

# YÜKSEK YARMA ŞEVLERİNİN DEPLASMANA DAYALI DİNAMİK ANALİZİ

## DISPLACEMENT BASED DYNAMIC ANALYSIS OF HIGH CUT SLOPES

Özgen KÖKTEN<sup>1</sup>, Buse TÜFEKÇİ<sup>2</sup>, Seray ZEDELİ<sup>3</sup>

### ÖZET

Yüksek tasarım ivmesi altında tasarımı yapılacak olan yüksek yarma şevlerinin dinamik performansının değerlendirilmesi geoteknik deprem mühendisliği açısından oldukça büyük önem teşkil etmektedir. Dinamik yükler altında yüksek yarma şevlerinin tasarımında toptan kaymaya karşı stabilite tahkiklerinin deplasmandan bağımsız olarak yalnızca limit denge yöntemi prensiplerine göre yapılması çoğu zaman aşırı güvenli şev tasarımlarının yapılmasına neden olmaktadır. Bu kapsamda şevlerde oluşacak kalıcı deplasmanların hesaplanmasında mühendislik pratiği açısından yaygın olarak kullanılan birçok basitleştirilmiş analitik - ampirik yöntem mevcuttur. Belirtilen basitleştirilmiş yöntemler ile birlikte ivme - zaman alanında tanımlı deprem kayıtlarının da kullanılabildiği sonlu elemanlar veya sonlu farklar yöntemlerinin kullanıldığı ileri nümerik analizlerle de kalıcı deplasmanlar hesaplanabilmektedir. Bu çalışma kapsamında yüksek tasarım ivmeleri altında tasarımı yapılan bir demiryolu yarma şevi özelinde şev kalıcı deplasmanları, limit denge analizlerine paralel olarak basitleştirilmiş analitik - ampirik yöntemler ve sonlu elemanlar analizleri ile yapılan dinamik analizler ile hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılarak deplasman hesabı için önerilen basitleştirilmiş yöntemlerin performansı limit denge yöntemi ile yapılan stabilite hesaplarında elde edilen güvenlik sayıları ile ilişkilendirilerek optimum şev tasarımının yapılması hedeflenmiştir.

*Anahtar Kelimeler: Şev stabilitesi, deplasman, sonlu elemanlar, dinamik, deprem*

### ABSTRACT

Evaluation of the dynamic performance of high cutting slopes to be designed under high design acceleration is of great importance in terms of geotechnical earthquake engineering. In the design of high cut slopes under dynamic loads, overall stability analysis against sliding are carried out only according to the principles of the limit equilibrium

<sup>1</sup> İnşaat Mühendisi, Temelsu Uluslararası Müh. Hiz. A.Ş., ozgen.kokten@temelsu.com.tr (Sorumlu Yazar)

<sup>2</sup> İnşaat Mühendisi, Temelsu Uluslararası Müh. Hiz. A.Ş., buse.tufekci@temelsu.com.tr

<sup>3</sup> İnşaat Mühendisi, Temelsu Uluslararası Müh. Hiz. A.Ş., seray.sezgin@temelsu.com.tr



method, regardless of displacement, which often leads to conservative designs. In this context, there are many simplified analytical - empirical methods that are widely used in engineering practice in calculating permanent displacements that will occur in slopes. In addition to the simplified methods mentioned, permanent displacements can also be calculated with advanced numerical analysis using finite element or finite difference methods, where earthquake records defined in the acceleration-time domain can also be used. Within the scope of this study, permanent slope displacements, specific to a cut slope of railway designed under high design accelerations, were calculated by dynamic analysis made with simplified analytical - empirical methods and finite element analysis in parallel with limit equilibrium analysis. The results obtained were compared with each other and the performance of the simplified methods proposed for displacement calculation was correlated with the factor of safety obtained in the stability calculations made by the limit equilibrium method and it was aimed to make the optimum slope design.

*Keywords: Slope stability, displacement, finite elements, dynamic, earthquake*

## 1. GİRİŞ

Dinamik yüklerin etkisi altında şev stabilitesinin değerlendirilmesi hem mühendislik uygulamalarının güvenilirliğini arttırmak hem de sismik riskleri yönetmek açısından kritik bir öneme sahiptir. Şevlerin dinamik stabilitesini değerlendirmek için kullanılan en yaygın yaklaşım; deprem etkilerini yarı statik atalet kuvvetleri olarak kayan kütlelerin ağırlık merkezine etki ettirilerek kaymaya karşı güvenlik katsayısının belirlendiği pseudo-statik yöntemdir. Pseudo statik yaklaşımda deprem hareketleri tek bir bileşene indirgenmekte olup; şev güvenliğini değerlendirirken kalıcı deplasmanları ve gerçek zemin davranışını yeterince yansıtmamaktadır. Dinamik yükler altında yapılan şev tasarımlarında, yalnızca limit denge analizleriyle pseudo statik yöntemle göre yapılan değerlendirmeler genellikle aşırı güvenli tasarımlara yol açarak mühendislik açısından ekonomik olmayan çözümler üretmeye sebep olmaktadır.

Dinamik etkilere maruz kalan yüksek yarma şevlerinde oluşacak kalıcı deplasmanların doğru bir şekilde hesaplanabilmesi, sismik şev stabilitesi daha etkin bir tasarım sağlamaktadır. Bu kapsamda literatürde; Newmark (1965) tarafından geliştirilen "Kayan Blok Modeli" yaklaşımı esas alınarak geliştirilen çalışmalar sonucunda kalıcı yer değiştirmelerin tahmini için önerilen ampirik korelasyonlar yer almaktadır. Sismisitesi yüksek bölgelerde yer alan ve kullanım açısından kritik öneme sahip şevlerde meydana gelen kalıcı deformasyonların daha detaylı bir şekilde incelenmesi amacıyla, sonlu elemanlar veya sonlu farklar yöntemi (FEM, FDM) kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi, gerilme-deformasyon etkilerini ve zemin davranışını daha kapsamlı bir şekilde modelleyerek, sismik yüklerin şev üzerindeki etkilerini ayrıntılı bir biçimde analiz etme olanağı sunmaktadır.

Bu çalışmada, yüksek tasarım ivmelerine maruz kalan bir demiryolu yarma şevinin kalıcı deplasmanları hem limit denge analizlerine dayanan basitleştirilmiş ampirik yöntemler hem de sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen ivme-zaman tanımlı dinamik analizler aracılığıyla incelenmiştir. Farklı yöntemlerle elde edilen deplasman değerleri

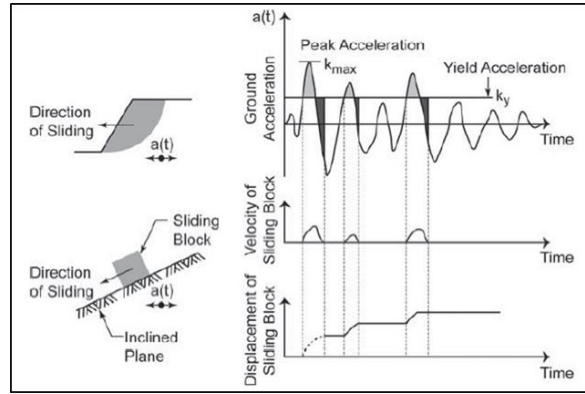


karşılaştırılmış ve bu doğrultuda şev tasarımlarının, elde edilen veriler ışığında optimize edilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

## 2. LİTERATÜR

Zemin şevlerinin sismik stabilitesi, genellikle Newmark (1965) ve Makdisi ve Seed'in (1978) temel çalışmalarına dayanan, deprem yüklerinin sebep olduğu kalıcı deformasyonları hesaplayan yöntemlerle değerlendirilir. Bu yöntemlerin kapsamlı tartışmaları ve mühendislik uygulamaları daha önce Lin ve Whitman 1983, Ambraseys ve Menu 1988, Jibson 1993, Bray vd. 1995, Kramer ve Smith 1997, Bray vd. 1998 ve Rathje ve Bray 2000 gibi araştırmacılar tarafından sunulmuştur. Newmark prosedürlerine dayanan düzenlemelerinin çoğu deterministik bir çerçeveye oturtulmuştur.

Mevcut basitleştirilmiş kalıcı şev yer değiştirme hesaplamalarında Newmark kayan rijit blok yöntemine (Newmark, 1965) göre, zemin kayan bir blok olarak modellenmekte ve bu bloğun hareketini tetikleyen kritik bir ivme değeri ( $a_c$ ) tanımlanmaktadır. Kritik ivme değeri  $GS=1.0$  değerini veren eşdeğer deprem katsayısı olarak açıklanmaktadır. Deprem ivmesinin bu kritik değerle karşılaştırılması yoluyla, zemin hareketlerinin şevde kalıcı deformasyonlara neden olup olmadığı belirlenmektedir. Kritik ivme değeri, deprem ivme kaydında eşğin üstünde kaldığı durumlarda, şevde kayma olayı meydana gelmekte; aksi takdirde zemin hareketi tetiklenmemektedir. Kritik ivme değerinin aşıldığı durumlarda, meydana gelen bu yer değiştirmeler birbirine eklenerek rijit bloğun tabana göre görece toplam kalıcı yer değiştirmesi hesaplanmaktadır.



Şekil 1. Newmark Kayan Blok Yönteminin Gösterimi (FHWA, 2011)

Newmark kayan rijit blok yöntemini esas alarak birçok araştırmacı çalışmalar yapmış ve kalıcı yer değiştirmelerin tahmini için ampirik korelasyonlar önermişlerdir. Bu korelasyonlardan bazıları orijinal Newmark yönteminde olduğu gibi sadece kaymadan kaynaklı yer değiştiren rijit blokları dikkate alırken, bazıları ise deprem esnasındaki kayan taban kaynaklı yer değiştirmeye ek olarak kendi içerisinde de deforme olabilen esnek kütleli de dikkate alarak toplam kalıcı yer değiştirmeyi hesaplamaya çalışmaktadır.

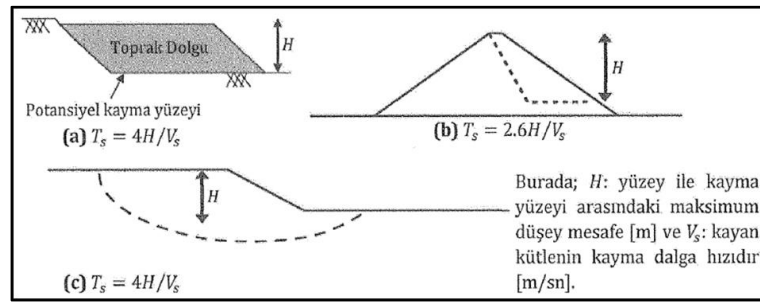
Rathje ve Antonakos(2011) yaptıkları çalışmalarda, kütleli hangi koşullarda rijit blok veya esnek kütle davranışı ile temsil edilebileceğinin belirlenmesi için kayan kütleli doğal periyodunun depremin medyan periyodu oranına ( $T_s/T_m$ ) bağlı olarak karar verilmesinin



uygun olacağını belirtmişlerdir. Kayan kütle yüzeysel ve sert (saha doğal periyodu,  $T_s$ , sıfıra yakın) ise rijit blok davranışı ile yer değiştirme tahmini yapmak mümkün olurken, daha derin ve yumuşak kütleler için esnek kütle davranışının daha gerçekçi bir yaklaşım olduğunu değerlendirmişlerdir.

Bu kapsamda kalıcı yer değiştirmelerin analizi için Rathje ve Antonakos(2011) tarafından  $T_s/T_m > 0.1$  olduğu durumlarda esnek kütle,  $T_s/T_m < 0.1$  olduğu durumlarda ise rijit blok analizleri yapılması önerilmiştir.

Kayan kütlelerin doğal periyodu ( $T_s$ ); Bray,2007 tarafından önerilen yaklaşımla yüzey ile kayma yüzeyi arasındaki maksimum mesafe ile kayan kütlelerin kayma dalgası hızına bağlı olarak hesaplanmaktadır.



Şekil 2. Kayan kütlelerin doğal periyodunun tahmini (Bray,2007)

Deprem hareketinin ortalama periyodu,  $T_m$ , ise aşağıda verilen eşitlikler ile belirlenmektedir (Rathje vd., 2004).

$$\ln(T_m) = \begin{cases} -1.00 + 0.18(M_w - 6) + 0.0038r + 0.078S_c + 0.27S_d, & 5.00 \leq M_w \leq 7.25 \\ -0.775 + 0.0038r + 0.078S_c + 0.27S_d, & M_w \geq 7.25 \end{cases} \quad (1)$$

Bu eşitlikte,

$M_w$ : Depremin moment büyüklüğü

$r$ : Fay kırığına olan en yakın mesafe (km)

$S_c$ : Ayrışmış/yumuşak kaya koşullarında (ZC yerel zemin sınıfı) 1.0 diğer koşullarda ise 0 alınan katsayı

$S_d$ : Derin zemin koşulunda (ZD yerel zemin sınıfı) 1.0 diğer koşullarda ise 0 alınan katsayıdır.

Basitleştirilmiş ampirik yöntemler ile deplasman analizi için Bray ve Travasarou (2007) tarafından yayınlanan makalede  $5.5 \leq M_w \leq 7.6$ , fay kırığına olan uzaklık,  $R \leq 100$  km ve Eurocode8'de tanımlanan B,C ve D zemin sınıflarını kapsayan deprem kayıtları kullanarak yaptıkları sismik deplasman modelinde, kayma kütlelerinin altındaki alan için potansiyel kayma kütlelerinin  $1.5 \times T_s$  periyodundaki tasarım yer hareketinin spektral ivmesine ( $S_a(1.5T_s)$ ) önemli ölçüde bağlı olduğu belirtilmiştir.

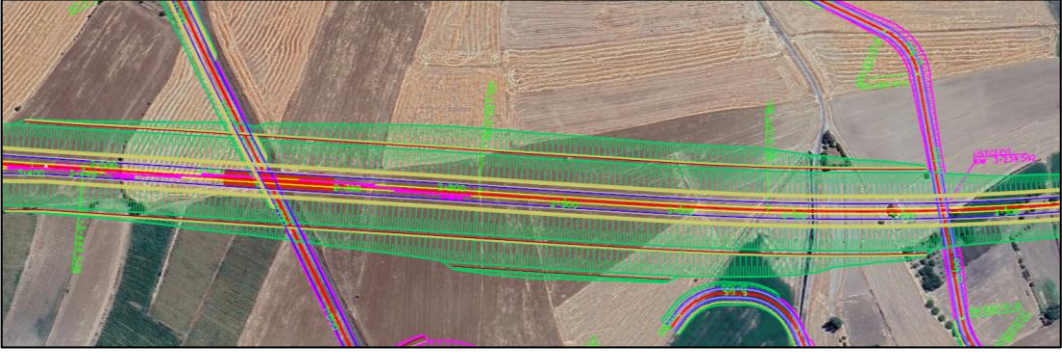
Buna göre Bray ve Travasarou(2007) tarafından sunulan aşağıdaki denklem ile deplasman değeri belirlenmektedir.

$$\ln D = -1.10 - 2.83 \ln(k_y) - 0.333(\ln(k_y))^2 + 0.566 \ln(k_y) \ln(S_a(1.5T_s)) + 3.04 \ln(S_a(1.5T_s)) - 0.244(\ln(S_a(1.5T_s)))^2 + 1.50T_s + 0.278(M - 7) \quad (2)$$



### 3. VAKA ANALİZİ

Bu çalışma kapsamında, yüksek tasarım ivmesine sahip bir bölgede yapımı planlanan bir yüksek hızlı tren hattında teşkil edilecek yarma şevinin dinamik durumdaki performansı, basitleştirilmiş amprik yöntemler ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Güzergah üzerinde yer alan yarma kesimi, yüzeye yakın kesimlerde killi kum içerikli alüvyon birimleri ve devamında diyabaz tabakalarından oluşmaktadır. Çalışma alanına referans teşkil edecek şekilde yapılan yarma sondajında, kum birimlerinde elde edilen SPT-N<sub>30</sub> değerlerinin ortalaması 42 olarak belirlenmiş; buna bağlı olarak düzeltilmiş SPT-N<sub>60</sub> darbe sayıları ise 32 olarak hesaplanmıştır.

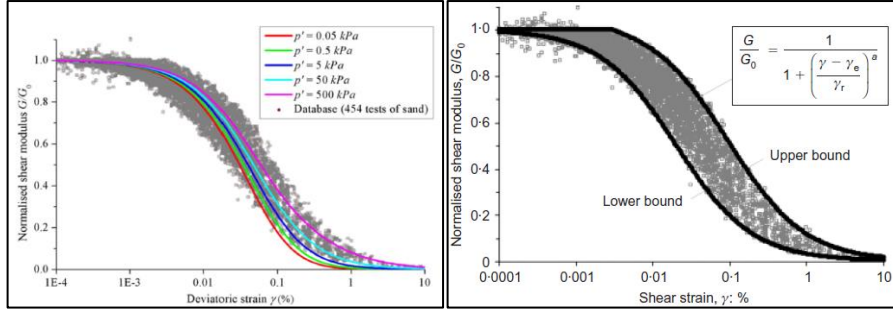


Şekil 3. Yüksek yarma şevine ait kesimin google earth üzerinde görüntüsü

Sayısal analizler kapsamında kum birimleri Mohr Coulomb ve Hardening Soil Small Strain Stiffness Model (HS-Small) olmak üzere iki farklı malzeme modeli ile modellenmiştir. Hiperbolik gerilme-birim deformasyon davranışına dayanarak geliştirilmiş olan HS-Small bünye modeli sayesinde dinamik yüklemeler altındaki histeretik sönümlenmeler dikkate alınmaktadır. Mohr Coulomb malzeme modeli akma (yield) sınırına ulaşana kadar malzemenin izotropik lineer elastik, sınır gerilme düzeyinden sonra ise mükemmel plastik davranış sergileyeceği esasına dayanmakta olup akma yüzeyi (Yield Surface), efektif asal gerilmelere,  $\sigma'_1$ ,  $\sigma'_2$ ,  $\sigma'_3$  ve bilinen iki plastik model parametresi olan içsel sürtünme açısı ( $\phi$ ) ve kohezyon (c) değerleri ile tanımlanan akma fonksiyonları ile oluşturulmaktadır.

HS-Small bünye modeli için maksimum kayma modülü ( $G_{0ref}$ ) ve bu modülün yaklaşık %70'ine düşmesine neden olacak kayma birim deformasyon ( $\gamma_{0.7}$ ) değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Killi kum tabakası için maksimum kayma modülü R. B. J. Brinkgreve, Kürşat Engin H., Engin E., (2010) " Validation of Empirical Formulas to Derive Model Parameters for Sands" referansında rölatif sıklığa bağlı önerilen yaklaşımlar kullanılarak 110 MPa olarak belirlenmiştir. "Stiffness of Sands Through a Laboratory Test Database, Bolton ve Öztoprak,2013" ile "A Unified Constitutive Model for Pressure Sensitive Shear Flow Transitions in Moderate Dense Granular Materials, Cheng vd., 2021" referansları esas alınarak kayma modülünün %70'ine düşmesine neden olacak kayma birim deformasyon miktarı  $\gamma_{0.7}=\%0.03$  olarak belirlenmiştir.





Şekil 4. Kayma Birim Deformasyonunun Belirlenmesinde Kullanılan Çalışmalar (Cheng vd. 2021, Bolton ve Öztoprak, 2013)

“Geotechnical Engineering, V.N.S Murthy (2002) Tablo 9.3” referansı kullanılarak SPT-N<sub>60</sub> değerine göre kum birimlerinin içsel sürtünme açısı 36° olarak belirlenmiştir. İçerdiği ince malzeme miktarı göz önüne alınarak 5 kPa kohezyon değeri alınmıştır. Killi kum tabakası için elastisite modülü ve poisson oranı değerleri “Foundation Analysis and Design, 5th Ed., Bowles, 2005” isimli referansta önerilen değerler göz önüne alınarak E=50 MPa ve ν=0.30 olarak belirlenmiştir. Diyabaz birimleri için Bieniawski (1989) kaya sınıflamasına dayanan değerlendirmelerde, RMR değeri 65 olarak belirlenmiştir. İyi kaya sınıfında yer alan birimler için ilgili referans yardımıyla , içsel sürtünme açısı 35° ve kohezyon değeri 300 kPa alınarak Mohr Coulomb malzeme modeli ile modellenmiştir.

Tablo 1. Analizlerde kullanılan dayanım ve mukavemet parametreleri

Birim	γ (kN/m <sup>3</sup> )	Φ (°)	C (kPa)	E (kPa)	ν	G (Mpa)	γ <sub>0.7</sub> (%)
Killi kum	19	36	5	50000	0.30	110	0.03
Diyabaz	22	35	300	1000000	0.25	-	-

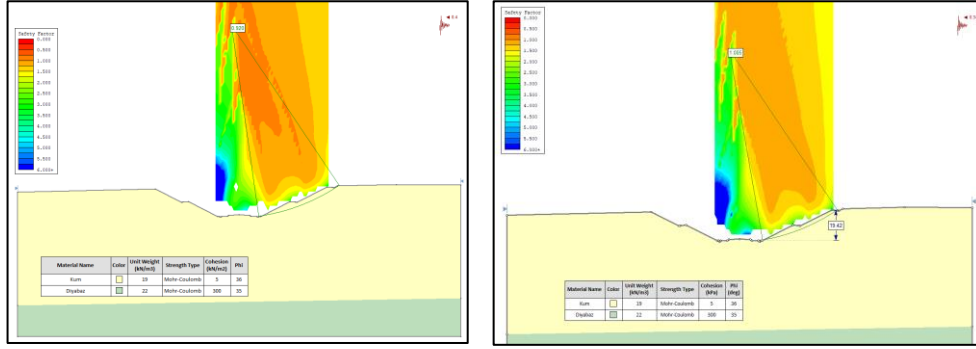
Çalışma alanı Türkiye Deprem Bölgeleri haritasına göre yüksek riskli ve tehlikeli deprem bölgesi üzerinde yer almakta olup Doğu Anadolu Fay Zonu(DAFZ) etkisi altındadır. DAFZ, Karlıova ile Hatay arasında yaklaşık 450 km boyunca uzanan, KD-yönelimli, sol yönlü doğrultu atımlı bir fay sistemidir.

Çalışma kapsamında yapılan analizlerde bölgenin enlem ve boylam verilerine göre AFAD-Türkiye Deprem Tehlike Haritaları interaktif Web Uygulaması kullanılarak 50 yılda aşılma olasılığı %2 (tekrarlanma periyodu 2475 yıl) olan DD-1 deprem yer hareketi düzeyine göre sismik parametreleri elde edilmiştir. Buna göre kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı (S<sub>Ds</sub>) 2.397, en büyük yer ivmesi (PGA) 0.961 g, en büyük yer hızı (V<sub>s</sub>) 61.11 cm/s bulunmuştur.

### 3.1. Ampirik Yöntemlerle Deplasman Analizi

2Y/1D eğimle projelendirilen 20.67 m yüksekliğe sahip yarma şevinin DD-1 deprem durumundaki sismik stabilitesi limit denge yöntemiyle incelenmiştir. Elde edilen güvenlik sayısı şartnamelerde istenilen güvenlik sayısı sınır şartını sağlamamaktadır. Literatürde yer alan ampirik yöntemler ile deplasman değerleri hesaplanmıştır. Newmark (1965)'e göre; şevin hareketini tetikleyen kritik ivme değeri (kaymaya karşı güvenlik sayısının 1.0 olduğu durumda) k<sub>y</sub>=0.34 olarak elde edilmiştir.





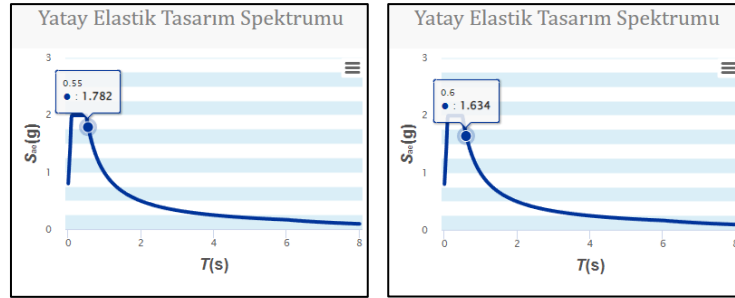
Şekil 5. a) Limit denge yöntemi sismik durum stabilite analiz sonucu b) GS=1.0 değerine karşılık gelen eşdeğer yatay deprem katsayısı

Rathje ve Antonakos (2011) yaklaşımı esas alınarak kayan kütle için doğal periyodunun depremin medyan periyoduna oranı 0.58 olarak hesaplanmış olup 0.1 değerinden büyük olması sebebiyle esnek kütleyle göre deplasman hesabı yapılmıştır.

Tablo 2. Yarma kesitine ait deprem verileri

Esnek Kütle için Doğal Periyodu				Deprem Doğal Periyodu				
$V_s$ (m/sn)	H (m) (Kritik kayma yüksekliği)	Kayma Tipi	$T_s$ (sn)	Zemin Sınıfı	$r$ (km)	$S_c$	$S_d$	$T_m$ (sn)
200	19.42	c	0.388	ZD	19.7	0	1	0.65

Bray ve Travasarou (2007) ampirik hesap yönteminde kullanılan parametrelerden; kayan kütle için doğal periyodunun 1.5 katına denk gelen periyotta oluşan spektral ivme değeri ( $S_{ae}$ ) yatay elastik tepki spektrumundan interpolasyon yapılarak 1.693 g olarak bulunmuştur.



Şekil 6. 1.5T<sub>s</sub> değeri için spektral ivmenin belirlenmesi

Ampirik yöntemlerle deplasman analizi yapan bir program kullanılarak yarma şevindeki kalıcı deplasman değeri 32.2 cm olarak hesaplanmıştır.

Rigid Flexible (coupled) Flexible/Rigid (unified model) Probability of failure	
<b>Input parameters (Bray and Travasarou, 2007):</b>	
Critical (yield) acceleration, $a_c$ or $k_y$ (g):	0.345
Site period, $T_s$ (s):	0.388
Spectral acceleration at $1.5 * T_s$ , $S_a$ ( $1.5 T_s$ ) (g):	1.693
Earthquake magnitude, M:	7.5
See Definition of terms in the User Guide for definitions of input parameters and for guidance in estimating appropriate input values.	
<input type="button" value="Compute"/>	
<b>Results:</b>	
Estimated mean displacement (cm):	32,2
Estimated mean displacement (in.):	12,7
Probability of zero displacement:	0,00

Şekil 7. Ampirik yöntemle hesaplanan şev deplasman değeri

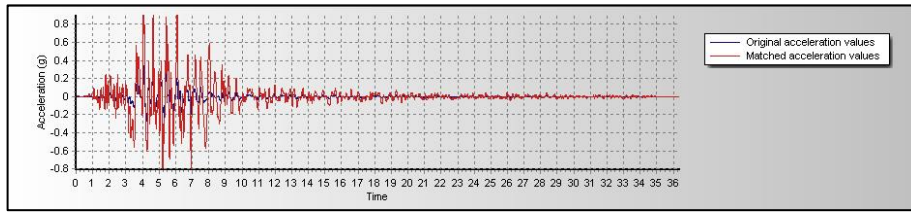


### 3.2. Nümerik Yöntemle Deplasman Analizi

Yüksek yarma şevinde sismik durumda oluşacak deplasmanın belirlenmesi için sonlu elemanlar modeli oluşturularak, The Pasific Earthquake Engineering Research Center, P.E.E.R. arşivinden seçilen deprem kaydı, bölgenin DD-1 deprem düzeyi yatay elastik tasarım spektrumuyla spektral olarak eşlenmiş ve ivme - zaman fonksiyonlu (acceleration – time history) deprem verisi modele tanımlanmıştır. Analizde kullanılan deprem kaydına ait bilgiler Tablo 2’de sunulmuştur.

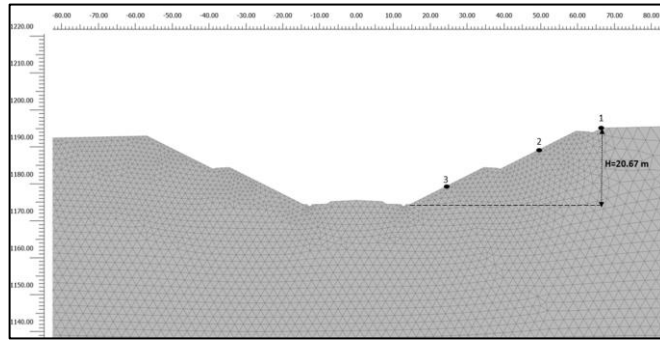
Tablo 3. Yarma kesitine ait deprem verileri

Deprem Adı	RSN	Yılı	Büyükük	İstasyon	R <sub>jb</sub> (km)	R <sub>rup</sub> (km)	Vs (m/s)
Fruli	125	1976	6.5	Tolmezzo	14.97	15.82	505

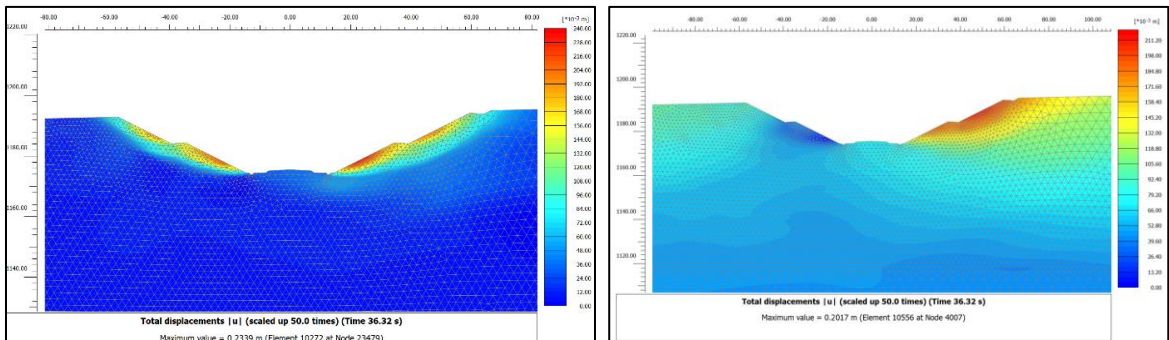


Şekil 8. Dinamik analizlerde kullanılan eşleştirilmiş ivme-zaman kaydı

2 boyutlu (2D) sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen analizlerde, sonlu elemanlar ağları 15 düğüm noktalı üçgen elemanlarla oluşturulmuştur. Maksimum deplasman değerlerinin meydana geldiği şev orta noktaları seçilerek, dinamik analizler sonucunda bu noktalarda zamana bağlı toplam deplasman değişimleri incelenmiştir.



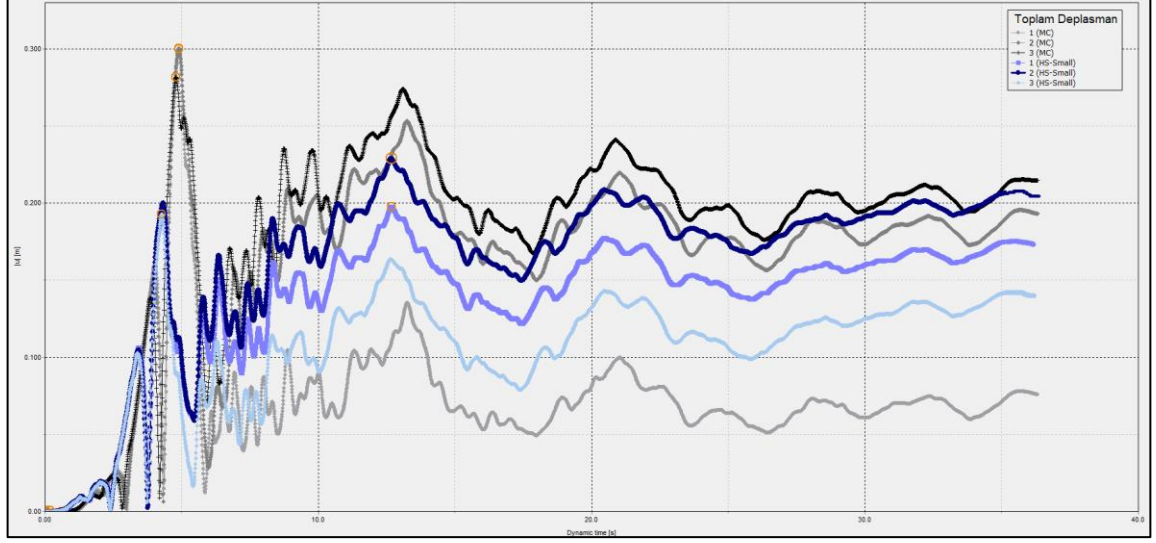
Şekil 9. Nümerik analizler için oluşturulan sonlu elemanlar modeli



Şekil 10. Dinamik analiz sonucunda şevde oluşan toplam deplasmanlar a) Mohr Coulomb malzeme modeli b) Hardening Soil Small Strain Stiffness malzeme modeli







Şekil 11. Dinamik analiz sonucunda şev üzerinde seçilen noktalarda oluşan deplasman değerlerinin zamana bağlı değişimi

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, yüksek tasarım ivmeleri altında tasarımı yapılan demiryolu yarma şevlerinin kalıcı deplasmanları, limit denge analizlerine ve sismik parametrelere bağlı ampirik yöntemler ile ivme zaman tanımlı dinamik analizlerin yapıldığı sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Limit denge yöntemine dayanan sismik durum stabilite analizleri, şartnamelerde belirtilen güvenlik sayısı değerini sağlayamadığını göstermiştir. Bu durum, mevcut tasarım yaklaşımlarının sismik etkilere karşı yetersiz kalabileceğini ortaya koymaktadır.

Sismik durumda şevde oluşan kalıcı deplasmanlar iki farklı yöntemle incelenmiştir. Ampirik yöntemlerle yapılan değerlendirmede kalıcı deplasman 32.2 cm olarak bulunmuştur. Sonlu elemanlar yöntemiyle gerçekleştirilen dinamik analizlerde Mohr Coulomb malzeme modeli kullanıldığında 23.4 cm, Hardening Soil Small Strain Stiffness malzeme modeli kullanıldığında ise 20.2 cm olarak bulunmuştur. Ampirik yöntem ile sonlu elemanlar analizleri sonucunda bulunan deplasman değerleri arasında Mohr Coulomb malzeme modelinde %37.6, Hardening Soil Small Strain Stiffness malzeme modelinde %59.4 fark olduğu görülmektedir.

"NCHRP Report-611,2008" referansında, Newmark Kayan Blok Yaklaşımı'na göre, şev deplasmanları 12 inçten (~30 cm) fazla olduğunda, şev stabil kabul edilmemektedir. Bu referansa göre, ampirik yöntem ile yapılan hesaplamalarda şev stabil olarak değerlendirilemezken, sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analizlerde bulunan deplasman değerleri şevin stabil olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir.

Bu bulgular, kalıcı deplasmanların şev tasarımında kritik bir faktör olduğunu ve limit denge yöntemlerinin yalnızca genel bir tahmin sağladığını, yapılacak kalıcı deplasman hesaplamalarına göre şev tasarımı yapılmasının önemli olduğunu ortaya koymaktadır. Yapılan çalışma kapsamında, ampirik yöntem ve sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılarak hesaplanan deplasman değerleri arasındaki farka bakıldığında, kritik öneme



sahip şevlerde meydana gelen kalıcı deformasyonların, sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan dinamik analizlerle desteklenmesi önerilmektedir.

Sonuç olarak elde edilen veriler, tasarım kriterlerinin kalıcı deplasmanları dikkate alacak şekilde optimize edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Şev tasarımında sismik durumda oluşan kalıcı deplasmanların dikkate alınması, daha güvenilir ve hassas sonuçlar elde edilmesine olanak tanıyacaktır. Bu doğrultuda, limit denge yöntemlerinin ötesine geçilerek dinamik koşulların etkilerinin ayrıntılı bir şekilde ele alınması önem arz etmektedir.

## KAYNAKLAR

- Bieniawski, Z.T., (1989), "Engineering Rock Mass Classification"
- Bray, J.D., Travasarou T. (2007), "Simplified Procedure for Estimating Earthquake-Induced Deviatoric Slope Displacements", Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering.
- Brinkgreve, R.B.J., Engin, H.K, Engin, E., (2010), "Validation of Empirical Formulas to Derive Model Parameters for Sand", 7th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering, Trondheim
- Bolton, D., Öztoprak , S., (2013), "Stiffness of Sands Through a Laboratory Test Database", Geotechnique 63 No.1, 54-70
- Bowles, J.E., (1997), "Foundation Analysis and Design (5th Edition)"
- Cheng, X., Xiao, S., Cao, A., Hou, M., (2021), "A Unified Constitutive Model for Pressure Sensitive Shear Flow Transitions in Moderate Dense Granular Materials", Scientific Reports: 11:19669
- FHWA-NHI-11-032 (2011), LRFD Seismic Analysis and Design of Transportation Geotechnical Features and Structural Foundations
- Macedo, J., Bray, J., Travasarou, T., (2017), "Simplified Procedure For Estimating Seismic Slope Displacements In Subduction Zones", 16th World Conference on Earthquake, Santiago Chile
- Makdisi, F. I., Seed, H. B., (1978), "Simplified Procedure for Estimating Dam and Embankment Earthquake-Induced Deformations", Journal of the Geotech Eng. Div., ASCE, 104.
- Murthy V.N.S, (2002), "Geotechnical Engineering Principles and Practices of soil Mechanics and Foundation Engineering"
- National Cooperative Highway Research Program, Report 611, (2008), "Seismic Analysis and Design of Retaining Walls, Buried Structures, Slopes, and Embankments"
- Newmark, N.M., (1965), "Effects of Earthquakes on Dams and Embankments", Geotechnique, 139-160.
- Pitilakis (ed.), K.D. (2007), Earthquake Geotechnical Engineering, Springer, 327-353.

## SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
$\Phi$	İçsel sürtünme açısı	c	Kohezyon
$\gamma$	Birim hacim ağırlık	E	Elastisite Modülü
$\nu$	Poisson oranı	$R_{up}$	Fay kırığına olan mesafe
$R_{jb}$	Joyner-Boore Mesafesi		

