

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DEPREM ETKİSİNDEKİ YERALTI YAPILARININ ZAMAN TANIM  
ALANINDA DOĞRUSAL VE DOĞRUSAL OLMAYAN ÇÖZÜMLEMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**CAN BERK KESKİN**

**Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Deprem Mühendisliği Programı**

**MAYIS 2014**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DEPREM ETKİSİNDEKİ YERALTI YAPILARININ ZAMAN TANIM  
ALANINDA DOĞRUSAL VE DOĞRUSAL OLMAYAN ÇÖZÜMLEMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Can Berk Keskin  
501111212**

**Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Deprem Mühendisliği Programı**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. A. Necmettin Gündüz**

**MAYIS 2014**



İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501111212 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Can Berk KESKİN**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “ **DEPREM ETKİSİNDEKİ YERALTI YAPILARININ ZAMAN TANIM ALANINDA DOĞRUSAL VE DOĞRUSAL OLMAYAN ÇÖZÜMLEMESİ** ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :**      **Doç. Dr. A. Necmettin GÜNDÜZ**      .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :**      **Doç. Dr. Konuralp GİRĞİN**      .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Doç. Dr. Kutay ORAKÇAL**      .....  
Boğaziçi Üniversitesi

**Teslim Tarihi : 05 Mayıs 2014**  
**Savunma Tarihi : 30 Mayıs 2014**



*Anneme,*



## ÖNSÖZ

Yeraltı yapıları, bize sağladığı çeşitli kolaylıklar nedeniyle toplumların günlük hayatı içerisinde oldukça önemli bir yere sahip olmuştur. Ancak bu yapıların özellikle bir deprem coğrafyasında bulunan ülkemizde, depreme dayanıklı ve bulunduğu bölgeye uygun biçimde tasarlanması ve inşa edilmesi yüksek önem taşımaktadır.

Bu çalışmada yeraltı yapısı olan tünellerin bilgisayar ortamında modellenmesi, karşılaştırmalı olarak doğrusal ve doğrusal olmayan analizlerinin yapılması ve uygun kesit tipinin belirlenmesiyle ilgili genel bir sunum ortaya konmuştur.

Çalışmanın oluşumu sırasında yardımlarını ve desteğini esirgemeyen başta tez danışmanım Sayın Doç. Dr. A. Necmettin Gündüz olmak üzere, D3 düzeyine göre üretilmiş deprem datasının oluşturulmasındaki yardımlarından dolayı Sayın Doç. Dr. Beyza Taşkın'a ve sevgili aileme teşekkürlerimi borç bilirim.

Mayıs 2014

Can Berk Keskin  
İnşaat Mühendisi



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

|                                                                              |           |
|------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| ÖNSÖZ.....                                                                   | viii      |
| İÇİNDEKİLER.....                                                             | ix        |
| KISALTMALAR.....                                                             | xi        |
| ÇİZELGE LİSTESİ.....                                                         | xiii      |
| ŞEKİL LİSTESİ.....                                                           | xv        |
| SEMBOL LİSTESİ.....                                                          | xv        |
| ÖZET .....                                                                   | xxii      |
| SUMMARY.....                                                                 | xxiii     |
| <b>1. GİRİŞ .....</b>                                                        | <b>1</b>  |
| 1.1 Giriş ve Tezin Amacı.....                                                | 1         |
| <b>2. YERALTI YAPILARI.....</b>                                              | <b>3</b>  |
| 2.1 Genel.....                                                               | 3         |
| 2.2 Yeraltı Yapı Türleri .....                                               | 4         |
| <b>3. YERALTI YAPILARININ TASARIM AŞAMASI.....</b>                           | <b>7</b>  |
| 3.1 Tasarım Öncesi Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar .....                    | 7         |
| 3.2 Bölgenin Sismik Araştırması ve İncelenen Parametreler .....              | 8         |
| <b>4. DEPREMİN YERALTI YAPILARINA ETKİLERİ .....</b>                         | <b>13</b> |
| 4.1 Depremlerin Oluşturduğu Dalga Hareketleri.....                           | 13        |
| 4.1.1 Boyuna dalgalar .....                                                  | 13        |
| 4.1.2 Enine dalgalar .....                                                   | 13        |
| 4.1.3 Yüzey dalgaları .....                                                  | 14        |
| 4.2 Yer Sarsıntısı.....                                                      | 15        |
| 4.2.1 Serbest alan zemin şekil değişimi .....                                | 17        |
| 4.3 Zemin Hasarları.....                                                     | 19        |
| 4.3.1 Sıvılaşma.....                                                         | 19        |
| 4.3.2 Toprak kayması.....                                                    | 21        |
| 4.3.3 Fay hareketleri.....                                                   | 21        |
| 4.3.4 Fay türleri.....                                                       | 21        |
| 4.3.4.1 Eğim atımlı normal ve ters faylar .....                              | 22        |
| 4.3.4.2 Yanal atımlı faylar .....                                            | 22        |
| 4.3.4.3 Oblik faylar .....                                                   | 23        |
| <b>5. YERALTI YAPILARININ TASARIM VE ANALİZ YÖNTEMLERİ.....</b>              | <b>25</b> |
| <b>6. YERALTI YAPILARININ DEPREM HAREKETLERİNE KARŞI</b>                     |           |
| <b>DAVRANIŞLARI .....</b>                                                    | <b>27</b> |
| 6.1 Yakın Tarihli Depremlerde Yeraltı Yapılarında Gözlemlenen Sonuçlar ..... | 29        |
| <b>7. DEPREM DOĞRULTUSU, BUNA BAĞLI DEFORMASYONLAR VE</b>                    |           |
| <b>ÇÖZÜMLERİ.....</b>                                                        | <b>33</b> |
| 7.1 Yapı Eksenine Paralel Deprem Hareketleri.....                            | 33        |
| 7.1.1 Eksenel yer değiştirme.....                                            | 33        |
| 7.1.2 Boyuna eğilme (bükülme) .....                                          | 35        |
| 7.1.3 Yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği çözüm .....                    | 36        |

|                                                                          |            |
|--------------------------------------------------------------------------|------------|
| 7.1.4 Yapı-zemin etkileşimli çözüm.....                                  | 36         |
| 7.2 Yapı Eksenine Dik Deprem Hareketleri .....                           | 38         |
| 7.2.1 Dairesel yapıda ovalleşme.....                                     | 39         |
| 7.2.1.1 Yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği çözüm.....               | 39         |
| 7.2.1.2 Yapı-zemin etkileşimli çözüm .....                               | 39         |
| 7.2.2 Dikdörtgen kesitte eğilme .....                                    | 41         |
| 7.2.2.1 Yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği çözüm.....               | 42         |
| 7.2.2.2 Yapı-zemin etkileşimli çözüm .....                               | 43         |
| 7.2.2.3 Basitleştirilmiş çerçeve analizi.....                            | 44         |
| 7.2.2.4 Dinamik yapı-zemin etkileşimli çözüm.....                        | 47         |
| <b>8. YERALTI YAPILARININ TASARIM YÜKLEMELERİ .....</b>                  | <b>49</b>  |
| 8.1 Statik Yükleme .....                                                 | 49         |
| 8.2 Dinamik Yükleme .....                                                | 50         |
| <b>9. SAP2000 PROGRAMI İLE SAYISAL UYGULAMALAR.....</b>                  | <b>51</b>  |
| 9.1 İki Boyutlu Dikdörtgen Kesitli Tünel Modeli .....                    | 51         |
| 9.1.1 Zemin tabakasının genişliğine bağlı analiz .....                   | 53         |
| 9.1.2 Analiz sonuçları .....                                             | 54         |
| 9.2 Zemin Tabakasında Tünel Kesit Boşluğu Açarak Analiz.....             | 56         |
| 9.2.1 Analiz sonuçları .....                                             | 57         |
| 9.3 Yapı ve Zemin Birlikte Analiz .....                                  | 58         |
| 9.3.1 Analiz sonuçları .....                                             | 59         |
| 9.4 İki Boyutlu Dikdörtgen Kesitli Tünel Modelinde Nonlinear Çözüm ..... | 64         |
| 9.4.1 Analiz sonuçları .....                                             | 66         |
| 9.5 İki Boyutlu Dairesel Kesitli Tünel Modeli.....                       | 72         |
| 9.5.1 Analiz sonuçları .....                                             | 72         |
| 9.6 İki Boyutlu Dairesel Kesitli Tünel Modelinde Nonlinear Çözüm.....    | 77         |
| 9.6.1 Analiz sonuçları .....                                             | 77         |
| <b>10. ÜRETİLMİŞ DEPREM DATASI İLE TASARIM .....</b>                     | <b>83</b>  |
| 10.1 Genel .....                                                         | 83         |
| 10.2 Dikdörtgen Kesitli Modelin Üretilen Deprem Kaydı İle Analizi .....  | 86         |
| 10.2.1 Zaman tanım alanında lineer analiz sonuçları .....                | 86         |
| 10.2.2 Zaman tanım alanında nonlinear analiz sonuçları .....             | 90         |
| 10.3 Dairesel Kesitli Modelin Üretilen Deprem Kaydı İle Analizi.....     | 94         |
| 10.3.1 Zaman tanım alanında lineer analiz sonuçları .....                | 94         |
| 10.3.2 Zaman tanım alanında nonlinear analiz sonuçları .....             | 98         |
| 10.4 Dairesel Kesitli Tünelin Kapasite Hesabı ve Kontrolü .....          | 103        |
| 10.4.1 Dairesel kesitli tünelin P-M diyagramı .....                      | 103        |
| 10.4.2 Dairesel kesitli tünelin kesme kuvveti kontrolü .....             | 105        |
| <b>11. SONUÇLAR .....</b>                                                | <b>107</b> |
| <b>KAYNAKLAR.....</b>                                                    | <b>109</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>                                                     | <b>111</b> |

## **KISALTMALAR**

|              |                                                     |
|--------------|-----------------------------------------------------|
| <b>YASS</b>  | : Yeraltı Su Seviyesi                               |
| <b>MSK</b>   | : Medvedev, Karnik, Sponheuer Deprem Şiddet Cetveli |
| <b>TMMOB</b> | : Türkiye Mimarlar ve Mühendisler Odası Birliği     |
| <b>MDE</b>   | : Maksimum Tasarım Depremi                          |
| <b>ODE</b>   | : İşletme Tasarım Depremi                           |



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

|                     |                                                                                                                 |    |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Çizelge 4.1</b>  | : Dalga türüne göre zemin birim şekil değiştirmeleri .....                                                      | 18 |
| <b>Çizelge 9.1</b>  | : Malzeme özellikleri.....                                                                                      | 52 |
| <b>Çizelge 9.2</b>  | : 1.Mod periyotları .....                                                                                       | 54 |
| <b>Çizelge 9.3</b>  | : Köşe noktaların maksimum yatay ve düşey yer değiştirmelerinin tabaka genişliğine bağlı değişimi .....         | 55 |
| <b>Çizelge 9.4</b>  | : Tabaka boyunca maksimum yatay ve düşey yer değiştirmelerin genişliğe bağlı değişimi .....                     | 55 |
| <b>Çizelge 9.5</b>  | : Zemin tabakalarındaki boşluk oranları.....                                                                    | 57 |
| <b>Çizelge 9.6</b>  | : Boşluksuz ve boşluklu modellerde periyot değerleri ve tabakada oluşan maksimum yer değiştirmeler .....        | 57 |
| <b>Çizelge 9.7</b>  | : Boşluksuz ve boşluklu modellerde a,b,c,d noktalarındaki maksimum yer değiştirmeler .....                      | 58 |
| <b>Çizelge 9.8</b>  | : Çerçevesiz ve boşluklu modellerde a,b,c,d noktalarındaki maksimum yer değiştirmeler ve 1.mod periyotları..... | 59 |
| <b>Çizelge 9.9</b>  | : Tabaka genişliğine bağlı olarak çerçeveye gelen maksimum iç kuvvetler.....                                    | 62 |
| <b>Çizelge 9.10</b> | : Lineer ve nonlinear çözümde tabaka boyunca oluşan maksimum yer değiştirmeler .....                            | 66 |
| <b>Çizelge 9.11</b> | : Lineer ve nonlinear çözümde a, b, c ve d noktalarındaki maksimum yer değiştirmeler .....                      | 66 |
| <b>Çizelge 9.12</b> | : Lineer ve nonlinear çözümde tünel kesitinde oluşan maksimum iç kuvvetler.....                                 | 70 |
| <b>Çizelge 9.13</b> | : Zemin tabakası boyunca oluşan maksimum yer değiştirmeler ve 1.mod periyotları .....                           | 73 |
| <b>Çizelge 9.14</b> | : Maksimum iç kuvvetler.....                                                                                    | 75 |
| <b>Çizelge 9.15</b> | : Lineer ve nonlinear çözümde tabaka boyunca oluşan maksimum yer değiştirmeler .....                            | 77 |
| <b>Çizelge 9.16</b> | : Lineer ve nonlinear çözümde kesitte oluşan maksimum yer değiştirmeler .....                                   | 77 |
| <b>Çizelge 9.17</b> | : Lineer ve nonlinear çözümde tünel kesitinde oluşan maksimum iç kuvvetler.....                                 | 80 |
| <b>Çizelge 9.18</b> | : Analizler sonucu maksimum yer değiştirmeler için özet tablo .....                                             | 82 |
| <b>Çizelge 9.19</b> | : Analizler sonucu maksimum iç kuvvetler için özet tablo .....                                                  | 82 |
| <b>Çizelge 10.1</b> | : Tabaka boyunca ve tünel kesiti köşe noktalarında oluşan maksimum yer değiştirmeler .....                      | 86 |
| <b>Çizelge 10.2</b> | : Kesitte oluşan maksimum iç kuvvetler .....                                                                    | 88 |
| <b>Çizelge 10.3</b> | : Tabaka boyunca ve tünel kesiti köşe noktalarında oluşan maksimum yer değiştirmeler .....                      | 90 |
| <b>Çizelge 10.4</b> | : Kesitte oluşan maksimum iç kuvvetler .....                                                                    | 91 |
| <b>Çizelge 10.5</b> | : Tabaka boyunca ve tünel kesiti köşe noktalarında oluşan maksimum yer değiştirmeler .....                      | 93 |

|                      |                                                          |     |
|----------------------|----------------------------------------------------------|-----|
| <b>Çizelge 10.6</b>  | : Kesitte oluşan maksimum iç kuvvetler.....              | 93  |
| <b>Çizelge 10.7</b>  | : Tabaka boyunca oluşan maksimum yer değiştirmeler ..... | 94  |
| <b>Çizelge 10.8</b>  | : Kesitte oluşan maksimum yer değiştirmeler.....         | 94  |
| <b>Çizelge 10.9</b>  | : Kesitte oluşan maksimum iç kuvvetler.....              | 96  |
| <b>Çizelge 10.10</b> | : Tabaka boyunca oluşan maksimum yer değiştirmeler ..... | 98  |
| <b>Çizelge 10.11</b> | : Kesitte oluşan maksimum yer değiştirmeler.....         | 98  |
| <b>Çizelge 10.12</b> | : Kesitte oluşan maksimum iç kuvvetler.....              | 100 |
| <b>Çizelge 10.13</b> | : Tabaka boyunca oluşan maksimum yer değiştirmeler ..... | 102 |
| <b>Çizelge 10.14</b> | : Kesitte oluşan maksimum yer değiştirmeler.....         | 102 |
| <b>Çizelge 10.15</b> | : Kesitte oluşan maksimum iç kuvvetler.....              | 103 |

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

|            |                                                                                                                                     |    |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1  | : Delme Tünel. ....                                                                                                                 | 4  |
| Şekil 2.2  | : Aç kapa Tünel. ....                                                                                                               | 4  |
| Şekil 2.3  | : Batırma Tüp Tünel. ....                                                                                                           | 5  |
| Şekil 3.1  | : A. Diverjan, B. Konverjan, C. Transform. ....                                                                                     | 9  |
| Şekil 4.1  | : P Dalgası. ....                                                                                                                   | 13 |
| Şekil 4.2  | : S Dalgası. ....                                                                                                                   | 14 |
| Şekil 4.3a | : Love Dalgası. ....                                                                                                                | 14 |
| Şekil 4.3b | : Rayleigh Dalgası. ....                                                                                                            | 15 |
| Şekil 4.4  | : Sıvılaşmış zeminde batma problemi oluşan bir bina. ....                                                                           | 19 |
| Şekil 4.5  | : Toprak kayması. ....                                                                                                              | 21 |
| Şekil 4.6  | : Graben ve Horst. ....                                                                                                             | 22 |
| Şekil 4.7  | : Eğim atımlı faylar. ....                                                                                                          | 22 |
| Şekil 4.8  | : Yanal Atımlı Fay. ....                                                                                                            | 23 |
| Şekil 4.9  | : Oblik Fay. ....                                                                                                                   | 23 |
| Şekil 6.1  | : Tünel eksenini boyunca çekme ve basınç gerilmeleri. ....                                                                          | 28 |
| Şekil 6.2  | : Boyuna eğilme (bükülme) deformasyonları. ....                                                                                     | 28 |
| Şekil 6.3  | : Ovalleşme (kırılma) deformasyonları. ....                                                                                         | 29 |
| Şekil 6.4  | : Tünel raylarındaki bozulmalar. ....                                                                                               | 29 |
| Şekil 6.5  | : Daikai metro istasyonunda kolon hasarları. ....                                                                                   | 30 |
| Şekil 7.1  | : Tünel eksenini $\emptyset$ açısı ile kesen deprem dalgası. ....                                                                   | 35 |
| Şekil 7.2  | : Elastik mesnetlere oturan sürekli kiriş. ....                                                                                     | 37 |
| Şekil 7.3  | : Eksene dik deprem hareketinde eğilme ve ovalleşme. ....                                                                           | 38 |
| Şekil 7.4  | : $K_a$ ve $F$ arasındaki ilişkiyi gösteren tablo. ....                                                                             | 41 |
| Şekil 7.5  | : Dikdörtgen kesitli yeraltı yapısında eğilme deformasyonu. ....                                                                    | 42 |
| Şekil 7.6  | : Dikdörtgen kesitli yeraltı yapısında A ve B noktalarındaki<br>deplasmanların farkından yapıdaki birim deplasmanın bulunması. .... | 43 |
| Şekil 7.7  | : Dikdörtgen kesitli yeraltı yapısında yapı-zemin etkileşimli çözüm. ....                                                           | 44 |
| Şekil 7.8  | : $G_s > G_g$ durumu. ....                                                                                                          | 45 |
| Şekil 7.9  | : $G_s < G_g$ durumu. ....                                                                                                          | 45 |
| Şekil 7.10 | : Kayma gerilmesi eşitliği. ....                                                                                                    | 46 |
| Şekil 7.11 | : Birim kuvvet etkisi altında birim yer değiştirme yapan basit mesnetli<br>çerçeve sistem. ....                                     | 47 |
| Şekil 7.12 | : Genel olarak dinamik yapı-zemin etkileşimli bir analiz modeli. ....                                                               | 48 |
| Şekil 9.1  | : 2 Boyutlu dikdörtgen tünel modeli. ....                                                                                           | 51 |
| Şekil 9.2  | : 2 Boyutlu zemin tabakası modeli. ....                                                                                             | 52 |
| Şekil 9.3  | : Sap2000 global eksenler; $x(1)$ , $y(2)$ , $z(3)$ . ....                                                                          | 53 |
| Şekil 9.4  | : Tünel kesitinin belirlenen dört köşesi. ....                                                                                      | 54 |
| Şekil 9.5  | : 2 Boyutlu boşluklu zemin tabakası modeli. ....                                                                                    | 56 |
| Şekil 9.6  | : 2 Boyutlu yapı-zemin birlikte model. ....                                                                                         | 59 |

|                   |                                                                                    |    |
|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 9.7</b>  | : a ve b noktalarında yatay yer değiştirmelerin zamana bağlı olarak değişimi. .... | 60 |
| <b>Şekil 9.8</b>  | : a ve b noktalarında düşey yer değiştirmelerin zamana bağlı olarak değişimi. .... | 60 |
| <b>Şekil 9.9</b>  | : c ve d noktalarında yatay yer değiştirmelerin zamana bağlı olarak değişimi. .... | 61 |
| <b>Şekil 9.10</b> | : c ve d noktalarında düşey yer değiştirmelerin zamana bağlı olarak değişimi. .... | 61 |
| <b>Şekil 9.11</b> | : 3,53. saniyedeki eksenel yük diyagramı. ....                                     | 62 |
| <b>Şekil 9.12</b> | : 3,53. saniyedeki kesme kuvveti diyagramı. ....                                   | 63 |
| <b>Şekil 9.13</b> | : 3,53. saniyedeki moment diyagramı. ....                                          | 63 |
| <b>Şekil 9.14</b> | : Zemin için gerilme şekil değiştirme grafiği. ....                                | 64 |
| <b>Şekil 9.15</b> | : C25 betonu için gerilme şekil değiştirme grafiği. ....                           | 65 |
| <b>Şekil 9.16</b> | : A615Gr60 çeliği için gerilme şekil değiştirme grafiği. ....                      | 65 |
| <b>Şekil 9.17</b> | : Lineer analiz sonucu deforme olmuş model. ....                                   | 67 |
| <b>Şekil 9.18</b> | : Nonlineer analiz sonucu deforme olmuş model. ....                                | 67 |
| <b>Şekil 9.19</b> | : a ve b noktalarında yatay yer değiştirmelerin zamana bağlı olarak değişimi. .... | 68 |
| <b>Şekil 9.20</b> | : a ve b noktalarında düşey yer değiştirmelerin zamana bağlı olarak değişimi. .... | 68 |
| <b>Şekil 9.21</b> | : c ve d noktalarında yatay yer değiştirmelerin zamana bağlı olarak değişimi. .... | 69 |
| <b>Şekil 9.22</b> | : c ve d noktalarında düşey yer değiştirmelerin zamana bağlı olarak değişimi. .... | 69 |
| <b>Şekil 9.23</b> | : 3,53. saniyedeki eksenel yük diyagramı. ....                                     | 70 |
| <b>Şekil 9.24</b> | : 3,53. saniyedeki kesme kuvveti diyagramı. ....                                   | 71 |
| <b>Şekil 9.25</b> | : 3,53. saniyedeki moment diyagramı. ....                                          | 71 |
| <b>Şekil 9.26</b> | : At nalı tipi tünel modeli. ....                                                  | 72 |
| <b>Şekil 9.27</b> | : Yatay yönde maksimum yer değiştirmenin olduğu noktalar. ....                     | 73 |
| <b>Şekil 9.28</b> | : Düşey yönde maksimum yer değiştirmenin olduğu noktalar. ....                     | 73 |
| <b>Şekil 9.29</b> | : x noktasında yatay yer değiştirmenin zamana bağlı olarak değişimi. ..            | 74 |
| <b>Şekil 9.30</b> | : y noktasında düşey yer değiştirmenin zamana bağlı olarak değişimi. .             | 74 |
| <b>Şekil 9.31</b> | : 3,53. saniyedeki eksenel yük diyagramı. ....                                     | 75 |
| <b>Şekil 9.32</b> | : 3,53. saniyedeki kesme kuvveti diyagramı. ....                                   | 76 |
| <b>Şekil 9.33</b> | : 3,53. saniyedeki moment diyagramı. ....                                          | 76 |
| <b>Şekil 9.34</b> | : Lineer analiz sonucu deforme olmuş model. ....                                   | 78 |
| <b>Şekil 9.35</b> | : Nonlineer analiz sonucu deforme olmuş model. ....                                | 78 |
| <b>Şekil 9.36</b> | : Yatay yönde maksimum yer değiştirmenin olduğu nokta. ....                        | 78 |
| <b>Şekil 9.37</b> | : Düşey yönde maksimum yer değiştirmenin olduğu noktalar. ....                     | 79 |
| <b>Şekil 9.38</b> | : $x_n$ noktasında yatay yer değiştirmenin zamana bağlı olarak değişimi. .         | 79 |
| <b>Şekil 9.39</b> | : $y_n$ noktasında düşey yer değiştirmenin zamana bağlı olarak değişimi. .         | 79 |
| <b>Şekil 9.40</b> | : 3,53. saniyedeki eksenel yük diyagramı. ....                                     | 80 |
| <b>Şekil 9.41</b> | : 3,53. saniyedeki kesme kuvveti diyagramı. ....                                   | 81 |
| <b>Şekil 9.42</b> | : 3,53. saniyedeki moment diyagramı. ....                                          | 81 |
| <b>Şekil 10.1</b> | : Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası. ....                                          | 84 |
| <b>Şekil 10.2</b> | : D3 depremi için tanımlanan ivme spektrumu. ....                                  | 85 |
| <b>Şekil 10.3</b> | : a ve b noktalarında yatay yer değiştirmelerin zamana bağlı olarak değişimi. .... | 86 |
| <b>Şekil 10.4</b> | : a ve b noktalarında düşey yer değiştirmelerin zamana bağlı olarak değişimi. .... | 87 |

|                                                                                                      |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Şekil 10.5</b> : c ve d noktalarında yatay yer değiştirmelerin zamana bağlı olarak değişimi.....  | 87  |
| <b>Şekil 10.6</b> : c ve d noktalarında düşey yer değiştirmelerin zamana bağlı olarak değişimi.....  | 88  |
| <b>Şekil 10.7</b> : 6,88. saniyedeki eksenel yük diyagramı. ....                                     | 88  |
| <b>Şekil 10.8</b> : 6,895. saniyedeki kesme kuvveti diyagramı. ....                                  | 89  |
| <b>Şekil 10.9</b> : 6,895. saniyedeki moment diyagramı. ....                                         | 89  |
| <b>Şekil 10.10</b> : a ve b noktalarında yatay yer değiştirmelerin zamana bağlı olarak değişimi..... | 90  |
| <b>Şekil 10.11</b> : a ve b noktalarında düşey yer değiştirmelerin zamana bağlı olarak değişimi..... | 90  |
| <b>Şekil 10.12</b> : c ve d noktalarında yatay yer değiştirmelerin zamana bağlı olarak değişimi..... | 91  |
| <b>Şekil 10.13</b> : c ve d noktalarında düşey yer değiştirmelerin zamana bağlı olarak değişimi..... | 91  |
| <b>Şekil 10.14</b> : 4,485. saniyedeki eksenel yük diyagramı. ....                                   | 92  |
| <b>Şekil 10.15</b> : 4,485. saniyedeki kesme kuvveti diyagramı. ....                                 | 92  |
| <b>Şekil 10.16</b> : 4,485. saniyedeki moment diyagramı. ....                                        | 93  |
| <b>Şekil 10.17</b> : Yatay ve düşey yönde maksimum yer değiştirme noktaları. ....                    | 95  |
| <b>Şekil 10.18</b> : x noktasında yatay yer değiştirmenin zamana bağlı olarak değişimi. ..           | 95  |
| <b>Şekil 10.19</b> : x noktasında düşey yer değiştirmenin zamana bağlı olarak değişimi..             | 96  |
| <b>Şekil 10.20</b> : 6,875. saniyedeki eksenel yük diyagramı. ....                                   | 97  |
| <b>Şekil 10.21</b> : 6,895. saniyedeki kesme kuvveti diyagramı. ....                                 | 97  |
| <b>Şekil 10.22</b> : 6,895. saniyedeki moment diyagramı. ....                                        | 98  |
| <b>Şekil 10.23</b> : Yatay yönde maksimum yer değiştirmenin olduğu nokta. ....                       | 99  |
| <b>Şekil 10.24</b> : Düşey yönde maksimum yer değiştirmenin olduğu noktalar. ....                    | 99  |
| <b>Şekil 10.25</b> : $x_n$ noktasında yatay yer değiştirmenin zamana bağlı olarak değişimi. ....     | 100 |
| <b>Şekil 10.26</b> : $y_n$ noktasında düşey yer değiştirmenin zamana bağlı olarak değişimi. ....     | 100 |
| <b>Şekil 10.27</b> : 4,505. saniyedeki eksenel yük diyagramı. ....                                   | 101 |
| <b>Şekil 10.28</b> : 4,48. saniyedeki kesme kuvveti diyagramı. ....                                  | 101 |
| <b>Şekil 10.29</b> : 4,48. saniyedeki moment diyagramı. ....                                         | 102 |
| <b>Şekil 10.30</b> : Programın otomatik donatılandığı tünel kesitinin P-M diyagramı. ....            | 104 |
| <b>Şekil 10.31</b> : Yeniden donatılandırılan tünel kesitinin görüntüsü.....                         | 104 |
| <b>Şekil 10.32</b> : Yeniden donatılandırılmış kesitin P-M diyagramı. ....                           | 105 |
| <b>Şekil 10.33</b> : Yeni kesitin P-M diyagramı. ....                                                | 106 |



## SEMBOL LİSTESİ

|                                                    |                                 |
|----------------------------------------------------|---------------------------------|
| <b>E</b>                                           | : Elastisite modülü             |
| <b>k</b>                                           | : Bulk modülü                   |
| <b>G<sub>g</sub></b>                               | : Zemin kayma modülü            |
| <b>G<sub>s</sub></b>                               | : Yapı kayma modülü             |
| <b>μ</b>                                           | : Poisson oranı                 |
| <b>q<sub>s</sub></b>                               | : Zemin emniyet gerilmesi       |
| <b>q<sub>a</sub></b>                               | : Zemin taşıma gücü             |
| <b>M<sub>L</sub></b>                               | : Yerel büyüklük                |
| <b>M<sub>S</sub></b>                               | : Yüzey dalga büyüklüğü         |
| <b>M<sub>B</sub></b>                               | : Cisim dalga büyüklüğü         |
| <b>M<sub>W</sub></b>                               | : Moment büyüklüğü              |
| <b>V<sub>S</sub>, V<sub>P</sub>, V<sub>R</sub></b> | : S, P, R dalgası parçacık hızı |
| <b>C<sub>S</sub>, C<sub>P</sub>, C<sub>R</sub></b> | : S, P, R dalgası hızı          |
| <b>a<sub>S</sub>, a<sub>P</sub>, a<sub>R</sub></b> | : S, P, R parçacık ivmesi       |
| <b>D</b>                                           | : Dalga genliği                 |
| <b>L</b>                                           | : Dalga boyu                    |
| <b>Ø</b>                                           | : Dalga açısı                   |
| <b>U<sub>x</sub></b>                               | : x yönündeki yer değiştirme    |
| <b>U<sub>y</sub></b>                               | : y yönündeki yer değiştirme    |
| <b>ε</b>                                           | : Birim uzama                   |
| <b>f</b>                                           | : Dalga frekansı                |
| <b>T</b>                                           | : Periyot                       |
| <b>H<sub>d</sub></b>                               | : Zemin tabakasının kalınlığı   |
| <b>N</b>                                           | : Normal kuvvet                 |
| <b>V</b>                                           | : Kesme kuvveti                 |
| <b>M</b>                                           | : Eğilme momenti                |
| <b>A</b>                                           | : Kesit alanı                   |
| <b>I</b>                                           | : Atalet momenti                |
| <b>K<sub>I</sub></b>                               | : Boyuna rijitlik               |

|                              |                                                        |
|------------------------------|--------------------------------------------------------|
| <b><math>K_t</math></b>      | : Enine rijitlik                                       |
| <b><math>d</math></b>        | : Tünel çapı                                           |
| <b><math>C</math></b>        | : Sıkışabilme oranı                                    |
| <b><math>F</math></b>        | : Esneklik oranı                                       |
| <b><math>\delta</math></b>   | : Birim kayma şekil değıştirmesi                       |
| <b><math>K_a</math></b>      | : Davranış katsayısı                                   |
| <b><math>K_\beta</math></b>  | : Yapı-zemin ara yüzündeki kaymasız davranış katsayısı |
| <b><math>\Delta_S</math></b> | : Kesitte meydana gelen yer değıştirme                 |
| <b><math>R</math></b>        | : Şekil değıştirme oranı                               |
| <b><math>\rho</math></b>     | : Birim hacim ağırlığı                                 |
| <b><math>g</math></b>        | : Yerçekimi ivmesi                                     |
| <b><math>P_S</math></b>      | : Birim yanal kuvvet                                   |
| <b><math>G</math></b>        | : Sabit yük                                            |
| <b><math>Q</math></b>        | : Hareketli yük                                        |
| <b><math>F_d</math></b>      | : Tasarım kuvveti                                      |
| <b><math>H</math></b>        | : Yatay zemin etkisi                                   |
| <b><math>Y</math></b>        | : Yeraltı suyu yatay basıncı                           |
| <b><math>A_0</math></b>      | : Etkin yer ivmesi katsayısı                           |
| <b><math>V_c</math></b>      | : Beton kesme kapasitesi                               |
| <b><math>V_w</math></b>      | : Donatı kesme kapasitesi                              |
| <b><math>V_{cr}</math></b>   | : Toplam kesme kapasitesi                              |
| <b><math>A_{sw}</math></b>   | : Donatı kesit alanı                                   |
| <b><math>A_c</math></b>      | : Beton kesit alanı                                    |
| <b><math>f_{ctd}</math></b>  | : Beton hesap çekme dayanımı                           |
| <b><math>f_{ywd}</math></b>  | : Donatı hesap akma dayanımı                           |
| <b><math>d_s</math></b>      | : Donatı çapı                                          |

## **DEPREM ETKİSİNDEKİ YERALTI YAPILARININ ZAMAN TANIM ALANINDA DOĞRUSAL VE DOĞRUSAL OLMAYAN ÇÖZÜMLEMESİ**

### **ÖZET**

Teknolojinin her anlamda giderek gelişmekte olduğu çağımızda, inşaat alanındaki faaliyetler de buna bağlı olarak gelişmekte ve yenilenmektedir. Yeraltı yapı uygulamaları da eskiye oranla oldukça artmış ve kullanım alanları giderek genişlemiştir. Özellikle ulaşım alanında sıkça kullanılmaya başlanan yeraltı tünelleri, tasarım ve analizleri hakkında birçok soruyu da beraberinde getirmiştir.

Yeraltı yapılarının tasarımının üst yapı tasarımından ayrıldığı en önemli nokta, yapının tamamen veya tamamına yakınının zemine gömülü olması ve deprem esnasında zemin şekil değiştirmelerine doğrudan maruz kalmasıdır. Bu nedenle, yeraltı yapısı sismik tasarım aşamasında içinde bulunduğu zeminden bağımsız düşünülemez ve yapı kendi özelliklerinin yanı sıra bulunduğu bölgenin zemin özelliklerine göre de tasarlanır.

Çalışma toplam on bir bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde çalışma hakkında genel bir tanıtım yapılmıştır. İkinci bölümde yeraltı yapıları, kullanım alanları ve türleri hakkında kısa bir genel bilgi verilmiştir. Üçüncü bölümde tasarım öncesi yapının bulunacağı zeminin hangi özelliklerinin ve hangi parametrelerin incelenmesi gerektiği anlatılmış, depremlerin oluşum şekilleri, levha hareketleri ve depremin büyüklük ve şiddet kavramlarının tanımları ve ölçümleri hakkında bilgi verilmiştir. Dördüncü bölümde depremlerin oluşturduğu dalga hareketleri ve bu dalgaların özellikleri anlatılmış, depremin yeraltı yapılarına verdiği zararlar ve bu zararları etkileyen faktörler açıklanmış, aynı zamanda serbest alan zemin şekil değişimleri, zemin hasarları ve türleri gibi konular incelenmiştir. Beş ve altıncı bölümlerde yeraltı yapılarının tasarım yöntemleri ve bu yapıların deprem hareketlerine karşı gösterdiği davranışlar anlatılmıştır. Ayrıca altıncı bölümde yakın tarihte meydana gelen depremlerin yeraltı yapılarında oluşturduğu hasarlar gösterilmiştir. Yedinci bölümde ise yeraltı yapılarının deprem doğrultusuna bağlı olarak maruz kaldığı deformasyonlar ve çözümleri hakkında genel bir bilgi verilmiştir. Sekizinci bölümde tasarımda kullanılan statik ve dinamik yükler hakkında kısa bir özet sunulmuştur. Çalışmanın dokuz ve onuncu bölümleri farklı kesite sahip iki ayrı tünel modelinin SAP2000 programında modellenmesini ve analizler sonucu uygunluğunun belirlenmesini kapsamaktadır. Dokuzuncu bölümde analizleri yapılacak kesit tipleri tanıtılmış, zemin tabakası ve tünel kesitinin malzeme özellikleri, modelin sınır koşulları açıklanmış ve zaman tanım alanında farklı parametrelerin sırayla değiştirilerek doğrusal ve doğrusal olmayan analizleri yapıp sonuçlar karşılaştırılmış ve incelenmiştir. Dokuzuncu bölüm sonunda kullanılacak modellerin son haline karar verilmiştir. Onuncu bölümde deprem tehlikesi ve deprem düzeyleri hakkında genel bir bilgi verilip modellerde kullanılacak tasarım depreminin düzeyine karar verilmiştir. D3 deprem düzeyine göre modellerin tekrar zaman tanım alanında

doğrusal ve doğrusal olmayan analizleri yapıp uygunluğu incelenmiş ve tasarımı tamamlanmıştır. Son bölüm olan on birinci bölümde sonuçlar ortaya koyulmuştur.

# **THE SOLUTIONS OF UNDERGROUND STRUCTURES UNDER EARTHQUAKE BY USING LINEAR AND NONLINEAR TIME HISTORY ANALYSIS**

## **SUMMARY**

Construction activities is improving depending on the technological developments in the every field of our age. Underground construction applications has increased considerably compared to the past and its application fields are rapidly expanding. Especially increasing usage of the underground tunnels in the field of transport has brought many questions about their design and analysis.

The most important difference between the designs of underground and aboveground structures is as follows: above ground structures are completely or mostly buried into ground and it expose to the shifts of the ground occurred during the earthquake. Therefore, the seismic design of underground structures can not be considered independent from the ground and the structure is designed according to its own features as well as the ground structures in which it was build.

This study consists of totally eleven sections. The first section presents an overview of the study. In the second section a short brief is given about underground structures, its type and usage areas. In the third section, it was explain that which features and which parameters need to be analyzed before the design. In addition, information was given about formation shapes of the earthquake, plate tectonics and earthquake magnitude and severity definitions of concepts and metrics. In the fourth chapter of the wave movement generated by earthquakes its features was explained. The damages in underground structures by the earthquakes and the factors affecting this damages as well as free-field ground changes in shape, floor damage and types of topics were explained. In the fifth and sixth sections, the design methods of underground structures and the behaviour of these structures against seismic movements were described. In addition, the damages in the underground structures which caused by the earthquakes occurred in recent history were shown. In the seventh part of the underground structure is exposed to due to the earthquake direction and solutions, general information about the deformations are given. In the eighth section, a brief summary is presented about static and dynamic loads used in the design. Ninth and tenth sections consists of the modelling of different cross-sections of two separate tunnel model by using SAP2000 program and the determination of its usability/suitability . The ninth chapter will be analyzed cross section types have been introduced, the ground layer and the tunnel cross-section of the material properties of the model boundary conditions described and in the time domain of the different parameters were alternated linear and nonlinear analysis made and the results were compared and examined. At the end of the ninth chapter the appropriate model was decided. In the tenth chapter, seismic hazard and earthquake-level were briefly explained, also it was decided to the level of the projection earthquake which will be used in testing the applicability of the model . In

the tenth part, on the model according to the level of earthquake recurrence of D3 in the time domain linear and nonlinear analysis examined the suitability and its design was completed. In eleventh chapter, which is the last one, the results were revealed.

# 1. GİRİŞ

## 1.1 Giriş ve Tezin Amacı

Yeraltı yapısının deprem sırasındaki davranışı, yapının tasarımındaki en önemli unsurlardan biridir. Geçmişte meydana gelen depremlerde yeraltı yapılarının aldığı hasarlar üst yapılara kıyasla oldukça hafif kalmaktadır. Bazı büyük depremlerde üst yapılarda çok ağır hasarlar ve yıkımlar görülürken yeraltı yapılarında önemli bir hasarın oluşmadığı görülmüştür. Örneğin 1995 yılında Japonya'nın Kobe ve Osaka bölgelerinde meydana gelen ve 20 saniye süren Hyogo –kan Nambu depreminde binlerce yerüstü yapısı yıkılırken sadece bir kaç yeraltı yapısı hasar almıştır. Dolayısıyla yeraltı yapılarının depreme karşı doğal bir korumaya sahip olduğu söylenebilir. Ancak yine de yerüstü yapılarının tasarımında sismik yükler ne kadar önemliyse yeraltı yapılarının tasarımında da aynı derecede önemlidir. Bir çok örnekte yeraltı yapılarının üst yapılara göre depremden daha az etkilendiği görülse de örneğin, 1999 Kocaeli depreminde yeraltı yapıları üst yapılar gibi ciddi hasarlar almıştır. Son yıllarda yeraltı yapılarının depreme karşı gösterdiği davranışların anlaşılması adına oldukça önemli bir yol katedilmiştir. Deprem zeminde oluşturduğu şekil değişimlerinin ve bunların yeraltı yapısına nasıl ve ne derece etki ettiği, yapının bu şekil değişimlerine karşı koyup koymadığı hakkında birçok çalışma yapılmış ve analiz yöntemleri sunulmuştur. Deprem yeraltı yapısına olan etkilerini doğrudan ve dolaylı yoldan olmak üzere iki kısma ayırabiliriz. Deprem dalgalarının zeminde oluşturduğu şekil değişimlerinin yapıya aktarılması sonucu yapıda oluşabilecek hasarlar depremin yeraltı yapısına doğrudan etkisi olarak açıklanabilir. Bunun yanısıra depremin zeminin kendisinde oluşturduğu sıvılaşma, toprak kayması ve fay hareketleri gibi olguların zemine verdiği hasarlar dolaylı yoldan yeraltı yapısına etki edeceğinden bu etkileri de depremin yeraltı yapısına verebileceği ikincil, yani dolaylı etkiler olarak tanımlayabiliriz. Bu nedenle yapının sismik tasarımında zeminin oldukça iyi bir şekilde analiz edilip deprem performansının belirlenmesi gerekir. Bu çalışmada farklı tipte yeraltı yapıları, aynı koşullarda analiz

edilerek kullanılan kesitlerin zemin ve deprem yüklerini taşımada ne derecede başarılı olduğu ve yapımının ne ölçüde uygun olduğu araştırılacaktır.

## **2. YERALTI YAPILARI**

### **2.1 Genel**

Bilindiği üzere, yeraltı yapıları günümüz toplumlarının yaşamlarını kolaylaştırmak adına çokça kullanılan ve günlük hayatımızda sıklıkla karşımıza çıkan yapı türleridir. Özellikle ulaşım alanında, demiryolu ve karayollarında kullanıldığı gibi depo, otopark ve su iletim hatları gibi sistemlerde de görülmektedir. Ancak bu yapıların bize sağladığı birçok kolaylığın yanısıra projelendirilmesi ve inşası sırasında dikkat edilmesi gereken bir o kadar önemli husus bulunmaktadır.

Deprem bölgelerinde inşa edilen bütün yapılar, statik yüklere ek olarak sismik yüklere de maruz kalacağından her iki yüke de dayanabilecek şekilde dizayn edilmelidir. Geçmiş yıllardan günümüze kadar geçen süreç incelendiğinde yeraltı yapılarının yerüstü yapılarına nazaran daha az hasar aldığı görülmektedir. Fakat 1999 Kocaeli depreminde Bolu Dağı tünellerinde oluşan hasarlar gibi yakın geçmişte meydana gelen bazı depremlerde yeraltı yapılarında önemli hasarlar ortaya çıktığı bilinmektedir.

Yeraltı ve yerüstü yapılarının sistemleri farklı olduğu gibi depreme karşı göstereceği davranışlar da birbirinden farklıdır. Çünkü yerüstü yapılarının bir kısmı zemin içinde kalmasına rağmen büyük kısmı zeminin üstünde bulunmaktadır. Ancak yeraltı yapılarının tamamı ya da büyük kısmı zemine gömülüdür ve yapı tamamen zeminle temas halindedir. Bu sebepten ötürü yerüstü yapıları zemin hareketlerinden dolayı oluşan iç kuvvetlere göre tasarlanırken yeraltı yapıları ise yapının bulunduğu zeminde oluşan şekil değişim farklarının yapıda oluşturduğu yer değiştirmeler ve gerilmelere göre tasarlanmaktadır.

Deprem esnasında yerüstü yapılarının zemin içinde kalan bölümü, zemin ile birlikte salınıma geçer ve bu salınımlar üst yapıyı etkileyerek iç kuvvetlerin meydana gelmesine neden olur. Üst yapı zeminle birlikte oluşan bu hareketlere kendi kütlesi ile karşı koymaya çalıştığından etki eden deprem kuvveti ile üst yapının kütlesi arasında doğru orantılı bir ilişki mevcuttur. Ancak yeraltı yapılarına bakıldığında yapının tamamı zemin ile birlikte salınmaktadır ve bu nedenle özellikle küçük hacme

sahip yeraltı yapılarında deprem etkisinde önemli ölçüde zorlanmalar görülmemektedir.

Küçük hacimli yeraltı yapılarının bulundukları ortamda oluşan deformasyonlar hemen hemen birbirine eşit olduğundan zemin ve yapı bir bütünmüş gibi birlikte hareket eder ve zemin içindeki deformasyonlar yapıda herhangi bir zorlamaya sebep olmaz. Ancak tüneller metrolar gibi uzun ve geniş hacimli yeraltı yapılarında bulundukları zeminde oluşan deformasyon farkları nedeniyle yapıda etkili kuvvetler ve zorlamalar doğabilir.

## 2.2 Yeraltı Yapı Türleri

Büyük yeraltı yapılarını tasarım ve inşa özelliklerine göre üç farklı grupta gösterebiliriz.

-Delinerek ya da kazılarak açılan tünel sistemler,



**Şekil 2.1 : Delme Tünel**

-Aç kapa tünel sistemler,



**Şekil 2.2 : Aç kapa Tünel**

-Batırma t p tüneller,



**Şekil 2.3 : Batırma T p Tünel**



### 3. YERALTI YAPILARININ TASARIM AŞAMASI

#### 3.1 Tasarım Öncesi Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar

Yeraltı yapılarının şehirlerdeki trafik yoğunluğunu, gürültü ve hava kirliliğini azaltması, coğrafi olarak ulaşım elverişsiz alanlarda kolaylık sağlaması gibi faydalarının yanında zorlu hava koşullarından, yeryüzündeki patlama ve nükleer sızıntılardan izole bir ortam oluşturması da bu sistemlerin olumlu özellikleri olarak gösterilebilir.

Ancak oldukça avantajı olan bu yapıların inşasına başlanmadan önce birtakım çevre ve ihtiyaç analizleri yapılmalıdır.

Bir yeraltı projesinin tasarım aşamasında tahmin edileceği gibi en önemli etmenlerden biri yapının bulunacağı zeminin özellikleridir. Bu özelliklerin bir kısmı aşağıdaki gibi sıralanabilir;

##### 1. Young Modülü (E)

Birim alana düşen yük ile birim uzunluktaki uzama arasındaki orandır. Bir diğer adı elastisite modülüdür.

$$E = 2 \cdot (1 + \mu) \cdot G = 3 \cdot k \cdot (1 - 2 \cdot \mu) \quad (3.1)$$

##### 2. Bulk Modülü (k)

Birim alana gelen kuvvet ile bu kuvvetin etkisiyle birim hacimde meydana gelen hacimsel değişikliğin oranıdır.

$$k = 2 \cdot (1 + \mu) / 3 \cdot (1 - 2 \cdot \mu) \cdot G \quad (3.2)$$

##### 3. Kayma Modülü (G)

Birim alana gelen kuvvet ile bu kuvvetin etkisiyle meydana gelen açısal deformasyonun oranıdır.

$$G = q \cdot V \cdot s^2 \quad (3.3)$$

#### 4. Poisson Oranı ( $\mu$ )

Zemine uygulanan gerilme yönündeki deformasyon ile bu gerilmeye dik yönde meydana gelen deformasyonun oranıdır.

$$\mu = [1-2.(V_s/V_p)^2]/[2-2.(V_s/V_p)^2] \quad (3.4)$$

#### 5. Zemin Emniyet Gerilmesi ( $q_s$ )

Zeminin birim alanda taşıyabileceği maksimum gerilme miktarıdır.

$$q_s = k_1.c.N_c + \rho_1.D_f.N_q + k_2. \rho_2.B.N_g \quad (3.5)$$

#### 6. Zemin Taşıma Gücü ( $q_a$ )

Zeminin birim alanda taşıyabileceği maksimum yük miktarıdır.

#### 7. Yeraltı Su Seviyesi (YASS)

İki zon arasında atmosfer basıncı ile su basıncının eşit olduğu yüzeydir.

Sıraladığımız bu parametreler tasarım aşamasında yapının yapılacağı bölgedeki zemin çalışmaları ve etütleriyle belirlenmeli ve raporlanmalıdır. Söz konusu zemin sismolojik, hidrolojik ve jeolojik yönden incelenip daha sonra yapım aşamasında meydana gelebilecek olumsuzlukların önüne geçilmelidir.

Yeraltı kazıları ve inşaatları bulundukları jeolojik çevrede dönüşümü olmayan değişimlere sebep olurlar. Bu değişimlerin çevrede bulunan diğer yeraltı veya yerüstü yapılarına verebileceği hasarlar gözardı edilmemelidir. Bazı yeraltı yapıları arkeolojik alanlardan geçebilir. Bu gibi durumlarda tarihsel mirasın korunması her zaman için ön planda olmalıdır. Bu tip durumlarda arkeolojik kazıların yapılması ve bu kazıların yeraltı yapısının proje takvimine etkilerinin dikkate alınması gerekir (Cüceoğlu 2006).

Ayrıca yeraltı yapılarının yapımı bir kez tamamlandıktan sonra yıkılması ya da geri dönüştürülmesi bir hayli zor olacağından karar aşamasında ileriye dönük fonksiyonelliği ve kullanılabilirliği, maliyeti de göz önünde bulundurularak kapsamlı bir şekilde incelenmelidir.

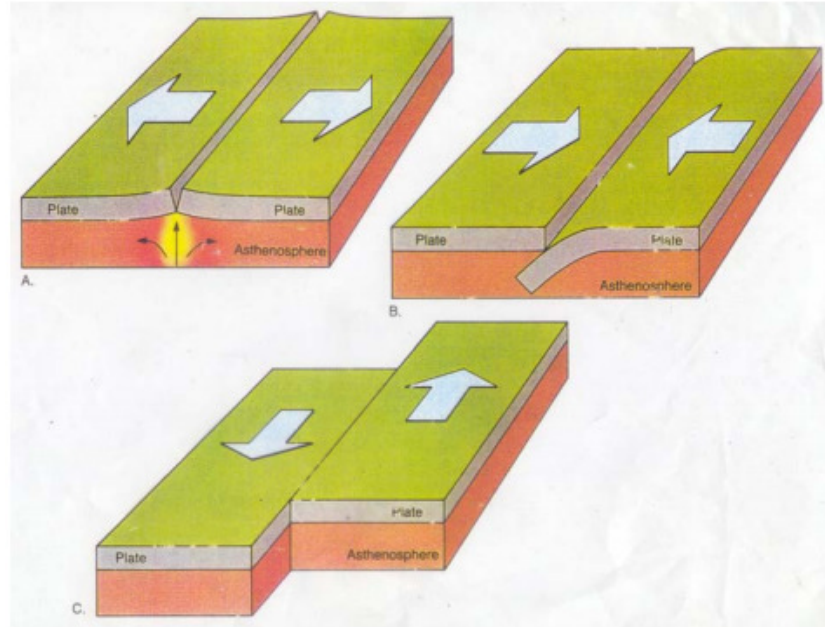
### 3.2 Bölgenin Sismik Araştırması ve İncelenen Parametreler

Yukarıda sıralanan faktörlerin incelenmesiyle beraber aynı zamanda yeraltı yapısının bulunacağı bölgenin deprem performansı ve depremsellik özellikleri de tasarım

aşamasında araştırılmalıdır. Depremleri meydana geliş şekillerine göre tektonik, volkanik, çöküntü ve yapay depremler olarak dört ayrı başlıkta tanımlayabiliriz.

Yer içinde oluşan kuvvetlerin meydana getirdiği ve bunun sonucunda çıkan enerjiyle birlikte levhaların hareketlenmesi sonucu yeryüzünde oluşan sarsıntılar tektonik deprem olarak tanımlanır. Tektonik depremler genelde levha sınırlarında meydana gelmekle beraber şiddet ve etkili olduğu alan bakımından en güçlü deprem türüdür. Meydana gelen depremlerin hemen hemen tamamına yakını tektonik depremlerdir.

İç kuvvetlerin birikip boşalmasıyla oluşan levha hareketlerini ise diverjan (ıraksayan levha sınırı), konverjan (yakınsayan levha sınırı) ve transform olarak sıralayabiliriz (Şekil 3.1).



**Şekil 3.1 : A. Diverjan, B. Konverjan, C. Transform**

Volkanik depremler ise volkanların püskürmesi sırasında yeraltında ki ergimiş maddenin yeryüzüne çıkarken çeşitli yollardan oluşturduğu gazların patlaması sonucu meydana gelen sarsıntılardır ve oluşum sebebi doğrudan yanardağlar ile ilgili olduğundan yerel, yani sadece o bölgeyi etkileyen depremler diyebiliriz. Türkiye’de aktif yanardağ bulunmadığı için yurdumuzda bu çeşit bir deprem görülmezken Japonya, İtalya gibi aktif yanardağların bulunduğu ülkelerde bu tip depremlere rastlamak mümkündür.

Bir diğerk tip olan çöküntü depremleri de volkanik depremler gibi yereldir ve çok büyük zararlara neden olmazlar. Bu depremler yeraltında bulunan yapay ya da doğal boşlukların (mağara, maden ocağı vb.) tavan bloklarının çökmesi sonucu meydana gelir.

Yapay depremler ise doğal oluşum sebeplerinin dışında, çeşitli patlayıcılar kullanılarak yapılan çalışmalar nedeniyle oluşan deprem türüdür.

Yeraltı yapısının sismik tasarımında ihtiyaç duyulan bilgiler arasında bölgede oluşabilecek depremin şiddeti, büyüklüğü ve etkili olduğu süre bulunur. Bir depremin büyüklüğü, o deprem sırasında açığa çıkan enerji miktarıyla ilişkilendirilerek ölçülür ve bu ölçü birimi magnitüd (M) olarak isimlendirilir. Ancak yerel büyüklük ( $M_L$ ), yüzey dalga büyüklüğü ( $M_S$ ), cisim dalga büyüklüğü ( $M_B$ ) ve moment büyüklüğü ( $M_W$ ) gibi farklı büyüklük ölçme çeşitleri mevcuttur.

Depremin şiddetiye, oluşan sarsıntının bölgedeki canlılar ve yapılar üzerinde meydana getirdiği zararlar, yıkımlar ve etkiler göz önüne alınarak tanımlanır. Depremin şiddeti göreceli bir kavramdır ancak tanımlamak için birtakım şiddet cetvelleri oluşturulmuştur.

MSK Deprem Şiddet Cetveli;

**I, II, III Şiddetindeki Depremler :** Sırasıyla; duyulmayan, çok hafif ve hafif depremlerdir.

**IV Orta Şiddetli Deprem :** Deprem yapı içinde çok, dışarda ise az kişi tarafından hissedilir. Yapılarda sıvalar çatlar ve dökülür.

**V Şiddetli Deprem :** Deprem yapı içinde ve dışında hissedilir. Yapı sallanır, A tipi yapılarda hafif hasarlar olabilir.

**VI Çok Şiddetli Deprem :** Yapı içinde ve dışında hissedilir. A tipi yapılarda orta ve çok, B tipi yapılarda az hasar görülür. Nemli zeminlerde 1 cm genişliğinde çatlaklar olabilir. Yer kaymaları, kaynak ve yeraltı sularında değişiklikler görülebilir.

**VII Hasar Yapıcı Deprem :** Yapı içinde fazla hissedilir. İnsanlar korkar ve dışarı kaçarlar, oturdukları yerden kalkmakta güçlük çekerler. Sarsıntı, araç kullananlar tarafından da hissedilir. A tipi yapılarda ağır hasar ve yıkım, B tipi yapılarda orta hasar, C tipi yapılarda az hasar görülür. Kaynak suları bulanır ve debileri değişir, yeraltı sularının düzeyleri değişir. Yollarda kayma ve çatlama olabilir.

**VIII Yıkıcı Deprem :** Korku ve panik meydana gelir. Ağaç dalları kırılıp düşer. A tipi yapılarda yıkım, B tipi yapılarda ağır hasar ve C tipi yapılarda orta ve ağır hasarlar görülür. Dik şevli yol kenarlarında ve vadi içlerinde yer kaymaları olabilir. Zeminde çatlaklar oluşabilir, göl suları bulanır ve yeraltı su düzeyleri değişir.

**IX Çok Yıkıcı Deprem :** İnsanlarda panik, hayvanlarda kaçış ve bağırışlar olur. A tipi ve B tipi yapılarda yıkım, C tipi yapılarda ağır hasar ve yıkım görülür. Yollar bozulur, demiryolu rayları bükülür. Açık alanlarda su kum ve çamur taşmaları, zeminlerde 10cm genişliğine kadar çatlaklar oluşur. Kaya düşmeleri, yer kaymaları görülür ve sulara büyük dalgalanmalar meydana gelir.

**X Ağır Yıkıcı Deprem :** C tipi yapılarda yıkım, yollarda kasisler oluşur. Baraj, bent ve köprülerde önemli hasarlar görülür, demiryolu rayları eğrilir. Zeminde 100cm genişliğine kadar çatlaklar görülür. Büyük heyelanlar olur. Kayma düşmeleri, deniz göl ve nehir sularında taşmalar görülür ve yeni göller oluşabilir.

**XI Çok Ağır Yıkıcı Deprem :** İyi yapılmış yapılarda, köprülerde, su bentlerinde, barajlarda ve demiryolu raylarında tehlikeli hasarlar olur, yollar kullanılamaz hale gelir. Yatay ve düşey doğrultudaki hareketler nedeniyle yerde geniş ve derin çatlaklar, yarıklar oluşur ve yer önemli biçimde bozulur.

**XII Yok Edici Deprem :** Yeryüzü değişir, yeraltı ve yerüstündeki tüm yapılar yıkılır.

Bu cetvelde sözü edilen A tipi yapılar kerpiç, kireç ya da çamur harçlı moloz taş yapıları, B tipi yapılar tuğla, yarım kagir, kesme taş, beton briket ve prefabrik yapıları, C tipi yapılar ise betonarme ve iyi yapılmış ahşap yapıları tanımlamaktadır.

Depremlerin şiddet ve magnitüdleri arasında birtakım ampirik bağıntılar çıkarılmıştır. Bu bağıntılardan şiddet ve magnitüd değerleri arasındaki ilişki aşağıdaki gibidir (TMMOB).

Şiddet : IV V VI VII VIII IX X XI XII

Magnitüd : 4 4.5 5.1 5.6 6.2 6.6 7.3 7.8 8.4

Depremi etkili olduğu süre ise çevreye verdiği zararın boyutunu belirleyen en önemli faktörlerden biridir. Depremi süresini ve bu süre zarfında yeraltı yapısına etkiyen kuvvetlere karşı yapının davranışını ve performansını belirleyen ampirik

formüller bulunur. Örneğin Watabe formülü deprem sürelerini genliğe bağlı tanımlayan ampirik bir formüldür (Cüceoğlu, 2006).

Bu bilgiler ışığında sismik inceleme için bölgenin jeolojik ve sismolojik haritaları temin edilmeli ve söz konusu parametrelerin belirlenmesi için arazi deneyleri yapılmalıdır.

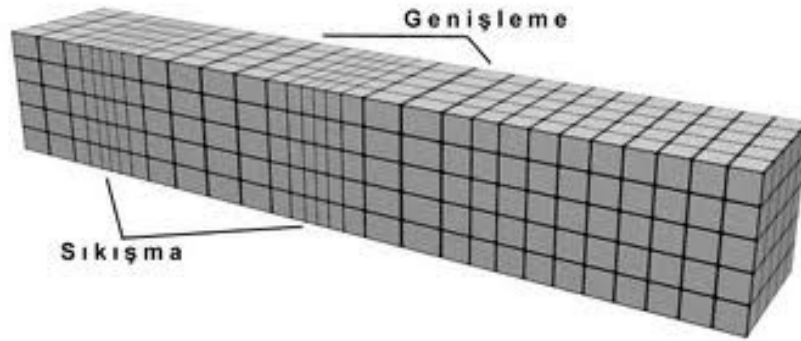
## 4. DEPREMİN YERALTI YAPILARINA ETKİLERİ

### 4.1 Depremlerin Oluşturduğu Dalga Hareketleri

Deprem esnasında meydana gelen sarsıntılar, depremin odağında oluşan gerilme ve hareketler sonucu ortaya çıkan dalga hareketlerinden kaynaklanmaktadır. Bir diğer deyişle deprem odağındaki potansiyel enerji açığa çıkan bu dalgalar ile kinetik enerjiye dönüşür. Deprem dalgalarını üç ayrı türe ayırabiliriz. Bunlar boyuna dalgalar, enine dalgalar ve yüzey dalgalarıdır.

#### 4.1.1 Boyuna Dalgalar

Boyuna dalgalara P dalgası adı verilir ve en hızlı yayılan, dolayısıyla sismograflarda ilk kaydedilen deprem dalgalarıdır. Yıkım etkisi düşük ve titreşim hareketi yayılma doğrultusundadır (Şekil 4.1).

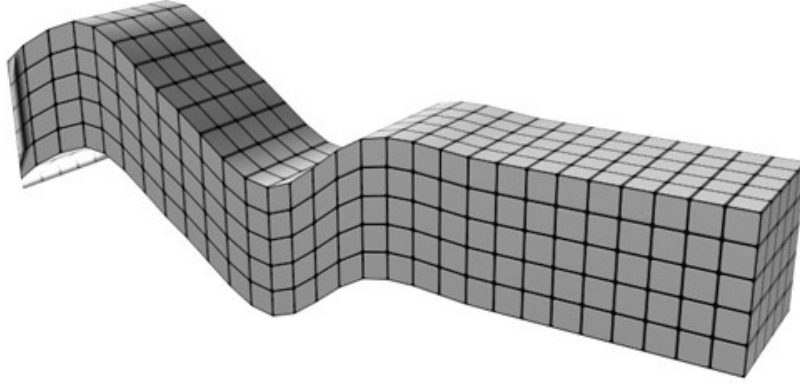


Şekil 4.1 : P Dalgası

#### 4.1.2 Enine Dalgalar

Boyuna dalgalara göre daha yavaştır ve S dalgası adı verilir. Sismograflarda ikincil olarak kaydedilen dalgalardır. P dalgalarının aksine titreşim hareketi yayılma

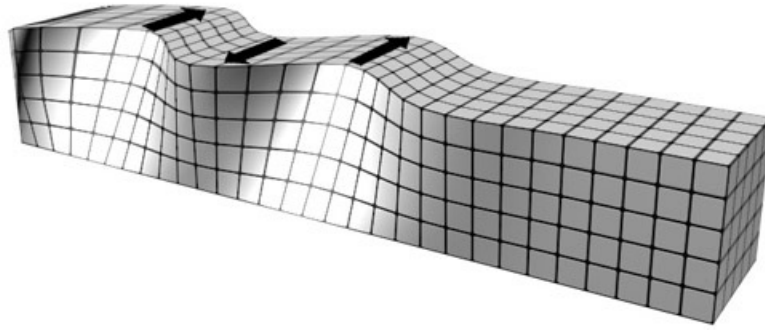
doğrultusuna diktir. Yayılma hızları düşüktür ancak yapılarda yıkıma yol açan dalgalardır (Şekil 4.2).



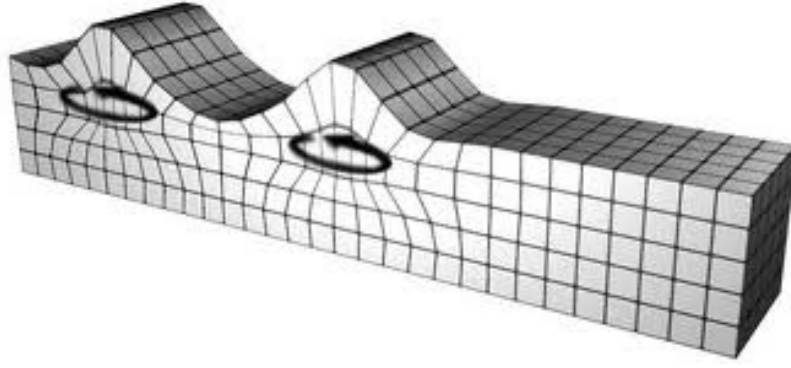
**Şekil 4.2 : S Dalgası**

#### **4.1.3 Yüzey Dalgaları**

En yavaş yayılan dalgalardır. Genlikleri P ve S dalgalarına göre daha büyüktür. Yüzey dalgaları da Love (C) ve Rayleigh (D) dalgaları olarak ikiye ayrılır. Love dalgası daha hızlı yayılırken Rayleigh dalgasının genliği daha büyüktür (Şekil 4.3a ve Şekil 4.3b).



**Şekil 4.3a : Love Dalgası**



**Şekil 4.3b : Rayleigh Dalgası**

Love dalgaları, S dalgalarının hızının az olduğu alt katmanlarda, tabakalı zeminlerde oluşur ve hızı S dalgasının yüzeydeki ve alt katmanlardaki yayılma hızının arasında bir değere sahiptir. Rayleigh dalgalarının yayılma hızı hemen hemen S dalgalarına yakın bir hızdadır. S ve P dalgaları yayıldıkları farklı zemin türlerine göre kırılma ve yansımalarla maruz kalırken bu esnada lokal yer değiştirme genliğinde artma veya azalma meydana gelebilir. Dalgaların yayıldığı yüzeyin topoğrafyasındaki değişimler ve alt tabakalardaki süreksizlikler kırılma ve yansıma olaylarını oldukça etkileyen faktörlerdir. Yüzey topoğrafyası yüzey dalgalarını etkileyen bir diğer unsurdur (St. John ve Zahrah, 1987).

Yeraltı yapıları üzerinde oluşan deprem etkilerini yer sarsıntısı ve zemin hasarları olarak iki grupta inceleyebiliriz.

#### **4.2 Yer Sarsıntısı**

Yer sarsıntısı, yer kabuğunda oluşan sismik dalgaların meydana getirdiği zemin deformasyonları olarak tanımlanabilir. Bu deformasyonların yeraltı yapılarına verdiği zararları etkileyen faktörleri sıralarsak;

1. Yapının şekli, boyutu ve derinliği
2. Yapının içinde bulunduğu zemin ya da kaya ortamının özellikleri

- $V_s/C_s$  dalgasının görünen hızı
- Zemin birim ağırlığı
- Zeminin poisson oranı

- Rijit kaya üzerindeki zemin kalınlığı

### 3. Yapının özellikleri

- Tünel kalınlığı
- Tünel ortalama çapı
- Tünel uzunluğu
- Tünel enkesitinin çatlamış kesit atalet momenti
- Tünel enkesit alanı
- Beton elastisite modülü
- Beton dayanımı
- Eksenel basınç ve eğilme altındaki betonun maksimum birim deformasyonu

### 4. Yer sarsıntısının şiddeti

Zemin hasarlarının olmadığı durumlarda, yeraltı yapısı tasarlanırken sismik dalgaların oluşturduğu zemin şekil değişimlerine dikkat edilir. Zemin şekil değiştirmelerinin incelenmesinde yer hareketinin ve zemin özelliklerinin beraber değerlendirilmesi gerekir. Yer hareketi üç adet yer değiştirme ve üç adet dönme hareketinin bileşeni olarak tanımlanır. Yer hareketi bileşenlerini ivme, hız ve yer değiştirme parametreleri olan genlik, frekans ve güçlü yer sarsıntısı süresi karakterize eder (Cüceoğlu, 2006).

Yapının tasarımında kullanılacak deprem parametrelerini maksimum ya da işletme tasarım depremlerine göre belirleriz. Maksimum tasarım depremi (MDE), bölgede meydana gelecek yer hareketinin maksimum seviyesini belirtirken işletme tasarım depremi (ODE) ise yapının ömrü boyunca en az bir kez karşılaşacağı deprem hareketi seviyesine karşılık gelir.

MDE'ye göre tasarlanmış bir yapıdaki amaç, yapı ömrü içerisinde gerçekleşme olasılığı %3-%5 olan bir depremde yapı içerisindeki kamu güvenliğinin sağlanmasıdır (Hashash ve diğ., 2001).

ODE'ye göre tasarlanmış bir yapı, deprem esnasında veya sonrasında işletmeye açık kalabilecek seviyede az hasara maruz kalmalıdır. Yeraltı yapısı ODE davranışı, elastik sınırlar içerisinde olmalıdır (Hashash ve diğ., 2001).

#### **4.2.1 Serbest Alan Zemin Şekil Değişimi**

Herhangi bir yapı veya kazının bulunmadığı bir zeminde deprem dalgalarının oluşturduğu şekil değişimleri, serbest alan zemin şekil değişimi olarak tanımlanır. Deprem dalgasının türüne göre meydana gelen şekil değişimleri de farklılık gösterir (Çizelge 4.1).

**Çizelge 4.1 :** Dalga türüne göre zemin birim şekil değiştirmeleri (St.John ve Zahrah, 1987)

| DALGA TİPİ                           | BOYUNA<br>DEFORMASYON                                        | ENİNE<br>DEFORMASYON                                         | KAYMA<br>DEFORMASYONU                                           | EĞRİLİK                                                |
|--------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| P DALGASI                            | $\epsilon_l = (V_P/C_P) \cdot \cos^2 \theta$                 | $\epsilon_n = (V_P/C_P) \cdot \sin^2 \theta$                 | $\epsilon_s = (V_P/C_P) \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta$    | $1/\rho = (a_P/C_P^2) \cos^2 \theta \cdot \sin \theta$ |
|                                      | $\epsilon_{lm} = V_P/C_P$<br>( $\theta=0$ için)              | $\epsilon_{nm} = V_P/C_P$<br>( $\theta=90$ için)             | $\epsilon_{sm} = V_P/2C_P$<br>( $\theta=45$ için)               | $1/\rho_m = 0,385(a_P/C_P^2)$                          |
| S DALGASI                            | $\epsilon_l = (V_S/C_S) \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta$ | $\epsilon_n = (V_S/C_S) \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta$ | $\epsilon_s = (V_S/C_S) \cdot \cos^2 \theta$                    | $K = (a_S/C_S^2) \cos^3 \theta$                        |
|                                      | $\epsilon_{lm} = V_S/2C_S$<br>( $\theta=45$ için)            | $\epsilon_{nm} = V_S/2C_S$<br>( $\theta=45$ için)            | $\epsilon_{sm} = V_S/C_S$<br>( $\theta=0$ için)                 | $K_m = a_S/C_S^2$<br>( $\theta=0$ için)                |
| RAYLEIGH DALGASI<br>(Boyuna bileşen) | $\epsilon_l = (V_{RP}/C_R) \cdot \cos^2 \theta$              | $\epsilon_n = (V_{RP}/C_R) \cdot \sin^2 \theta$              | $\epsilon_s = (V_{RP}/C_R) \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta$ | $K = (a_{RP}/C_R^2) \cos^2 \theta \cdot \sin \theta$   |
|                                      | $\epsilon_{lm} = V_{RP}/C_R$<br>( $\theta=0$ için)           | $\epsilon_{nm} = V_{RP}/C_R$<br>( $\theta=90$ için)          | $\epsilon_{sm} = V_{RP}/2C_R$<br>( $\theta=45$ için)            | $K_m = 0,385(a_{RP}/C_R^2)$                            |
| RAYLEIGH DALGASI (Enine<br>bileşen)  |                                                              | $\epsilon_n = (V_{RS}/C_R) \cdot \sin^2 \theta$              | $\epsilon_s = (V_{RS}/C_R) \cdot \cos \theta$                   | $K = (a_{RS}/C_R^2) \cos^2 \theta$                     |
|                                      |                                                              | $\epsilon_{nm} = V_{RS}/C_R$<br>( $\theta=90$ için)          | $\epsilon_{sm} = V_{RS}/C_R$<br>( $\theta=0$ için)              | $K_m = a_{RS}/C_R^2$                                   |

### 4.3 Zemin Hasarları

Zemin hasarlarını, deprem ile birlikte aktif hale gelen sıvılaşma, toprak kayması, fay hareketlerinden kaynaklanan deformasyonlar gibi zemin kusurları olarak açıklayabiliriz.

#### 4.3.1 Sıvılaşma

Suya doymuş, gevşek kum/kumlu zeminler tekrarlı yükler etkisinde sıkışma ve hacim daralması eğilimi gösterirler. Bu eğilim drenajın olmadığı koşullarda, boşluk suyu basıncını artırır. Boşluk suyu basıncının artması aynı zamanda zeminin efektif gerilmesinin düşmesi ve dolayısıyla zeminin taşıma gücü ve mukavemetinin azalması demektir. Tekrarlı yükler kum tabakası içindeki boşluk suyu basıncının artmasını desteklediği zaman, toplam normal gerilme boşluk suyu basıncına eşit değere ulaşabilir (Das, 1983). Bu durumda kohezyonsuz zemin, kayma direncini kaybeder ve bir sıvı gibi davranıp büyük yer değiştirmeler yaparak sıvılaşma durumuna geçmiş olur.



**Şekil 4.4 :** Sıvılaşmış zeminde batma problemi oluşan bir bina

Sıvılaşma potansiyeli yüksek olan zeminlerde, yeraltı su seviyesinin altında bulunan yapılarda yanal toprak basıncında artış görülebilir. Ayrıca sıvılaşmış zeminde yapının yüzmesi ya da batması gibi problemlerde meydana gelebilir (Şekil 4.4).

Zemin sıvılaşmasının etkisinin görüldüğü örnekler; 1964 Niigata, 1920 California Calvers, 1938 Montana Fort Peck, 1948 Fukui, 1971 California San Fernando, 1964

Alaska Anchorage, 1980 Mino Owari olarak sıralanabilir (Kishida, 1969). Ülkemizde sıvılaşmanın görüldüğü son büyük örnek ise 1999 Marmara Depreminde meydana gelen sıvılaşmalardır.

Zeminin sıvılaşma potansiyelini asli ve yardımcı yöntemler olmak üzere iki farklı şekilde belirleyebiliriz.

a) Asli Yöntemler

- Başlangıç ivmesi yöntemi (Dobry et.al., 1981)
- Tekrarlı kayma gerilmesi yöntemi (Seed et.al., 1981)
- Sıvılaşma indeksi yöntemi (Iwasaki et.al., 1984)

b) Yardımcı Yöntemler

- Relatif sıkılık
- Boşluk suyu basıncı artış oranı
- Dane boyutu ve boyut dağılımı
- Kritik boşluk oranı
- Standart penetrasyon
- Zeminin gerilme altında kaldığı süre
- Sismik geçmiş
- Yanal basınç katsayısı ve aşırı konsolidasyon oranı
- İnce dane oranının etkisi
- Dane şekli
- Titreşim

Sıvılaşmanın yeraltı yapılarına olan olumsuz etkilerini en aza indirmek için birtakım yöntemler geliştirilmiştir;

1. Drenaj kuyuları sayesinde boşluk suyu basıncı kontrol altında tutulabilir.
2. Dinamik kompaksiyon ile zemin sıkıştırılabilir.
3. Zemine çimento enjekte edilerek mukavemet artışı sağlanabilir.
4. Yeraltı su seviyesi kalıcı olarak düşürülebilir.

5. Zemin değişikliğine gidilerek, yerine uygun özellikte daha iyi bir malzeme doldurulabilir.

#### 4.3.2 Toprak Kayması

Zemin hasarlarından bir diğeri olan toprak kayması, yeraltı yapıları için oldukça büyük tehlike arz eder. Örneğin bir tünel boyunca meydana gelen toprak kaymaları, kayma yer değiştirmeleri ve göçmelere sebep olur (Şekil 4.5). Önceden toprak kayması olmuş bölgelerde yapılacak inşaat çalışmaları sırasında tekrar toprak kayması olma ihtimali yüksektir. Bu nedenle dikkatli arazi çalışmaları yapılmalıdır.



Şekil 4.5 : Toprak kayması

#### 4.3.3 Fay Hareketleri

Zemin tabakalarında gözle görülür yer değiştirmeler oluşturan kırıklara fay denir ve bazı durumlarda inşa edilen yeraltı yapıları bu faylar üzerinden geçmek durumunda kalabilir. Yeraltı yapılarının fay bölgelerinden geçtiği kısımlarda fay hareketlerinden kaynaklı hasarlar, çatlaklar hatta göçme durumları meydana gelebilir. Bu nedenle fay hareketlerinin engellenme şansı olamayacağı için inşaat öncesinde bölgedeki fayların ve hareketlerinin analizi iyi bir şekilde yapılarak, yeraltı yapısı bu hareketlerden oluşabilecek zorlanmaları karşılayabilecek şekilde tasarlanmalıdır.

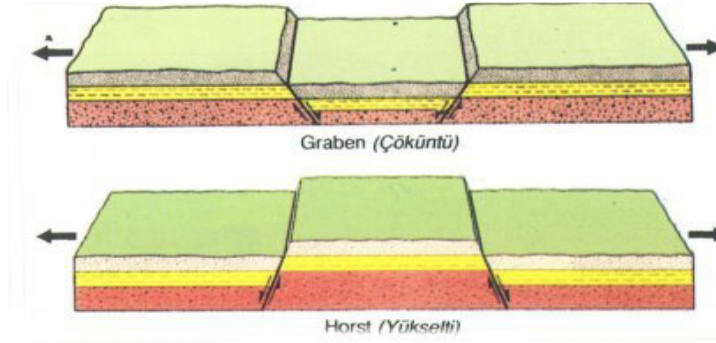
#### 4.3.4 Fay Türleri

Faylar blokların hareket yönlerine göre üçe ayrılır. Bunlar;

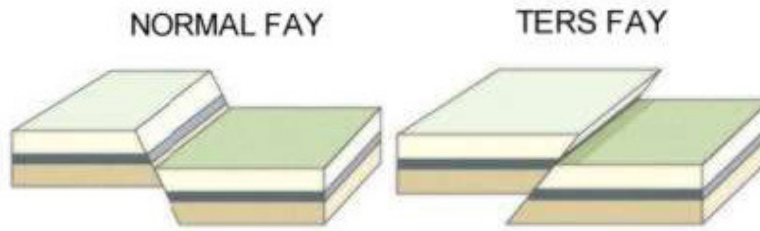
#### 4.3.4.1 Eğim Atımlı Normal Ve Ters Faylar

Normal faylar eğik bir fay düzleminde, üstteki bloğun alttaki bloğa göre aşağı doğru hareket etmesi sonucu oluşan faylardır. Fay düzlemi altındaki bloğa taban, üstündeki bloğa ise tavan bloğu denir. Normal fayların oluşturduğu çöküntü alanlarına graben, yükselti alanlarına ise horst adı verilir (Şekil 4.6). Bu tip faylanmalar derin vadiler oluşturabilir.

Ters faylar ise normal fayların tam tersi şekilde meydana gelir. Yani eğik fay düzleminde üstteki blok, düzlemin altındaki bloğa göre yukarı doğru hareket ederek yükselir. Ters faylar sıkışmalı bölgelerde olduğundan bloklar kıvrılarak bozulur ve kıvrımlı yapılar meydana getirirler. Bu tip faylanmalarda yükselen tavan blokları yurdumuzdaki Karadeniz ve Toros dağları gibi dağ kuşakları oluştururlar.



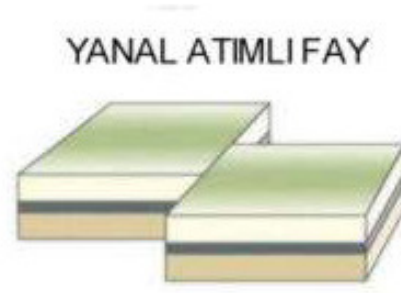
Şekil 4.6 : Graben ve Horst



Şekil 4.7 : Eğim atımlı faylar

#### 4.3.4.2 Yanal Atımlı Faylar

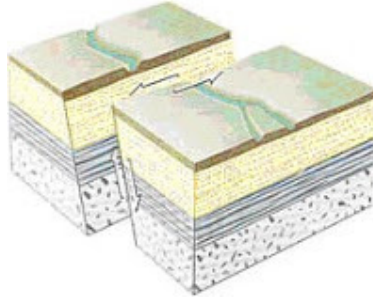
Makaslama kuvvetleri etkisinde oluşan faylanmadır. Blokların fay düzleminin doğrultusu boyunca hareket ettiği fay tipidir. Bloğun hareket yönüne göre sağ yanal atımlı ya da sol yanal atımlı fay olarak isimlendirilir.



**Şekil 4.8 :** Yanal Atımlı Fay

#### 4.3.4.3 Oblik Faylar

Fay düzlemi boyunca hareketin hem düşey hem de yatay yönde olduğu fay türüdür.



**Şekil 4.9 :** Oblik Fay



## 5. YERALTI YAPILARININ TASARIM VE ANALİZ YÖNTEMLERİ

Yeraltı yapılarının depreme karşı gösterdikleri davranışlar incelenip tasarımları gerçekleştirilirken yapı ve zemin etkileşimi kimi zaman ihmal edilirken kimi zaman önem kazanır. Örneğin düşük titreşimlerin beklendiği bölgelerde ya da kaya gibi yüksek rijitlikte olan zeminlerde yapılacak yeraltı yapısı tasarımlarında yapının doğrudan zeminde oluşan deformasyonların şeklini aldığı kabul edilerek yapı-zemin etkileşimi ihmal edilirken, yumuşak zeminlerde yapının zemindeki hareket ve yer değiştirmelere karşı koyduğunun düşünüldüğü durumlarda yapı-zemin etkileşimi incelenir.

Bir diğer adı serbest alan şekil değiştirme metodu olan yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği tasarım şeklinde, zeminin yeraltı yapısından daha rijit olduğu ve yapının zeminde oluşan deformasyonlara hiç karşı koymadığı dolayısıyla serbest alan zemin şekil değiştirmelerinin yani zemin deformasyonlarının yeraltı yapısındaki şekil değiştirmeler ile aynı olduğu kabul edilir. Yapı-zemin etkileşiminin ihmal ile yapılan tasarımda, yapıda beklenen gerilme ve yer değiştirmeler normalde olabileceğinden daha büyük çıkar. Bu nedenle bu metot ile yapılan tasarımda oldukça güvenli tarafta kalmış oluruz.

Newmark (1968) ve Kuesel (1969), serbest alan şekil değiştirme metodu için zeminde oluşan deformasyonların hesabında kullanılabilecek bir yöntem sunmuştur. Buna göre dalga hareketi harmonik, yayıldığı ortam ise homojen, izotropik ve elastik olarak kabul edilir. Ancak yöntemin kullanılabilmesi için dalganın yayılma doğrultusuyla yapı eksenini aynı olmalıdır.

St. John ve Zahrah (1987), Newmark'ın bu yöntemi ile dalga türüne göre oluşabilecek boyuna, enine, kayma ve eğilme deformasyonlarını hesaplamışlardır (Çizelge 4.1).

Yapının zeminden daha rijit olduğu yumuşak zeminlerde yapılan tasarımlarda ise yapı-zemin etkileşimini ihmal etmeyiz. Çünkü yapı zeminden gelecek olan gerilme ve şekil değiştirmelere karşı koyacak durumdadır.

Yapı-zemin etkileşimli basit statik metotta, elastik zemine oturan kiriş modeli kullanılmakta ve buna göre hesap yapılmaktadır. Çözüm dinamik etkileşimlerin yok sayıldığı yarı statik analiz olarak tanımlanabilir. Deprem yükleri altında tünel enkesitinde aksenal kuvvet, iki eksende kesme kuvveti ve iki eksende moment oluşabilmektedir (Youssef Hashash, Jeffrey J. Hook, Birger Schmidt, John Chiang Yao 2001). Bu tip durumlarda da yine serbest alan şekil değiştirme metodu kullanarak güvenli tarafta tasarım yapılabilir, ancak yapı zaten zeminden daha rijit olduğundan aşırı derecede güvenli tarafta kalmış oluruz ve bu sefer tasarım ve inşaa problemleri, hatta gereksiz maliyet artışı meydana gelebilir.

Bir diğer yöntem ise ilk olarak Wang (1993) tarafından dik açılı tünelin flush isimli program ile analiz edilmesiyle ortaya çıkan ve giderek yaygınlaşan yapı-zemin etkileşimli dinamik metottur. Bu metotta zemin ve yapı beraber modellenerek sonlu elemanlar analizi yapılır.

## **6. YERALTI YAPILARININ DEPREM HAREKETLERİNE KARŞI DAVRANIŞLARI**

Yeraltı yapılarının depreme karşı gösterdiği davranışlar yapının boyutları, derinliği, sistemi, kullanılan malzemenin ve bulunduğu zeminin özellikleri, depremin büyüklüğü ve süresi gibi birçok etkene bağlı olarak meydana gelir. Yeraltı yapısının olası deprem esnasında nasıl bir tepki göstereceğini bilebilmemiz için öncelikle etki etmesi beklenen büyüklükteki depremin, yeraltı yapısının bulunduğu zeminde nasıl bir etki oluşturacağını iyi bir şekilde irdelenmesi gerekir. Çünkü deprem hareketleri zeminin cinsine ve özelliklerine göre farklı gerilmeler ve yer değiştirmeler oluşturur. Bunun yanı sıra yapıyı etkileyecek olan sismik yükleri, yapıya aktaran bulunduğu zemin olduğuna göre zemin ve yeraltı yapısının etkileşiminin nasıl olduğunun incelenmesi oldukça önemlidir.

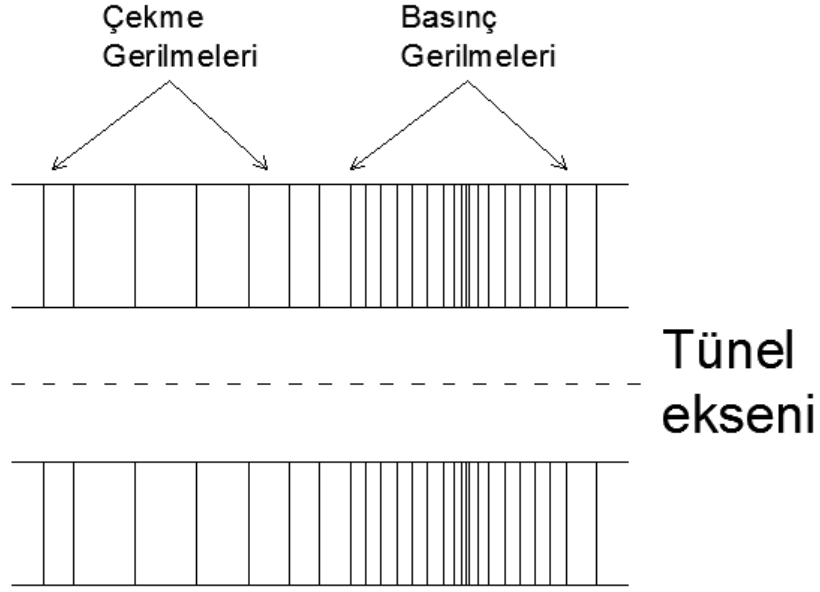
Yeraltı yapılarında, meydana gelen deprem hareketlerinin özelliklerine ve bu hareketlerin yapının eksenine aynı doğrultuda ya da yapı eksenine dik doğrultuda olmasına göre üç farklı türde şekil değiştirme görülür.

Bu şekil değiştirmeleri;

- Eksenel esneme ve sıkışma
- Boyuna eğilme (bükülme)
- Ovalleşme (kırılma)

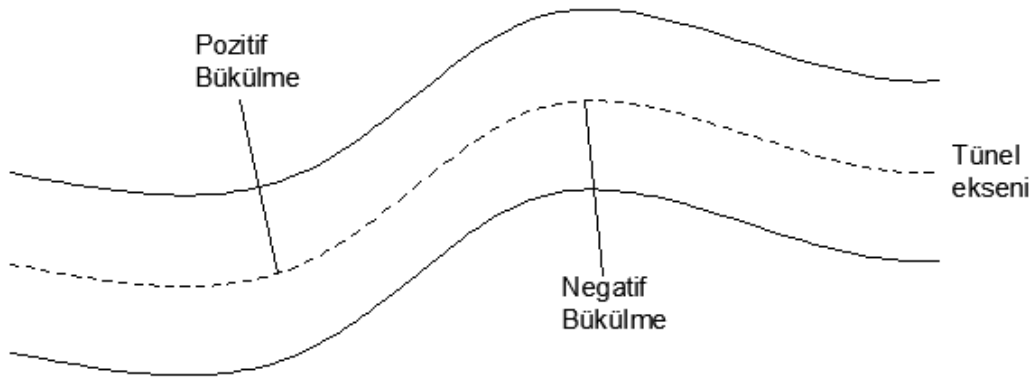
olarak sıralayabiliriz (Owen ve Scholl, 1981).

Yeraltı yapılarındaki eksenel deformasyonlar, deprem dalgalarının yapı eksenine paralel doğrultuda ürettiği hareketler sonucu oluşan gerilmeler ile oluşur (Şekil 6.1).



**Şekil 6.1 :** Tünel ekseni boyunca çekme ve basınç gerilmeleri

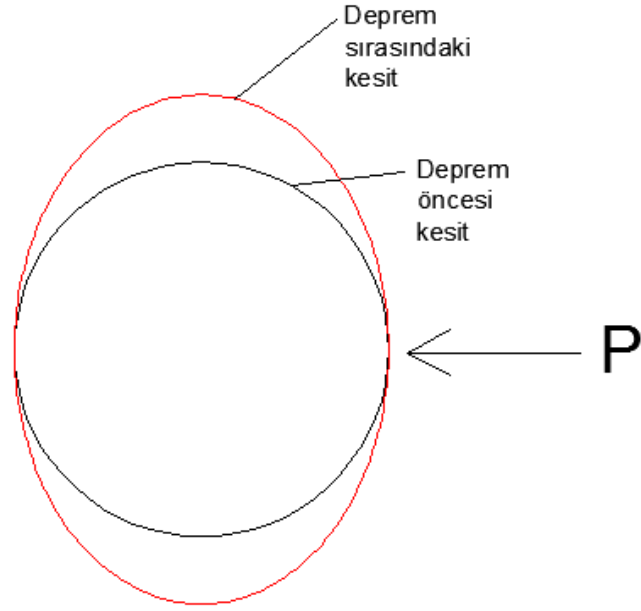
Boyuna eğilme deformasyonları ise deprem dalgalarının yeraltı yapı eksenine dik doğrultuda tekil hareketleri sonucu oluşur (Şekil 6.2).



**Şekil 6.2 :** Boyuna eğilme (bükülme) deformasyonları

Eksenel ve boyuna eğilme deformasyonlarına hazırlıklı yapı kaplaması tasarımları, genellikle yapı boyunca uzanan eksen yönüne yoğunlaşır (Wang, 1993).

Bir diğer deformasyon tipi olan ovalleşmede ise, enine (kesme) dalgalar yeraltı yapı eksenine dik ya da dike yakın doğrultuda yayılır ve yapı enkesitinde deformasyonlara yol açar (Şekil 6.3).



**Şekil 6.3 :** Ovalleşme (kırılma) deformasyonları

#### **6.1 Yakın Tarihli Depremlerde Yeraltı Yapılarında Gözlemlenen Sonuçlar**

Geçmişte meydana gelen bazı büyük depremlerin önemli şehirlerdeki yeraltı yapılarına verdiği hasarlar ve bu yapıların deprem performansları gözlemlenmiştir. Bunlardan birkaçını sıralarsak;

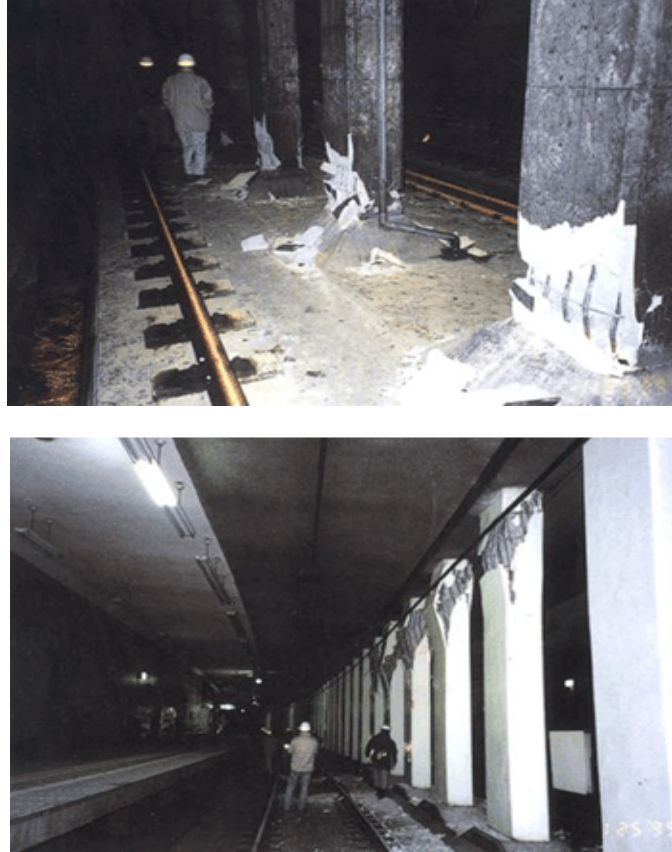
1952 Kern County depreminde, fay üzerinde bulunan Kern County tüneli fay boyunca yatay yer değiştirmelere maruz kalmış ve oldukça büyük hasarlar almıştır. Moment büyüklüğü 7.5 olan depremin yatay kuvvetleri tünel raylarının hareket etmesine ve bükülmelerine neden olmuştur (Şekil 6.4) (Kontogianni ve Stiros 2003).



**Şekil 6.4 :** Tünel raylarındaki bozulmalar

1989 Loma Prieta depremi 6.9 moment büyüklüğüne sahiptir. Deprem sırasında California bölgesinde bulunan, Oakland ve Alameda adasını birbirine bağlayan Alameda tüp geçitlerinde hasar meydana gelmiştir. Bir çift batırma tüp tünelden oluşan bu yeraltı yapısında, yapısal çatlaklar sonucu tünel içine yoğun miktarda su sızıntısı gözlemlenmiştir. Ayrıca bazı kısımlarda sıvılaşmaya bağlı deformasyonlar da oluşmuştur (Hashash, 2001).

1995 Japonya Hyogoken-Nambu depreminin moment büyüklüğü 6.8 olarak kayıtlara geçmiştir. Deprem Rokko, Bantaki ve Naruo-Mikage tünellerinde ağır hasara sebep olurken Kobe şehrindeki Daikai metro istasyonu göçmüştür (Nakamura, 1996). Depremde önce istasyonun merkez kolonları, akabinde tavan kaplamaları çökmüştür. Zemin kaplamasında ise 2.5 metreden fazla çökme olmuştur (Şekil 6.5) (Hashash, 2001).



**Şekil 6.5 :** Daikai metro istasyonunda kolon hasarları

1999 Chi Chi depreminin ölçülen moment büyüklüğü 7.3 tür. Orta Tayvan'da bulunan tünellerin çoğu kısıtlı çatlaklar haricinde depremi hasarsız atlattır. En

büyük hasar, eğim hatalarından kaynaklanan toprak kaymaları sonucu tünel giriş-çıkışlarındaki tıkanmalardır (Hashash, 2001).

1999 yılında ülkemizde meydana gelen Kocaeli depreminde, Bolu tünellerinde çeşitli bozulmalar oluşmuştur. Moment büyüklüğü 7.5 olan depremde Asarsuyu tünelinin tabanında 1 metreye varan kabarmaların yanı sıra püskürtme betonda dökülme, basınç kırılmaları, 0.5-5.0 cm arası değişen boyuna çekme çatlakları ve kesme çatlakları gibi orta dereceli ciddi hasarlar gözlemlenmiştir (O'Rourke, 2001).



## 7. DEPREM DOĞRULTUSU, BUNA BAĞLI DEFORMASYONLAR VE ÇÖZÜMLERİ

Bu bölümde 5 ve 6 numaralı başlıklarda genel olarak bahsettiğimiz analiz ve deformasyon türlerini depremin, yeraltı yapısına geliş doğrultusuna göre daha ayrıntılı bir şekilde inceleyeceğiz.

### 7.1 Yapı Eksenine Paralel Deprem Hareketleri

Meydana gelen depremin dalga boyunun, etki edeceği yeraltı yapısının boyutlarından daha küçük olduğu durumlarda yapının eksenine doğrultusunda gerilmeler ve buna bağlı yer değiştirmeler oluşur. Bu durum genellikle tünellerde söz konusu olur. Bahsettiğimiz eksen ile aynı doğrultulu dalgalar, yapıda eksenel yer değiştirmeler ve boyuna bükülmeler oluşturarak hasarlara yol açabilir. Bu yüzden bir tünel tasarımında tünel eksenine boyunca yayılan deprem dalgalarının etkisi incelenmeli ve yapı bu dalgaların getirdiği gerilme ve yer değiştirmelere karşı dayanıklı olacak şekilde tasarlanmalıdır. Tünel ekseninde gözlemlediğimiz serbest alan zemin şekil değiştirmeleri depremin tünelde meydana getireceği şekil değiştirmelerdir. Tünelin eksenine paralel olan dalgalar basınç ve çekme gerilmeleri ile eksenel yer değiştirmeler oluştururken, yine aynı dalgaların eksene dik parçacık hareketler üretmesi sonucu boyuna bükülme deformasyonlarıyla karşılaşılır. Bu durumda tüneli eksenel ve boyuna şekil değiştirmeler altındaki elastik bir karışmış gibi inceleyebiliriz.

#### 7.1.1 Eksenel Yer Değiştirme

Deprem dalgasının meydana getirdiği eksenel yer değiştirmelerin bulunabilmesi için genliği  $D$  ve boyu  $L$  olan, tünel eksenine ile  $\emptyset$  açısı yapan bir dalganın geometrisini inceleyebiliriz (Şekil 7.1).  $U_x$  ve  $U_y$  ise tünel ekseninde oluşacak yer değiştirmelerin, sırasıyla yatay ve düşey bileşenleri olsun. Buna göre;

$$\bullet \quad U_x(x) = D \cdot \sin \emptyset \cdot \sin[(2\pi x \cdot \cos \emptyset)/L] \quad (7.1)$$

- $U_y(x) = D \cdot \cos\emptyset \cdot \sin[(2\pi x \cdot \cos\emptyset)/L]$  (7.2)

olarak bulunur (French Association for Seismic Engineering, 2001).

Deprem dalgasının etki ettiği tüneli elastik sürekli kiriş modellemesine benzetirsek, yapının dinamik davranışı sonucu,  $U_x$  yer değiştirmesinin tünel kesitinde meydana getireceği birim uzama  $\xi(x)$  olur ve

- $\xi(x) = dU_x/dx = (2\pi D \cdot \sin\emptyset \cdot \cos\emptyset \cdot \cos[(2\pi x \cdot \cos\emptyset)/L])/L$  (7.3)

şeklinde hesaplanır (French Association for Seismic Engineering, 2001).

Ayrıca tünel eksenindeki parçacık hızına  $V$ , dalga frekansına  $f$  dersek;

- $V = 2\pi f D$  (7.4)

şeklinde bir denklem yazılır.

Dalga boyu ( $L$ ) ise periyot ( $T$ ) ve dalga hızının ( $C$ ) çarpımına eşittir.

- $L = C \cdot T$  (7.5)

Buna göre birim uzamanın denklemini yeniden düzenlersek

- $\xi(x) = (V/C) \cdot (\sin\emptyset \cdot \cos\emptyset \cdot \cos[(2\pi x \cdot \cos\emptyset)/L])$  (7.6)

olarak yazılır.

Dalga genliğinin ( $D$ ) bulunması için ise zeminin doğal titreşim periyodu gereklidir. Çünkü dalga genliğine, zemin titreşim periyodunun zemin hareket spektrumunda kullanılması ile ulaşılabilir. ( $H$ ) kalınlığında bir zemin ve ( $C_s$ ) hızına sahip bir kayma dalgası için zemin titreşim periyodu;

- $T = 4 \cdot H / C_s$  (7.7)

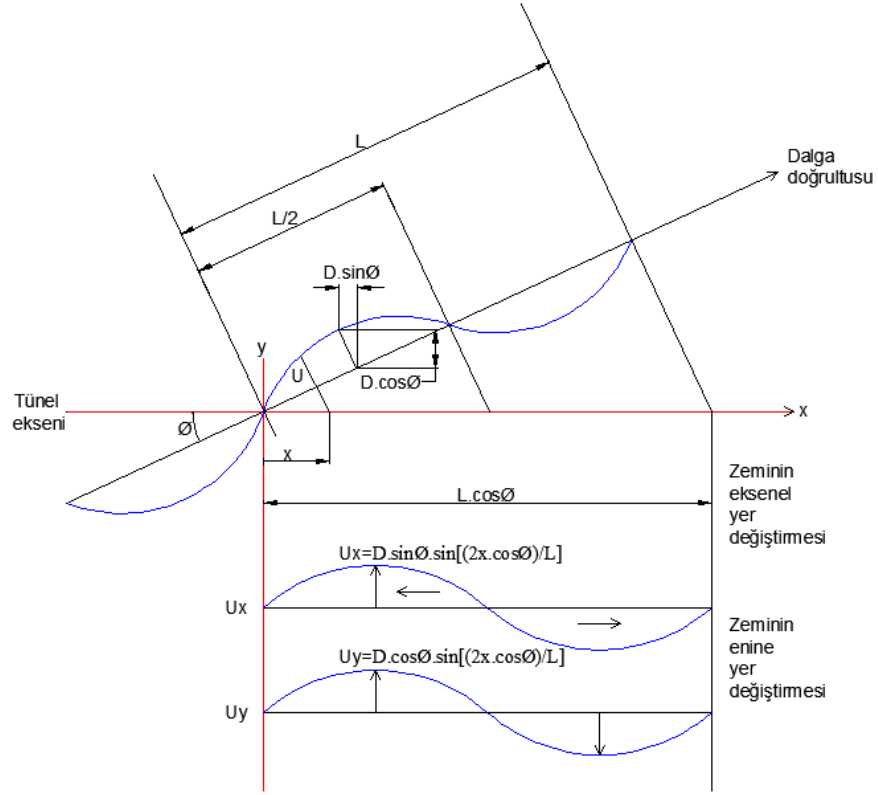
olarak bulunur.

Bu durumda a parçacık ivmesi olmak üzere P, S ve Rayleigh dalgası için eksenel yer değiştirmeler şu şekildedir;

- $\xi_p = [(V_p/C_p) \cos^2\emptyset] + [r(a_p/C_p^2) \sin\emptyset \cdot \cos^2\emptyset]$  (7.8)

- $\xi_s = [(V_s/C_s) \sin\emptyset \cdot \cos\emptyset] + [r(a_s/C_s^2) \cos^3\emptyset]$  (7.9)

- $\xi_R = [(V_R/C_R) \cos^2\emptyset] + [r(a_R/C_R^2) \sin\emptyset \cdot \cos^2\emptyset]$  (7.10)



**Şekil 7.1 :** Tünel eksenini  $\emptyset$  açısı ile kesen deprem dalgası

### 7.1.2 Boyuna Eğilme (Bükülme)

Dalgaların tünel eksenine dik parçacık hareketleri üretmesiyle tünel ekseninde oluşan yer değiştirmeler boyuna eğilmeleri meydana getirir. Oluşan bu yer değiştirmeye  $U_y$  ve tünel eksenindeki birim boyuna eğilmeye  $(1/r)(x)$  denilirse aradaki bağıntı aşağıdaki gibi olur (French Association for Seismic Engineering, 2001).

$$\bullet \quad (1/r)(x) = -(d^2 u_y / dx^2) = (4\pi^2 \cdot D \cdot \cos^3 \emptyset \cdot \sin[(2\pi x \cdot \cos \emptyset) / L]) / L \quad (7.11)$$

Parçacık ivmesi ( $a$ ), dalga genliği ( $D$ ) ve frekans ( $f$ ) ile oluşturulan formül;

$$\bullet \quad a = 4\pi^2 \cdot f^2 \cdot D^2 \quad (7.12)$$

ise iki formülü birleştirdiğimiz takdirde

$$\bullet \quad (1/r)(x) = (a \cdot \cos^3 \emptyset \cdot \sin[(2\pi x \cdot \cos \emptyset) / L]) / C^2 \quad (7.13)$$

sonucu elde edilir.

Deprem dalgalarının zeminde oluşturduğu şekil değiştirmeler yeraltı yapısının kesitinde normal kuvvet ( $N$ ), kesme kuvveti ( $V$ ) ve eğilme momenti ( $M$ ) meydana

getirir. Dalganın tünel eksenine yaptığı açıya ( $\emptyset$ ) bağlı olarak bu kuvvet ve momentler değişik değerler alırlar. Örneğin deprem dalgası tünel eksenine 45 derecelik bir açı yaptığında normal kuvvet en büyük değerini alırken 0 derecelik açıda, yani paralellik durumunda kesme kuvveti ve eğilme momenti maksimum değerine ulaşır.

### 7.1.3 Yapı-Zemin Etkileşiminin İhmal Edildiği Çözüm

Daha önce bahsettiğimiz gibi bu çözüm sisteminde yapının, zeminde oluşan serbest alan şekil değiştirmelerini yaptığı kabul edilir ve yeraltı yapısındaki iç kuvvetler yapının elastik sürekli bir kirişmiş gibi davrandığı düşünülerek elde edilir. Deprem dalgalarının yapıda oluşturduğu iç kuvvetler normal kuvvet (N), kesme kuvveti (V) ve eğilme momenti (M) dir.

Yapı kesitinin alanına A, atalet momentine I, elastisite modülüne E ve deprem dalgasının yeraltı yapısının eksenine ile yaptığı açıya  $\emptyset$  denilirse iç kuvvetler şu şekilde hesaplanır (French Association for Seismic Engineering, 2001);

- $N = (2\pi.E.A.D.\sin\emptyset.\cos\emptyset)/L$  (7.14)

$\emptyset = 45$  iken N maksimum değerini alır.

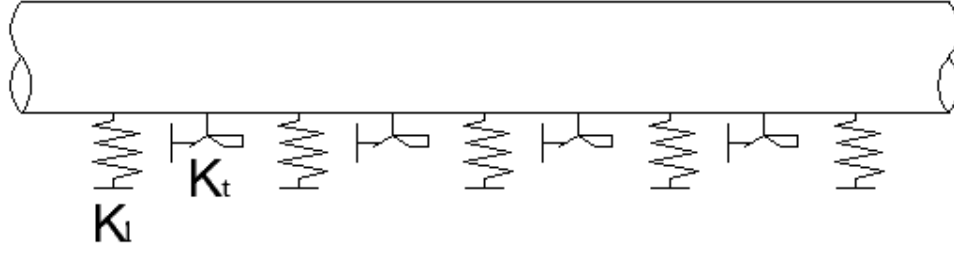
- $M = (4\pi^2.E.I.D.\cos^3\emptyset)/L^2$  (7.15)

$\emptyset = 0$  iken M ve V maksimum değerini alır.

- $V = (2\pi.\cos\emptyset.M)/L$  (7.16)

### 7.1.4 Yapı-Zemin Etkileşimli Çözüm

Bu metotta yapı ve zemin arasında bir etkileşim olduğu kabul edilir ve bu etkileşim zeminin boyuna ( $K_l$ ) ve enine ( $K_t$ ) rijitlik katsayıları ile tanımlanır.  $K_l$  ve  $K_t$  birim tünel uzunluğundaki zeminin sırası ile boyuna ve enine birim yer değiştirme yapması için gerekli kuvvetlerdir. Tünele etkiyen yüklerin belirlenmesi için serbest alan zemin şekil değiştirmeleri rijitlik katsayıları  $K_l$  ve  $K_t$  olan elastik mesnetlere oturan sürekli bir kirişe uygulanır (Şekil 7.2) (Cüceoğlu, 2006).



**Şekil 7.2 :** Elastik mesnetlere oturan sürekli kiriş

Deprem dalgasının yeraltı yapı eksenini kestiği  $\emptyset$  açısına göre maksimum eksenel ve boyuna eğilme şekil değiştirmeleri bulunur.  $\emptyset=45$  derecede eksenel yer değiştirme maksimum seviyeye ulaşırken ( $\epsilon^a_{maks}$ ),  $\emptyset=0$  derecede maksimum boyuna eğilme deformasyonu ( $\epsilon^b_{maks}$ ) elde edilir (Hashash ve diğ., 2001).

$$\bullet \quad \epsilon^a_{maks} = [2\pi.D/L]/[2+(E.A/K_l).(2\pi/L)^2] \quad (7.17)$$

$$\bullet \quad \epsilon^b_{maks} = [(\{2\pi/L\}^2.D)/(1+\{E.I/K_t\}.\{2\pi/L\}^4)].r \quad (7.18)$$

Yapı zemin etkileşimli çözümde deprem dalgalarının yapı kesitinde meydana getirdiği maksimum iç kuvvetler ise;

$$\bullet \quad N_{maks}=[\pi.E.A.D/L].K_l/[(\{E.A/2\}.\{2\pi/L\}^2)+K_l] \quad (7.19)$$

$$\bullet \quad M_{maks}=[(2\pi/L)^2.E.I.D].[K_t/(E.I.\{2\pi/L\}^4+K_t)] \quad (7.20)$$

$$\bullet \quad V_{maks}=2\pi.M_{maks}/L \quad (7.21)$$

olarak hesaplanır (French Association for Seismic Engineering, 2001).

Yapı zemin etkileşimli statik analizde yeraltı yapısındaki birim şekil değiştirmeleri ve iç kuvvetleri hesaplamamız için gereken söz konusu rijitlik katsayılarının bulunması için farklı kişilerden farklı formüller ortaya konulmuştur. Bu formülleri tarihsel olarak sıralayacak olursak;

$$\bullet \quad K = [8.G_g.(1-\mu_g)]/[10.H.(1-2.\mu_g)] \quad (7.22)$$

(Scott, 1973)

$$\bullet \quad K = [16.\pi.G_g.(1-\mu_g).d]/[(3-4.\mu_g).L] \quad (7.23)$$

(St. John ve Zahrah, 1987)

$$\bullet \quad K = [1,086.\pi^2.G_g]/[4.H.\sqrt{(1-\mu_g)}. (2 - \mu_g)] \quad (7.24)$$

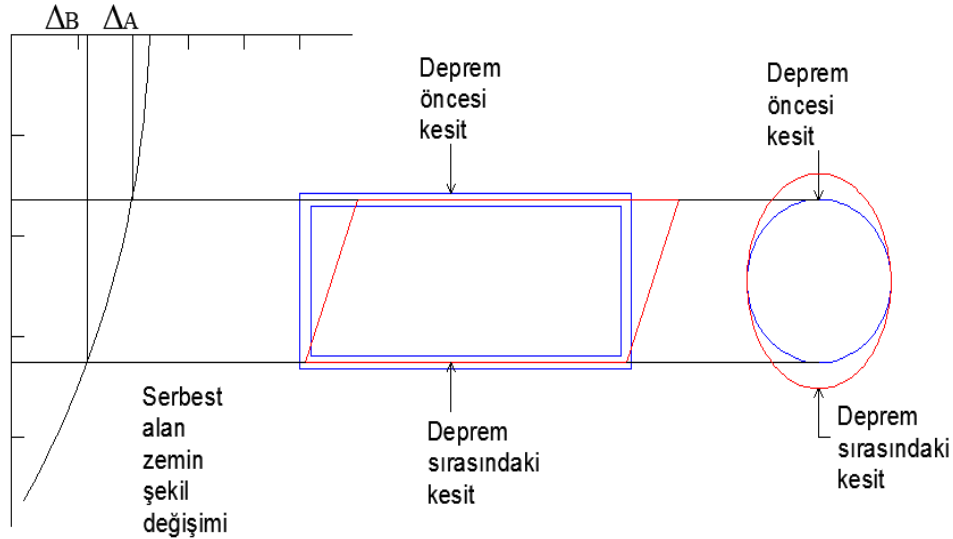
(Veletsos, 1994)

Bu formüllerde geçen  $G_g$  zemin kayma modülü,  $\mu_g$  poisson oranı,  $d$  tünel çapı,  $H$  üst tabaka kalınlığı,  $L$  ise dalga boyunu temsil etmektedir. Formülleri inceleyecek olursak birbirine yakın sonuçlar veren benzer formüller olduğunu görmekteyiz. Ancak Velesztos ve Scott'ın aksine St.John ve Zahrah'ın denkleminde rijitlik katsayısının tünel çapı ve dalga boyuyla da ilişkilendirildiğini görüyoruz.

Bu yöntemlerin haricinde rijitlik katsayılarının belirlenmesi için bir de Japon yöntemi bulunmaktadır. Japon yöntemine göre yapının içinde bulunduğu zeminin yatay ve düşey virtüel birim yer değiştirmelerine verdiği yatay ve düşey tepkiler, zeminin rijitlik katsayılarını verir ve bu şekilde hem yatay hem de düşey rijitlik katsayıları elde edilir.

## 7.2 Yapı Eksenine Dik Deprem Hareketleri

Depremde yapı eksenine dik doğrultuda gelen kayma dalgaları, eksene dik şekil değiştirmeler oluştururlar. Yeraltı yapı eksenine dik oluşan bu şekil değiştirmeler yapının kesitine göre, ovalleşme ya da eğilmeye neden olur (Şekil 7.3). Yeraltı yapımızın kesiti dairesel ise ovalleşme, dikdörtgen ise eğilme görülür. Oluşan bu yer değiştirmeleri ve kuvvetleri hesaplamak için öncelikle kayma dalgalarının zeminde meydana getirdiği serbest alan zemin şekil değiştirmeleri incelenmelidir.



**Şekil 7.3 :** Eksene dik deprem hareketinde eğilme ve ovalleşme

### 7.2.1 Dairesel Yapıda Ovalleşme

Dairesel kesite sahip bir tünelde, yapının eksenine dik doğrultuda gelen kayma dalgaları oluşturduğu gerilmeler ile yapı kesitinde ovalleşme dediğimiz bozulmaya yol açar. Ovalleşme şekil değiştirmelerinin büyüklüğü, dairese kesitli yeraltı yapısının kesit çapı ve kayma dalgasının boyu ile ilişkilidir. Deprem kaynağına yaklaştıkça yapı üzerine etkiyecek olan sismik kuvvetlerin arttığını ve dalga boyunun kısaldığını bildiğimize göre kısa dalga boyunun ovalleşmeyi arttırdığını söyleyebiliriz. Kesit çapı ve dalga boyu oranı küçüldükçe daha küçük gerilmelerin ortaya çıktığı öne sürülmüştür (St. John ve Zahrah, 1987).

#### 7.2.1.1 Yapı-Zemin Etkileşiminin İhmal Edildiği Çözüm

Daha önce de belirttiğimiz gibi yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği durumlarda yapının zeminde oluşan serbest alan zemin şekil değiştirmelerini aynen aldığı kabul edilir. Bu durumda dairese kesitli yeraltı yapısında ovalleşme şekil değiştirmesini, zeminin serbest alan kayma birim şekil değiştirmesi olarak tanımlayabiliriz (Hashash ve diğ., 2001).

#### 7.2.1.2 Yapı-Zemin Etkileşimli Çözüm

Yeraltı yapısının, deprem sonucu oluşan zemin şekil değiştirmelerine nasıl tepki göstereceği yapı-zemin etkileşiminin nasıl olduğuyula alakalıdır. Yapı, zemin şekil değiştirmelerine karşı koymaya çalıştığında karşımıza uzama ve esneme rijitliği olarak iki tanım çıkar. Uzama rijitliği ya da bir başka deyişle sıkışabilme oranını (C), deprem sırasında yapının enkesitinde şekil değiştirme olmadan sadece birim boy değişimi yapması için gereken kuvvet olarak tanımlayabiliriz. Esneklik rijitliği ise yapının birim eğilme şekil değiştirmesi yapması için gerekli kuvvettir. Zemin ve yapının esneklik rijitliklerinin oranına ise esneklik oranı (F) denir (Metro Rail Transit Consultants, 1984).

$$C = [E_g \cdot (1 - \mu_s^2) \cdot r] / [E_s \cdot t \cdot (1 + \mu_g) \cdot (1 - 2\mu_g)] \quad (7.25)$$

$$F = [E_g \cdot (1 - \mu_s^2) \cdot r^3] / [6 \cdot E_s \cdot I \cdot (1 + \mu_g)] \quad (7.26)$$

Yapılan çalışmalarda esneklik oranı (F)'nin 20 den büyük olduğu durumlarda yapının yüksek esneklik göstererek zemin şekil değiştirmelerine uyduğu ortaya konulmuştur (Metro Rail Transit Consultants, 1984). Ayrıca yapının zeminle aynı

rijitlikte ya da zeminin rijitliğinin yapıya göre daha büyük olduğu durumlarda yine yapıda meydana gelecek şekil değiştirmelerin zemin şekil değiştirmeleri ile aynı olduğu kabul edilir. Ancak yapının zeminden daha rijit olması halinde yapıda oluşan şekil değiştirmeler, zemin şekil değiştirmelerine göre daha küçüktür. Bu durumda tasarım yaparken zemin şekil değiştirmelerini esas alıp yapımızı bu şekil değiştirmeleri oluşturan kuvvetlere ve gerilmelere karşı koyabilecek güçte tasarlırsak her zaman güvenli tarafta kalacağımızı söyleyebiliriz.

Fakat yapının zeminden daha rijit olduğu durumda tasarımı zemin şekil değiştirmelerine göre yaparsak aşırı derecede güvenli tarafta kalmış olur ve yapının inşasında güçlükler yaşayabiliriz. Bu nedenle bu tip tasarımlarda esneklik oranı ve rijitlik katsayıları göz önüne alınarak düzenlemeler yapılmalı ve şekil değiştirmeler azaltılmalıdır.

Dairesel kesitli elastik yapı bir tünelin, homojen ve elastik kabul edilen sonsuz bir zemin içinde ve yapı ile zeminin ara yüzeyinde sürtünmenin olmadığı varsayılarak tam kayma durumunda olması halinde maksimum serbest alan kayma birim şekil değiştirmesi ( $\delta_{maks}$ ),

$$\bullet \Delta d/d = \mp(1/3).K_{\alpha}.F.\delta_{maks} \quad (7.27)$$

formülü ile hesaplanır (Cüceoğlu, 2006).

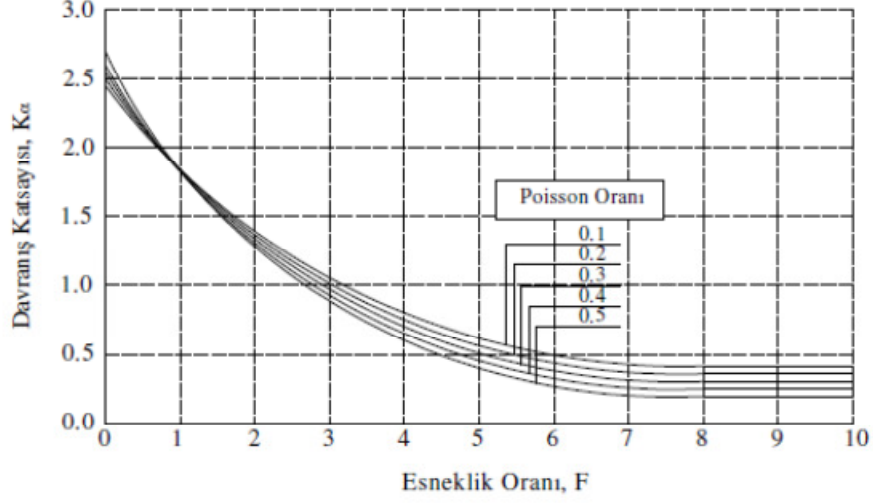
Bununla beraber eksene dik deprem hareketleri sonucu oluşan maksimum kesme ( $V_{maks}$ ), maksimum moment ( $M_{maks}$ ) ve tam kayma durumunda yeraltı yapısının davranış katsayısı ( $K_{\alpha}$ ) denklemleri aşağıdaki gibidir (Cüceoğlu, 2006).

$$\bullet V_{maks} = \mp(1/6).K_{\alpha}.(E/(1+\mu)).r.\delta_{maks} \quad (7.28)$$

$$\bullet M_{maks} = \mp(1/6).K_{\alpha}.(E/(1+\mu)).r^2.\delta_{maks} \quad (7.29)$$

$$\bullet K_{\alpha} = [12(1-\mu_g)]/[12F+5-6\mu_g] \quad (7.30)$$

Deprem sırasında yapı ile zeminin ara yüzeyinde tam kayma durumu yumuşak zeminlerdeki yapılarda ya da çok büyük depremlerde söz konusu olur (French Association for Seismic engineering, 2001). Genellikle yapı ile zemin ara yüzeyi kayma ve yapışma durumlarının arasında kalır. Bu yüzden her iki durumun incelenmesi ve kritik olan duruma göre tasarım yapılması gerekir (Cüceoğlu, 2006).



**Şekil 7.4 :**  $K_\alpha$  ve  $F$  arasındaki ilişkiyi gösteren tablo (Hashash ve diğ., 2001)

Yapı ile zemin ara yüzünde kaymasız durumdaki davranış katsayısı ( $K_\beta$ ),

$$K_\beta = 1 + \frac{(F\{1-2\mu_g\}\{1-C\} - \{1/2\}\{1-2\mu_g\}^2 + 2)}{(F\{3-2\mu_g\} + F\{1-2\mu_g\}C + C\{2,5-8\mu_g+6\mu_g^2\} + 6-8\mu_g)}$$
(7.31)

şeklinde bulunur (French Association for Seismic engineering, 2001).

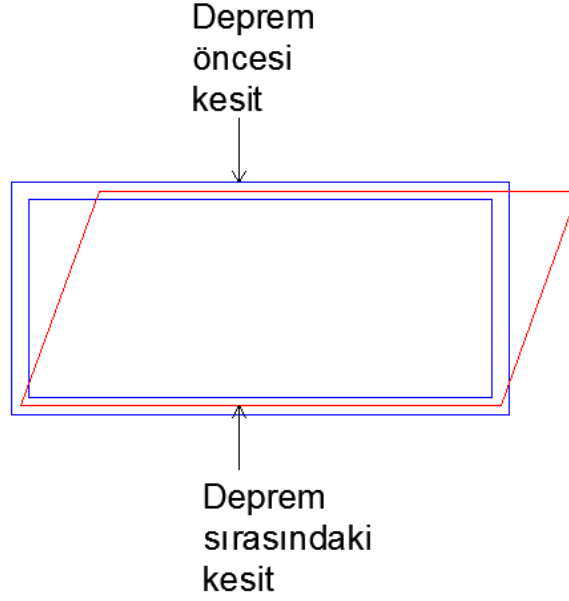
Bu durumda  $V_{maks}$ ,

$$V_{maks} = (\mp K_\beta \cdot E_g \cdot r \cdot \delta_{maks}) / (2 + 2\mu_g)$$
(7.32)

denklemini ile hesaplanır (Schwartz ve Einstein, 1980).

### 7.2.2 Dikdörtgen Kesitte Eğilme

Dikdörtgen kesite sahip bir yeraltı yapısında, yapının eksenine dik doğrultuda gelen deprem dalgalarının meydana getirdiği şekil değiştirmeler eğilme deformasyonlarını oluşturur (Şekil 7.5).



**Şekil 7.5 :** Dikdörtgen kesitli yeraltı yapısında eğilme deformasyonu

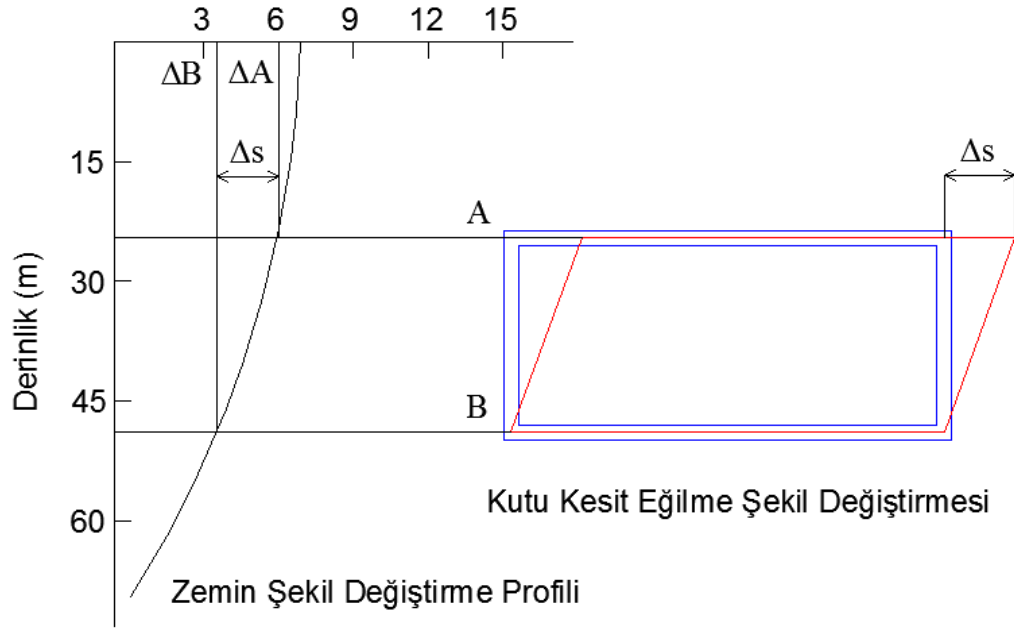
Daha önceki sistemlerde olduğu gibi dikdörtgen kesite sahip yeraltı yapımız ve eğilme deformasyonu için, yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği ve edilmediği durumlara göre mevcut çözümler bulunmaktadır.

#### 7.2.2.1 Yapı-Zemin Etkileşiminin İhmal Edildiği Çözüm

Kayma etkisi altındaki dikdörtgen kesitte eğilme deformasyonları görülürken, yapıdan daha rijit ya da yapı ile aynı rijitliğe sahip zeminlerin bulunduğu durumlarda bu deformasyonlar serbest alan zemin şekil değiştirmelerine eşittir.

Bu durumda kesitin üst (A) ve alt (B) noktalarındaki serbest alan kayma birim şekil değiştirmeleri hesap edilip iki yer değiştirmenin farkı alınırsa kesitte meydana gelen yer değiştirme ( $\Delta_S$ ) bulunur (Şekil 7.6).

- $\Delta_S = \Delta_A - \Delta_B$  (7.33)



**Şekil 7.6 :** Dikdörtgen kesitli yeraltı yapısında A ve B noktalarındaki yer değiştirmelerin farkından yapıdaki birim yer değiştirmenin bulunması

#### 7.2.2.2 Yapı-Zemin Etkileşimli Çözüm

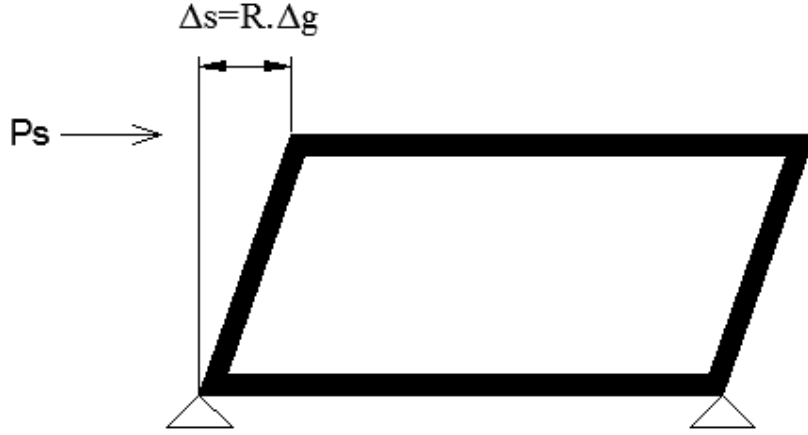
Yapının bulunduğu zeminden daha rijit olduğu ve serbest alan zemin şekil değiştirmelerine karşı koyduğu durumlar için yapı-zemin etkileşimli çözüm önerilir. Bu tip bir çözüm için de zemin ve yapının rijitliklerinin ayrı ayrı hesap edilerek düzenlemeler bu oranlara göre yapılmalıdır.

Dikdörtgen kesitli yeraltı yapımız için birim kayma şekil değiştirmesini ( $\delta_s$ ) şu denklem ile ifade edebiliriz;

$$\bullet \quad \delta_s = \Delta/h = \tau/G_g \quad (7.34)$$

Ayrıca yapı birim kayma şekil değiştirmesi ( $\delta_s$ ) ve zemin birim kayma şekil değiştirmesi ( $\delta_g$ ) oranı (R), aynı zamanda yapı yer değiştirmesi ( $\Delta_s$ ) ve zemin yer değiştirmesi ( $\Delta_g$ ) oranına eşittir.

$$\bullet \quad R = \delta_s/\delta_g = \Delta_s/\Delta_g \quad (7.35)$$



**Şekil 7.7 : Dikdörtgen kesitli yeraltı yapısında yapı-zemin etkileşimli çözüm**

### 7.2.2.3 Basitleştirilmiş Çerçeve Analizi

Deprem hareketleri sonucu yeraltı yapısının enkesitine etkileyen zemin şekil değiştirmeleri genelde kayma şekil değiştirmeleridir. Basitleştirilmiş çerçeve analizinde yapıda meydana gelen kayma şekil değiştirmeleri esas alınarak çözüm gerçekleştirilir ve bir performans elde edilir. Zeminde oluşup yapıya aktarılan bu kayma şekil değiştirmeleri yapı ve zeminin kayma rijitliklerinin birbirleriyle oranı doğrultusunda etkili olur. Yapı ve zeminin kayma rijitliklerinin oranını belirlemek için yapı kayma modülü ( $G_s$ ) ve zemin kayma modülü ( $G_g$ ) bilinmelidir. Yapı kayma modülünün hesaplanmasında üst noktaya etki eden birim yanal kuvvet ( $P_s$ ), bu kuvvetin üst kısımda oluşturduğu birim yanal yer değiştirme ( $\Delta_s$ ), yapı kesitinin yüksekliği ( $h$ ) ve genişliği ( $b$ ) kullanılır.

- $G_s = (P_s/b) \cdot (\Delta_s/h)$  (7.36)

Zemin kayma modülü ise zeminin birim hacim ağırlığı ( $\rho_g$ ), kayma dalgasının hızı ( $C_s$ ) ve yer çekimi ivmesinin ( $g$ ) kullanıldığı bir formül ile elde edilebilir.

- $G_g = \rho_g \cdot C_s^2 / g$  (7.37)

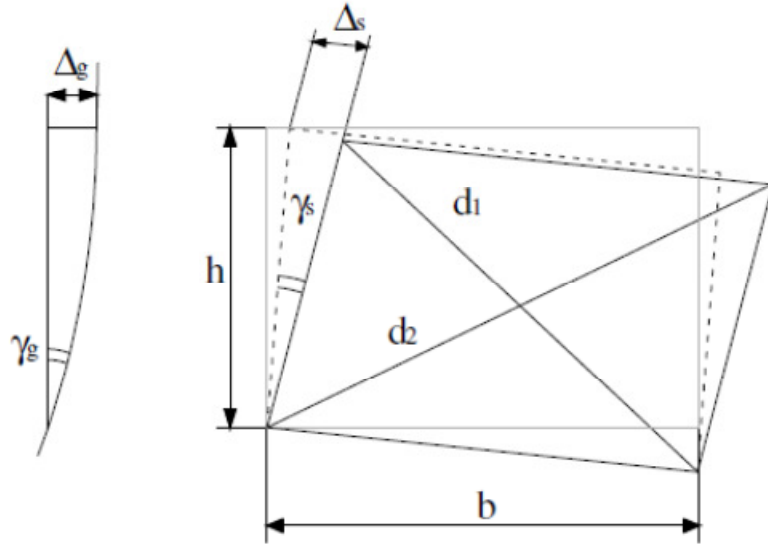
Yapı kesitinin üst döşeme seviyesindeki zeminde meydana gelen birim yer değiştirme ( $\Delta_g$ ), zeminin birim kayma şekil değiştirmesinin ( $\delta_g$ ) kesitin yüksekliği ( $h$ ) ile çarpılmasıyla bulunur.

- $\Delta_g = \delta_g \cdot h$  (7.38)

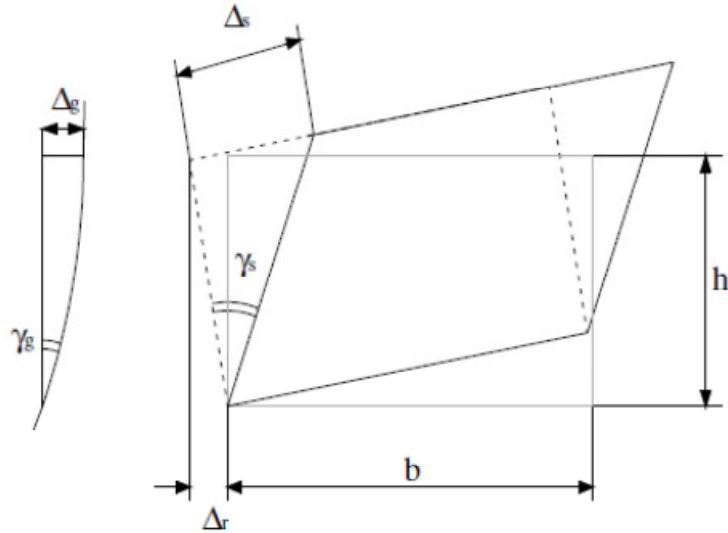
Yapıda üst döşeme seviyesinde meydana gelen yer değiştirme ise  $d_1$  ve  $d_2$  yapı kesitinin kısa ve uzun köşegenleri olmak üzere şu formül ile hesaplanır.

- $\Delta_s = \delta_s \cdot h = (d_2^2 - d_1^2) / 4b$  (7.39)

Yapı rijitliğinin zemin rijitliğinden büyük olması durumunda tüm yapıda dönme meydana gelir (Şekil 7.8). Yapı rijitliğinin zemin rijitliğinden küçük olması durumunda ise büyük şekil değiştirmeler ve bunun sonucunda temelde saat yönünün tersine dönme oluşabilir (Şekil 7.9) (Nishioka ve Unjoh).



Şekil 7.8 :  $G_s > G_g$  durumu

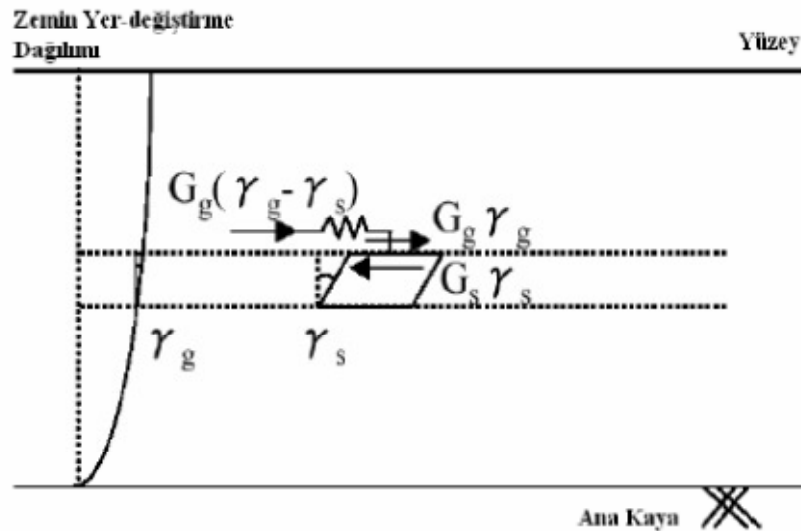


Şekil 7.9 :  $G_s < G_g$  durumu

Yapıda sadece kayma şekil değiştirmesi olduğu durumda tek eksenli kayma gerilmesi eşitliği ortaya çıkar (Şekil 7.10) (Cüceoğlu, 2006).

$$\bullet \quad G_s \cdot \delta_s = G_g \cdot (\delta_g - \delta_s) + G_g \cdot \delta_g \quad (7.40)$$

$$\bullet \quad \delta_s / \delta_g = 2(G_g/G_s)/(1+\{G_g/G_s\}) \quad (7.41)$$



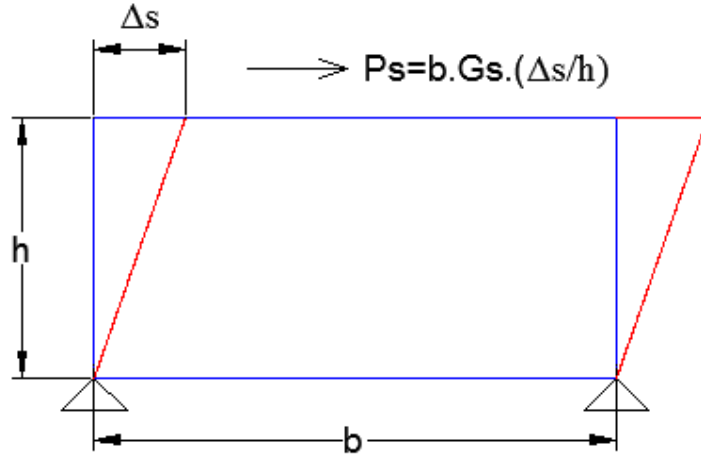
**Şekil 7.10 : Kayma gerilmesi eşitliği**

Zeminin birim kayma şekil değiştirme ( $\delta_g$ ) ve kayma modülü ( $G_g$ ) serbest alan zemin şekil değiştirme yöntemi ile belirlenip 7.38’de yerine konulunca yapının birim kayma şekil değiştirme ( $\delta_s$ ) ve kayma modülü ( $G_s$ ) arasındaki bağıntı bulunur.

Basit mesnetler üzerine oturan dikdörtgen bir çerçeve tasarlanıp, çerçevenin üst döşemesine birim yer değiştirme ( $\Delta_s$ ) yaptıracak olan birim yanıl kuvvet ( $P_s$ ) uygulanarak statik bir çözüm yapılırsa  $G_s$  değeri elde edilir ve bu değer ile sırasıyla  $\delta_s$  ve  $\Delta_s$  bulunabilir (Şekil 7.11).

$$\bullet \quad P_s = b.G_s.(\Delta_s/h) \quad (7.42)$$

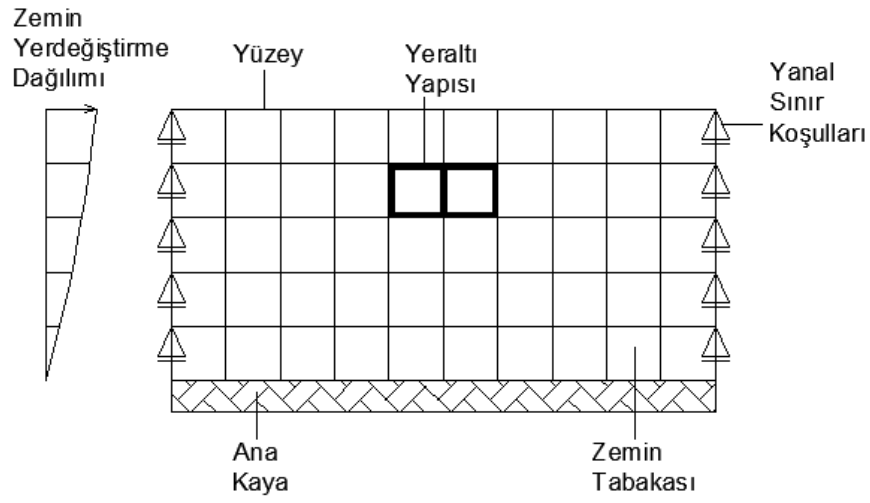
$$\bullet \quad \Delta_s = \delta_{s,h} \tag{7.43}$$



**Şekil 7.11 :** Birim kuvvet etkisi altında birim yer değiştirme yapan basit mesnetli çerçeve sistem

#### 7.2.2.4 Dinamik Yapı-Zemin Etkileşimli Çözüm

Yeraltı yapılarının daha genel sayısal çözümleri için yapı-zemin etkileşimli ve zaman, frekans gibi tanım alanlarında çalışan bilgisayar modelleri ve analizleri kullanılabilir (Şekil 7.12). Bu analizler, çözümü gereken problemin türüne göre sonlu elemanlar, sonlu farklar ya da sınır elemanlar yöntemlerinden biriyle gerçekleştirilebilir. Homojen ve lineer olarak düşünülen problemlerde sonlu farklar metodunun uygulanabilirliği yüksekken farklı homojenlikte malzemelerin bulunduğu ve nonlineer olan sistemlerde sonlu elemanlar metodu daha iyi sonuçlar verir. Bu yüzden sonlu elemanlar metodu en çok kullanılan analiz yöntemidir. Analiz programlarının geçmişten günümüze giderek gelişmesiyle yeraltı yapılarında dinamik yapı-zemin etkileşimli çözümlerin kullanımı da yaygınlaşmıştır. Bu metotlardaki ortak eksiklik ise yarı sonsuz zemin tabakalarının sonlu olarak modellenmesidir (St. John ve Zahrah, 1987).



**Şekil 7.12 :** Genel olarak dinamik yapı-zemin etkileşimli bir analiz modeli (Nishioka ve Unjoh)

## 8. YERALTI YAPILARININ TASARIM YÜKLEMELERİ

Yeraltı yapı tasarımında, yapıya etki edebilecek bütün kuvvetler tespit edilir ve tasarım yapının bu kuvvetleri karşılayabileceği şekilde gerçekleştirilir. Bu kuvvetleri statik ve dinamik olarak ayrı ayrı ele alıp inceleyebiliriz.

### 8.1 Statik Yükleme

Betonarme yeraltı yapılarının tasarımında statik yüklemeler Türk Standartları Enstitüsünde, betonarme yapılar için verilen tasarım kuvvetleri ve kat sayıları kullanılarak oluşturulabilir. Tasarım kuvvetine  $F_d$  dersek, sabit yük  $G$ , hareketli yük  $Q$  ve yatay zemin etkisi  $H$  olmak üzere TS500’de belirtilen tasarım kuvveti formülleri aşağıdaki gibidir.

$$\bullet \quad F_d = 1,4G + 1,6Q + 1,6H \quad (8.1)$$

$$\bullet \quad F_d = 0,9G + 1,6H \quad (8.2)$$

Sabit yükler yapıyı oluşturan elemanların kendi ağırlıklarını temsil eden zati yüklerdir. Yeraltı yapılarında ek olarak yapı üstünde kalan zemin tabakasının, var ise üst yapıların ve yeraltı suyunun ağırlığı da sabit yüklere eklenmelidir. Hareketli yükler ise yapıya sonradan etki eden kullanım süresi boyunca devamlı yapı üzerinde kalmayacak yüklerdir. Hareketli yükler yeraltı yapısının kullanım amacına göre değişiklik göstermekte olup, araç yükleri, insan yükleri, eşya yükleri, trafik yükleri gibi faktörleri içerir. Ayrıca yeraltı yapısının çevresinde bulunan önemli üst yapıların meydana getirdiği hareketli yüklerde incelenerek hesaba katılmalıdır. Toprak itkisinin ( $H$ ) yanı sıra yeraltı suyu yatay basıncının ( $Y$ ) da hesaplanıp tasarımda göz önünde bulundurulması gereklidir. TS500’de yatay su basıncının 1.4 kat sayısı ile çarpılarak ilave edildiği formül aşağıdaki gibidir.

$$\bullet \quad F_d = 1,4G + 1,6Q + 1,6H + 1.4Y \quad (8.3)$$

Eğer yeraltı yapısı, yeraltı su seviyesinin kısmen ya da tamamen altında bulunuyorsa yeraltı suyu yapıyı ekstradan bir kaldırma kuvveti etkisine maruz bırakır. Yapının ve

üzerinde bulunan toprağın toplam ağırlığı yapıya etki eden kaldırma kuvvetinden daha az ise yapıda yüzme hareketi denilen durum ve buna bağlı hasarlar görülebilir. Bu nedenle tasarım aşamasında bu duruma da dikkat edilerek yüzme tahkiki yapılması gereklidir. Yeraltı yapısının zeminle temas eden düşey kısımlarının oluşturduğu sürtünme kuvveti yapıyı etkileyen kaldırma kuvvetine karşı koysa da güvenli tarafta kalmak adına bu sürtünme kuvvetleri ihmal edilir ve yapı ağırlığı ile üzerinde taşıdığı zemin tabakasının ağırlığının hesaplanan kaldırma kuvvetinden daha büyük olması sağlanır (Cüceoğlu 2006).

## 8.2 Dinamik Yükleme

Deprem kuvvetinin de hesaba katılacağı durumda tasarım kuvvetini hesaplamak için aşağıdaki kat sayı ve yük bileşenleri kullanılır (TS500).

- $F_d = 1,0G + 1,0Q + 1,0E$  (8.4)

- $F_d = 0,9G + 0,9E$  (8.5)

Burada E, deprem yükünü temsil eder.

Zeminde deprem kuvvetinden dolayı oluşacak serbest alan zemin şekil değiştirmeleri yapıya uygulanarak, yapıda bu şekil değiştirmelere neden olacak yükler hesaplanıp deprem yükü olarak 8.4'de kullanılabilir. Bu uygulama sonucunda da yapıdaki iç kuvvetler bulunur.

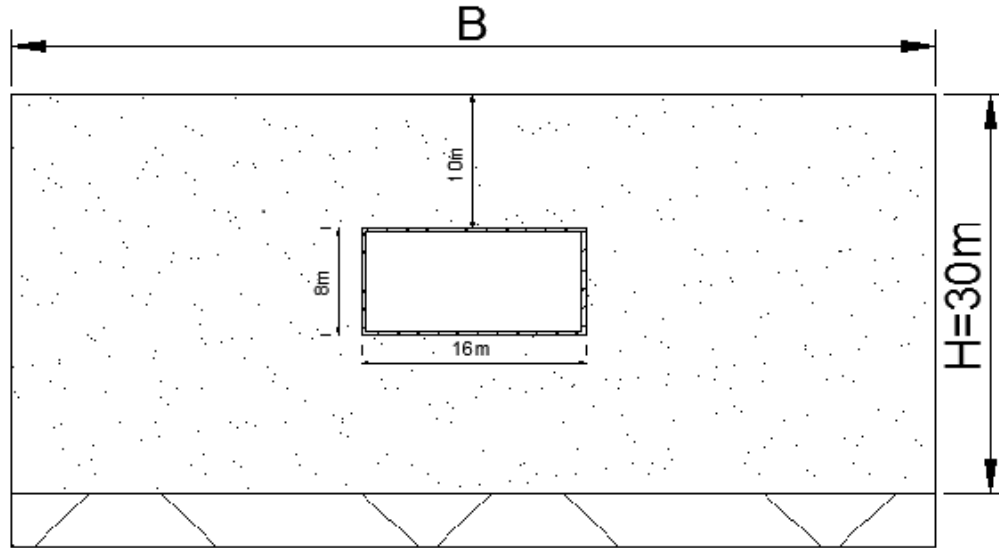
Ayrıca yeraltı yapısı üzerinde bulunan toprak basıncında depreme bağlı oluşan dinamik artışlar da deprem yükü olarak kullanılabilir. Bu durumda en yüksek tasarım kuvveti hangisinde oluşuyor ise ona göre tasarım yapılır.

## 9. SAP2000 PROGRAMI İLE SAYISAL UYGULAMALAR

Bu kısımda program üzerinde oluşturduğumuz iki boyutlu tünel modellerinin deprem kuvvetleri etkisinde ve bazı parametreler çerçevesinde gösterdiği davranışlar ve yaptığı yer değiştirmeler incelenecektir. İncelemeler, tünel eksenine dik doğrultudaki deprem yer hareketi için yapılacak olup, çözümlemelerde tünellerin boyuna doğrultusunda bir deprem etkisi göz önünde bulundurulmayacaktır. Yani bütün modellerde düzlem şekil değiştirme durumu söz konusu olacaktır.

### 9.1 İki Boyutlu Dikdörtgen Kesitli Tünel Modeli

Kesit boyutları 8 metre ve 16 metre olmak üzere, yüzeyden ana kayaya kadar 30 metre yüksekliğe sahip bir zemin tabakasının 10 metre altına yerleştirilmiş  $t=100$  cm kesit kalınlığına sahip iki boyutlu modelimiz şekildeki gibi oluşturulmuştur (Şekil 9.1).



Şekil 9.1 : 2 Boyutlu dikdörtgen tünel modeli

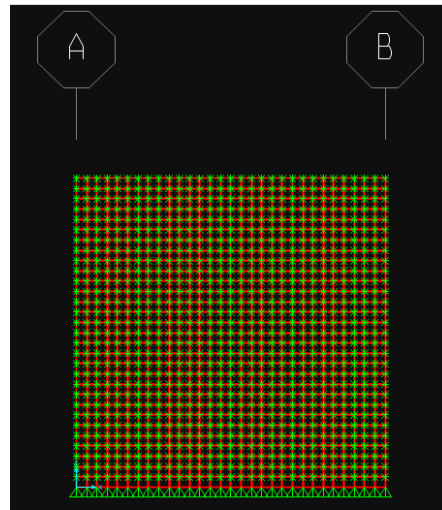
Burada B, programda oluşturacağımız zemin tabakasının genişliğini göstermekte olup uygulamalarda değişkenlik gösterecek parametrelerimizden ilkidir. Modelde kullandığımız malzeme özellikleri ise çizelge 9.1’de gösterilmiştir.

**Çizelge 9.1 : Malzeme özellikleri**

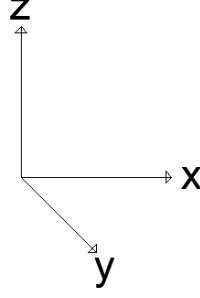
| MALZEME    | BİRİM HACİM<br>AĞIRLIĞI | ELASTİSİTE<br>MODÜLÜ       | POISSON ORANI |
|------------|-------------------------|----------------------------|---------------|
| ZEMİN      | 18 kN/m <sup>3</sup>    | 30000 kN/m <sup>2</sup>    | 0,3           |
| BETON(C25) | 25 kN/m <sup>3</sup>    | 32000000 kN/m <sup>2</sup> | 0,2           |

Zemin tabakası sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmiş olup ağ aralığı birer metre seçilmiştir (Şekil 9.2). Sınır koşulları ise 2 boyutlu ortamda çalışıldığı düşünülerek düzenlenmiştir. Programın global eksenlerine göre bakacak olursak (Şekil 9.3) tabakanın 2 ekseninde yer değiştirme ve 1 ile 3 eksenlerinde dönme yapması engellenmiştir. Tabakanın tabanında ise düğüm noktalarının sadece 2 yönünde dönme yapmasına izin verilmiş diğer bütün dönme ve yer değiştirmeler engellenmiştir.

Zemin tabakası elastoplastik düzlem şekil değiştirme durumu etkisinde olduğundan, aslında çözümlerlerin daha çok zemin mekaniği problemlerine uygun paket programlar tarafından yapılması daha uygundur. Ancak bu çalışmada SAP2000 programının olanaklarından yararlanılmıştır.



**Şekil 9.2 : 2 Boyutlu zemin tabakası modeli**



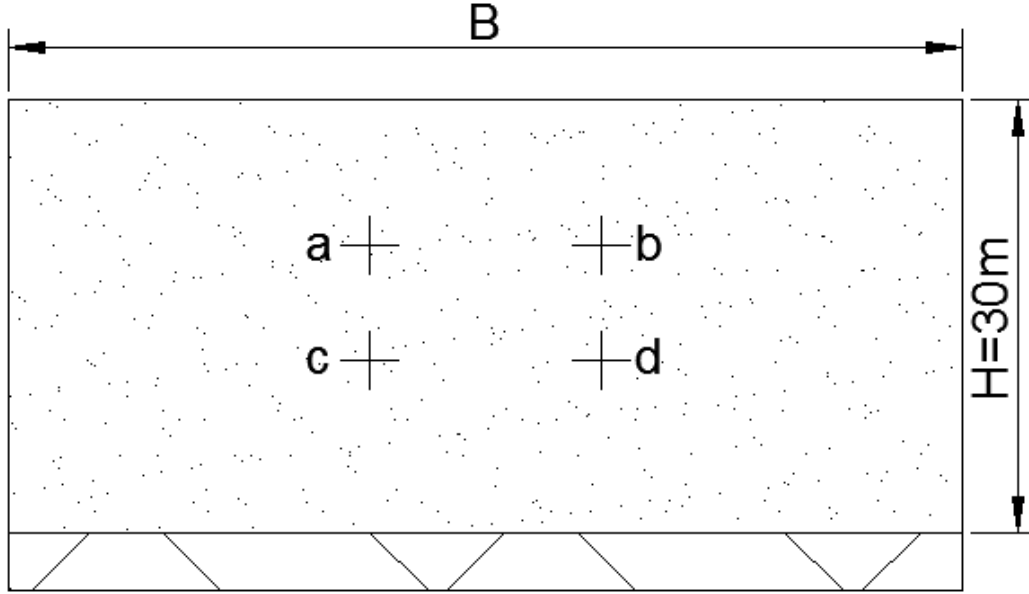
**Şekil 9.3 : Sap2000 global eksenler; x(1), y(2), z(3)**

### **9.1.1 Zemin Tabakasının Genişliğine Bağlı Analiz**

Bilindiği gibi zemin tabakası yarı sonsuz bir kavramdır ancak bunun tanımlanması mümkün olmadığı için programda sonlu elemanlar yöntemi uygulanmış ve zemin tabakası sonlu olarak modellenmiştir.

İlk olarak zemin tabakasının içine herhangi bir tünel kesiti yerleştirmeden tabakanın genişliği sırasıyla  $B=30\text{m}$ ,  $B=60\text{m}$ ,  $B=120\text{m}$  ve  $B=240\text{m}$  alınarak dört farklı model oluşturulup, bu zemin tabakalarına moment büyüklüğü 6.9 olan, 1992 tarihli Erzincan depreminin Erzincan Meteoroloji İstasyonundan kaydedilmiş doğu-batı yönlü 0,01sn zaman aralıklı 20,94 saniyelik bir ivme kaydı ile üretilen deprem uygulanmıştır. Deprem kaydındaki maksimum ivme değeri 488,3 g'dır. Deprem kuvveti tünel eksenine dik şekilde uygulanmıştır. Zaman tanım alanında yapılan bu çözümle zeminin tabaka genişliğine (B) bağlı olarak serbest alan zemin şekil değiştirmeleri ve periyotlar incelenecektir.

Daha sonra yerleştireceğimiz tünel kesitinin dört köşesine denk gelen düğüm noktaları belirlenmiş ve a,b,c,d olarak isimlendirilmiştir (Şekil 9.4).



**Şekil 9.4 :** Tünel kesitinin belirlenen dört köşesi

Dikdörtgen kesitli tünel çalışmasında, zaman tanım alanında yapacağımız bütün analizlerde bu dört noktanın davranışı incelenecektir.

### 9.1.2 Analiz Sonuçları

Genişliğin değiştirildiği dört farklı modelin analiz sonuçlarında tabaka genişliği arttıkça sistemin birinci mod periyodunun azaldığı ve daha rijit bir hal aldığı, yer değiştirmelerin ise özellikle düşey yönde azaldığı gözlenmiştir (Çizelge 9.2) (Çizelge 9.3).

**Çizelge 9.2 :** 1.Mod periyotları

| TABAKA<br>GENİŞLİĞİ<br>(B) | 1.MOD<br>PERİYODU<br>(T) |
|----------------------------|--------------------------|
| 30m                        | 1,521sn                  |
| 60m                        | 1,517sn                  |
| 120m                       | 1,515sn                  |
| 240m                       | 1,514sn                  |

**Çizelge 9.3 :** Köşe noktaların maksimum yatay ve düşey yer değiştirmelerinin tabaka genişliğine bağlı değişimi

| TABAKA<br>GENİŞLİĞİ (B) | EKSEN | MAKSİMUM Y.<br>DEĞİŞTİRMELER |        |
|-------------------------|-------|------------------------------|--------|
|                         |       | U(a-b)                       | U(c-d) |
| 30m                     | 1     | 0,204m                       | 0,163m |
|                         | 3     | 0,000m                       | 0,000m |
| 60m                     | 1     | 0,203m                       | 0,162m |
|                         | 3     | 0,000m                       | 0,000m |
| 120m                    | 1     | 0,203m                       | 0,162m |
|                         | 3     | 0,000m                       | 0,000m |
| 240m                    | 1     | 0,202m                       | 0,162m |
|                         | 3     | 0,000m                       | 0,000m |

Tabaka boyunca oluşan maksimum yatay ve düşey yer değiştirmelerin artan genişlikten çok etkilenmediği görülmüştür (Çizelge 9.4).

**Çizelge 9.4 :** Tabaka boyunca maksimum yatay ve düşey yer değiştirmelerin genişliğe bağlı değişimi

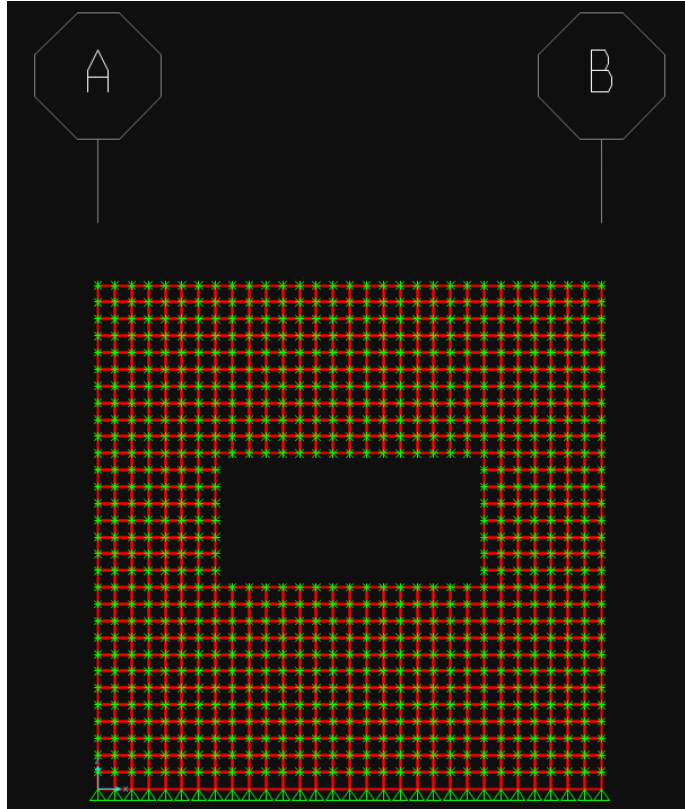
| TABAKA<br>GENİŞLİĞİ (B) | EKSEN | U(maks) |
|-------------------------|-------|---------|
| 30m                     | 1     | 0,229m  |
|                         | 3     | 0,0021m |
| 60m                     | 1     | 0,228m  |
|                         | 3     | 0,0021m |
| 120m                    | 1     | 0,228m  |
|                         | 3     | 0,0021m |
| 240m                    | 1     | 0,228m  |
|                         | 3     | 0,0021m |

## 9.2 Zemin Tabakasında Tünel Kesit Boşluğu Açarak Analiz

İlk adımda yaptığımız çalışmada zemin tabakasında herhangi bir boşluk ya da tünel kesiti oluşturulmamıştı. İkinci adımda modellediğimiz zemin tabakalarında a,b,c,d noktaları kullanılarak tünel kesiti kadar boşluk açılacak (Şekil 9.5) ve yer değiştirmelerdeki değişim incelenecektir.

Boşluklu analiz de 30, 60, 120 ve 240 metre genişliğe sahip dört ayrı tabaka modelinde yine Erzincan deprem kaydı ile zaman tanım alanı yöntemi ile gerçekleştirilmiştir.

Dört modelde de aynı tünel kesiti kullanıldığı için boşluk büyüklüğü aynıdır. Bu nedenle zemin tabakalarındaki boşluk oranları değişiklik gösterecek ve tabaka genişliği arttıkça boşluğun bütün sistem içindeki etkisinin azalacağı düşünülmüştür (Çizelge 9.5).



Şekil 9.5 : 2 Boyutlu boşluklu zemin tabakası modeli

**Çizelge 9.5 : Zemin tabakalarındaki boşluk oranları**

| TABAKA GENİŞLİĞİ (B) | BOŞLUK ORANI |
|----------------------|--------------|
| 30m                  | 14,22%       |
| 60m                  | 7,11%        |
| 120m                 | 3,55%        |
| 240m                 | 1,77%        |

### 9.2.1 Analiz Sonuçları

Dört ayrı sistem için çözüm yapıldığında genişliği 30 metre olan modelde boşluk açıldığında rijitliğin azaldığı, 1.mod periyodunun ve tabaka boyunca maksimum yatay ve düşey yer değiştirmelerin arttığı görülmüştür. Genişliği 60, 120 ve 240 metre olan zemin tabakalarında ise periyot ve maksimum yer değiştirmelerde önemli bir değişiklik olmamıştır (Çizelge 9.6).

**Çizelge 9.6 : Boşluksuz ve boşluklu modellerde periyot değerleri ve tabakada oluşan maksimum yer değiştirmeler**

| TABAKA GENİŞLİĞİ (B) |           | PERİYOT (T) | U <sub>1</sub> (maks) | U <sub>3</sub> (maks) |
|----------------------|-----------|-------------|-----------------------|-----------------------|
| 30m                  | Boşluksuz | 1,521sn     | 0,23m                 | 0,0021m               |
|                      | Boşluklu  | 1,605sn     | 0,25m                 | 0,0027m               |
| 60m                  | Boşluksuz | 1,517sn     | 0,23m                 | 0,0021m               |
|                      | Boşluklu  | 1,524sn     | 0,23m                 | 0,0024m               |
| 120m                 | Boşluksuz | 1,515sn     | 0,23m                 | 0,0021m               |
|                      | Boşluklu  | 1,515sn     | 0,23m                 | 0,0022m               |
| 240m                 | Boşluksuz | 1,514sn     | 0,23m                 | 0,0021m               |
|                      | Boşluklu  | 1,514sn     | 0,23m                 | 0,0022m               |

Boşluksuz ve boşluklu zemin tabakaları için a, b, c, d noktalarındaki maksimum yer değiştirmeler ise aşağıdaki gibidir (Çizelge 9.7).

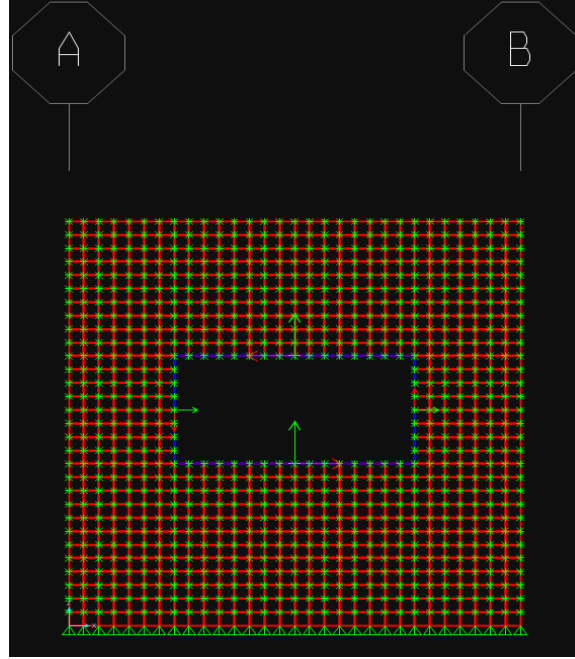
**Çizelge 9.7 :** Boşluksuz ve boşluklu modellerde a,b,c,d noktalarındaki maksimum yer değiştirmeler

| TABAKA GENİŞLİĞİ (B) |           | $U_1(a-b)$ | $U_3(a-b)$ | $U_1(c-d)$ | $U_3(c-d)$ |
|----------------------|-----------|------------|------------|------------|------------|
| 30m                  | Boşluksuz | 0,20m      | 0,000m     | 0,16m      | 0,000m     |
|                      | Boşluklu  | 0,22m      | 0,00119m   | 0,16m      | 0,00074m   |
| 60m                  | Boşluksuz | 0,20m      | 0,000m     | 0,16m      | 0,000m     |
|                      | Boşluklu  | 0,20m      | 0,00088m   | 0,16m      | 0,00056m   |
| 120m                 | Boşluksuz | 0,20m      | 0,000m     | 0,16m      | 0,000m     |
|                      | Boşluklu  | 0,20m      | 0,00077m   | 0,16m      | 0,00050m   |
| 240m                 | Boşluksuz | 0,20m      | 0,000m     | 0,16m      | 0,000m     |
|                      | Boşluklu  | 0,20m      | 0,00073m   | 0,16m      | 0,00047m   |

İki modelin a, b, c ve d noktalarındaki yer değiştirmeler incelendiğinde düşey yöndeki yer değiştirmelerin boşluklu modellerde daha yüksek olduğu görülmüştür (Çizelge 9.7).

### 9.3 Yapı ve Zemin Birlikte Analiz

Zemin tabakasında tünel kesiti kadar boşluk bıraktığımız üç modelde boşluklara tablo 9.1’de özellikleri verilen malzemeden t=100 cm kalınlıklı tünel çerçevesi eklenmiş (Şekil 9.6) ve tekrar zaman tanım alanında Erzincan deprem kaydı ile çözüm yapılmıştır.



**Şekil 9.6 : 2 Boyutlu yapı-zemin birlikte model**

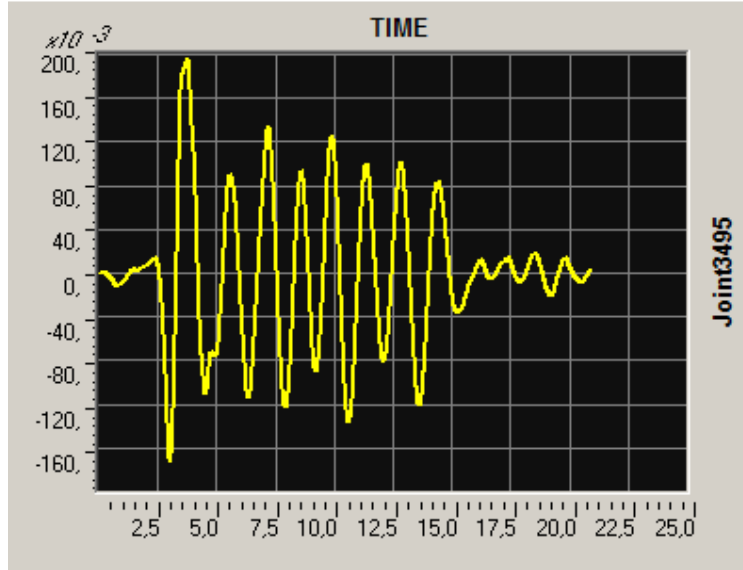
### 9.3.1 Analiz Sonuçları

Analizler sonucu oldukça rijit olan zemin tabakasına karşı tünel çerçevesinin çok fazla karşı koymadığı ve serbest alan zemin şekil değiştirmelerine yakın sonuçlar çıktığı görülmüştür (Çizelge 9.8).

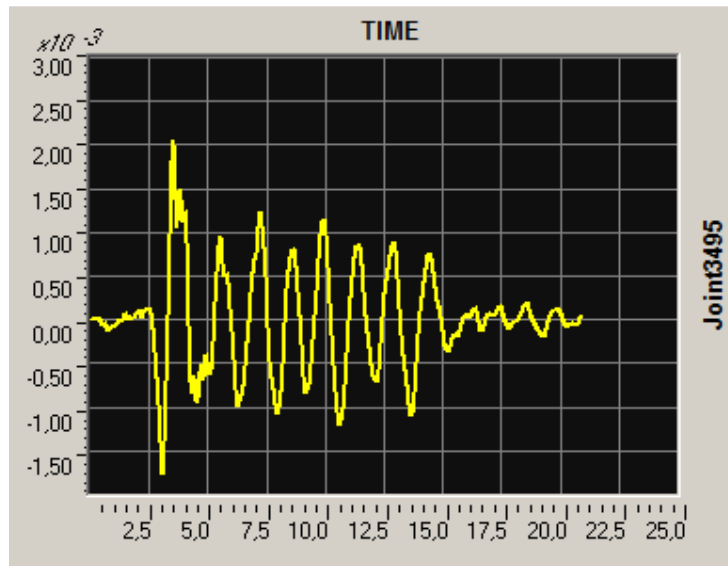
**Çizelge 9.8 : Çerçeve ve boşluklu modellerde a,b,c,d noktalarındaki maksimum yer değiştirmeler ve 1.mod periyotları**

| TABAKA GENİŞLİĞİ<br>(B) |          | $U_1(a-b)$ | $U_3(a-b)$ | $U_1(c-d)$ | $U_3(c-d)$ | PERİYOT<br>(T) |
|-------------------------|----------|------------|------------|------------|------------|----------------|
| 30m                     | Çerçeve  | 0,19m      | 0,0013m    | 0,15m      | 0,0013m    | 1,38sn         |
|                         | Boşluklu | 0,22m      | 0,0012m    | 0,16m      | 0,0007m    | 1,60sn         |
| 60m                     | Çerçeve  | 0,18m      | 0,0016m    | 0,16m      | 0,0016m    | 1,44sn         |
|                         | Boşluklu | 0,20m      | 0,0009m    | 0,16m      | 0,0006m    | 1,52sn         |
| 120m                    | Çerçeve  | 0,19m      | 0,0018m    | 0,16m      | 0,0019m    | 1,47sn         |
|                         | Boşluklu | 0,20m      | 0,0008m    | 0,16m      | 0,0005m    | 1,51sn         |
| 240m                    | Çerçeve  | 0,20m      | 0,0020m    | 0,16m      | 0,0021m    | 1,49sn         |
|                         | Boşluklu | 0,20m      | 0,0007m    | 0,16m      | 0,0005m    | 1,51sn         |

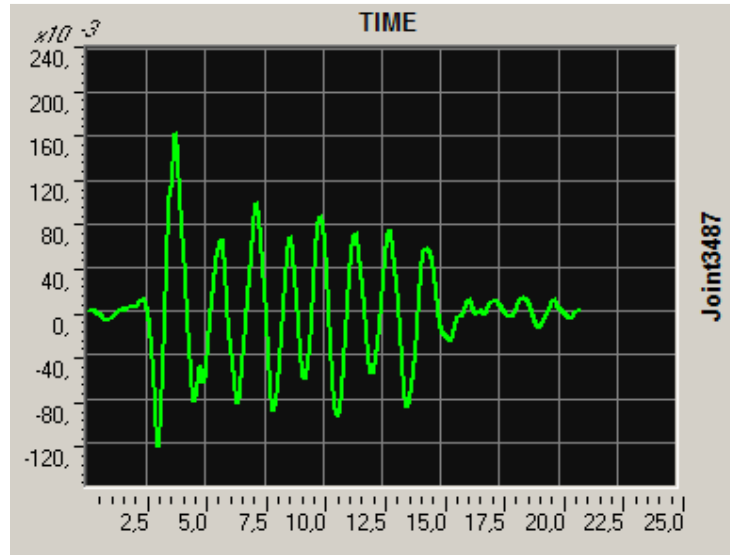
240 metre tabaka genişliğine sahip çerçevesiz modelin a, b, c, d noktalarının yer değiştirmelerinin zamana bağlı değişimleri ise aşağıdaki gibidir (Şekil 9.7) (Şekil 9.8) (Şekil 9.9) (Şekil 9.10).



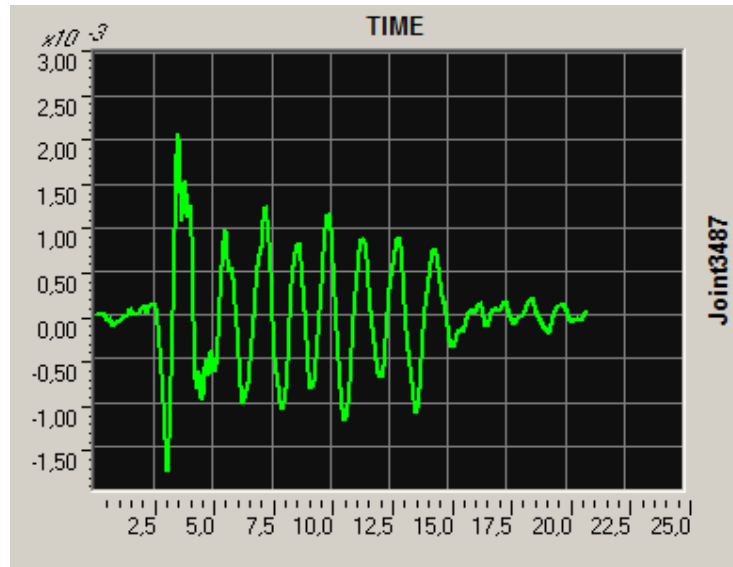
**Şekil 9.7 :** a ve b noktalarında yatay yer değiştirmelerin zamana bağlı olarak değişimi



**Şekil 9.8 :** a ve b noktalarında düşey yer değiştirmelerin zamana bağlı olarak değişimi



**Şekil 9.9 :** c ve d noktalarında yatay yer değiştirmelerin zamana bağlı olarak değişimi

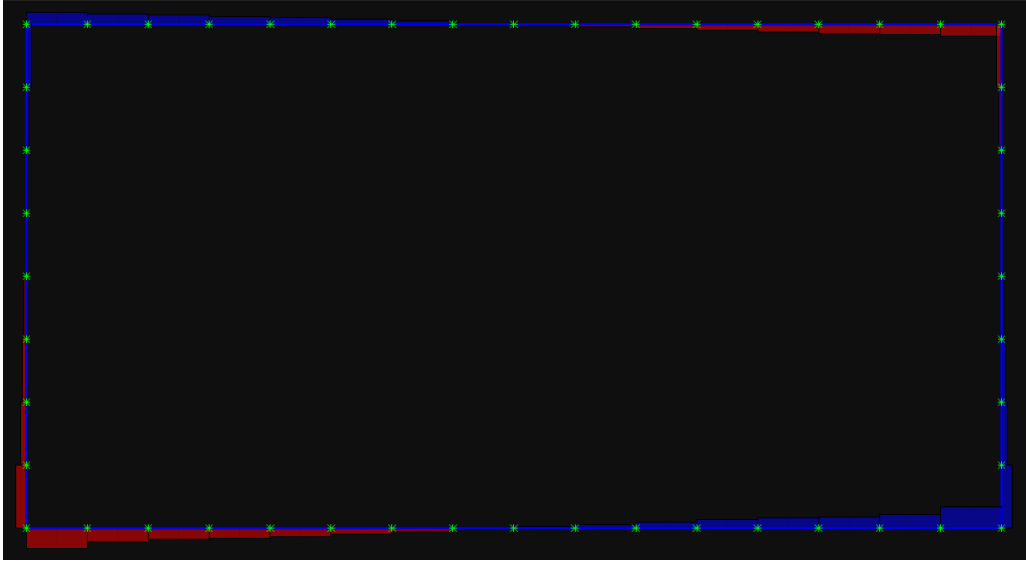


**Şekil 9.10 :** c ve d noktalarında düşey yer değiştirmelerin zamana bağlı olarak değişimi

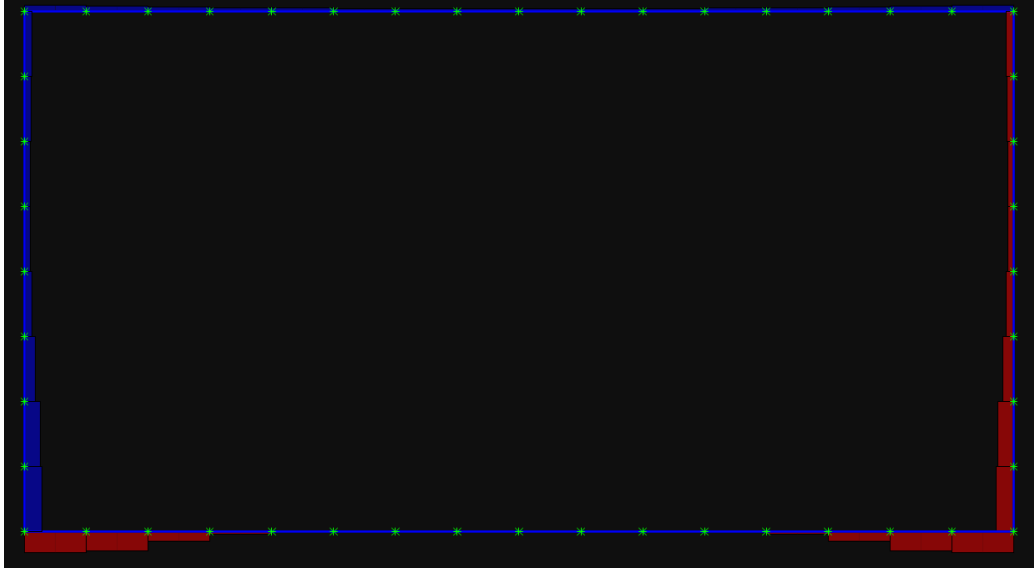
**Çizelge 9.9 :** Tabaka genişliğine bağlı olarak çerçeveye gelen maksimum iç kuvvetler

| TABAKA GENİŞLİĞİ (B) | MAKSİMUM EKSENEL YÜK (P) | MAKSİMUM KESME KUVVETİ (V2) | MAKSİMUM EĞİLME MOMENTİ (M3) |
|----------------------|--------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| 30m                  | 858,22 kN                | 2441,66 kN                  | 5841,59 kNm                  |
| 60m                  | 933,51 kN                | 3161,75 kN                  | 7557,58 kNm                  |
| 120m                 | 1034,88 kN               | 3718,34 kN                  | 8877,82 kNm                  |
| 240m                 | 1108,22 kN               | 4032,39 kN                  | 9620,38 kNm                  |

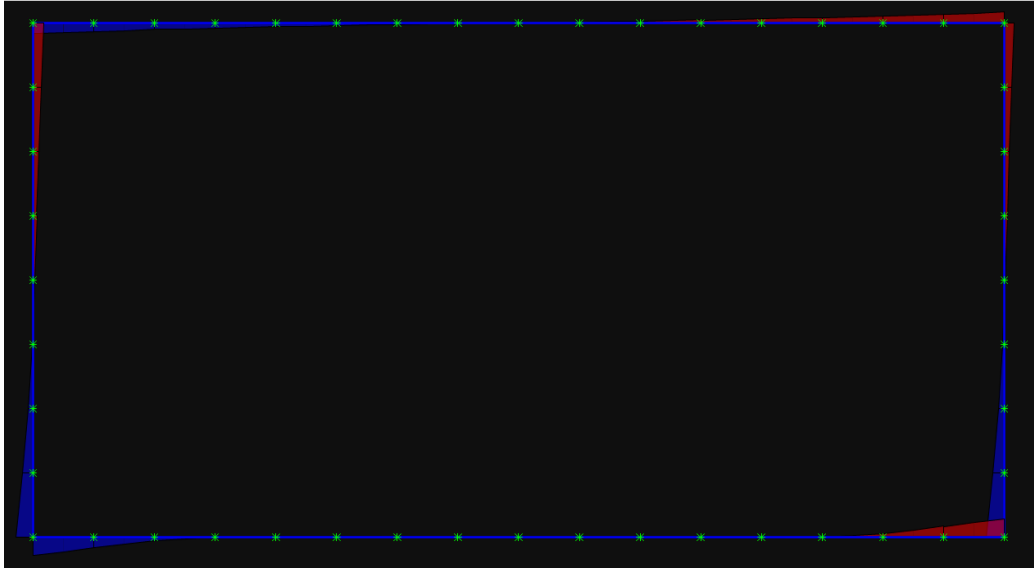
Tünel kesiti maksimum iç kuvvet değerlerine depremin 3,53. saniyesinde ulaşmıştır. 240 metrelik model için maksimum iç kuvvet diyagramları şekildeki gibidir (Şekil 9.11) (Şekil 9.12) (Şekil 9.13).



**Şekil 9.11 :** 3,53. saniyedeki eksenel yük diyagramı



**Şekil 9.12 :** 3,53. saniyedeki kesme kuvveti diyagramı



**Şekil 9.13 :** 3,53. saniyedeki moment diyagramı

Diyagramlardan anlaşıldığı gibi iç kuvvetler dikdörtgen kesitin taban köşelerinde en yüksek değerlerine ulaşmıştır.

Kurulan on iki farklı modelin analizleri incelendiğinde, sonuçların belli sınırlar içinde değişiklik gösterdiği ve birbirine çok yakın olduğu anlaşılmakla beraber, özellikle çizelge 9.9 incelendiğinde görüldüğü gibi tabaka genişliği arttırıldıkça analiz sonuçlarının birbirine yakınsadığı belirlenmiş ve daha sonraki adımlarda

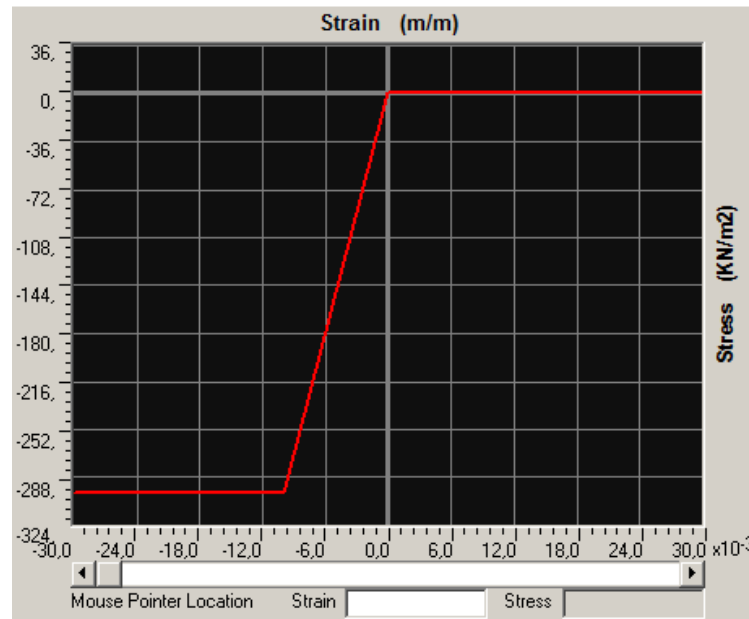
tabaka genişliğinin 240 metre alınmasının, gerçekte yarı sonsuz tanımlanan yeryüzünün programda tanıtılmasında daha doğru sonuçlar vereceğine karar verilmiştir.

#### 9.4 İki Boyutlu Dikdörtgen Kesitli Tünel Modelinde Nonlineer Çözüm

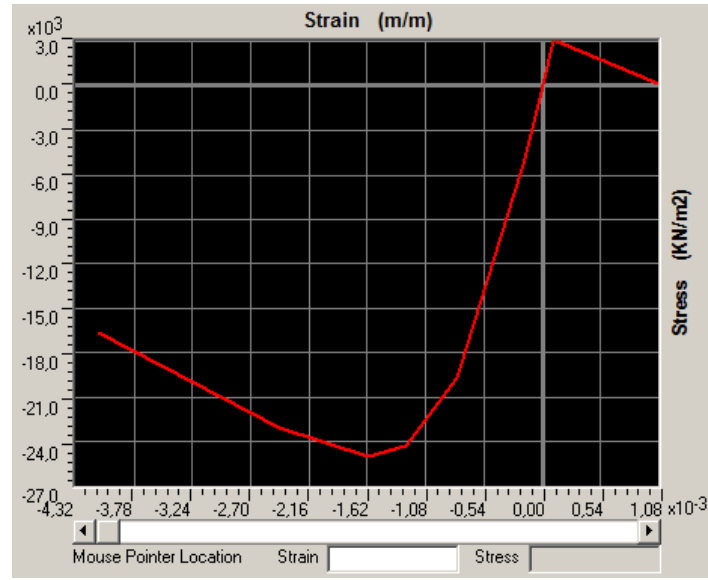
Daha önceki model ve çözümlerimizde uyguladığımız zaman tanım alanı analizleri tanımlanan malzemelerin lineer davranışları göz önüne alınarak yapılmıştır. Bir sonraki adımda yapılacak olan analizde ise zemin ve tünel kesiti için tanımladığımız malzemelerin nonlinear davranışları dikkate alınarak iki çözüm arasındaki sonuçlar karşılaştırılacaktır.

Tabaka genişliğinin 240 metre olduğu modelde yapılacak analizde hiçbir değişikliğe gidilmeden sadece zemin ve tünel kesitinin nonlinear malzeme özellikleri aktifleştirilmiş ve yine aynı deprem kaydı altında çözüm yapılmıştır.

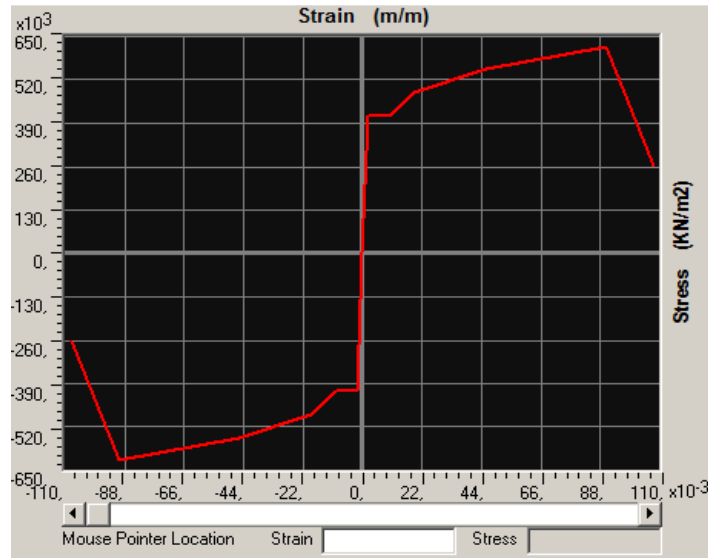
Ayrıca nonlinear çözümlemelerde zeminin elastoplastik davrandığı düşünülürken tünel kesitinin elastik davrandığı kabul edilmiştir.



Şekil 9.14 : Zemin için gerilme şekil değiştirme grafiği



Şekil 9.15 : C25 betonu için gerilme şekil değiştirme grafiği



Şekil 9.16 : A615Gr60 çeliği için gerilme şekil değiştirme grafiği

#### 9.4.1 Analiz Sonuçları

Çözüm sonucunda nonlinear analizde tabaka boyunca oluşan maksimum yatay ve düşey yer değiştirmelerin lineer analizdeki sonuçlara göre arttığı görülmüştür (Çizelge 9.10). Tünel kesitinin köşe noktaları olan a, b, c ve d noktalarındaki maksimum yer değiştirmeler incelendiğinde ise yatay yer değiştirmeler çok fazla değişmezken düşey yer değiştirmelerde artış görülmüştür (Çizelge 9.11).

**Çizelge 9.10 :** Lineer ve nonlinear çözümde tabaka boyunca oluşan maksimum yer değiştirmeler

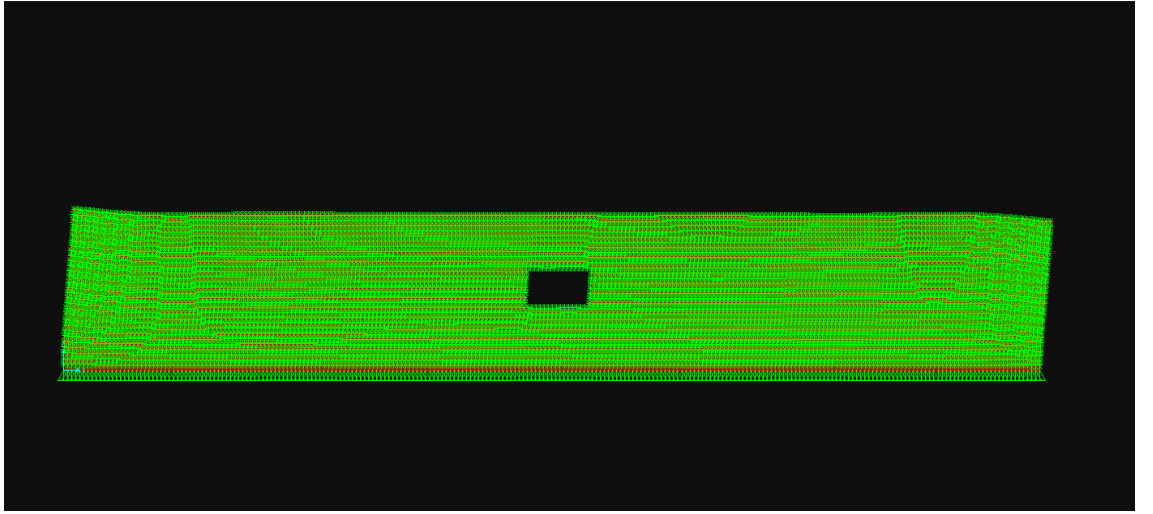
| TABAKA GENİŞLİĞİ | ANALİZ    | EKSEN | U(maks) |
|------------------|-----------|-------|---------|
| B=240m           | Lineer    | 1     | 0,227m  |
|                  |           | 3     | 0,006m  |
|                  | Nonlinear | 1     | 0,348m  |
|                  |           | 3     | 0,290m  |

**Çizelge 9.11 :** Lineer ve nonlinear çözümde a, b, c ve d noktalarındaki maksimum yer değiştirmeler

| TABAKA GENİŞLİĞİ | ANALİZ    | $U_1(a-b)$ | $U_3(a-b)$ | $U_1(c-d)$ | $U_3(c-d)$ |
|------------------|-----------|------------|------------|------------|------------|
| B=240m           | Lineer    | 0,20m      | 0,0020m    | 0,16m      | 0,0021m    |
|                  | Nonlinear | 0,19m      | 0,0164m    | 0,13m      | 0,0164m    |

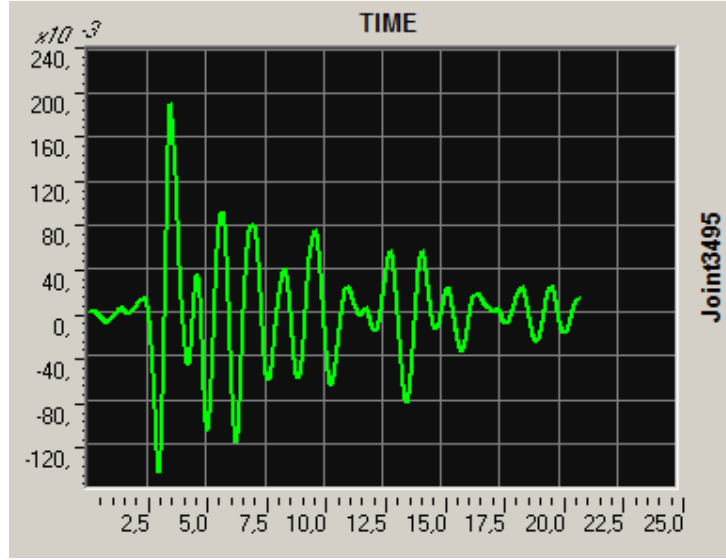


**Şekil 9.17 :** Lineer analiz sonucu deforme olmuş model

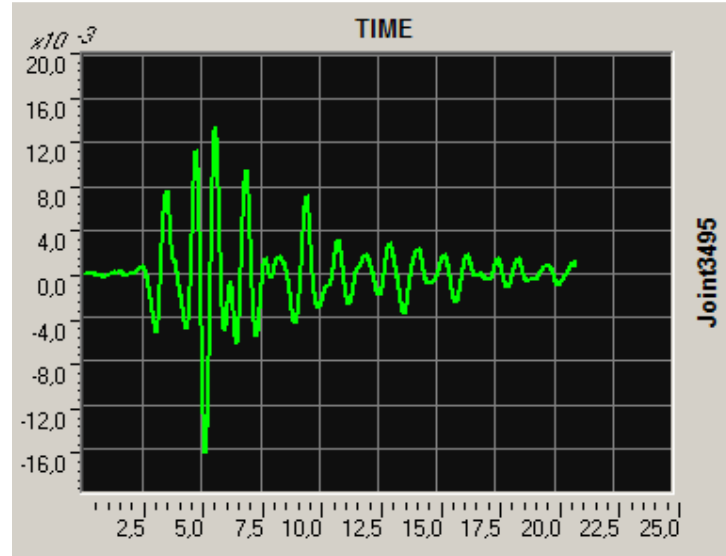


**Şekil 9.18 :** Nonlinear analiz sonucu deforme olmuş model

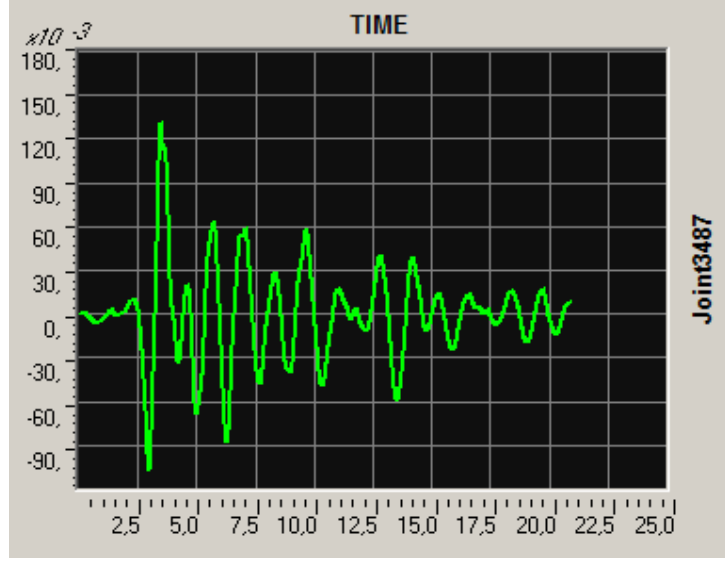
240 metre tabaka genişliğine sahip çerçeveli modelin nonlinear çözümü sonucu a, b, c, d noktalarındaki yer değiştirmelerin zamana bağlı değişimleri ise şekildeki gibidir (Şekil 9.19) (Şekil 9.20) (Şekil 9.21) (Şekil 9.22).



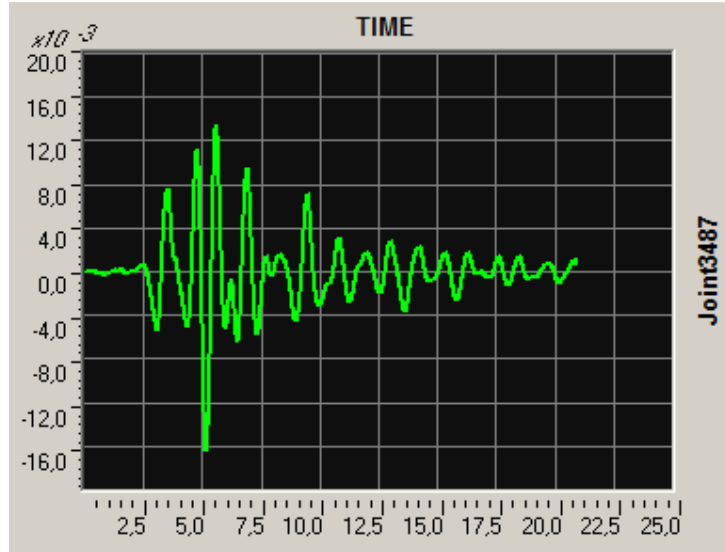
**Şekil 9.19 :** a ve b noktalarında yatay yer değiştirmelerin zamana bağlı olarak değişimi



**Şekil 9.20 :** a ve b noktalarında düşey yer değiştirmelerin zamana bağlı olarak değişimi



**Şekil 9.21 :** c ve d noktalarında yatay yer değiştirmelerin zamana bağlı olarak değişimi



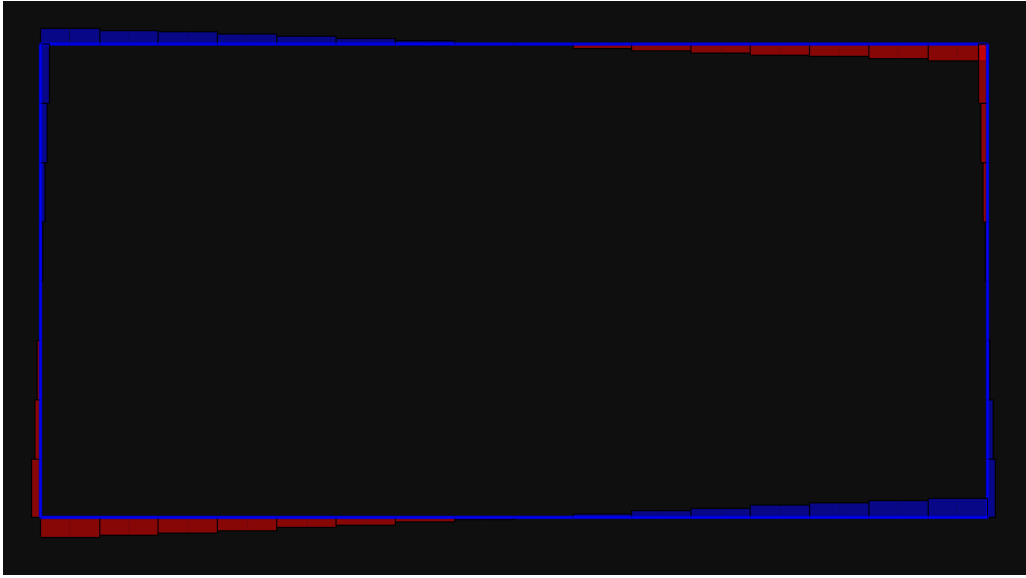
**Şekil 9.22 :** c ve d noktalarında düşey yer değiştirmelerin zamana bağlı olarak değişimi

Tünel kesitinde oluşan iç kuvvetler, lineer analizdeki sonuçlarla karşılaştırmalı olarak aşağıda verilmiştir (Çizelge 9.12). Buna göre eksenel yük değişmezken kesme kuvveti ve eğilme momentinde lineer çözüm sonuçlarına göre azalma görülmüştür.

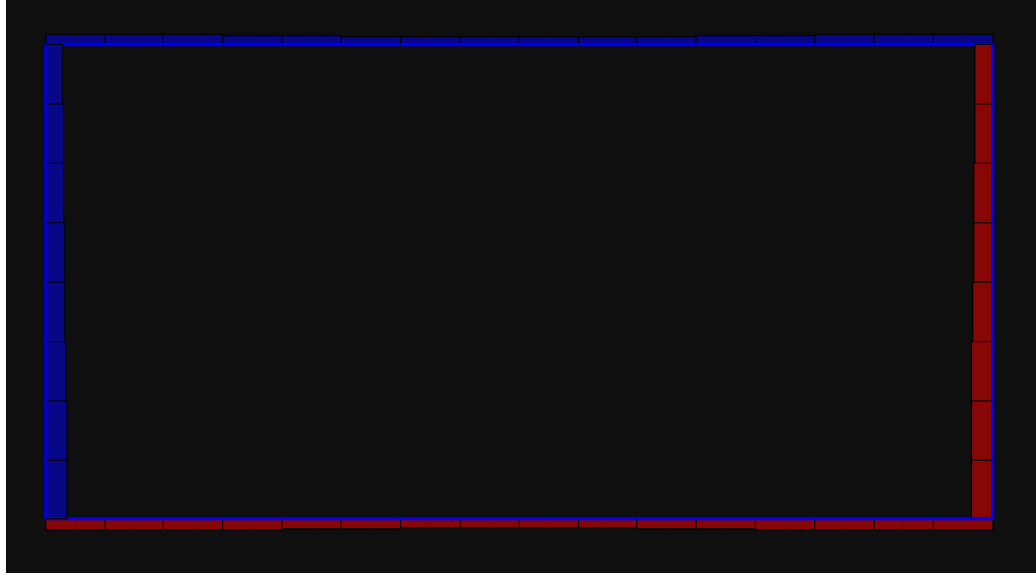
**Çizelge 9.12 :** Lineer ve nonlinear çözümde tünel kesitinde oluşan maksimum iç kuvvetler

| TABAKA GENİŞLİĞİ | ANALİZ    | MAKSİMUM EKSENEL YÜK (P) | MAKSİMUM KESME KUVVETİ (V2) | MAKSİMUM EĞİLME MOMENTİ (M3) |
|------------------|-----------|--------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| B=240m           | Lineer    | 1108,22 kN               | 4032,39 kN                  | 9620,38 kNm                  |
|                  | Nonlinear | 1099,91 kN               | 1202,80 kN                  | 4478,76 kNm                  |

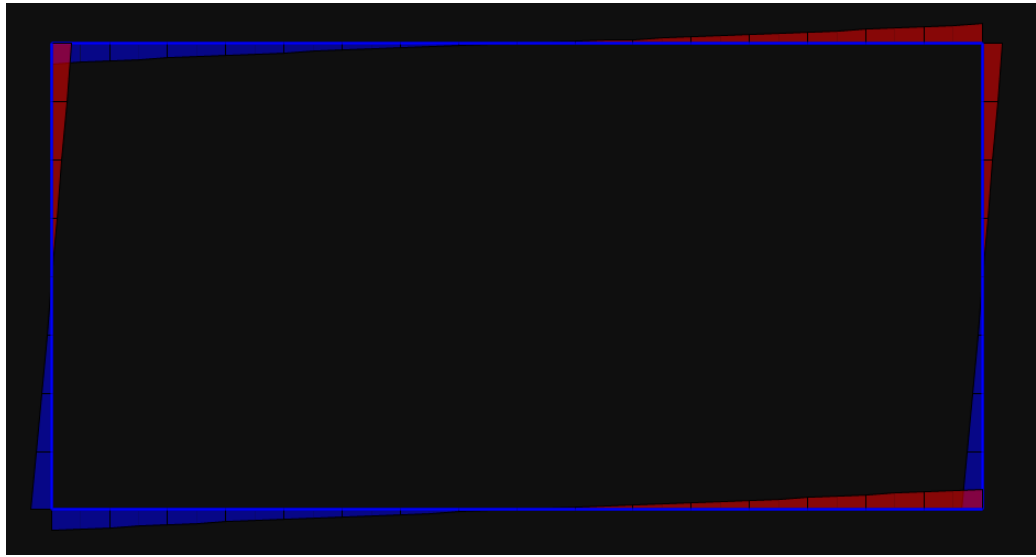
Tünel kesiti maksimum iç kuvvet değerlerine yine depremin 3,53. saniyesinde ulaşmıştır (Şekil 9.23) (Şekil 9.24) (Şekil 9.25).



**Şekil 9.23 :** 3,53. saniyedeki eksenel yük diyagramı



**Şekil 9.24 :** 3,53. saniyedeki kesme kuvveti diyagramı

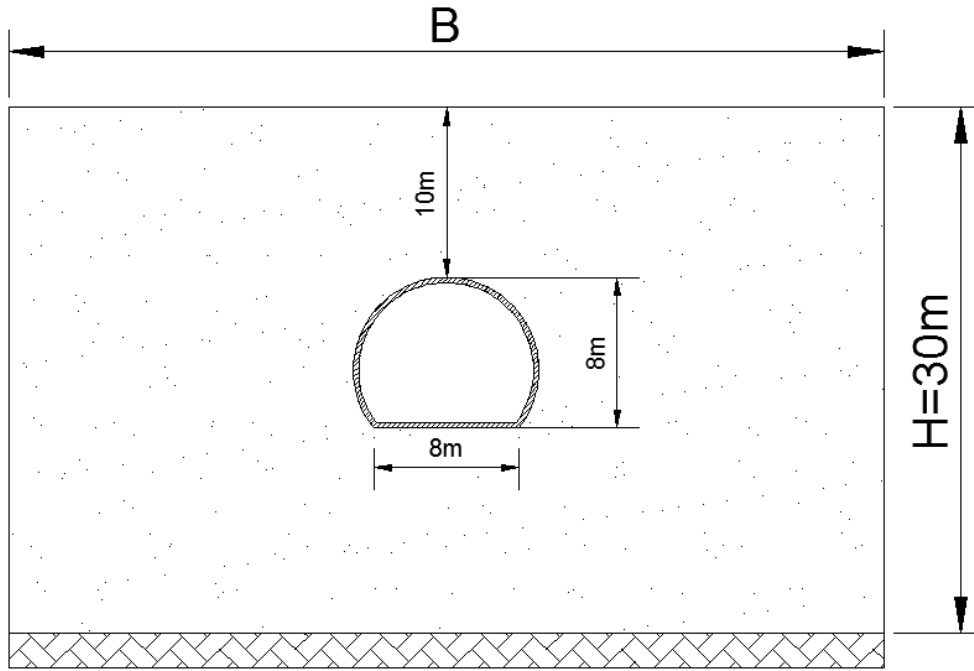


**Şekil 9.25 :** 3,53. saniyedeki moment diyagramı

Lineer çözümde olduğu gibi nonlinear çözümde de maksimum iç kuvvetler kesitin taban köşelerinde oluşmuştur.

## 9.5 İki Boyutlu Dairesel Kesitli Tünel Modeli

Dairesel kesitli tüneller zemin yüklerini taşıma konusunda daha başarılı olduklarından genellikle dikdörtgen kesite göre daha çok tercih edilirler. Bu kez 240 metre genişlik ve 30 metre yüksekliğinde tanımladığımız zemin tabakamızda, at nalı olarak adlandırabileceğimiz daireesel kesitli tünelin yine aynı deprem etkisi altında nasıl bir davranış sergileyeceği incelenecektir. Kesit kalınlığı yine  $t=100\text{cm}$  olup malzeme özellikleri çizelge 9.1'deki gibidir. At nalı tipi tünel kesitimiz de diğer modelde olduğu gibi çubuk elemanlar ile modellenmiş olup, daireesel kısmında 20 adet kiriş eleman kullanılmıştır.



Şekil 9.26: At nalı tipi tünel modeli

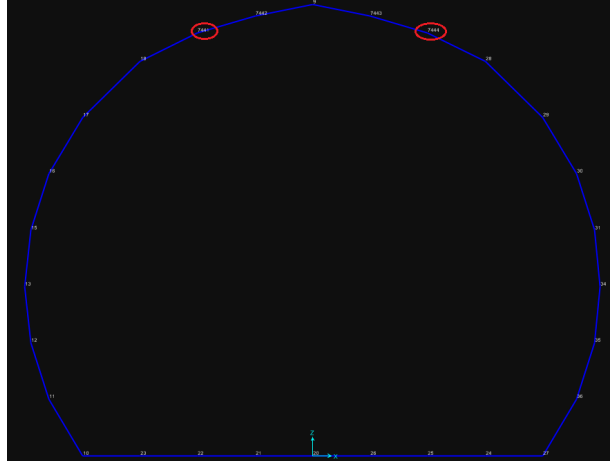
### 9.5.1 Analiz Sonuçları

Diğer modellerde uyguladığımız Erzincan depremi ile zaman tanım alanında analiz, adımlarında bir değişiklik yapılmadan uygulandığında modelde meydana gelen maksimum yer değiştirmeler ve 1.mod periyodu dikdörtgen kesitli modelin sonuçları ile karşılaştırmalı olarak tabloda verilmiştir (Çizelge 9.13).

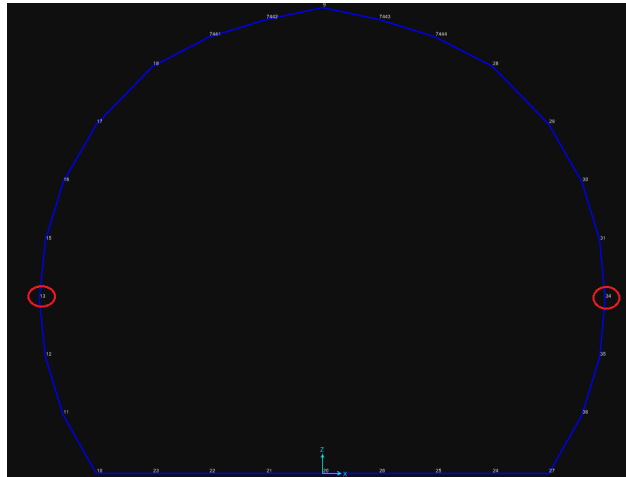
**Çizelge 9.13 :** Zemin tabakası boyunca oluşan maksimum yer değiştirmeler ve 1.mod periyotları

| TABAKA GENİŞLİĞİ<br>(B) | TÜNEL KESİT<br>TİPİ | $U_1(\text{maks})$ | $U_3(\text{maks})$ | PERİYOT (T) |
|-------------------------|---------------------|--------------------|--------------------|-------------|
| 240m                    | Dikdörtgen          | 0,227m             | 0,006m             | 1,49sn      |
| 240m                    | At nalı             | 0,222m             | 0,005m             | 1,46sn      |

Tünel kesitinde oluşan maksimum yer değiştirmeler ise yatay yönde 0,19 metre ve düşey yönde 0,005 metre olarak görülmüştür. Kesitte oluşan maksimum yer değiştirmelerin oluştukları noktalar aşağıda gösterilmiştir (Şekil 9.27) (Şekil 9.28).

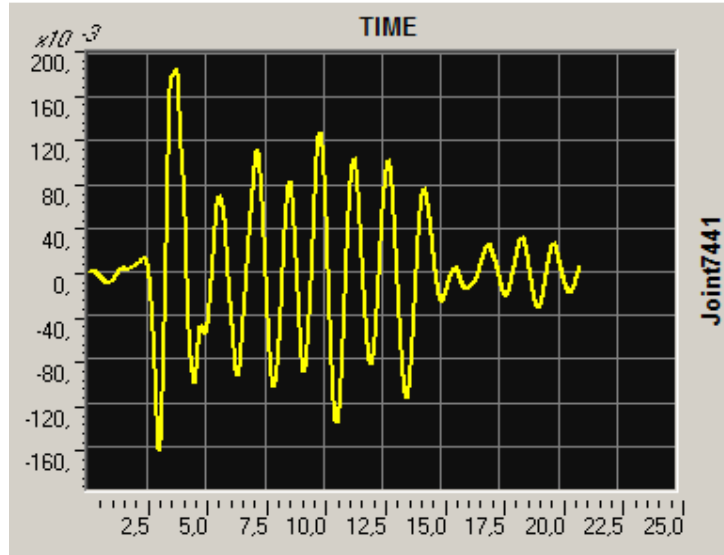


**Şekil 9.27:** Yatay yönde maksimum yer değiştirmenin olduğu noktalar

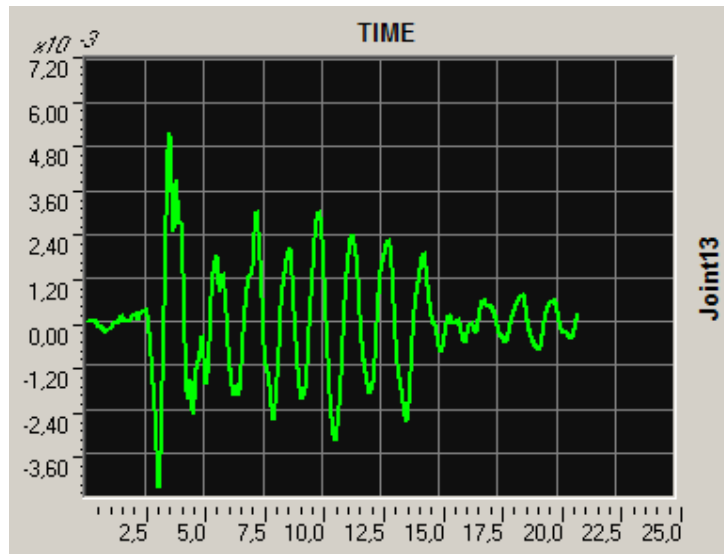


**Şekil 9.28:** Düşey yönde maksimum yer değiştirmenin olduğu noktalar

Kesit üzerinde maksimum yatay yer deđiřtirmenin olduđu noktayı x, maksimum dűey yer deđiřtirmenin olduđu noktayı da y olarak isimlendirirsek; x noktasının zamana bađlı yatay yer deđiřtirme grafiđi ve y noktasının zamana bađlı dűey yer deđiřtirme grafiđi ařađıdaki gibidir (řekil 9.29) (řekil 9.30).



**şekil 9.29** : x noktasında yatay yer değiştirmenin zamana bağlı olarak değişimi



**řekil 9.30** : y noktasında dűey yer deđiřtirmenin zamana bađlı olarak deđiřimi

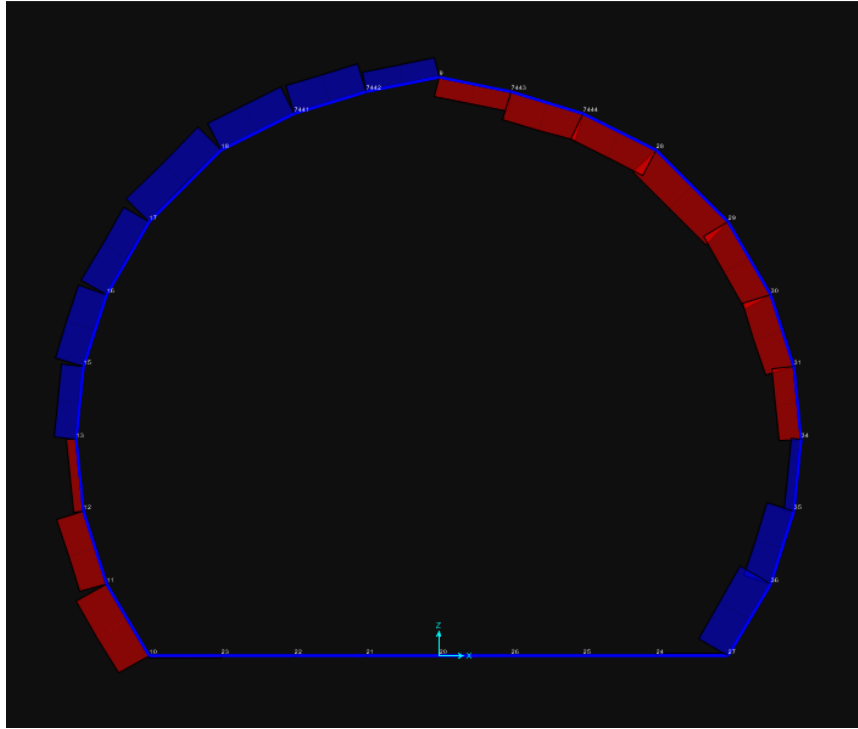
Kesitte oluřan maksimum iç kuvvetler ise yine dikdűrtgen kesitli tűnelin sonuçları ile karřılařtırmalı olarak ařađıda verilmiřtir (izelge 9.14).

**Çizelge 9.14 : Maksimum iç kuvvetler**

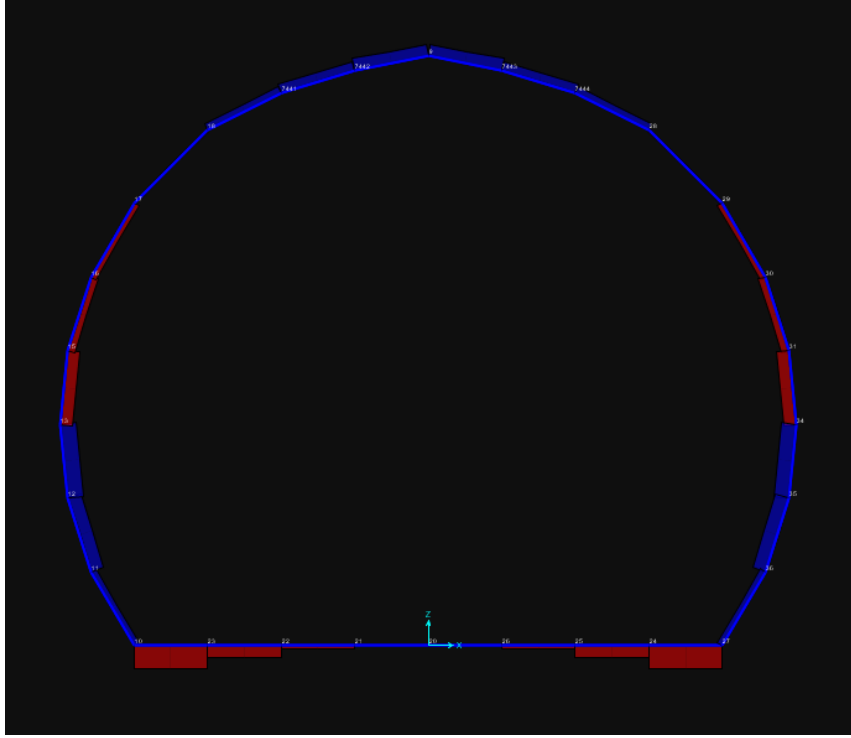
| TABAKA GENİŞLİĞİ (B) | KESİT TİPİ | MAKSİMUM EKSENEL YÜK (P) | MAKSİMUM KESME KUVVETİ (V2) | MAKSİMUM EĞİLME MOMENTİ (M3) |
|----------------------|------------|--------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| 240m                 | Dikdörtgen | 1108,22 kN               | 4032,39 kN                  | 9620,380 kNm                 |
| 240m                 | At Nalı    | 6882,501 kN              | 5181,83 kN                  | 8418,911 kNm                 |

Çizelge 9.14'e göre iki kesit tipi arasında maksimum eksenel yük yaklaşık altı kat büyürken maksimum kesme kuvveti ve maksimum eğilme momenti birbirine yakındır.

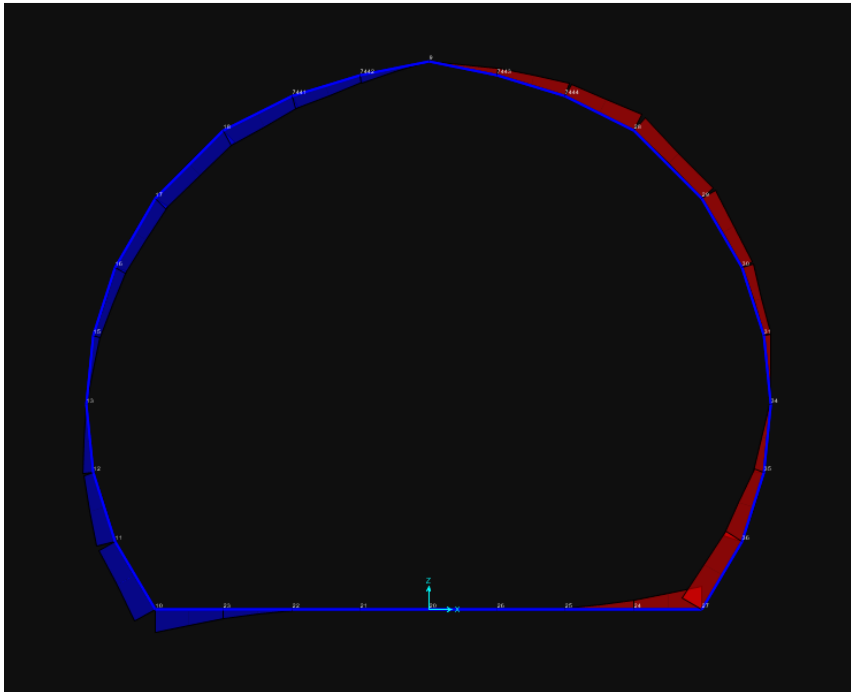
İç kuvvetler dikdörtgen kesitli tünel modelinde olduğu gibi en yüksek değerini depremin 3,53. saniyesinde almıştır. Tünel kesitinin 3,53. saniyedeki eksenel yük, kesme ve moment diyagramları aşağıdaki gibidir (Şekil 9.31) (Şekil 9.32) (Şekil 9.33).



**Şekil 9.31 : 3,53. saniyedeki eksenel yük diyagramı**



**Şekil 9.32 :** 3,53. saniyedeki kesme kuvveti diyagramı



**Şekil 9.33 :** 3,53. saniyedeki moment diyagramı

Dikdörtgen kesitli modelde olduğu gibi iç kuvvetler en yüksek değerlerine kesitin taban köşelerinde ulaşmıştır.

## 9.6 İki Boyutlu Dairesel Kesitli Tünel Modelinde Nonlinear Çözüm

Bu adımda at nalı tipi kesite sahip modeldeki malzemelerin daha önce tanımladığımız gerilme şekil değiştirme eğrileri (Şekil 9.14) (Şekil 9.15) (Şekil 9.16) kullanılarak nonlinear çözüm yapılacak ve analiz sonuçları karşılaştırılacaktır.

### 9.6.1 Analiz Sonuçları

Tabaka boyunca oluşan maksimum yer değiştirmeler dikdörtgen kesitte olduğu gibi nonlinear analizde lineer analize göre daha büyüktür (Çizelge 9.15).

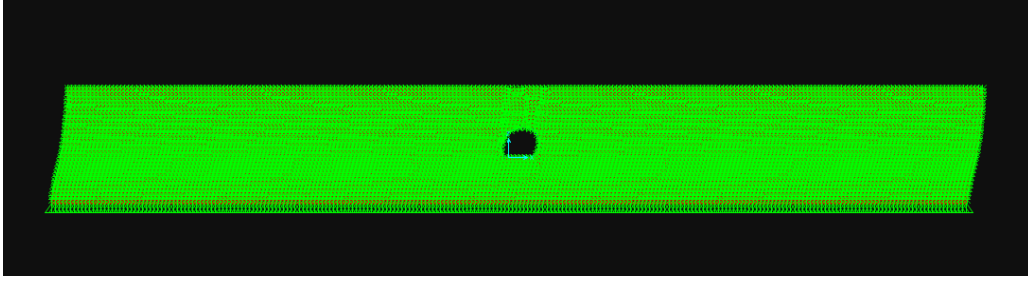
**Çizelge 9.15 :** Lineer ve nonlinear çözümde tabaka boyunca oluşan maksimum yer değiştirmeler

| TABAKA GENİŞLİĞİ | ANALİZ    | EKSEN | U(maks) |
|------------------|-----------|-------|---------|
| B=240m           | Lineer    | 1     | 0,222m  |
|                  |           | 3     | 0,005m  |
|                  | Nonlinear | 1     | 0,348m  |
|                  |           | 3     | 0,292m  |

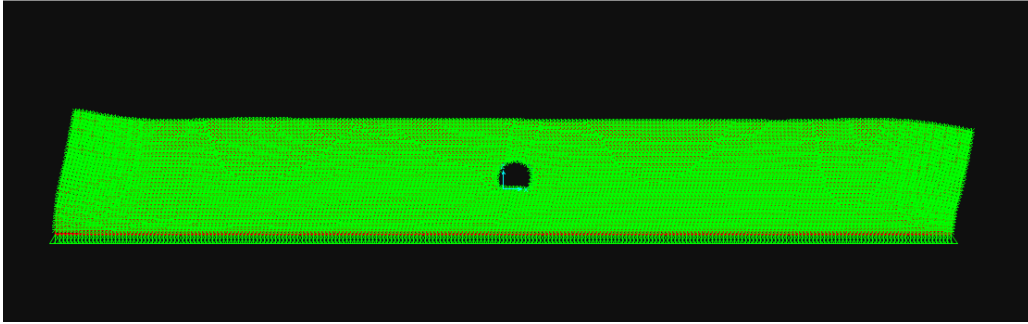
Kesitte oluşan maksimum yer değiştirmeler ise yatay yönde 0,18 metre iken düşey yönde 0,018 metre olarak görülmüştür. Dikdörtgen kesitteki lineer ve nonlinear çözümlerde olduğu gibi at nalı tipi kesitte de nonlinear çözümde maksimum yatay yer değiştirme bir miktar azalırken maksimum düşey yer değiştirme artmıştır (Çizelge 9.16).

**Çizelge 9.16 :** Lineer ve nonlinear çözümde kesitte oluşan maksimum yer değiştirmeler

| TABAKA GENİŞLİĞİ | ANALİZ    | EKSEN | U(maks) |
|------------------|-----------|-------|---------|
| B=240m           | Lineer    | 1     | 0,19m   |
|                  |           | 3     | 0,005m  |
|                  | Nonlinear | 1     | 0,18m   |
|                  |           | 3     | 0,018m  |

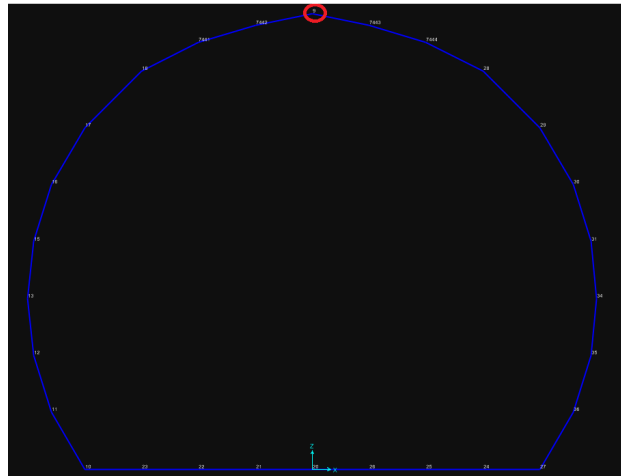


**Şekil 9.34 :** Linear analiz sonucu deforme olmuş model

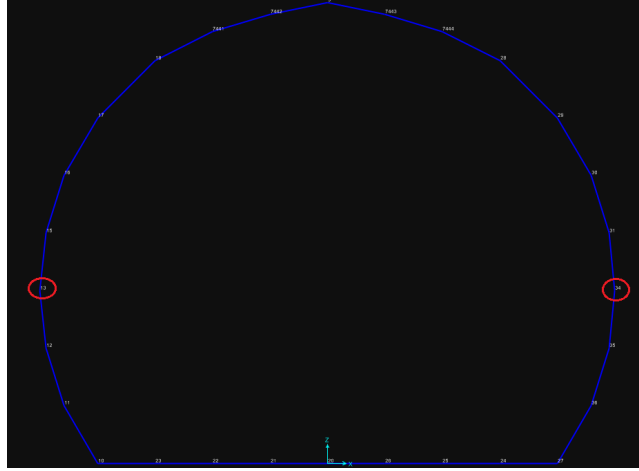


**Şekil 9.35 :** Nonlinear analiz sonucu deforme olmuş model

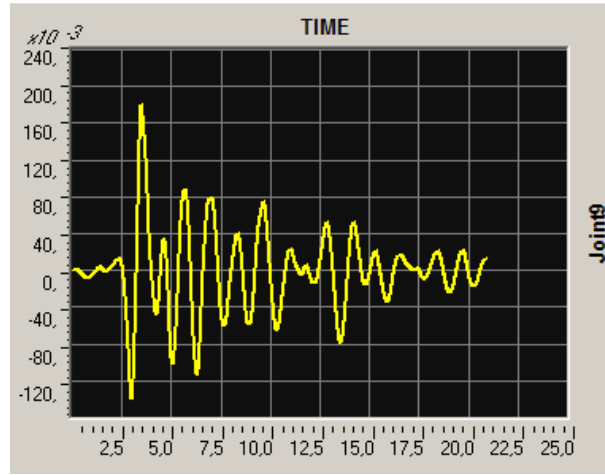
Nonlinear çözümde maksimum yatay yer değiştirme kesitin tepe noktasında oluşurken, maksimum düşey yer değiştirme ise lineer çözümdeki maksimum düşey yer değiştirmeye aynı bölgede oluşmuştur (Şekil 9.36) (Şekil 9.37). Maksimum yatay yer değiştirmenin olduğu noktaya  $x_n$  ve maksimum düşey yer değiştirmenin olduğu noktaya  $y_n$  dersek, bu noktaların zamana bağlı hareketleri aşağıda gösterilmiştir (Şekil 9.38) (Şekil 9.39).



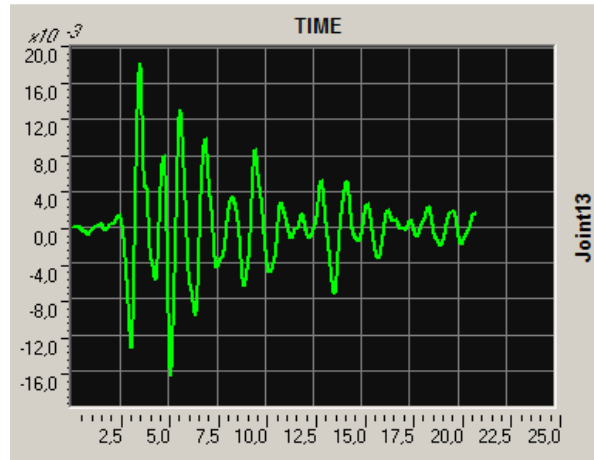
**Şekil 9.36 :** Yatay yönde maksimum yer değiştirmenin olduğu nokta



Şekil 9.37 : Düşey yönde maksimum yer değiştirmenin olduğu noktalar



Şekil 9.38 :  $x_n$  noktasında yatay yer değiştirmenin zamana bağlı olarak değişimi



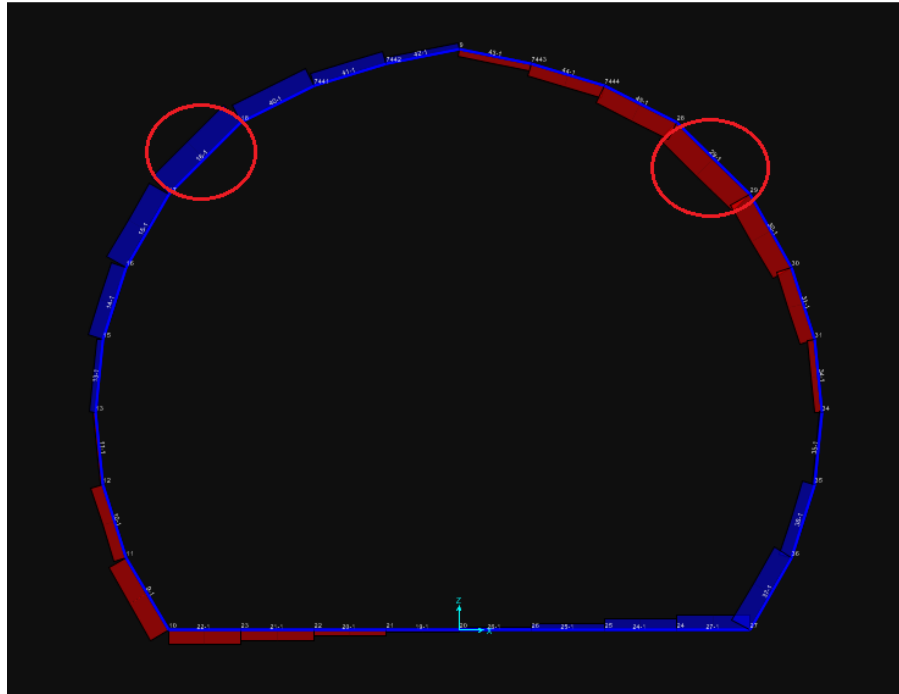
Şekil 9.39 :  $y_n$  noktasında düşey yer değiştirmenin zamana bağlı olarak değişimi

Lineer ve nonlinear çözüm sonuçlarında kesitte oluşan iç kuvvetler karşılaştırmalı olarak tabloda gösterilmiştir (Çizelge 9.17).

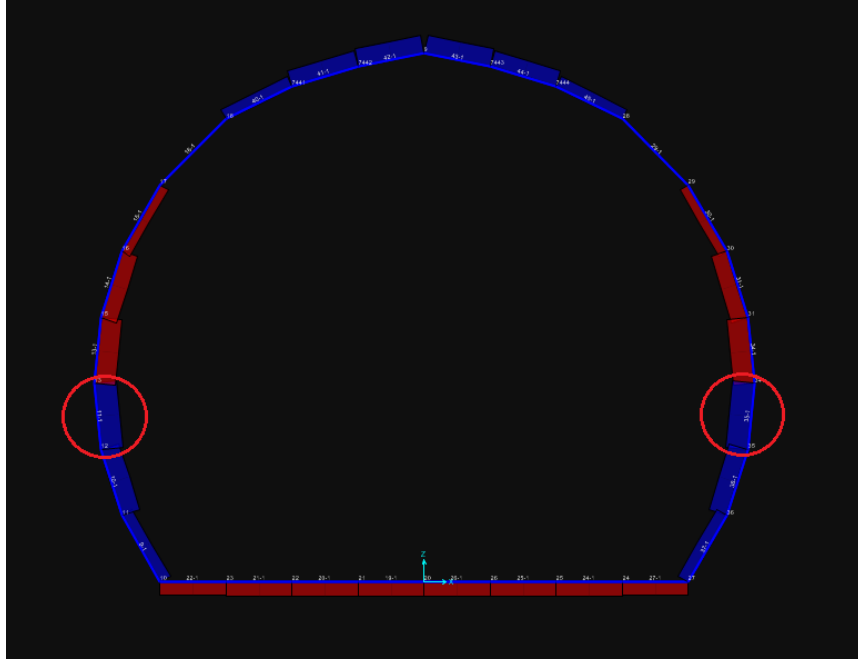
**Çizelge 9.17 :** Lineer ve nonlinear çözümde tünel kesitinde oluşan maksimum iç kuvvetler

| TABAKA GENİŞLİĞİ | ANALİZ    | MAKSİMUM EKSENEL YÜK (P) | MAKSİMUM KESME KUVVETİ (V2) | MAKSİMUM EĞİLME MOMENTİ (M3) |
|------------------|-----------|--------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| B=240m           | Lineer    | 6882,50 kN               | 5181,83 kN                  | 8418,91 kNm                  |
|                  | Nonlinear | 831,41 kN                | 831,78 kN                   | 2176,27 kNm                  |

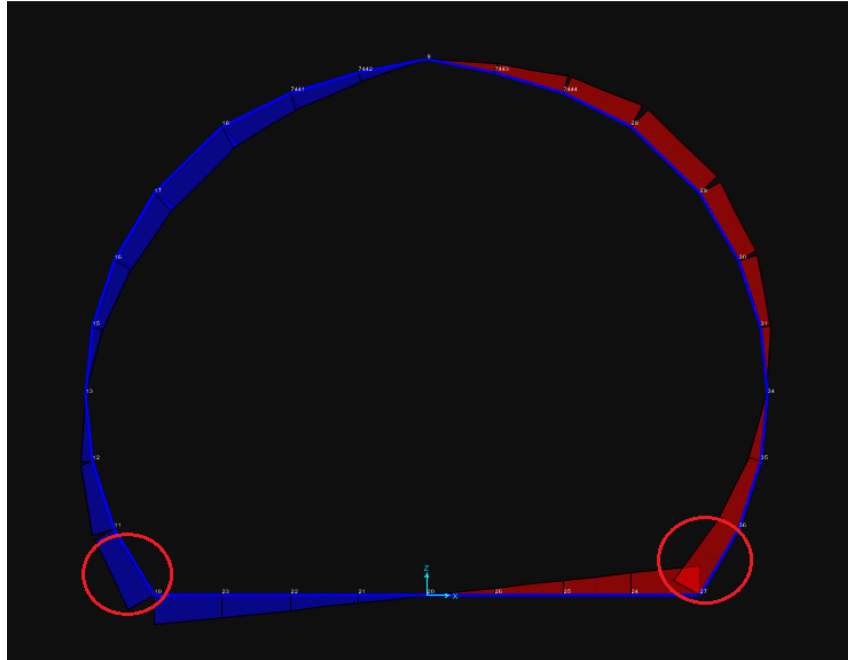
Çizelge 9.17'e göre at nalı tipi tünel kesitinde nonlinear çözüm sonucunda oluşan iç kuvvetlerin lineer çözüm sonuçlarına göre oldukça azaldığı görülmüştür. Maksimum eksenel yük ve kesme kuvveti diğer model ve analizlerin aksine kesitin taban köşelerinde değil farklı bölgelerinde oluşmuştur ve yine depremin 3,53. saniyesinde meydana gelmiştir. Diyagramlar aşağıdaki gibidir (Şekil 9.40) (Şekil 9.41) (Şekil 9.42).



**Şekil 9.40 :** 3,53. saniyedeki eksenel yük diyagramı



Şekil 9.41 : 3,53. saniyedeki kesme kuvveti diyagramı



Şekil 9.42 : 3,53. saniyedeki moment diyagramı

Tasarım aşaması öncesi yapılan on beş farklı model ve çözümün sonuçlarını iki tabloda aşağıdaki gibi özetleyebiliriz (Çizelge 9.18) (Çizelge 9.19).

**Çizelge 9.18 :** Analizler sonucu maksimum yer değiştirmeler için özet tablo

| TABAKA GENİŞLİĞİ (B) | KESİT TİPİ | ANALİZ    | EKSEN | TABAKA BOYUNCA OLUŞAN MAKSİMUM Y. DEĞİŞTİRME | KESİTTE OLUŞAN MAKSİMUM Y. DEĞİŞTİRME |
|----------------------|------------|-----------|-------|----------------------------------------------|---------------------------------------|
| 240m                 | Dikdörtgen | Lineer    | 1     | 0,23m                                        | 0,20m                                 |
|                      |            |           | 3     | 0,0057m                                      | 0,0021m                               |
|                      |            | Nonlineer | 1     | 0,35m                                        | 0,19m                                 |
|                      |            |           | 3     | 0,29m                                        | 0,0164m                               |
|                      | At nalı    | Lineer    | 1     | 0,22m                                        | 0,19m                                 |
|                      |            |           | 3     | 0,0050m                                      | 0,0050m                               |
|                      |            | Nonlineer | 1     | 0,35m                                        | 0,18m                                 |
|                      |            |           | 3     | 0,29m                                        | 0,0180m                               |

**Çizelge 9.19 :** Analizler sonucu maksimum iç kuvvetler için özet tablo

| TABAKA GENİŞLİĞİ (B) | KESİT TİPİ | ANALİZ    | MAKSİMUM EKSENEL YÜK (P) | MAKSİMUM KESME KUVVETİ (V2) | MAKSİMUM EĞİLME MOMENTİ (M3) |
|----------------------|------------|-----------|--------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| 240m                 | Dikdörtgen | Lineer    | 1108,22 kN               | 4032,39 kN                  | 9620,38 kNm                  |
|                      |            | Nonlineer | 1099,91 kN               | 1202,80 kN                  | 4478,76 kNm                  |
|                      | At nalı    | Lineer    | 6882,50 kN               | 5181,83 kN                  | 8418,91 kNm                  |
|                      |            | Nonlineer | 831,41 kN                | 831,78 kN                   | 2176,27 kNm                  |

## **10. ÜRETİLMİŞ DEPREM DATASI İLE TASARIM**

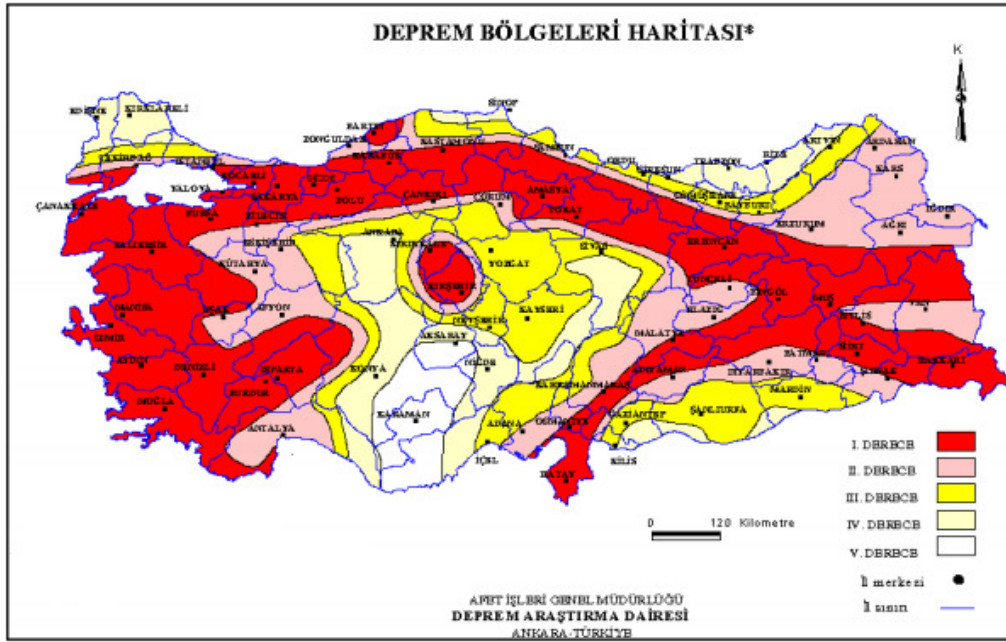
### **10.1 Genel**

Ülkemizde deprem yönetmeliğinde esas alınan mühendislik sismolojisi, yapıların dinamiği, taşıyıcı sistemlerin davranışı ve tasarımı gibi alt başlıklarda yapı sistemlerinin ve malzemelerinin doğrusal olmayan yani nonlinear davranışlarına önem verilmiştir.

Deprem tehlikesini belli bir zaman aralığında ve coğrafi bölgede, depremin herhangi bir parametresinin belirli bir büyüklüğe ulaşması olarak açıklayabiliriz. Deprem tehlikesi olasılıksal ya da kesinsel olarak incelenebilir.

Olasılıksal analizde ele alınan coğrafi bölgenin tektonik yapısı, bölgede etkili olan aktif faylar ve fay mekanizmaları, bölgenin depremselliği, geçmiş yıllarda oluşan depremlerin ne sıklıkta ve büyüklükte olduğu, bir yer hareketi parametresinin depremin büyüklüğü ve faya olan mesafeyle ilişkisi gibi çeşitli konular incelenir. Bu bilgiler istatistiksel olarak ele alındığında söz konusu coğrafi bölgenin belli bir zaman aralığındaki deprem tehlikesi olasılıksal olarak hesaplanabilir. Bunun yanı sıra bölgeyi birinci planda etkileyeceği düşünülen deprem kaynağı dikkate alınarak kesinsel analizde uygulanabilir.

Bayındırlık ve İskan Bakanlığı tarafından hazırlanıp, 1996 yılında Bakanlar Kurulu Kararnamesi ile onaylanan Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası ülkemizde birinci, ikinci, üçüncü ve dördüncü dereceden deprem bölgelerini belirleyip Türkiye genelinde bir deprem tehlikesi analizi ortaya koymuştur (Şekil 10.1).



**Şekil 10.1 : Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası**

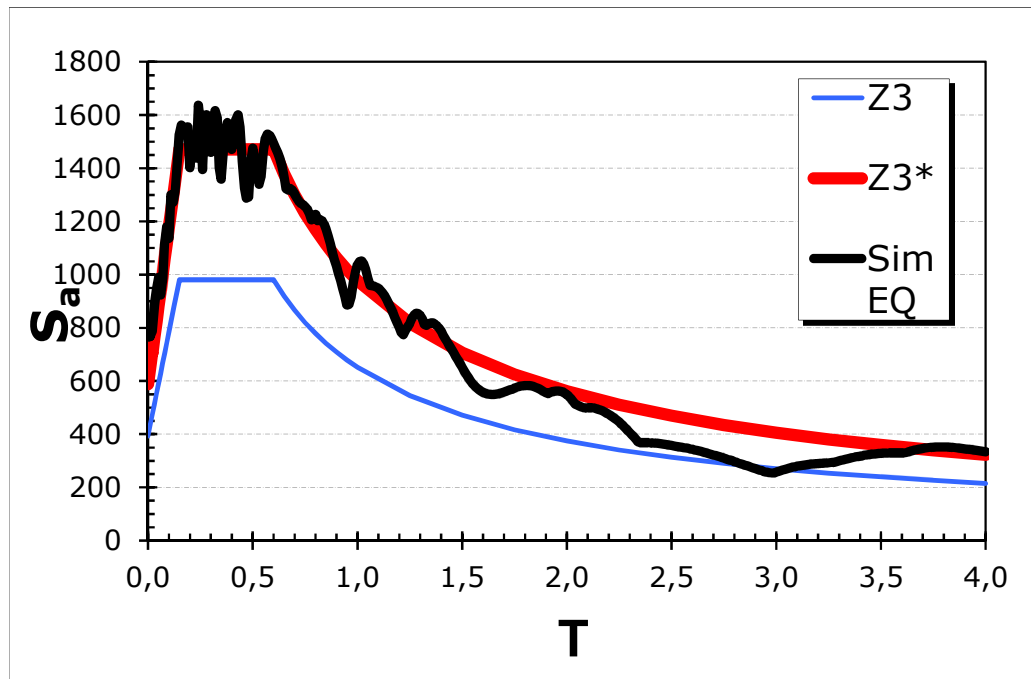
2007 Deprem yönetmeliğine göre depreme dayanıklı yapı tasarımının ana ilkesi yapısal ve yapısal olmayan sistem elemanlarının hafif şiddetteki depremlerde hasar almaması, orta şiddetteki depremlerde alınan hasarın sınırlı ve onarılabılır şekilde olması ve şiddetli depremlerde kalıcı yapısal hasarların sınırlandırılarak can güvenliğinin sağlanması olarak açıklanmıştır.

Farklı düzeylerdeki deprem hareketleri, yapının performansa dayalı değerlendirme ve tasarımında kullanılmak üzere belirlenmiş ve 50 yıllık bir süre içerisindeki aşılma ve tekrar etme durumlarına göre tanımlanmıştır. Bu depremler yönetmelikte şu şekilde belirlenmiştir;

- D1 Deprem Düzeyi : Bu düzeydeki depremin 50 yılda aşılma olasılığı %50 olup, tekrar etme süresi yani dönüş periyodu 72 yıl olarak verilmiştir. D1 düzeyindeki depremin meydana gelme olasılığı oldukça yüksektir ancak düşük şiddetli depremleri ifade eder. D1 depreminin ivme spektrumunun ordinatları yönetmelikte D2 depremi için tanımlanan ivme spektrumunun ordinatlarının yaklaşık yarısı kadardır.
- D2 Deprem Düzeyi : 50 yılda aşılma olasılığı %10, dönüş periyodu ise 475 yıl olan deprem düzeyidir. Oluşma olasılığı çok yüksek olmayan ancak şiddetli depremleri tanımlar.

- D3 Deprem Düzeyi : D3 depreminin 50 yılda aşılma olasılığı %2, dönüş periyodu ise 2475 yıl olarak belirlenmiştir. Meydana gelme olasılığı en düşük olan bu deprem düzeyi aynı zamanda yapının maruz kalabileceği en şiddetli depremi tanımlar. D3 depreminin ivme spektrumunun ordinatları D2 depremi için tanımlanan ivme spektrumunun ordinatlarının yaklaşık 1.5 katı kadardır.

Bu bölümde sap2000 programında hazırlamış olduğumuz dikdörtgen ve at nalı kesite sahip iki farklı modelin tasarımı yapılacaktır. Ancak yeraltı yapıları önemli yapılar sınıfında olduğu için tasarım aşamasında analizlerde kullanmış olduğumuz Erzincan deprem kaydı yerine D3 deprem düzeyine göre üretilmiş bir deprem kaydı kullanılacaktır. Üretilen D3 depreminin ivme spektrumunun ordinatları, D2 depremi için tanımlanan ivme spektrumunun ordinatlarının 1.5 katı alınarak elde edilmiştir (Şekil 10.2). Üretilen deprem kaydının süresi 25 saniye iken maksimum ivme değeri  $7,009 \text{ m/sn}^2$ 'dir.



Şekil 10.2 : D3 depremi için tanımlanan ivme spektrumu

Şekil 10.2’de görülen mavi spektrum D2 deprem düzeyine, kırmızı spektrum 1.5 ile çarpılarak büyütülen D3 deprem düzeyine ve siyah spektrum D3’e göre üretilen deprem kaydına aittir.

## 10.2 Dikdörtgen Kesitli Modelin Üretilen Deprem Kaydı İle Analizi

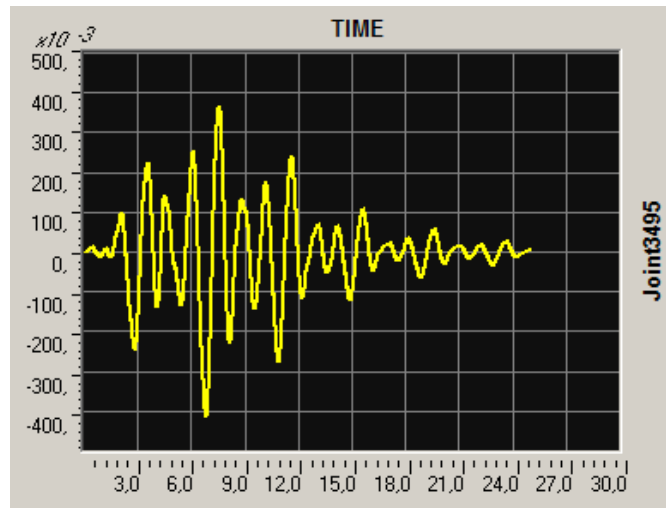
Daha önce oluşturmuş olduğumuz 240 metrelik zemin tabakası içinde kalan dikdörtgen kesitli tünel modeli üretilmiş kayıt ile lineer ve nonlinear olarak ayrı ayrı analiz edilip tasarımı yapılacaktır. Tünellerin tasarımı yapılacağı için deprem yükünün yanı sıra kesite sabit toprak yükleri de etki ettirilecektir.

### 10.2.1 Zaman Tanım Alanında Lineer Analiz Sonuçları

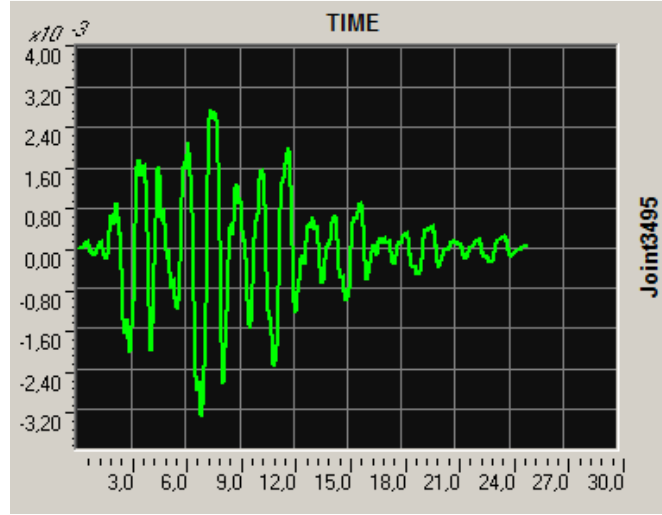
Lineer analiz sonucu modelde oluşan maksimum yer değiştirmeler ve iç kuvvetler aşağıdaki gibidir.

**Çizelge 10.1 :** Tabaka boyunca ve tünel kesiti köşe noktalarında oluşan maksimum yer değiştirmeler

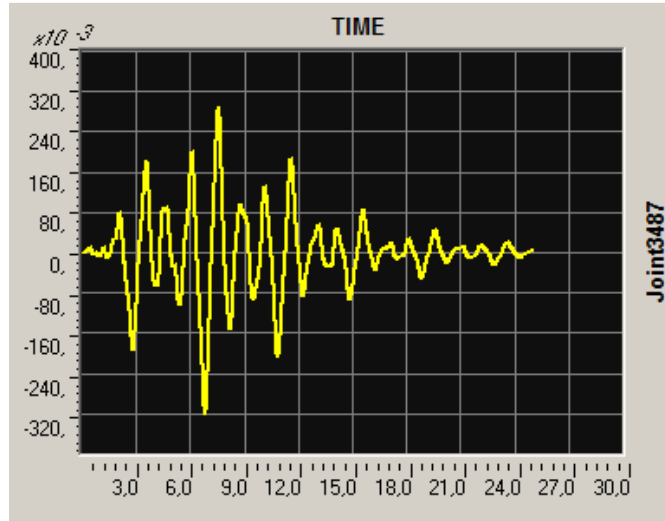
| $U_1(\text{maks})$ | $U_3(\text{maks})$ | $U_1(a-b)(\text{maks})$ | $U_3(a-b)(\text{maks})$ | $U_1(c-d)(\text{maks})$ | $U_3(c-d)(\text{maks})$ |
|--------------------|--------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 0,443m             | 0,022m             | 0,412m                  | 0,004m                  | 0,322m                  | 0,004m                  |



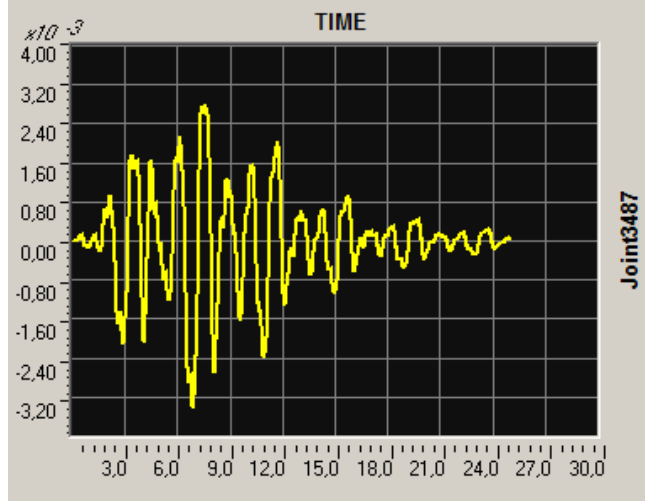
**Şekil 10.3 :** a ve b noktalarında yatay yer değiştirmelerin zamana bağlı olarak değişimi



**Şekil 10.4 :** a ve b noktalarında düşey yer değiştirmelerin zamana bağlı olarak değişimi



**Şekil 10.5 :** c ve d noktalarında yatay yer değiştirmelerin zamana bağlı olarak değişimi

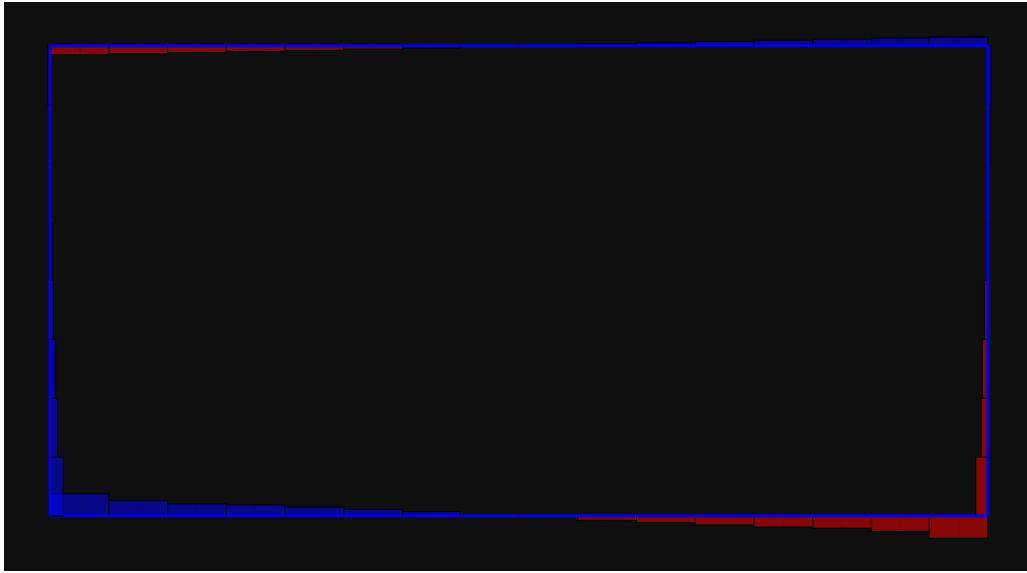


**Şekil 10.6 :** c ve d noktalarında düşey yer değiştirmelerin zamana bağlı olarak değişimi

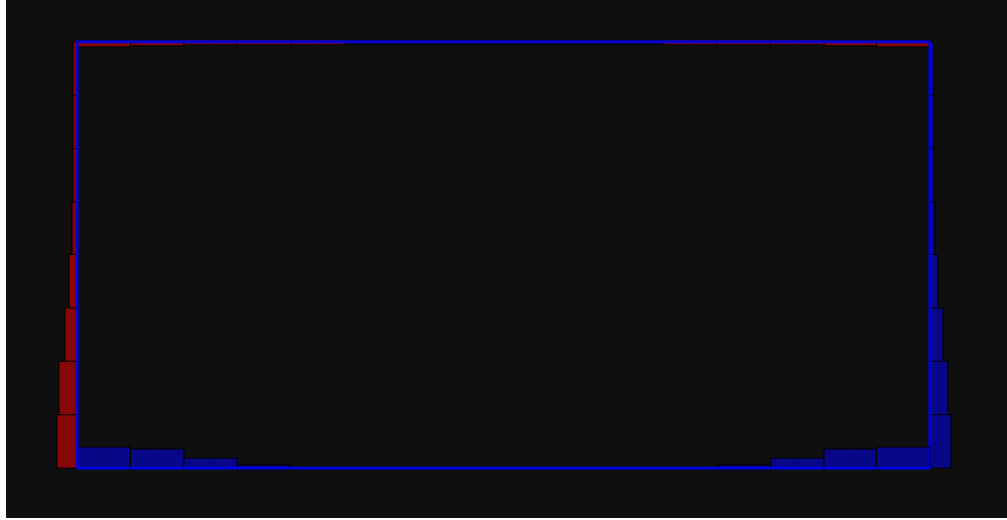
**Çizelge 10.2 :** Kesitte oluşan maksimum iç kuvvetler

| MAKSİMUM EKSENEL YÜK (P) | MAKSİMUM KESME KUVVETİ (V2) | MAKSİMUM EĞİLME MOMENTİ (M3) |
|--------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| 2447,47 Kn               | 7331,54 kN                  | 16137,45 kNm                 |

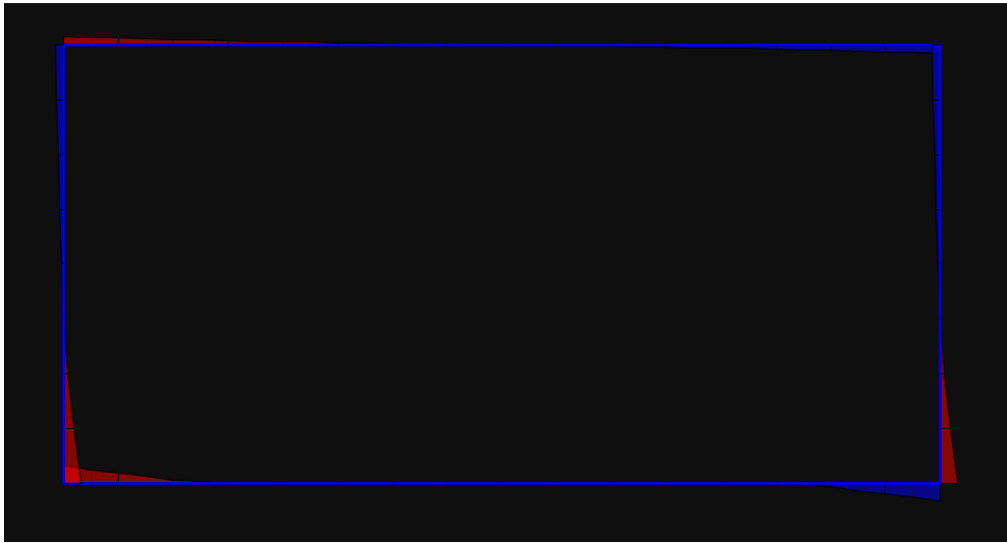
Maksimum eksenel yük üretilen depremin 6,88. saniyesinde, maksimum kesme kuvveti ve eğilme momenti ise 6,895. saniyesinde meydana gelmiştir.



**Şekil 10.7 :** 6,88. saniyedeki eksenel yük diyagramı



**Şekil 10.8 :** 6,895. saniyedeki kesme kuvveti diyagramı



**Şekil 10.9 :** 6,895. saniyedeki moment diyagramı

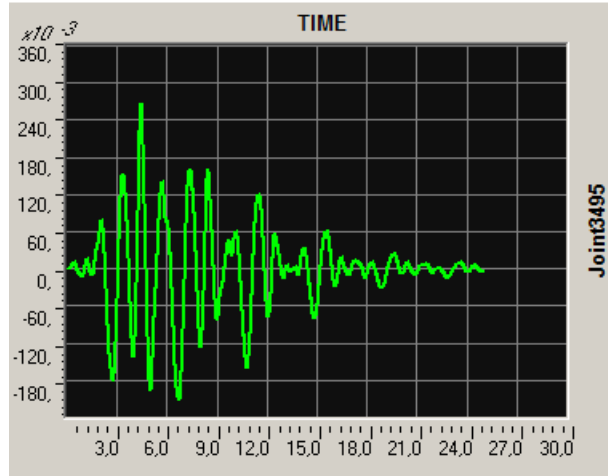
Diyagramlardan anlaşıldığı gibi iç kuvvetler maksimum değerlerine yine kesitin taban köşelerinde ulaşmıştır.

### 10.2.2 Zaman Tanım Alanında Nonlinear Analiz Sonuçları

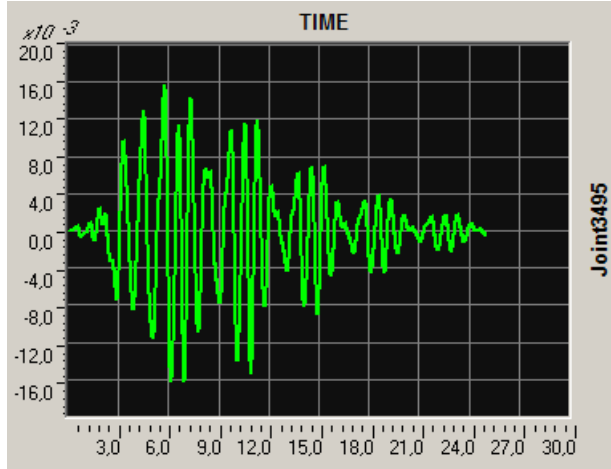
Nonlinear analiz sonucu modelde oluşan maksimum yer değiştirmeler ve iç kuvvetler aşağıdaki gibidir.

**Çizelge 10.3 :** Tabaka boyunca ve tünel kesiti köşe noktalarında oluşan maksimum yer değiştirmeler

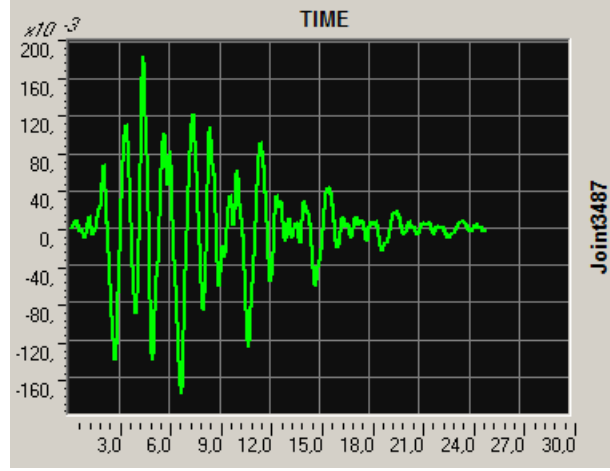
| $U_1(\text{maks})$ | $U_3(\text{maks})$ | $U_1(a-b)(\text{maks})$ | $U_3(a-b)(\text{maks})$ | $U_1(c-d)(\text{maks})$ | $U_3(c-d)(\text{maks})$ |
|--------------------|--------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 0,785m             | 0,757m             | 0,266m                  | 0,199m                  | 0,184m                  | 0,199m                  |



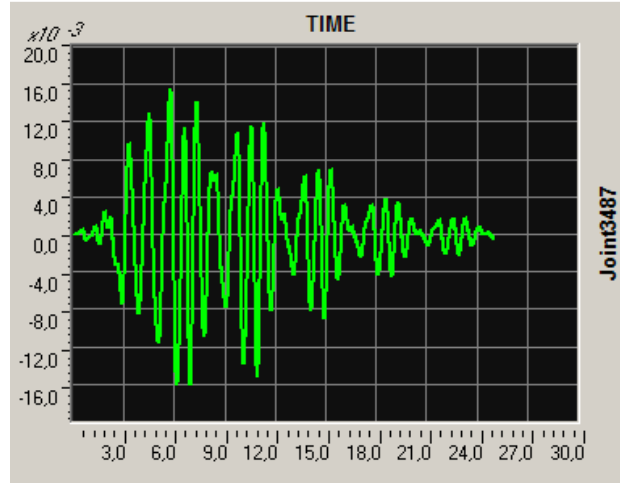
**Şekil 10.10 :** a ve b noktalarında yatay yer değiştirmelerin zamana bağlı olarak değişimi



**Şekil 10.11 :** a ve b noktalarında düşey yer değiştirmelerin zamana bağlı olarak değişimi



**Şekil 10.12 :** c ve d noktalarında yatay yer değiştirmelerin zamana bağlı olarak değişimi

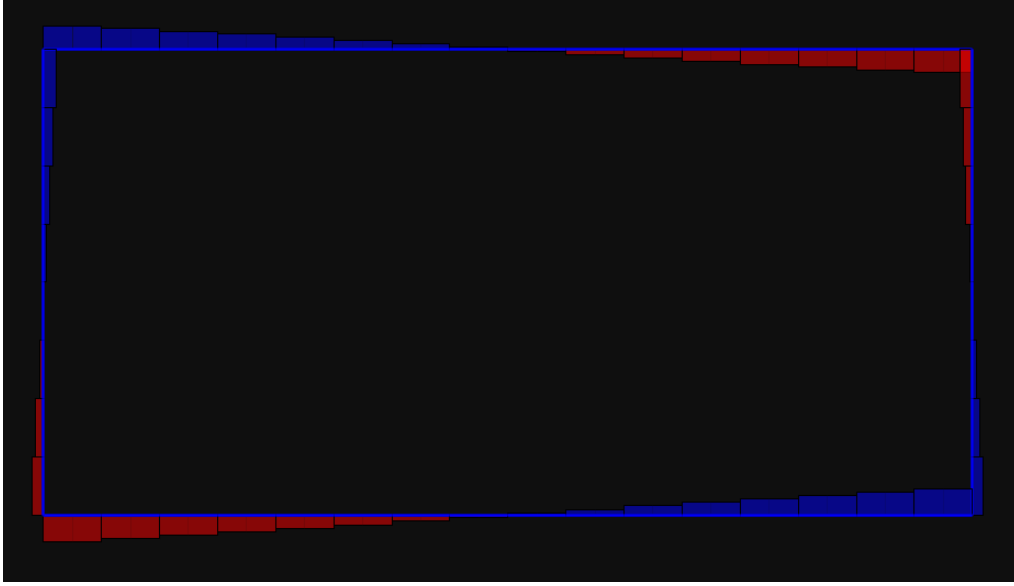


**Şekil 10.13 :** c ve d noktalarında düşey yer değiştirmelerin zamana bağlı olarak değişimi

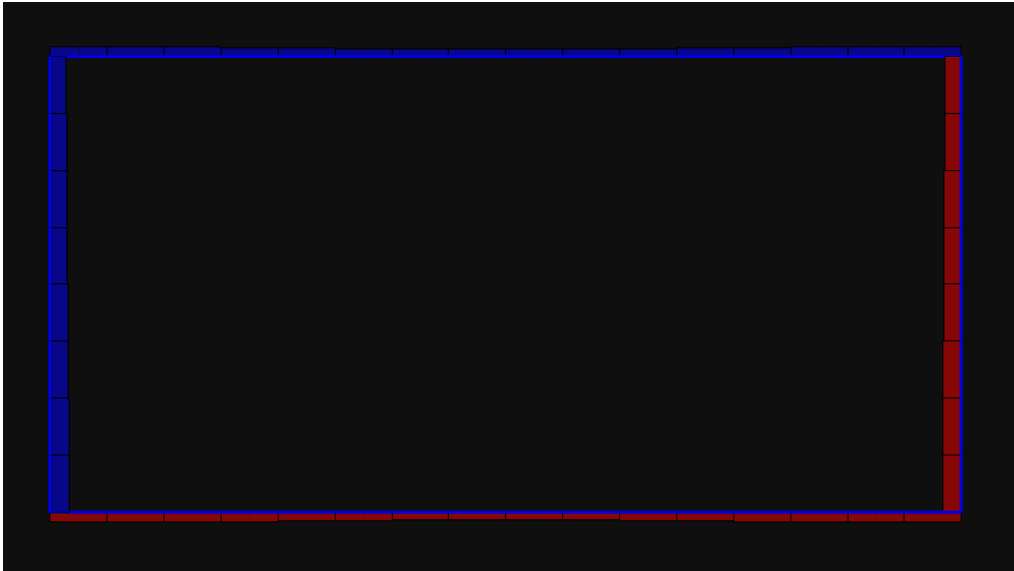
**Çizelge 10.4 :** Kesitte oluşan maksimum iç kuvvetler

| MAKSİMUM EKSENEL<br>YÜK (P) | MAKSİMUM KESME<br>KUVVETİ (V2) | MAKSİMUM EĞİLME<br>MOMENTİ (M3) |
|-----------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| 3303,30 kN                  | 2870,60 kN                     | 10039,46 kNm                    |

Maksimum iç kuvvetler üretilen depremin 4,485. saniyesinde meydana gelmiştir.



Şekil 10.14 : 4,485. saniyedeki eksenel yük diyagramı



Şekil 10.15 : 4,485. saniyedeki kesme kuvveti diyagramı



**Şekil 10.16 :** 4,485. saniyedeki moment diyagramı

Üretilmiş deprem kaydı ile dikdörtgen kesitli tünel üzerinde yapılan lineer ve nonlinear analizler sonucunda nonlinear analizde, lineer analize göre eksenel yük bir miktar artarken kesme kuvveti ve eğilme momenti oldukça azalmıştır (Çizelge 10.6). Tabaka boyunca ve kesitin a, b, c, d noktalarında oluşan maksimum yer değiştirmelerin karşılaştırılması ise aşağıda verilmiştir (Çizelge 10.5).

**Çizelge 10.5 :** Tabaka boyunca ve tünel kesiti köşe noktalarında oluşan maksimum yer değiştirmeler

| ANALİZ    | $U_1(\text{maks})$ | $U_3(\text{maks})$ | $U_1(a-b)\text{maks}$ | $U_3(a-b)\text{maks}$ | $U_1(c-d)\text{maks}$ | $U_3(c-d)\text{maks}$ |
|-----------|--------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Lineer    | 0,443m             | 0,022m             | 0,412m                | 0,004m                | 0,322m                | 0,004m                |
| Nonlinear | 0,785m             | 0,757m             | 0,266m                | 0,199m                | 0,184m                | 0,199m                |

**Çizelge 10.6 :** Kesitte oluşan maksimum iç kuvvetler

| ANALİZ    | MAKSİMUM EKSENEL YÜK (P) | MAKSİMUM KESME KUVVETİ (V2) | MAKSİMUM EĞİLME MOMENTİ (M3) |
|-----------|--------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| Lineer    | 2447,47 kN               | 7331,54 kN                  | 16137,45 kNm                 |
| Nonlinear | 3030,30 kN               | 2870,60 kN                  | 10039,46 kNm                 |

### 10.3 Dairesel Kesitli Modelin Üretilen Deprem Kaydı İle Analizi

Daha önce oluşturmuş olduğumuz 240 metrelik zemin tabakası içinde kalan at nalı kesitli tünel modeli üretilmiş kayıt ile sabit toprak yükü de ilave edilerek lineer ve nonlinear olarak ayrı ayrı analiz edilip tasarımı yapılacaktır.

#### 10.3.1 Zaman Tanım Alanında Lineer Analiz Sonuçları

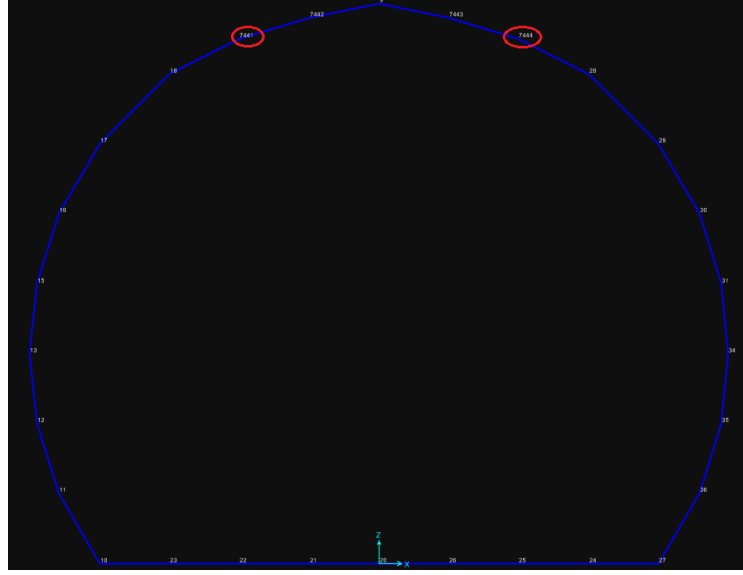
Lineer analiz sonucu modelde oluşan maksimum yer değiştirmeler ve iç kuvvetler aşağıdaki gibidir.

**Çizelge 10.7 :** Tabaka boyunca oluşan maksimum yer değiştirmeler

| ZEMİN TABAKASI BOYUNCA OLUŞAN Y.<br>DEĞİŞTİRMELER |                       |
|---------------------------------------------------|-----------------------|
| U <sub>1</sub> (maks)                             | U <sub>3</sub> (maks) |
| 0,451m                                            | 0,010m                |

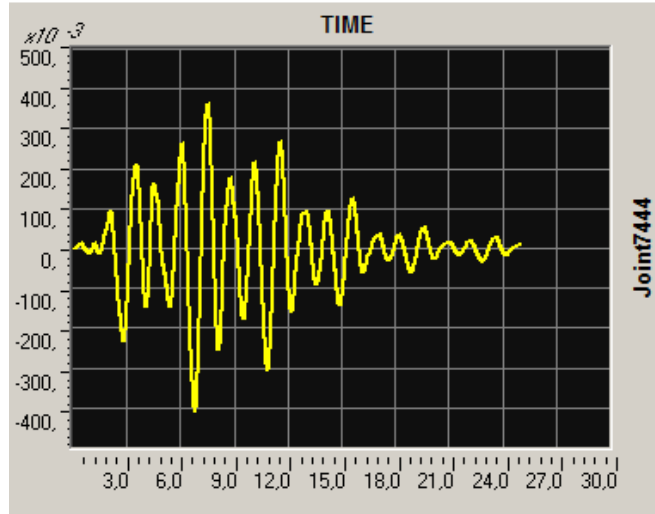
**Çizelge 10.8 :** Kesitte oluşan maksimum yer değiştirmeler

| TÜNEL KESİTİNDE OLUŞAN Y.<br>DEĞİŞTİRMELER |                       |
|--------------------------------------------|-----------------------|
| U <sub>1</sub> (maks)                      | U <sub>3</sub> (maks) |
| 0,409m                                     | 0,010m                |

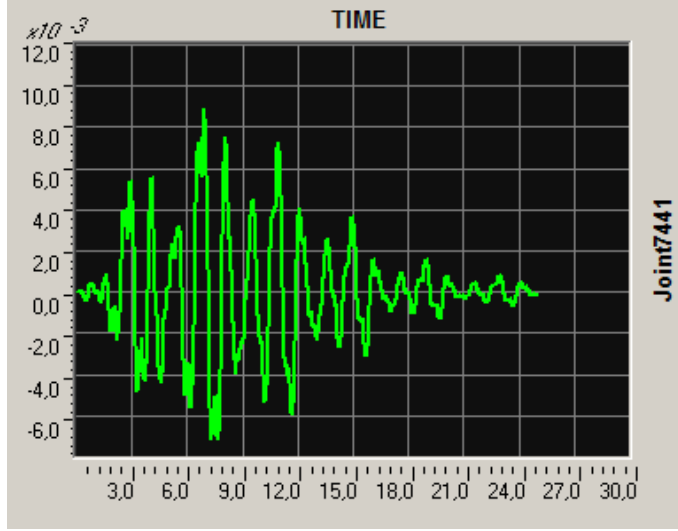


**Şekil 10.17 :** Yatay ve düşey yönde maksimum yer değiştirmenin olduğu noktalar

Hem maksimum yatay hem de maksimum düşey yer değiştirme kesitin aynı noktasında(x) meydana gelmiştir (Şekil 10.17).



**Şekil 10.18 :** x noktasında yatay yer değiştirmenin zamana bağlı olarak değişimi

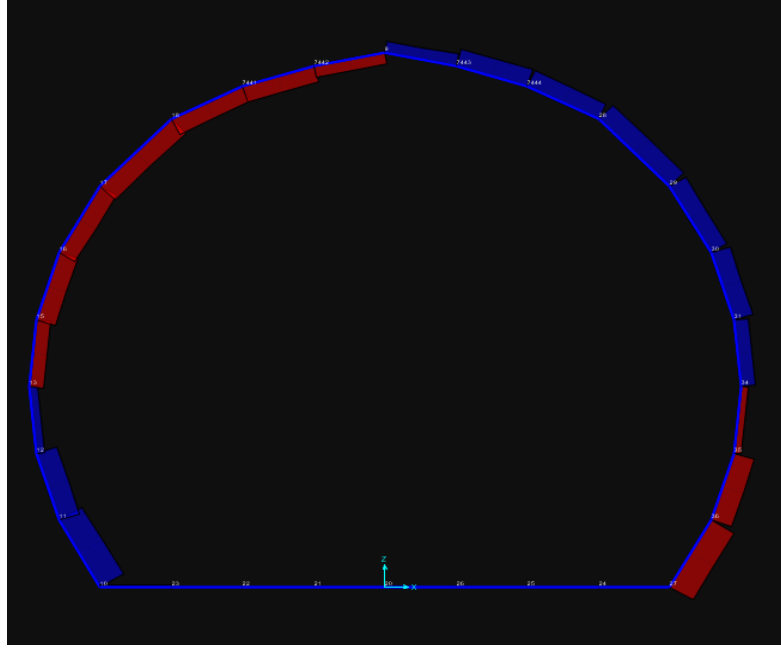


**Şekil 10.19 :** x noktasında düşey yer değiştirmenin zamana bağlı olarak değişimi

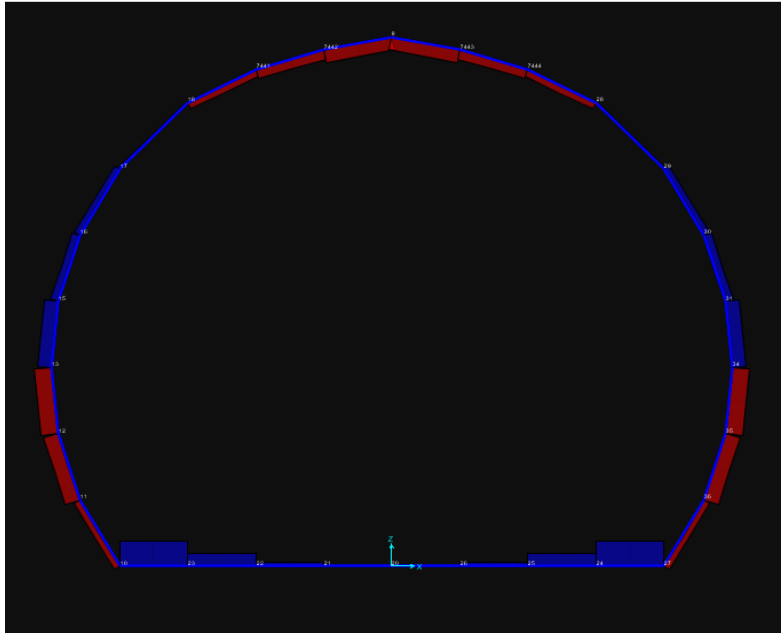
**Çizelge 10.9 :** Kesitte oluşan maksimum iç kuvvetler

| MAKSİMUM EKSENEL YÜK (P) | MAKSİMUM KESME KUVVETİ (V2) | MAKSİMUM EĞİLME MOMENTİ (M3) |
|--------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| 13022,20 kN              | 9405,01 kN                  | 15443,30 kNm                 |

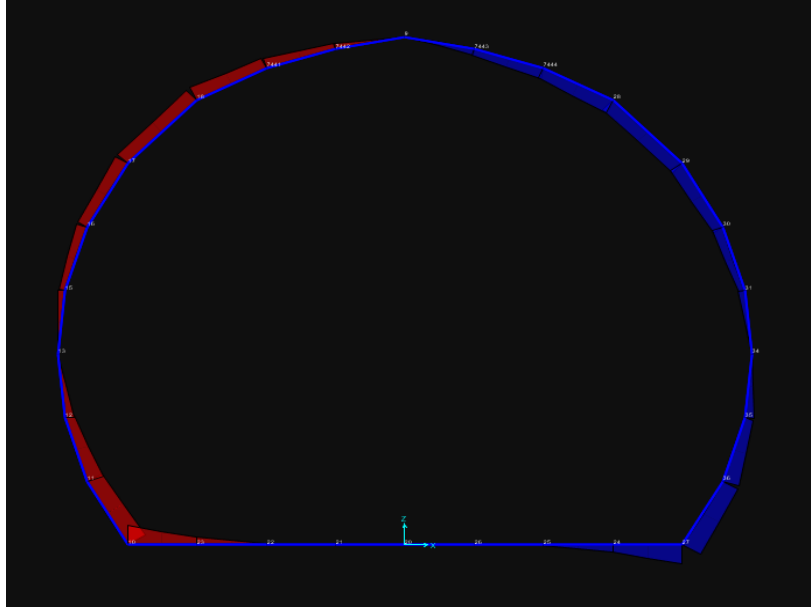
Maksimum eksenel yük üretilen depremin 6,875. saniyesinde, maksimum kesme kuvveti ve eğilme momenti ise 6,895. saniyesinde kesitin taban köşelerinde meydana gelmiştir.



**Şekil 10.20** : 6,875. saniyedeki eksenel yük diyagramı



**Şekil 10.21** : 6,895. saniyedeki kesme kuvveti diyagramı



**Şekil 10.22 : 6,895. saniyedeki moment diyagramı**

### 10.3.2 Zaman Tanım Alanında Nonlineer Analiz Sonuçları

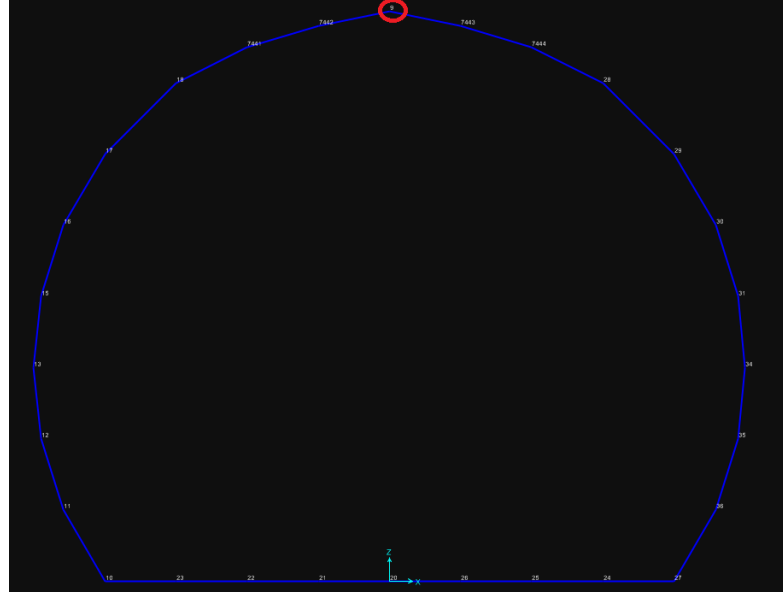
Nonlinear analiz sonucu modelde oluşan maksimum yer değiştirmeler ve iç kuvvetler aşağıdaki gibidir.

**Çizelge 10.10 : Tabaka boyunca oluşan maksimum yer değiştirmeler**

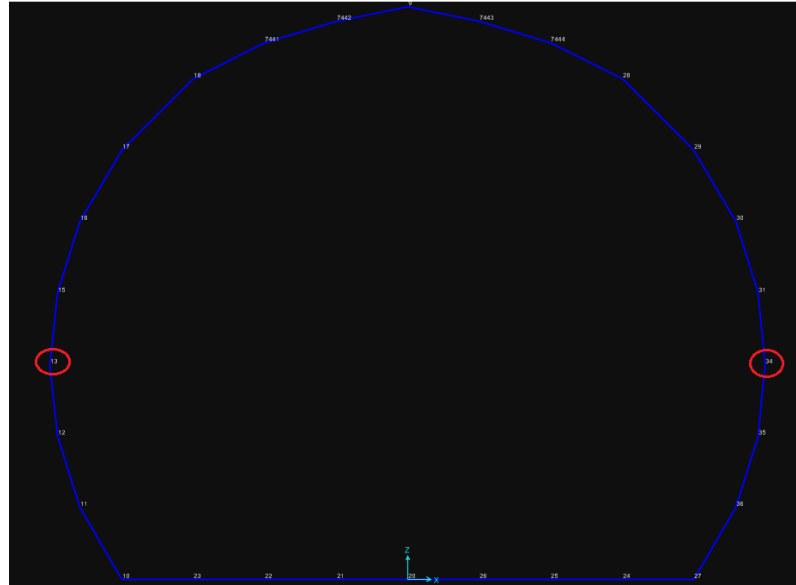
| ZEMİN TABAKASI BOYUNCA OLUŞAN Y. DEĞİŞTİRMELER |                    |
|------------------------------------------------|--------------------|
| $U_1(\text{maks})$                             | $U_3(\text{maks})$ |
| 0,790m                                         | 0,760m             |

**Çizelge 10.11 : Kesitte oluşan maksimum yer değiştirmeler**

| TÜNEL KESİTİNDE OLUŞAN Y. DEĞİŞTİRMELER |                    |
|-----------------------------------------|--------------------|
| $U_1(\text{maks})$                      | $U_3(\text{maks})$ |
| 0,254m                                  | 0,213m             |

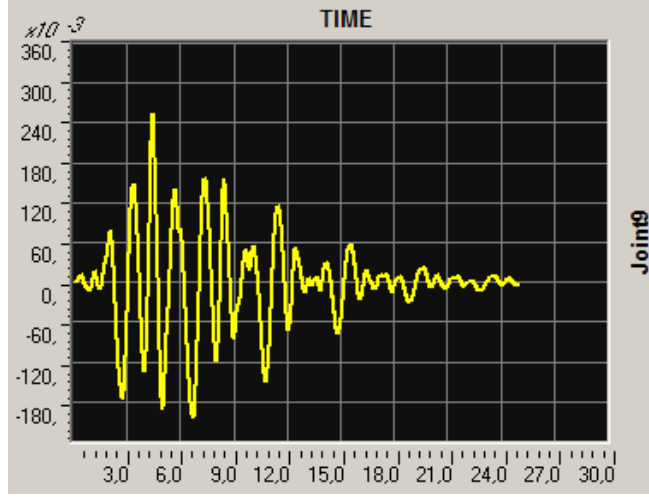


**Şekil 10.23 :** Yatay yönde maksimum yer değıştirmenin oluştuğu nokta

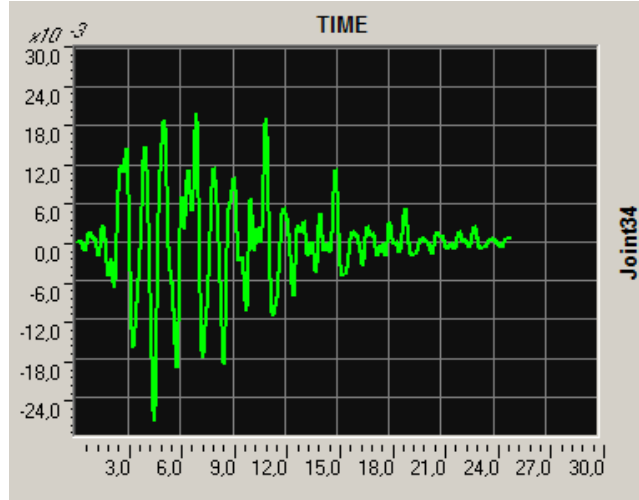


**Şekil 10.24 :** Düşey yönde maksimum yer değıştirmenin oluştuğu noktalar

Maksimum yatay yer değıştirmenin oluştuğu noktaya  $x_n$  ve maksimum düşey yer değıştirmenin oluştuğu noktaya  $y_n$  dersek, bu noktaların zamana bağılı hareketleri aşağıda gösterilmiştir (Şekil 10.25) (Şekil 10.26).



**Şekil 10.25 :**  $x_n$  noktasında yatay yer değiştirmenin zamana bağlı olarak değişimi

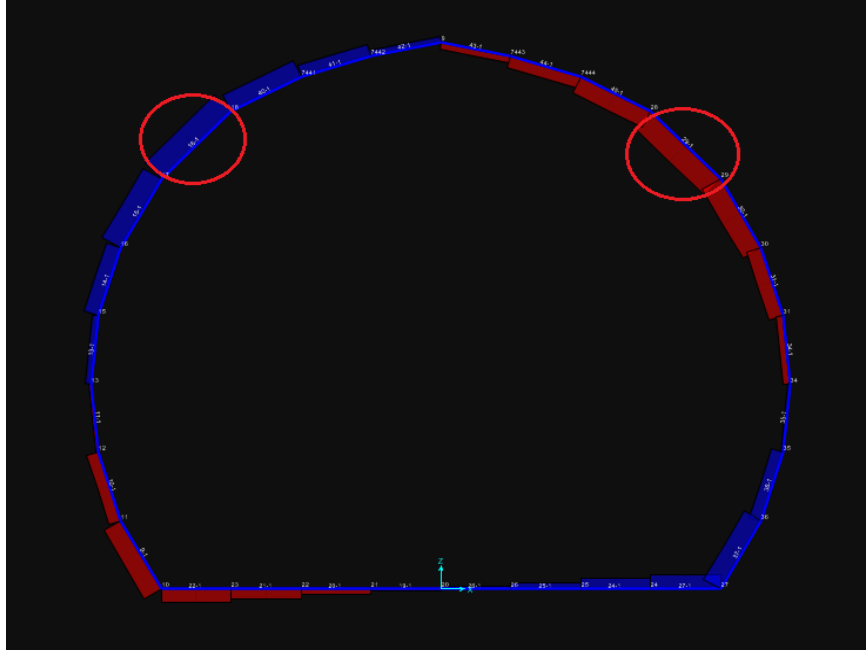


**Şekil 10.26 :**  $y_n$  noktasında düşey yer değiştirmenin zamana bağlı olarak değişimi

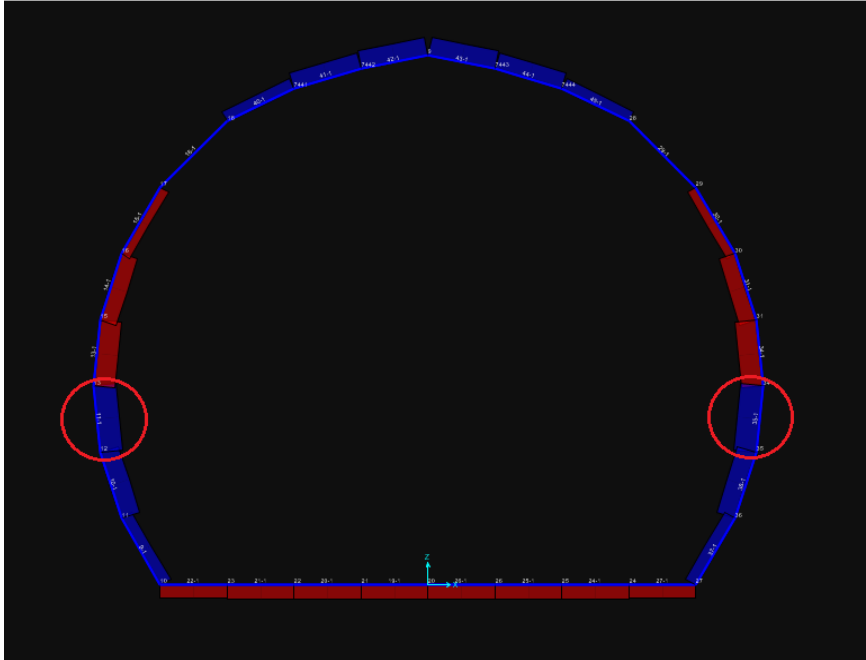
**Çizelge 10.12 :** Kesitte oluşan maksimum iç kuvvetler

| MAKSİMUM EKSENEL YÜK (P) | MAKSİMUM KESME KUVVETİ (V2) | MAKSİMUM EĞİLME MOMENTİ (M3) |
|--------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| 2538,62 kN               | 1865,75 kN                  | 3469,94 kNm                  |

Maksimum eksenel yük üretilen depremin 4,505. saniyesinde, maksimum kesme kuvveti ve eğilme momenti ise 4,48. saniyesinde meydana gelmiştir (Şekil 10.27) (Şekil 10.28) (Şekil 10.29).



Şekil 10.27 : 4,505. saniyedeki eksenel yük diyagramı



Şekil 10.28 : 4,48. saniyedeki kesme kuvveti diyagramı



**Şekil 10.29 :** 4,48. saniyedeki moment diyagramı

At nalı tipi tünel kesitimizde lineer ve nonlinear analiz sonuçları karşılaştırıldığında nonlinear analizde zemin tabakası boyunca oluşan maksimum yer değiştirmenin daha yüksek çıktığı görülmüştür (Çizelge 10.13). Ayrıca nonlinear analizde kesitte oluşan yatay yer değiştirme azalırken düşey yer değiştirme artmıştır (Çizelge 10.14).

**Çizelge 10.13 :** Tabaka boyunca oluşan maksimum yer değiştirmeler

| ANALİZ    | ZEMİN TABAKASI BOYUNCA OLUŞAN Y. DEĞİŞTİRMELER |          |
|-----------|------------------------------------------------|----------|
|           | U1(maks)                                       | U3(maks) |
| Lineer    | 0,451m                                         | 0,010m   |
| Nonlinear | 0,790m                                         | 0,760m   |

**Çizelge 10.14 :** Kesitte oluşan maksimum yer değiştirmeler

| ANALİZ    | TÜNEL KESİTİNDE OLUŞAN Y. DEĞİŞTİRMELER |          |
|-----------|-----------------------------------------|----------|
|           | U1(maks)                                | U3(maks) |
| Lineer    | 0,409m                                  | 0,010m   |
| Nonlinear | 0,254m                                  | 0,213m   |

**Çizelge 10.15 : Kesitte oluşan maksimum iç kuvvetler**

| ANALİZ    | MAKSİMUM EKSENEL YÜK (P) | MAKSİMUM KESME KUVVETİ (V2) | MAKSİMUM EĞİLME MOMENTİ (M3) |
|-----------|--------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| Lineer    | 13022,20 kN              | 9405,01 kN                  | 15443,30 kNm                 |
| Nonlinear | 2538,62 kN               | 1865,75 kN                  | 3469,94 kNm                  |

Kesitte oluşan maksimum iç kuvvetler nonlinear analizde, lineer analize göre oldukça azalmıştır (Çizelge 10.15).

#### **10.4 Dairesel Kesitli Tünelin Kapasite Hesabı Ve Kontrolü**

Yapılan analizler sonucunda belirtilen kesit ve malzeme özelliklerine sahip yeraltı yapılarımızın, başlangıçta belirlediğimiz özelliklere sahip zemin tabakası içerisinde, uyguladığımız D3 tasarım depremi altında ortaya koyduğu performanslar ve oluşan iç kuvvetler incelendiğinde dairesele kesite sahip tünel uygulamasının bu koşullar altında daha uygun ve elverişli olduğu görülmüştür. At nalı tipi tünel kesiti, nonlinear analiz sonuçları incelendiğinde kesme ve eğilme kuvvetlerini karşılamada dikdörtgen tünel kesitine göre daha başarılı olmuştur.

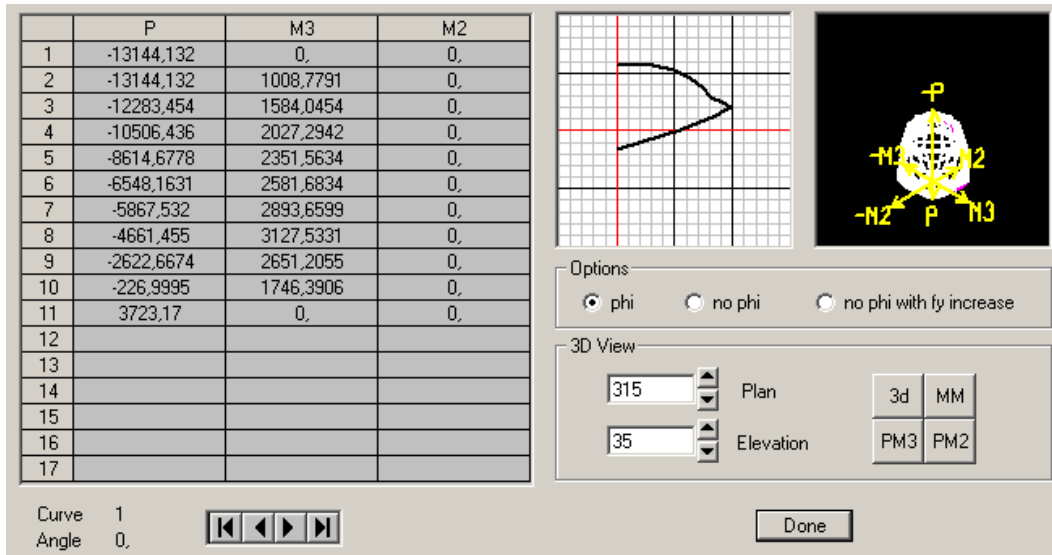
At nalı tipi tünel kesitinin kapasite hesabı yapılarak, oluşan maksimum iç kuvvetlere göre kontrolü sağlanıp tasarım tamamlanacaktır.

##### **10.4.1 Dairesel Kesitli Tünelin P-M Diyagramı**

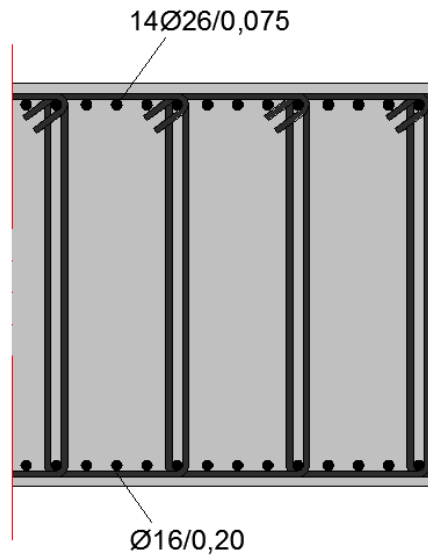
Sap2000 programının, çözümlemeler sırasında kesite atadığı, hemen hemen S420 çeliğine karşılık gelen A615Gr60 donatıları ile, kesitin P-M diyagramı şekildeki gibi olup maksimum iç kuvvetleri karşılamada yetersizdir (Şekil 10.30). Bu nedenle kesit yeniden donatılandırılmıştır.

Tünel kesitinin şekildeki gibi (Şekil 10.31) 1 metrelik parçası baz alınıp yeniden donatılandırıldığında oluşan P-M diyagramı şekildeki gibidir (Şekil 10.32).

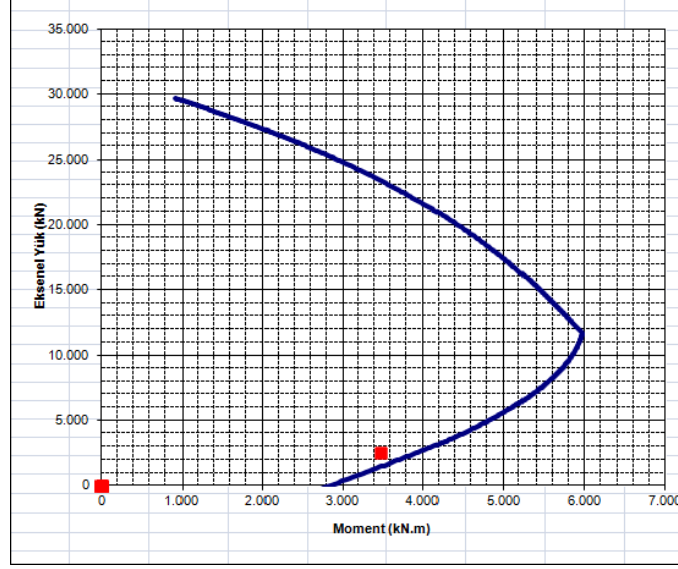
Şekil 10.32’de gösterilen kırmızı nokta analiz sonucu elde ettiğimiz maksimum eksenel kuvvet ve momentin kesiştiği noktayı göstermektedir. Bu nokta kesitin sahip olduğu P-M diyagramının içinde kaldığı için tasarımda güvenli tarafta olduğumuz görülmektedir.



**Şekil 10.30 :** Programın otomatik donatılandığı tünel kesitinin P-M diyagramı



**Şekil 10.31 :** Yeniden donatılandırılan tünel kesitinin görüntüsü



**Şekil 10.32 : Yeniden donatılandırılmış kesitin P-M diyagramı**

#### 10.4.2 Dairesel Kesitli Tünelin Kesme Kuvveti Kontrolü

Eksenel kuvvet ve moment kontrolü sağlandıktan sonra bir diğer kontrol olan kesme kuvveti kontrolü yapılmalıdır.

Betonarme bir kesitin kesmede çatlama dayanımı, daha kesin bir hesaba gerek duyulmadığı durumlarda, denklem 10.1 kullanılarak hesaplanabilir (TS-500).

$$\bullet \quad V_{cr} = 0,65 \cdot f_{ctd} \cdot b_w \cdot d \cdot [1 + \alpha \cdot (N_d / A_c)] \quad (10.1)$$

$$\bullet \quad V_c = 0,8 \cdot V_{cr} + V_w \quad (10.2)$$

$$\bullet \quad V_w = A_{sw} \cdot f_{ywd} \cdot d / s \quad (10.3)$$

$$V_{cr} = 0,65 \cdot 1,28 \cdot 1000 \cdot 1000 \cdot [1 + 0,07 \cdot (2538,62 / 1000000)] = 832,15 \text{ kN}$$

20cm ara ile 16mm lik etriye eklenirse;

$$V_w = 2 \cdot (\pi \cdot d_s^2 / 4) \cdot 365000 \cdot 1 / 0,20 = 733,51 \text{ kN}$$

$$V_c = 0,8 \cdot (832,15) + 733,51 = 1399,23 \text{ kN} < 1865,75 \text{ kN}$$

İlk adımda hesaplanan kesme kapasitesi, kesite etki eden maksimum kesme kuvvetinin altında kalmıştır. Kesme kapasitesinin maksimum kesme kuvvetini karşılayabilecek düzeye gelmesi için beton sınıfının yükseltilmesi, etriye aralığının sıklaştırılması ya da kesitin büyütülmesi gibi işlemler yapılabilir. Yapılan her değişiklikte kesite etki eden maksimum iç kuvvetlerde doğal olarak değişir. Bu

nedenle kapasiteyi arttırmak adına yapılan değişikliklerden sonra iç kuvvetlerde oluşan değişikliklere de ayrıca dikkat edilmelidir.

Tünel kesitimizi 1 metreden 1,25 metreye çıkartıp yeni analiz sonuçlarına göre tekrar kesme kapasitesi hesabı yaparsak;

$$V_{cr} = 0,65 \cdot 1,28 \cdot 1250 \cdot 1250 \cdot [1 + 0,07 \cdot (2582,25 / 1562500)] = 1300,15 \text{ kN}$$

$$V_w = 2 \cdot (\pi \cdot d_s^2 / 4) \cdot 365000 \cdot 1 / 0,20 = 733,51 \text{ kN}$$

$$V_c = 0,8 \cdot (1300,15) + 733,51 = 1773,63 \text{ kN} < 1949,87 \text{ kN}$$

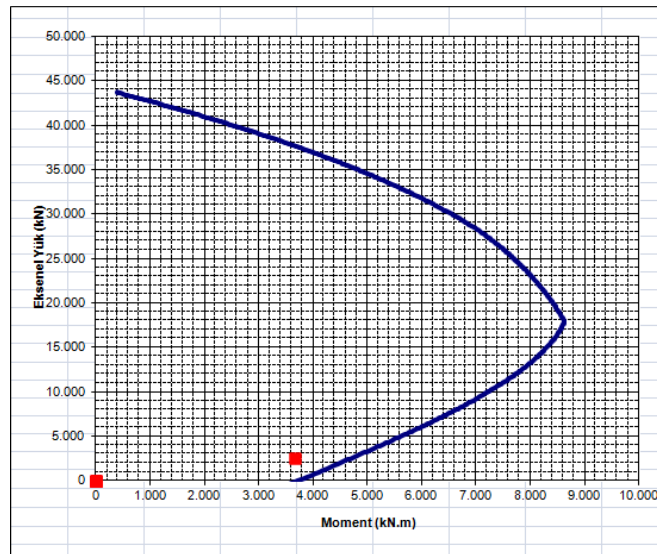
Kapasite yine maksimum kesme kuvvetinin altında kaldığından, etriye aralığını 20cm den 15cm'e düşürüp tekrar hesaplayabiliriz.

$$V_w = 2 \cdot (\pi \cdot d_s^2 / 4) \cdot 365000 \cdot 1 / 0,15 = 978,01 \text{ kN}$$

$$V_c = 0,8 \cdot (1300,15) + 978,01 = 2018,13 \text{ kN} > 1949,87 \text{ kN}$$

Kesitin büyüüp etriye sıklaşmasıyla kesme kapasitesinin, maksimum kesme kuvvetini karşılayabilecek düzeye çıktığı görülmüştür. Bunun yanısıra beton kalitesini arttırmakta bir diğer alternatif yöntemdir.

Kesitte yapılan değişiklikler sonucu 26mm'lik boy donatılarının, 125cm'lik yeni kesitte 7,5cm yerine 10cm ara ile kullanılması da eksenel yük ve moment kapasitesinin yeterli düzeyde kalmasını sağlamaktadır (Şekil 10.33).



Şekil 10.33 : Yeni kesitin P-M diyagramı

## 11. SONUÇLAR

Yeraltı yapılarının tasarımında, bulunduğu zeminin malzeme özellikleri, en önemli unsur kabul edilmiştir. Çünkü yeraltı yapısındaki şekil değiştirmeler, zeminin serbest alan şekil değiştirmeleri ile doğrudan bir ilişki içerisindedir. Zeminde oluşacak şekil değiştirmeler de, zeminin ve şekil değiştirmeleri oluşturacak deprem dalgalarının özelliklerine göre oluşur.

Yapının bulunduğu bölgenin sismik ve jeolojik özellikleri araştırıldıktan sonra deprem dalgalarının yeraltı yapısının eksenine dik ve paralel doğrultuda olmasına göre zeminde oluşacak şekil değiştirmeler ve kuvvetler hesaplanır. Yapı eksenine paralel doğrultulu durumlarda yeraltı yapılarında eksenel şekil değiştirme ve boyuna eğilme deformasyonları incelenir. Eksene dik dalga hareketlerinde ise dairesel kesitlerde ovalleşme ve dikdörtgen kesitlerde eğilme deformasyonları incelenir.

Deformasyonlar hesaplandıktan sonra, yeraltı yapısının bu şekil değiştirmelere ne kadar uyacağı belirlenir. Bu aşamada yapının tasarımına, yapı-zemin etkileşimi ihmal edilerek yada göz önünde bulundurularak devam edilir. Yeraltı yapısının, zemin hareketlerini karşı koymadan aynen kabul ettiği düşünülürse etkileşim ihmal edilir. Ancak yapının zeminde oluşan serbest alan şekil değiştirmelerine karşı koyduğu düşünülürse yapı ve zemin arasında bir etkileşim oranı belirlenip buna göre tasarım yapılır.

Deprem sırasında oluşan zemin şekil değişimleri, zeminin yapıya zorladığı deformasyonlar olarak tanımlanabilir. Yapı bu zorlamaya zeminin rijitliği ile kendi rijitliği arasındaki oran ile ilişkili olarak bir miktar karşı koyabilir ya da aynen kabul edebilir. Bu nedenle zeminde oluşan serbest alan zemin şekil değişimlerinin yapıda oluşabilecek maksimum deformasyonlar olduğu söylenebilir. Dolayısıyla yapı ve zemin arasındaki etkileşim ihmal edildiği takdirde her zaman için güvenli tarafta tasarım yapılmış olunur.

Bu çalışmada ise öncelikle zemin ve kesit modelleri oluşturulurken tabaka genişliği, tabaka içerisinde bırakılan kesit boşluğu ve bu boşluğun toplam tabakaya olan oranı

gibi parametreler değiştirilerek sonuçlar incelenmiş ve bırakılan boşluk içerisine kesitin yerleştirilmesi ile tekrar analiz edilerek oluşan farklar ve gerçeğe olan yakınsaklık belirlenmeye çalışılmıştır.

Yarı sonsuz olarak kabul edilen zemin tabakasının modellenirken mümkün olduğunca büyük modellenmesinin gerçeğe daha yakın sonuç verdiği, sonuçlar arasındaki yakınsamanın görölmesiyle anlaşılmıştır.

Öte yandan sadece zemin tabakası, boşluklu zemin tabakası ve tünel kesiti yerleştirilmiş zemin tabakası analizleri ayrı ayrı yapıldığında sonuçlar arasında çok küçük farklar olduğu görölmüştür.

Çalışmanın ikinci aşamasında, başlangıçta değişkenlik gösteren bütün parametreleri sabitleyip dikdörtgen ve at nalı olarak isimlendirdiğimiz dairesel kesitli iki farklı yer altı yapısının önce Erzincan deprem kaydı ile daha sonra ise D3 düzeyine göre üretilmiş deprem kaydına göre lineer ve nonlineer olarak analizleri yapılmış ve oluşan yer değiştirmeler ve iç kuvvetler incelenmiştir.

Nonlinear özümelerde ortaya çıkan iç kuvvetlerin, lineer çözümlerdeki i kuvvetlere göre daha düşük olduğu gözlemlenirken, dairesel kesitin iç kuvvetleri karşılama açısından daha başarılı olduğu anlaşılmış ve yeraltı yapılarında dikdörtgen kesite göre tasarım ve uygulamasının daha kullanışlı ve tercih edilebilir olduğu ortaya konmuştur.

## KAYNAKLAR

- Arioğlu E., Yılmaz A. O.** (2000). *Çözümlü Problemlerle Yeraltı Mühendislik Yapılarına Deprem Etkileri*.
- Aydinoğlu N.** (2005). *Deprem Mühendisliğinde Temel Kavramlar, İstanbul Proje Koordinasyon Birimi, Örnekler Kitabı*.
- Aykaç S.** (2001). *Deprem Zemin İçerisinde Yapılara Etkisi*.
- Başhan E.** (2010). *Yeraltı Yapılarının Deprem Esnasındaki Davranışı, İstanbul Kültür Üniversitesi*.
- Cüceoğlu C.** (2006). *Yeraltı Yapılarının Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı, İstanbul Teknik Üniversitesi*.
- French Association for Seismic Engineering (AFPS), French Tunneling Association (AFTES)** (2001). *Earthquake Design and Protection of Underground Structures*.
- Hashash, Y. M. A., Hook, J. J., Schmidt, B., Yao, J. I. C.** (2001). *Seismic Design and Analysis of Underground Structures, Tunneling and Underground Space Technology, 16, pp. 247-293*.
- Hatzigeorgiou George D. a, Beskos Dimitri E. b,** (2010). *Soil–structure Interaction Effects on Seismic Inelastic Analysis of 3-D Tunnels*.
- Hopper W. M.** (2009). *Analytical Models For The Nonlinear Seismic Response of Reinforced Concrete Frames, The Pennsylvania State University*.
- Karabork T.,** (2009). *Yapı-Zemin Etkileşimi Dikkate Alınarak Betonarme Yapıların Doğrusal Olmayan 3 Boyutlu Dinamik Analizi*.
- Korkmaz K. A., Demir F.** (2012). *Yapı-Zemin Etkileşiminin Yapıların Deprem Davranışına Etkileri, Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 3 (1): 12-17., Arastırma Makalesi / Research Paper*.
- Kontogianni, V. A., Stiros, S. C.,** (2003). *Earthquake and Sesimic Faulting: Effects on Tunnels, Turkish Journal of Earth Sciences, 12, pp. 153-156*.
- Kramer S. L.** (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*.
- Matsui J., Ohtomo K., Kensei K.** (2004). *Development and Validation of Nonlinear Dynamic Analysis in Seismic Performance Verification of Underground RC Structures*.
- Metro Rail Transit Consultants (DMJM/PBQD/KE/HWA)** (1984). *Informational Annexes to Supplemental Criteria for Seismic Design of Underground Structures, Los Angeles*.
- Metro Rail Transit Consultants (DMJM/PBQD/KE/HWA)** (1984). *Supplemental Criteria for Seismic Design of Underground Structures, Los Angeles*.

- Nihioka, T., Unjoh, S.** (2003). *A Simplified Seismic Design Method for Underground Structures Based on the Shear Strain Transmitting Characteristics.*
- Özmen M. T.** (2007). *Deprem ve Antalya'nın Depremselliği, TMMOB, İnşaat Mühendisleri Odası Antalya Şubesi.*
- Özmen G., Orakdöğen E., Darılmaz K.** (2003). *Örneklerle SAP2000.*
- St. John C. M., Zahrah T. F.** (1987). *Aseismic Design of Underground Structures, Tunneling and Underground Space Technology, 2, pp. 165-197.*
- Stein S.** (2004). *Non-Linear Hyperbolic Model & Parameter Selection.*
- Takeda T., Nielsen N., M. A. Sozen,** (1970). *Reinforced Concrete Response To Simulated Earthquakes.*
- TS-500** (2000). *Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.*
- Unjoh, S., Kusakabe, T., Nakatani, S., Ohshita, T., Wakizaka, Y., Tamura, K., Fukui, J.** (2003). *Site-Specific Design Earthquake Ground Motion and Seismic Design Technology in Next Generation (19).*
- University of Bradford** (2013). *A step-by-step guide for BEng/MEng/MSc students familiarizing with this piece of software, Time-history seismic analysis with SAP2000.*
- Y.M.A., Hashash, J. J., Hook, B. Schmidt, J. I-C. Yao.** (2001). *Seismic Design and Analysis of Underground Structures, in the Journal "Tunnelling and Underground Space Technology", Vol. 16, Nr. 4, pp. 247 – 293.*

## **ÖZGEÇMİŞ**

**Ad Soyad:** Can Berk Keskin

**Doğum Yeri ve Tarihi:** İstanbul, 1988

**Adres:** Haznedar mah. Kınalı cad. No:26/3 Güngören-İSTANBUL

**E-Posta:** cnbrkkskn@hotmail.com

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