Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği
20. Ulusal Konferansı

15-16 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

KIYI YAPILARININ YAKIN VE UZAK FAY DEPREMLERİ ALTINDAKİ ZEMİN-KAZIK-YAPI ETKİLEŞİMİ

SOIL-PILE-STRUCTURE INTERACTION OF COASTAL STRUCTURES UNDER NEAR AND FAR FAULT EARTHQUAKES

Aleyna ÜSTÜN CAN[1], Cenk ALHAN[2]

ÖZET

Kıyı yapıları ulaştırma altyapısının en önemli parçalarından biri olup ülke güvenliğinin ve ekonomik çıkarların korunması için meydana gelebilecek büyük depremler sonrasında da hizmet vermesi gereken yapılardır. Depremin gerçekleştiği bir bölgeye yapılacak yardımların ulaştırılabilmesi ve gerektiğinde tahliyelerin yapılabilmesi için yine bu kıyı yapılarına ihtiyaç duyulmaktadır. Dolayısıyla, kıyı yapılarının deprem güvenilirliklerinin sıradan yapılardan çok daha fazla olması gerekmektedir. Türkiye'de Deprem Etkisi Altında Kıyı ve Liman Yapıları Tasarımı İçin Esaslar yönetmeliği 2020 yılında yürürlüğe girmiş olup kritik kullanım özelliğine sahip ve yüksek depremselliği olan bölgelerde bulunan yapıların deprem davranışlarının zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz yöntemi ile belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, örnek bir kazıklı iskele yapısının tabliye, kazık ve zemin ortamının birlikte modellendiği ortak sistem dinamik modelleme adımları uygulamalı olarak ortaya konmuştur. Hazırlanan ortak sistem modeli üzerinde farklı fay mesafelerine sahip iki farklı deprem kaydı kullanılarak zaman tanım alanında gerçekleştirilen doğrusal olmayan analizler neticesinde, iskele yapısının yakın ve uzak fay deprem davranışları incelenmiştir.
Anahtar Kelimeler: *kazık-zemin-yapı etkileşimi, doğrusal olmayan zaman tanım alanında analiz, iskele yapısı, deprem davranışı*

ABSTRACT

Coastal structures are among the most critical components of transportation infrastructure and must remain operational even after major earthquakes to protect national security and economic interests. These coastal structures are also needed to deliver aid to the region where the earthquake occurred and to carry out evacuations when necessary. Therefore, their seismic reliability must be much higher than that of ordinary structures. In Türkiye, the Principles for the Design of Coastal and Port Structures Under Earthquake Effects regulation took effect in 2020. According to this regulation, the seismic response of structures with critical use characteristics located in high-seismicity areas must be determined using nonlinear time-history analysis. In this study, the dynamic modeling steps of an integrated system where the deck, piles, and soil medium of a sample pile-supported pier structure are modeled together are presented in a practical manner. As a result of nonlinear time-history analyses performed on the prepared integrated system model using two different earthquake records with varying fault distances, the near-fault and far-fault seismic behaviors of the pier structure were investigated.
Keywords: *pile-soil-structure interaction, nonlinear time history analysis, pier structure, earthquake behavior*

[1] İnşaat Mühendisi - Y. Lisans Öğrencisi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, aleynaustun@ogr.iuc.edu.tr (sorumlu yazar)
[2] Prof. Dr., İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, cenkalhan@iuc.edu.tr

1. GİRİŞ

Kıyı ve liman yapıları, ulaştırma altyapısının temel taşlarından biri olarak ülkenin ekonomik ve güvenlik çıkarlarını doğrudan etkilediğinden büyük sismik sarsıntılardan sonra bile hizmete devam edebilecek şekilde tasarlanmaları gerekmektedir. Afet anlarında arama-kurtarma ve insani yardım faaliyetlerinin deniz yoluyla bölgeye ulaştırılması ile tahliye süreçlerinin yönetilmesi bu yapıların ayakta kalmasıyla mümkündür. Dolayısıyla, sismik risk altındaki kıyı yapılarının deprem dirençlerinin sıradan mühendislik yapılarına göre çok daha üst düzeyde tutulması bir zorunluluktur. Ulusal ve uluslararası birçok kuruluş, deniz yapılarının tasarlanmasına yönelik yönetmelik ve standartlar yayınlanmıştır. Türkiye Kıyı ve Liman Yapıları Deprem Yönetmeliği (TKLYDY, 2020), Dalgakıran Tasarımı, Liman Mühendisliği ve Gemi Manevraları İçin Kılavuzlar (PIANC, 2001) ve Rıhtım ve İskelelerin Sismik Tasarımı (ASCE 61-14, 2014) standartlardan bazıları olarak örnek verilebilir. BS 6349-2:2010 (Maritime Works), rıhtım duvarları, iskeleler ve dolfenlerin tasarımı için temel uygulama kurallarını belirleyen kapsamlı bir standart dokümandır.

TKLYDY-2020, Türkiye'de yayımlanan deniz yapılarının sismik analiz ve tasarımı için ikinci performans temelli tasarım yönetmeliğidir (Gülenç, 2024). Farklı öneme sahip yapılar farklı deprem seviyelerine göre tasarlanmakta olup TKLYDY-2020 kapsamında 4 adet deprem düzeyi belirlenmiştir. DD-1, tekrarlanma periyodunun 2475 yıl olduğu çok seyrek deprem yer hareketidir. DD-2 ise, tekrarlanma periyodunun 475 yıl olduğu seyrek deprem yer hareketi olup Deprem Tasarım Sınıflarının tanımlanması için kullanılır. DD-2a, tekrarlanma periyodunun 144 yıl olduğu sıkça deprem yer hareketi iken, DD-3, tekrarlanma periyodunun 72 yıl olduğu sık deprem yer hareketidir. Tasarım iki aşamada gerçekleştirilmekte olup ilk aşamada eşdeğer statik hesap yöntemi ile dayanıma göre tasarım (Yöntem 1) gerçekleştirilmektedir. İkinci aşama deprem hesaplarında ise doğrusal olmayan hesap yöntemleri/şekil değiştirmeye göre tasarım esasları dikkate alınarak performans değerlendirmesi gerçekleştirilmekte ve belirlenen bir performans hedefinin yakalanması gözetilmektedir.

İkinci tasarım aşamasında şekil değiştirmeye göre değerlendirmenin gerçekleştirilmesinde üç farklı hesaplama yöntemi tarif edilmiştir. Karma yöntem olarak da adlandırılan Yöntem 2.1'de eşit yer değiştirme kuralı esas alınarak taşıyıcı sistemin yer değiştirmeleri doğrusal hesapla belirlenmektedir. Yöntem 2.2'de statik itme analizi, Yöntem 2.3 kapsamında ise zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz gerçekleştirilmektedir. Performans hedeflerini ve kullanılacak hesap yöntemini seçmek için öncelikle DD-2 deprem seviyesi için Deprem Tasarım Sınıfı (DTS) ve Kıyı ve Liman Yapıları Önem Sınıfı (KLÖS) belirlenmelidir. DTS'nin belirlenmesinde kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı (S_{DS}) rol oynamaktadır (Tablo 1). Stratejik öneme sahip yapılar, deprem sonrasında acil yardım ve kurtarma amacı ile hemen kullanılması gereken yapılar, toksik parlayıcı ve patlayıcı özellikleri olan maddelerle ilgili yapılar "önemli yapılar" olarak kategorize edilerek KLÖS=1 sınıfına dahil edilirken deprem sonrasında onarım/güçlendirilmesi veya yeniden yapımı zor, pahalı ve zaman kaybına neden olacak yapılar "normal yapılar" olarak kategorize edilmekte ve KLÖS=2 olarak sınıflandırılmaktadır. Depremden sonra kolaylıkla yeniden yapılabilecek, şiddetli depremlerde ileri hasar görmesi kabul edilebilecek, yanaşma yapılmayan yapılar ise "basit yapılar" olup KLÖS=3'tür. DD-1 deprem yer hareketi etkisi altında, KLÖS=1 ve DTS=1 olan yapılar Yöntem 2.3'le, KLÖS=1 ve DTS=2, 3 olan yapılar Yöntem 2.1'le, KLÖS=2 ve DTS=1 olan yapılar Yöntem 2.2 ile ve KLÖS=2 ve DTS=2, 3 olan yapılar Yöntem 2.1'le hesaplanmaktadır. Farklı deprem düzeylerinde kazıklı rıhtım ve iskeleler için performans hedefleri Tablo 2'de sunulmuştur. Sunulan bu hedefler

doğrultusunda sınır durumları; KK (Kesintisiz Kullanım), KH (Kontrollü Hasar) ve GÖ (Göçmenin Önlenmesi) performans düzeyleri olarak belirlenmiştir. Bu doğrultuda, farklı deprem seviyeleri altında yapıda meydana gelebilecek birim şekil değiştirme ve hasar limitleri, bu üç temel performans düzeyi (KK, KH ve GÖ) esas alınarak tahkik edilmektedir.

Tablo 1. Deprem tasarım sınıfları (TKLYDY, 2020)

DD-2 Deprem Yer Hareketi Düzeyinde Kısa Periyot Tasarım Spektral İvme Katsayısı (S_{DS})	Deprem Tasarım Sınıfı
$S_{DS} < 0.33$	DTS = 4
$0.33 \leq S_{DS} < 0.67$	DTS = 3
$0.67 \leq S_{DS} < 1.00$	DTS = 2
$1.00 \leq S_{DS}$	DTS = 1

Tablo 2. Kazıklı kıyı yapıları için performans hedefleri (TKLYDY, 2020)

Deprem Yer Hareketi Düzeyi	KLÖS = 1	KLÖS = 2	KLÖS = 3
DD-3	—	KK	KH
DD-2a	KK	—	—
DD-1	KH	GÖ	—

İkinci aşama analizinde tabliye-kazık-zemin etkileşimi için KZE-A, KZE-B, KZE-C olarak adlandırılan üç farklı yöntem söz konusudur. Yöntem 1, Yöntem 2.1/2.2 ve Yöntem 2.3 kapsamında kullanılabilecek tabliye-kazık-zemin etkileşimi yöntemleri sırasıyla KZE-A, KZE-B ve KZE-C olarak tanımlanmaktadır. KZE-A yönteminde sadece eylemsizlik etkileşimi dikkate alınırken KZE-B yönteminde tabliye-kazık-zemin etkileşimi kinematik ve eylemsizlik etkileşimi olarak iki kısımda ele alınmaktadır. KZE-C yönteminde, tabliye, kazık ve zemin ortamının birlikte tek bir taşıyıcı sistem olarak modellendiği "ortak sistem yaklaşımı" uygulanmaktadır. Bu yöntemde, yedi farklı deprem kaydı verisinden elde edilen kazık düğüm noktası yer değiştirmeleri, zaman tanım alanı analizi boyunca her bir zaman anında, kazık düğümlerine bağlı sadece basınç alan p-y yayları üzerinden doğrudan sisteme dahil edilir. Tasarım aşamasında ihtiyaç duyulan yapısal tepkiler, yedi ayrı deprem kaydından elde edilen kazıkların yer değiştirmelerinin, iç kuvvetlerinin ve plastik şekil değiştirmelerinin maksimum değerleri olarak dikkate alınmaktadır.

Kıyı yapılarının sismik performanslarının değerlendirilmesine yönelik literatürde bazı çalışmalar mevcuttur. Doran vd. (2015) çalışmalarında, Türkiye'nin İskenderun Körfezi'nde bulunan iki farklı mevcut rıhtım yapısının (W1 ve W2) sismik performansını değerlendirmiştir. Çalışma kapsamında, betonarme kazıklar tarafından desteklenen bu yapıların deprem davranışları, Kıyı ve Liman Yapıları Demiryolları İnşaatlarına İlişkin Teknik Esaslar (2008) yönetmeliğinde yer alan performans temelli tasarım ilkelerine göre incelenmiştir. Kawamata (2009) çalışmalarında, liman tesislerinde yaygın olarak kullanılan kaya dolgu içindeki kazık destekli konteyner rıhtım yapılarının sismik performansını incelemiştir. Çalışmanın amacı kaya dolgu içerisindeki rıhtım tabliye-kazık-zemin sisteminin yanal yükler altındaki performansını ve kaya dolgu içerisindeki reaksiyon mekanizmasını daha iyi anlamaktır. Kıyı ve liman yapılarının sismik performansını belirleyen kritik unsurlardan biri, maruz kaldıkları deprem dalgalarının karakteristiğidir. Yakın fay depremlerinde darbe (puls) adı verilen, ani ve çok yüksek enerjili tek bir hız dalgası oluşmaktadır. Uzak fay depremlerinde ise enerji daha uzun bir zamana yayılmaktadır ve böylece yapı daha uzun süre, defalarca sallanmaktadır. Chopra ve Chintanapakdee (2001), yakın fay hareketlerinin özellikle fay kırılma yönündeki istasyonlarda kaydedildiğini ve ivme kayıtlarında uzun periyotlu bir darbe olarak beliren karakteristik özelliklere sahip

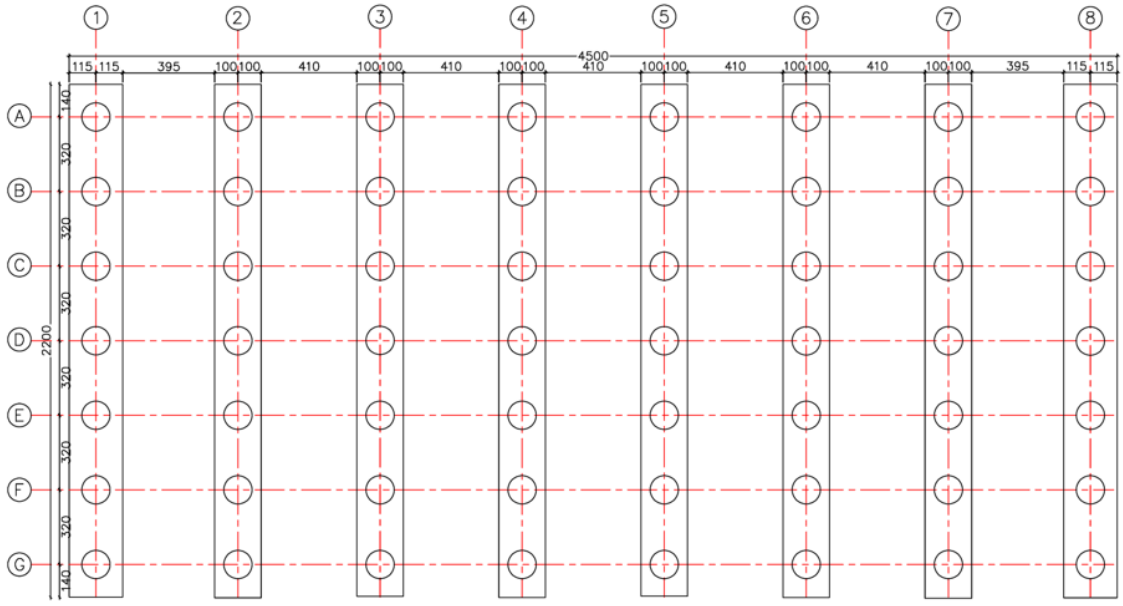
olduğunu belirtmişlerdir. Söz konusu çalışma, bu darbe içerikli hareketlerin, geniş frekans bandına sahip klasik uzak fay hareketlerinden yapısal tepki bakımından nasıl ayrıştığını incelemektedir. Arslan (2024), deprem karakteristiğinin etkisini değerlendirebilmek amacıyla 3 ve 6 katlı bina modelleri üzerinde, 11'i yakın fay ve 11'i uzak fay olmak üzere toplam 22 farklı deprem kaydı kullanarak kapsamlı analizler gerçekleştirmiştir. Hajali vd. (2018), CSI Bridge yazılımı yardımıyla iki açıklıklı bir betonarme köprü modellemiş ve geçmiş yedi deprem kaydını kullanarak doğrusal olmayan zaman tanım alanında hesap analizleri gerçekleştirmiştir. Çalışma sonucunda, yakın fay depremlerinin neden olduğu yer değiştirmelerin uzak fay depremlerine kıyasla daha büyük olduğu; ayrıca fay hattına olan mesafe azaldıkça taban kesme kuvveti ile tabliye yer değiştirmelerinin maksimum değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Literatürde, özellikle bina türü yapılar veya köprüler üzerinde yakın ve uzak fay etkileri sıklıkla araştırılmış olsa da deniz ve kıyı yapılarının bu iki farklı sismik mekanizma altındaki dinamik tepkilerini karşılaştırmalı olarak inceleyen çalışmalar sınırlı olup Zeinoddini vd. (2013) ve Lemsara vd. (2023) güncel örnekler arasında sayılabilir. Kıyı yapılarında yakın fayların yaratacağı yüksek enerji transferinin yapısal hasar mekanizmalarını nasıl değiştirdiği halen araştırılması gereken kritik bir konu olmaktadır.

Bu çalışmada, kazıklı bir iskele yapısının sismik performansı, yakın ve uzak fay sismik karakteristikleri dikkate alınarak güncel yönetmelik kriterleri çerçevesinde karşılaştırmalı bir analize tabi tutulmuştur. Araştırma kapsamında; KLÖS 1 ve DTS 1 sınıfına giren kazıklı bir iskele yapısının doğrusal olmayan dinamik zaman tanım alanındaki davranışları, KZE-C etkileşimi dikkate alınarak incelenmiştir. Bu doğrultuda, kritik yapısal yer değiştirmeler ve kesit tesirleri her iki deprem senaryosu için karşılıklı olarak değerlendirilmiştir.

2. YÖNTEM

2.1. Kazıklı İskele Yapısı

Bu çalışmada ele alınan kazıklı iskele, 180 m uzunluğa ve simetrik bir yapıya sahip olup, dört eşit anoya bölünmüştür. Burada, 45 m uzunluğunda ve 22 m genişliğindeki bir anonun (Şekil 1) modellemesi ve analizi ortaya konmuştur (Üstün Can, 2026).



Şekil 1. Ano Kalıp Planı (birimler cm'dir).

Yapısal taşıyıcı sistemde, 1219,2 mm çapında ve 22 mm et kalınlığına sahip çelik boru kazıklar kullanılmış olup; her bir anoda 56 adet kazık yer almaktadır. Üstyapı sisteminde kenar başlık kiriş eni 2,15 m, orta başlık kiriş eni ise 2 m olarak tasarlanmıştır. Üst yapı elemanlarının prekast ve yerinde dökme döşeme yükseklikleri 75'er cm olarak dikkate alınırken, kazık içi beton dolgu yüksekliği 8 m olacak şekilde modellenmiştir.

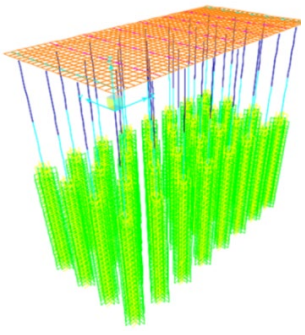
Çelik çakma boru kazıklarda St52 çelik sınıfı malzeme seçilmiştir. Kazık içi betonu C40, üst yapı betonarme elemanlarında ise C35 beton kullanılmıştır. Yapıda B420C sınıfı donatı kullanılmıştır. Kullanılan malzemelere ilişkin özellikler Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Malzeme özellikleri

Malzeme Grubu	Parametre	Sembol	Değer/ Birim
Donatı Çeliği (B420C)	Elastisite Modülü	E	200.000 MPa
	Karakteristik Akma Dayanımı	f_{yk}	420 MPa
	Tasarım Akma Dayanımı	f_{yd}	365 MPa
Çelik Boru Kazıklar (St52)	Elastisite Modülü	E	200.000 MPa
	Poisson Oranı	ν	0,3
	Akma Gerilmesi	σy	355 MPa
Üst Yapı Beton (C35)	Elastisite Modülü	E	33.000 MPa
	Poisson Oranı	ν	0,2
	Karakteristik Basınç Dayanımı	f_{ck}	35 MPa
	Tasarım Basınç Dayanımı	f_{cd}	23,33 MPa
	Tasarım Çekme Dayanımı	f_{ctd}	1,38 MPa
Kazık İçi Beton (C40)	Elastisite Modülü	E	34.000 MPa
	Poisson Oranı	ν	0,2
	Karakteristik Basınç Dayanımı	f_{ck}	40 MPa
	Tasarım Çekme Dayanımı	f_{ctd}	1,7 MPa

2.2. Yapısal Modelleme ve Analiz Yöntemi

Kıyı ve liman yapılarının sismik performans değerlendirmesinde, zaman tanım alanında doğrusal olmayan hesap yöntemi en kapsamlı analiz metodu olarak öne çıkmaktadır. Bu yöntem, yapının deprem yer hareketi altındaki davranışını, zamanın her adımında dinamik denge denklemlerinin doğrudan entegrasyonu yoluyla belirler. Bu analiz yöntemi kapsamında sayısal modellerde, çelik boru kazıklar ve betonarme kirişler çubuk elemanlar kullanılarak, üst yapı döşemesi kabuk elemanlar kullanılarak SAP2000'de modellenmiştir (Şekil 2). Histeretik davranış Takeda modeli ile ele alınmıştır. Doğrusal elemanlardaki dinamik enerji kaybı viskoz sönüm matrisi ile temsil edilmiştir.



Şekil 2. Sap2000 üç boyutlu analiz modeli

Doğrusal Olmayan Malzeme Davranışı ve Plastik Mafsallar

Yapısal sistemin dinamik yükler altındaki doğrusal olmayan davranışının pratik bir şekilde ortaya konması ve sismik performansın belirlenmesi amacıyla, literatürde yaygın kabul gören yığılı plastik davranış (plastik mafsal) yaklaşımı kullanılmıştır. Özellikle kazık-tabliye birleşimlerinde eksenel kuvvet ve eğilme momentlerinin en üst düzeye ulaştığı dikkate alındığında plastik mafsalın bu bölgede oluşması öngörülmektedir. Fiber mafsal tanımlamasında ise plastikleşmenin yalnızca uç noktalarda değil, plastik mafsal boyunca yayılabileceği kabul edilmektedir. SAP2000 analiz programı, fiber mafsal tanımlamalarında eleman boyunca yer alan entegrasyon noktalarında kesit hesaplarını yapmaktadır. Plastik mafsal boyu (L_p), eğilme momentinin etkin akma momentine eriştiği noktadan itibaren plastik şekil değiştirmelerin yayıldığı kabul edilen teorik bir uzunluğu temsil etmekte olup boyuna donatı çeliğinin beklenen akma dayanımı (f_{ye}) ve donatı çapı (d_{bl}) parametrelerine bağlı olarak Denklem (1)'e göre hesaplanmaktadır.

$$L_p=0.044\, f_{ye}\, d_{bl} \quad (1)$$

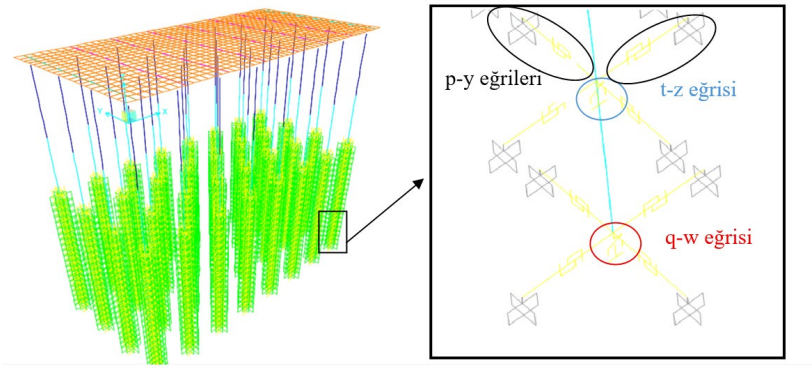
Kazık-Zemin Etkileşimi (Zemin Yayları)

Çalışma kapsamında kullanılacak zemin profillerinin modellenmesini teşkil eden idealize zemin profillerine ait parametreler [zemin birim hacim ağırlığı (γ), kayma dalgası hızı (V_s) ve drenajsız kayma dayanımı (C_u)], gerek sayısal modeldeki zemin yaylarının tanımlanmasında gerekse Bölüm 2.4'teki dinamik zemin tepki analizi hesaplarında kullanılmak üzere toplu olarak Tablo 4'te verildiği gibi kabul edilmiştir.

Tablo 4. Zemin parametreleri

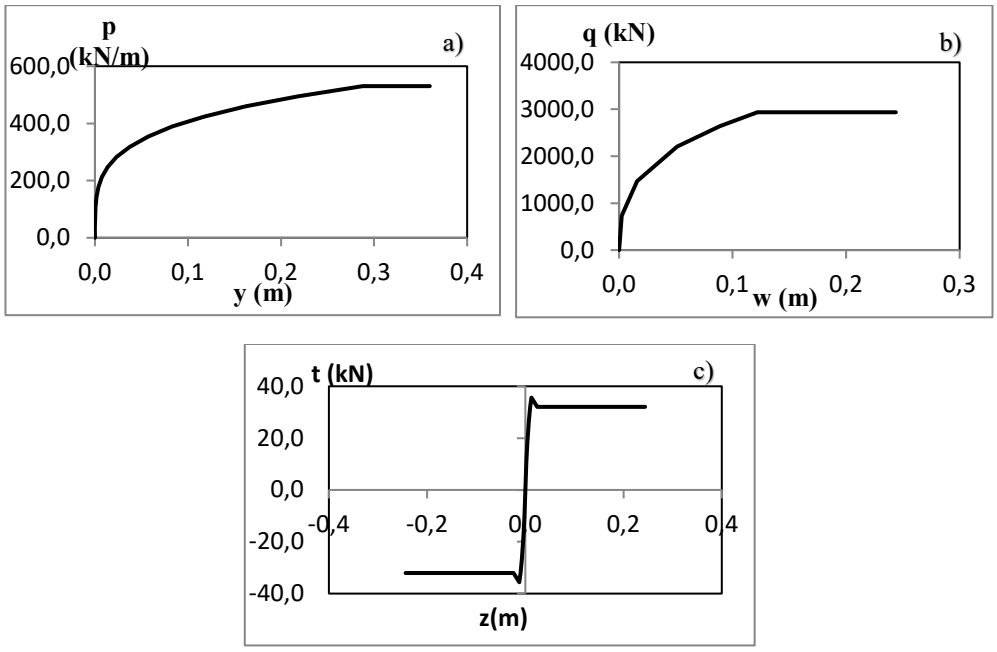
Derinlik	γ (kN/m³)	V_s (m/s)	C_u (kPa)	TANIM
15	18.5	310	145	KİL
16.5	18	325	160	KİL
18	18	342	185	KİL
19.5	18.5	330	172	KİL
21	19	365	205	KİL
22.5	18.5	390	230	KİL
24	19	415	255	KİL
25.5	19	405	248	KİL
27	18.5	440	280	KİL
28.5	19	465	310	KİL
30	19	495	345	KİL
31.5	19	480	330	KİL
33	18	525	380	KİL
35	19	560	420	KİL

Çalışma kapsamında gerçekleştirilecek kazık ve zemin arasındaki modelleme çalışmalarında, yatay yük aktarımı kazık gövdesi boyunca her bir düğüm noktasına, bir çift basınç yayı (p-y) eğrisi olarak atanmıştır. Kazık çevresindeki sürtünme kuvvetlerini temsil etmek için t-z eğrileri, kazık ucunda oluşacak taban direncini hesaplamak için ise q-w eğrileri sisteme dahil edilmiştir (Şekil 3). Yanal zemin tepkilerini temsil eden p-y eğrileri LPILE (Ensoft, 2019) yazılımı vasıtasıyla; çeper sürtünmesi (t-z) ve uç direnci (q-w) ilişkileri ise APILE yazılımı ile elde edilmiştir. p-y, t-z ve q-w, çalışmada belirtilen kazık çapları dikkate alınarak sismik yükleme durumları için ayrı ayrı türetilmiştir.



Şekil 3. Sap2000 programına tanımlanmış zemin yayları

Analizlerde kullanılan doğrusal olmayan zemin yaylarının karakteristik davranışları Şekil 4'te sunulmuştur. Kazıkların zemine girdiği 15 m kotundan itibaren 35 m derinliğe kadar, her 1 metrede değişen zemin yayları (p-y, q-w ve t-z) sisteme tanımlanmıştır. Söz konusu modellere örnek teşkil etmesi adına, ilk 1 metrelik aralığa ait yay eğrileri Şekil 4'te verilmiştir.

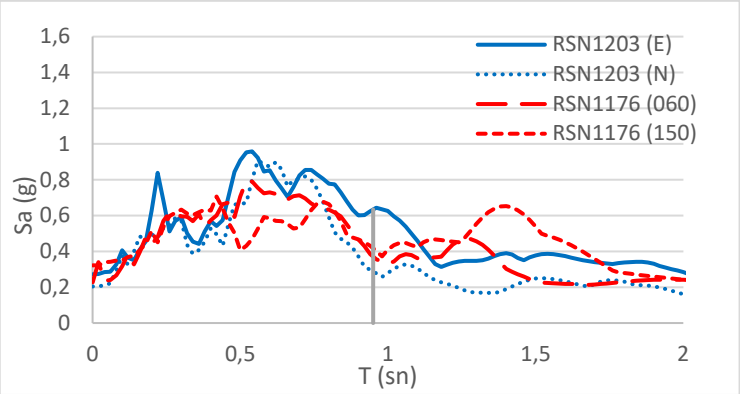


Şekil 4. Kazık enine yük analizi için 1 metre derinlikte tanımlanan doğrusal olmayan a) p-y yayı eğrisi, b) q-w yayı eğrisi, c) t-z yayı eğrisi.

2.3. Depremsellik

Bu çalışma kapsamında 2 adet deprem verisi dikkate alınmıştır. TKLYDY-2020 Bölüm 7.4.4. uyarınca her bir takım, birbirine dik iki yatay bileşeni içermekte olup bu bileşenler yapıya aynı anda etki ettirilirmiştir. Ayrıca, bu kayıtlar 90 derece döndürülerek hesaplar tekrarlanmış ve elde edilen tepki parametreleri ortalama pik değerler olarak sunulmuştur. Deprem yer hareketinin seçilmesinde PEER Ground Motion Database (Ancheta vd., 2013) deprem yer hareketi veri kataloğu kullanılmıştır. Seçilen deprem kayıtlarına ait parametreler Tablo 5'te verilmiştir. Tabloda yer alan parametrelerden T_p puls (atım) periyodunu, M_w deprem moment büyüklüğünü, R_{rup} fay yüzeyine en kısa mesafeyi, PGA pik yer ivmesini, PGV en büyük yer hızını ve PGD en büyük yer değiştirmesini temsil etmektedir. Görüleceği

üzere, her iki depremin PGA değerleri birbirlerine oldukça yakındır. Yakın fay depremine ait PGV değerleri ise uzak fayınkilere göre belirgin bir şekilde daha yüksektir. Deprem kayıtlarına ait ivme spektrumları Şekil 5'te verilmiştir. Şekil 5 incelendiğinde, yapı hâkim periyodu olan $T = 0{,}95$ sn civarında farklı kayıtlara ait spektral ivme (S_a) değerlerinin de birbirine yakın seviyelerde seyrettiği görülmektedir.

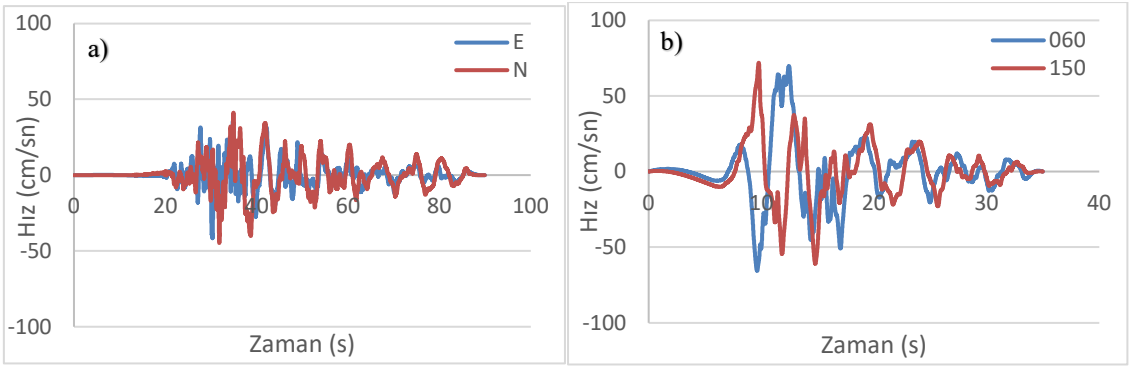


Şekil 5. Deprem kayıtlarının %5 sönümlü ivme spektrumları ve yapı hâkim periyodu (T= 0.95 sn) için karşılaştırması.

Tablo 5. Deprem yer hareketlerine ait parametreler

Kayıt No	Deprem Adı	Yıl	T_p-Pulse Periyodu (s)	M_w	R_{rup} (km)	Bileşke	PGA (g)	PGV (cm/s)	PGD (cm)
1203	Chi-Chi, Taiwan	1999	-	7.62	16.04	E	0.27	41.72	19.46
						N	0.2	44.76	33.98
1176	Kocaeli, Türkiye	1999	4.94	7.51	4.83	060	0.22	69.71	62.32
						150	0.32	71.88	47.32

Seçilen kayıtlardan RSN1203 (Chi-Chi Taiwan) kaydı fay kırığına olan mesafesinin yakın alan sınırının dışında kalması (15 km'den daha uzak) ve belirgin bir hız darbesi (pulse) barındırmaması sebebiyle çalışmada uzak alan (far-fault) yer hareketini temsil etmektedir. RSN1176 (Kocaeli, Türkiye) kaydı ise, faya olan en yakın yatay mesafesinin oldukça kısa olması (R_{rup} = 4.83 km) ve belirgin bir hız pulsu (T_p = 4.94 s) içermesi nedeniyle yakın alan (near-fault) yer hareketini temsil etmek üzere seçilmiştir. Uzak ve yakın fay karakterlerindeki depremlerin darbe davranışlarını karşılaştırmak amacıyla hazırlanan ve depremlerin birbirine dik bileşenlerini içeren hız-zaman grafikleri Şekil 6'da sunulmuştur.

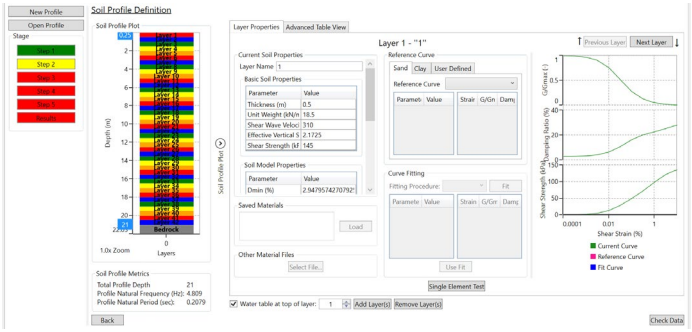


Şekil 6. Hız-zaman grafikleri: a) Chi-Chi, Tayvan (RSN1203) uzak fay depremi ve b) Kocaeli, Türkiye (RSN1176) yakın fay depremi

2.4. Dinamik Zemin Tepki Analizi

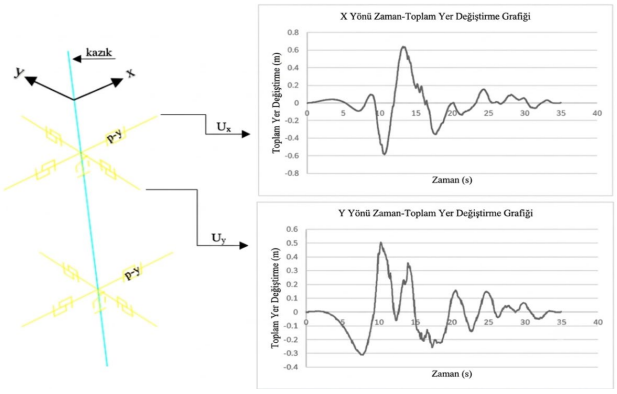
Deprem yer hareketlerinin ana kaya seviyesinden zemin yüzeyine iletimini modellemek için DEEPSOIL yazılımı kullanılmıştır. Tek boyutlu (1-B) bir zemin tepki analizi programı olan DEEPSOIL; gözenek suyu basıncı oluşumlu/oluşumsuz doğrusal olmayan zaman alanı analizlerini, katlama ve ters katlama içeren eşdeğer doğrusal frekans alanı analizlerini ve doğrusal zaman/frekans alanı analizlerini gerçekleştirebilmektedir (Hashash, 2020).

DEEPSOIL programında modellenen zemin profili analizleri için, seçilen uzak ve yakın fay depremi kayıtları kullanılmıştır. Dinamik zemin tepki analizi için DEEPSOIL programında modellenen zemin profili tabakaları ve referans dinamik zemin eğrileri Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7. Dinamik zemin tepki analizi için DEEPSOIL programında modellenen zemin profili tabakaları ve referans dinamik zemin eğrileri.

Bu analizler neticesinde elde edilen zaman tanım alanındaki toplam yer değiştirmeler, ortak sistem modelinde dinamik yer değiştirme yüklemesi olarak kazıklar boyunca tanımlanan aktif p-y yaylarının uçlarına her bir t zaman adımında etki ettirilmiştir. Şekil 8'de örnek olarak şematize edilen bu süreçte, DEEPSOIL'den elde edilen X ve Y yönlerindeki zamana bağlı toplam yer değiştirme girdileri (U_x ve U_y) doğrusal olmayan p-y zemin yaylarına eş zamanlı olarak aktarılmıştır.



Şekil 8. p-y yaylarının zemin uçlarına uygulanan dinamik toplam yer değiştirme yüklemeleri

3. BULGULAR

Uzak ve yakın fay deprem yer hareketleri esas alınarak TKLYDY-2020 kapsamında gerçekleştirilen zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler neticesinde hesaplanan birim şekil değiştirme kapasite kontrolleri Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 7, uzak ve yakın fay deprem yer hareketleri analizlerden elde edilen iç kuvvetler ve kapasitelerin karşılaştırmasını içermektedir. Burada, M_{max}, V_{max} ve P_{max} sırasıyla moment, kesme ve eksenel kuvvet zarflarının maksimum değerlerini, M_{ii} ve V_{ij} sırasıyla döşeme moment ve kesme bileşenlerini, V_c, V_n ve V_{cr} sırasıyla betonun kesme, nominal kesme ve kesmede çatlama dayanımlarını, A_c ve A_g sırasıyla beton kesitin enkesit ve brüt enkesit alanlarını, k_c eğrilik sünekliğine bağlı katsayıyı, f_{ck} beton karakteristik silindir basınç dayanımını, f_{ctd} beton tasarım çekme dayanımını, F_{cr} kritik burkulma gerilmesini, b_w kesit genişliğini ve d faydalı yüksekliği temsil etmektedir.

Tablo 6. TKLYDY-2020'ye göre birim şekil değiştirme kontrolleri

	RSN1203 (Uzak Fay Depremi)	RSN1176 (Yakın Fay Depremi)
Performans Hedefi	GÖ	GÖ
Donatı Birim Şekil Değiştirme Kapasitesi	0.053	0.053
Beton Birim Şekil Değiştirme Kapasitesi	0.018	0.018
Zaman Tanım Alanı Analiz Sonuçları (Donatı)	0.007048	0.003688
Zaman Tanım Alanı Analiz Sonuçları (Beton)	0.007589	0.003849
Değerlendirme	Performans Sağlandı	Performans Sağlandı

Tablo 7. Uzak ve yakın fay deprem yer hareketleri altında iç kuvvet ve kapasite karşılaştırılması

	RSN1203 (Uzak Fay Depremi)	RSN1176 (Yakın Fay Depremi)	Kapasite Kontrolleri
Betonarme Tapa	M_{max}:3299 kNm V_{max}:413 kN P_{max}: 1750 kN	M_{max}:1836 kNm V_{max}:319 kN P_{max}: 1631 kN	Kesme Dayanımı: $V_c = 0.80A_ck_c\sqrt{f_{ck}}$: 1572 kN
Çelik Boru Kazık	M_{max}:5431 kNm V_{max}: 1350 kN P_{max}: 1660 kN	M_{max}:3196 kNm V_{max}:1570 kN P_{max}: 1287 kN	Kesme Dayanımı: $V_n = F_{cr}*A_g/2$: 5833 kN
Başlık Kirişi	M_{max}:2480 kNm V_{max}: 1045 kN	M_{max}:2799 kNm V_{max}: 817 kN	Kesme Dayanımı: $V_{cr} = 0.65\ f_{ctd}$ bw d: 2450 kN
Döşeme	V_{13}:341 kN V_{23}:104 kN M_{11}:751 kNm M_{22}:304 kNm	V_{13}:227 kN V_{23}:95 kN M_{11}:427 kNm M_{22}:217 kNm	$V_c = 0.17\sqrt{f_{ck}}$bwd: 628.5 kN
Kazık Ucu Eksenel Yük	2072 kN	2273 kN	Kazık Taşıma Gücü: (7535/1.5)+(4412/2): 7229 kN

4. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında, uzak fay (RSN1203) ve yakın fay (RSN1176) deprem yer hareketlerinin yapısal elemanlar üzerindeki etkileri TKLYDY-2020 esaslarına göre incelenmiştir. Aşağıda bu çalışma kapsamında ele alınan 2 deprem yer hareketi seti için geçerli olan temel sonuçlar özetlenmiştir:

- Analizler sonucunda, yakın (RSN1176) ve uzak (RSN1203) fay deprem kayıtları için elde edilen iç kuvvet ve şekil değiştirme sonuçları açısından iki deprem kaydının birbirine karşı belirgin bir üstünlük sağlamadığı, bazı sonuçlar bir deprem türü için

daha büyük çıkarken diğer sonuçların diğer deprem türü için büyük çıktığı görülmüştür. Sonuçların bu şekilde elde edilmesinde, seçilen deprem kayıtlarının pik yer ivmeleri (PGA) birbirine oldukça yakın olması, yapı periyodunun 0.95 s ve hız puls periyodunun ise 5 s olması nedeniyle bir çakışma ve rezonans benzeri durumun ortaya çıkmamış olmasının etkili olduğu değerlendirilmiştir.

- Her iki deprem kaydında da şekil değiştirmeler izin verilen limitlerin altında kalmıştır. Böylece hedeflenen Göçmenin Önlenmesi (GÖ) performans seviyesi sağlanmıştır.

- Betonarme tapa, çelik boru kazık, başlık kirişi ve döşeme elemanlarında meydana gelen maksimum kesme kuvveti, elemanların mevcut kesme dayanımı kapasitelerinin altındadır. Yakın fay sismik darbe (puls) etkisi çelik boru kazıkta daha büyük kesme talebi (1570 kN) ortaya çıkarmış olsa da eleman 5833 kN'luk yüksek kesme kapasitesiyle güvenli taraftadır.

- Deprem yükleri altında kazık ucunda oluşan maksimum eksenel yük talebi, uzak fayda 2072 kN, yakın fayda ise 2273 kN olarak hesaplanmıştır. Her iki değer de sitemin 7229 kN'luk toplam kazık taşıma gücü kapasitesinin altında kalarak güvenli tarafta kalmıştır.

Devam eden çalışmalar kapsamında, yönetmelikte (TKLYDY, 2020) belirtilen 7 deprem kaydı esas alınacak; yakın ve uzak fay hareketlerine göre yapılan ölçeklendirme sonrasında ortalama değerler üzerinden karşılaştırmaların yapılması planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

Ancheta, T.D., Darragh, R.B., Stewart, J.P., Seyhan, E., Silva, W.J., Chiou, B.S.J., Wooddell, K.E., Graves, R.W., Kottke, A.R., Boore, D.M., Kishida, T. ve Donahue, J.L. (2013), **"**PEER NGA-West2 Database**"**, PEER Report 2013/03, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.

Arslan, A.C. (2024), **"**Elastomer İzolatörlerin Alt ve Üst Sınır Değerlerinin Sismik İzolasyonlu Binaların Kat İvmesi Tepkilerine Etkisi**"**, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, İstanbul.

ASCE (American Society of Civil Engineers) (2014), **"**Seismic Design of Piers and Wharves (ASCE/COPRI 61-14) **"**, Reston, VA: ASCE.

BS 6349-2:2010 (British Standards Institution) (2010), **"**Maritime Works — Part 2: Code of Practice for the Design of Quay Walls, Jetties and Dolphins**"**, London: BSI.

Chopra, A.K. ve Chintanapakdee, C. (2001), **"**Comparing Response of SDF Systems to Near-Fault and Far-Fault Earthquake Motions in the Context of Spectral Regions**"**, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol 30, 1769-1789.

CSI (Computers and Structures Inc.) (2024), **"**SAP2000: Integrated Structural Analysis and Design Software**"**, Berkeley, California.

Doran, B., Shen, J. ve Akbas, B. (2015). **"**Seismic Evaluation of Existing Wharf Structures Subject to Earthquake Excitation: Case Study**"**. Earthquake Spectra.

Ensoft, Inc. (2019). LPILE 2019: Technical Manual – A Program for the Analysis of Deep Foundations Under Lateral Loading. Austin, TX: Ensoft, Inc.

Gülenç, C. (2024), **"**Seismic Soil-Structure Interaction Behavior of Pile-Supported Wharf Systems on Liquefiable Soils Under 3-D Excitation**"**, Yüksek Lisans / Doktora Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul.

Hajali, M., Jalali, A. ve Maleki, A. (2018), **"**Effects of Near Fault and Far Fault Ground Motions on Nonlinear Dynamic Response and Seismic Improvement of Bridges**"**, Civil Engineering Journal, Vol 4, No 6.

Hashash, Y.M.A. (2020), **"**Department of Civil and Environmental Engineering**"**, University of Illinois at Urbana-Champaign.

Kawamata, Y. (2009), **"**Seismic Performance of Pile-Supported Container Wharf Structures in Rockfill**"**, Doctor of Philosophy in Civil Engineering, Oregon State University.

Lemsara, F., Bouzid, T., Yahiaoui, D., Mamen, B. ve Saadi, M. (2023), **"**Seismic Fragility of a Single Pillar-Column Under Near and Far Fault Soil Motion with Consideration of Soil-Pile Interaction**"**, Engineering, Technology & Applied Science Research, Vol 13, No 1, 9819-9824.

PIANC (2001), **"**Guidelines for the Design of Breakwaters, Harbour Engineering and Ship Manoeuvres**"**, Brussels: World Association for Waterborne Transport Infrastructure.

T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı (TKLYDY-2020), **"**Türkiye Kıyı ve Liman Yapıları Deprem Yönetmeliği**"**, Ankara: Resmi Gazete.

Üstün Can, A. (2026),"Kazıklı Kıyı Yapılarının Deprem Davranışlarının Zaman-Tanım Alanında Analiz Yöntemiyle İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi (Çalışma Devam Ediyor), Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, İstanbul.

Zeinoddini, M., Matin Nikoo, H. ve Ahmadpour, F. (2013), **"**A Coupled Soil-Fluid-Structure Simulation of the Near-Field Earthquake Effects on Gravity Type Quay-Walls**"**, China Ocean Engineering, Vol 27, No 4, 481-494.

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
E	Elastisite Modülü	U_x, U_y	X ve Y Yönlerindeki Zamana Bağlı Toplam Yer Değiştirme Girdileri
f_{yk}	Donatı Çeliği Karakteristik Akma Dayanımı	M_{max}	Maksimum Moment Zarfı
f_{yd}	Donatı Çeliği Tasarım Akma Dayanımı	V_{max}	Maksimum Kesme Kuvveti Zarfı
ν	Poisson Oranı	P_{max}	Maksimum Eksenel Kuvvet Zarfı
σ_y	Çelik Boru Kazık Akma Gerilmesi	M_{ii}	Döşeme Moment Bileşenleri
f_{ck}	Beton Karakteristik Silindir Basınç Dayanımı	V_{ij}	Döşeme Kesme Bileşenleri
f_{cd}	Beton Tasarım Basınç Dayanımı	V_c	Beton Kesme Dayanımı
f_{ctd}	Beton Tasarım Çekme Dayanımı	V_n	Nominal Kesme Dayanımı
L_p	Plastik Mafsal Boyu	V_{cr}	Kesmede Çatlama Dayanımı
f_{ye}	Beklenen Akma Dayanımı	A_c	Beton Enkesit Alanı
d_{bl}	Donatı Çapı	A_g	Brüt Enkesit Alanı
γ	Zemin Birim Hacim Ağırlığı	k_c	Eğrilik Sünekliğine Bağlı Katsayı
V_s	Kayma Dalgası Hızı	F_{cr}	Kritik Burkulma Gerilmesi
C_u	Drenajsız Kayma Dayanımı	b_w	Kesit Genişliği
T_p	Puls (Atım) Periyodu	PGA	Pik (En Büyük) Yer İvmesi
M_w	Deprem Moment Büyüklüğü	PGV	En Büyük Yer Hızı
R_{rup}	Faya olan en yakın mesafe	PGD	En Büyük Yer Değiştirmesi