Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği
20. Ulusal Konferansı

15-16 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

RIHTIM YAPILARINDA DEPREM SONRASI NEWMARK YÖNTEMİ İLE KALICI DEPLASMAN HESABI

POST-EARTHQUAKE PERMANENT DISPLACEMENT ANALYSIS OF QUAY STRUCTURES USING THE NEWMARK METHOD

İlbüke YALÇINKAYA[1], Tayyar İlke HAMURSUZ [2] Zeynep ÇEKİNMEZ BAYRAM[3]

ÖZET

Bu çalışmada, Hatay bölgesinde inşa edilmesi planlanan bir kıyı-liman yapısı kapsamında tasarlanan çelik çakma ve betonarme kazıklı rıhtımın şev stabilitesi değerlendirilmiştir. Stabilite analizleri limit denge yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiş, statik ve deprem koşulları altında güvenlik sayıları belirlenmiştir. Deprem analizleri, 72 yıl tekrarlanma periyoduna sahip DD-3 ve 2475 yıl tekrarlanma periyoduna sahip DD-1 deprem düzeyleri için ayrı ayrı yürütülmüştür. DD-1 deprem düzeyi altında oluşabilecek kalıcı deplasmanlar, iki farklı yaklaşım kullanılarak değerlendirilmiştir. İlk yaklaşımda, limit denge analizinden elde edilen yenilme eşdeğer deprem katsayısı (k_y) ile birlikte PGA ve PGV parametreleri kullanılarak ampirik bağıntı ile kalıcı deplasman yaklaşık 13.5 cm olarak hesaplanmıştır. İkinci yaklaşımda ise deprem uzmanı tarafından seçilen 11 adet tasarım spektrumu ile uyumlu deprem ivme kaydı, limit denge analiz programına doğrudan tanımlanarak Newmark kayan rijit blok yöntemi ile kalıcı deplasmanlar hesaplanmış ve ortalama kalıcı deplasman yaklaşık 35 cm olarak elde edilmiştir. İki yaklaşım arasındaki sonuç farkı, deprem kayıtlarının zaman tanım alanındaki özelliklerinin doğrudan dikkate alınmasının kalıcı deformasyonların değerlendirilmesindeki önemini ortaya koymaktadır. Elde edilen bulgular, kazıklı rıhtım yapılarının deprem performansının değerlendirilmesinde, ampirik deplasman tahminlerinin yanı sıra gerçek deprem ivme kayıtlarına dayalı Newmark analizlerinin kullanılmasının daha ihtiyatlı bir deformasyon değerlendirmesi sağlayabileceğini göstermektedir.
Anahtar Kelimeler: *Sismik etki, newmark metodu, stabilite, kazıklı rıhtım yapısı*

ABSTRACT

This study evaluates the slope stability of a piled quay structure consisting of driven steel and reinforced concrete piles, planned as part of a coastal port facility in the Hatay region. Stability analyses were performed using the limit equilibrium method, and factors of safety were determined under static and seismic loading conditions. Seismic analyses were conducted for DD-3 and DD-1 earthquake levels, corresponding to return periods of 72 and 2475 years, respectively. Permanent displacements under DD-1 were evaluated using two approaches. First, an empirical relationship based on the yield acceleration (k_y), obtained from the limit equilibrium analysis was used to estimate a permanent displacement of approximately 13.5 cm. Second, 11 earthquake acceleration records compatible with the design response spectrum were directly incorporated into the limit equilibrium software, and permanent displacements were calculated using the Newmark sliding rigid-block method. The average displacement obtained from the record-based Newmark analyses was approximately 35 cm. The difference between the two approaches highlights the importance of accounting for the time-domain characteristics of earthquake ground motions in estimating permanent deformations.

[1] İnşaat Yüksek Mühendisi, Yüksel Proje, iuslu@yukselproje.com.tr (Sorumlu Yazar)
[2] İnşaat Yüksek Mühendisi, Yüksel Proje, tihamursuz@yukselproje.com.tr
[2] Dr. İnşaat Yüksek Mühendisi, Yüksel Proje, zcekinmez@yukselproje.com.tr

The findings demonstrate that record-based Newmark analyses provide a more comprehensive basis for the performance-based seismic assessment and design of piled quay structures.
Keywords: *Seismic Effect, newmark sliding block method, stability, piled quay structure*

1. GİRİŞ

Kıyı ve liman yapıları, kara tarafındaki yapılardan farklı olarak, zemin koşulları, su seviyesi, dolgu geometrisi, yapısal yükler ve deprem etkilerinin birlikte değerlendirilmesini gerektiren karmaşık geoteknik sistemlerdir. Özellikle kazıklı rıhtım yapılarında, rıhtım arkasındaki zemin kütlesinin deprem sırasında göstereceği davranış ile kazıkların ve üstyapının bu hareketlere karşı göstereceği tepki birbirleriyle doğrudan ilişkilidir. Literatürde, kazıklı rıhtımların deprem performansının zemin-yapı etkileşimi, yanal yayılma, şev hareketleri ve kazıkların deformasyon talepleri ile yakından ilişkili olduğu belirtilmektedir (Shafieezadeh et al., 2012; Na et al., 2009).

Deprem etkisi altındaki şev ve zemin kütlelerinin stabilitesinin değerlendirilmesinde deprem hareketinin zamana bağlı doğasının tek bir eşdeğer ivme katsayısı ile temsil edilmesi, deprem sırasında oluşabilecek hareketlerin büyüklüğü hakkında doğrudan bilgi vermemektedir. Nitekim pseudo-statik analiz sonucunda güvenlik sayısının 1.0'ın altına geçici olarak düşmesi, yapının mutlaka göçeceği anlamına gelmediği gibi, güvenlik sayısının belirli bir seviyenin üzerinde olması da deprem sonrasında oluşabilecek kalıcı deplasmanların ihmal edilebilir olduğu anlamına gelmemektedir (Jibson, 2011). Bu noktada, deprem etkisi altında oluşabilecek kalıcı deplasmanların değerlendirilmesi performans esaslı geoteknik tasarım açısından önemli bir araç olarak öne çıkmaktadır. Newmark -tarafından geliştirilen kayan rijit blok yaklaşımında, potansiyel olarak kayan zemin kütlesi rijit bir blok olarak idealize edilmekte ve deprem ivmesinin kritik/yield ivmesini aşması durumunda blokta kalıcı hareketin başladığı kabul edilmektedir. İvme-zaman kayıtlarının kritik ivme ile karşılaştırılması ve kayma sırasında oluşan göreli hızların zamana göre integrasyonu ile deprem sonunda oluşan kümülatif kalıcı deplasman hesaplanabilmektedir. Bu yaklaşım, klasik pseudo-statik analiz ile daha karmaşık gerilme-deformasyon analizleri arasında pratik bir yöntem sunmakta ve güvenlik sayısının ötesinde deprem performansının deformasyon esaslı olarak değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır (Newmark, 1965; Jibson, 2011).

Newmark yönteminin temel avantajı, deprem kaydının zamana bağlı özelliklerini doğrudan analize dahil ederek, yalnızca "stabil/instabil" şeklinde bir değerlendirme yerine beklenen kalıcı hareketin büyüklüğü hakkında nicel bilgi sağlamasıdır. Bununla birlikte, yöntemin rijit blok varsayımı, kayma yüzeyinin tanımlanması ve kritik ivmenin belirlenmesi gibi kabullerin sonuçlar üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır. (Jibson, 2011; Rathje et al., 2014). Türkiye'nin yüksek deprem tehlikesine sahip bölgelerinde gerçekleştirilen kıyı ve liman yapılarında bu husus özellikle önem kazanmaktadır.

Bu çalışma kapsamında, Hatay bölgesinde inşa edilmesi planlanan bir kıyı-liman yapısında tasarlanan çelik çakma kazıklar ve betonarme kazıklardan oluşan kazıklı rıhtım sisteminin şev stabilitesi ve deprem etkisi altındaki performansı incelenmiştir. Çalışmanın temel amacı, rıhtım yapısının statik ve deprem etkileri altındaki stabilitesinin limit denge yöntemiyle değerlendirilmesinin yanı sıra, özellikle büyük deprem düzeyi altında oluşabilecek kalıcı deplasmanların ampirik yöntemler ve gerçek deprem ivme kayıtları kullanılarak belirlenmesidir.

Bu kapsamda DD-3 ve DD-1 deprem düzeyleri için stabilite analizleri gerçekleştirilmiş; DD-1 deprem düzeyinde Saygılı ve Rathje (2008) tarafından önerilen ampirik yöntem ile kalıcı deplasman tahmini yapılmıştır. Bununla birlikte deprem uzmanı tarafından seçilen 11 adet ivme kaydı kullanılarak Newmark kayan rijit blok yöntemi ile kalıcı deplasmanlar hesaplanmıştır.

Çalışmanın sonuçlarının, kazıklı rıhtım sistemlerinin yalnızca güvenlik sayısı üzerinden değil, deprem sonrasında oluşması beklenen kalıcı deplasmanlar açısından da değerlendirilmesine katkı sağlaması ve kıyı yapılarının performans esaslı geoteknik tasarımına yönelik uygulamalı bir yaklaşım ortaya koyması amaçlanmaktadır. Çalışma konusu rıhtım yapısı, Hatay bölgesinde yer almakta olup kıyı boyunca oluşturulan dolgu ve zemin kütlesinin deniz tarafında desteklenmesini sağlayan kazıklı bir taşıyıcı sistemden oluşmaktadır. Yapısal sistem kapsamında çelik çakma kazıklar ile betonarme kazıklar kullanılmıştır. Rıhtım arkasındaki dolgu ve doğal zemin tabakalarının oluşturduğu potansiyel kayma kütlesinin deprem sırasında harekete geçmesi, rıhtım sisteminin bütünsel performansını doğrudan etkileyebilmektedir.

Bu çalışmada stabilite problemi rıhtım yapısını ve arkasındaki zemin kütlesini içerecek şekilde tanımlanan kritik kayma yüzeyleri üzerinden ele alınmıştır. Statik durumda mevcut zemin ve yapı yükleri altında stabilite koşulları incelenirken, deprem durumunda zemin kütlesine etkiyen sismik kuvvetlerin global stabilite üzerindeki etkisi ayrıca değerlendirilmiştir.

Kazıklı rıhtımların deprem davranışında zemin deformasyonlarının önemli bir rol oynadığı daha önceki çalışmalarda da ortaya konmuştur. Özellikle büyük deprem hareketleri altında oluşan zemin deformasyonlarının kazıklarda önemli ilave iç kuvvetler oluşturabileceği ve kazık davranışının yalnızca yapıya etkiyen atalet kuvvetleri üzerinden değerlendirilmesinin yeterli olmayabileceği belirtilmektedir (Shafieezadeh et al., 2012; Takahashi et al., 2023). Bu nedenle mevcut çalışmada rıhtım sisteminin deprem performansının değerlendirilmesinde, stabilite koşullarının yanı sıra potansiyel kayma kütlesinin oluşturabileceği kalıcı deplasmanlar da dikkate alınmıştır.

2. ANALİZ YÖNTEMİ

2.1. Limit Denge Yöntemi ile Stabilite Analizleri

Rıhtım kesitlerinin stabilite analizleri Rocscience Slide2 programı ile "GLE/Morgenstern-Price Metodu" kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Limit denge yaklaşımında, potansiyel kayma yüzeyi boyunca hareket etmesi muhtemel zemin kütlesinin denge koşulları incelenerek güvenlik sayısı hesaplanmaktadır. Analizlerde öncelikle rıhtım sisteminin mevcut yükleme koşulları altındaki statik stabilitesi değerlendirilmiştir. Ardından deprem etkisi, eşdeğer yatay sismik kuvvet yaklaşımı ile sisteme dahil edilerek farklı deprem düzeyleri için güvenlik sayıları belirlenmiştir. Böylece deprem etkisinin rıhtım kesitinin genel stabilitesi üzerindeki etkisi ortaya konmuştur. Statik durum analizlerinde uzun dönem (drenajlı) kayma mukavemeti parametreleri, deprem analizlerinde ise kısa dönem (drenajsız) kayma mukavemeti parametreleri kullanılmıştır.

Türkiye Kıyı ve Liman Yapıları Deprem Yönetmeliği'nde (2020) tanımlanan Performansa Göre Değerlendirme ve Tasarım İlkeleri doğrultusunda hesaplar iki aşamada yapılmıştır.

Birinci aşamada, yönetmelikte kazıklı rıhtımlar için verilen deprem etkisi altında hesap ve değerlendirme yöntemlerinden (KLÖS=2 ve DD-3 için) Yöntem-1'e göre doğrusal hesap (dayanıma göre değerlendirme) yapılmıştır. İkinci aşamada ise DD-1 deprem düzeyi (T_r=2475 yıl) için Yöntem-2.2'ye göre doğrusal olmayan hesaplar (şekil değiştirmeye göre değerlendirme) yapılacaktır. DD-3 deprem düzeyi (T_r=72 yıl) için Türkiye Kıyı ve Liman Yapıları Deprem Yönetmeliği'nde (2020) statik-eşdeğer yöntemle yapılacak deprem hesaplarında kullanılacak yatay statik-eşdeğer deprem katsayısı k_h=0.267xS_{DS} olarak tanımlanmıştır. Düşey statik-eşdeğer deprem katsayısı ise k_v=0.5k_h olarak alınmıştır. Yapılan analizlerde S_{DS}=0.78 için k_h=0.208 ve k_v=0.104 olarak alınmıştır.

DD-1 deprem düzeyinde (Tr=2475 yıl) gelişebilecek kalıcı yer değiştirmeler SLIDE programında Newmark kayan rijit blok analizi yöntemi ile hesaplanmıştır. Yer değiştirmeler kullanılan deprem kayıtlarındaki yer ivmesi k_y (limit değer güvenlik sayısını sağlayan yanal ivme katsayısı) değerini aştığı zaman oluşmakta ve deprem esnasında oluşan bu yer değiştirmeler birbirine eklenerek toplam kalıcı deplasmanı oluşturmaktadır.

Deprem uzmanı tarafından iletilen ZD zemin sınıfı ile uyumlu 11 adet deprem kaydı kullanılarak analizler yapılmış ve elde edilen kalıcı deplasmanlar Türkiye Kıyı ve Liman Yapıları Deprem Yönetmeliği'nde (2020) KLÖS=2 önem sınıfındaki kazıklı rıhtım yapıları için verilen "Göçmenin Önlenmesi Performans Düzeyi" (GÖ) hedefi ile karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçlarında elde edilen güvenlik sayıları, rıhtım kesitinin ilgili deprem düzeylerindeki stabilite koşullarının değerlendirilmesinde kullanılmıştır.

2.2. Ampirik Yaklaşımlarla Kalıcı Deplasman Tahmini

Limit denge analizinden elde edilen yenilme eşdeğer deprem katsayısı (k_y) kullanılarak, deprem etkisi altında oluşabilecek kalıcı deplasmanların bağıntı ile tahmini de gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda Saygılı ve Rathje (2008) tarafından önerilen PGA ve PGV tabanlı ampirik bağıntı kullanılmıştır. Bu bağıntı Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı tarafından hazırlanan "Türkiye Karayolları ve Demiryolları Tünelleri ile Diğer Zemin Yapıları Deprem Yönetmeliği", 6 Ekim 2020 tarih ve 31266 (Mükerrer) sayılı Resmî Gazete ile yayınlanmış ve yayım tarihinden 1 yıl sonra yürürlüğe girmiştir. İlgili yönetmeliğin Ek – 2 Geoteknik Konular Raporu Bölüm 2.5.1 'Rijit Blok Analizi Ampirik Yaklaşımları' kısmında belirtilmiştir. Söz konusu bağıntı, rijit blok varsayımına dayalı Newmark deplasman analizlerinden elde edilen sonuçlar kullanılarak geliştirilmiş olup, yer hareketinin PGA ve PGV parametrelerini birlikte dikkate almaktadır (Saygılı ve Rathje, 2008).

2.3. Newmark Kayan Rijit Blok Analizi

Limit denge analizleri ile elde edilen güvenlik sayıları, deprem etkisi altında sistemin stabilite durumuna ilişkin önemli bir gösterge olmakla birlikte, deprem sırasında ve sonrasında meydana gelebilecek kalıcı deplasmanın büyüklüğü hakkında doğrudan bilgi sağlamamaktadır. Bu nedenle çalışmanın ikinci aşamasında, DD-1 deprem düzeyi için kalıcı deplasman analizi gerçekleştirilmiştir.

Kalıcı deplasman hesaplarında Newmark kayan rijit blok yöntemi kullanılmıştır. Yöntemin temelinde, potansiyel kayma kütlesinin rijit bir blok olarak kabul edilmesi ve blok hareketinin kritik/yield ivmesi ile deprem ivme-zaman kayıtları arasındaki ilişki üzerinden belirlenmesi bulunmaktadır.

Deprem ivmesinin kritik ivmeyi aştığı zaman aralıklarında blokta kayma hareketi meydana geldiği kabul edilmekte ve bu hareketin zamana bağlı olarak integrasyonu sonucunda toplam kalıcı deplasman elde edilmektedir (Newmark, 1965; Jibson, 2011).

Bu çalışmada DD-1 deprem düzeyini temsil etmek üzere deprem uzmanı tarafından seçilen 11 adet deprem ivme kaydı kullanılmıştır. Her bir ivme kaydı limit denge analiz programına tanımlanarak ilgili kayma mekanizması için Newmark analizi gerçekleştirilmiştir.

Böylece tek bir deprem kaydına bağlı kalmadan, farklı yer hareketlerinin rıhtım kesitinin beklenen kalıcı deplasmanı üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir.

Çoklu deprem kayıtlarının kullanılması, tek bir ivme kaydından elde edilen sonucun genellenebilirliği açısından önem taşımaktadır.

Deprem ivme kayıtlarının frekans içeriği, süreleri, maksimum ivmeleri ve zamana bağlı özellikleri farklı olduğundan, aynı kritik ivme değeri için hesaplanan kalıcı deplasmanlar da kayıtlar arasında önemli farklılıklar gösterebilmektedir. Bu nedenle farklı yer hareketlerinin birlikte değerlendirilmesi, performans esaslı deplasman değerlendirmesinin daha kapsamlı şekilde yapılmasına olanak sağlamaktadır.

Newmark yaklaşımının temel avantajı, klasik pseudo-statik analizden farklı olarak deprem hareketinin zamana bağlı karakterini doğrudan dikkate almasıdır. Bununla birlikte, yöntem potansiyel kayma kütlesinin rijit blok olarak hareket ettiği ve kayma yüzeyi boyunca direnç koşullarının analiz süresince uygun şekilde temsil edilebildiği varsayımına dayanmaktadır. Bu nedenle elde edilen kalıcı deplasmanların, kullanılan zemin parametreleri, kritik kayma yüzeyi ve buna bağlı kritik ivme değeri ile birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir (Jibson, 2011; Rathje et al., 2014).

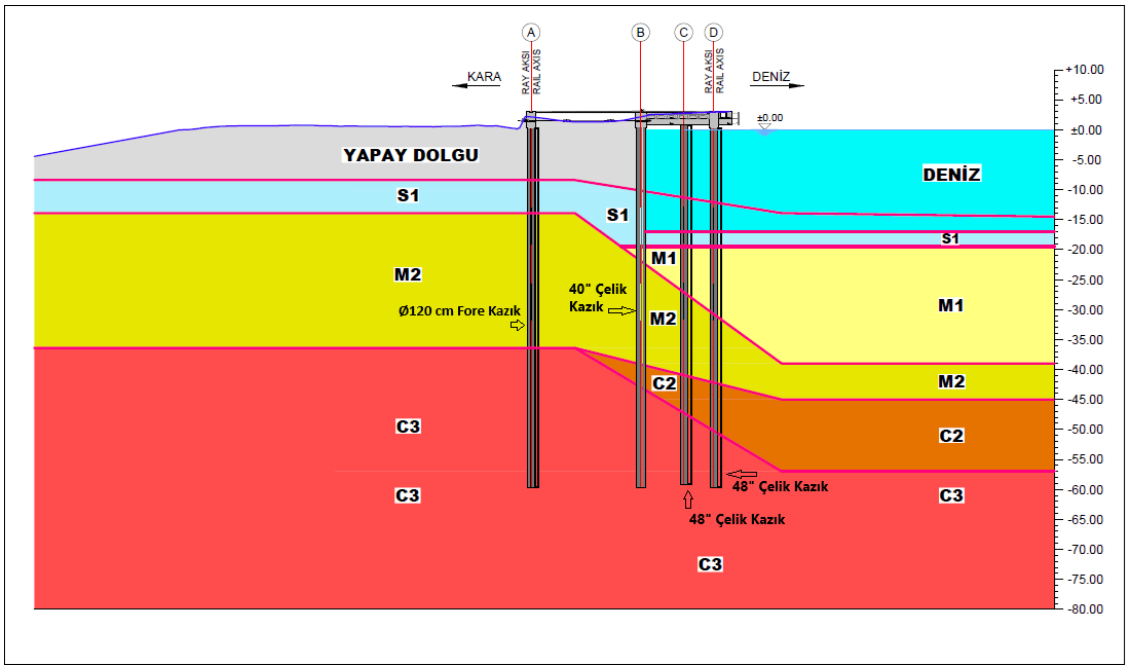
2.4. Performans Esaslı Değerlendirme Yaklaşımı

Bir yapının deprem sırasında klasik anlamda bir göçme mekanizmasına ulaşmaması, deprem sonrasında kullanımını etkileyebilecek düzeyde kalıcı deformasyonların meydana gelmeyeceği anlamına gelmemektedir. Nitekim geçmiş depremler sonrasında kazıklı rıhtım yapılarında önemli kalıcı deformasyonlar ve kazık hasarları gözlenmiş; bu durum kıyı yapılarının deprem performansının yalnızca dayanım kriterleri üzerinden değil, deformasyon ve kullanım performansı açısından da değerlendirilmesi gerektiğini göstermiştir (Shafieezadeh et al., 2012; Na et al., 2009).

Bu kapsamda, gerçekleştirilen analizlerden elde edilen güvenlik sayıları ve Newmark yöntemiyle hesaplanan kalıcı deplasmanlar birlikte değerlendirilerek rıhtım sisteminin deprem performansı ortaya konmuştur. Analiz sonuçları bir sonraki bölümde sunulmakta ve farklı deprem düzeyleri ile deprem kayıtları altında elde edilen davranışlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmektedir.

3. ANALİZ GİRDİLERİ

Analizlerde kullanılan idealize zemin profili ve parametreler Tablo 1.'de sunulmaktadır. C2 ve C3 birimleri kil, M1 ve M2 birimleri silt ve S1 birimi kum birimlerini temsil etmektedir. Rıhtım bölgesinde kıyı tarafında 40'' çapında bir aks boyunca çelik çakma kazık, bu sıranın önünde ise iki aks boyunca 48" çelik çakma kazık bulunmaktadır. İlave olarak yapay dolgu içerisinde ise Ø120 cm fore kazık bulunmaktadır.



Şekil 1. Rıhtım kesiti idealize zemin profili

Tablo 1. Geoteknik Parametreler

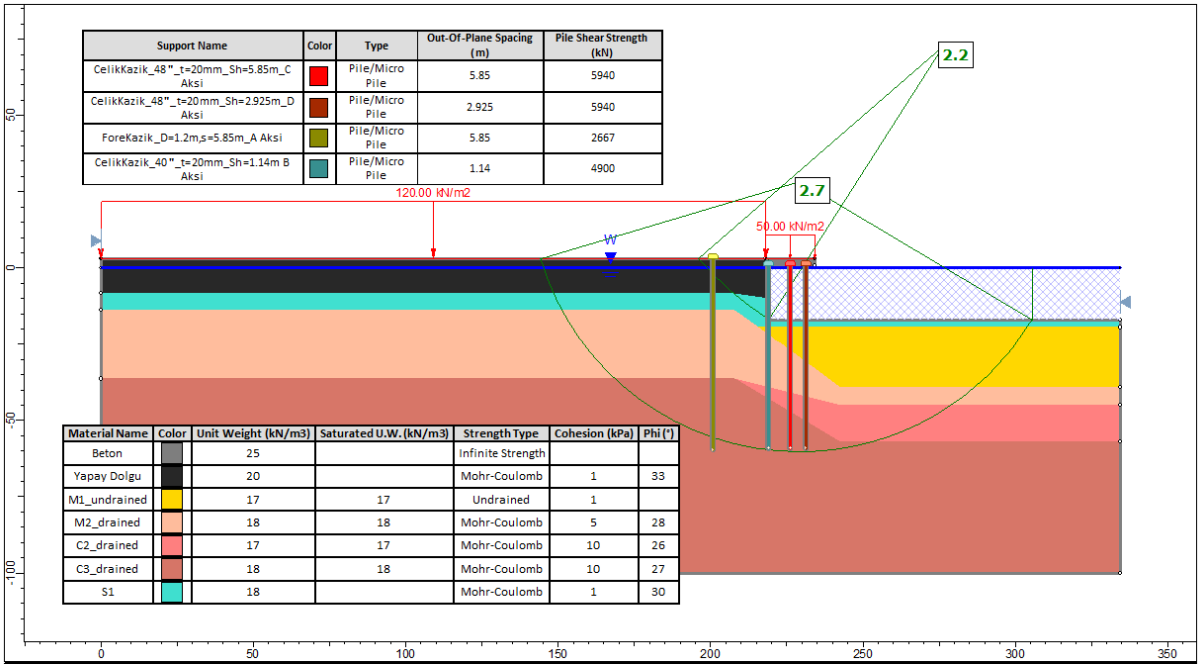
Birim	γ_{sat} (kN/m^3)	c_u (kPa)	c' (kPa)	φ' (°)	E_s (MPa)
C2	17	75	10	26	18
C3	18	150	10	27	35
M1	17	c_u=0.2σ'	-	-	40 σ'$_{v0}$ [kPa]
M2	18	60	5	28	12
C2	17	75	10	26	18
C3	18	150	10	27	35
S1	18	-	1	30	4

Dolgu ve rıhtım alanı için sürşarj yükleri kritik durumu yansıtmak adına rıhtım arkasındaki alanda 120 kPa olarak alınmıştır. Deprem durumunda yükler Türkiye Kıyı ve Liman Yapıları Deprem Yönetmeliği (2020) Bölüm 4.2.2'ye göre yarıya indirilerek 60 kPa olarak alınmıştır.

4. ANALİZ SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

4.1. Statik Durum Analiz Sonuçları

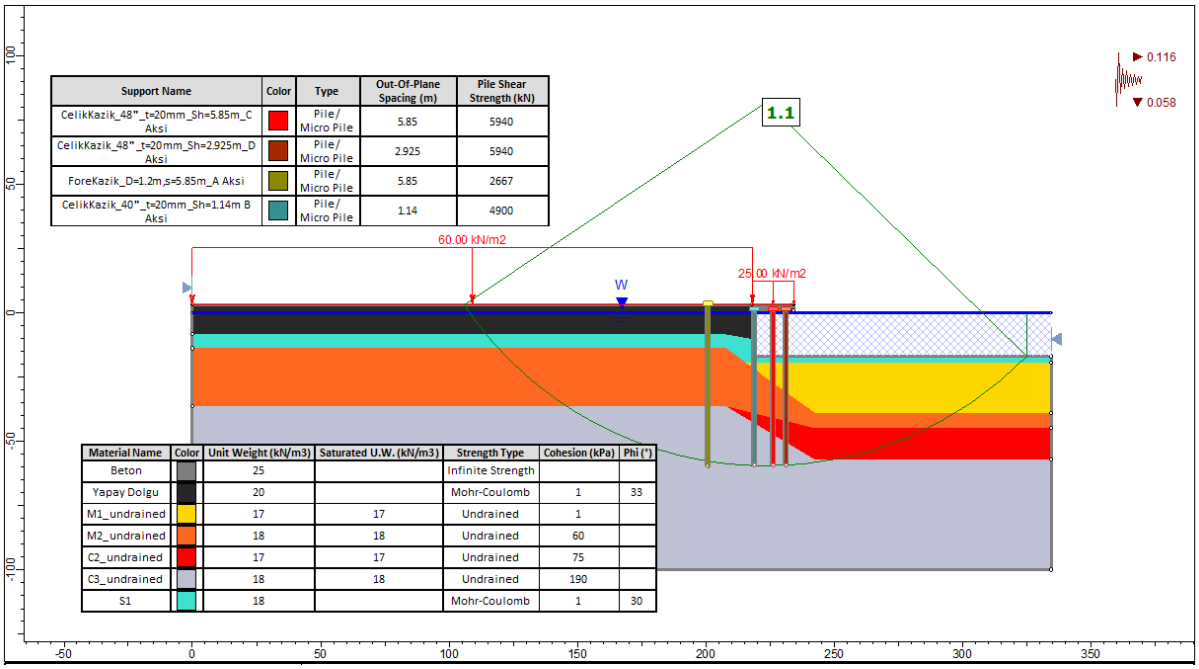
Kritik kesitte gerçekleştirilen statik durum stabilite analiz sonuçları Şekil 2'de sunulmuştur. Yapılan analiz sonuçlarından da görüleceği üzere statik durum güvenlik sayısı (F.S.>1.5) aranan limitin üzerinde olup, herhangi bir stabilite problemi beklenmemektedir.



Şekil 2. Statik durum stabilite analiz sonucu

4.2. DD-3 Deprem Durumu Stabilite Analizleri

DD-3 deprem durumu için gerçekleştirilen stabilite analiz sonuçları Şekil 3'te sunulmuştur. Yapılan analiz sonuçlarından da görüleceği üzere güvenlik sayısı (F.S.>1.1) aranan limite eşit olup, herhangi bir stabilite problemi beklenmemektedir.



Şekil 3. DD-3 deprem durumu stabilite analiz sonucu

4.3. DD-1 Deprem Durumu Stabilite Analizleri ve k_y Analizi

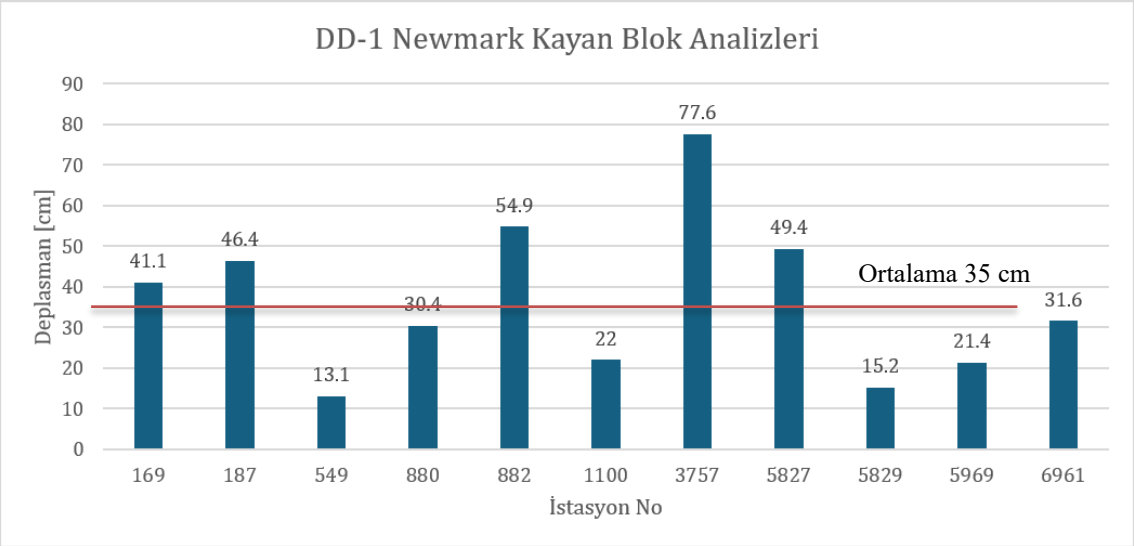
Deprem uzmanı tarafından seçilen 2475 yıllık ortalama yinelenme periyoduna tekabül eden tasarım spektrumu uyuşumlu yer hareketi kayıtları (DD-1, V_{S30} =360 m/s) Tablo 2.'de sunulmuştur.

Tablo 2. Seçilen deprem kayıtları

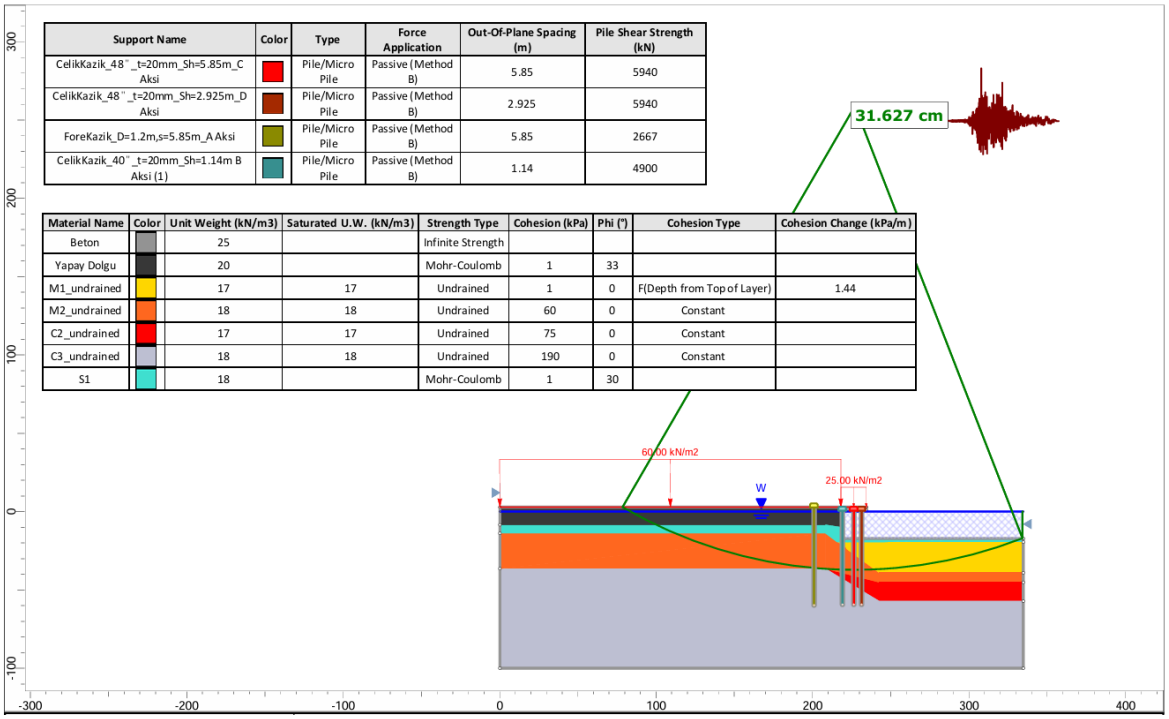
RSN	Deprem	Yıl	İstasyon	Magnitüd
169	"Imperial Valley-06"	1979	"Delta"	6.53
187	"Imperial Valley-06"	1979	"Parachute Test Site"	6.53
549	"Chalfant Valley-02"	1986	"Bishop - LADWP South St"	6.19
880	"Landers"	1992	"Mission Creek Fault"	7.28
882	"Landers"	1992	"North Palm Springs"	7.28
1100	"Kobe_ Japan"	1995	"Abeno"	6.90
3757	"Landers"	1992	"North Palm Springs Fire Sta #36"	7.28
5827	"El Mayor-Cucapah_ Mexico"	2010	"MICHOACAN DE OCAMPO"	7.20
5829	"El Mayor-Cucapah_ Mexico"	2010	"RIITO"	7.20
5969	"El Mayor-Cucapah_ Mexico"	2010	"Bonds Corner"	7.20
6961	"Darfield_ New Zealand"	2010	"RKAC"	7.00

DD-1 deprem durumu için deprem uzmanı tarafından iletilen ZD zemin sınıfı ile uyumlu 11 adet deprem kaydı kullanılarak Newmark kayan blok analiz yöntemine göre analizler yapılmış ve kalıcı deplasmanlar hesaplanmıştır.

Gerçekleştirilen analiz sonuçları Şekil 4'te sunulmuştur. Buna göre Newmark analiz sonuçlarının ortalaması yaklaşık 35 cm'dir. Ortalamaya en yakın sonucu yansıtan kayda ait analiz sonucu ise Şekil 5'te sunulmuştur.



Şekil 4. DD-1 deprem durumu Newmark kalıcı deplasman analizi sonuçları



Support Name	Color	Type	Force Application	Out-Of-Plane Spacing (m)	Pile Shear Strength (kN)
CelikKazik_48"_t=20mm_Sh=5.85m_C Aksi		Pile/Micro Pile	Passive (Method B)	5.85	5940
CelikKazik_48"_t=20mm_Sh=2.925m_D Aksi		Pile/Micro Pile	Passive (Method B)	2.925	5940
ForeKazik_D=1.2m,s=5.85m_A Aksi		Pile/Micro Pile	Passive (Method B)	5.85	2667
CelikKazik_40"_t=20mm_Sh=1.14m B Aksi (1)		Pile/Micro Pile	Passive (Method B)	1.14	4900

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m3)	Saturated U.W. (kN/m3)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (°)	Cohesion Type	Cohesion Change (kPa/m)
Beton		25		Infinite Strength				
Yapay Dolgu		20		Mohr-Coulomb	1	33		
M1_undrained		17	17	Undrained	1	0	F(Depth from Top of Layer)	1.44
M2_undrained		18	18	Undrained	60	0	Constant	
C2_undrained		17	17	Undrained	75	0	Constant	
C3_undrained		18	18	Undrained	190	0	Constant	
S1		18		Mohr-Coulomb	1	30		

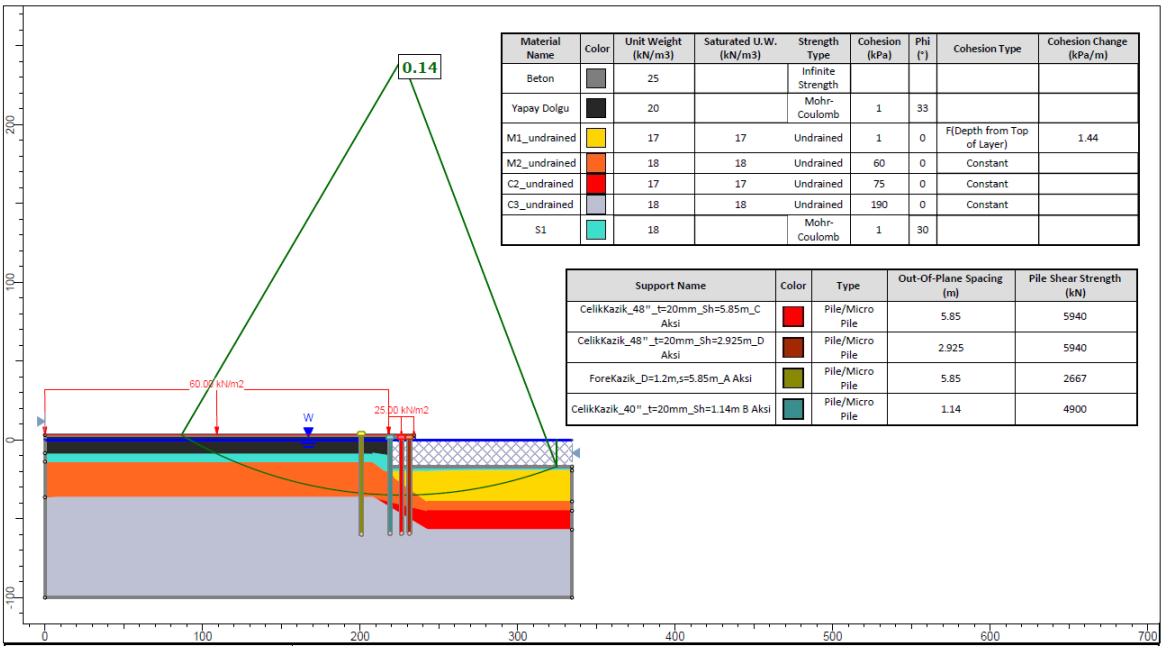
Şekil 5. 6961 nolu deprem kaydına ait Newmark kalıcı deplasman analizi sonuçları

Türkiye Kıyı ve Liman Yapıları Deprem Yönetmeliği'nde (2020), KLÖS=2 önem sınıfında yer alan kazıklı rıhtım yapıları için "Göçmenin Önlenmesi Performans Düzeyi" (GÖ) kapsamında kabul edilebilir kalıcı şev yer değiştirmesi 50 cm olarak tanımlanmaktadır. Gerçekleştirilen Newmark analizleri sonucunda elde edilen kalıcı deplasmanların tamamının bu sınır değerin altında kaldığı görülmüştür.

Buna göre, DD-1 deprem düzeyi altında hesaplanan kalıcı deplasmanlar, yönetmelikte GÖ performans düzeyi için tanımlanan kabul edilebilir sınır içerisinde kalmaktadır.

4.4. Limit Denge Analizinden k_y Değerinin Belirlenmesi

DD-1 deprem düzeyinde kalıcı deplasmanların değerlendirilmesi kapsamında limit denge analizinden elde edilen k_y değeri 0.14 olarak belirlenmiştir. Slide2 programında gerçekleştirilen analiz sonucunda elde edilen k_y değeri Şekil 6'da sunulmaktadır.



Material Name	Color	Unit Weight (kN/m3)	Saturated U.W. (kN/m3)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (°)	Cohesion Type	Cohesion Change (kPa/m)
Beton		25		Infinite Strength				
Yapay Dolgu		20		Mohr-Coulomb	1	33		
M1_undrained		17	17	Undrained	1	0	F(Depth from Top of Layer)	1.44
M2_undrained		18	18	Undrained	60	0	Constant	
C2_undrained		17	17	Undrained	75	0	Constant	
C3_undrained		18	18	Undrained	190	0	Constant	
S1		18		Mohr-Coulomb	1	30		

Support Name	Color	Type	Out-Of-Plane Spacing (m)	Pile Shear Strength (kN)
CelikKazik_48"_t=20mm_Sh=5.85m_C Aksi		Pile/Micro Pile	5.85	5940
CelikKazik_48"_t=20mm_Sh=2.925m_D Aksi		Pile/Micro Pile	2.925	5940
ForeKazik_D=1.2m,s=5.85m_A Aksi		Pile/Micro Pile	5.85	2667
CelikKazik_40"_t=20mm_Sh=1.14m B Aksi		Pile/Micro Pile	1.14	4900

Şekil 6. k_y değerinin belirlenmesine ilişkin limit denge analizi sonucu

4.5. Ampirik ve Kayıt Bazlı Newmark Deplasmanlarının Karşılaştırılması

Ampirik yaklaşımda (k_y) parametresi kullanılarak hesaplanan kalıcı deplasman yaklaşık 13.5 cm olarak elde edilmiştir. Bu değer, doğrudan deprem ivme kayıtlarının kullanıldığı Newmark analizinden elde edilen deplasmanlarla karşılaştırılmıştır.

Bu yaklaşım üzerinden hesaplanan kalıcı deplasman yaklaşık 13.5 cm iken, DD-1 deprem düzeyini temsil eden 11 adet deprem kaydının Slide2 programında "Newmark Displacements" analizi kapsamında doğrudan kullanılmasıyla elde edilen ortalama kalıcı deplasman yaklaşık 35 cm'dir.

İki yaklaşım arasındaki fark, ampirik bağıntının yer hareketini PGA ve PGV gibi özet parametreler üzerinden temsil etmesine karşılık, kayıt bazlı Newmark analizinin deprem ivme-zaman geçmişini doğrudan dikkate alması ile ilişkilendirilebilir. Bu nedenle kayıt bazlı yaklaşım, yer hareketinin süre, genlik ve zamana bağlı karakteristiklerini doğrudan hesaba katarak rıhtım kesitinin deprem sonrası deformasyon talebinin daha kapsamlı ve ihtiyatlı biçimde değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

Bu karşılaştırma, performans esaslı değerlendirmede yalnızca ampirik deplasman tahminlerine bağlı kalmak yerine, tasarım spektrumu ile uyumlu gerçek deprem kayıtlarının doğrudan Newmark analizine dahil edilmesinin önemini ortaya koymaktadır.

5. SONUÇLAR

Gerçekleştirilen limit denge analizleri sonucunda, rıhtım kesitinin statik durumda F.S. > 1,50, DD-3 deprem düzeyinde ise F.S. ≈ 1,10 güvenlik sayıları ile global stabilite kriterlerini sağladığı belirlenmiştir.

DD-1 deprem düzeyinde, limit denge analizinden elde edilen $\boldsymbol{k_y}$değeri kullanılarak Saygılı ve Rathje (2008) ampirik bağıntısı ile yaklaşık 13.5 cm kalıcı deplasman hesaplanmıştır. Aynı deprem düzeyi için seçilen 11 adet yer hareketi kaydının Slide2 programında Newmark Displacements analizi kapsamında doğrudan kullanılmasıyla ise ortalama kalıcı deplasman yaklaşık 35 cm olarak elde edilmiştir. Bu değer, Türkiye Kıyı ve Liman Yapıları Deprem Yönetmeliği'nde (2020) KLÖS=2 önem sınıfındaki kazıklı rıhtımlar için GÖ performans düzeyinde tanımlanan 50 cm kabul edilebilir kalıcı şev yer değiştirmesi sınırının altında kalmaktadır.

İki yaklaşım arasındaki belirgin fark, deprem ivme kayıtlarının zaman tanım alanındaki özelliklerinin doğrudan dikkate alınmasının kalıcı deformasyon talebinin değerlendirilmesindeki önemini ortaya koymaktadır. Bu kapsamda, seçilmiş deprem kayıtlarının doğrudan Newmark analizine dahil edilmesi, ampirik bağıntıya kıyasla daha yüksek kalıcı deplasman talebinin belirlenmesine ve rıhtım yapısının performans esaslı sismik değerlendirmesinin daha kapsamlı şekilde gerçekleştirilmesine olanak sağlamıştır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Yüksel Proje'nin mevcut projelerinden biridir; bahsi geçen verilerin bildiri kapsamında kullanılmasına destek sağladığı için Yüksel Proje'ye teşekkür ediyoruz.

KAYNAKLAR

Jibson, R.W., 2011. Methods for assessing the stability of slopes during earthquakes—A retrospective. *Engineering Geology*, 122(1–2), 43–50. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.09.017

Na, U.J., Chaudhuri, S.R. and Shinozuka, M., 2009. Performance evaluation of pile-supported wharf under seismic loading. *TCLEE 2009: Lifeline Earthquake Engineering in a Multihazard Environment*. ASCE. https://doi.org/10.1061/41050(357)98

Newmark, N.M., 1965. Effects of earthquakes on dams and embankments. *Geotechnique*, 15(2), 139–160. https://doi.org/10.1680/geot.1965.15.2.139

Rathje, E.M., Antonakakis, E.I., and Boulanger, R.W., 2014. Effects of directionality and vertical component of ground motions on seismic slope displacements in Newmark sliding-block analysis. *Engineering Geology*, 175, 56–68.

Shafieezadeh, A., DesRoches, R., Rix, G.J. and Werner, S.D., 2012. Seismic performance of pile-supported wharf structures considering soil-structure interaction in liquefied soil. *Earthquake Spectra*, 28(2), 729–757. https://doi.org/10.1193/1.4000008

Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, 2020. Türkiye Kıyı ve Liman Yapıları Deprem Yönetmeliği. Resmî Gazete, 6 Ekim 2020, Sayı: 31266, Ankara.

Saygılı, G. ve Rathje, E.M., 2008. Empirical Predictive Models for Earthquake-Induced Sliding Displacements of Slopes. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 134(6), 790–803. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:6(790)

Türkiye Karayolları ve Demiryolları Tünelleri ile Diğer Zemin Yapıları Deprem Yönetmeliği, Ek-2, Geoteknik Konular Raporu (Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, 2020)

Takahashi, H., et al., 2023. Seismic performance assessment of pile-supported wharfs: 2D frame analysis method considering both inertial and kinematic forces. *Applied Sciences*, 13(6), 3629. https://doi.org/10.3390/app13063629

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
γ_{sat}	Doygun birim hacim ağırlık	c_u	Drenajsız kayma mukavemeti / kohezyon
c'	Efektif kohezyon	φ'	Efektif içsel sürtünme açısı
E_s	Elastisite modülü	σ'	Efektif gerilme
σ'_{v0}	Düşey efektif gerilme	k_h	Yatay statik-eşdeğer deprem katsayısı
k_v	Düşey statik-eşdeğer deprem katsayısı	S_{DS}	Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı
F.S.	Güvenlik sayısı	T_r	Tekrarlama periyodu
k_y	Yenilme eşdeğer deprem katsayısı		