



T.C.  
ULAŖTIRMA VE ALTYAPI BAKANLIğI  
KARAYOLLARI GENEL MÜDÜRLÜğÜ  
SANAT YAPILARI DAİRESİ BAŖKANLIđI



ULAŖIM VE DAğITIM TESİSLERİ İÇİN  
DEPREM YÖNETMELİKLERİ HAZIRLANMASI  
VE MÜŖAVİRLİK HİZMETLERİ DANIŖMANLIK  
HİZMET ALIMI İŖİ

**YÜKSEL  
PROJE**

**NİHAİ RAPORA ESAS TASLAK RAPOR  
(ARA RAPOR-3)**

**Karayolu ve Demiryolu Tünelleri ve Diğer Zemin Yapıları  
(Sektör: UlaŖım Tesisleri – A2)**

MAYIS 2019



## İÇİNDEKİLER

<b>SİMGELER.....</b>	<b>3</b>
<b>BÖLÜM 1 – GENEL HÜKÜMLER.....</b>	<b>8</b>
1.1. KAPSAM .....	8
1.2. GENEL İLKELER .....	9
1.3. ÖZEL KONULARDA TASARIM GÖZETİMİ VE KONTROLÜ .....	10
1.4. ATIF YAPILAN STANDART VE YÖNETMELİKLER .....	10
<b>BÖLÜM 2 – DEPREM YER HAREKETİ.....</b>	<b>11</b>
2.1. DEPREM TEHLİKESİ VERİLERİ .....	11
2.2. DEPREM YER HAREKETİ DÜZEYLERİ .....	11
2.3. ZEMİN-BAĞIMSIZ DEPREM YER HAREKETİ SPEKTRUMLARI.....	11
2.4. ZEMİN-BAĞIMLI YATAY DEPREM YER HAREKETİ SPEKTRUMLARI.....	13
2.5. YATAY SPEKTRUM UYUMLU HARMONİK YER HAREKETLERİ.....	13
2.8. ZAMAN TANIM ALANINDA DEPREM YER HAREKETİ .....	15
2.9. EŞ-ZAMANSIZ DEPREM YER HAREKETİ .....	16
2.10. YAPI DAVRANIŞ KAYITÇILARININ YERLEŞTİRİLMESİ .....	16
<b>BÖLÜM 3 – DEPREM ETKİSİ ALTINDA PERFORMANSA GÖRE ANALİZ VE TASARIM ESASLARI.....</b>	<b>16</b>
3.1. PERFORMANSA GÖRE HESAP VE TASARIMIN TEMEL YÖNTEMLERİ .....	16
3.2. RİSK SINIFLARI .....	16
3.3. PERFORMANS HEDEFLERİ .....	17
3.4. UYGULANACAK ANALİZ/TASARIM YÖNTEMLERİ.....	17
<b>BÖLÜM 4 – TÜNEL VE YERALTI YAPILARININ DEPREM DAVRANIŞ ANALİZİ .....</b>	<b>18</b>
4.1. DEFORMASYON TİPLERİ .....	18
4.2. HESAP/TASARIM FELSEFESİ VE YÖNTEMLERİ .....	19
4.3. TASARIM SÜRECİ .....	20
<b>BÖLÜM 5 – YER SARSINTISI İÇİN BOYUNA YÖNDE ANALİZ VE TASARIM .....</b>	<b>22</b>
5.1. GENEL KURALLAR .....	22
5.2. SERBEST SAHA ZEMİN YERDEĞİŞTİRME HESABI .....	22
5.3. SAYISAL HESAP/TASARIM YÖNTEMLERİ (C-TİPİ HESAP) .....	27
<b>BÖLÜM 6 – YER SARSINTISI İÇİN ENİNE YÖNDE ANALİZ VE TASARIM .....</b>	<b>31</b>
6.1. SERBEST-SAHA ZEMİN YERDEĞİŞTİRME HESABI.....	31
6.2. DAİRESEL KESİTLİ TÜNELLER İÇİN ENİNE HESAP/TASARIM (KAPALI FORM ÇÖZÜM) .....	33
6.3. DİKDÖRTGEN KESİTLİ TÜNEL/YERALTI YAPISI İÇİN ENİNE ANALİZ VE TASARIMI (YARI-KAPALI FORM ÇÖZÜM) .....	38
6.4. SAYISAL ANALİZ/TASARIM YÖNTEMLERİ.....	44
6.5. DÜŞEY ŞAFT YAPILARININ ENİNE ANALİZ/TASARIMI .....	50
<b>BÖLÜM 7 – ZEMİN ÖZELLİKLERİNİN VE DEPREM ETKİSİ ALTINDA ZEMİN DAVRANIŞININ BELİRLENMESİNE İLİŞKİN KURALLAR .....</b>	<b>50</b>
<b>BÖLÜM 8 – KALICI ZEMİN HAREKETLERİ İÇİN ANALİZ VE TASARIM.....</b>	<b>50</b>
8.1. FAY HAREKETLERİ .....	51
8.2. HEYELAN HAREKETLERİ .....	52
8.3. SIVILAŞMA VE YANAL YAYILMA HAREKETLERİ .....	52
<b>BÖLÜM 9 – DEPREM ETKİSİ ALTINDA TÜNEL KAPLAMASI VE YERALTI YAPISI TAŞIYICI SİSTEM ELEMANLARININ TASARIMINA İLİŞKİN ÖZEL KURALLAR .....</b>	<b>53</b>
<b>BÖLÜM 10 – DEPREM VE RELATİF HAREKET DERZLERİ VE ÖZEL BAĞLANTILARI .....</b>	<b>53</b>



10.1. JEOLJİK/GEOTEKNİK ORTAM RİJİTLİK DEĞİŞİMLERİ .....	53
10.2 YAPILAR ARASI BAĞLANTILAR .....	55
<b>BÖLÜM 11 –MEVCUT TÜNEL VE YERALTI YAPILARININ DEPREM PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ VE GÜÇLENDİRME TASARIMI İÇİN GENEL KURALLAR.....</b>	<b>56</b>
11.1. GENEL YAKLAŞIM .....	56
11.2. MEVCUT TÜNEL/YERALTI YAPILARINDAN BİLGİ TOPLANMASI VE PERFORMANS DEĞERLENDİRİLMESİ ..	56
11.3 MEVCUT TÜNEL/YERALTI YAPILARININ DEPREM GÜÇLENDİRMESİ.....	57
<b>BÖLÜM 12– DEPREM ERKEN UYARI – TRAFİK DURDURMA SİSTEMİ .....</b>	<b>58</b>

## SİMGELER

$A_I$  = Tünel kaplaması kesit alanı ( $m^2$ )

$A_S = d_S$  = Harmonik S-dalgası yerdeğiştirme genliği (en büyük parçacık yerdeğiştirmesi) (m)

$a_{max}$  = Zemin yüzeyindeki enbüyük yatay ivme ( $m/s^2$ )

$a_S$  = S-dalgası enbüyük parçacık ivmesi ( $m/s^2$ )

$C$  = Tünel kesiti dış çeper toplam uzunluğu (m)

$C_C$  = Dairesel kesitli tünel kaplaması Sıkışabilirlik Oranı

$C_R$  = Dikdörtgen kesitli tünel için Sıkışabilirlik oranı

$c$  = Deprem dalgası (jenerik) yayılma hızı (m/s)

$c_S$  = S-dalgası yayılma hızı (m/s)

$c'_S$  = S-dalgası etkin yayılma hızı (m/s)

$c_{Se}$  = S-dalgası görünür (tünel eksenine göre) yayılma hızı (m/s)

$D$  = Dairesel tünel kaplaması çapı veya dikdörtgen kesitli tünel yüksekliği (m)

DD-1 = 50 yılda aşılma olasılığı %2 (tekrarlanma periyodu 2475 yıl) olan deprem yer hareketi düzeyi

DD-2 = 50 yılda aşılma olasılığı %10 (tekrarlanma periyodu 475 yıl) olan deprem yer hareketi düzeyi

DD-2a = 100 yılda aşılma olasılığı %50 (tekrarlanma periyodu 144 yıl) olan deprem yer hareketi düzeyi

DD-3 = 50 yılda aşılma olasılığı %50 (tekrarlanma periyodu 72 yıl) olan deprem yer hareketi düzeyi  $D_i$  = Dairesel tünel kaplaması iç çapı olmaktadır.

$D_o$  = Dairesel tünel kaplaması dış çapı olmaktadır.

$d_S$  = S-dalgası enbüyük parçacık yerdeğiştirmesi (m)

$E_I$  = Tünel kaplaması esneklik modülü ( $N/m^2$ )

$EQ_b$  = Deprem yer hareketine bağlı boyuna etkiler

$EQ_e$  = Deprem yer hareketine bağlı enine etkiler

$E_S$  = Zemin ortamı esneklik modülü ( $N/m^2$ )

$EX$  = Tünel kazısı nedeniyle oluşan statik yük etkileri

$E1$  = Zemin ve su düşey yüklerinden kaynaklanan etkiler

$E2$  = Zemin ve su yatay yüklerinden kaynaklanan etkiler

$F_C$  = Dairesel kesitli tünel kaplaması için Esneklik Oranı

$F_R$  = Dikdörtgen kesitli tünel için Esneklik Oranı

$F_S$  = Kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayısı

$F_1$  = 1.0 saniye periyot için yerel zemin etki katsayısı

$f$  = Tünel-zemin arayüzünde birim boy başına maksimum sürtünme kuvveti (N/m)

$f_D$  = Uzun periyot zemin büyütme faktörü

$G$  = Yapısal zati (ölü) yük etkileri

$G_S$  = Zemin ortamı kesme modülü (N/m<sup>2</sup>)

$G'_S$  = Zemin ortamının etkin (kesme birim şekildeğiştirme seviyesi ile uyumlu) kesme modülü (Pa)

$g$  = Yerçekimi ivmesi ( $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ )

$H$  = Dikdörtgen kesitli yapı yüksekliği (m)

$h$  = Zemin yüzeyinden tünel alt seviyesine ölçülen zemin örtüsü kalınlığı (m)

$h_w$  = Yapı tabanından ölçülen su tablası yüksekliği

$I_e$  = Tünel kaplamasının, birim boy başına, etkin atalet momenti

$I_l$  = Tünel kaplamasının birim boy başına atalet momenti (m<sup>3</sup>)

$I_1$  = Tünel kaplamasının, birim boy başına, atalet momenti ( $I_1 = 1 \times t_1^3/12$ )

KH = Kontrollü Hasar Performans Düzeyi

KK = Kesintisiz Kullanım Performans Düzeyi

$K_1$  = Tünel kaplaması birinci davranış katsayısı (veya ovalleşme katsayısı)

$K_2$  = Tünel kaplaması ikinci davranış katsayısı

$k_a$  = Boyuna zemin yayı katsayısı

$k_l$  = Yapı kesiti birim boy başına yanal rijitliği (N/m)

$k_S$  = Zemin elemanı birim boy başına kesme rijitliği (N/m)

$k_t$  = Enine (yanal) zemin yayı katsayısı

$k_Y$  = Yapı kesiti birim boy başına yamulma rijitliği (N/m)

$L_F$  = Fay düzlemine olan mesafe [km]

$M_l$  = Tünel enkesit düzlemi üzerinde oluşan moment (Nm)

$M_{l,max}$  = Tünel enkesit düzlemi üzerinde oluşan momentin enbüyük değeri (Nm)

$M_{t,max}$  = Enine hesapda kaplama kesitinde, birim başına oluşan momentin enbüyük değeri (Nm)

$M_{l,max,zye}$  = Tünel enkesit düzlemi üzerinde oluşan momentin, zemin yapı etkileşiminin göz önüne alınması durumundaki, enbüyük değeri (Nm)

$M_{max}$  = Tünel kaplaması boyuna kesitinde oluşan birim boy başına enbüyük eğilme momenti (Nm)

$M = M(\theta)$  = Tünel kaplaması boyuna kesitinde oluşan birim boy başına eğilme momenti (Nm)

$N_l$  = Tünel enkesit düzlemi üzerinde oluşan normal kuvvet (N)

$N_{l,max}$  = Tünel enkesit düzlemi üzerinde oluşan normal kuvvetin enbüyük değeri (N)

$N_{t,max}$  = Enine hesapda kaplama kesitinde, birim başına oluşan normal kuvvetin enbüyük değeri (N)

$N_{l,max,zye}$  = Tünel enkesit düzlemi üzerinde oluşan normal kuvvetin, zemin yapı etkileşiminin göz önüne alınması durumundaki, enbüyük değeri (N)

$Q$  = Hareketli yük etkileri

$R$  = Dikdörtgen kesitli tünel / yeraltı yapısı Yamulma Katsayısı

$RF_1$  ve  $RF_2$  = Boyuna hesap için zemin-yapı etkileşimi bağlantılı indirgeme faktörleri

RS-1 = Normal Risk Sınıfı

RS-2 = Yüksek Risk Sınıfı

$r$  = Dairesel tünel kaplaması yarıçapı veya, dikdörtgen kesitli tünel yarı yüksekliği (m)  
 $r_h$  = Tünel konumundaki enbüyük yatay ivmenin belirlenmesi için (zemin yüzeyindeki) yatay maksimum ivmeye ( $a_{max}$ ) derinliğe ( $z$ ) bağlı olarak uygulanacak azaltma faktörü.

$SA_{144}$  = 144 yıllık aşılma olasılığına karşı gelen spektral ivme değerleri

$SA_{475}$  = 475 yıllık aşılma olasılığına karşı gelen spektral ivme değerleri

$SA_{72}$  = 72 yıllık aşılma olasılığına karşı gelen spektral ivme değerleri

$S_{D1}$  = 1.0 saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayısı (boyutsuz)

$S_{DS}$  = Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı (boyutsuz)

$SH$  = Sınırlı Hasar Performans Düzeyi

$S_s$  = Kısa periyot harita spektral ivme katsayısı (boyutsuz)

$S_1$  = 1.0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı [(boyutsuz)

$S'_1$  = 1.0 saniye periyot için zemin-bağımsız spektral ivme katsayısı (boyutsuz)

$S'_s$  = Kısa periyot için zemin-bağımsız spektral ivme katsayısı (boyutsuz)

$T = T(\theta)$  = Tünel kaplaması boyuna kesitinde oluşan birim boy başına normal kuvvet (N)

$T_A$  = Yatay elastik tasarım ivme spektrumu köşe periyodu (s)

$T_a$  = Spektrum uyumlu harmonik deprem yer ivmesi periyodu (s)

$T_{AD}$  = Düşey elastik tasarım ivme spektrumu köşe periyodu (s)

$T_B$  = Yatay elastik tasarım ivme spektrumu köşe periyodu (s)

$T_{BD}$  = Düşey elastik tasarım ivme spektrumu köşe periyodu (s)

$T_d$  = Spektrum uyumlu harmonik deprem yer yerdeğiştirme periyodu (s)

$T_L$  = Yatay elastik tasarım spektrumunda sabit yerdeğiştirme bölgesine geçiş periyodu (s)

$T_{LD}$  = Düşey elastik tasarım spektrumunda sabit yerdeğiştirme bölgesine geçiş periyodu (s)

$t_1$  = Tünel kaplama kalınlığı (m)

$T_{max}$  = Tünel kaplaması boyuna kesitinde oluşan birim boy başına enbüyük normal kuvvet (N)

$T_P$  = Yapı hakim doğal titreşim periyodu (s)

$T_v$  = Spektrum uyumlu harmonik deprem yer hızı periyodu (s)

$U$  = Yapısal dayanım kapasitesi

$V = V(\theta)$  = Tünel kaplaması boyuna kesitinde oluşan birim boy başına kesme kuvveti (N)

$V_l$  = Tünel enkesit düzlemi üzerinde oluşan kesme kuvveti (N)

$V_{l,max}$  = Tünel enkesit düzlemi üzerinde oluşan kesme kuvvetin enbüyük değeri (N)

$V_{l,max,zye}$  = Tünel enkesit düzlemi üzerinde oluşan normal kuvvetin, zemin yapı etkileşiminin göz önüne alınması durumunda, enbüyük değeri (N)

$V_{max}$  = Tünel kaplaması boyuna kesitinde oluşan birim boy başına enbüyük kesme kuvveti (N)

$v_s$  = S-dalgası enbüyük parçacık hızı (m/s)

$v_{S30}$  = Zemin ortamı üst 30 metresindeki ortalama kayma dalgası yayılma hızı (m/s)

$V_{t,max}$  = Enine hesapda kaplama kesitinde, birim başına oluşan kesme kuvvetin enbüyük değeri (N)

- $W$  = Dikdörtgen kesitli yeraltı yapısının eni (m)
- $x$  = Tünel-yapı birleşim (veya başlangıç) noktasından, tünelin ilgili konumuna, ölçülen mesafe (m)
- $Z$  = Zemin yüzeyinden tünel/yeraltı yapısına ölçülen derinlik (m)
- $\Delta D$  = Çapsal görelî yerdeğiştirmesi
- $\Delta D/D$  =Çapsal birim Şekildeğiştirme
- $\Delta_{D,boşluk}$  = Boşluklu zemin ortamı çap değişimi
- $\Delta_{D,serbest-saha}$  = Serbest saha zemin ortamı çap değişimi
- $\Delta p_s$  = ek yanall zemin basıncı
- $\Delta p_w$  = ek dinamik su basıncı
- $\Delta x$  = Tünelin yapıya bağlanan ucunun serbest olması durumunda oluşacak görelî boyuna yerdeğiştirme (m)
- $\Delta y$  = Tünelin yapıya bağlanan ucunun serbest olması durumunda oluşacak görelî yanall yerdeğiştirme (m)
- $\Delta_s$  = Dikdörtgen kesitli yapı yamulma yerdeğiştirmesi (m)
- $\Delta \varphi$  = Tünelin yapıya bağlanan ucunun serbest olması durumunda oluşacak görelî dönme açısı
- $\delta_F$  = Faya yakınlık katsayısı
- $\delta_s$  =  $S_s$  için doğrultu dönüştürme katsayısı
- $\delta_T$  = Topografik büyütme katsayısı
- $\delta_1$  =  $S_1$  için doğrultu dönüştürme katsayısı
- $\gamma$  = Kesme birim Şekildeğiştirmesi
- $\gamma_{max}$  = Enbüyük kesme birim Şekildeğiştirmesi
- $\varepsilon^a$  = Tünel enkesitinde boyuna (eksenel) birim Şekildeğiştirme
- $\varepsilon_{max}^a$  = Tünel enkesitinde boyuna (eksenel) birim Şekildeğiştirmenin enbüyük değeri
- $\varepsilon^{ab}$  = Tünel enkesitinde boyuna toplam (çekme ve eğilme kaynaklı) birim Şekildeğiştirme
- $\varepsilon^b$  = Tünel enkesitinde eğilme kaynaklı boyuna (eksenel) birim Şekildeğiştirme
- $\varepsilon_{max}^b$  = Tünel enkesitinde eğilme kaynaklı boyuna (eksenel) birim Şekildeğiştirmenin enbüyük değeri
- $\varepsilon_{max}^{ab}$  = Tünel enkesitinde Boyuna toplam (çekme ve eğilme kaynaklı) birim Şekildeğiştirmenin enbüyük değeri
- $\varepsilon_{zye}^{ab}$  = Zemin-yapı etkileşimim göz önüne alınması durumunda, tünel enkesitinde boyuna toplam (çekme ve eğilme kaynaklı) birim Şekildeğiştirme
- $\varepsilon_l$  = Boyuna birim Şekildeğiştirme
- $\varepsilon_M$  = Tünel kaplaması boyuna kesitinde eğilme momenti kaynaklı birim Şekildeğiştirme
- $\varepsilon_T$  = Tünel kaplaması boyuna kesitinde normal kuvvet kaynaklı birim Şekildeğiştirme



$\kappa$  = Eğrilik

$\lambda_S$  = S-dalgası için dalga boyu (m)

$\mu$  = Zemin ortamı ve tünel dış yüzeyi arasındaki sürtünme katsayısı

$\nu_t$  = Tünel kaplamasının Poisson oranı

$\nu_s$  = Zemin ortamının Poisson oranı

$\rho$  = Eğrilik yarıçapı (m)

$\rho_S$  = Zemin toplam birim ağırlığı (N/m<sup>3</sup>)

$\rho_w$  = su birim ağırlığı

$\sigma_{max}$  = Tünel alt seviyesindeki toplam düşey basınç (zemin örtü basıncı + sürşarj basıncı) (Pa)

$\sigma_{sürşarj}$  = Tünel alt seviyesindeki sürşarj kaynaklı düşey basınç (Pa)

$\phi$  = Tünel eksenine göre s-dalgası yayılma (geliş) açısı



## BÖLÜM 1 – GENEL HÜKÜMLER

### 1.1. KAPSAM

1.1.1 -Tüm tünel tipi uzun yeraltı yapıların ve yeraltında tamamen gömülü olarak bulunan yapıların deprem davranış hesapları ve depreme karşı tasarımları bu şartname kapsamında yapılacaktır.

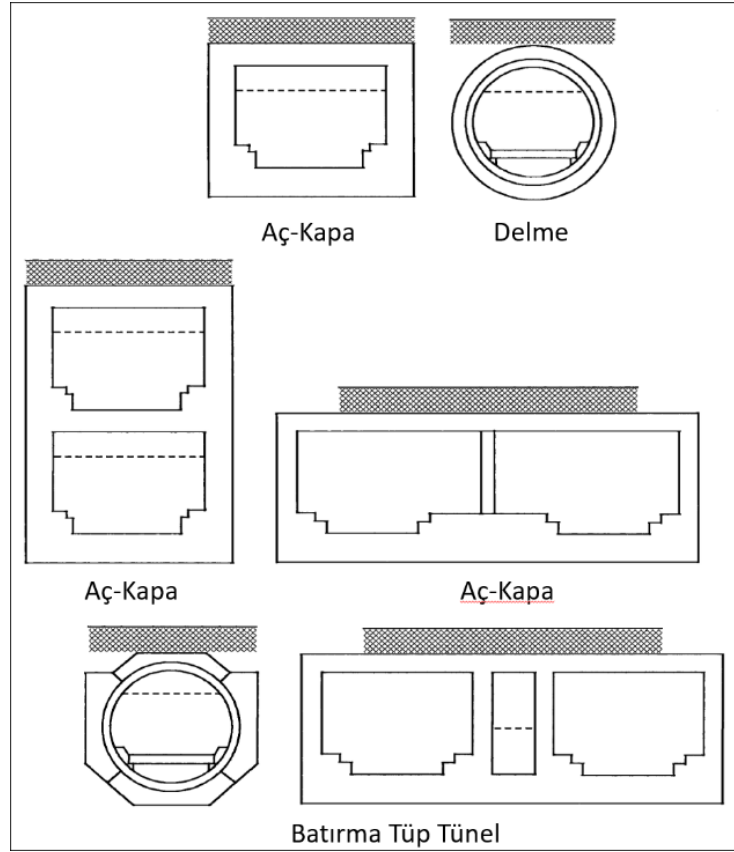
Tünel/Yeraltı yapıları iki ana kategoriye ayrılabilir:

- Çok katlı, büyük boyutlu yeraltı yapıları (örneğin metro istasyonları, otoparklar) ve
- Uzun yeraltı yapıları (tüneller).

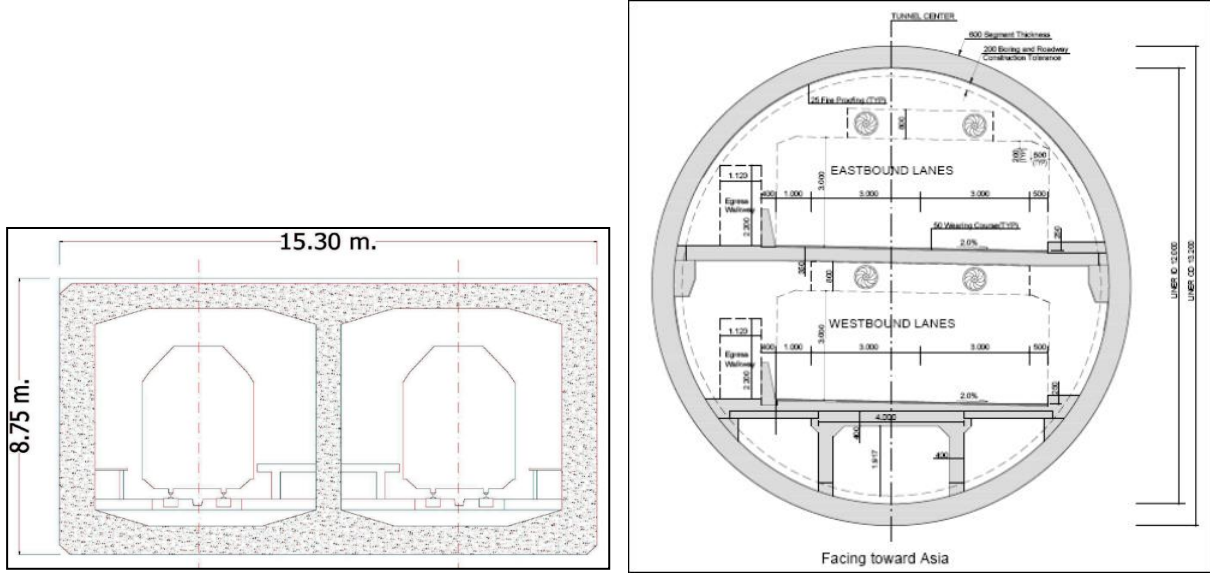
İnşaat metoduna göre tüneller aşağıdaki gibi gruplandırılabilir:

- Delme tüneller,
- Aç-kapa tüneller ve
- Batırma tüp tüneller.

1.1.2 - Özel kaplama teknolojisi ve/veya inşaat tekniği kullanan tüneller için işbu şartname hükümlerine ek olarak özel tasarım kriterleri hazırlanacak ve İdare'nin onayına sunulacaktır.



Şekil 1a. Yeraltı yapılarının tipik en kesitleri



Şekil 1b. Marmaray ve Avrasya tüneli en kesitleri

## 1.2. GENEL İLKELER

1.2.1- Karayolu ve demiryolu tünel ve yeraltı yapılarının deprem etkisi altında hesap ve tasarımına yönelik genel esaslar aşağıda özetlenmiştir.

- Yeraltı yapılarına etkiyen yükler; toprak ve su basıncı, zati yükler, sürşarj yükleri, hareketli yükler, deprem yükleri ve araç yükleridir.
- Yeraltı yapılarının deprem etkilerine karşı koyabilecek şekilde projelendirilmeleri ve inşaları için belirli deprem düzeylerine karşı gelen performans hedeflerinin sağlanması gerekmektedir.
- Tünellerin ve yeraltı yapılarının deprem davranışı yer hareketi ivmelerinden kaynaklanan atalet kuvvetlerinden ziyade, zemin-yapı ortamının kinematik davranışı (yerdeğiştirmeleri) tarafından kontrol edilmektedir. Bu açıdan, tünel ve diğer yeraltı yapılarının tasarımında yerdeğiştirme esaslı tasarımlar ön planda olmalıdır.
- Tünel ve diğer yeraltı yapılarının deprem davranışını genelde zemin ortamı ve yapı kesiti yanıl rijitliklerinin oranı ve zemin-yapı ara yüzü fiziksel özellikleri tarafından etkilenir ve yeraltı yapıları içinde buldukları zemin ortamında bir deprem sırasında veya başka nedenle meydana gelen yerdeğiştirmelere uymaya çalışırlar. Özellikle yumuşak zemin ortamlarında yer alan tünellerin deprem davranışlarında yapı-zemin etkileşimi önemli rol oynar ve deprem tasarımlarında göz önüne alınmalıdır.
- Deprem sırasında tünel gibi uzun yeraltı yapıları boyuna yönde çekme, basınç ve eğilmeden kaynaklanan deformasyonlara maruz kalır. Boyuna yöndeki deformasyonlar aynı yönde yayılan deprem dalgalarının yayılım etkisinden ve özellikle değişik zemin ortamlarından geçerken meydana gelen asenkron (eş-zamansız) etkilerden kaynaklanır.
- Enine yönde ise kesitte, özellikle düşey yönde yayılan SH dalgalarından kaynaklandığı kabul edilen, enkesit deformasyonları (dairese kesitte ovalleşme ve dikdörtgen kesitte ise yamulmalar) meydana gelir.
- Yapının zemine göre göreceli olarak daha rijit olduğu durumlarda zemin ortamı ile yapı etkileşiminin etkisi dikkate alınmalıdır. Tünellerin kesişmesi, tünel güzergâhı boyunca zemin ortamındaki ani değişiklik ve tünellerin istasyon binası veya havalandırma bacası gibi rijit yapılarla birleşmesi durumlarında özel değerlendirmelerin yapılması ihtiyacı çıkar.

- Yapısal rijitlikte veya jeolojî/zemin şartlarındaki ani değişiklikler nedeni ile kaynaklanacak farklı gerilme ve birim şekildeğiştirme ile ilgili sorunların çözümleri için; deprem derzleri ve/veya yeterli dayanım ve sünekliğe sahip bağlantılar gerekir.
- Fay atımı, sıvılaşma, şev şev stabilite sorunları veya diğer zemin problemlerinden kaynaklanan zemin yenilmesi etkileri (kalıcı yerdeğiştirmeler) gerek tünel güzergâhı ve yeraltı yapısı konumunun seçiminde ve gerekse bu yapıların tasarımı açısından çok önemlidir. Aktif fay hatlarını kesen tünellerde depremde büyük deformasyon ve süreksizliklerden kaynaklanan hasarlar görülebilir. Tünel güzergâhlarının aktif (veya aktif faylarla mekanik ilişkisi olan) fayları kesmeyecek şekilde seçilmesi esastır.

**1.2.2-** Bu Yönetmeliğe göre deprem etkisi altında yeni tünel ve yeraltı yapılarının tasarımında ve mevcut olanların değerlendirilmesinde esas alınacak Performans Hedefleri Bölüm 3'te tanımlanmıştır.

**1.2.3-** Bu Yönetmeliğe göre deprem etkisi altında tasarımı yapılan tünel ve yeraltı yapıları malzeme açısından 10.07.2013 tarihli ve 28703 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanan Yapı Malzemeleri Yönetmeliği'ne ve 26.06.2009 tarihli ve 27270 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanan Yapı Malzemelerinin Tabi Olacağı Kriterler Hakkında Yönetmelik kurallarına uygun olacaktır.

### **1.3. ÖZEL KONULARDA TASARIM GÖZETİMİ VE KONTROLÜ**

**1.3.1 -** Bu Yönetmeliğin uygulanmasına ilişkin değerlendirme ve tasarım süreçlerinde, özel uzmanlık gerektiren konularda projenin başlangıcından tamamlanmasına kadar tüm tasarım aşamalarında görev yapacak şekilde, ilgili alanda teorik ve mesleki bilgi ve deneyim sahibi inşaat mühendislerinden (Tasarım Gözetmeni'nden) "tasarım gözetimi ve kontrolü" hizmeti alınmak zorundadır.

**1.3.2 -** Bu tür hizmetleri yerine getireceklerin eğitim koşulları, mesleki yeterlilik ve deneyim konuları ve bunların belgelendirilmesi ile hizmetin yürütülmesine ilişkin usul ve esaslar T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı tarafından belirlenir.

**1.3.3 -** Bu Yönetmeliğin uygulanmasında aşağıda belirtilen konular "tasarım gözetimi ve kontrolü" hizmetine tabidir:

- (a) Madde 2.5 kapsamında belirtilmiş "Sahaya Özel Deprem Tehlikesi Hesapları"
- (b) Madde 2.6 kapsamında belirlenmiş "Zaman Tanım Alanında Deprem Yer Hareketlerinin Tanımlanması"
- (c) Madde 2.7 kapsamında belirlenmiş "Eş-zamansız Deprem Yer Hareketlerinin Tanımlanması"
- (d) Madde 2.4.3 kapsamında belirtilmiş "Sahaya Özel Zemin Deprem Davranışı Hesapları"
- (e) Madde 3.4.2.3 kapsamında belirtilmiş "C-Tipi Hesaplar"

### **1.4 ATIF YAPILAN STANDART VE YÖNETMELİKLER**

Bu Yönetmelik kapsamında gerekli bölüm ve maddelerde 2018 tarihli Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne atıflar yapılmıştır.

## BÖLÜM 2 – DEPREM YER HAREKETİ

### 2.1. DEPREM TEHLİKESİ VERİLERİ

**2.1.1-** Deprem tehlikesi probabilistik açıdan gerek frekans ve gerekse zaman tanım alanında nicelendirilmiş 3 boyutlu deprem yer hareketleri ile tanımlanacaktır. Tüneller gibi uzun yapılar için, tünel boyunca farklı zemin hareketleri meydana gelebilir. Bu nedenle, tünelin boyuna deprem hesaplarında deprem yer hareketinin mekânsal değişimi göz önüne alınmalıdır. Tasarım esaslı deprem yer hareketlerinin belirlenmesinde yerel zemin koşulları ve yakın-fay etkisi dikkate alınmalıdır.

**2.1.2 –** Bölüm 2.2’de tanımlanan yer hareketi düzeyi için deprem verileri, 22/01/2018 tarih ve 2018/11275 sayılı Bakanlar Kurulu kararı ile yürürlüğe konulan Türkiye Deprem Tehlike Haritaları ile tanımlanmıştır.

### 2.2. DEPREM YER HAREKETİ DÜZEYLERİ

Bu Yönetmelik kapsamında aşağıda belirtilen üç farklı deprem yer hareketi düzeyi tanımlanmıştır.

#### **2.2.1- Deprem Yer Hareketi Düzeyi-1 (DD-1)**

DD-1 Deprem Yer Hareketi, tünel/yeraltı yapısının ekonomik ömrü olan 100 yıl içinde aşılma olasılığının %4 ve buna karşı gelen ortalama yinelenme periyodunun 2475 yıl olduğu probabilistik deprem yer hareketi düzeyini tanımlamaktadır. Bu deprem yer hareketi, en büyük deprem yer hareketi olarak da adlandırılacaktır.

#### **2.2.2- Deprem Yer Hareketi Düzeyi-2 (DD-2)**

DD-2 Deprem Yer Hareketi, tünel/yeraltı yapısının ekonomik ömrü olan 100 yıl içinde aşılma olasılığının %20 ve buna karşı gelen ortalama yinelenme periyodunun 475 yıl olduğu probabilistik deprem yer hareketi düzeyini tanımlamaktadır. Bu deprem yer hareketi, tasarım deprem yer hareketi olarak da adlandırılacaktır.

#### **2.2.3- Deprem Yer Hareketi Düzeyi-2a (DD-2a)**

DD-2 Deprem Yer Hareketi, tünel/yeraltı yapısının ekonomik ömrü olan 100 yıl içinde aşılma olasılığının %50 ve buna karşı gelen ortalama yinelenme periyodunun 144 yıl olduğu probabilistik deprem yer hareketi düzeyini tanımlamaktadır.

**2.2.4-** DD-2a ile ilgili haritalar hazırlanana kadar, yinelenme periyodu ve spektral ivmelerin verilen bir konum için log-log dağılım gösterdiği kabulü ile DD-2a deprem yer hareketi spektral ivmelerinin tesbiti için aşağıdaki denklem kullanılabilir.

$$\log(SA_{144}) = 0.37(\log(SA_{475})) + 0.63(\log(SA_{72})) \quad (2.1)$$

Bu denklemde  $SA_{144}$ ,  $SA_{475}$  ve  $SA_{72}$  terimleri, sırası ile 144, 475 ve 72 yıllık aşılma olasılıklarına karşı gelen referans zemin [ $(V_S)_{30} = 760\text{m/s}$ ] serbest saha mostrasındaki %5 sönümlü spektral ivme değerlerini göstermektedir.  $SA_{475}$  ve  $SA_{72}$  değerleri, sırası ile DD-2 ve DD-3 deprem yer hareketi düzeylerine karşı gelen  $S_S$  ve  $S_1$  için Türkiye Deprem Tehlike Haritaları vasıtası ile belirlenecektir.

### 2.3. ZEMİN-BAĞIMSIZ DEPREM YER HAREKETİ SPEKTRUMLARI

#### 2.3.1-Tanım

Yatay Deprem Yer Hareketi Spektrumları, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği’nde (TBDY, 2018) verilen standart spektrum şekilleri veya Madde 2.5’e göre sahaya özel deprem tehlikesi hesapları ile özel olarak tanımlanacaktır.

### 2.3.2 - Zemin-Bağımsız İvme Spektrumları

Zemin-bağımsız yatay ivme spektrumlarının Madde 2.2'de tanımlanmış üç farklı deprem yer hareketi düzeyi için belirlenmesinde, yer çekimi ivmesi (g) cinsinden, boyutsuz olarak tanımlanmış aşağıdaki *spektral ivme katsayıları* kullanılacaktır.

(a) Kısa periyod bölgesi için *haritalanmış spektral ivme katsayısı*  $S_S$

(b) 1.0 saniye periyod için *haritalanmış spektral ivme katsayısı*  $S_1$

Birbirine dik iki yatay doğrultudaki deprem etkilerinin geometrik ortalamasına karşı gelen *haritalanmış spektral ivme katsayıları*, belirli bir deprem düzeyi için referans zemin koşulu [ $(V_S)_{30} = 760\text{m/s}$ ] esas alınarak %5 sönüm oranı için *Deprem Tehlike Haritaları*'nda yer alan *haritalanmış spektral ivmeler*'in yerçekimi ivmesine bölünmesi ile *boyutsuz katsayılar* olarak tanımlanmıştır.

Yukarıda tanımlanan *haritalanmış spektral ivme katsayıları*  $S_S$  ve  $S_1$ , Denklem 2.2 ve 2.3 kullanılarak, *zemin-bağımsız spektral ivme katsayıları*  $S'_S$  ve  $S'_1$ 'e dönüştürülecektir

$$S'_S = S_S \delta_S \delta_T \quad (2.2)$$

$$S'_1 = S_1 \delta_1 \delta_F \delta_T \quad (2.3)$$

Burada  $\delta_S$  ve  $\delta_1$  **2.3.3**'de tanımlanan *doğrultu dönüştürme katsayıları*'nı,  $\delta_F$  **2.3.4**'de tanımlanan *faya yakınlık katsayısı*'nı ve  $\delta_T$  ise **2.3.5**'de tanımlanan *topografik büyütme katsayısı*'nı göstermektedir.

Zemin-bağımsız yatay ve düşey elastik tasarım spektrumlarının elde edilmesi için (TBDY,2018, Bölüm 2.3.4. Yatay Elastik Tasarım Spektrumu ve Bölüm 2.3.5. Düşey Elastik Tasarım Spektrumu) kapsamında sunulu kural, denklem ve şekiller,  $S_{DS} = S'_S$  ve  $S_{D1} = S'_1$  alınarak kullanılacaktır.

### 2.3.3. Doğrultu Dönüştürme Katsayıları

**2.3.2**'de tanımlanan ve birbirine dik iki yatay doğrultudaki deprem etkilerinin geometrik ortalamasına karşı gelen  $S_S$  ve  $S_1$  *haritalanmış spektral ivme katsayılarını* maksimum deprem etkisine karşı gelen doğrultudaki spektral ivmelere dönüştüren *doğrultu dönüştürme katsayıları*  $\delta_S$  ve  $\delta_1$  Denklem (2.4) ile tanımlanmıştır:

$$\delta_S = 1.2 ; \quad \delta_1 = 1.3 \quad (2.4)$$

### 2.3.4. Faya Yakınlık Katsayısı

Sadece spektral ivme katsayısına ( $S_1$ ) uygulanmak üzere, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü-Türkiye Diri Fay Haritası'nda gösterilmiş veya sahaya özel deprem tehlikesi hesabı sonucu belirlenmiş aktif fayların düzlemlerine 25 km ve daha az mesafedeki konumlar için *faya yakınlık katsayısı*  $\delta_F$  Denklem 2.5 ile tanımlanmıştır:

$$\begin{aligned} \delta_F &= 1.2 & L_F &\leq 15\text{km} \\ \delta_F &= 1.2 - 0.02 (L_F - 15) & 15\text{km} < L_F &\leq 25\text{km} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Burada  $L_F$  fay düzlemine olan dik mesafeyi [km] göstermektedir.

### 2.3.5. Topografik Büyütme Katsayısı

Eğimli bir arazide yer alan yeraltı yapıları ve fönüküler gibi topoğrafik eğimi takip eden tüneller için kullanılacak *topografik büyütme katsayısı*,  $\delta_T$ , Denlem 2.6 ile tanımlanmıştır.

Topografik eğim açısı 15°'nin altında veya rölyef yüksekliği 30m'nin altında:	$\delta_T = 1.0$	
Topografik eğim açısı 15° ile 30° arasında, tepe konumları:	$\delta_T = 1.2$	
Topografik eğim açısı 30°'den büyük, tepe konumları:	$\delta_T = 1.4$	(2.6)

## 2.4. ZEMİN-BAĞIMLI YATAY DEPREM YER HAREKETİ SPEKTRUMLARI

### 2.4.1 Tanım

Zemin-Bağımlı Deprem Yer Hareketi: tünel/yeraltı yapısının konum ve derinliğindeki tasarım esaslı deprem yer hareketini tanımlar.

### 2.4.2 – Zemin-Bağımlı İvme Spektrumları (A-Tipi Hesaplar)

Bölüm 3 kapsamında gösterilmiş, A-Tipi hesaplara dayalı tasarım yönteminde kullanılmak üzere *zemin-bağımlı tasarım spektral ivme katsayıları*  $S_{DS}$  ve  $S_{D1}$  aşağıdaki şekilde elde edilecektir.

$$S_{DS} = S'_s F_s \quad (2.7)$$

$$S_{D1} = S'_1 F_1 \quad (2.8)$$

Burada  $F_s$  ve  $F_1$  (TBDY,2018, Bölüm 2.3.3. Yerel Zemin Etki Katsayıları) kapsamında tanımlanan *yerel zemin etki katsayıları*'ni göstermektedir.

Zemin-bağımlı yatay elastik tasarım spektrumlarının elde edilmesi için: TBDY,2018, Bölüm 2.3.4. Yatay Elastik Tasarım Spektrumu kapsamında sunulu kurallar kullanılacaktır.

### 2.4.3 – Zemin-Bağımlı İvme Spektrumları (B-Tipi ve C-Tipi Hesaplar)

Bölüm 3 kapsamında gösterilmiş, B-Tipi ve C-Tipi hesaplara dayalı hesap/tasarım yönteminde kullanılmak üzere (TBDY, 2018, Bölüm 16.5. Deprem Etkisi Altında Sahaya Özel Zemin Davranış Hesapları) kapsamında açıklandığı şekilde, sahaya özel zemin davranış hesapları yapılacaktır. Bu hesaplar için mühendislik taban kayası deprem hareketi olarak Madde 2.3.2 kapsamında elde edilmiş Zemin-bağımsız deprem yer hareketi yatay elastik spektrumundan Madde 2.7 hükümlerine göre elde edilmiş zaman tanım alanı deprem yer hareketleri kullanılacaktır.

## 2.5. YATAY SPEKTRUM UYUMLU HARMONİK YER HAREKETLERİ

Tünellerin boyuna hesap/tasarımı için S-dalga tiplerini içeren harmonik nitelikli deprem yer hareketlerinin belirlenmesine gerek vardır.

2.5.1- Yatay spektrum uyumlu harmonik yer hareketleri: genlik (en büyük parçacık ivmesi, hızı ve yerdeğiştirmesi) ve periyot değerleri ile tanımlanacaktır.

İşbu parametreler, daha ayrıntılı özel bir çalışma yapılmadığı takdirde, aşağıdaki ifadelerde gösterildiği şekilde, Madde 2.3.2 ve 2.4.2 kapsamında tanımlanmış deprem yer hareketi ivme spektrumu parametrelerine ( $S'_1$ ,  $S_{DS}$  ve  $S_{D1}$ ) dayalı olarak belirlenecektir.

$$\text{En Büyük Parçacık İvmesi (m/s}^2\text{): } a_s = 0.4 g S_{DS} \quad (2.9)$$

$$\text{Periyot: } T_a = 0.15s \quad (2.10)$$

$$\text{En Büyük Parçacık Hızı (m/s): } v_s = 0.75 (S_{DS} S_{D1})^{0.55} \quad (2.11)$$

$$\text{Periyot: } T_v = 0.6s \quad (2.12)$$

$$\text{En Büyük Parçacık Yerdeğiştirmesi (m): } d_s = 0.25 f_D \cdot S'_1 \cdot \left(\frac{v_{s30}}{760}\right)^{-0.4} \quad (2.13)$$

$$\text{Periyot: } T_d = 2s \quad (2.14)$$

Burada  $f_D$  uzun periyot zemin büyütme faktörü olmaktadır.

$f_D$  değeri  $S'_1 \leq 0.1$  için  $f_D=2$  ve  $S'_1 > 0.1$  için  $f_D=1+10S'_1$  alınacaktır.

## 2.6. ZEMİN-BAĞIMLI DÜŞEY DEPREM YER HAREKETİ SPEKTRUMLARI

Gözönüne alınan herhangi bir deprem yer hareketi düzeyi için düşey elastik tasarım ivme spektrumu'nun ordinatları olan düşey elastik tasarım spektral ivmeleri  $S_{aeD}(T)$ , doğal titreşim periyoduna bağlı olarak yerçekimi ivmesi  $[g]$  cinsinden aşağıda verilen ifadeler ile hesaplanır.

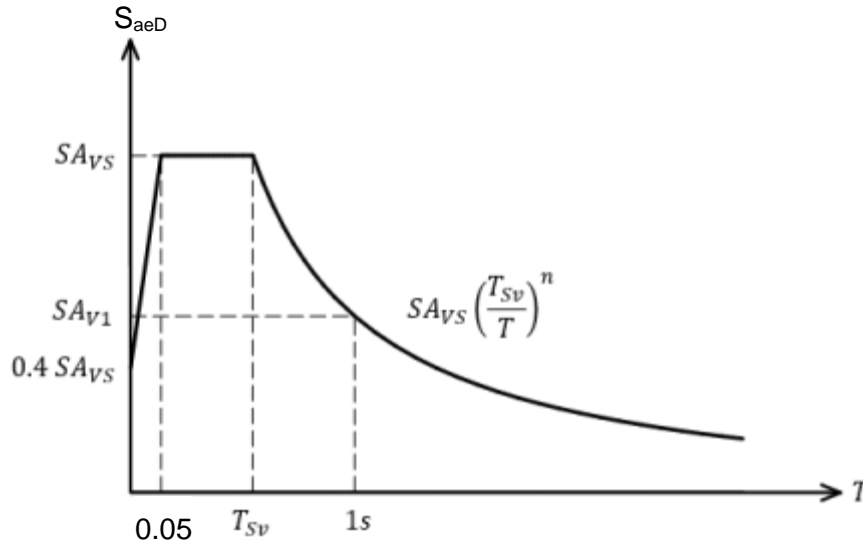
$$\begin{aligned} S_{aeD}(T) &= 0.6SA_{VS} \frac{T}{0.05} + 0.4SA_{VS} & (T < T_{AD}) \\ S_{aeD}(T) &= SA_{VS} & (0.05 \text{ s} \leq T \leq T_{SV}) \\ S_{aeD}(T) &= SA_{VS} \left( \frac{T_{SV}}{T} \right)^n & (T > T_{SV}) \end{aligned} \quad (2.15)$$

Denklem (2.15) kullanılarak hesaplanan düşey ivme tasarım spektrumu Şekil 2.1'de temsili olarak gösterilmektedir. Denklem (2.15)'te  $SA_{VS}$  kısa periyot düşey spektrum değerini temsil eder.  $T_{SV}$  ve düşey spektral ivmenin periyota bağlı azalımını kontrol eden üssel  $n$  katsayısı Denklem (2.16)'da verilen ifadelerle hesaplanır.

$$T_{SV} = \max\{0.13, (0.7 - C_L)\}; \quad n = \frac{\ln(1 - C_L)}{\ln(T_{SV})}; \quad C_L = 1 - \frac{SA_{V1}}{SA_{VS}} \quad (2.16)$$

Denklem (2.16)'da hesaplarda kullanılan  $SA_{V1}$ ,  $T = 1.0$  s'deki düşey ivme spektrumu ordinatıdır ve  $SA_{VS}$  ile beraber zemin etkilerinden bağımsız yatay spektral ivme değerleri  $S'_S$  ve  $S'_1$  kullanılarak Denklem (2.17)'de verilen ifadelerle hesaplanır. Yukarıdaki denklemlerde  $\ln$  ifadesi doğal logaritmayı temsil eder.

$$\begin{aligned} SA_{VS} &= a_{VS} (S'_S)^{b_{VS}}; \quad a_{VS} = 5.07((V_S)_{30})^{-0.306}; \quad b_{VS} = 1.03 + 0.066 \left( \frac{\min\{(V_S)_{30}, 760\}}{1000} \right) \\ SA_{V1} &= a_{V1} (S'_1)^{b_{V1}} \quad a_{V1} = 9.90((V_S)_{30})^{-0.467}; \quad b_{V1} = 0.91 \end{aligned} \quad (2.17)$$



Şekil 2.1. Temsili düşey ivme tasarım spektrumu

## 2.7. SAHAYA ÖZEL DEPREM YER HAREKETİ SPEKTRUMU

**2.7.1 – Normal Risk Sınıfı (RS-1) tünel/yeraltı yapıları için proje mühendisinin ve idarenin tercihine bağlı, ancak, Yüksek Risk Sınıfı (RS-2) tünel/yeraltı yapıları için zorunlu olarak,**

sahaya özel probabilistik deprem tehlikesi hesapları ile sahaya özel deprem yer hareketi spektrumları tanımlanacaktır.

**2.7.2** – Sahaya özel deprem yer hareketi spektrumlarının ordinatları, hiçbir zaman 2.4.2, 2.4.3 veya 2.6 ile tanımlanan zemin-bağımlı spektrum ordinatlarının %90'ından daha küçük olmayacaktır.

## **2.8. ZAMAN TANIM ALANINDA DEPREM YER HAREKETİ**

### **2.8.1- Tanım**

Bu yönetmeliğe göre tünel veya yeraltı yapılarının zaman tanım alanında bir, iki veya üç boyutlu deprem hesabı için gerekli deprem yer hareketlerinin tanımlanması için kullanılacak deprem kayıtlarının seçimi ve spektrum uyumlu akselerometrik verilere dönüştürülmesi için uygulanması gerekli kurallar tanımlanmıştır.

### **2.8.2 – Deprem Kayıtlarının Seçimi**

**2.8.2.1** – Zaman tanım alanında deprem hesabında kullanılacak deprem kayıtlarının seçimi, performansa esas deprem yer hareketi düzeyi ile uyumlu deprem büyüklükleri, fay uzaklıkları, kaynak mekanizmaları ve yerel zemin koşulları dikkate alınarak yapılacaktır. Tünel yapısının yakın fay etkisine maruz kalma durumu deprem kayıtları seçiminde dikkate alınmalıdır. Tünelin bulunduğu bölgede performans hedefine esas deprem yer hareketi düzeyi ile uyumlu geçmiş deprem kayıtlarının mevcut olması durumunda öncelikle bu kayıtlar kullanılacaktır. Sahaya özel deprem tehlikesi hesabının yapılması durumunda performansa esas deprem yer hareketi düzeyine en fazla katkıda bulunan depremlere ait büyüklük, fay uzaklığı yakın fay etkisi bilgilerinin belirlenmesi için deprem tehlikesi ayırıştırma işleminden yararlanılmalıdır.

**2.8.2.2** – Yeterli sayı veya nitelikte deprem ivme kaydı seçiminin yapılamadığı durumlarda, zaman tanım alanında benzeştirilmiş yer hareketi kayıtları kullanılabilir. Bu tür kayıtların kullanılması durumunda, yapının bulunduğu sahanın deprem kaynağı, dalga yayılım ve yerel zemin özellikleri göz önüne alınacaktır. Benzeştirme için kullanılacak model parametrelerinin, söz konusu bölgede meydana gelmiş depremlerde kaydedilmiş gerçek deprem kayıtları ile uyumlu olduğu gösterilecektir.

**2.8.2.3** – *Deprem kaydı takımları*'nın sayısı en az yedi olacaktır. Aynı depremden seçilecek kayıt takımı sayısı ikiyi geçmeyecektir. Yakın fay etkisinin sahada etkili olması durumunda seçilen deprem kaydı takımlarından en az 3 tanesi yakın fay *yönelim* etkisine sahip olmalıdır. Seçilen deprem kayıtları mutlaka bir kayıt işleme (filtreleme) yöntemine tabii tutulmuş olmalıdır. Bu filtreleme yöntemi sonucu zaman tanım alanı hesaplarında işlenmiş kaydın kullanılabilir frekans aralığı dikkate alınmalıdır.

### **2.8.3 - Deprem Kayıtlarının Ölçeklendirilmesi**

**2.8.3.1** - Bu yönetmelik kapsamında tasarıma esas yer hareketi parametreleri en büyük yön doğrultusunda tanımlanmıştır. Kayıt takımlarının ölçeklendirilmesi en büyük yön doğrultusunu dikkate almalıdır.

**2.8.3.2** - Bu uygulama için  $TP = 1s$  kabul edilecek ve TBDY (2018), Bölüm 2.5.2 (b) maddesi aşağıdaki şekilde değiştirilerek kullanılacaktır.

*“Üç boyutlu hesap için seçilen her bir deprem kaydı takımının iki yatay bileşenine ait spektrumları kullanılarak en büyük doğrultu yönündeki bileşke yatay spektrum elde edilecektir. Seçilen tüm kayıtlara ait bileşke spektrumların ortalamasının 0.2TP ve 2TP periyotları arasındaki genliklerinin, 2.3 veya 2.4'e göre tanımlanan spektrumların aynı periyot aralığındaki genliklerine oranının 1.0'den daha küçük olmaması kuralına göre deprem yer hareketi bileşenlerinin genlikleri ölçeklendirilecektir. Her iki yatay ve düşey bileşenin ölçeklendirilmesi aynı ölçek katsayıları ile yapılacaktır.”*



**2.8.3.3** – Sahaya özel deprem tehlikesi hesabının yapılması durumunda ölçeklendirmeler en büyük doğrultu yönünde hedef performans deprem seviyelerini temsil eden sahaya özel elastik ivme spektrumlarını veya bu spektrumlar kullanılarak elde edilen koşullandırılmış ortalama spektrumları dikkate alınarak yapılabilir.

## **2.9. EŞ-ZAMANSIZ DEPREM YER HAREKETİ**

**2.9.1-** Bölüm-3 kapsamında gösterilmiş, C-Tipi hesap yöntemlerinde, tünellerin boyuna hesap/tasarımları için, eş-zamansız (senkronize olmayan) deprem yer hareketi kullanılacaktır. Bu amaçla, gerçek veya görünür dalga yayılma hızına bağlı “varış zamanı gecikmeleri” ve farklı zemin ortamlarında yer alacak deprem yer hareketi modifikasyonları göz önüne alınacaktır.

## **2.10. YAPI DAVRANIŞ KAYITÇILARININ YERLEŞTİRİLMESİ**

**2.10.1-** İdare tarafından uygun görülmesi durumunda, tünel ve yeraltı yapılarının deprem davranışlarının ölçülmesi amacı ivme, görelî yerdeğiştirme ve şekildeğiştirme (eğim) kayıtçıları yerleştirilecek, ilgili yapının işletmecileri işbu cihazların bakımından sorumlu olacaktır.

## **BÖLÜM 3 – DEPREM ETKİSİ ALTINDA PERFORMANSA GÖRE ANALİZ VE TASARIM ESASLARI**

### **3.1. PERFORMANSA GÖRE HESAP VE TASARIMIN TEMEL YÖNTEMLERİ**

**3.2.1-** Tünel/yeraltı yapılarının deprem hesap/tasarımı için kullanılan temel yöntemler, deprem yüklemesinin tanımlanma ve modellenme şekline göre, üç genel kategoride sınıflandırılabilir:

- Dayanım (kuvvet) esaslı yöntemler
- Şekildeğiştirmeye dayalı yöntemler
- Yapının ve zeminin birlikte modellendiği sayısal yöntemler (sonlu elemanlar, sonlu farklar, vb.)

Bu yöntemler: zemin-yapı etkileşimini içerip içermedikleri açısından da ayrıca sınıflandırılabilir. Zemin-yapı etkileşiminin dikkate alınmadığı yöntemler için yapının zemin ortamının serbest saha deformasyonlarına uyacağı kabul edilir. Zemin-yapı etkileşimini içeren yöntemlerde ise yapıya uygulanan deprem etkileri (şekildeğiştirmeler veya eşdeğer kuvvetler açısından) yapının zemin ortamı içinde olduğu hesaba katılarak belirlenir.

**3.1.2-** Madde 2.4 kapsamında tanımlanmış düzeylerdeki deprem yer hareketleri altında tünel/yeraltı yapısı taşıyıcı sistem elemanlarında oluşabilecek hasar sayısal olarak belirlenecek ve bu hasarın kabul edilebilir hasar sınırlarının altında kalıp kalmadığı kontrol edilecektir. Kabul edilebilir hasar sınırları, çeşitli deprem düzeyleri için öngörölmüş performans hedefleri ile uyumlu olacak şekilde tanımlanacaktır.

### **3.2. RİSK SINIFLARI**

**3.2.1-** Tünel/yeraltı yapısının Risk Sınıfı, idare tarafından, deprem sonrası oluşabilecek ulaşım kesintisi kaynaklı insani, stratejik, sosyal ve mali risk boyutları göz önüne alınarak belirlenecektir.

**3.2.2-** İki adet risk sınıfı tanımlanmıştır:

**RS-1 – Normal Riskli Tünel/Yeraltı Yapıları** (Tüm metro sistemleri, Karayolu ve Demiryolu Tünelleri)

**RS-2 – Yüksek Riskli Tünel/Yeraltı Yapıları** (İdare tarafından belirlenecek, istisnai önem ve stratejik özelliğe sahip olan yapılar)

### 3.3. PERFORMANS HEDEFLERİ

Deprem etkisi altında tünel/yeraltı yapısı taşıyıcı sistemleri için Performans Hedefleri 3.3.1, 3.3.2, 3.3.3'te tanımlanmıştır.

#### 3.3.1- Kesintisiz Kullanım (KK) Performans Hedefi

Tünel/Yeraltı Yapısı doğrusal-elastik olarak davranacak ve yapısal unsurlarında sadece ihmal edilebilir düzeyde minimum hasar oluşacaktır. Tünel/Yeraltı Yapısı deprem sonrası incelendikten sonra hizmete devam edecektir.

#### 3.3.2- Sınırlı Hasar (SH) Performans Hedefi

Tünel/Yeraltı Yapılarının ana yapısal unsurlarında sınırlı düzeyde hasar meydana gelecek ve doğrusal olmayan davranış sınırlı kalacaktır. Onarımın yapılmasını takiben, Tünel/Yeraltı Yapısı çok kısa sürede hizmete alınacaktır.

#### 3.3.3- Kontrollü Hasar (KH) Performans Hedefi

Tünel/Yeraltı Yapılarının ana yapısal unsurlarında, can emniyetini sağlayacak ve su basması meydana gelmeyecek düzeyde ağır olmayan ve onarılması mümkün olan kontrollü hasar oluşabilecektir. Hasarların onarımın yapılmasını takiben, Tünel/Yeraltı Yapısı tekrar hizmete alınabilecektir.

### 3.4. UYGULANACAK ANALİZ/TASARIM YÖNTEMLERİ

#### 3.4.1- Değişik deprem yer hareketi düzeyleri ve Risk Sınıflarına karşı gelen Performans

Deprem Yer Hareketi Düzeyi	Normal Risk Sınıfı (RS-1)		Yüksek Risk Sınıfı (RS-2)	
	Performans Hedefi	Hesap/Tasarım Yöntemi	Performans Hedefi	Hesap/Tasarım Yöntemi
DD-2a (144 yıl)	Kesintisiz Kullanım	A-Tipi	-	-
DD-2 (475 yıl)	-	-	Kesintisiz Kullanım	B-Tipi
DD-1 (2475 yıl)	Kontrollü Hasar	B-Tipi	Sınırlı Hasar	C-Tipi

Hedefleri ve kullanılacak Hesap/Tasarım Yöntemleri Tablo 3.1'de gösterilmiştir. Bu tabloda gösterilen ve değişik Deprem Yer Hareketi Düzeyleri ve Risk Sınıflarına uygun olarak kullanılacak "A", "B" ve "C" tipi hesap/tasarım yöntemleri Madde 3.4.2 kapsamında belirlenmiştir.

Tablo 3.1 Performans Hedefleri ve Uygulanacak Hesap/Tasarım Yöntemleri

#### 3.4.2 - Uygulanacak Hesap/Tasarım Yöntemleri

##### 3.4.2.1- A-Tipi Hesap/Tasarım Yöntemleri:

Enine Yönde (Tüneller ve diğer yeraltı yapıları):

Dairesel kesitli tünellerde ovalleşme ve dikdörtgen kesitli tünel ve diğer aç-kapa yeraltı yapılarında yamulma hesabı için, serbest-saha zemin yerdeğiştirmesine dayalı, zemin-yapı etkileşimini göz önüne almayan, basitleştirilmiş kapalı form çözümler.

### Boyuna Yönde (Tüneller):

Serbest-saha zemin ortamı yerdeğiştirme hesabı için basitleştirilmiş çözümler. Boyuna yönde kuvvetler, moment ve yerdeğiştirme için, zemin-yapı etkileşimini göz önüne almayan, kapalı form denklemlere dayalı yöntemler.

### **3.4.2.2- B-Tipi Hesap/Tasarım Yöntemleri:**

#### Enine Yönde (Tüneller ve diğer yeraltı yapıları):

Serbest-saha zemin ortamı yerdeğiştirme hesabı için, özel zemin davranış hesapları (Madde 2.4 ve TBDY,2018, Bölüm 16.5). Dairesel kesitli tünellerde ovalleşme hesabı için, zemin-yapı etkileşimini göz önüne alan analitik kapalı form çözümler. Dikdörtgen kesitli tünel ve diğer yeraltı yapılarında yamulma hesabı için: Sıkışabilirlik Oranı, Esneklik Oranı ve Yamulma Katsayısına bağlı çözümler.

#### Boyuna Yönde (Tüneller):

Serbest-saha zemin ortamı yerdeğiştirme hesabı için basitleştirilmiş çözümler. Boyuna yönde kuvvetler, moment ve yerdeğiştirme için, zemin-yapı etkileşimini göz önüne alan, kapalı form denklemlere dayalı yöntemler

### **3.4.2.3- C-Tipi Hesap/Tasarım Yöntemleri:**

B-Tipi Hesap/Tasarım Yöntemleri'ne ilave olarak:

#### Enine Yönde (Tüneller ve diğer yeraltı yapıları):

Serbest-saha zemin ortamı yerdeğiştirme hesabı için özel zemin davranış hesapları (Madde 2.4 ve TBDY, 2018, Bölüm 16.5). Zemin ortamı serbest saha yerdeğiştirme hesabı sonlu eleman/fark modeline dayalı yöntemler. Winkler modeline dayalı eşdeğer-statik ve eşdeğer-dinamik yöntemler. Sayısal eşdeğer-sonlu eleman ve farklar modellemesine dayalı yöntemler.

#### Boyuna Yönde (Tüneller):

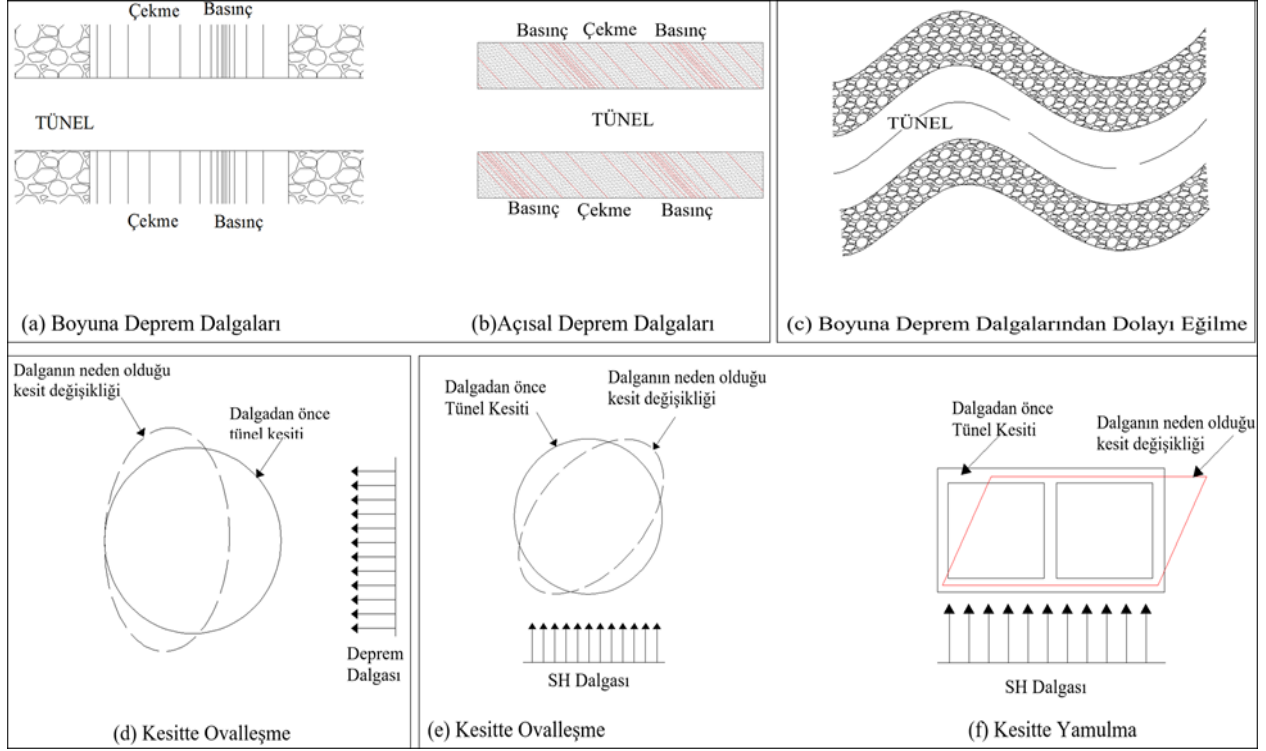
Winkler modeline dayalı eşdeğer-statik ve eşdeğer-dinamik yöntemler. Sayısal eşdeğer-sonlu eleman ve farklar modellemesine dayalı yöntemler.

## **BÖLÜM 4 – TÜNEL VE YERALTI YAPILARININ DEPREM DAVRANIŞ ANALİZİ**

### **4.1. DEFORMASYON TİPLERİ**

**4.1.1-** Kuvvetli bir deprem hareketi sırasında, tünel/yeraltı yapıları, yer hareketi (sarsıntı) ve kalıcı şekildeğiştirmeler (yanal yayılma, heyelan ve fay atımı) nedeniyle etkilenir. Tünellerin yer hareketi sarsıntısına karşı gösterdiği davranış aşağıdaki temel deformasyon türleri altında incelenecektir (Şekil 4.1).

- Boyuna eksenel deformasyonlar
- Boyuna eğilme deformasyonları
- Enine kesit ovalleşmesi (dairesel tüneller için) ve
- Enine kesit yamulması (aç-kapa tünelleri gibi dikdörtgen kesitli tüneller ve yeraltı yapıları için)



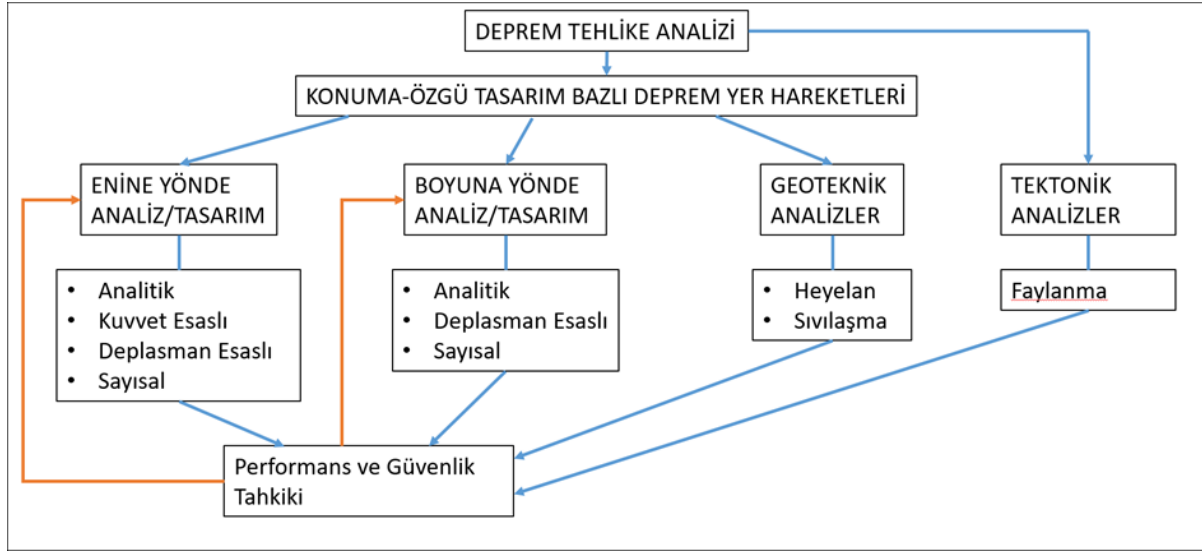
Şekil 4.1. Tünel/Yeraltı yapıları deprem deformasyon tipleri

## 4.2. HESAP/TASARIM FELSEFESİ VE YÖNTEMLERİ

**4.2.1-** Mühendislik uygulamalarında, statik ve deprem davranışlarının ayrı ayrı değerlendirilmesi ve toplam davranış ve etkilerin bulunması için uygun bir şekilde birleştirilmesi genel bir uygulamadır. Tünel/Yeraltı yapılarının deprem hesabı ve tasarımı aşağıdaki temel adımlardan oluşacaktır (Şekil 4.2):

- Deprem tehlikesi belirlemesi ve tasarım depremi seçimi,
- Zemin ortamı dinamik deprem davranışının ve diğer ilgili olayların (fay yırtılması, sıvılaştırma, heyelan gibi) değerlendirilmesi,
- Tünel/Yeraltı yapısının deprem davranışının değerlendirilmesi,
- Statik ve dinamik (deprem) etkilerin uygun bir şekilde birleştirilmesi.

Madde 3.4.2 kapsamında hesap ve tasarım için uygulanacak yöntemler Deprem Yer Hareketi Düzeyleri ve Risk Sınıflarına bağlı olarak belirlenmiştir. (A-Tipi, B-Tipi ve C-Tipi).



Şekil 4.2. Tünel/Yeraltı yapılarının deprem tasarım süreci

**4.2.2-** Tünel ve diğer yeraltı yapılarının deprem hesap ve tasarımı, genellikle, boyuna ve enine hesap olarak ayrı ayrı yapılır. Bu hesaplarda basitleştirilmiş kapalı denklemler, konvansiyonel yapısal hesap ve sayısal hesap yaklaşımları, deprem risk sınıfı ve yer hareketi düzeyine bağlı olarak, kullanılabilir. Bu hesaplar kapsamında zemin-yapı etkileşiminin ihmal edilmesi veya göz önüne alınması mümkündür. Yapı zemin etkileşiminin ihmal edilmesi, boyuna hesap ve tasarımlarda konservatif sonuçlara yol açar. Enine hesap ve tasarımlarda ise, yapı ve zeminin göreceli rijitliğine bağlı olarak, yapı zemin etkileşiminin ihmal edilmesi ile konservatif olmayan sonuçlar elde edilecektir.

**4.2.3-** Üç boyutlu sonlu elemanlar, sonlu farklar veya toplanmış kütle modelleri kullanılarak zaman tanım alanında yapılan dinamik hesap, tünel ve diğer yeraltı yapılarının en gelişmiş ve kapsamlı deprem davranış hesabı ve tasarım yöntemidir. Bu yöntemle tünel/yeraltı yapısı hem enine, hem de boyuna yönlerde, karmaşık zemin ortamı geometrisi ve eş-zamansız deprem yer hareketi dağılımı de dikkate alınarak modellenebilir ve hesap edilebilir. Bu yöntemde, zemin-yapı etkileşimi doğrudan göz önüne alınmaktadır. Uygun bünye denklemleri kullanılarak, yapının, zemin ortamının ve zemin-tünel ara yüzünün doğrusal olmayan davranışı dikkate alınır. İdare tarafından belirlenecek, yüksek risk sınıfında (RS-2) yer alan, çok önemli ulaşım hattı fonksiyonuna haiz kritik ve özel tünellerin deprem hesap/tasarımı için, idarenin talebine binaen, bu hesap/tasarım yöntemi kullanılabilir.

### 4.3 TASARIM SÜRECİ

Tünel/Yeraltı yapılarının tasarımı “Ön-Tasarım” ve “Nihai-Tasarım” olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilecektir.

#### 4.3.1- Deprem Etkisi Altında Dayanıma Göre Tasarım (Ön Tasarım)

Normal Risk Sınıfında (RS-1) yer alan yapılar için DD-2a ve Yüksek Risk Sınıfında (RS-2) yer alan yapılar için DD-2 Deprem Seviyesi altında, Tablo 3.1’de belirtilmiş tasarım yöntemleri kullanılarak, taşıyıcı sistemin doğrusal deprem hesabı yapılır.

Bu hesap ile bulunan deprem iç kuvvetleri diğer (statik) yüklerden oluşan iç kuvvetlerle birleştirilerek dayanım talepleri elde edilir ve eleman dayanım talepleri, eleman iç kuvvet kapasiteleri (dayanım kapasiteleri) ile karşılaştırılır.

Dayanım taleplerinin dayanım kapasitelerinin altında olduğu gösterilerek tasarım tamamlanır. Aksi durumda taşıyıcı eleman kesitleri değiştirilir ve hesap tekrarlanarak sonuca gidilir.

Dayanıma Göre Tasarım kapsamında betonarme taşıyıcı sistem elemanlarının modelleme ve tasarımında TBDY (2018)- Bölüm 7 ve 8'in ilgili kuralları kullanılacaktır. Betonarme taşıyıcı sistem elemanlarının etkin kesit rijitliklerinin belirlenmesi için TBDY (2018)- Madde 4.5.8 kuralları uygulanacaktır.

#### 4.3.2 - Deprem Etkisi altında Şekildeğiştirmeye Göre Tasarım (Nihai Tasarım)

DD-1 Deprem Seviyesi etkisi altında, Tablo 3.1'de kapsanan Risk Sınıfı'na bağlı tasarım yöntemleri kullanılarak yapının şekildeğiştirme talepleri ile dayanım talepleri elde edilir.

Elde edilen şekildeğiştirme ve iç kuvvet talepleri, Risk Sınıfı'na bağlı olarak, SH-Sınırlı Hasar veya KH-Kontrollü Hasar performans hedefleri ile uyumlu olarak tanımlanan şekildeğiştirme ve dayanım kapasiteleri ile karşılaştırılır.

Bulunan şekildeğiştirme ve dayanım talepleri, bunlara karşı gelen şekildeğiştirme ve dayanım kapasitelerinin altında ise şekildeğiştirmeye göre tasarım tamamlanır. Aksi durumda eleman kesitleri değiştirilir ve hesap tekrarlanarak yeniden değerlendirme yapılır ve bu şekilde şekildeğiştirmeye göre tasarım sonuçlandırılır.

İç kuvvet kapasitelerinin hesabında karakteristik malzeme dayanımları yerine hesap (beklenen) malzeme dayanımı değerleri kullanılacaktır.

Betonarme taşıyıcı sistem elemanlarının modelleme ve tasarımında TBDY (2018)- Bölüm 7 ve 8'in ilgili kuralları kullanılacaktır. Betonarme Taşıyıcı Sistem Elemanlarının Etkin Kesit Rijitliklerinin belirlenmesi için TBDY (2018)- Madde 4.5.8 kullanılacaktır.

Sınırlı Hasar (SH) ve Kontrollü Hasar (KH) Performans Düzeyleri için yapılacak performans değerlendirmesinde kullanılacak beton ve donatı çeliği için izin verilen toplam birim şekildeğiştirmeler TBDY (2018) – Madde 5.8 kapsamında tanımlanmıştır.

Kontrollü Hasar (KH) Performans Hedefi kapsamında, doğrusal-elastik hesap kullanılarak, belirlenen yapı taşıyıcı sistemi eğilme dayanımının belirli konumlarda aşılması durumunda, uygun bir detaylandırma prosedürü kullanılarak, yeterli sünekliğin sağlanması gerekir.

Gerekli durumlarda ve özellikle aç-kapa tipi yapılarda plastik mafsalların oluşumu göz önüne alınarak yapı davranışı tekrar hesap edilmeli, moment ve iç kuvvetlerin dağılımı yeniden belirlenmelidir.

#### 4.4.3 Yük Birleşimleri

Taşıyıcı sistem elemanlarının tasarımında esas alınmak üzere, deprem etkisini içeren yük birleşimleri aşağıdaki ifadelerde verildiği şekilde kullanılacaktır.

$$U = 1.0 G + 1.0 Q + 1.0 (E1 + E2 + EX) + 1.0EQe + 0.3EQb \quad (4.1)$$

$$U = 1.0 G + 1.0 Q + 1.0 (E1 + E2 + EX) + 1.0EQb + 0.3EQe \quad (4.2)$$

Bu denklemlerde,

*U*: gerekli yapısal dayanım kapasitesini,

*G*: yapısal zati (ölü) yük etkilerini,

*Q*: hareketli yük etkilerini,

*E1*: zemin ve suyun düşey yüklerinden kaynaklanan etkileri,

*E2*: zemin ve suyun yatay yüklerinden kaynaklanan etkileri,

*EX*: kazı nedeniyle oluşan statik yüklerin etkisi,

*EQb*: tasarım depremi yer hareketine bağlı boyuna etkiler ve

*EQe*: tasarım depremi yer hareketine bağlı enine etkilerdir

## BÖLÜM 5 – YER SARSINTISI İÇİN BOYUNA YÖNDE ANALİZ VE TASARIM

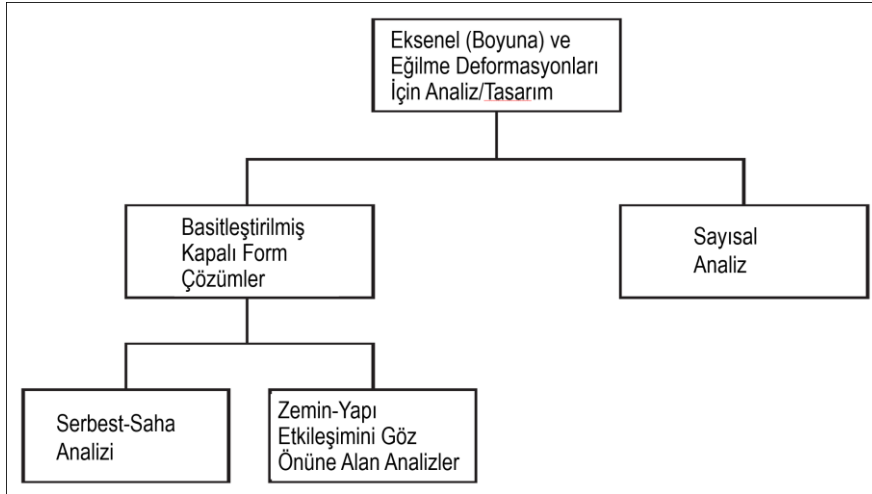
### 5.1. GENEL KURALLAR

5.1.1. Tünellerin deprem yer sarsıntısı için boyuna yönde hesap ve tasarımı için, belirli kısıtlamalara (Madde 3.4 ve Tablo 3.1) bağlı olarak, aşağıdaki yöntemler (Şekil 5.1) kullanılacaktır.

- Zemin-yapı etkileşim etkilerini ihmal eden, basitleştirilmiş serbest-saha zemin deformasyonu yöntemi (A-Tipi hesap)
- Elastik temel üzerine oturan kiriş modeline dayalı olarak geliştirilmiş zemin-yapı etkileşimi etkisini içeren hesap yöntemi (B-Tipi hesap)
- Sayısal modelleme yaklaşımı kullanan yöntemler (C-Tipi hesap)

5.1.2- Aşağıda belirtilen koşullar için özel hesap ve tasarım yapılacaktır.

- Tünelin bir istasyon veya havalandırma binası gibi rijit ve masif bir yapıya bağlandığı durumlarda
- İki tünel arasındaki bağlantı veya tünel / çapraz geçiş ara yüzünün bağlantı noktalarında.
- Tünelin keskin rijitlik farkı olan iki ayrı jeolojik ortamdan (örneğin, bir zemin / kaya ara yüzü) geçtiği durumlarda.
- Tünel hareketlerinin herhangi bir şekilde (sert nokta) yerel olarak kısıtlandığı durumlarda.



Şekil 5.1 Yer sarsıntısı için boyuna hesap/tasarım yöntemleri

### 5.2 SERBEST SAHA ZEMİN YERDEĞİŞTİRME HESABI

#### 5.2.1- Genel Kurallar

5.2.1.1- Tünel kaplamasındaki boyuna (eksenel) ve eğilme deformasyon davranışlarının doğrusal elastik olduğu kabulü ve tünellerin zemin ortamında oluşan deformasyonlara uyduğu varsayımı ile birim şekildeğiştirme ve gerilmelerin belirlenmesine yönelik olarak, zemin ortamı serbest saha yerdeğiştirme hesapları yapılacaktır. İşbu boyuna ve eğilme kaynaklı eksenel birim şekildeğiştirmelerin hesabı için P-dalgaları, S-(kesme) dalgaları ve R- (Rayleigh) dalgalarının yayılımına dayalı kapalı form çözümler geliştirmiştir (A ve B-Tipi hesap). Hesaplamalar esasen tünel deprem davranışında en büyük önemi haiz S-salgalarına bağlı olarak yapılacaktır. Büyük havza geçişlerinde R-dalgalarına bağlı davranış önemli olabilmektedir. Serbest-saha zemin deformasyonu yöntemi, her ne kadar konservatif ise de,

tünel kaplaması rijitliğinin zemine göre daha düşük olduğu durumlarda makul bir değerlendirme sağlamaktadır.

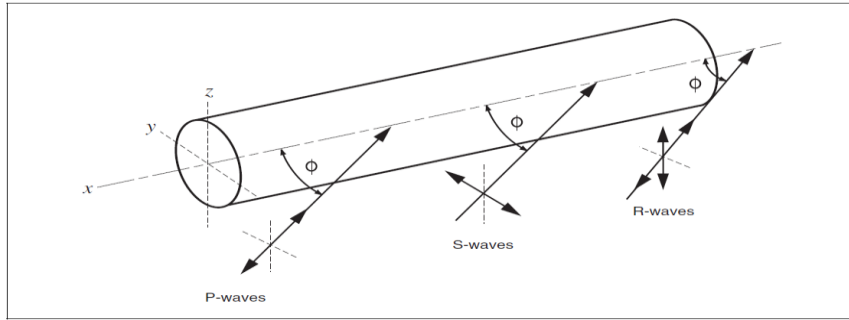
**5.2.1.2-** Düzgün (uniform) jeolojik ortamın olmadığı, ani yapısal rijitlik ve jeolojik ortam değişikliklerinin meydana geldiği ve tünellerin diğer yeraltı yapılarına bağlanmaları durumunda boyuna özel hesaplar yapılacaktır.

**5.2.1.3-** Yüksek risk sınıfında (RS-2) yer alan tünellere çevresindeki zemin ortamı tarafından uygulanan boyuna ve eğilme deformasyonlarının ve kuvvet ve momentlerin hesabı için 2 ve 3 boyutlu sonlu eleman/fark modellemesine dayalı sayısal yöntemler (C-Tipi hesap) kullanılacaktır (Madde 3.4 ve Tablo 3.1).

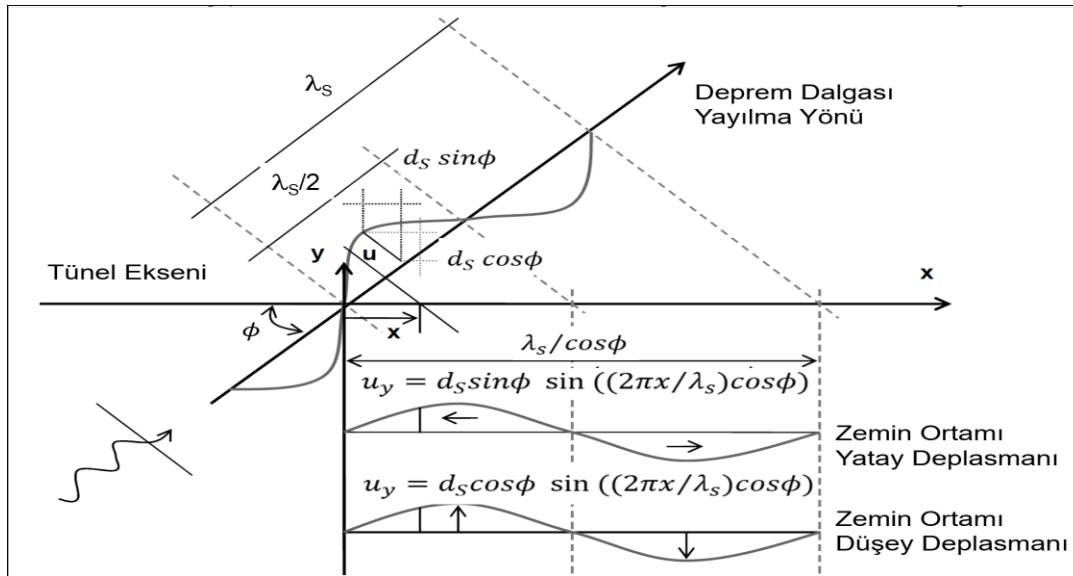
## 5.2.2. Kapalı Form Çözümler

**5.2.2.1-** Kapalı form birim şekildeğiştirme ve eğrilik yarıçapı çözümleri, harmonik deprem dalgalarının (P-, S- ve R- dalgaları) tünel eksenine göre yayılma açılarına, genliklerine, gerçek ve görelî yayılma hızlarına bağlı olarak verilir (Şekil 5.2 ve 5.3)

**5.2.2.2-** Eksenel birim şekildeğiştirme genellikle tünel tasarım ve performansında birincil öneme sahiptir. S-dalgaları tipik olarak en büyük birim şekildeğiştirmelere neden olur ve boyuna davranışı kontrol eden dalga tipidir. Özel durum (havza veya kalın alüvyon tabakaları) ve konumlarda R-dalgaları en yüksek birim şekildeğiştirmelere neden olabilir ve tasarımda, tasarım gözetimi tarafından, göz önüne alınmalıdır.



Şekil 5.2. Tünel eksenine göre  $\phi$  açısı ile yayılan P-, S- ve R- dalgaları



Şekil 5.3. Tünel eksenine göre  $\phi$  açısı ile yayılan,  $d_s$  yerdeğiştirme genliğine ve  $\lambda_s$  dalga boyuna haiz bir harmonik S-dalgası için zemin ortamının x ve y yönündeki harmonik yerdeğiştirmeleri.



### 5.2.2.3. Zemin-Yapı Etkileşiminin İhmal Edilmesi Durumu (A-Tipi Hesap)

Tünel kaplamasının esnek bir kiriş olarak modellenmesi ve serbest-saha zemin birim şekildeğiştirme ve eğriliklerin, zemin-yapı etkileşiminin ihmal edilerek kullanılması ile elde edilen boyuna toplam eksenel birim şekildeğiştirme, kayma dalgası (s-dalgası) için aşağıda sunulmuştur. Bu denklemlerde yer alan  $r$ , dairesel kesitli tünel kaplamasının yarıçapını veya dikdörtgen (veya nal kesitli) tünel kaplamalarının eşdeğer (aynı kesit alanına karşı gelen daire) yarıçapını göstermektedir.

s-dalgası için boyuna (eksenel) birim şekildeğiştirme:

$$\varepsilon^a = \left[ \frac{v_s}{c_{se}} \sin\phi \cos\phi \right] \quad (5.1)$$

s-dalgası için eğilme kaynaklı boyuna (eksenel) birim şekildeğiştirme:

$$\varepsilon^b = \left[ r \frac{a_s}{c_{se}^2} \cos^3\phi \right] \quad (5.2)$$

S-dalgası için toplam boyuna (eksenel) birim şekildeğiştirme:

$$\varepsilon^{ab} = \left[ \frac{v_s}{c_{se}} \sin\phi \cos\phi + r \frac{a_s}{c_{se}^2} \cos^3\phi \right] \quad (5.3)$$

Burada:

$c_{se}$  = s-dalgası görünür yayılma hızı

$v_s$  = s-dalgası en büyük zemin parçacık hızı

$a_s$  = s-dalgası en büyük zemin parçacık ivmesi

$d_s$  = s-dalgası en büyük zemin parçacık yerdeğiştirmesi

$\phi$  = Tünel eksenine göre s-dalgası geliş (yayılma) açısı

$r$  =  $D/2$ = dairesel tünel kaplaması yarı çapı

S-dalgalarının görünür yayılma hızı, özel olarak hesaplanmadığı takdirde, emniyetli tarafta kalınarak hızı ZA ve ZB zemin sınıfları için  $c_{se} = 1\text{ km/s}$  ve diğer zemin sınıfları için  $c_{se} = 0.8\text{ km/s}$  olarak alınabilir.

Teorik olarak, Denklem 5.3'ü maksimize edecek yayılma açısı ( $\phi$ ) değerinin belirlenmesi gerekir. Ancak, konservatif tarafta kalarak,  $\phi=45^\circ$  kabulü ile aşağıdaki maksimum eksenel birim şekildeğiştirme değerleri kullanılabilir.

$$\varepsilon_{max}^a = \left[ \frac{v_s}{2c_{se}} \right] \quad (5.4)$$

$$\varepsilon_{max}^b = 0.35 \left[ r \frac{a_s}{c_{se}^2} \right] \quad (5.5)$$

$$\varepsilon_{max}^{ab} = \left[ 0.5 \frac{v_s}{c_{se}} + 0.35 r \frac{a_s}{c_{se}^2} \right] \quad (5.6)$$

Tünel yapısının esnek bir kiriş olarak modellenmesi ve bu model üzerine (zemin-yapı etkileşimi ihmal edilerek), homojen, izotropik ve esnek sonsuz bir zemin ortamında yayılan, s-dalgası tipi deprem yer hareketinin uygulanması ile elde edilmiş moment ( $M_l$ ), boyuna normal kuvvet ( $N_l$ ) ve kesme kuvveti ( $V_l$ ) (Şekil 5.4) ifadeleri aşağıda verilmiştir.

$$M_l = \left( \frac{2\pi}{\lambda_s} \right)^2 \cos^3\phi E_l I_l d_s \sin\left( \frac{2\pi x}{\lambda_s/\cos\phi} \right) \quad (5.7)$$

$$N_l = \left( \frac{2\pi}{\lambda_s} \right) \sin\phi \cos\phi E_l A_l d_s \cos\left( \frac{2\pi x}{\lambda_s/\cos\phi} \right) \quad (5.8)$$

$$V_l = \left(\frac{2\pi}{\lambda_s}\right)^3 \cos^4 \phi E_l I_l d_s \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda_s / \cos \phi}\right) \quad (5.9)$$

Denklem (5.7), (5.8) ve (5.9) sırasıyla tünel enkesit düzlemi üzerindeki moment (M), kesme (V) ve normal (eksenel) kuvvet (N) ifadeleridir. Bu ifadelerde  $d_s$  ve  $\lambda_s$ , sırasıyla s-dalgasının yerdeğiştirme genliğini ve dalga boyunu,  $E_l$ ,  $A_l$  ve  $I_l$  ise sırasıyla tünel kaplamasının elastisite modülü, kesit alanı ve birim boy başına atalet momentidir. Göz önüne alınan konuma tünel başlangıç noktasından ölçülen mesafeyi ise  $x$  temsil eder.

S-dalgası dalga boyu,  $\lambda_s$ , Denklem 5.10 ile belirlenecektir.

$$\lambda_s = c_{se} T_d \quad (5.10)$$

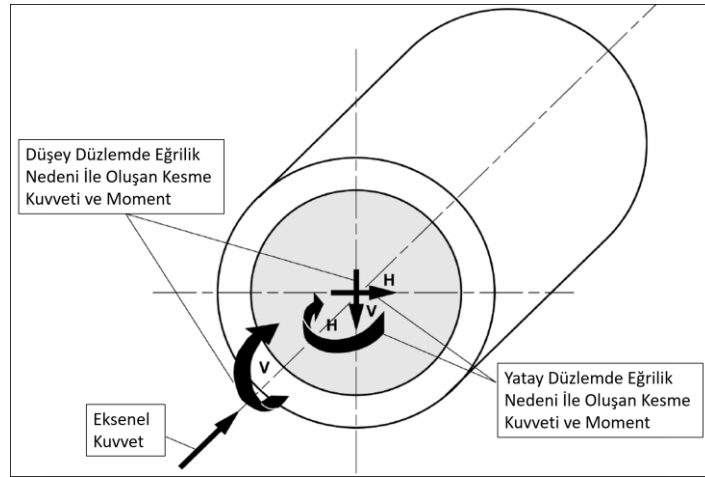
Özel bir etüd yapılmadığı takdirde,  $T_d = 2s$  (Denklem 2.14) olarak kabul edilebilir.

Tünel enkesit düzlemi üzerine oluşacak en büyük moment ( $M_{l,max}$ ), normal (eksenel) kuvvet ( $N_{l,max}$ ) ve kesme kuvveti ( $V_{l,max}$ ) değerleri aşağıda sırasıyla Denklem (5.11), (5.12) ve (5.13) ile verilmiştir. Enbüyük yerdeğiştirme,  $d_s$ , Denklem 2.13 vasıtası ile hesaplanacaktır.

$$M_{l,max} = \left(\frac{2\pi}{\lambda_s}\right)^2 E_l I_l d_s \quad (5.11)$$

$$N_{l,max} = \left(\frac{\pi}{\lambda_s}\right) E_l A_l d_s \quad (5.12)$$

$$V_{l,max} = \left(\frac{2\pi}{\lambda_s}\right) M_{l,max} \quad (5.13)$$



Şekil 5.4. Tünel en kesitinde oluşan boyuna normal kuvvet, kesme kuvveti ve momentin şematik gösterimi

#### 5.2.2.4. Zemin-Yapı Etkileşiminin Göz Önüne Alınması Durumu (B-Tipi Hesap)

Zemin-Yapı etkileşiminin göz önüne alınarak hesap sonuçlarına yansıtılması için serbest-saha zemin ortamı yerdeğiştirmesine dayalı birim şekildeğiştirmeler, kuvvet ve momentler aşağıdaki İndirgeme Faktörleri ( $RF_1$  ve  $RF_2$ ) ile bölünür.

Boyuna birim şekildeğiştirme ve normal (eksenel) kuvvet için:

$$RF_1 = 1 + \frac{E_l A_l}{k_a} \left(\frac{2\pi}{\lambda_s}\right)^2 \cos^2 \phi \quad (5.14)$$

Eğilme birim şekildeğiştirme, moment ve kesme kuvveti için:

$$RF_2 = 1 + \frac{E_l I_l}{k_t} \left(\frac{2\pi}{\lambda_s}\right)^4 \cos^4 \phi \quad (5.15)$$

Burada:

$E_l$  = Tünel kesitinin elastisite modülü

$A_l$  = Tünel kaplaması kesit alanı

$k_t$  = Zemin enine (yanal) yay katsayısı

$k_a$  = Zemin boyuna yay katsayısı

$\lambda_s$  = s-dalgası dalga boyu

$I_l$  = Kaplama kesitinin atalet momenti,  $I_l = \frac{\pi(D_d^4 - D_i^4)}{64}$

Burada  $D_d$  ve  $D_i$  dairesel kaplamanın sırasıyla dış ve iç çaplarını göstermektedir.

Denklem 5.14 ve 5.15'de yer alan  $k_a$  ve  $k_t$  zemin katsayıları aşağıdaki ifade ile verilir:

$$k_a = k_t = \frac{16\pi G'_s (1-\nu_s)}{3-4\nu_s} \frac{D}{\lambda_s} \quad (5.16)$$

Tünel kesiti üzerine oluşacak, Zemin-Yapı etkileşimi göz önüne alınmış, en büyük eğilme moment ( $M_{max}$ ), boyuna normal (eksenel itme) kuvveti ( $N_{max}$ ), kesme kuvveti ( $V_{max}$ ) ve s-dalgası için toplam eksenel birim şekildeğiştirme ( $\varepsilon_{zye}^{ab}$ ) değerleri aşağıda sırasıyla Denklem (5.15), (5.16), (5.17) ve (5.18) ile gösterilmiştir.

$$N_{l,max,zye} = N_{l,max} / RF_1 \quad (5.17)$$

$$M_{l,max,zye} = M_{l,max} / RF_2 \quad (5.18)$$

$$V_{l,max,zye} = V_{l,max} / RF_2 \quad (5.19)$$

$$\varepsilon_{zye}^{ab} = \left[ \left(\frac{\nu_s}{C_s} \sin\phi \cos\phi\right) / RF_1 + \left(r \frac{a_s}{C_s^2} \cos^3\phi\right) / RF_2 \right] \quad (5.20)$$

Burada,  $D$  dairesel tünel kaplamanının çapı veya dikdörtgen kesitli tüneller için tünel kesitinin yüksekliği ( $H$ ) olmaktadır. Denklem (5.16) ve dolayısıyla, Denklem 5.17, 5.18, 5.19 ve 5.20 ile verilen ifadeler s-dalgası dalga boyunun ( $\lambda_s$ ) bir fonksiyonu olmaktadır.

Dalga boyu hâkim değerinin belirlenmesi için özel etüdlerin yapılmadığı durumlar için aşağıdaki yöntem kullanılabilir.

Yay katsayılarının dalga boyundan bağımsız olduğu kabul edilir ve Denklem 5.18, 5.19 ve 5.20 dalga boyu cinsinden maksimize edilirse, eksenel kuvvet, moment ve kesme kuvveti değerlerinin basitleştirilmiş, dalga boyundan bağımsız, ancak konservatif, değerleri aşağıdaki denklemlerle verilir. Bu denklemlerde  $k_a = k_t = 3G'_s$  olarak kabul edilecektir.

$$N_{l,max,zye} = \frac{1}{4} (2k_a E_l A_l)^{0.5} d_s \quad (5.21)$$

$$M_{l,max,zye} = \frac{1}{2} (k_t E_l I_l)^{0.5} d_s \quad (5.22)$$

$$V_{l,max,zye} = \frac{3}{4} \left(\frac{k_t^3 E_l I_l}{3}\right)^{0.25} d_s \quad (5.23)$$

Hesaplanan normal (eksenel) kuvvet,  $N_{l,max,yze}$ , kaplama ve zemin ortamı arasındaki (arayüzdeki) maksimum sürtünme kuvvetlerinden kaynaklanacak eksenel kuvvet'ten daha büyük olamaz.

$$\text{Maksimum eksenel kuvvet } N_{l,max,yze} \leq f \lambda_S / 4 \quad (5.24)$$

$$\text{Maksimum eksenel birim şekildeğiştirme } (\epsilon_{zye}^a) \leq f \lambda_S / (4 E_I A_I) \quad (5.25)$$

Burada, f, tünel-zemin arayüzünde birim boy başına maksimum sürtünme kuvveti olmaktadır.

### 5.3. SAYISAL HESAP/TASARIM YÖNTEMLERİ (C-TİPİ HESAP)

Sayısal hesaplar: elastik temel üzerine oturan giriş modeline (Winkler Modeli) dayalı eşdeğer-statik yöntem, toplanmış kütle-yay modeline dayalı dinamik yöntem ve sonlu fark/eleman modellerine dayalı yöntemler kullanılarak yapılabilir.

#### 5.3.1. Eşdeğer-Statik Hesap Yöntemi

**5.3.1.1-** Genel olarak, bir tünelin eylemsizliği, çevresindeki zemin ortamına kıyasla daha küçük olduğu cihetle, boyuna eksenel ve eğrilik deformasyon hesabının eşdeğer-statik olarak yapılması mümkündür. Eşdeğer-statik hesap yönteminde, zaman tanım alanında belirlenmiş serbest saha zemin yerdeğiştirmeleri doğrudan tünele bağlı zemin yaylarına (ve söndürücülere) uygulanır. Bu yöntem için oluşturulan modelde, tünel yapısı, zemin yayları ve söndürücüleri ile modellenmiş dinamik Winkler temeli üzerinde yer alan doğrusal (veya eşdeğer doğrusal) elastik bir giriş olarak modellenir.

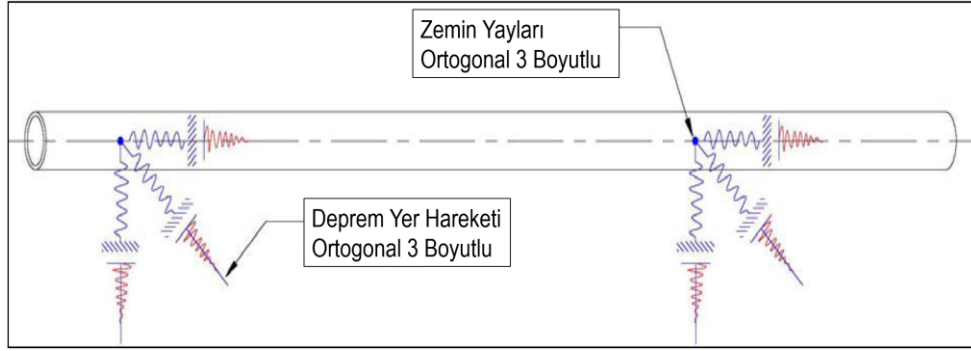
**5.3.1.2-** Eşdeğer-Statik Hesap Yönteminin uygulaması genel olarak aşağıdaki basamakları içerir.

- Tünel seviyesindeki zeminin serbest saha deformasyonları dinamik zemin davranış hesabı ile ele edilir. Bu hesap kapsamında deprem hareketinin üç boyutlu özelliği, mekânsal değişimi ve yayılmadan kaynaklanan faz değişikliği göz önüne alınmalıdır. Tünel güzergâhı boyunca ve tünel seviyesindeki zemin yerdeğiştirmeleri, zaman tanım alanında, boyuna, enine ve düşey doğrultuda belirlenir.

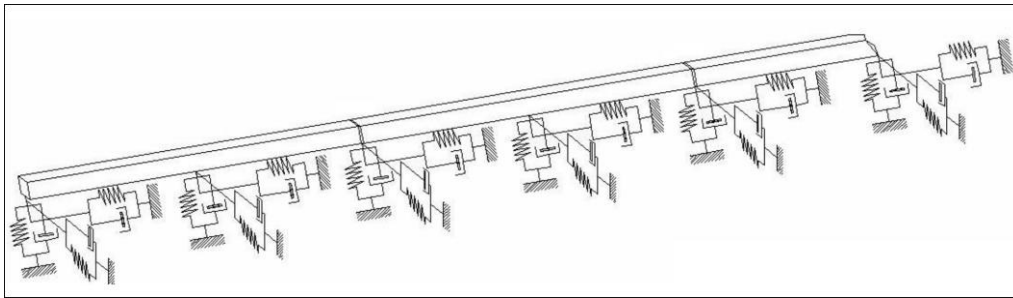
- Tünel boyunca üç boyutlu bir sonlu elemanlar / farklar modeli geliştirilir. Bu modelde, tünel, tünel eksen boyunca ayırık hale getirilirken, çevresindeki zemin ortamı boyuna, enine ve düşey zemin yaylar ve söndürücüleri (zemin impedansı) vasıtası ile temsil edilir. Bu yayların özellikleri, yukarıda tanımlanmış zemin davranış hesabında kullanılan özelliklerle uyumlu olmalıdır. Tünel ve zemin ortamı arasındaki sürtünme davranışı, boyuna zemin yayı özelliklerine yansıtılmalıdır.

- Tünel güzergâhı boyunca zaman tanım alanında belirlenmiş zemin yerdeğiştirmeleri, her bir zaman adımında statik olarak zemin yaylarının uçlarına etkiletilir ve tünel davranışı (iç kuvvetler ve yerdeğiştirmeleri) hesaplanır.

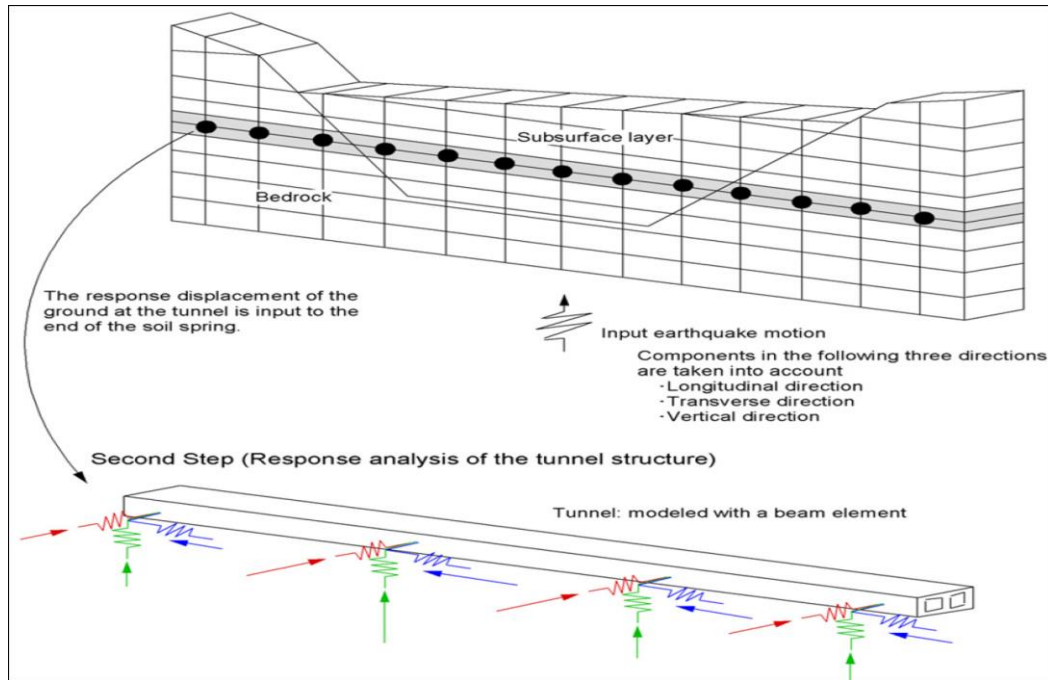
**5.3.1.3-** Şekil 5.5 ve 5.6'da örnek olarak, Eşdeğer-Statik Hesap Yöntemi kapsamına geliştirilmiş zemin-yapı modelleri sunulmuştur. Şekil 5.7'de Avrasya batırma tüp tüneli için kullanılmış model verilmektedir. Avrasya modelinde kullanılmış serbest-saha zemin hareketleri ve zemin yayı katsayıları sonlu elemanlar/farklar modeline dayalı olarak (Şekil 5.9 ve 5.10) hesaplanmıştır.



Şekil 5.5. Elastik-temel (zemin yayları) üzerine oturan elastic kiriş modeline (Winkler Modeli) dayalı olarak, zemin-yapı etkileşimini göz önüne alan bir modelleme.



Şekil 5.6. Elastik-temel (zemin yayları ve söndürücülerini) üzerine oturan elastic kiriş modeline (Winkler Modeli) dayalı olarak, zemin-yapı etkileşimini göz önüne alan bir modelleme. (Tünel segmentleri arasındaki derzlerde birleşim elemanlarının yanal rijitliğini yansıtan yay ve söndürücülerle modellenmiştir).



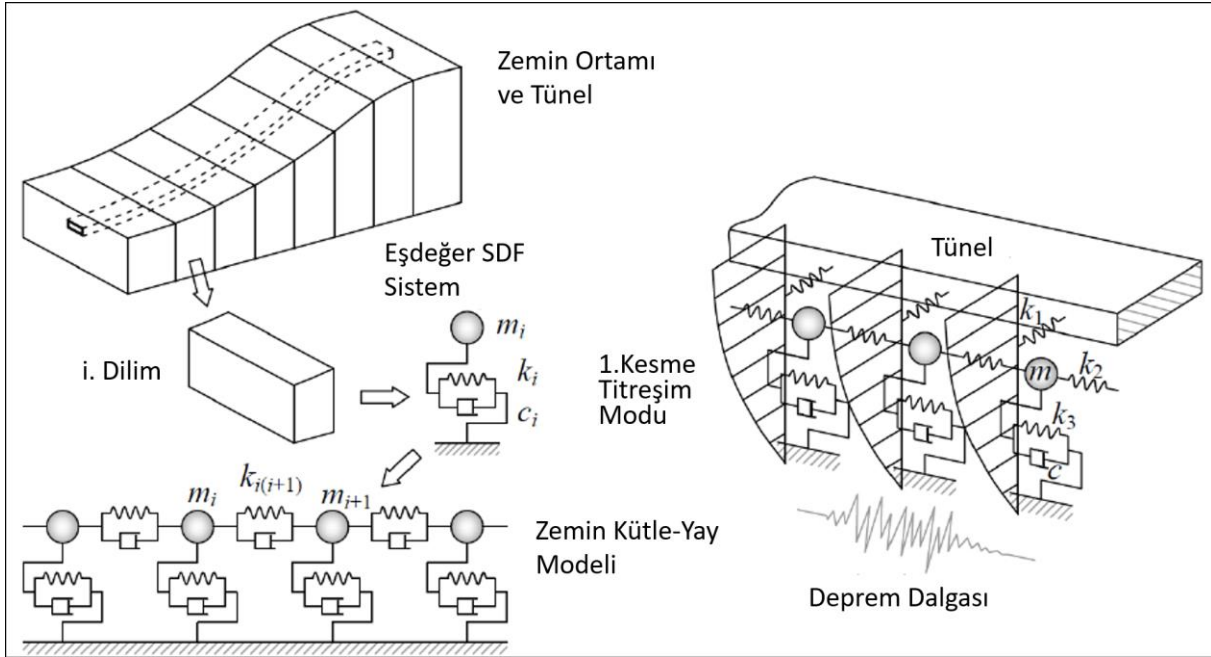
Şekil 5.7. Elastik-temel (zemin yayları ve söndürücülerini) üzerine oturan elastic kiriş modeline (Winkler Modeli) dayalı olarak, zemin-yapı etkileşimini göz önüne alan MARMARAY Batırma Tüp Tüneli modeli.

### 5.3.2. Toplanmış Kütle-Yay Modeline Dayalı Yöntem

5.3.2.1-Toplanmış kütle-yay modeline dayalı eşdeğer-statik yöntemde, zemin ortamı tünel eksenini boyunca düşey olarak dilimlenmekte ve her bir dilim eşdeğer bir kütle ve yay sistemi ile temsil edilmektedir (Şekil 5.8). Zemin ortamının modellenmesi kapsamında:

- Herbir zemin dilimi için, kısa yöndeki 1. titreşim modu özellikleri kullanılarak eşdeğer tek serbestlik dereceli model (etkin kütle ( $m_i$ ), etkin rijitliği ( $k_i$ ) ve etkin sönüm katsayısı ( $c_i$ )) oluşturulur.
- Toplanmış kütle, zemin diliminin hareketli kütlelerini temsil eder ve bu kütle temele zemin diliminin temel kesme titreşim modu özelliklerini temsil eden) bir yay ve söndürücü vasıtası ile bağlanır.
- Her bir kütle, ayrıca, boyuna yönde, zemin dilimleri arasındaki zemin ortamının visko-elastik özelliklerini modelleyen yay ve söndürücülerle birbirine bağlanır.

Tünel elastik bir kiriş olarak modellenir ve eşdeğer kütlelere zemin rijitliğini temsil eden yaylarla bağlanır. Her bir dilimin deprem davranışı SH dalgası yayılımına dayalı eşdeğer doğrusal olmayan hesap metodu ile belirlenir ve bu hesap vasıtası ile elde edilmiş deprem yerdeğiştirmeleri her bir kütle üzerine boyuna yönde etkilerek tünelin dinamik davranışı incelenir.



Şekil 5.8. Toplanmış kütle-yay modeline dayalı dinamik hesap yöntemi

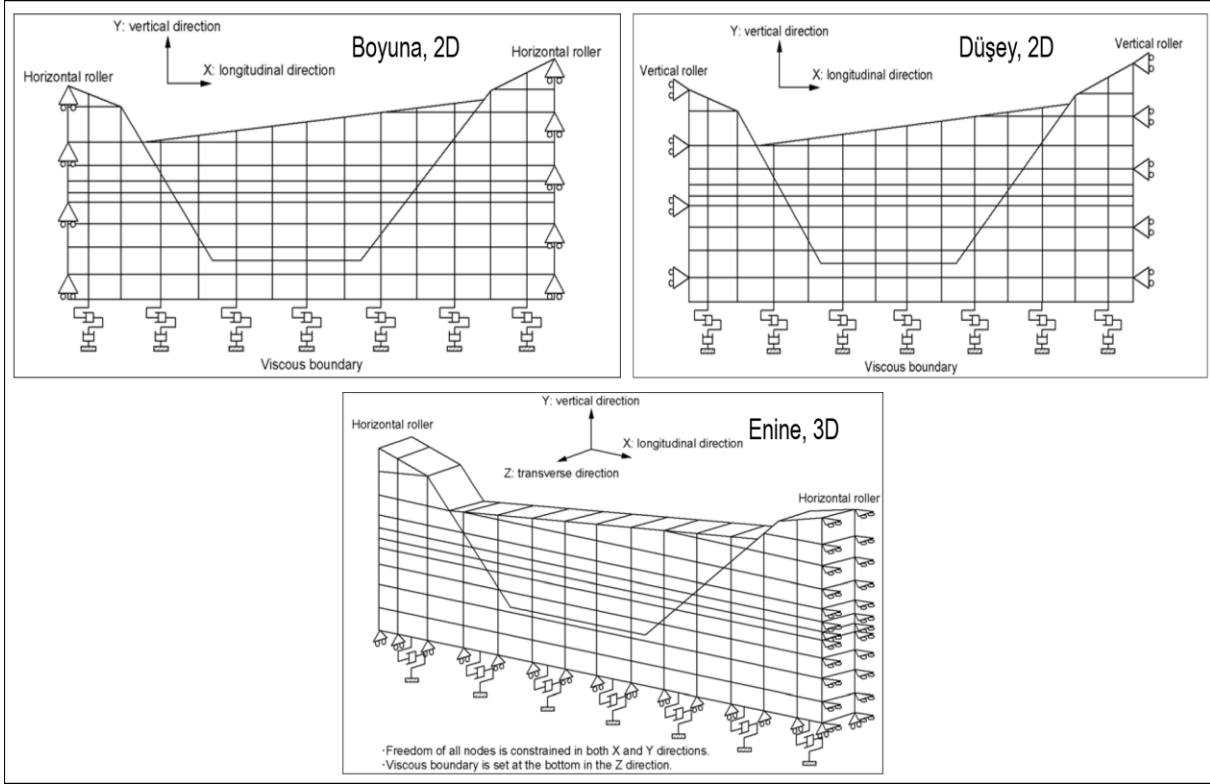
### 5.3.3 Sonlu Fark/Element Modellerine Dayalı Yöntem

Tünel güzergâhı üzerinde boyuna yapılacak 2-boyutlu bir zemin davranış hesabı ile boyuna yatay ve düşey doğrultuda zaman tanım alanında serbest-saha zemin deformasyonları tesbit edilebilir. Hesap kapsamında, deprem dalgası yayılma ve faz farkı özellikleri de göz önüne alınmalıdır.

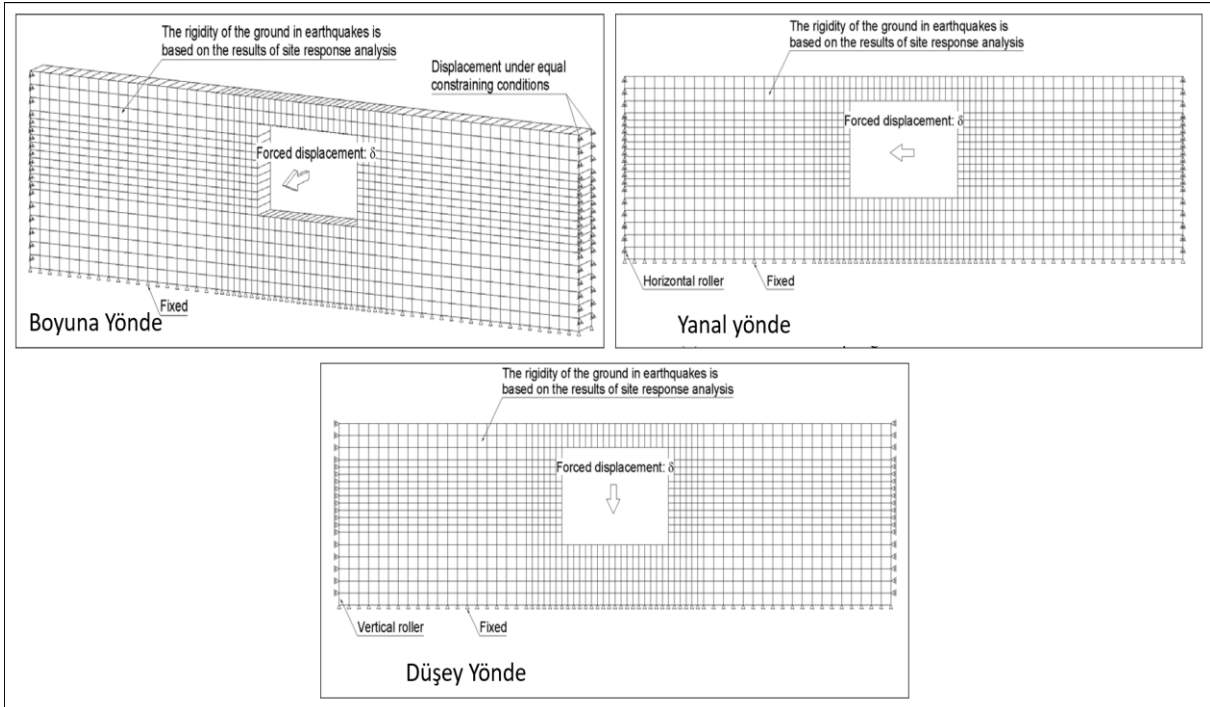
Boyuna, enine ve aksenal zemin yay katsayılarının belirlenmesi için tünel güzergâhı boyunca belirli konumlarda alınacak zemin ortamı dilimleri içinde yer alan tünel boşluğu üzerine birim yerdeğiştirme uygulanarak, 2D hesap yapılabilir (Şekil 5.9).

Sonlu fark/element modelleri, tünel güzergâhı boyunca belirlenen noktalarda, serbest saha zemin ortamı yerdeğiştirmelerinin tayini için kullanılmalıdır (Şekil 5.10).

Şekil 5.9 ve 5.10'da sunulu modeller kapsamında belirlenmiş serbest-saha zemin hareketleri ve zemin yayı katsayıları Avrasya tünelinin Şekil 5.7'de gösterilen elastik-temel üzerine oturan elastik kiriş modelinde kullanılmıştır.



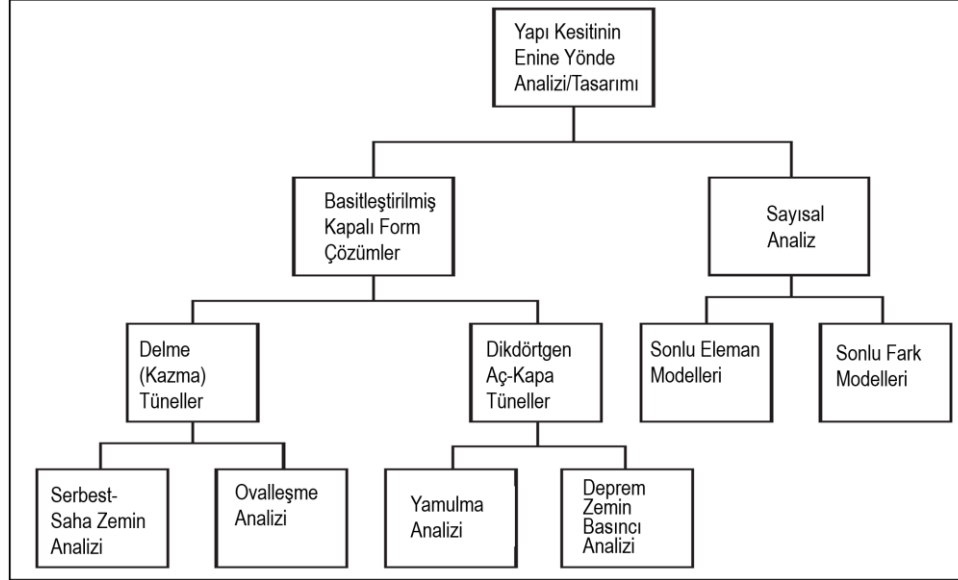
Şekil 5.9. Boyuna, Düşey ve Enine serbest-saha zemin davranış hesabı (MARMARAY)



Şekil 5.10. Boyuna, Yanal ve Düşey yönde zemin yayı katsayılarının belirlenmesi (MARMARAY)

## BÖLÜM 6 – YER SARSINTISI İÇİN ENİNE YÖNDE ANALİZ VE TASARIM

Enine yönde hesap/tasarım yöntemleri, genelde: Dayanım Esaslı, Yerdeğiştirme Esaslı ve Sayısal olmak üzere ayrılabilir. Tünel/yeraltı yapısı kesitinin deprem davranış hesabı için Basitleştirilmiş Kapalı Form Çözüm ve Sayısal Hesap yöntemleri mevcuttur. Basitleştirilmiş Kapalı Form çözümler, kendi içinde, dairesel kesitli (delme/kazma tünel) ve dikdörtgen kesitli (aç-kapa tünel ve diğer yeraltı yapıları) yapılar için ayrılır (Şekil 6.1). Bu çözümler dayanım veya yerdeğiştirme esaslı olabilir.



Şekil 6.1. Yeraltı yapısı kesitinin enine yönde hesap metotları

### 6.1. SERBEST-SAHA ZEMİN YERDEĞİŞTİRME HESABI

#### 6.1.1 Genel Kurallar

Deprem dalgalarının tünel eksenine düşey yönde veya bir açı ile yayılması durumunda, tünel enine kesitinde şekil bozulmaları meydana gelir ve tünel en kesitinde ovalleşme (dairesel kesitler için) veya yamulma (dikdörtgen kesitleri için) deformasyonları gelişebilir (Şekil 4.1). Ovalleşme ve yamulma deformasyonları, esasen, düşey olarak yayılan kayma dalgası (SH-dalgası) tarafından kontrol edilir.

Tünel yapılarının ve veya diğer gömülü yapıların enine ovalleşme / yamulma davranışının hesabı için yapının içinde yer aldığı zemin ortamındaki serbest-saha deformasyonunun tünel veya diğer gömülü yapı seviyesine karşı gelen maksimum kesme birim şekildeğiştirmesinin,  $\gamma_{max}$ , belirlenmesi gerekir.

Bu amaçla, belirli koşul ve kısıtlamalara bağlı olarak, Serbest-Saha Zemin Yerdeğiştirme Hesabı için Madde 6.1.2 ve 6.1.3'de sunulu iki basit ve yaklaşık yöntem (A-Tipi Tasarım Yöntemleri, Madde 3.4 ve Tablo 3.1) kullanılabilir. Tasarım için, her iki yöntemden elde edilen en büyük  $\gamma_{max}$  değeri kullanılacaktır. B- ve C-Tipi Tasarım Yöntemleri (Madde 3.4 ve Tablo 3.1) için Madde 6.1.4'de sunulmuş bir veya iki boyutlu sonlu eleman/farklar yöntemi kullanılacaktır.

#### 6.1.2- Yöntem-1 (A-Tipi Hesap)

Kısıtlı koşullar (Nisbeten homojen, düzgün (uniform) ve yatay stratigrafi ve yatay serbest yüzeyli bir zemin ortamında yer alan sığ bir tünel/yeraltı yapısı) kapsamında, enbüyük serbest-saha zemin kesme birim şekildeğiştirmesi,  $\gamma_{max}$ , tünel/yeraltı yapısı konumundaki pik yatay parçacık hızı,  $v_s$ , ve SH-dalgası etkin (kesme birim şekildeğiştirme seviyesi ile uyumlu) yayılma hızı,  $c'_s$ , kullanılarak, Denklem 6.1 ile hesaplanabilir.



$$\gamma_{max} = V_s / C'_s \quad (6.1)$$

Düşey yayılan kayma dalgasının (SH-dalgası) etkin dalga yayılma hızı,  $c'_s$ , tünel seviyesinde oluşacak kesme birim şekildeğiştirme seviyesi ile uyumlu olmalıdır.  $c'_s$  değerleri, geoteknik etüdlerden elde edilen küçük birim kesme şekildeğiştirmesine telabül eden kayma dalgası yayılma hızı,  $c_s$ 'den, kesme birim şekildeğiştirme seviyesini göz önüne alan uygun bir modifikasyonla elde edilmelidir.

Kaya ortamlar (ZA zemin sınıfı) için  $c'_s/c_s = 1.0$  ila 0.9 arasında alınabilir. Sert zeminlerde (ZB ve ZC zemin sınıfları)  $c'_s/c_s$  oranı 0.9'dan 0.5'ya kadar değişebilir ve yumuşak zeminlerde daha düşük değerler söz konusu olabilir. Değişik enbüyük ivme seviyeleri ve zemin sınıfları için yaklaşık  $c'_s/c_s$  değerleri Tablo 6.1'de sunulmuştur.

Enbüyük İvme Seviyesi	Zemin Sınıfı			
	ZD	ZC	ZB	ZA
$a_s < 0.1g$	0.65	0.80	1.0	1.0
$0.1g \leq a_s < 0.3g$	0.50	0.65	0.80	1.0
$0.3g \leq a_s < 0.5g$	0.15	0.35	0.65	1.0
$a_s \geq 0.5g$	0.04	0.25	0.50	0.90

Tablo 6.1 Değişik enbüyük ivme seviyeleri ve zemin sınıfları için yaklaşık  $c'_s/c_s$  değerleri.

### 6.1.3- Yöntem-2 (A-Tipi Hesap)

Yöntemde önce tünel derinliğindeki (h) maksimum kesme gerilmesi ( $\tau_{max}$ ): zemin toplam birim yoğunluğu ( $\rho_s$ ) ve maksimum yatay ivme ( $a_{max}$ ) cinsinden aşağıdaki ifadeler ile hesaplanır.

Daha sonra maksimum kesme birim şekildeğiştirme seviyesi, maksimum kesme gerilmesi cinsinden hesaplanır.

$$\tau_{max} = [(a_s \cdot r_h) / g] \sigma_{max} \quad (6.2)$$

$$\sigma_{max} = \rho_s h + \sigma_{sürşarj} \quad (6.3)$$

$$\gamma_{max} = \tau_{max} / G'_s \quad (6.4)$$

Burada:

$a_s$  = Zemin yüzeyindeki enbüyük parçacık yatay ivmesi ( $m/s^2$ ) (Denklem 2.9)

$G'_s$  = Zemin ortamının etkin (kesme birim şekildeğiştirme seviyesi ile uyumlu) kesme modülü (Pa)

$\rho_s$  = Zemin toplam birim ağırlığı ( $N/m^3$ )

$\sigma_{max}$  = Tünel alt seviyesindeki toplam düşey basınç (zemin örtü basıncı + sürşarj basıncı) (Pa)

$\sigma_{sürşarj}$  = Tünel alt seviyesindeki sürşarj kaynaklı düşey basınç (Pa)

h = Zemin yüzeyinden tünel alt seviyesine ölçülen zemin örtüsü kalınlığı (m)

$r_h$  = Tünel konumundaki enbüyük yatay ivmenin belirlenmesi için (zemin yüzeyindeki) yatay maksimum ivmeye ( $a_s$ ) derinliğe (z) bağlı olarak uygulanacak azaltma faktörü.

$$\begin{aligned} r_h &= 1 - 0.017 z & z < 30m \\ r_h &= 0.5 & z \geq 30m \end{aligned} \quad (6.5)$$

Serbest-Saha Zemin Yerdeğiştirme Hesaplarında zemin ortamı kesme gerilmesinin ve ise SH dalgasının "etkin" (birim kesme şekildeğiştirme seviyesine bağlı) yayılma hızı değerleri ( $G'_s$  ve  $c'_s$ ) kullanılmalıdır (Denklem 6.6).

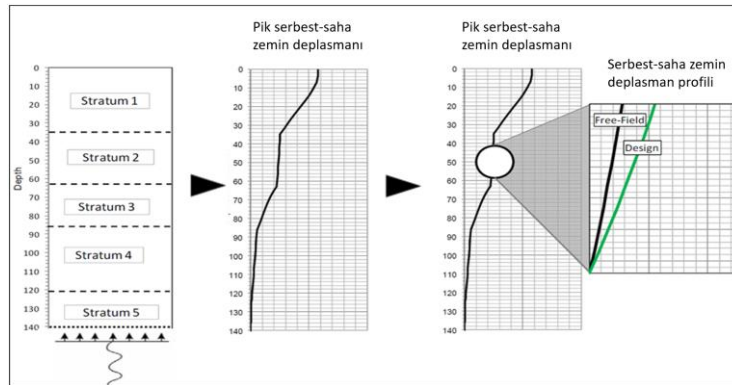
$$G'_s = \frac{\rho_s}{g} c'_s{}^2 \quad (6.6)$$

Değişik enbüyük ivme seviyeleri ve zemin sınıfları için yaklaşık c's/cs değerleri Tablo 6.1'de sunulmuştur.

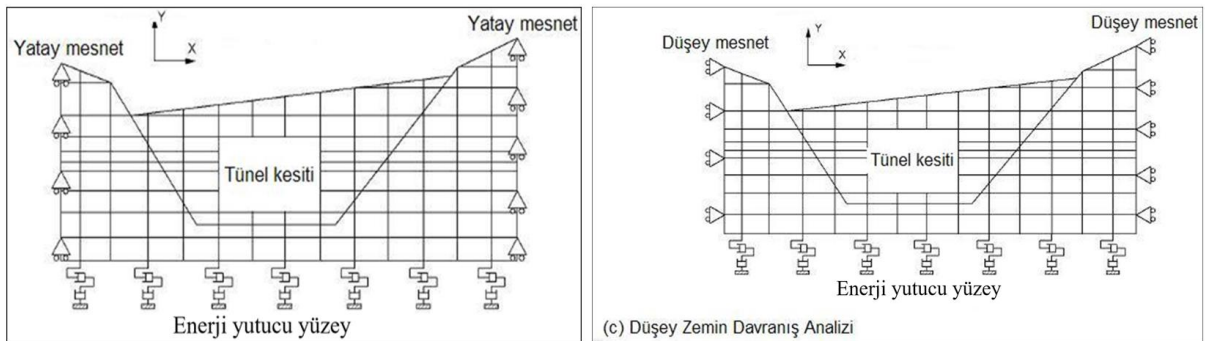
#### 6.1.4- B- ve C-Tipi Tasarım Yöntemleri

B- ve C-Tipi Tasarım Yöntemleri (Madde 3.4 ve Tablo 3.1) kapsamında, maksimum kesme birim şekildeğiştirme seviyesinin belirlenmesi için bir veya iki boyutlu sonlu eleman/farklar yöntemi ile sayısal hesap yapılması gerekir. Bu amaçla, tek boyutlu SH-dalgası yayılımına dayalı, eşdeğer-doğrusal zemin dinamik davranış hesabı kullanılabilir (TBDY, 2018, Bölüm 16.5).

Şekil 6.2 ve 6.3'te sırası ile Avrasya ve Marmaray tünelleri tasarımında maksimum kesme birim şekildeğiştirme seviyesinin belirlenmesi için kullanılan modellemeler sunulmuştur.



Şekil 6.2. Tek boyutlu SH-dalgası yayılımına dayalı eşdeğer-doğrusal zemin dinamik davranış hesabı kullanımı (Avrasya Tüneli).



Şekil 6.3. Serbest-saha zemin deformasyonlarının hesaplanması için kullanılmış iki boyutlu sonlu eleman yatay ve düşey hareket modelleri (Marmaray Batırma Tüp Tüneli).

## 6.2. DAİRESEL KESİTLİ TÜNELLER İÇİN ENİNE HESAP/TASARIM (KAPALI FORM ÇÖZÜM)

Tünel kesiti, düşey olarak yayılan kesme dalgaları (SH-dalgaları) varsayımı ile ovalleşme deformasyonları için hesap edilmelidir. Bu kapsamda, statik yaklaşımlarla bulunan basitleştirilmiş kapalı form denklemlere dayalı hesaplar, belirli kısıtlamalarla, kullanılabilir.

## 6.2.1 Zemin-Yapı Etkileşiminin Göz Önüne Alınmadığı Durum (A-Tipi Hesap)

6.2.1.1- Tünel kaplamasının etkiyecek deprem talepleri, serbest-saha zemin maksimum kesme birim şekildeğiştirmesine,  $\gamma_{max}$ , bağlı olarak belirlenen kaplama çapsal birim şekildeğiştirmenin,  $\Delta D/D$ , bir fonksiyonu olarak belirlenir. Zemin-yapı etkileşiminin göz önüne alınmadığı durumlarda, tünel kaplamasının çapsal birim şekildeğiştirmesi aşağıdaki iki limit uygulama ile bulunabilir.

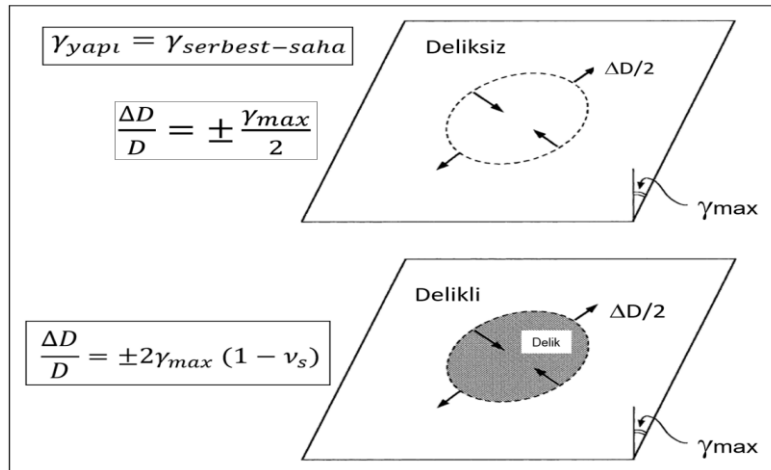
(a) Eğer tünel çevresindeki zeminin kesme deformasyonunun hesaplanmasında, serbest-saha (deliksiz) zemin ortamı kullanılırsa (Şekil 6.4), tünel kaplamasının çapsal birim şekildeğiştirmesi,  $\Delta D/D$ , Denklem 6.7 ile verilir.

$$\frac{\Delta D}{D} = \pm \frac{\gamma_{max}}{2} \quad (6.7)$$

(b) Eğer zemin ortamına, tünel kazısından (delgisinden) kaynaklanan bir delik (boşluk) yerleştirilirse (Şekil 13), tünel kaplamasının çapsal birim şekildeğiştirmesi,  $\Delta D/D$ , Denklem 6.8 ile verilir.

$$\frac{\Delta D}{D} = \pm 2\gamma_{max} (1 - \nu_s) \quad (6.8)$$

Burada  $\nu_s$  zemin ortamının Poisson Oranı olmaktadır.



Şekil 6.4. Zemin ortamının deliksiz ve delikli durumları için çapsal birim şekildeğiştirmeler.

Tünel kaplamasının çapsal birim şekildeğiştirmesi: kaplaması yanal rijitliğinin, aynı büyüklükteki zemin ortamı yanal rijitliğine göre çok küçük olduğu durumlarda Denklem 6.8 ile her iki rijitliğin birbirine eşit olduğu durumlarda ise, Denklem 6.7 ile bulunur.

6.2.1.2- Madde 6.2.1.1 kapsamında belirlenmiş çapsal birim şekildeğiştirmelerden elde edilen  $\Delta D$  yerdeğiştirmelerinin kaplama üzerine uygulanması ile iç kuvvet ve birim şekildeğiştirmeler (deprem talepleri) elde edilebilir. Özellikle zemin ortamının, tünelden daha rijit olduğu ve Denklem 6.13 ile tanımlanmış Esneklik Oranı'nın  $F_c \geq 20$  olduğu durumlarda ve ön-tasarım (A-Tipi Hesap) için, tünel kaplaması çapsal birim şekildeğiştirmesinin Denklem 6.8 tarafından verildiği kabulü ile, tünel kaplamasında (Şekil 6.5a, T-Yönünde) oluşacak birim şekildeğiştirmeler aşağıdaki denklemler vasıtası ile belirlenecektir.

$$\text{Normal kuvvet kaynaklı birim şekildeğiştirme: } \varepsilon_T = 3 (1 - \nu_s) \frac{t_l}{r} \gamma_{max} \quad (6.9)$$

$$\text{Eğilme momenti kaynaklı birim şekildeğiştirme: } \varepsilon_M = \frac{1}{2} \frac{E_s}{E_l} \frac{(1-\nu_l^2)}{(1+\nu_s)} \frac{r}{t_l} \gamma_{max} \quad (6.10)$$

Burada

$E_l$  = Tünel kaplamasının elastisite modülü

$\nu_s$  = Zemin ortamın Poisson oranı

$\nu_l$  = Tünel kaplamasının Poisson oranı

$t_l$  = Tünel kaplaması kalınlığı

$r$  = Tünel kaplamasının yarıçapı  
olmaktadır.

**6.2.1.3-** Dikdörgen kesitli ( $b \times t_l$ ) bir kaplama için (Şekil 6.5.a) birim boy ( $b=1$ ) başına karşı gelen Normal (T) kuvvet ve Moment (M), sırası ile Denklem 6.11 ve 6.12 vasıtası ile verilir. Kesme kuvveti (V), yaklaşık olarak, normal kuvvete eşit alınabilir.

$$T = E_l t_l \varepsilon_T \quad (6.11)$$

$$M = \frac{1}{6} E_l t_l^2 \varepsilon_M \quad (6.12)$$

### 6.2.2 Zemin-Yapı Etkileşiminin Göz Önüne Alındığı Durum (B-Tipi Hesap)

Tünel ve diğer dairesel kesitli yer altı yapılarının enine hesap ve tasarımında, Denklem 6.7 ve 6.8'in uygulanabileceği özel durumlar dışında, zemin-yapı etkileşimini göz önüne alan kapalı form çözümlerin kullanılması gerekir (B-Tipi Hesap/Tasarım Yöntem).

**6.2.2.1-** Dairesel tünellerde zemin-yapı etkileşiminin tahmini için geliştirilmiş kapalı form çözümler genellikle aşağıdaki varsayımlara dayanır:

- Zemin homojen ve izotropik bir ortamdır.
- Dairesel kaplama düzlemsel birim şekildeğiştirme koşulları altında elastik, ince duvarlı bir boru olarak modellenebilir.
- Zemin ve kaplama arasındaki arayüz boyunca tam kayma veya kaymama (kaynaklı olma) limit koşulları göz önüne alınmıştır.

**6.2.2.2-** Tünel kaplaması ve zemin ortamı arasındaki etkileşim esasen kaplama ve zemin ortamı arasındaki görelî yanal rijitlik oranları tarafından kontrol edilir. Tünel kaplamasının deprem davranışı, esneklik oranı ( $F_C$ ) ve sıkışabilirlik oranlarının ( $C_C$ ) bir fonksiyonudur ve tünel kaplaması-zemin ortamı arayüzünde *tam kayma* veya *kaymama* limit durumları için kapalı form ifadelerle belirlenir.

Bu oranları (boyutsuz) ölçen *Sıkışabilirlik*,  $C_C$  ve *Esneklik Oranları*,  $F_C$ , aşağıdaki basitleştirilmiş kapalı form denklemler ile tanımlanır:

$$\text{Sıkışabilirlik Oranı } C_C = \frac{G'_s (1-\nu_l^2) D}{E_l t_l (1-2\nu_s)} \quad (6.13)$$

$$\text{Esneklik Oranı } F_C = \frac{G'_s (1-\nu_l^2) D^3}{24 E_l I_l} \quad (6.14)$$

Bu denklemlerde:

$G'_s$  = Zemin ortamının etkin (kesme birim şekildeğiştirme ile uyumlu) kesme modülü

$E_l$  = Tünel kaplamasının elastisite modülü

$\nu_s$  = Zemin ortamın Poisson oranı

$\nu_l$  = Tünel kaplamasının Poisson oranı

$t_l$  = Tünel kaplaması kalınlığı

$r$  = Tünel kaplamasının yarıçapı

$D$  = Tünel kaplamasının çapı

$I_l$  = Tünel kaplamasının, birim boy başına, atalet momenti ( $I_l = 1 \times t_l^3/12$ )

Bu atalet momentinin hesaplanmasında betonarme kaplamalar için "çatlamış kesit" özellikleri kullanılmalıdır.

"n" birleşim elemanlı segmentli bir kaplama için kaplama halkasının enine etkin atalet momenti ( $I_e$ ) için, özel bir etüd yapılmadığı takdirde, aşağıdaki ifade kullanılabilir.

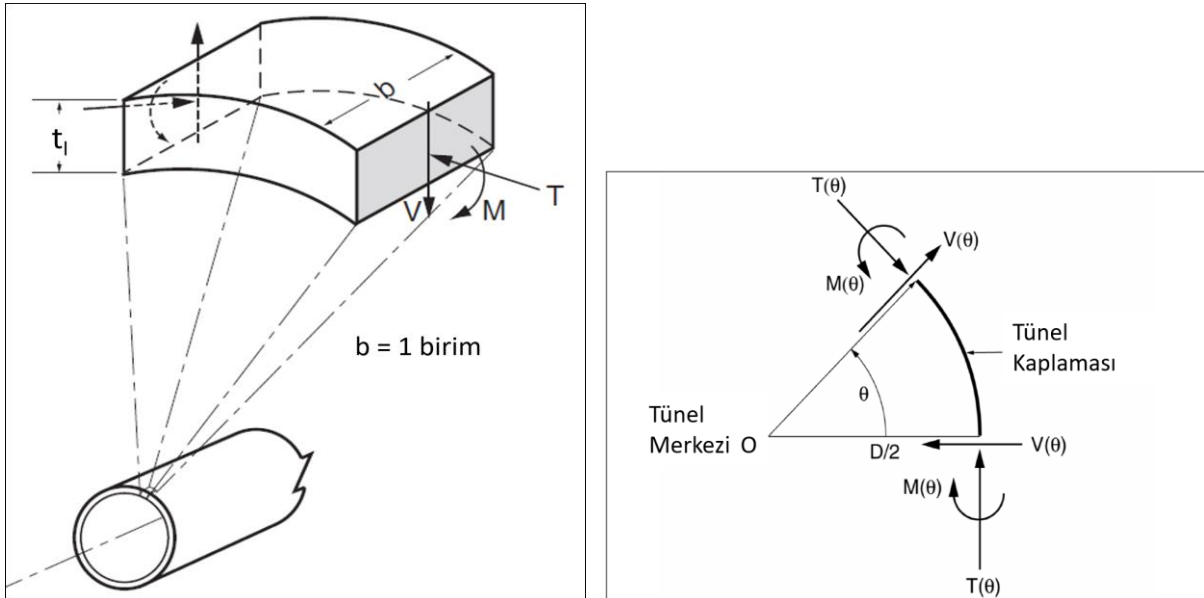
$$I_e = I_j + (4/n)^2 \quad I_e \leq I_l \quad \text{ve} \quad n > 4 \quad (6.15)$$

Burada:  $I_l$  = Monolitik kaplama atalet momenti

$I_j$  = Kaplama segmenti birleşim elemanının atalet momenti

$I_e$  = Segmentli kaplamanın etkin atalet momenti olmaktadır.

**6.2.2.3-** Ovalleşme deformasyonuna maruz dairesel tünel kaplaması çeperinde oluşacak moment, itme kuvveti (normal kuvvet) ve kesme kuvvetinin şematik gösterimi Şekil 6.5'te sunulmuştur.



Şekil 6.5 a,b. Tünel kaplama kesiti birim boy başına çeper moment ve kuvvetleri

Tünel-zemin arayüzünde tam kayma olması durumunda, dairesel tünel kaplaması kesitinde meydana gelecek çapsal (diametrik) birim şekildeğiştirme ( $\Delta D/D$ ), birim boy başına kaplama çeper momenti ( $M(\theta)$ ) ve birim boy başına çeper kesme kuvveti ( $V(\theta)$ ) sırası ile Denklem 6.16, 6.17 ve 6.18 ile verilir. Bu moment ve kesme kuvvetinin maksimum değerleri Denklem 6.19 ve 6.20'de verilmiştir.

$$\frac{\Delta D}{D} = \pm \frac{1}{3} K_1 F_C \gamma_{max} \quad (6.16)$$

$$M(\theta) = \pm \frac{1}{12} K_1 G'_s D^2 \gamma_{max} \sin 2\theta \quad (6.17)$$

$$V(\theta) = \pm \frac{1}{3} K_1 G'_s D \gamma_{max} \cos 2\theta \quad (6.18)$$

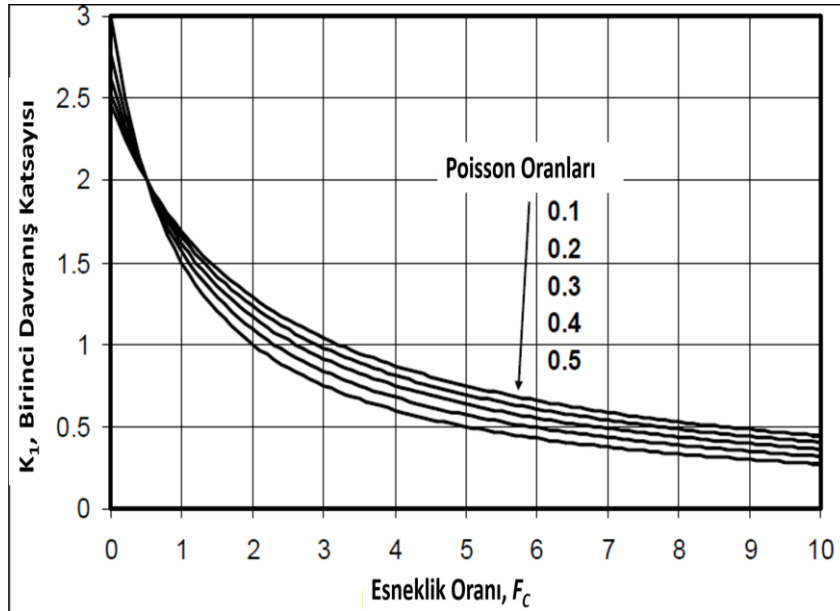
$$M_{max} = \pm \frac{1}{12} K_1 G'_s D^2 \gamma_{max} \quad (6.19)$$

$$V_{max} = \pm \frac{1}{3} K_1 G'_s D \gamma_{max} \quad (6.20)$$

Burada,  $K_1$ , tünel kaplaması birinci davranış katsayısı (veya ovalleşme katsayısı) olarak tanımlanır ve Denklem (6.20) ile ifade edilir.

$$K_1 = \frac{12(1-\nu_s)}{2 F_c + 5 - 6\nu_s} \quad (6.21)$$

Denklem 6.21 ile ifade edilen,  $K_1$ , tünel kaplaması birinci davranış (ovalleşme) katsayısı ile esneklik oranı ( $F_c$ , Denklem 6.14) arasındaki ilişki tam kaymalı arayüz ve değişik zemin Poisson oranları için Şekil 6.6'te sunulmuştur.



Şekil 6.6. Tünel kaplaması birinci davranış katsayısı,  $K_1$ , (Arayüzde tam kayma durumu için)

**6.2.2.4-** Dairesel tünel kaplaması çeperinde oluşacak normal kuvvetinin,  $T(\theta)$ , belirlenmesi için tünel-zemin arayüzünde kaymama (kaynaklı olma) durumu göz önüne alınmakta ve kapalı form ifadesi, maksimum değeri ile birlikte, Denklem 6.22 ve 6.23 ile verilmektedir.

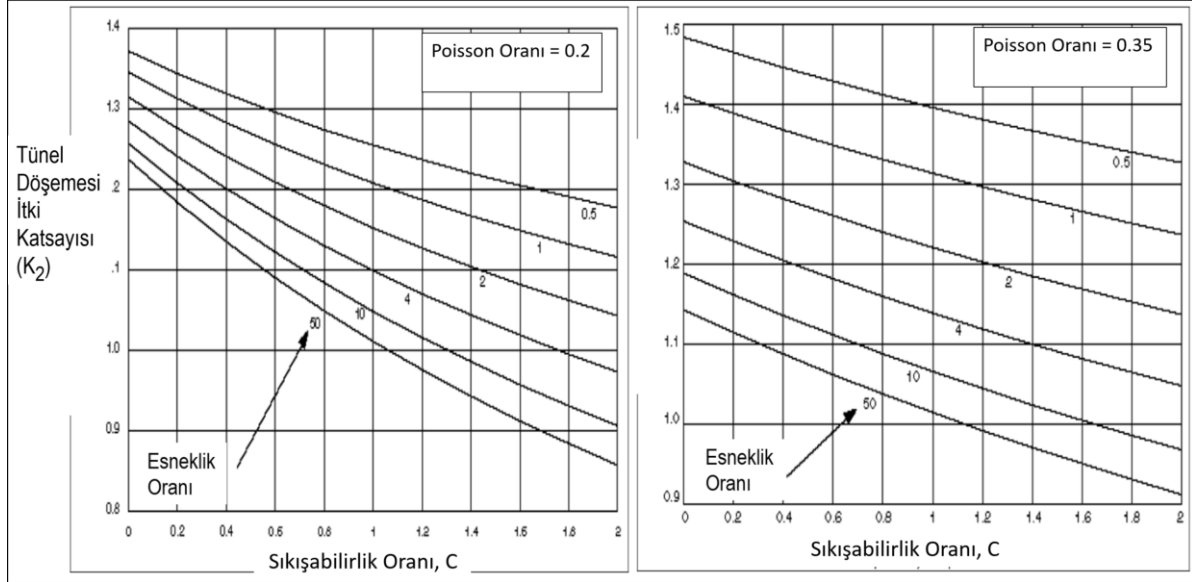
$$T(\theta) = \pm \frac{1}{2} K_2 G'_s D \gamma_{max} \sin 2\theta \quad (6.22)$$

$$T_{max} = \pm \frac{1}{2} K_2 G'_s D \gamma_{max} \quad (6.23)$$

Burada  $K_2$  terimi kaplama ikinci davranış katsayısı olarak adlandırılır ve aşağıdaki denklemle ifade edilir:

$$K_2 = 1 + \frac{F_c[(1-2\nu_s) - C_c(1-2\nu_s)] - 0.5(1-2\nu_s)^2 C_c + 2}{F_c[(3-2\nu_s) + (1-2\nu_s)C_c] + C_c[2.5 - 8\nu_s + 6\nu_s^2] + 6 - 8\nu_s} \quad (6.24)$$

Denklem (6.24) ile ifade edilen,  $K_2$ , tünel kaplaması ikinci davranış katsayısı ile sıkıştırabilirlik oranı ( $C_c$ , Denklem 6.13) arasındaki ilişki kaymayan (kaynaklı) tünel-zemin arayüzü için farklı zemin esneklik oranları ( $F_c$ , Denklem 6.14) ve zemin ortamı Poisson oranlarının,  $\nu_s$ , değişimine göre Şekil 6.7'de sunulmuştur.



Şekil 6.7. Tünel kaplaması ikinci davranış katsayısı ( $K_2$ ) ile sıkıştırabilirlik oranı ( $C_c$ ) arasındaki ilişki.

**6.2.2.5-** Denklem 6.17, 6.18 ve 6.22'te sunulu moment ve kuvvetler esasen tünel kesiti yatay ekseninden ölçülen açının ( $\theta$ , Şekil 6.5b) bir fonksiyonu olmaktadır. Ancak, deprem dalgasının, tünel kaplaması en kesit düzlemi içerisinde, herhangi bir yönden gelebileceği göz önünde bulundurularak, birim boy başına enbüyük moment ve kuvvet değerleri ( $M_{max}$ ,  $V_{max}$  ve  $T_{max}$ ), sırasıyla Denklem 6.19, 6.20 ve 6.23, tasarım amacı ile kullanılacaktır.

**6.2.2.6-** Eğilme momentinden kaynaklanan maksimum birim şekildeğiştirme ( $\epsilon_M$ ) ve normal kuvvetten kaynaklanan maksimum şekildeğiştirme ( $\epsilon_T$ ) Denklem 6.25 ve 6.26 ile belirlenecektir. Kaplama içindeki maksimum enine birim şekildeğiştirme ( $\epsilon_M$ ) ve ( $\epsilon_T$ ) değerlerinin kareleri toplamının karekökü olarak bulunacaktır.

$$\epsilon_M = \pm \frac{1}{24} t_l K_1 \gamma_{max} G'_s \frac{D^2}{E_l I_l} \quad (6.25)$$

$$\epsilon_T = \pm \frac{1}{2} K_2 \gamma_{max} G'_s \frac{D}{E_l t_l} \quad (6.26)$$

Kaplama atalet momentinin ( $I_l$ ) hesabında çatlama betonarme kesit kullanılmalıdır.

### 6.3. DİKDÖRTGEN KESİTLİ TÜNEL/YERALTI YAPISI İÇİN ENİNE ANALİZ VE TASARIMI (YARI-KAPALI FORM ÇÖZÜM)

#### 6.3.1. Genel Kurallar

**6.3.1.1-** Dikdörtgen Kesitli Tünel/Yeraltı Yapıları (Aç-Kapa Yapıların) deprem yükleri altında enine hesabı için serbest-saha zemin yerdeğiştirmelerinden kaynaklanacak kesit yamulmasının tahmin edilmesi ve bu yamulmayı sağlayacak yanal yüklerin yapı kesitine uygulanması yöntemi kullanılacaktır. Bu kapsamda, yapı kesitinin yamulma yerdeğiştirmesi ( $\Delta_{yapı}$ , Şekil 6.8), yapının üst ve alt kotu arasındaki görelî yanal yerdeğiştirme olarak

tanımlanacak ve yapısal sistemdeki kuvvet, moment ve birim şekildeğiştirmeler, bu yamulma yerdeğiştirmenin yapı üzerine uygulanmasını içeren basit bir yapısal çerçeve hesabı ile elde edilecektir (Şekil 6.8).

**6.3.1.2-** İstinat yapısı gibi davranan, U kesitli sığ aç-kapa tünel/ yeraltı yapılar için, Madde 6.3.1.1 kuralları yerine, “Mononobe-Okabe” yönteminine (TBDY (2018), Bölüm 16.12.2. Toprak Basınçları) dayalı olarak dinamik zemin basıncı belirlenerek, deprem hesap/tasarımı yapılacaktır.

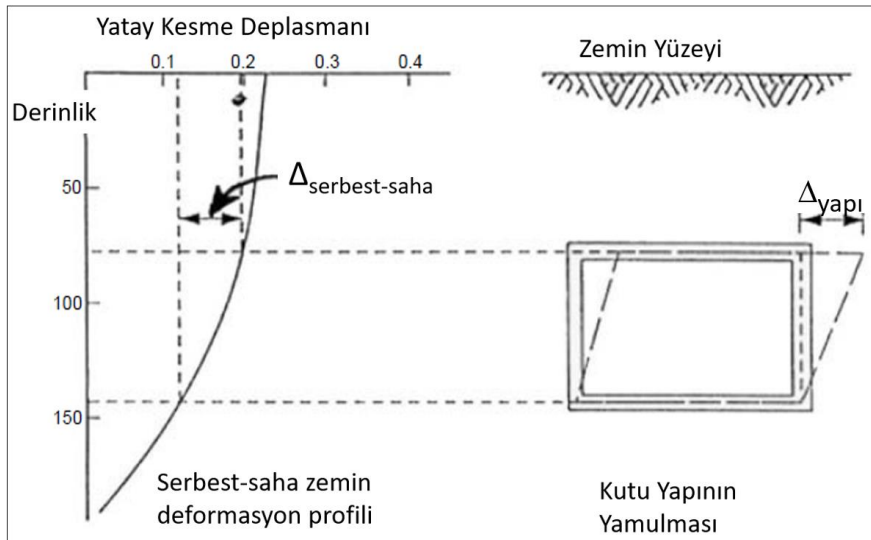
### 6.3.2. Zemin-Yapı Etkileşiminin Göz Önüne Alınmadığı Durum (A-Tipi Hesap)

Zemin-yapı etkileşiminin göz önüne alınmadığı durumlarda, yapı yamulma yerdeğiştirmesi, serbest-saha zemin yerdeğiştirmesine ( $\Delta_{serbest-saha}$ , Şekil 6.8) eşit olarak kabul edilecektir. Bu kabul sadece, yapı ve zeminin yamulma rijitliğinin benzer olduğu durumlar için de geçerlidir.

Özellikle zemin ortamının tünelle benzer rijitlikte veya daha rijit olduğu ve Denklem 6.27 ile tanımlanmış *Esneklik Oranı*'nin  $F_R < 1$  olduğu durumlarda, A-Tipi Hesap için, yapı yerdeğiştirmesi olarak serbest saha zemin yerdeğiştirmesinin ( $\Delta_{yapı} = \Delta_{serbest-saha}$ ) yapı üzerine uygulanmasını içeren basit bir yapısal çerçeve hesabı yapılarak (Şekil 6.11) deprem talepleri elde edilecektir.

### 6.3.3. Zemin-Yapı Etkileşiminin Göz Önüne Alındığı Durum (B-Tipi Hesap)

Zemin ve yapı arasındaki göreceli rijitliğin dikkate alınmaması konservatif veya konservatif olmayan tasarımlara yol açabilmekte ve rasyonel bir tasarım için zemin-yapı etkileşiminin göz önüne alınması gerekmektedir.



Şekil 6.8. Serbest-saha Zemin Deformasyon Profili ve Dikdörtgen Kesitli bir Yapının Yamulma Deformasyonu

**6.3.3.1-** Zemin-yapı etkileşimin göz önüne alınması durumunda, yapı yamulma yerdeğiştirmesi Denklem (6.26) ile verilir.

$$\Delta_{yapı} = R \Delta_{serbest-saha} \quad (6.27)$$

Yamulma Katsayısını, R, yapı yamulma yerdeğiştirmesinin, yapı kesitine eş yükseklikteki serbest saha zemin ortamının yerdeğiştirmesine oranı olarak tanımlanır ve yapı ve zemin



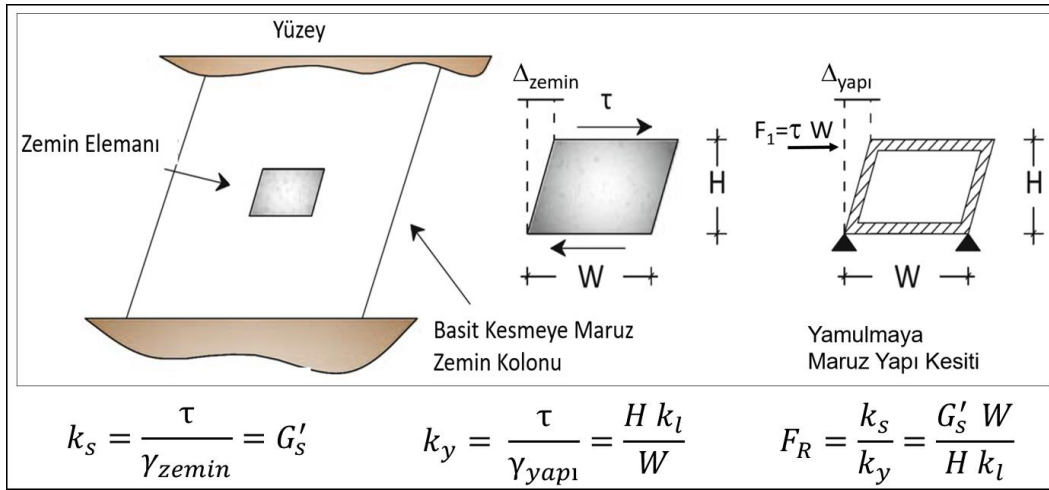
arayüzünde kayma ve kaymama (kaynaklı) olması limit durumları için, Esneklik Oranı ( $F_R$ ) ve zemin ortamı Poisson Oranı ( $\nu_s$ ) cinsinden, Denklem 6.28 ve 6.29 vasıtası ile sağlanır.

$$\text{Arayüzde kayma durumu için} \quad R = \frac{4(1-\nu_s)F_R}{2,5-3\nu_s+F_R} \quad (6.28)$$

$$\text{Arayüzde kaymama durumu için} \quad R = \frac{4(1-\nu_s)F_R}{3-4\nu_s+F_R} \quad (6.29)$$

Zemin ve yapı arasındaki göreceli rijitlik “Esneklik Oranı”: ( $F_R$ ) ile tanımlanır. Esneklik Oranı,  $F_R$ , yapı kesiti ile aynı boyuttaki bir zemin elemanının kesme (yamulma) rijitliğinin ( $k_s=G'_s$ ), yapı kesitinin yamulma rijitliğine ( $k_y$ ) orandır (Denklem 6.30 ve Şekil 6.9).

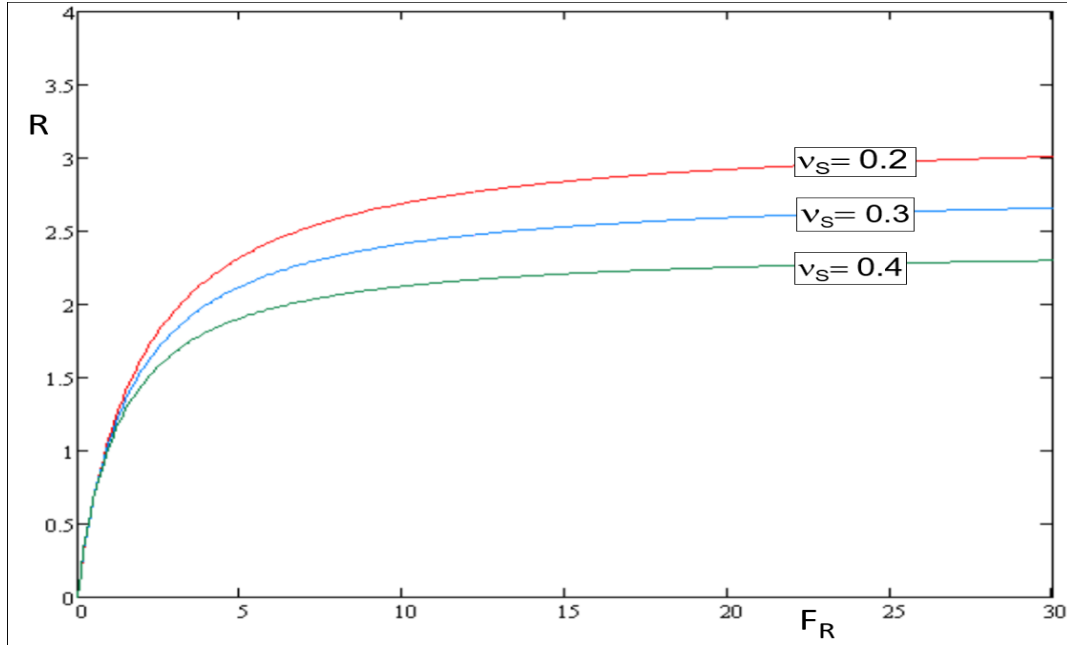
$$F_R = \frac{k_s}{k_y} = \frac{G'_s W}{H k_l} \quad (6.30)$$



Şekil 6.9 Dikdörtgen kesitli alt yapı ve tüneller için esneklik oranının ( $F_R$ ) tanımı

Burada  $k_l$  yapının birim boy başına yanal rijitliği olmaktadır.  $k_l$  değerinin belirlenmesi için yapı Şekil 6.9 ve 6.11’de gösterildiği gibi mafsallarla mesnetlenecek ve yapı bünyesinde yer alan tüm yapısal unsurlar yapı modele dahil edilerek yapısal hesap yapılacaktır. Hesap kapsamında çatlamış kesit rijitlikleri kullanılacaktır.

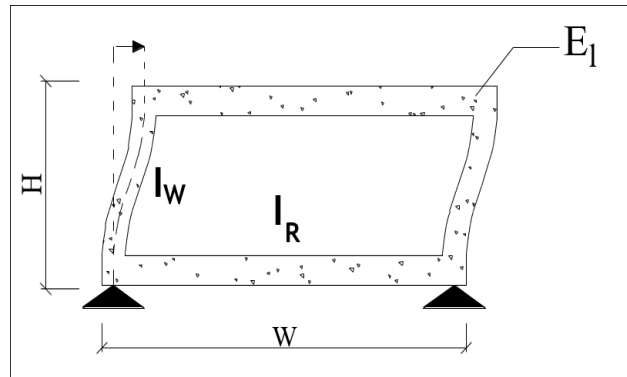
Şekil 6.10’da, Arayüzde “Kayma” ve “Kaymama” limit durumlarının (Denklem 6.28 ve 6.29) ortalamasına karşı gelen Yamulma Oranı (R) verilen Esneklik Oranı ( $F_R$ ) ve zemin ortamı Poisson Oranları ( $\nu_s$ ) için Şekil 6.10’da sunulmuştur. Arayüzde “Kayma” limit durumuna karşı gelen Yamulma Oranları, küçük Poisson oranları için “Kaymama” limit durumuna karşı gelen Yamulma Oranları’ndan yaklaşık %4 daha büyüktür. Daha büyük Poisson Oranları için bu fark kapanmakta ve her iki Yamulma Oranı birbirine eşit olmaktadır.



Şekil 6.10. Yamulma katsayısı (R) ortalama değeri ve esneklik oranı ( $F_R$ ) arasındaki ilişki.

**6.3.3.2-** Üst ve alt döşeme plakasının birim boy başına atalet momentinin,  $I_R$ , ve her iki yan duvar plakasının birim boy başına atalet momentinin,  $I_W$ , olduğu, H yüksekliğinde ve W açıklığında tek gözlü bir yapı için Esneklik Oranı,  $F_R$ , Denklem 6.31 ile verilir (Şekil 6.11).

$$F_R = \frac{G'_s}{24 E_l} \left( \frac{W H^2}{I_W} + \frac{W^2 H}{I_R} \right) \quad (6.31)$$



Şekil 6.11. Tek gözlü dikdörtgen kesitli basit bir yapı kesiti

**6.3.3.3-** Esneklik Oranının aldığı değer, yapıda beklenen deprem kaynaklı gerilme (zorlanma) seviyeleri ile yakından ilişkilidir.

- $F_R \rightarrow 0$  Yapı zemin ortamına göre çok rijittir. Yamulma Katsayısı geçerli bir değer sağlayamaz ve sayısal hesap/tasarım yöntemlerinin kullanılması gerekir
- $F_R < 1$ : Yapı zemin ortamına göre daha rijittir, bu nedenle yapısal deformasyon seviyesi serbest saha zemin deformasyon seviyesinden daha küçük olacaktır.
- $F_R = 1$ : Yapı ve çevredeki zemin aynı seviyede rijitliğe sahiptir. Bu nedenle tünel kesiti, serbest saha zemin deformasyonunu izleyecektir.
- $F_R > 1$ : Zemin ortamı yapıdan daha rijittir. Yapının deformasyonu serbest saha zemin deformasyonuna kıyasla daha büyük olabilir.

- $F_R \rightarrow \infty$ : Yapının rijitliği zemine göre çok küçüktür. Yamulma Katsayısı yaklaşık olarak  $R=4 (1-\nu_s)$  ifadesi ile verilebilir. Bu durumda, yamulma oranı iki ve üç arasındaki değerlere ulaşabilir.

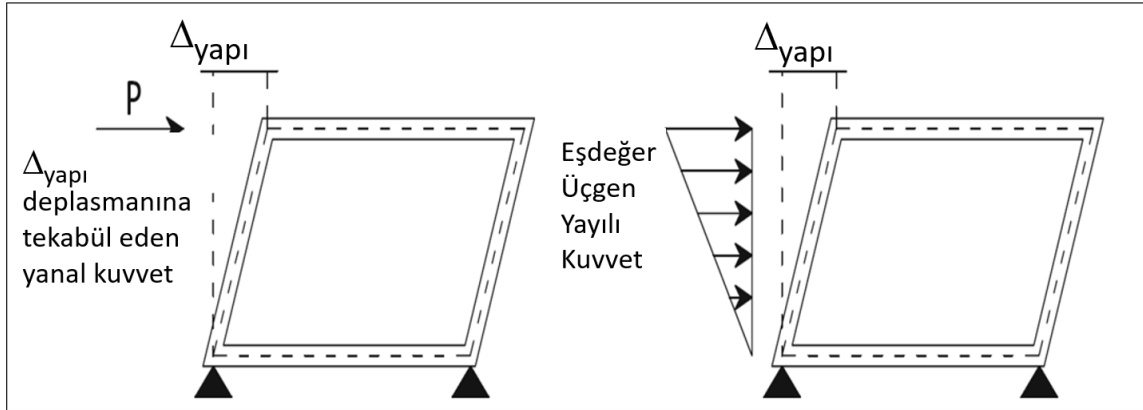
**6.3.3.4-** Yapı üzerindeki deprem taleplerinin belirlenmesi için aşağıdaki süreç adımları kullanılacaktır.

Adım 1- Zemin ortamında düşey olarak yayılan kesme dalgalarının (SH-dalgaları) yayılımına dayalı tünel seviyesindeki serbest-saha zemin maksimum kesme birim şekildeğiştirmesinin,  $\gamma_{max}$ , ve serbest saha zemin ortamını kesme yerdeğiştirmesinin ( $\Delta_{serbest-saha}$ ) Bölüm 6.1’de sunulu yöntemlerle tahmin edilmesi.

Adım 2: Dikdörtgen kesitli yapı çerçevesinin yapısal hesabı ile yapının birim boy başına yanall rijitliğinin,  $k_l$  belirlenmesi. Yapı modeli Şekil 6.9 ve 6.11’de gösterildiği şekilde mesnetlenecek ve yapıda yer alan tüm yapısal unsurlar modele dâhil edilecektir. Çatlamış kesit rijitlikleri kullanılacaktır.

Adım 3: Denklem 6.19 veya 6.20 kullanılarak bulunacak yamulma katsayısının (R) en büyük değeri kullanılarak, yapı yamulma yerdeğiştirmesinin ( $\Delta_{yapı}$ ) belirlenmesi.

Adım 5:  $\Delta_{yapı}$  yerdeğiştirmesine karşı gelen yanall tekil (veya yayılı) kuvvetin yapı kesitine uygulanarak, iç kuvvetler ve birim şekildeğiştirmeler cinsinden, deprem talebinin belirlenmesi (Şekil 6.12)



Şekil 6.12. Basit çerçeve hesap modeli (a) tekil kuvvet, (b) üçgen yayılı kuvvet

### 6.3.4 Yanall ve Düşey Zemin Deprem Basıncı ve Hidrodinamik Basınçlar

**6.3.4.1-** Dikdörtgen kesitli tünel veya gömülü yapının etrafındaki zemin ortamına nazardan daha rijit olduğu durumlarda (Esneklik Oranı,  $F < 1$ ) yapı duvarlarının dinamik zemin basıncına göstereceği dayanımın kontrol edilmesi gerekir. Deprem kaynaklı dinamik yatay zemin basınçları, duvarlara etkiyen statik zemin basınçlarına ilave olarak uygulanır (Şekil 6.13).

Sığ yeraltı yapıları (yapı üzerindeki zemin tabakası kalınlığının yapı yüksekliğinin yarısından daha az olduğu durumlar) ve özellikle, Esneklik Oranı ( $F_R$ ) değerinin 1’in altında olduğu ( $F_R \leq 1.0$ ) durumlar için yapı duvarlarına etki edecek zemin basınçları belirlenmeli ve yapı tasarımı tahkik edilmelidir.

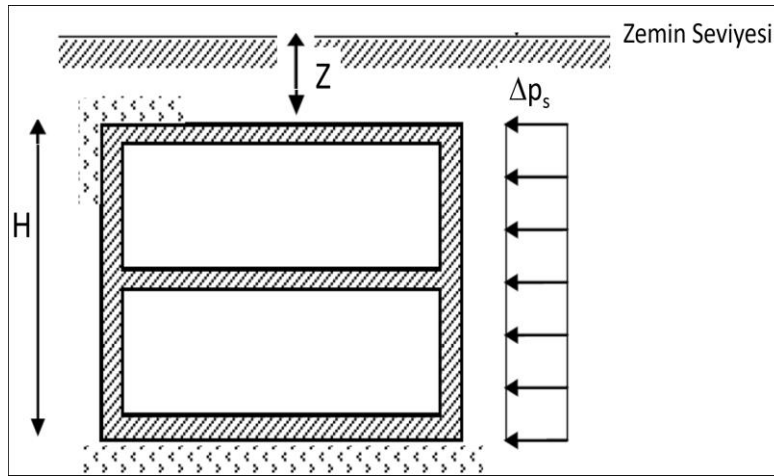
U kesitli yeraltı yapıları dışında kalan Dikdörtgen Kesitli Tünel/Yeraltı Yapı duvarları üzerine etki edecek dinamik (deprem kaynaklı) ek zemin basıncı,  $\Delta p_s$  (kN/m<sup>2</sup>), duvar yüksekliği boyunca düzgün yayılı olarak etki ettirilecektir.

**6.3.4.2-** Yapı üzerindeki zemin tabakası kalınlığının (Z) ve yapı yüksekliğine (H) oranının ( $Z/H \leq 0.5$ ) olduğu durumlar için, dikdörtgen kesitli tünel veya gömülü yapı duvarına etkiyen ek yanal zemin basıncı Denklem 6.32 ile belirlenecektir.

$$\Delta p_s = 0.4 S_{DS} \rho_s (H+Z) \quad (6.32)$$

Burada,  $S_{DS}$  zemin yüzeyinde tanımlanan kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısını,  $\rho_s$  zemin birim ağırlığını ( $N/m^3$ ), H (m) yapı yüksekliğini ve Z (m) yapı üzerindeki zemin tabakası kalınlığını göstermektedir.

Tahrik için, Zemin Deformasyon (Yamulma) Metodu ile bulunan yükler, Dinamik Zemin Basınçları ile birleştirilmemelidir.



Şekil 6.13. Yanal Zemin Deprem Basıncı

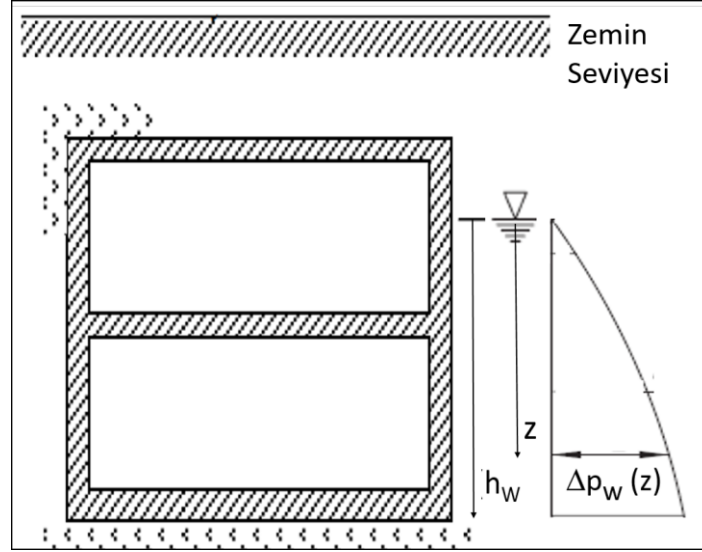
**6.3.4.3-** Dikdörtgen kutu şeklinde yapılar için düşey deprem hareketlerin etkisi dikkate alınacaktır. Düşey deprem katsayısı ile statik tasarımda kullanılan düşey zemin ve sürşarj yüklerinin çarpılması ile elde edilen, eşdeğer düşey bir statik kuvvetin uygulanması ile bu talep hesaplanabilir.

Tünel üzerindeki toprak dolgu kütleindeki düşey deprem hareketlerinde kaynaklanan düşey deprem kuvvetleri aç ve kapa tünelin üst döşemesine uygulanabilir. Sığ bir tünel üzerindeki zemin dolgusundan gelecek düşey deprem yükü, dolgu zemin kütleinin düşey pik ivme ile çarpılmasıyla elde edilir. Düşey deprem katsayısı, yatay tasarım deprem ivmesinin 2/3'ünün yer çekimi ivmesine (g) bölünmesi ile elde edilebilir.

Yapı duvarların ve tavan döşemesinin dayanım kapasitesinin deprem (ve statik) zemin basınçları açısından kontrolü için hesap gerekir. Bu hesap için kullanılan yüklere, tavan döşemesi ağırlığı ölü ve eylemsizlik kuvvetleri ile duvarlardaki eylemsizlik kuvvetleri eklenmelidir.

**6.3.4.4-** Yeraltı yapısı duvarlarına etki edecek depremden kaynaklı, hidrostatik basınca ek dinamik su basıncı ( $\Delta p_w$ ) Westergaard yöntemi kullanılarak Denkem 6.33 ile verilir (Şekil 6.14). Burada,  $h_w$ , yapı tabanından ölçülen su yüksekliği ve  $\rho_w$  suyun birim ağırlığıdır.

$$\Delta p_w(z) = 0.24 S_{DS} \rho_w (h_w z)^{1/2} \quad (6.33)$$



Şekil 6.14. Hidrodinamik Basıncı

## 6.4. SAYISAL ANALİZ/TASARIM YÖNTEMLERİ

### 6.4.1. Genel Kurallar

Yeraltı yapılarının enine deprem davranışının (yani, dairesel tüneller için ovalleşme ve dikdörtgen tüneller için yamulma) hesabı için 6.4 ve 6.5 Maddelerinde açıklanmış analitik çözümler aşağıdaki ideal koşul ve varsayımlara dayalı olarak geliştirilmiştir:

- Yeraltı yapıları, ovalleşme davranışı için daire veya yamulma davranışı için dikdörtgen enkesit geometrisine sahiptir.
- Yeraltı yapısı çevresindeki zemin ortamı düzgün (uniform) ve izotropiktir.
- Yeraltı yapısının derinliği, deprem dalgalarının zemin yüzeyinden yansıma/kırılmalarının ihmal edilmesini sağlayacak mertebededir.
- Zemin ortamına sadece tek bir yeraltı yapısı mevcuttur. Yakın konumda bulunan diğer yeraltı veya yerüstü yapı(lar) ile bir etkileşim yoktur.

Sahada, yeraltı yapıları için karşılaşılan gerçek zemin-yapı sistemi, yukarıda tanımlanan ideal koşullardan daha karmaşık olduğu durumlarda ve C-Tipi hesap için sayısal metotların kullanılmasını gerektir. Sayısal hesaplar, özellikle yüksek bir deprem tehlikesine maruz çok önemli bir tünel yapısının tasarımı için (C-Tipi hesap) uygulanmalıdır.

Bu durumda, ovalleşme / yamulma hesapları için: zemin ortamının-yay modellemesine dayalı hesabı yöntemi veya zemin-yapı etkileşimini içeren iki boyutlu sonlu eleman/sonlu fark (sürekli ortam hesabı) yöntemi kullanılmalıdır. Kullanılan sayısal model, zemin ortamı özelliklerinin derinlikle değişimini, deprem yer hareketi girdilerini ve zemin-yapı etkileşimini uygun bir şekilde ele almalıdır.

**6.4.1.1-** Ovalleşme/yamulma deformasyonuna maruz kalan tünel kesitinin, sayısal modellendirilmesinde aşağıdaki hususlar dikkate alınacaktır:

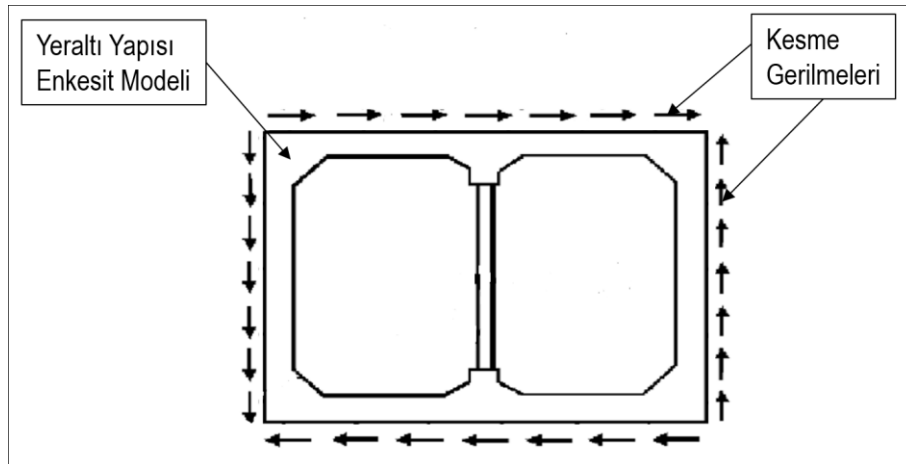
- Enine ovalleşme/yamulma hesabı için, yeterli bir sayısal modelleme yaklaşımı olarak genellikle iki boyutlu sonlu elemanlar veya sonlu fark sürekli ortam hesap yöntemi kullanılır. Kullanılan sayısal hesap yönteminde, zemin ortamı özelliklerinin derinlikle değişimini ve deprem yer hareketi girdilerini uygun bir şekilde ele alma ve zemin-yapı etkileşimi etkilerini değerlendirme yeteneği olmalıdır.
- Gerilme birikimi ve yapı davranışı üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi için, yeraltı yapısı kesitinde yer alan duvar ve kaplamalar modele dâhil edilmelidir.

- Özellikle tünel kaplama derzlerinin açılma ve kapanmaya karşı uygun şekilde bağlanmadığı (tasarlanmadığı) durumlarda, kaplama eklemlerinin davranışları modellenmelidir. Kuvvet ve deformasyonlar, sadece kaplama veya kaplama segmentlerinde değil, aynı zamanda derzler için de değerlendirilmelidir.
- Zemin ortamının dinamik özellikleri, geoteknik profil ve birim şekil değiştirme seviyeleri dikkate alınarak modellenmelidir.
- Yeraltı yapısının ataletinin, içinde yer aldığı zemin ortamına kıyasla küçük olduğu durumlarda, deprem davranış hesabının eşdeğer-statik veya eşdeğer-dinamik yöntemle yapılması (yani maksimum yer değiştirme veya değişik zaman adımlarındaki yer değiştirmelerin zemin-yapı sistemine statik olarak uygulanması) mümkündür.
- Hesaplar, serbest-saha zemin deformasyonlarının zemin-yapı sistemine statik olarak uygulandığı eşdeğer-statik yöntem kullanılarak gerçekleştirilebilir. Bu durumda, serbest saha zemin deformasyonları, düşey yayılan deprem kayma dalgası (SH-Dalgası) kabulüne dayalı zemin dinamik deprem davranışı hesapları ile belirlenmelidir
- Elastik hesaplar, ancak yapısal davranışın elastik sınırlar içinde kaldığı durumlar için kabul edilebilir. Yapısal davranışın elastik sınırların dışına çıktığı durumlarda, doğrusal olmayan hesap yapılması gerekir.
- Tüm bu hesaplar için ölü yüklerin daha önce yeraltı yapısı üzerine üzerine etkililmiş olması gerekir.

#### 6.4.2. Basitleştirilmiş Eşdeğer-Statik Hesap Yöntemi

Bu yöntemin kullanılmasına yönelik aşamalar aşağıda özetlenmiştir:

- SH-dalgası düşey yayılımına dayalı, tek boyutlu serbest saha zemin deprem davranış hesabı yaparak enbüyük yer ivme katsayısının (deprem yer hareketi yatay ivmesinin yer çekimi ivmesine (g) bölünmesi ile elde edilen değer) derinlikle değişimi profilini belirli noktalar için bulunur.
- En büyük yatay ivme katsayısının, düşey zemin basıncı ile çarpılmasına dayalı olarak elde edilmiş kesme gerilmelerini (Denklem 6.2), eşdeğer statik bir yaklaşımla, yapıya uygulayarak uygulanarak hesap yapılır (Şekil 6.15)



Şekil 6.15. Basitleştirilmiş Eşdeğer-Statik Hesap Yöntemi

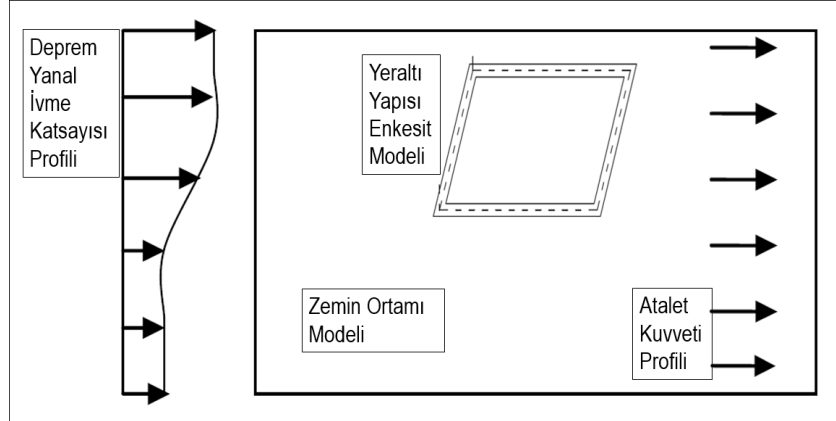
#### 6.4.2 Eşdeğer-Statik Deprem Katsayısı Yöntemi

**6.4.2.1- Eşdeğer-statik deprem katsayısı deformasyonu yönteminde** zemin deformasyonları, ivme katsayıları (deprem yer hareketi yatay ivmesinin yer çekimi ivmesine (g) bölünmesi ile elde edilen değer) vasıtası ile üretilir ve hesap için sonlu elemanlar / sonlu farklar modeli kapsamında kullanılır. İvme katsayıları, tek boyutlu, serbest saha zemin deprem davranış

hesabı ile belirlenir. Eşdeğer statik deprem katsayısı yaklaşımı dinamik bir hesap değildir ve bu nedenle ivmenin zamanla değişimini içermez.

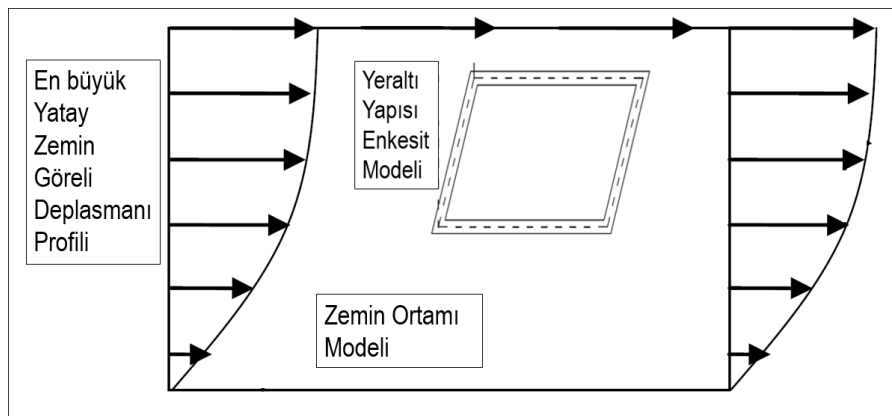
**6.4.2.2-** Bu yöntemin kullanılmasına yönelik aşamalar aşağıda özetlenmiştir:

- SH-dalgası düşey yayılımına dayalı, tek boyutlu serbest saha zemin deprem davranış hesabı yapılarak en büyük yer ivmesinin derinlikle değişim profili bulunur.
- Zemin-yapı ortamının iki boyutlu sonlu elemanlar/farklar modelini yapın. Modellenen ortamın yanal boyutları, sınır etkilerinden etkilenmeyecek uzaklıkta alınmalı veya özel sınır elemanları kullanılmalıdır. Zemin ortamı katı elemanlar ve yeraltı yapı veya çerçeve elemanları ile modellenebilir. Modelin yan sınır şartları tüm yatay şekildeğıştirmeler için serbest, ancak düşey hareketler için engelleyici olmalıdır. Bu sınır şartları oldukça yatay tabakalanmış zemin ortamı ve düşey yayılan kesme dalgaları (SH dalgaları) için yeterlidir.
- İki boyutlu modelleme için, tek boyutlu hesap sonucunda bulunan, birim şekildeğıştirme uyumlu, zemin kesme katsayıları kullanılmalıdır.
- En büyük yatay ivme katsayısının derinlikle değişim profilinin (atalet kuvveti profilinin) eşdeğer statik bir yaklaşımla, iki boyutlu zemin-yapı ortamı modeline uygulanması ile deprem hesabı yapılır (Şekil 6.16).

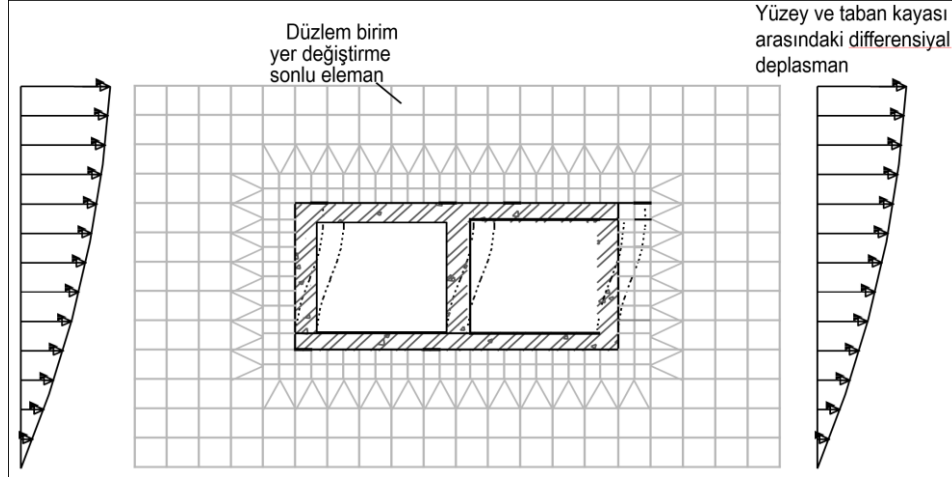


Şekil 6.16. Eşdeğer-Statik Deprem Katsayısı Deformasyonunu Yöntemi için kullanılan modelin şematik görünümü

Benzer şekilde, SH-dalgası düşey yayılımına dayalı, tek boyutlu serbest saha zemin deprem davranış hesabı yapılarak elde edilen enbüyük görelî yatay zemin yerdeğıştirmesinin derinlikle değişimi profilinin, statik bir yaklaşımla, iki boyutlu zemin-yapı ortamı modeline uygulanması vasıtası ile deprem hesabını yapmak mümkündür (Şekil 6.17, 6.18)



Şekil 6.17. Model sınırlarına enbüyük görelî yatay zemin yerdeğıştirmesinin derinlikle değişimi profili uygulanmasının şematik görünümü



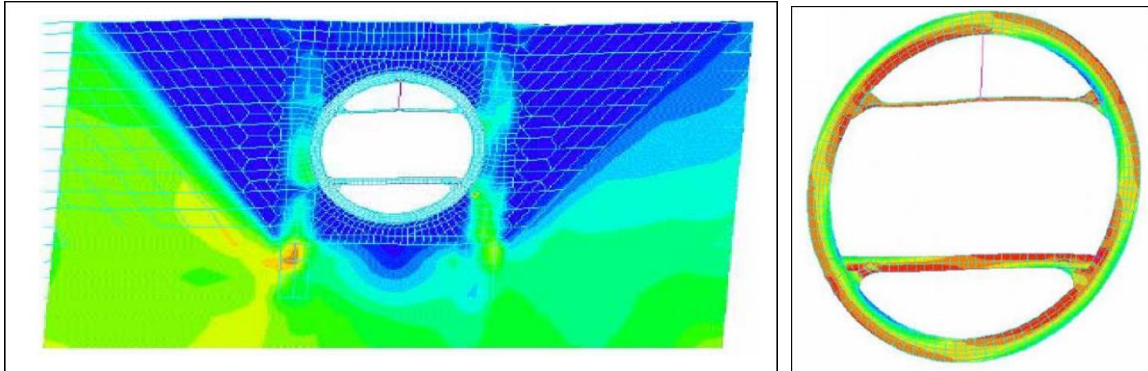
Şekil 6.18. Model sınırlarına enbüyük görelî yatay zemin yerdeğiştirmesinin derinlikle değişimi profili uygulanması için bir örnek

### 6.4.3. Eşdeğer-Dinamik Zaman Tanım Alanı Yöntemi

**6.4.3.1-** Tek boyutlu düşey yayılan SH dalgalarına dayalı serbest saha zemin deprem davranış hesabı sonucu zaman tanım alanında (belirli zaman adımları için) hesaplanmış yatay zemin yerdeğiştirmeleri düşey profili, iki boyutlu tüm zemin-yapı sonlu elemanlar/farklar modeline, aynı zaman adımları için statik olarak (atalet kuvvetlerinin ihmal edilmesi ile) uygulanarak deprem talepleri elde edilir. Gerekli durumlarda yapının doğrusal olmayan davranışını da dikkate alınmalıdır.

**6.4.3.2-** Bu yöntemin kullanılmasına yönelik genel prosedür aşağıda özetlenmiştir:

- Tek boyutlu serbest saha davranış hesabı yapılarak (örn. Eşdeğer doğrusal yöntem kullanılarak) en büyük yatay yer hareketi dağılımının düşey profili belirlenir.
- Zemin-yapı ortamının iki boyutlu sonlu elemanlar (veya sonlu farklar) modelini geliştirin. Modellenen ortamın yanal boyutları sınır etkilerinden kaçınacak büyüklükte (genişlikte) alınmalıdır. Zemin ortamı katı elemanlar ve yapı ya katı elemanlar veya çerçeve elemanları ile modellenebilir. Yan kenar sınır şartları tüm yatay şekildeğiştirmeler için serbest, ancak düşey hareketler için engelleyici olmalıdır. Bu sınır koşulları, oldukça yatay tabakalanmış zemin ortamı ve düşey yayılan kesme dalgaları (SH-dalgaları) için geçerlidir.
- İki boyutlu hesap kapsamında, tek boyutlu zemin dinamik davranış hesabı sonucunda bulunan birim şekildeğiştirmeler ile uyumlu, zemin kesme katsayıları kullanılmalıdır.
- Tek boyutlu zemin dinamik davranış hesabı neticesinde elde edilmiş yatay yer hareketinin derinlikle değişimi profili, eşdeğer statik bir yaklaşımla, iki boyutlu zemin-yapı ortamı modeli sınırına her bir zaman adımı için uygulanarak hesap yapılır (Şekil 6.19).



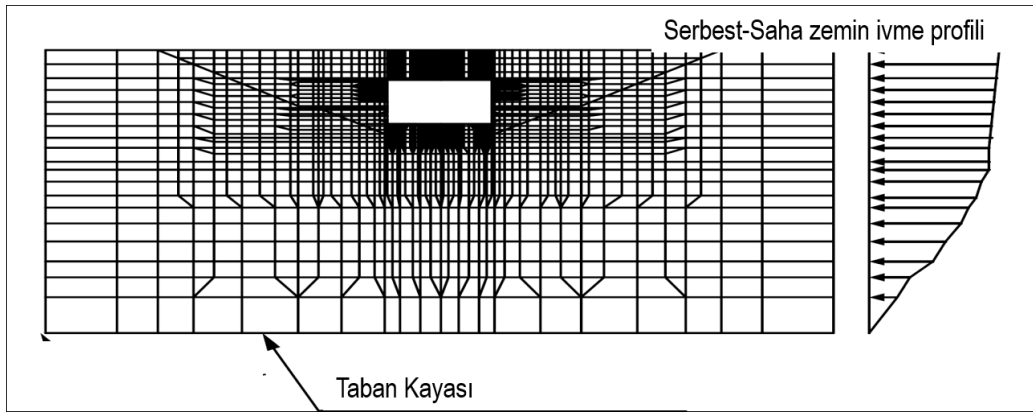
Şekil 6.19 Eşdeğer-Dinamik Zaman Tanım Alanı Hesabı için kullanılan iki boyutlu sonlu eleman modeli örneği.



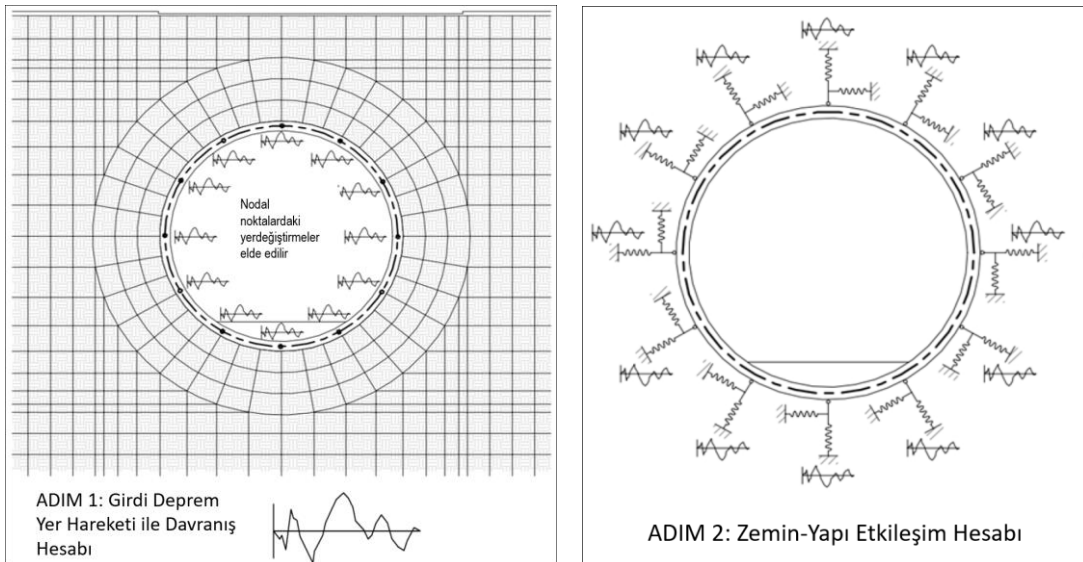
#### 6.4.4. Ayrık Eşdeğer-Dinamik Zaman Tanım Alanı Hesabı Yöntemi

**6.4.4.1-** Eşdeğer-Dinamik Zaman Tanım Alanı Hesabı Yöntemi'nin, yapının zemin ortamından ayrılarak (bağlantısız olarak) uygulanması da mümkündür. Bu yöntemde, delikli (yapı kısmı boşaltılmış) zemin ortamında, boşluk sınırlarında belirlenmiş noktalarda (node), deprem etkisi altında oluşacak iki boyutlu deprem yerdeğiştirmeleri hesaplanır (Şekil 6.20, 6.21a ve 6.22a). Bu yerdeğiştirmelerin hesaplanması için iki boyutlu düzlem birim şekildeğiştirme, sonlu eleman/farklar hesap yöntemi kullanılabilir.

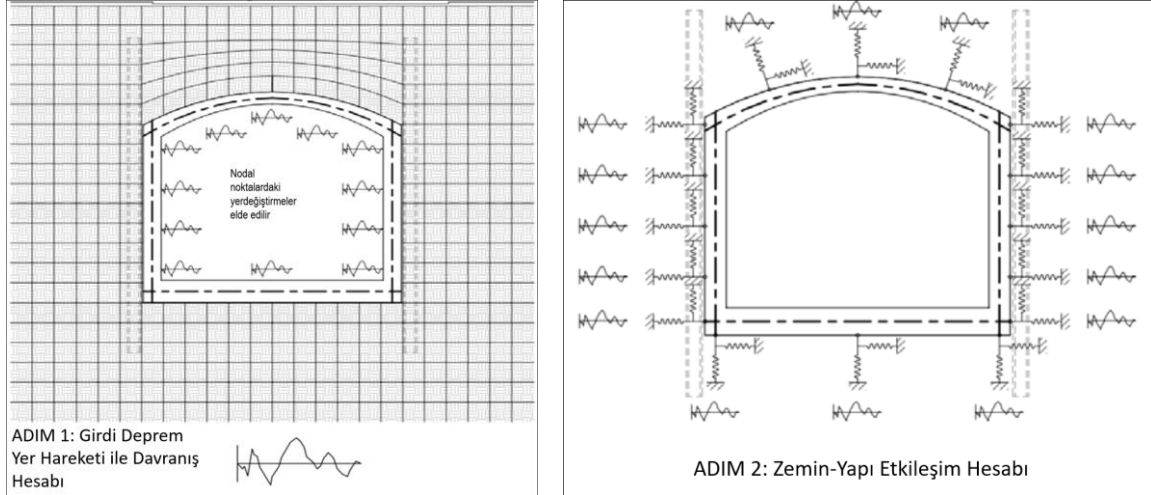
**6.4.4.2-** Zemin ortamı modellemesinde kullanılan zemin özellikleri birim şekildeğiştirmelerle uyumlu olmalıdır. Yapı-zemin arayüzündeki belirlenmiş noktalarda elde edilen iki boyutlu yerdeğiştirmeler, arayüze teğet ve dik (normal) yöndeki yerdeğiştirmelere koordinat transformasyonu ile dönüştürülür. Tünel/yeraltı yapısı boşluğu arayüzü sınırlarında elde edilmiş olan bu yerdeğiştirmeler yapı modeli üzerine zemin yayları vasıtası ile uygulanır ve yapı davranışının hesabı yapılır (Şekil 6.21b ve 6.22b). Yapı-zemin arayüzü üzerinde oluşabilecek açılma (ayırılma) ve sıyrılmalar (kaymalar) bu zemin yayları özelliklerine yansıtılmalıdır.



Şekil 6.20. Marmaray Tüneli örneği



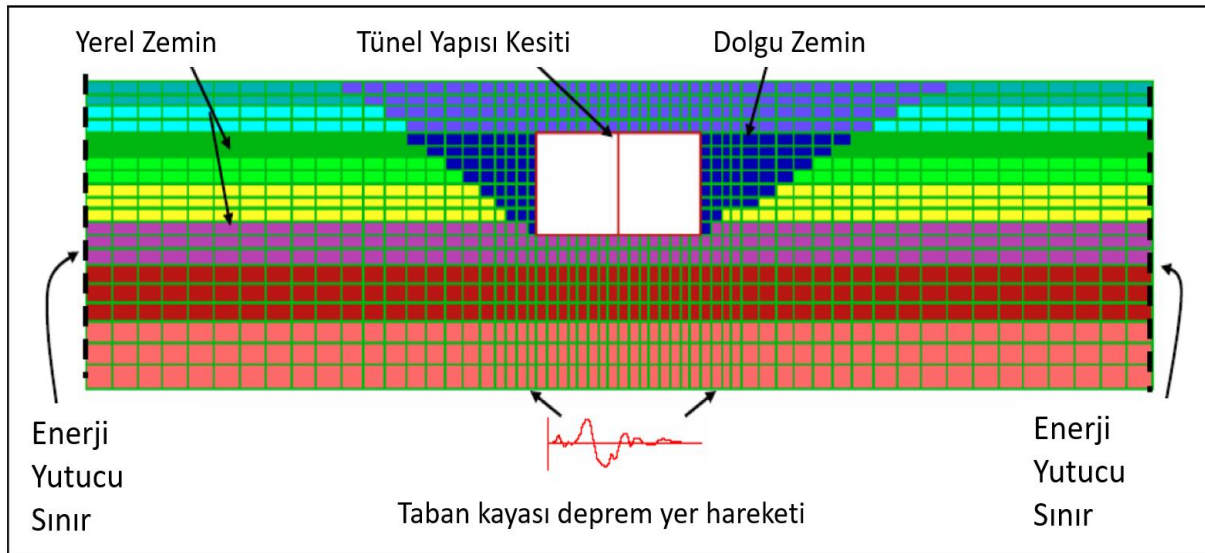
Şekil 6.21 a ve b. Dairesel kesitli bir tünel için Ayrık Eşdeğer-Dinamik Zaman Tanım Alanı Hesabı Yöntemi Örneği



Şekil 6.22 a ve b. Bir tünel için Ayrık Eşdeğer-Dinamik Zaman Tanım Alanı Hesabı Yöntemi Örneği

#### 6.4.5 Zaman Tanım Alanında Dinamik Hesap

6.4.5.1- Tünel yapısının ve zemin ortamı atalet etkilerinin ile kıyaslanabilir durumda olduğu ve kritik önem arz eden yeraltı yapıları kullanılmalıdır. Zaman tanım alanında yapılacak bu dinamik hesap için iki boyutlu zemin-yapı modelinin tabanına, uygun bir şekilde üretilmiş deprem yer hareketi uygulanır. Bu deprem hareketi, zemin serbest yüzü için belirlenmiş davranış spektrumu uyumlu deprem yer hareketinin model tabanı arayüzüne dekonvolüsyonu ile belirlenir. Kurulacak modeldeki sınır şartlarının dalga yayılımı enerjisini yutacak şekilde olması gerekir. Şekil 6.23'de Zaman Tanım Alanında Dinamik Hesap yöntemi uygulanmış bir natırma tüp tünel enkesit hesap modeli örnek olarak sunulmuştur.



Şekil 6.23. Zaman Tanım Alanında Dinamik Hesap yöntemi uygulama örneği

6.4.5.2- Üç boyutlu sonlu elemanlar veya sonlu farklar modelleri kullanılarak zaman tanım alanında yapılan dinamik hesap, en gelişmiş ve kapsamlı deprem davranış hesabı ve tasarım yöntemidir. Bu yöntemle tünel/yeraltı yapısı hem enine, hem de boyuna yönlerde, karmaşık zemin ortamı geometrisi de dikkate alınarak, modellenebilir ve hesap edilebilir. Bu yöntemde, zemin-yapı etkileşimi doğrudan göz önüne alınmaktadır. Deprem yer hareketinin uygulanmasında her hareketinin mekânsal değişimi göz önüne alınmalıdır. Uygun bünye

denklemleri kullanılarak, yapının, zemin ortamının ve zemin-tünel ara yüzünün doğrusal olmayan davranışı dikkate alınır.

## 6.5. DÜŞEY ŞAFT YAPILARININ ENİNE ANALİZ/TASARIMI

**6.5.1-** Düşey şaft yapılarının tasarımı için birincil deprem etkisi, düşey olarak yayılan kesme (SH) dalgalarına dayalı zemin kesme birim şekildeğiştirmelerinden kaynaklanan kaplama eğrilikleri ve kesme kuvvetleridir. Kuvvetler ve deformasyon talepleri, şaftların, derin, yumuşak alüvyonlar içinde yer aldığı veya keskin rijitlik kontrastı olan iki zemin (veya jeolojik) tabakayı kesmesi durumlarında özellikle kritik olmaktadır.

**6.5.2-** Düşey yayılan kesme (SH) dalgaları nedeniyle şaft yapıları üzerindeki zemin kesme gerilmelerinin etkilerini değerlendirmek için kullanılan genel yaklaşım aşağıda özetlenmiştir:

(a)-Serbest-saha zemin kesme deformasyonu profilini Madde 6.1'de açıklanmış yöntemleri kullanarak elde edin. A-Tipi hesap için Madde 6.1.2 ve 6.1.3'de kapsanmış hesap yöntemleri kullanılabilir. B- ve C-Tipi hesap için, kesme deformasyonu profilini, temel kayasından (veya çok sağlam taban katmanından) zemin yüzeyine doğru düşey olarak yayılan kesme (SH) dalgalarına dayalı 1D eşdeğer doğrusal zemin davranış hesabı ile elde edin (Madde 6.1.4'de kapsanmış hesap yöntemi).

(b)- A- ve B-Tipi hesap için maksimum serbest-saha zemin kesme birim şekildeğiştirmesini şaft yapısı üzerinde doğrudan uygulayarak deprem taleplerini belirleyin.

(c)- C-Tipi hesap için, zemin-yapı etkileşim hesabında kullanılacak, değişken zemin rijitliğini ve mukavemetini temsil üzere şaft yapısı boyunca yerleştirilecek, enine zemin yay konum ve katsayılarını (impedans fonksiyonlarını) belirleyin.

(d)- (a) aşaması kapsamında belirlenmiş şaft üst kotu (genellikle zemin yüzeyi) ve şaft tabanı arasındaki göreceli yanal kesme deformasyon profilini, her bir zaman adımı için statik olarak şaft yapısı modeline zemin yayları vasıtası ile uygulayın ve deprem taleplerini tesbit edin.

(e)- Kullanılan hesap tipine bağlı olarak, (c) ve (d) aşamada belirlenmiş deprem taleplerin, Madde 4.2.2'de sunulu birleştirme yöntemlerini kullanarak, deprem dışı etkilerle birleştirip, tasarım ve değerlendirme süreçlerini gerçekleştirin.

## BÖLÜM 7 – ZEMİN ÖZELLİKLERİNİN VE DEPREM ETKİSİ ALTINDA ZEMİN DAVRANIŞININ BELİRLENMESİNE İLİŞKİN KURALLAR

Tünel güzergâhı boyunca ve diğer altyapılar için yerel jeolojik ve zemin ortamı özelliklerinin ve deprem etkisi altındaki davranışlarının belirlenmesine ilişkin kurallar, Ulaşım ve Dağıtım Tesisleri için hazırlanan “Geoteknik Konular Raporu” kapsamında belirlenmiş özel hususlar haricinde, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY,2018, Bölüm 16 – Deprem Etkisi Altında Temel Zemin ve Temellerin Tasarımı İçin Özel Kurallar) Maddesi gereğince belirlenecektir.

## BÖLÜM 8 – KALICI ZEMİN HAREKETLERİ İÇİN ANALİZ VE TASARIM

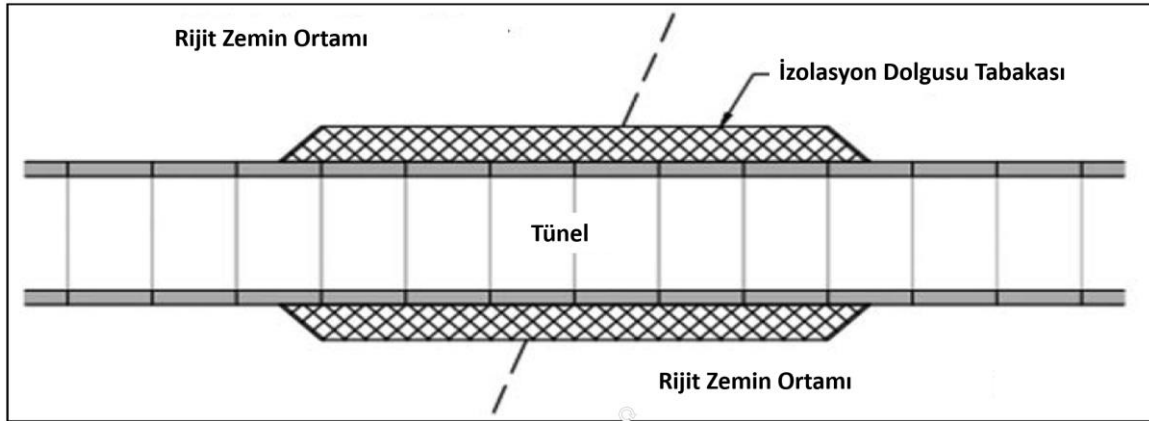
Zemin yenilmeleri ve kalıcı şekildeğiştirmeler sıvılaşma, heyelan, göçme ve fay atımlarından kaynaklanır. Tünel ve diğer yeraltı yapıları genellikle 5 cm mertebesinde yerdeğiştirmeler karşısında yerel hasara uğrarlar. Kalıcı toplam ve diferansiyel şekildeğiştirmelerinin küçük boyutta olması durumunda tünel/yeraltı yapısının tasarımı bu deformasyonlara direnecek klasik bir statik hesap ve tasarıma indirgenir. Ancak, tünel inşa maliyeti yüksek olabilir.

Büyük ve/veya kalıcı zemin deformasyonlarına karşı koymak için yeterli dayanım veya düktiliteye sahip bir tünel kaplamasının veya yeraltı yapısının tasarlanması genel olarak mümkün değildir. Bu nedenle, bu sorunun çözümü için maddelerde açıklanan hususlar göz önünde bulundurulmalıdır.

## 8.1. FAY HAREKETLERİ

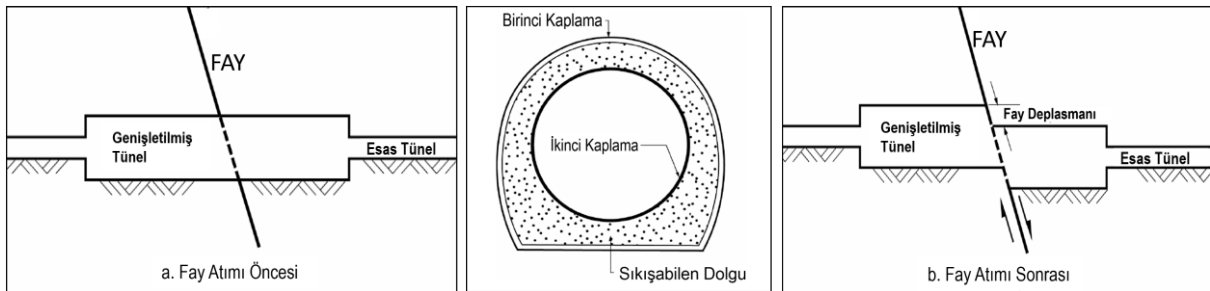
Aktif bir fayın tünel güzergâhını kesmesi durumunda, fay yırtılması ve atımı tehlikesi vardır. Bu tür yerdeğıştirmeler, 10 cm'den 10m'ye kadar uzanabilir ve birçok durumda, dar bir alanda yoğunlaşabilir. Fay yırtılması tüneller üzerinde çok olumsuz etkilere neden olabilir. Tektonik yükselme ve çökme olaylarında fay yırtılmasına benzer zararlı etkilere sahiptir. Fay geçişleri için özel önlemler uygulanması ve/veya fay atımından meydana gelecek hasarın süratli bir şekilde onarımı için önlem alınması gereklidir. Fay yerdeğıştirmeleri ile ilgili olarak, en iyi önlem, aktif fayların kesilmesinden kaçınmaktır.

**8.1.1-** Aktif fay kesmelerinin mümkün olmadığı durumlarda, genel tasarım felsefesi: fay yerdeğıştirmelerini absorbe etmek için büyük kazılar yapılması ve tünelle kazı arasındaki boşluğun yumuşak malzeme ile doldurulması ve/veya düktil kaplama kullanılması ve/veya deprem derzleri yapılmasıdır. Genel kabul gören bu yaklaşım, fay geçiş bölgelerinde delik çapının büyütülmesini (overboring) ve tünel kaplaması ile zemin arasında kalan boşluğun ezilebilir (cellular) beton ile doldurulmasını içerir (Şekil 8.1). Tünelin önemli ölçüde farklı rijitlik kontrastına sahip zemin/kaya ortamlarını kestiği durumlarda) tünel kazı çapının büyütülerek, boşluğa sıkıştırılabilir bir dolgu tabakası yerleştirilmesi yöntemi ile tünelin diferansiyel yerdeğıştirmelerden yalıtımı sağlanacaktır.



Şekil 8.1. Fay veya farklı rijitlikte zemin/jeolojik ortam geçiş bölgesi için dolgu (izolasyon) tabakası uygulanması

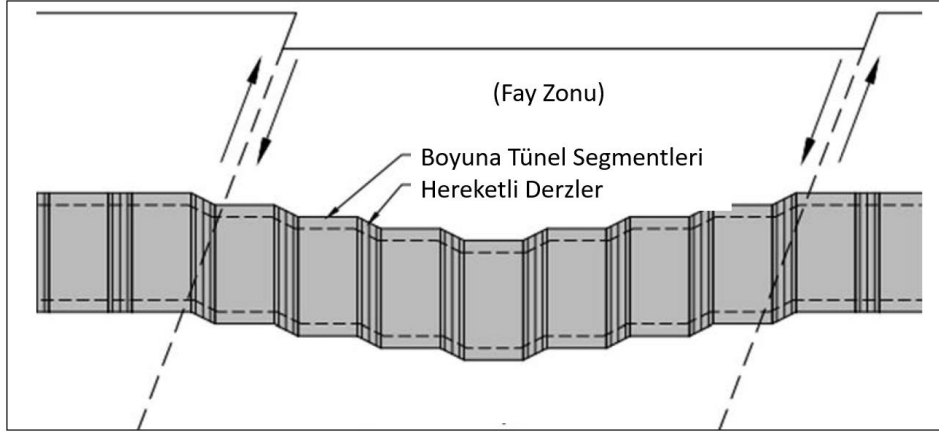
**8.1.2-** Fay atımının dar bir bölgede meydana geldiği durumlarda, fay geçiş bölgelerinde, fay atımını absorbe edebilecek şekilde, daha büyük çaplı kesit kullanılması gerekebilir. Genişlemiş bir tünel kazısından sonar dış ve iç kaplama yapılır ve bu kaplamaların arası sıkışabilir malzeme ile doldurulur (Şekil 8.2). Deprem ve fay atımı sonrası, tamir ve takviye için hasarlı bölgedeki kaplamanın ve molozun kaldırılıp yenilenmesi ve güzergâh sürekliliğinin tekrar sağlanması gerekir.



Şekil 8.2 a, b. Birinci ve İkinci Tünel kaplaması ve kırılabilir olan genişletilmiş tünel bölümü

**8.1.3-** Özellikle geniş bir bölgeye yayılı fay atımları ile baş edebilmek için belirli aralıklarla yerleştirilmiş genleşme derzlerinin kullanılması ve tünel bölümlerinin büyütülmesi gerekir (Şekil

8.3). Aktif fay bölgesi boyunca, uzunlamasına tünel parçaları arasında genişleme derzlerinin yerleştirilmesi ile tünel esnekliği artırılır. Genişleme derzleri, aksenal, enine ve düşey yönde belirli hareket seviyelerine izin verir. Bu durum kaplama üzerindeki itme kuvveti ve momenti de azaltacaktır.



Şekil 8.3. Fay Hareketi Ve Genişleme Derzlerinin Etkisi Altında Deforme Olan Tünel Profili

## 8.2. HEYELAN HAREKETLERİ

**8.2.1-** Statik veya deprem tetiklemesi ile oluşan heyelanlarda, tüneller üzerinde büyük, konsantre kesme şekildeğiştirmeleri oluşabilir ve tünel kaplamalarının tam ya da kısmi çökme durumu oluşur. Heyelan etkileri, genellikle tünelin sığ kısımlarında ve tünel partallarında hasar yaratır.

**8.2.2-** Şev stabilitesi hesabı için, emniyet katsayısı 1.1'den daha az olmayacaktır. Eğer hesaplanan emniyet katsayısı 1.1'den küçükse, Newmark Kayan Kütle hesabı ile kalıcı zemin hareketleri belirlenecek ve etkilenen yapılar üzerindeki etkisi değerlendirilecektir. Etki değerlendirmeleri sonucunda yeraltı yapılarının kabul edilemez bir performans göstermesi durumunda, uygun önlemler tasarıma dâhil edilecektir. Heyelan yerdeğiştirmelerine maruz kalan tünellerle ilgili olarak alınacak tedbirler genelde, fay yerdeğiştirmeleri için kullanılan önlemlere benzer.

## 8.3. SIVILAŞMA VE YANAL YAYILMA HAREKETLERİ

**8.3.1-** Yeraltısuyu tablasının altındaki orta-sıkı ve gevşek kohezyonsuz zeminlerde (kum, silt, çakıl) yer alan tünellerde ve yeraltı yapılarında, sıvılaşma nedeni ile hasarı ihtimali vardır. Bu kapsamda: Artan yanıl zemin basınçları, zemin şekildeğiştirmeleri ve yanıl zemin akmaları nedeni ile tünel kaplaması veya diğer altyapı duvarları ağır hasar görebilir ve uzun süreli su sızmasına yol açabilir.

**8.3.2-** Sıvılaşma ve sıvılaşma kaynaklı zemin deformasyonlarının etkileri tünel güzergâhı boyunca değerlendirilmelidir. Sıvılaşma araştırması derinliği en az 20m olacaktır. Bu değerlendirme aşağıdaki hususları içerecektir:

- Tünellerin, istasyonların ve diğer yeraltı yapılarının yükselmesi ve yüzmesi;
- Sıvılaşma sonrası oturma ve zemin tanıl yayılmaları (toplam ve diferansiyel);
- Tünellerin ve diğer yeraltı yapılarının yanıl kayma potansiyeli;
- Temel taşıma kapasitesinin kaybı;
- Yeraltı yapısını destekleyen derin temellerin yatay ve düşey dayanım kapasitesinde azaltma.

**8.3.3-** Sıvılaşmaya karşı alınacak tedbirler aşağıda sıralanmıştır.

- Zemin stabilizasyonu (örneğin sıkıştırma, su drenajı, iyileştirme, enjeksiyon, kazık ve ankraj ve/veya ve diğer zemin iksa sistemleri)
- Sorunlu zeminlerin değiştirilmesi
- Güzergâhın yeniden düzenlenmesi
- Tünel yapısının, sıvılaşmadan etkilenmeyen, daha derin konumlara yerleştirilmesi.

## **BÖLÜM 9 – DEPREM ETKİSİ ALTINDA TÜNEL KAPLAMASI VE YERALTI YAPISI TAŞIYICI SİSTEM ELEMANLARININ TASARIMINA İLİŞKİN ÖZEL KURALLAR**

Tünel ve diğer yeraltı yapıları taşıyıcı sistemlerinin deprem açısından tasarımına ilişkin kurallar için, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nin aşağıda belirtilmiş bölümlerinin ilgili maddeleri geçerlidir.

(a)- TBDY (2018) Bölüm 7 – Deprem Etkisi Altında Yerinde Dökme Betonarme Bina Taşıyıcı Sistemlerinin Tasarımı İçin Özel Kurallar,

(b)- TBDY (2018) Bölüm 8 – Deprem Etkisi Altında Ön-üretimli Betonarme Bina Taşıyıcı Sistemlerinin Tasarımı İçin Özel Kurallar

(c)- TBDY (2018) Bölüm 9 – Deprem Etkisi Altında Çelik Bina Taşıyıcı Sistemlerinin Tasarımı İçin Özel Kurallar

Segmentli kaplama ve deprem derzleri ile ilgili özel tasarım kuralları, proje mühendisi tarafından hazırlanacak ve İdare'nin onayına sunulacaktır.

## **BÖLÜM 10 – DEPREM VE RELATİF HAREKET DERZLERİ VE ÖZEL BAĞLANTILARI**

Yapısal rijitlik veya jeoloji/zemin özelliklerindeki ani ve aşırı değişikliklerden kaynaklanması muhtemel farklı gerilme ve birim şekildeğiştirme ile ilgili sorunların çözümleri için; hareketli derzler veya yeterli dayanım ve süneklige sahip özel bağlantılar gerekir.

Yapısal rijitlik veya jeoloji/zemin özelliklerindeki ani ve aşırı değişiklikler genellikle aşağıdaki koşullar nedeni ile oluşur:

- Tünelin, istasyon, şaft veya havalandırma binası gibi rijit bir yapı ile bağlantıları
- Tünel kavşakları ve tünellerin kesişimleri
- Tünelin büyük rijitlik kontrastına sahip iki farklı jeoloji/zemin ortamını kesmesi
- Tünel zati hareketlerinin kısıtlanması (yapısal sisteminde "rijit noktalar" oluştuğunda) durumunda

İşbu koşulların oluştuğu konumlarda yer alması gereken derzler veya yeterli dayanım ve süneklige sahip özel bağlantılar diferansiyel yerdeğiştirme ve dönmelere maruz kalacaktır. Bu diferansiyel hareketlerin tahmini ve derzlerinin gerekli olup olmadığını belirlemek için zemin-yapı etkileşimini hesaba katan kapsamlı bir dinamik hesap yapılacaktır.

### **10.1. JEOLJİK/GEOTEKNİK ORTAM RİJİTLİK DEĞİŞİMLERİ**

B- ve C-Tipi Hesap/Tasarım yöntemleri (Madde 3.4.4) kapsamında jeolojik/geoteknik formasyonların rijitliklerindeki ani değişimler, bu oluşumları kesen tünel ve diğer uzun yeraltı yapılara etki edecek deprem taleplerine yansıtılacak ve gerekli durumlarda, performans kriterlerini sağlayacak özellikte, bir derz tasarımı gerçekleştirilecektir. Tünel güzergahının kestiği, zemin (yumuşak bir oluşum) ve kaya (sert bir formasyon) ortamları arasındaki diferansiyel serbest-saha yanıl yerdeğiştirmelerinin bulunması için her iki ortam için düşey yayılan kesme (SH) dalgasına dayalı zemin deprem davranış hesabı yapılacak ve zemin-yapı

etkileşimini hesaba katan kapsamlı bir dinamik hesap yapılacaktır. İşbu diferansiyel yanal serbest-saha deformasyonlarının tünel davranışı üzerindeki etkilerinin değerlendirmesi için kullanılacak genel yaklaşım enine ve boyuna değerlendirmeler için aşağıda özetlenmiştir:

### 10.1.1. Enine Hesap ve Tasarım

B- ve C-Tipi Hesap/Tasarım yöntemleri kapsamında kullanılacak Enine Hesap ve Tasarım yöntemi aşağıda özetlenmiştir.

(a)- Tünel güzergâhı boyunca ani rijitlik değişimi gösteren (zemin ve kaya geçişi gibi) farklı ortamlar için serbest-saha yanal yerdeğıştirmelerini belirleyin. Tünel güzergâhı boyunca serbest-saha yerdeğıştirmeleri, belirli konumlarda düşey SH dalgası yayılımına dayalı tek boyutlu zemin deprem davranış hesapları (Madde 6.1.4) gerçekleştirilerek bulunur.

(b)- Zemin-yapı etkileşim hesabı için kullanılacak olan ve değışken zemin rijitliğini temsil eden zemin/kaya yaylarının özellik ve konumlarını belirlenir.

(c)- Tünel yapısının özellik ve geometrisine dayanan bir yapısal model geliştirilerek, tünel güzergâhında yer alması planlanan derzlerinin yapısal karakteristikleri bu yapısal model kapsamında dikkate alınmalıdır.

(d)- Tünel güzergâhı boyunca elde edilmiş serbest-saha yanal yerdeğıştirme dağılımını, zemin ve kaya yayları vasıtası ile tünel yapı modeline uygulanır.

(e)- Hesap sonucunda hesaplanan deprem talepleri, deprem dışı etkilerle birleştirilerek, tünel yapısının ve planlanan derzlerin dayanım ve görelî yanal yerdeğıştirme kapasitesi kontrol edilir.

### 10.1.2. Boyuna Hesap ve Tasarım

Tünel deprem derzlerindeki boyuna görelî yerdeğıştirme dönme açılarının hesabı için basit analitik kapalı form çözümler (B-Tipi Hesap/Tasarım) ve sayısal dinamik hesap yöntemi (C-Tipi Hesap/Tasarım) kullanılacaktır. Bu hesap süreci aşağıda özetlenmiştir.

**10.1.2.1-** (a) -Basit analitik kapalı form çözümlere dayalı yöntem kapsamında (B-Tipi Hesap/Tasarım), derz ile ayrılmış tünel parçalarının rijit oldukları varsayımı ile enbüyük boyuna (eksenel) derz deformasyonu ( $\Delta x$ ) yaklaşık olarak Denklem 10.1 ile verilir.

$$\Delta x = \epsilon^a \times l_c \quad (10.1)$$

Bu denklemde  $l_c$  derzlerle ayrılmış tünel parçasının uzunluğunu ve ,  $\epsilon^a$ ,eksenel (boyuna) birim şekildeğıştirmeyi temsil eder.  $l_c$  uzunluğu, s-dalgası dalga boyunun,  $\lambda_s$ , 1/10 değıerinden daha büyük alınmamalıdır.

S-dalgası için ekstenel birim şekildeğıştirme,  $\epsilon^{ab}$  , Denklem 10.2 (Denklem 5.4) ile bulunur.

$$\epsilon^{ab} = \epsilon_{max}^a = \left[ \frac{v_s}{2C_{SE}} \right] \quad (10.2)$$

(b)- (a) Adımında yapılan hesaplar sonucunda elde edilen boyuna görelî derz yerdeğıştirmeleri derzlerin görelî yerdeğıştirme kapasiteleri ile karşılaştırılır.

**10.1.2.2-** (a)- C-Tipi Hesap/Tasarım için Bölüm 5.3'te yer alan sayısal boyuna hesap/tasarım yöntemleri, tünel yapısal modellemesine derzlerin rijitlik özellikleri de dahil edilerek (Şekil 5.6), uygulanacaktır. Zaman tanım alanında yapılan hesaplarda deprem yer hareketinin mekânsal değışimi dikkate alınacaktır.

(b)- (a) adımda yapılan hesaplar sonucunda elde edilen boyuna ve yanal görelî derz yerdeğıştirmeleri derzlerin dayanım ve görelî yerdeğıştirme kapasiteleri ile karşılaştırılacaktır.

## 10.2 YAPILAR ARASI BAĞLANTILAR

Tünelin yapısının, istasyon, şaft veya havalandırma binası gibi rijit bir yapı ile bağlantılarının, özel hareketli derlerin kullanılmadığı durumlarda, istenilen deprem performansını karşılayabilecek dayanım ve süneklığe sahip olarak tasarımı gereklidir. Bu hususta kullanılacak hesap/tasarım yöntemleri aşağıda sunulmuştur.

**10.2.1-** A-Tipi Hesap/Tasarım yöntemi kapsamında, tünel normal kesitleri için Denklem 5.1, 5.2 ve 5.3 vasıtası ile bulunan boyuna birim şekildeğiştirme, tünel-rijit yapı birleşim noktalarında iki katı olarak kabul edilerek kullanılacaktır.

**10.2.2-** B-Tipi Hesap/Tasarım yöntemi kapsamında, tünel, Winkler temeli üzerine oturan elastik bir kiriş olarak modellenecektir. Tünelin rijit yapıya bağlı ucunun ( $x=0$ ) ankastre olduğu kabulü ile birleşim nokasına ( $x=0$ ) ve tünelin diğer konumlarına etki edecek eğilme momenti ( $M_l(x)$ ), kesme kuvveti ( $V_l(x)$ ) ve normal (eksenel) kuvvet ( $N_l$ ) (Şekil 5.4) aşağıdaki denklemlerle verilir.

$$M_l(x) = \frac{k_t}{2 \alpha^2} \Delta y C_{\alpha x} + \frac{k_t}{2 \alpha^3} \Delta \varphi D_{\alpha x} \quad (10.3)$$

$$V_l(x) = \frac{k_t}{\alpha} \Delta y D_{\alpha x} + \frac{k_t}{2 \alpha^2} \Delta \varphi A_{\alpha x} \quad (10.4)$$

$$N_l = (2 E_l A_l f \Delta x)^{1/2} \quad (10.5)$$

$$C_{\alpha x} = e^{-\alpha x} (\cos \alpha x + \sin \alpha x) \quad (10.6)$$

$$A_{\alpha x} = e^{-\alpha x} (\cos \alpha x - \sin \alpha x) \quad (10.7)$$

$$D_{\alpha x} = e^{-\alpha x} (\cos \alpha x) \quad (10.8)$$

$$\alpha = \left( \frac{k_t}{4 E_l I_l} \right)^{1/4} \quad (10.9)$$

$$f = C \rho_s Z \mu \quad (10.10)$$

Burada,  $\Delta y$  ve  $\Delta \varphi$  tünelin yapıya bağlanan ucunun serbest olması durumunda oluşacak görelî dönme açısını (Denklem 10.11) ve görelî yatay yerdeğiştirmesi (Denklem 10.12) göstermektedir.

$$\Delta \varphi = 0.35 \left( \frac{a_s}{c_{SE}^2} \right) l_c \quad (10.11)$$

$$\Delta y = \left( \frac{v_s}{c_{SE}} \right) l_c \quad (10.12)$$

f = Birim boy başına tünel çeperindeki sürtünme kuvveti

x = Birleşim noktasından, tünelin ilgili konumuna, ölçülen mesafe

C = Tünel kesiti dış çeper toplam uzunluğu

$\rho_s$  = Zemin birim ağırlığı

Z = Tünelin ortalama derinliği

$\mu$  = Zemin ortamı ve tünel dış yüzeyi arasındaki sürtünme katsayısı

$k_t$  = Zemin enine (yanal) yay katsayısı (Denklem 5.18)

olmaktadır.



**10.2.3-** C-Tipi Hesap/Tasarım için Bölüm 5.3'te yer alan sayısal boyuna hesap/tasarım yöntemleri, tünel yapısal modellemesine bağlantı yapılan yapıların rijitlik özellikleri de dâhil edilerek, uygulanacaktır. Zaman tanım alanında yapılan hesaplarda deprem yer hareketinin mekânsal değişimi dikkate alınacaktır.

## **BÖLÜM 11 –MEVCUT TÜNEL VE YERALTI YAPILARININ DEPREM PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ VE GÜÇLENDİRME TASARIMI İÇİN GENEL KURALLAR**

### **11.1. GENEL YAKLAŞIM**

Bu bölümde mevcut tünel/yeraltı yapılarının deprem performanslarının değerlendirilmesi ve gerekli olması halinde güçlendirilmesi için uygulanacak tasarım kurallarına yer verilecektir. Mevcut Tünel/Yeraltı Yapılarının deprem performanslarının değerlendirmesinin amacı, DD-2 Deprem Yer Hareketi Düzeyinde'ki deprem performans durumunun ve deprem riskinin belirlenmesidir.

Yer sarsıntısı davranış yetersizliği dışında, potansiyel olarak önemli bir deprem riskini açıkça gösteren koşullar aşağıda özetlenmiştir:

- Tüneli güzergâhını kesen aktif bir fay.
- Tüneli güzergâhını kesen bir heyelan
- Tünelin yer aldığı zemin ortamında sıvılaşma potansiyeli bulunan zeminler (Standard Penetrasyon Darbe Sayısı, SPT < 30).
- Geçmişte meydana gelmiş hasarların varlığı (ör. Yerel çökmeler, büyük deformasyonlar, çatlama veya zemin hareketlerinden dolayı kaplamanın dökülmesi).

### **11.2. MEVCUT TÜNEL/YERALTI YAPILARINDAN BİLGİ TOPLANMASI VE PERFORMANS DEĞERLENDİRİLMESİ**

Mevcut bir tünel/yeraltı yapısının değerlendirilmesi ve güçlendirme aşamasında, tasarım ve yapım ve koşulları ile tünel güzergâhındaki zemin ve jeolojik durumlar üzerinde olabildiğince eksiksiz bilgi edinilmesi önemlidir. Mevcut koşulların yeterince belirlenmesi ve yapısal problemlerin nedenlerini belirlemek için özel muayene ve araştırmalar gerekebilir.

Tünel/yeraltı yapısının deprem davranışını etkileyebilecek ve mevcut deprem performansının değerlendirilmesi için gerekli unsurları şunlardır:

1. Deprem etkilerinin tünel tasarımında doğru olarak göz önüne alınıp alınmadığı
2. Tünel kaplamasının ve/veya yeraltı yapısı taşıyıcı sisteminin yapısal niteliği
3. Tünelin diğer yapılarla birleşim noktalarının yapısal özellikleri
4. Kaplama ve/veya taşıyıcı sisteminde meydana gelmiş çatlama ve bozulmalar açısından tünel deprem performansının tarihçesi
5. Kaplama ve/veya taşıyıcı sisteminde mevcut yapısal bozulma durumu

Tünel ve diğer yeraltı yapıları taşıyıcı sistemlerinden toplanacak bilgi gerek kapsam ve gerekse düzey açısından, TBDY (2018)- Bölüm 15.2 ile uyumlu olacaktır.

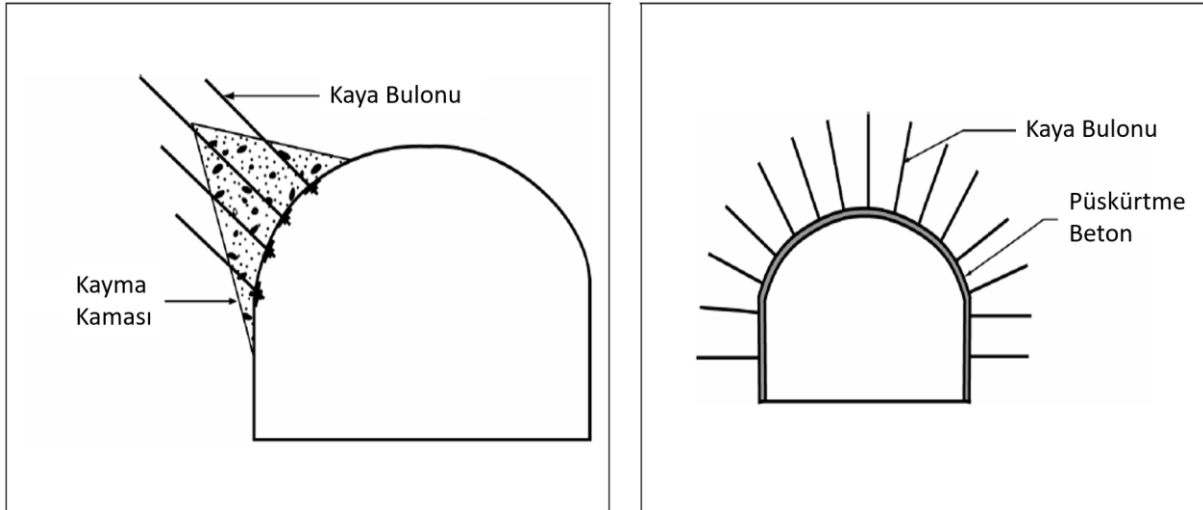
Mevcut ve güçlendirilen yığma binaların kapasite hesabı ve deprem performans değerlendirmesi, işbu şartnamede yer alan esaslar çerçevesinde yapılacaktır.

## 11.3 MEVCUT TÜNEL/YERALTI YAPILARININ DEPREM GÜÇLENDİRMESİ

### 11.3.1- Delme/Kazma Tüneller

Mevcut delme/kazma tünellerdeki yapısal zafiyetlerin giderilmesi ve deprem performanslarının istenilen düzeye getirilmesine yönelik güçlendirme yöntemleri kısaca belirtilmiştir.

- Çatlamış tünel kaplamaları için, FRP (karbon elyafli polimer), epoksi, püskürtme beton veya diğer alternatif tamir malzemeleri kullanılabilir.
- Tünel kaplamaları çatlamış, bozulmuş veya başka bir şekilde düşük dayanım nedeniyle yerel olarak zayıfsa kaplama, nokta onarımları ile zayıf bölgeleri kaldırarak veya yenisi ile değiştirerek kullanılabilir.
- Segmentli kaplamaların birleşim derzlerindeki hasar için derz yapısına özel malzemeler kullanılmalı ve su geçirimsizliği sağlanmalıdır.
- Çelik astar plakalarının mevcut kaplamaya epoksi ile yapıştırılması ile tüneller kaplamaları güçlendirilebilir
- Tünel kaplamalarına zayıf zemin/kaya bölgelerinde destek sağlanması için kaya civataları, civileri ve kaya dübelleri kullanılır.(Şekil 11.1 a ve b)
- Kaplama arkasında oluşmuş boşluklar beton şerbeti enjeksiyonu ile doldurulur.



Şekil 11.1 a ve b. Tünellerde kaya/zemin ankrajları ile stabilizasyon örnekleri

### 11.3.2- Aç-Kapa Tünel ve Diğer Yeraltı Yapıları

Mevcut Aç-Kapa Tünel ve Diğer Yeraltı Yapıları'nın deprem performanslarının istenilen düzeye getirilmesine yönelik güçlendirme uygulamaları TBDY (2018)- Bölüm 15.9.3 kapsamında açıklandığı şekilde yapılacaktır.

Zemin basıncı nedeni ile duvar ve döşemelerin orta bölgeleri- iç yüzeylerinde meydana gelen çekme hasarı, çatlama ve olası su sızıntılarının tamir ve güçlendirmesi için FRP (karbon elyafli polimer), epoksi, veya çelik plaka yapıştırılması seçenekleri dikkate alınmalıdır.

### 11.3.3- Batırma Tüp Tüneller

Delme/Kazma Tüneller, Aç-Kapa Tünel ve Diğer Yeraltı Yapıları için önerilen güçlendirme stratejilerine ek olarak, Batırma Tüp Tüneller için aşağıdaki hususlar göz önüne alınmalıdır.

- Sıvılaşma kaynaklı problemlerin önlenmesi için zemin iyileştirme (jet grout)
- Görelî yerdeğiştirme kapasitesi azalmış ve/veya hasar görmüş deprem derzlerinin değiştirilmesi (yenilenmesi).



## **BÖLÜM 12- DEPREM ERKEN UYARI – TRAFİK DURDURMA SİSTEMİ**

İdare tarafından belirlenecek tüneller için oluşturulacak deprem erken uyarı/trafik durdurma sistemi vasıtası ile deprem yer hareketinin belirli eşik seviyelerini aşması durumunda araç trafiği yavaşlatılarak durdurulacak ve tünel boşatılacaktır. Akabinde, tüm veri, gözlemler ve yapısal incelemeler değerlendirilerek, tünelde olası hasarlar tespit edilecek ve araç trafiğinin yeniden başlatılması hususu ile ilgili karar verilecektir. Deprem erken uyarı/trafik durdurma sisteminin tünel/yeraltı yapılarının deprem davranışının belirlenmesi için idare tarafından kurulacak yapısal sağlık izleme sistemi (Madde 2.9) ile entegrasyonu mümkündür.