

## DEPREM ETKİSİ ALTINDA YAPI-KAZIK-ZEMİN ETKİLEŞİMİ: BİR VAKA ANALİZİ

### STRUCTURE-PILE-SOIL INTERACTION UNDER EARTHQUAKE EFFECT: A CASE STUDY

Muhammed Selahaddin AKIN<sup>1</sup>

#### ÖZET

Derin temeller, üstyapılardan aktarılan yüklerin temel zeminleri tarafından taşınmayacağı ve/veya farklı oturmaların meydana gelmesi durumlarında tercih edilen ve genellikle üst yapı ile direk etkileşim ile inşa edilen yapısal sistemlerdir. Derin temellerin deprem etkisi altında tasarımı geoteknik mühendisliğinin güncel araştırmalarında önemli bir yer teşkil etmektedir. Ülkemizin fay hatlarıyla çevrili olması ve 6 Şubat 2023 tarihinde yaşamış olduğumuz Kahramanmaraş Depremleri depreme dayanıklı yapıların inşa edilmesinin önemini bir kez daha vurgulamıştır. Üstyapı-kazık ve zeminin birbirini karşılıklı olarak etkilemesi yapı-kazık-zemin etkileşimi olarak adlandırılmaktadır. 2018 yılında yayımlanan Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018) ile derin temellerin üst yapı ve zemin ile olan etkileşimleri Ülkemizde ön plana çıkarılmıştır. TBDY-2018'de yapı-kazık-zemin etkileşiminin analiz edilmesi için Yöntem I, Yöntem II ve Yöntem III olarak adlandırılan üç adet yöntem önerilmiştir. Bu bildiri kapsamında İstanbul'da güçlendirilmiş bir yapı altında bulunan kazıkların TBDY-2018'e göre yapı-kazık-zemin etkileşimi hesaplarına (Yöntem III) yer verilmiştir. Yöntem III analizleri için öncelikle sahaya özel zemin davranış analizleri gerçekleştirilmiş ve deplasman talepleri öğrenilmiştir. Sahaya özel zemin davranış analizleri için iki adet deprem seti kullanılarak parametrik analizler uygulanmıştır. Daha sonra ise kazık ile zemin ortamı arasında görelî kuvvet-yer değıştirme ilişkisi, doğrusal olmayan P-y yayları ile uygulanmıştır. P-y yayları modellendikten sonra üstyapı yükleri kazıklara etki ettirilerek kinematik ve eylemsizlik etkileşimi analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizler TBDY-2018'de verildiği şekilde birleştirilmiş ve yapı-kazık-zemin etkileşimi analizleri tamamlanmıştır. Sonuç olarak, bu bildiri incelenen vaka analizinin derin temellerin tasarlanmasında Yöntem III'ün kullanılması ile yapılan projelendirmelerde mühendis ve araştırmacılara yol gösterici olacağı düşünülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** *Yapı-kazık-zemin etkileşimi, deprem, vaka analizi*

#### ABSTRACT

Deep foundations are structural systems that are preferred in cases where the loads transferred from the superstructures cannot be carried by the foundation soils and/or different settlements occur and are generally constructed by direct interaction with the superstructure. Earthquake design of deep foundations has an important place in current research in geotechnical engineering. The fact that our country is surrounded by fault lines and the Kahramanmaraş Earthquakes we experienced on February 6, 2023 once again emphasized the importance of constructing earthquake-resistant structures. The interaction of pavement-pile and soil mutually is called structure-pile-soil interaction. With the Turkish Building Earthquake Code (TBDY-2018) published in 2018, the interaction of deep foundations with the superstructure and ground has been highlighted in our country. In TBDY-2018, three methods, named Method I, Method II and Method III, were proposed to analyze the structure-pile-soil interaction. Within the scope of this paper, the structure-pile-soil interaction calculations (Method-III) of the piles under a reinforced structure in İstanbul according to

<sup>1</sup> İnşaat Yüksek Mühendisi, T.C. Kartal Belediye Başkanlığı, [msehaddinakin@gmail.com](mailto:msehaddinakin@gmail.com) (Sorumlu yazar)

TBDY-2018 are given. For Method-III analyses, first of all, site-specific soil behavior analyzes were performed and displacement demands were learned. For site-specific soil response analyzes, parametric analyzes were applied using two earthquake sets. Then, the relative force-displacement relationship between the pile and the soil environment is applied with non-linear P-y springs. After the P-y springs were modeled, the pavement loads were applied to the piles and kinematic and inertial interaction analyzes were performed. These analyzes were combined as given in TBDY-2018 and structure-pile-soil interaction analyzes were completed. As a result, it is thought that the case analysis examined in this paper will guide engineers and researchers in the projects made by using Method-III in the design of deep foundations..

**Keywords:** *Structure-soil-pile interaction, earthquake, case study*

## 1. GİRİŞ

Günümüzde şehirlerin artık metropollere dönüşmesi, özellikle teknolojik gelişmeler ve iş olanaklarının şehir merkezlerinde yoğunlaşması ile yüksek binaların, sanayi ve liman yapılarının inşası hız kazanmış; bu yapıların projelendirilmesi için mühendislik yaklaşımları önem kazanmaya başlamıştır. Aynı zamanda nüfusun hızlı artışı inşa edilecek arazilerin yetersizliği sorununu da beraberinde getirmekte ve yapılması planlanan yapılar için uygun arazi seçimini zorlaştırmaktadır. Bu sebepler göz önünde bulundurulduğunda tasarlanan binaların, köprüler ve viyadüklerin, baraj gövdelerinin üstyapı yüklerinin inşa sahasında mevcut bulunan zemin profillerine taşıtılması gerekliliğini de beraberinde getirmiştir. Bir geoteknik mühendisliği problemi olarak karşılaşılan bu durum hem taşıma gücü problemlerinin çözümünü hem de oturma miktarı sınırlarının izin verilebilir limitlerde tutulmasını gerektirmektedir. Yapı yüklerinin taşınması ve zemin ortamına dağıtılmasında ilgili zemin ortamının taşıma gücünün yetersiz kalması, inşaat mühendisliği bilimini mevcut zeminin geoteknik özelliklerinin iyileştirilmesine ya da alternatif temel yöntemleri uygulanmasına yönlendirmektedir.

Günümüzde sıklıkla uygulanan yüzeysel temeller (mütemadi, radye) üstyapı yüklerinin artması ve zeminlerin geoteknik özelliklerinin yetersiz kalması nedeniyle derin temellerin kullanımını gitgide yaygınlaştırmakta ve/veya zorunlu hale getirmektedir. Derin temeller, genel olarak derinliği plan görünümündeki plan genişliğinin iki buçuk katından fazla olan temel türünü ifade etmek için kullanılır ve kazıklı temeller, kesonlar veya derin ayak temel türlerini kapsar. Bunların içinde en yaygın olarak kullanılanı kazıklı temellerdir (Birand, 2007).

Bu çalışma kapsamında özellikle 2018 yılında yayımlanan Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği ile ülkemizde de kullanılmaya başlanan ve kazıkların deprem davranışlarının incelenmesini kapsayan yapı-kazık-zemin etkileşimi yöntemlerinden biri olan Yöntem III konusu irdelenmektedir. Çalışmada İstanbul ilinde bulunan mevcut bir yapı altında yer alan kazıkların deprem performansı değerlendirilecektir.

## 2. DOĞRUSAL OLMAYAN İTME İLE KAZIK-1 BOYUTLU ZEMİN ETKİLEŞİMİ

Yapı-zemin etkileşimi en genel şekilde, deprem etkisi altında zemin ortamı ve (eğer varsa kazıklar) ile üstyapının birlikte göz önüne alındığı yapı-zemin sisteminde, yapı ve zeminin birbirini karşılıklı olarak etkilemesi olarak tanımlanır. Ana kayadan tanımlanan ve zemin ortamı içerisinde yayılarak yapı tabanına ulaşan deprem dalgaları kısmen yapı temelinden zemin ortamına geri dönmekte, kısmen de üstyapıya geçerek onun titreşimine yol açmakta ve tekrar zemin ortamına dönmektedir. Yapı-kazık-zemin etkileşimi ise genel olarak iki alt başlık altında incelenebilir. Bunlar direkt (doğrudan) yöntem ve altsistem yöntemleridir (Aydınöğlü, 2012).

Direkt yöntemde; bina temeli, kazıklar ve zeminin bir arada modellenip analiz edildiği durumdur. Kuvvetli yer hareketi altında gerek üst yapıda gerekse zeminde meydana gelebilecek doğrusal olmayan şekil değiştirmelerin “üstyapı-zemin ortak sistemi”nin zaman tanım alanında analizi ile doğrudan elde edilebilme olanağı teorik olarak mevcuttur. Ancak üstyapı ve alt yapı sistemlerinin birlikte modellenebilir olması teorik olarak her ne kadar mümkünse de çözümler karmaşık ve zordur. Altsistem yönteminde ise kazıklarla birlikte zemin ortamı ve üstyapı ayrı ayrı birer altsistem olarak modellenir. Bu modelleme pratikteki iş bölümüne de uygundur. Uygulama projelerinde zemin-kazık altsistemi ile üstyapı altsistemi, farklı uzmanlık alanlarındaki mühendislik grupları tarafından ayrı ayrı modellenir ve farklı bilgisayar yazılımları ile analiz edilir (Aydınöğlü, 2012).

TBDY-2018'e göre yapı-kazık-zemin etkileşimi üç başlık altında toplanmıştır. Bunlar Yöntem I, Yöntem II ve Yöntem III'tür. Bu çalışma kapsamında **doğrusal olmayan itme analizi ile kazık-1 boyutlu zemin etkileşimi** olarak da anılan Yöntem III uygulanarak bir vaka analizi gerçekleştirilmiştir. Yöntem III'te temel-kazık-zemin kinematik etkileşim hesabı, zaman tanım alanında kazık-1 boyutlu zemin etkileşim hesabı ile yapılan hesabın basitleştirilmiş şekline karşılık gelmektedir. Kinematik etkileşim hesabı modeli aşağıdaki şekilde oluşturulmaktadır:

- Kazıklar ilgili deprem yönünde çubuk elemanlar olarak modellenir.
- Zemin ortamı için herhangi bir modelleme yapılmaz. Kazıkların her birim metre için kazık düğüm noktasına kazık ile zemin arasındaki göreceli kuvvet-yer değiştirme ilişkisi P-y yayları ile modellenir.
- Yapı temeli (varsa eğer bodrumlarla beraber) kütsüz, sonsuz bir rijit eleman olarak modellenir.
- Tek boyutlu serbest zemin davranış analizlerinde göz önüne alınan deprem doğrultusunda taban kayasından yatay doğrultuda etkililen depremlerden her biri için, zemin profili boyunca kazık düğüm noktaları hizalarında elde edilen toplam yer değiştirmelerin zamana göre maksimumları dikkate alınır.

Etkileşim analizleri sonucu her bir deprem doğrultusu için kullanılan sayıda depremin her deprem için ayrı ayrı yapılan analizlerin sonuçlarının en büyük mutlak değerlerinin ortalaması alınır. Eylemsizlik etkileşim hesabında ise yapının doğrusal hesap modelinde azaltılmış DD-2 deprem düzeyi ile yapılan analiz sonucunda, dikkate alınan kazıklara etkiyen düşey ve yatay etkiler hesaplanır. Bu yüklere bağlı olarak da iç kuvvetler hesaplanır.

### 3. VAKA ANALİZİ

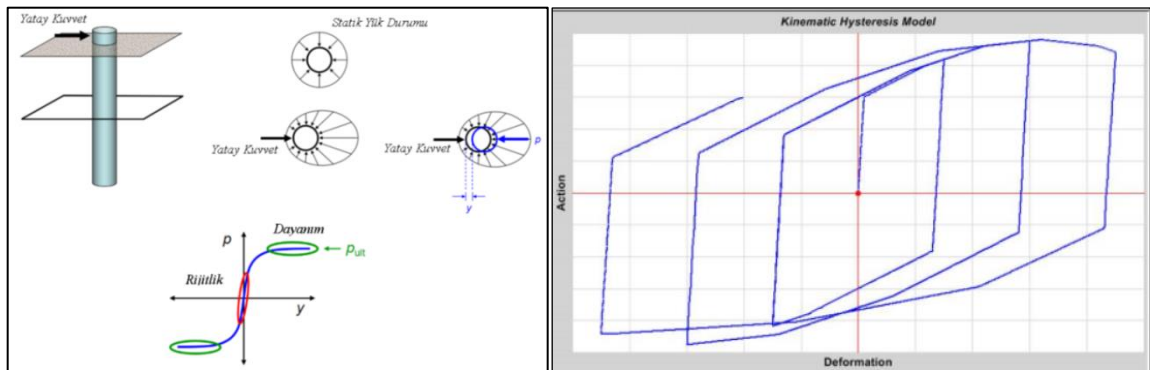
Bu çalışma kapsamında ele alınan vaka analizinde İstanbul ilinde bulunan mevcut bir işyeri binasının temelini altındaki mevcut çapı  $\varnothing 120$  cm olan fore kazıkların etkileşim analizleri irdelenecektir. Yapı iki bodrum + zemin + yedi normal + çatı katı olmak üzere on bir kattan oluşmaktadır. İdealize zemin profilini Tablo 1'de verilmiş olup yapı temeli çok katı kil tabakasına oturmakta olup yeraltı suyu seviyesi yapı temeli hizasındadır.

Tablo 1. İdealize zemin profili

Derinlik (m)	Zemin Tabakası
1,00-4,00	Bitkisel Toprak
4,00-6,00	Çok Katı Kil (CI-CH)
6,00-50,00	Sert Kil (CH)

#### 3.1. Zemin Yaylarının Belirlenmesi

P-y yayları kazık ile zemin ortamı arasındaki göreceli kuvvet-yer değiştirme ilişkisini modellemek için kullanılmaktadırlar (Şekil 2). Her bir kazık düğüm noktasında kazık ile zemin ortamı arasındaki ilişki sert killer için Reese, L. C., Cox, W. R. and Koop, F. D. tarafından önerilen çevrimsel yükleme koşulu ve su seviyesi altındaki katı killerin P-y eğrisi hesapları dikkate alınarak oluşturulmuştur.

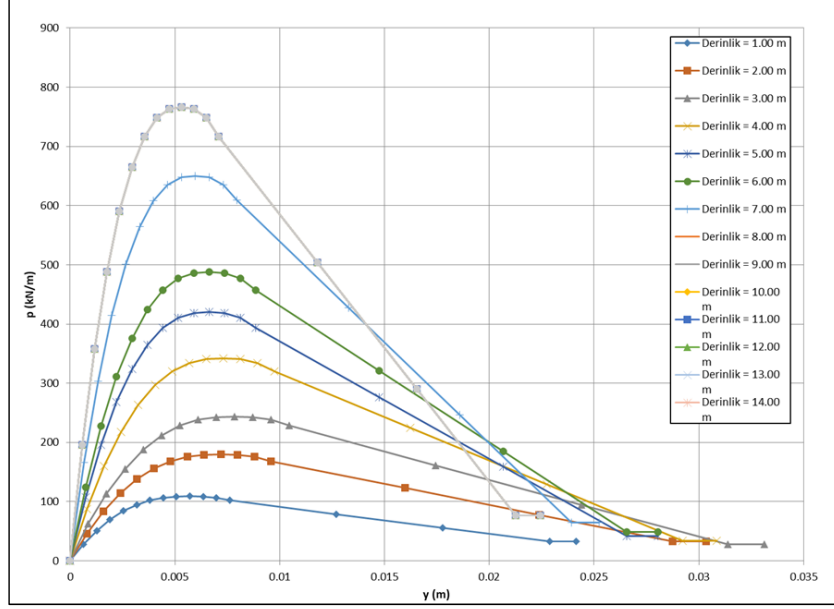


Şekil 2. P-y eğrilerinin tanımlanması

Kazıklarda grup etkisinin yaklaşık olarak gözönüne alınması için TBDY-2018 Denk.(16C.1)'de verilen ampirik bağıntı ile hesaplanan azaltma katsayıları  $\beta_G$ , P-y yayları için tanımlanan kuvvet-yerdeğiştirme eğrilerinin

kuvvet eksenine uygulanmaktadır (Denklem 1). Kazıklarda grup etkisinin de dikkate alındığı P-y yayları Şekil 3'te verilmiştir.

$$\beta_G = 0,2 * [(1 - \beta_{G1}) * s - (1 - 6 * \beta_{G1})] \quad (1)$$



Şekil 3. Kazıkların düğüm noktalarına etkitilen P-y eğrileri

### 3.2. Sahaya Özel Deprem Kayıtlarının Seçimi ve Kazıkların Düğüm Noktalarına Etkitilen Deplasmanların Hesabı

TBDY-2018 Bölüm 2.4 ve Bölüm 2.5'te verilen kriterlere göre deprem kayıtları seçimi gerçekleştirilmiştir. Kayıtların seçimi gerçekleştirildikten sonra deprem yer hareketi kayıtları SeismoMatch2018 bilgisayar programı kullanılarak üretilmiştir. SeismoMatch yazılımı Al-Atik ve Abrahamson (2010) tarafından zaman tanım aralığı için önerilen yöntem kullanılarak geliştirilmiştir. Bu yöntemde spektrum uyumlu yer hareketinin elde edilmesi için sonlu süreli dalgacık (wavelet) eklenmesi veya çıkarılması ile hedef spektruma uyumlu deprem kayıtları üretilmektedir. Bu yaklaşımla elde edilen kayıtların hedef spektruma oldukça yakın ve uyumlu olduğu görülmektedir. Dalgacıkların oluşturulması için SeismoMatch yazılımında iki model kullanılmaktadır. Bu temsili iki dalgacık modellerinin birincisi "zamanda tersinirilmiş tek dereceli sistem darbe davranış ivmesi" ikincisi ise "filtrelenmiş kosinüs dalgası" yöntemidir. Uygulanan her iki dalgacık modeli sonucunda istenilen frekans içeriğinde en büyük ivme değerlerine göre faz içeriğinde önemli bir değişiklik olmadan yer hareketleri elde edilebilmektedir. Vaka örneği araştırmasında parametrik çalışma kapsamında ilk olarak iki adet deprem seti (11'er adet deprem kaydı) PEER NGA West2 Veri Bankasından (PEER, 2013) yer hareketi kayıtları incelenerek istenilen özelliklerde dikkate alınarak seçilmiştir. Daha sonra seçilen kayıtlar SeismoMatch bilgisayar programı kullanılarak TBDY-2018'de belirtilen şartları sağlayan 2x11 adet yer hareketi kaydı belirlenmiştir. Kullanılan birinci set yer hareketlerinin listesi Tablo 2'de, ikinci set yer hareketlerinin listesi ise Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 2. Seçilen deprem kayıtları (birinci deprem seti)

Deprem	Yıl	Deprem Büyüklüğü (Mw)	Fay Mekanizması	İstasyon Adı	Deprem Merkezine Uzaklık (km)	Vs <sub>30</sub> (m/s)
Kobe_Japan	1995	6,90	Strike Slip	Nishi-Akashi	7,1	609
Kocaeli_Turkey	1999	6,93	Strike Slip	Arcelik	13,5	523
Duzce_Turkey	1999	7,51	Strike Slip	Mudurnu	34,3	535

Manjil_Iran	1990	6,69	Strike Slip	Abbar	12,6	724
Hector Mine	1999	6,90	Strike Slip	Amboy	43,1	383
Hector Mine	1999	7,51	Strike Slip	Joshua Tree	31,1	379
Landers	1992	7,37	Strike Slip	Forest Falls Post Office	45,3	436
Landers	1992	7,13	Strike Slip	Morongo Valley Hall (GEO#58)	40,7	368
Darfield_Nwe Zealand	2010	7,01	Strike Slip	CSHS	43,6	638
Darfield_Nwe Zealand	2010	6,90	Strike Slip	OXZ	30,6	482
El Mayor-Cucapah_Mexico	2010	6,90	Strike Slip	Sam W, Stewart	32,2	503

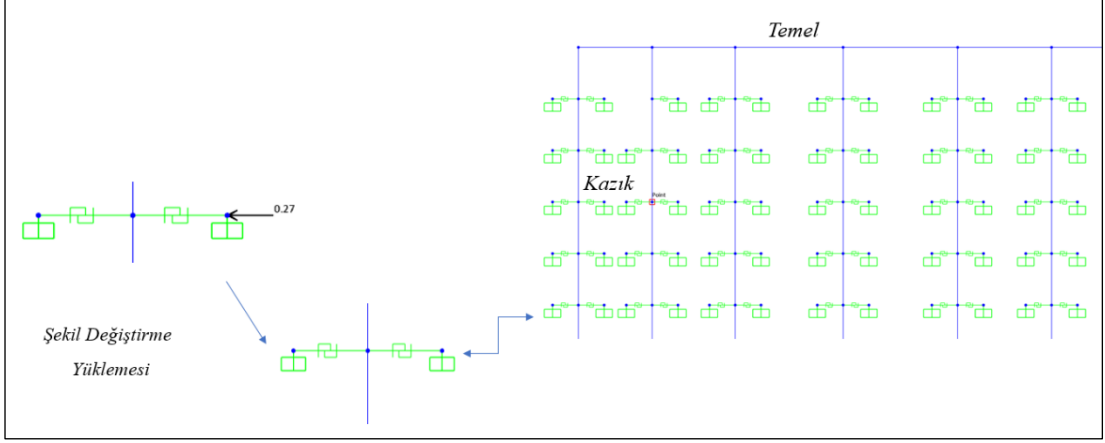
Tablo 3. Seçilen deprem kayıtları (ikinci deprem seti)

Deprem	Yıl	Deprem Büyüklüğü (Mw)	Fay Mekanizması	İstasyon Adı	Deprem Merkezine Uzaklık (km)	V <sub>S30</sub> (m/s)
Irpina_Italy-01	1980	6,9	Normal	Bagnoli Irpino	8,18	649,67
Loma Prieta	1989	6,93	Reverse Oblique	Coyote Lake Dam - Southwest Abutment	20,34	561,43
Duzce_Turkey	1999	7,14	Strike Slip	IRIGM 487	2,65	690
Northridge-01	1997	6,69	Reverse	Pacoima Kagel Canyon	7,26	508,08
Kobe_Japan	1995	6,9	Strike Slip	Nishi-Akashi	7,08	609
Landers	1992	7,28	Strike Slip	Forest Falls Post	46,3	436
Manjil_Iran	1990	7,37	Strike Slip	Abbar	12,55	723,95
Hector Mine	1999	7,13	Strike Slip	Hector	11,66	726
Cape Mendocino	1992	7,01	Reverse	Bunker Hill FAA	12,24	566,42
Iwate_Japan	2008	6,9	Reverse	Minase Yuzawa	21,25	655,45
Iwate_Japan	2008	6,9	Reverse	Kurihara City	12,85	512,26

Seçilen deprem kayıtları sonrası sahaya özel zemin davranış analizlerinin ve deprem etkisi altında zemin ortamında meydana gelecek deplasmanların hesaplanmasında DeepSoil v7.0.22 bilgisayar programı kullanılmıştır. DeepSoil programında modellenen zemin profillerinin zemin davranış analizleri için doğrusal olmayan analiz metodu kullanılmıştır. Zemin davranış analiz çözümleri ise zaman tanım alanında yapılmıştır. Tek boyutlu serbest zemin davranış analizlerinde gözönüne alınan deprem doğrultusunda taban kayasından yatay doğrultuda etkitilen depremlerden her biri için, zemin profili boyunca kazık düğüm noktaları hizalarında elde edilen toplam yerdeğiştirmeler hesaplanmıştır.

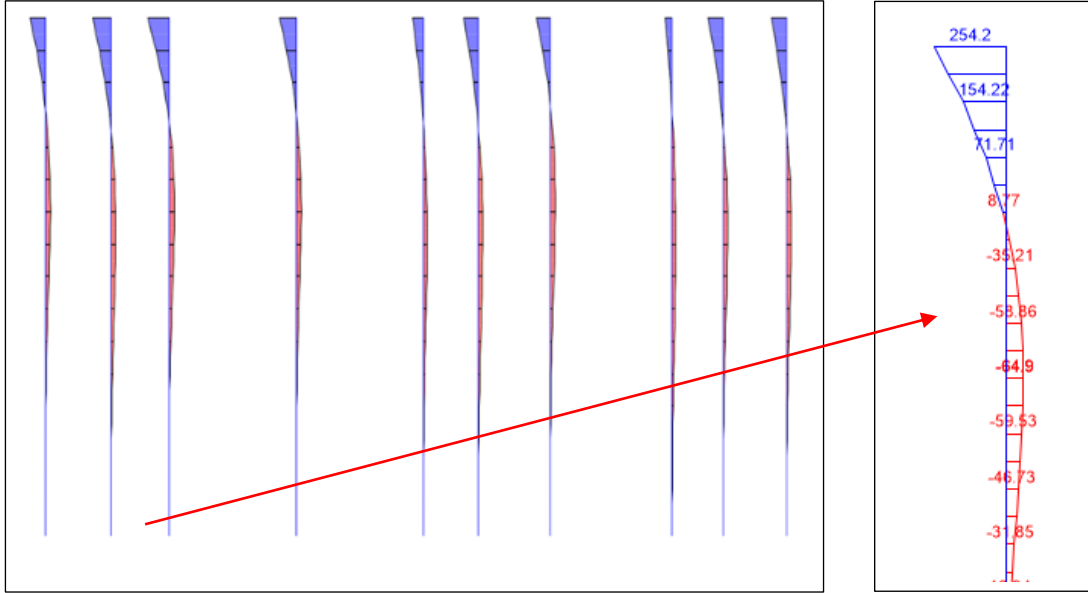
### 3.2. Analiz Sonuçları

Bölüm 2’de tanımlanan kinematik etkileşim adımları göz önünde bulundurularak yapının eylemsizlik özelliğinin dikkate alınmadığı temek-kazık-zemin sisteminin hesap modeli SAP2000 v21.0 sonlu elemanlar bilgisayar programı ile Şekil 4’teki gibi oluşturulmuştur.

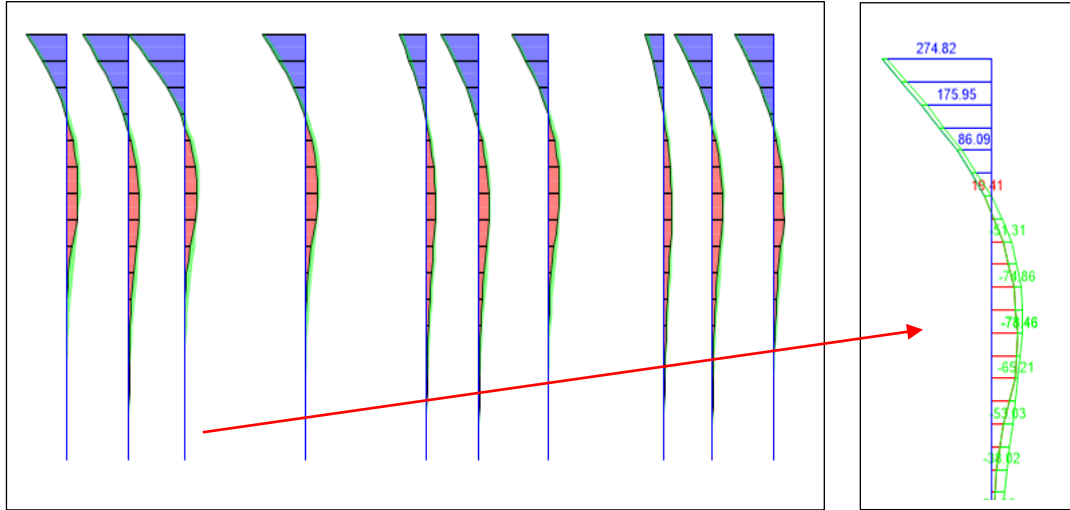


Şekil 4. Hesap modeli

DeepSoil yazılımı ile elde edilen yer değiştirmeler bir uçlarında kazık düğüm noktalarına bağlı olan doğrusal olmayan P-y yaylarının öteki uçlarına basınç yönünde statik olarak uygulanmıştır. Daha sonrasında ise kazıklardaki iç kuvvet talepleri, yapılan analizlerin her birinden elde edilen sonuçlarının en büyük mutlak değerinin ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Eylemsizlik etkileşim hesabında ise yapının doğrusal hesap modelinde azaltılmış DD-2 deprem düzeyi ile yapılan analiz sonucunda, dikkate alınan kazıklara etkileyen düşey ve yatay etkiler hesaplanmıştır. Bu yüklere bağlı olarak da iç kuvvetler hesaplanmıştır. Eylemsizlik etkileşim hesabı sonucunda kazıklarda oluşan iç kuvvetler ile kinematik etkileşim hesabında oluşan iç kuvvetler birleştirilerek kazıkların tasarımı yapılmıştır. Birinci deprem seti kullanılarak gerçekleştirilen Yöntem III analizleri sonucu elde edilen moment grafiği ve kritik kazığa ait moment değerleri (kNm) Şekil 5'te, ikinci deprem seti kullanılarak gerçekleştirilen Yöntem III analizleri sonucu elde edilen moment grafiği ve kritik kazığa ait moment değerleri ise (kNm) Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 5. Yöntem III sonucu elde edilen moment grafiği ve değeri (birinci deprem seti için)



Şekil 6. Yöntem III sonucu elde edilen moment grafiği ve değeri (ikinci deprem seti için)

TBDY-2018 EK16C'ye göre yapılan analizler sonucunda  $\varnothing 120$ cm çapındaki kazıkların moment kapasite oranı birinci deprem seti kullanılarak gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre 0.13, ikinci deprem seti kullanılarak gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre ise 0.16 olarak hesap edilmiş ve Yöntem III analiz adımları tamamlanmıştır.

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018) kapsamında tanımlanan yapı-kazık-zemin etkileşimi analizlerinden Yöntem III olarak adlandırılan “doğrusal olmayan itme kazık-1 boyutlu zemin” analizinin iki adet deprem yer hareketi seti kullanılarak bir vaka örneği gerçekleştirilmiştir.

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen analizler ile  $\varnothing 120$  cm çapındaki kazıkların birinci ve ikinci deprem seti ile gerçekleştirilen Yöntem III analizleri sonucunda kazık kapasite oranlarının düşük olduğu ve güvenli bir tasarım gerçekleştirildiği sonucuna varılmıştır.

Bu vaka analizinin Yöntem III'ün kullanımının parametrik bir süreçle sunulmuş olması, yapı-kazık-zemin etkileşimi analizlerinin Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği TBDY-2018 ile zorunlu hale getirilmesi ve hali hazırda konu ile ilgili az sayıda kaynak bulunması nedenleri ile inşaat mühendislerine yol gösterecek nitelikte olduğu düşünülmektedir.

#### TEŞEKKÜR

*Yüksek lisans tez çalışmamda emeklerini ve desteklerini benden esirgemeyen yüksek lisans tez danışmanım, değerli hocam Doç. Dr. Utkan MUTMAN'a teşekkürlerimi her daim borç bilirim.*

#### KAYNAKLAR

- Akin, M.S. (2021), “Deprem Etkisi Altında Yapı-Kazık-Zemin Etkileşimi”, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Al-Atik L., Abrahamson N., Bommer J. J., Scherbaum F., Cotton F., Kuehn N. (2010), “The Ability of Ground-Motion Prediction Models and Its Components”, *Seismological Research Letters*, 81, 5, 794-801.
- Aydinoğlu, M. N. (2012), “Zayıf Zeminlerde Yapılan Binalarda Deprem Etkisi Altında Yapı-Kazık-Zemin Etkileşimi”, İzmir TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası.
- Birand, A. A. (2007), “Kazıklı Temeller (2)”, Teknik Yayınevi.
- Reese, L. C., Cox, W. R. and Koop, F. D. (1975), “Field testing and analysis of laterally loaded piles in stiff clay,” *Proc. 7th Offshore Technology Conference*, Paper No. OTC 2321, Houston, Texas, pp. 671-690.
- Wolf, J. P. (1985), “Dynamic soil-structure interaction, Prentice-Hall, Englewood Cliffs,” New Jersey.