1,7
Orta Sıkı / Sıkı Kum	30	0	220	0,32	1,8
Çok Katı Kil	0	125	270	0,34	1,9
Anakaya	30	51	380	0,25	2,0

## 5.4 İnceleme Alanındaki Sıvılaşma Analiziyle İlgili Bilgiler

İnceleme alanında deprem sırasında zeminde dinamik süreçlerin ortaya çıkacağı düşünülmektedir. Sıvılaşmanın suya doymun zeminlerde ortaya çıktığı, bu nedenle yeraltı su seviyesinin altında gerçekleşebileceği not edilmesi gereken ilk husustur. Bununla birlikte yer yüzeyinden itibaren 20 m derinlikten sonra, artan zemin gerilmeleri nedeniyle zeminlerin sıvılaşma riski genellikle kalmamaktadır. Bunun yanında SPT verileri ile sıvılaşma hesabı yapıldığı durumlarda düzeltilmiş SPT vuruş sayısınının 30 değerinden büyük olduğu durumda genel olarak zemin sıvılaşması riski bulunmayacağı kabul edilmektedir (TBDY, 2019).

Sıvılaşmaya neden olabilecek dinamik yüklerin,  $M_w = 7.5$  büyüklüklü bir depremin inceleme alanında oluşturabileceği yer hareketleri ile ilgili olarak 2019'da yenilenen Türkiye Deprem Tehlike Haritasından inceleme alanının geneli göz önüne alınarak maksimum yatay yer ivmesi  $0,375g$  olarak kabul alınmıştır (Şekil 5.4).



**Şekil 5.4 :** Güncel Türkiye Deprem Tehlike Haritaları uygulamasından inceleme alanına ait maksimum yer ivmesi (<https://tdth.afad.gov.tr/TDTH/main.xhtml>).

## 5.5 İnceleme Alanının Depremselliği

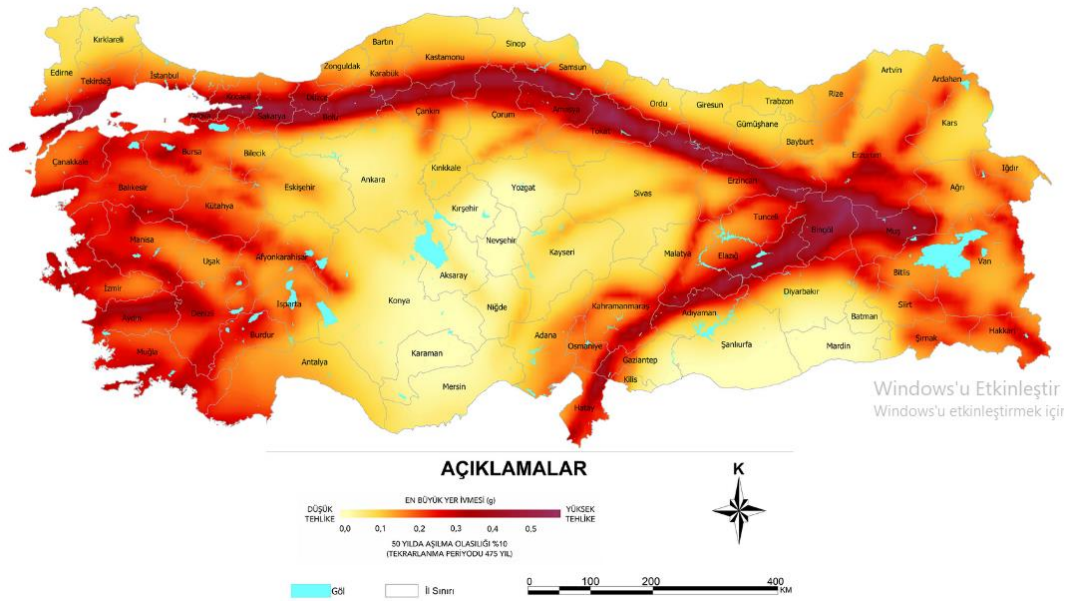
İnceleme alanının depremselliği bütün kuzey Anadolu'da ve özellikle Marmara Bölgesi'nde olduğu gibi Kuzey Anadolu Fay Kuşağındaki gerilimlere bağlı olarak gerçekleşmektedir. Kuzey Anadolu Fay Zonu, Doğu Anadolu ile Ege Denizi arasında tüm Kuzey Anadolu'yu kesen sağ yanal atımlı büyük bir fay zonudur.

Doğuda yalın bir yapısı olan bu kuşak, batıya doğru çatallanmakta ve özellikle Adapazarı'nın batısında birkaç kola ayrılarak batıya uzanmaktadır. Bunlardan en kuzeydeki Adapazarı-İzmit arasından uzanarak İzmit Körfezi'ne girmekte ve Marmara Denizi'nin tabanından batıya uzanmaktadır. Kabaca Doğu-Batı doğrultulu uzanan bu faylar, Yalova'nın batısında Kuzeydoğu-Güneybatı doğrultuya saparak, Marmara Denizi'nin tabanını bu konumdaki birkaç doğrultu atımlı fay kolu ile bloklara ayırmaktadır. Bu bloklar ayrıca, Kuzeybatı-Güneydoğu uzanımlı çekim fayları ile sınırlanmaktadır.

Çalışma alanının yer aldığı bölge ülkede deprem etkinliğinin var olduğu bir bölge olduğu söylenebilir. Son yıllarda inceleme alanına yakın olarak gerçekleşen son deprem 26 Eylül 2019 tarihinde Silivri açıklarında gerçekleşen odak derinliği 12,6 km, moment büyüklüğü 5,7 olan depremdir.

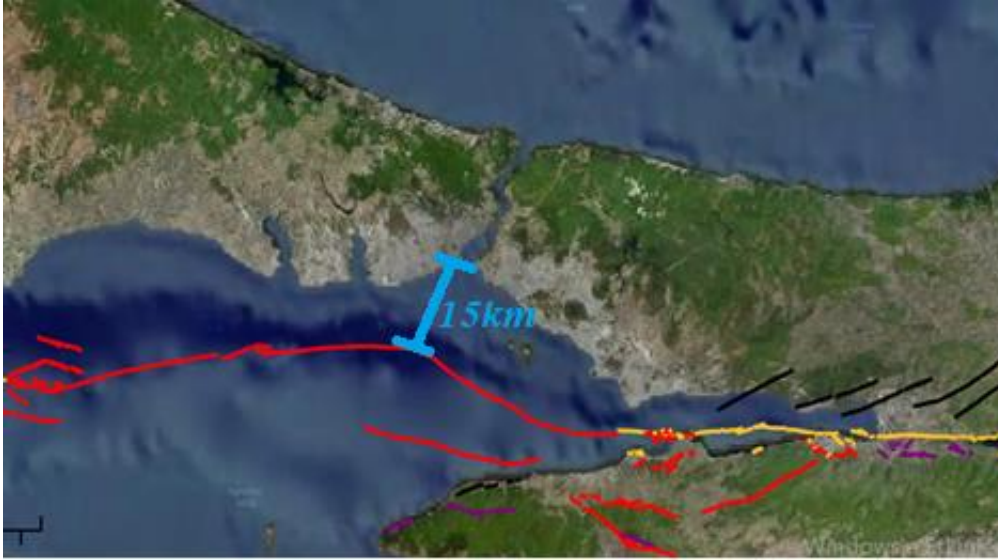
AFAD Deprem Dairesi Başkanlığı tarafından yenilenmiş, 18 Mart 2018 tarih ve 30364 sayılı Resmi Gazete'de yayınlanan, 1 Ocak 2019 tarihi itibarıyla yürürlüğe giren yeni "Türkiye Deprem Tehlike Haritası" Şekil 5.13'de gösterilmiştir. Seçilen çalışma alanı güncellenen "Türkiye Deprem Tehlike Haritası" kapsamında deprem açısından tehlikeli bölgede yer almaktadır (Şekil 5.5).

## TÜRKİYE DEPREM TEHLİKE HARİTASI



Şekil 5.5 : Türkiye Deprem Tehlike Haritası – 2019  
(<https://deprem.afad.gov.tr/deprem-tehlike-haritasi>).

Seçilen çalışma alanının bulunduğu bölgeye ait MTA (Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü) tarafından oluşturulan “Yenilenmiş Diri Fay Haritaları” ve “Yerbilimleri Harita Görüntüleyici ve Çizim Editörü” temel alınarak alanın bulunduğu bölgeye en yakın fay hattının Marmara Denizi altında, alana yaklaşık 15 km uzaklıkta bulunduğu kabul edilmiştir (Şekil 5.14). Çalışma kapsamında yapılmış olan hesaplamalarda da ilgili bu değer kullanılmıştır.



**Şekil 5.6 :** MTA tarafından oluşturulan diri fay hatları haritasının inceleme alanına ait kısmı (<http://yerbilimleri.mta.gov.tr/anasayfa.aspx>).

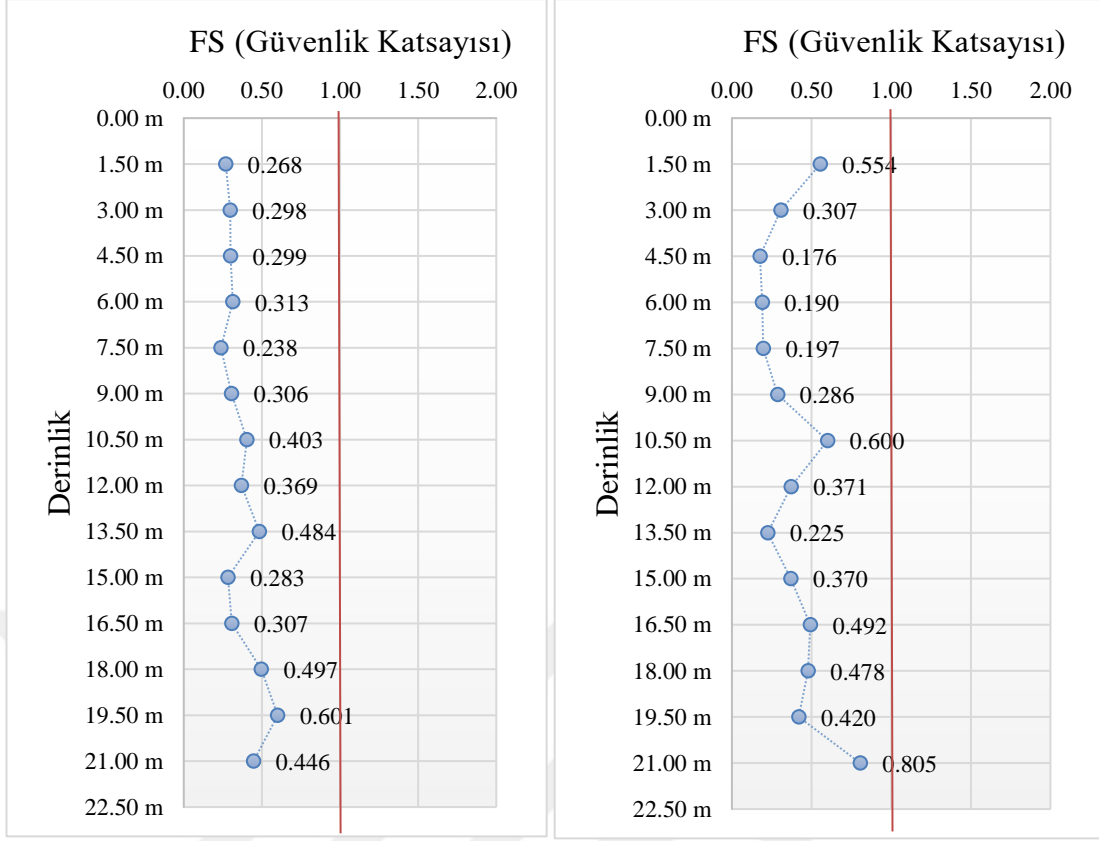
## 5.6 İnceleme Alanındaki Zemin Profilleri

İnceleme alanında seçilen 15 adet kara ve 12 adet deniz sondajında rastlanan birimler; kontrolsüz dolgu, dolgu, kum (dolgu), kum-çakıl, gevşek ve sıkı özelliklere sahip kum, kumlu çakıl, çakıl, kil ve grovak, kiltaş, kumtaş, kireçtaş gibi anakayalardır.

## 5.7 Basitleştirilmiş Yöntem İle Sıvılaşma Analizi

Çalışmanın bu bölümünde özellikleri verilen inceleme alanındaki sondajlar üzerinde Seed ve Idriss(1971) tarafından oluşturulan ve daha sonra da Youd vd. (2001a) tarafından güncellenen “Basitleştirilmiş Yöntem” yaklaşımı ile sıvılaşma potansiyeli belirlenmiştir. Yapılan sıvılaşma analiz sonuçlarına göre elde edilen güvenlik faktörlerinin derinlikle değişimleri grafik oluşturulmuştur.

Şekil 5.7’de GSK17 ve GSK15 sondajlarının sıvılaşma potansiyelini oluşturan güvenlik faktörü-derinlik grafiği verilmiştir.



**Şekil 5.7 :** GSK17 ve GSK15 sondajlarının güvenlik faktörü-derinlik grafiği

GSK17 ve GSK15 sondajlarının haricindeki diğer sondajların güvenlik faktörü-derinlik grafikleri EK-C’de mevcuttur.

Seçilen alandaki sondajlar üzerinde oluşturulan güvenlik faktörü-derinlik grafikleri sonucunda çalışma alanındaki hemen hemen bütün sondaj noktalarında farklı derinlik ve kalınlıktaki tabakaların farklı düzeyde sıvılaşma potansiyeli bulunduğunu görülmüştür.

## 5.8 Sonuçlar

Yer altı su seviyesinin yüksek olduğu ve genellikle yüzeye yakın, kumlu birimler muhteva eden alanlar, deprem gibi büyük sarsıntılar sırasında sıvılaşmaya maruz kalabilmektedir.

Sıvılaşma potansiyeli bulunurken, seçilen alanda hesap yapılan ilgili birimin kum(dolgu), kumlu dolgu, kum ve kumlu çakıl gibi kum muhteva eden birimler olması dikkate alınmıştır. Ayrıca düzeltilmiş SPT sayısı 30 vuruşu geçen ve sondaj derinliği 20 metreyi aşan tabakalarda TBDY(2019) uyarınca sıvılaşma riski dikkate

alınmamıştır. Sıvılaşma risk analizi yapılırken her bir sondaj noktası için ayrı yeraltı su seviyesi alınmıştır. Analizlerde olası depremin moment büyüklüğü 7,5 kabul edilmiş ve maksimum yatay yer ivmesi ( $a_{maks}$ ) güncellenen AFAD tarafından yayınlanan Türkiye Güncel Deprem Riski haritası temel alınarak 0,375g kabul edilmiştir. Tüm sondaj noktalarında aynı deprem büyüklüğü ve maksimum yer ivmesi kullanılmıştır.

Yapılan sıvılaşma analizleri sonucu, inceleme alanında seçilmiş 27 sondaj noktasında yapılan sıvılaşma analizinde, analiz yapılan tüm noktalarda çeşitli derinliklerde ve kalınlıklardaki tabakaların sıvılaşma potansiyelinin bulunduğu görülmüştür. Sıvılaşma riski bulunduran tabaka kalınlıkları bazı sondajlarda 1,5 m ile sınırlıyken bazı sondajlarda ise 20 m'ye varan tabakaların sıvılaşma riski altında olduğu görülmüştür.



## 6. YANAL YAYILMALARIN BELİRLENMESİ

### 6.1 Giriş

Çalışmanın bu bölümünde inceleme alanında yapılan proje kapsamında zemin iyileştirme çalışmaları ve yanal yayılmayı kısıtlayan geoteknik imalatlar yapılmadan önceki zemin koşulları ve inceleme alanında seçilen sondajların verileri kullanılarak yanal yayılma miktarının tahmin edilmesinde ampirik yaklaşımlardan olan Hamada vd.(1986)'nin ampirik modeli, Bartlett ve Youd'un MLR modeli ve Shamoto vd.(1998)'nin modeli kullanılarak yatay yer değiştirme tahmini yapılmıştır.

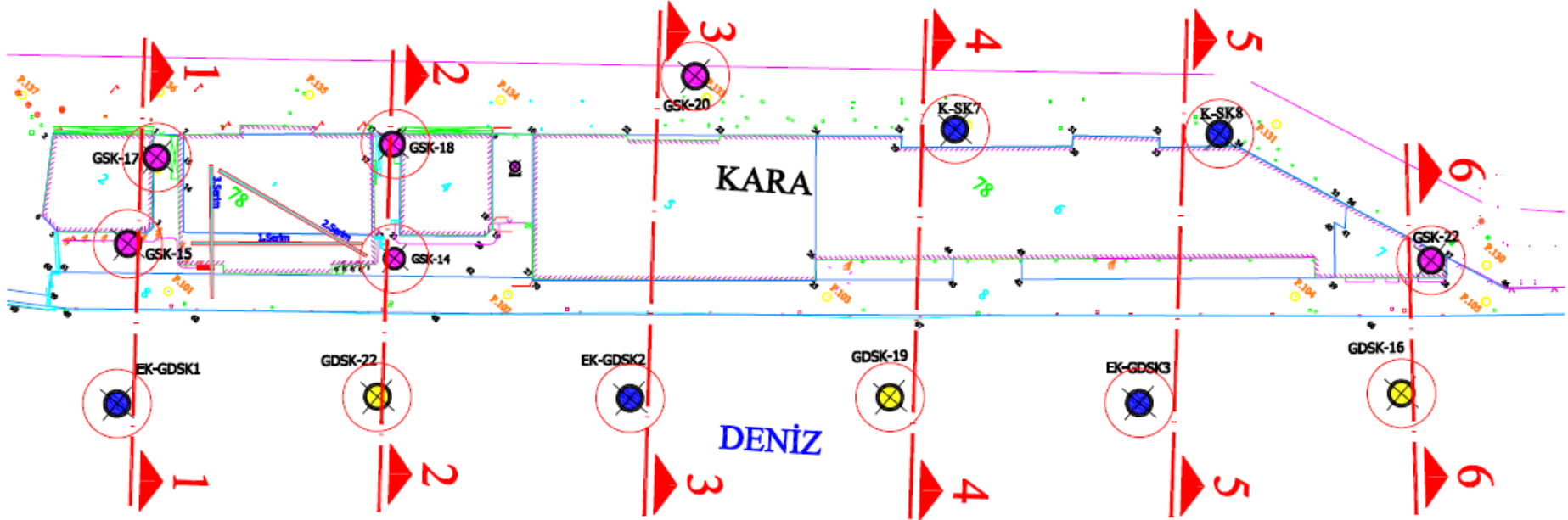
Hamada vd.(1986)'nin ampirik modeli, Bartlett ve Youd'ın MLR modeli ve Shamoto vd.(1998)'ne göre tahmin edilen yatay yer değiştirme değerleri karşılaştırılmış ve oluşturulan grafiklerle ilgili sonuçlar gösterilmiştir.

### 6.2 Bölgenin Yerel Zemin Koşulları

Tez kapsamında inceleme alanı olarak seçilen alan İstanbul'da yer almaktadır (Şekil 6.1). Seçilen alanda verileri kullanılan sondaj noktaları ve sondaj noktaları kullanılarak oluşturulan denize dik kesitlerin yerleşimi Şekil 6.2'de gösterilmiştir. Çalışma kapsamında oluşturulan 6 adet kesitin çizimleri ise Şekil 6.3-4-5-6-7-8'de gösterilmiştir.



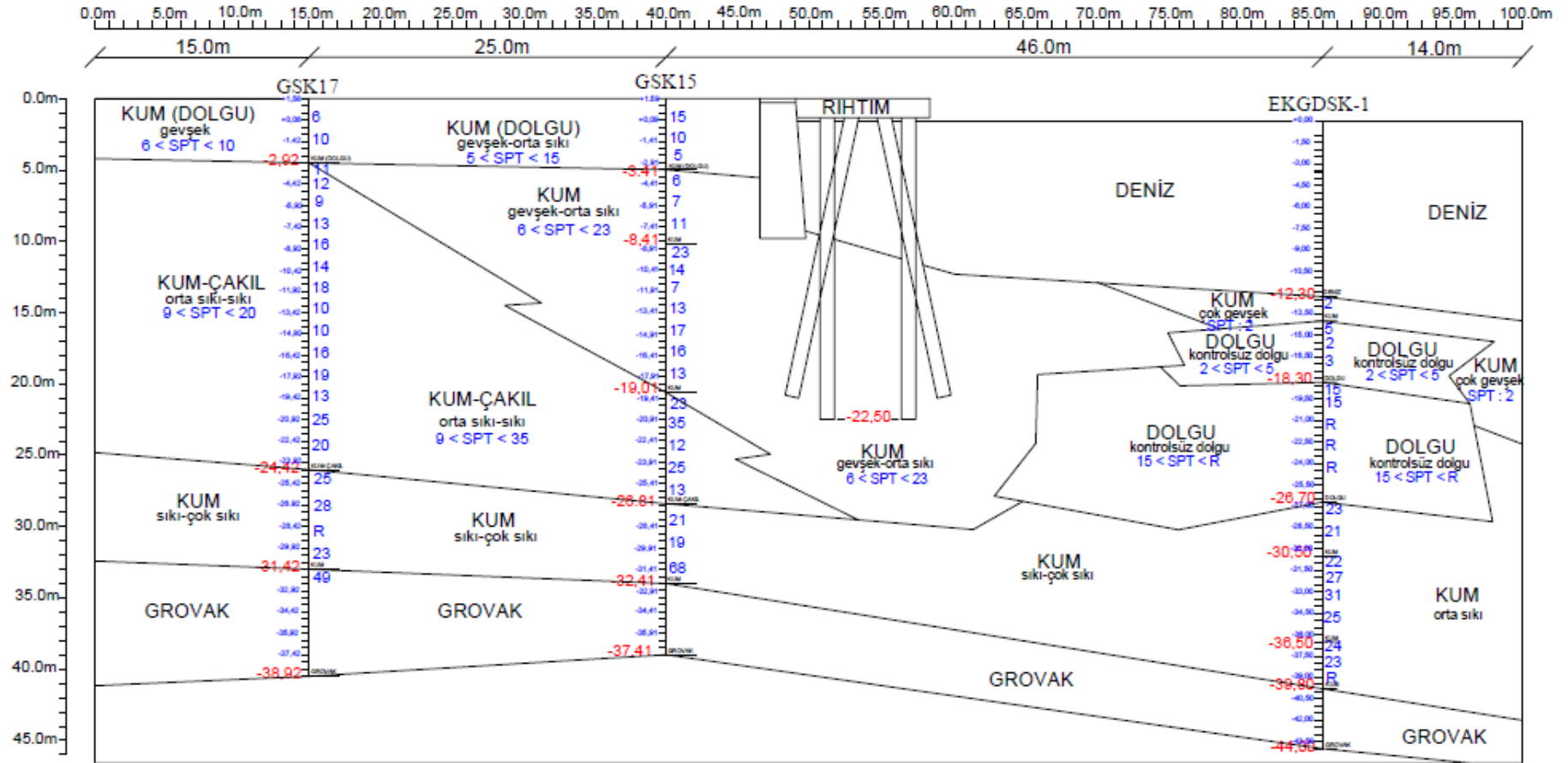
Şekil 6.1 : Seçilen inceleme alanının lokasyonu



Şekil 6.2 : İnceleme alanında oluşturulan kesitlerin yerleşimi

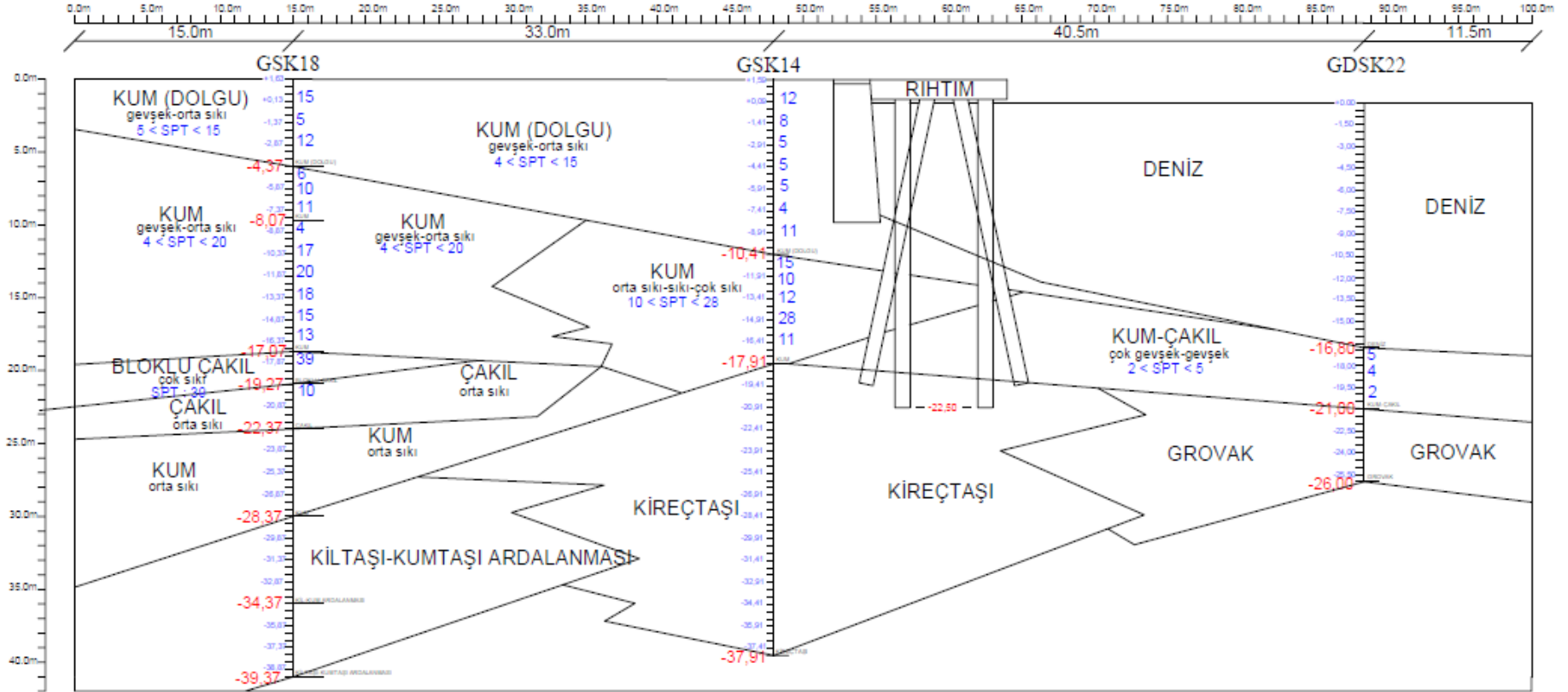


## KESİT 1



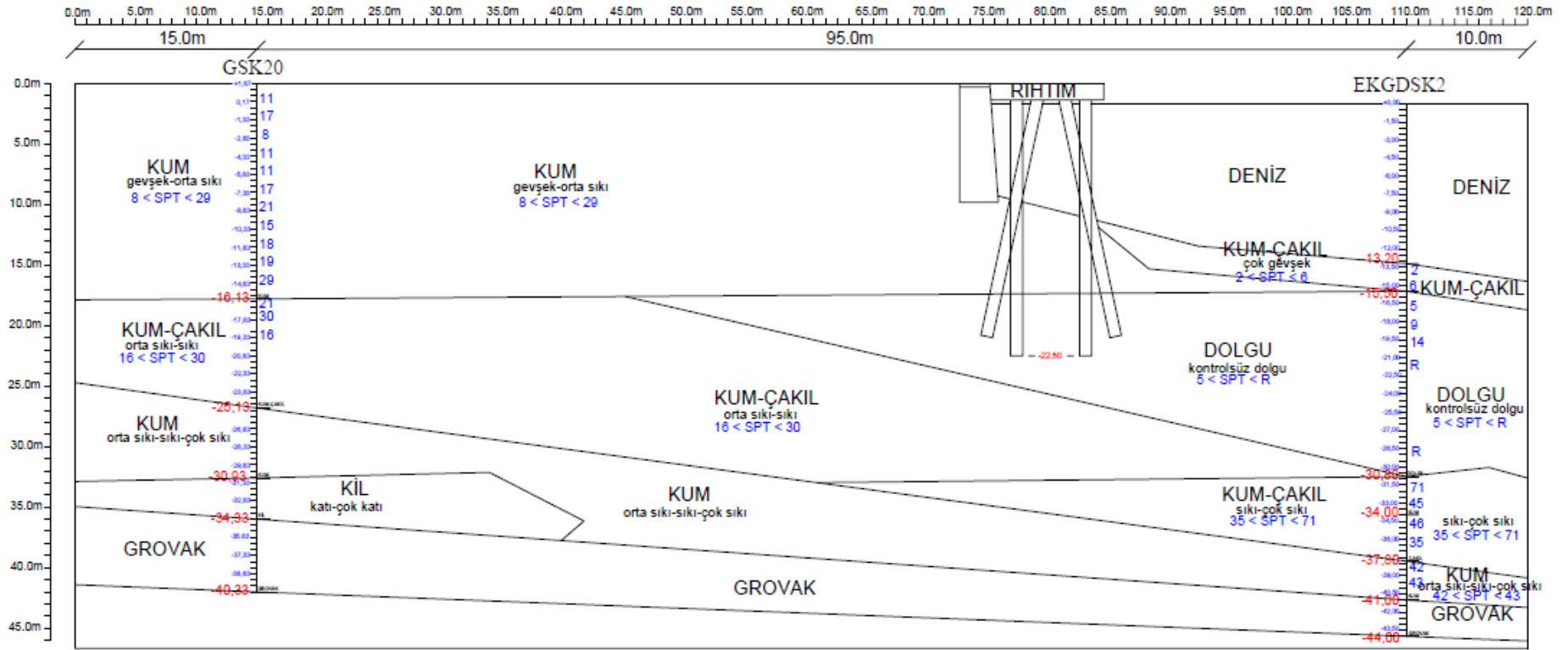
Şekil 6.3 : Yanal yayılma kesit-1

## KESİT 2



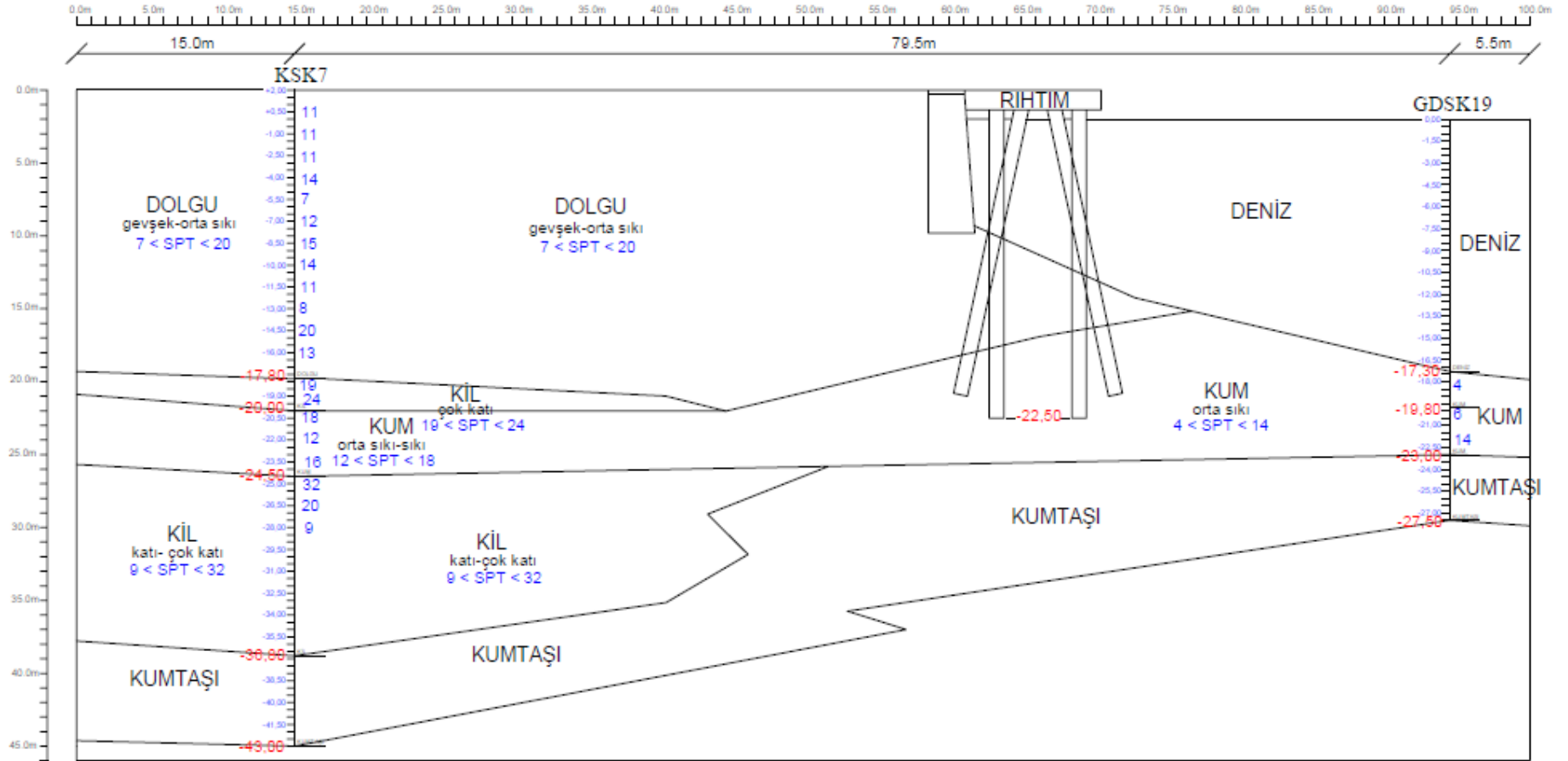
Şekil 6.4 : Yanal yayılma kesit-2

### KESİT 3



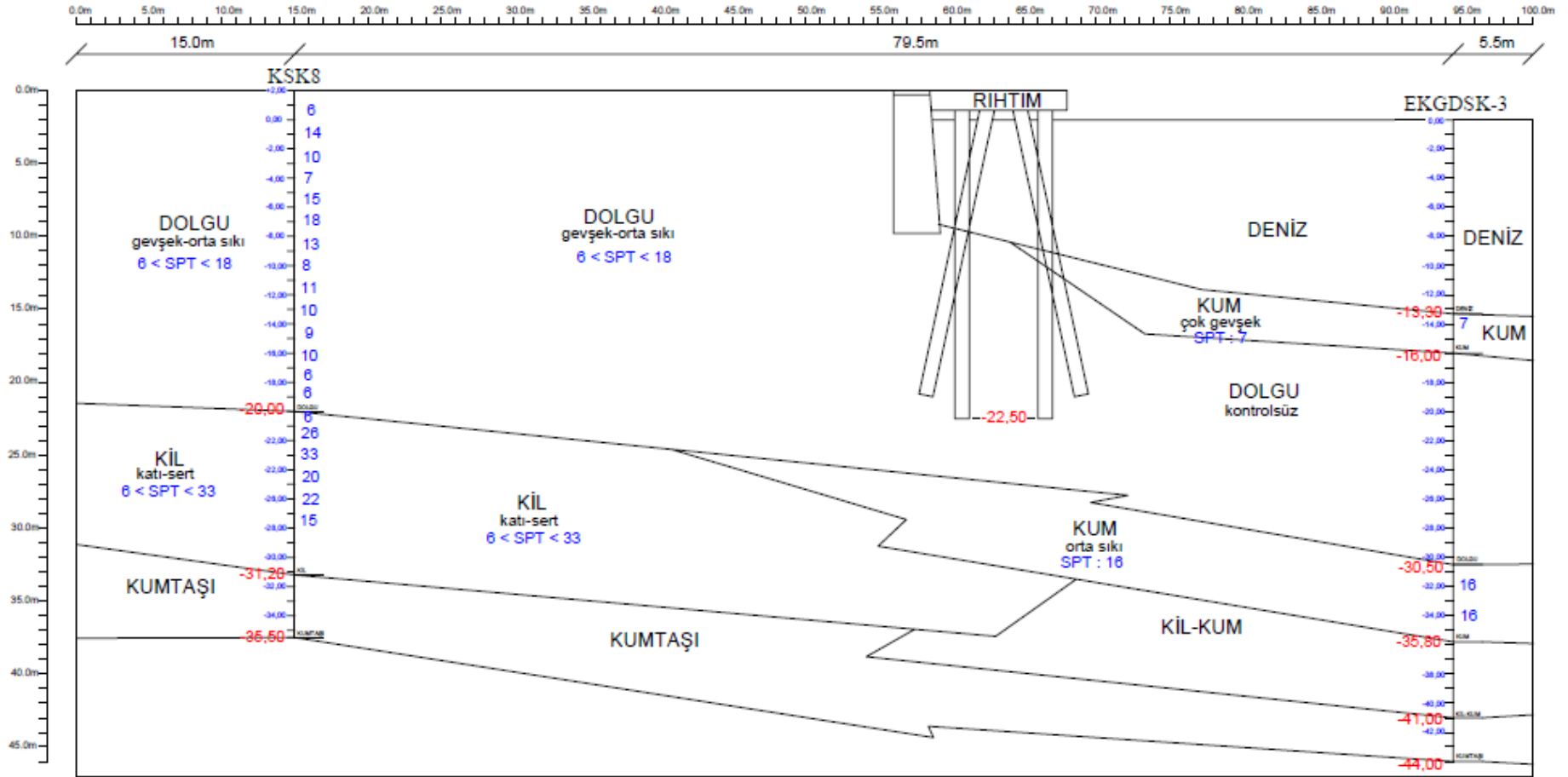
Şekil 6.5 : Yanal yayılma kesit-3

## KESİT-4



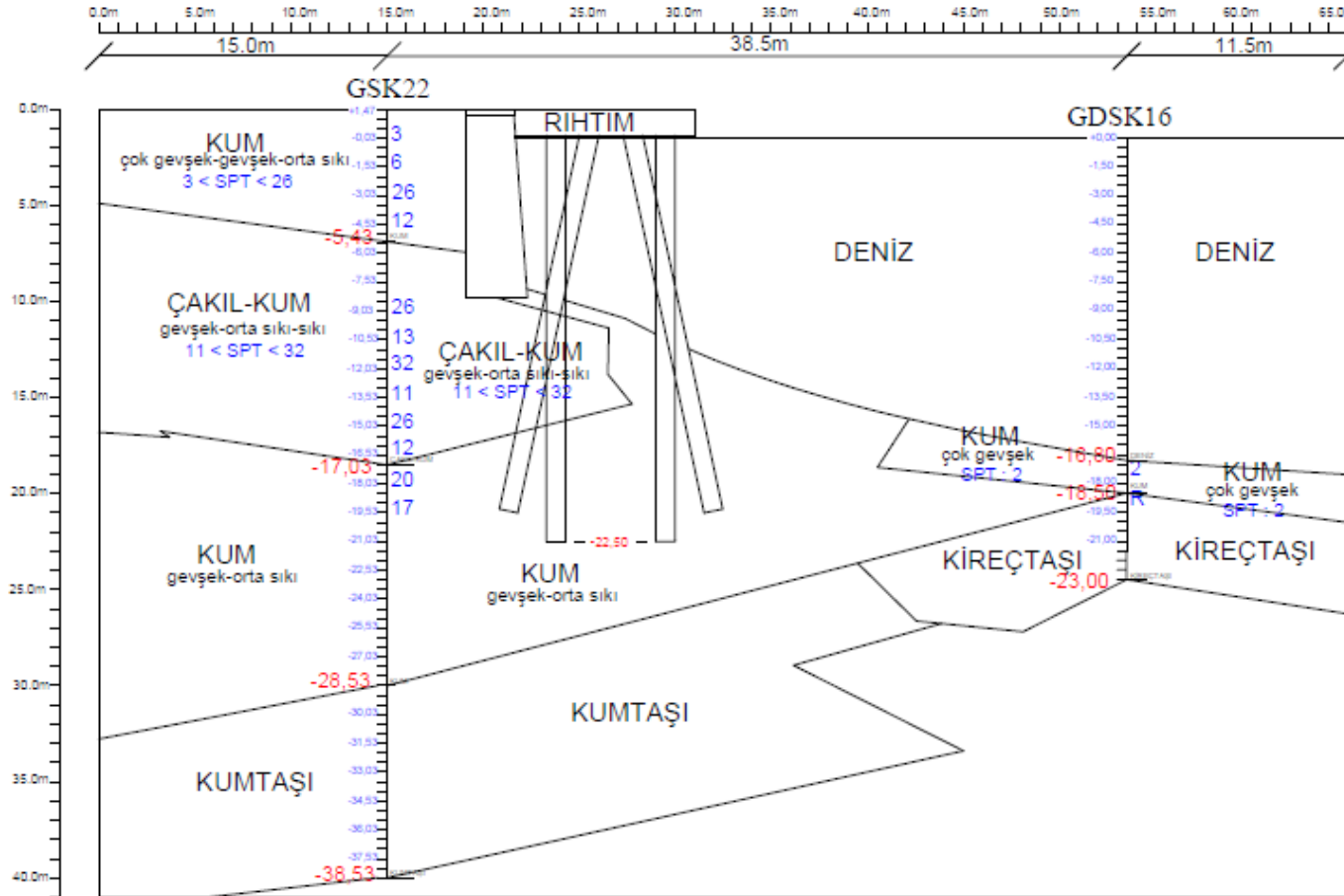
Şekil 6.6 : Yanal yayılma kesit-4

## KESİT-5



Şekil 6.7 : Yanal yayılma kesit-5

## KESİT 6



Şekil 6.8 : Yanal yayılma kesit-6

### 6.3 Yanal Yayılmada Yatay Deplasmanların Belirlenmesi

Çalışmanın bu bölümünde Hamada vd. (1986)'nin ampirik modeli, Bartlett ve Youd'un MLR modeli ve Shamoto vd.(1998)'nin modeli olmak üzere 3 farklı ampirik model kullanılarak yatay yer değiştirme tahmini çalışması yapılmıştır.

#### 6.3.1 Hamada (1986)'nin ampirik modeli

Daha önceki bölümlerde yer verildiği üzere Hamada vd. (1986) çalışmalarında kalıcı yatay yer değiştirme hesabını aşağıda verilen Eşitlik 6.1 ile ortaya koymuştur.

$$D = 0,75 \cdot H^{0,5} \cdot Q^{0,33} \quad (6.1)$$

Bu eşitlikte;

D = yatay yönde yer değiştirme (m)

H = sıvılaştıran zemin tabakası kalınlığı (m)

Q = zemin yüzey eğimi ile sıvılaştıran zeminin taban eğiminden fazla olanı (%)

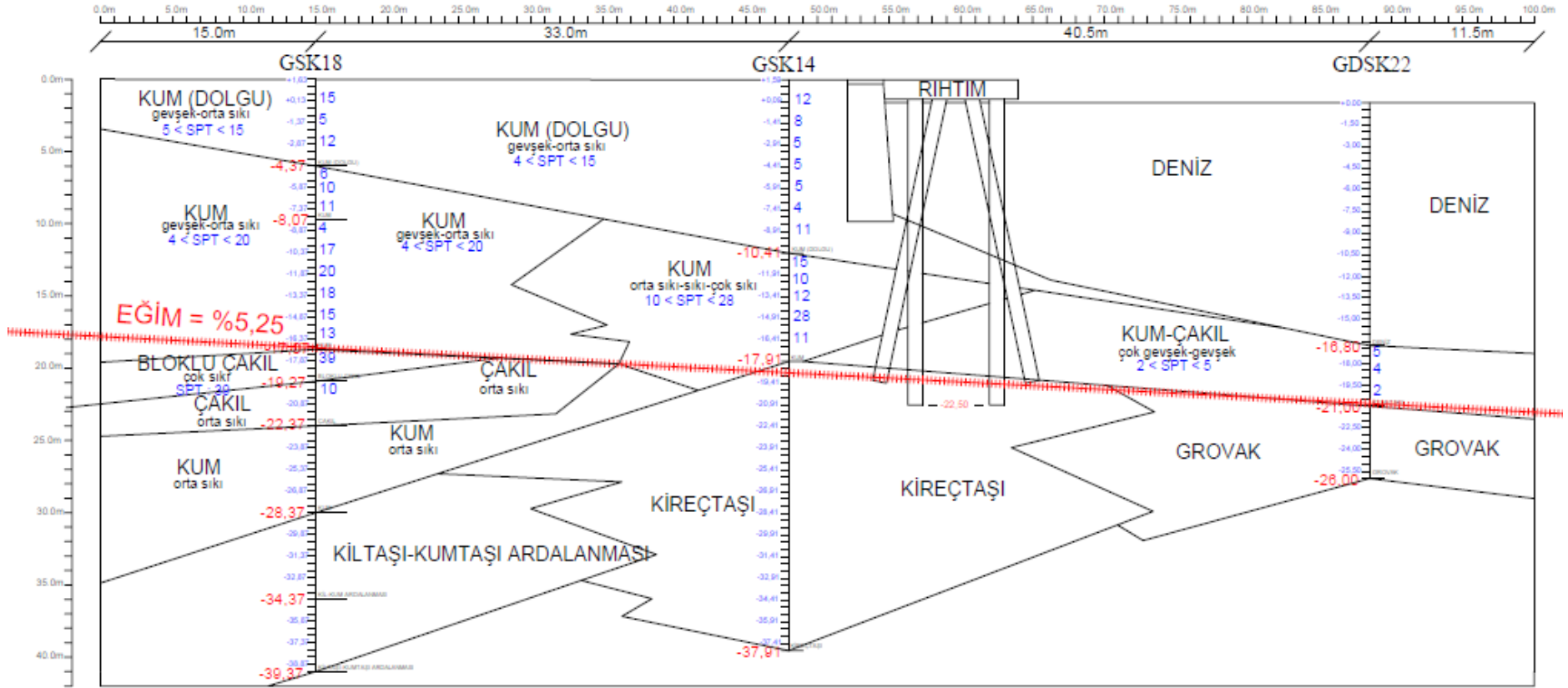
Seçilen inceleme alanının zemin yüzey eğimi oldukça düşük olup, genel olarak düz bir yüzeye sahiptir. Bu nedenle Hamada vd.(1986)'nin ampirik formülünde kullanılacak Q değeri için sıvılaştıran zemin tabakalarının taban eğimleri bulunması gereklidir. Oluşturulan kesitlerde sıvılaştıran tabaka taban eğimleri çizilmiştir. İnceleme alanında oluşturulan kesitlerde sıvılaştıran zemin tabakalarının taban eğimleri Çizelge 6.1'de verilmiştir. Ayrıca Şekil 6.9'de Kesit-2 için çizilen sıvılaştıran tabakaların taban eğimi örnek olarak gösterilmiştir.

**Çizelge 6.1:** Oluşturulan kesitlerde sıvılaştıran zemin tabakalarının taban eğimleri

Kesit No	Sıvılaştıran Zeminin Tabakalarının Taban Eğimi (Q)
Kesit-1	% 3,80
Kesit-2	%5,25
Kesit-3	%2,95
Kesit-4	%5,10
Kesit-5	% 16,60
Kesit-6	% 1,40

Hamada vd.(1986)'nin ampirik modeli formülündeki Q değeri sırasıyla Kesit-1'de %3,80, Kesit-2'de %5,25, Kesit-3'de %2,95, Kesit-4'te %5,10, Kesit-5'te %16,60 ve Kesit-6'de %1,40 olarak bulunmuştur.

## KESİT 2



Şekil 6.9 : Kesit-2 için oluşturulan sıvılaştıran tabaka taban eğimi



Hamada vd.(1986)'nin ampirik formülündeki bir diğer parametre olan H (sıvılaştan tabaka kalınlığı) değerleri Çizelge 6.2 ile ortaya konmuştur.

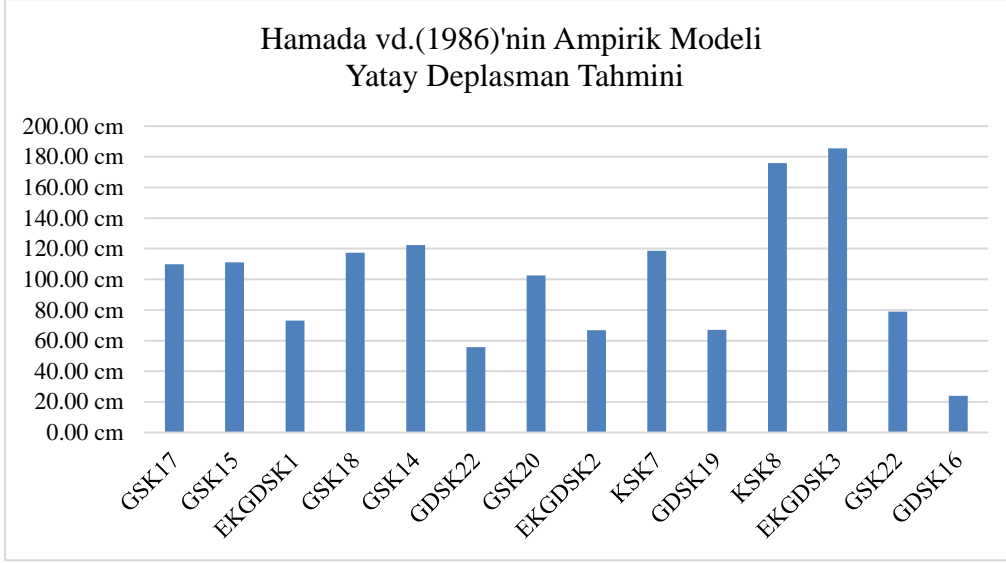
**Çizelge 6.2:** Çalışma alanındaki sondajlarda sıvılaştan tabaka kalınlıkları

	Sondaj No	Sıvılaştan Tabaka Kalınlığı (H)
Kesit-1	GSK17	18,55 m
	GSK15	19,00 m
	EKGDSK1	8,20 m
Kesit-2	GSK18	17,10 m
	GSK14	18,65 m
	GDSK22	3,85 m
Kesit-3	GSK20	19,10 m
	EKGDSK2	8,10 m
Kesit-4	KSK7	17,80 m
	GDSK19	5,70 m
Kesit-5	KSK8	18,00 m
	EKGDSK3	20,00 m
Kesit-6	GSK22	18,55 m
	GDSK16	1,70 m

Çalışma kapsamında kesitlerde bulunan sondajların Hamada vd.(1986)'nin metoduna göre tahmin edilen yatay yer değiştirme değerleri Çizelge 6.3'de gösterilmiştir.

**Çizelge 6.3:** Hamada (1986)'nin metoduna göre sondajlardaki yatay deplasmanlar

	Sondaj No	Yatay Deplasman Miktarı (D)
Kesit-1	GSK17	110 cm
	GSK15	111 cm
	EKGDSK1	73 cm
Kesit-2	GSK18	117 cm
	GSK14	122 cm
	GDSK22	56 cm
Kesit-3	GSK20	102 cm
	EKGDSK2	67 cm
Kesit-4	KSK7	119 cm
	GDSK19	67 cm
Kesit-5	KSK8	176 cm
	EKGDSK3	185 cm
Kesit-6	GSK22	79 cm
	GDSK16	24 cm



**Şekil 6.10 :** Hamada (1986) metoduna göre tahmin edilen yatay deplasman değerleri

### 6.3.2 Bartlett ve Youd(1992)'un MLR (Çoklu Doğrusal Regresyon) modeli

Daha önceki bölümlerde yer verildiği üzere MLR metodu ile yapılan çalışmalarda yatay yer değiştirme tahmini için düşük eğimli araziler ve serbest yüzeyli araziler olmak üzere 2 farklı bağıntı önerilmiştir. Bu çalışma için seçilen alandaki zemin şartları göz önüne alınarak serbest yüzeyli araziler için uygun görülen bağıntı Eşitlik 6.2 ile ortaya koymuştur.

$$\log D = -16,713 + 1,532M_w - 1,406\log R^* - 0,012R + 0,592\log W + 0,540\log T_{15} + 3,413 \log(100 - F_{15}) - 0,795\log (D50_{15} + 0,1mm) \quad (6.2)$$

Bu eşitlikte;

D = Yatay yer değiştirme (m)

$M_w$  = Deprem moment büyüklüğü

R = Sismik kaynağa en kısa yatay mesafe (km)

$T_{15}$  = Suya doymun kaba daneli tabakaların düzeltilmiş SPT değerlerinin 15'den küçük olan zemin tabakalarının kalınlığı (m)

$F_{15}$  =  $T_{15}$  içindeki ince dane yüzdesi

$D50_{15}$  =  $T_{15}$ 'de ortalama dane çapı (mm)

W = Serbest yüzey oranı (W=H/L)

$R^*$  = Değiştirilmiş sismik kaynağa mesafe (km)

$R^*$  değeri, aşağıda verilen Eşitlik 6.3 ve Eşitlik 6.4 kullanılarak hesap edilebilir.

$$R^* = R_0 + R \quad (6.3)$$

$$R_0 = 10^{(0,89M_w - 5,64)} \quad (6.4)$$

Bartlett ve Youd'un MLR metodunu kullanmak için uygun şartlar şunlardır;

- Moment magnitudü:  $6,0 \leq M_w \leq 8,0$
- Serbest yüzey oranı:  $\%1 \leq W \leq \%20$
- Şev eğimi:  $\%0,1 \leq S \leq \%6$
- SPT değeri 15'den küçük olan zemin tabakalarının kalınlığı:  $1m \leq T_{15} \leq 15m$
- İnce dane oranı:  $F_{15} < \%50$
- Ortalama tane çapı:  $0,075mm \leq D_{50} \leq 1,0mm$

Çalışma için seçilen alanda oluşturulan kesitlerdeki sondaj noktaları içinde Bartlett ve Youd'un MLR metodunun kullanılmasına uygun olan 6 sondaj noktasına yatay deplasman tahmini yapılmıştır. Kullanılan parametreler Çizelge 6.4'de gösterilmiştir.

**Çizelge 6.4:** Bartlett ve Youd(1992)'un MLR metodu için kullanılacak parametreler

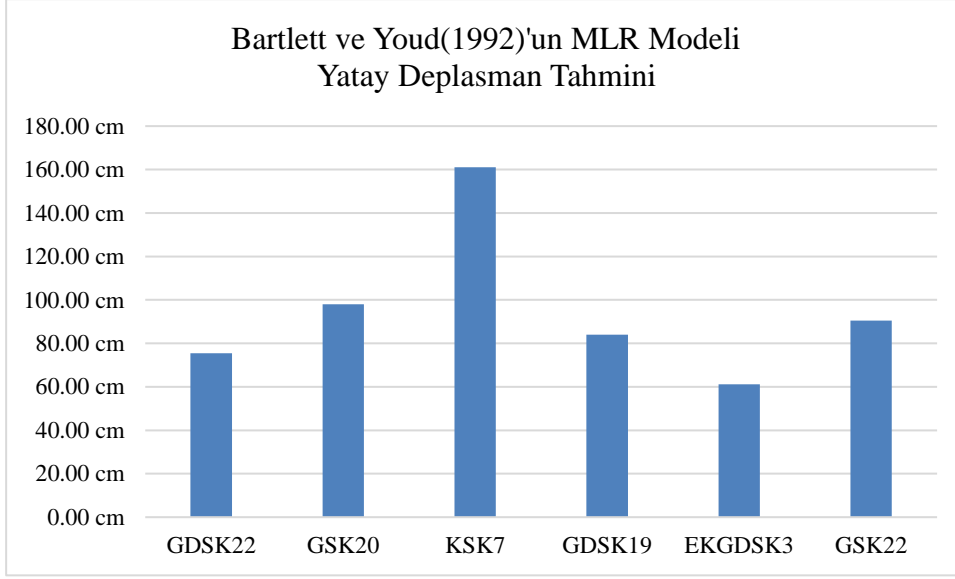
Sondaj No	W	T15	F15	(D50)15
GDSK22	%5,25	3,20 m	%16,00	0,90 mm
GSK20	%2,95	5,15 m	%5,00	1,00 mm
KSK7	%5,10	10,00 m	%10,00	1,00 mm
GDSK19	%5,10	2,70 m	%8,50	1,00 mm
EKGDSK3	%16,60	3,20 m	%30,10	0,30 mm
GSK22	%1,40	8,05 m	%9,75	1,00 mm

Çalışma kapsamında ele alınan zemin kesitlerinde  $R = 15$  km ve  $M_w = 7,5$  kabul edilmiştir.  $R^*$  değeri gerekli formüllerle hesaplanmıştır ( $R^* = 25,839$  km).

Seçilen 6 sondaj noktasının MLR metoduna göre tahmin edilen yatay deplasman değerleri ve bulunan değerlerin grafiği Çizelge 6.5 ve Şekil 6.11'de verilmiştir.

**Çizelge 6.5:** Bartlett ve Youd(1992)'un MLR metoduna göre yatay deplasmanlar

Sondaj No	Log(D)	D (Yatay Deplasman)
GDSK22	-0,1220	75,51 cm
GSK20	-0,0091	97,93 cm
KSK7	0,2071	161,12 cm
GDSK19	-0,0754	84,06 cm
EKGDSK3	0,2180	61,22 cm
GSK22	-0,1720	90,51 cm



**Şekil 6.11** : Seçilen sondajların Bartlett ve Youd (1992)'un MLR metoduna göre yatay deplasman tahminleri

### 6.3.3 Shamoto (1998)'nin modeli

Daha önceki bölümlerde de yer verildiği üzere Shamoto vd.(1998)'nin modeli ile yatay yer değiştirme tahmininde bulunmak için kullanılan denklem Eşitlik 6.5 ile verilmiştir.

$$D_h = C_h \times (D_h)_{\max} = C_h \times \int_0^H (\gamma_r)_{\max} dz \quad (6.5)$$

Eşitlikte;

$D_h$  = Zeminin yatay deplasmanı (m)

$C_h$  = Görülen ve hesap edilen yatay deplasmanlar arasındaki düzeltme faktörü

$H$  = İncelenen tabaka derinliği (m)

$z$  = Yüzeyden itibaren derinlik (m)

$(\gamma_r)_{\max}$  = En büyük artık makaslama birim deformasyonu

Çalışma için seçilen alandaki 5 sondaj noktasına Shamoto vd.(1998)'nin modeli kullanılarak yatay yer değiştirme tahmini yapılmıştır. Shamoto vd.(1998)'nin modelinde 5 sondaj noktasına yatay yer değiştirme tahmini yapılırken kullanılan parametrelerden olan  $(\gamma_r)_{\max}$ , Shamoto vd.(1998) tarafından oluşturulan, %0-10-20 ince dane oranına düzenlenmiş, kayma gerilmesi oranı ve ince dane oranına göre düzeltilmiş SPT sayısının kullanıldığı grafiklerden bulunmaktadır. Ayrıca denklemde bulunan  $C_h$  değeri; hafif eğimli veya serbest yüzeyli alanlarda 1,00; düz alanlar için ise 0,16 olarak kullanılmaktadır.

Çizelge 6.6-7-8-9-10'da sırasıyla KSK7, GSK20, GSK15, GSK14 ve GSK17 sondajlarına ait Shamoto vd. (1998) metoduna göre yatay yer değiştirmenin belirlenmesi hususunda kullanılan parametreler verilmiştir.

**Çizelge 6.6:** Shamoto (1998) modeline göre yatay deplasman – KSK7

KSK7	
İDO	%10
Ortalama Na	12
Ortalama CSR	0,35
Sıvılaştan Tabaka Kalınlığı	19,80 m
yr	25,44
Dh	90,51 cm

**Çizelge 6.7:** Shamoto (1998) modeline göre yatay deplasman – GSK20

GSK20	
İDO	%11
Ortalama Na	15
Ortalama CSR	0,41
Sıvılaştan Tabaka Kalınlığı	20,00 m
yr	19,13
Dh	61,22 cm

**Çizelge 6.8:** Shamoto (1998) modeline göre yatay deplasman – GSK15

GSK15	
İDO	%12
Ortalama Na	12
Ortalama CSR	0,40
Sıvılaştan Tabaka Kalınlığı	20,00 m
yr	29,75
Dh	95,21 cm

**Çizelge 6.9:** Shamoto (1998) modeline göre yatay deplasman – GSK14

GSK14	
İDO	%8
Ortalama Na	10
Ortalama CSR	0,41
Sıvılaştan Tabaka Kalınlığı	19,50 m
yr	37,14
Dh	115,88 cm

**Çizelge 6.10:** Shamoto (1998) modeline göre yatay deplasman – GSK17

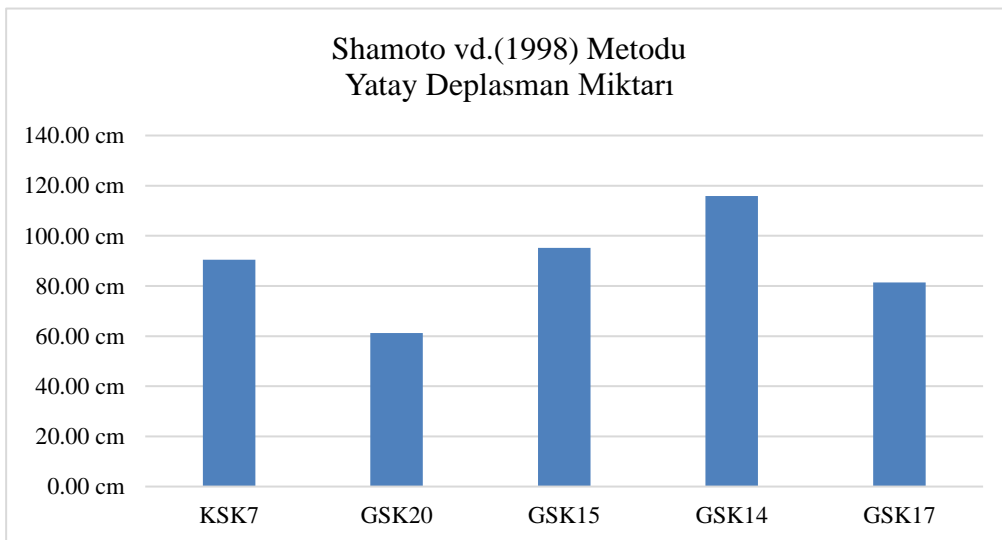
GSK17	
İDO	%12
Ortalama Na	13
Ortalama CSR	0,40
Sıvılaştan Tabaka Kalınlığı	20,00 m
yr	25,43
Dh	81,38 cm

Çizelge 6.6-7-8-9-10’da bulunan sondajların ( $y_r$ ) değerinin bulunmasında ince dane oranları; KSK7 sondajı için %10 oranı, GSK20 sondajı için %11, GSK 15 için %12, GSK14 için %8, GSK17 için %12 alınmıştır.

Çizelge 6.11’de ve Şekil 6.12’de seçilen 5 sondaj noktasının Shamoto vd.(1998) metoduna göre tahmin edilen yatay deplasman değerleri ve tahmin edilen bu değerlerin grafiği gösterilmiştir.

**Çizelge 6.11:** Shamoto (1998) modeline göre sondajlardaki yatay deplasman değerleri

Shamoto vd. (1998) Metodu	
Sondaj No	Yatay Yer Değiştirme Değerleri
KSK7	90,51 cm
GSK20	61,22 cm
GSK15	95,21 cm
GSK14	115,88 cm
GSK17	81,38 cm



**Şekil 6.12 :** Seçilen sondajların Shamoto (1998) modeline göre yatay deplasman tahmin değerleri

## 6.4 Sonuçlar

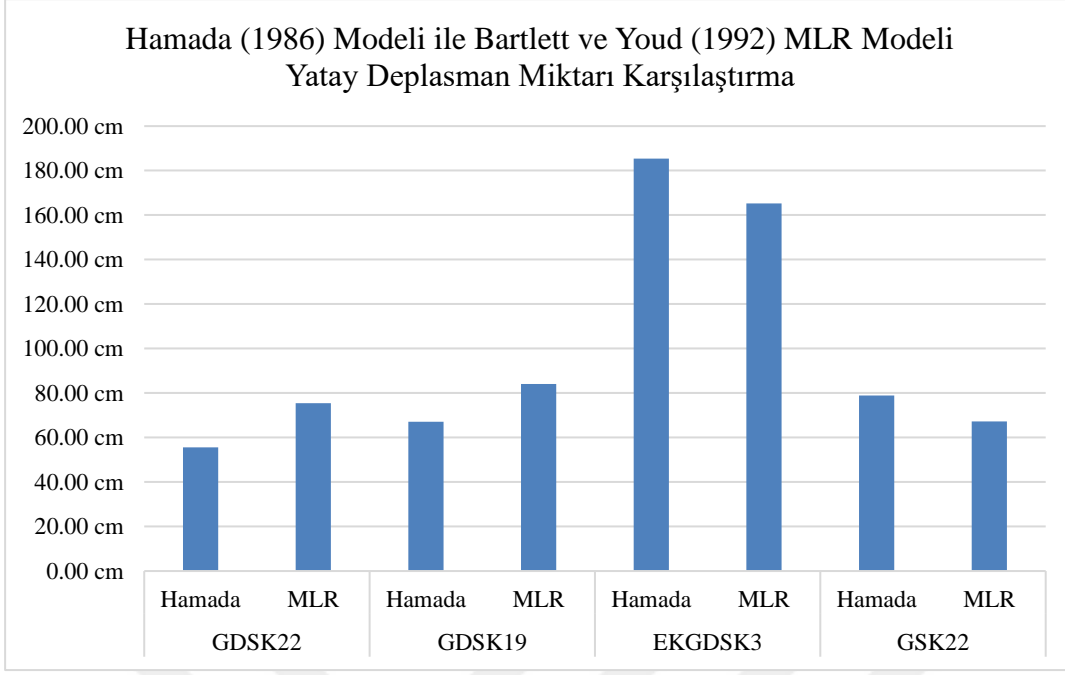
Çalışma kapsamında seçilen alanındaki birçok geoteknik veri 3 farklı metotlar kullanılarak işlenmiş ve alandaki yer alan sondaj noktalarındaki yatay yer değiştirme miktarları tahmin edilmeye çalışılmıştır.

İlk olarak Hamada vd.(1986)'nin ampirik metodu ile yapılan çalışmalara değinilecek olursa, kullanılan ampirik formül oldukça üniform ortalama tane çapına sahip kum muhteva eden zeminler üzerindeki çalışmalardan elde edildiği için ince daneli zemin bölgelerine uygulandığında daha emniyetli olmak gerektiği çeşitli araştırmacıların daha önceki çalışmalarında belirtilmiştir. Hamada vd.(1986)'nin metodu kullanılarak 6 kesitteki 14 sondaja ait tahmin edilen yatay yer değiştirme değerleri 24 cm ile 185 cm arasında değişmektedir.

Çalışmada kullanılan bir diğer metot olan Bartlett ve Youd'un MLR metodu bahsedilen araştırmacılar tarafından Japonya'da ve Amerika'da yaşanmış bazı depremler sonucu oluşan sıvılaşmadan kaynaklanan yanal yayılmalar incelenerek oluşturulmuş bir metottur. Hafif eğimli arazi ve serbest yüzeyle arazi şartları olmak üzere 2 farklı durum için denklem bulunan metotta, çalışma için seçilen proje alanındaki şartlara uygun olduğu için serbest yüzeyle arazi şartları için kullanılması önerilen denklem kullanılmıştır. Bu metodun çakıllı veya çok siltli zeminler için çok uygun olmadığı ve genellikle Japonya, Kuzey Amerika'nın batısı ve kuvvetli azalım oranları benzer diğer alanlarla sınırlı bölgelerde daha uygun sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Seçilen alışma alanında Bartlett ve Youd'un MLR metodunun zemin özellikleri sınır şartlarına uygun olarak seçilen sondajlardaki yatay yer değiştirme tahmin değerleri 67 cm ile 165 cm arasında değişmektedir.

Çalışmadan kullanılan 3. metot olan Shamoto vd.(1998) metodu ise Japonya'da yaşanan 12 farklı deprem bölgesinden alınan ve laboratuvardaki çalışmalarda kullanılan örselenmemiş kumlu zeminler üzerine yapılan üniform genlikli çalışmalar sonucu oluşturulmuştur. Seçilen alışma alanında Shamoto vd.(1998) metodu kullanılarak yatay yer değiştirme tahmini yapılan sondajlardaki yatay yer değiştirme değerleri 61 cm ile 116 cm arasında değişmektedir.

Çalışmada kullanılan Hamada vd.(1986) modeli ile MLR modeli ile tahmin edilen GDSK22, GDSK19, EKGDSK3 ve GSK22 sondajlarının yatay deplasman miktarları şekil 6.13'de karşılaştırma tablosu şeklinde verilmiştir.



**Şekil 6.13 :** Belirlenmiş 4 sondajın Hamada (1986) ile Barlett ve Youd (1992) MLR metodunun karşılaştırılması

GDSK22 sondajına ait yatay deplasman miktarı Hamada vd.(1986) metoduna göre 56cm, MLR metoduna göre 76 cm bulunmuştur. Hamada vd. (1986) metoduna göre tahmin edilen değer MLR metoduna göre tahmin edilen değere göre 20 cm daha az olduğu görülmüştür.

GDSK19 sondajına ait yatay deplasman miktarı Hamada vd.(1986) metoduna göre 67 cm, MLR metoduna göre 84 cm bulunmuştur. Hamada vd.(1986) metoduna göre tahmin edilen değer MLR metoduna göre tahmin edilen değere göre 17 cm daha az olduğu görülmüştür.

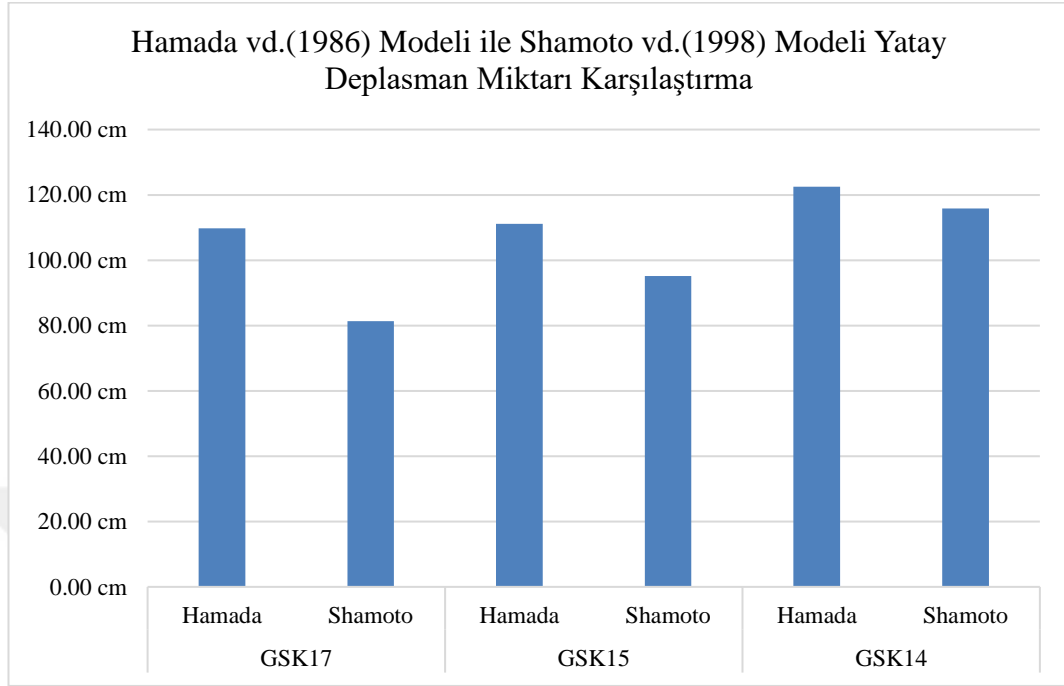
EKGDSK3 sondajına ait yatay deplasman miktarı Hamada vd.(1986) metoduna göre 185 cm, MLR metoduna göre 165 cm bulunmuştur. Hamada vd.(1986) metoduna göre tahmin edilen değer MLR metoduna göre tahmin edilen değere göre 20 cm daha fazla olduğu görülmüştür.

GSK22 sondajına ait yatay deplasman miktarı Hamada vd.(1986) metoduna göre 79 cm, MLR metoduna göre 67 cm bulunmuştur. Hamada vd.(1986) metoduna göre tahmin edilen değer MLR metoduna göre tahmin edilen değere göre 12 cm daha fazla olduğu görülmüştür.

Hamada vd.(1986) ile Barlett ve Youd(1992)'un MLR modellerinin yatay deplasman tahminleri karşılaştırıldığı 4 sondajda da birbirine yakın değerler görülmüştür.



Çalışmada kullanılan Hamada vd.(1986) metodu ve Shamoto vd.(1998) metodu ile tahmin edilen yatay deplasman miktarları Şekil 6.14’de verilmiştir.



**Şekil 6.14 :** Belirlenen 3 sondajın Hamada (1986) ve Shamoto (1998) metoduna göre karşılaştırılması

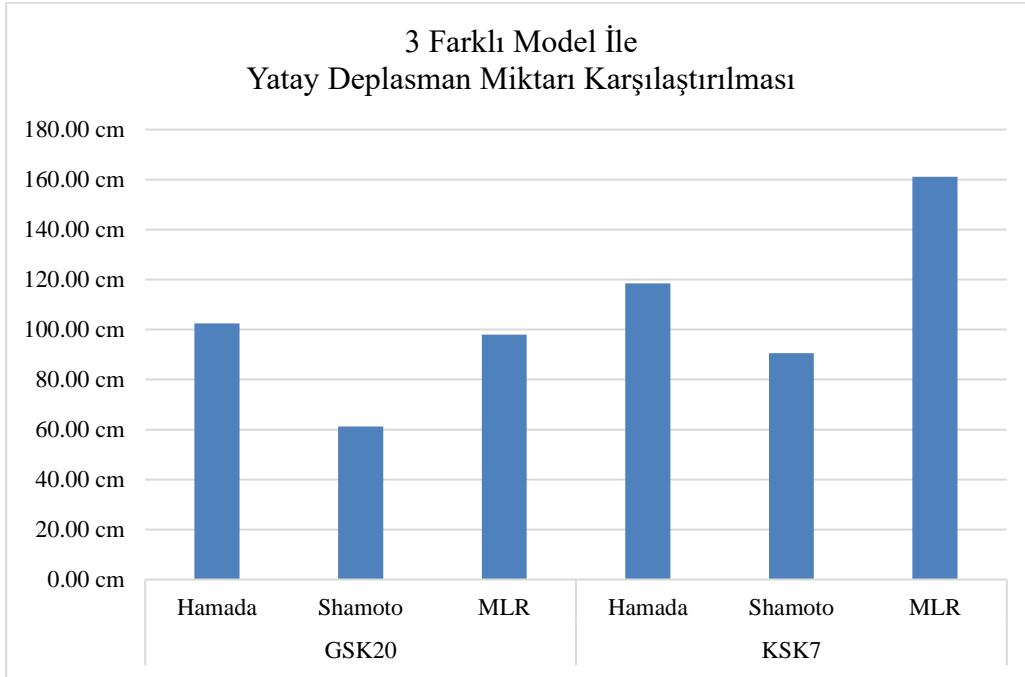
GSK17 sondajına ait yatay deplasman miktarı Hamada vd.(1986) metoduna göre 110 cm, Shamoto vd.(1998) metoduna göre 81 cm bulunmuştur. Hamada vd.(1986) metoduna göre tahmin edilen değer, Shamoto vd.(1998) metoduna göre tahmin edilen değerden 29 cm daha fazla olduğu görülmüştür.

GSK15 sondajına ait yatay deplasman miktarı Hamada vd.(1986) metoduna göre 111 cm, Shamoto vd.(1998) metoduna göre 95 cm bulunmuştur. Hamada vd.(1986) metoduna göre tahmin edilen değer, Shamoto vd.(1998) metoduna göre tahmin edilen değerden 16 cm daha fazla olduğu görülmüştür.

GSK14 sondajına ait yatay deplasman miktarı Hamada vd.(1986) metoduna göre 122 cm, Shamoto vd.(1998) metoduna göre 116 cm bulunmuştur. Hamada vd.(1986) metoduna göre tahmin edilen değer, Shamoto vd.(1998) metoduna göre tahmin edilen değerden 6 cm daha fazla olduğu görülmüştür.

Hamada vd.(1986) ile Shamoto vd.(1998) modellerinin yatay deplasman tahminleri karşılaştırıldığı Hamada vd.(1986) metodu ile tahmin edilen yatay deplasman değerinin 3 sondajda da daha fazla olduğu görülmüştür.

Son olarak çalışmada kullanılan 3 farklı metot ile yatay deplasman tahmini gerçekleştirilen GSK20 ve KSK7 sondajlarına ait değerler Şekil 6.15’de verilmiştir.



**Şekil 6.15 :** GSK20 ve KSK7 sondajlarında 3 farklı metotla tahmin edilen yatay deplasman miktarları

Şekil 6.15’de yer alan karşılaştırma tablosuna göre GSK20 sondajı için yatay yer değiştirme miktarı Hamada vd.(1986) metoduna göre 102 cm, Shamoto vd.(1998) metoduna göre 61 cm ve MLR metoduna göre 98 cm bulunmuştur. Hamada vd.(1986) metoduna göre tahmin edilen yatay yer değiştirme değeri Shamoto vd.(1998) metoduna göre 41cm, MLR metoduna göre 3 cm daha fazla bulunmuştur.

Şekil 6.15’de yer alan karşılaştırma tablosuna göre KSK7 sondajı için yatay yer değiştirme miktarı Hamada vd.(1986) metoduna göre 119 cm, Shamoto vd.(1998) metoduna göre 91 cm ve MLR metoduna göre 161 cm bulunmuştur. Hamada vd.(1986) metoduna göre tahmin edilen yatay yer değiştirme değeri, Shamoto vd.(1998) metoduna göre 28 cm fazla, MLR metoduna göre 42 cm daha az bulunmuştur.

3 metodunda sonuçlarının karşılaştırıldığı GSK20 ve KSK7 sondajlarında Shamoto vd.(1998) metodu diğer 2 metoda göre daha az yatay deplasman miktarı belirlemiştir. Hamada vd. (1986) ile MLR metodu ile tahmin edilen değerler ise sondajların farklı şartlardaki parametrelerin etki oranlarındaki farklılık sebebiyle değişebilmektedir.

## 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Depremler sırasında oluşan sıvılaşma ve sıvılaşmanın sebep olduğu yanal yayılmaların, zeminde oluşan hasarlar içerisinde en çok gözlenen olaylardan biri olduğu bilinmektedir. Bu tez çalışmasında geoteknik deprem mühendisliği alanının en önemli konularından biri olan, çevrimli dinamik yüklemeler sonucunda oluşan sıvılaşma ve sıvılaşma sonucu oluşan hasar tiplerinden olan yanal yayılma incelenmiştir.

Çalışma kapsamında ilk olarak sıvılaşma ile ilgili literatür araştırması yapılmış ve sıvılaşmanın mekanizması, sıvılaşmayı etkileyen faktörler, sıvılaşma sonucu oluşan hasar tipleri başta olmak üzere sıvılaşma olgusuna dair bilgiler ortaya konmuştur. Sıvılaşma potansiyelini hesaplanma yöntemi olarak “Basitleştirilmiş Yöntem” yaklaşımı, detayları ile açıklanmıştır. Sıvılaşma sonucunda oluşan hasar tiplerinden olan yanal yayılmanın yatay yönde deplasmanları ile ilgili Youd ve Perkins(1987) modeli, Hamada vd.(1986) modeli, Bartlett ve Youd(1992)’un MLR modeli ve Shamoto vd.(1998) modeli olmak üzere 4 farklı yöntem ele alınmıştır.

Çalışmanın analiz kısmındaki sıvılaşma bölümünde Seed ve Idriss (1971) tarafından bulunan ve daha sonra Youd vd. (2001a) tarafından güncelleştirilip en son halini alan “Basitleştirilmiş Yöntem” yaklaşımıyla sıvılaşma potansiyeli belirlenme işlemi yapılmıştır. İnceleme alanında seçilen sondajların tamamında çeşitli derinlikte ve kalınlıkta, farklı düzeyde güvenlik katsayısı (FS)  $< 1$  olan, sıvılaşma potansiyeli mevcut zemin bölgeleri görülmüştür. Bu tez çalışmasının analiz kısmı için kullanılan alandaki zemin özellikleri inceleme alanında herhangi bir zemin iyileştirme çalışması yapılmadan önceki değerlerdir. Tez çalışmasının analiz kısmında zemin özellikleri kullanılan çalışma alanı, alanda yapılan proje kapsamında jet grout, deep soil mixing (DSM) ve turbo grouting işlemleri yapılarak iyileştirilmiş ve sıvılaşma potansiyeli ortadan kaldırılmıştır.

Çalışmanın analiz kısmındaki yanal yayılma bölümünde daha önce hakkında bilgi verilen yanal yayılmada yatay yer değiştirme tahmin modellerinden Hamada vd.(1986) modeli, Bartlett ve Youd(1992)’un MLR modeli ve Shamoto vd.(1998)’ni modeli kullanılarak 3 farklı modelde yatay yer değiştirme tahmini yapılmıştır. Seçilen sondaj noktalarındaki yatay yer değiştirme değerlerinin Hamada vd.(1986) ampirik metoduna göre 24 cm ile 185 cm arasında, MLR metoduna göre 67 cm ile 165 cm

arasında ve Shamoto vd.(1998) metoduna göre 61 cm ile 115 cm arasında değiştiği grlmştr. Bu tez çalışmasının analiz kısmı için kullanılan alandaki zemin özellikleri inceleme alanında herhangi bir geoteknik yapılmadan önceki değerlerdir. Tez çalışmasının analiz kısmında zemin özellikleri kullanılan çalışma alanı, üzerine yapılan proje kapsamında kesişen kazık ve diyafram duvarlar ile çevrelenmiş ve yanal yayılma ortadan kaldırılmıştır.

Çalışmadan elde edilen başlıca sonuçlar şu şekilde sıralanabilir:

- Sıvılaşma mekanizması süreçleriyle birlikte detaylı ele alınmış ve seçilen çalışma alanın bulunduğu İstanbul'daki bölgenin sıvılaşma potansiyeline sahip olduğu "Basitleştirilmiş Yöntem" yaklaşımı ve TBDY(2019)'da bulunan sıvılaşmaya ile ilgili maddeler baz alınarak yapılan sayısal analizlerle ortaya konmuştur.
- Çeşitli araştırmacılar tarafından daha önce ortaya konan sıvılaşma ile ilgili parametrelerin, depremin moment byklğu, maksimum yer ivmesi, deprem merkezinin uzaklığı gibi deprem ile ilgili parametrelerin yanısıra yer altı su seviyesi, zemin cinsi, dane özellikleri, sıklık derecesi gibi zemin parametrelerden de oluştuğu tekrar ifade edilmiştir.
- Yanal yayılma hususunu etkileyen zemin tabakasının eğimi, sıvılaşan tabaka kalınlığı, ince dane oranları, SPT değer ve ortalama dane çapı gibi birçok faktör bulunmakta olup bu faktörlerin farklı araştırmacıların metotlarında değişik düzeylerde etkidiği grlmştr.
- Yanal deplasmanların tahmin edilmesinde kullanılan her metotta bazı kısıtlamaların mevcut olduğu ve bu bahsedilen kısıtlamalar dikkate alınarak ilgili metodun analizlerde kullanılmasının daha sağlıklı sonuçlar vereceği grlmştr.
- Yanal yayılma için kullanılan yatay yer değiştirme tahmin modellerinden Bartlett ve Youd(1992)'un MLR ve Shamoto vd.(1998) metotlarının uygulanabilirlik açısından çeşitli sınırlamalar dolayısıyla daha az sondaj loguna uygulanabildiği grlmştr. Seçilen sondajlarda 3 metot kullanılarak yapılan karşılaştırmalarda, Shamoto vd.(1998) modeli ile yapılan yatay yer değiştirme tahminlerinin diğer 2 modele göre daha az yatay yer değiştirme tahmininde bulunduğu grlmştr. Hamada vd.(1986)'nin ampirik modelinde

tahmin edilen yatay yer değiştirme miktarının, analiz için seçilen çalışma alanının düz yüzey alanından oluşması nedeniyle Q değerinde sıvılaşmış tabakaların taban eğiminin direkt olarak etkili olduğu görölmüştür. Bu nedenle Hamada vd.(1986)'nin ampirik modelinde sıvılaşmış tabaka alt eğiminin bulunması oldukça önemli olduğu saptanmıştır. Shamoto vd.(1998)'nin modelinde ise ince dane oranına göre düzenlenmiş maksimum makaslama birim deformasyonunu bulmaya yarayan grafiklerin modelin temelinde oldukça önemli olduğu görölmüştür.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar da dikkate alınarak, gelecekte konuyla ilgili yapılacak çalışmalar için yararlı olabileceği düşünölen hususlar, şu şekilde sıralanabilir:

- Bu tez çalışmasında sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi için kullanılan “Basitleştirilmiş Yöntem” yaklaşımının yanı sıra çalışma alanının standart penetrasyon deneyine dayalı diğer yöntemler veya koni penetrasyon deneyine ve kayma dalgası hızına bağlı farklı bir yöntem ile sıvılaşma potansiyelinin sınanmasında yarar.
- Bu tez çalışmasında yanal yayılmalarındaki düşey deplasmanların tahmin edilmesi ile ilgili herhangi bir tahmin metodu kullanılmamıştır. Düşey deplasmanların da tahmin edilmesi hakkında yapılacak hesaplar ile desteklenen çalışmalar yapılabileceği ilerleyen zamanlarda konu ile ilgili yapılabilecek örnek çalışmalara aday gösterilebilir.
- Bu tez çalışmasında yanal yayılmadaki yatay deplasmanları tahmin etmek için kullanılan modellerin tamamı ampirik modellerdir. Gelecekte konuyla ilgili yapılacak çalışmalarda sonlu eleman modelleri, basitleştirilmiş analitik modeller ve fiziksel modeller ile ampirik modellerin sonuçlarının desteklenmesi üzerinde çalışma gerçekleştirilebilir.



## KAYNAKLAR

- Andrews, D. C. A., Martin, G.R.** (2000). Criteria for Liquefaction of Silty Soils, 12th World Conference on Earthquake Engineering, Proceedings, Auckland, New Zealand, p.1-8.
- Aydan, Ö., Ulusay, R., Kumsak, H., Tuncay E.** (2000). Site Investigation and Engineering Evaluation of the Düzce-Bolu Earthquake of November 12,1999, Turkish Earthquake Foundation, TDV/DR 095-51, p.
- Bartlett, S. F. ve Youd, T. L.** (1992a). Empirical prediction of lateral spread displacement, *Proc. 4th Japan-U.S. Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures for soil liquefaction*, Buffalo, NY, National Center for Earthquake Engineering Research Technical Report NCEER-92-0019, Eds. Hamada, M. and O'Rourke, T. D., August 12, 351-365
- Bartlett, S. F. ve Youd, T. L.** (1992b). Empirical analysis of horizontal ground displacement generated by liquefaction-induced lateral spreads, 286 *National Center for Earthquake Engineering Research Technical Report NCEER-92-0021*, Buffalo, NY, August 17, 114-126
- Bartlett, S. F. ve Youd, T. L.** (1995). Empirical prediction of liquefaction-induced lateral spread, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 121, 316-329.
- Castro, G.** (1969). Liquefaction of sands, Harvard Soil Mechanics Series 87, Harvard University, Cambridge, Massachusetts
- Cooke, H. G.** (2000). Ground Improvement for Liquefaction Mitigation at Exiting Highway Bridges, PhD Thesis, Virginia Polytechnic Institute State University, 371 p.
- Çavuş, U. Ş.** (2015). Zeminlerin Sıvılaşması ve Barajların Alüvyon Temellerinin Sıvılaşma Riskinin Pratik Değerlendirilmesi, DSİ Teknik Bülteni, 119, s.32-33.
- Çetin, K. Ö. Ve Unutmaz, B.** (2004). Zemin Sıvılaşması ve Sismik Zemin Davranışı, Türkiye Mühendislik Haberleri, Sayı:430, s. 32-37.
- Çuha, B. A.** (2018). İstanbul İli Riva Bölgesi Zeminlerinin Sıvılaşma Potansiyeli ve Zeminlerin Bulanık Mantık Metodu İle İncelenmesi, (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Das, B. M.** (2008). Advanced Soil Mechanics, Third Edition, Taylor & Francis, New York, USA, 567 s.
- Day, R. W.** (2002). Geotechnical Earthquake Engineering Handbook, Mc Graw-Hill Companies, New York, USA.
- Dere, A.** (2009). Yapay Sinir Ağları Yöntemi İle Sıvılaşma Analizi ve Adapazarı İçin Örnek Uygulama, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Derinöz, N.** (2004). "Hakkari Baraj ve HES projesi zemin sıvılaşma riskinin belirlenmesi", TMH – Türkiye Mühendislik Haberleri, 431(3):33-38.

- Desroces, R., Comerio, M., Eberhang, O. M., Mooney, W. D., Rix, G. J.** (2001). Overview of the 2010 Haiti Earthquakes, ASCE, Liquefaction Problems in Geotechnical Engineering, p.1-105.
- Emiroğlu, T.** (2018). Serbest Arazi Koşullarında ve Düşey Gerilme Artışı Etkisinde Sıvılaşma Analizi (Yüksek Lisans Tezi). Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Edinçliler A. ve Çalıköğlu, M.** (2018). Nonlinear Site Response Analysis for the Izmir Region: A Case Study, Eurasian Journal of Civil Engineering, Volume 2, Issue 2.
- Erken, A., Özay, R., Kaya, Z., Ülker, C., Elibol, B.** (2004). Depremler Sırasında Zeminlerin Sıvılaşması ve Taşıma Gücü Kayıpları. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, Sayı 431 – 2004/3.
- Erken, A. ve Ansal, A. M.** (1994). Liquefaction characteristics of undisturbed sands, performance of ground and soil structure during earthquakes, 13<sup>th</sup> Int. Conf. Soil Mechanics and Foundation Eng., New Delhi, January 5-10, 165-170.
- Esin, G. ve Ceryan, Ş.** (2015). Burhaniye (Balıkesir) Yerleşim Alanının Sıvılaşma Potansiyelinin Değerlendirilmesi, *Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Bülteni, Yerbilimleri*, 36 (2), 81-96.
- FEMA 303, NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures**, (1997). Part 2: Commentary, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., 366 s.
- Finn, W. D. L., Ledbetter, R. H., Wu, G.** (1994). Liquefaction in Silty Soils, In S.Prakash and P.Dakoulos (editors), Ground Failures Under Seismic Conditions, American Society of Civil Engineers Geotechnical Special Publication, 44, p.51-76. Hydroelectric Power Scientific Research Institute, Beijing, China, 1-17.
- Hamada, M., Yasuda, S., Isoyama, R., and Emoto, K.** (1986). Study on liquefaction induced permanent ground displacement, The Association for the Development of Earthquake Prediction in Japan, November 1, 87.
- Hamada, M., Towhata, I., Yasuda, S. ve Isoyama, R.** (1987). Study on permanent ground displacement by seismic liquefaction, *Computers and Geotechnics*, 4, 197-220.
- Hamada, M., Sato, H., Kawakami, T.,** (1994). A consideration of the mechanism for liquefaction-related large ground displacement. In: Proceedings from the Fifth US-Japan Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures against Soil Liquefaction, Salt Lake City, USA, technical report NCEER-94-0026, 217-232.
- Hamada, M. and Wakamatsu, K.,** (1998). Liquefaction-induced ground displacement triggered by quay wall movement, Special Issue of Soils and Foundations, 85-95.
- Hasançebi, N.** (2011). Sıvılaşma İlişkili Yanal Yayılma Yer Değiştirmesinin Kestirimi (Doktora Tezi). Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.



- Ishihara, K.** (1981). Pore Water Pressure Rises During Earthquakes, Proceedings of Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, St. Louis, Missouri, 3, 1-4.
- Ishihara, K.** (1996). Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics, 1st ed., Oxford, Clarendon Press.
- Iwasaki, T.** (1986). Soil Liquefaction Studies in Japan, State-of-Art, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, V.5, N.1, 2-68.
- Iwasaki, T., Tokida, K., Tatsuoka, F., Watanabe, S., Yasuda, S., vd.** (1982). Microzonation for Soil Liquefaction Potential Using Simplified Methods, Vol.3, In: Proceedings of 3rd International Conference on Microzonation, Seattle, p. 319-330.
- İTÜ/EEDMI** (2011). 23 Ekim 2011 M7.2 Tabanlı – Van Depremi Raporu, 2011.
- Kaya Z.** (2008). Depremler Sırasında Zeminlerin Davranışına Bağlı Olarak Meydana Gelen Zemin Deplasmanlarının Belirlenmesi, (Doktora Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kayen, R.E., Mitchell, J.K., Seed, R.B., Lodge, A., Nishio, S., Countinho, R.** (1992). Evaluation of SPT, CPT and Shear Wave-Based Methods for Liquefaction Potential Assessment Using Loma Prieta Data, Proceedings, 4th US-Japan Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures for Soil Liquefaction, Vol.1, p.177-204.
- Kramer, S. L.** (1996). Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Kumar, K.** (2008). Basic Geotechnical Earthquake Engineering, New Age International (P) Limited Publishers, New Delhi, 142 s.
- Kundak, S. ve Kadioğlu, M.** (2011). *İlk 72 Saat*, AFAD Yayınları, Ankara.
- Lai, S.** (1998). Rigid and Flexible Retaining Walls During Kobe Earthquake, International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, SOA-4, p.108-127.
- Liao, S. S. C. ve Whitman, R. V.** (1986). Overburden Correction Factor for SPT in Sand, Massachusetts Inst. Of Technology, Cambridge, Massachusetts.
- Mavituna, O.** (2007). *Sıkılaştırma İle Sıvılaşma Riskinin Azaltılması* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Mert, M.** (2018). *Zeminlerin Sıvılaşma Potansiyelinin Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Analizlerle Değerlendirilmesi* (Yüksek lisans tezi). Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Mogami, T. ve Kubo, K.** (1953). “The Behavior Of Soil During Vibration” Proceedings of the Third International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering.
- Mollamahmutoğlu, M. ve Babuçcu, F.** (2006). *Zeminlerde Sıvılaşma Analiz ve İyileştirme Yöntemleri*, Ankara.

- Nas, M.** (2013). Trabzon Akyazı Sahil Dolgu Alanı Zeminlerinde Sismik Kaynaklı Sıvılaşma Potansiyelinin Değerlendirilmesi, (Yüksek lisans tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- National Center for Earthquake Engineering Research-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, Buffalo, New York.
- Obermeier, S. F.** (1996). Use of Liquefaction-Induced Features for Paleoseismic Analysis - An Overview of How Seismic Liquefaction Features Can Be Distinguished From Other Features and How Their Regional Distribution and Properties of Source Sediment Can Be Used to Infer the Location and Strength of Holocene Paleo-Earthquakes, *Engineering Geology*, 44, 1-4, 1-76.
- Önder, N. D.** (2010). Sıvılaşma Nedeniyle Oluşan Yanal Yayılmanın Bir Yapay Sınır Ağrı(YSA) Modeli İle Değerlendirilmesi, (Yüksek Lisans Tezi). Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Özaydın, K.** (2007). Zeminlerde Sıvılaşma, Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, Ekim, İstanbul, Bildiriler Kitabı: 231-255.
- Özudoğru, K.** (2003). Modern Zemin Mekaniğinin Kuruluşu: Karl Terzaghi ve Türkiye, *İtü dergisi/d*, 2, 5, 3-11.
- Rauch, A. F.** (1997). EPOLLS: An Empirical Method for Predicting Surface Displacements due to Liquefaction-Induced Lateral Spreading in Earthquakes, Doktora Tezi, Virginia Polytechnic Institute, Blacksburg, Virginia.
- Robertson, P. ve Wride, C. E.** (1998). Evaluating Cyclic Liquefaction Potential Using the Cone Penetration Test, *Canadian Geotechnical Journal*, Ottawa.
- Savaş, H., Tosun, H., Türköz, M., Orhan, A., Seyrek, E.** (2012), Eskişehir Çifteler İlçesi Temel Zeminin Statik ve Dinamik Davranışının İncelenmesi, ESOGÜ-BAP "201015012" No'lu Proje Sonuç Raporu, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, 90s.
- Seed, H.B. ve Idriss, I.M.** (1969). Influence of Soil Conditions on Ground Motions During Earthquakes, *ASCE J Soil Mech Found Div.*, 95, 99-137.
- Seed, H.B. ve Idriss, I.M.** (1971). Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol. 97, No SM9, Proc. Paper 8371, 1249-1273.
- Seed, H.B.** (1976). Evaluation of Soil Liquefaction Effects on Level Ground During Earthquakes, *Liquefaction Problems in Geotechnical Engineering*, ASCE Annual Convention and Exposition, Philadelphia, PA.
- Seed, H.B., Ugas, C., Lysmer, J.** (1976). Site-Dependent Spectra for Earthquake Resistant Design Bulletin of The Seismological Society of America, Vol 66, No 1, p.221-243.

- Seed, H.B., Tokimatsu, K., Harder, L.F., Chung, R.M.** (1985). Influence of SPT Procedures in Soil Liquefaction Resistance Evaluations, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 111(12), 1425-1445.
- Seed, H.B., Çetin, K. Ö., Moss, R.E.S., Kammerer, A.M., Wu, J., Pestana, J.M., Riemer, M.F., Sancio, R.B., Bray, J.D., Kayen, R.E., Faris, A.** (2003). Recent Advances in Soil Liquefaction Engineering: A Unified and Consistent Framework, 26th Annual ASCE Los Angeles Geotechnical Spring Seminar, California, p.4.
- Shamoto, Y., Zhang J. M., Tokimatsu, K.** (1998a). Methods for evaluating residual post-liquefaction ground settlement and horizontal displacement, *Special Issue of Soils and Foundations*, 69-83.
- Shamoto, Y., Zhang J. M., Tokimatsu, K.** (1998b). New charts for predicting large residual post-liquefaction ground deformation, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 17, 427-438.
- Shamoto, Y. ve Zhang J. M.** (1998c). Evaluation of seismic settlement potential of saturated sandy ground based on concept of relative compression, *Special Issue of Soils and Foundations*, 57-68.
- Shamoto, Y. ve Zhang J. M.** (1998d). Horizontal reziduel post-liquefaction deformation of level ground, *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics III, Proceedings of a Specialty Conference, Geotechnical Special Publication No. 75, Seattle, Washington, ASCE*, 373-384.
- Skempton, A. K.** (1986). Standart Penetration Test Procedures and the Effects in Sands of Overburden Pressure, Relative Density, Particle Size, Aging and Overconsolidation, *Geotechnique*, London.
- Sladen, J.A., D'Holland R.D., Krahn J.** (1985). The Liquefaction of Sands, a Collapse Surface Approach, *Canadian Geotechnical Journal*, 1985.
- TBDY** (2019). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, 2019.
- Terzaghi, K.** (1925). *Erdbaumechanik auf Bodenphysikalischer Grundlage*. Vienna, Deuticke.
- Terzaghi, K.** (1939). "Soil Mechanics – A New Chapter in Engineering Science" *Journal, Institution of Civil Engineers, London, England*.
- Terzaghi, K. ve Peck, R.B.** (1948). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley & Sons, Hoboken.
- Tezcan, S. ve Özdemir, Z.** (2004). Liquefaction Risk Analysis and Mapping Techniques, *Yüksek Öğrenim Eğitim ve Araştırma Vakfı Yayınları, Bebek, İstanbul*.
- Tokimatsu, K. ve Yoshimi, Y.** (1983). Empirical Correlation of Soil Liquefaction Based on SPT N-value and Fines Content, *Soils and Foundations*, 23, 56-74.
- Tosun, H.** (2002). Dolgu Baraj Depremselliği ve Tasarım Esasları, *DSİ Genel Müdürlüğü Yayınları, Ankara*, s.45-74.
- Ulusay, R.** (2000). *Zemin Sıvılaşması, Mavi Gezegen Popüler Bilim Dergisi, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayını*, 1, 34-45 s.

- Uyanık, O.** (2002). Kayma Dalga Hızına Bağlı Potansiyel Sıvılaşma Analiz Yöntemi, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 218s.
- Uzuner, B. A.** (2012). Çözümlü Problemlerle Temel Zemin Mekaniği, Derya Kitabevi, 8. Baskı, Trabzon, 697 s.
- Wang, W. S.** (1979). Some Findings in Soil Liquefaction, Water Conservancy and Hydroelectric Power Scientific Research Institute, Beijing, China, 1-17.
- Wei, L. M. ve Yang, J.** (2014). On the Role of Grain Shape in Static Liquefaction of Sand- Fines Mixtures, *Géotechnique*, V.64, N.9, 740-745.
- Yasuda, S.** (2004). Evaluation of Liquefaction-Induced Deformations of Structures, *In: Ansal, A., (ed.)*, Recent Advances in Earthquake Geotechnical Engineering and Microzonation, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 199-230.
- Yıldız, Ö.** (2011). Investigation On The Mitigation of Earthquake Hazards With Inclusion Of Tire Wastes Into The Sand, (Yüksek lisans tezi). Bogazici University, İstanbul.
- Yoshimi, Y., Tokimatsu, K. ve Hasaka, Y.** (1989). "Evaluation of liquefaction resistance of clean sands based on high-quality undisturbed samples". *Soils and Foundations*, vol.29, no.1, pp. 93-104.
- Youd, T.L. ve Hoose, S.N.** (1976). Liquefaction during 1906 San Francisco earthquake: American Society of Civil Engineers.
- Youd, T. L. ve Perkins, D. M.** (1987). Mapping of liquefaction severity index, *Journal of Geotechnical Engineering*, 113, 1374-1392.
- Youd, T. L. ve Idriss, L. M.** (1997). Proc., NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, Nat. Ctr. For Earthquake Engrg. Res., State Univ. Of New York at Buffalo.
- Youd, T.L., Idriss L.M, Andrus R. D., Arango I., Castro G., Christian J. T., Dobry R., Finn W. D. L., Harder L. F., Hynes M. E., Ishihara K., Koester J. P., Liao S. S. C., Marcuson W. F., Martin G. R., Mitchell J. K., Moriwaki Y., Power M. S., Robertson P. K., Seed R. B., Stokoe K. H.** (2001a). "Liquefaction Resistance Of Soils: Summary Report From The 1996 NCEER And 1998 NCEER/NSF Workshops On Evaluation Of Liquefaction Resistance Of Soils", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*.
- Youd, T. L.,** (2001b). Latest Procedures for Liquefaction Hazard Evaluation, TC4 Satellite Conference, Geotechnical Earthquake Engineering and Microzonation Seminar for Local and Young Engineers, İstanbul, August 24.
- Youd, T. L., Hansen, C. M and Bartlett, S. F.,** (2002). Revised multilinear regression equation for predicting of lateral spread displacement, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 128, 1007-1017.
- Url-1** <<https://www.dw.com/tr/2050de-d%C3%BCnya-n%C3%BCfusu-97-milyar-olacak/a-49245966>> erişim tarihi 04.01.2020

- Url-2** <[www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/deprem-verileri/yillik-deprem-haritalari/](http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/deprem-verileri/yillik-deprem-haritalari/)> erişim tarihi 31.12.2019
- Url-3** <[tdth.afad.gov.tr/TDTH/main.xhtml](http://tdth.afad.gov.tr/TDTH/main.xhtml)> erişim tarihi 09.01.2020
- Url-4** <[www.deprem.gov.tr/sarbis/Shared/Default.aspx](http://www.deprem.gov.tr/sarbis/Shared/Default.aspx)> erişim tarihi 22.11.2019
- Url-5** <<http://yerbilimleri.mta.gov.tr/anasayfa.aspx>> erişim tarihi 01.03.2020
- Url-6** <[www.worldometers.info/tr/](http://www.worldometers.info/tr/)> erişim tarihi 30.12.2019





## EKLER

### EK A: Sondajların düzeltilmemiş SPT verileri

**Çizelge A.1:** GSK20-GSK17-GSK18-GSK15 sondajları düzeltilmemiş SPT verileri

GSK20		GSK17		GSK18		GSK15	
Derinlik	SPT-N	Derinlik	SPT-N	Derinlik	SPT-N	Derinlik	SPT-N
1,50-1,95	9	1,50-1,95	5	1,50-1,95	12	1,50-1,95	12
3,00-3,45	13	3,00-3,45	8	3,00-3,45	4	3,00-3,45	8
4,50-4,95	6	6,00-6,45	10	4,50-4,95	9	4,50-4,95	4
6,00-6,45	9	7,50-7,95	8	6,00-6,45	5	6,00-6,45	5
7,50-7,95	10	9,00-9,45	12	7,50-7,95	9	7,50-7,95	6
9,00-9,45	16	10,50-10,95	16	9,00-9,45	10	9,00-9,45	11
10,50-10,95	20	12,00-12,45	15	10,50-10,95	4	10,50-10,95	22
12,00-12,45	15	13,50-13,95	20	12,00-12,45	17	12,00-12,45	15
13,50-13,95	20	15,00-15,45	11	13,50-13,95	22	13,50-13,95	8
15,00-15,45	22	16,50-16,95	12	15,00-15,45	20	15,00-15,45	11
16,50-16,95	39	18,00-18,45	17	16,50-16,95	18	16,50-16,95	12
18,00-18,45	26	19,50-19,95	21	18,00-18,45	16	18,00-18,45	19
19,50-19,95	38	21,00-21,45	17	19,50-19,95	67	19,50-19,95	12
21,00-21,45	16	22,50-22,95	25	21,00-21,45	14	21,00-21,45	30
22,50-22,95	12	25,50-25,95	20	22,50-22,95	27	22,50-22,95	35
24,00-24,45	17	27,00-27,45	25	24,00-24,45	20	24,00-24,45	12
25,50-25,95	19	28,50-28,95	28	25,50-25,95	11	25,50-25,95	25
27,00-27,45	18	30,00-30,45	R	27,00-27,45	19	27,00-27,45	11
28,50-28,95	26	31,50-31,95	23	28,50-28,95	19	28,50-28,95	21
30,00-30,45	76	33,00-33,45	49	30,00-30,45	34	30,00-30,45	19
31,50-31,95	16			31,50-31,95	37	33,00-33,45	68

**Çizelge A.2:** KSK7-KSK8-EKGDSK1-GSK22 sondajları düzeltilmemiş SPT verileri

KSK7		KSK8		EKGDSK1		GSK22	
Derinlik	SPT-N	Derinlik	SPT-N	Derinlik	SPT-N	Derinlik	SPT-N
1,50-1,95	9	1,50-1,95	5	12,30-12,75	3	1,50-1,95	2
3,00-3,45	10	3,00-3,45	12	14,00-14,45	8	3,00-3,45	5
4,50-4,95	10	4,50-4,95	9	15,50-15,95	2	4,50-4,95	21
6,00-6,45	12	6,00-6,45	6	17,00-17,45	4	6,00-6,45	10
7,50-7,95	7	7,50-7,95	14	18,50-18,95	20	10,50-10,95	25
9,00-9,45	12	9,00-9,45	18	20,00-20,45	22	12,00-12,45	14
10,50-10,95	15	10,50-10,95	11	21,50-21,95	R	13,50-13,95	45
12,00-12,45	15	12,00-12,45	9	23,00-23,45	R	15,00-15,45	7
13,50-13,95	13	13,50-13,95	12	24,50-24,95	R	16,50-16,95	28
15,00-15,45	9	15,00-15,45	12	27,50-27,95	23	18,00-18,45	13
16,50-16,95	25	16,50-16,95	11	29,00-29,45	21	19,50-19,95	22
18,00-18,45	17	18,00-18,45	7	30,50-30,95	22	21,00-21,45	15
19,50-19,95	25	19,50-19,95	8	32,00-32,45	27	22,50-22,95	18
21,00-21,45	26	21,00-21,45	8	33,50-33,95	31	24,00-24,45	30
22,50-22,95	25	22,50-22,95	11	35,00-35,45	25	25,50-25,95	13
24,00-24,45	11	24,00-24,45	40	36,50-36,95	24	27,00-27,45	16
25,50-25,95	24	25,50-25,95	37	38,00-38,45	23	28,50-28,95	10
27,00-27,45	37	27,00-27,45	32	39,50-39,62	R	30,00-30,45	R
28,50-28,95	33	28,50-28,95	24				
30,00-30,45	15	30,00-30,45	25				
31,50-31,95	16	31,50-31,95	43				

**Çizelge A.3:** GSK14-EKGDSK2-EKSK1-GDSK6 sondajları düzeltilmemiş SPT verileri

GSK14		EKGDSK2		EKSK1		GDSK6	
Derinlik	SPT-N	Derinlik	SPT-N	Derinlik	SPT-N	Derinlik	SPT-N
1,50-1,95	9	14,00-14,45	2	1,50-1,78	R	12,50-12,95	3
3,00-3,45	6	15,50-15,95	5	3,00-3,45	26	14,00-14,45	4
4,50-4,95	4	17,00-17,45	8	4,50-4,95	14	15,50-15,95	6
6,00-6,45	4	18,50-18,95	14	6,00-6,45	9	17,00-17,45	5
7,50-7,95	4	20,00-20,45	20	7,50-9,95	10	18,50-18,95	14
9,00-9,45	4	29,00-29,05	R	9,00-9,45	7	20,00-20,45	17
10,50-10,95	11	32,00-32,45	71	10,50-10,95	5	21,50-21,95	21
12,00-12,45	15	33,50-33,95	45	12,00-12,45	4	23,00-23,15	R
13,50-13,95	11	35,00-35,45	46	13,50-13,95	5		
15,00-15,45	13	36,50-36,95	35	15,00-15,45	6		
16,50-16,95	30	38,00-38,45	42	16,50-16,95	5		
18,00-18,45	9	39,50-39,95	43	18,00-18,45	8		
19,50-19,55	R						

**Çizelge A.4:** GSK2-GSK8-GDSK2-GDSK13 sondajları düzeltilmemiş SPT verileri

GSK2		GSK8		GDSK2		GDSK13	
Derinlik	SPT-N	Derinlik	SPT-N	Derinlik	SPT-N	Derinlik	SPT-N
12,00-12,15	R	7,50-7,95	2	15,50-15,95	10	18,50-18,95	4
15,00-15,45	8	9,00-9,45	6	17,00-17,45	9	20,00-20,45	9
16,50-16,95	6	10,50-10,95	2	18,50-18,95	7	21,50-21,95	7
18,00-18,45	2	12,00-12,45	4	20,00-20,45	4	23,00-23,45	8
19,50-19,95	5	13,50-13,95	6	21,50-21,95	7	24,50-24,95	19
21,00-21,45	23	15,00-15,45	5	23,00-23,45	10	26,00-26,45	17
22,50-22,95	9	16,50-16,95	12	24,50-24,95	R	27,50-27,70	R
24,00-24,45	42	18,00-18,45	17				

**Çizelge A.5:** GDSK3-GDSK10-EKGDSK3-EKSK3 sondajları düzeltilmemiş SPT verileri

GDSK3		GDSK10		EKGDSK3		EKSK3	
Derinlik	SPT-N	Derinlik	SPT-N	Derinlik	SPT-N	Derinlik	SPT-N
18,50-18,95	2	14,00-14,45	4	14,00-14,45	2	6,00-6,45	18
20,00-20,45	7	15,50-15,95	4	32,00-32,45	22	7,50-7,95	6
21,50-21,95	4	17,00-17,45	5	33,80-34,25	23	9,00-9,45	5
23,00-23,45	6	18,50-18,95	6	36,00-36,45	42	10,50-10,95	15
24,50-24,95	7	20,00-20,45	7	38,20-38,65	25	13,50-13,95	44
26,00-26,45	14	21,50-21,95	12	41,00-41,10	R	15,00-15,45	75
27,50-27,95	R	23,00-23,45	R				



**Çizelge A.6:** GDSK16-GDSK19-GDSK22-GYSK2 sondajları düzeltilmemiş SPT verileri

GDSK16		GDSK19		GDSK22		GYSK2	
Derinlik	SPT-N	Derinlik	SPT-N	Derinlik	SPT-N	Derinlik	SPT-N
17,00-17,45	4	18,50-18,95	6	17,00-17,45	5	10,75-11,20	17
18,50-18,58	R	20,00-20,45	11	18,50-18,95	5	12,55-13,00	6
		21,50-21,95	20	20,00-20,45	3	14,45-14,90	4
		23,00-23,45	R			16,35-16,80	4

**Çizelge A.7:** GSK5-GSK1-GDSK9 sondajları düzeltilmemiş SPT verileri

GSK5		GSK1		GDSK9	
Derinlik	SPT-N	Derinlik	SPT-N	Derinlik	SPT-N
9,50-9,95	2	1,50-1,95	9	14,00-14,45	9
10,50-10,95	3	3,00-3,45	6	15,50-15,95	7
12,00-12,45	4	4,50-4,95	36	17,00-17,45	7
13,50-13,95	7	6,00-6,45	18	18,50-18,95	9
15,00-15,45	8	7,50-7,75	R	20,00-20,45	23
16,50-16,95	21			22,00-22,45	53

**EK B: Sondajların laboratuvar verileri**

**Çizelge B.1: GSK1-GSK2-GSK5-GSK8-GSK14 sondajları laboratuvar verileri**

Sondaj No	Derinlik (m)	Elek Analizi			Hidrometre			Kıvam Limitleri			Zemin Sınıfı
		Çakıl (%)	Kum (%)	İnce (%)	Kaba (%)	Silt (%)	Kil (%)	LL (%)	PL (%)	PI (%)	
GSK1	1,50-1,95	70,0	22,0	8,0							
GSK1	3,00-3,45	26,0	56,0	18,0							
GSK1	4,50-4,95	50,0	41,0	9,0							
GSK1	6,00-6,45	54,0	39,0	7,0							
GSK1	7,50-7,95	82,0	14,0	4,0				NP	NP	NP	GP
GSK2	16,50-16,95	54,0	24,0	22,0							
GSK2	18,00-18,45	41,0	35,0	24,0				46,0	18,0	28,0	GC
GSK2	19,50-19,95	28,0	52,0	20,0							
GSK2	21,00-21,45	4,0	87,0	9,0				NP	NP	NP	SW-SM
GSK2	22,50-22,95	8,0	84,0	8,0				NP	NP	NP	SW-SM
GSK5	9,50-9,95	16,0	35,0	49,0	51,0	29,0	20,0				
GSK5	12,00-12,45	79,0	17,0	4,0				NP	NP	NP	GP
GSK5	13,50-13,95	13,0	80,0	7,0							
GSK5	15,00-15,45	35,0	61,0	4,0				NP	NP	NP	GW
GSK5	16,50-16,95	61,0	34,0	5,0							
GSK8	7,50-7,95	36,0	27,0	37,0	63,0	23,0	14,0	59,0	32,0	27,0	GM
GSK8	9,00-9,45	67,0	20,0	13,0	87,0	2,0	11,0	NP	NP	NP	GM
GSK8	10,50-10,95	43,0	30,0	27,0	73,0	11,0	16,0	55,0	19,0	36,0	GC
GSK8	12,00-12,45	38,0	38,0	24,0	76,0	7,0	17,0	48,0	22,0	26,0	GC
GSK8	13,50-13,95	39,0	41,0	20,0							
GSK8	15,00-15,45	13,0	64,0	23,0							
GSK8	16,50-16,95	11,0	79,0	10,0							
GSK8	18,00-18,45	7,0	84,0	9,0							
GSK14	1,50-1,95	15,0	78,0	7,0							
GSK14	7,50-7,95	15,0	77,0	8,0							
GSK14	10,50-10,95	7,0	90,0	3,0							
GSK14	12,00-12,45	7,0	89,0	4,0							
GSK14	13,50-13,95	10,0	88,0	2,0							
GSK14	15,00-15,45	12,0	79,0	9,0				NP	NP	NP	SW-SM
GSK14	16,50-16,95	12,0	74,0	14,0							
GSK14	18,00-18,45	2,0	81,0	17,0				NP	NP	NP	SM
GSK14	27,00-27,45	26,0	66,0	8,0							
GSK14	28,50-28,95	26,0	66,0	8,0				NP	NP	NP	SP-SM
GSK14	33,00-33,45	15,0	38,0	47,0							
GSK14	34,50-34,95	0,0	4,0	96,0				48,0	15,0	33,0	CL

**Çizelge B.2: GSK15-GSK17-GSK18-GSK20 sondajları laboratuvar verileri**

Sondaj No	Derinlik (m)	Elek Analizi			Hidrometre			Kıvam Limitleri			Zemin Sınıfı
		Çakıl (%)	Kum (%)	İnce (%)	Kaba (%)	Silt (%)	Kil (%)	LL (%)	PL (%)	PI (%)	
GSK15	3,00-3,45	46,0	49,0	5,0							
GSK15	7,50-7,95	25,0	73,0	2,0							
GSK15	9,00-9,45	14,0	85,0	1,0							
GSK15	10,50-10,95	23,0	69,0	8,0				NP	NP	NP	SW-SM
GSK15	15,00-15,45	30,0	53,0	17,0				NP	NP	NP	SM
GSK15	16,50-16,95	21,0	18,0	61,0				NP	NP	NP	ML
GSK15	18,00-18,45	67,0	25,0	8,0				NP	NP	NP	GW-GM
GSK15	19,50-19,95	48,0	35,0	17,0							
GSK15	21,00-21,45	73,0	20,0	7,0							
GSK15	22,50-22,95	62,0	23,0	5,0							
GSK15	24,00-24,45	73,0	19,0	8,0							
GSK15	25,50-25,95	50,0	44,0	6,0				NP	NP	NP	GP-GM
GSK15	27,00-27,45	26,0	49,0	25,0							
GSK15	28,50-28,95	70,0	27,0	3,0				NP	NP	NP	GP
GSK15	30,00-30,45	13,0	80,0	7,0							
GSK15	33,00-33,45	0,0	58,0	42,0				NP	NP	NP	SM
GSK17	18,00-18,45	47,0	39,0	14,0				NP	NP	NP	GM
GSK17	19,50-19,95	48,0	39,0	13,0				NP	NP	NP	GM
GSK17	21,00-21,45	44,0	49,0	7,0							
GSK17	22,50-22,95	43,0	50,0	7,0				NP	NP	NP	GP-GM
GSK17	25,50-25,95	12,0	80,0	8,0				NP	NP	NP	SP-SM
GSK17	27,00-27,45	8,0	72,0	20,0				NP	NP	NP	SM
GSK17	28,50-28,95	16,0	78,0	6,0				NP	NP	NP	SP-SM
GSK18	21,00-21,45	37,0	49,0	14,0				NP	NP	NP	GM
GSK18	24,00-24,45	27,0	67,0	6,0				NP	NP	NP	SP-SM
GSK18	25,50-25,95	29,0	57,0	14,0				NP	NP	NP	SM
GSK18	28,50-28,95	3,0	87,0	10,0				NP	NP	NP	SW-SM
GSK18	30,00-30,45	18,0	59,0	23,0				NP	NP	NP	SM
GSK18	31,50-31,95	0,0	6,0	94,0				42,0	16,0	26,0	CL
GSK20	12,00-12,45	23,0	72,0	5,0				NP	NP	NP	SP
GSK20	15,00-15,45	16,0	83,0	1,0				NP	NP	NP	SP
GSK20	16,50-16,95	9,0	75,0	16,0				NP	NP	NP	SM
GSK20	19,50-19,95	29,0	58,0	13,0				NP	NP	NP	SM
GSK20	21,00-21,45	18,0	63,0	19,0				NP	NP	NP	SM
GSK20	24,00-24,45	14,0	72,0	14,0				NP	NP	NP	SM
GSK20	25,50-25,95	3,0	85,0	12,0				NP	NP	NP	SW-SM
GSK20	27,00-27,45	15,0	78,0	7,0				NP	NP	NP	SP-SM
GSK20	33,00-33,45	0,0	3,0	97,0				42,0	16,0	26,0	CL

**Çizelge B.3: GSK22-GDSK2-GDSK3-GDSK6-GDSK9-GDSK10 sondajları**  
laboratuvar verileri

Sondaj No	Derinlik (m)	Elek Analizi			Hidrometre			Kıvam Limitleri			Zemin Sınıfı
		Çakıl (%)	Kum (%)	İnce (%)	Kaba (%)	Silt (%)	Kil (%)	LL (%)	PL (%)	PI (%)	
GSK22	1,50-1,95	22,0	77,0	1,0							
GSK22	3,00-3,45	19,0	76,0	5,0							
GSK22	13,50-13,95	50,0	41,0	9,0				NP	NP	NP	GP-GM
GSK22	15,00-15,45	45,0	33,0	22,0				40,0	32,0	8,0	GM
GSK22	16,50-16,95	31,0	25,0	44,0				NP	NP	NP	GM
GSK22	18,00-18,45	57,0	32,0	11,0				NP	NP	NP	GW-GM
GSK22	19,50-19,95	62,0	24,0	14,0				NP	NP	NP	GM
GSK22	21,00-21,45	13,0	62,0	25,0				NP	NP	NP	SM
GSK22	22,50-22,95	11,0	79,0	10,0				NP	NP	NP	SP-SM
GSK22	24,00-24,45	5,0	83,0	12,0							
GSK22	25,50-25,95	9,0	77,0	14,0							
GSK22	27,00-27,45	9,0	78,0	13,0				NP	NP	NP	SM
GDSK2	15,50-15,95	34,0	54,0	12,0				NP	NP	NP	GM
GDSK2	17,00-17,45	42,0	44,0	14,0							
GDSK2	18,50-18,95	1,0	95,0	4,0				NP	NP	NP	SP
GDSK2	20,00-20,45	14,0	43,0	43,0	57,0	30,0	13,0	43,0	18,0	25,0	SC
GDSK2	21,50-21,95	28,0	51,0	21,0				34,0	17,0	17,0	GC
GDSK2	23,00-23,45	4,0	89,0	7,0				NP	NP	NP	SW-SM
GDSK2	24,50-24,95	57,0	37,0	6,0				NP	NP	NP	GW-GM
GDSK3	21,50-21,95	28,0	58,0	14,0				NP	NP	NP	SM
GDSK3	23,00-23,45	31,0	48,0	21,0				30,0	21,0	9,0	GC
GDSK3	24,50-24,95	16,0	65,0	20,0							
GDSK3	26,00-26,45	2,0	90,0	8,0				NP	NP	NP	SW-SM
GDSK3	27,50-27,95	50,0	27,0	23,0				27,0	14,0	13,0	GC
GDSK6	12,50-12,95	27,0	61,0	12,0				NP	NP	NP	SM
GDSK6	15,50-15,95	13,0	72,0	15,0				NP	NP	NP	SM
GDSK6	18,50-18,95	3,0	89,0	8,0				NP	NP	NP	SW-SM
GDSK6	20,00-20,45	2,0	88,0	10,0				NP	NP	NP	SW-SM
GDSK6	21,50-21,95	4,0	80,0	16,0				NP	NP	NP	SM
GDSK9	14,00-14,45	30,0	53,0	17,0							
GDSK9	17,00-17,45	25,0	61,0	14,0							
GDSK9	18,50-18,95	10,0	81,0	9,0				NP	NP	NP	SW-SM
GDSK9	20,00-20,45	0,0	11,0	89,0				50,0	16,0	34,0	CH
GDSK9	22,00-22,45	8,0	27,0	65,0				48,0	16,0	32,0	CL
GDSK10	14,00-14,45	51,0	29,0	20,0				44,0	19,0	25,0	GC
GDSK10	15,50-15,95	37,0	44,0	19,0				42,0	18,0	24,0	GC
GDSK10	17,00-17,45	36,0	42,0	22,0				NP	NP	NP	GM
GDSK10	18,50-18,95	8,0	83,0	9,0				NP	NP	NP	SW-SM
GDSK10	20,00-20,45	1,0	86,0	13,0				NP	NP	NP	SM

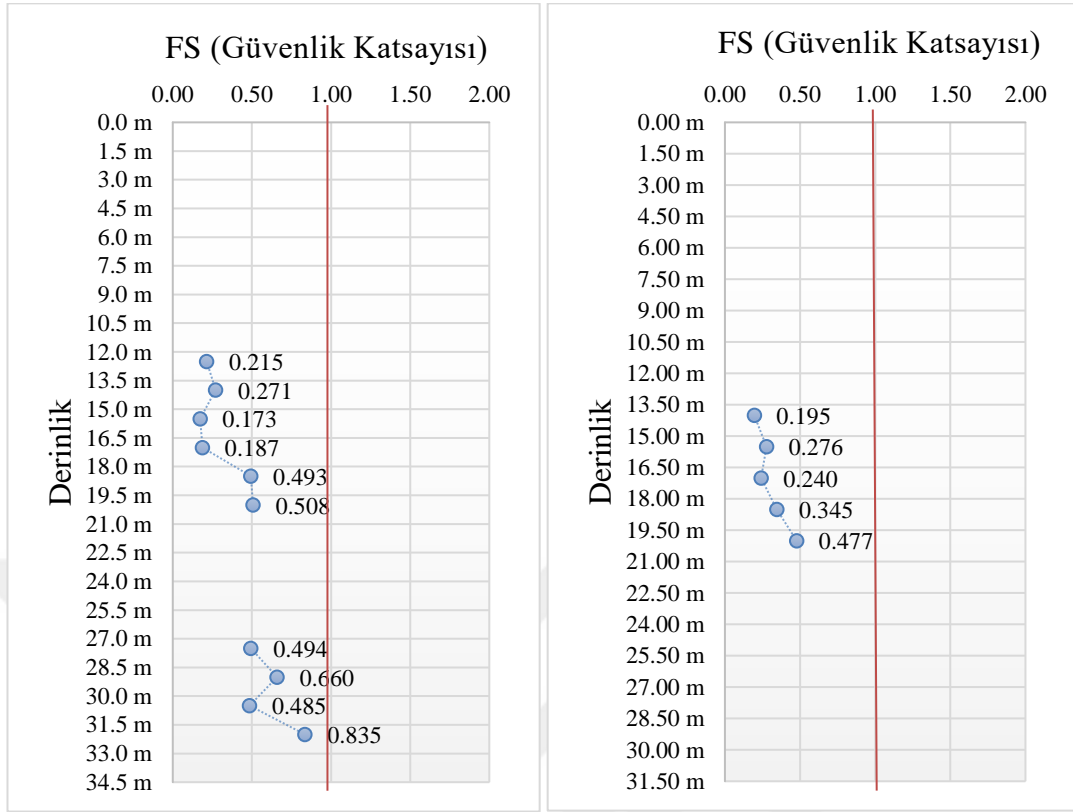
**Çizelge B.4: GDSK13-GDSK16-GDSK19-GDSK22-EKGDSK1-EKGDSK2-  
EKGDSK3-EKSK1 sondajları laboratuvar verileri**

Sondaj No	Derinlik (m)	Elek Analizi			Hidrometre			Kıvam Limitleri			Zemin Sınıfı
		Çakıl (%)	Kum (%)	İnce (%)	Kaba (%)	Silt (%)	Kil (%)	LL (%)	PL (%)	PI (%)	
GDSK13	18,50-18,95	7,0	80,0	13,0				NP	NP	NP	SM
GDSK13	20,00-20,45	5,0	83,0	12,0				NP	NP	NP	SW-SM
GDSK13	21,50-21,95	23,0	63,0	14,0				NP	NP	NP	SM
GDSK13	23,00-23,45	6,0	83,0	11,0				NP	NP	NP	SP-SM
GDSK16	18,50-18,95	49,0	46,0	5,0							
GDSK19	18,50-18,95	24,0	67,0	9,0							
GDSK19	20,00-20,45	25,0	67,0	8,0							
GDSK19	21,50-21,95	12,0	70,0	18,0				NP	NP	NP	SM
GDSK22	17,00-17,45	40,0	48,0	12,0				NP	NP	NP	GW-GM
GDSK22	18,50-18,95	1,0	89,0	10,0				NP	NP	NP	SW-SM
GDSK22	20,00-20,45	35,0	39,0	26,0							
EKGDSK1	29,00-29,45	25,8	48,9	25,3	74,7	21,7	3,7	NP	NP	NP	
EKGDSK1	32,00-32,45	1,7	74,3	24,0				27,2	17,2	10,0	
EKGDSK1	33,50-33,95	3,0	78,4	18,7							
EKGDSK1	36,50-36,95	11,4	77,4	11,3	88,7	9,3	2,0	NP	NP	NP	
EKGDSK1	38,00-38,45	14,5	69,4	16,1				NP	NP	NP	
EKGDSK1	41,00-41,45	24,5	40,2	35,4				30,5	17,7	12,8	
EKGDSK2	15,50-15,95	49,5	36,1	14,4							
EKGDSK2	32,00-32,45	3,8	72,9	23,3							
EKGDSK2	35,00-35,45	73,9	24,6	1,5							
EKGDSK2	38,00-38,45	5,0	70,0	25,0	75,0	18,1	7,0	29,2	15,0	14,2	
EKGDSK2	39,50-39,95	8,1	73,3	18,6	81,4	13,2	5,4	NP	NP	NP	
EKGDSK3	14,00-14,45	15,5	37,4	47,2	52,8	26,5	20,7				
EKGDSK3	32,00-32,45	5,6	77,2	17,2	82,8	11,9	5,3	NP	NP	NP	
EKGDSK3	33,80-34,25	0,2	86,8	13,0	87,0	9,3	3,6	NP	NP	NP	
EKGDSK3	36,00-36,45	7,7	45,8	46,6	53,4	36,2	10,4	34,6	15,3	19,3	
EKGDSK3	38,20-38,65	4,7	55,5	39,8	60,2	22,6	17,2	35,9	15,5	20,4	
EKSK1	1,50-1,95	57,1	29,1	13,8							
EKSK1	3,00-3,45	62,4	29,1	8,6							
EKSK1	4,50-4,95	60,2	32,5	7,3							
EKSK1	7,50-7,95	36,6	54,6	8,8							
EKSK1	9,00-9,45	27,6	43,0	29,4	70,6	22,4	7,0				
EKSK1	10,50-10,95	36,7	41,4	21,9				NP	NP	NP	SM
EKSK1	12,00-12,45	28,2	37,4	34,5	65,5	29,1	5,3	NP	NP	NP	SM
EKSK1	13,50-13,95	26,3	47,6	26,1	73,9	20,9	5,2				
EKSK1	15,00-15,45	37,6	39,8	22,6				NP	NP	NP	SM
EKSK1	16,50-16,95	6,4	83,7	9,9							
EKSK1	18,00-18,45	9,3	66,5	24,2	75,8	17,3	6,9				
EKSK1	19,50-19,95	17,4	29,7	52,9				NP	NP	NP	CL-ML

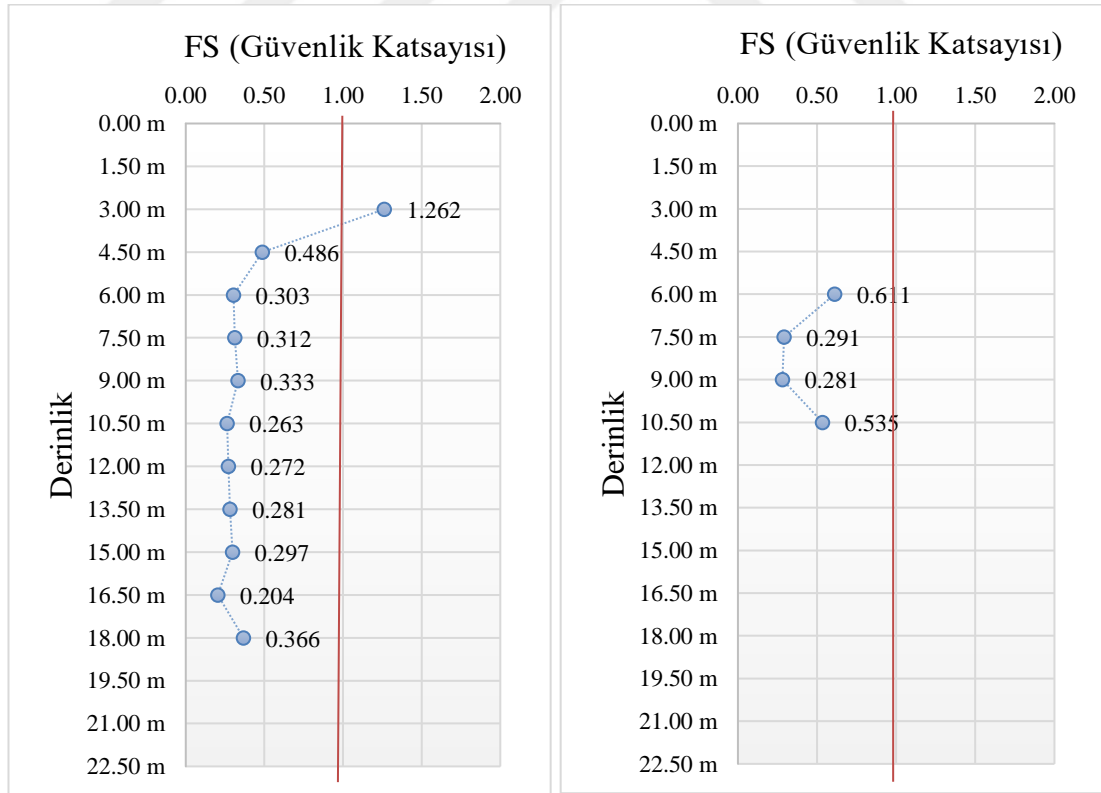
**Çizelge B.5: EKSK3-GYSK2-KSK7-KSK8 sondajları laboratuvar verileri**

Sondaj No	Derinlik (m)	Elek Analizi			Hidrometre			Kıvam Limitleri			Zemin Sınıfı
		Çakıl (%)	Kum (%)	İnce (%)	Kaba (%)	Silt (%)	Kil (%)	LL (%)	PL (%)	PI (%)	
EK-SK3	7,50-7,95	35,8	46,9	17,3							
EK-SK3	9,00-9,45	32,9	42,4	24,8	75,2	19,4	5,3				
EK-SK3	10,50-10,95	37,6	42,2	20,2				NP	NP	NP	SM
EK-SK3	12,00-12,45	40,2	37,0	22,8				NP	NP	NP	GM
EK-SK3	13,50-13,95	19,1	62,6	18,3	81,7	14,7	3,7	NP	NP	NP	SM
EK-SK3	15,00-15,45	72,7	23,2	4,1							
GYSK-2	10,75-11,20	39,9	54,4	5,7							
GYSK-2	12,55-13,00	59,4	28,1	12,5							
GYSK-2	16,45-16,90	57,7	34,1	8,1							
GYSK-2	16,35-16,80	44,4	40,0	15,6							
KSK-7	6,00-6,45	44,0	44,5	11,5							
KSK-7	7,50-7,95	5,4	88,7	5,9							
KSK-7	10,50-10,95	3,0	87,5	9,5							
KSK-7	12,00-12,45	45,8	42,6	11,6							
KSK-7	21,00-21,45	18,5	58,2	23,3							
KSK-7	24,00-24,45	9,0	68,9	22,1							
KSK-7	27,00-27,45	0,0	31,2	68,8	31,2	27,8	41,0	26,7	14,4	12,3	CL
KSK-7	31,50-31,95	0,0	9,5	90,5				33,5	10,1	23,4	CL
KSK-7	33,50-33,95	0,0	5,7	94,3	5,7	38,3	55,9	42,0	16,4	25,6	CL
KSK-7	36,00-36,95	0,0	7,4	92,6				41,9	16,9	25,0	CL
KSK-8	7,50-7,95	61,8	30,6	7,7							
KSK-8	10,50-10,95	48,9	39,0	12,1							
KSK-8	18,00-18,45	28,7	50,4	20,9							
KSK-8	22,50-22,95	4,2	86,9	8,9							
KSK-8	25,50-25,95	0,0	39,3	60,7				28,7	12,1	16,6	CL
KSK-8	28,50-28,95	0,0	1,0	99,0				33,3	13,2	20,1	CL
KSK-8	31,50-31,95	2,2	33,2	64,6	35,4	26,3	38,3	27,6	12,0	15,6	CL

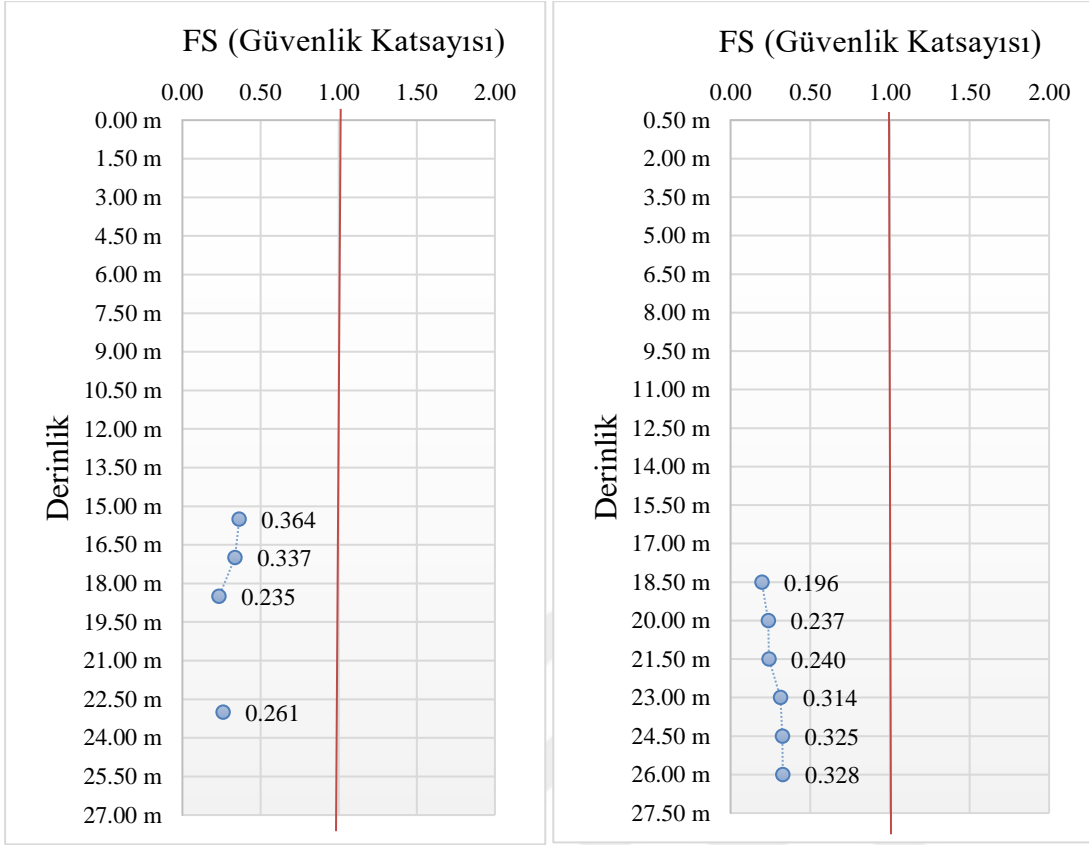
**EK C: Sondajların güvenlik katsayısı-derinlik grafikleri**



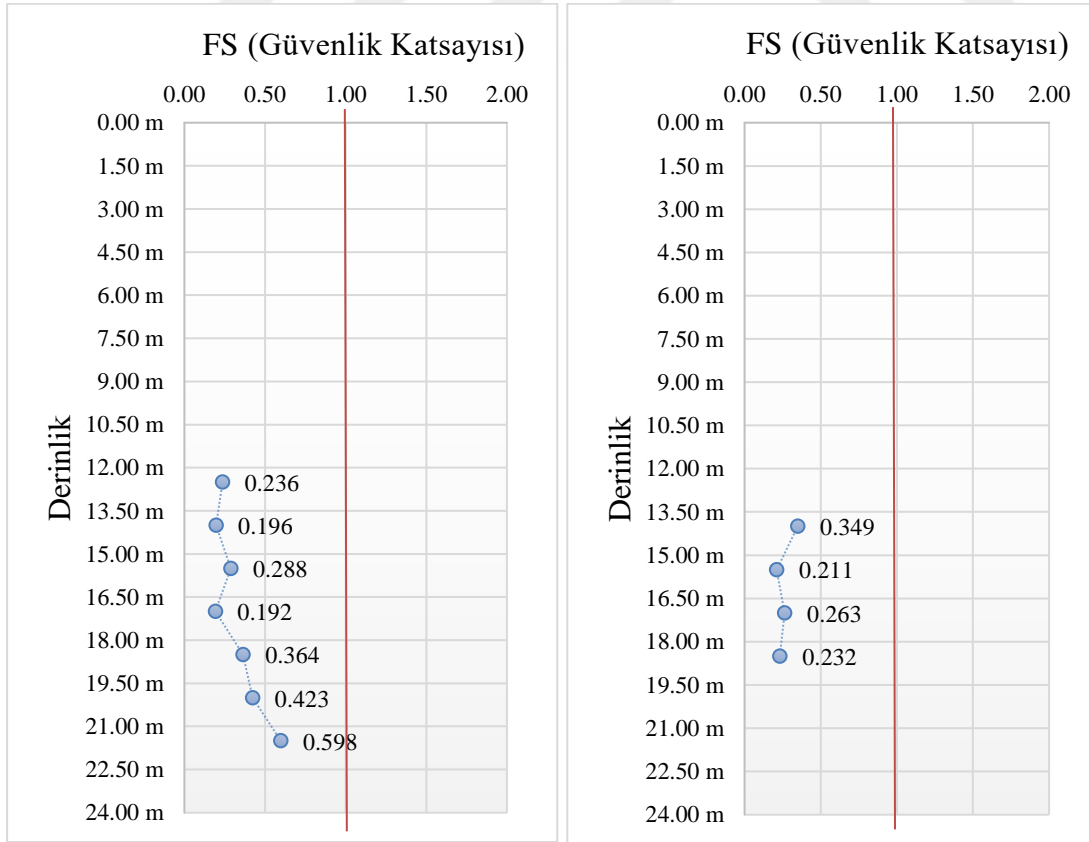
**Şekil C.1 : EKGDSK1-EKGDSK2 güvenlik katsayısı-derinlik grafiği**



**Şekil C.2 : EKSK1-EKSK3 güvenlik katsayısı-derinlik grafiği**

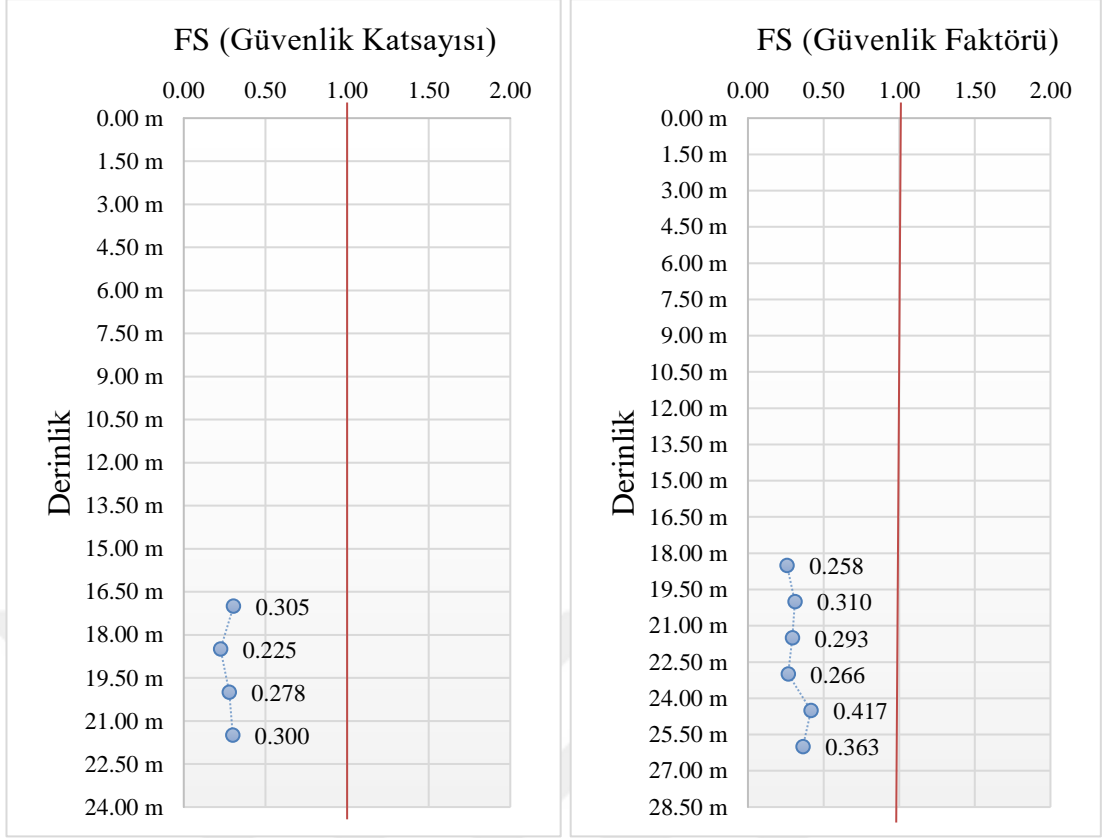


**Şekil C.3 : GDSK2-GDSK3 güvenlik katsayısı-derinlik grafiği**

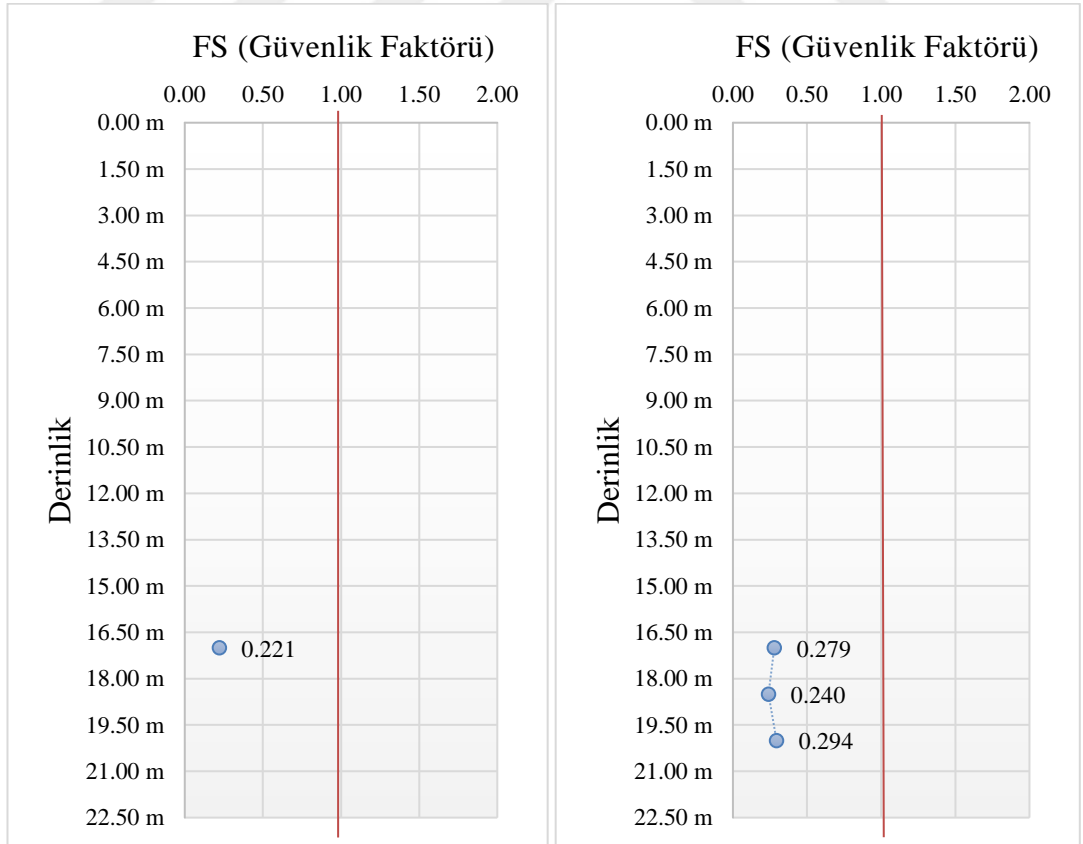


**Şekil C.4 : GDSK6-GDSK9 güvenlik katsayısı-derinlik grafiği**

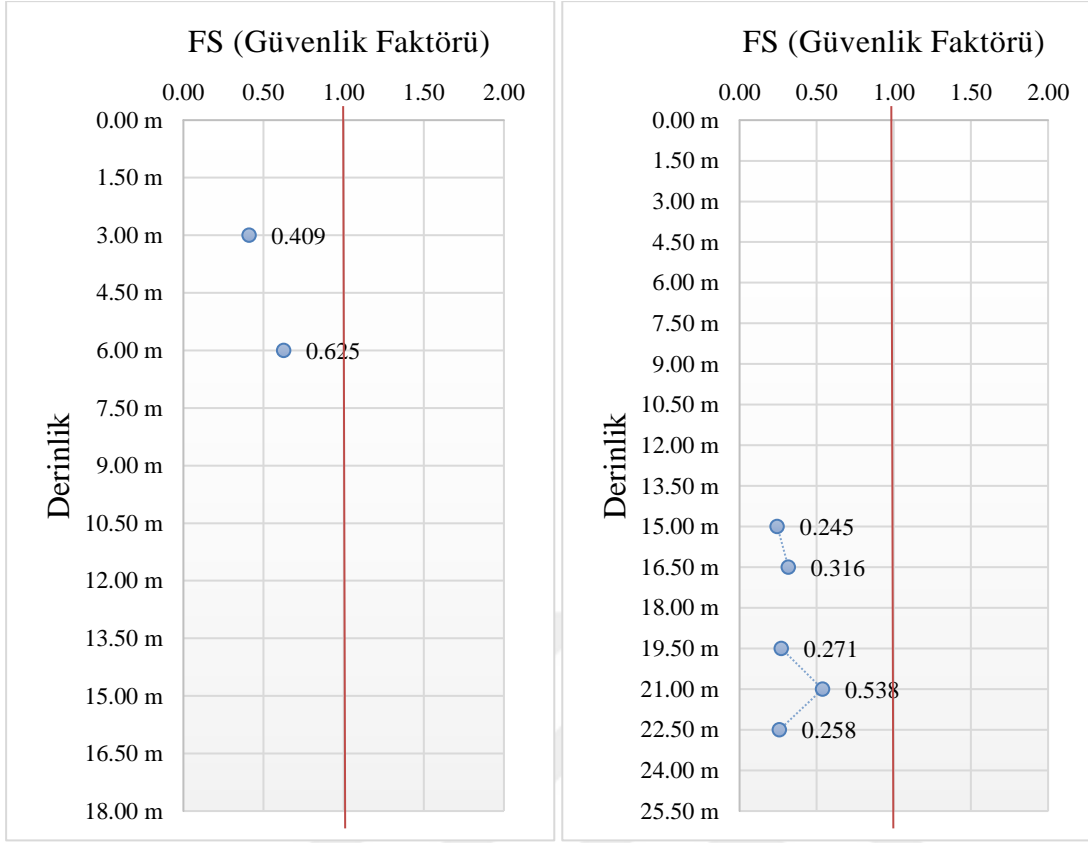




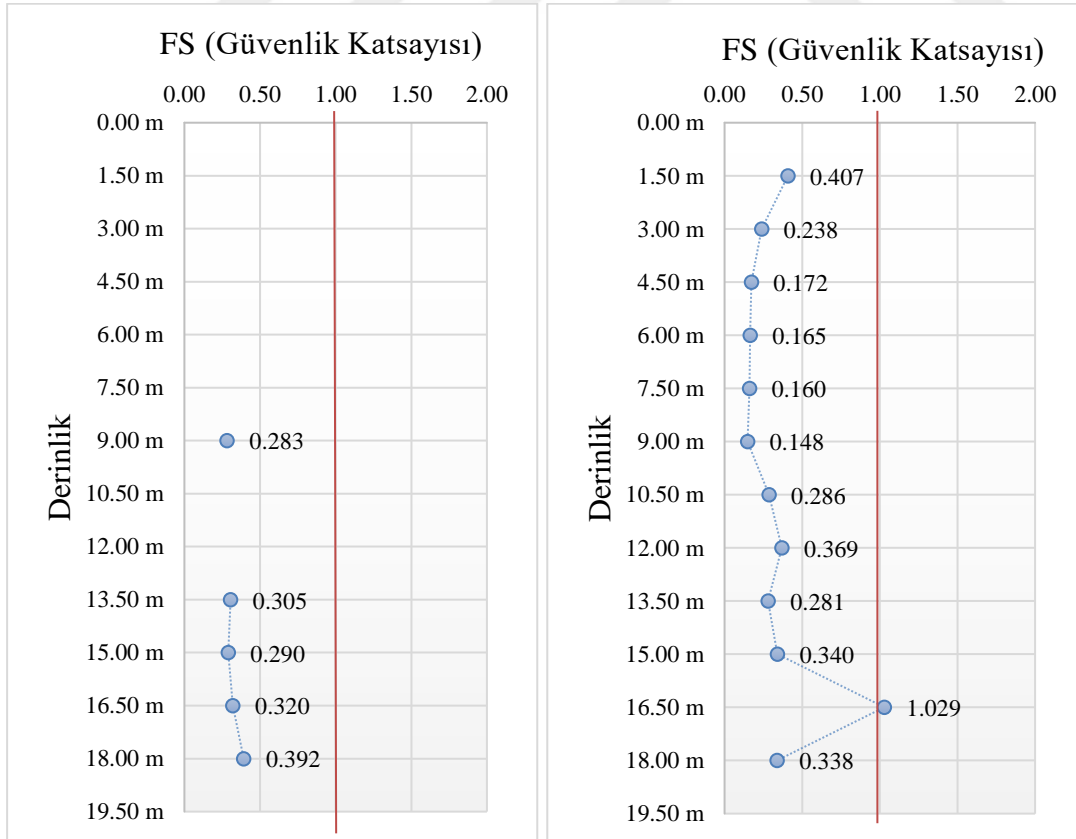
Şekil C.5 : GDSK10-GDSK13 güvenlik katsayısı-derinlik değişim grafiği



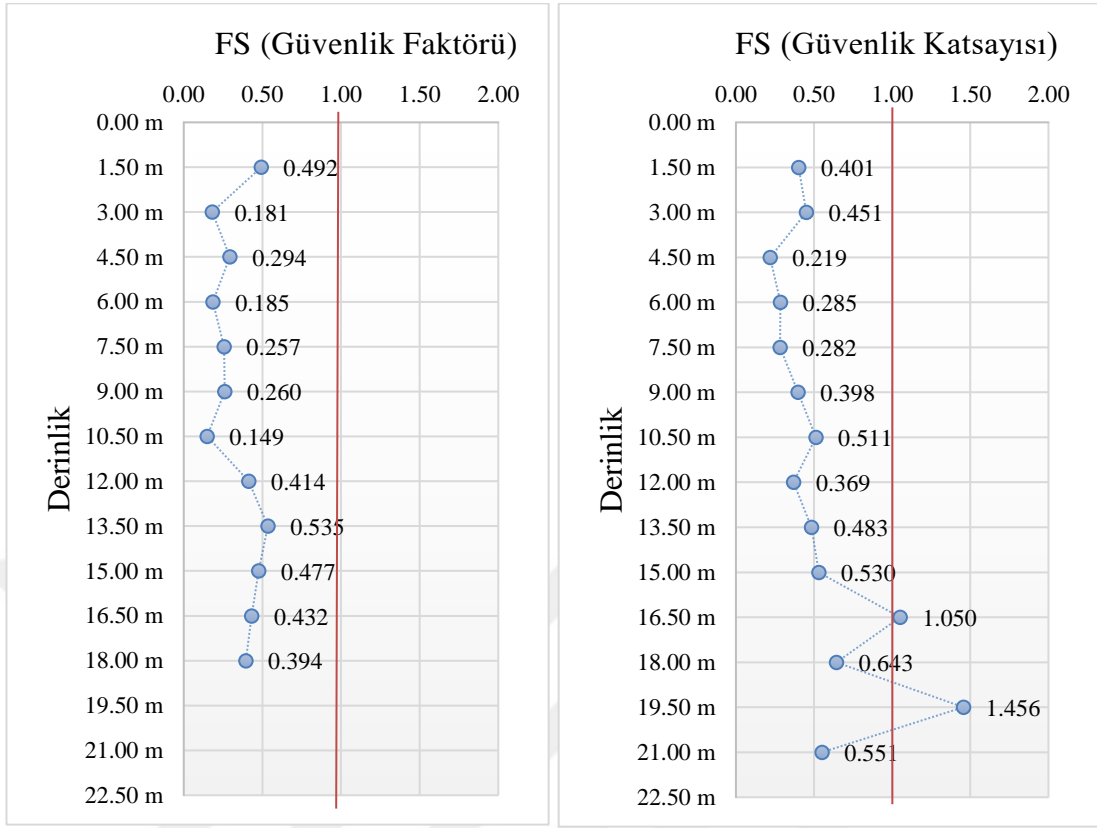
Şekil C.6 : GDSK16-GDSK22 güvenlik katsayısı-derinlik değişim grafiği



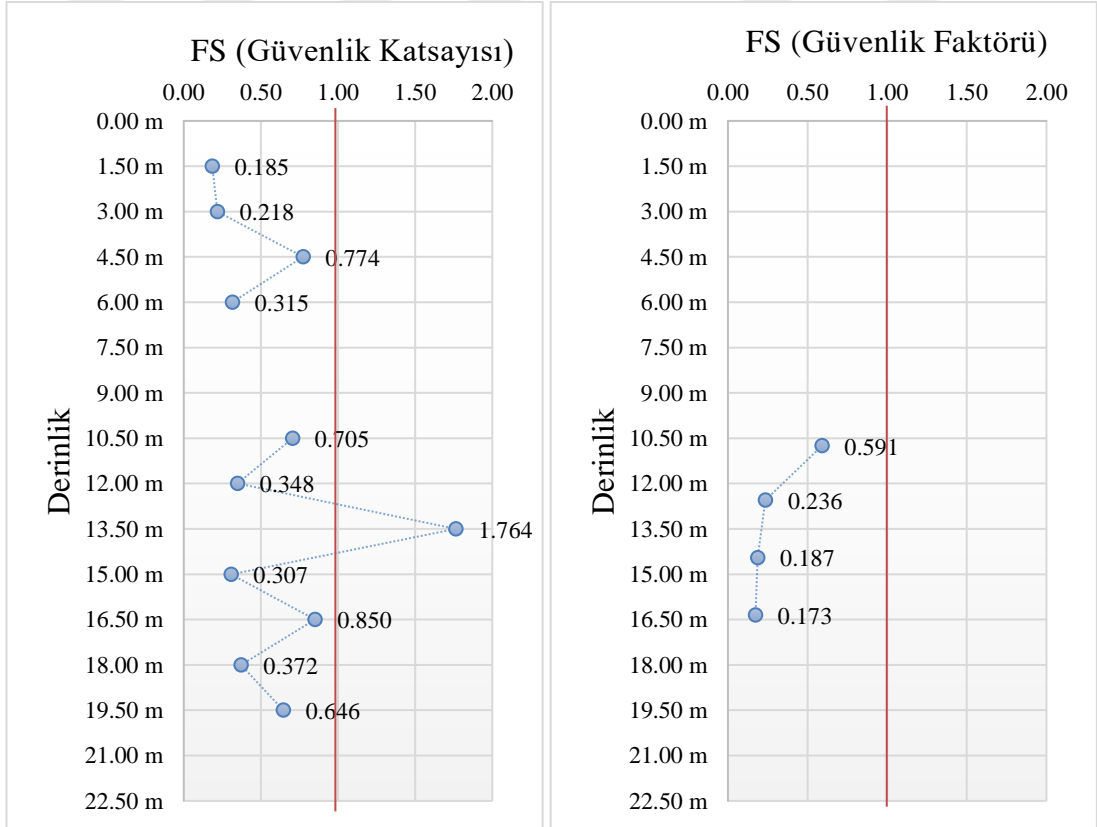
**Şekil C.7 : GSK1-GSK2 güvenlik katsayısı-derinlik değişim grafiği**



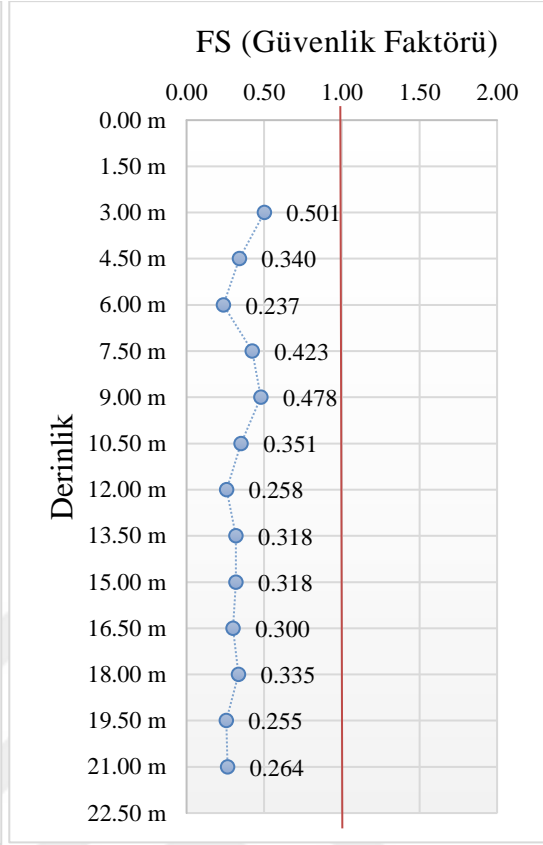
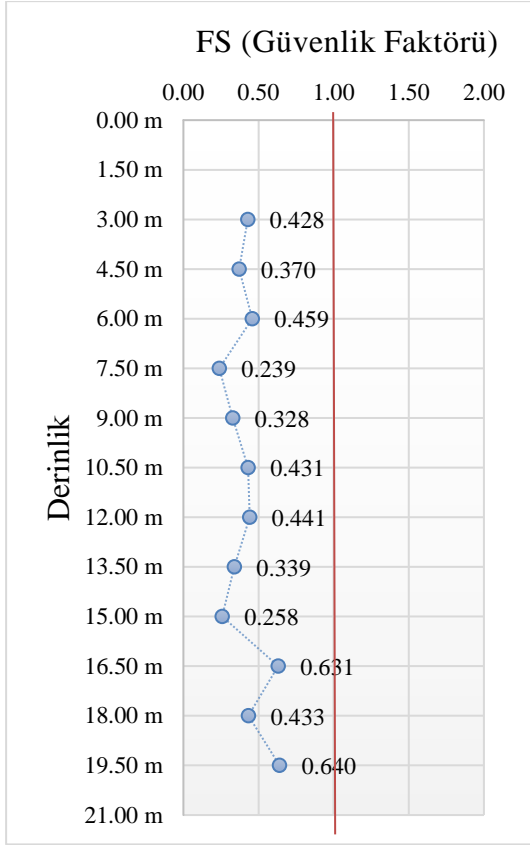
**Şekil C.8 : GSK8-GSK14 güvenlik katsayısı-derinlik değişim grafiği**



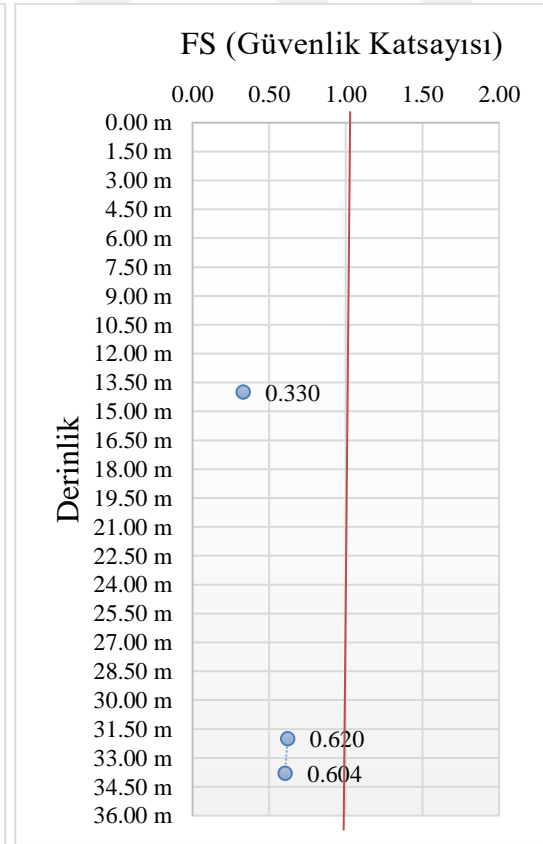
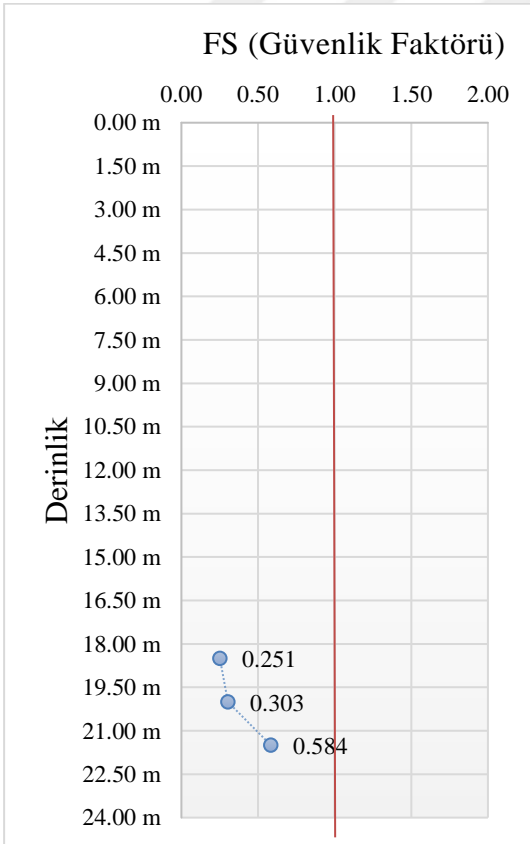
**Şekil C.9 : GSK18-GSK20 güvenlik katsayısı-derinlik değişim grafiği**



**Şekil C.10 : GSK22-GYSK2 güvenlik katsayısı-derinlik değişim grafiği**



Şekil C.11 : KSK7-KSK8 güvenlik katsayısı-derinlik değişim grafiği



Şekil C.12 : GDSK19-EKGDSK3 güvenlik katsayısı-derinlik değişim grafiği

## ÖZGEÇMİŞ



**Ad-Soyad** : Mert ALTINDIŞ  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 18.03.1993 – Biga/Çanakkale  
**E-posta** : mert.altindis@gmail.com

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2015, Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2013 yılında İstanbul merkezli özel bir yapı firmasının Kocaeli’de bulunan fabrika ve endüstriyel yapı işleri şantiyesinde stajyer mühendis olarak görev aldı.
- 2014 yılında Çanakkale’de bulunan özel bir proje firmasında proje çizim ve kontrol işlerinde stajyer mühendis olarak görev aldı.
- 2016 yılında Çanakkale’de hizmet veren özel bir inşaat firmanın konut ve villa şantiyesinde şantiye şefi olarak görev aldı.
- 2018 yılından günümüze İstanbul merkezli özel bir geoteknik danışmanlık ve kontrol firması bünyesinde Çanakkale’de yapımı süren gemi inşa havuzu projesinde kontrol mühendisi olarak görev almaktadır.