

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DEPREM ETKİSİ ALTINDAKİ GÖMÜLÜ SÜREKLİ BORU HATLARI**

**DOKTORA TEZİ**

**Adil YİĞİT  
(501092009)**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Yapı Mühendisliği Programı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Abdullah GEDİKLİ**

**HAZİRAN 2015**



İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501092009 numaralı Doktora Öğrencisi **Adil YİĞİT**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**DEPREM ETKİSİ ALTINDAKİ GÖMÜLÜ SÜREKLİ BORU HATLARI**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :**      **Prof. Dr. Abdullah GEDİKLİ** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :**      **Prof. Dr. Musaffa Ayşen LAV** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Doç. Dr. Şenol ATAÖĞLU** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Prof. Dr. Bilge SİYAHİ** .....  
Gebze Teknik Üniversitesi

**Prof. Dr. İrfan COŞKUN** .....  
Yıldız Teknik Üniversitesi

**Teslim Tarihi :**      **01 Nisan 2015**  
**Savunma Tarihi :**      **04 Haziran 2015**



*Anneme, babama, yetiştiren hocalarıma, destekleyenlere, eşime, çocuklarıma, tüm  
aile fertlerime ve dostlarıma,*



## ÖNSÖZ

Bu çalışmada İstanbul'un jeolojik ve jeofizik özelliklerine bağlı olarak gömülü sürekli boru hatlarının deprem etkilerine karşı davranışı ele alınmıştır.

Çalışmam boyunca bana destek olan değerli hocalarım Prof. Dr. Abdullah Gedikli ve Prof. Dr. M. Ayşen Lav'a öncelikli olarak teşekkürlerimi sunarım. Kendilerine ayırmam gereken zamandan kısıp bu çalışmaya yönelmem konusunda bana anlayış ve sabır gösteren eşim, oğlum Hasbi Miraç ve kızım Rabia Eslem'den hak helallığı diliyorum. Beni destekleyen tüm İGDAŞ çalışanı arkadaşlarıma özellikle de Ahmet Alper Kavçakar, Osman Emre Ülke, Abdullah Karaman, İzzetin Tüner, Ali Öztürk, Murat Odabaşı, Ümit Bektaş, Vedat Kermeli, Hikmet Bıyıkoglu ve Seyit Çeri beyefendilere şükranlarımı sunarım. Ayrıca bilgi, birikim ve deneyimlerini böyle bir çalışma için tarafımla paylaşan Jeodinamik firmasından Nevzat Mengüllüoğlu'na, Borusan'dan Kemal Aksu'ya, Marmara Zemin'den Miray Mürtezaoğlu'na, A1 Mühendislik'ten Abdullah Alkan'a teşekkür ederim. Özel olarak TEKDER İstanbul Şubesi Başkanı Sn. Hüseyin Kurşun'a ilgi ve desteklerinden ötürü şükranlarımı sunarım. Kadim dostlarım Barbaros Azizoglu ve İlhan Dinç kardeşlerime de teşekkür etme borcumu yerine getirmek isterim.

Bugünüme kadar benim yetişmemde zerre kadar da olsa emeği olan tüm hocalarıma saygılarımı sunarım. Anneme, babama ve babaanneme beni yetiştirdikleri ve destek oldukları için hürmet ederim. Yıllar önce vefat etmiş olan kardeşim Gürhan'ı rahmetle yad ederim. Varlıklarıyla ve destekleriyle bana mutluluk veren değerli kardeşim Fatih Yiğit ve eşlerine, yeğenlerim Hatice Kübra, Fatmanur Zehra ve Ahmet Gürhan'a da sevgilerimi sunarım.

Nisan 2015

Adil YİĞİT  
(İnş.Yük.Müh.)



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

|                                                                   |      |
|-------------------------------------------------------------------|------|
| ÖNSÖZ.....                                                        | vii  |
| İÇİNDEKİLER .....                                                 | ix   |
| ÇİZELGE LİSTESİ.....                                              | xiii |
| ŞEKİL LİSTESİ.....                                                | xv   |
| ÖZET.....                                                         | xvii |
| SUMMARY .....                                                     | xix  |
| 1. GİRİŞ .....                                                    | 1    |
| 2. ÇALIŞMA ALANI.....                                             | 5    |
| 2.1 İstanbul İli Jeolojisi .....                                  | 5    |
| 2.1.1 Danışmen formasyonu .....                                   | 5    |
| 2.1.2 Denizliköyü formasyonu .....                                | 6    |
| 2.1.3 Istranca birliği .....                                      | 7    |
| 2.1.4 Pendik formasyonu (Kartal formasyonu, Kozyatağı üyesi)..... | 8    |
| 2.1.5 Pelitli formasyonu .....                                    | 9    |
| 2.1.6 Pınarhisar formasyonu .....                                 | 10   |
| 2.1.7 Sarıyer formasyonu .....                                    | 11   |
| 2.1.8 Yemişliçay formasyonu .....                                 | 12   |
| 2.1.9 Trakya formasyonu .....                                     | 13   |
| 2.1.10 Yayalar formasyonu .....                                   | 14   |
| 2.1.11 Çukurçeşme formasyonu.....                                 | 15   |
| 2.1.12 Akveren formasyonu.....                                    | 16   |
| 2.1.13 Şile formasyonu .....                                      | 16   |
| 2.1.14 Yunuslubayır formasyonu.....                               | 17   |
| 2.1.15 Aydos formasyonu .....                                     | 17   |
| 2.1.16 Kapaklı formasyonu .....                                   | 18   |
| 2.1.17 Gebze grubu ballıkaya formasyonu .....                     | 19   |
| 2.1.18 Gebze grubu demirciler formasyonu.....                     | 20   |
| 2.1.19 Gebze grubu tepecikköy formasyonu .....                    | 20   |
| 2.1.20 Sancaktepe graniti .....                                   | 21   |
| 2.1.21 Çavuşbaşı granodiyoriti .....                              | 22   |
| 2.1.22 Ömerli formasyonu .....                                    | 22   |
| 2.1.23 Altıntepe formasyonu.....                                  | 24   |
| 2.1.24 Çekmece formasyonu, Bakırköy üyesi .....                   | 25   |
| 2.1.25 Çekmece formasyonu, Güngören üyesi .....                   | 26   |
| 2.1.26 Kırklareli grubu, ceylan formasyonu .....                  | 27   |
| 2.1.27 Kırklareli grubu, koyunbaba formasyonu .....               | 28   |
| 2.1.28 Kırklareli grubu, soğucak formasyonu.....                  | 28   |
| 2.1.29 Kırklareli grubu, balıkköyü üyesi .....                    | 29   |
| 2.1.30 Danışmen formasyonu, suloğlu üyesi .....                   | 30   |
| 2.1.31 Danışmen formasyonu, Gürpınar üyesi .....                  | 31   |
| 2.1.32 Danışmen formasyonu, çantaköy üyesi .....                  | 31   |

|                                                                           |           |
|---------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.1.33 Polonezköy grubu Kurtköy formasyonu .....                          | 32        |
| 2.1.34 Polonezköy grubu kocatöngel formasyonu .....                       | 33        |
| 2.1.35 Kuşdili formasyonu .....                                           | 33        |
| 2.1.36 Güncel birikintiler .....                                          | 34        |
| 2.1.36.1 Seki birikintisi .....                                           | 34        |
| 2.1.36.2 Alüvyon .....                                                    | 34        |
| 2.1.36.3 Plaj birikintisi .....                                           | 35        |
| 2.1.36.4 Yalıtaşı .....                                                   | 35        |
| 2.1.36.5 Yamaç molozu .....                                               | 35        |
| 2.1.36.6 Kumul .....                                                      | 36        |
| 2.2 Çalışma Alanı Sismik ve Jeofizik İncelemesi .....                     | 37        |
| 2.3 İstanbul İl Jeolojisi Formasyonlarının Zemin Özellikleri .....        | 41        |
| <b>3. DEPREM ETKİSİ ALTINDA GÖMÜLÜ SÜREKLİ BORU HATLARI.....</b>          | <b>45</b> |
| 3.1 Deprem Kaynaklı Zemin Kayması .....                                   | 45        |
| 3.2 Newmark Deplasman Hesabı İçin Yeni Yaklaşımlar .....                  | 50        |
| 3.2.1 Birinci yaklaşım .....                                              | 50        |
| 3.2.2 İkinci yaklaşım .....                                               | 52        |
| 3.2.3 Yaklaşımlar arası kıyaslama .....                                   | 53        |
| 3.3 İstanbul Verilerine Göre İlgili Değerlerin Elde Edilmesi .....        | 54        |
| 3.4 Sismik Dalga Yayılımı Etkisi .....                                    | 62        |
| 3.5 Sismik Dalga Yayılımı Etkisinin İstanbul Verilerine Uygulanması ..... | 63        |
| 3.6 Zemin-Gömülü Boru Etkileşimi .....                                    | 66        |
| 3.6.1 Boyuna (boru eksenine paralel) hareket .....                        | 67        |
| 3.6.2 Yatay (enine) hareket .....                                         | 69        |
| 3.6.3 Yukarı yönde (dikey çapraz) hareket .....                           | 70        |
| 3.6.4 Aşağı yönde (düşey çapraz) hareket .....                            | 72        |
| 3.7 Hasar Oluşum Kriterleri .....                                         | 73        |
| 3.7.1 Kritik şekil değiştirme oranı .....                                 | 73        |
| 3.7.2 İşletme şekil değiştirme oranı .....                                | 74        |
| 3.7.2.1 Sıcaklık .....                                                    | 74        |
| 3.7.2.2 Toprak basıncı .....                                              | 75        |
| 3.7.2.3 İç basınç .....                                                   | 75        |
| 3.7.2.4 Trafik yükü .....                                                 | 76        |
| <b>4. MATEMATİK MODELLEME .....</b>                                       | <b>79</b> |
| 4.1 Boru Eksenine Dik Zemin Hareketi Durumu .....                         | 79        |
| 4.2 Boru Eksenine Dik Zemin Hareketi Durumu-M.O'Rourke Yaklaşımı .....    | 81        |
| 4.3 Boru Eksenine Paralel Zemin Hareketi Durumu .....                     | 83        |
| 4.4 Elastik Olmayan Boru Modeli Yaklaşımı .....                           | 86        |
| 4.5 Sismik Dalga Yayılımı (SDY) Durumu .....                              | 89        |
| 4.6 Sıvılaşma .....                                                       | 90        |
| <b>5. MEVCUT İSTANBUL VERİLERİ ÜZERİNE UYGULAMA.....</b>                  | <b>93</b> |
| 5.1 Malzemeler .....                                                      | 93        |
| 5.2 PE Borular .....                                                      | 94        |
| 5.3 Çelik Borular .....                                                   | 94        |
| 5.4 Tranşeler .....                                                       | 95        |
| 5.5 Teknik Uygulamalar .....                                              | 96        |
| 5.5.1 Boru eksenine dik zemin hareketi durumu .....                       | 96        |
| 5.5.2 Boru eksenine paralel zemin hareketi durumu .....                   | 107       |
| 5.5.3 Sismik dalga yayılımı durumu .....                                  | 113       |
| 5.5.4 Sıcaklık değişimi durumu .....                                      | 116       |

|                                                                       |            |
|-----------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.5.5 İç basınç durumu .....                                          | 116        |
| 5.5.6 Lokal burkulma analizi için kritik şekil değiştirme oranı ..... | 119        |
| 5.6 Örnek Çalışmalar .....                                            | 119        |
| 5.6.1 Polietilen boru için örnek çalışma .....                        | 119        |
| 5.6.2 Çelik boru için örnek çalışma .....                             | 122        |
| <b>6. SONUÇLAR .....</b>                                              | <b>125</b> |
| 6.1 Güzergah Tespiti ve Sorunlu Bölgeden Kaçınma .....                | 125        |
| 6.2 Zemin İyileştirmesi .....                                         | 125        |
| 6.3 Esnek Malzeme .....                                               | 126        |
| 6.4 Malzeme Seçimi .....                                              | 126        |
| 6.5 Gömme Derinliği .....                                             | 128        |
| 6.6 Dolgu Malzemesi .....                                             | 131        |
| 6.7 Boru Kaplaması .....                                              | 131        |
| 6.8 Sismik Kaynaklı Hasar Karşılaştırması .....                       | 132        |
| 6.9 İşletme Şekil Değiştirme Oranı Etkisi .....                       | 132        |
| <b>KAYNAKLAR .....</b>                                                | <b>133</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>                                                 | <b>139</b> |



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

|              |                                                                           |     |
|--------------|---------------------------------------------------------------------------|-----|
| Çizelge 2.1  | : Formasyon Tablosu .....                                                 | 42  |
| Çizelge 3.1  | : 1976-2013 Yılları Arası Türkiye Depremleri ( $M_w \geq 5,5$ ).....      | 49  |
| Çizelge 3.2  | : Yaklaşımlar Arası Kıyaslama.....                                        | 53  |
| Çizelge 3.3  | : Deprem Kaynaklı Zemin Kaymasına Bağlı Deplasman Miktarı .....           | 61  |
| Çizelge 3.4  | : Formasyon Bazında Dalga Boyu Aralığı .....                              | 64  |
| Çizelge 3.5  | : Zemin Yatak Katsayıları .....                                           | 66  |
| Çizelge 3.6  | : $X_u$ Deplasmanı.....                                                   | 67  |
| Çizelge 3.7  | : $k$ Değerleri.....                                                      | 67  |
| Çizelge 3.8  | : $k_0$ Değerleri.....                                                    | 68  |
| Çizelge 3.9  | : $(H+D/2)$ Değerinin Katsayısı .....                                     | 69  |
| Çizelge 3.10 | : Yatay Taşıma Kapasite Faktörü .....                                     | 70  |
| Çizelge 3.11 | : $H$ Değerinin Katsayısı .....                                           | 71  |
| Çizelge 4.1  | : Çelik Sınıfları İçin Ramberg Osgood Parametreleri .....                 | 86  |
| Çizelge 5.1  | : Bazı Boru Malzeme Değerleri.....                                        | 93  |
| Çizelge 5.2  | : $H=0,5$ m İçin $P_u$ (kN/m) Değerleri .....                             | 97  |
| Çizelge 5.3  | : $H=1,0$ m İçin $P_u$ (kN/m) Değerleri .....                             | 97  |
| Çizelge 5.4  | : $H=1,5$ m İçin $P_u$ (kN/m) Değerleri .....                             | 97  |
| Çizelge 5.5  | : $H=2,0$ m İçin $P_u$ (kN/m) Değerleri .....                             | 98  |
| Çizelge 5.6  | : $H=2,5$ m İçin $P_u$ (kN/m) Değerleri .....                             | 98  |
| Çizelge 5.7  | : $K_v$ (kN/m <sup>2</sup> ) Değerleri .....                              | 99  |
| Çizelge 5.8  | : Polietilen Boru İçin $\beta_v$ (1/m) Değerleri .....                    | 100 |
| Çizelge 5.9  | : Çelik Boru İçin $\beta_v$ (1/m) Değerleri .....                         | 101 |
| Çizelge 5.10 | : $\delta x D=Z$ (m <sup>2</sup> ) Katsayısı .....                        | 102 |
| Çizelge 5.11 | : Boru Eksenine Dik KZH İçin $\epsilon_b$ Tablosu .....                   | 103 |
| Çizelge 5.12 | : Boru Eksenine Dik KZH İçin $\epsilon_a$ Tablosu .....                   | 105 |
| Çizelge 5.13 | : Boyuna Zemin Hareket $t_u$ (kN/m) Değişimi.....                         | 107 |
| Çizelge 5.14 | : Boyuna Zemin Hareketi $K_u$ (kN/m <sup>2</sup> ) Değerleri.....         | 108 |
| Çizelge 5.15 | : Polietilen Boru İçin $\beta_u$ (1/m) Değerleri.....                     | 109 |
| Çizelge 5.16 | : Çelik Boru İçin $\beta_u$ (1/m) Değerleri .....                         | 110 |
| Çizelge 5.17 | : $m$ Değerleri Tablosu.....                                              | 111 |
| Çizelge 5.18 | : $l$ (m) Boyu Tablosu.....                                               | 111 |
| Çizelge 5.19 | : $n$ Değerleri Tablosu .....                                             | 111 |
| Çizelge 5.20 | : Boru Eksenine Paralel KZH İçin $\epsilon_a$ Tablosu .....               | 112 |
| Çizelge 5.21 | : $S$ Değeri Tablosu .....                                                | 113 |
| Çizelge 5.22 | : Sismik Dalga Yayılımı (SDY) İçin $\epsilon_b$ Tablosu .....             | 114 |
| Çizelge 5.23 | : Sismik Dalga Yayılımı (SDY) İçin $\epsilon_{au}$ Tablosu .....          | 115 |
| Çizelge 5.24 | : Sismik Dalga Yayılımı (SDY) İçin $\epsilon_{av}$ Tablosu .....          | 115 |
| Çizelge 5.25 | : Çelik Boru İçin İç Basınçtan Kaynaklı Şekil Değiştirme Oranı .....      | 117 |
| Çizelge 5.26 | : Polietilen Boru İçin İç Basınçtan Kaynaklı Şekil Değiştirme Oranı ..... | 118 |



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

|                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1 : İstanbul Jeoloji Haritası.....                                           | 5  |
| Şekil 2.2 : Danışmen Formasyonu Yayılımı .....                                       | 6  |
| Şekil 2.3 : Denizli Köyü Formasyonu Yayılımı .....                                   | 7  |
| Şekil 2.4 : Istanca Birliği Yayılımı.....                                            | 8  |
| Şekil 2.5 : Pendik (Kartal) Formasyonu Yayılımı .....                                | 9  |
| Şekil 2.6 : Pelitli Formasyonu Yayılımı .....                                        | 10 |
| Şekil 2.7 : Pınarhisar Formasyonu Yayılımı .....                                     | 11 |
| Şekil 2.8 : Sarıyer Formasyonu Yayılımı .....                                        | 12 |
| Şekil 2.9 : Yemişliçay Formasyonu Yayılımı .....                                     | 13 |
| Şekil 2.10 : Trakya Formasyonu Yayılımı .....                                        | 14 |
| Şekil 2.11 : Yayalar Formasyonu Yayılımı .....                                       | 15 |
| Şekil 2.12 : Çukurçeşme Formasyonu Yayılımı.....                                     | 16 |
| Şekil 2.13 : Akveren, Yunuslubayır, Şile Formasyon Yayılımları.....                  | 17 |
| Şekil 2.14 : Aydos Formasyonu Yayılımı .....                                         | 18 |
| Şekil 2.15 : Kapaklı Formasyonu Yayılımı .....                                       | 19 |
| Şekil 2.16 : Gebze Grubu Formasyon Yayılımı .....                                    | 21 |
| Şekil 2.17 : Sancaktepe Graniti Yayılımı .....                                       | 21 |
| Şekil 2.18 : Çavuşbaşı Granodiyoriti Yayılımı .....                                  | 22 |
| Şekil 2.19 : Ömerli Formasyonu Yayılımı .....                                        | 23 |
| Şekil 2.20 : Altıntepe Formasyonu Yayılımı .....                                     | 25 |
| Şekil 2.21 : Bakırköy Üyesi Formasyon Yayılımı .....                                 | 26 |
| Şekil 2.22 : Güngören Üyesi Formasyon Yayılımı .....                                 | 27 |
| Şekil 2.23 : Kırklareli Grubu Formasyon Yayılımı .....                               | 30 |
| Şekil 2.24 : Danışmen Formasyonu Üye Yayılımları.....                                | 32 |
| Şekil 2.25 : Kurtköy ve Kocatöngel Formasyonları Yayılımı .....                      | 33 |
| Şekil 2.26 : Güncel Birikintiler ve Kuşdili Formasyonu Yayılımı .....                | 37 |
| Şekil 2.27 : Kuzey Anadolu Fay Hattı.....                                            | 38 |
| Şekil 2.28 : Kuzey Anadolu Fay Hattı Marmara Parçası.....                            | 38 |
| Şekil 2.29 : Marmara Denizi'ndeki Yıkıcı Depremler .....                             | 39 |
| Şekil 2.30 : İstanbul İli'nin Ortalama $V_{s30}$ Dağılım Haritası .....              | 40 |
| Şekil 2.31 : İstanbul Senaryo Depremine Göre PGA Dağılımı .....                      | 41 |
| Şekil 3.1 : Boru Hatlarına Etki Açısından Zemin Kaymaları .....                      | 45 |
| Şekil 3.2 : a) Newmark Kayan Blok Modeli, b) Newmark Analizi Algoritması ...         | 46 |
| Şekil 3.3 : $\log(I_a) - \log(a_0)$ İlişkisi .....                                   | 51 |
| Şekil 3.4 : $\log(I_a) - \log(a_{\max})$ İlişkisi .....                              | 52 |
| Şekil 3.5 : Sabit Arias İndeksi İçin Deplasman – Kritik İvme İlişkisi .....          | 54 |
| Şekil 3.6 : Olası İstanbul Depremi İçin $R - \log I_a$ İlişkisi.....                 | 55 |
| Şekil 3.7 : Anadolu Yakası Zemin Formasyonları İçin $a_c$ Kritik İvme Grafikleri...  | 56 |
| Şekil 3.8 : Avrupa Yakası Zemin Formasyonları İçin $a_c$ Kritik İvme Grafikleri .... | 59 |
| Şekil 3.9 : Sismik Dalga Yayılımı .....                                              | 62 |
| Şekil 3.10 : Olası İstanbul $M=7,5$ Depremi İçin $\delta - R$ İlişkisi.....          | 63 |

|                                                                                                                        |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 3.11 : Boru-Toprak Arayüzünde İdeal Yük-Deformasyon İlişkisi.....                                                | 66  |
| Şekil 3.12 : Sürekli Boru -Zemin Arayüzünde İdeal Elasto-Plastik Yaylar .....                                          | 66  |
| Şekil 3.13 : Adhezyon Faktörü – $S_u$ İlişkisi.....                                                                    | 68  |
| Şekil 3.14 : Çizelge 3.10’a Göre $\phi=36^\circ$ İçin Yatay Taşıma Kapasitesi Faktörü .....                            | 69  |
| Şekil 3.15 : Kum İçin Dikey Yukarı İtme Çarpanı – Derinlik / Çap Oranı .....                                           | 71  |
| Şekil 3.16 : Kil İçin Dikey Yukarı İtme Çarpanı – Derinlik / Çap Oranı .....                                           | 72  |
| Şekil 3.17 : Dikey Taşıma Kapasitesi Faktörü – Toprak İçsel Sürtünme Açısı .....                                       | 73  |
| Şekil 3.18 : İç Basınç Etkisindeki İnce Cidarlı Açık Uçlu Silindir .....                                               | 75  |
| Şekil 3.19 : Tek ve İki Kamyon Halinde Boussinesq Katsayısı ( $\alpha$ ) .....                                         | 76  |
| Şekil 4.1 : İdealleştirilmiş Kalıcı Zemin Hareketi (KZH) .....                                                         | 79  |
| Şekil 4.2 : a) Boru Eksenine Enine Zemin Hareketi, b) Enine Zemin Hareketinde<br>Boru- Zemin Etkileşimi Modeli .....   | 80  |
| Şekil 4.3 : Eksene Dik Hareket - Mesnette Oluşan Eksenel Şekil Değiştirme .....                                        | 81  |
| Şekil 4.4 : M. O’ Rourke Modeli .....                                                                                  | 82  |
| Şekil 4.5 : a) Boru Eksenine Paralel Zemin Hareketi, b) Boyuna Zemin<br>Hareketinde Boru- Zemin Etkileşimi Modeli..... | 83  |
| Şekil 4.6 : Boyuna KZH Durumunda Boru Şekil Değiştirmesi Model Grafiği.....                                            | 84  |
| Şekil 4.7 : Durum-1 İçin İdealleştirilmiş Örnek .....                                                                  | 88  |
| Şekil 4.8 : Durum-2 İçin İdealleştirilmiş Örnek .....                                                                  | 88  |
| Şekil 4.9 : Maksimum Şekil Değiştirme Oranı – Sıvılaşmış Bölge Genişliği .....                                         | 91  |
| Şekil 5.1 : Tipik Tranşe Modeli .....                                                                                  | 95  |
| Şekil 5.2 : Kohezyonsuz Sıkı Bir Zemin İçin $y_u$ Değeri .....                                                         | 96  |
| Şekil 5.3 : Yerel (Lokal) Burkulma – $t/R$ İlişkisi .....                                                              | 119 |
| Şekil 5.4 : Örnek Problem - Harita .....                                                                               | 120 |
| Şekil 6.1 : $\epsilon_a - t$ Değişimi (Eksene Paralel Hareket Durumu) .....                                            | 126 |
| Şekil 6.2 : $\epsilon_a - D$ Değişimi (Eksene Paralel Hareket Durumu).....                                             | 127 |
| Şekil 6.3 : $\epsilon_a - D$ Değişimi (Eksene Dik Hareket Durumu).....                                                 | 127 |
| Şekil 6.4 : $\epsilon_b - D$ Değişimi (Eksene Dik Hareket Durumu).....                                                 | 128 |
| Şekil 6.5 : $\epsilon_b - H$ Değişimi (Eksene Dik Hareket Durumu).....                                                 | 129 |
| Şekil 6.6 : $\epsilon_a - H$ Değişimi (Eksene Dik Hareket Durumu).....                                                 | 129 |
| Şekil 6.7 : $\epsilon_a - H$ Değişimi (Eksene Paralel Hareket Durumu).....                                             | 129 |
| Şekil 6.8 : $\epsilon_b - H/D$ Değişimi (Eksene Dik Hareket Durumu).....                                               | 130 |
| Şekil 6.9 : $\epsilon_a - H/D$ Değişimi (Eksene Dik Hareket Durumu).....                                               | 131 |

## DEPREM ETKİSİ ALTINDAKİ GÖMÜLÜ SÜREKLİ BORU HATLARI

### ÖZET

Üst yapılarda oluşan ağır hasar ve yıkılmalara bağlı ölümlerin ve yaralıların olması depremin insan hayatı üzerine birincil etkileri olarak tarif edilirse alt yapılarda oluşan hasarlara bağlı ortaya çıkan, depremden sonraki yaşam kalitesini olumsuz etkileyen durumlar da depremin insan hayatı üzerine etkileyen ikincil etkenleri olarak tarif edilebilir. Tarihteki depremler incelendiğinde bu ikincil etkilerin birincil etkiler kadar önemli olduğu açıkça görülmektedir.

Burada bahsedilen durumlar dikkate alındığında toplumsal hayatın can damarları olan ve bu işlevleri nedeniyle de “yaşam hattı” olarak adlandırılan altyapı boru hattı sistemlerinin depreme karşı güvenliğinin sağlanmasının kaçınılmaz olduğu açıkça anlaşılmaktadır.

Boru hatları sürekli ve parçalı diye iki kısma ayrılırlar. Petrol ve gaz boru hatları genellikle sürekli boru hattı şeklinde, su temini boru hatları ise parçalı boru hattı şeklinde dizayn ve inşa edilirler.

Gömülü boru hatları kalıcı zemin hareketi (KZH) ve sismik dalga yayılımı yolu ile hasar görebilirler. Bunun yanı sıra, fay-boru hattı kesişimi durumu da boru hattı güvenliği açısından dikkate alınması gereken bir konudur.

Kalıcı zemin hareketi sıvılaşma nedeniyle yanal yayılma, sismik oturma, zemin kayması ve yüzeysel fay hareketi olarak tarif edilmektedir. Genel olarak boru hasarlarına neden olan kalıcı zemin hareketi potansiyeli zemin deplasman miktarı ile ilişkilidir. Zemin- boru etkileşiminin ana konusu olan sıvılaşma nedeniyle oluşan kalıcı zemin hareketi miktarının tahmini zor bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Zemin kayması nedeniyle oluşan kalıcı zemin hareketi konusuyla sınırlandırılmış olan bu çalışmada zemin kaymasına karşı gömülü sürekli boru hatlarının davranışı incelenmiştir.

Newmark kayan blok modeli deprem kaynaklı zemin deplasmanlarının hesaplanması için sıkça kullanılan bir modeldir. Literatürde bu model kullanılarak çeşitli deprem verilerine göre regresyon analizleri yapılmış ve bazı hesap yöntemleri elde edilmiştir. Literatürde var olan yöntemlere ilave olarak regresyon uyumu anlamında daha iyi bir yöntem bu çalışmayla elde edilmiştir. Elde edilen yöntemle gerekli çalışmalar yapılmış ve ulaşılan sonuçlar irdelenmiştir.

Bu çalışmada öncelikle İstanbul’un jeolojik ve jeofizik özelliklerine göre zemin formasyonları ele alınmıştır. İkinci aşamada ise gömülü sürekli boru hattı – zemin modellemesi yapıp bu matematik modellemelerin çözümlemeleri yapılmıştır. Son aşamada ise birinci ve ikinci aşamada elde edilen veriler birleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.



## **BURIED CONTINUOUS PIPELINES UNDER THE EFFECTS OF EARTHQUAKE**

### **SUMMARY**

Harm arising from heavy damage in superstructures is defined as primary effects of earthquake on human life. Conditions occurring in consequence of damages in infrastructures and negatively affect life quality after earthquake can be defined as secondary effects of earthquake on human life. When earthquakes in history are analysed, it is clearly seen that secondary effects are as severe as primary effects.

Seismic design of buried pipeline has great importance in the field of “lifeline” engineering. The pipelines are often referred to as “lifelines” since carry materials essential to support of life. The pipelines are usually buried below ground for economic, aesthetic, safety and environmental reasons.

Pipelines can be categorized as either continuous or segmented. Generally the oil and gas pipelines are designed and constructed as continuous pipeline, while water supply pipelines are designed and constructed as segmented pipelines. The pipelines must be designed and constructed to resist most of the earthquake hazards.

Maintaining the safety of lifelines in incidents of earthquakes today constitutes one of the world's most important matters. Buried pipelines can be damaged by an earthquake via either permanent ground deformation (PGD) or seismic wave propagation (SWP). Besides these, fault-pipe intersection is another issue that must be considered in ensuring the safety of pipelines. The current widespread, and growing, consumption of natural gas in Turkey has drawn even more attention to the subject of the safety of gas networks. Added to this is the fact that Turkey has become an important transmission region for international pipelines such as Baku-Ceyhan, NABUCCO, etc., and, because Turkey is situated on very active and major fault lines, such as the North Anatolian Fault Zone (NAFZ), the safety of these gas transmission networks in incidents of earthquakes is a very important concern.

The most well known forms of PGD are described as surface faulting, landsliding, seismic settlement and lateral spreading due to soil liquefaction. In general, the potential for PGD to induce pipe damage is related to the amount of ground displacement. Predicting the amount of ground displacement due to soil liquefaction is a challenging problem, and therefore, such estimation is the main subject for soil-pipe interaction. This study has been limited to the permanent ground deformation due to landslide. In this study, behaviour of continuous buried pipelines subject to landslide is investigated.

PGD can be started by a seismic activity. There are several types of PGD. The main two types of PGD are the spatially distributed and localized abrupt PGD. The spatially distributed case commonly occurs in liquefaction and the abrupt case in landslide. Pipelines are generally damaged near the side walls of landslide in the case

of abrupt PGD, and throughout the PGD zone for a distributed PGD. Localized abrupt PGD is more destructive than one that was distributed.

An idealized PGD zone can be characterized by the width ( $W$ ) and the amount of PGD ( $\delta$ ) and shape. If the pipe axis is perpendicular to the direction of sliding and the width of sliding zone,  $W$ , is large enough, the damage of the pipe can be assumed as localized near the side walls. This is true if, and only if, the zone slides as a mass without breaking into pieces. If the zone is narrow, the pipeline may display damage throughout the sliding zone. As the mechanism is vague, no any approach (even an empirical one) has been developed to model the behavior of a sliding mass during breaking into pieces. Abrupt permanent ground deformation has the same properties with a pipe-fault  $90^\circ$  angle crossing case.

Calculation or estimation of earthquake-induced ground motions is important both for superstructures and infrastructures. Newmark sliding block model is a model frequently used for calculating earthquake-induced ground displacements. According to Newmark model, ground displacement is calculated based on earthquake acceleration records. Using this model in literature, regression analyses were carried out according to various earthquake data and some calculation methods were obtained. Generally, these approximations are depend on maximum acceleration, critical acceleration and Arias Intensity. Arias Intensity index based on time-dependent acceleration of an earthquake. Besides, a regression analysis for Arias Intensity, depends on moment magnitude of an earthquake and distance from the epicentre of the earthquake, has been developed. In this study, a new analysis covering maximum earthquake acceleration has been obtained according to significant earthquake records between 1976 and 2013 in Turkey.

Turkey is a country with a number of important and large fault lines. The North Anatolian Fault Zone (NAFZ) ranks as one of the most active fault systems in Turkey. This fault line is an active right-lateral strike-slip fault in northern Anatolia that runs along the transform boundary between the Eurasian Plate and the Anatolian Plate. The fault extends westward from a junction with the East Anatolian Fault at the Karlioia Triple Junction in eastern Turkey, across northern Turkey and into the Aegean Sea. It runs south of Istanbul, throughout Marmara Sea. There have been significant earthquake records along the NAFZ since the disastrous 1939 Erzincan earthquake, such as 1939 Erzincan ( $M=7.9$ ), 1942 Niksar-Erbaa ( $M=6.9$ ), 1943 Tosya-Ladik ( $M=7.7$ ), 1944 Bolu-Gerede ( $M=7.5$ ), 1949 Karlioia ( $M=7.1$ ), 1951 Kurşunlu ( $M=6.9$ ), 1957 Abant ( $M=6.8$ ), 1966 Varto ( $M=6.9$ ), 1967 Mudurnu Valley ( $M=7.1$ ), 1992 Erzincan ( $M=6.5$ ), 1999 İzmit ( $M=7.4$ ), 1999 Düzce ( $M=7.2$ ). The northern branch of the NAFZ in the Marmara Sea is very close to Istanbul's southernmost shore. The distance between the fault line and the center of the city (old Istanbul) is about 15-20 kilometers.

The Marmara region has some potential seismic gaps. For example, the middle strand from the Mudurnu Valley region to the Aegean Sea has not experienced a significant earthquake for the last 400 years, excepting the 1737 earthquake in the Biga peninsula. In addition to this, the most westerly portion of the southern strand has not ruptured since 1855. In historical times a number of earthquakes occurred along the northern strand, especially in the Marmara Sea area. Recent seismicity maps indicate a potential seismic gap in the central part of the Marmara Sea. Earthquake records spanning two millennia indicate that, on average, at least one medium intensity earthquake has affected Istanbul every 50 years. The average return

period for high intensity events has been 300 years. The Istanbul-Marmara region of northwestern Turkey with a population of more than 15 million faces a high probability of being exposed to an earthquake of magnitude approximately 7.5. One of the aims of this study to analyse the behaviour of ground formations in Istanbul against the expected Istanbul earthquake in terms of its effects on buried pipelines.

Through a vast number of geological, geotechnical and settlement evaluation studies the region had been investigated in the past. As the potential for landsliding is a major problem all over the hill sides. Therefore, expected Istanbul earthquake will be able to trigger to landslides in this region.

Soil-pipeline interaction is one of the main subjects of this study. In general, surroundings of buried pipe in trench is filled with compressed sand or gravel. While polyethylene (PE) pipes are used for low pressure distribution network, steel pipes (ST), covered by polyethylene, are used for high pressure distribution network. Thus, soil-pipe interface consists of PE.

During an earthquake, buried pipelines can be damaged by forces that emerge through soil-pipe interaction at the soil-pipe interface. In such cases the ground moves and causes damage to buried pipelines. Equivalent elasto – plastic soil spring coefficients have been obtained. Then, the straight pipelines under the permanent ground deformation (PGD) and seismic wave propagation (SWP) loads have been examined. To obtain mathematical models for PGD case, this problem has been examined in two parts as Longitudinal Permanent Ground Deformation and Transverse Permanent Ground Deformation.

In the case of SWP, it has been assumed that the ground surface displace sinusoidally. The wave amplitude is much smaller than the wave length. Therefore, it has been assumed that the pipe moves with the soil and the displacement remains in elastic limit.

Traffic load, temperature change, soil weight, operating pressure are important effects on the buried pipelines. External pressure due to traffic load can be calculated via Boussineq Method. The result of our study showed that traffic load effect can be negligible. The land surface temperature at certain times of the day increases and decreases markedly, typically after 50 cm depth, daily change of temperature is low enough to be negligible. On the other hand, operational temperature change may cause longitudinal pressure and strain. When a thin-walled pipe is subjected to internal pressure a hoop and longitudinal stress are produced in the wall. In open-ended cylinder case (such as buried pipelines) only hoop stress occurs, longitudinal stress doesn't occur, but, because of poisson ratio axial strain can take place. Another external pressure can become due to soil weight. This value may be ignored when comparing with internal pressure.

Failure criterias are limit values for a pipeline. Therefore, these criterias have been determined, in this study, to compare with results.

As a result, in this study, firstly, geotechnical and geological characteristics of the ground formations of Istanbul have been investigated. Secondly, mathematical models of buried pipeline – soil interaction have been produced and solved. Finally, data obtained from the first step have been applied on the result equations of the second step and outcomes have been evaluated.



## 1. GİRİŞ

Toplumsal hayatın can damarları olan ve bu işlevleri nedeniyle de “yaşam hattı” olarak adlandırılan altyapı boru hattı sistemlerinin depreme karşı güvenliğinin sağlanmasının kaçınılmaz olduğu tarihi verilerden açıkça anlaşılmaktadır.

Kobe (17 Ocak 1995 Hyogo-Ken Nanbu) depremi nedeni ile bölgedeki otoyolların 1.257 noktasında hasar meydana gelmiş, yaklaşık 1 milyon hanenin suyu, 857 bin hanenin doğalgazı, 916.000 hanenin elektriği ve 410.000 abonenin telefonu kesilmiştir. Depremden sonra aynı anda 234 değişik yerde, özellikle doğalgaz kaçağı ve elektrik kontağı nedeniyle yangın çıktığı belirlenmiştir. Toplam yangın adedi 531, yanan saha ise yaklaşık 1 km<sup>2</sup>'dir. 7.000 civarında bina tamamen yanmış ya da yangından hasar görmüştür. 5.740 ölüm olayının birçoğunun yangın nedeniyle veya su basması sonucu boğulmalar nedeniyle olduğu kayıtlara geçmiştir. Uzmanlar Haiti depreminden sonra, depremzedelerin, kirli suların neden olduğu ishal ve kolera tehdidine açık olduğunu belirterek temiz su sıkıntısı nedeniyle çok sayıda çocuk ve yaşlının hayatını kaybetmesi hususundaki endişelerini sık sık dile getirmişlerdir. Araştırmacılar, 17 Ağustos 1999 Marmara Depreminde fay kırığının her iki tarafında 20 km'lik genişlikteki bölgelerde yer alan gömülü borularda oldukça ağır hasarlar tespit etmişlerdir. Pakistan'da 08 Ekim 2005 tarihinde meydana gelen 7,6 büyüklüğündeki deprem çok geniş bir alanda birçok yerleşim yerini etkilemiş ve oluşan kötü duruma yetkililerin müdahale etmesi hiç de kolay olmamıştır. Altyapı çökmüş, temiz su ve ulaşım sağlanması konusunda büyük sıkıntılar yaşanmıştır.

Bu tür tecrübeleri yaşadktan sonra ABD ve Japonya'da altyapı deprem güvenliği hususunda önemli çalışmalar yapılmış ve yapılmaktadır. Bir deprem ülkesi olan Türkiye'de de üstyapılarla ilgili çalışmalar yapılırken bu çalışmalara da gerekli önemin verilmesi gerekmektedir.

Gerek büyük iletim hattı projeleri gerekse dağıtım hatları projeleri için statik ve dinamik etki kriterlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu noktada enerji (doğalgaz, petrol, vb.) ve ihtiyaç (su, kanalizasyon, vb.) gereksinmelerini karşılamak için imalatı

yapılan gömülü boru hatlarının teknik olarak emniyeti söz konusu olmaktadır. Bu çalışmada depremlerin gömülü boru hatlarına etkileri sismik dalga yayılması ve deprem kaynaklı zemin hareketleri diye iki ana başlıkta ele alınmıştır. Her iki başlık altında da boru hattı-zemin etkileşimi önem arz etmektedir. Boru ve zeminin göreceli hareketleri boru-zemin ara yüzeyinde gerilmelere neden olmaktadır. Zemini sonlu elemanlar ağı ile modellemek mümkün olduğu gibi, bu çalışmada eşdeğer yaylar ile modelleme yapılarak çözümleme yapılmıştır.

Önümüzdeki yıllarda İstanbul'u yaklaşık 7,5 büyüklüğünde bir depremin beklediği hususunda otoriteler hemfikir olmuş durumdadır. Beklenen bu depremde 50 bin civarında yıkık ve/veya ağır hasarlı bina, 90 bin civarında ölü, 130 bin civarında yaralı; elektrik, su ve doğalgaz hatlarında yüzlerce hasar olması olasılıkları üzerinde senaryo çalışmaları yapılmaktadır. Buna bağlı olarak bu çalışmada İstanbul'un zemin formasyonları bazında jeolojik ve jeofizik özelliklerine göre beklenen deprem etkilerine karşı sürekli gömülü boru hatlarının davranışının incelenmesi amaçlanmıştır. Parçalı boru hatları bu çalışma kapsamı dışında tutulmuştur.

Bu amaç doğrultusunda öncelikle çalışma alanı olarak seçilen İstanbul İli'nin jeolojik ve jeofizik yapısı ele alınmıştır. Zemin formasyonlarının yayılım haritaları elde edilerek bu formasyonların karakteristik özellikleri ve özellikle de bu çalışma kapsamında gerekli olan özellikleri derlenmiştir.

Yukarıda da belirtildiği üzere depremler gömülü boru hatlarına sismik dalga yayılımı ve deprem kaynaklı zemin hareketi vasıtasıyla etki ederler. Her iki durumda da zeminde oluşacak deplasman miktarı önem arz eder. Özellikle deprem kaynaklı zemin hareketi miktarını hesaplamak üzere geliştirilen Newmark Modeli bu çalışmaya da esas teşkil etmiştir. Bu model kullanılarak yapılan önceki çalışmalar irdelenmiş ve bu çalışmalardan elde edilen formüller Türkiye'de meydana gelmiş büyük deprem kayıtları kullanılarak ülkemize göre uyarlanmıştır. Aynı çalışma kapsamında daha iyi regresyon uyumu gösterebilecek yaklaşımlar araştırılmış ve elde edilerek kıyaslanmıştır. Ayrıca sismik kesme dalgası yayılımından kaynaklı zemin deplasman hesabı ele alınmıştır.

Gerek sismik kayma dalgası gerekse deprem kaynaklı zemin hareketi sonucu oluşan deplasman gömülü boru hattı üzerinde gerilmelerin oluşmasına neden olur. Söz konusu deprem kaynaklı kalıcı zemin hareketi (KZH) ile boru hattı arasındaki

etkileşimin nasıl gerçekleştiğinin açıklanması ise diğer önemli bir husus olarak karşımıza çıkmıştır. Bu konuda ise American Society of Civil Engineering (ASCE)'nin elasto-plastik zemin yay modeli yaklaşımı temel alınmıştır.

Deprem kaynaklı kalıcı zemin hareketi ile boru hattı arasındaki etkileşim iki alt başlık altında incelenmiştir; boru hattı eksenine dik ve boru hattı eksenine paralel zemin hareketi. Her iki durum için de boru hattı elastik zemine oturan iki ucu ankastre bağlı kiriş olarak modellenmiştir. Bu modele göre diferansiyel denklemler elde edilerek çözümlemelere gidilmiş ve en büyük şekil değiştirme miktarlarını veren sonuç formüller elde edilmiştir. Sismik dalga yayılımı durumunda ise boru hattının zemin ile beraber hareket ettiği kabulünden hareketle çözümlemeler yapılmıştır.

İşletme durumundaki bir boru hattında deprem kaynaklı gerilmelerden oluşacak şekil değiştirmelerin yanı sıra ilave bazı işletmesel şekil değiştirmeler de oluşmaktadır. Bunlar başlıca sıcaklık değişimi, toprak basıncı, trafik yükü, iç basınç ve burkulma şeklinde ifade edilebilir. Hangi ilave gerilmelerin ihmal edilip hangilerinin dikkate alınması gerektiği hususu ele alınarak değerlendirme yapılmıştır. Ayrıca sınırlayıcı (izin verilen) üst şekil değiştirme oranı miktarı aşılmaması gereken bir değer olarak ortaya çıkmış olup bu değere göre kıyaslama yapılarak durum değerlendirmesi yapılması hususu önem arz etmektedir.

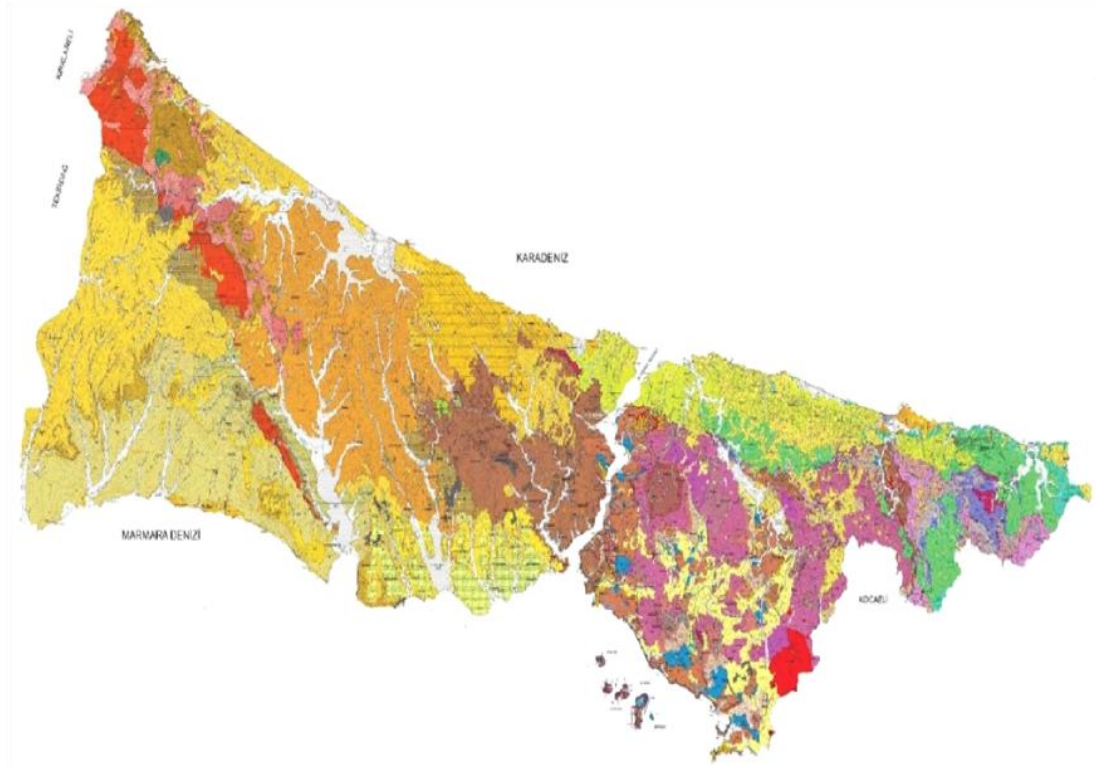
Bu çalışma kapsamında yine pratiğe yönelik olması düşüncesiyle kullanım kolaylığı sağlayacak şekilde tablolar yapılmış olup İstanbul özelinde de örnek çalışmalar sunulmuştur.

İnsan hayatına etkisi anlamında bakıldığında boru hatlarının deprem dayanımı açısından ele alınmasının önemli olduğu özet sonucu ortaya çıkmaktadır. Bunun sağlanması için boru hattı döşenmeden ve/veya döşendikten sonra yapılması gerekenler ve alınması gerekli olan önlemler vardır. Bu çalışmada esas itibarıyla mevcut veya yeni imal edilecek sürekli boru hatlarının, İstanbul örneğinde, maruz kalacakları deprem etkilerinin ne gibi sonuçlar doğurabileceği hususunun ortaya konulması hedeflenmiştir.



## 2. ÇALIŞMA ALANI

Aynı deprem etkisi ve koşulları altında gömülü boru hatlarını etkileyen en belirleyici özellik zemin formasyonlarının karakteristik özellikleridir. Bu nedenle öncelikli olarak İstanbul'un zemin formasyonları (Şekil 2.1) jeolojik ve jeofizik özelliklerine göre ele alınıp incelenmiştir.



Şekil 2.1 : İstanbul Jeoloji Haritası [1].

### 2.1 İstanbul İli Jeolojisi

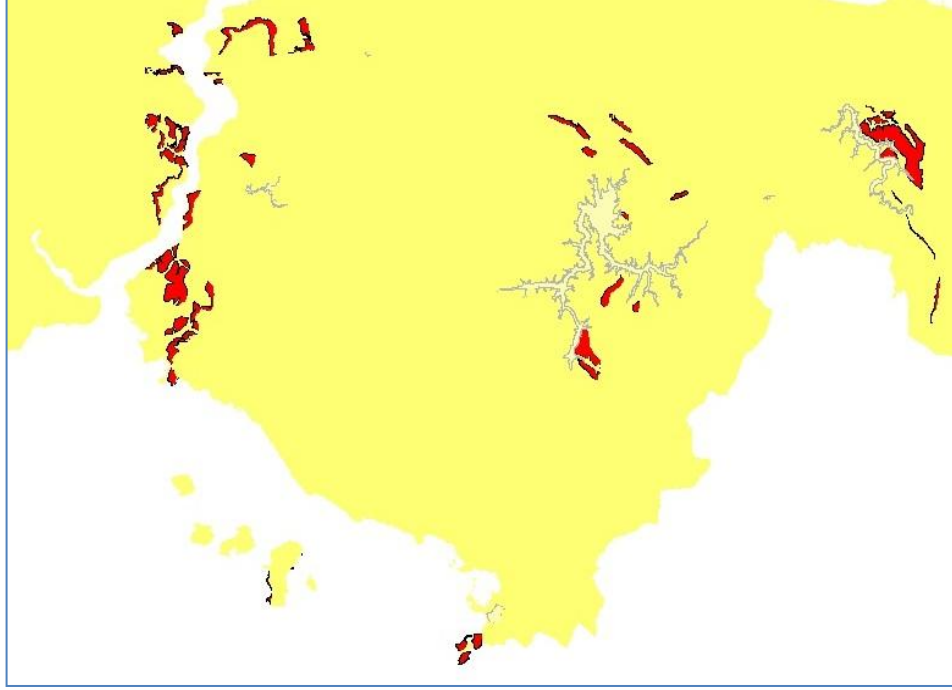
#### 2.1.1 Danışmen formasyonu

Trakya havzasında regressif delta sistemi içinde yer aldığı düşünülen taşkın ovası, göl ve bataklık çökelleri geniş alanlar kaplar. Bu çökeller başlıca, Yenimuhacir Formasyonu, Yenimuhacir Grubu kapsamında ya da tek başına Danışmen Formasyonu, Danışmen Şeyili gibi çeşitli adlar altında incelenmiştir. Bazı çalışmalar söz konusu çökelleri Mezardere, Osmancık, Çakıl ve Danışmen formasyonları adlarıyla Yenimuhacir Grubu adı altında toplamıştır. Bu çalışma için İstanbul il



yanyol yarması ve Büyükada'nın Güney Batı kıyısı formasyonun incelemeye elverişli yüzeylemelerini kapsar [1].

Bu zemin formasyonu için yapılan haritalama çalışmaları sonucunda ise aşağıdaki sonuç (Şekil 2.3) elde edilmiştir.

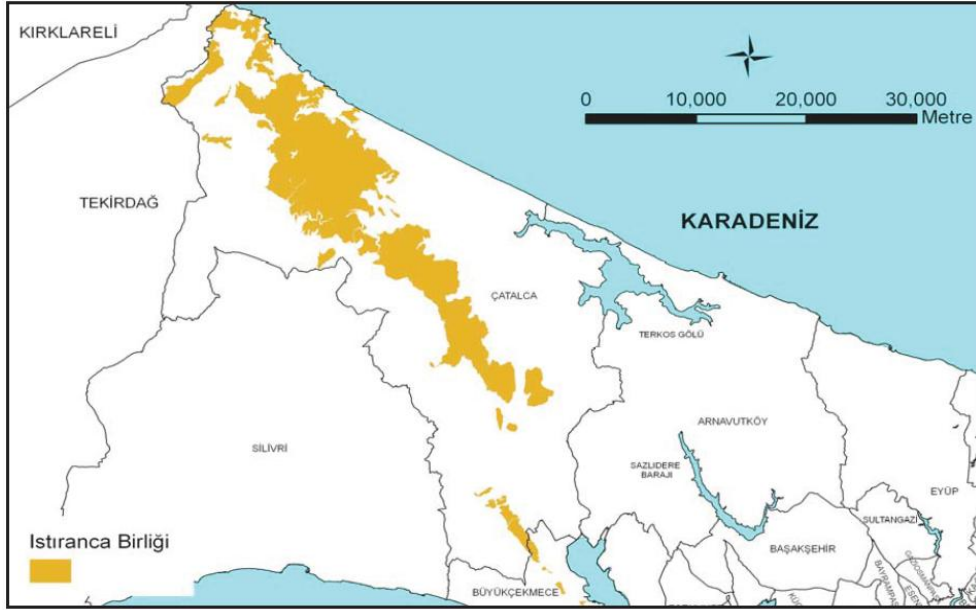


**Şekil 2.3 : Denizli Köyü Formasyonu Yayılımı [2].**

### **2.1.3 Istranca birliği**

Genellikle İstanbul İli'nin Kuzey Batısında yoğunlaşan, Trakya yarımadasının kuzey kesiminde Edirne-Kırklareli-Saray-Çorlu-Çatalca hattı ile Karadeniz kıyısı arasında geniş alan kaplayan metamorfit ve metamagmatitler "Istranca Birliği"ni oluşturur. Birliğin bir bölümü Çatalca ilçesinin batı ve kuzey kesimlerinde İstanbul il alanına girer (Şekil 2.4).

Istranca Birliği metamorfitleri amfibolit ve yüksek yeşil şist metetamorfizması geçirmiş yaşı belirsiz bir temel ve bu temeli uyumsuzlukla üstleyen Triyas-Jurasik yaşlı yeşilşist metamorfizması geçirmiş örtü kayalardan oluştuğu bilinmektedir. Bazı çalışmalarda İğneada dolayında yüzeyleyen metamorfitlerin Orbitolina'lı kireçtaşları tarafından uyumsuzlukla üstlendiğini belirtilir. Eldeki verilere göre Demirköy Sokulumu'nun geniş anlamda Üst Kretase (Senomaniyen-Kampaniyen arası) yaşta olduğu anlaşılmaktadır [1].



**Şekil 2.4 : Istanca Birliği Yayılımı [1].**

#### **2.1.4 Pendik formasyonu (Kartal formasyonu, Kozyatağı üyesi)**

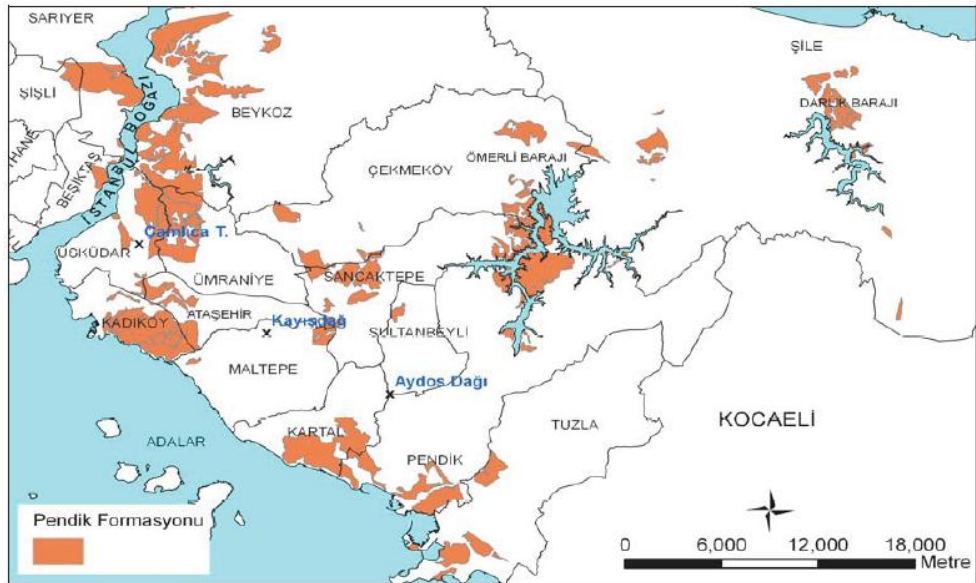
Pendik Formasyonu büyük bölümüyle, mika pullu, kil-mil boyu ince kırıntılı kayalardan oluşur; belirli düzeylerinde özellikle üst kesimlerinde kireçtaşı arakatlıdır. Bol makrofosil kapsamıyla ayırt edilebilen ve bu özelliği ile sahada kolay izlenebilen formasyon, İstanbul'un Anadolu yakasında geniş alanlar kaplamasının yanı sıra Avrupa yakasında da Boğaz kesiminde karşımıza çıkmaktadır (Şekil 2.5) [1].

Formasyon değişik yerli ve yabancı araştırmacılar tarafından Bosporianiche Fazies, Pendik Schichten, Orta Pendik tabakaları, Kanlıca horizonu, Üst Pendik tabakaları, Killi şist ve kalkerler gibi istifi değişik isim ve başlıklar altında incelemiştir. İstifin Gebze-Kartal dolaylarındaki yüzeylemelerini "Marmara Serisi" kapsamında "Kartal Formasyonu", "Kurtdoğmuş Formasyonu" ve "Dede Formasyonu" adlarıyla formasyonlara ayırarak inceleyen çalışmalar da mevcuttur. Bazı araştırmacılar, "Pendik Grubu" adıyla adlandırdığı aynı istifi "Kartal Formasyonu", "Kozyatağı Formasyonu" ve "İçerenköy Şeyili" gibi formasyonlara ayırmıştır. Kartal Formasyonu adını, tüm istifi kapsayacak şekilde kapsamını genişleterek koruyan ve formasyon aşamasında tanımlamış olduğu Pendik, Kozyatağı ve İçerenköy birimlerini Kartal Formasyonu içinde üyeler olarak inceleyen çalışmaların yanında bu formasyonu bütünüyle Kartal Formasyonu olarak isimlendirip benimseyen çalışmalar da ağırlıklı olarak göze çarpmaktadır. Bu adlamalar dikkate alındığında,

“Pendik” adının değişik birimleri içerecek şekilde geniş kapsamlı olarak kullanıldığı, Kartal adının söz konusu istifin önemli bölümünü oluşturan mikalı şeyilleri temsil edecek şekilde kullanıldığı anlaşılmaktadır.

Bazı araştırmacılar, “Pendik” adını, istifin bütününe kapsayacak şekilde formasyon adı olarak, Kartal adını ise formasyonun büyük bölümünü oluşturan bol makrofosilli mikalı kıltaşı-miltaşı-şeyil istifi için üye aşamasında (Kartal Üyesi) kullanmıştır. Formasyonun, kireçtaşının egemen olduğu ara düzeyi üye ve formasyon aşamasında kullanılmış olan Kozyatağı adını ise aynı kapsamda olmak üzere üye adı olarak (Kozyatağı Üyesi) koruyan çalışmalar da mevcuttur.

Bu çalışma kapsamında Pendik, Kartal ve Kozyatağı isimleri benimsenmiştir.



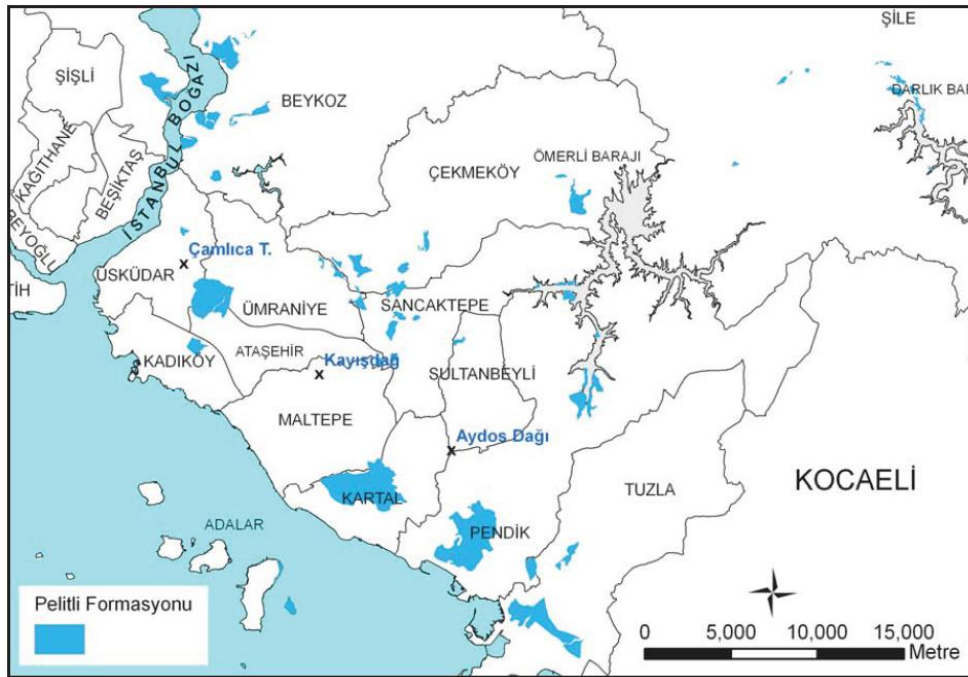
Şekil 2.5 : Pendik (Kartal) Formasyonu Yayılımı [1].

### 2.1.5 Pelitli formasyonu

Pelitli Formasyonu büyük bölümüyle kireçtaşından oluşur; değişik düzeylerinde değişen oranda kil ara katkılıdır. Resif ve sığ deniz kireçtaşlarıyla başlar, üst kesiminde yumrulu kireçtaşlarıyla son bulur. Kartal-Soğanlık Sementi ve Ümraniye-Örnek Mahallesi dolaylarında yüzeylemeleri yaygındır. Formasyonu kalkerli Pendik Fasiyesi (kalkige Pendikfazies), Kartal-Pendik yöresindeki yüzeylemelerini “Kartal-Pendik Halysitesli kireçtaşları” adlarıyla inceleyen çalışmalar mevcuttur (Şekil 2.6). Bazı araştırmacılar istifin, tabanından başlayarak büyük bölümünü kapsayan kesimini Akviran Serisi adıyla tanımlamış; istifin en üst düzeyini oluşturan yumrulu kireçtaşı düzeyini Marmara Serisi’ne ait Soğanlı birimi alt düzeyini ise

Pelitli Formasyonu (Pelitli Schichten) adlarıyla incelemiştir. İstifin alt bölümünü Dolayoba Kireçtaşı, üst bölümünü ise İstinye Formasyonu olarak iki formasyona ayırarak ele alan çalışmaların yanı sıra istifin Dolayoba, Sedefadası, İstinye ve Kaynarca formasyonları olmak üzere dört formasyona ayırarak inceleyen çalışmalar da mevcuttur. Formasyon Yumrukaya Grubu şeklinde de adlandırılmaktadır. Büyük bölümü şelf tipi karbonatlardan oluşan ve çökelmede süreklilik gösteren istifin farklı formasyonlara ayırtlanmasının, adlama kuralları açısından sakıncalı olacağı gibi, sahada izlenebilme ve haritalama sorunları doğuracağı gerekçesiyle, istifin tümünün tek bir formasyon adı altında toplanmasını yeğleyen çalışmalar da vardır [1].

Bu gerekçe ile, birimin değişik düzeylerini kapsayan Gebze ilçesine bağlı Pelitli köyünün adını, bu adın (Pelitli Formasyonu-Pelitli Schichten) kireçtaşı istifinin büyük bölümü için önceden kullanılmış olduğunu da dikkate alarak, formasyon adı olarak kullanan literatür çalışmaları, bu çalışma kapsamında dikkate alınmıştır.

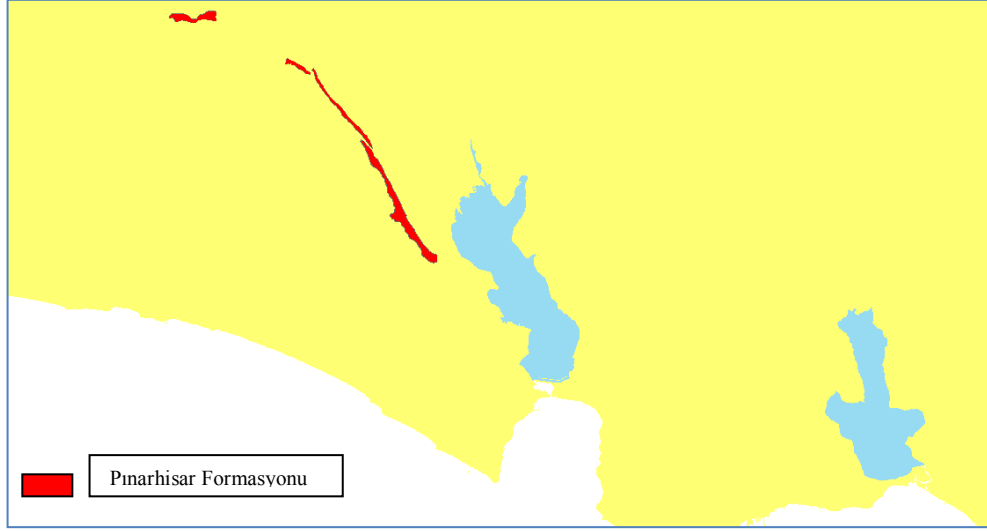


Şekil 2.6 : Pelitli Formasyonu Yayılımı [1].

### 2.1.6 Pınarhisar formasyonu

Pınarhisar Formasyonu başlıca çakıltası (kalsirudit) arakatkılı kireçtaşı, kalkarenit ve çakıllı kumtaşından oluşur [1].

Bu çalışma kapsamında hazırlanan harita (Şekil 2.7) incelendiğinde formasyonun İstanbul İli Büyükçekmece Gölü'nün Kuzey Batı kısmında şerit şeklinde uzandığı görülmektedir.

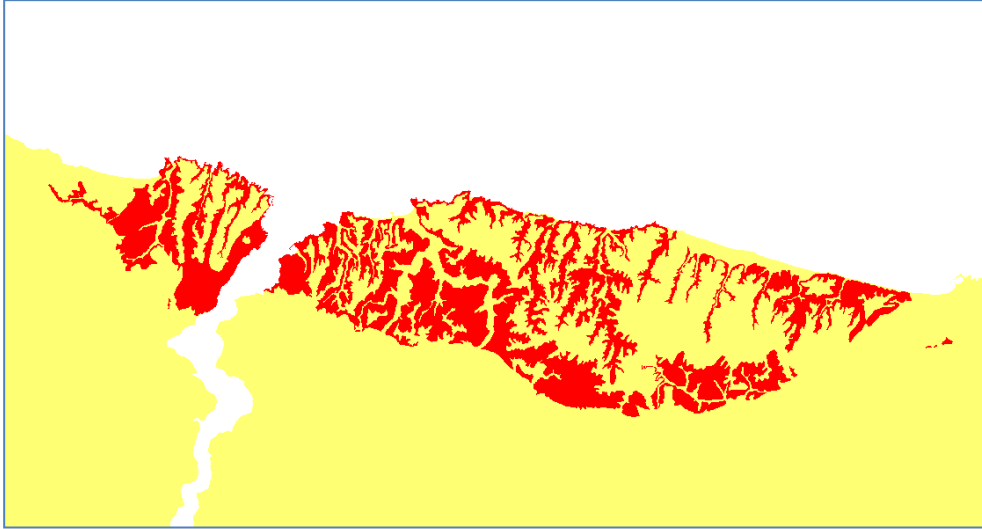


Şekil 2.7 : Pınarhisar Formasyonu Yayılımı [2].

#### 2.1.7 Sarıyer formasyonu

İstanbul Boğazı'nın her iki yakasında, Şile-Karaburun arasında Karadeniz kıyısına kabaca paralel uzanan üst Kretase yaşlı kırıntılı ve volkanik kayaç topluluğu değişik araştırmacılar tarafından Sarıyer Formasyonu, İstanbul Volkanitli Filişi ve İstanbul Volkaniti, Kilyos Volkanitli Flişleri, Sarıyer Grubu, İsaklı Formasyonu ve Riva Formasyon'unu kapsayan Yemişliçay Grubu, Bozhane Formasyonu, Garipçe Formasyonu ve Kısırkaya Formasyonu'nu kapsayan Kavaklar Grubu gibi değişik adlar altında incelenmiştir (Şekil 2.8). Söz konusu kırıntılı ve volkanitlerden oluşan alan üzerinde yer alan Sarıyer ilçesinin adının, istifin tümü için formasyon adı olarak korunması önerilmektedir. İstifin alt düzeyinde kırıntılılar üst düzeyinde ise volkanitler egemendir. Bazı araştırmacılar tarafından, birbiriyle yanal ve düşey geçişli olan ve birbirine ait kaya türlerini arakatkılar halinde kapsayabilen bu iki düzeyin, tek bir formasyona ait üyeler olarak adlandırılması ve bu düşünce ile, Bozhane, Garipçe ve Kısırkaya formasyon adlarının, Sarıyer Formasyonu kapsamında olmak üzere, “Bozhane Üyesi”, “Garipçe Üyesi” ve “Kısırkaya Üyesi” olarak üye derecesine indirgenmesi benimsenmiştir [4].

Bu çalışma kapsamında “Sarıyer” adının kullanılmasını öneren yaklaşım benimsenmiştir.



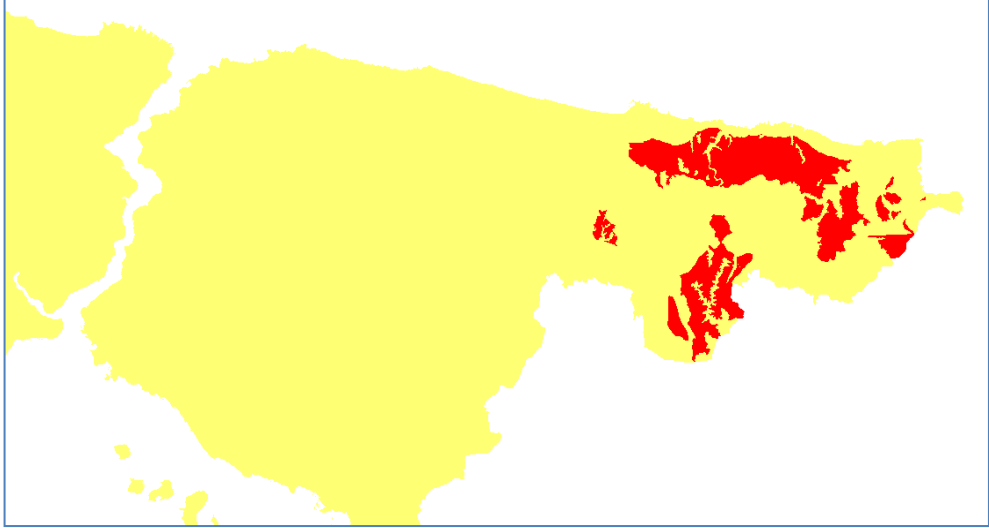
**Şekil 2.8 : Sarıyer Formasyonu Yayılımı [2].**

### **2.1.8 Yemişliçay formasyonu**

Şile İlçesi'nden başlayarak Karadeniz kıyısı boyunca İstanbul İl sınırına kadar doğuya doğru uzanan üst Kretase yaşlı kırıntılı ve volkanitlerden oluşan volkanosedimanter istif, Yemişliçay Formasyonu adı altında incelenmiştir (Şekil 2.9).

Formasyon adı, formasyon yüzeylemesinin incelendiği Ayancık İlçesi batısında yer alan Yemişliçay deresinden alınmıştır. İstanbul il alanının Şile ilçesi dolayını kapsayan küçük bir bölümünde konumlanan Yemişliçay Formasyonu, Sarıyer Formasyonu'na benzer şekilde, genellikle altta kumtaşı-şeyil ardışığı ve üstte volkanitlerin egemen olduğu iki düzeyden oluşur. Sarıyer Formasyonu'nun Bozhane Üyesine karşılık gelen kumtaşı-şeyil ardışık düzeyi taze iken koyu yeşil-koyu külrengi, ayrılmış kahverengi-boz, genellikle, kumtaşı arakatkılı kil-mil boyu ince kırıntılı kayaları kapsar. Başlıca kuvars, mika ve volkanit kırıntılı, kil hamurlu kuvarsvake türü egemendir. Taneler boylanmış ve derecelenmiştir. Seyrek olarak, çakıltaşı, aglomera, tuf ve Sarıyer Formasyonu'nun Garipçe Üyesine karşılık gelen üst düzeyi andezitik lav akıntıları, aglomera, tuf vb. volkanitlerden oluşur. Kumtaşı düzeyleri kuvarsit kahverengimsi gri ve kahverenkli, ince-orta tabakalı volkanojenik kumtaşı ve yeşil- yeşilimsi gri, yer yer kırmızı renkli, ince tabakalı şeyl sıralaması ile aglomera, tuf, andezit gibi volkanik kayalardan oluşur. Yemişliçay Formasyonu ile Sarıyer Formasyonu arasında kayatürü ve stratigrafi özellikleri açısından yakın benzerlikler vardır. Bölgesel bir inceleme sonucu bu iki istifin tek bir formasyon adı altında birleştirilmeleri gerekebileceği hususu önerilmiştir. Şile dolaylarında

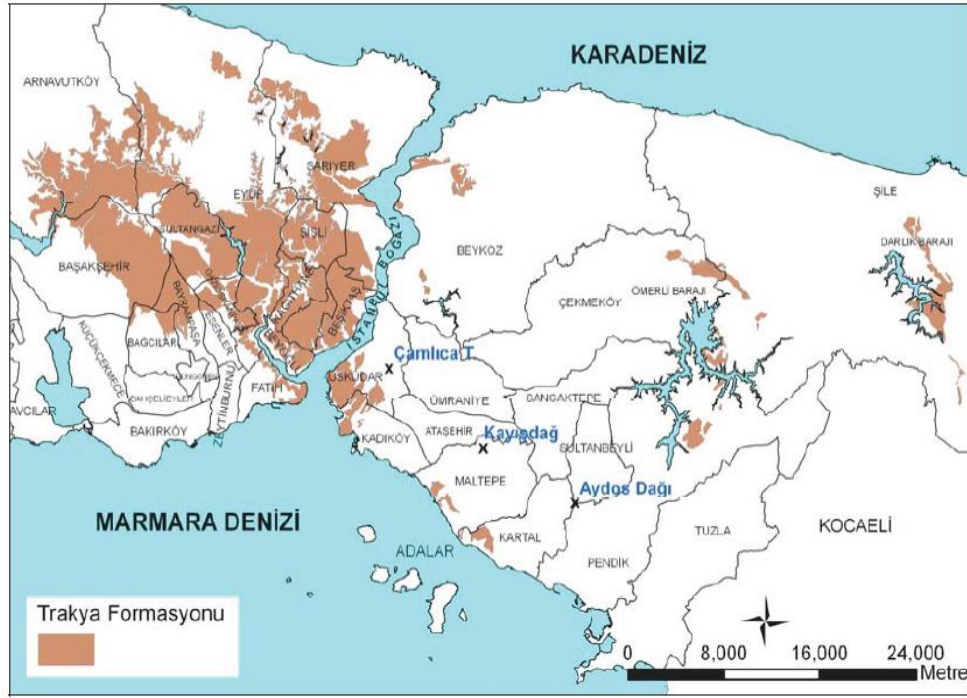
Yemişliçay ve Sarıyer Formasyonları ve bu formasyonlarla dokanak ilişkili bulunan birimler Sarıyer-Şile Fayı ile birbirlerinden ayrılmış bulunmaktadır. Sarıyer Formasyonu, doğrultu atımlı karakteri baskın olan Sarıyer-Şile Fayı'nın kuzey blokunda, Yemişliçay Formasyonu ise bu fayın güney blokunda yer almaktadır. [4]



**Şekil 2.9 : Yemişliçay Formasyonu Yayılımı [2].**

### **2.1.9 Trakya formasyonu**

Ağırlıklı olarak İstanbul İli'nin Avrupa yakasında kendini gösteren formasyon ilgili haritadan da (Şekil 2.10) görülebileceği üzere Anadolu yakasında da yer yer görülmektedir. Başlıca kumtaşı, miltaşı, şeyil, yer yer çakıltası türünden kırıntılı kayaların ardalanmasından oluşur; alt kesimlerinde, değişen kalınlıkta kireçtaşı arakatki ve merceklerini kapsar. İstanbul'un Avrupa yakasında geniş alanlar kaplaması nedeniyle 1900'lü yılların başlarından beri değişik araştırmacılar tarafından Trakya Serisi (Thrazische Serie) adıyla incelenmiştir. Formasyonu Devoniyen yaşta karasal çökeller, Geç Devoniyen yaşta denizel çökeller olarak yorumlayan araştırmacılar ilk kez favna ve flora kapsamına dayanarak istifin alt düzeylerinin Vizeyen yaşta olduğunu belirtmişlerdir. Bazı araştırmalar, istifi Alt Karbonifer yaşta "Ober Thrazische Serie" adıyla incelemiş bazıları da yaklaşık 2000 m kalınlıkta olduğu varsayılan kırıntılı istifi "Trakya Formasyonu" olarak adlandırmıştır [1].

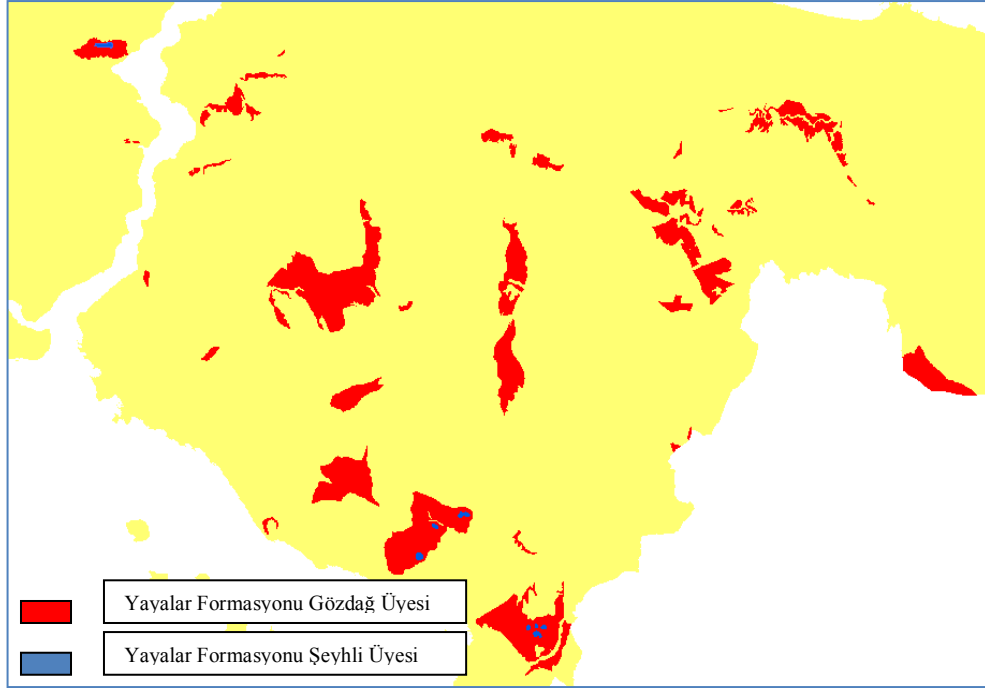


Şekil 2.10 : Trakya Formasyonu Yayılımı [1].

### 2.1.10 Yayalar formasyonu

Büyük bölümüyle mikalı kumtaşlarından oluşan formasyon, inceleme alanının çeşitli kesimlerinde büyüklü küçüklü yüzeylemeler vermektedir. Önceki araştırmacılar tarafından değişik adlar altında tanımlanmıştır. Bazı araştırmacılar tarafından “Halysites-Grauwacken Horizont” adıyla incelenen birim, bazıları tarafından ise kaya-stratigrafi adlama kuralları için gerekli bazı bilgiler de verilerek, “Yayalar Formasyonu (Yayalar-Schichten)” adıyla incelenmiş ve kendi içinde Umur Deresi Üyesi, Şeyhli Üyesi ve Kayalı dere (Kanlı dere) Üyesi olmak üzere üç alt birime ayırmıştır. Daha sonra yapılan bazı çalışmalar istifi “Büyükdere Şeyl Birimi, Gözdağ Litarenit Birimi ve Şeyhli Subarkoz Birimi” olmak üzere üç birim adı altında incelemiştir (Şekil 2.11). Araştırmacıların bir kısmı istifi “Gözdağ Formasyonu ve Aydınli Formasyonu” olmak üzere iki formasyona ayırmıştır. Türkiye Stratigrafi Komitesi Gözdağ Formasyonu adını benimsemiştir. Birbirleriyle yanal ve düşey girik olan ve egemen tane boyu, tane türü, hamur ve çimento oranları açısından birbirlerinden ayırtlanabilen söz konusu birimlerin tümünü tek bir formasyon adı altında inceleyen bazı araştırmacılar istifin tümü için “Yayalar Formasyonu” adını kullanmıştır [1].

Bu çalışma kapsamında formasyon “Yayalar Formasyonu” olarak ele alınmış, “Gözdağ Üyesi” ve “Şeyli Üyesi” olarak iki alt birimde yorumlanmıştır.



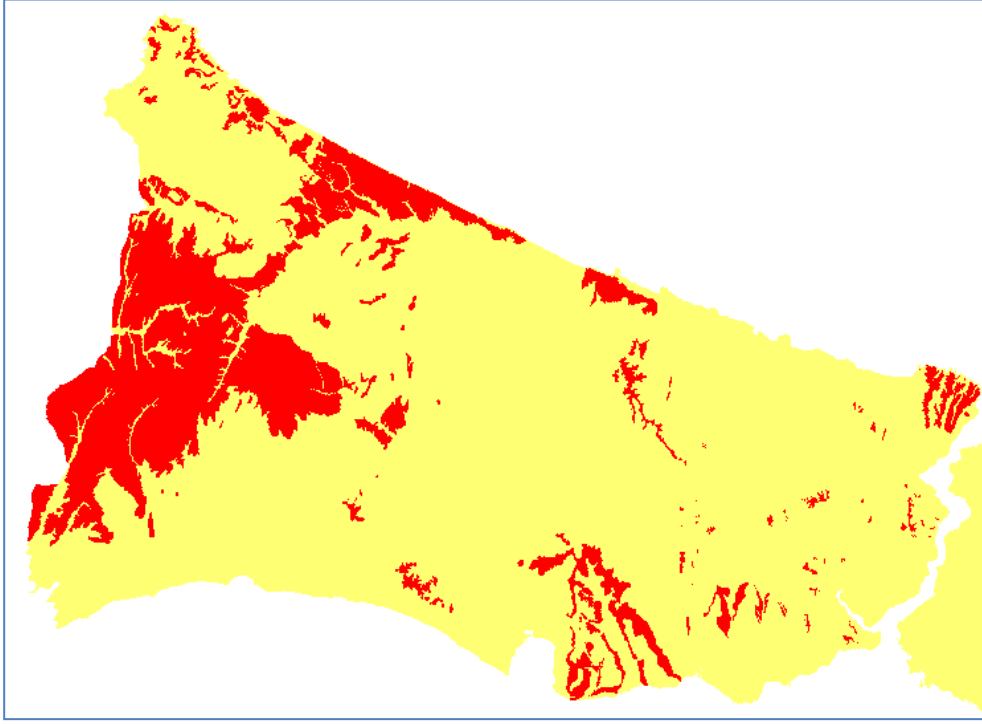
**Şekil 2.11 : Yayalar Formasyonu Yayılımı [2].**

#### **2.1.11 Çukurçeşme formasyonu**

İstanbul'un Avrupa yakasında yayılmış olarak görülen Çukurçeşme Formasyonu daha ziyade yakanın Batı kesiminde yoğundur.

Çukurçeşme Formasyonu Miyosen devrinde çökelmiştir. Çukurçeşme Formasyonu çoğunlukla çakıl ya da kum, kısmen kil ile çakıl ya da çakıltaşından oluşmuştur. Çakıl muhteviyatı kuzeybatı alanında yüksek iken, kum muhteviyatı güneydoğu alanında daha fazladır [3].

Çukurçeşme formasyonu bazı kaynaklarda İstanbul Formasyonu'nun Avrupa yakası bölümü olarak da adlandırılmaktadır. Ayrıca bu formasyon Çekmece Formasyonunun alt üyelerinden (Çukurçeşme, Güngören, Bakırköy) biri olarak da sınıflandırılmıştır (Şekil 2.12) [1].



**Şekil 2.12 : Çukurçeşme Formasyonu Yayılımı [2].**

#### **2.1.12 Akveren formasyonu**

İstanbul il alanının Anadolu yakasında özellikle Şile ilçesi sınırları içinde bulunan formasyon büyük bölümüyle algli, bentonik foraminiferli kireçtaşı ve kalkarenitten oluşur; alt düzeylerinde değişen oranda killi kireçtaşı, marn ve kiltası arakatlıdır. Batı Karadeniz bölgesinde, Gebze-Şile hattı ile doğuda Ayancık ilçesi dolayları arasında geniş alan kaplar. Akveren adı istifin Sinop dolayındaki yüzeylemeleri için kullanılmıştır. Formasyonun Kocaeli yarımadasındaki yüzeylemeleri Ahmediköy Kalkerleri, Şemsettin Kireçtaşı, Yunusludere Formasyonu, Ahmetli Kireçtaşı ve Akveren Formasyonu gibi değişik ad ve başlıklar altında incelenmiştir [1]. Bu araştırma kapsamında formasyon “Akveren Formasyonu” olarak isimlendirilerek ele alınmıştır (Şekil 2.13).

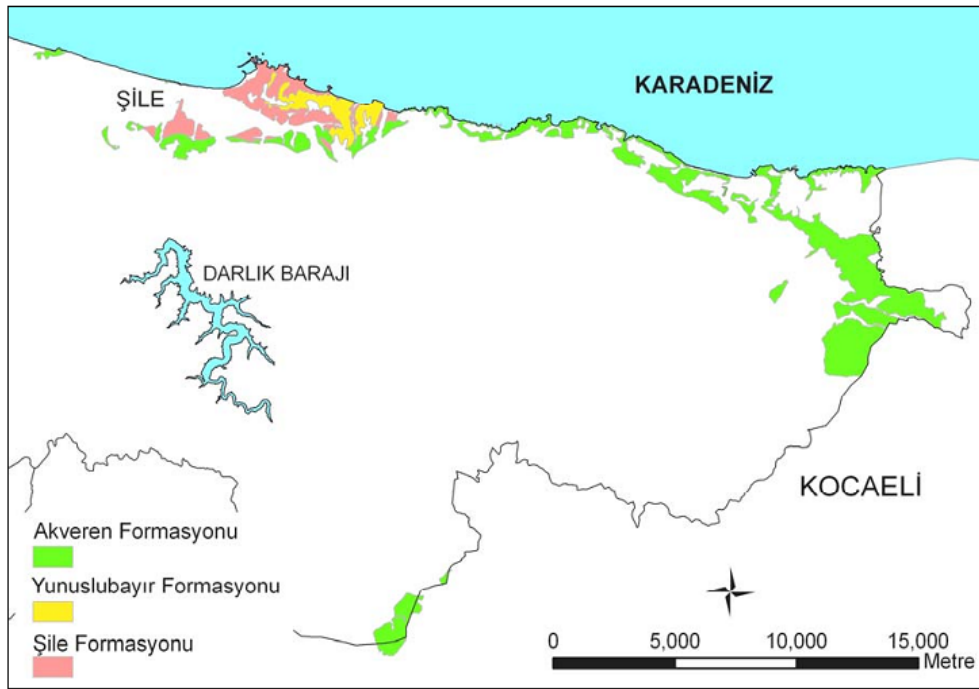
#### **2.1.13 Şile formasyonu**

Şile ilçe merkezi ve yakın dolayında yüzeyleyen çeşitli boyda olistolit, olistostrom ve moloz akıntısı (debris flow) içeren kiltası-miltası-kumtaşı birimi bazı araştırmacılar tarafından “Şile Sedimanter Karışığı (Şile Olistostromu)” adıyla incelenmiştir. İstifin hamuru konumunda bulunan kiltası-miltası-kumtaşı düzeyini “Atbaşı formasyonu”, olistostromal düzeylerini ise “Şile Üyesi” adıyla Atbaşı formasyonunun üyesi olarak

inceleyen çalışmalar mevcuttur. Bazı çalışmalarda kullanılmış olan “şile” adı, istifin bütününe kapsayacak şekilde, literatürde, formasyon adı olarak kullanılmış ve formasyon; istifin kil, mil, kum boyu kırıntılı kayalardan oluşan düzeyi “İmam Tepesi Üyesi”, moloz akıntısı (debris flow), olistolit ve olistostromal oluşukları içeren düzeyleri ise “Ağlayankaya Üyesi” olmak üzere, iki üyeye ayrılmıştır (şekil 2.13) [1]. Bu araştırma kapsamında ise formasyon “şile Formasyonu” ve “İmam Tepesi” üyesi olarak ele alınmıştır.

#### 2.1.14 Yunuslubayır formasyonu

Yunuslubayır Formasyonu başlıca, sarımsı boz renkli, bol Nummulit’li kumtaşı, kumlu-killi kireçtaşı ve çakıltaşından oluşur. Formasyonun inceleme alanındaki yüzeylemeleri, şile’nin 5 km doğusunda yüzeylemelerinden birini kapsayan Yunuslubayır sırtının adıyla incelenmiştir (şekil 2.13).

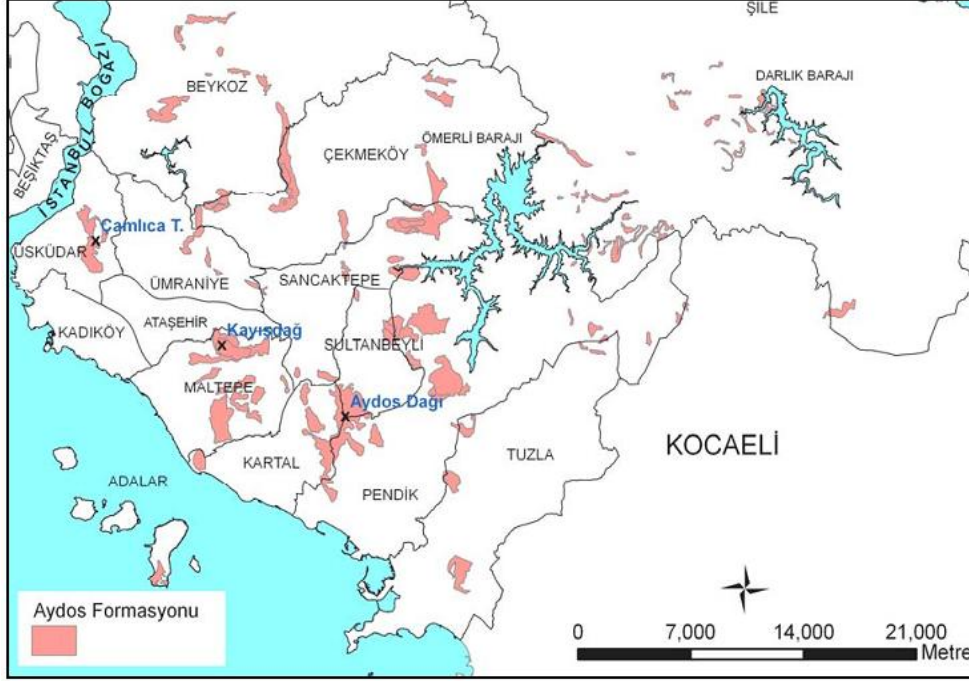


şekil 2.13 : Akveren, Yunuslubayır, şile Formasyon Yayılımları [1].

#### 2.1.15 Aydos formasyonu

Anadolu yakasının güneyinde yayılı bir şekilde konumlanan formasyon büyük oranda kuvarsitlerden (kuvarsarenit) oluşur. İstanbul’un başlıca yüksek dağ ve tepelerini oluşturan kuvarsitler farklı zamanlarda çeşitli araştırıcılar tarafından değişik adlar altında incelenmiş ve yorumlanmıştır (şekil 2.14). Söz konusu kuvarsitler, Silüriyen sonu yaşta “Kuvarsit Serisi (Quarzit-Serie)” kapsamında “Ana

Kuvarsit Düzeyi (Hauptquarzit Horizont)”, “Ayazma Tabakaları (Ayazma-Schichten)”, “Ortokuvarsit Formasyonu”, “Aydos Kuvarsarenit Birimi”, “Aydos Formasyonu” adlarıyla tanımlamıştır [1]. Türkiye Stratigrafi Komitesi tarafından Aydos Formasyonu adıyla benimsenen formasyon bu incelemede de aynı adla ele alınmıştır.

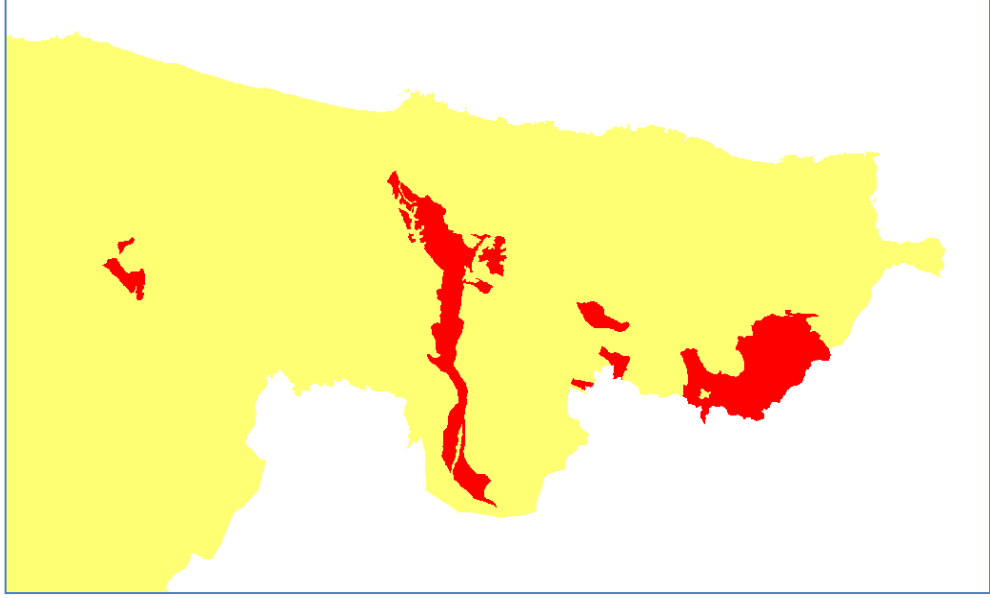


Şekil 2.14 : Aydos Formasyonu Yayılımı [1].

### 2.1.16 Kapaklı formasyonu

İstanbul’un Anadolu yakasının doğu kesiminde Paleozoyik temel kayaları üstleyen volkanit aradüzeyle, şarabi-kızıl renkli karasal çakıltası-kumtaşı istifi önceki araştırmalarda “Taban Konglomerası”, “Kapaklı Formasyonu”, “Ballıkaya Konglomerası” gibi değişik adlar altında incelenmiştir. Bazı araştırmacılar sözkonusu karasal istifi volkanit kapsamını göz önünde tutarak iki formasyona ayırmış; volkanitlerin az yer kapladığı istifi “Kapaklı Formasyonu”, Kurucadağ yöresinde volkanitlerin egemen olduğu istifi ise “Dümbüldek Formasyonu” adlarıyla incelemiştir. Kocaeli Triyas istifi içinde renge dayalı bir ayırımla, kızıl-bordo rengini Kapaklı Formasyonu’na özgü bir özellik olarak varsayan, üstteki sarı kumtaşı ve kireçtaşlarını Kapaklı Formasyonu’ndan ayıran çalışmalara da literatürde rastlanmaktadır. Volkanitli karasal kırıntılı istifin tümünü, volkanit ara katkılarını da kapsayacak şekilde, Kapaklı Formasyonu adı altında inceleyen çalışmalar da mevcuttur. Kapaklı Formasyonu Kocaeli ilinin batı kesiminde geniş alanlar kaplar.

Bu formasyonun İstanbul'un doğu kesiminde Kocaeli iline komşu bölgelerinde Şile güneyinde Karamandere, Ovacık ve Teke köyleri arasında, İstanbul-Ankara E5 (D100) ve TEM otoyolunun Gebze doğusunda Tavşancıl dolayından geçen kesiminin yol yarmalarında temiz kesitleri açığa çıkmaktadır (Şekil 2.15) [1].



**Şekil 2.15 : Kapaklı Formasyonu Yayılımı [2].**

#### **2.1.17 Gebze grubu ballıkaya formasyonu**

Formasyon kireçtaşı, dolomitik kireçtaşı ve dolomitleri kapsayan kalın karbonat istifinden oluşur. Kocaeli il alanı içinde Gebze ilçesi dolayında ve Gebze-İzmit arasında yaygın yüzeylemeleri bulunan ve çoğu taş ocağı olarak işletilen bu karbonat istifini “Külrengi renkli kalkerler”, “Hereke formasyonu’nun kapsamında, “Dolomitik kalkerler”, “Külrengi renkli kireçtaşları ve dolomitler”, “Demirciler Formasyonu” ile birlikte “Köseler kireçtaşı” adlarıyla inceleyen birçok çalışma yapılmıştır. Daha çok kaya türlerini yansıtan bu adlamalarda coğrafya bileşeni kullanılmamıştır. Literatürde formasyonun temiz yüzeylemelerini kapsayan Ballıkaya deresinin adıyla “Ballıkaya Formasyonu” olarak adlandırılan çalışmalar yapılmıştır [1]. Tepecik köyünün yakın kuzeyinde ve Şile doğusunda Teke köyü dolaylarında yüzeylemeleri bulunur. İnceleme alanının doğu ve güneydoğu kesiminde Teke, Hacılı ve Göksu köyleri dolaylarında yer yer yüzeyleyen formasyon Yazımanayır, Osmanköy, Sortullu, Hacılı, Göksu, Çataklı, Übeyli köyleri dolaylarında geniş alanlar kaplayan formasyon (Şekil 2.16) bu çalışma içinde Gebze Grubu Ballıkaya Formasyonu olarak incelenmiştir.

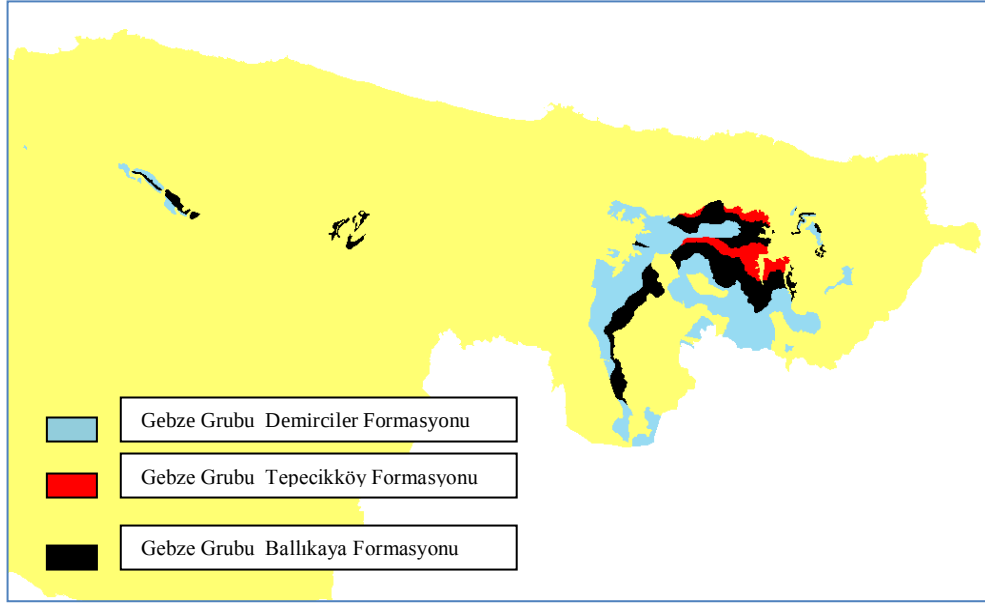
### **2.1.18 Gebze grubu demirciler formasyonu**

Demirciler Formasyonu başlıca kumtaşı, şeyl, arakatkılı kireçtaşı ve killi kireçtaşının değişen oranda ardalanmasından oluşur. Birim çeşitli araştırmacılar tarafından tek başına ya da Kapaklı Formasyonu kapsamı içinde, “Kırmızı renkli gremsi marnlı kalker”, “Naticella’lı külrengi-sarı renkli marnlı plaket kalkerler”, “Değirmendere Formasyonu”nun alt bölümü, “Alacalı kumtaşı- plaketler halinde killi kireçtaşı ve dolomitler”, “Alacalı (Variegated) Kumtaşı ve Marn”, “Köseler Formasyonu”nun alt bölümü, Erikli Formasyonu + Demirciler Formasyonu” gibi değişik ad ve başlıklar altında incelenmiştir [1]. Bu çalışma kapsamında Gebze Grubunun altında literatürde de sık kullanılan Demirciler Formasyonu adı kullanılmıştır.

### **2.1.19 Gebze grubu tepecikköy formasyonu**

Ballıkaya Formasyonu’nun üzerinde yer alan, yumrulu kireçtaşı, şeyil, killi kireçtaşı, kireçli kiltası ardalanmasından oluşan istif, çeşitli araştırmacılar tarafından, değişik ad ve başlıklar altında incelenmiştir. Bunlardan biri olan “Tepecik Formasyonu” adı, istifin temiz yüzeylemelerinden birinin yer aldığı Gebze ilçesine bağlı Tepecik köyünden alınmıştır. Formasyon, “Aralarında marnlar bulunan plaket kalkerleri”, “Plaket kalkerleri” ve “Yumrulu kireçtaşı” istifleri şeklinde de incelemeye alınmıştır. İstifin yumrulu kireçtaşı düzeyini “Kazmalı Formasyonu”, istifin alt düzeyini “Übeyli Formasyonu” üst düzeyini ise “Tepeköy Formasyonu” adlarıyla inceleyen çalışmalar da mevcuttur [1].

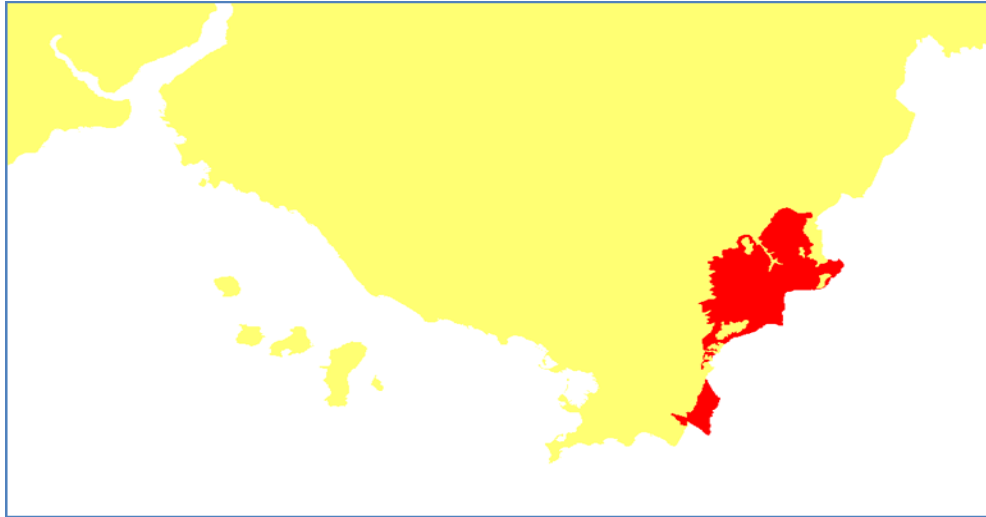
Aşağıda harita çalışması yapılan (Şekil 2.16) formasyon için bu çalışmada Tepecikköy Formasyonu adının kullanılması tercih edilmiştir.



**Şekil 2.16 :** Gebze Grubu Formasyon Yayılımı [2].

#### 2.1.20 Sancaktepe graniti

İstanbul İli Anadolu yakasının doğusunda Akfırat, Tepeören, Şekerpınar ve Çayırova köyleri arasında yaklaşık 100 km<sup>2</sup> genişliğinde bir alanı kaplayan granitler, araştırmacılar tarafından “Sancaktepe Graniti” adıyla ele alınmıştır (Şekil 2.17) [1]. Literatürde bu adla anılması tercih edilen söz konusu formasyon adı için bu çalışma kapsamında da aynı ad kullanılmıştır.



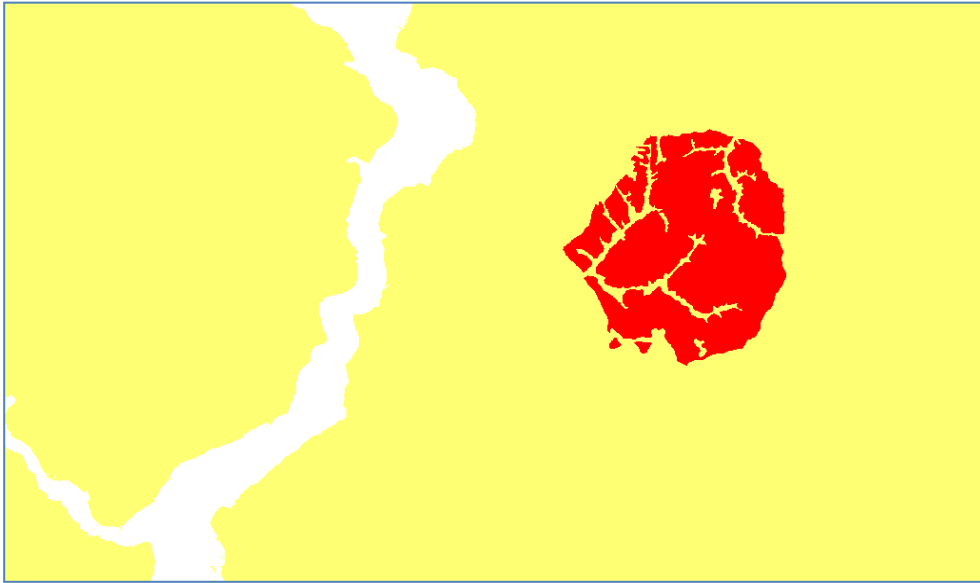
**Şekil 2.17 :** Sancaktepe Graniti Yayılımı [2].

### 2.1.21 Çavuşbaşı granodiyoriti

Polenezköy'ün güneybatısında Çavuşbaşı Beldesi ile Çekmeköy arasında yüzeyleyen ve yaklaşık 25 km<sup>2</sup> genişliğinde bir alanı kaplayan asidik intrüzifler, çeşitli araştırmacılar tarafından, “Çavuşbaşı granitleri”, “Çavuşbaşı Granodiyoriti”, “Çavuşbaşı plütoniti”, “Çavuşbaşı Çiftliği granodiyorit-kuvarsdiyorit plütonu” gibi değişik adlar altında incelenmiştir.

Başlıca plajiyoklaz, K-feldispat, hornblend, kuvars, biyotit ve ikincil derecede apatit, zirkon, epidot, titanit, ve opak mineral kapsayan istif kuvarşlı diyorit ve granodiyorit türünden derinliktaşı özelliği taşır. Sancaktepe Graniti'nde olduğu gibi ileri derecede ayrışma gösterir ve yüzeye yakın kesimlerinde genellikle arenaya dönüşmüştür. Çavuşbaşı Granodiyoriti Çavuşbaşı dolayındaki yüzeylemelerinde Kurtköy Formasyonu'nun arkozları içine yerleşmiştir; dokanak boyunca belirgin olarak kontak metamorfizma zonu gelişmiştir.[1]

Şekil 2.18'de yayılımı görülebilen formasyon için bu çalışma kapsamında Çavuşbaşı Granodiyoriti adı kullanılmıştır.



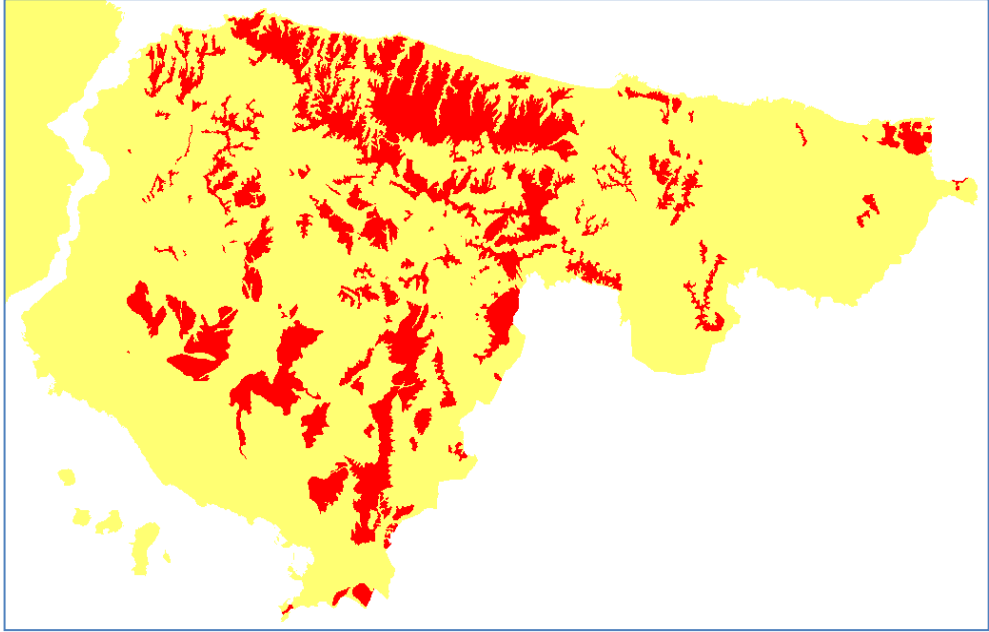
Şekil 2.18 : Çavuşbaşı Granodiyoriti Yayılımı [2].

### 2.1.22 Ömerli formasyonu

İstanbul'un Anadolu yakasında Ömerli Beldesi ve Ömerli Barajını çevreleyen geniş bir alana yayılan kil, kum ve çakıl birikintileri, Ömerli Formasyonu adıyla

incelenmiştir. Ömerli Formasyonu Anadolu yakasında geniş bir alana yayılı olarak konumlanmıştır (Şekil 2.19).

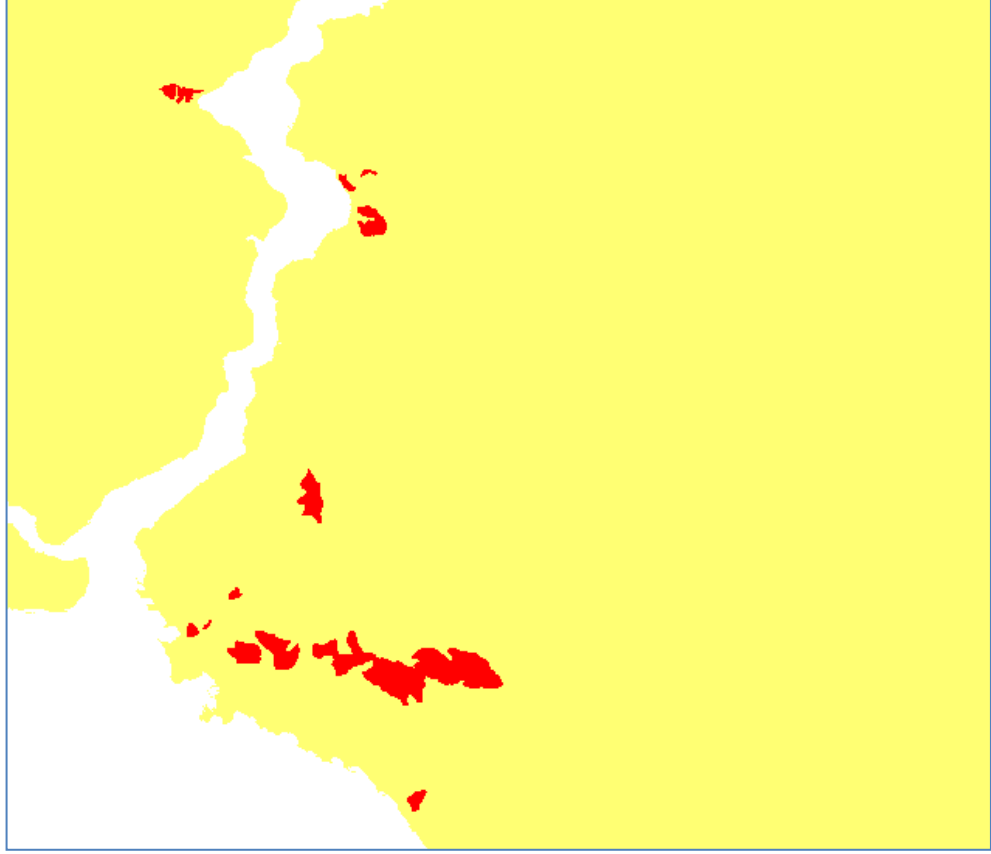
Birbirleriyle yanal ve düşey giriklik gösteren çakıl-kum-mil-kil boyu tutturulmamış birikintilerinden oluşan istifin, egemen gereç boyuna dayalı olarak birden çok formasyona ayırtlanması, adlama kuralları açısından sakıncalı olacağı gerekçesiyle, istifin bütününün tek bir formasyon adı altında incelenmesi yeğlenmiştir ve bölgenin geniş kitlelerce bilinen ve söz konusu kırıntılıları yaygın olarak kapsayan, Ömerli ilçesi adının istifin tümünü içeren formasyon aşamasında kullanılması önerilmiştir. Meşe tepesi ve Kayalı tepe adları ise, bazı araştırmacılar tarafından, Ömerli Formasyonu'na ait Meşe tepesi Üyesi ve Kayalı tepe Üyesi olarak üye derecesinde kullanılmıştır. Ömerli Formasyonu, boyutları ve biçimleri yerden yere değişen kil, kum, çakıl birikintilerinden oluşur. Formasyon genellikle iri çakıl-kaba kum birikintileriyle başlar, daha üstte yanal ve düşey giriklik gösteren mil-kil boyu ince gereçli birikintilere geçer; en üstte kızılımsı sarı, seyrek çakıllı, çakılcıklı kum-mil boyu ince taneli birikintiler yer alır. Formasyonu “Meşe tepesi Üyesi”, “Kayalı tepe Üyesi” ve “Sultanbeyli Üyesi ” olmak üzere 3 üyeye ayırıp inceleyen çalışmalar da mevcuttur [4]. Ancak bu çalışma kapsamında söz konusu zemin formasyonu tek bir başlık altında, Ömerli Formasyonu adıyla ele alınmıştır.



**Şekil 2.19 : Ömerli Formasyonu Yayılımı [2].**

### 2.1.23 Altıntepe formasyonu

İstanbul'un özellikle Anadolu yakasında ve özellikle Bostancı-Küçükalyalı-Maltepe arasında Paleozoyik yaşta kaya birimlerinin oluşturduğu kabaca Kuzey-Güney uzanımlı sırtların üzerinde, ince örtüler halinde korunmuş çakıl-kaba kum birikintileri, bazı uzmanlar tarafından Altıntepe Formasyonu adıyla incelenmiştir. Formasyon, Küçükalyalı yöresinde, E5 (D100) karayolunun Altıntepe sırtını kestiği yol yarmasında yolun her iki şevinin üst kotlarında izlenebilmektedir. Ayrıca, Altıntepe sırtı ve bu sırtın doğusunda Kuzey-Güney doğrultuda uzanan sırtların üst kotlarında, Kartal ve Cevizli semtlerinde yer yer açılan ve geçici süre açıkta kalan temel çukurlarında da formasyon açığa çıkmaktadır. Altıntepe Formasyonu sarımsı kahverengi-kızılımsı-boz, başlıca kuvars, kuvarsit ve arkoz türü çakıl- kaba kum boyu sıkılaşmamış zeminden oluşur; sarımsı kil-mil mercek ve düzeylerini kapsar. Boyutları yer yer 20-50 cm'yi bulan kuvarsit bloklarını kapsar. Çakıllar köşeli-yarı köşeli, kötü boylanmalıdır. Çoğunluğu Aydos Formasyonu'na ait kuvarsitlerin oluşturduğu az yuvarlanmış ve kötü boylanmış çakıl ve blokların egemen olduğu gevşek birikintilerden oluşan Altıntepe Formasyonunun, olasılıkla Pliyo-kuvaterner'de Aydos kuvarsitlerinin oluşturduğu yüksek alanlardan hızlı aşınma, taşınma ve yamaç eteklerinde yığılma sonucu gelişmiş olduğu tahmin edilmektedir (Şekil 2.20) [4]. Elde edilen ilgili formasyon haritası incelendiğinde formasyonun Boğaz'ın Avrupa yakasında Sarıyer kıyılarında da bir miktar görülebileceği anlaşılmaktadır.



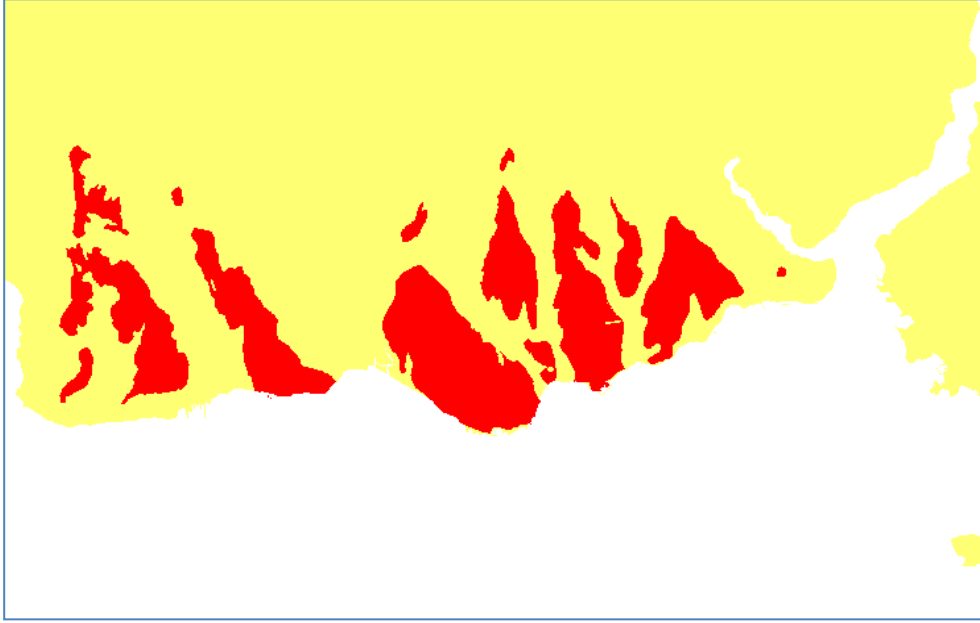
**Şekil 2.20 : Altıntepe Formasyonu Yayılımı [2].**

#### **2.1.24 Çekmece formasyonu, Bakırköy üyesi**

Çekmece Formasyonu'nun üst düzeyini oluşturan Bakırköy Üyesi, büyük bölümüyle kireçtaşıdan oluşur, değişen oranda kil ve marn arakatlıdır. Bolca Mactra kapsamından dolayı önceleri “Mactra’lı kalkerler”, sonraları “Bakırköy Formasyonu”, “Bakırköy Kireçtaşı” ve “Bakırköy Üyesi” adlarıyla incelenmiştir [4]. Bakırköy Üyesi, Şekil 2.21’den de görülebileceği üzere, Haliç’ten batıya doğru Marmara kıyısı boyunca, Yeşilköy-Yeşilyurt dolaylarında, Avcılar-Firuzköy, Kavaklı ve Küçükçekmece yerleşim alanlarının yer aldığı sırtların üst kotlarındaki yatay düzlüklerde konumlanmıştır.

Kireçtaşı kirlili beyaz-krem rengi, ince-orta-kalın katmanlı, boşluklu-gözenekli, genellikle algli, onkoidlidir; kil-killi kireçtaşı-marn ara düzeylerini kapsar. Kil-kireç oranı çok değişkendir; alt düzeylerde kil üst düzeylerde kireç kapsamı artar. Bolca mactra cinsi lamellibrans kapsamı ayırt edici özelliklerindendir. Güngören Üyesi’ni yanal ve düşey geçişli olarak üstler; yüzeylemeleri genellikle güncel

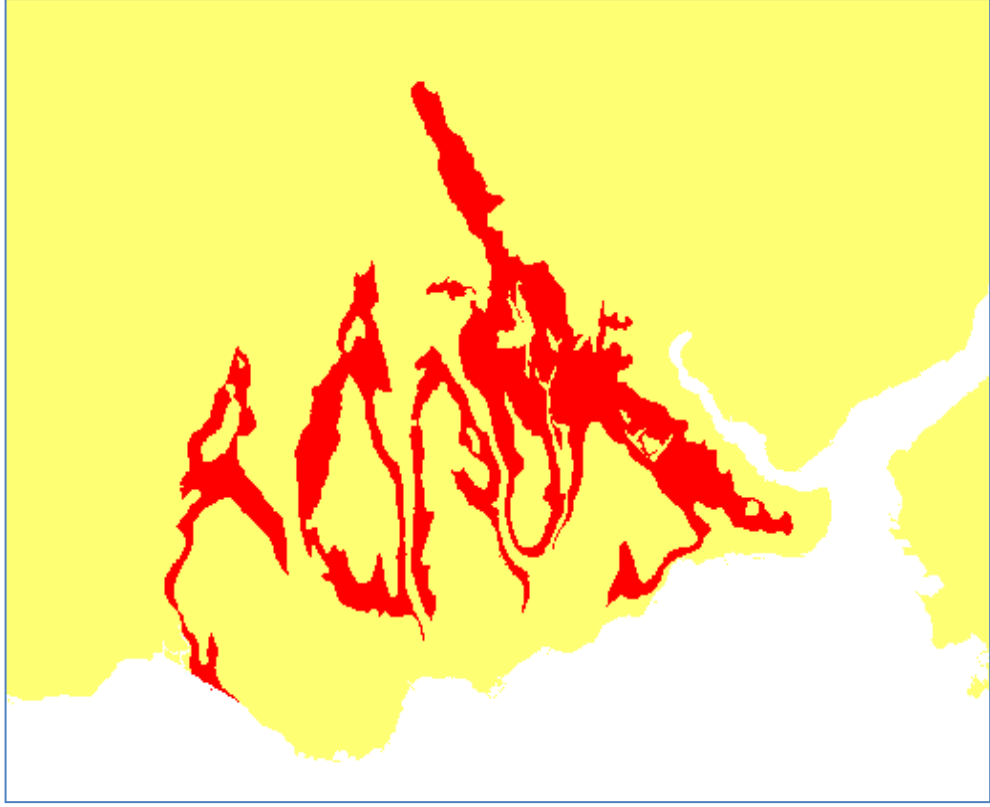
aşınmaya açık olduğundan birim kalınlığı tam olarak bilinmemektedir; görünür kalınlığı 30- 40 m dolayındadır [4].



**Şekil 2.21 : Bakırköy Üyesi Formasyon Yayılımı [2].**

#### **2.1.25 Çekmece formasyonu, Güngören üyesi**

Başlıca kum-mil ara katkılı killerden oluşur; üst düzeylerinde makrofosil kavkılı ince, kireçtaşı ara katmanlıdır. İstif Güngören Formasyonu ya da Çekmece Formasyonu'nun Güngören Üyesi adlarıyla incelenmiştir. Güngören Üyesi bol mikalı, çapraz katmanlı kum-kil ardışığıyla başlar, daha üstte istifin egemen kaya türünü oluşturan bitki kırıntılı yeşil killer yer alır. Killer seyrek olarak, orta boylanmış, çapraz katmanlı gevşek ince kum ara düzey ve merceklerini içerir. Üye, özellikle üst kesimlerinde, makrofosil kavkılı Bakırköy Üyesi'nin kireçtaşlarına benzer özellikte, 5-30 cm kalınlıkta kireçtaşı, killi kireçtaşı, kireçli kilitaşı ara katkılıdır. Üye adının alındığı Güngören semti dolayında, yoğun kentleşme yüzünden, birimin incelemeye elverişli yüzeylemeleri görülememektedir. Küçükçekmece gölünün doğu yakasında, Avcılar ve Firuzköy'ün yer aldığı sırtın Küçükçekmece gölüne bakan doğu yamacındaki kimi ocak ve yarmalarda, birimin temiz kesitleri açığa çıkmaktadır. Güngören Üyesi, Yedikule civarındaki yüzeylemelerinde 120-140 m dolayında kalınlık göstermektedir [4]. Tez çalışması kapsamında elde edilen aşağıdaki harita (Şekil 2.22) formasyonun yayılımıyla ilgili gerekli bilgiyi vermektedir.



**Şekil 2.22 :** Güngören Üyesi Formasyon Yayılımı [2].

#### **2.1.26 Kırklareli grubu, ceylan formasyonu**

Çatalca kuzeyinde ve Sazlıdere dolaylarında yaygın olan marn-kiltaşı ağırlıklı istif, Ceylan Formasyonu’nu oluşturur. Trakya havzasında yapılan ve istifi kesen petrol ve doğal gaz amaçlı sondajlardan sağlanan yeraltı bilgilerine göre yapılan adlamada, istif için, Ceylan Şeyli ve Ceylan Formasyonu adları kullanılmıştır. Bazı çalışmalar kapsamında formasyon, Pınarhisar Formasyonu’nun “İhsaniye Üyesi” ve İhsaniye Formasyonu adlarıyla incelenmiştir. İnceleme alanında, Bahçeşehir’in doğusundan geçen ve bölgeyi Kuzeybatı-Güneydoğu doğrultusunda kesen Kartal Deresi vadisi boyunca, Sazlıdere Barajının kuzey yakasında ve Çatalca’nın doğusunda geniş alanları kaplar. Ceylan Formasyonu başlıca değişen oranda marn-killi kireçtaşı-kireçli kiltası ardalanmasından oluşur; kumtaşı ve kireçtaşı arakatlıdır, alt düzeylerinde tuf ara düzeylerini kapsar. Formasyonun egemen kaya türünü oluşturan marn ve kiltası taze iken mavimsi-külrengi, ayrıışmış sarımsı boz-krem rengi, orta ve düzgün katmanlı, dış bükey ya da iç bükey kırılma yüzeylidir. Bentonik foraminiferli mikrit ve biyomikrit türü kireçtaşı, killi kireçtaşı, seyrek olarak biyoklastik kireçtaşı-kalkarenit ara düzeylerini kapsar [4]. Şekil 2.23’ten de görülebileceği üzere Avrupa

yakasının göbeğine konumlanan formasyon Kırklareli Grubunun bir üyesi olarak ele alınmaktadır.

#### **2.1.27 Kırklareli grubu, koyunbaba formasyonu**

Trakya bölgesinin, Istranca ve Çatalca metamorfitlerini güneyden sınırlayan ve Kuzey Ergene Havzası olarak da bilinen kuzey kesiminde Tersiyer yaşlı çökellerin transgressif taban birimini oluşturan kırıntılılar, başlangıçta Koyunbaba Üyesi adıyla incelenmiş ve kesit ölçümü yapılmıştır. Bazı çalışmalarda istif, İslambeyli Formasyonu adıyla da incelemiştir. Yine bölgede çalışan MTA jeologları tarafından, aynı birim için İslambeyli Formasyonu adı kullanılmıştır. Literatürde bir çok araştırmacı, gerek Trakya havzasının çeşitli kesimlerindeki yüzeylemelerinde, gerekse sondajlardan edinilen yeraltı bilgileri ışığında ayrıntılı olarak incelemiş bulunan söz konusu birimin, yerli ve yabancı petrol jeologları arasında da yaygın olarak kullanılan “Koyunbaba Formasyonu” adının kullanılmasını önerir. Çatalca’nın kuzeybatısında yer alan İnceğiz köyünün 3-3,5 km batısında Teferiç tepesinin doğu yamacı, birimin bu yöredeki en iyi görüldüğü yerdir. Kırklareli Grubu’nun bir üyesi olarak ele alınan formasyon tez çalışması kapsamında da “Koyunbaba Formasyonu” adıyla anılacaktır. Formasyon Kırklareli Grubu içinde az bir bölgeyi kapsamaktadır (Şekil 2.23)

İnceleme alanının batı ucunda, Çatalca metamorfitlerinin ya da Karbonifer yaşlı Trakya Formasyonu’nun üzerinde gevşek tutturulmuş kum ve çakıl birikintileriyle başlar; yanal ve düşey geçişli olarak, seyrek ve ince kömür arakatkılı piritli, petrolü yeşil-koyu külrengi şeyil ve miltaşı düzeylerini kapsar. Çakıllar genellikle, üzerinde yer aldıkları taban kayasından türemiş, başlıca şist, metagranit, kuvarsit, kuvars ve Trakya Formasyonu’na ait kumtaşı-miltaşından oluşur; yuvarlanmış-yarı yuvarlanmış, zayıf boylanmıştır. Kumlar genellikle sarımsı, yeşilimsi, boz, zayıf boylanmalı, orta-kaba tanelidir; gevşek tutturulmuş ya da tutturulmamış mika, feldspat, kuvars gereç ve killi hamur kapsar. Kimi yüzeylemelerinde, örneğin Çatalca dolayında, iyi boylanmış ve yuvarlanmış, çok iyi yıkanmış ve temizlenmiş olduğu için döküm ve cam sanayinde kullanılmakta olan kum birikintilerini kapsar [4].

#### **2.1.28 Kırklareli grubu, soğucak formasyonu**

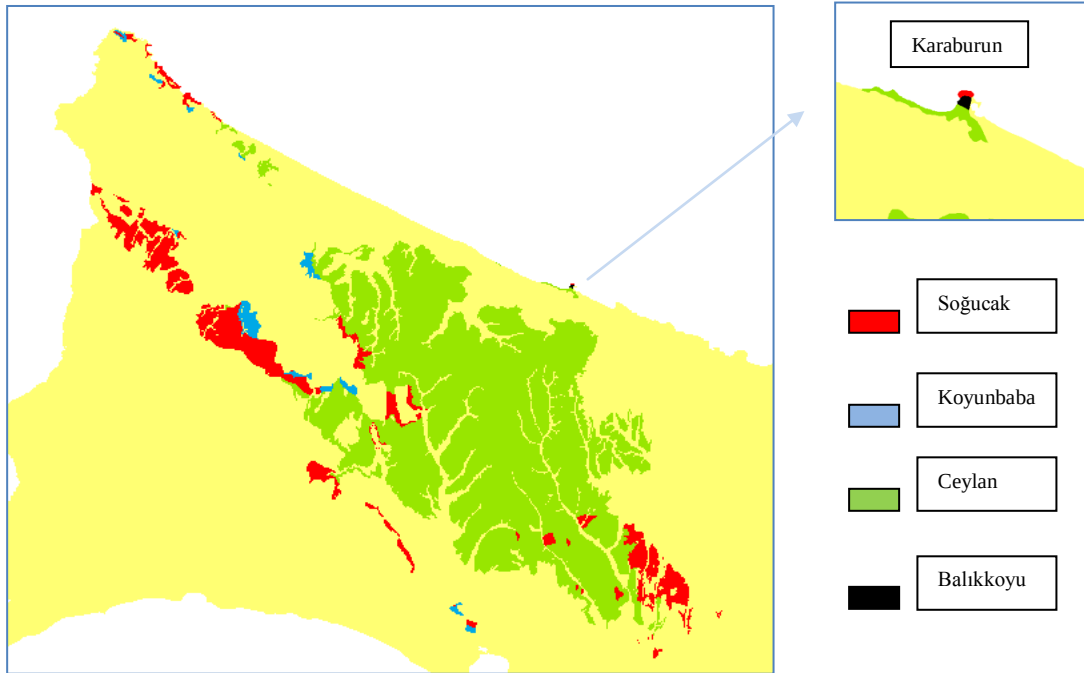
Kırklareli Grubu’nun ayırtman kaya türlerinden birini oluşturan Soğucak Kireçtaşı, resif ortamının çeşitli fasiyeslerini temsil eden karbonatlardan oluşur. Söz konusu

kireçtaşı istifi, Kırklareli Formasyonu'na ait "Soğucak Üyesi", Soğucak Kireçtaşı ya da Soğucak Formasyonu gibi adlarla incelenmiştir. İnceleme alanının doğu kesimlerinde, Çatalca ilçesi ile güneyindeki Muratbey köyü arasında taş ocaklarının bulunduğu alanda Bahçeşehir'in doğusunda Karanlık Dere vadisinde, Çatalca masifinin doğu yamacında ve Çatalca'nın doğusunda Altınşehir-Kayabaşı-Şamlar arasında dar kuşaklar boyunca yer yer temiz yüzeylemeleri görülür. Soğucak Kireçtaşı, başlıca resif çekirdeği, resif önü ve resif gerisi gibi resif ortamının çeşitli fasiyeslerini temsil eden istifleri kapsar. Kireçtaşı kirli beyaz, açık krem, boz, orta-kalın çok kalın katmanlı, bol makrofosil ve bentonik foraminiferli kireçtaşından oluşur. Kovuklu ve gözenekli dokuya sahiptir, yer yer dolomitleşme gösterir. İrili ufaklı paleokarstik erime boşlukları yaygındır. Bol algli, mercanlı bağlamtaşı ve tanetaşı türünden kireçtaşı egemendir [4]. Formasyonun yayılımı bu çalışma için hazırlanan Şekil 2.23'ten incelenebilmektedir.

#### **2.1.29 Kırklareli grubu, balıkkoyu üyesi**

Trakya'nın Karadeniz kıyısında yer alan Karaburun burnunun batı kıyısında Balık koyu adıyla bilinen küçük bir koyda yüzeyleyen kalın çakıлтаşı-kaba kumtaşı birimi, ile onun üzerinde yer alan kireçtaşı arakatkılı ve olistostromal düzeyler içeren mil-kil boyu gerecin egemen olduğu ince kırıntılı düzey Karaburun Formasyonu adıyla incelenmiştir. Ancak formasyon bazı araştırmacılar tarafından Karacahisar Formasyonu'na ait üye adı olarak (Karaburun Üyesi), diğer yandan, bu çakıлтаşı biriminin üzerinde geçişli olarak yer alan Karaburun Formasyonu kapsamında incelenen mil-kil boyu gerecin egemen olduğu kırıntılı istif, Ceylan Formasyonu'nun devamı olduğu gerekçesiyle Ceylan Formasyonu kapsamında, daha üstte yer alan kömür arakatkılı birim ise ortam ve yaş birlikteliğinden dolayı Gürpınar Formasyonu kapsamında Ağaçlı Üyesi olarak incelenmiştir. Karaburun adının önceki araştırmalarda başka birimler için kullanılmış olduğu ve birimin Balık koyunda incelemeye elverişli yüzeylemesinin bulunduğu gerekçesiyle, Balık koyu Çakıлтаşı Üyesi olarak adlandıran çalışmalar mevcuttur. Yanal sürekliliği olmadığı için, bazı araştırmacılar tarafından Ceylan Formasyonun içinde kamalandığı gerekçesiyle, formasyonun bir üyesi olarak incelenen Balık koyu Çakıлтаşı Üyesi, Karaburun Formasyonu adıyla incelenen istifin alt düzeyine karşılık gelir. İnceleme alanında yalnızca Karaburun beldesi kıyısı boyunca yüzeyleyen Balık koyu Çakıлтаşı Üyesi Ceylan Formasyonu'nun bu yöredeki yüzeylemesinin en alt düzeyini oluşturur.

Soğucak Kireçtaşı'nı doğrudan üstler, Adından da anlaşılacağı gibi birimin tamamına yakın bölümü çakıltaşından oluşur; yanal ve düşey geçişli olarak çakıl ve çakılcıklı kaba kumtaşı arakatkılıdır. Çakıl ve hamur kapsamına bağlı olarak boz, açık külrengi, yeşilimsi renklerde, orta-kalın ve düzgün katmanlanma gösteren, istif, kumlu-killi hamurla tutturulmuştur. 1-2 cm'den 20-30 cm'ye değin değişen (ortalama 3-5 cm) boyutlarda, çoğunlukla taban kayayı oluşturan Soğucak Kireçtaşı'ndan ve daha az oranda volkanitlerden türemiş, kaba kum, çakılcık, çakıl ve blok boyu gereci kapsar; koşut ve çapraz katmanlanmalı, derecelenme ve merceklenme gösterir. Çakıllar çoğunlukla yarı yuvarlanmış, kötü boylanmıştır; bloklar çakıltaşı içinde saçılmış halde bulunur [4]. Şekil 2.23'ten de görülebileceği üzere boru hattı imalatı açısından ele alınması gerekli olmayacak derecede az bir alanı kapsayan formasyon literatürde geçtiği için bu çalışmada da ele alınmıştır.



**Şekil 2.23 : Kırklareli Grubu Formasyon Yayılımı [2].**

### **2.1.30 Danışmen formasyonu, süloğlu üyesi**

İstifin alt düzeyinde varvlı yapı gösteren şeyil birimi yer alır, Önceki araştırmalarda, balık fosili kapsamından dolayı Balıklı ve / veya açık havada nemini yitirince ince levhamsı yarıлма gösterdiğinden Karton Şeyil adlarıyla incelenmiştir. Bazı araştırmacılar tarafından Süloğlu Formasyonu adıyla incelenmiştir. Kumtaşı arakatkılı şeyiller Süloğlu Üyesi'nin egemen kaya türünü oluşturur. İnce mil ve kil

laminalarının ardalanmasından oluşan varvlı şeyiller, taze iken kara-koyu yeşilimsi, koyu külrengi, ayrıışmışı açık kahvems, boz, açık külrengi ve dağılgandır; 20-30 m kalınlık gösteren varvlı şeyiller, büyük olasılıkla kışları donan, durgun tatlı su ortamında çökelmiş yıllık ince kil ve mil düzeylerini kapsayan lamina çiftlerinin ardalanmasından oluşmuştur. Birim, yer yer ince kömür mercekleri ve jips içerir. Yer yer, beyaz ve küçük boyutlu bol lamelli branşlı ara düzeyler kapsar. Büyükçekmece gölünün doğu kıyısında ve doğusundaki sırtlarda, Çatalca ilçesi yöresinde yer alan Akören, Bekirli, Kabakça köyleri dolayında ve Hoşdere köyünün güney ve güneydoğusunda ve Büyükçekmece gölünün kuzey doğu kıyısında yüzeylemeleri bulunur [4]. Bu çalışma kapsamında Danişmen Formasyonunun bir üyesi olarak Süloğlu adıyla ele alınmıştır (Şekil 2.24).

#### **2.1.31 Danişmen formasyonu, Gürpınar üyesi**

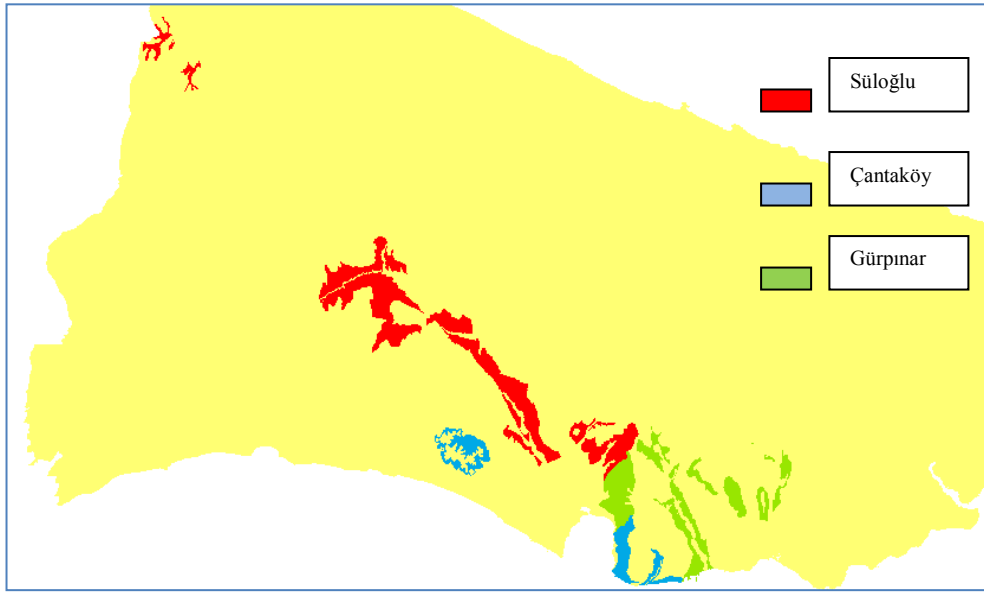
Başlıca, gevşek tutturulmuş kumtaşı ve miltaşı arakatlı kilaşı- şeyil türü ince kırıntılılardan oluşur; ince linyit ve tuf-tüfit ara düzeylerini kapsar. Terkos, Büyükçekmece ve Küçükçekmece gölleri arasında ve Gürpınar yerleşim alanı dolayında çoğunlukla vadi tabanı ve yamaçlarında açığa çıkar. Birim adı, bazı çalışmalarda, yüzeylemelerinin yaygın olduğu Gürpınar semtinden alınmıştır. Bazı araştırmacılar tarafından, Danişmen Formasyonu'nun diğer üyeleriyle yanal ve düşey geçiş gösterdiği gerekçesiyle, Danişmen Formasyonu kapsamında üye derecesine indirgenmiştir. Başlıca ince kum-mil arakatlı kilaşları, Gürpınar üyesinin egemen kaya türünü oluşturur; seyrek olarak çakıl-çakılcık merceklerini kapsar. Kilaşı, taze iken yeşilimsi-koyu külrengi, ayrıışmışı boz, açık külrengi, ince-orta katmanlı ve laminalıdır; katmanlanmaya koşut dizilmiş kireçli konkresyon ve kil topaklarını kapsar. Kumtaşı ara katmanları kalınlığı 20 cm'yi geçmeyen ara düzeyler oluşturur. Genellikle küçük boyutlu, ince kavkılı, beyaz renkli lamellibranş ve gastropod kavkı yığınlarını kapsayan, 5-10 cm kalınlıkta makrofosilli ara düzeyler ve seyrek olarak Congeria'lı beyaz kireçtaşı arakatmanlarını kapsar [4]. Şekil 2.24'te yayılım haritası elde edilmiş olan formasyon tez çalışması kapsamında Danişmen Formasyonu'nun bir üyesi olarak ele alınmıştır.

#### **2.1.32 Danişmen formasyonu, çantaköy üyesi**

Bu çalışma kapsamında Danişmen Formasyonu'nun bir üyesi olarak incelenen Çantaköy Üyesi, Gürpınar yerleşim alanında Gürpınar Üyesi'nin değişik

düzeylerinde kalınlığı yer yer 8-10 metreyi bulan felsik tüf-tüfit arakatkıları şeklinde yer alır.

Bazı araştırmacılar tarafından, volkanitlerin Tekirdağ yöresindeki yüzeylemeleri Çantaköy Formasyonu ya da Çantaköy Tüfiti adı altında incelenmiştir. Gürpınar Üyesi'nin değişik düzeylerinde ince dokulu, kalınlığı yer yer 8-10 metreyi bulan arakatkılar oluşturduğu gerekçesiyle, söz konusu tüf-tüfitlerin, üye derecesinde adlandırılması gerektiğini ileri süren çalışmalar da mevcuttur (Şekil 2.24) [4].



**Şekil 2.24 :** Danışmen Formasyonu Üye Yayılımları [2].

### 2.1.33 Polenezköy grubu, Kurtköy formasyonu

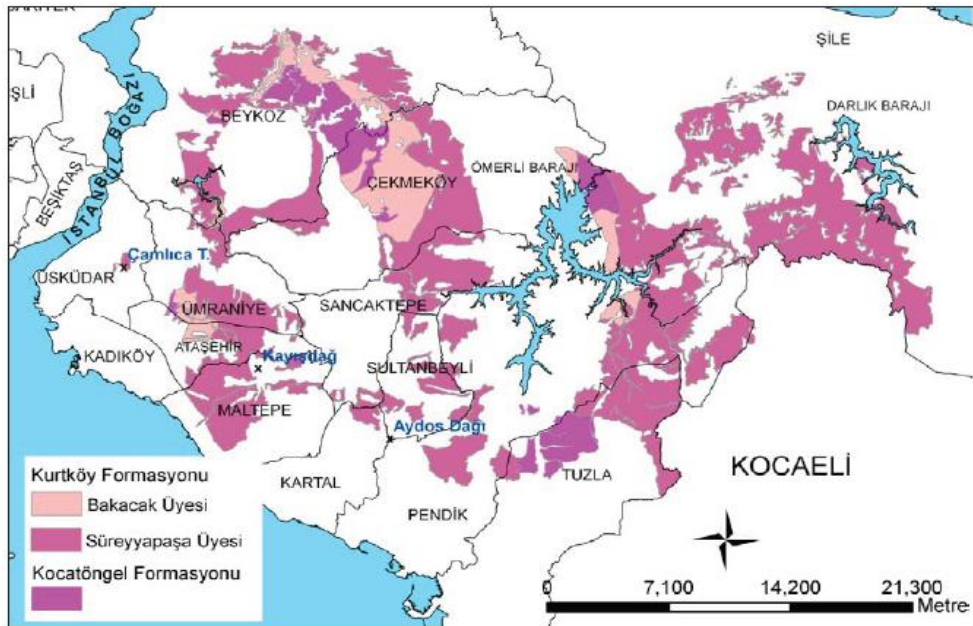
Formasyon, arkoz türü kıvrımsı, mor, eflatun renkli kırıntılı kayalardan oluşur, bazı araştırmacılar bu istifi, Siluriyen sonu yaşıta düşündüğü, altta taban çakıltaşı (Hauptkonglomerat) düzeyi ile başlayan ve arkoz (Arkoz-Horizont) olarak devam eden “Quarzit-Serie” içinde tanımlamıştır [1]. Bazı araştırmacılar ise istifi “Arkozlar” başlığı altında incelemiş, bazıları da formasyonun Kurtköy dolayında geniş alan kapladığını göz önünde tutarak birimi Kurtköy Formasyonu adıyla incelenmiştir. Formasyonun boz-mor-eflatun renk ardalı, kumtaşı arakatkılı miltaşlarının egemen olduğu alt düzeyini Bakacak Üyesi ve çakıltaşı arakatkılı şarabi-mor kumtaşından oluşan üst düzeyini ise Süreyyapaşa Üyesi adlarıyla inceleyen çalışmalar da mevcuttur. Bu çalışma kapsamında Polenezköy Grubu Kurtköy Formasyonu olarak ele alınan formasyonun dağılımı aşağıdaki haritadan görülebilmektedir (Şekil 2.25).

#### 2.1.34 Polenezköy grubu, kocatöngel formasyonu

Başlıca laminalı miltaşı, kiltası ve ince taneli kumtaşından oluşan formasyonun, Sakarya ilinin kuzeydoğusunda Çamdağ-Kocatöngel köyü dolaylarında yüzeylemeleri araştırmacılarca “Kocatöngel Formasyonu” adıyla incelenmiş, bu ad Stratigrafi Komitesi tarafından benimsenmiştir [1]. Formasyonun İstanbul il sınırları içindeki yayılımı Şekil 2.25’te görüldüğü gibi tespit edilmiştir.

#### 2.1.35 Kuşdili formasyonu

Marmara Denizi’ne ve Boğaz’a açılan büyük akarsuların akışaşağı kesiminde kalınlığı 20-30m ile 70-80m arasında değişen koyu renkli kil, mil, çamur türü ince gereçten oluşan haliç çökelleri gelişmiştir. Kadıköy semtinde yer alan Kurbağalıdere’nin akışaşağı kesiminde, Kuşdili Çayırı olarak bilinen alanda yapılan sondaj verilerini inceleyen araştırmacılar tarafından birim Kuşdili Formasyonu adıyla tanımlanmıştır. Avrupa yakasında Büyükçekmece ve Küçükçekmece gölleri, Haliç, Ayamama deresi, Anadolu yakasında Göksu, Küçüksu, Kurbağalı dere vadi tabanlarında, Dragos’un doğusu, Cevizli’nin güneybatısı ve Tuzla-Abduş gölünün kuzeyindeki düzlüklerde yapılan sondajlarda 20-30 m kalınlıkta Kuşdili Formasyonu belirlenmiştir [1]. Güncel birikintiler kapsamında da incelenebilecek olan söz konusu formasyon deprem incelemeleri açısından göz önünde tutulması gereken bir zemin türüdür.



Şekil 2.25 : Kurtköy ve Kocatöngel Formasyonları Yayılımı [1].

### **2.1.36 Güncel birikintiler**

Deprem ve sivilaşma anlamında ele alınması ve gerek altyapı gerekse üstyapı yapılaşması açısından dikkate alınması önem arz eden Güncel Birikintiler bu çalışma kapsamında 6 alt başlıkta incelenmiştir (Şekil 2.26).

#### **2.1.36.1 Seki birikintisi**

Anadolu yakasında, örneğin, İstanbul Park Oto Yarış Pistinin batısında Ömerli baraj gölüne dökülen akarsu vadisinin yatağından 4-5m yüksekte seki düzlükleri izlenir. Bu sekiler yarı sıkılaşmış, boylanmamış kum, çakıl, mil, kil karışımı ince alüvyal gereç kapsar. Bu tür sekiler yerel sera ve tarla tarımı için verimli alanlar oluşturur. Göçbeyli deresi boyunca gelişmiş 5-6m kalınlıkta geniş seki düzlüklerinde yoğun seracılık yapılmaktadır. Mevsimsel akışlı ve çok düşük debili olan bu tür akarsular günümüzde bu denli seki malzemesini biriktirecek kapasitede değildirler. Olasılıkla, Marmara Denizi havzasının çökmesi ve alçalmasına bağlı olarak, bu tür sekileri oluşturmuş olan Karadeniz'e akışlı güçlü akarsuların, güneye akış kazanan akarsular tarafından kapılmasına bağlı olarak, debilerinin düşmüş olabileceği düşünülmektedir [1].

#### **2.1.36.2 Alüvyon**

İstanbul il alanında Karadeniz, Marmara ve Boğaz'a dökülen akarsu vadilerinin tabanında genellikle dar şeritler halinde kum, mil ve boyu çoğunlukla 10 cm'yi geçmeyen çakıllı gereçten oluşan alüvyon birikintileri gelişmiştir. Alüvyon birikintileri genellikle yuvarlanmış-yarı yuvarlanmış, zayıf-orta boylanmış, çoğunlukla kuvarsit, kumtaşı, kireçtaşı ve volkanit türü gereçten oluşur. Karadeniz'e dökülen görelî olarak yüksek eğimli ve dikçe yamaçlı akarsu vadileri boyunca hızlı aşınma ve taşınma nedeniyle çakıllı ve bloklu gereç egemendir. Boğaz'a ve Marmara Denizine açılan akarsu vadilerinin akışaşağı kesimlerinde, buzul sonrası deniz düzeyinin yükselmesine bağlı olarak, boğulma ve dolayısıyla düşük enerjili akış nedeniyle, vadi içlerine doğru ilerleyen kum-mil boyu ince gereçli alüvyon birikintileri gelişmiştir. Göksu deresi, Küçüksu deresi, Bekar deresi ve Marmara Denizine açılan Kurbağalıdere, Çamaşırılık deresi, Küçükyalı deresi, Büyükyalı (Narlı) deresi, Tavşan deresi, Kemikli dere ve Umur deresi vadilerinin tabanında, yapılan sondajlarda Kuşdili Formasyonu'nu oluşturan haliç çökellerinin üstünde 5-6 metreden 20 metrelere kadar değişen kalınlıkta alüvyon tespit edilmiştir. Örneğin Göksu çayının boğaza açıldığı alanda vadi tabanında yapılan sondajlarda, 40 m'yi

aşan kalınlıkta Kuşdili Formasyonu'nun haliç çökellerinin üstünde 21 m kalınlıkta alüvyon saptanmıştır. Yine Kurbağalıdere'nin Marmara Denizine açıldığı alanda vadi tabanında 35 m kalınlıktaki Kuşdili Formasyonu'nun çökellerinin üstünde 7,5m kalınlıkta kum çakıl gereçli alüvyon saptanmıştır, Ayamama deresi düzlüğünde, Kuşdili Formasyonu'nu oluşturan haliç çökellerinin üstünde 6,5 m kalınlıkta alüvyon birikintisinin yer aldığı bazı araştırmacılarca tespit edilmiştir [1].

#### **2.1.36.3 Plaj birikintisi**

Marmara Denizine açılan bazı akarsuların ağzında küçük plaj birikintileri gelişmiştir. Taban kotları deniz düzeyinin 5-6m altına inebilen bu tür birikintiler genellikle denize uzanan doğal sırtların kenarında yer alan, dolayısıyla kıyı akıntısı ve dalgalardan korunabilen koylarda gelişmiştir (Moda, Caddebostan plajları gibi). Yıkanmış ve boylanmış, kaba kum ve yuvarlanmış ufak çakıl yoğunluktadır. İnce plaj şeritlerinin bir bölümü yol genişletme çalışmalarıyla ilişkili olarak yapay dolgu altında kalmıştır. Karadeniz kıyısı boyunca genellikle dar şeritler halinde uzanan kaba kum ve çakıllı plaj birikintilerinin dışında denize açılan büyük akarsuların ağzında görece olarak daha geniş plaj birikintileri gelişmiştir [1].

#### **2.1.36.4 Yalıtışı**

Avrupa yakasının Karadeniz ve Marmara kıyılarında, yer yer küçük boyutlarda plaj kayası (beach rock) olarak da bilinen yalıtışı oluşumları izlenir. Kireç çimentolu, sıkı tutturulmuş, gözenekli, kavrı kırıklı, zayıf boylanmış çakıl, kum, silt boyu gereçten oluşur. Karadeniz'in Karaburun beldesi doğusunda kalan kıyı kesiminde güzel gelişmiştir. Yaklaşık 3 m kalınlığa erişebilen yüzeylemelerinde denize doğru çok düşük eğimli katmanlanma gösterir. Marmara Denizinin Silivri ve Gümüşdere kıyılarında da yer yer küçük ölçekli yalıtışı oluşumları izlenir [1].

#### **2.1.36.5 Yamaç molozu**

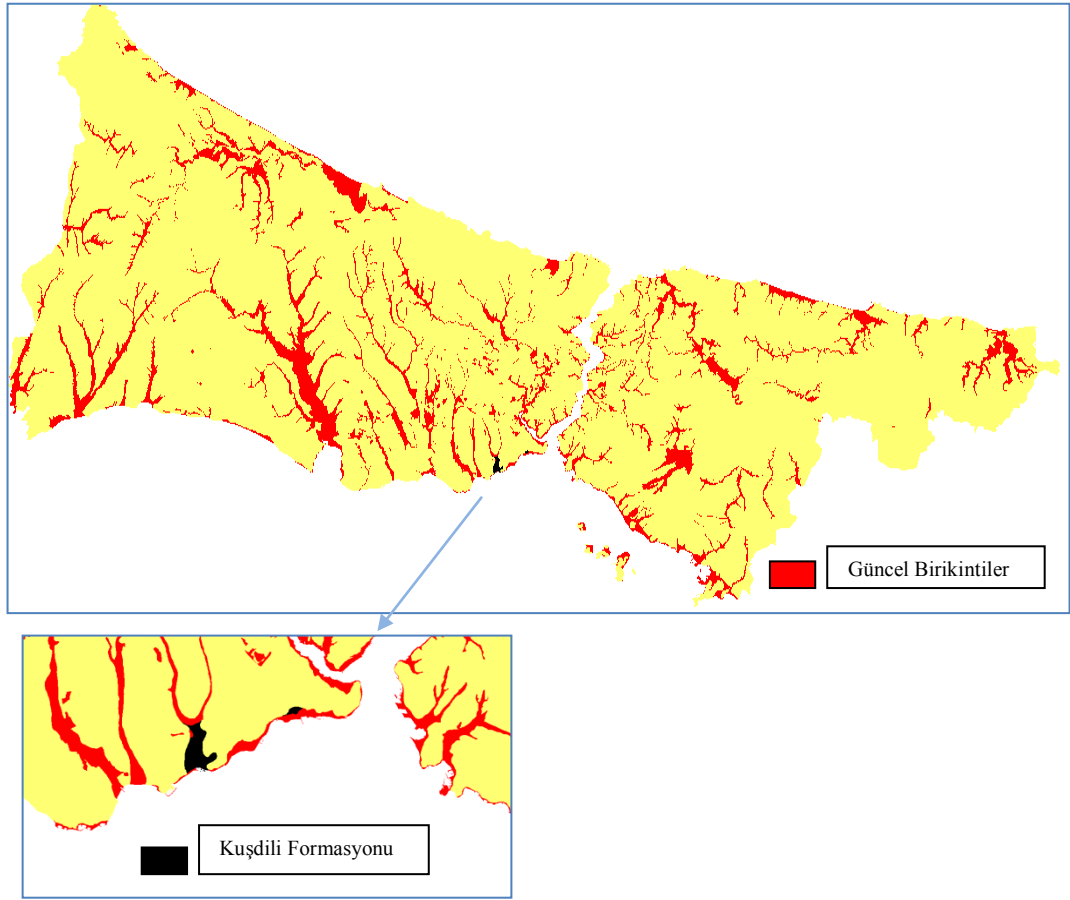
Bölgenin kuvarsit vb, dayanımlı kayaların oluşturduğu yüksek yamaç eğimli dağ ve tepelerin eteklerinde yer yer kalın yamaç molozu birikintileri gelişmiştir. Aydos dağı, Kayış dağı, Büyük ve Küçük Çamlıca tepelerinin yamaç ve eteklerinde yer yer 30-40 metreye varan kalınlıkta bu tür birikintiler yaygındır. Kum, çakıl, kocataş (blok) boyu köşeli-yarı köşeli, kötü boylanmış gereç ve sarımsı kahverengi- kırmızı killi milli hamur kapsar. Yakacık semtinde kimi temel kazılarında açığa çıkan kesitlerde,

çakılların yatay sıralanım gösterdikleri ve kıızıl renkli kil-kum boyu ince kırıntılılarla kabaca ardalandıkları görülür. İstanbul'un kuvarsitlerden oluşan yüksek dağ ve tepelerinin yamaç ve eteklerinde gelişen kalın yamaç molozu birikintileri ile, başlangıçta benzer mekanizmayla oluşmuş ancak, daha uzak alanlara sellenme ve yoğunluk akıntılarıyla taşınmış olan Altıntepe ve kısmen de Tuğlacıbaşı üyeleri, yüzeylemelerin kıt ya da yetersiz olduğu alanlarda karıştırılabilmekte ve dokanak çizmede zorlanılmaktadır. Altıntepe ve Tuğlacıbaşı üyelerinin gereçlerinin yatay dizilim göstermesi, daha sıkışmış olması, çakıl ve blokların görelî olarak daha yuvarlanmış olması ve taban topoğrafyasının eğimi ayırtlamada veri olarak kullanılmıştır [1].

#### **2.1.36.6 Kumul**

Kumul birikintileri Karadeniz kıyısı boyunca yer yer geniş alanlar kaplar, Avrupa yakasında Karadeniz'in özellikle Rumelifeneri-Terkos gölü arasında kalan kıyı kesiminde, Gümüşdere-Kilyos, Karaburun-Ormanlı köyleri arasında sarımsı, kıızıl renkli, iyi boylanmış kaba kum gereçli kumul birikintileri yer yer geniş alanlar kaplar. Kıyıdan yaklaşık 5 km içlere doğru ilerleyen ve yüksekliği deniz düzeyinden 40-50 metreye varan tepecikler ya da kıyıya koşut uzanan sırtlar oluşturur. Özellikle Terkos gölü kuzeyindeki kumulların, kumullar için olağan olmayan, kıızıl renkli oluşu, geçmişte oksidasyon koşullarının etkinliği ile açıklanabilir.

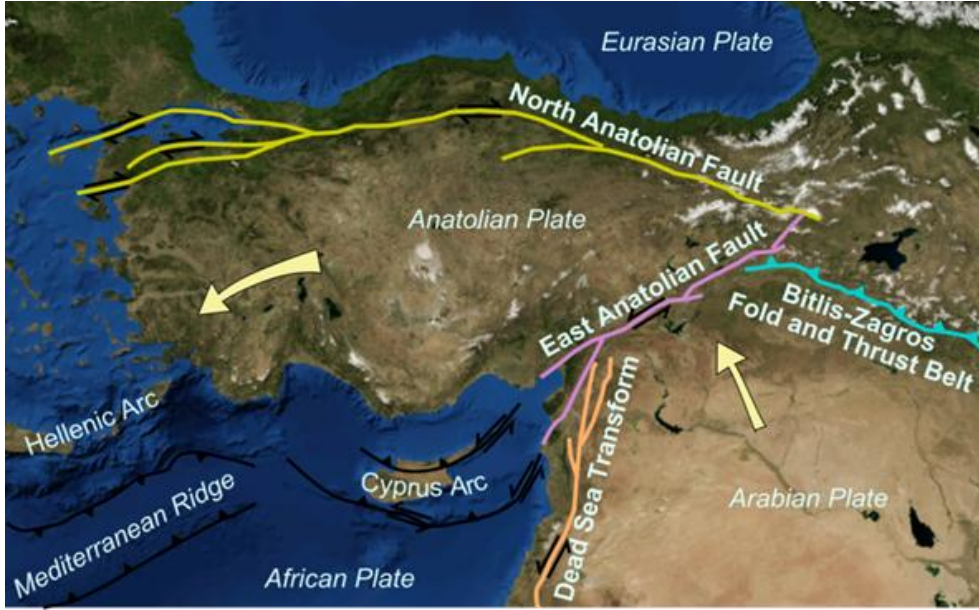
Anadolu yakasında Ağva dolayında, Türknîl Çayı'nın akışaşağı (mansap) kesiminde, Şile merkezi ile Kumbaba Mahallesi arasında kalan düzlükte, Kumbaba Tepesi'nin çevresinde, Riva kasabasının batısındaki sahil kesimlerinde yaygındır. Bu yöredeki kumul birikintileri genellikle açık renkli, kirli beyaz, krem rengi, sarımsı boz, yer yer sütlü kahverengi, boylanmış, yuvarlanmış, tutturulmamış, katmanlanmasız, ince-orta kum boyu %90-95 oranında kuvars gereçten oluşur. Anadolu yakası batı kesimindeki kumullar deniz düzeyinden 25-30 m, yüksekliğe kadar yayılabilmektedir. Kumul kalınlığı yerden yere, 1-2 m ile 15-20 m arasında değişir [1].



Şekil 2.26 : Güncel Birikintiler ve Kuşdili Formasyonu Yayılımı [2].

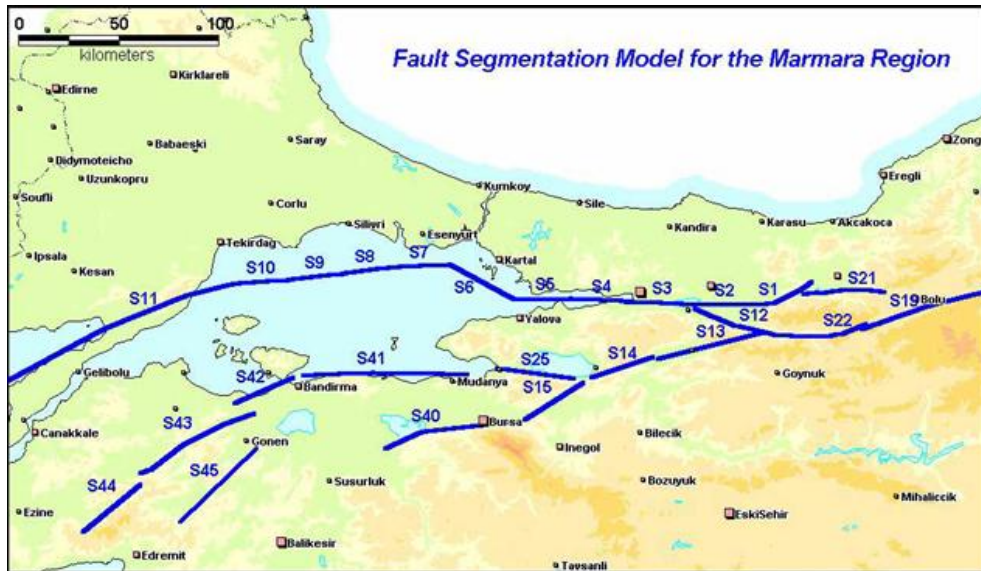
## 2.2 Çalışma Alanının Sismik ve Jeofizik İncelemesi

Türkiye konumu itibariyle büyük ve önemli fay hatlarına sahip bir ülkedir. Bu fay hatlarının en önemlilerinden biri Kuzey Anadolu Fay Hattı'dır (KAFH). Aktif olan bu fay hattı Anadolu'nun kuzeyinden boylu boyunca geçmekte olup (Şekil 2.27) Anadolu levhası ile Avrasya Levhasını birbirinden ayırır. Tarihsel seyri incelendiğinde Kuzey Anadolu Fay'ı boyunca 1939 Erzincan ( $M=7,9$ ), 1942 Niksar-Erbaa ( $M=6,9$ ), 1943 Tosya-Ladik ( $M=7,7$ ), 1944 Bolu-Gerede ( $M=7,5$ ), 1949 Karlıova ( $M=7,1$ ), 1951 Kurşunlu ( $M=6,9$ ), 1957 Abant ( $M=6,8$ ), 1966 Varto ( $M=6,9$ ), 1967 Mudurnu ( $M=7,1$ ), 1992 Erzincan ( $M=6,5$ ), 1999 İzmit ( $M=7,4$ ), 1999 Düzce ( $M=7,2$ ) gibi büyük depremlerin meydana geldiği görülür.



Şekil 2.27 : Kuzey Anadolu Fay Hattı.

Yapılan çalışmalar ile KAFH'nın Marmara Bölgesi içindeki dallanma haritası elde edilmiştir [5]. Şekil 2.28 incelendiğinde fayın Marmara Denizi içindeki kuzey parçasının İstanbul'a aşırı yakın konumlandığı, eski şehrin (sur içi) yaklaşık 15-20 km yakınından geçtiği görülebilmektedir.

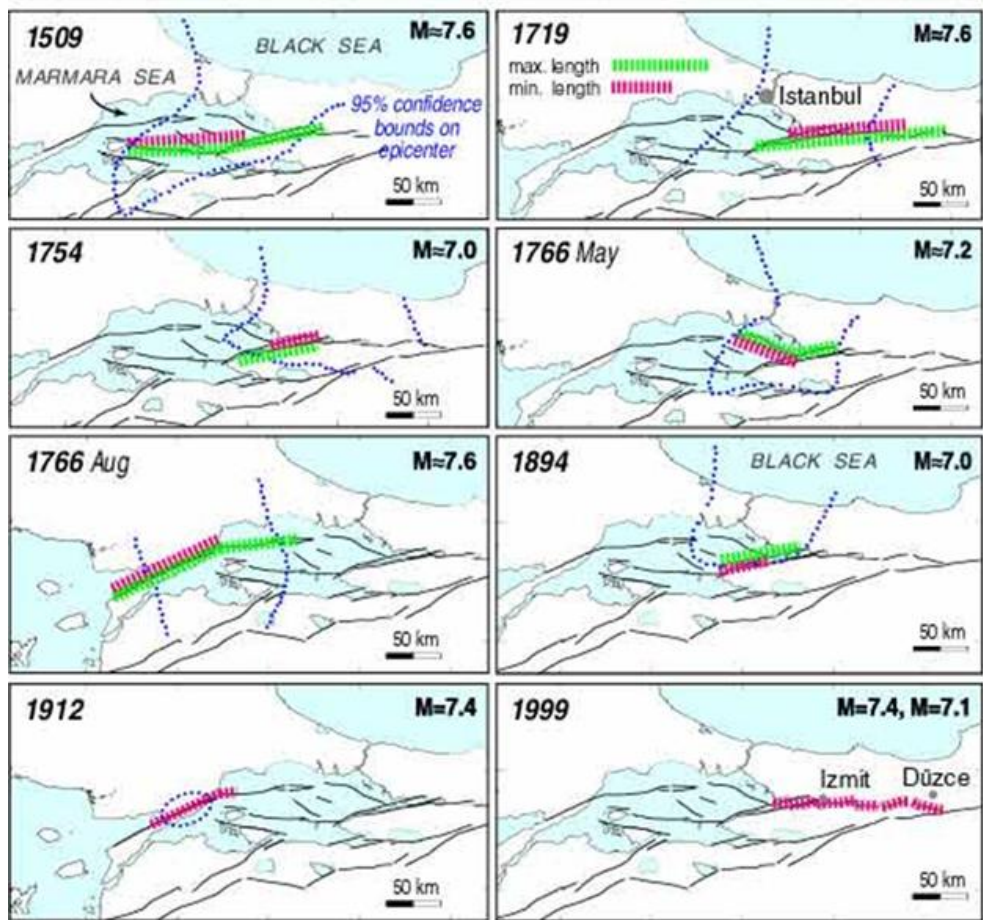


Şekil 2.28 : Kuzey Anadolu Fay Hattı'nın Marmara Parçası [5].

Üç parça halinde ele alınan KAFH'nın Marmara Bölgesi içindeki bölümünün Mudurnu'dan başlayıp Ege Denizi'ne uzanan orta parçasında 1737 yılından beri

büyük bir deprem kaydedilmemiştir. Ayrıca güney parçasında ise 1855'ten itibaren büyük bir sismik hareket gözlenmemiştir [2].

Bölgenin tarihsel sismik hareketleri incelendiğinde Marmara Denizi'nde birçok yıkıcı depremin meydana gelmiş olduğu görülmektedir (Şekil 2.29). Deprem kayıtları üzerinde yapılan istatistiksel çalışmalar sonucu İstanbul'u her 50 yılda bir orta büyüklükte, her 300 yılda bir de büyük bir depremin etkilediği tespit edilmiştir [5]. Yapılan yeni araştırmalar KAFH'nın Marmara Bölgesi'ndeki bölümünün kuzey parçasının orta bölümünde potansiyel bir sismik sıkışmanın olduğunu ortaya koymaktadır.

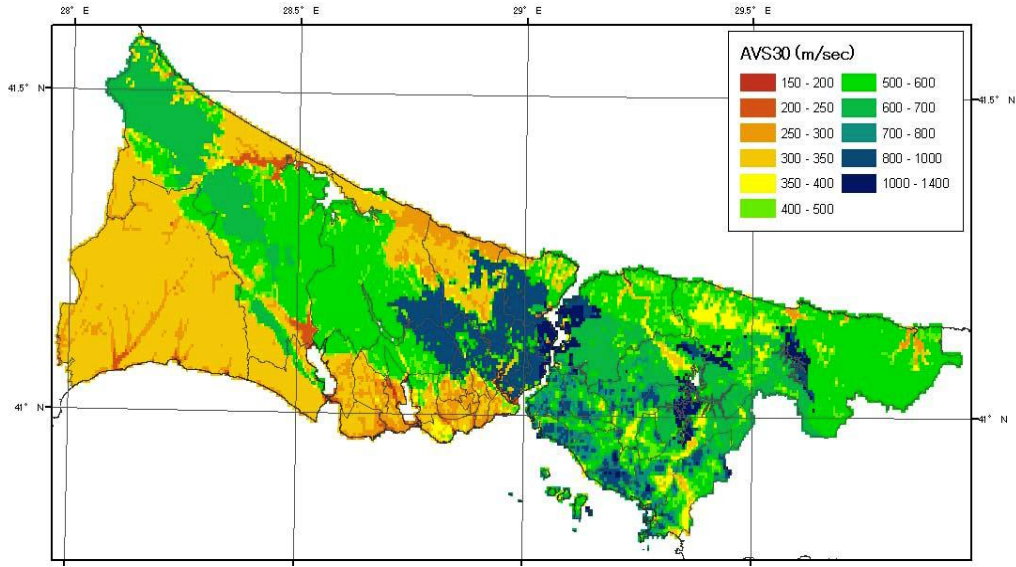


Şekil 2.29 : Marmara Denizi'ndeki Yıkıcı Depremler [6].

Bu çalışmalar sonucunda uzmanlar İstanbul'un yaklaşık 7,5 büyüklüğünde bir depremle karşı karşıya olduğu fikrindedirler. Bu ortak düşünceden hareketle de çeşitli deprem senaryoları üretilmiştir. Bu anlamda altyapıların da deprem güvenliği önem arz etmektedir.

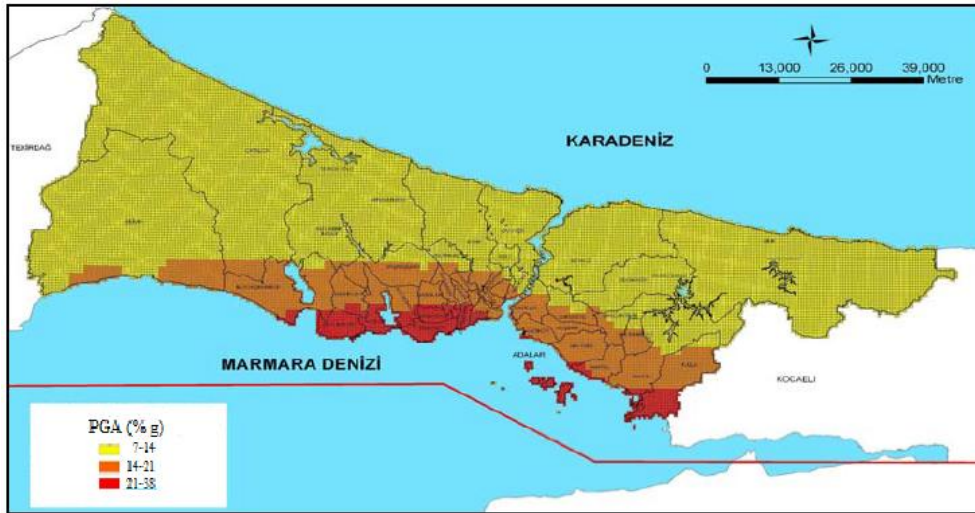
Altyapıların deprem güvenliği konusunda, bu çalışma kapsamında gerekli bazı jeofizik verilere ihtiyaç duyulmuş olup bu veriler değişik kaynaklardan derlenmiştir (Çizelge 2.1).

Bu çalışma kapsamında zemin formasyonlarına ait iki ana jeofizik değere ihtiyaç duyulmuştur. Bunlardan biri S-dalga hızı diğeri ise hakim periyottur. S-dalga hızı için İstanbul geneline ait  $V_{s30}$  haritalaması yapılmış olup bu haritadan genel bir fikir edinmek mümkün olmaktadır (şekil 2.30). Doğal olarak Kuşdili Formasyonu gibi zayıf zeminlerin ortalama kesme dalgası hızları düşük olmaktadır. Hakim periyod için derlenen veriler Çizelge 2.1’de toplanmıştır.



**Şekil 2.30 : İstanbul İli'nin Ortalama  $V_{s30}$  Dağılım Haritası [1].**

Marmara Denizi orjinli beklenen İstanbul depremine ( $M_w=7,5$ ) göre ilk 30 m derinlik için kayma dalgası hızı ortalama 760m/s alınarak hesaplanan en büyük yer ivmesinin (PGA) farklı bölge ve zeminler için dağılımı Şekil 2.31’de gösterilmiştir. Bu şekil beklenen depremin İstanbul İli’ne bölgesel etkileri hakkında ön fikir vermektedir.



**Şekil 2.31 : İstanbul Senaryo Depremine Göre PGA Dağılımı [1].**

### **2.3 İstanbul İl Jeolojisi Formasyonlarının Zemin Özellikleri**

Yukarıda izah edilen İstanbul İli'ne ait tüm formasyonların bu çalışma için gerekli olacak jeolojik ve jeofizik yaklaşık ve/veya ortalama özellikleri aşağıdaki tabloda olduğu şekliyle tespit edilmiştir (Çizelge 2.1). Burada her bir formasyonun kendi içinde içeriğinin karışım oranına bağlı olarak jeofizik ve jeolojik değerlerinin kesin değerler alamayacağı görülmektedir. Bu nedenle ortalama değerler ve/veya değer aralığı dikkate alınmıştır. “Güncel Birikintilerin” çalışma kapsamı dışında tutulması ve gerekirse “sıvılaşma” başlığı altında ayrı bir çalışma konusu olabileceği hususu tespit edilmiştir. Ayrıca bu çalışmada formasyonların kaya birimlerinin kapsam dışında tutularak toprak birimleri üzerinde çalışılması gerektiği ortaya çıkmıştır. Bu nedenle aşağıdaki tabloda belirtilen değerler ilk 5 metreye ait değerler olup bu değerler kullanılırken formasyonların kaya birimleri değil toprak birimleri dikkate alınmıştır.

**Çizelge 2.1 : Formasyon Tablosu [7-9, 10].**

| FORMASYON TANIMI        |            | ORTALAMA JEOLJİK DEĞERLER                        |                                       |                        | ORTALAMA JEOFİZİK DEĞERLER            |                            |
|-------------------------|------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------|------------------------|---------------------------------------|----------------------------|
| Formasyon Adı           | Üye Adı    | Özgül Ağırlık,<br>$\gamma$ ( kN/m <sup>3</sup> ) | İçsel Sürtünme Açısı,<br>$\phi$ ( ° ) | Kohezyon,<br>C ( kPa ) | Kesme Dalgası Hızı,<br>$V_s$ ( m/sn ) | Hakim Periyot,<br>T ( sn ) |
| Akveren                 |            | 17-19                                            | 25-35                                 | 80-100                 | 300-400                               | 0,15-0,60                  |
| Altıntepe               |            | 14-17                                            | 12-16                                 | 10-20                  | 300-600                               | 0,30-0,60                  |
| Aydos                   |            | 14-18                                            | 25-30                                 | 200-25000              | 400-750                               | 0,15-0,35                  |
| Çavuşbaşı Granodiyoriti |            | 18-21                                            | 25-30                                 | 200-10000              | 400-600                               | 0,25-0,40                  |
| Çekmece                 | Bakırköy   | 17-20                                            | 5-10                                  | 20-100                 | 400-600                               | 0,25-0,40                  |
| Çekmece                 | Güngören   | 13-16                                            | 10-12                                 | 40-80                  | 250-400                               | 0,35-0,70                  |
| Çukurçeşme              |            | 13-16                                            | 12-16                                 | 10-20                  | 300-550                               | 0,35-0,60                  |
| Danışmen                |            | 15-17                                            | 12-16                                 | 10-20                  | 350-550                               | 0,35-0,55                  |
| Danışmen                | Gürpınar   | 13-19                                            | 8-12                                  | 50-60                  | 250-500                               | 0,35-0,60                  |
| Danışmen                | Süloğlu    | 14-17                                            | 7-13                                  | 10-20                  | 200-300                               | 0,15-0,60                  |
| Danışmen                | Çantaköy   | 14-17                                            | 7-13                                  | 10-20                  | 200-300                               | 0,15-0,60                  |
| Denizli Köyü            | Ayrılmamış | 18-23                                            | 35-40                                 | 100-25000              | 400-800                               | 0,15-0,35                  |
| Gebze Grubu             | Ballıkaya  | 19-23                                            | 40-45                                 | 100-10000              | 450-750                               | 0,15-0,40                  |
| Gebze Grubu             | Demirciler | 18-22                                            | 35-40                                 | 100-2000               | 400-600                               | 0,15-0,45                  |
| Gebze Grubu             | Tepecikköy | 18-21                                            | 30-40                                 | 80-1000                | 400-600                               | 0,15-0,45                  |
| Istranca Birliği        |            | 18-25                                            | 45-50                                 | 100-20000              | 400-800                               | 0,10-0,30                  |
| Kapaklı                 |            | 18-22                                            | 35-40                                 | 100-450                | 400-600                               | 0,25-0,50                  |
| Kartal (Pendik)         | Kozyatağı  | 17-22                                            | 35-40                                 | 70-18000               | 500-750                               | 0,15-0,35                  |
| Kırklareli Grubu        | Ceylan     | 16-19                                            | 30-35                                 | 100-200                | 400-600                               | 0,25-0,40                  |
| Kırklareli Grubu        | Balıkköyü  | 15-16                                            | 4-10                                  | 0-5                    | 250-400                               | 0,15-0,60                  |

**Çizelge 2.1 (devam) : Formasyon Tablosu [7-9, 10].**

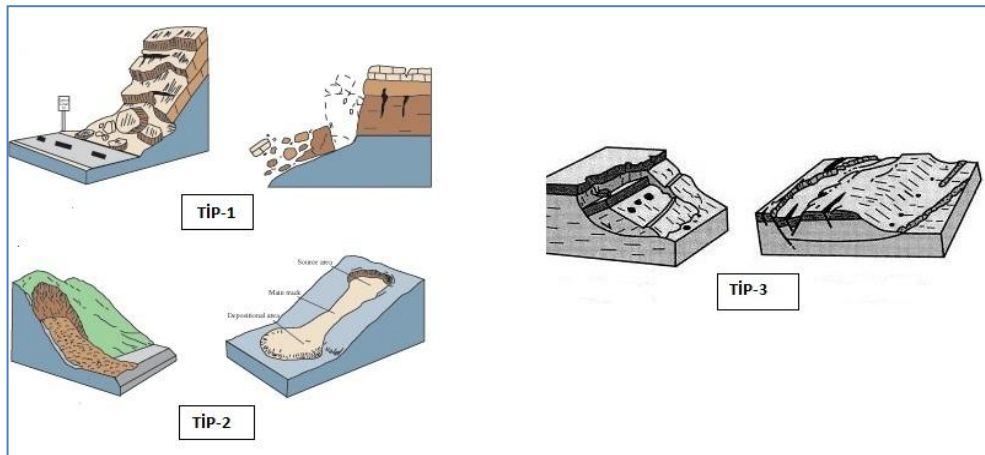
| FORMASYON TANIMI   |             | ORTALAMA JEOLJİK DEĞERLER                        |                                       |                        | ORTALAMA JEOFİZİK DEĞERLER            |                            |
|--------------------|-------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------|------------------------|---------------------------------------|----------------------------|
| Formasyon Adı      | Üye Adı     | Özgül Ağırlık,<br>$\gamma$ ( kN/m <sup>3</sup> ) | İçsel Sürtünme Açısı,<br>$\phi$ ( ° ) | Kohezyon,<br>C ( kPa ) | Kesme Dalgası Hızı,<br>$V_s$ ( m/sn ) | Hakim Periyot,<br>T ( sn ) |
| Kırklareli Grubu   | Koyunbaba   | 18-22                                            | 30-35                                 | 100-300                | 250-500                               | 0,35-0,60                  |
| Kırklareli Grubu   | Soğucak     | 18-22                                            | 30-35                                 | 80-250                 | 400-700                               | 0,25-0,45                  |
| Kuşdili Formasyonu |             | 13-15                                            | 0-5                                   | 0                      | 150-250                               | 0,50-0,80                  |
| Ömerli             |             | 12-15                                            | 4-10                                  | 0-5                    | 100-200                               | 0,20-0,90                  |
| Pelitli            |             | 18-22                                            | 35-40                                 | 75-15000               | 400-800                               | 0,15-0,35                  |
| Pınarhisar         |             | 17-20                                            | 25-30                                 | 30-200                 | 300-400                               | 0,15-0,60                  |
| Polenezköy Grubu   | Kocatöngel  | 16-19                                            | 20-30                                 | 150-25000              | 400-700                               | 0,20-0,35                  |
| Polenezköy Grubu   | Kurtköy     | 18-21                                            | 30-40                                 | 200-20000              | 400-700                               | 0,20-0,35                  |
| Sancaktepe Graniti |             | 15-18                                            | 12-16                                 | 10-20                  | 350-650                               | 0,20-0,40                  |
| Sarıyer            |             | 16-19                                            | 22-27                                 | 20-50                  | 400-600                               | 0,25-0,40                  |
| Şile               | İmam Tepesi | 16-19                                            | 10-20                                 | 30-60                  | 300-500                               | 0,15-0,60                  |
| Trakya             | Ayrılmamış  | 18-20                                            | 25-30                                 | 100-200                | 450-700                               | 0,20-0,40                  |
| Yayalar            | Şeyhli      | 16-19                                            | 20-30                                 | 150-20000              | 400-700                               | 0,20-0,35                  |
| Yayalar            | Gözdağ      | 16-19                                            | 20-30                                 | 80-2500                | 400-600                               | 0,25-0,40                  |
| Yemişliçay         |             | 19-24                                            | 30-40                                 | 50-120                 | 400-600                               | 0,15-0,40                  |
| Yunuslubayır       |             | 16-18                                            | 10-20                                 | 50-70                  | 300-500                               | 0,15-0,60                  |



### 3. DEPREM ETKİSİ ALTINDA GÖMÜLÜ SÜREKLİ BORU HATLARI

#### 3.1 Deprem Kaynaklı Zemin Kayması

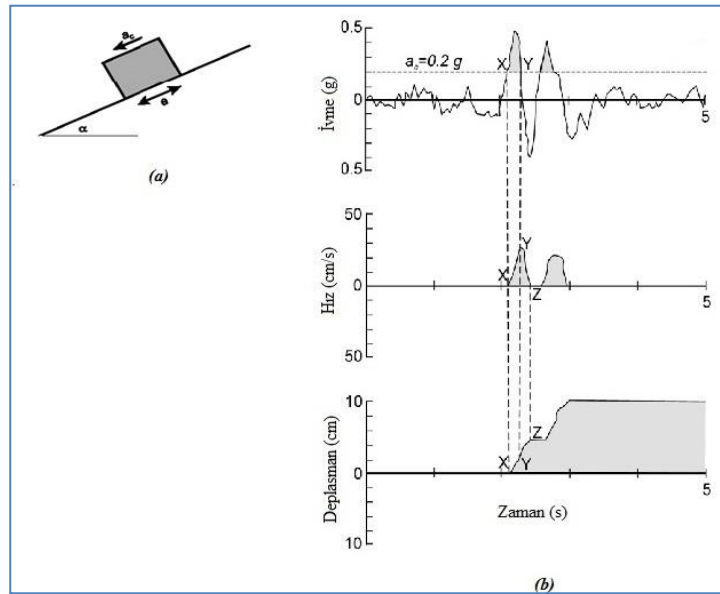
Yer kaymaları, sismik sarsıntı ile tetiklenebilen zeminin toplu hareketidir. Çok sayıda sistem, yer kaymalarını sınıflandırmak için geliştirilmiştir. Boru hatlarına etkiyen farklı tesirlere dayalı olarak Meyersohn üç türlü yer kayması oluşturmuştur [11]. Şekil 3.1’de görüldüğü üzere; Tip-1, yerüstü boru hatlarına düşen kayaların doğrudan çarpması nedeniyle hasara sebep olabilen kaya düşmesi ve kaya yuvarlanmalarını içerir. Bu tür yer kayması gömülü boru hatları üzerine göreceli olarak daha az etki yaptıklarından dolayı burada incelenmeyeceklerdir. Tip-2, taşınan malzemenin kıvamlı bir sıvı gibi davrandığı toprak akması ve enkaz akmasını içerir. Geniş hareketler (birkaç metre veya daha fazla) sıklıkla bu tür toprak kayması ile bağlantılıdır. Fakat beklenen kayma miktarını önceden tayin etmek zordur. Tip-3 zemin kayması, toprağın bir blok olarak hareket ettiği toprak çökmesi ve toprak kaymasıdır. Bunlar genellikle doğal yamaçlarda, nehir kenarlarında ve yığınaklarda (toprak setlerde) meydana gelirler. Boru hatlarının sıklıkla bu tip bölgelerden geçmesi nedeniyle aşağıda bu tür toprak kayması üzerine odaklanılacaktır.



Şekil 3.1 : Boru Hatlarına Etki Açısından Zemin Kaymaları [11,12].

Deprem kaynaklı zemin hareketi miktarının hesaplanması veya tahmin edilmesi hem üst yapılar hem de altyapılar için önem arz etmektedir. Bu deplasmanın tahmin edilebilmesi için Newmark kayan blok modelini (şekil 3.2a) önermiştir [13]. Bu yöntemi kullanarak deprem kaynaklı zemin deplasman miktarını hesaplayabilmek için bir çok araştırmacı çeşitli çalışmalar yapmıştır. Wilson ve Keefer, Wicczorek ve diğ., Houston ve diğ., Jibson, Jibson ve Keefer, California Division of Mines and Geology, Jibson ve diğ., Mankelow ve Murphy, Bray ve Rathje, Luzi ve Pergalani, Miles ve Ho, Jibson ve diğ., Miles ve Keefer, DelGaudio ve diğ., Pradel ve diğ., Haneberg, Rathje ve Saygılı'nın çalışmaları bu çalışmalara örnektir [14-31].

Newmark modeline göre deprem ivme kayıtlarından hareket ile zemin deplasmanları hesaplanmaktadır (Şekil 3.2b), Şekil 3.2a incelendiğinde ivme-zaman kaydı grafiği üzerinde  $a_c = 0,2g$  durumuna göre X noktasının solunda ivme kayıt verilerinin  $a_c$  değerinin altında olduğu görülmektedir. X noktasının sağında ise  $a_c$  değerinin üzerinde olan ivme kaydının zamana göre integrasyonu ile hız-zaman grafiği elde edilmektedir. Hız Y noktasına kadar artar ve Y noktasında bir extrem nokta oluşur. Y noktasından sonra ise ivme değeri  $a_c$ 'nin altına düşmesine rağmen blok ataleti nedeniyle hareketine devam eder. Sürtünme ve zeminin ters yönde hareketi nedeniyle hız Z noktasında sıfırlanır, bloğun kayması durur. Diğer  $a_c$  kritik ivme değerinin aşıldığı tüm noktalarda aynı işleme devam edilerek sonuçta bloğun (zeminin) toplam deplasmanı (kayması) hesaplanmış olur [12].



Şekil 3.2 : a) Newmark Kayan Blok Modeli, b) Newmark Analizi Algoritması [12].

$$a_c = g(FS - 1) \sin \alpha \quad (3.1)$$

Burada  $a_c$  kritik ivme,  $g$  yerçekimi ivmesi,  $FS$  statik güvenlik faktörü,  $\alpha$  kayan bloğun yatayla yaptığı açıdır.

Wilson ve arkadaşlarının önerdiği yöntemde atalet kuvvetlerine bağlı olarak ince bir tabakanın kaydığı varsayılır [32]. Boşluk suyu basıncının sıfır olması halinde şev hareketi geçirici ve kaymaya direnç gösteren kuvvetler arasındaki ilişkiden kaymaya neden olan kritik ivme,

$$a_c = g \left[ \frac{c}{\gamma h} + \cos \alpha \tan \phi - \sin \alpha \right] \quad (3.2)$$

olarak tanımlanmaktadır [33]. Burada,  $a_c$ , kaymayı başlatan kritik ivme;  $g$ , yerçekimi ivmesi;  $c$ , zeminin kohezyonu;  $\alpha$ , şev açısı;  $\phi$ , zeminin kayma mukavemeti açısı;  $\gamma$ , zeminin birim hacim ağırlığıdır. Bu eşitlik ile belli bir şev açısı,  $c$  ve  $\phi$  parametreleri kullanılarak şev hasar görebilirliği tahmini yapılabilir. Bazı araştırmacılar tarafından  $h$  değeri için tipik 10ft (=3,33 m) sabit zayıf yamaç derinliği önerilmiştir. [34, 35]

Ambraseys ve Menu tarafından 11 adet depreme ait 50 tane kuvvetli yer hareketi kaydı kullanılarak kritik ivme ( $a_c$ ) ve maksimum ivmeye ( $a_{max}$ ) bağlı olarak Newmark deplasmanını hesaplayan aşağıdaki regresyon denklemi elde edilmiştir [36].

$$\log \delta = 0,90 + \log \left[ \left( 1 - \frac{a_c}{a_{max}} \right)^{2,53} \left( \frac{a_c}{a_{max}} \right)^{-1,09} \right] \quad (3.3)$$

Newmark deplasmanını hesaplayabilmek için daha farklı regresyon denklemleri geliştirilmiştir. Yegian ve diğ. [37], Jibson [17], Ambraseys ve Srbulov [38], Crespellani ve diğ. [39], Jibson ve diğ. [20], Bray ve Travarasrou [40], Chyi-Tye Lee ve diğ. [41] bu çalışmalar kapsamındadır.

Jibson [17], 1993 yılında, Newmark deplasman hesabı için Arias indeksinin ( $I_a$ ) maksimum ivme değerine göre daha iyi regresyon uyumu sağladığını tespit ederek kritik ivme değerleri  $0,02g$ ;  $0,05g$ ;  $0,10g$ ;  $0,20g$ ;  $0,30g$  ve  $0,40g$  için 11 tane kuvvetli yer hareketi kaydını kullanıp aşağıdaki denklemi elde etmiştir:

$$\log \delta = 1,460 \log I_a - 6,642 a_c + 1,546 \quad (3.4)$$

Burada deplasman  $\delta$  cm, kaymayı başlatan kritik ivme  $a_c$  g, Arias indeksi  $I_a$  m/s türündendir. Arias indeksi aşağıdaki gibi ifade edilmektedir [42]:

$$I_a = \frac{\pi}{2g} \int_0^{T_d} a^2(t) dt \quad (3.5)$$

Zamana bağlı ivme  $a(t)$ 'ye bağlı olarak Bağntı 3.5 şeklinde ifade edilen Arias indeksi (m/s) için Wilson ve Keefer tarafından deprem büyüklüğü (M) ve deprem merkez üssü mesafesi ( $R$ , km) değerlerine bağlı olarak aşağıdaki bağıntı önerilmiştir [43]:

$$\log I_a = M - 2 \log R - 4,1 \quad (3.6)$$

Bağıntı 3.4, 13 adet depremin 555 adet verisi kullanılarak aşağıdaki denklemde görüldüğü şekliyle güncellenmiştir [20]:

$$\log \delta = 1,521 \log I_a - 1,993 \log a_c - 1,546 \quad (3.7)$$

Yapılan çalışma ile  $\log \delta - \log I_a$  ve  $\log \delta - a_c$  dağılım uyumunun istatistiksel olarak daha iyi olduğu hususu öne sürülerek aşağıdaki formül geliştirilmiştir [41] :

$$\log \delta = 0,847 \log I_a - 10,62 a_c + 6,587 a_c \log I_a + 1,84 \quad (3.8)$$

Çizelge 3.1'de verilen 1976-2013 yılları arasında Türkiye genelinde oluşmuş  $M_w \geq 5,5$  olan tüm deprem verileri kullanılarak ve kritik ivme olarak 0,02g; 0,05g; 0,10g; 0,20g; 0,30g ve 0,40g değerleri dikkate alınarak elde edilen regresyon analizleri incelendiğinde yukarıda verilen bağıntılar Türkiye verileri için aşağıdaki gibi elde edilmiştir:

**Çizelge 3.1 : 1976-2013 Yılları Arası Türkiye Depremleri ( $M_w \geq 5,5$ ) [44].**

|    | Deprem                      | $M_w$ |
|----|-----------------------------|-------|
| 1  | 1983, Şenkaya-ERZURUM       | 6,6   |
| 2  | 1986, Doğanşehir - MALATYA  | 6,0   |
| 3  | 1992, Üzümlü - ERZİNCAN     | 6,6   |
| 4  | 2000, Çerkeş - ÇANKIRI      | 6,0   |
| 5  | 1992, Menderes - İZMİR      | 6,0   |
| 6  | 1999, Merkez - DÜZCE        | 7,1   |
| 7  | 2002, Merkez - AFYON        | 5,8   |
| 8  | 1999, Gölyaka -DÜZCE        | 5,5   |
| 9  | 1999, Merkez - KOCAELİ      | 7,6   |
| 10 | 1988, Yüreğir - ADANA       | 6,2   |
| 11 | 1995, Dinar - AFYON         | 6,4   |
| 12 | 1983, Biga - ÇANAKKALE      | 6,1   |
| 13 | 2003, Seferihisar - İZMİR   | 5,7   |
| 14 | 2003, Merkez - BİNGÖL       | 6,3   |
| 15 | 1996, Gümüşhacıköy - AMASYA | 5,6   |
| 16 | 2002, Sultandağı - AFYON    | 6,5   |
| 17 | 1976, Merkez - DENİZLİ      | 6,1   |
| 18 | 2011, Merkez - VAN          | 7,0   |
| 19 | 1997, Merkez - HATAY        | 5,7   |
| 20 | 1999, Merkez - KOCAELİ      | 5,6   |
| 21 | 1999, Merkez - KOCAELİ      | 5,8   |
| 22 | 1977, Bornova - İZMİR       | 5,6   |
| 23 | 1977, Ilgaz - ÇANKIRI       | 5,8   |
| 24 | 1988, Çaldıran - VAN        | 5,5   |
| 25 | 1986, Doğanşehir - MALATYA  | 5,8   |
| 26 | 1992, Pülümür - TUNCELİ     | 5,9   |
| 27 | 1994, İzmir Körfezi - İZMİR | 5,5   |
| 28 | 2007, Sivrice - ELAZIĞ      | 5,5   |
| 29 | 1996, Merzifon - AMASYA     | 5,7   |

Buna göre Bağntı 3.4 Türkiye verilerine göre uyarlandığında;

$$\log \delta = 1,34 \log I_a - 8,202 a_c + 1,7 \quad (3.9)$$

olarak elde edilmiştir. Bağntı 3.7 Türkiye verilerine göre uyarlandığında;

$$\log \delta = 1,492 \log I_a - 2,021 \log a_c - 1,5125 \quad (3.10)$$

olarak elde edilmiştir. Bağntı 3.8 Türkiye verilerine göre uyarlandığında ise;

$$\log \delta = 1,1586 \log I_a - 9,4776 a_c + 5,6268 a_c \log I_a + 1,7158 \quad (3.11)$$

olarak elde edilmiştir.

Bu inceleme kapsamında iki ayrı özgün çalışma yapılmış olup yapılan regresyon analizler kapsamında her iki yaklaşımın da önceki çalışmalara göre daha iyi bir uyum sağladığı tespit edilmiştir. Ayrıca aşağıda detaylı açıklamaları bulunan her iki yaklaşım kıyaslandığında maksimum ivme değeri kullanılan çalışmanın regresyon uyumunun en iyi sonucu verdiği sonucuna varılmıştır.

### 3.2 Newmark Deplasman Hesabı İçin Yeni Yaklaşımlar

#### 3.2.1 Birinci yaklaşım

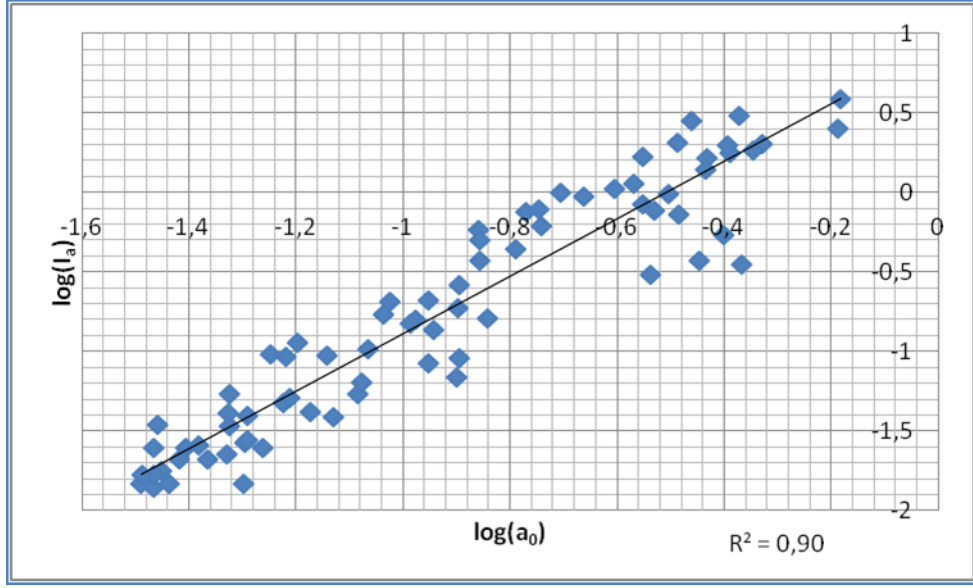
Bu yaklaşımda esas itibariyle en büyük deprem ivmesine bağlı  $a_0$  ortalama ivme parametresi tanımlanmış ve bu parametrenin de içinde olduğu yeni bir yaklaşım önerilmiştir.

Kritik ivmesi sıfır olan kayan bir bloğun bir deprem kaydındaki sadece pozitif değerli ivmelerin etkisinde hareket etmesi halinde yapacağı yer değiştirme (Newmark yer değiştirmesi)  $\delta^+$ , ters yöndekilerden elde edilen de  $\delta^-$  ile gösterilsin. Bunlara sırasıyla pozitif salt yer değiştirme ve negatif salt yer değiştirme diyelim.

Pozitif ve negatif yönlerde ait en büyük ivme  $a^+ = a_{max}$  ve  $a^- = -a_{min}$  değerlerinin salt yer değiştirme miktarları ile ağırlıklı ortalaması aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$a_0 = \frac{a^+ \delta^+ + a^- \delta^-}{\delta^+ + \delta^-} \quad (3.12)$$

Arias indeksi ile ortalama ivme  $a_0$  arasındaki ilişki Şekil 3.3'te açıkça görülmektedir.



**Şekil 3.3 :**  $\log I_a - \log a_0$  ilişkisi.

Doğrusal regresyonun determinasyon katsayısı  $R^2 = 0,90$ , standart sapması  $\sigma = 0,124$  ve denklemi de aşağıdaki gibidir:

$$\log a_0 = 0,5 \log I_a - 0,5516 \quad (3.13)$$

Yapılan incelemeler sonucu Çizelge 3.1'deki 29 adet depremin 374 tane gözlemine dayanarak hem Arias indeksine  $I_a$ , hem kritik ivmeye  $a_c$ , hemde ortalama ivme değerine  $a_0$  bağlı olacak şekilde;

$$\begin{aligned} \log \delta = & 0,7367 \log I_a + 2,9185 \log a_0 - 0,9723 \log a_c \\ & + 2,1491 \log a_0 \log a_c - 0,5436 \log I_a \log a_c \\ & + 0,3924 \log a_0 \log I_a + 0,3231 \log I_a \log a_0 \log a_c \\ & - 0,1066 \end{aligned} \quad (3.14)$$

elde edilmiştir. Bu yaklaşımda  $R^2 = 0,87$  ve  $\sigma = 0,351$  olup Öneri-A formu olarak adlandırılacaktır.  $R^2 = 0,867$  ve  $\sigma = 0,3513$  olan daha sade bir yaklaşım ise;

$$\begin{aligned} \log \delta = & 0,4159 \log I_a + 2,7695 \log a_0 - 1,021 \log a_c + 2,006 \log a_0 \log a_c \\ & - 0,7857 \log I_a \log a_c - 0,1457 \end{aligned} \quad (3.15)$$

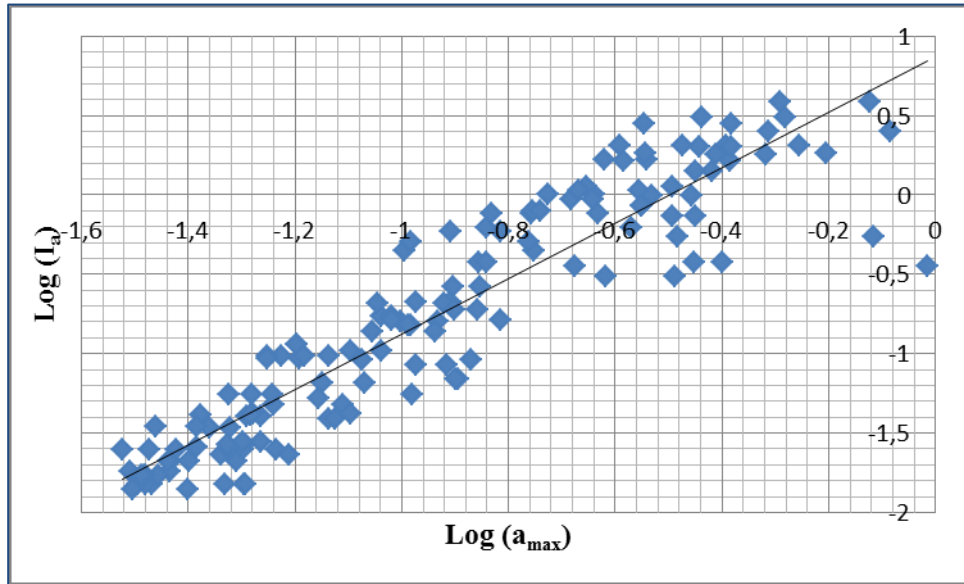
şeklinde elde edilmiş olup Öneri-B formu olarak adlandırılacaktır.

### 3.2.2 İkinci yaklaşım

Çizelge 3.1'deki deprem verileri kullanılarak maksimum ivme ( $a_{max}$ ) değerine bağlı hesaplamayı esas alan Bağıntı 3.3 ve Bağıntı 3.7'nin kombinasyonu ile deprem büyüklüğü ( $M$ ) değeri de hesaba katılarak başka bir yaklaşım önerilmiştir (Son Form).

$$\log \delta = 1,317 \log I_a - 1,521 \log a_c + 0,494 \log \left( \frac{a_c}{a_{max}} \right) + 2,202 \log \left( 1 - \frac{a_c}{a_{max}} \right) + 0,044 \log M - 0,454 \quad (3.16)$$

Bu yaklaşımda determinasyon katsayısı  $R^2 = 0,91$  ve standart sapma  $\sigma = 0,284$ 'tür. Arias indeksi ile maksimum ivme ( $a_{max}$ ) arasındaki ilişki incelendiğinde logaritmik olarak  $R^2 = 0,86$  ve  $\sigma = 0,147$  olan bir regresyon uyumunun varlığı Şekil 3.4'ten görülmektedir.



Şekil 3.4 :  $\log I_a - \log a_{max}$  ilişkisi.

Aynı şekilde bu iki parametre arasındaki regresyon denklemi de aşağıdaki gibi elde edilmiştir:

$$\log a_{max} = 0,491 \log I_a - 0,560 \quad (3.17)$$

Ayrıca yapılan inceleme sonucu  $R^2 = 0,88$  ve  $\sigma = 0,134$  olacak şekilde ;

$$\log a_{max} = 0,5585 \log I_a - 1,724 \log M + 0,8646 \quad (3.18)$$

regresyon denklemi elde edilmiştir.

### 3.2.3 Yaklaşımlar arası kıyaslama

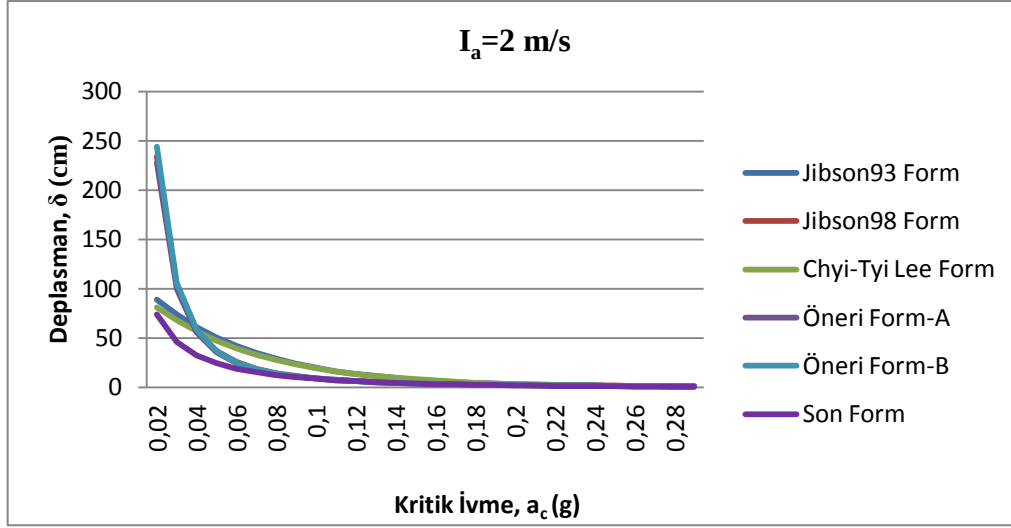
Sonuçlar arası bir karşılaştırma yapabilmek için hem orijinal formül hem de bu çalışmayla elde edilen formlara ait değerler Çizelge 3.2’de toplanmıştır. Buna göre ilgili tablo incelendiğinde Son Form olarak adlandırılan formülün Türkiye deprem verilerine göre daha uygun olduğu ( $R^2 = 0,91$ ;  $\sigma = 0,284$ ) tespit edilmiştir. Ayrıca Jibson-93 formu ile Chyi-Tyi Lee formunun Türkiye verilerine göre elde edilen sonuçlarının orijinal sonuçlara kıyasla daha az regresyon uyumunun olduğu görülebilmektedir. Bunun yanı sıra Jibson-98 formu için durum tam aksine olup Türkiye verilerine göre elde edilen sonuçların regresyon uyumunun orijinal forma göre daha iyi olduğu anlaşılmaktadır.

**Çizelge 3.2 : Yaklaşımlar Arası Kıyaslama.**

|                    |                                                 | $R^2$ | $\sigma$ (standart sapma) |
|--------------------|-------------------------------------------------|-------|---------------------------|
| Jibson93 Formu     | Orijinal Form (Bağ.-3.4)                        | 0,87  | 0,409                     |
|                    | Türkiye Verilerine Göre Elde Edilen (Bağ.-3.9)  | 0,79  | 0,442                     |
| Jibson98 Formu     | Orijinal Form (Bağ.-3.7)                        | 0,83  | 0,375                     |
|                    | Türkiye Verilerine Göre Elde Edilen (Bağ.-3.10) | 0,855 | 0,365                     |
| Chyi-Tyi Lee Formu | Orijinal Form (Bağ.-3.8)                        | 0,89  | 0,295                     |
|                    | Türkiye Verilerine Göre Elde Edilen (3.11)      | 0,82  | 0,406                     |
| Öneri-A Formu      | Türkiye Verilerine Göre Elde Edilen (Bağ.-3.14) | 0,87  | 0,351                     |
| Öneri-B Formu      | Türkiye Verilerine Göre Elde Edilen (Bağ.-3.15) | 0,867 | 0,3513                    |
| Son Form           | Türkiye Verilerine Göre Elde Edilen (Bağ.-3.16) | 0,913 | 0,284                     |

Örnek bir çalışma olarak Şekil 3.5 incelendiğinde Jibson-98 formunun orijinal ve Türkiye verilerine uyarlanmış hali ile Öneri-A formu ve Öneri-B formu ile elde edilen sonuçların birbirine yakın değerler olduğu ve bunların bir grup halinde

(bundan sonra 1. Grup olarak ifade edilecektir); Jibson-93 ve Chyi-Tyi Lee formlarının ise ayrı bir grup (bundan sonra 2. Grup olarak ifade edilecektir) olarak değerlendirilebileceği, Son Form olarak adlandırılan çalışmanın ise ayrı bir davranış sergilediği görülmektedir.



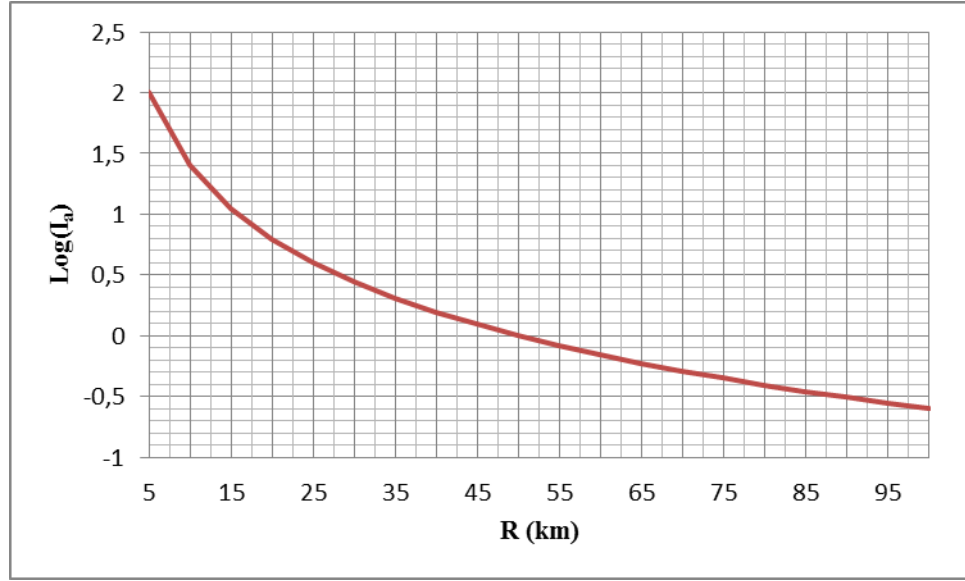
**Şekil 3.5 : Sabit Arias İndeksi İçin Deplasman – Kritik İvme İlişkisi.**

Türkiye deprem verilerine göre hazırlanmış olan bu grafik incelendiğinde yaklaşık  $a_c = 0,04g$  noktasında, Son Form hariç, bütün formların örtüştüğü, yani yaklaşık olarak aynı deplasman miktarı sonucunu verecekleri görülmektedir. Bu noktanın solunda, yani daha küçük kritik ivme değerlerinde, 1. grup formlar 2. grup formlara göre daha büyük deplasman değerleri vermektedir. Bu noktanın sağında ise, yani daha büyük kritik ivme değerlerinde, 2. grup formlar 1. grup formlara göre nispeten daha büyük deplasman değerleri vermektedir. Ancak  $a_c = 0,2g$ 'den sonra formlar arasında yine iyi bir uyumun olduğu söylenebilir. Dönüm noktası olan  $a_c = 0,04g$  noktasının sağ ve solundaki değerleri kıyaslamak gerekirse sağdaki formlar arası uyumun sol taraftaki uyuma göre daha iyi olduğu görülmektedir. Ancak Son Form olarak adlandırılan denklemin Türkiye verilerine göre daha uygun olduğu ilgili regresyon analizinden anlaşılmaktadır.

### 3.3 İstanbul Verilerine Göre İlgili Değerlerin Elde Edilmesi

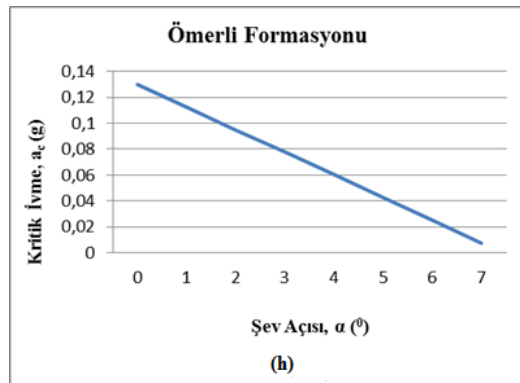
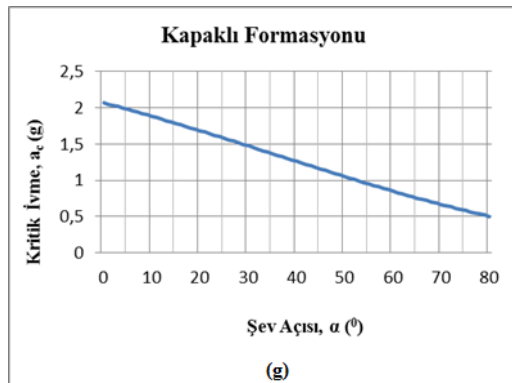
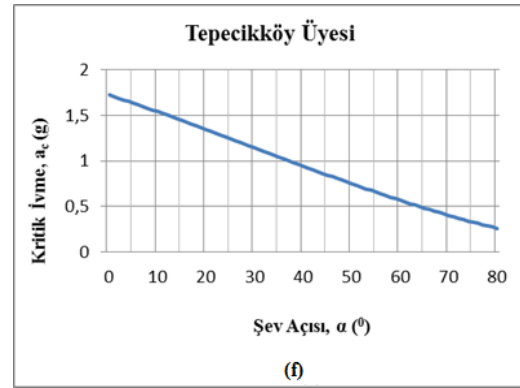
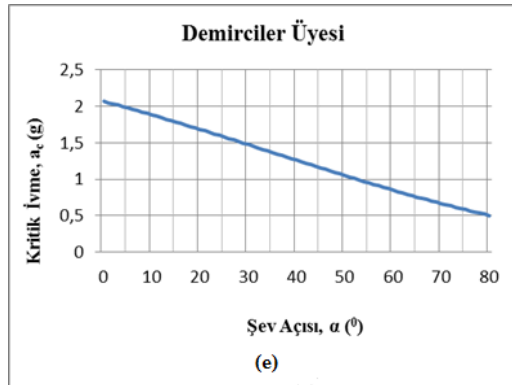
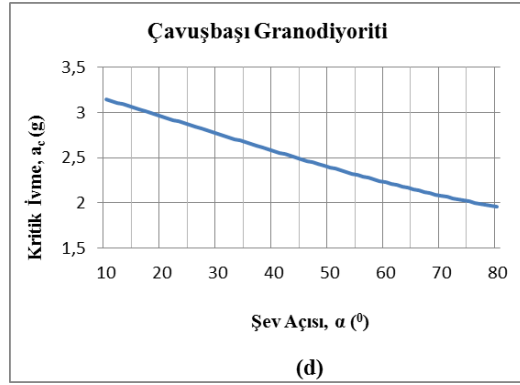
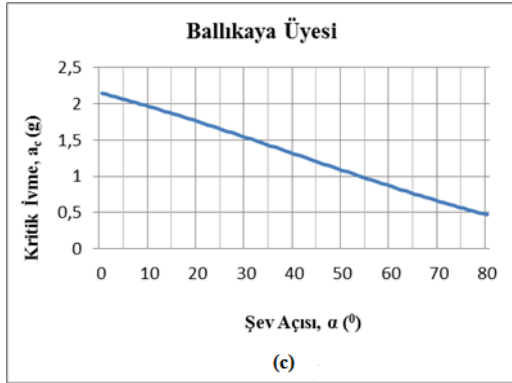
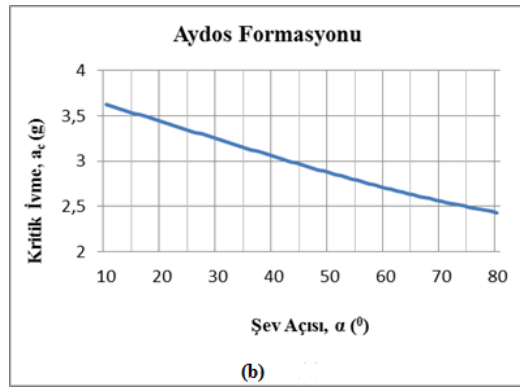
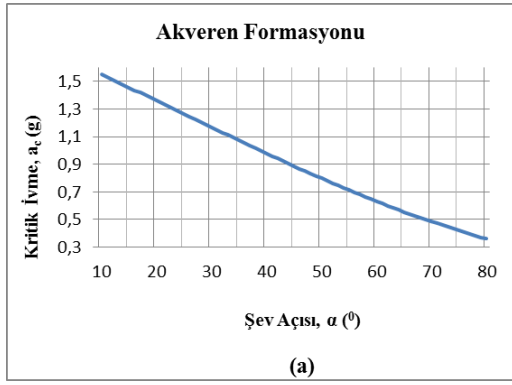
Bilindiği üzere beklenen İstanbul depremi için depremin büyüklüğü  $M = 7,5$  olarak tahmin edilmekte olup literatürde de bu değer kullanılmaktadır. Yukarıdaki Bağıntı

3.6 kullanılarak Arias indeksi ile  $R$  mesafesi arasında  $M = 7,5$  için aşağıdaki (Şekil 3.6) gibi bir ilişki kurulabilir:

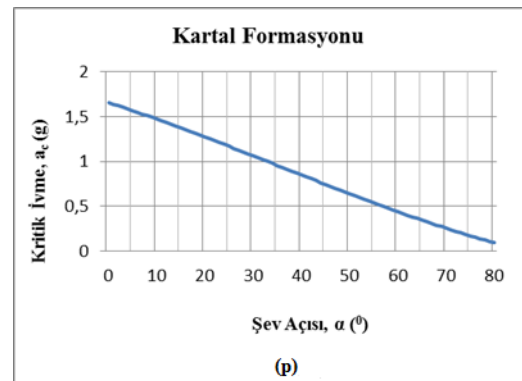
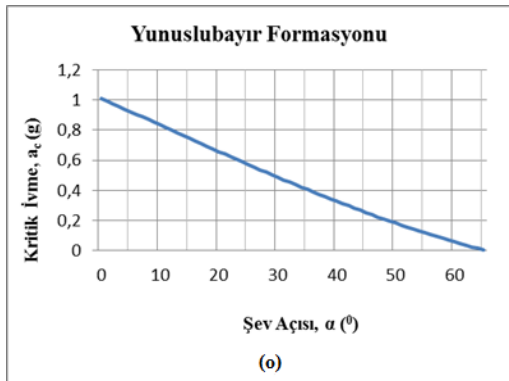
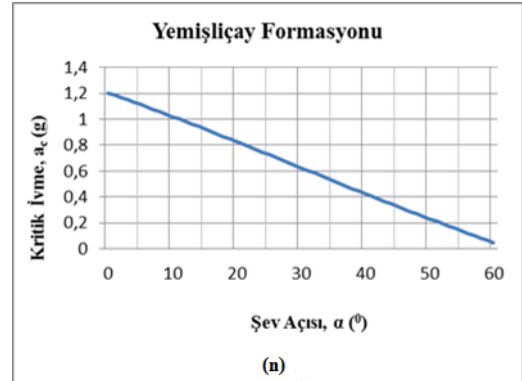
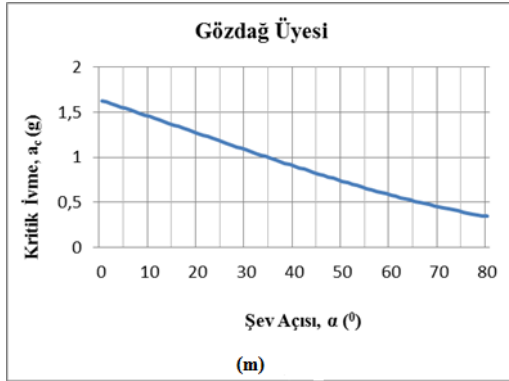
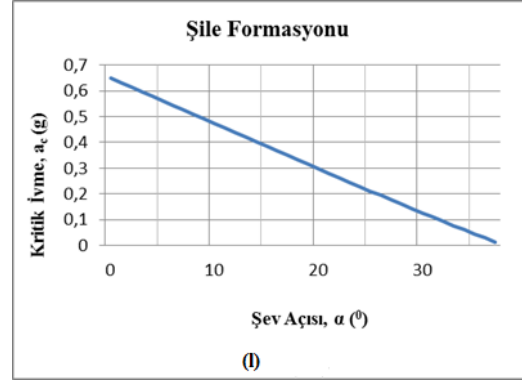
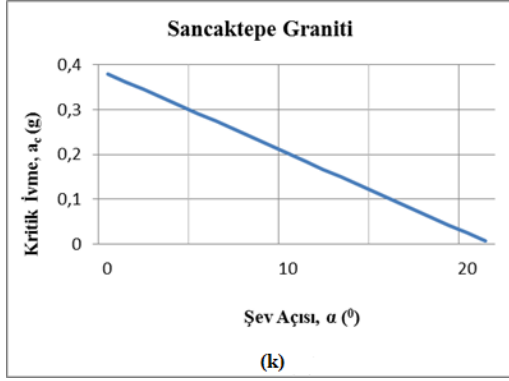
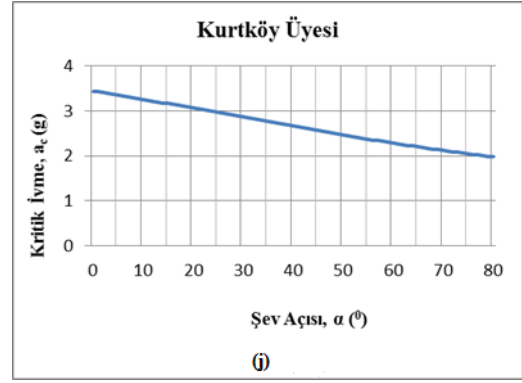
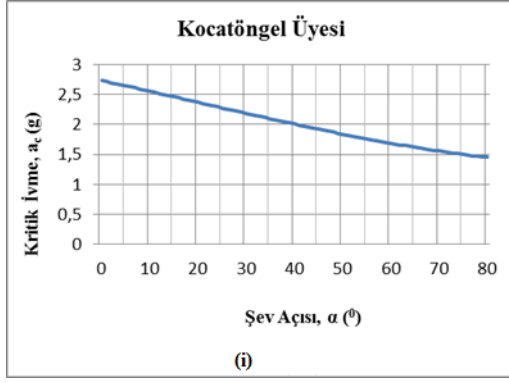


**Şekil 3.6 :** Olası İstanbul Depremi İçin  $R - \log I_a$  ilişkisi.

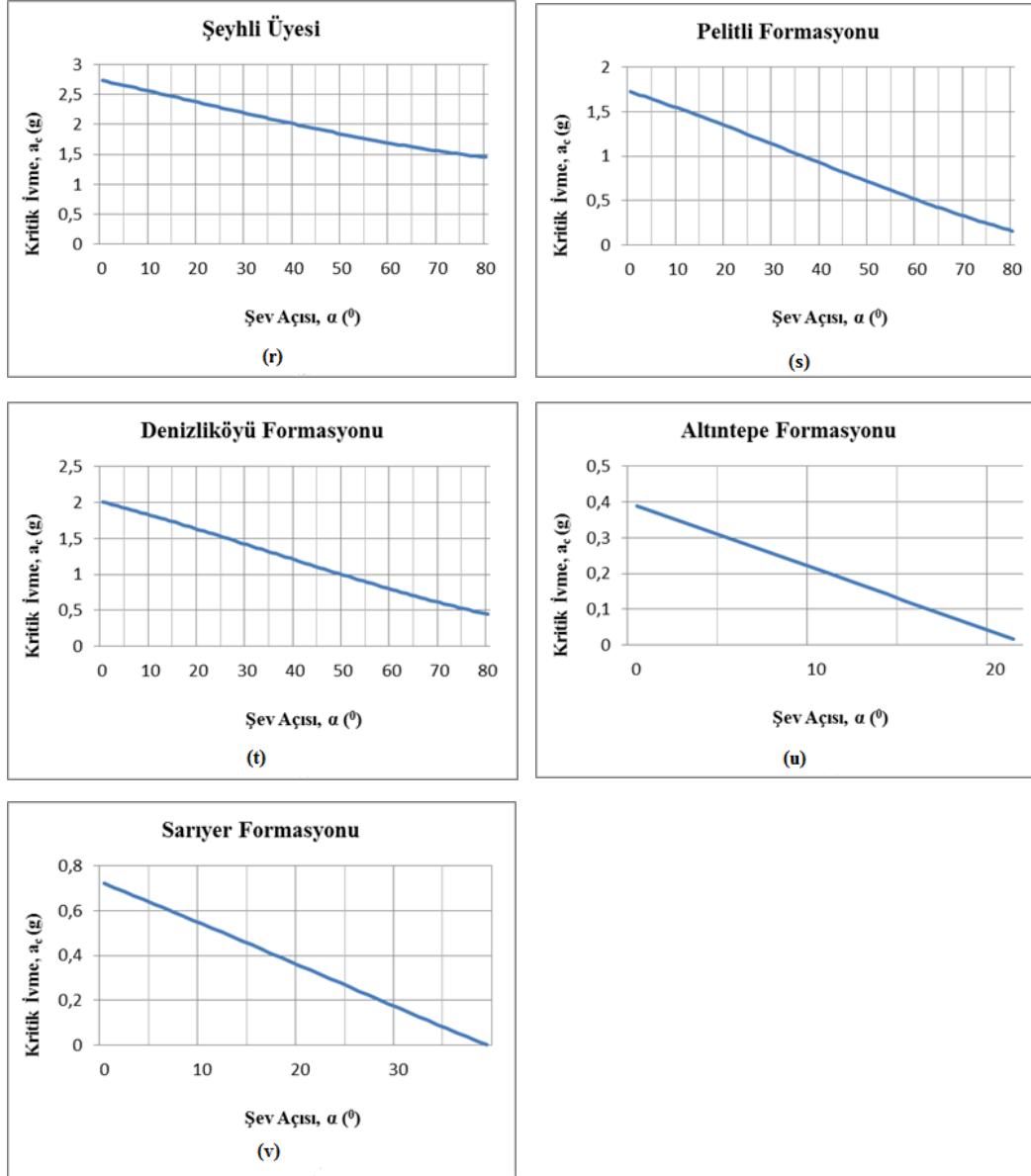
Çizelge 2.1'de belirtilen her bir formasyona ait Bağlantı 3.2 ile ifade edilen kritik ivme değerleri için ilgili grafikler aşağıdaki gibi elde edilmiştir (Şekil 3.7). Burada elde edilen grafikler Bağlantı 3.2 için zemin formasyonu bazında elde edilen grafikler olup grafik değerleri bazen çok yüksek sonuçlar vermiştir ( $a_c = g; 1,5g; 2g$  vb.). Burada asıl amaç gerçekte bu değerlerin varlığını kabul etmek değil teorik anlamda grafiğin seyrinin incelenmesidir. Verilen grafikler Çizelge 2.1'deki değerlerin en kritik durumu dikkate alınarak elde edilmiş olup formasyonlar için ön fikir vermesi anlamında önem arz etmektedir. Daha net bir hesaplama için çalışma yapılacak bölgede zemin etüdü yapılarak elde edilen zemin değerlerinin hesap için kullanılması gerekmektedir. Bu anlamda elde edilen veriler ile Bağlantı 3.2, Şekil 3.7 ve Şekil 3.8'den yararlanarak Çizelge 3.3 kullanılabilir. Söz konusu bu hesaplama için kullanılacak olan ve ağırlıklı olarak İstanbul İli Anadolu Yakası konumlu olan formasyonlara ait kritik ivme grafikleri aşağıdaki gibi elde edilmiştir (Şekil 3.7):



**Şekil 3.7 : Anadolu Yakası Zemin Formasyonları İçin ( $a_c$ ) Kritik İvme Grafikleri.**

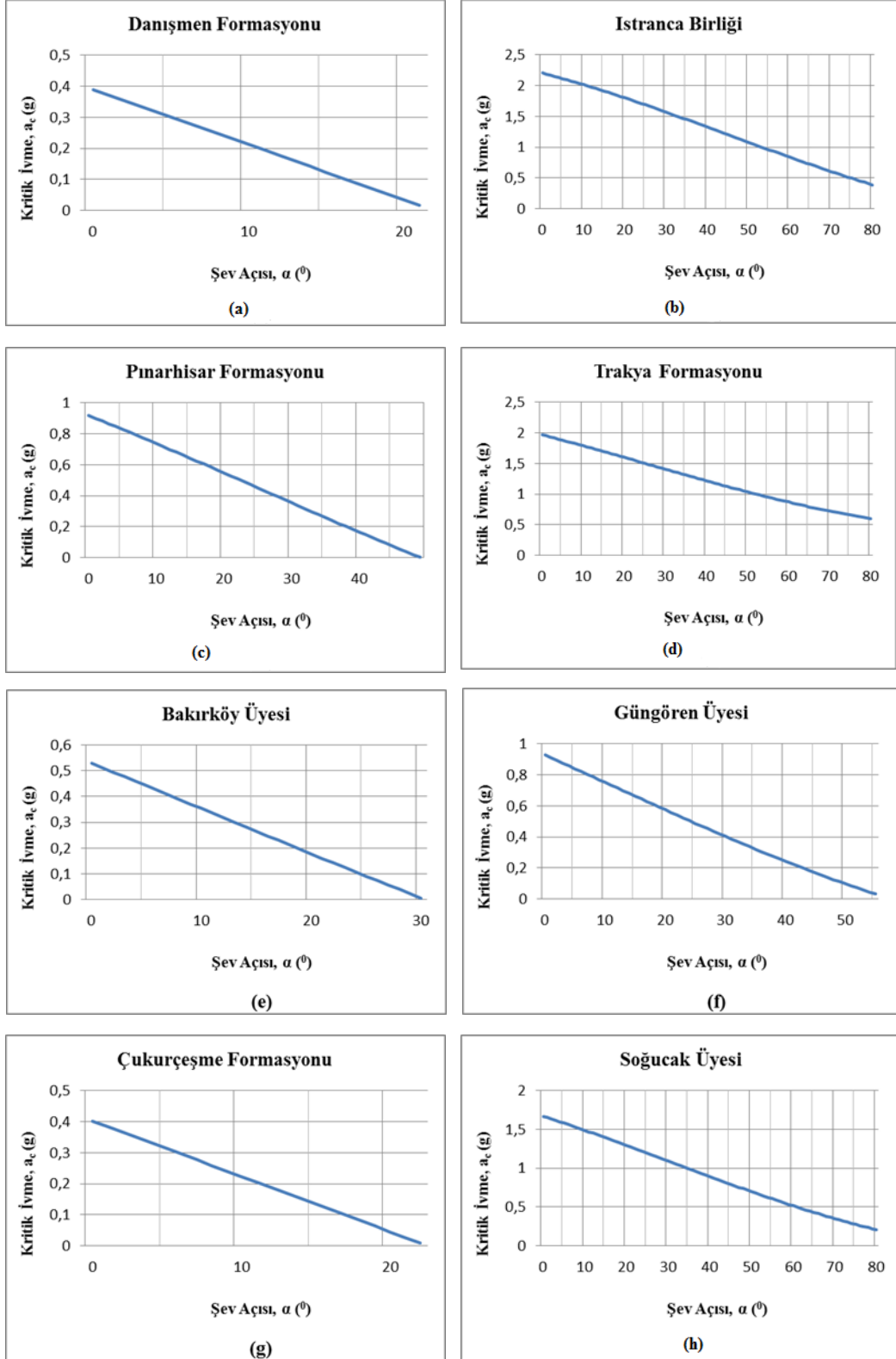


**Şekil 3.7 (devam) : Anadolu Yakası Zemin Formasyonları İçin ( $a_c$ ) Kritik İvme Grafikleri.**

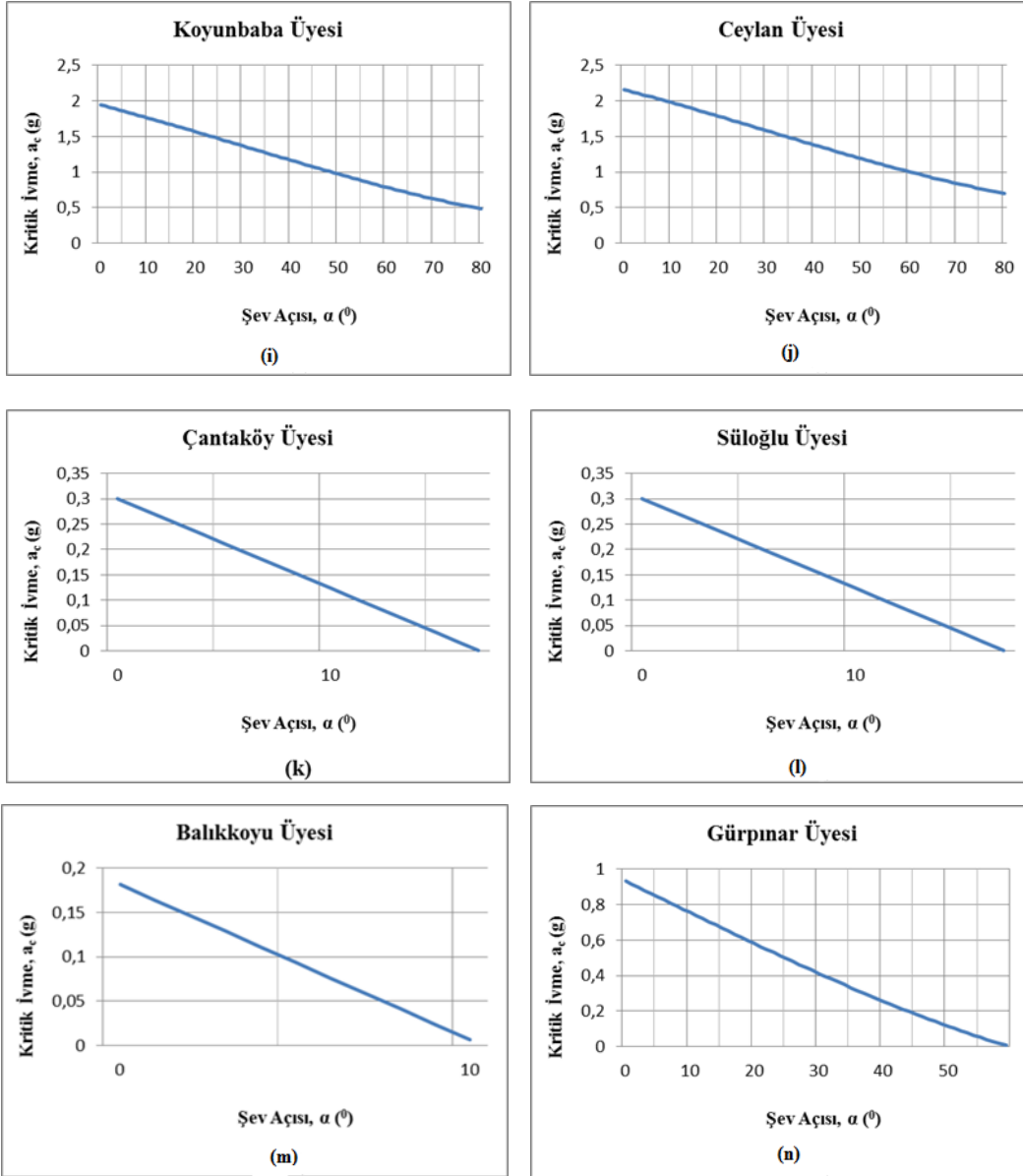


**Şekil 3.7 (devam) :** Anadolu Yakası Zemin Formasyonları İçin ( $a_c$ ) Kritik İvme Grafikleri.

Ayrıca İstanbul İli Avrupa Yakası konumlu olan formasyonlara ait kritik ivme grafikleri aşağıdaki gibi elde edilmiştir (Şekil 3.8). Bu grafikler hazırlanırken şehrin her iki yakasında da mevcut olan formasyonlar ağırlıklı olarak hangi yakada konumlu ise o yaka adı altında ele alınmıştır. Kuşdili Formasyonu ise bu anlamda sınılaşma riski yüksek güncel birikintiler kapsamında değerlendirilmiş olup grafik değerlendirmesi yapılmamıştır.



**Şekil 3.8 :** Avrupa Yakası Zemin Formasyonları İçin  $a_c$  Kritik İvme Grafikleri.



**Şekil 3.8 (devam) :** Avrupa Yakası Zemin Formasyonları İçin  $a_c$  Kritik İvme Grafikleri.

Beklenen İstanbul depremine göre ( $M = 7,5$ ) Bağntı 3.16 kullanılarak Arias indeksinin logaritmik değişimi ( $\log I_a$ ) ile kritik ivme ( $a_c$ ) değerine bağlı zemin deplasman miktarının tespiti için aşağıda verilen Çizelge 3.3 hazırlanmıştır:

**Çizelge 3.3 : Deprem Kaynaklı Zemin Kaymasına Bağlı Deplasman Miktarı ( $\delta$ , cm).**

|                                  |      | LogI <sub>a</sub> (m/s) |     |     |     |     |     |     |     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        |
|----------------------------------|------|-------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
|                                  |      | -0,5                    | 0,0 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1,0 | 1,1   | 1,2   | 1,3   | 1,4   | 1,5   | 1,6   | 1,7   | 1,8   | 1,9   | 2,0    |
| a <sub>c</sub> , Kritik İvme (g) | 0,01 | 23                      | 82  | 285 | 364 | 466 | 595 | 759 | 968 | 1.235 | 1.574 | 2.005 | 2.554 | 3.252 | 4.140 | 5.269 | 6.706 | 8.532 | 10.855 |
|                                  | 0,03 | 5                       | 21  | 83  | 107 | 139 | 179 | 231 | 297 | 381   | 488   | 625   | 800   | 1.023 | 1.306 | 1.668 | 2.128 | 2.714 | 3.460  |
|                                  | 0,05 | 2                       | 10  | 44  | 58  | 75  | 98  | 128 | 166 | 214   | 277   | 356   | 458   | 588   | 754   | 965   | 1.235 | 1.579 | 2.017  |
|                                  | 0,10 | 0                       | 2   | 16  | 22  | 29  | 40  | 53  | 70  | 93    | 121   | 159   | 206   | 268   | 347   | 448   | 577   | 742   | 953    |
|                                  | 0,15 |                         | 1   | 7   | 11  | 15  | 21  | 29  | 40  | 53    | 71    | 94    | 125   | 164   | 214   | 279   | 362   | 468   | 605    |
|                                  | 0,20 |                         | 0   | 4   | 6   | 8   | 12  | 18  | 25  | 34    | 47    | 63    | 85    | 112   | 149   | 195   | 255   | 333   | 433    |
|                                  | 0,25 |                         |     | 2   | 3   | 5   | 8   | 11  | 16  | 23    | 33    | 45    | 61    | 82    | 110   | 146   | 193   | 253   | 330    |
|                                  | 0,30 |                         |     | 1   | 1   | 3   | 5   | 7   | 11  | 16    | 24    | 33    | 46    | 63    | 85    | 114   | 151   | 200   | 263    |
|                                  | 0,35 |                         |     | 0   | 1   | 1   | 3   | 5   | 8   | 12    | 17    | 25    | 35    | 49    | 67    | 91    | 122   | 163   | 215    |
|                                  | 0,40 |                         |     | 0   | 0   | 1   | 2   | 3   | 5   | 8     | 13    | 19    | 28    | 39    | 54    | 74    | 101   | 135   | 180    |
|                                  | 0,45 |                         |     |     | 0   | 0   | 1   | 2   | 3   | 6     | 10    | 15    | 22    | 31    | 44    | 61    | 84    | 114   | 153    |
|                                  | 0,50 |                         |     |     |     | 0   | 0   | 1   | 2   | 4     | 7     | 11    | 17    | 25    | 36    | 51    | 71    | 97    | 131    |

### 3.4 Sismik Dalga Yayılımı Etkisi

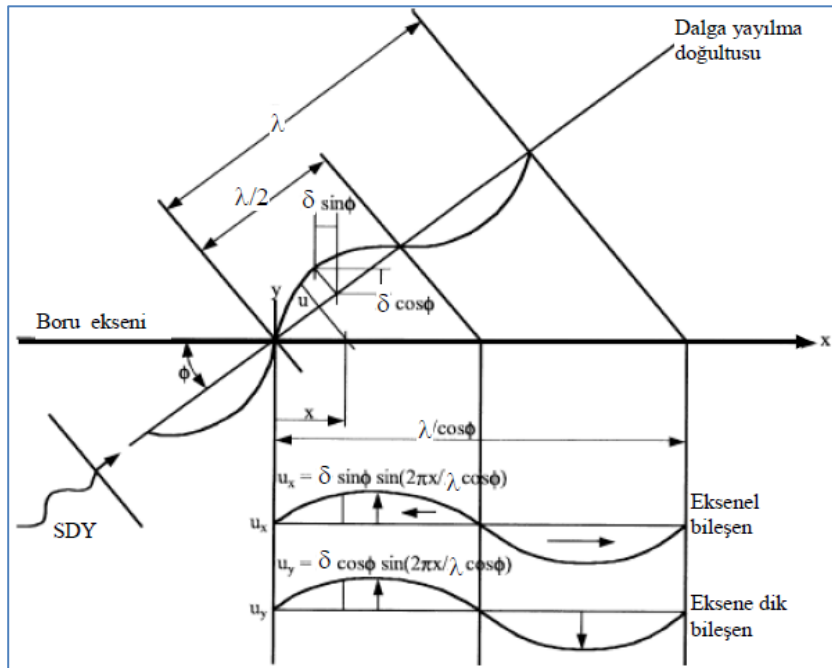
Sismik dalga yayılması, dalga uzunluğu  $\lambda$  ve dalga genliği  $\delta$  ile Şekil 3.9'daki gibi ifade edilebilir. Dalga genliği için Gregor [45] tarafından aşağıdaki formül verilmiştir. Bu formülde farklı fay mekanizmaları ve dalga tipleri dikkate alınmaktadır. Örneğin, yanal atım tipli fayda (Kuzey Anadolu Fay Hattı yanal atım bir fay olduğundan burada sadece yanal atım fay için olan ifadeye yer verilmiştir) kayma dalgası için ana kayada dalga genliği şu şekilde formüle edilmiştir:

$$\log \delta = -5,0 + 1,02M - 0,87 \log R \quad (3.19)$$

Burada  $M$ , depremin Richter cinsinden büyüklüğü,  $\delta$  (cm) sismik dalga yayılımı kaynaklı deplasman,  $R$  (km) ise fay hattına olan en yakın mesafedir.  $V_s$  kayma dalgası yayılma hızı ve  $T$  zemin hakim periyodu olmak üzere, dalga boyu

$$\lambda = V_s T \quad (3.20)$$

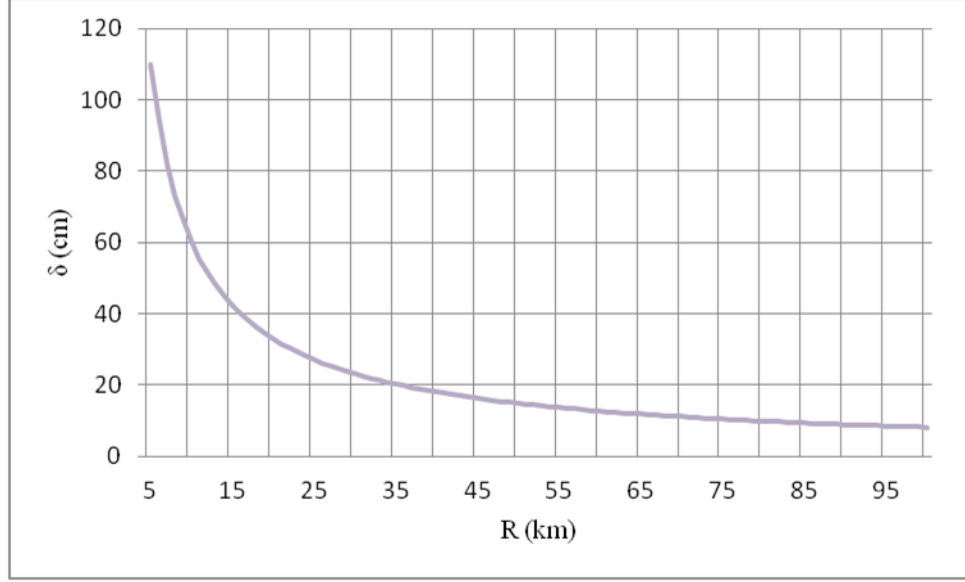
bağıntısından elde edilebilir [10].



Şekil 3.9 : Sismik Kayma Dalgası Yayılımı (SDY) [10].

### 3.5 Sismik Dalga Yayılımı Etkisinin İstanbul Verilerine Uygulanması

Bağıntı 3.19 dikkate alındığında olası İstanbul depremi  $M = 7,5$  için  $\delta - R$  ilişkisi aşağıdaki şekilde gösterilmiştir:



**Şekil 3.10 :** Olası İstanbul  $M = 7,5$  Depremi İçin  $\delta - R$  İlişkisi.

Çizelge 2.1’de belirtilen her bir formasyon için ilgili değerler kullanılarak  $\lambda$ , dalga boyu tablosu Bağıntı 3.20 kullanılarak aşağıdaki gibi elde edilmiştir:

**Çizelge 3.4 : Formasyon Bazında Dalga Boyu Aralığı.**

| Formasyon Tanımı        |                       | Ortalama Jeofizik Değerler            |                             | $\lambda$ , Dalga Boyu (m) |          |
|-------------------------|-----------------------|---------------------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------|
| Formasyon Adı           | Üye Adı               | Kesme Dalgası Hızı,<br>$V_s$ ( m/sn ) | Hakim Peryod,<br>$T$ ( sn ) | En Küçük                   | En Büyük |
| Akveren                 |                       | 300-400                               | 0,15-0,60                   | 45                         | 240      |
| Altıntepe               |                       | 300-600                               | 0,30-0,60                   | 90                         | 360      |
| Aydos                   |                       | 400-750                               | 0,15-0,35                   | 60                         | 263      |
| Çavuşbaşı Granodiyoriti |                       | 400-600                               | 0,25-0,40                   | 100                        | 240      |
| Çekmece                 | Bakırköy              | 400-600                               | 0,25-0,40                   | 100                        | 240      |
| Çekmece                 | Güngören              | 250-400                               | 0,35-0,70                   | 88                         | 280      |
| Çukurçeşme              |                       | 300-550                               | 0,35-0,60                   | 105                        | 330      |
| Danışmen                |                       | 350-550                               | 0,35-0,55                   | 123                        | 303      |
| Danışmen                | Gürpınar              | 250-500                               | 0,35-0,60                   | 88                         | 300      |
| Danışmen                | Süloğlu               | 200-300                               | 0,15-0,60                   | 30                         | 180      |
| Danışmen                | Çantaköy              | 200-300                               | 0,15-0,60                   | 30                         | 180      |
| Denizli Köyü            | Ayrılmamış            | 400-800                               | 0,15-0,35                   | 60                         | 280      |
| Gebze Grubu             | Ballıkaya Formasyonu  | 450-750                               | 0,15-0,40                   | 68                         | 300      |
| Gebze Grubu             | Demirciler Formasyonu | 400-600                               | 0,15-0,45                   | 60                         | 270      |
| Gebze Grubu             | Tepecikköy            | 400-600                               | 0,15-0,45                   | 60                         | 270      |
| Istranca Birliği        |                       | 400-800                               | 0,10-0,30                   | 40                         | 240      |
| Kapaklı                 |                       | 400-600                               | 0,25-0,50                   | 100                        | 300      |
| Kartal (Pendik)         | Kozyatağı             | 500-750                               | 0,15-0,35                   | 75                         | 263      |
| Kırklareli Grubu        | Ceylan Formasyonu     | 400-600                               | 0,25-0,40                   | 100                        | 240      |

**Çizelge 3.4 (devam) : Formasyon Bazında Dalga Boyu Aralığı.**

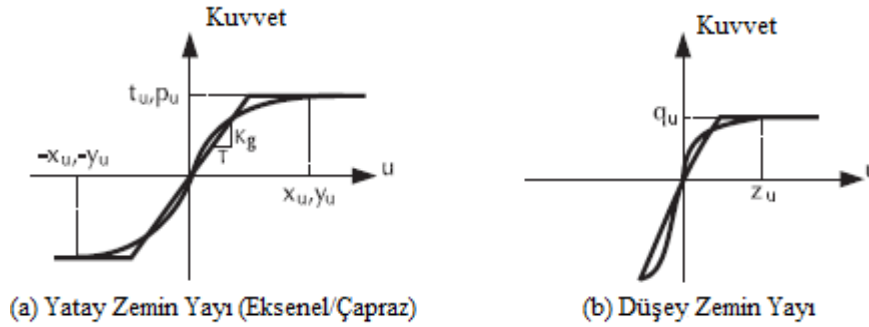
| Formasyon Tanımı   |                       | Ortalama Jeofizik Değerler            |                             | $\lambda$ , Dalga Boyu (m) |          |
|--------------------|-----------------------|---------------------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------|
| Formasyon Adı      | Üye Adı               | Kesme Dalgası Hızı,<br>$V_s$ ( m/sn ) | Hakim Peryod,<br>$T$ ( sn ) | En Küçük                   | En Büyük |
| Kırklareli Grubu   | Balıkkoyu             | 250-400                               | 0,15-0,60                   | 38                         | 240      |
| Kırklareli Grubu   | Koyunbaba             | 250-500                               | 0,35-0,60                   | 88                         | 300      |
| Kırklareli Grubu   | Soğucak               | 400-700                               | 0,25-0,45                   | 100                        | 315      |
| Kuşdili Formasyonu |                       | 150-250                               | 0,50-0,80                   | 75                         | 200      |
| Ömerli             |                       | 100-200                               | 0,20-0,90                   | 20                         | 180      |
| Pelitli            |                       | 400-800                               | 0,15-0,35                   | 60                         | 280      |
| Pınarhisar         |                       | 300-400                               | 0,15-0,60                   | 45                         | 240      |
| Polenezköy Grubu   | Kocatöngel Formasyonu | 400-700                               | 0,20-0,35                   | 80                         | 245      |
| Polenezköy Grubu   | Kurtköy Formasyonu    | 400-700                               | 0,20-0,35                   | 80                         | 245      |
| Sancaktepe Graniti |                       | 350-650                               | 0,20-0,40                   | 70                         | 260      |
| Sarıyer            |                       | 400-600                               | 0,25-0,40                   | 100                        | 240      |
| Şile               | İmam Tepesi           | 300-500                               | 0,15-0,60                   | 45                         | 300      |
| Trakya             | Ayrılmamış            | 450-700                               | 0,20-0,40                   | 90                         | 280      |
| Yayalar            | Gözdağ                | 400-600                               | 0,25-0,40                   | 100                        | 240      |
| Yayalar            | Şeyhli                | 400-700                               | 0,20-0,35                   | 80                         | 245      |
| Yayalar            | Gözdağ                | 400-600                               | 0,25-0,40                   | 100                        | 240      |
| Yemişliçay         |                       | 400-600                               | 0,15-0,40                   | 60                         | 240      |
| Yunuslubayır       |                       | 300-500                               | 0,15-0,60                   | 45                         | 300      |

### 3.6 Zemin - Gömülü Boru Etkileşimi

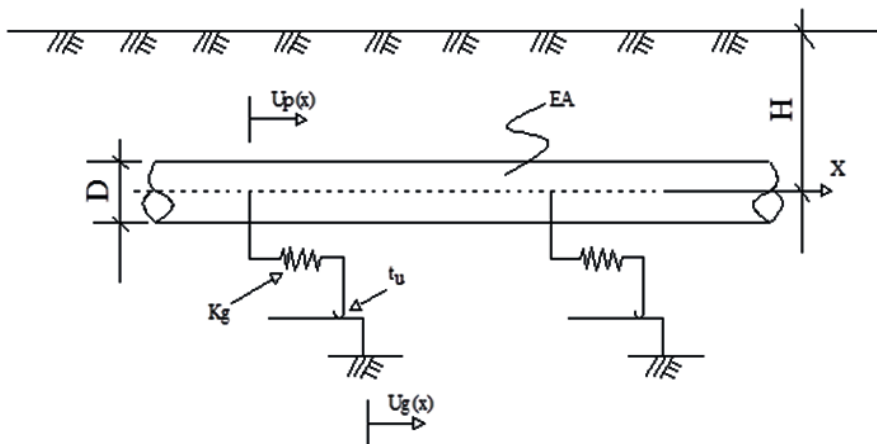
Boru ve zeminin rölatif hareketleri boru-zemin ara yüzeyinde gerilmelere neden olur. Zemini eşdeğer yaylar ile modellemek mümkündür (Şekil 3.11 ve Şekil 3.12). ASCE’de elasto-plastik yay katsayıları, taşıyabildikleri en büyük kuvvet ( $t_u, p_u, q_u$ ) ve elastik davranış gösterdikleri en büyük uzama değerlerinin ( $x_u, y_u, z_u$ ) yarısı ile ifade edilmiştir. ASCE kabulüne göre zemin yay katsayıları için aşağıdaki tablo hazırlanmıştır [46].

**Çizelge 3.5 : Zemin Yatak Katsayıları [46].**

| Yön     | Yatak Katsayısı       |
|---------|-----------------------|
| Eksenel | $K_u = 2t_u / x_u$    |
| Yanal   | $K_v = 2p_u / y_u$    |
| Yukarı  | $K_{wu} = 2q_u / z_u$ |
| Aşağı   | $K_{wd} = 2q_u / z_u$ |



**Şekil 3.11 : Boru-Toprak Arayüzünde İdeal Yük-Deformasyon İlişkisi [46].**



**Şekil 3.12 : Sürekli Boru -Zemin Arayüzünde İdeal Elasto-Plastik Yaylar.**

### 3.6.1 Boyuna (boru eksenine paralel) hareket

Boru eksenine paralel olan göreceli hareket boru-toprak ara yüzlerinde eksen boyunca kuvvetlere neden olur. Elasto-plastik model için ASCE (American Society of Civil Engineering) kil ve kum dolgu için aşağıdaki ilişkileri vermektedir [46]:

Kum için;

$$t_u = \frac{\pi}{2} D \bar{\gamma} H (1 + k_0) \tan(k\phi) \quad (3.21)$$
$$X_u = 2,54 \sim 5,08 \text{ mm}$$

Kil için;

$$t_u = \pi D \alpha S_u \quad (3.22)$$
$$X_u = 5,08 \sim 10,16 \text{ mm}$$

$X_u$  deplasmanı için aşağıdaki tablo kullanılabilir:

**Çizelge 3.6 :**  $X_u$  Deplasmanı ( $\times 10^{-3}$  m).

|     | Düşük | Orta | Sıkı |
|-----|-------|------|------|
| Kum | 5     | 4    | 3    |
| Kil | 10    | 9    | 8    |

$$\alpha = 0,608 - 0,123 S_u - \frac{0,274}{(S_u^2 + 1)} + \frac{0,695}{(S_u^3 + 1)} \quad (3.23)$$

Burada  $S_u$  , kPa/100 cinsinden yazılmalıdır.

$$k_0 = 1 - \sin \phi \quad (3.24)$$

Yukarıdaki  $k$  ve  $k_0$  değerleri için aşağıdaki tablolardan yararlanılabilir:

**Çizelge 3.7 :**  $k$  Değerleri [46].

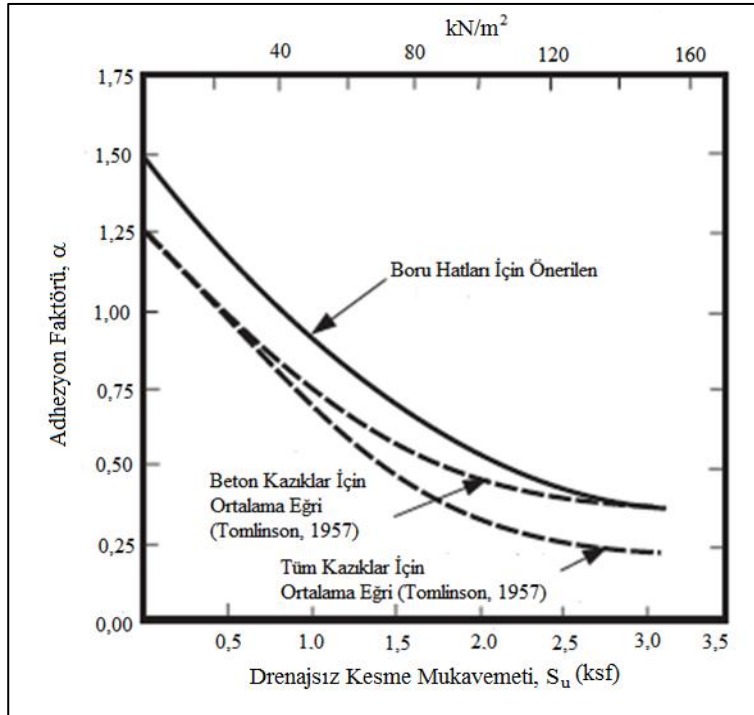
| Boru Kaplaması | $k$ |
|----------------|-----|
| Beton          | 1,0 |
| Kömür Katranı  | 0,9 |
| Sert Çelik     | 0,8 |
| Düz Çelik      | 0,7 |
| Epoksi         | 0,6 |
| Polietilen     | 0,6 |

**Çizelge 3.8 :  $k_0$  Değerleri [46].**

| Toprak Cinsi         | $k_0$     |
|----------------------|-----------|
| Zayıf (Gevşek) Zemin | 0,5 – 0,6 |
| Yoğun Zemin          | 0,3 – 0,5 |
| Kil (Drenajlı)       | 0,5 – 0,6 |
| Kil (Drenajsız)      | 0,8 – 1,1 |

Yukarıdaki (3.23) bağıntısıyla verilen  $\alpha$  değeri Şekil 3.13'ten de tespit edilebilir. Burada  $D$ , çap;  $S_u$  çevreleyen toprağın drenajsız kayma mukavemeti;  $\alpha$ ,  $S_u$  ile değişen deneysel yapışma (adhezyon) katsayısı;  $\bar{\gamma}$  toprağın efektif birim hacim ağırlığıdır.  $H$ , boru hattı ekseninin derinliği;  $\phi$ , içsel sürtünme açısı ve  $k_0$ , durağan konumda yanıl toprak basıncı katsayısıdır. Boru hattı gömme koşullarının çoğunda tahmini olarak  $k_0 = 1$  alınması tavsiye edilmektedir. Son olarak  $k$ , dış yüzey özelliği ve borunun sertliğine bağılı olarak azaltma faktörüdür. Beton, çimento kaplamalı olan çelik veya dökme demir borular için  $k = 1$ , dökme demir veya ham çelik için  $k$  aralığı 0,7~1,0 arasında değişir. Düz ve göreceli olarak sert kaplaması olan bir boru veya düz çelik için bu değer 0,5~0,7 aralığında olmalıdır [12].

Adhezyon faktörü drenajsız kesme mukavemetinin bir azalan fonksiyonudur ve  $\alpha$  ile  $S_u$  arasındaki ilişki Şekil 3.13'te gösterilmiştir.



**Şekil 3.13 : Adhezyon Faktörü –  $S_u$  İlişkisi [46].**

### 3.6.2 Yatay (enine) hareket

Yatay düzlemde boru eksenine dik olan göreceli hareket, boru-toprak ara yüzünde yatay enine kuvvetlerin doğmasına neden olur. Elasto-plastik model dikkate alındığında, ASCE kil ve kum için aşağıdaki bağıntıları vermektedir:

Kum için;

$$P_u = \bar{\gamma} H N_{qh} D \quad (3.25)$$

$$y_u = \begin{cases} (0,07 \sim 0,10)(H + D/2) & \text{zayıf kum} \\ (0,03 \sim 0,05)(H + D/2) & \text{orta derece kum} \\ (0,02 \sim 0,03)(H + D/2) & \text{yoğun (sıkı) kum} \end{cases} \quad (3.26)$$

Kil için;

$$P_u = S_u N_{ch} D \quad (3.27)$$

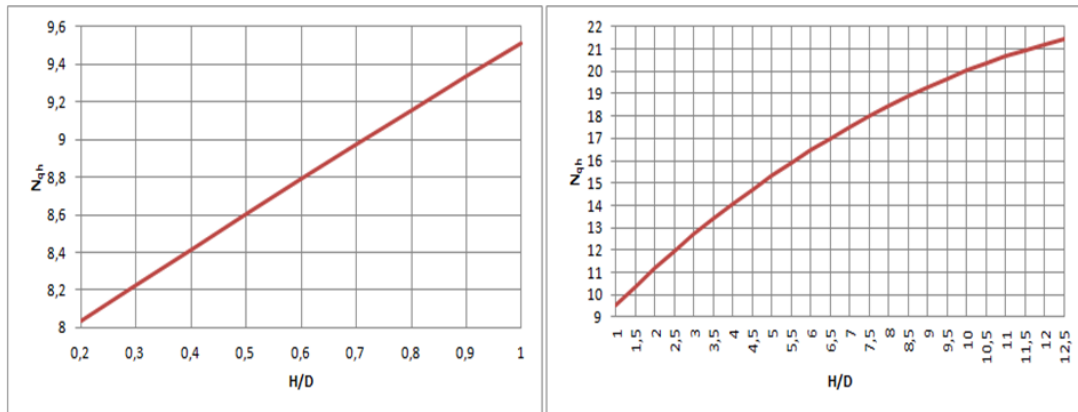
$$y_u = (0,03 \sim 0,05) \left( H + \frac{D}{2} \right) \quad (3.28)$$

Burada  $N_{qh}$ ,  $N_{ch}$  sırasıyla kum ve kil için yatay taşıma çarpanlarıdır.  $N_{qh}$  değişimi,  $\emptyset = 36^\circ$  kum için Şekil 3.14'te gösterilmiştir.

$y_u \leq 0,15D$  olması koşuluyla yukarıdaki  $y_u$  bağıntılarındaki  $(H + D/2)$  değerinin katsayı seçimi için aşağıdaki tablo kullanılabilir.

**Çizelge 3.9 :  $(H + D/2)$  Değerinin Katsayısı [46].**

|     | Düşük | Orta | Sıkı |
|-----|-------|------|------|
| Kum | 0,08  | 0,04 | 0,02 |
| Kil | 0,05  | 0,04 | 0,03 |



**Şekil 3.14 : Çizelge 3.10'a Göre  $\emptyset = 36^\circ$  İçin Yatay Taşıma Kapasitesi Faktörü.**

$$N_{ch} = a + bx + c / (x + 1)^2 + d / (x + 1)^3 \leq 9$$

$$N_{qh} = a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4 \quad (3.29)$$

$X = H / D$  olmak üzere aşağıdaki tablo da kullanılabilir.

**Çizelge 3.10 : Yatay Taşıma Kapasite Faktörü [46].**

| Faktör   | Ø  | x   | a      | b     | c       | d                       | e                       |
|----------|----|-----|--------|-------|---------|-------------------------|-------------------------|
| $N_{ch}$ | 0  | H/D | 6,752  | 0,065 | -11,063 | 7,119                   |                         |
| $N_{qh}$ | 20 | H/D | 2,399  | 0,439 | -0,03   | $1,059 \times 10^{-3}$  | $-1,754 \times 10^{-5}$ |
| $N_{qh}$ | 25 | H/D | 3,332  | 0,839 | -0,09   | $5,606 \times 10^{-3}$  | $-1,319 \times 10^{-4}$ |
| $N_{qh}$ | 30 | H/D | 4,565  | 1,234 | -0,089  | $4,275 \times 10^{-3}$  | $-9,159 \times 10^{-5}$ |
| $N_{qh}$ | 35 | H/D | 6,816  | 2,019 | -0,146  | $7,651 \times 10^{-3}$  | $-1,683 \times 10^{-4}$ |
| $N_{qh}$ | 40 | H/D | 10,959 | 1,783 | 0,045   | $-5,425 \times 10^{-3}$ | $-1,153 \times 10^{-4}$ |
| $N_{qh}$ | 45 | H/D | 17,658 | 3,309 | 0,048   | $-6,443 \times 10^{-3}$ | $-1,299 \times 10^{-4}$ |

### 3.6.3 Yukarı yönde (dikey çapraz) hareket

Boru-Toprak ara yüzünde boru eksenine dik göreceli yukarı hareket, yanal kuvvetler ortaya çıkarmaktadır. Elasto-plastik model için ASCE'nin prensibi kil ve kum için aşağıdaki bağıntılarla belirtilmektedir:

Kum için;

$$q_u = \bar{\gamma} H N_{qv} D \quad (3.30)$$

$$Z_u = (0,01 \sim 0,015) H \quad (3.31)$$

Kil için;

$$q_u = S_u N_{cv} D \quad (3.32)$$

$$Z_u = (0,1 \sim 0,2) H \quad (3.33)$$

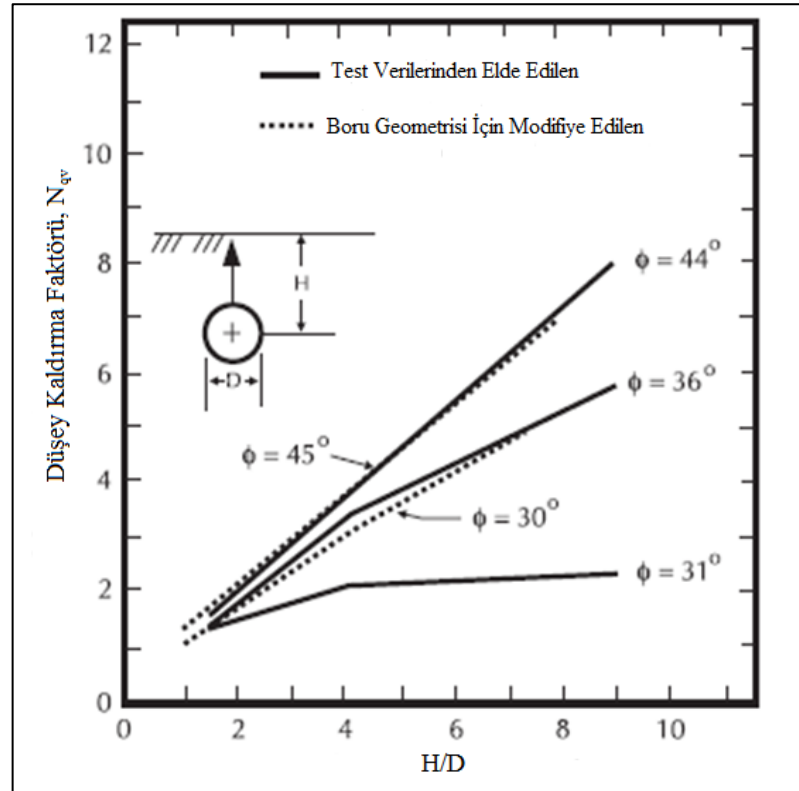
$N_{qv}$  kum için dikey yukarı itme faktörü ve  $N_{cv}$  kil için dikey yukarı itme faktörüdür.  $N_{qv}$  ve  $N_{cv}$  sırasıyla Şekil 3.15 ve Şekil 3.16'da derinlik/çap oranının fonksiyonları olarak sunulmuştur.

$Z_u$  deplasmanının hesabındaki  $H$  değerinin katsayı çarpanı için aşağıdaki tablo kullanılabilir.

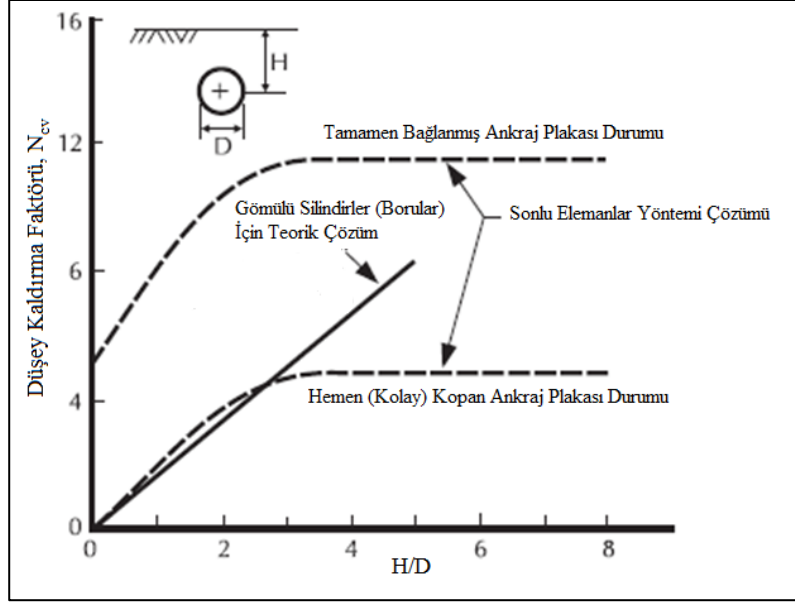
**Çizelge 3.11 :  $H$  Değerinin Katsayısı [46].**

|     | Düşük | Orta | Sıkı |
|-----|-------|------|------|
| Kum | 0.02  | 0.01 | 0.01 |
| Kil | 0.2   | 0.1  | 0.1  |

$x = H/D$  olmak üzere  $x < 10$  için  $N_{cv} = 2x \leq 10$  ve  $N_{qv} = \emptyset_s x / 44 \leq N_q$  'dur.  
(Burada  $\emptyset_s$  değeri yukarıdaki  $\emptyset$  değeridir).



**Şekil 3.15 : Kum İçin Dikey Yukarı İtme Çarpanı – Derinlik / Çap Oranı [46].**



**Şekil 3.16 : Kil İçin Dikey Yukarı İtme Çarpanı – Derinlik / Çap Oranı [46].**

### 3.6.4 Aşağı yönde (düşey çapraz) hareket

Boru eksenine dik göreceli aşağıya doğru hareket, boru-toprak ara yüzünde yanal kuvvetler oluşturmaktadır. Elasto-plastik model için ASCE ilkeleri kum ve kil için aşağıdaki bağıntılarla verilmektedir:

Kum için;

$$q_u = \bar{\gamma} H N_q D + \frac{1}{2} \gamma D^2 N_y \quad (3.34)$$

$$Z_u = (0,1 - 0,15) D \quad (3.35)$$

(Genellikle  $Z_u = 0,1D$  alınabilir)

Kil için;

$$q_u = S_u N_c D \quad (3.36)$$

$$Z_u = (0,1 \sim 0,2) D \quad (3.37)$$

(Genellikle  $Z_u = 0,2D$  alınabilir)

$$N_c = \cot(x) \left\{ \tan^2 \left( 45 + \frac{x}{2} \right) \exp(\pi \tan(x)) - 1 \right\} \quad (3.38 \text{ a})$$

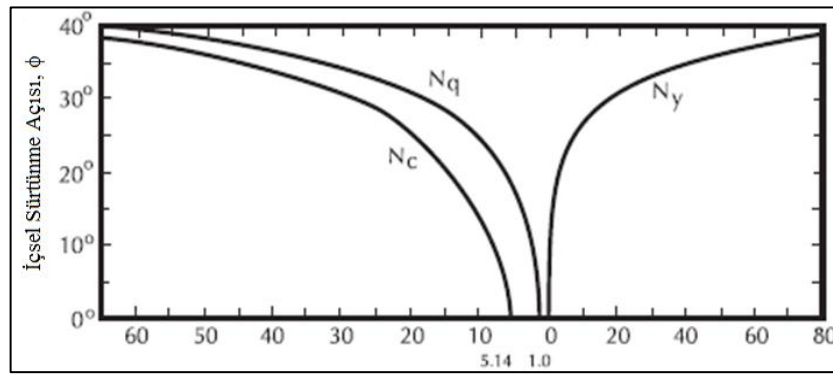
$$N_q = \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi_s}{2} \right) \exp(\pi \tan(\phi_s)) \quad (3.38 \text{ b})$$

$$N_y = \exp(0,18\phi_s - 2,5) \quad (3.38 \text{ c})$$

$$x = \emptyset_s + 0,001 \quad (3.39)$$

(Burada  $\emptyset_s = \emptyset'$  dir.)

Burada  $\gamma$  kumun toplam birim hacim ağırlığı,  $N_c$  düşey yönde yüklenmiş kil zemin için yatay yöndeki taşıma kapasite çarpanı,  $N_q$  ve  $N_y$  düşey yönde yüklenmiş kum zemin için yatay yöndeki taşıma kapasite faktörleridir. Bu faktörler yukarıda belirtilen formüllerden (Bağıntı 3.38) elde edilebileceği gibi ASCE bu üç faktör için Şekil 3.17'yi önermektedir [12, 46].



Şekil 3.17 : Dikey Taşıma Kapasitesi Faktörü – Toprak İçsel Sürtünme Açısı [46].

### 3.7 Hasar Oluşum Kriterleri

#### 3.7.1 Kritik şekil değiştirme oranı

Burkulma, basınç altındaki bir elemanın istikrarlı durumdan istikrarsız duruma geçtiği yapısal bir istikrarsızlık durumudur. Yerel (lokal) burkulma boru duvarlarının yerel istikrarsızlığıdır. Yerel kabuk burkulmasının başlamasından sonra zemin deformasyonunun veya yayılmasının neden olduğu bütün başka geometrik bozulmalar buruşma bölgesinde yoğunlaşma eğilimindedir. Sonuçta ortaya çıkan boru duvarındaki büyük eğilmeler genellikle boru duvarının çevresinde çatlama ve sızıntıya neden olur. Bu çelik borular için genel bir yetersizliktir. Basınç etkisi altındaki bir boruda teorik olarak şekil değiştirme oranının başladığı değerin aşağıdaki gibi olduğu kabul edilmektedir [12]:

$$\varepsilon_{teorik} = 0,6 \frac{t}{R} \quad (3.40)$$

Burada  $t$  boru et kalınlığı,  $R$  boru yarıçapıdır. İnce duvarlı silindirler üzerinde yapılan laboratuvar testlerine dayanarak bir boruda basınç nedeniyle ortaya çıkan

burkulmanın, teorik değerin 1/3 ile 1/4'ü kadar bir şekil değıştirme oranında başladığı ortaya konulmuştur. Buna göre;

$$0,15 \frac{t}{R} \leq \varepsilon_{cr} \leq 0,20 \frac{t}{R} \quad (3.41)$$

olur [47].

Ortalama olarak kritik şekil değıştirme oranı

$$\varepsilon_{cr} = 0,175 \frac{t}{R} \quad (3.42)$$

alnabilir [48].

Çekme etkisi altındaki borular için üretici firmaların izin verdikleri uzama oranlarına göre işlemler yapılabileceği gibi genelde izin verilen şekil değıştirme oranı için çelik borularda %3, polietilen (PE) borularda %20 değeri kullanılabilir. Ayrıca PE borular için elastik şekil değıştirme oranı %2,4'tür [10, 48, 49].

### 3.7.2 İşletme şekil değıştirme oranı

#### 3.7.2.1 Sıcaklık

Sıcaklık zamana ve toprak profilinin derinliklerine bağı olarak değışir. Toprak yüzeyinde sıcaklık günün belli saatlerinde belirgin bir şekilde artıp azalırken, profilin derinliklerinde (genellikle 50 cm derinlikte) günlük değışim ihmal edilecek kadar az olmaktadır. Bu nedenle yüzeydeki sıcaklık değışimlerinin genelde 60 cm'den daha derine gömülen gömülü boru hattını etkilemediği kabul edilmektedir. Ancak bu hususun etken olabileceği durumlarda sıcaklık değışimi etkisinin mutlaka dikkate alınması gerekmektedir.

Ayrıca gömülü sürekli boru hattının işletmeye (devreye) alınmadan önceki ve sonraki sıcaklığında herhangi bir değışim olması halinde bu sıcaklık değışiminin boru şekil değıştirmesi üzerine etkisi de dikkate alınmalıdır. Basit bir yaklaşımla bu durumdan kaynaklı şekil değıştirme oranı;

$$\varepsilon_t = \alpha(T_2 - T_1) \quad (3.43)$$

olarak alınabilir. Burada  $\alpha$  , ısı genleşme katsayısı;  $T_1$ , devreye almadan önceki sıcaklık;  $T_2$ , devreye aldıktan sonraki sıcaklıktır.

### 3.7.2.2 Toprak basıncı

Boru hatlarının üzerinde ayrıca gömme derinliğine bağlı olarak dolgu zeminden kaynaklı dış basınç etkisi de oluşmaktadır. Ancak yapılan incelemeler yaklaşık 1 m derinliğe gömülen iletim ve dağıtım hatlarında diğer etkilerin yanında bu etkinin ihmal edilebileceğini göstermiştir. Bu etkinin ihmal edilemeyeceği (fazla gömme derinliği, iç basıncın çok düşük olduğu durumlar gibi) durumlarda bu dış basınç mutlaka dikkate alınmalıdır.

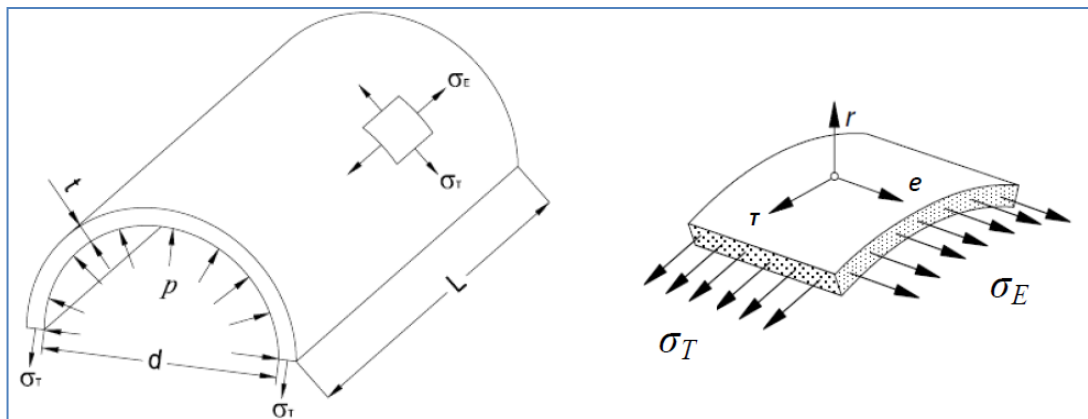
Örneğin zemin ağırlığından doğan ortalama dış basınç ( $\gamma = 15 \text{ kN/m}^3$ ,  $H = 1\text{m}$ ,  $k_0 = 0,5$  olan zemin için) yaklaşık olarak,

$$P = \gamma H \frac{1 + k_0}{2} = 15 \times 1,0 \times \frac{1 + 0,5}{2} = 11 \text{ kPa}$$

bulunur. Bu değer iç basınç yanında ihmal edilebilecek derecede düşüktür [10].

### 3.7.2.3 İç basınç

İşletme esnasında ortaya çıkabilecek diğer bir husus da iç basınçtan kaynaklı şekil değiştirme oranıdır. Gömülü sürekli boru hatları açık uçlu silindir (tek eksenli gerilme) haline bir örnektir. Şekil 3.18'den görüleceği üzere iç basınç etkisindeki ince cidarlı silindirde teğetsel gerilme  $\sigma_T$  ve eksenel gerilme  $\sigma_E$  oluşur. Açık uçlu silindir durumunda yalnızca teğetsel gerilme meydana gelip eksenel gerilme oluşmaz. Ancak Poisson etkisi nedeniyle açık uçlu silindirde teğetsel gerilmeden kaynaklı eksenel gerilme oluşur.



Şekil 3.18 : İç Basınç Etkisindeki İnce Cidarlı Açık Uçlu Silindir [50].

Açık uçlu silindir durumunda (gömülü sürekli boru hatlarında) iç basınçtan kaynaklı eksenel (boyuna) gerilme ve buna paralel oluşan boyuna şekil değiştirme oranı;

$$\sigma_E = \nu \sigma_T = \nu \frac{pd}{2t} \quad (3.44)$$

$$\varepsilon_E = \frac{\sigma_E}{E} = \nu \frac{pd}{2Et} \quad (3.45)$$

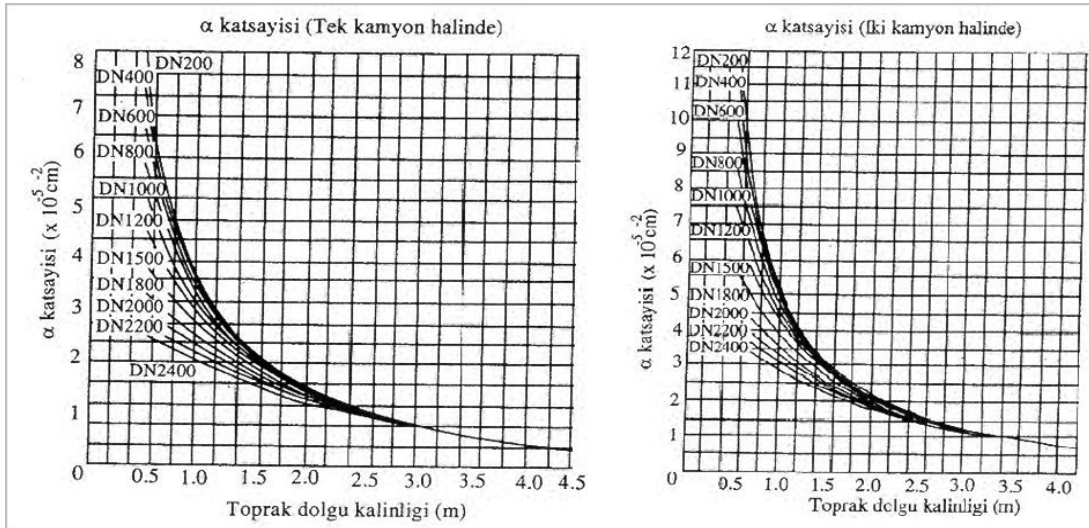
olur. Burada  $d = (d_{iç} + d_{dış})/2$ ,  $\nu$  Poisson oranı (çelik için 0,3; PE için 0,4),  $p$  iç basınç,  $t$  et (cidar) kalınlığı olup  $E$  elastisite modülüdür.

### 3.7.2.4 Trafik yükü

Trafik yükü nedeniyle oluşan toprak basıncı Boussinesq yöntemi kullanılarak hesaplanabilir. Buna göre boruya etkiyen toprak basıncı;

$$W_t = F\alpha P \quad (3.46)$$

olarak yazılabilir. Burada;  $W_t$ , trafik (kamyon) yükü nedeniyle oluşan toprak basıncı ( $kgf/cm^2$ );  $F$ , etki faktörü ( $F = 1,5$  alınabilir);  $P$ , tekerlek yükü (ağır trafik için bu değer  $p = 10.000 \text{ kgf}$ 'tir. [51]);  $\alpha$ , Boussinesq katsayısı olup Şekil 3.19'da tek kamyon veya çift kamyon olması durumuna göre alacağı değerler görülmektedir [52].



Şekil 3.19 : Tek ve İki Kamyon Halinde Boussinesq Katsayısı ( $\alpha$ ) [52].

İşletme basıncının  $p = 0,4 \text{ MPa}$  ( $4 \text{ Bar}$ ) olduğu bir durum dikkate alınır, örnek olarak  $110 \text{ mm}$  çapında  $10 \text{ mm}$  et kalınlığı olan bir boru için oluşacak normal gerilme,

$$\sigma = \frac{Pd}{2t} = \frac{0,4 \times 0,1}{2 \times 0,01} = 2 \text{ MPa}$$

olarak bulunur. Zemin ağırlığından doğan ortalama dış basınç ( $\gamma = 0,018 \text{ MN/m}^3$ ,  $H = 1 \text{ m}$ ,  $k_0 = 0,4$  olan zemin için) yaklaşık olarak,

$$p = \gamma H \frac{1 + k_0}{2} = 0,018 \times 1,0 \times \frac{1 + 0,4}{2} = 0,013 \text{ MPa}$$

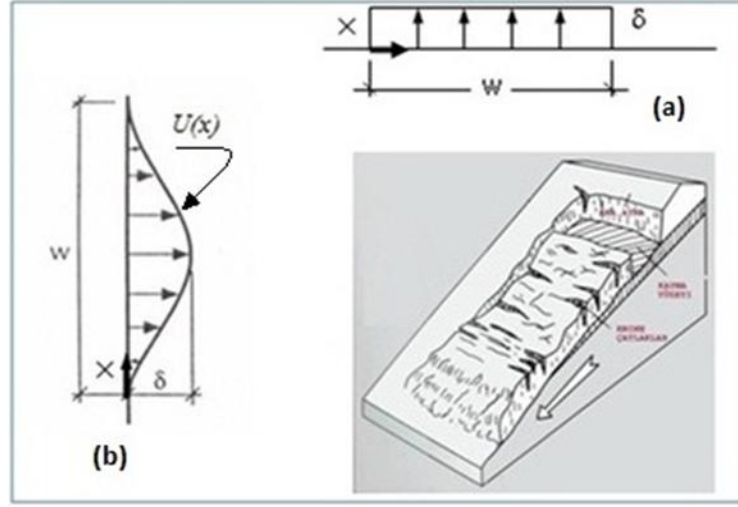
elde edilir. Ayrıca trafik yükünden dolayı oluşacak ilave toprak dış basıncı ( $\alpha = 5 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-2}$  iki kamyon durumuna göre)  $W_t = 1,5 \times 10.000 \times 5 \times 10^{-5} = 0,75 \text{ kgf/cm}^2 = 0,075 \text{ MPa}$  olur. Toplam toprak basıncı;

$W_T = 0,075 + 0,013 = 0,088 \text{ MPa}$  olarak elde edilir ki bu değer iç basınç yanında ihmal edilebilecek bir değerdir ( $0,088 \text{ MPa} \ll 2 \text{ MPa}$ ).



#### 4. MATEMATİK MODELLEME

İdealleştirilmiş kalıcı zemin hareketi (Şekil 4.1), bölgenin genişliği  $W$  ve deplasman miktarı  $\delta$  ile ifade edilebilir.



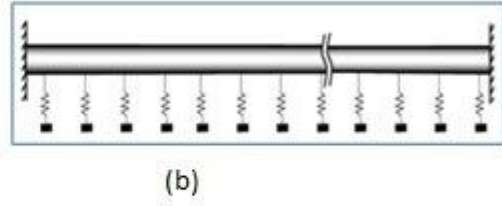
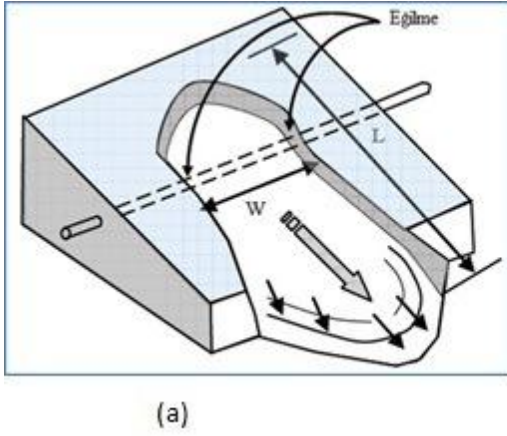
Şekil 4.1 : İdealleştirilmiş Kalıcı Zemin Hareketi (KZH) [10].

Ani kalıcı zemin hareketi (KZH) (Şekil 4.1a); fay hattı ile  $90^0$ 'lik açı yapan boru modeli ile aynı özelliği taşıyıp çözümlemeye bu mantıktan faydalanılmaktadır. İdealleştirilmiş yaygın KZH'nin (Şekil 4.1b) geometrisini tanımlayan aşağıdaki fonksiyon M. O'Rourke tarafından önerilmiştir [53].

$$u = \frac{\delta}{2} \left( 1 - \cos \frac{2\pi x}{W} \right) \quad (4.1)$$

##### 4.1 Boru Eksenine Dik Zemin Hareketi Durumu

Boru eksenine dik kalıcı zemin hareketi etkisindeki boru – zemin etkileşimi durumu (Şekil 4.2a) elastik zemine oturan kiriş modellemesi şeklinde yorumlanabilir (Şekil 4.2b). Bu durumda yönetici denklem aşağıdaki gibi olur:



**Şekil 4.2 :** a) Boru Ekseni Enine Zemin Hareketi, b) Enine Zemin Hareketinde Boru-Zemin Etkileşimi Modeli [48].

$$EIv^{IV} = q \quad (4.2)$$

Burada;  $q = k_v(u - v)$  olup  $k_v$  yanal zemin hareketi için zemin yatak (yay) katsayısı,  $u$  zemin deplasman fonksiyonunu,  $v$  boru deplasmanını ifade etmektedir. Değerler (4.2) de yerine konulduğunda;

$$EIv^{IV} = k_v(u - v)$$

olur. Bu ifadede  $u$  yerine (4.1) ile tanımlanan zemin hareketi yazılır ve düzenlenirse;

$$v^{IV} + \frac{k_v}{EI}v = \frac{k_v}{EI} \frac{\delta}{2} \left( 1 - \cos \frac{2\pi x}{W} \right)$$

Ayrıca;

$$4\beta_v^4 = \frac{k_v}{EI}$$

Alınırsa yönetici denklemin son hali;

$$v^{IV} + 4\beta_v^4 v = 2\beta_v^4 \delta \left( 1 - \cos \frac{2\pi x}{W} \right) \quad (4.3)$$

olur. Bu dördüncü mertebeden, homojen olmayan doğrusal diferansiyel denklemin çözümü

$$v = \frac{\delta}{2} (1 - e^{-\beta_v x} \cos \beta_v x) \quad (4.4)$$

olarak elde edilir.

$$v^I = \frac{\delta\beta e^{-\beta_v x}}{2} (\cos \beta_v x + \sin \beta_v x) \quad (4.5)$$

$v^I = 0$  olabilmesi için

$$\frac{\delta\beta e^{-\beta_v x}}{2} \neq 0 ; \cos \beta_v x + \sin \beta_v x = 0 \rightarrow \sin \beta_v x = -\cos \beta_v x$$

şartını sağlamalı; o halde  $x = 3\pi/4\beta_v$  noktasında  $v(x)$  bir ekstrem noktaya sahiptir.

$$v^{II}(x) = -\delta\beta_v^2 e^{-\beta_v x} \sin \beta_v x \quad (4.6)$$

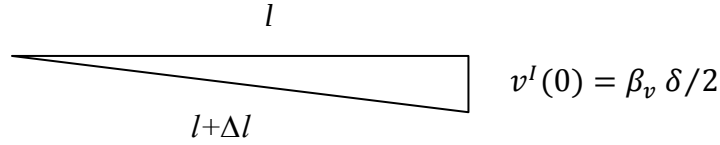
$x = \pi/4\beta_v$  noktasında eğilme en büyük olur ve;

$$\varepsilon_b = -v^{II}(x)y \quad \text{ise;}$$

$$\varepsilon_b = \frac{\delta\beta_v^2 e^{-\frac{\pi}{4}} D}{\sqrt{2}} \frac{1}{2} \quad (4.7)$$

olur.

$x = 0$  noktasındaki eksenel şekil değiştirme, Şekil 4.3'ten hareketle;



**Şekil 4.3 :** Eksene Dik Hareket - Mesnette Oluşan Eksenel Şekil Değiştirme.

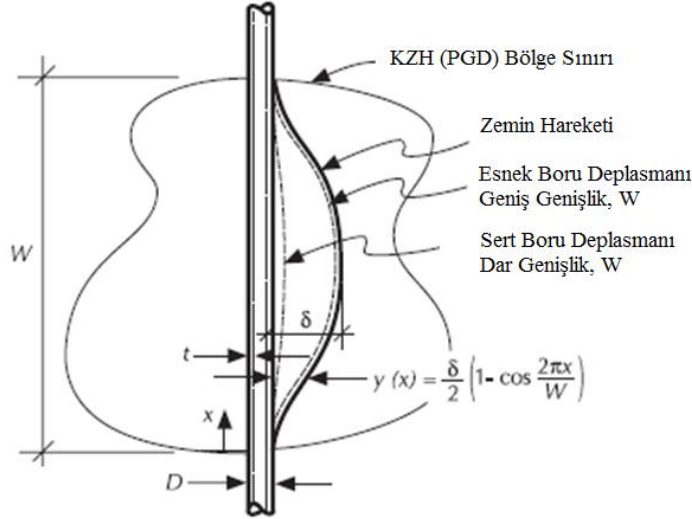
$$\varepsilon_a = -1 + \sqrt{1 + \frac{\beta_v^2 \delta^2}{4}} \quad (4.8)$$

olarak elde edilir.

#### 4.2 Boru Eksenine Dik Zemin Hareketi Durumu - M. O'Rourke Yaklaşımı

M. O' Rourke yaygın KZH'ya karşı boru hattı tepkisi için geliştirdiği ve Şekil 4.4'te görülen modeli için iki tür tepkiyi göz önüne almıştır [12]. Birinci durumda KZH bölgesinin geniş eni için boru hattının göreceli olarak esnek olduğu ve onun yanal yer değiştirmesinin toprağın yer değiştirmesiyle uyumlu olduğu kabul edilmiştir. Bu durumda boru şekil değiştirmesinin esas olarak zemin kıvrımından dolayı olduğu

kabul edilmiştir. İkinci durumda ise dar bir KZH eni için boru hattının göreceli olarak sert ve boru yanal yer değiştirmesinin zemininkinden az olduğu kabul edilmiştir. Bu durumda borudaki gerilmelerin toprak-boru ara yüzündeki sürtünme kuvvetlerinden doğduğu farz edilmiştir.



Şekil 4.4 : M. O' Rourke Modeli [53].

Geniş KZH - boru eğilmesi (esnek boru) durumu için en yüksek eğilme şekil değiştirmesi,

$$\varepsilon_b = \pm \frac{\pi^2 \delta D}{W^2} \quad (4.9)$$

olarak verilmektedir. Borunun tamamıyla yanal toprak yer değiştirmesine benzediği farz edilerek, ortalama eksenel çekme şekil değiştirmesi  $\varepsilon_a$  şu şekilde tahmin edilmiştir [53]:

$$\varepsilon_a = \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \left(\frac{\delta}{W}\right)^2 \quad (4.10)$$

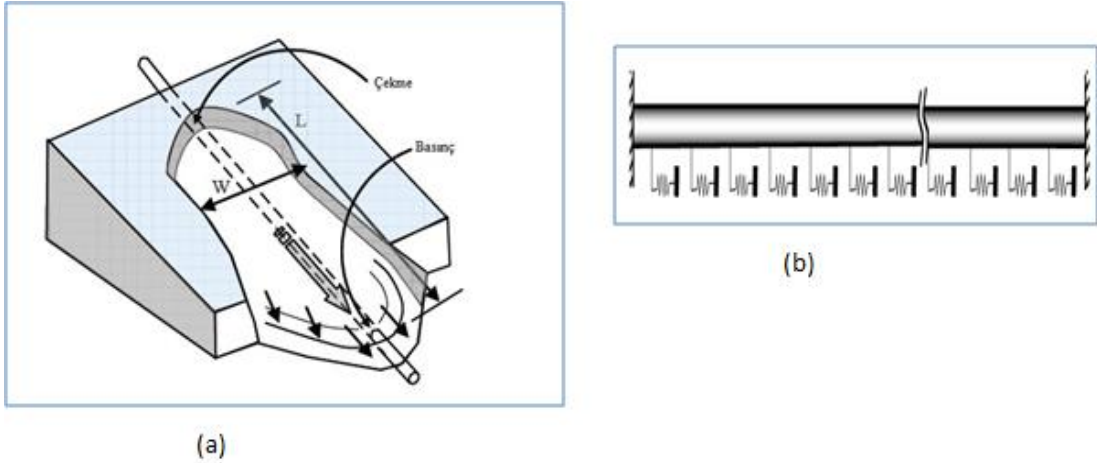
Dar genişlik - sert boru durumu için boru; toprak-boru ara yüzünde birim uzunluk başına en yüksek yanal kuvvet  $p_u$  olacak şekilde her iki kenardan sabitlenmiş bir kiriş olarak modellenmiştir. Bu durum için eksenel şekil değiştirmenin ( $\varepsilon_a$ ) küçük olduğu kabul edilerek önemsenmemiştir. Bundan dolayı borudaki en yüksek şekil değiştirme şu şekilde verilmiştir [12]:

$$\varepsilon_b = \pm \frac{p_u W^2}{3\pi E t D^2} \quad (4.11)$$

### 4.3 Boru Eksenine Paralel Zemin Hareketi Durumu

Boru eksenine paralel kalıcı zemin hareketi etkisindeki boru – zemin etkileşimi durumu (Şekil 4.5a) aksenal yüke maruz kiriş modellemesi şeklinde yorumlanabilir (Şekil 4.5b). Bu durumda yönetici denklem aşağıdaki gibi olur:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( EA \frac{\partial v}{\partial x} \right) = -q(x) \quad (4.12)$$



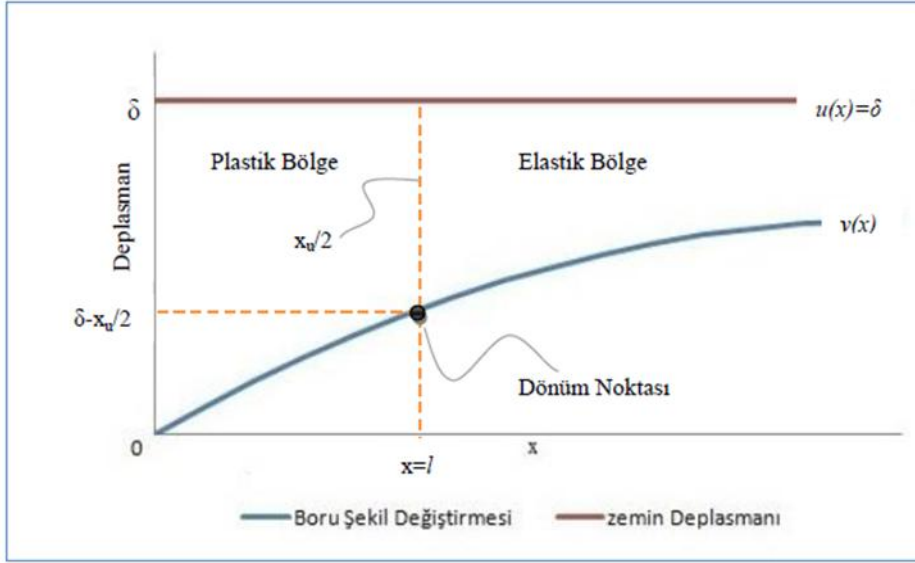
**Şekil 4.5 :** a) Boru Eksenine Paralel Zemin Hareketi, b) Boyuna Zemin Hareketinde Boru- Zemin Etkileşimi Modeli [48].

Burada;  $q = k_u(u - v)$  olup  $k_u$  boyuna zemin hareketi için zemin yatak (yay) katsayısı,  $u$  boyuna zemin deplasmanını,  $v$  boyuna boru deplasmanını ifade etmektedir. . ASCE’de elasto-plastik yayların elastik davranış gösterdikleri en büyük uzama değerlerinin  $(x_u, y_u, z_u)$  yarısı ile ifade edildiği Çizelge 3.5’te belirtilmiştir. Buna göre yönetici denklemi aşağıdaki gibi ve Şekil 4.6’daki model çizimden görüldüğü üzere iki parça halinde ifade edebiliriz:

$$\text{Plastik bölge} \quad \delta - v > \frac{x_u}{2} \quad v'' = -\frac{\beta_u^2 x_u}{2} \quad (4.13a)$$

$$\text{Elastik bölge} \quad \delta - v < \frac{x_u}{2} \quad v'' = -\beta_u^2(\delta - v) \quad (4.13b)$$

$\beta_u^2 = k_u/EA$  ve zemin deplasmanı  $u(x) = \delta$  alınmıştır. Burada  $x = l$  noktası plastik davranıştan elastik davranışa geçiş noktası olup (elasto-plastik)  $\delta - v(x) = x_u/2$  dir.



**Şekil 4.6 :** Boyuna KZH Durumunda Boru Şekil Değiştirmesi Model Grafiği.

Bu elasto-plastik noktada meydana gelen  $\delta - x_u/2$  yer değiştirmesinin yarısının elastik davranıştan, diğer yarısının da plastik davranıştan kaynaklandığı kabul edilebilir. Yani;

$$v(l) = v_e(l) + v_p(l) = \left(\frac{\delta}{2} - \frac{x_u}{4}\right) + \left(\frac{\delta}{2} - \frac{x_u}{4}\right) = \delta - \frac{x_u}{2}$$

olur. Dolayısıyla

$$\frac{x_u}{2} = \delta - v(l) \rightarrow \frac{x_u}{4} = \frac{\delta}{2} - \frac{v(l)}{2} = \frac{\delta}{2} - v_e(l) = \frac{\delta}{2} - v_p(l)$$

olur. Buna göre 1.42a denklemi çözülürse;

$$v_p(x) = -\frac{\beta_u^2 x_u}{4} x^2 + c_1 x + c_2$$

olur. Burada  $x = 0$ 'da  $v_p = 0$  olduğundan  $c_2 = 0$  olur.

$$v_p(l) = \frac{\delta}{2} - \frac{x_u}{4} \rightarrow c_1 = \frac{2\delta - x_u}{4l} + \frac{\beta_u^2 x_u}{4} l$$

olur ki;

$$v_p(x) = -\frac{\beta_u^2 x_u}{4} x^2 + \left(\frac{2\delta - x_u}{4l} + \frac{\beta_u^2 x_u}{4} l\right) x \quad (4.14)$$

olarak elde edilir. Yukarıdaki 1.42b denklemi çözüldüğünde ise;

$$v_e''(x) = -\beta_u^2 \left(\frac{\delta}{2} - v_e\right) \rightarrow v_e''(x) - \beta_u^2 v_e = -\beta_u^2 \frac{\delta}{2}$$

Çözümlemede  $\beta_u$  yerine  $\beta$  kullanılacaktır.

$$(v_e)_H = c_1 e^{\beta x} + c_2 e^{-\beta x} \quad x \rightarrow \infty \quad v_e \rightarrow 0 \text{ olmalı. O halde } c_1 = 0 \text{ olur.}$$

$$(v_e)_P = \frac{\delta}{2} \rightarrow v_e = (v_e)_H + (v_e)_P \rightarrow v_e = \frac{\delta}{2} + c_2 e^{-\beta x} \text{ olur. } x = l \text{ 'de}$$

$$v_e(l) = \frac{\delta}{2} - \frac{x_u}{4} = \frac{\delta}{2} + c_2 e^{-\beta l} \rightarrow c_2 = -\frac{x_u}{4} e^{\beta l}$$

$$v_e(x) = \frac{\delta}{2} - \frac{x_u}{4} e^{\beta(l-x)} \quad (4.15)$$

olarak elde edilir.

$v_p'(l) = v_e'(l)$  eşitliğinden yararlanılarak;

$$l = \frac{1}{\beta_u} \left( -\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{2\delta}{x_u} - \frac{3}{4}} \right) \quad (4.16)$$

sonucu elde edilir. Boruda en büyük şekil değiştirme oranı  $x = 0$  noktasında meydana gelir ki bu değer;

$$\varepsilon_a = \frac{2\delta - x_u + \beta_u^2 x_u l^2}{4l} \quad (4.17)$$

olarak elde edilir.

Yaklaşık değer olarak  $l = \frac{1}{\beta_u} \sqrt{\frac{2\delta}{x_u}}$  alınırsa %1'lik hata payı ile, ki bu oran da makul bir orandır,

$$\varepsilon_a = \beta_u \sqrt{\frac{x_u \delta}{2}} \quad (4.18)$$

olarak alınabilir.

Ayrıca yukarıdaki denklemlerin (denklem 4.13a, denklem 4.13b) çözümü olarak aşağıdaki sonuçlar da önerilmektedir [49]:

$$u(x) = \frac{1}{4} \left\{ \begin{array}{ll} \frac{2\delta + x_u(2 + \beta_u l)\beta_u l}{1 + \beta_u l} \beta_u x - x_u \beta_u^2 x^2; & x < l; \text{ Plastik bölge} \\ 2\delta - \frac{2\delta - x_u \beta_u^2 l^2}{1 + \beta_u l} e^{(l-x)\beta_u}; & l < x; \text{ Elastik bölge} \end{array} \right\} \quad (4.19)$$

$$l = \frac{1}{\beta_u} \left( -1 + \sqrt{\frac{2\delta}{x_u} - 1} \right) \quad (4.20)$$

$$\varepsilon_a = \frac{\beta_u}{4(1 + \beta_u l)} (2\delta + (2 + \beta_u l)x_u \beta_u l) \quad (4.21)$$

Her iki yaklaşım da yaklaşık olarak aynı sonucu vermektedir.

#### 4.4 Elastik Olmayan Boru Modeli Yaklaşımı

M.O'Rourke vd.'nin [55] yaptıkları çalışma sonucu, Ramberg ve Osgood [56] tarafından önerilen aşağıdaki yöntem kullanılarak boru eksen boyu boyunca oluşan zemin hareketi (paralel zemin hareketi) için elastik olmayan boru modeli geliştirilmiştir.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \left[ 1 + \frac{n}{1+r} \left( \frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^r \right] \quad (4.22)$$

Burada  $\varepsilon$  şekil değiştirme oranı,  $\sigma$  ek eksenli gerilme,  $E$  elastisite modülü,  $\sigma_y$  akma gerilimi,  $n$  ve  $r$  Ramberg Osgood parametreleridir.  $\sigma$ ,  $n$  ve  $r$ 'nin değişik sınıflardaki çelikler için genelde kullanılan değerleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

**Çizelge 4.1 : Çelik Sınıfları İçin Ramberg Osgood Parametreleri.**

|                  | Sınıf B | X-42 | X-52 | X-62 | X-70 |
|------------------|---------|------|------|------|------|
| $\sigma_y$ (MPa) | 227     | 310  | 358  | 413  | 517  |
| $n$              | 10      | 15   | 9    | 10   | 5,5  |
| $r$              | 100     | 32   | 10   | 12   | 16,6 |

Malzemenin elastik olmadığı durum için M.O'Rourke ve diğ. [54] blok modelini kullanarak Şekil 4.7'de gösterilen ideal örneği önermişlerdir. Bu modelde L uzunluğundaki kalıcı zemin hareketi (KZH) bölgesinin her iki tarafındaki toprak yer değiştirmesi sıfır olup bölge içindeki toprak yer değiştirmesi,  $\delta$  değeri sabittir.

Gömülü boru hattı için boyuna KZH'nın blok örneğine tabi olan iki durum dikkate alınmıştır. Birinci durumda yer hareketi miktarı,  $\delta$ , büyüktür ve boru dayanımı KZH bölgesinin uzunluğu,  $L$ , tarafından kontrol edilir. İkinci durumda  $L$  büyük olup boru dayanımı  $\delta$  tarafından kontrol edilir. Borunun eksenel yer değiştirmesi, kuvvet ve

dayanım dağılımı, birinci durum için Şekil 4.7’de ve ikinci durum için Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Burada  $t_u$  boru-toprak ara yüzünde oluşan birim uzunluk başına sürtünme kuvveti ve  $L_e$  ise  $t_u$ ’nun etkilediği etkin uzunluktur.

Ramberg-Osgood modeli kullanılarak boru şekil değiştirme ve yer değiştirmesi aşağıdaki şekilde açıklanabilir:

$$\varepsilon(x) = \frac{\beta_p x}{E} \left[ 1 + \frac{n}{1+r} \left( \frac{\beta_p x}{\sigma_y} \right)^r \right] \quad (4.23)$$

$$\delta(x) = \frac{\beta_p x^2}{E} \left[ 1 + \frac{2}{(2+r)} \frac{n}{(1+r)} \left( \frac{\beta_p x}{\sigma_y} \right)^r \right] \quad (4.24)$$

$\beta_u$ , aşağıda tanımlanmış olup borunun gömme parametresidir.

Kum zemin ( $c = 0$ ) için;

$$\beta_p = \mu \gamma H / t \quad (4.25a)$$

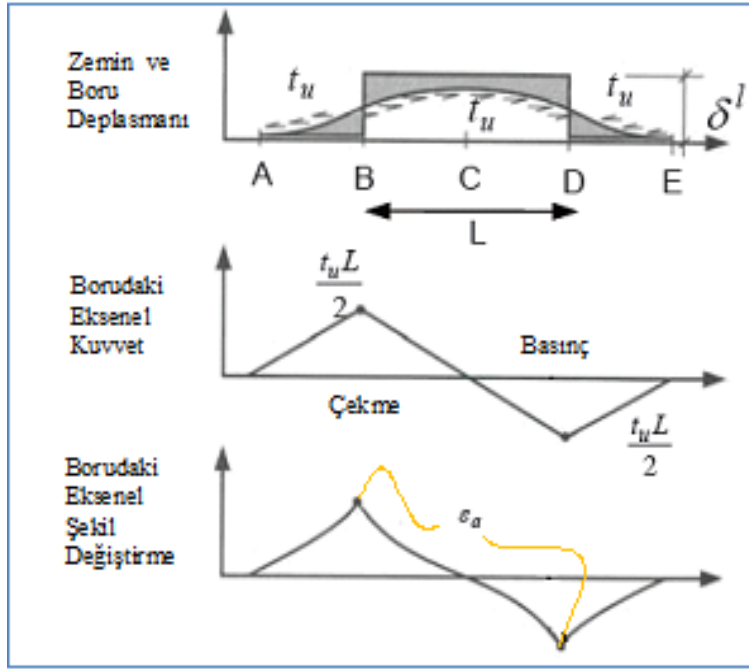
ve sürtünme katsayısı,

$$\mu = t \tan \phi \quad (4.25b)$$

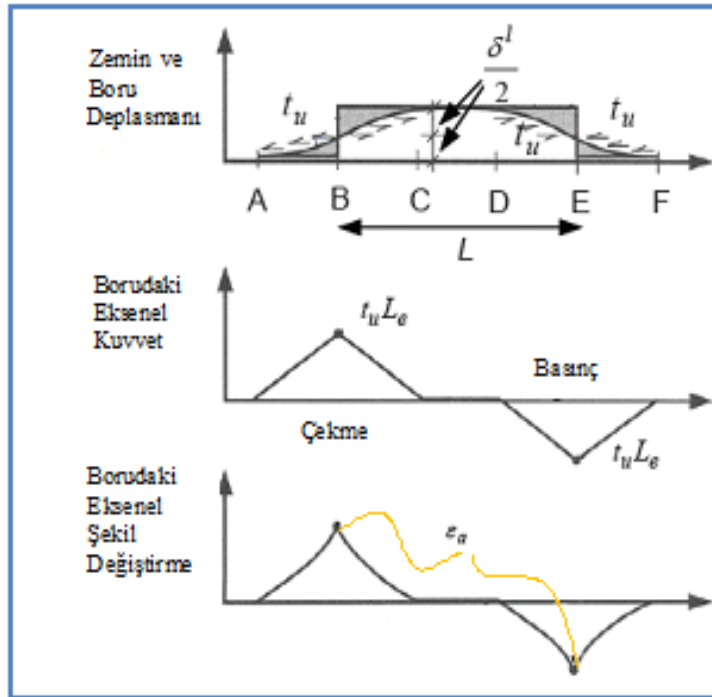
Kil zemin için;

$$\beta_p = \alpha S_u / t \quad (4.25c)$$

Burada  $S_u$  kohezyon,  $\phi$  içsel sürtünme açısı,  $H$  boru ekseninin zemin yüzeyine olan mesafesi (gömme derinliği),  $t$  boru et kalınlığı,  $\gamma$  zeminin özgül ağırlığı olup  $k$  değeri Çizelge 3.7’den,  $\alpha$  değeri de Bağntı 3.23’ten elde edilir [55].



Şekil 4.7 : Durum-1 İçin İdealleştirilmiş Örnek [55].



Şekil 4.8 : Durum-2 İçin İdealleştirilmiş Örnek [55].

Ayrıca boru boyu  $L$ 'nin yarısında çekme yarısında basınç olduğu kabulü ile

$$\sigma = \frac{t_u L}{2\pi D t} \quad (4.26)$$

alınarak birinci durum için

$$\varepsilon_a = \frac{t_u L}{2\pi D t E} \left[ 1 + \frac{n}{1+r} \left( \frac{t_u L}{2\pi D t \sigma_y} \right)^r \right] \quad (4.27)$$

ikinci durum için ise

$$\varepsilon_a = \frac{t_u L_e}{2\pi D t E} \left[ 1 + \frac{n}{1+r} \left( \frac{t_u L_e}{2\pi D t \sigma_y} \right)^r \right] \quad (4.28)$$

$$\delta^l = \frac{t_u L_e^2}{\pi D t E} \left[ 1 + \left( \frac{2}{2+r} \right) \left( \frac{n}{1+r} \right) \left( \frac{t_u L_e}{\pi D t \sigma_y} \right)^r \right] \quad (4.29)$$

alınabileceği hususu ilgili kaynaklarda belirtilmektedir [12, 48].

#### 4.5 Sismik Dalga Yayılımı (SDY) Durumu

Yukarıdaki Şekil 3.9’da belirtilen sismik dalga yayılımı durumu dikkate alındığında

$$u_x(x) = \delta \sin \varnothing \sin \left( \frac{2\pi x}{\lambda} \cos \varnothing \right) \quad (4.30)$$

$$u_y(x) = \delta \cos \varnothing \sin \left( \frac{2\pi x}{\lambda} \cos \varnothing \right) \quad (4.31)$$

olduğu görülür.

$\varepsilon_b = -u_y''(x)y$  olduğundan hareketle;

$u_y''(x) = -\delta \cos^3 \varnothing \frac{4\pi^2}{\lambda^2} \sin \left( \frac{2\pi x}{\lambda} \cos \varnothing \right)$  olur ki bu denklemin ekstrem olduğu değerler  $\varnothing = 0$  ve  $x = \lambda/4$ ’tür.  $y = D/2$  noktasında ise maksimum eğilme şekil değiştirme oranı;

$$\varepsilon_b = 2 \frac{\delta \pi^2}{\lambda^2} D \quad (4.32)$$

olarak elde edilir. Eksenel şekil değiştirme oranı için

$$\varepsilon_{au} = u_x'(x) = \delta \sin \varnothing \frac{2\pi}{\lambda} \cos \varnothing \cos \left( \frac{2\pi x}{\lambda} \cos \varnothing \right) \quad \text{olarak elde edilir. Bu denklemin}$$

ekstrem değeri için  $x = 0$  ve  $\varnothing = \pi/4$  alınırsa maksimum değer

$$\varepsilon_{au} = \frac{\pi\delta}{\lambda} \quad (4.33)$$

olur. Ayrıca Bağıntı 4.8'in elde edilme yöntemi kullanılarak  $x = 0$ ,  $\varnothing = 0$  için

$$u_y'(x = 0) = \delta \frac{2\pi}{\lambda} \cos^2 \varnothing \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda} \cos \varnothing\right) = 2 \frac{\delta\pi}{\lambda} \quad \text{alınarak en büyük değer olarak}$$

$$\varepsilon_{av} = 2\pi^2 \frac{\delta^2}{\lambda^2} \quad (4.34)$$

elde edilir. Bu üç denklem incelendiğinde SDY için en büyük şekil değiştirme oranının 4.33 denkleminde elde edildiği görülmektedir [49].

#### 4.6 Sıvılaşma

Hou ve diğ., sonlu elemanlar yaklaşımıyla sıvılaşma sonucu oluşan kaldırma etkileri yüzünden ortaya çıkan boru şekil değiştirmesini analiz etmişlerdir. Birim uzunluk başına yukarı kaldırma kuvveti olan sıvılaşmış bölgenin içindeki boruda oluşan hareket,  $P_{\text{uplift}}$ , şu şekilde ifade edilmiştir [57]:

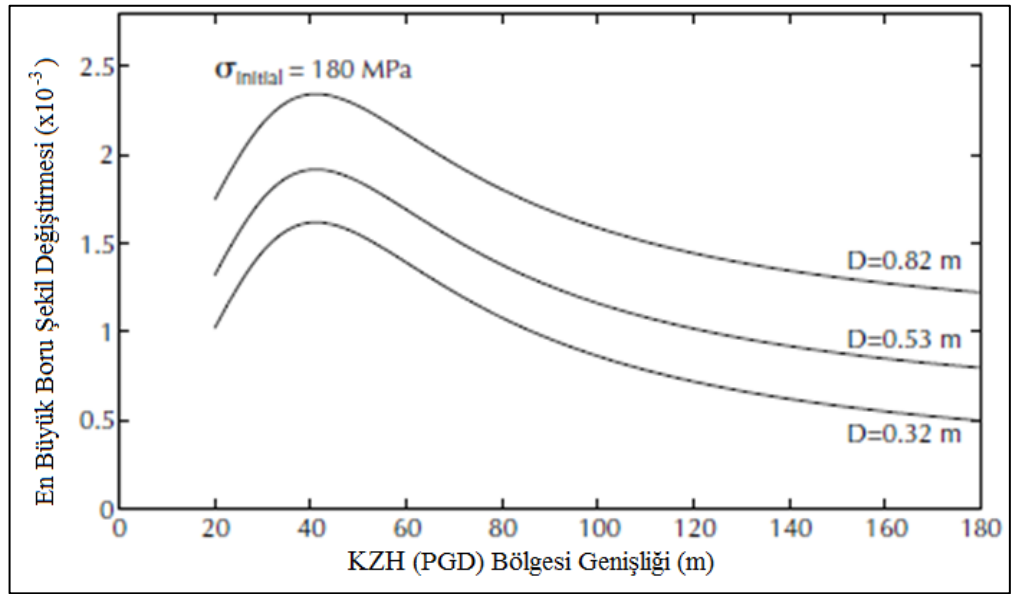
$$P_{\text{kaldırma}} = \frac{1}{4} \pi D^2 (\gamma_{\text{zemin}} - \gamma_{\text{içerik}}) - \pi D t \gamma_{\text{boru}} \quad (4.35)$$

Burada sırasıyla  $\gamma_{\text{zemin}}$  sıvılaşmış zeminin yoğunluğu,  $\gamma_{\text{boru}}$  borunun yoğunluğu,  $\gamma_{\text{içerik}}$  boru içindeki maddenin (su, gaz vs.) yoğunluğudur. Boru sıvılaşmış toprağın sınırlarının ötesinde sabitlenmiştir. Bu durum, yukarıdaki düzgün yüke bağlı her bir kenarda sabitlenen bir kirişe benzemektedir. Çelik bir borudaki maksimum şekil değiştirme üç ayrı boru çapı ve  $t = 0,0079 \text{ m}$ ,  $\gamma_{\text{zemin}} = 2,0 \times 10^4 \text{ N/m}^3$ ,  $\gamma_{\text{içerik}} = 0,8 \times 10^4 \text{ N/m}^3$  için sıvılaşmış bölgenin uzunluğunun bir fonksiyonu olarak Şekil 4.8'de gösterilmiştir. Baştaki gerilmenin ısı değişimi ve/veya içsel işletme basıncı nedeniyle olduğu kabul edilmektedir. Şekil 4.8'de gösterildiği gibi maksimum boru şekil değiştirmesi sıvılaşmış kuşağın belli bir genişliğinde,  $W_{cr}$ , meydana gelir.  $W_{cr}$ 'den büyük genişlik için boru şekil değiştirmesi genişliğin artmasıyla azalırken; boru şekil değiştirmesi  $W_{cr}$ 'den daha az olan genişlik için genişliğin artan bir fonksiyonudur. Kritik genişlik,  $W_{cr}$ , 4.9 denkleminin 4.11 denklemine eşitlenmesi ve

$\delta = H_c$  alınmasıyla tahmin edilebilmiştir [12]. ( $H_c$  boru üstü ile zemin yüzeyi arasındaki mesafedir.)

$$W_{cr} = \sqrt[4]{\frac{3\pi^3 Et H_c D^3}{P_u}} \quad (4.36)$$

Buradan görüleceği üzere sıvılaşma bölgesinin genişliği  $W_{cr}$ 'den küçük ise sıvılaşma kaynaklı şekil değiştirme oranı hesabı için Bağıntı 4.11,  $W_{cr}$ 'den büyük ise sıvılaşma kaynaklı şekil değiştirme oranı hesabı için Bağıntı 4.9 kullanılabilir [12].



Şekil 4.9 : Maksimum Şekil Değiştirme Oranı – Sıvılaşmış Bölge Genişliği [57].



## 5. MEVCUT İSTANBUL VERİLERİ ÜZERİNE UYGULAMA

### 5.1 Malzemeler

Boru hattı projelerinin dizayn aşamasında yapılacak yatırımın gereksinimlerini karşılayacak uygun malzemelerin seçilmesi büyük önem taşır. Malzeme seçiminde malzeme performans kriterleri, maliyet etkinlik, sistemin güvenlik ve güvenilirliği dikkate alınmalıdır. Temel ilgi noktası olan malzeme performans kriterleri, çatlak kontrol kapasitesi, kimyasal kompozisyon, malzeme kuvveti, boyutlarla ilgili toleranslar ve denetim koşullarını içerir. Güvenilir ve doğru bir tasarımın gerçekleştirilmesi çeşitli seçenekler arasından çeşitli kriterler baz alınarak gerek teknolojik gerekse ekonomik olarak rekabet şartları çerçevesinde ulusal ve uluslararası standartlara uygun, istenilen teknik şartları sağlayan malzeme seçimini yapmayı ve kullanımını gerektirir. Hatalı malzeme seçimi ve kullanımı, imalat sürecini olumsuz etkileyebileceği gibi; yatırım maliyetlerinin artmasına, nihai ürün kullanım ömrünün azalmasına ve işletme giderlerinde artışa neden olur [58].

Uygulamalar incelendiğinde iletim ve dağıtım hatlarında boru malzemesi olarak genelde polietilen (PE) boru ve polietilen izolasyon kaplamalı çelik boruların kullanıldığı görülmektedir. Polietilen ve çelik malzemeler için bazı gerekli değerler aşağıda Çizelge 5.1’de verilmiştir [48, 59-61].

**Çizelge 5.1 : Bazı Boru Malzeme Değerleri.**

| Malzeme    | Çap Aralığı (mm) | Et Kalınlığı Aralığı (mm) | Malzeme yoğunluğu (gr/cm <sup>3</sup> ) | Elastisite Modülü (MPa)                                               | Poisson Oranı | Isıl Genleşme Katsayısı, $\alpha$ (1/ °C) |
|------------|------------------|---------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|---------------|-------------------------------------------|
| Polietilen | 20-1600          | 2-61,5                    | 0,95                                    | $\geq 700$ (PE 80);<br>$\geq 1000$ (PE 100)<br>Ortalama Değer:<br>850 | 0,4           | $18 \times 10^{-5}$                       |
| Çelik      | 21,3-2540        | 2-25,4                    | 7,75                                    | 200.000                                                               | 0,3           | $1,2 \times 10^{-5}$                      |

## 5.2 PE Borular

Teknolojideki ilerlemeler, plastik hammadde üretiminde de önemli gelişmelerin yaşanmasını sağlamıştır. 1950'li yıllarda geliştirilen PE 32 sınıf düşük yoğunluklu polietilen plastik borular ilk kez içme suyu hatlarında kullanılmıştır. Daha sonra PE 63 hammaddesi geliştirilerek yüksek basınç gerektirmeyen sistemlerde kullanımı başarı ile uygulanmıştır. Ancak PE 63, malzemenin teknik özelliklerinden dolayı 4 bara kadar basınç gerektiren hatlarda kullanılmıştır. Hammadde konusunda gelişmeler devam etmiş ve 2. jenerasyon olarak PE 80 hammaddesi kullanıma sunulmuştur. Böylece PE 80 hammaddesi de içme suyu ve doğalgaz şebekelerinde yüksek performans ile kullanılmaya başlanmıştır.. 1990 başlarında geliştirilen 3. jenerasyon PE 100 hammaddesi ise içme, kullanma suyu ve doğal gaz şebekelerindeki kullanım alanına hem yüksek performans, hem de ekonomik bir çözüm olmuştur.

1. Jenerasyon hammaddeler; PE 32 (LDPE), PE 40 (LDPE), PE 63 (HDPE)
2. Jenerasyon hammaddeler; PE 80 (MDPE), PE 80 (HDPE)
3. Jenerasyon hammaddeler; PE 100 (HDPE) [59]

## 5.3 Çelik Borular

Metal boru üretiminde üç yöntem kullanılır:

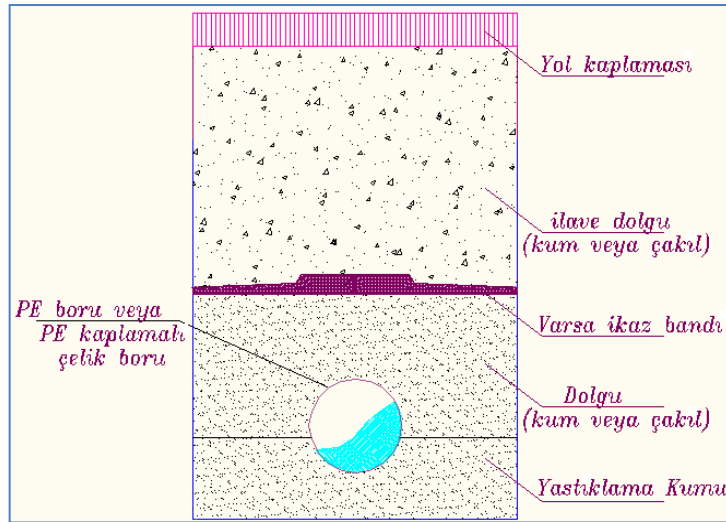
- 1-Dikişsiz borular (Çekme)
- 2-Dikişli (kaynaklı) borular
  - a) Boyuna dikişli borular
  - b) Spiral dikişli borular
- 3-Dökme borular

Şehir içi ana iletim ve dağıtım hatlarında kullanılan çelik boruların ekseriyeti düz çelik plakaların rulolama (boyuna dikiş) ve dikişli kaynaklama (spiral dikiş) yöntemi ile boru haline getirilmesi ile üretilmektedir. Bunun yanında özellikle çok yüksek basınçlara ve nem şartlarına maruz kalabilecek bazı kısımlar için dikişsiz borular da kullanılabilir. Ayrıca toprak altına döşenecek boruların korozyona karşı korunmasını sağlamak için uygulanan en uygun yöntem polietilen ile kaplama yapmaktır. Bindirmeli olarak yapılan polietilen kaplama; yapışma direnci, darbeye dayanımı, sıyrılma direnci, elektrik direnci ısı ve ışık altında yaşlanmaya dayanım

özelliklerinin çok iyi olması nedeniyle diğer kaplama türlerinden daha üst düzeyde koruma sağlamaktadır [58].

#### 5.4 Tranşeler

İstanbul İli içerisinde yatırım yapan büyük kurum ve/veya kuruluşların teknik şartnameleri incelendiğinde iletim ve dağıtım hatlarında genellikle ya polietilen boru veya polietilen kaplamalı çelik boruların kullanıldığı görülmektedir. Polietilen kaplamalı çelik borular özellikle katodik koruma için de tercih edilmektedir. Boru hattı tranşe (hendek, kanal) kesitlerine bakıldığında boru altına yaklaşık 10-15 cm yastıklama kumu serildiği, boru üzerine ise kurumdan kuruma değişiklik arz edecek şekilde ya ilave kum dolgu veya çakıl (mıcır vb.) dolgu yapıldığı, en üstte ise yol kaplamasının durumuna göre asfalt, beton+asfalt vb. uygulamaların yapıldığı görülmektedir (Şekil 5.1).



Şekil 5.1 : Tipik Tranşe Modeli.

Buradan anlaşıldığı üzere tranşe içi kohezyonsuz (kum, çakıl, vb.) malzeme ( $c = 0$ ) ile sıkıştırılarak doldurulmakta olup boru-dolgu ara yüzeyi de polietilen malzeme olmaktadır. Buna göre Çizelge 3.7'den  $k = 0,6$  olarak alınabilir.

Yoğun (sıkıştırılmış) kum için içsel sürtünme açısının yaklaşık  $32^{\circ} - 40^{\circ}$  arası olduğu, çakıl için ise  $34^{\circ} - 37^{\circ}$  olduğu bilinmektedir [62]. Böylece  $k_0$  değeri için ortalama  $\emptyset = 36^{\circ}$  alınıp Bağntı 3.24 kullanılarak;

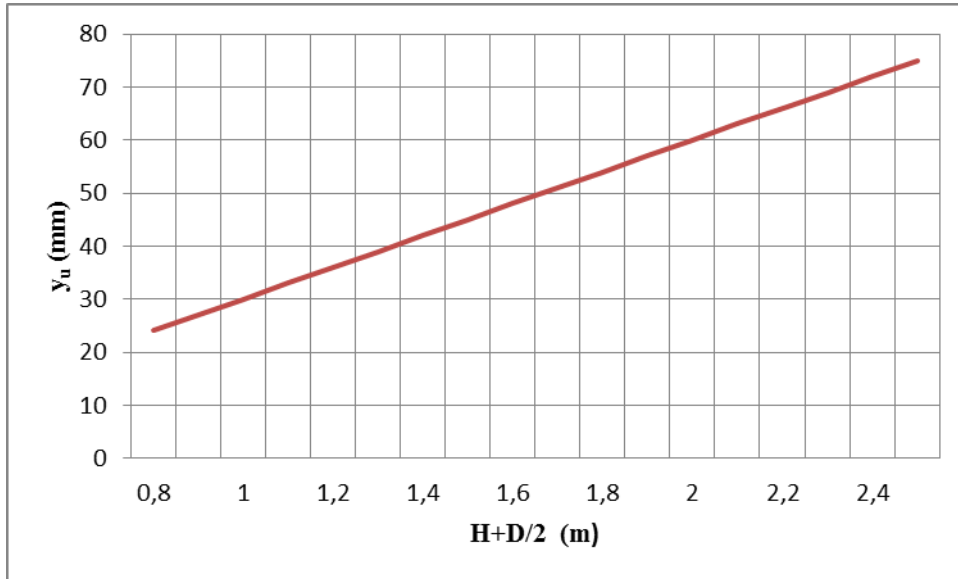
$$k_0 = 1 - \sin\emptyset = 1 - \sin 36;$$

$k_0 = 0,41$  elde edilir. Bu değerin Çizelge 3.8'deki yoğun zemin için verilen değerin ortalaması olan 0,4 ile örtüştüğü de görülmektedir.

## 5.5 Teknik Uygulamalar

### 5.5.1 Boru eksenine dik zemin hareketi durumu

Bağıntı 3.26'dan hareketle kohezyonsuz sıkı bir dolgu için  $y_u = 0,03(H + D/2)$  olarak alınabileceği açıktır. Burada  $(H + D/2)$  katsayısının, yani boru orta noktasının zemin üstü kotuna olan mesafesinin, değişimine göre  $y_u$  değerinin alacağı değerler aşağıdaki grafikten görülebilmektedir (Şekil 5.2).



Şekil 5.2 : Kohezyonsuz Sıkı Bir Zemin İçin  $y_u$  Değeri.

$N_{qh}$  değerinin elde edilmesi hususunda Şekil 3.14 kullanılarak  $\emptyset = 36^\circ$  için  $H/D$  oranına göre değişim izlenebilir. Tranşe dolgu malzemesi için ortalama yoğunluk değeri  $\bar{\gamma} = 18 \text{ kN/m}^3$  alınarak çeşitli  $H$  derinlikleri için ortaya çıkabilecek  $P_u$  değer tabloları aşağıda elde edilmiştir.

**Çizelge 5.2 :  $H = 0,5 \text{ m}$  İçin  $p_u(kN/m)$  Değerleri.**

|          |    | $D \text{ (m)}$ |      |      |      |     |      |      |      |     |      |      |
|----------|----|-----------------|------|------|------|-----|------|------|------|-----|------|------|
|          |    | 0,02            | 0,1  | 0,25 | 0,75 | 1   | 1,25 | 1,50 | 1,75 | 2   | 2,25 | 2,54 |
| $N_{qh}$ | 4  | 0,72            | 3,6  | 9    | 27   | 36  | 45   | 54   | 63   | 72  | 81   | 91   |
|          | 6  | 1,08            | 5,4  | 13,5 | 40,5 | 54  | 68   | 81   | 95   | 108 | 122  | 137  |
|          | 8  | 1,44            | 7,2  | 18   | 54   | 72  | 90   | 108  | 126  | 144 | 162  | 183  |
|          | 10 | 1,8             | 9    | 22,5 | 67,5 | 90  | 113  | 135  | 158  | 180 | 203  | 229  |
|          | 12 | 2,16            | 10,8 | 27   | 81   | 108 | 135  | 162  | 189  | 216 | 243  | 274  |
|          | 14 | 2,52            | 12,6 | 31,5 | 94,5 | 126 | 158  | 189  | 221  | 252 | 284  | 320  |
|          | 16 | 2,88            | 14,4 | 36   | 108  | 144 | 180  | 216  | 252  | 288 | 324  | 366  |
|          | 18 | 3,24            | 16,2 | 40,5 | 122  | 162 | 203  | 243  | 284  | 324 | 365  | 411  |
|          | 20 | 3,6             | 18   | 45   | 135  | 180 | 225  | 270  | 315  | 360 | 405  | 457  |
|          | 22 | 3,96            | 19,8 | 49,5 | 149  | 198 | 248  | 297  | 347  | 396 | 446  | 503  |

**Çizelge 5.3 :  $H = 1,0 \text{ m}$  İçin  $p_u(kN/m)$  Değerleri.**

|          |    | $D \text{ (m)}$ |      |      |      |     |      |      |      |     |      |      |
|----------|----|-----------------|------|------|------|-----|------|------|------|-----|------|------|
|          |    | 0,02            | 0,1  | 0,25 | 0,75 | 1   | 1,25 | 1,50 | 1,75 | 2   | 2,25 | 2,54 |
| $N_{qh}$ | 4  | 1,44            | 7,2  | 18   | 54   | 72  | 90   | 108  | 126  | 144 | 162  | 183  |
|          | 6  | 2,16            | 10,8 | 27   | 81   | 108 | 135  | 162  | 189  | 216 | 243  | 274  |
|          | 8  | 2,88            | 14,4 | 36   | 108  | 144 | 180  | 216  | 252  | 288 | 324  | 366  |
|          | 10 | 3,6             | 18   | 45   | 135  | 180 | 225  | 270  | 315  | 360 | 405  | 457  |
|          | 12 | 4,32            | 21,6 | 54   | 162  | 216 | 270  | 324  | 378  | 432 | 486  | 549  |
|          | 14 | 5,04            | 25,2 | 63   | 189  | 252 | 315  | 378  | 441  | 504 | 567  | 640  |
|          | 16 | 5,76            | 28,8 | 72   | 216  | 288 | 360  | 432  | 504  | 576 | 648  | 732  |
|          | 18 | 6,48            | 32,4 | 81   | 243  | 324 | 405  | 486  | 567  | 648 | 729  | 823  |
|          | 20 | 7,2             | 36   | 90   | 270  | 360 | 450  | 540  | 630  | 720 | 810  | 914  |
|          | 22 | 7,92            | 39,6 | 99   | 297  | 396 | 495  | 594  | 693  | 792 | 891  | 1006 |

**Çizelge 5.4 :  $H = 1,5 \text{ m}$  İçin  $p_u(kN/m)$  Değerleri.**

|          |    | $D \text{ (m)}$ |      |      |      |     |      |      |      |      |      |      |
|----------|----|-----------------|------|------|------|-----|------|------|------|------|------|------|
|          |    | 0,02            | 0,1  | 0,25 | 0,75 | 1   | 1,25 | 1,50 | 1,75 | 2    | 2,25 | 2,54 |
| $N_{qh}$ | 4  | 2,16            | 10,8 | 27   | 81   | 108 | 135  | 162  | 189  | 216  | 243  | 274  |
|          | 6  | 3,24            | 16,2 | 40,5 | 122  | 162 | 203  | 243  | 284  | 324  | 365  | 411  |
|          | 8  | 4,32            | 21,6 | 54   | 162  | 216 | 270  | 324  | 378  | 432  | 486  | 549  |
|          | 10 | 5,4             | 27   | 67,5 | 203  | 270 | 338  | 405  | 473  | 540  | 608  | 686  |
|          | 12 | 6,48            | 32,4 | 81   | 243  | 324 | 405  | 486  | 567  | 648  | 729  | 823  |
|          | 14 | 7,56            | 37,8 | 94,5 | 284  | 378 | 473  | 567  | 662  | 756  | 851  | 960  |
|          | 16 | 8,64            | 43,2 | 108  | 324  | 432 | 540  | 648  | 756  | 864  | 972  | 1097 |
|          | 18 | 9,72            | 48,6 | 122  | 365  | 486 | 608  | 729  | 851  | 972  | 1094 | 1234 |
|          | 20 | 10,8            | 54   | 135  | 405  | 540 | 675  | 810  | 945  | 1080 | 1215 | 1372 |
|          | 22 | 11,9            | 59,4 | 149  | 446  | 594 | 743  | 891  | 1040 | 1188 | 1337 | 1509 |

**Çizelge 5.5 :  $H = 2,0 \text{ m}$  İçin  $p_u(kN/m)$  Değerleri.**

|          |    | $D \text{ (m)}$ |      |      |      |     |      |      |      |      |      |      |
|----------|----|-----------------|------|------|------|-----|------|------|------|------|------|------|
|          |    | 0,02            | 0,1  | 0,25 | 0,75 | 1   | 1,25 | 1,50 | 1,75 | 2    | 2,25 | 2,54 |
| $N_{qh}$ | 4  | 2,88            | 14,4 | 36   | 108  | 144 | 180  | 216  | 252  | 288  | 324  | 366  |
|          | 6  | 4,32            | 21,6 | 54   | 162  | 216 | 270  | 324  | 378  | 432  | 486  | 549  |
|          | 8  | 5,76            | 28,8 | 72   | 216  | 288 | 360  | 432  | 504  | 576  | 648  | 732  |
|          | 10 | 7,2             | 36   | 90   | 270  | 360 | 450  | 540  | 630  | 720  | 810  | 914  |
|          | 12 | 8,64            | 43,2 | 108  | 324  | 432 | 540  | 648  | 756  | 864  | 972  | 1097 |
|          | 14 | 10,1            | 50,4 | 126  | 378  | 504 | 630  | 756  | 882  | 1008 | 1134 | 1280 |
|          | 16 | 11,5            | 57,6 | 144  | 432  | 576 | 720  | 864  | 1008 | 1152 | 1296 | 1463 |
|          | 18 | 13              | 64,8 | 162  | 486  | 648 | 810  | 972  | 1134 | 1296 | 1458 | 1646 |
|          | 20 | 14,4            | 72   | 180  | 540  | 720 | 900  | 1080 | 1260 | 1440 | 1620 | 1829 |
|          | 22 | 15,8            | 79,2 | 198  | 594  | 792 | 990  | 1188 | 1386 | 1584 | 1782 | 2012 |

**Çizelge 5.6 :  $H = 2,5 \text{ m}$  İçin  $p_u(kN/m)$  Değerleri.**

|          |    | $D\text{ (m)}$ |     |      |      |     |      |      |      |      |      |      |
|----------|----|----------------|-----|------|------|-----|------|------|------|------|------|------|
|          |    | 0,02           | 0,1 | 0,25 | 0,75 | 1   | 1,25 | 1,50 | 1,75 | 2    | 2,25 | 2,54 |
| $N_{qh}$ | 4  | 3,6            | 18  | 45   | 135  | 180 | 225  | 270  | 315  | 360  | 405  | 457  |
|          | 6  | 5,4            | 27  | 67,5 | 203  | 270 | 338  | 405  | 473  | 540  | 608  | 686  |
|          | 8  | 7,2            | 36  | 90   | 270  | 360 | 450  | 540  | 630  | 720  | 810  | 914  |
|          | 10 | 9              | 45  | 113  | 338  | 450 | 563  | 675  | 788  | 900  | 1013 | 1143 |
|          | 12 | 10,8           | 54  | 135  | 405  | 540 | 675  | 810  | 945  | 1080 | 1215 | 1372 |
|          | 14 | 12,6           | 63  | 158  | 473  | 630 | 788  | 945  | 1103 | 1260 | 1418 | 1600 |
|          | 16 | 14,4           | 72  | 180  | 540  | 720 | 900  | 1080 | 1260 | 1440 | 1620 | 1829 |
|          | 18 | 16,2           | 81  | 203  | 608  | 810 | 1013 | 1215 | 1418 | 1620 | 1823 | 2057 |
|          | 20 | 18             | 90  | 225  | 675  | 900 | 1125 | 1350 | 1575 | 1800 | 2025 | 2286 |
|          | 22 | 19,8           | 99  | 248  | 743  | 990 | 1238 | 1485 | 1733 | 1980 | 2228 | 2515 |

Şekil 5.2 incelendiğinde  $y_u$  değerinin  $0,02 \text{ m}$  ile  $0,08 \text{ m}$  arasında değiştiği, yukarıdaki tablolar incelendiğinde ise  $p_u$  değerinin  $0,72 \text{ kN/m}$  ile  $1600 \text{ kN/m}$  arasında değiştiği görülebilmektedir. Çizelge 3.5'te belirtilen eksenel yatak katsayısı,  $k_v$  için değişen bu verilere göre değişim aralığı tablosu aşağıdaki gibi elde edilmiştir. Ayrıca hem çelik hem de polietilen boru için  $\beta_v$  değerleri aşağıdaki tablolardan elde edilebilir (Çizelge 5.8 ve Çizelge 5.9).

**Çizelge 5.7 :  $k_v$  ( $kN/m^2$ ) Değerleri.**

|            |    | $P_u$ (kN/m) |      |       |       |       |       |       |        |        |        |        |
|------------|----|--------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
|            |    | 0,72         | 10   | 100   | 200   | 400   | 600   | 800   | 1000   | 1200   | 1400   | 1600   |
| $y_u$ (mm) | 20 | 72           | 1000 | 10000 | 20000 | 40000 | 60000 | 80000 | 100000 | 120000 | 140000 | 160000 |
|            | 40 | 36           | 500  | 5000  | 10000 | 20000 | 30000 | 40000 | 50000  | 60000  | 70000  | 80000  |
|            | 50 | 29           | 400  | 4000  | 8000  | 16000 | 24000 | 32000 | 40000  | 48000  | 56000  | 64000  |
|            | 60 | 24           | 333  | 3333  | 6667  | 13333 | 20000 | 26667 | 33333  | 40000  | 46667  | 53333  |
|            | 70 | 21           | 286  | 2857  | 5714  | 11429 | 17143 | 22857 | 28571  | 34286  | 40000  | 45714  |
|            | 80 | 18           | 250  | 2500  | 5000  | 10000 | 15000 | 20000 | 25000  | 30000  | 35000  | 40000  |

**Çizelge 5.8 : Polietilen Boru İçin  $\beta_v$  (1/m) Değerleri.**

|                           |        | $K_v$ (kN/m <sup>2</sup> ) |       |       |       |       |        |        |        |        |         |         |
|---------------------------|--------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
|                           |        | 18                         | 100   | 500   | 1.000 | 5.000 | 10.000 | 30.000 | 50.000 | 80.000 | 120.000 | 160.000 |
| $EI$ (kN.m <sup>2</sup> ) | 0,002  | 6,89                       | 10,57 | 15,81 | 18,80 | 28,12 | 33,44  | 44,01  | 50,00  | 56,23  | 62,23   | 66,87   |
|                           | 0,01   | 4,61                       | 7,07  | 10,57 | 12,57 | 18,80 | 22,36  | 29,43  | 33,44  | 37,61  | 41,62   | 44,72   |
|                           | 1      | 1,46                       | 2,24  | 3,34  | 3,98  | 5,95  | 7,07   | 9,31   | 10,57  | 11,89  | 13,16   | 14,14   |
|                           | 2      | 1,22                       | 1,88  | 2,81  | 3,34  | 5,00  | 5,95   | 7,83   | 8,89   | 10,00  | 11,07   | 11,89   |
|                           | 3      | 1,11                       | 1,70  | 2,54  | 3,02  | 4,52  | 5,37   | 7,07   | 8,03   | 9,04   | 10,00   | 10,75   |
|                           | 4      | 1,03                       | 1,58  | 2,36  | 2,81  | 4,20  | 5,00   | 6,58   | 7,48   | 8,41   | 9,31    | 10,00   |
|                           | 5      | 0,97                       | 1,50  | 2,24  | 2,66  | 3,98  | 4,73   | 6,22   | 7,07   | 7,95   | 8,80    | 9,46    |
|                           | 6      | 0,93                       | 1,43  | 2,14  | 2,54  | 3,80  | 4,52   | 5,95   | 6,76   | 7,60   | 8,41    | 9,04    |
|                           | 7      | 0,90                       | 1,37  | 2,06  | 2,44  | 3,66  | 4,35   | 5,72   | 6,50   | 7,31   | 8,09    | 8,69    |
|                           | 8      | 0,87                       | 1,33  | 1,99  | 2,36  | 3,54  | 4,20   | 5,53   | 6,29   | 7,07   | 7,83    | 8,41    |
|                           | 9      | 0,84                       | 1,29  | 1,93  | 2,30  | 3,43  | 4,08   | 5,37   | 6,10   | 6,87   | 7,60    | 8,16    |
|                           | 10     | 0,82                       | 1,26  | 1,88  | 2,24  | 3,34  | 3,98   | 5,23   | 5,95   | 6,69   | 7,40    | 7,95    |
|                           | 20     | 0,69                       | 1,06  | 1,58  | 1,88  | 2,81  | 3,34   | 4,40   | 5,00   | 5,62   | 6,22    | 6,69    |
|                           | 30     | 0,62                       | 0,96  | 1,43  | 1,70  | 2,54  | 3,02   | 3,98   | 4,52   | 5,08   | 5,62    | 6,04    |
|                           | 40     | 0,58                       | 0,89  | 1,33  | 1,58  | 2,36  | 2,81   | 3,70   | 4,20   | 4,73   | 5,23    | 5,62    |
|                           | 50     | 0,55                       | 0,84  | 1,26  | 1,50  | 2,24  | 2,66   | 3,50   | 3,98   | 4,47   | 4,95    | 5,32    |
|                           | 60     | 0,52                       | 0,80  | 1,20  | 1,43  | 2,14  | 2,54   | 3,34   | 3,80   | 4,27   | 4,73    | 5,08    |
|                           | 70     | 0,50                       | 0,77  | 1,16  | 1,37  | 2,06  | 2,44   | 3,22   | 3,66   | 4,11   | 4,55    | 4,89    |
|                           | 80     | 0,49                       | 0,75  | 1,12  | 1,33  | 1,99  | 2,36   | 3,11   | 3,54   | 3,98   | 4,40    | 4,73    |
|                           | 90     | 0,47                       | 0,73  | 1,09  | 1,29  | 1,93  | 2,30   | 3,02   | 3,43   | 3,86   | 4,27    | 4,59    |
|                           | 100    | 0,46                       | 0,71  | 1,06  | 1,26  | 1,88  | 2,24   | 2,94   | 3,34   | 3,76   | 4,16    | 4,47    |
|                           | 500    | 0,31                       | 0,47  | 0,71  | 0,84  | 1,26  | 1,50   | 1,97   | 2,24   | 2,51   | 2,78    | 2,99    |
|                           | 1.000  | 0,26                       | 0,40  | 0,59  | 0,71  | 1,06  | 1,26   | 1,65   | 1,88   | 2,11   | 2,34    | 2,51    |
|                           | 5.000  | 0,17                       | 0,27  | 0,40  | 0,47  | 0,71  | 0,84   | 1,11   | 1,26   | 1,41   | 1,57    | 1,68    |
|                           | 10.000 | 0,15                       | 0,22  | 0,33  | 0,40  | 0,59  | 0,71   | 0,93   | 1,06   | 1,19   | 1,32    | 1,41    |
|                           | 20.000 | 0,12                       | 0,19  | 0,28  | 0,33  | 0,50  | 0,59   | 0,78   | 0,89   | 1,00   | 1,11    | 1,19    |
|                           | 40.000 | 0,10                       | 0,16  | 0,24  | 0,28  | 0,42  | 0,50   | 0,66   | 0,75   | 0,84   | 0,93    | 1,00    |

**Çizelge 5.9 : Çelik Boru İçin  $\beta_v$  (1/m) Değerleri.**

|                              |            | $K_v \text{ (kN/m}^2\text{)}$ |      |      |       |       |        |        |        |        |         |         |
|------------------------------|------------|-------------------------------|------|------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
|                              |            | 18                            | 100  | 500  | 1.000 | 5.000 | 10.000 | 30.000 | 50.000 | 80.000 | 120.000 | 160.000 |
| $EI \text{ (kN.m}^2\text{)}$ | 0,9        | 1,50                          | 2,30 | 3,43 | 4,08  | 6,10  | 7,26   | 9,55   | 10,86  | 12,21  | 13,51   | 14,52   |
|                              | 10         | 0,82                          | 1,26 | 1,88 | 2,24  | 3,34  | 3,98   | 5,23   | 5,95   | 6,69   | 7,40    | 7,95    |
|                              | 100        | 0,46                          | 0,71 | 1,06 | 1,26  | 1,88  | 2,24   | 2,94   | 3,34   | 3,76   | 4,16    | 4,47    |
|                              | 1.000      | 0,26                          | 0,40 | 0,59 | 0,71  | 1,06  | 1,26   | 1,65   | 1,88   | 2,11   | 2,34    | 2,51    |
|                              | 2.500      | 0,21                          | 0,32 | 0,47 | 0,56  | 0,84  | 1,00   | 1,32   | 1,50   | 1,68   | 1,86    | 2,00    |
|                              | 5.000      | 0,17                          | 0,27 | 0,40 | 0,47  | 0,71  | 0,84   | 1,11   | 1,26   | 1,41   | 1,57    | 1,68    |
|                              | 7.500      | 0,16                          | 0,24 | 0,36 | 0,43  | 0,64  | 0,76   | 1,00   | 1,14   | 1,28   | 1,41    | 1,52    |
|                              | 10.000     | 0,15                          | 0,22 | 0,33 | 0,40  | 0,59  | 0,71   | 0,93   | 1,06   | 1,19   | 1,32    | 1,41    |
|                              | 15.000     | 0,13                          | 0,20 | 0,30 | 0,36  | 0,54  | 0,64   | 0,84   | 0,96   | 1,07   | 1,19    | 1,28    |
|                              | 20.000     | 0,12                          | 0,19 | 0,28 | 0,33  | 0,50  | 0,59   | 0,78   | 0,89   | 1,00   | 1,11    | 1,19    |
|                              | 25.000     | 0,12                          | 0,18 | 0,27 | 0,32  | 0,47  | 0,56   | 0,74   | 0,84   | 0,95   | 1,05    | 1,12    |
|                              | 30.000     | 0,11                          | 0,17 | 0,25 | 0,30  | 0,45  | 0,54   | 0,71   | 0,80   | 0,90   | 1,00    | 1,07    |
|                              | 35.000     | 0,11                          | 0,16 | 0,24 | 0,29  | 0,43  | 0,52   | 0,68   | 0,77   | 0,87   | 0,96    | 1,03    |
|                              | 40.000     | 0,10                          | 0,16 | 0,24 | 0,28  | 0,42  | 0,50   | 0,66   | 0,75   | 0,84   | 0,93    | 1,00    |
|                              | 45.000     | 0,10                          | 0,15 | 0,23 | 0,27  | 0,41  | 0,49   | 0,64   | 0,73   | 0,82   | 0,90    | 0,97    |
|                              | 50.000     | 0,10                          | 0,15 | 0,22 | 0,27  | 0,40  | 0,47   | 0,62   | 0,71   | 0,80   | 0,88    | 0,95    |
|                              | 60.000     | 0,09                          | 0,14 | 0,21 | 0,25  | 0,38  | 0,45   | 0,59   | 0,68   | 0,76   | 0,84    | 0,90    |
|                              | 80.000     | 0,09                          | 0,13 | 0,20 | 0,24  | 0,35  | 0,42   | 0,55   | 0,63   | 0,71   | 0,78    | 0,84    |
|                              | 100.000    | 0,08                          | 0,13 | 0,19 | 0,22  | 0,33  | 0,40   | 0,52   | 0,59   | 0,67   | 0,74    | 0,80    |
|                              | 250.000    | 0,07                          | 0,10 | 0,15 | 0,18  | 0,27  | 0,32   | 0,42   | 0,47   | 0,53   | 0,59    | 0,63    |
|                              | 500.000    | 0,05                          | 0,08 | 0,13 | 0,15  | 0,22  | 0,27   | 0,35   | 0,40   | 0,45   | 0,49    | 0,53    |
|                              | 750.000    | 0,05                          | 0,08 | 0,11 | 0,14  | 0,20  | 0,24   | 0,32   | 0,36   | 0,40   | 0,45    | 0,48    |
|                              | 1.000.000  | 0,05                          | 0,07 | 0,11 | 0,13  | 0,19  | 0,22   | 0,29   | 0,33   | 0,38   | 0,42    | 0,45    |
|                              | 5.000.000  | 0,03                          | 0,05 | 0,07 | 0,08  | 0,13  | 0,15   | 0,20   | 0,22   | 0,25   | 0,28    | 0,30    |
|                              | 10.000.000 | 0,03                          | 0,04 | 0,06 | 0,07  | 0,11  | 0,13   | 0,17   | 0,19   | 0,21   | 0,23    | 0,25    |
|                              | 20.000.000 | 0,02                          | 0,03 | 0,05 | 0,06  | 0,09  | 0,11   | 0,14   | 0,16   | 0,18   | 0,20    | 0,21    |
|                              | 32.000.000 | 0,02                          | 0,03 | 0,04 | 0,05  | 0,08  | 0,09   | 0,12   | 0,14   | 0,16   | 0,17    | 0,19    |

İşlemlerde kolaylık sağlaması için  $\delta x D$  (zemin deplasman miktarı x Boru çapı) değerine  $Z$  denirse,  $Z$  katsayısı için aşağıdaki tablo elde edilir:

**Çizelge 5.10 :  $\delta x D = Z (m^2)$  Katsayısı.**

|              |     | $D (m)$ |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|--------------|-----|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|              |     | 0,02    | 0,1   | 0,25  | 0,75  | 1     | 1,25  | 1,50  | 1,75  | 2     | 2,25  | 2,54  |
| $\delta (m)$ | 0,1 | 0,002   | 0,010 | 0,025 | 0,075 | 0,100 | 0,125 | 0,150 | 0,175 | 0,200 | 0,225 | 0,254 |
|              | 0,2 | 0,004   | 0,020 | 0,050 | 0,150 | 0,200 | 0,250 | 0,300 | 0,350 | 0,400 | 0,450 | 0,508 |
|              | 0,3 | 0,006   | 0,030 | 0,075 | 0,225 | 0,300 | 0,375 | 0,450 | 0,525 | 0,600 | 0,675 | 0,762 |
|              | 0,4 | 0,008   | 0,040 | 0,100 | 0,300 | 0,400 | 0,500 | 0,600 | 0,700 | 0,800 | 0,900 | 1,016 |
|              | 0,5 | 0,010   | 0,050 | 0,125 | 0,375 | 0,500 | 0,625 | 0,750 | 0,875 | 1,000 | 1,125 | 1,270 |
|              | 0,6 | 0,012   | 0,060 | 0,150 | 0,450 | 0,600 | 0,750 | 0,900 | 1,050 | 1,200 | 1,350 | 1,524 |
|              | 0,7 | 0,014   | 0,070 | 0,175 | 0,525 | 0,700 | 0,875 | 1,050 | 1,225 | 1,400 | 1,575 | 1,778 |
|              | 0,8 | 0,016   | 0,080 | 0,200 | 0,600 | 0,800 | 1,000 | 1,200 | 1,400 | 1,600 | 1,800 | 2,032 |
|              | 0,9 | 0,018   | 0,090 | 0,225 | 0,675 | 0,900 | 1,125 | 1,350 | 1,575 | 1,800 | 2,025 | 2,286 |
|              | 1   | 0,020   | 0,100 | 0,250 | 0,750 | 1,000 | 1,250 | 1,500 | 1,750 | 2,000 | 2,250 | 2,540 |

Eksene dik kalıcı zemin hareketi (KZH) için Çizelge 5.10'daki  $Z$  katsayılarına göre  $\beta_v$  değerlerine bağlı olarak enine şekil değiştirme oranı ( $\varepsilon_b$ ) aşağıdaki tablodan (Çizelge 5.11) elde edilebilir.

Boru eksenine dik zemin hareketinden kaynaklı eksenel şekil değiştirme oranı ( $\varepsilon_a$ ) için ise aşağıdaki tablodan faydalanılabilir (Çizelge 5.12).

**Çizelge 5.11 : Boru Eksenine Dik KZH İçin  $\varepsilon_b$  Tablosu.**

|                |      | Z = $\delta x D$ |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |          |         |          |
|----------------|------|------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|----------|
|                |      | 0,002            | 0,006   | 0,01    | 0,05    | 0,1     | 0,3     | 0,5     | 0,8     | 1       | 1,3     | 1,5     | 1,8      | 2       | 2,54     |
| $\beta_v(1/m)$ | 0,02 |                  |         |         |         | 0,00001 | 0,00002 | 0,00003 | 0,00005 | 0,00006 | 0,00008 | 0,00010 | 0,00012  | 0,00013 | 0,00016  |
|                | 0,04 |                  |         |         | 0,00001 | 0,00003 | 0,00008 | 0,00013 | 0,00021 | 0,00026 | 0,00034 | 0,00039 | 0,00046  | 0,00052 | 0,00066  |
|                | 0,06 |                  |         | 0,00001 | 0,00003 | 0,00006 | 0,00017 | 0,00029 | 0,00046 | 0,00058 | 0,00075 | 0,00087 | 0,00104  | 0,00116 | 0,00147  |
|                | 0,08 |                  | 0,00001 | 0,00001 | 0,00005 | 0,00010 | 0,00031 | 0,00052 | 0,00083 | 0,00103 | 0,00134 | 0,00155 | 0,00186  | 0,00206 | 0,00262  |
|                | 0,1  |                  | 0,00001 | 0,00002 | 0,00008 | 0,00016 | 0,00048 | 0,00081 | 0,00129 | 0,00161 | 0,00210 | 0,00242 | 0,00290  | 0,00322 | 0,00409  |
|                | 0,2  | 0,00001          | 0,00004 | 0,00006 | 0,00032 | 0,00064 | 0,00193 | 0,00322 | 0,00516 | 0,00645 | 0,00838 | 0,00967 | 0,01161  | 0,01290 | 0,01638  |
|                | 0,4  | 0,00005          | 0,00015 | 0,00026 | 0,00129 | 0,00258 | 0,00774 | 0,01290 | 0,02063 | 0,02579 | 0,03353 | 0,03869 | 0,04643  | 0,05158 | 0,06551  |
|                | 0,6  | 0,00012          | 0,00035 | 0,00058 | 0,00290 | 0,00580 | 0,01741 | 0,02902 | 0,04643 | 0,05803 | 0,07544 | 0,08705 | 0,10446  | 0,11606 | 0,14740  |
|                | 0,8  | 0,00021          | 0,00062 | 0,00103 | 0,00516 | 0,01032 | 0,03095 | 0,05158 | 0,08253 | 0,10317 | 0,13412 | 0,15475 | 0,18570  | 0,20634 | 0,26205  |
|                | 1    | 0,00032          | 0,00097 | 0,00161 | 0,00806 | 0,01612 | 0,04836 | 0,08060 | 0,12896 | 0,16120 | 0,20956 | 0,24180 | 0,29016  | 0,32240 | 0,40945  |
|                | 1,2  | 0,00046          | 0,00139 | 0,00232 | 0,01161 | 0,02321 | 0,06964 | 0,11606 | 0,18570 | 0,23213 | 0,30177 | 0,34819 | 0,41783  | 0,46426 | 0,58961  |
|                | 1,4  | 0,00063          | 0,00190 | 0,00316 | 0,01580 | 0,03160 | 0,09479 | 0,15798 | 0,25276 | 0,31595 | 0,41074 | 0,47393 | 0,56871  | 0,63190 | 0,80252  |
|                | 1,6  | 0,00083          | 0,00248 | 0,00413 | 0,02063 | 0,04127 | 0,12380 | 0,20634 | 0,33014 | 0,41267 | 0,53647 | 0,61901 | 0,74281  | 0,82534 | 1,04819  |
|                | 1,8  | 0,00104          | 0,00313 | 0,00522 | 0,02611 | 0,05223 | 0,15669 | 0,26114 | 0,41783 | 0,52229 | 0,67897 | 0,78343 | 0,94012  | 1,04458 | 1,32661  |
|                | 2    | 0,00129          | 0,00387 | 0,00645 | 0,03224 | 0,06448 | 0,19344 | 0,32240 | 0,51584 | 0,64480 | 0,83824 | 0,96720 | 1,16064  | 1,28960 | 1,63779  |
|                | 2,5  | 0,00202          | 0,00605 | 0,01008 | 0,05038 | 0,10075 | 0,30225 | 0,50375 | 0,80600 | 1,00750 | 1,30975 | 1,51125 | 1,81350  | 2,01500 | 2,55905  |
|                | 3    | 0,00290          | 0,00870 | 0,01451 | 0,07254 | 0,14508 | 0,43524 | 0,72540 | 1,16064 | 1,45080 | 1,88604 | 2,17620 | 2,61144  | 2,90160 | 3,68503  |
|                | 3,5  | 0,00395          | 0,01185 | 0,01975 | 0,09874 | 0,19747 | 0,59241 | 0,98735 | 1,57976 | 1,97470 | 2,56711 | 2,96205 | 3,55446  | 3,94940 | 5,01574  |
|                | 4    | 0,00516          | 0,01548 | 0,02579 | 0,12896 | 0,25792 | 0,77376 | 1,28960 | 2,06336 | 2,57920 | 3,35296 | 3,86880 | 4,64256  | 5,15840 | 6,55117  |
|                | 4,5  | 0,00653          | 0,01959 | 0,03264 | 0,16322 | 0,32643 | 0,97929 | 1,63215 | 2,61144 | 3,26430 | 4,24359 | 4,89645 | 5,87574  | 6,52860 | 8,29132  |
|                | 5    | 0,00806          | 0,02418 | 0,04030 | 0,20150 | 0,40300 | 1,20900 | 2,01500 | 3,22400 | 4,03000 | 5,23900 | 6,04500 | 7,25400  | 8,06000 | 10,23620 |
|                | 5,5  | 0,00975          | 0,02926 | 0,04876 | 0,24382 | 0,48763 | 1,46289 | 2,43815 | 3,90104 | 4,87630 | 6,33919 | 7,31445 | 8,77734  | 9,75260 |          |
|                | 6    | 0,01161          | 0,03482 | 0,05803 | 0,29016 | 0,58032 | 1,74096 | 2,90160 | 4,64256 | 5,80320 | 7,54416 | 8,70480 | 10,44576 |         |          |

**Çizelge 5.11 (devam) : Boru Eksenine Dik KZH İçin  $\varepsilon_b$  Tablosu.**

|    | Z = $\delta \times D$ |         |         |         |         |          |         |          |          |          |     |     |   |      |
|----|-----------------------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|----------|----------|----------|-----|-----|---|------|
|    | 0,002                 | 0,006   | 0,01    | 0,05    | 0,1     | 0,3      | 0,5     | 0,8      | 1        | 1,3      | 1,5 | 1,8 | 2 | 2,54 |
| 7  | 0,01580               | 0,04739 | 0,07899 | 0,39494 | 0,78988 | 2,36964  | 3,94940 | 6,31904  | 7,89880  | 10,26844 |     |     |   |      |
| 8  | 0,02063               | 0,06190 | 0,10317 | 0,51584 | 1,03168 | 3,09504  | 5,15840 | 8,25344  | 10,31680 |          |     |     |   |      |
| 9  | 0,02611               | 0,07834 | 0,13057 | 0,65286 | 1,30572 | 3,91716  | 6,52860 | 10,44576 |          |          |     |     |   |      |
| 10 | 0,03224               | 0,09672 | 0,16120 | 0,80600 | 1,61200 | 4,83600  | 8,06000 |          |          |          |     |     |   |      |
| 11 | 0,03901               | 0,11703 | 0,19505 | 0,97526 | 1,95052 | 5,85156  | 9,75260 |          |          |          |     |     |   |      |
| 12 | 0,04643               | 0,13928 | 0,23213 | 1,16064 | 2,32128 | 6,96384  |         |          |          |          |     |     |   |      |
| 13 | 0,05449               | 0,16346 | 0,27243 | 1,36214 | 2,72428 | 8,17284  |         |          |          |          |     |     |   |      |
| 14 | 0,06319               | 0,18957 | 0,31595 | 1,57976 | 3,15952 | 9,47856  |         |          |          |          |     |     |   |      |
| 15 | 0,07254               | 0,21762 | 0,36270 | 1,81350 | 3,62700 | 10,88100 |         |          |          |          |     |     |   |      |
| 16 | 0,08253               | 0,24760 | 0,41267 | 2,06336 | 4,12672 |          |         |          |          |          |     |     |   |      |
| 20 | 0,12896               | 0,38688 | 0,64480 | 3,22400 | 6,44800 |          |         |          |          |          |     |     |   |      |
| 30 | 0,29016               | 0,87048 | 1,45080 | 7,25400 |         |          |         |          |          |          |     |     |   |      |
| 40 | 0,51584               | 1,54752 | 2,57920 |         |         |          |         |          |          |          |     |     |   |      |
| 60 | 1,16064               | 3,48192 | 5,80320 |         |         |          |         |          |          |          |     |     |   |      |
| 70 | 1,57976               | 4,73928 | 7,89880 |         |         |          |         |          |          |          |     |     |   |      |

Çizelge 5.12 : Boru Eksenine Dik KZH İçin  $\varepsilon_a$  Tablosu.

|                 |      | $\delta$ (m) |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
|-----------------|------|--------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|                 |      | 0,1          | 0,2        | 0,3        | 0,4        | 0,5        | 0,6        | 0,7        | 0,8        | 0,90       | 1          |
| $\beta_v$ (1/m) | 0,02 | 0,00000050   | 0,00000200 | 0,00000450 | 0,00000800 | 0,00001250 | 0,00001800 | 0,00002450 | 0,00003200 | 0,00004050 | 0,00005000 |
|                 | 0,04 | 0,00000200   | 0,00000800 | 0,00001800 | 0,00003200 | 0,00005000 | 0,00007200 | 0,00009800 | 0,00012799 | 0,00016199 | 0,00019998 |
|                 | 0,06 | 0,00000450   | 0,00001800 | 0,00004050 | 0,00007200 | 0,00011249 | 0,00016199 | 0,00022048 | 0,00028796 | 0,00036443 | 0,00044990 |
|                 | 0,08 | 0,00000800   | 0,00003200 | 0,00007200 | 0,00012799 | 0,00019998 | 0,00028796 | 0,00039192 | 0,00051187 | 0,00064779 | 0,00079968 |
|                 | 0,1  | 0,00001250   | 0,00005000 | 0,00011249 | 0,00019998 | 0,00031245 | 0,00044990 | 0,00061231 | 0,00079968 | 0,00101199 | 0,00124922 |
|                 | 0,2  | 0,00005000   | 0,00019998 | 0,00044990 | 0,00079968 | 0,00124922 | 0,00179838 | 0,00244701 | 0,00319490 | 0,00404183 | 0,00498756 |
|                 | 0,4  | 0,00019998   | 0,00079968 | 0,00179838 | 0,00319490 | 0,00498756 | 0,00717426 | 0,00975244 | 0,01271911 | 0,01607086 | 0,01980390 |
|                 | 0,6  | 0,00044990   | 0,00179838 | 0,00404183 | 0,00717426 | 0,01118742 | 0,01607086 | 0,02181212 | 0,02839681 | 0,03580886 | 0,04403065 |
|                 | 0,8  | 0,00079968   | 0,00319490 | 0,00717426 | 0,01271911 | 0,01980390 | 0,02839681 | 0,03846040 | 0,04995238 | 0,06282642 | 0,07703296 |
|                 | 1    | 0,00124922   | 0,00498756 | 0,01118742 | 0,01980390 | 0,03077641 | 0,04403065 | 0,05948101 | 0,07703296 | 0,09658561 | 0,11803399 |
|                 | 1,2  | 0,00179838   | 0,00717426 | 0,01607086 | 0,02839681 | 0,04403065 | 0,06282642 | 0,08461975 | 0,10923397 | 0,13648581 | 0,16619038 |
|                 | 1,4  | 0,00244701   | 0,00975244 | 0,02181212 | 0,03846040 | 0,05948101 | 0,08461975 | 0,11359777 | 0,14612390 | 0,18190524 | 0,22065556 |
|                 | 1,6  | 0,00319490   | 0,01271911 | 0,02839681 | 0,04995238 | 0,07703296 | 0,10923397 | 0,14612390 | 0,18726577 | 0,23223374 | 0,28062485 |
|                 | 1,8  | 0,00404183   | 0,01607086 | 0,03580886 | 0,06282642 | 0,09658561 | 0,13648581 | 0,18190524 | 0,23223374 | 0,28689549 | 0,34536240 |
|                 | 2    | 0,00498756   | 0,01980390 | 0,04403065 | 0,07703296 | 0,11803399 | 0,16619038 | 0,22065556 | 0,28062485 | 0,34536240 | 0,41421356 |
|                 | 2,5  | 0,00778222   | 0,03077641 | 0,06800047 | 0,11803399 | 0,17924764 | 0,25000000 | 0,32876823 | 0,41421356 | 0,50519932 | 0,60078106 |
|                 | 3    | 0,01118742   | 0,04403065 | 0,09658561 | 0,16619038 | 0,25000000 | 0,34536240 | 0,45000000 | 0,56204994 | 0,68002976 | 0,80277564 |
|                 | 3,5  | 0,01519703   | 0,05948101 | 0,12943570 | 0,22065556 | 0,32876823 | 0,45000000 | 0,58133646 | 0,72046505 | 0,86564332 | 1,01556444 |
|                 | 4    | 0,01980390   | 0,07703296 | 0,16619038 | 0,28062485 | 0,41421356 | 0,56204994 | 0,72046505 | 0,88679623 | 1,05912603 | 1,23606798 |
|                 | 4,5  | 0,02500000   | 0,09658561 | 0,20649285 | 0,34536240 | 0,50519932 | 0,68002976 | 0,86564332 | 1,05912603 | 1,25845633 | 1,46221445 |
|                 | 5    | 0,03077641   | 0,11803399 | 0,25000000 | 0,41421356 | 0,60078106 | 0,80277564 | 1,01556444 | 1,23606798 | 1,46221445 | 1,69258240 |
|                 | 5,5  | 0,03712343   | 0,14127122 | 0,29638922 | 0,48660687 | 0,70018381 | 0,92937814 | 1,16924526 | 1,41660919 | 1,66938663 | 1,92617498 |
|                 | 6    | 0,04403065   | 0,16619038 | 0,34536240 | 0,56204994 | 0,80277564 | 1,05912603 | 1,32594067 | 1,60000000 | 1,87923601 | 2,16227766 |

**Çizelge 5.12 (devam) : Boru Eksenine Dik KZH İçin  $\varepsilon_a$  Tablosu.**

|    | $\delta$ (m) |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
|----|--------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|    | 0,1          | 0,2        | 0,3        | 0,4        | 0,5        | 0,6        | 0,7        | 0,8        | 0,90       | 1          |
| 7  | 0,05948101   | 0,22065556 | 0,45000000 | 0,72046505 | 1,01556444 | 1,32594067 | 1,64622372 | 1,97321375 | 2,30492057 | 2,64005494 |
| 8  | 0,07703296   | 0,28062485 | 0,56204994 | 0,88679623 | 1,23606798 | 1,60000000 | 1,97321375 | 2,35261092 | 2,73630834 | 3,12310563 |
| 9  | 0,09658561   | 0,34536240 | 0,68002976 | 1,05912603 | 1,46221445 | 1,87923601 | 2,30492057 | 2,73630834 | 3,17163038 | 3,60977223 |
| 10 | 0,11803399   | 0,41421356 | 0,80277564 | 1,23606798 | 1,69258240 | 2,16227766 | 2,64005494 | 3,12310563 | 3,60977223 | 4,09901951 |
| 11 | 0,14127122   | 0,48660687 | 0,92937814 | 1,41660919 | 1,92617498 | 2,44818793 | 2,97775062 | 3,51220567 | 4,05000000 | 4,59016994 |
| 12 | 0,16619038   | 0,56204994 | 1,05912603 | 1,60000000 | 2,16227766 | 2,73630834 | 3,31740663 | 3,90306027 | 4,49181209 | 5,08276253 |
| 13 | 0,19268604   | 0,64012195 | 1,19146070 | 1,78567766 | 2,40036763 | 3,02616443 | 3,65859421 | 4,29528092 | 4,93485467 | 5,57647322 |
| 14 | 0,22065556   | 0,72046505 | 1,32594067 | 1,97321375 | 2,64005494 | 3,31740663 | 4,00099990 | 4,68858506 | 5,37887137 | 6,07106781 |
| 15 | 0,25000000   | 0,80277564 | 1,46221445 | 2,16227766 | 2,88104367 | 3,60977223 | 4,34438958 | 5,08276253 | 5,82367203 | 6,56637298 |
| 16 | 0,28062485   | 0,88679623 | 1,60000000 | 2,35261092 | 3,12310563 | 3,90306027 | 4,68858506 | 5,47765390 | 6,26911274 | 7,06225775 |
| 20 | 0,41421356   | 1,23606798 | 2,16227766 | 3,12310563 | 4,09901951 | 5,08276253 | 6,07106781 | 7,06225775 | 8,05538514 | 9,04987562 |
| 30 | 0,80277564   | 2,16227766 | 3,60977223 | 5,08276253 | 6,56637298 | 8,05538514 | 9,54751155 |            |            |            |
| 40 | 1,23606798   | 3,12310563 | 5,08276253 | 7,06225775 | 9,04987562 |            |            |            |            |            |
| 60 | 2,16227766   | 5,08276253 | 8,05538514 |            |            |            |            |            |            |            |
| 70 | 2,64005494   | 6,07106781 | 9,54751155 |            |            |            |            |            |            |            |

### 5.5.2 Boru eksenine paralel zemin hareketi durumu

Bağıntı 3.21 dikkate alınırsa  $\bar{\gamma} = 18 \text{ kN/m}^3$ ,  $k_0 = 0,41$ ;  $k = 0,6$ ;  $\emptyset = 36^\circ$  değerleri kullanılarak;

$$t_u = 15,784 \times D \times H \quad (5.1)$$

elde edilir. Gömülme derinliği ( $H$ ) ve çap ( $D$ ) verilerine bağlı olarak  $t_u$  ve  $k_u$  değişim tablosu aşağıdaki gibi elde edilir (Çizelge 5.13). Ayrıca çelik ve PE borular için  $\beta_u$  değerleri için aşağıdaki Çizelge 5.14 ve 5.15 hazırlanmıştır.

**Çizelge 5.13 : Boyuna Zemin Hareket  $t_u$  ( $kN/m$ ) Değişimi.**

|         |     | $D$ (m) |      |      |      |     |      |      |      |    |      |      |
|---------|-----|---------|------|------|------|-----|------|------|------|----|------|------|
|         |     | 0,02    | 0,1  | 0,25 | 0,75 | 1   | 1,25 | 1,50 | 1,75 | 2  | 2,25 | 2,54 |
| $H$ (m) | 0,5 | 0,16    | 0,79 | 1,97 | 5,92 | 7,9 | 10   | 12   | 14   | 16 | 18   | 20   |
|         | 1   | 0,32    | 1,58 | 3,95 | 11,8 | 16  | 20   | 24   | 28   | 32 | 36   | 40   |
|         | 1,5 | 0,47    | 2,37 | 5,92 | 17,8 | 24  | 30   | 36   | 41   | 47 | 53   | 60   |
|         | 2   | 0,63    | 3,16 | 7,89 | 23,7 | 32  | 39   | 47   | 55   | 63 | 71   | 80   |
|         | 2,5 | 0,79    | 3,95 | 9,87 | 29,6 | 39  | 49   | 59   | 69   | 79 | 89   | 100  |

**Çizelge 5.14 :** Boyuna Zemin Hareketi  $k_u$  ( $kN/m^2$ ) Değerleri.

|            |      | $t_u$ (kN/m) |     |      |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------|------|--------------|-----|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|            |      | 0,16         | 1   | 10   | 20    | 30    | 40    | 50    | 60    | 70    | 80    | 100   |
| $X_u$ (mm) | 2,54 | 126          | 787 | 7874 | 15748 | 23622 | 31496 | 39370 | 47244 | 55118 | 62992 | 78740 |
|            | 3,0  | 107          | 667 | 6667 | 13333 | 20000 | 26667 | 33333 | 40000 | 46667 | 53333 | 66667 |
|            | 3,5  | 91           | 571 | 5714 | 11429 | 17143 | 22857 | 28571 | 34286 | 40000 | 45714 | 57143 |
|            | 4,0  | 80           | 500 | 5000 | 10000 | 15000 | 20000 | 25000 | 30000 | 35000 | 40000 | 50000 |
|            | 4,5  | 71           | 444 | 4444 | 8889  | 13333 | 17778 | 22222 | 26667 | 31111 | 35556 | 44444 |
|            | 5,08 | 63           | 394 | 3937 | 7874  | 11811 | 15748 | 19685 | 23622 | 27559 | 31496 | 39370 |

**Çizelge 5.15 : Polietilen Boru İçin  $\beta_u(1/m)$  Değerleri.**

|         |         | $K_u$ (kN/m <sup>2</sup> ) |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |
|---------|---------|----------------------------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
|         |         | 60                         | 500  | 1000 | 2000 | 3000 | 4000 | 5000 | 10000 | 25000 | 50000 | 79000 |
| EA (kN) | 90      | 0,82                       | 2,36 | 3,33 | 4,71 | 5,77 | 6,67 | 7,45 | 10,54 | 16,67 | 23,57 | 29,63 |
|         | 250     | 0,49                       | 1,41 | 2,00 | 2,83 | 3,46 | 4,00 | 4,47 | 6,32  | 10,00 | 14,14 | 17,78 |
|         | 500     | 0,35                       | 1,00 | 1,41 | 2,00 | 2,45 | 2,83 | 3,16 | 4,47  | 7,07  | 10,00 | 12,57 |
|         | 750     | 0,28                       | 0,82 | 1,15 | 1,63 | 2,00 | 2,31 | 2,58 | 3,65  | 5,77  | 8,16  | 10,26 |
|         | 1.000   | 0,24                       | 0,71 | 1,00 | 1,41 | 1,73 | 2,00 | 2,24 | 3,16  | 5,00  | 7,07  | 8,89  |
|         | 1.500   | 0,20                       | 0,58 | 0,82 | 1,15 | 1,41 | 1,63 | 1,83 | 2,58  | 4,08  | 5,77  | 7,26  |
|         | 2.000   | 0,17                       | 0,50 | 0,71 | 1,00 | 1,22 | 1,41 | 1,58 | 2,24  | 3,54  | 5,00  | 6,28  |
|         | 2.500   | 0,15                       | 0,45 | 0,63 | 0,89 | 1,10 | 1,26 | 1,41 | 2,00  | 3,16  | 4,47  | 5,62  |
|         | 3.000   | 0,14                       | 0,41 | 0,58 | 0,82 | 1,00 | 1,15 | 1,29 | 1,83  | 2,89  | 4,08  | 5,13  |
|         | 3.500   | 0,13                       | 0,38 | 0,53 | 0,76 | 0,93 | 1,07 | 1,20 | 1,69  | 2,67  | 3,78  | 4,75  |
|         | 4.000   | 0,12                       | 0,35 | 0,50 | 0,71 | 0,87 | 1,00 | 1,12 | 1,58  | 2,50  | 3,54  | 4,44  |
|         | 4.500   | 0,12                       | 0,33 | 0,47 | 0,67 | 0,82 | 0,94 | 1,05 | 1,49  | 2,36  | 3,33  | 4,19  |
|         | 5.000   | 0,11                       | 0,32 | 0,45 | 0,63 | 0,77 | 0,89 | 1,00 | 1,41  | 2,24  | 3,16  | 3,97  |
|         | 5.500   | 0,10                       | 0,30 | 0,43 | 0,60 | 0,74 | 0,85 | 0,95 | 1,35  | 2,13  | 3,02  | 3,79  |
|         | 6.000   | 0,10                       | 0,29 | 0,41 | 0,58 | 0,71 | 0,82 | 0,91 | 1,29  | 2,04  | 2,89  | 3,63  |
|         | 7.000   | 0,09                       | 0,27 | 0,38 | 0,53 | 0,65 | 0,76 | 0,85 | 1,20  | 1,89  | 2,67  | 3,36  |
|         | 8.000   | 0,09                       | 0,25 | 0,35 | 0,50 | 0,61 | 0,71 | 0,79 | 1,12  | 1,77  | 2,50  | 3,14  |
|         | 9.000   | 0,08                       | 0,24 | 0,33 | 0,47 | 0,58 | 0,67 | 0,75 | 1,05  | 1,67  | 2,36  | 2,96  |
|         | 10.000  | 0,08                       | 0,22 | 0,32 | 0,45 | 0,55 | 0,63 | 0,71 | 1,00  | 1,58  | 2,24  | 2,81  |
|         | 20.000  | 0,05                       | 0,16 | 0,22 | 0,32 | 0,39 | 0,45 | 0,50 | 0,71  | 1,12  | 1,58  | 1,99  |
|         | 30.000  | 0,04                       | 0,13 | 0,18 | 0,26 | 0,32 | 0,37 | 0,41 | 0,58  | 0,91  | 1,29  | 1,62  |
|         | 40.000  | 0,04                       | 0,11 | 0,16 | 0,22 | 0,27 | 0,32 | 0,35 | 0,50  | 0,79  | 1,12  | 1,41  |
|         | 60.000  | 0,03                       | 0,09 | 0,13 | 0,18 | 0,22 | 0,26 | 0,29 | 0,41  | 0,65  | 0,91  | 1,15  |
|         | 80.000  | 0,03                       | 0,08 | 0,11 | 0,16 | 0,19 | 0,22 | 0,25 | 0,35  | 0,56  | 0,79  | 0,99  |
|         | 100.000 | 0,02                       | 0,07 | 0,10 | 0,14 | 0,17 | 0,20 | 0,22 | 0,32  | 0,50  | 0,71  | 0,89  |
|         | 200.000 | 0,02                       | 0,05 | 0,07 | 0,10 | 0,12 | 0,14 | 0,16 | 0,22  | 0,35  | 0,50  | 0,63  |
|         | 240.000 | 0,02                       | 0,05 | 0,06 | 0,09 | 0,11 | 0,13 | 0,14 | 0,20  | 0,32  | 0,46  | 0,57  |

**Çizelge 5.16 : Çelik Boru İçin  $\beta_u(1/m)$  Değerleri.**

|           |            | $K_u$ (kN/m <sup>2</sup> ) |       |      |      |      |      |      |       |       |       |       |
|-----------|------------|----------------------------|-------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
|           |            | 60                         | 500   | 1000 | 2000 | 3000 | 4000 | 5000 | 10000 | 25000 | 50000 | 79000 |
| $EA$ (kN) | 22.000     | 0,05                       | 0,15  | 0,21 | 0,30 | 0,37 | 0,43 | 0,48 | 0,67  | 1,07  | 1,51  | 1,89  |
|           | 50.000     | 0,03                       | 0,10  | 0,14 | 0,20 | 0,24 | 0,28 | 0,32 | 0,45  | 0,71  | 1,00  | 1,26  |
|           | 75.000     | 0,03                       | 0,08  | 0,12 | 0,16 | 0,20 | 0,23 | 0,26 | 0,37  | 0,58  | 0,82  | 1,03  |
|           | 100.000    | 0,02                       | 0,07  | 0,10 | 0,14 | 0,17 | 0,20 | 0,22 | 0,32  | 0,50  | 0,71  | 0,89  |
|           | 200.000    | 0,02                       | 0,05  | 0,07 | 0,10 | 0,12 | 0,14 | 0,16 | 0,22  | 0,35  | 0,50  | 0,63  |
|           | 300.000    | 0,01                       | 0,04  | 0,06 | 0,08 | 0,10 | 0,12 | 0,13 | 0,18  | 0,29  | 0,41  | 0,51  |
|           | 400.000    | 0,01                       | 0,04  | 0,05 | 0,07 | 0,09 | 0,10 | 0,11 | 0,16  | 0,25  | 0,35  | 0,44  |
|           | 500.000    | 0,01                       | 0,03  | 0,04 | 0,06 | 0,08 | 0,09 | 0,10 | 0,14  | 0,22  | 0,32  | 0,40  |
|           | 600.000    | 0,01                       | 0,03  | 0,04 | 0,06 | 0,07 | 0,08 | 0,09 | 0,13  | 0,20  | 0,29  | 0,36  |
|           | 700.000    | 0,01                       | 0,03  | 0,04 | 0,05 | 0,07 | 0,08 | 0,08 | 0,12  | 0,19  | 0,27  | 0,34  |
|           | 800.000    | 0,01                       | 0,03  | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,08 | 0,11  | 0,18  | 0,25  | 0,31  |
|           | 900.000    | 0,01                       | 0,02  | 0,03 | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,07 | 0,11  | 0,17  | 0,24  | 0,30  |
|           | 1.000.000  | 0,01                       | 0,02  | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,10  | 0,16  | 0,22  | 0,28  |
|           | 1.250.000  | 0,01                       | 0,02  | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,06 | 0,09  | 0,14  | 0,20  | 0,25  |
|           | 1.500.000  | 0,01                       | 0,02  | 0,03 | 0,04 | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,08  | 0,13  | 0,18  | 0,23  |
|           | 1.750.000  | 0,01                       | 0,02  | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,05 | 0,08  | 0,12  | 0,17  | 0,21  |
|           | 2.000.000  | 0,01                       | 0,02  | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,04 | 0,05 | 0,07  | 0,11  | 0,16  | 0,20  |
|           | 2.500.000  | 0,005                      | 0,01  | 0,02 | 0,03 | 0,03 | 0,04 | 0,04 | 0,06  | 0,10  | 0,14  | 0,18  |
|           | 3.000.000  | 0,004                      | 0,01  | 0,02 | 0,03 | 0,03 | 0,04 | 0,04 | 0,06  | 0,09  | 0,13  | 0,16  |
|           | 3.500.000  | 0,004                      | 0,01  | 0,02 | 0,02 | 0,03 | 0,03 | 0,04 | 0,05  | 0,08  | 0,12  | 0,15  |
|           | 4.000.000  | 0,004                      | 0,01  | 0,02 | 0,02 | 0,03 | 0,03 | 0,04 | 0,05  | 0,08  | 0,11  | 0,14  |
|           | 4.500.000  | 0,004                      | 0,01  | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,05  | 0,07  | 0,11  | 0,13  |
|           | 5.000.000  | 0,003                      | 0,01  | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,03 | 0,03 | 0,04  | 0,07  | 0,10  | 0,13  |
|           | 10.000.000 | 0,002                      | 0,01  | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,03  | 0,05  | 0,07  | 0,09  |
|           | 20.000.000 | 0,002                      | 0,01  | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,02  | 0,04  | 0,05  | 0,06  |
|           | 30.000.000 | 0,001                      | 0,004 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02  | 0,03  | 0,04  | 0,05  |
|           | 40.000.000 | 0,001                      | 0,004 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02  | 0,03  | 0,04  | 0,04  |

$l$  boyu ve boyuna KZH durumunda oluşan boyuna şekil değiştirme  $\varepsilon_a$  için aşağıdaki tablolar hazırlanmıştır. Burada;  $m = \sqrt{2\delta/x_u}$  ve  $n = \sqrt{x_u\delta/2}$  olarak alınmıştır.

**Çizelge 5.17 :  $m$  Değerleri Tablosu.**

|            |      | $\delta$ (m) |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------|------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|            |      | 0,1          | 0,2   | 0,3   | 0,4   | 0,5   | 0,6   | 0,7   | 0,8   | 0,9   | 1     |
| $X_u$ (mm) | 2,54 | 8,87         | 12,55 | 15,37 | 17,75 | 19,84 | 21,74 | 23,48 | 25,10 | 26,62 | 28,06 |
|            | 3,0  | 8,16         | 11,55 | 14,14 | 16,33 | 18,26 | 20,00 | 21,60 | 23,09 | 24,49 | 25,82 |
|            | 3,5  | 7,56         | 10,69 | 13,09 | 15,12 | 16,90 | 18,52 | 20,00 | 21,38 | 22,68 | 23,90 |
|            | 4,0  | 7,07         | 10,00 | 12,25 | 14,14 | 15,81 | 17,32 | 18,71 | 20,00 | 21,21 | 22,36 |
|            | 4,5  | 6,67         | 9,43  | 11,55 | 13,33 | 14,91 | 16,33 | 17,64 | 18,86 | 20,00 | 21,08 |
|            | 5,08 | 6,27         | 8,87  | 10,87 | 12,55 | 14,03 | 15,37 | 16,60 | 17,75 | 18,82 | 19,84 |

**Çizelge 5.18 :  $l$  (m) Boyu Tablosu.**

|           |      | m    |      |      |      |      |      |      |      |       |       |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
|           |      | 6    | 9    | 12   | 15   | 18   | 20   | 22   | 24   | 26    | 29    |
| $\beta_u$ | 0,02 | 300  | 450  | 600  | 750  | 900  | 1000 | 1100 | 1200 | 1300  | 1450  |
|           | 0,2  | 30   | 45   | 60   | 75   | 90   | 100  | 110  | 120  | 130   | 145   |
|           | 0,5  | 12   | 18   | 24   | 30   | 36   | 40   | 44   | 48   | 52    | 58    |
|           | 1    | 6    | 9    | 12   | 15   | 18   | 20   | 22   | 24   | 26    | 29    |
|           | 2,6  | 2,31 | 3,46 | 4,62 | 5,77 | 6,92 | 7,69 | 8,46 | 9,23 | 10,00 | 11,15 |

**Çizelge 5.19 :  $n$  Değerleri Tablosu.**

|            |      | $\delta$ (m) |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------|------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|            |      | 0,1          | 0,2   | 0,3   | 0,4   | 0,5   | 0,6   | 0,7   | 0,8   | 0,9   | 1     |
| $X_u$ (mm) | 2,54 | 0,011        | 0,016 | 0,020 | 0,023 | 0,025 | 0,028 | 0,030 | 0,032 | 0,034 | 0,036 |
|            | 3,0  | 0,012        | 0,017 | 0,021 | 0,024 | 0,027 | 0,030 | 0,032 | 0,035 | 0,037 | 0,039 |
|            | 3,5  | 0,013        | 0,019 | 0,023 | 0,026 | 0,030 | 0,032 | 0,035 | 0,037 | 0,040 | 0,042 |
|            | 4,0  | 0,014        | 0,020 | 0,024 | 0,028 | 0,032 | 0,035 | 0,037 | 0,040 | 0,042 | 0,045 |
|            | 4,5  | 0,015        | 0,021 | 0,026 | 0,030 | 0,034 | 0,037 | 0,040 | 0,042 | 0,045 | 0,047 |
|            | 5,08 | 0,016        | 0,023 | 0,028 | 0,032 | 0,036 | 0,039 | 0,042 | 0,045 | 0,048 | 0,050 |

**Çizelge 5.20 : Boru Eksenine Paralel KZH İçin  $\varepsilon_a$  Tablosu.**

|           |      | $n$     |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|-----------|------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|           |      | 0,011   | 0,015   | 0,02    | 0,025   | 0,03    | 0,035   | 0,04    | 0,045   | 0,05    | 0,055   |
| $\beta_u$ | 0,01 | 0,00011 | 0,00015 | 0,00020 | 0,00025 | 0,00030 | 0,00035 | 0,00040 | 0,00045 | 0,00050 | 0,00055 |
|           | 0,02 | 0,00022 | 0,00030 | 0,00040 | 0,00050 | 0,00060 | 0,00070 | 0,00080 | 0,00090 | 0,00100 | 0,00110 |
|           | 0,03 | 0,00033 | 0,00045 | 0,00060 | 0,00075 | 0,00090 | 0,00105 | 0,00120 | 0,00135 | 0,00150 | 0,00165 |
|           | 0,04 | 0,00044 | 0,00060 | 0,00080 | 0,00100 | 0,00120 | 0,00140 | 0,00160 | 0,00180 | 0,00200 | 0,00220 |
|           | 0,05 | 0,00055 | 0,00075 | 0,00100 | 0,00125 | 0,00150 | 0,00175 | 0,00200 | 0,00225 | 0,00250 | 0,00275 |
|           | 0,06 | 0,00066 | 0,00090 | 0,00120 | 0,00150 | 0,00180 | 0,00210 | 0,00240 | 0,00270 | 0,00300 | 0,00330 |
|           | 0,07 | 0,00077 | 0,00105 | 0,00140 | 0,00175 | 0,00210 | 0,00245 | 0,00280 | 0,00315 | 0,00350 | 0,00385 |
|           | 0,08 | 0,00088 | 0,00120 | 0,00160 | 0,00200 | 0,00240 | 0,00280 | 0,00320 | 0,00360 | 0,00400 | 0,00440 |
|           | 0,09 | 0,00099 | 0,00135 | 0,00180 | 0,00225 | 0,00270 | 0,00315 | 0,00360 | 0,00405 | 0,00450 | 0,00495 |
|           | 0,1  | 0,00110 | 0,00150 | 0,00200 | 0,00250 | 0,00300 | 0,00350 | 0,00400 | 0,00450 | 0,00500 | 0,00550 |
|           | 0,2  | 0,00220 | 0,00300 | 0,00400 | 0,00500 | 0,00600 | 0,00700 | 0,00800 | 0,00900 | 0,01000 | 0,01100 |
|           | 0,3  | 0,00330 | 0,00450 | 0,00600 | 0,00750 | 0,00900 | 0,01050 | 0,01200 | 0,01350 | 0,01500 | 0,01650 |
|           | 0,4  | 0,00440 | 0,00600 | 0,00800 | 0,01000 | 0,01200 | 0,01400 | 0,01600 | 0,01800 | 0,02000 | 0,02200 |
|           | 0,5  | 0,00550 | 0,00750 | 0,01000 | 0,01250 | 0,01500 | 0,01750 | 0,02000 | 0,02250 | 0,02500 | 0,02750 |
|           | 0,6  | 0,00660 | 0,00900 | 0,01200 | 0,01500 | 0,01800 | 0,02100 | 0,02400 | 0,02700 | 0,03000 | 0,03300 |
|           | 0,7  | 0,00770 | 0,01050 | 0,01400 | 0,01750 | 0,02100 | 0,02450 | 0,02800 | 0,03150 | 0,03500 | 0,03850 |
|           | 0,8  | 0,00880 | 0,01200 | 0,01600 | 0,02000 | 0,02400 | 0,02800 | 0,03200 | 0,03600 | 0,04000 | 0,04400 |
|           | 0,9  | 0,00990 | 0,01350 | 0,01800 | 0,02250 | 0,02700 | 0,03150 | 0,03600 | 0,04050 | 0,04500 | 0,04950 |
|           | 1    | 0,01100 | 0,01500 | 0,02000 | 0,02500 | 0,03000 | 0,03500 | 0,04000 | 0,04500 | 0,05000 | 0,05500 |
|           | 1,5  | 0,01650 | 0,02250 | 0,03000 | 0,03750 | 0,04500 | 0,05250 | 0,06000 | 0,06750 | 0,07500 | 0,08250 |
|           | 2    | 0,02200 | 0,03000 | 0,04000 | 0,05000 | 0,06000 | 0,07000 | 0,08000 | 0,09000 | 0,10000 | 0,11000 |
|           | 2,6  | 0,02860 | 0,03900 | 0,05200 | 0,06500 | 0,07800 | 0,09100 | 0,10400 | 0,11700 | 0,13000 | 0,14300 |

### 5.5.3 Sismik dalga yayılımı durumu

Çizelge 3.4 ve Şekil 3.10'daki veriler kullanılarak Bağntı 4.32, 4.33, 4.34 için aşağıdaki tablolar elde edilebilir.

Aşağıda  $S = 2\pi^2\delta D$  olarak tanımlanmaktadır. Buna göre;

**Çizelge 5.21 : S Değeri Tablosu.**

|              |     | <i>D</i> (m) |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |
|--------------|-----|--------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|              |     | 0,02         | 0,1  | 0,25 | 0,75  | 1     | 1,25  | 1,50  | 1,75  | 2     | 2,25  | 2,54  |
| $\delta$ (m) | 0,1 | 0,04         | 0,20 | 0,49 | 1,48  | 1,97  | 2,47  | 2,96  | 3,45  | 3,95  | 4,44  | 5,01  |
|              | 0,2 | 0,08         | 0,39 | 0,99 | 2,96  | 3,95  | 4,93  | 5,92  | 6,91  | 7,90  | 8,88  | 10,03 |
|              | 0,3 | 0,12         | 0,59 | 1,48 | 4,44  | 5,92  | 7,40  | 8,88  | 10,36 | 11,84 | 13,32 | 15,04 |
|              | 0,4 | 0,16         | 0,79 | 1,97 | 5,92  | 7,90  | 9,87  | 11,84 | 13,82 | 15,79 | 17,77 | 20,06 |
|              | 0,5 | 0,20         | 0,99 | 2,47 | 7,40  | 9,87  | 12,34 | 14,80 | 17,27 | 19,74 | 22,21 | 25,07 |
|              | 0,6 | 0,24         | 1,18 | 2,96 | 8,88  | 11,84 | 14,80 | 17,77 | 20,73 | 23,69 | 26,65 | 30,08 |
|              | 0,7 | 0,28         | 1,38 | 3,45 | 10,36 | 13,82 | 17,27 | 20,73 | 24,18 | 27,63 | 31,09 | 35,10 |
|              | 0,8 | 0,32         | 1,58 | 3,95 | 11,84 | 15,79 | 19,74 | 23,69 | 27,63 | 31,58 | 35,53 | 40,11 |
|              | 0,9 | 0,36         | 1,78 | 4,44 | 13,32 | 17,77 | 22,21 | 26,65 | 31,09 | 35,53 | 39,97 | 45,12 |
|              | 1   | 0,39         | 1,97 | 4,93 | 14,80 | 19,74 | 24,67 | 29,61 | 34,54 | 39,48 | 44,41 | 50,14 |

**Çizelge 5.22 : Sismik Dalga Yayılımı (SDY) İçin  $\varepsilon_b$  Tablosu.**

|   | $\lambda$ (m) |          |          |          |          |          |          |          |           |           |
|---|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|
|   | 30            | 50       | 80       | 100      | 150      | 200      | 250      | 300      | 330       | 360       |
| S | 0,04          | 0,000044 | 0,000016 | 0,000006 | 0,000004 | 0,000002 | 0,000001 | 0,000001 | 0,0000004 | 0,0000003 |
|   | 0,08          | 0,000089 | 0,000032 | 0,000013 | 0,000008 | 0,000004 | 0,000002 | 0,000001 | 0,000001  | 0,000001  |
|   | 0,12          | 0,000133 | 0,000048 | 0,000019 | 0,000012 | 0,000005 | 0,000003 | 0,000002 | 0,000001  | 0,000001  |
|   | 0,16          | 0,000178 | 0,000064 | 0,000025 | 0,000016 | 0,000007 | 0,000004 | 0,000003 | 0,000002  | 0,000001  |
|   | 0,2           | 0,000222 | 0,000080 | 0,000031 | 0,000020 | 0,000009 | 0,000005 | 0,000003 | 0,000002  | 0,000002  |
|   | 0,5           | 0,000556 | 0,000200 | 0,000078 | 0,000050 | 0,000022 | 0,000013 | 0,000008 | 0,000006  | 0,000005  |
|   | 1             | 0,001111 | 0,000400 | 0,000156 | 0,000100 | 0,000044 | 0,000025 | 0,000016 | 0,000011  | 0,000009  |
|   | 2             | 0,002222 | 0,000800 | 0,000313 | 0,000200 | 0,000089 | 0,000050 | 0,000032 | 0,000022  | 0,000018  |
|   | 3             | 0,003333 | 0,001200 | 0,000469 | 0,000300 | 0,000133 | 0,000075 | 0,000048 | 0,000033  | 0,000028  |
|   | 4             | 0,004444 | 0,001600 | 0,000625 | 0,000400 | 0,000178 | 0,000100 | 0,000064 | 0,000044  | 0,000037  |
|   | 5             | 0,005556 | 0,002000 | 0,000781 | 0,000500 | 0,000222 | 0,000125 | 0,000080 | 0,000056  | 0,000046  |
|   | 6             | 0,006667 | 0,002400 | 0,000938 | 0,000600 | 0,000267 | 0,000150 | 0,000096 | 0,000067  | 0,000055  |
|   | 7             | 0,007778 | 0,002800 | 0,001094 | 0,000700 | 0,000311 | 0,000175 | 0,000112 | 0,000078  | 0,000064  |
|   | 8             | 0,008889 | 0,003200 | 0,001250 | 0,000800 | 0,000356 | 0,000200 | 0,000128 | 0,000089  | 0,000073  |
|   | 9             | 0,010000 | 0,003600 | 0,001406 | 0,000900 | 0,000400 | 0,000225 | 0,000144 | 0,000100  | 0,000083  |
|   | 10            | 0,011111 | 0,004000 | 0,001563 | 0,001000 | 0,000444 | 0,000250 | 0,000160 | 0,000111  | 0,000092  |
|   | 15            | 0,016667 | 0,006000 | 0,002344 | 0,001500 | 0,000667 | 0,000375 | 0,000240 | 0,000167  | 0,000138  |
|   | 20            | 0,022222 | 0,008000 | 0,003125 | 0,002000 | 0,000889 | 0,000500 | 0,000320 | 0,000222  | 0,000184  |
|   | 25            | 0,027778 | 0,010000 | 0,003906 | 0,002500 | 0,001111 | 0,000625 | 0,000400 | 0,000278  | 0,000230  |
|   | 30            | 0,033333 | 0,012000 | 0,004688 | 0,003000 | 0,001333 | 0,000750 | 0,000480 | 0,000333  | 0,000275  |
|   | 35            | 0,038889 | 0,014000 | 0,005469 | 0,003500 | 0,001556 | 0,000875 | 0,000560 | 0,000389  | 0,000321  |
|   | 40            | 0,044444 | 0,016000 | 0,006250 | 0,004000 | 0,001778 | 0,001000 | 0,000640 | 0,000444  | 0,000367  |
|   | 45            | 0,050000 | 0,018000 | 0,007031 | 0,004500 | 0,002000 | 0,001125 | 0,000720 | 0,000500  | 0,000413  |
|   | 51            | 0,056667 | 0,020400 | 0,007969 | 0,005100 | 0,002267 | 0,001275 | 0,000816 | 0,000567  | 0,000468  |

**Çizelge 5.23 : Sismik Dalga Yayılımı (SDY) İçin  $\varepsilon_{au}$  Tablosu.**

|              |     | $\lambda$ (m) |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|--------------|-----|---------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|              |     | 30            | 50      | 80      | 100     | 150     | 200     | 250     | 300     | 330     | 360     |
| $\delta$ (m) | 0,1 | 0,01047       | 0,00628 | 0,00393 | 0,00314 | 0,00209 | 0,00157 | 0,00126 | 0,00105 | 0,00095 | 0,00087 |
|              | 0,2 | 0,02094       | 0,01257 | 0,00785 | 0,00628 | 0,00419 | 0,00314 | 0,00251 | 0,00209 | 0,00190 | 0,00175 |
|              | 0,3 | 0,03142       | 0,01885 | 0,01178 | 0,00942 | 0,00628 | 0,00471 | 0,00377 | 0,00314 | 0,00286 | 0,00262 |
|              | 0,4 | 0,04189       | 0,02513 | 0,01571 | 0,01257 | 0,00838 | 0,00628 | 0,00503 | 0,00419 | 0,00381 | 0,00349 |
|              | 0,6 | 0,06283       | 0,03770 | 0,02356 | 0,01885 | 0,01257 | 0,00942 | 0,00754 | 0,00628 | 0,00571 | 0,00524 |
|              | 0,7 | 0,07330       | 0,04398 | 0,02749 | 0,02199 | 0,01466 | 0,01100 | 0,00880 | 0,00733 | 0,00666 | 0,00611 |
|              | 0,8 | 0,08377       | 0,05026 | 0,03142 | 0,02513 | 0,01675 | 0,01257 | 0,01005 | 0,00838 | 0,00762 | 0,00698 |
|              | 0,9 | 0,09425       | 0,05655 | 0,03534 | 0,02827 | 0,01885 | 0,01414 | 0,01131 | 0,00942 | 0,00857 | 0,00785 |
|              | 1   | 0,10472       | 0,06283 | 0,03927 | 0,03142 | 0,02094 | 0,01571 | 0,01257 | 0,01047 | 0,00952 | 0,00873 |

**Çizelge 5.24 : Sismik Dalga Yayılımı (SDY) İçin  $\varepsilon_{av}$  Tablosu.**

|              |     | $\lambda$ (m) |         |         |         |         |          |          |          |          |          |
|--------------|-----|---------------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|
|              |     | 30            | 50      | 80      | 100     | 150     | 200      | 250      | 300      | 330      | 360      |
| $\delta$ (m) | 0,1 | 0,00022       | 0,00008 | 0,00003 | 0,00002 | 0,00001 | 0,000005 | 0,000003 | 0,000002 | 0,000002 | 0,000002 |
|              | 0,2 | 0,00088       | 0,00032 | 0,00012 | 0,00008 | 0,00004 | 0,00002  | 0,00001  | 0,00001  | 0,00001  | 0,00001  |
|              | 0,3 | 0,00197       | 0,00071 | 0,00028 | 0,00018 | 0,00008 | 0,00004  | 0,00003  | 0,00002  | 0,00002  | 0,00001  |
|              | 0,4 | 0,00351       | 0,00126 | 0,00049 | 0,00032 | 0,00014 | 0,00008  | 0,00005  | 0,00004  | 0,00003  | 0,00002  |
|              | 0,6 | 0,00790       | 0,00284 | 0,00111 | 0,00071 | 0,00032 | 0,00018  | 0,00011  | 0,00008  | 0,00007  | 0,00005  |
|              | 0,7 | 0,01075       | 0,00387 | 0,00151 | 0,00097 | 0,00043 | 0,00024  | 0,00015  | 0,00011  | 0,00009  | 0,00007  |
|              | 0,8 | 0,01404       | 0,00505 | 0,00197 | 0,00126 | 0,00056 | 0,00032  | 0,00020  | 0,00014  | 0,00012  | 0,00010  |
|              | 0,9 | 0,01777       | 0,00640 | 0,00250 | 0,00160 | 0,00071 | 0,00040  | 0,00026  | 0,00018  | 0,00015  | 0,00012  |
|              | 1   | 0,02193       | 0,00790 | 0,00308 | 0,00197 | 0,00088 | 0,00049  | 0,00032  | 0,00022  | 0,00018  | 0,00015  |

#### 5.5.4 Sıcaklık değişimi durumu

Bağıntı 3.43'ten hareket ederek çelik ve polietilen boru için işletmeye (devreye) alma nedeniyle ortaya çıkabilecek sıcaklık değişimine bağlı şekil değiştirme oranları ( $\varepsilon_t$ ); çelik borularda her 5 °C sıcaklık farkı için  $0,6 \times 10^{-4}$ , polietilen borularda her 5 °C sıcaklık farkı için  $0,9 \times 10^{-3}$  olarak alınabilir (örneğin; çelik bir boru için  $\Delta T = 15$  °C ise  $\varepsilon_t = 3 \times 0,6 \times 10^{-4} = 1,8 \times 10^{-4}$  olur).

#### 5.5.5 İç Basınç durumu

Bağıntı 3.45 kullanılarak polietilen boru için  $\nu/2E = 0,4/2 \times 800 = 2,5 \times 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$ ; çelik boru için  $\nu/2E = 0,4/2 \times 200.000 = 7,5 \times 10^{-7} \text{ MPa}^{-1}$  olarak elde edilir. Ayrıca  $D/t = r$  olarak ifade edilirse  $r$  değerlerine bağlı olarak hem çelik hem de polietilen boruda iç basınçtan dolayı oluşacak şekil değiştirme oranları aşağıdaki tablolardan elde edilebilir.

**Çizelge 5.25 : Çelik Boru İçin İç Basınçtan Kaynaklı Şekil Değiştirme Oranı ( $\epsilon_E$ ).**

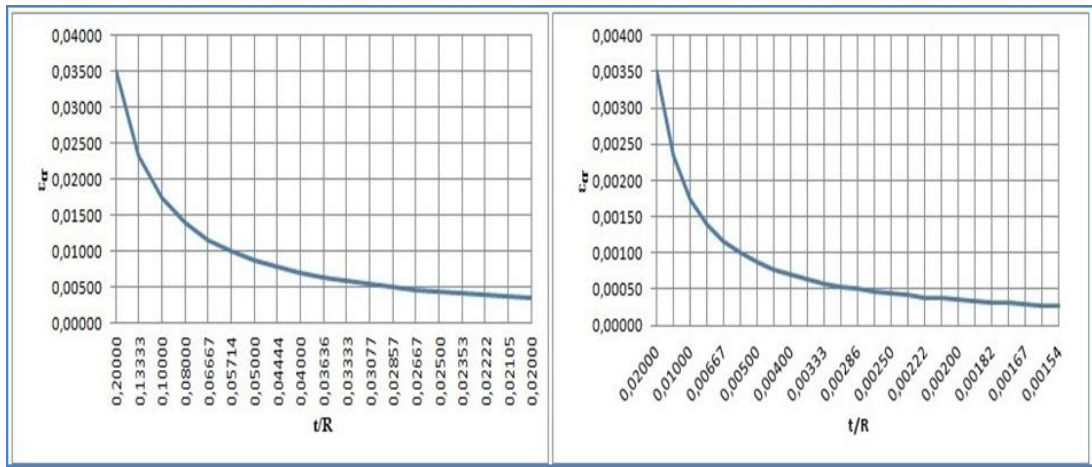
|           |     | $D/t = r$ |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
|-----------|-----|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|           |     | 10        | 50       | 100      | 200      | 300      | 400      | 500      | 600      | 700      | 800      | 1000     | 1100     | 1200     | 1300     |
| $P$ (MPa) | 0,1 | 0,000001  | 0,000004 | 0,000008 | 0,000015 | 0,000023 | 0,000030 | 0,000038 | 0,000045 | 0,000053 | 0,000060 | 0,000075 | 0,000083 | 0,000090 | 0,000098 |
|           | 0,2 | 0,000002  | 0,000008 | 0,000015 | 0,000030 | 0,000045 | 0,000060 | 0,000075 | 0,000090 | 0,000105 | 0,000120 | 0,000150 | 0,000165 | 0,000180 | 0,000195 |
|           | 0,3 | 0,000002  | 0,000011 | 0,000023 | 0,000045 | 0,000068 | 0,000090 | 0,000113 | 0,000135 | 0,000158 | 0,000180 | 0,000225 | 0,000248 | 0,000270 | 0,000293 |
|           | 0,4 | 0,000003  | 0,000015 | 0,000030 | 0,000060 | 0,000090 | 0,000120 | 0,000150 | 0,000180 | 0,000210 | 0,000240 | 0,000300 | 0,000330 | 0,000360 | 0,000390 |
|           | 0,5 | 0,000004  | 0,000019 | 0,000038 | 0,000075 | 0,000113 | 0,000150 | 0,000188 | 0,000225 | 0,000263 | 0,000300 | 0,000375 | 0,000413 | 0,000450 | 0,000488 |
|           | 0,6 | 0,000005  | 0,000023 | 0,000045 | 0,000090 | 0,000135 | 0,000180 | 0,000225 | 0,000270 | 0,000315 | 0,000360 | 0,000450 | 0,000495 | 0,000540 | 0,000585 |
|           | 0,7 | 0,000005  | 0,000026 | 0,000053 | 0,000105 | 0,000158 | 0,000210 | 0,000263 | 0,000315 | 0,000368 | 0,000420 | 0,000525 | 0,000578 | 0,000630 | 0,000683 |
|           | 0,8 | 0,000006  | 0,000030 | 0,000060 | 0,000120 | 0,000180 | 0,000240 | 0,000300 | 0,000360 | 0,000420 | 0,000480 | 0,000600 | 0,000660 | 0,000720 | 0,000780 |
|           | 0,9 | 0,000007  | 0,000034 | 0,000068 | 0,000135 | 0,000203 | 0,000270 | 0,000338 | 0,000405 | 0,000473 | 0,000540 | 0,000675 | 0,000743 | 0,000810 | 0,000878 |
|           | 1   | 0,000008  | 0,000038 | 0,000075 | 0,000150 | 0,000225 | 0,000300 | 0,000375 | 0,000450 | 0,000525 | 0,000600 | 0,000750 | 0,000825 | 0,000900 | 0,000975 |
|           | 2   | 0,000015  | 0,000075 | 0,000150 | 0,000300 | 0,000450 | 0,000600 | 0,000750 | 0,000900 | 0,001050 | 0,001200 | 0,001500 | 0,001650 | 0,001800 | 0,001950 |
|           | 3   | 0,000023  | 0,000113 | 0,000225 | 0,000450 | 0,000675 | 0,000900 | 0,001125 | 0,001350 | 0,001575 | 0,001800 | 0,002250 | 0,002475 | 0,002700 | 0,002925 |
|           | 4   | 0,000030  | 0,000150 | 0,000300 | 0,000600 | 0,000900 | 0,001200 | 0,001500 | 0,001800 | 0,002100 | 0,002400 | 0,003000 | 0,003300 | 0,003600 | 0,003900 |
|           | 5   | 0,000038  | 0,000188 | 0,000375 | 0,000750 | 0,001125 | 0,001500 | 0,001875 | 0,002250 | 0,002625 | 0,003000 | 0,003750 | 0,004125 | 0,004500 | 0,004875 |
|           | 6   | 0,000045  | 0,000225 | 0,000450 | 0,000900 | 0,001350 | 0,001800 | 0,002250 | 0,002700 | 0,003150 | 0,003600 | 0,004500 | 0,004950 | 0,005400 | 0,005850 |
|           | 7   | 0,000053  | 0,000263 | 0,000525 | 0,001050 | 0,001575 | 0,002100 | 0,002625 | 0,003150 | 0,003675 | 0,004200 | 0,005250 | 0,005775 | 0,006300 | 0,006825 |
|           | 8   | 0,000060  | 0,000300 | 0,000600 | 0,001200 | 0,001800 | 0,002400 | 0,003000 | 0,003600 | 0,004200 | 0,004800 | 0,006000 | 0,006600 | 0,007200 | 0,007800 |
|           | 9   | 0,000068  | 0,000338 | 0,000675 | 0,001350 | 0,002025 | 0,002700 | 0,003375 | 0,004050 | 0,004725 | 0,005400 | 0,006750 | 0,007425 | 0,008100 | 0,008775 |
|           | 10  | 0,000075  | 0,000375 | 0,000750 | 0,001500 | 0,002250 | 0,003000 | 0,003750 | 0,004500 | 0,005250 | 0,006000 | 0,007500 | 0,008250 | 0,009000 | 0,009750 |
|           | 20  | 0,000150  | 0,000750 | 0,001500 | 0,003000 | 0,004500 | 0,006000 | 0,007500 | 0,009000 | 0,010500 | 0,012000 | 0,015000 | 0,016500 | 0,018000 | 0,019500 |

**Çizelge 5.26 :** Polietilen Boru İçin İç Basıncıdan Kaynaklı Şekil Değişirme Oranı ( $\varepsilon_E$ ).

|           |     | $D/t = r$ |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|-----------|-----|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|           |     | 10        | 50     | 100    | 200    | 300    | 400    | 500    | 600    | 700    | 800    | 1000   | 1100   | 1200   | 1300   |
| $P$ (MPa) | 0,1 | 0,0003    | 0,0013 | 0,0025 | 0,0050 | 0,0075 | 0,0100 | 0,0125 | 0,0150 | 0,0175 | 0,0200 | 0,0250 | 0,0275 | 0,0300 | 0,0325 |
|           | 0,2 | 0,0005    | 0,0025 | 0,0050 | 0,0100 | 0,0150 | 0,0200 | 0,0250 | 0,0300 | 0,0350 | 0,0400 | 0,0500 | 0,0550 | 0,0600 | 0,0650 |
|           | 0,3 | 0,0008    | 0,0038 | 0,0075 | 0,0150 | 0,0225 | 0,0300 | 0,0375 | 0,0450 | 0,0525 | 0,0600 | 0,0750 | 0,0825 | 0,0900 | 0,0975 |
|           | 0,4 | 0,0010    | 0,0050 | 0,0100 | 0,0200 | 0,0300 | 0,0400 | 0,0500 | 0,0600 | 0,0700 | 0,0800 | 0,1000 | 0,1100 | 0,1200 | 0,1300 |
|           | 0,5 | 0,0013    | 0,0063 | 0,0125 | 0,0250 | 0,0375 | 0,0500 | 0,0625 | 0,0750 | 0,0875 | 0,1000 | 0,1250 | 0,1375 | 0,1500 | 0,1625 |
|           | 0,6 | 0,0015    | 0,0075 | 0,0150 | 0,0300 | 0,0450 | 0,0600 | 0,0750 | 0,0900 | 0,1050 | 0,1200 | 0,1500 | 0,1650 | 0,1800 | 0,1950 |
|           | 0,7 | 0,0018    | 0,0088 | 0,0175 | 0,0350 | 0,0525 | 0,0700 | 0,0875 | 0,1050 | 0,1225 | 0,1400 | 0,1750 | 0,1925 | 0,2100 | 0,2275 |
|           | 0,8 | 0,0020    | 0,0100 | 0,0200 | 0,0400 | 0,0600 | 0,0800 | 0,1000 | 0,1200 | 0,1400 | 0,1600 | 0,2000 | 0,2200 | 0,2400 | 0,2600 |
|           | 0,9 | 0,0023    | 0,0113 | 0,0225 | 0,0450 | 0,0675 | 0,0900 | 0,1125 | 0,1350 | 0,1575 | 0,1800 | 0,2250 | 0,2475 | 0,2700 | 0,2925 |
|           | 1   | 0,0025    | 0,0125 | 0,0250 | 0,0500 | 0,0750 | 0,1000 | 0,1250 | 0,1500 | 0,1750 | 0,2000 | 0,2500 | 0,2750 | 0,3000 | 0,3250 |

### 5.5.6 Lokal burkulma analizi için kritik şekil değıştirme oranı ( $\epsilon_{cr}$ )

Çekme etkisi altındaki borular için çelik borularda %3, polietilen (PE) borularda (çekme durumunda plastik izin verilen sınır olarak) %20 şekil değıştirme oranı sınır değerlerinin kullanılabileceği, ayrıca PE borular için elastik şekil değıştirme oranı sınır değerinin %2,4 olduğu hususu yukarıda (3.7.1 konu başlığında) belirtilmiştir. Bağntı-3.42 ile ifade edilen eşitlik için çeşitli  $t/R$  değerlerine bağlı olarak yerel (lokal) burkulma analizi yapılmak istenmesi durumunda aşığı elde edilen grafikler (Şekil 5.3) yol gösterici olabilecektir.

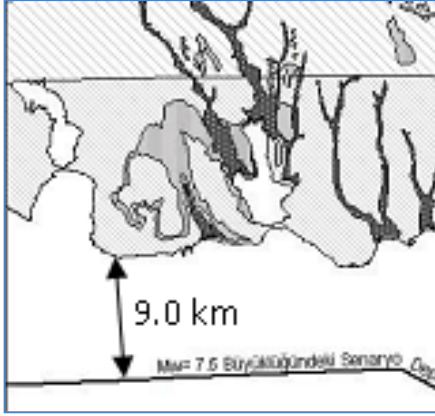


Şekil 5.3 : Yerel (Lokal) Burkulma ile  $t/R$  İlişkisi.

## 5.6 Örnek Çalışmalar

### 5.6.1 Polietilen boru için örnek çalışma

İstanbul İli Beylikdüzü İlçesi Dereağızı Mahallesi Güngören formasyonunun bulunduğu 35° eğimli bir bölgede (Şekil 5.4) polietilen 110mm çaplı (4 bar) doğalgaz boru hattının beklenen İstanbul depremine göre davranışının incelenmesi. (İşletmeye alma sıcaklık farkı 10 °C ‘dir.)



Şekil 5.4 : Örnek Problem – Harita.

PE Boru:

$$D = 0,11 \text{ m}$$

$$t = 0,01 \text{ m}$$

$$H = 0,85 \text{ m}$$

PE boru için elastik şekil değiştirme sınırı,

$$\varepsilon_e = 0,024$$

İstanbul Depremi:

$$M = 7,5$$

$$R = 9 \text{ km (ilgili bölge için)}$$

**Çözüm:**

### 1- Zemin İle İlgili Parametreler

|                                       |   |                   |                  |
|---------------------------------------|---|-------------------|------------------|
| Şekil 3.6'dan $R = 9 \text{ km}$ için | → | $\log I_a = 1,49$ | Çizelge 3.3'ten  |
| Şekil 3.8'den                         | → | $a_c = 0,35g$     |                  |
| Çizelge 3.4'ten                       | → | $\lambda = 88m$   | $\delta = 0,48m$ |
| Şekil 3.10'dan dalga genliği          | → | $\delta = 0,70m$  |                  |

### 2- İşletme Şekil Değiştirmesi

|                    |   |                          |
|--------------------|---|--------------------------|
| Çizelge 5.26'dan   | → | $\varepsilon_E = 0,0011$ |
| Sıcaklık Farkından | → | $\varepsilon_t = 0,0018$ |

$$\varepsilon_i = \varepsilon_E + \varepsilon_t = 0,0011 + 0,0018 = 0,0029$$

Lokal Burkulma Şekil Değiştirme Oranı:

|                                  |   |                              |
|----------------------------------|---|------------------------------|
| Şekil 5.3'ten $t/R = 0,182$ için | → | $\varepsilon_{cr} = 0,03185$ |
|----------------------------------|---|------------------------------|

### 3- Eksene Dik KZH

|                                 |   |                  |
|---------------------------------|---|------------------|
| Şekil 5.2'den                   | → | $y_u = 0,02715m$ |
| Şekil 3.14'ten $H/D = 7,7$ için | → | $N_{qh} = 18,2$  |

|                                                 |   |                                                |
|-------------------------------------------------|---|------------------------------------------------|
| Çizelge 5.2 ve 5.3'ten                          | → | $p_u = 30,6 \text{ kN/m}$                      |
| Çizelge 5.7'den                                 | → | $K_v = 2254 \text{ kN/m}^2$                    |
| Çizelge 5.8'den $EI = 3,37 \text{ kN/m}^2$ için | → | $\beta_v = 3,6$                                |
| Çizelge 5.10'dan                                | → | $Z = 0,0528$                                   |
| Çizelge 5.11'den                                | → | <b><u><math>\epsilon_b = 0,1103</math></u></b> |

$\epsilon_{Tb} = \epsilon_i + \epsilon_b = 0,0029 + 0,1103 = \%11,32 < \%20 = \epsilon_p \quad \checkmark$  (plastik izin verilen şekil değiştirme oranı)

$\epsilon_{Tb} = \%11,32 > \%3,2 = \epsilon_{cr}$  (lokal burkulma şekil değiştirmesi)

$\epsilon_{Tb} = \%11,32 > \%2,4 = \epsilon_e$  (elastik şekil değiştirme)

Burada uzama şekil değiştirme oranının plastik izin verilen sınıra göre uygun olduğu ancak hem lokal burkulma şekil değiştirme oranı hem de elastik şekil değiştirme sınır değer kriterinin sağlanmadığı görülmektedir.

|                  |   |                      |
|------------------|---|----------------------|
| Çizelge 5.12'den | → | $\epsilon_a = 0,322$ |
|------------------|---|----------------------|

$\epsilon_{Ta} = \epsilon_i + \epsilon_a = 0,0029 + 0,322 = \%32,49 > \%20$ ; aynı zamanda

$\epsilon_{Ta} = \%32,49 > \%2,4$

olduğundan hem plastik izin verilen hem de elastik şekil değiştirme oranı için gerekli kriterler sağlanmamış olmaktadır.

#### 4- Eksene Paralel KZH

|                                               |   |                            |
|-----------------------------------------------|---|----------------------------|
| Çizelge 5.13'ten                              | → | $t_u = 1,48 \text{ kN/m}$  |
| Çizelge 5.14'ten $x_u = 0,004 \text{ m}$ için | → | $K_u = 740 \text{ kN/m}^2$ |
| Çizelge 5.15'ten $EA = 2513 \text{ kN}$ için  | → | $\beta_u = 0,54$           |
| Çizelge 5.19'dan                              | → | $n = 0,031$                |
| Çizelge 5.20'den                              | → | $\epsilon_a = 0,01674$     |

$\epsilon_{Ta} = \epsilon_i + \epsilon_a = 0,0029 + 0,01674 = 0,01964 < \%20 \quad \checkmark$

$\epsilon_{Ta} = \%1,964 < \%2,4 \quad \checkmark$

## 5- Sismik Dalga Yayılımı

$$\text{Çizelge 5.21'den} \longrightarrow S = 1,52$$

$$\text{Çizelge 5.22'den} \longrightarrow \varepsilon_b = 0,0002 < \%2,4 < \%3,2 < \%20 \checkmark$$

$$\text{Çizelge 5.23'ten} \longrightarrow \varepsilon_{au} = 0,025 > \%2,4 ; \%2,5 < \%20$$

$$\text{Çizelge 5.24'ten} \longrightarrow \varepsilon_{av} = 0,0012 < \%2,4 < \%20 \checkmark$$

Sismik dalga yayılımı durumunda Elastik şekil değiştirme kriteri aşılmaktadır.

### 5.6.2 Çelik boru için örnek çalışma

Aynı bölgeye 12" çelik doğalgaz boru hattının (20 bar) döşeneceği durumu dikkate alınarak problem aşağıdaki gibi çözülmüştür.

Çelik Boru:

$$D = 0,3238m$$

$$t = 0,00556m$$

$$H = 1,16 m$$

**Çözüm:**

#### 1- Zemin İle İlgili Parametreler

$$\begin{array}{ll} \text{Şekil 3.6'dan } R = 9 \text{ km için} \longrightarrow & \log I_a = 1,49 \\ \text{Şekil 3.8'den} \longrightarrow & a_c = 0,35g \\ \text{Çizelge 3.4'ten} \longrightarrow & \lambda = 88m \\ \text{Şekil 3.10'dan dalga genliği} \longrightarrow & \delta = 0,70m \end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{l} \log I_a = 1,49 \\ a_c = 0,35g \\ \lambda = 88m \\ \delta = 0,70m \end{array}} \right\} \begin{array}{l} \text{Çizelge 3.3'ten} \\ \delta = 0,48m \end{array}$$

#### 2- İşletme Şekil Değiştirmesi

$$\text{Çizelge 5. 25'ten} \longrightarrow \varepsilon_E = 0,000087$$

$$\text{Sıcaklık Farkından} \longrightarrow \varepsilon_t = 0,00012$$

$$\varepsilon_i = \varepsilon_E + \varepsilon_t = 0,000207$$

Lokal Burkulma Şekil Değiştirme Oranı;

Şekil 5.3'ten  $t/R = 0,0343$  için  $\longrightarrow \underline{\varepsilon_{cr} = 0,006}$

### 3- Eksene Dik KZH

Şekil 5.2'den  $\longrightarrow y_u = 0,035 \text{ m}$

Şekil 3.14'ten  $H/D = 3,6$  için  $\longrightarrow N_{qh} = 13,6$

Çizelge 5.3 ve 5.4'ten  $\longrightarrow p_u = 79,3 \text{ kN/m}$

Çizelge 5.7'den  $\longrightarrow K_v = 4531 \text{ kN/m}^2$

Çizelge 5.9'dan  $EI = 14079 \text{ kNm}^2$  için  $\longrightarrow \beta_v = 0,53$

Çizelge 5.11'den  $\longrightarrow \varepsilon_b = 0,00704$

$$\varepsilon_{Tb} = \varepsilon_i + \varepsilon_b = 0,000207 + 0,00704 = 0,007247 = \%0,7247 < \%3 \sqrt{}$$

$$\varepsilon_{Tb} = \%0,7247 > \%0,6 = \varepsilon_{cr} \text{ (lokal burkulma şekil değiştirmesi)}$$

Çizelge 5.12'den  $\longrightarrow \varepsilon_a = 0,00806$

$$\varepsilon_{Ta} = \varepsilon_i + \varepsilon_a = 0,000207 + 0,00806 = 0,008267 < \%3 \sqrt{}$$

Burada lokal burkulma durumunun kurtarmadığı görülmektedir.

### 4- Eksene Paralel KZH

Çizelge 5.13'ten  $\longrightarrow t_u = 5,11 \text{ kN/m}$

Çizelge 5.14'ten  $x_u = 0,004 \text{ m}$  için  $\longrightarrow K_u = 2555 \text{ kN/m}^2$

Çizelge 5.16'dan  $EA = 1111800 \text{ kN}$  için  $\longrightarrow \beta_u = 0,048$

Çizelge 5.19'dan  $\longrightarrow n = 0,031$

Çizelge 5.20'den  $\longrightarrow \varepsilon_a = 0,001487$

$$\varepsilon_{Ta} = \varepsilon_i + \varepsilon_a = 0,000207 + 0,001487 = 0,0017 < \%3 \sqrt{}$$

### 5- Sismik Dalga Yayılımı

Çizelge 5.21'den  $\longrightarrow S = 4,47$

Çizelge 5.22'den  $\longrightarrow \varepsilon_b = 0,0006 < \%0,6 < \%3 \sqrt{}$

Çizelge 5.23'ten  $\longrightarrow \varepsilon_{au} = 0,025 < \%3 \sqrt{}$

Çizelge 5.24'ten  $\longrightarrow \varepsilon_{av} = 0,0012 < \%3 \sqrt{}$



## **6. SONUÇLAR**

### **6.1 Güzergah Tespiti ve Sorunlu Bölgeden Kaçınma**

Boru hattı güzergahı belirlenirken zemin araştırması yapılması hususunda titiz olunması, uygun güzergahın tespitini sağlayıp olası problemleri önleyecektir. Eğer daha önce heyelanlı veya zemin açısından problemli yerlere boru hatları döşenmiş ise bu hatların yeniden konumlandırılması (deplasesi) gerekecektir. Özellikle iletim hatlarının mutlaka bu tür bölgelerin dışına taşınması önemlidir. Şehir içi dağıtım hatlarında ise bunu sağlamak daha zordur. Aslında bu tür bölgelerin kesinlikle imara kapanması ve yeşil alan olarak değerlendirilmesi olası kayıpları azaltacaktır. Ancak yine de böyle bir alana dağıtım hattı döşenmesi gerekecekse de ilave tedbirler alınmalıdır. Bu tür bölgelerde zemin hareketleri ve bu hareketlere bağlı olarak boru hattı ağ sisteminin (şebekenin) davranışlarının sürekli gözlenmesi, esnek malzemelerin kullanılması, bölge dışına tehlike anında sistemi otomatik kapayacak vanaların yerleştirilmesi vb. tedbirler alınacak ilave önlemler için birer örnektir.

Zeminin kötü olduğu sıvılaşma gibi bölgelerde yatay yönlendirilebilir sondaj gibi yöntemler ile sıvılaşmanın etkileyemeyeceği bir derinlikten geçerek (bu derinlik zemin etütleriyle tespit edilir) sorunlu bölge atlatılmış olunur. Ayrıca boru-zemin arayüzünde sürtünmeye bağlı kuvvetlerin oluşmasını engellemek için özellikle fay hattı kavşak geçişlerinde boru hattı gömülmeyp yüzeyde serbest bırakılır [12].

### **6.2 Zemin İyileştirmesi**

Sorunlu güzergahlarda çeşitli geoteknik yöntemler kullanılarak zemin iyileştirmesi yapılabilir. Maksimum kılcal su basıncını düşürmek amacıyla boru hattı boyunca drenaj sistemlerinin inşa edilmesi, zeminin yoğunluğunu ve mukavemetini artıracak bununla beraber sıvılaşma potansiyelini düşürecek sıkıştırma tekniklerinin uygulanması, kılcal su basıncını azaltan yöntemlerin kullanılması yapılabilecek zemin iyileştirme çalışmalarına bir örnektir. Bunun yanı sıra mümkün olduğu

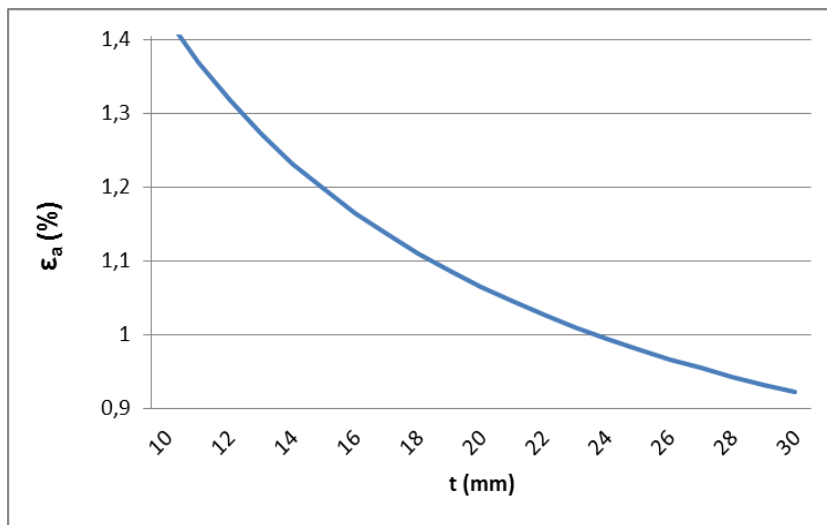
hallerde şev stabilitesini sağlayıcı önlemlerin alınması durumu altyapı boru hattı sistemlerinin deprem güvenliği açısından fayda sağlayacaktır [12].

### 6.3 Esnek Malzeme

Esnek boru malzemelerinin kullanılmasının gömülü boru hatlarının sismik performansını arttırdığı bilinmektedir. Örneğin polietilen malzemeden üretilmiş boruların elastik şekil değiştirme oranı %2,4 iken uygulamada %20'ye kadar şekil değiştirme oranına (çekme durumunda) izin verilmektedir. Ancak bu oran çelik borularda en fazla %3 olmaktadır.

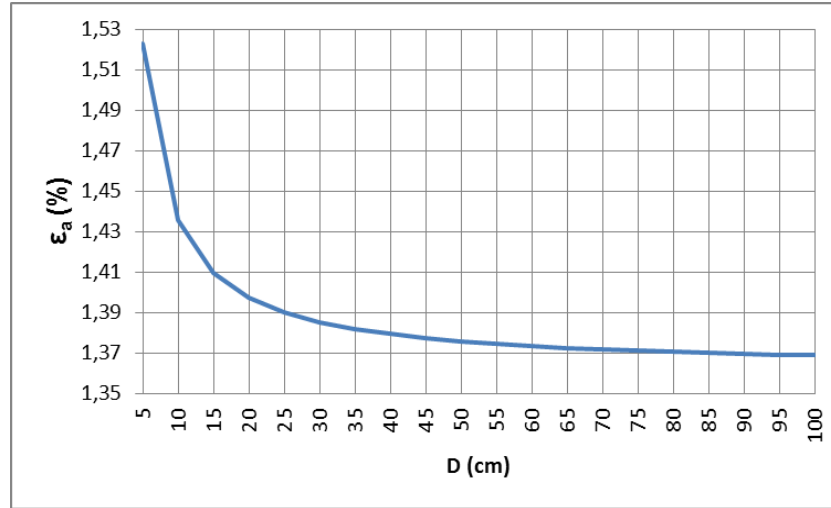
### 6.4 Malzeme Seçimi

Sürekli borular için daha sağlam (yüksek nominal akma değeri) ve daha fazla boru et kalınlığı olan malzemeler kullanılarak sismik performans sonuçları beklendiği üzere arttırılır. Yüksek elastisite modülü, büyük atalet momenti ve kesit alanı şekil değiştirme oranını düşürür. Örneğin Şekil 6.1 incelendiğinde boru eksenine paralel zemin hareketi durumunda ( $H = 0,85m$ ;  $D = 0,11m$ ;  $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$ ;  $E = 8.10^5 \text{ kN/m}^2$ ;  $\delta = 0,35m$  durumuna göre) eksenel şekil değiştirmenin boru et kalınlığı ile ilişkisi görülebilir ki et kalınlığı arttıkça eksenel şekil değiştirme oranı düşmektedir. Bu durumun eğilme şekil değiştirme oranı için de atalet momentine bağlı olarak aynı olduğu bilinmektedir.

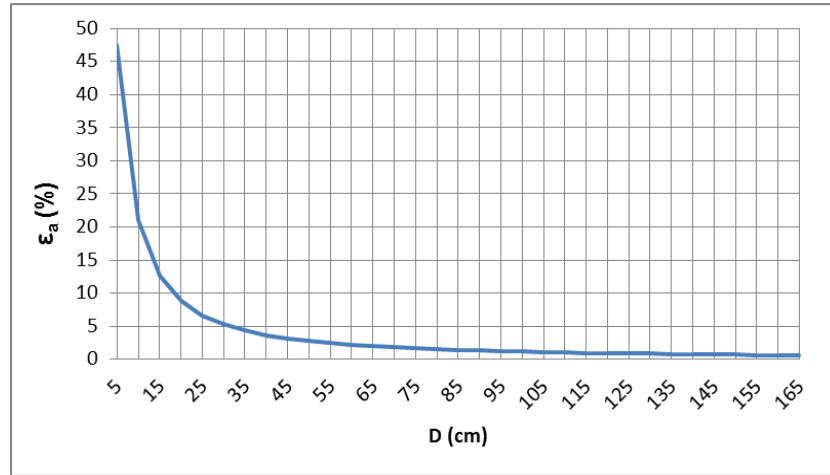


Şekil 6.1 :  $\varepsilon_a - t$  Değişimi (Eksene Paralel Hareket Durumu).

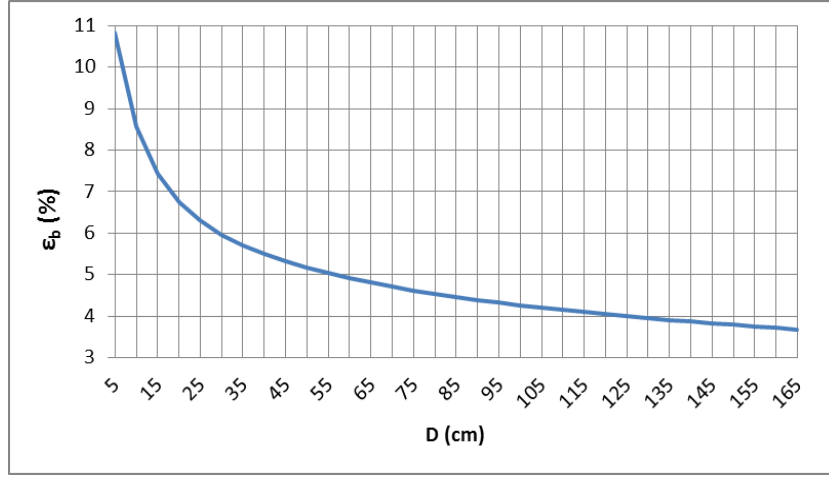
Ayrıca hem eksenel hem de eğilme şekil değiştirme oranının boru çapı ( $D$ ) arttıkça azalacağı, ancak ilk başlarda bu azalma fazla olurken çap büyüdükçe bu değişimin yataya yaklaştığı görülmektedir (Şekil 6.2, Şekil 6.3, Şekil 6.4 ). (Şekiller  $H = 0,85m$ ;  $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$ ;  $E = 8.10^5 \text{ kN/m}^2$ ;  $\delta = 0,35m$  durumuna göre gözlem grafiği olup abak şeklinde kullanılamaz.)



Şekil 6.2:  $\varepsilon_a - D$  Değişimi (Eksene Paralel Hareket Durumu).



Şekil 6.3 :  $\varepsilon_a - D$  Değişimi (Eksene Dik Hareket Durumu).

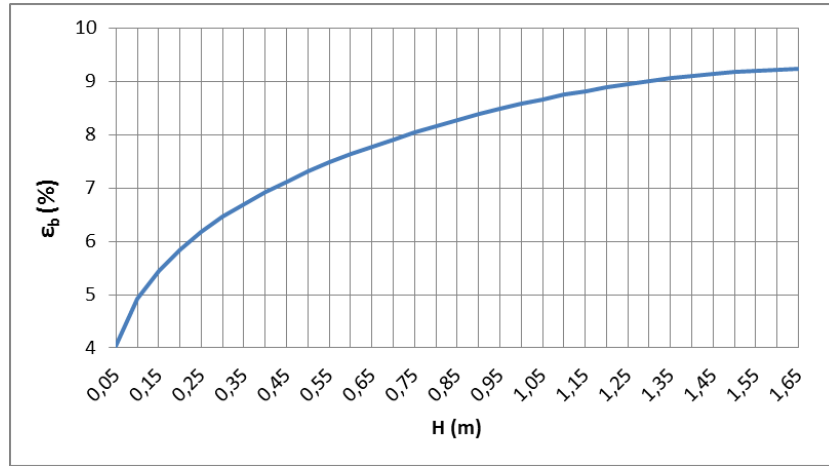


**Şekil 6.4 :  $\varepsilon_b - D$  Değişimi (Eksene Dik Hareket Durumu).**

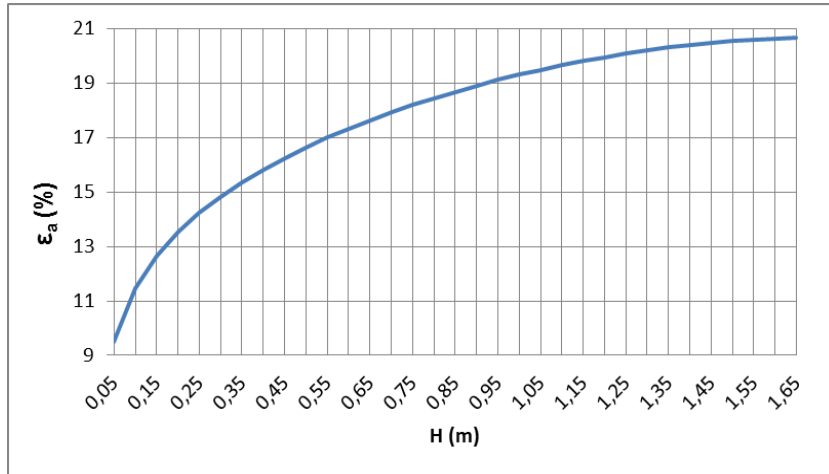
Boru et kalınlığının ( $t$ ) artması şekil değiştirme oranını düşürürken aynı şekilde boru çapının artması da (aynı gömme derinliği için) şekil değiştirme oranını düşürmektedir. Ancak burada dikkat edilmesi gereken önemli bir husus daha vardır ki Bağıntı 3.42 gereği boru çapı (buna bağlı olarak  $R$  değeri) arttırılırken lokal burkulma performansının düşürülmemesi hatta arttırılması adına boru et kalınlığı da beraberinde arttırılmalıdır.

### 6.5 Gömme Derinliği

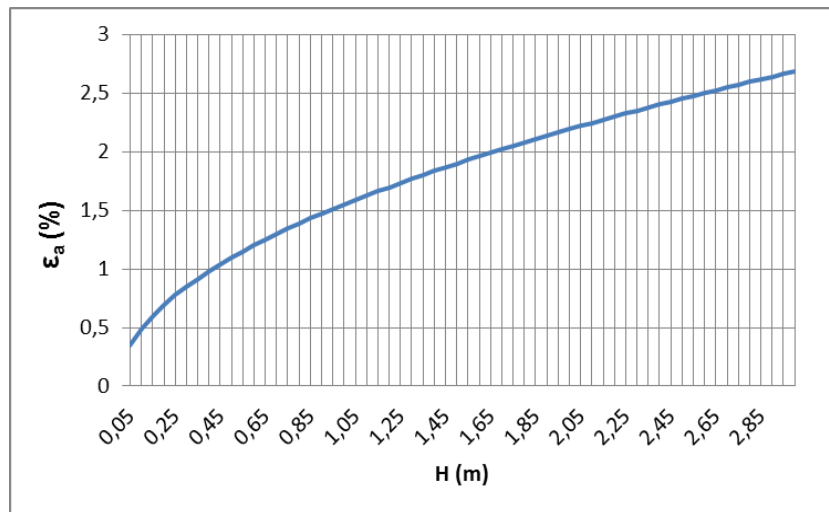
Gömme derinliği ( $H$ ) arttıkça hem eksene dik hem de paralel zemin hareketi durumunda aksenal ve eğilme şekil değiştirme oranları artmaktadır.  $D = 0,11m$ ;  $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$ ;  $E = 8.10^5 \text{ kN/m}^2$ ;  $\delta = 0,35m$  alınarak şekil değiştirme oranlarının gömme derinliğine bağlı değişim grafikleri aşağıdaki gibi elde edilmiştir (Şekil 6.5, Şekil 6.6, Şekil 6.7):



Şekil 6.5 :  $\varepsilon_b - H$  Değişimi (Eksene Dik Hareket Durumu).



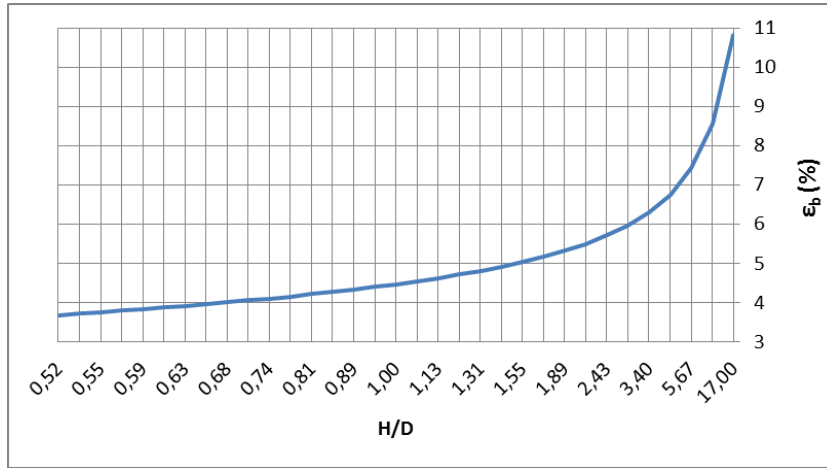
Şekil 6.6 :  $\varepsilon_a - H$  Değişimi (Eksene Dik Hareket Durumu).



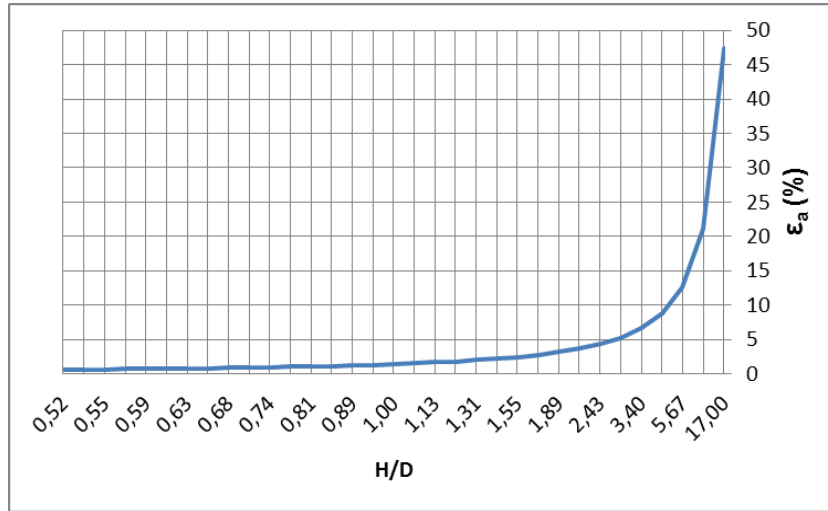
Şekil 6.7 :  $\varepsilon_a - H$  Değişimi (Eksene Paralel Hareket Durumu).

Gömülü boru hattı için kiriş burkulması daha çok sığ tranşelere gömülü olan ve/veya gevşek malzeme ile gömülen boru hatlarında olması muhtemeldir. Bu nedenle eğer boru yeterli derinliğe gömülürse kiriş burkulmasından önce yerel burkulma olacaktır. Bu kavrama dayanarak yerel burkulma basıncına eşit olan en düşük kiriş burkulma basıncı belirlenmiş ve bir kritik gömme derinliğini tespit eden çalışmalar yapılmıştır. Kritik derinlikten daha az derinliğe gömülen herhangi bir boruda yerel burkulmadan önce kiriş burkulması meydana gelir. Eğer boru kritik derinlikten daha fazla bir derinliğe gömülürse, bir olumsuzluk durumunda, yerel burkulma meydana gelecektir [12].

Yine  $D = 0,11m$ ;  $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$ ;  $E = 8.10^5 \text{ kN/m}^2$ ;  $\delta = 0,35m$  alınarak şekil değiştirme oranlarının  $H/D$  oranına bağlı değişim grafikleri aşağıdaki gibi elde edilmiştir (Şekil 6.8, Şekil 6.9). Buna göre ilgili grafikler incelendiğinde  $H/D$ 'nin belli bir değerine kadar şekil değiştirme oranının yavaş arttığı ancak belli bir noktadan sonra artış hızının yükseldiği görülebilmektedir. Bu nedenle  $H/D$  değeri dikkate alınarak gömme derinliğinin tespit edilmesi olası risk durumunda boru hattının sismik performansını arttıracaktır.



**Şekil 6.8 :**  $\epsilon_b - H/D$  Değişimi (Eksene Dik Hareket Durumu).



**Şekil 6.9 :**  $\varepsilon_a - H/D$  Değişimi (Eksene Dik Hareket Durumu).

### 6.6 Dolgu Malzemesi

Tranşeye gömülen boru hattı etrafına ve üzerine koyulan dolgu malzemesinin özellikleri sismik performansı etkilemektedir. İçsel sürtünme açısı yüksek dolgu malzemesi kullanmak şekil değiştirme oranını artırır. Aynı şekilde yoğunluğu yüksek dolgu malzemesi kullanmak da şekil değiştirme oranını artırır. Ancak yoğunluğu az veya sıkışmamış dolgu kullanmak oturma, çökme gibi işletme açısından problemler yaşanmasına neden olabilir. Bu iki durum arasında optimum noktayı yakalamak gerekir.

### 6.7 Boru Kaplaması

Boru-zemin etkileşimi nedeniyle ortaya çıkan gerilmelerin büyüklüğüne etkiyen faktörlerden biri de boru-zemin arayüzüdür. Bu arayüzde oluşan sürtünme kaynaklı gerilmeler boruda deformasyona neden olur. Çizelge 3.7’de boru kaplama malzemesine göre  $k$  değerleri verilmiştir. Buna göre daha düşük  $k$  değerli boru kaplama malzemesi kullanmak şekil değiştirme oranını düşürecektir. Konuyla ilgili fikir vermesi anlamında 5.6 nolu başlık altında yapılan örnek çalışma bölgesi için  $X - 52$  malzemeden üretilmiş  $D = 0,60m, t = 0,0064m$  olan boruya göre PE kaplamalı ve kaplamasız durumlarında oluşabilecek şekil değiştirmeler hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucu PE kaplamalı boruda oluşan şekil değiştirme oranının yaklaşık olarak %18 daha az olduğu görülmüştür.

## 6.8 Sismik Kaynaklı Hasar Karşılaştırması

Sismik kaynaklı hasarlar, Kalıcı Zemin hareketi (KZH) ve Sismik Dalga Yayılımı (SDY) hasarları diye iki grupta sınıflandırılmaktadır. KZH hasarları tipik olarak belli bir alanda (lokal olarak) meydana gelirken SDY hasarları daha geniş alanda etkili olmaktadır. Ancak 5.6 başlığı altında yapılan örnek çalışmalardan da görülebileceği üzere KZH kaynaklı şekil değiştirmeler yanında SDY kaynaklı şekil değiştirmelere bağlı hasar oranı daha azdır.

## 6.9 İşletme Şekil Değiştirme Oranı Etkisi

Gömülü boru hatlarıyla iç basıncı düşük madde taşınması boru çeperinde oluşacak gerilmeyi azaltacaktır. Buna ilave olarak olası kaçak ve sorunlara müdahale daha kolay olacaktır. Ancak düşük basınçlı boru sistemlerinde işletmesel anlamda bazı problemler yaşanması beklenebilir. Bunlardan biri hatların uç noktalarında hat boyunca oluşacak müşteri çekişlerinden dolayı basıncın düşmesi ve gerekli madde basıncının sağlanamaması sorunudur. Ayrıca düşük basınçlı hatlara art niyetli kişilerin müdahale edip kaçak kullanımlara yönelmesi bir başka problemdir.

Bunun yanı sıra termal su iletim ve dağıtım hatları gibi boru hattını devreye almadan öncesi ile sonrası arasında sıcaklık farkının aşırı büyük olduğu durumlar için ek tedbirlerin alınması boru çeperindeki ilave gerilmeleri azaltacaktır.

Her ne kadar bu çalışmada diğer gerilmeler yanında etkisi az olduğu için trafik yükü ihmal edilse de bu yükün az olduğu güzergahların tercih edilmesi önemlidir. Bu önem kendini, oluşturabileceği ilave gerilmelerden ziyade bir arıza durumunda boru hattına müdahaledeki zorluk ve tehlikeleriyle gösterir.

Donma-çözünmenin etkili olduğu ve toprak örtüsünün derinliklerine kadar indiği durumlarda bu mevsimsel ve/veya gün içindeki sıcaklık değişimlerinin de dikkate alınması gerekmektedir. İstanbul ölçeğinde gerçekleştirilen bu çalışmada bu husus etkili olmadığından ihmal edilmiştir.

Boru hatları genellikle 1m derinliğe kadar gömülmektedir. Bu derinlik için dolgu malzemesinden gelen basınç etkisi ihmal edilebilecek düzeydedir. Ancak daha derine gömülme zorunluluğu olan özel durumlarda bu etki mutlaka dikkate alınmalıdır.

## KAYNAKLAR

- [1] **Özgül, N.** (2011). *İstanbul İl Alanının Jeolojisi*. İstanbul: İBB Deprem ve Zemin İnceleme Müdürlüğü.
- [2] **Yiğit, A.** (2012). *Zemin İnceleme Çalışmaları*. İstanbul: İBB İstanbul Gaz Dağıtım A.Ş. (İGDAŞ).
- [3] **Oyo International Corporation.** (2007). *Avrupa Yakası Güneyi Mikrobölgeleme Çalışması*. İstanbul: İBB Deprem ve Zemin İnceleme Müdürlüğü.
- [4] **Özgül, N.** (2005). *İstanbul İli Temel Jeolojik Özellikleri*. İstanbul: İBB Deprem ve Zemin İnceleme Müdürlüğü.
- [5] **Erdik M., Demircioglu M., Sesetyan K., Durukal E and Siyahi B.** (2004). Earthquake Hazard in Marmara Region, Turkey. *13th World Conference on Earthquake Engineering*, (pp.270). Vancouver, B.C., Canada, August 1-6.
- [6] **Parsons T., Toda S., Stein R.S., Barka A. And Dieterich J.H.** (2000). Heightened Odds of Large Earthquakes Near Istanbul: An Interaction-Based Probability Calculation. *Science*, 288(5466), 661-5.
- [7] **Alkan, A.** (2012). *Zemin Etüt Çalışmaları*. İstanbul: A1 Mühendislik.
- [8] **Murtezaoğlu, M.** (2012). *Zemin Etüt Çalışmaları*. İstanbul: Mavi Marmara Zemin Etüt.
- [9] **Mengüllüoğlu, N.** (2012). *Zemin Etüt Çalışmaları*. İstanbul: Jeodinamik Yerbilimleri Mühendislik.
- [10] **Gedikli, A., Lav, M.A.** (2007). İstanbul İli Büyükçekmece İlçesinin Gürpınar, Beylikdüzü Ve Yakuplu Beldelerine Doğalgaz Arzı Hakkında Teknik Rapor. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [11] **Meyersohn, W.** (1991). *Analytical and design considerations for the seismic response of buried pipelines* (Ph.D. thesis). Cornell University, New York
- [12] **Yiğit, A.** (2007). *Gömülü boru hatlarının deprem etkilerine karşı davranışı* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [13] **Newmark, N.M.,** (1965). Effects of earthquakes on dams and embankments. *Geotechnique* 15, 139–159.
- [14] **Wilson, R.C., Keefer, D.K.,** (1983). Dynamic analysis of a slope failure from the 6 August 1979 Coyote Lake, California, earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America* 73, 863–877.

- [15] **Wieczorek, G.F., Wilson, R.C., Harp, E.L.,** (1985). Map showing slope stability during earthquakes in San Mateo County California: US Geological Survey Miscellaneous Investigations Map I-1257-E, scale 1:62,500.
- [16] **Houston, S.L., Houston, W.N., Padilla, J.M.,** (1987). Microcomputer aided evaluation of earthquake-induced permanent slope displacements. *Microcomputers in Civil Engineering* 2, 207–222.
- [17] **Jibson, R.W.,** (1993). Predicting earthquake-induced landslide displacements using Newmark's sliding block analysis. *Transportation Research Record* 1411, 9–17.
- [18] **Jibson, R.W., Keefer, D.K.,** (1993). Analysis of the seismic origin of landslides: examples from the New Madrid seismic zone. *Geological Society of America Bulletin* 105, 521–536.
- [19] **California Division of Mines and Geology,** (1997). Guidelines for evaluating and mitigating seismic hazards in California, *California Division of Mines and Geology Special Publication* (Vol. 117- pp. 74). California.
- [20] **Jibson, R.W., Harp, E.L., Michael, J.M.,** (1998). A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps: an example from the Los Angeles, California area. *US Geological Survey Open-File Report* 17, 98-113.
- [21] **Mankelaw, J.M., Murphy, W.,** (1998). Using GIS in the probabilistic assessment of earthquake triggered landslide hazards. *Journal of Earthquake Engineering* 2, 593– 623.
- [22] **Bray, J.D., Rathje, E.M.,** (1998). Earthquake-induced displacements of solid-wastelandfills. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 124, 242–253.
- [23] **Luzi, L., Pergalani, F.,** (1999). Slope instability in static and dynamic conditions for urban planning: the “Oltre Po Pavese” case history (Regione Lombardia — Italy). *Natural Hazards* 20, 57–82.
- [24] **Miles, S.B., Ho, C.L.,** (1999). Rigorous landslide hazard zonation using Newmark's method and stochastic ground motion simulation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 18, 305–323.
- [25] **Jibson, R.W., Harp, E.L., Michael, J.M.,** (2000). A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps. *Engineering Geology* 58, 271–289
- [26] **Miles, S.B., Keefer, D.K.,** (2000). Evaluation of seismic slope performance models using a regional case study. *Environmental and Engineering Geoscience* 6, 25–39.
- [27] **Miles, S.B., Keefer, D.K.,** (2001). Seismic Landslide Hazard Report for the City of Berkeley, California. US Geological Survey Miscellaneous Field Studies Map MF-2378.
- [28] **Del Gaudio, V., Pierri, P., Wasowski, J.,** (2003). An approach to time-probabilistic evaluation of seismically induced landslide hazard. *Seismological Society of America* 93, 557–569.

- [29] **Pradel, D., Smith, P.M., Stewart, J.P., Raad, G.,** (2005). Case history of landslide movement during the Northridge earthquake. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 131, 1360–1369.
- [30] **Haneberg, W.C.,** (2006). Effects of digital elevation model errors on spatially distributed seismic slope stability calculations: an example from Seattle, Washington. *Environmental and Engineering Geoscience* 12, 247–260.
- [31] **Rathje, E., Saygili, G.,** (2006). A vector hazard approach for Newmark sliding block analysis. *Proceedings, New Zealand Workshop on Geotechnical Earthquake Engineering Workshop*, (pp. 205-216). New Zealand: University of Canterbury, November 20–23.
- [32] **Wilson, R. Eieczorek, G., Harp, E.** (1979). Development of Criteris for Regional Mapping of Seismic Slope Stability, 1979 Annual Meeting of the Geological Society of America.
- [33] **Siyahi, B., Erdik, M., Sesetyan, K., Demircioglu, M.B., Akman, H.** (2003). Sıvılaşma ve şev stabilitesi hassaslığı ve potansiyeli haritaları: İstanbul örneği. *Besinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*. İstanbul, Türkiye, 26-30 Mayıs.
- [34] **Keefer, D.K.,** (1984). Landslides caused by earthquakes. *Geological Society of America Bulletin* 95, 406-421.
- [35] **Miles, S.B., Keefer, D.K.** (2001). Seismic Landslide Hazard ort he Cities of Oakland and Piedmont, California. US Geological Survey Miscellaneous Field Studies Map MF-2379.
- [36] **Ambraseys, N.N., Menu, J.M.,** (1988). Earthquake – induced ground displacements. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 16, 985–1006.
- [37] **Yegian, M.K., Marciano, E.A., Ghahraman, V.G.,** (1991). Earthquake induced permanent deformations: probabilistic approach. *Journal of Geotechnical Engineering* 117, 35–50.
- [38] **Ambraseys, N.N., Srbulov, M.,** (1995). Earthquake induced displacements of slope. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 14, 59–71.
- [39] **Crespellani, T., Madiai, C., Vannucchi, G.,** (1998). Earthquake destructiveness potential factor and slope stability. *Geotechnique* 48 (3), 411–419.
- [40] **Bray, J.D., Travasarou, T.,** (2007). Simplified procedure for estimating earthquake-induced deviatoric slope displacements. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 133 (4), 381–392.
- [41] **Chyi-Tyi Lee, Shang-Yu Hesieh,** (2011). Empirical estimation of the Newmark displacement from the Arias intensity and critical acceleration. *Engineering Geology* 122, 34–42.
- [42] **Arias, A.,** (1970). A measure of earthquake intensity. In: Hansen, R.J. (Ed.), *Seismic Design for Nuclear Power Plants*, (pp. 438-483). Cambridge: Massachusetts Institute of Technology.

- [43] **Wilson, R.C., Keefer, D.K.**, (1985). Predicting Aerial Limits of Earthquake-Induced Landsliding. In *Evaluating Earthquake Hazards in the Los Angeles Region-An Earth-Science Perspective*, Professional Paper 1360, U.S. Geological Survey.
- [44] **AFAD, Ulusal Kuvvetli Yer Hareketi Gözlem Ağı**. Erişim: 18 Eylül 2013, <http://kyh.deprem.gov.tr/>
- [45] **Gregor, N.J.**, (1995). The Attenuation of Strong Ground Motion Displacements (Report Number UCB/EERC-95/02). Berkeley: University of California, Earthquake Engineering Research Center.
- [46] **American Society of Civil Engineers (ASCE)**. (1984). *Guidelines for the Seismic Design of Oil and Gas Pipeline Systems*, Committee on Gas and Liquid Fuel Lifeline, ASCE.
- [47] **Hall, W. And Newmark, N.**, (1977). Seismic Design Criteria for Pipelines and Facilities. *Current State of Knowledge of Lifeline Earthquake Engineering*, (pp. 18-34). New York: ASCE.
- [48] **Indian Institute of Technology** (2007). *Guidelines for Seismic Design of Buried Pipelines*. Indian: Kanpur.
- [49] **Gedikli, A., Lav, M.A., Yiğit, A.** (2008). Seismic Vulnerability Of A Natural Gas Pipeline Network. *ASCE Pipelines 2008*. Atlanta, July 22-27.
- [50] **Koç, E., Keleş, İ., Yıldızlı, K.** (2012). İnce Cidarlı Silindirde Gerilme ve Şekil Değiştirme Analizi Deneyi. Samsun: Ondokuzmayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü.
- [51] **Url-1** < <http://www.dizayngrup.com/> >, erişim tarihi: 26.08.2013.
- [52] **Türkdoğan, F. İ., Yetilmezsoy, K.** (2004). *Su Getirme ve Kanalizasyon Uygulamaları*. İstanbul: Su Vakfı Yayınları.
- [53] **O'Rourke, M.** (1989). Approximate analysis procedure for permanent ground deformation effect on buried pipelines. Proceedings of 2<sup>nd</sup> Japan-U.S. Workshop on Liquefaction, Large Ground Deformation and Their Effects on Lifeline Facilities (Technical Report NCEER-89-0032). New York: Multidisciplinary Centre for Earthquake Engineering Research.
- [54] **İnan, M.** (1967). *Cisimlerin Mukavemeti*. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Vakfı Yayınları.
- [55] **O'Rourke, M.J., Liu, X.J., and Flores-Berrones, R.**, (1995). Steel Pipe Wrinkling Due to Longitudinal Permanent Ground Deformation. *Journal of Transportation Engineering* 121 (5), 443-451.
- [56] **Ramberg, W. And Osgood, W.**, (1943). *Description of Stress-Strain Curves by Three Parameters*, Technical Note, No. 902, National Advisory Committee for Aeronautics, 28p.
- [57] **Hou, Z., Cai, J., and Liu, X.**, (1990). Response Calculation of Oil Pipeline Subjected to Permanent Ground Movement Induced by Soil Liquefaction. *Proceedings of the China-Japan Symposium on Lifeline Earthquake Engineering*, (pp. 107-114). Beijing.

- [58] **Türkel, V.** (2012). *Doğalgaz Dağıtımında Tasarım, İmalat ve Yönetim*. İstanbul: İBB İstanbul Gaz Dağıtım A.Ş. (İGDAŞ) Yayınları
- [59] **Url-2** <<http://www.firat.com/firat-boru>>, erişim tarihi: 03.05.2013.
- [60] **Url-3** <<http://www.borusan.com.tr/>>, erişim tarihi: 03.05.2013.
- [61] **Zeytinoğlu, M.** (2005). Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Yumuşak Polietilen Bir Silindirik Borunun Gerilme Analizi. Bursa: Uludağ Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Makinaları Bölümü.
- [62] **Hoek, E., Bray, J.W.** (1974). *Kaya Şev Stabilitesi* (A. Paşamehmetoğlu ve M. Öncül, Çev.). Ankara: TMMOB Maden Mühendisleri Odası.



## ÖZGEÇMİŞ



**Ad Soyad:** Adil YİĞİT  
**Doğum Yeri ve Tarihi:** OF – 24.09.1974  
**Adres:** İGDAŞ  
**E-Posta:** [adilyigit75@hotmail.com](mailto:adilyigit75@hotmail.com)  
**Lisans:** KTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü  
**Yüksek Lisans:** İTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü

### Mesleki Deneyim ve Ödüller:

- Altunizade Hilal Konakları İnşaatı (1997-1999)
- İGDAŞ Etüt Proje Müdürlüğü, Mühendis (1999- 2006)
- İGDAŞ Etüt Proje Müdürlüğü, Uzman (2006- 2008)
- İGDAŞ Mukavele ve Kesin Hesap Müd., Üstyapı İnşaat Şefi (2008- 2010)
- İGDAŞ Yapı Denetim ve Koord. Müd., Teknik İşler Şefi (2010- )
- Anadolu Üniversitesi Kamu Yönetimi Mezunu (2005-2009)
- Enerji Kimlik Belgesi Uzmanı
- Gayrimenkul Değerleme Uzmanı
- A Sınıfı İş Güvenliği Uzmanı

### Yayın ve Patent Listesi:

### TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

- **Yiğit, A., Demirci, H.E., Gedikli, A., Lav, M.A.** (2014). Gömülü Sürekli Boru Hatlarının Zemin Deplasmanına Karşı Davranışı. *Zemin Mekaniği Ve Temel Mühendisliği 15. Ulusal Kongresi*. Ankara: Ortadoğu Teknik Üniversitesi, 16-17 Ekim.
- **Yiğit, A., Demirci, H.E., Gedikli, A., Lav, M.A.** (2014). Prediction of Permanent Ground Deformation of Newmark Block Based on Earthquakes in Turkey. *11<sup>th</sup> International Congress on Advances in Civil Engineering*. Istanbul: Istanbul Technical University, October 21- 25.

- **Yiğit, A., Gedikli, A.** (2015). Türkiye Kuvvetli Yer Hareketi Kayıtları Kullanılarak Deprem Kaynaklı Kalıcı Zemin Yer Değiştirmelerinin Tahmin Edilmesi. *Gazi Üniversitesi Politeknik Dergisi* 18 (3), 175-181.