

Temel Kenarlarındaki Yayların Kazıklı Temellere Etkisi: TBDY 2018 Yöntem 3 Baz Alınarak Sonlu Elemanlar Analizi

IMPACT OF SPRINGS AT FOUNDATION EDGES ON PILE FOUNDATIONS: A FINITE ELEMENT ANALYSIS REGARDING TBDY 2018 METHOD 3

Emre ERBEK¹, Ozan BİLAL²
İlknur Kara³, Yasin Fahjan⁴

ÖZET

Yapı Kazık Zemin Etkileşimi (YKZE) analizlerinde, zemin, kazık ve yapı modellemesinin doğruluğu, elde edilecek sonuçların anlamlılığı açısından büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda yapılan araştırma, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 (TBDY 2018) hükümleri dikkate alınarak, temel kenarlarına zemin-kazık-yapı etkileşim elemanları olarak yay elemanlarının eklenmesinin, kazık iç kuvvetleri üzerindeki etkilerini Yöntem 3 kullanılarak incelemiştir. Araştırma kapsamında, SAP2000 programı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi ile analizler yapılmıştır. Üç boyutlu modelleme yöntemiyle oluşturulan kazıklı temellerde, temel kenarlarına bodrum yapısını simüle eden yay elemanlarının eklenmesi, zemin-kazık-yapı etkileşimlerinin daha gerçekçi bir şekilde modellenmesine imkân tanımaktadır. Araştırma sonuçları, yay elemanlarının kazıklı temellerin kenarlarına yerleştirilmesinin, kazıkların moment ve kesme kuvveti değerlerini önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Bu bulgular, kazıklı temellerin kenarlarındaki yay elemanlarının, geoteknik mühendisliği, yapı mühendisliği ve deprem mühendisliği disiplinlerinde, özellikle kazık iç kuvvetlerinin karmaşıklığını anlamada kritik bir rol oynadığını ortaya koymaktadır. Bu çalışma kazık iç kuvvetlerinin doğru bir şekilde hesaplanmasında yay elemanlarının kullanımının önemini vurgulamakta ve bu konuda yapılan modellemelerin daha gerçekçi sonuçlar vermesine katkıda bulunmayı amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: TBDY 2018; Yöntem 3; Yay Etkisi; Temel Kenarları; Kazıklı Temeller; Zemin-Kazık-Yapı Etkileşimi; Sonlu Elemanlar Yöntemi; Kazık iç Kuvvetleri

¹ İnş. Yük. Müh., Geoproje, emreerbek@geoproje.com.tr

² Dr. İnş. Müh., Geoproje, ozanbilal@geoproje.com.tr (Sorumlu yazar)

³ Dr. İnş. Müh., Gebze Teknik Üniversitesi, filknur@gyte.edu.tr

⁴ Prof. Dr., İstanbul Teknik Üniversitesi, fahjan@itu.edu.tr

ABSTRACT

In Soil-Structure-Pile Interaction (SPSI) analyses, accurate modeling of the soil, pile, and structure is crucial for obtaining meaningful results. This study investigates the effects of incorporating soil-pile-structure interaction elements, specifically spring elements, at the foundation edges according to the Turkish Building Earthquake Code 2018 (TBEC 2018), using Method 3. The analyses were conducted using the finite element method with the aid of SAP2000 software. In the three-dimensional modeling of piled foundations, the addition of springs at the foundation edges, representing the basement structure, highlights the significance of these elements in more realistically simulating soil-pile-structure interactions. The study demonstrates that placing spring elements at the edges of piled foundations significantly influences the pile's moment and shear force values. By elucidating the critical role of springs at the edges of piled foundations, this research contributes to the understanding of the complexities of pile internal forces within geotechnical, structural, and earthquake engineering disciplines. The findings emphasize the importance of using spring elements for accurate computation of pile internal forces, enhancing the realism of modeling efforts in this field.

Keywords: TBDY 2018; Method 3; Spring Effect; Foundation Edges; Pile Foundations; Soil-Pile-Structure Interaction; Finite Element Method; Pile Internal Forces

1. GİRİŞ

Kazıklı temel sistemleri, zayıf zeminler üzerindeki yapılar için önemli bir çözüm sunarak, yükleri doğrudan taşıyıcı zemin katmanlarına aktarır ve böylece yük dağılım alanını artırarak taşıma gücünü iyileştirir, oturma problemlerini minimize eder. Bu sistemlerin kullanım alanı oldukça geniştir; köprülerden yüksek binalara, deniz yapılarından altyapı tesislerine kadar birçok yapısal projede tercih edilmektedir. Dinamik Yapı-Kazık-Zemin Etkileşimi (YKZE), yapıların doğal periyodunu etkileyerek zeminin tepki spektrumunun tasarım spektrumundan ayrışmasına yol açabilir (FEMA P-2091, 2021), sınılaşma sonucu artan boşluk suyu basınçları sebebiyle etkili gerilmenin düşmesi kazıklarda ek dayanım taleplerine neden olabilir (Liyanapathirana, 2005). Türkiye gibi sık sık depremlerle karşılaşan ve deprem kuşağında yer alan ülkemiz için bu dinamik etkileşimi doğru bir şekilde anlamak hem ekonomik hem de manevi açıdan ayrı ayrı öneme sahiptir. Bu bağlamda, YKZE'nin doğru modellenmesi, yapısal tasarım ve analizlerin doğruluğu için temel bir gerekliliktir.

Bu çalışma, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 (TBDY 2018) hükümlerine dayanarak, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak üç boyutlu modellenmiş kazıklı temeller üzerinde YKZE analizleri gerçekleştirilmiştir. SAP2000 yazılımı kullanılarak, temel kenarlarına gömme derinliğini simüle eden yay elemanlarının kazık iç kuvvetleri üzerindeki etkileri basitçe gösterilmiştir.

Literatürde, Gömme derinliğinin etkisine yönelik yapılan çalışmalar bulunmaktadır (Bilal, 2021), (Bilal ve Fahjan, 2024) fakat Yöntem II ve Yöntem III için gerçekleştirilen analizler için yapılan literatür çalışmalarında yay elemanlarının kazıklı temellerin kenarlarına

atanmasının dikkate alındığı bir çalışma ile karşılaşılmamıştır. Bu çalışma, yay elemanlarının etkilerini değerlendirerek, yapı-kazık-zemin etkileşimi modellerinin daha gerçekçi ve doğru sonuçlar vermesinde bulunmayı amaçlamaktadır.

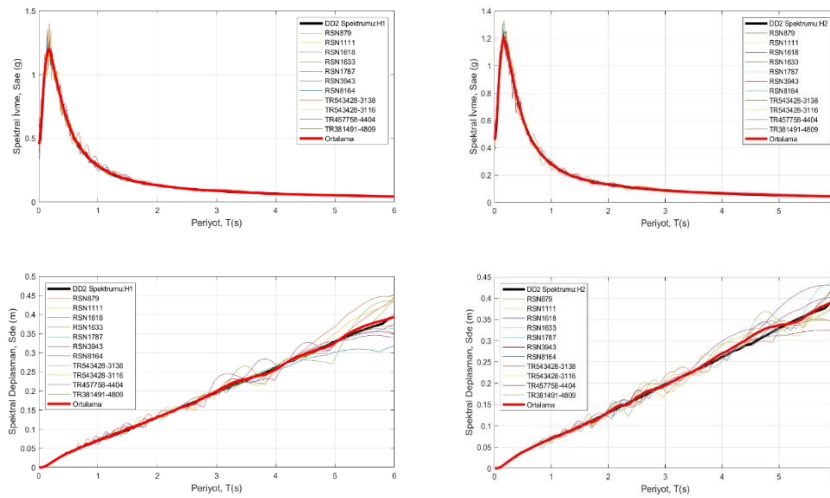
2. YÖNTEM

2.1 Deprem Kayıtları

Araştırmanın Yapı-Kazık-Zemin Etkileşimi hesapları, Yöntem III ile yapılacak analizler için DD-2 deprem seviyesi yer hareketleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Depremler tasarım spektrumuna göre ölçeklendirilip uyuşumu sağlanarak kullanılmıştır. Mühendislik kayası ($V_s=760$ m/sn) seviyesinden (275 m) girdi olarak kullanılan DD-2 deprem seviyesi için yer hareketleri tabloları Tablo 1’de; DD-2 deprem düzeyi, H1 ve H2 yönleri için spektral ivme ve spektral deplasman grafikleri Şekil 1’de sunulmaktadır.

Tablo 1. Deprem Yer Hareketi Seviyesi DD2 için seçilen Depremler

Dep Num	Deprem Adı	Dep. Büy.	Mekanizma	Rjb	Rrup	Vs30	SF
RSN879	Landers	7.28	strike slip	2.2	2.2	1369	0.65
RSN1111	Kobe_Japan	6.9	strike slip	7.1	7.1	609	0.54
RSN1618	Duzce_Turkey	7.14	strike slip	8.0	8.0	638	1.91
RSN1633	Manjil_Iran	7.37	strike slip	12.6	12.6	723	0.64
RSN1787	Hector Mine	7.13	strike slip	10.4	11.7	726	0.80
RSN3943	Tottori_Japan	6.61	strike slip	9.1	9.1	616	1.60
RSN8164	Duzce_Turkey	7.14	strike slip	2.7	2.7	690	1.01
TR543428_3138	Kahramanmaraş-Pazarcık	7.8	strike slip	2.0	2.0	618	0.23
TR543428_3116	Kahramanmaraş-Pazarcık	7.8	strike slip	18.7	18.7	868	1.37
TR457758_4404	Sivrice(Elazığ)	6.8	strike-slip	18.6	18.6	1380	1.18
TR381491_4809	EgeDenizi_Mugla	6.5	Normal	12.6	12.6	747	2.25



Şekil 1. Seçilen Deprem Yer Hareketlerine Ait (DD-2 Deprem Düzeyi için Benzeştirilmiş) H1 ve H2 Yönü Spektral ivme ve Spektral Deplasman Grafikler

2.2. Zemin Davranış Analizleri (ZDA)

Deprem tehlikesi altındaki bölgelerde, özellikle heterojen ve tabakalı zemin yapısına sahip alanlarda, dinamik yer hareketi parametrelerinin (maksimum ivme, maksimum deformasyon, yüzey ivme kayıtları) doğru ve güvenilir bir şekilde tahmin edilmesi yapısal analizler açısından önemli bir gerekliliktir. Deprem dalgalarının farklı zemin birimleri içinde geçişi sırasında yerel dalga yayılma karakteristiklerine bağlı olarak büyüme veya küçülme eğiliminde olması, zemin ortamlarının çevrimsel yükler altındaki doğrusal olmayan davranışı ve sönümlenme özellikleri yüzeyde karmaşık ve değişken tepki spektrumlarının ortaya çıkmasına neden olmaktadır.

Bu bağlamda, incelenen saha içerisinde deprem etkisi altında oluşan yer hareketinin zemin tabakaları boyunca nasıl değiştiğinin kapsamlı bir analizi ve YKZE analizlerine altlık olacak deplasman verilerinin elde edilmesi amacıyla DEEPSOIL v7 (Youssef M. A. Hashash, 2022) yazılımı kullanılmıştır.

Modelin oluşturulması: Zemin profilinin jeofiziksel ve geoteknik parametrelerinin incelenerek dinamik doğrusal olmayan ortam modelinin oluşturulması. Bunun için Tablo 2.'deki zemin profili baz alınarak dinamik analiz için profil oluşturulmuştur.

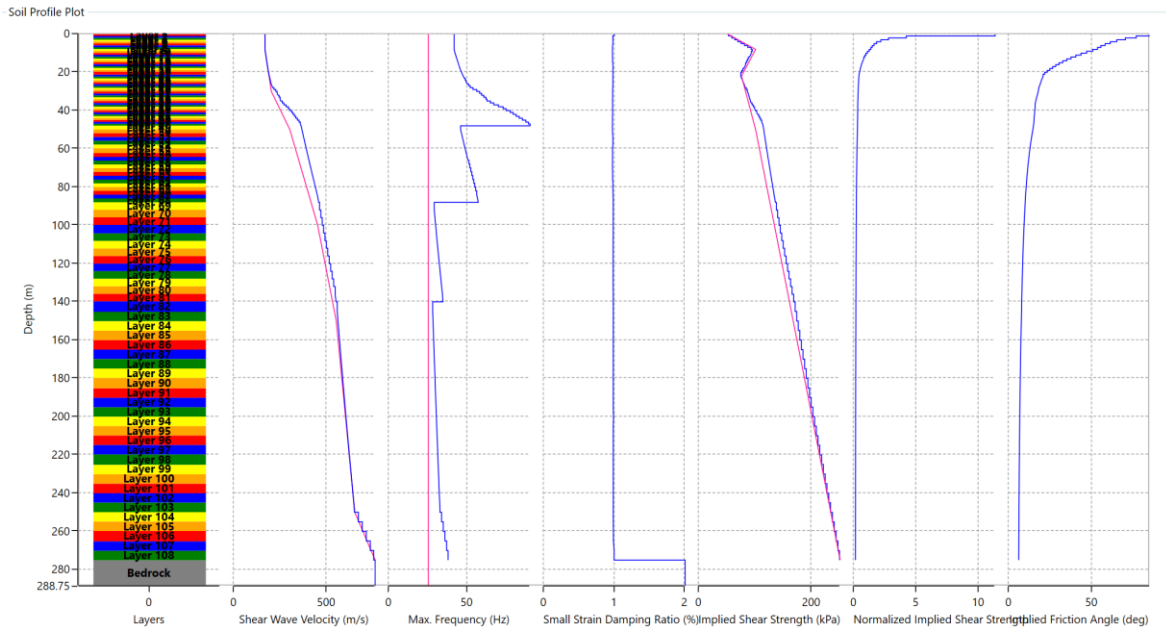
Analizlerin Gerçekleştirilmesi: Seçilen-Ölçeklendirilen-Benzeştirilen deprem kaydı ve belirlenen zemin özelliklerine dayalı olarak, yatay tabakalı zeminin dinamik davranışının analizi.

Çıktılar: ZDA analiz çıktıları, YKZE girdi verisi olarak kullanılması için hazırlanması. (TBDY 2018 Madde 16.C – Yöntem 2, 3)

Tablo 2. Hesaplarda baz alınan Parametreler

Derinlik Parametre	Vs (m/sn)	E ₅₀ (kPa)	c' (kPa)	φ' (°)
0 – 8m :	165	5000	2	25
8m – 30m :	165	3000	5	22
30m-40m :	200	10000	5	27
40-50m:	300	15000	5	28
50m-100m:	450	25000	10	28
100m-150m:	550	50000	15	28
150m-250m:	650	80000	20	28
275m >	760	150000	25	32

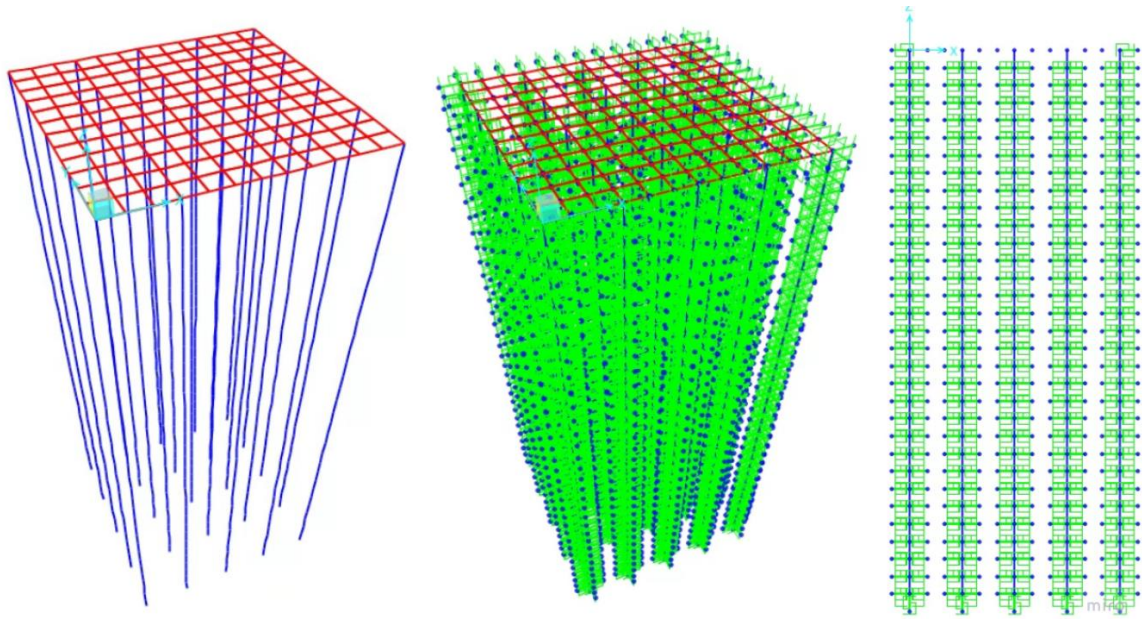
Çalışmada doğrusal olmayan GQ/H zemin modeli kullanılarak, zaman tanım alanında analizler gerçekleştirilmiştir. Tabaka kalınlıkları, depremin enerjisinin çoğunluğunu barındıran 30 Hz. frekansa kadar olan dalgaları geçirecek şekilde belirlenmiştir. Yapılan sondaj çalışmalarında yer altı su seviyesi model yüzeyinden itibaren dikkate alınmıştır. Analizlerde sönüm ve kayma modülü eğrileri "Vucetic&Dobry (1991)" kullanılmıştır. Analizde mühendislik kayası seviyesi (275 m) "Elastic Halfspace" olarak tanımlanmıştır. Vs=760 m/s ve γ=25 kN/m³ değerleri atanmıştır.



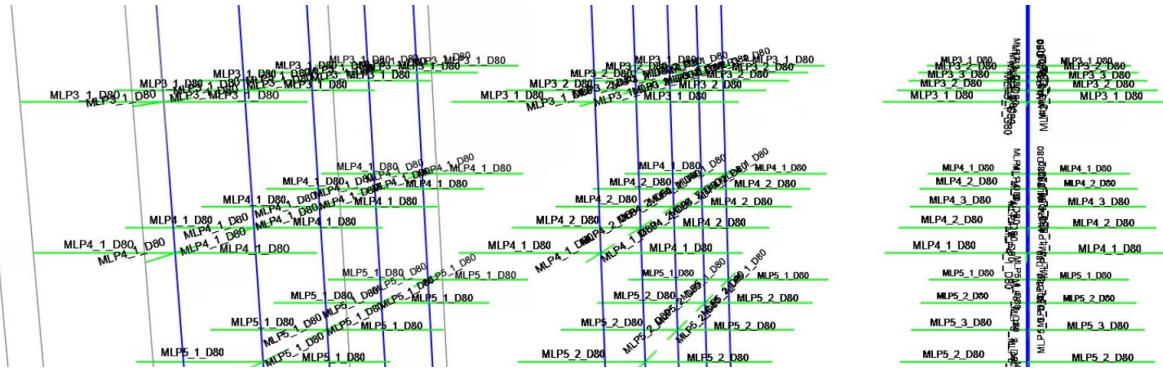
Şekil 2. Deepsoil Analizlerinde kullanılan Zemin Profili (275 m)

2.3. Kinematik Etkileşim Analizleri

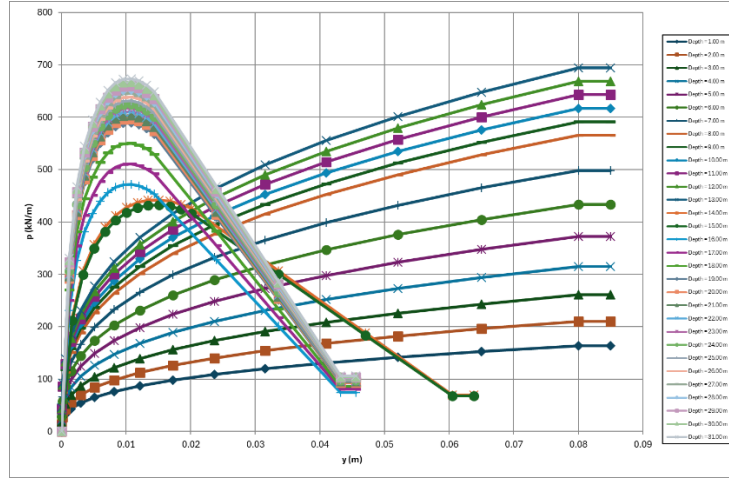
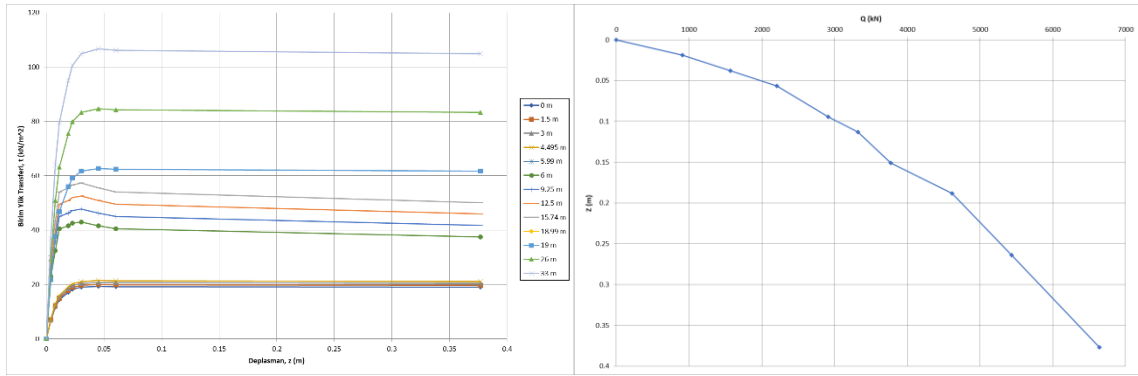
Kazıklar 80 cm çapında, 31 m uzunluğunda, 3x3 m karelajla toplam 25 adet 1 m kalınlığında rijit bir temelin altına yerleştirilmiştir (Şekil 3). p-y ve t-z eğrileri Tablo 2.deki zemin değerleri dikkate alınarak hesaplanmış ve TBDY 2018 Denk 16.C.1'deki β_G azaltma katsayısı kazıkların modeldeki sıralamalarına göre uygulanmıştır (Şekil 4). Analizlerde kazık derinliği boyunca her 1 m'de ZDA'dan elde edilen *toplam yerdeğiştirmelerin zamana göre maksimumlarının zarfı* etki ettirilmiştir (Şekil 5).



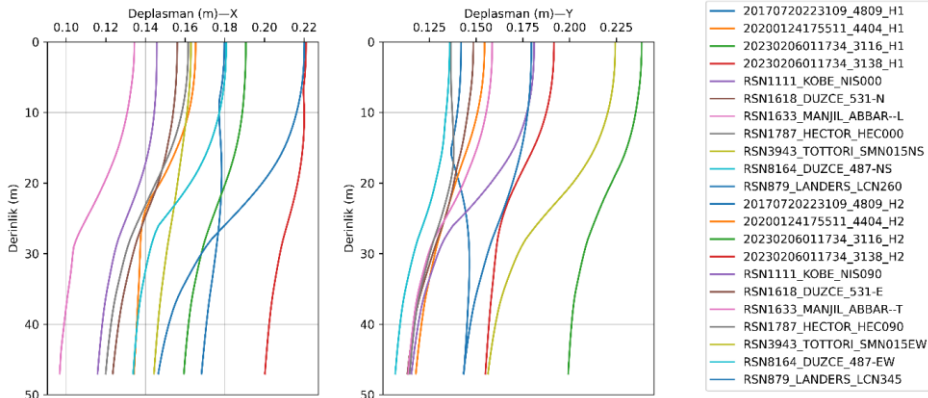
Şekil 3. Kazık, Temel ve Yaylar için SAP2000 modeli



Şekil 4. Farklı B_c için Yay isimlendirmeleri



Şekil 5. p-y, t-z, Q-Z eğrileri



Şekil 6. Deplasman-Derinlik Çıktıları- DD2 (X ve Y Yönü)

2.4 Kenar Yayların Modellenmesi

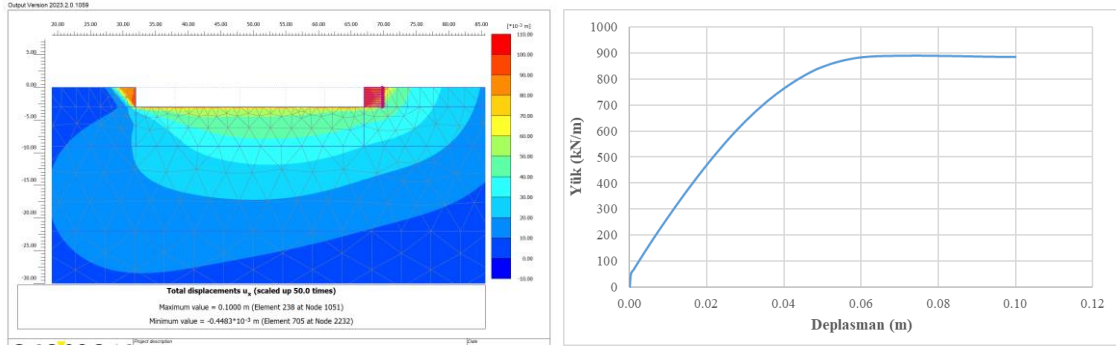
Temel kenar yaylarının modellenmesi ve bodrum kat perdeleri hizası boyunca oluşan deplasmanların etkisinin incelenmesi amacıyla 3 farklı model karşılaştırılmıştır. Kenar yaylarının hesabı Plaxis2D ile eşlenik olarak hazırlanan zemin-temel modelinin birim yüklemesi neticesinde elde edilmiştir. (Şekil 6) Bu modellerde kenar yaylarının ve uygulanan deplasmanların etkisi;

Model-1) Temel kenarlarına hiç yay koyulmadan,

Model-2) Plaxis itme analizlerinden elde edilen temel kenar yaylarına kazık başlık üst kotu deplasmanları etkilerek,

Model-3) Bodrum seviyesi profili boyunca zayıf zemin etkisinin incelenmesi amacıyla temel seviyesindeki yaylara uygulanan deplasmanları kazık başlık üst kotunun 3 katı uygulanarak,

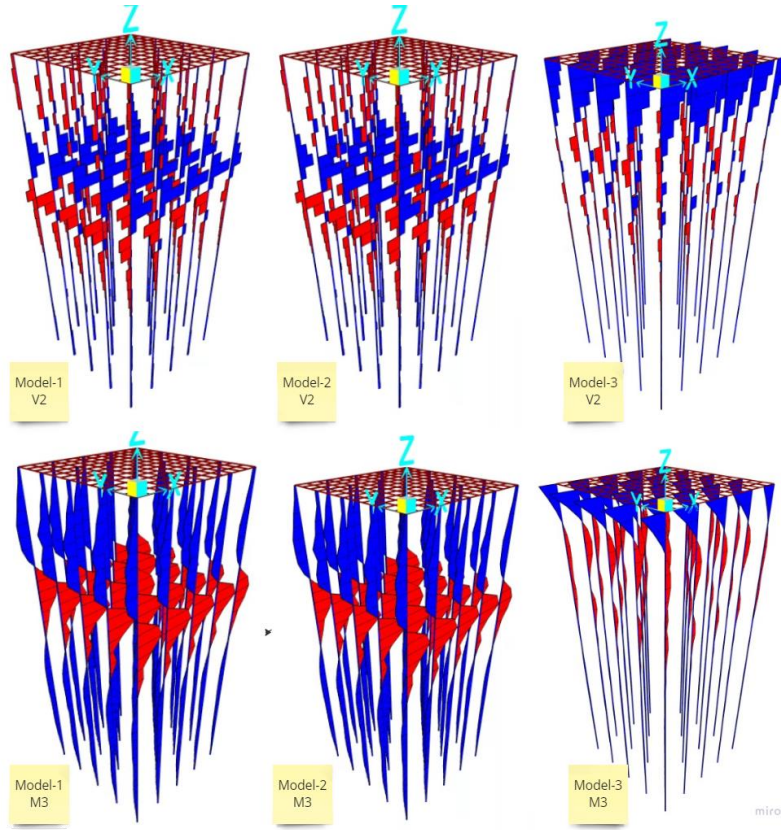
3 model üzerinden araştırılmıştır.



Şekil 7. Temel kenar yayları

3. BULGULAR VE ÖNERİLER

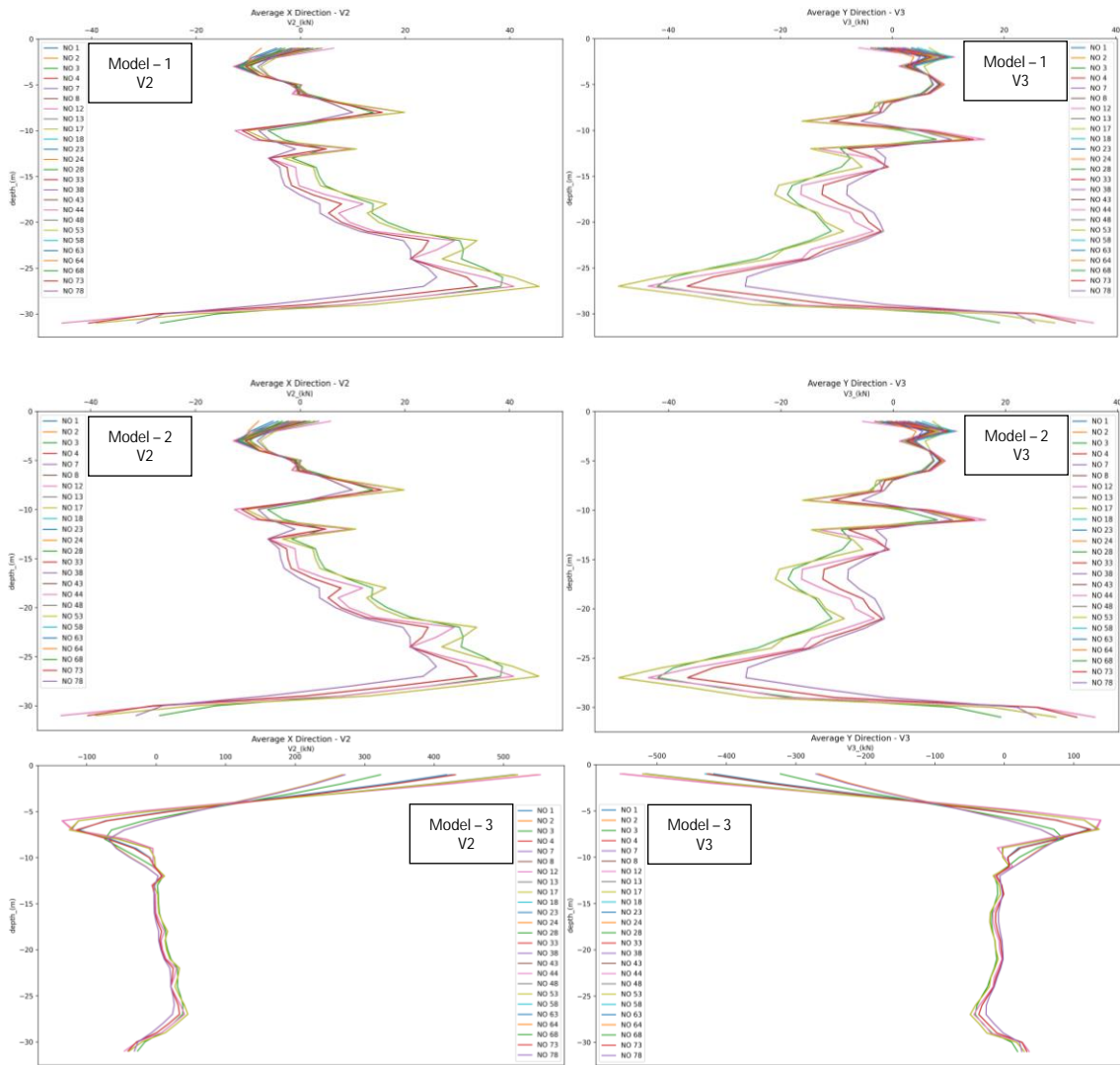
Yapılan çalışmalar, TBDY 2018 Bölüm 16 Yöntem II ve Yöntem III YKZE analizleri kapsamında yapılan temel-kazık-yay modellemelerinde bodrum perdesi etrafındaki zeminin etkisinin kazık iç kuvvetlerinin farklılığını Yöntem III açısından araştırmaktadır. Bu bağlamda yapılan modellemeler fiziksel karşılıkları olan durumlar (Model-1 Temelin yüzeyde olduğu, Model-2 Temelin gömüldüğü, Model-3 Gömme derinliği boyunca oluşan deplasmanların/deformasyonların kazıkların başlangıç kotundan daha fazla olduğu) için oluşturulmuştur. Kazık tasarım kuvvetleri [Moment (M), Kesme (V)] için her bir analizden elde edilen mutlak kazık iç kuvvetlerinin ortalamaları dikkate alınmıştır. (Şekil 8)



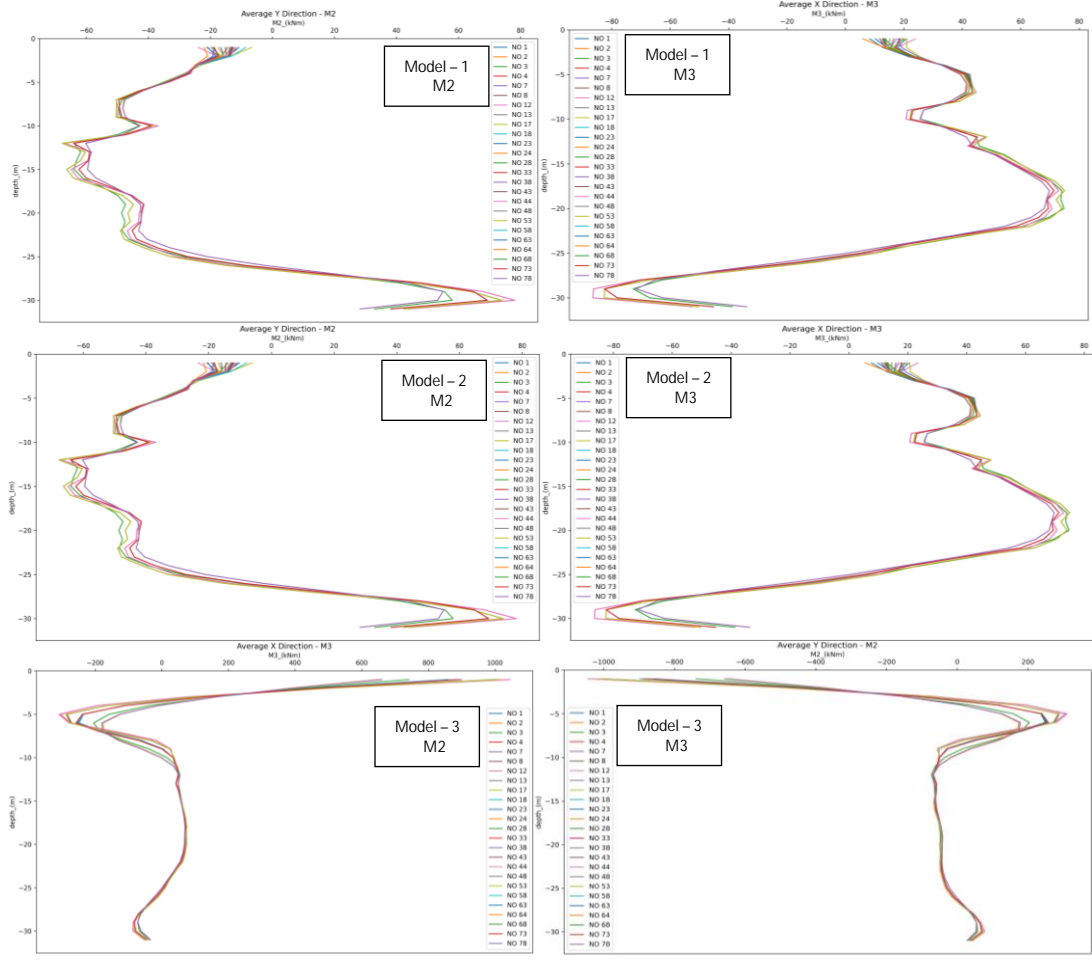
Şekil 8. X Yönünde Seçilen Bir Depremın Model Üzerinde V2-M3 Gösterimleri

Tablo 2. Analiz Sonucu Kazık Tasarım Kuvvetleri

MODEL	Kazık iç Kuvvetleri			
	V2 (kN)	V3 (kN)	M2 (kN.m)	M3 (kN.m)
1	40	40	80	80
2	40	40	80	80
3	550	550	1000	1000



Şekil 9. X ve Y Yönünde 11 Depremi Ortalama Derinlikle Değişen V2-V3 Grafikleri



Şekil 10. X ve Y Yönünde 11 Depremi Ortalama Derinlikle Değişen M2-M3 Grafikleri

Kinematik etkileşim analiz sonuçlarından elde edilen bulgular göstermektedir ki temel alt kotu ile yüzey kotu arasındaki görece zayıf zeminlerde oluşabilecek deplasmanlardan oluşacak ek yükler dolayısıyla kazıklarda daha fazla kesme kuvveti ve moment oluşmaktadır (Tablo 2). Bu durum özellikle gömme derinliği fazla olan ve bodrum perdesi etrafında sıvılaşabilir zeminler bulunan kazıklı yapılarda dikkate alınmadığında daha yüksek risk taşımaktadır. Kazık tasarımının %1 donatı oranıyla gerçekleştirildiği durumlarda deprem etkisiyle tasarım kuvvetleri aşıp kazıklar mafsallaşabilir. Yönetmelik gereği analizlerin DD2 için olduğu (Yöntem III) ayrıca dikkate alınmalıdır. DD1 deprem yer hareketi ve sıvılaşmanın beklendiği bölgelerde bu tür modellemelerin tasarımlarında temel kenar yaylarının tasarımdaki etkisinin önemi ortaya çıkmaktadır.

Zarf deplasmanlardan elde edilen sonuçlar (Yöntem III) gösteriyor ki eğer derinlikle değişen deplasman zarfı boyunca göreceli deplasmanlar düşük olursa kazıklardaki iç kuvvetler beklenenden çok daha düşük mertebelerde oluşmaktadır. Bu gibi özellikler profil boyunca deplasmanlarda değişkenliğin görüldüğü durumlarda yönetmelikçe belirlenen Yöntem II'nin kullanılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- FEMA P-2091, (2021). Soil-structure interaction for building structures. National Institute of Standards and Technology (NEHRP).
- Liyanapathirana, D. S., & Poulos, H. G. (2005). "Seismic lateral response of piles in liquefying soil." Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 131(12), 1466-1479.
- Bilal, O. (2021). Kazık temelli yapıların deprem etkisi altında yapı-kazık-zemin etkileşiminin incelenmesi. Doktora, İstanbul Kültür Üniversitesi.
- Bilal, O., & Fahjan, Y. (2024). "Dinamik yapı-kazık-zemin etkileşimi bağlamında temel gömme derinliğinin spektral tepki üzerindeki etkisi." Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 30(1), 44-52.
- Vucetic, M., & Dobry, R. (1991). "Effect of soil plasticity on cyclic response. Journal of geotechnical engineering", 117(1), 89-107.
- DEEPSOIL (2024, V7.1), A nonlinear and Equivalent Linear Seismic Site Response of 1-D Soil Columns, User Manual.
- TBDY, 2018, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara.