

# Dinamik yapı-kazık-zemin etkileşimi bağlamında temel gömme derinliğinin spektral tepki üzerindeki etkisi

## Effect of foundation embedment depth on spectral response considering dynamic structure-pile-soil interaction

Ozan BİLAL<sup>1\*</sup> , Yasin FAHJAN<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Geoproje Mühendislik ve Danışmanlık Limited Şirketi, İstanbul, Türkiye.

ozanbilal@geoproje.com.tr

<sup>2</sup>İnşaat Mühendisliği Bölümü, İnşaat Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.

fahjan@itu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 06.01.2022

Düzeltilme Tarihi/Revision: 27.10.2022

doi: 10.5505/pajes.2023.05046

Kabul Tarihi/Accepted: 24.03.2023

Araştırma Makalesi/Research Article

### Öz

Dinamik Yapı-Kazık-Zemin Etkileşiminin (YKZE) yapısal elemanlar üzerindeki etkisinin araştırılması amacıyla, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde (TBDY, 2018) tariflenen yöntemlerin (Yöntem I, II, III), hangi durumlarda tercih edilmesi gerektiği ve kapsamı ilgili bölümlerde (TBDY Tablo 16.5 ve EK16C) açıklanmıştır. Yönetmelikte, Yöntem I için belirlenen farklı çözüm yöntemleri (Ortak ve Altsistem Yöntemi) takip edilerek yapılan analizlerde "Kinematik" ve "Eylemsizlik" Etkileşimi doğrudan dikkate alınsa da diğer yöntemlerde (Yöntem II-III) dolaylı ve yaklaşık sonuçların elde edildiği (özellikle Kinematik etkileşim) varsayılarak çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Bilindiği üzere Kinematik etkileşiminde 2 faktör baskın olmaktadır: Gömme derinliği ve Taban Plaka Ortalaması. Bu çalışmada Yapı-Kazık-Zemin etkileşim analizleri Ortak Yöntem ile Altsistem yönteminin Kinematik kısmı dikkate alınarak hazırlanan modellerle gerçekleştirilmiştir. Üstyapının modelde bulunduğu ve bulunmadığı durumlarda oluşan Temel Tepki Spektrumlarının değişimi gömme derinliğine bağlı olarak incelenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Yapı-Kazık-Zemin etkileşimi, Ortak yöntem, Altsistem yöntemi, Kinematik ve eylemsizlik etkileşimi.

### Abstract

To investigate the effect of Dynamic Structure-Pile-Soil Interaction (SPSI) on structural elements, one of the following methods (Methods I, II, III) should be selected regarding the Structural Case described in the Turkish Building Earthquake Code (TBDY, 2018) in the relevant sections (TBDY Table 16.5 and Annex 16C). Although "Kinematic" and "Inertial" effects are considered directly in the analyzes outlined in TBDY 2018 (Direct and Substructural Methods) determined for Method I, in other methods (Method II-III), indirect and approximate results are obtained (especially in Kinematic Interaction Analysis). Generally, two factors dominate the Kinematic Interaction: Embedment Depth and Base-slab Averaging. In this research, Soil-Pile-Structure interaction analyzes were performed according to the Direct Method and the Kinematic Part of the Substructural Method. The variation of the Foundation Response Spectrum, one in which the Structure is present or not in the model, has been investigated according to the variation of embedment depth.

**Keywords:** Soil pile structure interaction, Direct method, Substructure method, Kinematic and inertial interaction.

## 1 Giriş

Şehir merkezlerindeki nüfus artışına bağlı olarak konut talebinde artış olmuş ve arsa birim m<sup>2</sup> fiyatları yükselmiştir. Dikey mimarinin cazibesi, insanlığın her zaman en değer verdiği şeyleri en yükseğe koyma isteğiyle yapılan 'kule'lerin inşasına dolayısıyla periyodu yüksek yapıların da artışına yol açmıştır. Bu yapıların oturma/taşınma gücü/sıvılaştırma problemlerinin değerlendirilmesi Geoteknik Mühendisliğinin alanına girse de yine de bu yapıların bulunduğu sistemin (Yapı-Kazık-Zemin) sismik kuvvetler altındaki davranışının anlaşılması; Geoteknik Mühendisliği, Deprem Mühendisliği ve Yapı Mühendisliği disiplinlerinin anlaşılmasını/sindirilmesini gerektirmektedir. Bütünsel olarak bu davranışların anlaşılma çabası 20. yüzyılda başlasa da [1] dinamik Yapı Kazık Zemin Etkileşimi (YKZE) çalışmaları, 60'lı yıllarda bilgisayarların işlem kapasitesinin artması ve buna bağlı olarak FFT'nin (Fast Fourier Transform) de etkin kullanımıyla daha kapsamlı ele alınmaya başlamıştır.

Dinamik YZE'nin (Yapı Zemin Etkileşimi) ilk analitik araştırması Erich Reissner'in [2] çalışmalarına dayandırılmaktadır. Asıl gelişmeler ise teknolojik araçların

gelişmesi ve artmasına bağlı olarak elektrik tüketimindeki artış, enerji talebinin karşılanması konusunda sorun yaşamaya başlayan dünya ülkelerinin, bu sorunun çözümü için Nükleer Enerji Santrali projelerine ağırlık vermesiyle 1960-70'li yıllarda yaşanmıştır. Kausel [3], sismik etki altındaki yapılarda oluşan eylemsizlik kuvvetlerinden (eksenel, taban kayma ve döndürme) kaynaklanan zemin deformasyonlarının tek başına çözüm için yeterli olmayacağını (ki bu çözüm titreşen makine temelleri probleminin çözümü için yeterli olduğu belirtilmektedir), aynı zamanda hareket halindeki sismik dalgalardan etkilenen bir temelin, yatay ötelenme hareketlerinin yüksek frekans içeriğinin filtrelemesi ve dönme hareketlerini ortaya çıkarmasının da dikkate alınmasından bahseder [4]. Bu etkiler, kinematik etkileşim ve eylemsizlik etkileşimi olarak temelde hesap kolaylığı için birbirinden Whitman tarafından ayrılmıştır [5].

Mylonakis ve Gazetas [6], yönetmeliklerde kullanılması önerilen spektrum ile oluşan spektral eğri karşılaştırıldığında YZE'den kaynaklanan birincil doğal periyottaki artış, genelde beklendiği üzere yapının lehine olacak şekilde bir davranışın sergilenemeyeceğini ortaya koymuş ve bu yaklaşımın

\*Yazışılan yazar/Corresponding author

sürdürülmesinin talepleri karşılayamayan tasarımlara yol açabileceğini göstermiştir.

Yapı-Kazık-Zemin etkileşimini etkileyen birçok faktör olmasıyla birlikte, yapılaşmanın şehir merkezlerinde yoğunlaşması sebebiyle bodrum kat sayısı artmakta ve bina temelleri yüzeyden minimum 3m, arsa birim  $m^2$  maliyet değerlerinin çok yüksek olduğu yerlerde ise 20-30 m derinliklere oturtulmaktadır. Bu durum YZE'yi etkileyen en önemli unsurlardan (kinematik etkileşim) biri olan "Gömme Derinliği"nin etkisinin araştırılmasını gerektirmektedir. Yapı-Zemin etkileşiminde Gömme Derinliğinin etkisini anlamak için, serbest alan hareketi ( $u_{ff}$ ) ile temel kazısının yapılıp temel belirlenmiş derinliğe oturduğu durumda kinematik etkileşimden ötürü ortaya çıkan temel girdi hareketi ( $u_{FIM}$ ) arasında bir transfer fonksiyonu çeşitli çalışmalarda elde edilmeye çalışılmıştır [7]-[9].

Fan K. ve diğ. [10], yaptıkları çalışmanın öncül çalışmalarını özet haline getirir içerikteki, düşey sismik kayma dalgalarının, başlıklarına bağlı kazıkların yatay rijitliğinin frekans tanım alanında dinamik araştırmasını yapmıştır. Kaynia ve Kausel'in [11] çalışmalarına katkı sağlar niteliğindeki bu çalışmada; belirlenen bir noktadaki temel girdi ivmesi ile serbest alan ivmesi arasında ( $u_{FIM}/u_{ff}$ ) kayda değer bir şekilde farklılıkların olduğu bulgulanmıştır. Daha sonra Kim ve Stewart'ın [12] arazi sonuçlarıyla karşılaştırmasını yaptığı çalışmalar da bunu destekler niteliktedir. Fakat yine de bu çalışmalar gömme derinliği olan kazıklı yapıları araştırmamıştır.

Rainer [13], kazıklı temele sahip bir üst yapının modal sönümünü analiz etmek için bir Altsistem Metodolojisi (*Substructure Method*) kullanmıştır.

Kaynia ve Mahzooni [14], farklı kazıklı temel konfigürasyonlarında sismik kinematik ve atalet etkileşimi aşamalarında kazıklarda oluşan kesme kuvvetlerini hesaplamak için tek serbestlik dereceli (SDOF) bir model ve üç boyutlu Green fonksiyonlarına dayalı bir formülasyon kullanmışlardır.

Aguilar ve Avil'es [15], gömülü temeller için Avil'es ve P'erez-Rocha'nın [16] prosedürünü genişleterek kazıklı temelleri analiz ettiler ve böylece  $8 \times 8$  kazıkların belirli bir konfigürasyonu için sistem periyodu ve sönüm üzerindeki SSI etkilerini incelediler.

Lu ve diğ. [17] kazıklı temel üzerindeki 12 katlı bir yapıyı ANSYS kullanarak; zemin özelliklerinin, yapının sertliğinin, gömme derinliğinin ve dinamik özelliklerin yapı-kazık-zemin etkileşiminin üzerindeki etkisini çalışmıştır. Bu çalışmanın sonucunda birçok sonucun yanında:

- Zeminin kayma modülü azaldıkça yapının pik deplasman değeri artmaktadır,
- Kazıklar çok uzun olduğunda ve sert tabakaya girdiğinde, binanın gömme derinliğinin etkisi YZE'de çok az olmaktadır gibi sonuçlara ulaşmıştır.

Maravas ve diğ. [18], periyodunu ve sönümünü elde ederek tek kazıklı, tek katlı kesme (perde) yapılarında YZE etkilerini incelemek için basit bir metodoloji sunmuştur. Ancak, farklı gömülme ve aralıklara sahip, değişken sayıda kazıktan oluşan kazıklı temeller için bu nitelikte herhangi bir parametrik çalışma bulunmamaktadır.

Padr'on ve diğ. [19] kinematik ve atalet etkileşiminin hesapları için BEM-FEM (*Boundary-Finite Element Method*) ile empedans fonksiyonları ve kinematik etkileşim faktörleri bulmuş,

Medina ve diğ. [20] ise bunu ileriye taşıyarak Periyod Uzatması ( $\dot{T}/T$ ) ve sönüm ( $\xi$ ) için harmonik yükler altında elde edilen, çeşitli kazık konfigürasyonları için eğriler elde etmiştir. Buradaki grafikler kullanmaya hazır (*ready to use*) eğriler olarak söylene de gömme derinliği için değil yine "kazıkların gömme boyu" yani uzunluğu değiştirilerek elde edilen çıktılardır.

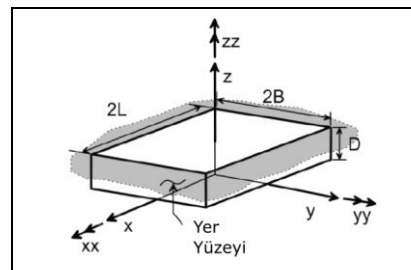
Grup kazıklı gömülü temellerin deprem etkisi altındaki davranışı hususunda, güncel bütün yönetmelik ve şartnamelerde henüz yeterli çalışmanın bulunmadığı ve bu yönde ileri çalışmaların yapılması gerektiği tezlerde belirtilmiş ve bu bağlamda çalışmalar yapılmaya başlanmıştır [21]. Ülkemizde kullanılan yönetmelik olan TBDY 2018'de [22] Yapı-Kazık-Zemin etkileşimi, Altsistem ve Direkt yöntemlerini de kapsayacak şekilde ele alınmış ve gömme derinliğinin hesaba katılmasıyla alakalı doğrudan bir hesap önermemiştir (Yöntem II-III). Gömme derinliğinin spektral ivmeler üzerindeki ve dolayısıyla üst yapı üzerindeki etkisinin, kuvvetli yer hareketi etkisi altında hangi mertebeye olduğunun araştırılması bu çalışmanın amacını oluşturmaktadır.

## 2 Modelleme

Modelleme ve analiz için, sonlu farklar metoduyla hesapları gerçekleştiren bir yazılım [23] tercih edilmiştir. NEHRP'in hazırladığı "*Soil-Structure Interaction for Building Structures*" [24] şartnamesindeki gömülü temellerde oluşan, derinliğe bağlı olarak değişen ivmelerin hesaplanabilmesi için önerilen analitik metotla da tanımlaması yapılacaktır. Aşağıdaki başlıklarda araştırmada kullanılan malzeme modellerinin detayları, model parametreleri ve analitik model açıklanmıştır.

### 2.1 Analitik model

Bodrumlu yapılarda, bodrum sayısının artışına bağlı olarak gerçekleşen derinlik artışı nedeniyle oluşan serbest alan hareketindeki azalma, temeldeki ötelenmelerde azalmaya yol açmaktadır. Pratikte kullanılan yaklaşımlar, sonlu ya da sonsuz kalınlığa sahip homojen bir zemin ortamında gömülü olan rijit silindirik temeller için kullanılmaktadır. Kausel ve diğ. [25] ve Day [26]'ın yaptığı çalışmalar, gömülü olan silindirik temellerin ötelenmelerini ( $u_{FIM}$ ), yüzeyde serbest oluşan ötelenmelere ( $u_g$ ) bağlı bir fonksiyon olarak tanımlamışlardır. Gömülü silindirik temelli yapılar, düşey olarak yayılan kayma dalgalarıyla etkileşiminde, derinliğin ve dalga saçılımının etkisi nedeniyle oluşan ötelenme azalımı sebebiyle,  $u_g$ 'ye göre temel tabanı ötelenmelerinde bir azalım ortaya çıkar. Gömme derinliğinin değişimi boyunca silindirik temele etkileyen deplasmanların farkı nedeniyle de dönme hareketi meydana gelir. Bahsi geçen çalışmada ve ayrıca NEHRP'de tanımlanan, dikdörtgen şekilli temellerde de kullanılacak (Şekil 1) transfer fonksiyonlarının elde edilmesi için kullanılan formüller aşağıdadır:



Şekil 1. Analitik hesaplarda kullanılan temel modeli [5].  
Figure 1. Foundation model for analytical calculations [5].

$$H_u = \frac{u_{FIM}}{u_s} = \cos\left(\frac{D}{B_e} a_0^k\right) = \cos\left(\frac{D\omega}{V_s}\right), \quad \frac{D\omega}{V_s} < 1.1 \quad (1)$$

$$H_u = 0.45, \quad \frac{D\omega}{V_s} > 1.1 \quad (2)$$

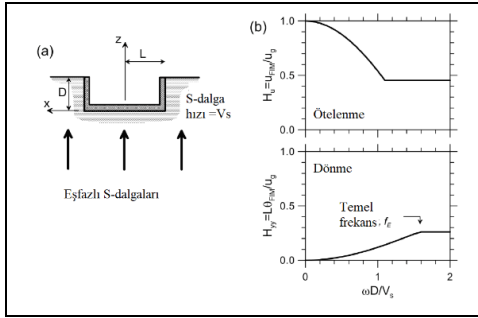
$$V_{s,ort} = \frac{z_p}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\Delta z_i}{V_{s,F}(z)_i} \right)} \quad (3)$$

$$z_p = B_e^A, \quad B_e^A = \sqrt{A/4} = \sqrt{BL} \quad (4)$$

$$a_0^k = \frac{\omega(B_e^A)}{V_s} \quad (5)$$

Burada,  $H_u$ , transfer fonksiyonu,  $D$ , gömme derinliğidir.  $V_s$ , profilin tamamı dikkate alınarak hesaplanan efektif ortalaması alınmış profil hızı ( $V_{s,ort}$ ) kullanılacaktır.  $B_e^A$  yarı-boyutlarla oluşturulan eşdeğer kare temel alanı, hesaplanarak kullanılacaktır.  $a_0^k$  boyutsuz frekans,  $z_p$ , efektif profil derinliğidir.

Şekil 2'de görüldüğü üzere yüksek frekanslarda yatay hareketlerdeki azalım önemi azımsanmayacak derecede fazladır. Yüzey ve temel alt kotu arasındaki kalınlıktan muteber (gömme derinliği) zemin kolonunun ( $D$ ) temel frekansı olan  $f_e$ 'nin yaklaşık %70'ine denk gelen frekanslarda yatay ötelenme transfer fonksiyonu doygunluğa erişmiştir. Yüksek frekanslardaki sönüm oranının 0.45 olması gömme derinliğinin etkisini, diğer bir kinematik etkileşim faktörü olan temel plakası ortalaması (*base slab averaging*) faktöründen daha önemli hale getirmektedir.



Şekil 2. Düşey yönde ilerleyen kayma dalgası etkisi altındaki temeller için; (a): Örnek geometri. (b): Yatay ve dönme hareketi için transfer fonksiyonları [24].

Şekil 2. Illustration of foundation subjected to vertically incident shear waves; (a): Schematic geometry; and (b): Transfer functions for horizontal foundation translation and rocking [24].

Burada yöntem detaylarına yer verilen analitik modelin, Sonlu farklar yöntemiyle doğrulamasının yapıldığı çalışmanın sonuçları, Bilal O. [20] tarafından yapılan doktora tezinin 6.3 başlığı altında incelenebilir. Bundan sonraki başlıkta bu doğrulamanın yapıldığı varsayılarak, bu çalışma kapsamında gömme derinliği bulunan yapıların, yapı-kazık-temel etkileşimi araştırılacaktır.

## 2.2 Flac3D modeli

Bu çalışma kapsamında, bahsi geçen doktora tezinde detaylarına yer verilen [21] Ortak Yöntem ve Altsistem metodları dikkate alınarak hazırlanan 3B modeller, Sonlu farklar yazılımı kullanılıp, deprem hareketi her iki yönden de olacak ( $x, y$ ) şekilde sisteme etki ettirilerek analizler

gerçekleştirilmiştir. Modellemede kullanılan/seçilen parametrelerin bilgileri alt başlıklarda verilecek olup; analiz çıktıları, gömme derinliğinin değişiminin tepki spektrumu üzerindeki etkisinin tartışılması olarak kullanılacaktır.

### 2.2.1 Üst yapı

Direkt/Ortak yaklaşımla yapılan analizin tasarımında, YKZE'nin dikkate alınmasının TBDY tanımlarıyla yapılabilmesi için yüksek olarak kabul edilebilecek bir bina (BYS=2) modellenmiştir. Yapı eleman kesitlerinin boyutları ile malzeme özellikleri Tablo 1'de sunulmuştur.

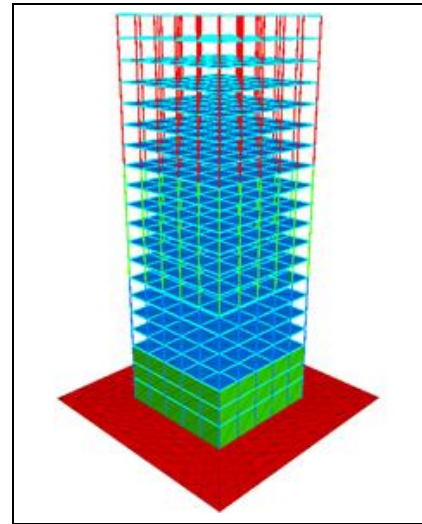
Tablo 1. Üst yapı ve temel model parametreleri.

Table 1. Superstructure and foundation model parameters.

	Döşeme	Kolon	Kiriş	Temel	Duvar
B.H.A. [kN/m <sup>3</sup> ]			25		
E [MPa]			30000		
Kalınlık (cm)	13	—	—	80	25
Ebatlar	—	Değişken	25x60cm	40x40m	—
$\nu$			0.2		

Modelde kullanılan temelin ebatları (40x40m), Kule yapısının ebatlarından (20x20 m) farklı uzunluklarda seçilmiştir (Şekil 3). Yapının bodrumlu olmasından dolayı kule etrafında etkileyecek zemin bulunmamaktadır. Bununla ilgili olarak ortaya çıkabilecek *back-stay* etkileri ise ileri çalışma olarak önerilmekte fakat bu araştırmanın kapsamı dışındadır.

Kat yükseklikleri (Yalnızca zemin katta  $H=4m$  olacak biçimde) 3 m olarak belirlenmiştir. Kolonların ebatları; 1'den 7. Kata kadar 0.6x0.6m, 8'den 13. kata kadar 0.4x0.4m, 14'den 20. Kata kadar ise 0.3x0.3m olarak boyutlandırılmıştır. DKT-CSTH kabuk eleman özelliğine sahip [23] duvar elemanları zeminle temas eden yüzeylere 0.25 m kalınlığındaki elastik malzeme parametreleri kullanılarak (Tablo 1) tanımlanmıştır.



Şekil 3. Üst yapı modeli.

Figure 3. Superstructure.

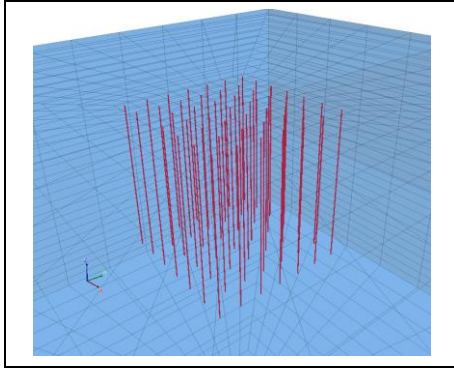
Bu çalışmada kullanılan üst yapı modelinin kolon-kiriş elemanlarında BeamSel, döşeme elemanlarında DKT-CST karma kabuk model, Temelin modellemesinde DKT-CST kabuk elemanlar, kazık modelinde ise pileSel elemanlar tercih edilmiştir.

## 2.2.2 Kazık modellemesi

Kazıklardaki mafsallaşmanın dikkate alınabilmesi için moment kapasitesi (Mp) bir parametre yardımıyla dikkate alınabilse de bu çalışma kapsamında dikkate alınamamıştır. Dinamik etki altındaki kazıkların, hareketi esnasında zeminle oluşabilecek boşluklar (gap) analizler de dikkate alınabilse de bu çalışmada kapsam dışı bırakılmıştır.

Rijit link [23] kullanılarak kazıklar ve temelin bağlantısı sağlanmıştır.

Modellerde tasarlanan kazıkların çapları 80 cm, boyları 20 m, aralıkları ise 300 cm'dir ve toplamda 49 kazık kullanılmıştır. (Şekil 4).



Şekil 4. Analizlerde kullanılan kazık modeli.

Figure 4. Piles Graphical Representation.

Kazık-zemin arayüzey özellikleri atanırken, Matlock [27] tarafından geliştirilen p-y eğrileri formülasyonu tercih edilmiştir.

Tablo 2'de sunulan kazık arayüzey değerlerinin hesaplamalarında kullanılan drenajsız kayma direnci parametresi, TBDY 2018 Yerel Zemin Tablosundaki  $V_s$  değerlerine bağlı olarak tercih edilmiştir.

Tablo 2. Kazık modeli ve kazık arayüzey parametreleri.

	$V_s$ 200
$S_u$	75
$k_t$ (N/m <sup>3</sup> )	1.54E+07
$k_n$ (N/m <sup>3</sup> )	1.54E+07
N_Koh (kPa)	1
D_Koh (kPa)	1
N_Sürtünme (°)	25
D_Sürtünme(°)	25

Kazıkların her biri 20 segmentten oluşturulmuştur.

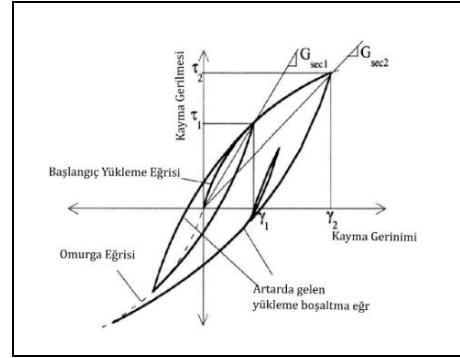
## 2.2.3 Zemin modellemesi

Zemin modeli, zeminin histeretik davranışının dikkate alınabilmesi için, sig3 histeretik model [23] tercih edilmiş ve bütün ızgara (grid) alanına atanmıştır.

Dinamik durumdaki zemin davranışını anlayabilmek amacıyla zemin ortamını doğrusal, eşdeğer-doğrusal ve doğrusal olmayan yöntemlerle modellemek mümkündür. Zemin ortamının doğal frekansıyla deprem yer hareketinin frekans içeriği arasındaki etkileşim kaynaklı ivme genliğindeki büyüme (amplification) veya küçülmenin (de-amplification) olması sebebiyle YZE'nin hesaba katılması gerekir [22]. Bu etkileşimin etkilerinin anlaşılması için, probleme bağlı olarak frekans veyahut zaman-tanım alanında yapılan hesaplamalar

gerçekleştirilmektedir. Her iki yaklaşım için de zeminin kayma modülü azalım eğrileri ve sönüm eğrilerinin gerininin fonksiyonu olarak belirlenmesi gereklidir. Deepsoil gibi tek boyutlu doğrusal olmayan yöntemle analiz gerçekleştiren yazılımlar her bir katmanı toplu kütle (lumped mass) olarak kabul ederken, 3 Boyutta modelleme yapabileme yeteneğine sahip olmasından ötürü Flac3D daha gerçekçi (doğrusal olmayan malzeme modeli, plastik deformasyonlar, farklı frekans girişimlerinin oluşabilmesi, kayma ve basınç dalgalarının aynı anda yayılımının sağlanması) sonuçlar elde edebilme olanağına sahiptir.

Şekil 5'te görülen doğrusal olmayan döngüsel davranışın Flac3D'de modellenenilmesi için yazılımın sunduğu çeşitli yöntemler mevcuttur (sig3, sig4, Hardin/Drnevich) [23].



Şekil 5. Hiperbolik omurga eğrisi ile oluşturulmuş doğrusal olmayan histeretik model ve Genişletilmiş Masing Kuralları [28].

Figure 5. Hyperbolic, non-linear soil model with extended Masing rule to define loading and unloading behavior [28].

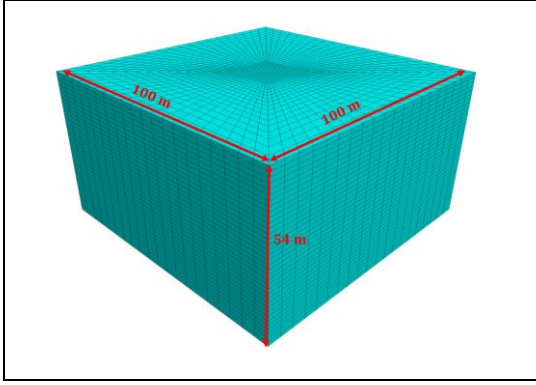
Bu çalışma kapsamında zemin ortamının döngüsel davranışının dikkate alınabilmesi için sig3 histeretik modeli kullanılmıştır. Bu model gerilmenin sadece gerinime bağlı olduğu (zamana ya da döngüye değil) ideal bir zemin kabul edildiğinde, azalım eğrisinden  $\tau/\gamma=Ms$  ilişkisini elde edilebileceği belirtilmiştir. (Formül 6). Burada  $\tau$ = normalize kayma gerilmesi,  $\gamma$ =kayma gerinimi ve  $Ms$ =normalize sekant modülüdür. Artımsal kayma modülü ise normalize tanjant modülünün ( $M_t$ ) başlangıç kayma modülüyle ( $G_0$ ) çarpılmasıyla bulunur.

$$sig3 \quad M_s = \frac{a}{1 + \exp\left(-\frac{L - x_0}{b}\right)} \quad (6)$$

Sigmoidal eğriler, belirlenen aralık içerisinde monotonik olarak davranırlar ve buna binaen asimptotik davranış sergilerler. Bundan dolayı önerilen formüller, kayma modülü azalım eğrilerini temsil edebilirlik açısından yüksek performans göstermektedir. sig3 formülasyonu;  $a$ ,  $x_0$  ve  $b$  katsayılarına bağlıdır. Bu katsayıların tayini, deneysel çalışmalarla elde edilmiş sonuçlarla ya da literatürde bulunan kayma modülü azalım eğrileriyle [29] uygunluğu, kullanılan yazılım içerisindeki bir kod yardımıyla edilmektedir.

Histeretik sönüme ek olarak, deprem girdisinin yüksek frekanslarının oluşturduğu gürültünün [distortion] azaltılabilmesi için  $\alpha=2$ ,  $\beta=0.2$  (Rayleigh sönüm parametreleri) değerleri seçilerek zemin ortamına atanmıştır.

Araştırmada kullanılan bütün modeller; genişlik 100 m, uzunluk 100 m ve derinlik 54 m olacak şekilde boyutlandırılmıştır. (Şekil 6).



Şekil 6. Zemin modeli.

Figure 6. Soil model.

Kayma modülü azalım eğrilerinin elde edilmesinde kullanılacak olan başlangıç kayma modülleri ( $G_0$ ) aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesap edilmiştir (Formül 7).

$$G_0 = \rho V_s^2 \quad (7)$$

Bu formüldeki kayma dalgası hızı terimi ( $V_s$ ) değeri, TBDY 2018'deki *Yerel Zemin Sınıfı* tablosu gözetilerek seçilmiştir. (Tablo 3).

Tablo 3 Modellerde kullanılan zemin ortamı parametreleri.

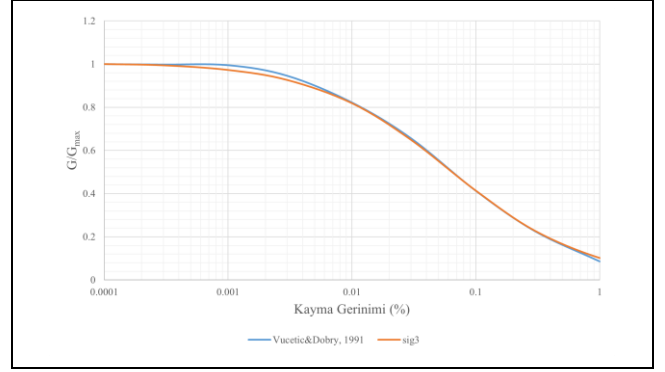
Table 3. Soil medium parameters used in models.

$V_s$ (m/sn.)	200	760
$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.8	1.8
$\nu$	0.4	0.4
E (kPa)	201600	2911104
G (kPa)	72000	1039680
K (kPa)	336000	4851840

Literatürde kabul görmüş eğrilere [29] uyumları sağlanarak oluşturulan gerinime bağlı kayma azalım eğrilerinin, yine yazılımın örnekleri içerisinde bulunan FISH (*Flacish*) yardımıyla gerinime bağlı olarak değişen sönüme kalibrasyonu yapılmıştır ( $a=1.01$ ,  $b=-0.55$ ,  $x_0=-1.20$ ), (Şekil 7-8).

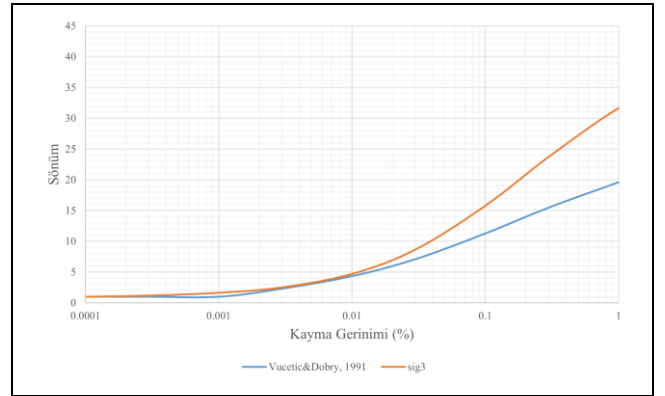
Deprem girdi hareketi enerjisinin büyük bir kısmı, düşük frekans bileşenlerinin içeriğinde bulunduğu dikkate alındığında, sinyalin filtrelenmesi yaklaşımla, hareketin içeriğindeki yüksek frekansa sahip bileşenlerin deprem girdi hareketinden çıkarılarak, frekans içeriği filtrelenbilir. Bu durum, analiz sonuçlarını dikkate değer bir mertebede etkilemeden daha büyük hacimlerdeki izgara elemanı boyutlandırmasını sağlamaktadır. Bu çalışmada, elemanların düzeydeki en büyük uzunluk 1 m'ye eşit olmaktadır. Böylelikle  $V_s=200$  m/s durumunda 0 ile 20 Hz aralığında dalgaların geçişine izin verilmektedir.

Dinamik analizlerde, hesap için gerekli en küçük zaman adımı (*timestep*); modelleme içerisinde tanımlanmış en yüksek elastisite modülüne sahip eleman ve en küçük izgara alanı dikkate alınarak belirlenir. Bu adım ne kadar küçük olursa, hesaplamalar da bir o kadar uzun sürer. Kritik zaman adımı hesabının probleminin kolaylaştırılması için, modeldeki tüm bölgeler (*zone*), dörtüzlü eleman yüzeyleri ve rijitlikler, yazılım tarafından hesaba katılarak en küçük gerekli zaman adımı bulunmaktadır (*Multi-stepping*). Bu çalışmadaki analizler için de bu yöntem kullanılarak en küçük hesap adımı bulunmuştur.



Şekil 7.  $G/G_{max}$  eğrileri, ( $I_p=15$ ).

Figure 7.  $G/G_{max}$  curves for  $I_p=15$ .

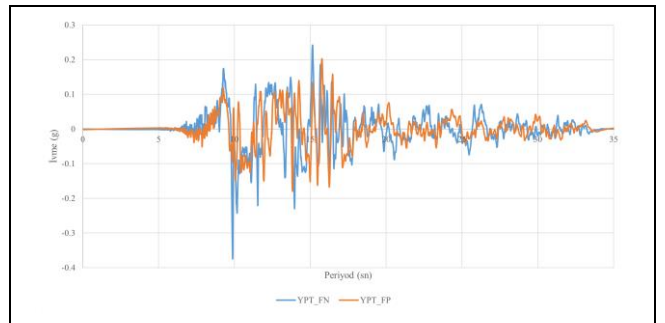


Şekil 8.  $I_p=15$  için sönüm eğrileri.

Figure 8. Damping curves for  $I_p=15$ .

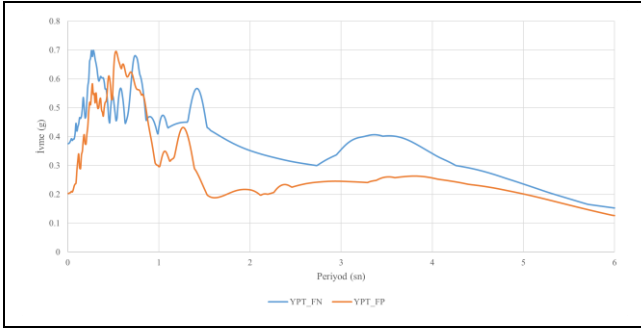
### 2.3 Deprem kaydı

Nümerik analizlerde, deprem kaydı olarak PEER NGA veri tabanındaki, Yarımcı İstasyonunda kaydedilmiş (Tablo 4) İzmit Depremine ait (17 Ağustos 1999) YPT60 ve YPT150 ivme-zaman kayıtları kullanılmıştır (RSN 1176). Bu veriler, fay düzlemine paralel (YPT-FP) ve fay düzlemine dik (YPT-FN) olarak düzenlenmiştir (Şekil 9-10). Model sınırlarından tekrar sistemin içerisine yansiyabilecek dalgaların etkisini engellemek amacıyla model yanal sınır yüzeylerine geçişgen sınırlar, model tabanına ise sessiz sınır koşulları atanmıştır.



Şekil 9. Yarımcı İstasyonundan alınan YPT\_FN/FP verilerinin ivme-zaman grafiği.

Figure 9. İzmit Eq. Yarımcı Station, YPT\_FN/FP Acc-time graph.



Şekil 10. Yarımca İstasyonundan alınan YPT\_FN-YPT\_FP verilerinin ivme spektrum grafiği.

Figure 10. Yarımca Station, YPT\_FN/FP response spectrum.

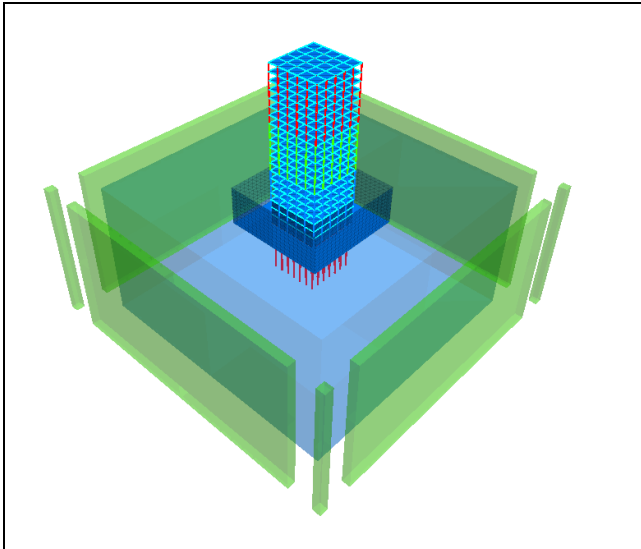
Girdi hareketinin bütün periyodları etkilemesi ve de enerjisi yüksek olması dolayısıyla, referans girdi hareketi olarak kullanılan zamana bağlı deprem ivme verisi, yazar tarafından belirlenen  $DİÇ$  (Deprem İvmesi Çarpanı) katsayılarla (0.2, 0.4, 0.6, 0.8) faktörlenerek analizlerde kullanılmak üzere hazırlanmıştır.

Tablo 4. İzmit depremi kaydı özellikleri, Yarımca İstasyonu.

Table 4. İzmit earthquake specs, Yarımca Station.

Titreşim Periyodu (sn)	4.949
Arias Şiddeti (m/s)	1.3
Deprem Adı	"İzmit "
Tarih	1999
İstasyonu	"Yarımca"
Büyükölç	7.51
Kırılma Mekanizması	Doğrultu Atımı
$R_{jb}$ (km)	1.38
$R_{rup}$ (km)	4.83
$V_{s30}$ (m/sec)	297

Nümerik analizlerde çift yönlü deprem hareketi, model tabanında eş-zamanlı olarak etki ettirilmiştir (Şekil 11).

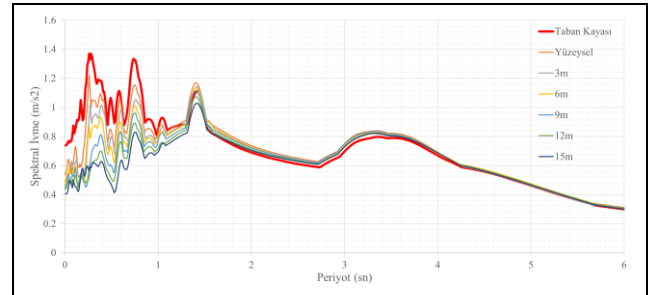


Şekil 11. Direkt metod için oluşturulmuş yapı-kazık-zemin modeli.

Figure 11. Direct method model for SPSI.

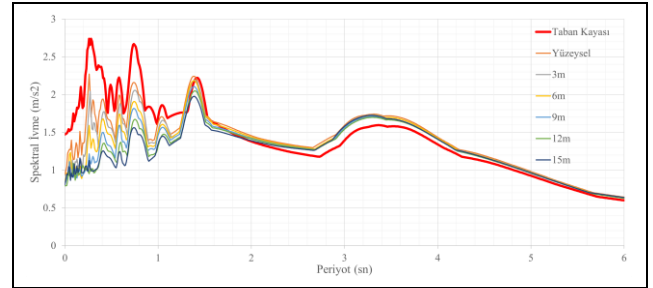
### 3 Bulgular

Yapı gömme derinliği (*Depth of Embedment*) değişiminin temelde oluşan spektral ivmeye etkisinin araştırılması amacıyla farklı gömme derinliklerinde ( $D_f$ ) bulunan temeller seçilerek (3, 6, 9, 12, 15 m) zaman-tanımlanma alanında analizler gerçekleştirilmiştir. Direkt/Ortak Yöntem ve Altsistem Yöntemi [19] kapsamında gerçekleştirilen analizler, Kinematik Etkileşim (K) metodu ve Direkt Metod (D) olarak iki farklı yaklaşım, modellemede benimsenmiştir. Grafiklerin eksenleri, Temel ivmelerine karşılık bina periyodları olarak oluşturulmuş ve gömme derinliğinin değişimi Yüzeysel Temelden başlayarak 15 m derinliğe kadar değişen derinlikteki değerler işlenmiştir. Ayrıca Taban Kayasından verilen yer hareketinin spektrumu da grafiklerde mertebenin anlaşılması amacıyla sunulmuştur (Şekil 12-17).



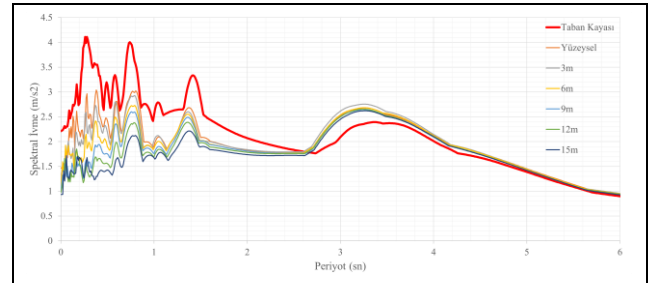
Şekil 12. Gömme derinliği değişiminin temel ivme spektrumu üzerindeki etkisi,  $DİÇ=0.2$  (D).

Figure 12. Response spectrum values regarding embedment depth for EAC=0.2 (D).



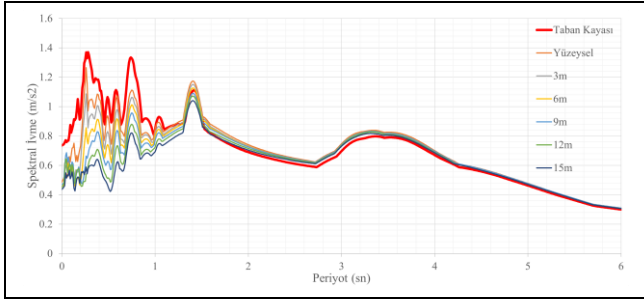
Şekil 13. Gömme derinliği değişiminin temel ivme spektrumu üzerindeki etkisi,  $DİÇ=0.4$  (D).

Figure 13. Response spectrum values regarding embedment depth for EAC=0.4 (D).



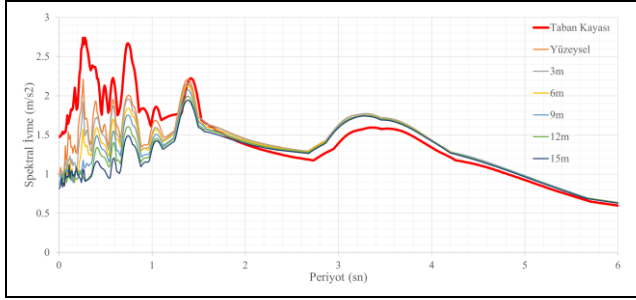
Şekil 14. Gömme derinliği değişiminin temel ivme spektrumu üzerindeki etkisi,  $DİÇ=0.6$  (D).

Figure 14. Response spectrum values regarding embedment depth for EAC=0.6 (D).



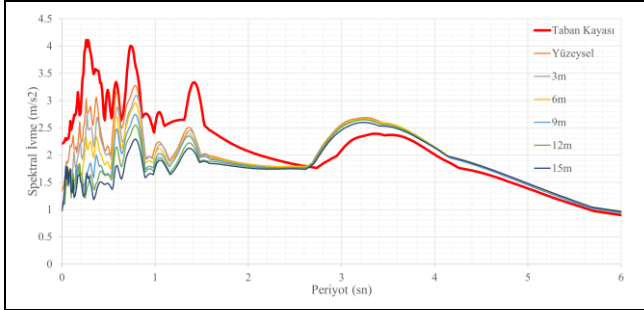
Şekil 15. Gömme derinliği değişiminin temel ivme spektrumu üzerindeki etkisi,  $DİÇ=0.2$  (K).

Figure 15. Response spectrum values regarding embedment depth for  $EAC=0.2$  (K).



Şekil 16. Gömme derinliği değişiminin temel ivme spektrumu üzerindeki etkisi,  $DİÇ=0.4$  (K).

Figure 16. Response spectrum values regarding embedment depth for  $EAC=0.4$  (K).



Şekil 17. Gömme derinliği değişiminin temel ivme spektrumu üzerindeki etkisi,  $DİÇ=0.6$  (K).

Figure 17. Response spectrum values regarding embedment depth for  $EAC=0.6$  (K).

$DİÇ$ 'nin 0.8 ve 1 olduğu değerlerde analiz ıraksadığı (divergence) için sonuçlar bu çalışmada sunulmamıştır.

Gömme derinliğinin değişimi dolayısıyla temel seviyesinde oluşan ivmelerden elde edilen spektral ivme grafiklerine bakıldığında; Gömme miktarı ( $D_f$ ) arttıkça, kısa periyot bölgesindeki ivme genliklerinde azalmanın meydana geldiği görülmektedir. Gömme derinliğinin spektral ivme üzerindeki etkisi yaklaşık olarak  $T=1.8$  sn. sonrasında kalmamaktadır.

Spektral ivmelerde en çok değişkenliğin gözlemlendiği alan olan kısa periyot alanındaki (0-1 sn.) değerler incelenmiştir. Gömme derinliğinin etkisini anlayabilmek amacıyla yüzeysel temelde oluşan ivme değeri ( $\ddot{u}_g$ ) ile diğer gömme derinliklerindeki temellerde oluşan ivmeler ( $\ddot{u}_{FIM}$ ) her bir periyot aralığı için oranlanmış ( $\ddot{u}_g/\ddot{u}_{FIM}$ ) ve aritmetik ortalamaları alınmıştır. Temeller 6 m derinlikte olduğunda %20, 9 m derinlikte

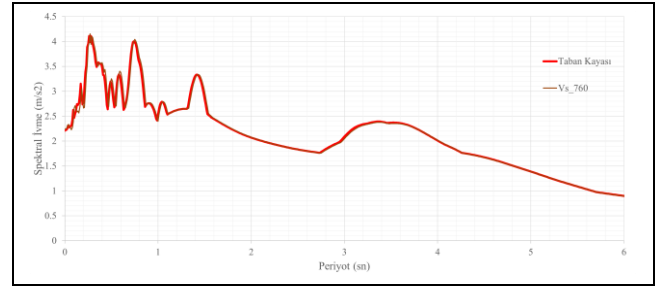
olduğunda ise %30 oranında spektral ivmelerde azalma bulgulanmıştır.

Bütün yöntemlerde (Ortak, Altsistem),  $DİÇ=0.2$  değeri 0.6'ya yükseldiğinde spektrumun 3. pik yaptığı periyoduna (1.4 sn.) yaklaştıkça bütün gömme derinliklerinde ivme genlikleri arasındaki fark azalmaktadır.

Orta-uzun periyot bölgelerine gelindiğinde ise yine  $DİÇ$  değeri yükseldikçe, uzun periyodlarda büyütme (amplifikasyon) gerçekleşmektedir (2.5-4 sn. arası).

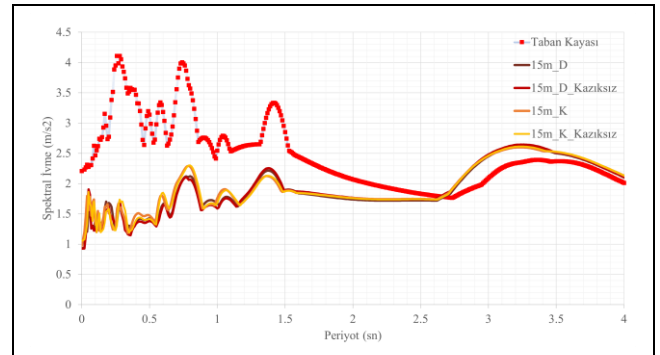
Modelin kendi içinde tanımlanması amacıyla dinamik analiz gerçekleştirilmiş ve bütün modele  $V_s=760$  m/s baz alınarak hesaplanıp ortam parametreleri atanmıştır (Tablo 4) Sonuçların eşleşip eşleşmediği kontrol edilerek sistemin tanımlanması (verifikasyon) sağlanmıştır. Yüzeysel tepki spektrumu incelendiğinde (Şekil 18) ivme değerleri, B/C zemin sınıf eşliğindeki ortamlarda beklendiği gibi bu çalışmada kullanılan profil derinliği (54 m) girdi spektrumuyla aynı değerleri vermektedir.

15 metre gömme derinliğine sahip modelde, kazıkların ve üstyapının olup/olmaması durumu (Direkt ve Altsistem Yöntem karşılaştırması) incelenmiştir. (Şekil 19) Kazıkların olup olmadığı durumunun spektral davranışı fazla etkilemediği, Üstyapının olup olmamasının ise ivmelerin pik yaptığı periyodlarda etkin olduğu bulgulanmıştır.



Şekil 18. Flac3D  $V_s=760$  m/s zemin modelinin taban kayası ve yüzeysel spektrumu karşılaştırması.

Figure 18. Flac3D  $V_s=760$  m/s soil model response spectrum comparison.



Şekil 19. Kazıkların ve üstyapının olduğu(D)/olmadığı (K) durumlardaki tepki spektrumu.

Figure 19. Response spectrum whether piles and superstructure present in the model.

#### 4 Tartışma ve sonuçlar

İncelenen her yöntemde (Ortak, Altsistem),  $DİÇ=0.2$  değeri 0.6'ya yükseltildiğinde, kısa periyot aralığının sol köşe periyoduna yaklaştıkça bütün gömme derinliklerinde ivme

genlikleri azalmaktadır. Bunun sebebinin  $D_1$  değeri arttıkça, sistemdeki doğrusal olmayan davranışın getirdiği sönümün de artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu bağlamda, doğrusal olmayan malzeme modelleriyle (Mohr Coulomb-Plastic Hardening) çalışmalar yinelenmeli ve karşılaştırılması ileri çalışma olarak önerilmektedir.

Orta ve uzun periyot aralıklarına erişildiğinde,  $D_1$  katsayısının artışıyla birlikte, yüksek periyotlu yapılar için etkin bir amplifikasyon meydana gelmektedir (2.5-4 saniye aralığı). Yapı-Kazık-Zemin Etkileşimi analizlerinde incelenen iki kritik faktörden biri olan Periyot-Uzaması, yapıların periyodunun, ankastre temelli analizlere kıyasla uzamasına yol açabilmektedir. Bu uzama, TBDY 2018 yönetmelikleri ışığında Yüksek Yapıların Yapı-Kazık-Zemin etkileşimi analizlerinde özel olarak değerlendirilmelidir; çünkü söz konusu periyot aralığına sahip yapılar, deprem yükleri altındaki yapısal eleman taleplerini (taşıma gücü ve şekil değiştirme kapasitesi) karşılayamayabilir. Bu sebepten dolayı, bu faktörlerin analizlerde dikkate alınması ve uygun tasarım stratejilerinin benimsenmesi büyük önem arz etmektedir.

YKZE etkileşiminin araştırılması amacıyla yapılan analizlerde, üst yapının modeldeki bulunmasının etkisi ve kazıkların temel altında bulunup bulunmaması incelenmiştir (Şekil 19). Grafikler incelendiğinde, tepki spektrum davranışını asıl etkileyen faktörün, üst yapının bulunup bulunmaması olduğu yönündedir. Kazıkların bulunup bulunmaması ise sınırlı sayıda olan analizlerde tasarım açısından kayda değer etki yaratmamış, özellikle 1.6 sn periyot sonrasında bütün modeller aynı tepkiyi göstermiştir. Bu amaçla doğrusal olmayan zemin malzeme modelleriyle (*Hardening Soil*, *Hardening Soil with Small Strain*) bu etkileşimin araştırılması yazar tarafından önerilmektedir.

## 5 Discussion and conclusions

In both direct and substructure methods, when the Damping Reduction Factor ( $D_1$ ) value is increased from 0.2 to 0.6, acceleration amplitudes decrease for all embedment depths as we approach the left corner period of the short period range. This decrease is thought to be due to the increased damping brought by the nonlinear behavior of the system as the  $D_1$  value increases.

Repeating and comparing studies with nonlinear material models (Mohr Coulomb-Plastic Hardening) is suggested for future work.

As we reach the medium and long period ranges, with the increase of the  $D_1$  coefficient, effective amplification occurs for high-period structures (2.5-4 seconds range). Period Elongation, one of the two critical factors analyzed in Structure-Pile-Soil Interaction (SPSI) analyses, can lead to the elongation of structures' periods compared to analyses with fixed-base foundations. This elongation should be specially considered in SPSI analyses of High Structures under TBDY 2018 regulations, as structures with such period ranges might not meet the structural element demands (bearing capacity and deformation capacity) under earthquake loads. Therefore, considering these factors in analyses and adopting appropriate design strategies is of great importance.

In analyses conducted for investigating SPSI, the presence of the superstructure in the model and whether piles are present below the foundation were examined (Figure 19). Upon examining the graphs, it appears that the main factor affecting the response spectrum behavior is the presence or absence of

the superstructure. The presence or absence of piles did not create a significant effect in the limited analyses conducted, especially after the 1.6-second period, where all models showed the same response. Therefore, investigating this interaction with nonlinear soil material models (Hardening Soil, Hardening Soil with Small Strain) is recommended by the author.

## 6 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada Ozan BİLAL fikrin oluşması, tasarımın yapılması, literatür taraması, yazım denetimi, elde edilen sonuçların değerlendirilmesi başlıklarında; Yasin FAHJAN sonuçların incelenmesi, içerik açısından makalenin kontrol edilmesi başlıklarında katkı sunmuşlardır.

## 7 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

## 8 Kaynaklar

- [1] Kausel E. "Early history of soil-structure interaction". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(9), 822-832, 2010.
- [2] Reissner E. "Stationäre, axialsymmetrische, durch eine schüttelnde Masse erregte Schwingungen eines homogenen elastischen Halbraumes". *Ingenieur-Archiv*, 7(6), 381-396, 1936.
- [3] Kausel E, Roesset JM. "Soil structure interaction problems for nuclear containment structures". *Electric Power and the Civil Engineer*, Boulder, Colorado, USA, 13 August 1974.
- [4] Roesset JM. "Soil structure interaction the early stages". *Journal of Applied Science and Engineering*, 16(1), 1-8, 2013
- [5] Whitman RV. *Soil-Structure Interaction*. Editors: Hansen RJ. Seismic Design for Nuclear Power Plants, 245-269, Cambridge, London, England, 1970.
- [6] Mylonakis G, Gazetas G. "Seismic soil-structure interaction: beneficial or detrimental?". *Journal of Earthquake Engineering*, 4(3), 277-301, 2000.
- [7] Federal Emergency Management Agency. "Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures". Washington, USA, 440, 2004.
- [8] Stewart J, Crouse C, Hutchinson T, Lizundia B, Naeim F and Ostadan, F. "Soil-Structure Interaction for Building Structures, Grant/Contract Reports (NISTGCR)". National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, USA, 12-917-21, 2012.
- [9] OGUT OC. Soil-Structure Interaction Effect of Embedded Foundation and Adjacent Buildings on Response Characteristics of Superstructures. Ph.D. Thesis, Nagoya University, Nagoya, Japan, 2017.
- [10] Fan K, Gazetas G, Kaynia A, Kausel E, Ahmad S. "Kinematic Seismic Response of Single Piles and Pile Groups". *Journal of Geotechnical Engineering*, 117(12), 1860-1879, 1991.
- [11] Kaynia AM, Kausel E. "Dynamic behavior of pile groups". *Proc. 2<sup>nd</sup> International Conference on Numerical Methods in Offshore Piling*, Texas, USA, 29-30 April 1982.
- [12] Kim S, Stewart JP. "Kinematic soil-structure interaction from strong motion recordings". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129(4), 323-335, 2003.



- [13] Rainer JH. "Simplified analysis of dynamic structure-ground interaction". *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2(3), 345-356, 1975.
- [14] Kaynia AM, Mahzooni S. "Forces in pile foundations under seismic loading". *Journal of Engineering Mechanics*, 122(1) 46-53, 1996.
- [15] Aguilar H, Avilés J. "Influencia de pilotes de fricción en la interacción dinámica suelo-estructura" *Revista Internacional de Métodos Numéricos*, 19(1), 3-18, 2003.
- [16] Avilés, J, Pérez-Rocha, LE. "Effects of foundation embedment during building-soil interaction". *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 27(12), 1523-1540, 1998.
- [17] Lu X, Chen B, Li P, Chen Y. "Numerical analysis of tall buildings considering dynamic soil-structure interaction". *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 2(1), 1-8, 2003.
- [18] Maravas A, Mylonakis G, Karabalis DL. "Dynamic characteristics of structures on piles and footings". In *4<sup>th</sup> International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Thessaloiki, Greece, 24-26 June 2007.
- [19] Padrón LA, Aznárez JJ, Maeso O. "3-D boundary element-finite element method for the dynamic analysis of piled buildings". *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 35(3), 465-477, 2011.
- [20] Nasser-Moghaddam A, Cascante G, Phillips C, Hutchinson DJ. "Effects of underground cavities on Rayleigh waves-Field and numerical experiments". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27(4), 300-313, 2007.
- [21] Bilal O. Kazık Temelli Yapıların Deprem Etkisi Altında Yapı-Kazık-Zemin Etkileşiminin İncelenmesi. Doktora Tezi, İstanbul Kültür Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2021.
- [22] Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. "Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği". Ankara, Türkiye, 30364, 2018.
- [23] Itasca Consulting Group Inc. "FLAC3D-Fast Lagrangian Analysis of Continua in Three-Dimensions, Ver. 9.0." <https://www.itascainternational.com/software/flac3d> (10.11.2023).
- [24] Venture NCJ. "Soil-Structure Interaction for Building Structures". *Nist GCR*, 12, 917-921, 2012.
- [25] Kausel E, Whitman RV, Morray JP, Elsabee F. "The spring method for embedded foundations". *Nuclear Engineering and Design*, 48, 377-392, 1978.
- [26] Day SM. "Seismic response of embedded foundations". *Preprints of Conference Proceedings of ASCE Convention and Exposition*, Chicago, USA, 16-20 October 1978.
- [27] Matlock H. "Correlations for design of laterally loaded piles in soft clay". *Proc. of the 2<sup>nd</sup> Offshore Technology Conference*, Texas, USA, 22-24 April 1970.
- [28] Hashash YMA, Park D. "Nonlinear one-dimensional seismic ground motion propagation in the mississippi embayment". *Engineering Geology*, 62, 185-206, 2001.
- [29] Vucetic M, Dobry R. "Effect of soil plasticity on cyclic response". *Journal of Geotechnical Engineering*, 117(1), 89-107, 1991.