



Araştırma Makalesi/Research Article

Bodrum Katlı Betonarme Yüksek Yapılarda Yapı-Kazık-Zemin Etkileşiminin Alt Sistem Yaklaşımı ile 2B ve 3B Analiz Yöntemleriyle Değerlendirilmesi

Evaluation of Structure-Pile-Soil Interaction in Basement-Story Reinforced Concrete High-Rise Buildings Using 2D and 3D Analysis Methods with Substructure Approach

Hüseyin Doğan^{1*}, Taha Taşkiran²

¹ Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, huseyinmetu@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7163-4631>

² Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, taskiran@aybu.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8444-0094>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 8 Ocak 2025
Revizyon 12 Mart 2025
Kabul 27 Mart 2025
Online 30 Haziran 2025

Anahtar Kelimeler:

Deprem; TBDY-2018; Yapı-Kazık-Zemin Etkileşimi; Alt Sistem Yaklaşımı, Yöntem-III.

ÖZ

Türkiye, Avrasya, Afrika ve Arap tektonik plakalarının etkileşim noktasında yer alan aktif bir sismik kuşakta bulunmakta olup, artan nüfus ve sınırlı arazi kullanımı güvenli yapı tasarımı zorunlu kılmaktadır. Özellikle kentleşmeyle birlikte yüksek katlı yapıların yaygınlaşması, yapı periyodunun artmasına ve zayıf zeminlerde deprem dalgalarının büyütülmesine neden olmuştur. Bu durum, yapı-kazık-zemin etkileşiminin detaylı bir şekilde incelenmesini gerektirmiştir. 6 Şubat 2023'te Kahramanmaraş'ta meydana gelen Mw 7.7 ve Mw 7.6 büyüklüğündeki depremler, zemin özelliklerinin deprem dalgalarının davranışına etkisini açıkça ortaya koymuştur. Bu çalışmada, TBDY-2018'e uygun ZD sınıfı zemin üzerine inşa edilmesi planlanan 17 katlı bodrumlu bir betonarme yapının yapı-kazık-zemin etkileşimi, alt sistem yaklaşımıyla iki (2B) ve üç (3B) boyutlu analizlerle incelenmiştir. Analiz sonuçları, bodrumlu yapılarda 3B analizlerin kazıklardaki iç kuvvetleri daha olumsuz gösterdiğini ortaya koymuş, bu durum dinamik yapı-kazık-zemin etkileşiminde 3B yaklaşımın önemini vurgulamıştır. Elde edilen bulgular, deprem etkisi altındaki kazıklı temel tasarımlarında dinamik etkilerin kapsamlı şekilde ele alınmasının, yapı güvenliği açısından kritik bir gereklilik olduğunu göstermektedir. Bu çalışma, deprem bölgelerinde güvenli tasarım yaklaşımlarına katkı sağlamaktadır.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 8 January 2025
Received in revised form 12 March 2025
Accepted 27 March 2025
Available online 30 June 2025

Keywords:

Earthquake; TBDY-2018; Structure-Pile-Soil Interaction; Substructure Approach; Method III

ABSTRACT

Turkey is located in an active seismic zone at the intersection of the Eurasian, African, and Arabian tectonic plates, where increasing population and limited land availability necessitate safe structural design. Urbanization has led to the widespread construction of high-rise buildings, increasing structural periods and amplifying seismic waves in weak soil conditions. This has highlighted the need for detailed investigations of structure-pile-soil interaction. The Mw 7.7 and Mw 7.6 earthquakes that struck Kahramanmaraş on February 6, 2023, demonstrated the significant impact of soil properties on seismic wave behavior. In this study, the structure-pile-soil interaction of a planned 17-story reinforced concrete building with a basement, designed on ZD-class soil in accordance with TBDY-2018, was analyzed using subsystem approaches in two (2D) and three (3D) dimensions. The results revealed that in basement structures, 3D analyses yield more critical internal forces in piles, emphasizing the importance of a 3D approach in dynamic structure-pile-soil interaction for such structures. The findings underline that a comprehensive assessment of dynamic effects in pile foundation designs under seismic conditions is crucial for structural safety. This study contributes significantly to design approaches based on soil-structure interaction in earthquake-prone regions.

DOI: 10.24012/dumf.1615806

* Sorumlu Yazar

1.Giriş

Türkiye, tektonik levhaların kesişim noktasında yer aldığı için son derece aktif bir deprem bölgesindedir ve bu durum ülkenin sismik aktivitesini ve deprem riskini doğrudan etkileyerek yüksek deprem riski oluşturmaktadır. Bu jeolojik konum hem bilimsel araştırmalar hem de mühendislik uygulamaları açısından kritik öneme sahiptir ve yapıların ve altyapıların sismik güvenliğini sağlamak için yenilikçi mühendislik çözümlerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Son yıllarda, bilimsel ve teknolojik ilerlemeler ile artan nüfus ve değişen sosyal-ekonomik ihtiyaçlar, büyük şehirlerde yüksek katlı binaların ve sanayi bölgelerinde karmaşık yapılar inşa edilmesine yol açmıştır. Bu büyüme, daha büyük ve karmaşık mühendislik projelerinin ortaya çıkmasına, yapı yüklerinin artmasına ve temel mühendisliği ile yapı tasarımı konusunda yeni taleplerin doğmasına sebep olmuştur.

Bu bağlamda, zemin iyileştirme ve kazık temeli tasarımları gibi mühendislik çözümleri, yüksek yapıların güvenli bir şekilde inşa edilmesi için vazgeçilmez hale gelmiştir. Kazıklar, zemine doğrudan temas eden elemanlar olarak, yapı-kazık-zemin etkileşimi kavramı ile yapı üzerindeki etkilerini gösterir. Kazıklı yapıların performansı, zemin özelliklerine bağlı olarak değişebilir ve bu etkileşim, yapıların deprem anındaki dayanıklılığı için kritik bir rol oynar. Yapı-kazık-zemin etkileşiminin değerlendirilmesi, yapıların sismik performansını ve güvenliğini analiz etmek için detaylı bir inceleme gerektirir.

Türk Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018) kapsamında, kazık-zemin-yapı etkileşimini değerlendirmek için üç temel yöntem önerilmektedir: Yöntem I, üstyapı, kazık ve zemin bileşenlerini tek bir analiz modelinde bütünleşik olarak ele alır ve tüm sistemin dinamik etkileşimlerini kapsamlı şekilde analiz eder. Yöntemler II ve III ise, üstyapı ve alt-yapı için ayrı analiz modelleri geliştirip, sonuçları birleştirir. Özellikle Yöntem III, kazıklı temellerin performansını detaylı bir şekilde inceleyerek yapı-kazık-zemin etkileşimini daha kısa sürede doğru bir şekilde değerlendirmeyi amaçlar.

Bu çalışmada, Hatay İli Kumlu İlçesi'nde ZD sınıfı zemin üzerine, TBDY-2018 standartlarına uygun olarak inşa edilmesi planlanan 17 katlı bodrumlu betonarme yapının yapı-kazık-zemin etkileşimi, TBDY-2018 Yöntem-III çerçevesinde alt sistem yaklaşımı kullanılarak, 2B ve 3B analizlerle değerlendirilecektir (Şekil 1).



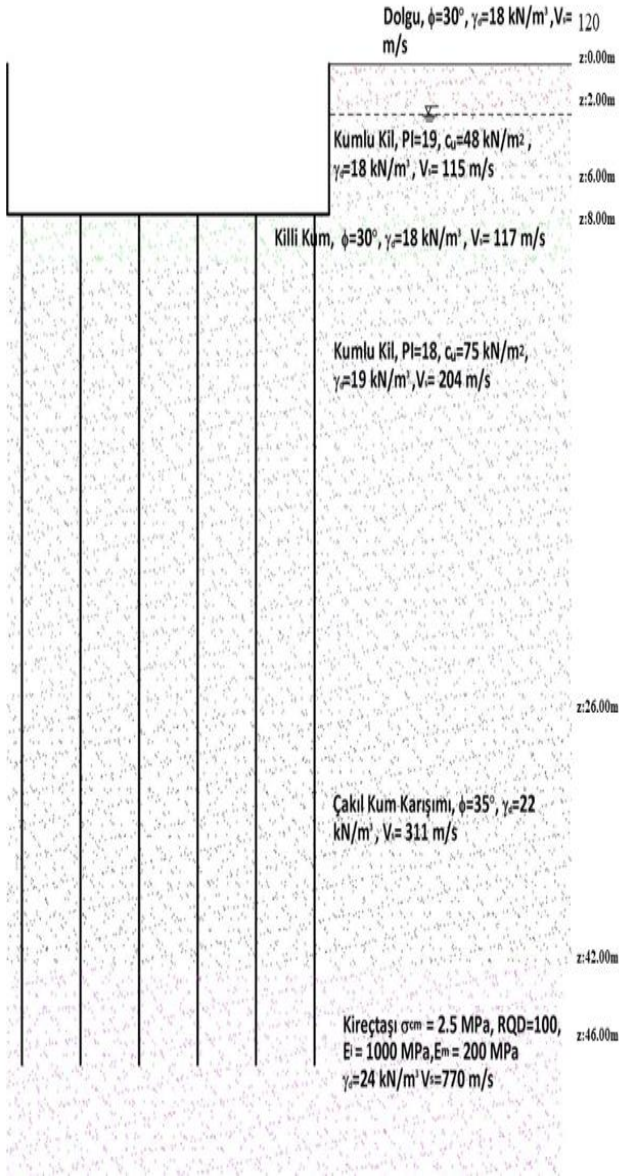
Şekil 1. Kumlu İlçesi, Hatay İli, Türkiye

2. Arazi zemin modelinin oluşturulması

2.1.Zemin araştırmaları

Yapının inşa edilmesinin planlandığı parselde zemin modelinin oluşturulması kapsamında, zemin profilini ve bu profildeki zeminlerin özelliklerini belirlemek amacıyla her biri 30 metre derinliğinde beş adet sondaj yapılmıştır. Sondajlara ek olarak, sahada gerçekleştirilen iki adet MASW (Yüzey Dalgalarının Çok Kanallı Analizi) ölçümü ile sınırlı derinliklere kadar zemin tabakalarının kayma dalgası hızları belirlenmiştir. Ayrıca, iki farklı noktada gerçekleştirilen mikro tremor deneyleri ile zeminin hâkim titreşim periyotları tespit edilmiştir. Sondaj sırasında alınan bozulan ve bozulmamış numuneler üzerinde sınıflandırma ve mukavemet deneyleri yapılmıştır. Saha ve laboratuvar deneylerinden elde edilen zemin tabakalarına ait parametreler, Şekil 2'de idealize edilmiş zemin profili olarak gösterilmiştir.

Arazi stratigrafisi, farklı zemin türlerinin belirgin bir tabakalaşma gösterdiğini ortaya koymaktadır. Yüzeyde, yaklaşık 2 metre kalınlığında bir dolgu tabakası bulunmaktadır. Bu dolgunun altında, yüzey dolgusu ile daha derin sedimanter yapılar arasında geçiş zonu oluşturan, 2 ila 6 metre derinliğe kadar uzanan kumlu kil tabakaları yer almaktadır. Daha derin seviyelerde, 6 ila 8 metre kalınlığında kil içeren bir kum tabakası bulunmakta olup, bunu 8 ila 26 metre derinliklere kadar uzanan hafif kumlu kil tabakası takip etmektedir. Bu tabakalar, 26 ila 36 metre derinlikleri arasında çakıl-kum karışımı ile kesintiye uğramakta, 36 metreden itibaren ise, 46 metredeki kazık ucu dahil olmak üzere, kireçtaşı birimi gözlenmektedir. Ayrıca, yüzeyden yaklaşık 2 metre derinlikte yer alan sığ su tablası, zeminlerin mekanik davranışını ve profil içerisindeki yeraltı suyu hareketini etkileyerek, alanın hidrojeolojik koşulları üzerinde önemli bir rol oynamaktadır.



Şekil 2. İdealize Zemin Profili

2.2 Yerel Zemin Sınıfı ve Tasarım Spektrumunun Belirlenmesi

Türk Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018) kapsamında, tasarım spektrumlarının belirlenmesinde Türkiye Deprem Tehlike Haritaları (TDTH) kullanılmaktadır. Genel kaya zeminler $(V_s)_{30}=760\text{m/s}$ için boyutsuz kısa periyot (S_s) ve 1.0 saniyelik spektral ivme katsayıları (S_1) TDTH'den elde edilir. Bu haritalara e-devlet üzerinden AFAD'ın web sitesinden (<https://tdth.afad.gov.tr>) ulaşılabilir.

Yerel zemin etkilerinin değerlendirilmesi için öncelikle uygun yer hareketi düzeyinin seçilmesi gereklidir. Bu çalışmada, %10 aşılma olasılığına ve 475 yıllık yinelenme aralığına karşılık gelen Deprem Yer Hareketi Düzeyi-2 (DD-2) seçilmiştir. Yerel zemin etkilerini hesaba katmak için S_s ve S_1 katsayıları, TBDY 16.4'e göre yerel zemin katsayıları (F_s ve F_1) kullanılarak tasarım spektral ivme katsayılarına (S_{DS} ve S_{D1}) dönüştürülür.

Saha ve laboratuvar çalışmalarında temel veya kazık başı seviyesinin altındaki 30 metre için kayma dalgası hızı $(V_s)_{30}$, düzeltilmiş standart penetrasyon darbe sayısı $(N_{60,30})$ ve/veya drenajsız kayma mukavemeti $(c_{u,30})$ belirlenir. TBDY'ye göre zeminler ZA'dan ZF'ye kadar sınıflandırılır. Bu çalışmada, kazık uçlarının oturduğu kaya biri için $V_s=770\text{m/s}$ alınmış ve ZB sınıfı olarak sınıflandırılmıştır. Temel altındaki zemin özellikleri $N_{60,30}=17\text{N}$ ve $(V_s)_{30}=229\text{m/s}$ olarak belirlenmiş ve zemin ZD sınıfı olarak tanımlanmıştır.

2.3 Deprem Yer Hareketi Spektrumu

Yapı-kazık-zemin etkileşim analizinin gerçekleştirileceği, Hatay ili Kumlu ilçesinde bulunan bina için DD-2 Deprem Yer Hareketi Düzeyi için Türkiye Deprem Tehlike Haritaları üzerinden alınan S_s ve S_1 değerleri aşağıdaki gibidir:

$$S_s=0.901, S_1=0.245.$$

Yerel zemin sınıfı ZD için TBDY'nin 2.1 ve 2.2 numaralı tablolarından elde edilen zemin katsayıları:

$$F_s=1.140, F_1=2.110$$

Tasarım spektral ivme katsayıları şu şekilde hesaplanmıştır:

$$S_{DS}=S_s \times F_s=1.027, S_{D1}=S_1 \times F_1=0.517.$$

Yatay tasarım spektrumu için köşe periyotları T_A ve T_B , TBDY 2018'in 3.1 numaralı denklemi kullanılarak hesaplanmıştır:

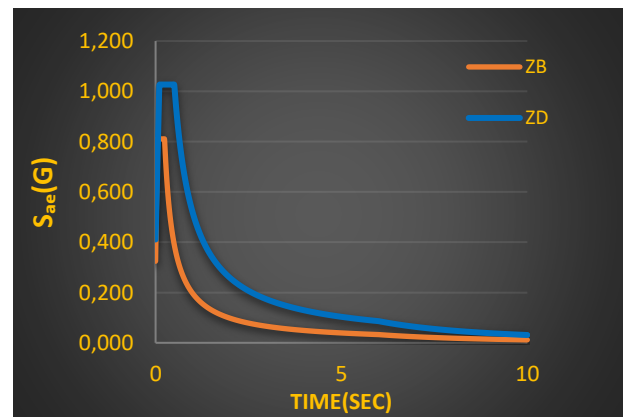
Doğal titreşim periyoduna bağlı olarak yatay tasarım spektral ivme değerlerinin ($S_{ae}(T)$) değişimi, TBDY 2018'in 3.2 numaralı denklemi kullanılarak yerçekimi ivmesi cinsinden belirlenmiştir. Yatay elastik tasarım spektrumu Şekil 3'te verilmiştir:

Yerel zemin sınıfı ZB için TBDY'nin 2.1 ve 2.2 numaralı tablolarından elde edilen zemin katsayıları:

$$F_s=0.900, F_1=0.800.$$

ZD için yukarıda belirtilen adımların aynısı takip edilerek ZB için spektrum hesaplanmış ve Şekil 3'de gösterilmiştir. DD-2 Deprem Yer Hareketi Düzeyi için tasarım spektral ivme katsayıları:

- Yerel zemin sınıfı ZB: $S_{DS}=0.811, S_{D1}=0.196.$
- Yerel zemin sınıfı ZD: $S_{DS}=1.027, S_{D1}=0.517.$



Şekil 3. ZB ve ZD yatay elastik tasarım ivme spektrumları.

3. Deprem Etkisi Altında Sahaya Özel Zemin Davranış Analizleri

3.1 Proje Alanı İçin Deprem Kayıtlarının Seçimi ve Spektral Uyumluluk

Sahaya özgü zemin davranışı analizleri için, TBDY 2018'de belirtilen tasarım ivme spektrumuna uyumlu ve $(V_s)_{30}=760\text{m/s}$ için geçerli en az 11 deprem kaydına ihtiyaç duyulmaktadır. Deprem kayıtlarının seçimi, TBDY 2018'in 2.5. bölümünde belirtilen basit ölçeklendirme veya spektral uyumluluk yöntemlerine göre yapılmıştır. Bir ve iki boyutlu analizlerde en az 11 deprem kaydı, üç boyutlu analizlerde ise 11 set kayıt seçilmesi gerekmektedir. Aynı depremden alınan kayıt sayısı üç ile sınırlandırılmıştır. Kayıt seçiminde deprem büyüklüğü, fay uzaklığı, kaynak mekanizması ve yerel zemin koşulları göz önünde bulundurulmuştur.

Proje alanına en yakın deprem kaynakları, Doğu Anadolu Fay Zonu'ndaki Amanos segmentidir ve bu bölge 10-30 km uzaklıktadır. Bu segmentten $M_w = 6.0-7.5$ büyüklüğündeki, 0-30 km mesafedeki bir kayıt seçilmiştir. Ayrıca, Antakya Fayı (30-50 km) ve Pazarcık segmentinden (30-120 km) $M_w = 6.5-8.0$ büyüklüğündeki depremler için on kayıt değerlendirilmiştir.

3.2 Deprem Kayıtlarının Yerel Zemin Koşullarına Uyumu

Deprem kayıtlarının seçimi sırasında, sahanın zemin profiline ait $(V_s)_{30}$ değeri temel kriter olarak kullanılmıştır. Ancak bu koşul sağlanamadığında, genel kaya (outcrop) kayıtları tercih edilmiş ve bu kayıtlar zemin yüzeyine aktarılıp simüle edilmiştir. Deprem kayıtları AFAD (deprem.gov.tr) ve PEER (ngawest2.berkeley.edu) veri tabanlarından temin edilmiştir. Kumlu ve çevresindeki kayıtlar incelenmiş, 11 adet kayıt PEER veri tabanından seçilmiştir. (Tablo 1)

TBDY 2018'in 2.5.3. bölümüne göre, seçilen 11 adet deprem kayıtların Kuzey-Güney ve Doğu-Batı her iki yön içinde spektrumlarının ortalaması, tasarım spektrumu ile uyumlu hale getirilmiş ve tüm periyotlar için tasarım spektrumu değerlerinin altına düşmeyecek şekilde uyum sağlanmıştır.

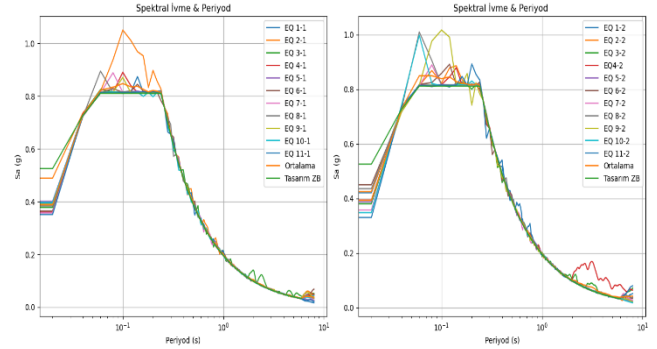
Tablo 1. Seçilen Deprem Kayıtları ve Detayları

#	PEER Kayıt No	Deprem Adı	Yıl	M _w	Odak mekanizması	İstasyon	Erzup (km)	$(V_s)_{30}$ (m/s)	H1-N-S	H2-E-W	Ölçek
1	RSN2929	Chi-Chi, Taiwan-04	1999	6.2	doğruşu atımı	TTD042	69	843.34	EQ 1-1	EQ 1-2	7.14
2	RSN897	Landers	1992	7.28	doğruşu atımı	Twentynine Palms	41.43	635.01	EQ 3-1	EQ 2-2	5.30
3	RSN3993	El Mayor-Cucapah, Mexico	2010	7.2	doğruşu atımı	El Monte County Park	104.91	805	EQ 3-1	EQ 3-2	9.30
4	RSN6041	El Mayor-Cucapah, Mexico	2010	7.2	doğruşu atımı	San Diego Road Dept	110.95	827	EQ 4-1	EQ 4-2	7.60
5	RSN1763	Hector Mine	1999	7.13	doğruşu atımı	Azusa - Pinyon Flat	89.98	724.89	EQ 5-1	EQ 5-2	9.07
6	RSN1836	Hector Mine	1999	7.13	doğruşu atımı	Twentynine Palms	42.06	635.01	EQ 6-1	EQ 6-2	4.58
7	RSN2753	Chi-Chi, Taiwan-04	1999	6.2	doğruşu atımı	CHY102	39.32	804.36	EQ 7-1	EQ 7-2	7.84
8	RSN3925	Tottori, Japan	2000	6.61	doğruşu atımı	OKYH07	15.23	940.2	EQ 8-1	EQ 8-2	2.40
9	RSN3930	Tottori, Japan	2000	6.61	doğruşu atımı	OKYH12	79.30	719.57	EQ 9-1	EQ 9-2	7.40
10	RSN3957	Tottori, Japan	2000	6.61	doğruşu atımı	SKDH13	96.93	650	EQ 10-1	EQ 10-2	8.70
11	RSN6963	Darfield, New Zealand	2010	7	doğruşu atımı	RZF	57.65	638.39	EQ 11-1	EQ 11-2	6.71

3.3. Zaman tanım alanı analizi ve spektral uyumluluk

Bu çalışmada, seçilen 11 deprem kaydının her iki yönü, öncelikle basit ölçekleme yöntemiyle tasarım spektrumuna ölçeklendirilmiş, ardından Seismomatch yazılımı kullanılarak tasarım spektrumu ile uyumlu hale getirilmiştir.

Kayıtlar, spektral eşleme yöntemiyle tasarım spektrumuna uyarlanmış ve böylece varyans azaltılmıştır. Ancak bu yöntem, kayıtların gerçekçiliğini belirli ölçüde azaltabilir. Uyarlanan deprem kayıtlarının yanıt spektrumları, ortalama spektrum ve tasarım spektrumu Şekil 4'te sunulmuştur



Şekil 4. On bir deprem kaydının tasarım spektrumuna ölçeklenmiş tepki spektrumları: Sol: H1 Kuzey-Güney yönü Sağ: H2 Doğu-Batı yönü

3.4 Zaman Tanım Alanında Zemin Davranışının Modellemesi

Saha tepki analizi, sismik dalgaların belirli bir sahadan geçişi sırasında maruz kaldığı büyütme veya sönümlenme etkilerini değerlendirerek, zemin koşullarının sismik davranış ve yapısal tepkiler üzerindeki etkisini anlamaya yönelik kritik bilgiler sağlar. Bu süreç; zemin özelliklerinin (ör. kayma dalgası hızı, yoğunluk, sönümlenme) karakterize edilmesi, tehlike analizi veya kayıtlardan elde edilen giriş hareketlerinin tanımlanması ve 1B, 2B veya 3B (doğrusal, eşdeğer doğrusal veya doğrusal olmayan) sayısal yöntemlerle dalga-zemin etkileşimlerinin modellenmesini içerir. Analiz sonuçları, dalga büyütmesi, deformasyon ve frekans değişimlerinin anlaşılmasını sağlayarak, yapı ve altyapının beklenen sismik kuvvetlere karşı dayanıklılığı için tasarım süreçlerini yönlendirir.

Zaman tanım alanında yapılan dinamik saha analizleri, Deepsoil programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde, Kondner ve Zelasko tarafından geliştirilen ve daha sonra Matasovic tarafından iyileştirilen hiperbolik model esas alınmıştır. Modelde kayma gerilmesi (τ) ile kayma deformasyonu (γ) arasındaki ilişki aşağıdaki denklemle tanımlanır:

$$\tau = \frac{G_{max}\gamma}{1 + \beta \left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^s} \quad (1)$$

Bu denklemde:

G_{max} : Maksimum kayma modülü,

γ : Kayma deformasyonu,

γ_r : Referans kayma deformasyonu,

β, s : Hiperbolik modelin şekil parametresidir.

Maksimum kayma modülü G_{max} , elastik ilişki kullanılarak kayma dalgası hızı V_s ve yoğunluk (ρ) cinsinden şu şekilde hesaplanır:

$$G_{max} = \rho V_s^2 \quad (2)$$

Laboratuvar testlerinin mümkün olmadığı durumlarda, literatürden alınan gerilme-deformasyon eğrileri kullanılır. Bu çalışmada, artan efektif gerilmenin derinlikle değişimini dikkate alan Darendeli (2001) eğrileri tercih edilmiştir. Belirli derinliklerdeki gerilme-deformasyon eğrileri, Şekil 5'te sunulmuştur.

Dinamik serbest saha analizlerinde her zemin tabakasının iletebileceği maksimum frekans, kayma dalgası hızı (V_s) ve tabaka kalınlığı (H) ile belirlenir:

$$f_{max} = \frac{V_s}{4H} \quad (3)$$

Frekansı f_{max} 'in üzerinde olan dalgalar zemin tabakasından iletilemez. Hesaplamalarda, herhangi bir tabaka için kesme frekansının en az 25–30 Hz olması önerilir. Ancak, giriş hareketinin frekans içeriğine ve beklenen deformasyon seviyelerine bağlı olarak bu değer daha büyük olabilir. Hesaplamaların doğruluğunu sağlamak amacıyla, düşük kayma dalgası hızına sahip tabakalarda maksimum frekansı $f_{max} > 20$ Hz tutmak için, zemin profili 40 metre derinliğe kadar 40 alt tabakaya bölünmüştür.

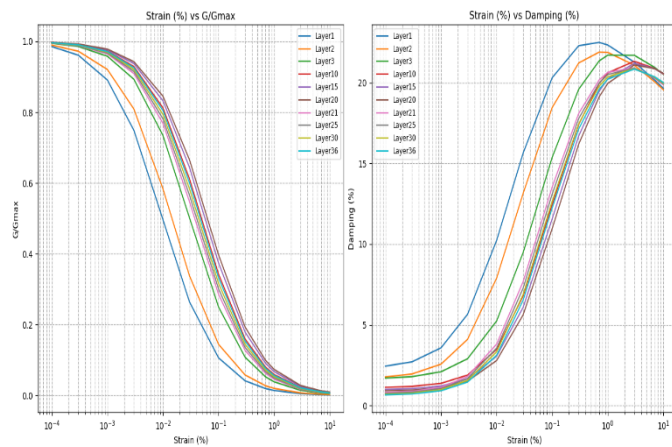
Yanal toprak basıncı katsayısı K_0 aşağıdaki denklem ile hesaplanır ve bu parametre zemin için hesaplanan değerler aşağıdaki tabloda verilmiştir.

$$K'_0 = [1 - \sin(\phi')] * OCR^{\sin(\phi')} \quad (4)$$

Burada:

- ϕ' : Zeminin efektif içsel sürtünme açısıdır.

Efektif gerilmeler, toplam gerilmelerden boşluk suyu basıncı çıkarılarak hesaplanır. Ortalama ana gerilmenin hesaplanabilmesi için, dinlenme durumundaki yanal toprak basıncının belirlenmesi gerekir. Bu hesaplama için Jaky (1944) ve Mayne & Kulhawy (1982) formülleri kullanılmıştır. Deepsoil programına girdi olarak kullanılan parametreler Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 5. Kayma deformasyonu ile G/G_{max} ve sönümleme oranı ilişkisi.

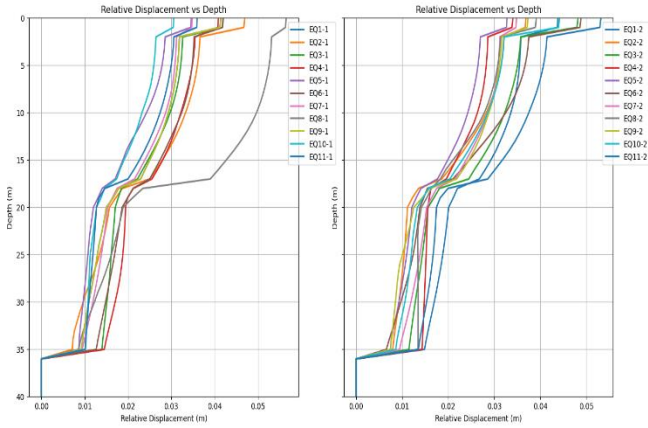
Tablo 2. Zemin Model Parametreleri

Katman	Z(derinlik)	Kalınlık(m)	Zemin Sınıfı	γ (kN/m3)	PI (%)	OCR	V_s	f_{max}	K_0
1	1	1	SC	18		1	117	29.3	0.455
2	2	1	SC	18		1	117	29.3	0.455
3	3	1	CL	19	18	1	204	51	0.913
4	4	1	CL	19	18	1	204	51	0.913
5	5	1	CL	19	18	1	204	51	0.913
6	6	1	CL	19	18	1	204	51	0.913
7	7	1	CL	19	18	1	204	51	0.913
8	8	1	CL	19	18	1	204	51	0.913
9	9	1	CL	19	18	1	204	51	0.913
10	10	1	CL	19	18	1	204	51	0.913
11	11	1	CL	19	18	1	204	51	0.913
12	12	1	CL	19	18	1	204	51	0.913
13	13	1	CL	19	18	1	204	51	0.913
14	14	1	CL	19	18	1	204	51	0.913
15	15	1	CL	19	18	1	204	51	0.913
16	16	1	CL	19	18	1	204	51	0.913
17	17	1	CL	19	18	1	204	51	0.913
18	18	1	CL	19	18	1	204	51	0.913
19	19	1	CL	19	18	1	204	51	0.913
20	20	1	CL	19	18	1	204	51	0.913
21	21	1	GW	22		1	311	77.8	0.426
22	22	1	GW	22		1	311	77.8	0.426
23	23	1	GW	22		1	311	77.8	0.426
24	24	1	GW	22		1	311	77.8	0.426
25	25	1	GW	22		1	311	77.8	0.426
26	26	1	GW	22		1	311	77.8	0.426
27	27	1	GW	22		1	311	77.8	0.426
28	28	1	GW	22		1	311	77.8	0.426
29	29	1	GW	22		1	311	77.8	0.426
30	30	1	GW	22		1	311	77.8	0.426
31	31	1	GW	22		1	311	77.8	0.426
32	32	1	GW	22		1	311	77.8	0.426
33	33	1	GW	22		1	311	77.8	0.426
34	34	1	GW	22		1	311	77.8	0.426
35	35	1	GW	22		1	311	77.8	0.426
36	36	1	GW	22		1	311	77.8	0.426
37	37	1	Kireçtaşı	24		1	770	193	0.293
38	38	1	Kireçtaşı	24		1	770	193	0.293
39	39	1	Kireçtaşı	24		1	770	193	0.293
40	40	1	Kireçtaşı	24		1	770	193	0.293

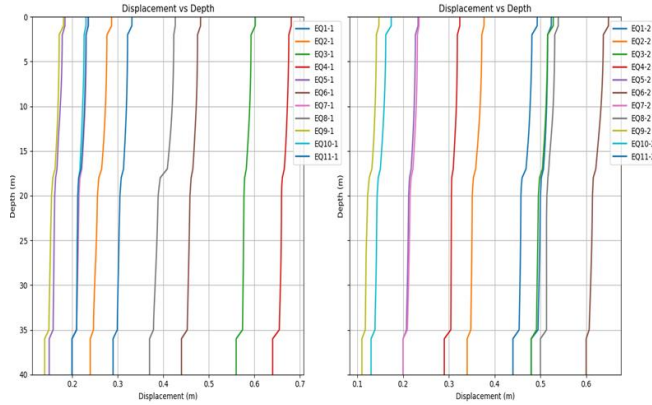
3.5 Maksimum Zemin Yer Değiştirmeleri

Deepsoil programında, dört farklı zemin tabakası için çeşitli zemin profilleri oluşturulmuştur. Kazık elemanları için her 1 metrede bir p-y yay tanımı yapıldığından, zemin tabakaları da 1 metre kalınlıkta tanımlanmıştır.

Deepsoil programı kullanılarak serbest saha analizlerini gerçekleştirmek amacıyla, kazık düğüm noktalarındaki zaman tanımına bağlı yer değiştirmeler, kaya zemini referans olarak 11 farklı deprem kaydı ve iki yön için hesaplanmıştır. Bu düğüm noktalarında elde edilen bağıl yer değiştirmeler, kaya zemindeki deprem kaydından kaynaklanan yer değiştirmelerle toplanarak maksimum zarf elde edilmiştir. Kazık düğüm noktaları arasında 1 metre yükseklik farkı için hesaplanan rölatif ve toplam yer değiştirmelerin zamanla değişimindeki maksimum zarfları, Şekil 6 ve 7'de sıra ile gösterilmektedir.



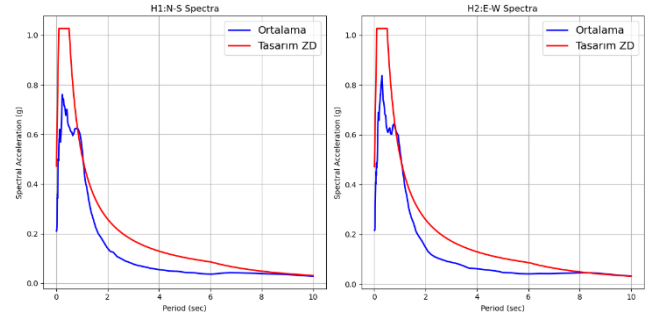
Şekil 6. Serbest saha analizlerinde kullanılan 11 deprem kaydı sonucunda elde edilen rölatif yatay zemin yer değiştirmelerinin derinlikle değişimi: Sol Grafik (H1): Kuzey-Güney yönündeki yatay yer değiştirme, Sağ Grafik (H2): Doğu-Batı yönündeki yatay yer değiştirme.



Şekil 7. Serbest saha analizlerinde kullanılan 11 deprem kaydı sonucunda elde edilen toplam yatay zemin yer değiştirmelerinin derinlikle değişimi: Sol Grafik (H1): Kuzey-Güney yönündeki yatay yer değiştirme, Sağ Grafik (H2): Doğu-Batı yönündeki yatay yer değiştirme.

3.5 Eylemsizlik Etkileşimi Analizi İçin Tasarım Spektrumunun Belirlenmesi

TBDY -2018'de belirtilen Yöntem III'e göre, eylemsizlik etkileşimine dayalı ivme spektrumu, serbest saha davranış analizlerinden elde edilen temel seviyedeki ivme spektrumlarının ortalaması alınarak hesaplanır. Ancak, bu ortalama spektrumun, TBDY -2018'de tanımlanan tasarım spektrumunun ordinatlarından büyük olması gerekmektedir. Şekil 8'de görüldüğü üzere, kaya zemininden temel seviyesine kadar yükseltile ivme spektrumlarının ortalaması, TBDY-2018'de verilen deprem spektrumundan daha düşük kalmaktadır. Bu nedenle, eylemsizlik etkileşimi için TBDY-2018 tasarım spektrumu kullanılmıştır.

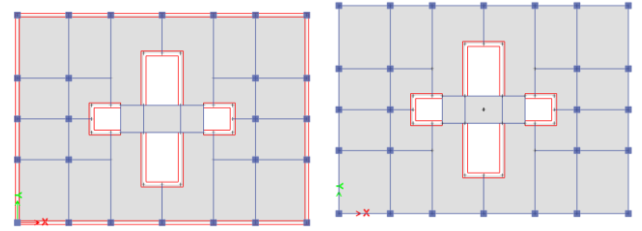


Şekil 8. Serbest saha analizlerinden elde edilen temel taban seviyesindeki ivme kayıtlarının tepki spektrumları: Sol: H1: Kuzey-Güney yönü, Sağ: H2: Doğu-Batı yönü.

4. Bina Modeli Bilgileri

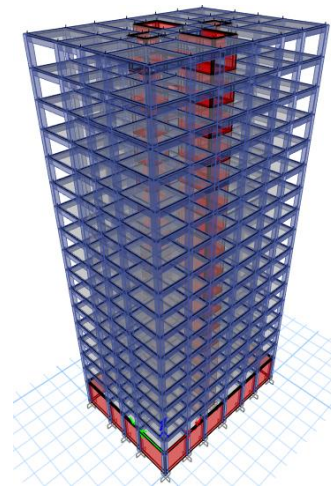
Yapı, Hatay İli Kumlu İlçesi'nde yer almakta olup bodrum, zemin ve 15 tipik kat olmak üzere toplam 17 kattan oluşmaktadır. Bodrum kat yüksekliği 4,5 metre, tipik kat yükseklikleri ise 3,0 metredir. Konut amaçlı tasarlanan yapının boyutları 17,30 metre genişlik ve 23,90 metre uzunluk şeklindedir. Taşıyıcı sistem, yüksek sünekliğe göre tasarlanmış betonarme çerçeveler ve perdelerden oluşmaktadır.

Yapı öncelikle yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmamış, yapı temel seviyesinde ankastre olarak varsayılmıştır. Boyutlandırmalar, TBDY-2018 ve TS-500'de belirtilen asgari kesit gereklilikleri ile TS-498'de tanımlanan yük şartlarına uygun şekilde yapılmıştır. Bodrum kat planı ve tipik kat planı Şekil 9'de, üç boyutlu hesap modeli ise Şekil 10'te



gösterilmektedir.

Şekil 9. Bodrum kat planı ve tipik kat planı



Şekil 10. Üç boyutlu hesap modeli

Yapının taşıyıcı elemanları olan radye temel, perde duvarlar, kolonlar, kirişler ve döşemeler için 28 günlük silindirik basınç dayanımı 40 MPa olan C40 sınıfı beton kullanılmıştır. Kazık elemanları için ise 28 günlük silindirik basınç dayanımı 35 MPa olan C35 sınıfı beton tercih edilmiştir. Donatı çeliği, minimum akma dayanımı B420C MPa olan malzeme özelliklerine sahiptir.

Normal katlar için sabit yük 2 kN/m², dış duvar yükü 8 kN/m, iç duvar yükü 6 kN/m ve hareketli yük 2 kN/m² olarak alınmıştır. Merdivenlerde ise hareketli yük 3,5 kN/m² olarak belirlenmiştir. Çatı katında sabit yük 1,5 kN/m² ve hareketli yük 1,5 kN/m² olarak hesaplanmıştır. Temel seviyesinde sabit yük 5 kN/m², hareketli yük ise 5 kN/m² olarak alınmıştır. Kat kütleleri, ETABS programında G+0.3Q yüklemesi dikkate alınarak tanımlanmıştır.

Konut amaçlı tasarlanan yapı için Bina Önem Katsayısı I=1 olarak belirlenmiştir. DD-2 deprem yer hareketi düzeyinde, yapıya ait kısa periyot spektral ivme katsayısı $S_{ds}=1.027$ olarak hesaplanmış ve Deprem Tasarım Sınıfı (DTS) 1 olarak tanımlanmıştır. Ayrıca, yapı yüksekliği sınıfı BYS=3 olarak belirlenmiştir. TBDY 2018'e göre, yeni inşa edilecek betonarme yapılara ilişkin yapı performans hedefleri ve bu hedeflere uygun değerlendirme ile tasarım yaklaşımları Tablo 3'te sunulmaktadır.

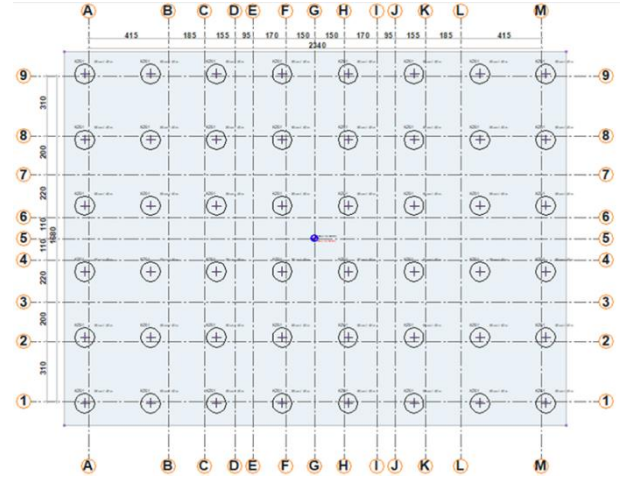
Tablo 3. Yeni yapılacak yerinde dökme betonarme, ön üretimli betonarme ve çelik binalar (Yüksek Binalar Dışında – BYS ≥ 2).

Deprem Yer H. Düzeyi	DTS = 1, 1a ⁽¹⁾ , 2, 2a ⁽¹⁾ , 3, 3a, 4, 4a		DTS = 1a ⁽²⁾ , 2a ⁽²⁾	
	Normal Performans Hedefi	Değerlendirme/Tasarım Yaklaşımı	İleri Performans Hedefi	Değerlendirme/Tasarım Yaklaşımı
DD-3	—	—	SH	ŞGDT
DD-2	KH	DGT ⁽⁵⁾	KH	DGT ^(3,4)
DD-1	—	—	KH	ŞGDT

5. Kazıklı Temellerin Tasarımı

Yapı temeli için 40 metre uzunluğunda ve 100 santimetre çapında kazıklar tasarlanmış olup, C35 beton ve B420C çelik malzemeleri kullanılacaktır. Kazıklar arası mesafe 3,40 metre olarak belirlenmiş, yerleşim detayları Şekil 11'da sunulmuştur.

Kazıklı temellerin tasarımında, zemin davranışı TBDY-2018 Ek 16C'ye göre değerlendirilmiş ve zemin sınıfının en az ZD olması şartı sağlanmıştır. Yapı, TBDY-2018'de tanımlanan Yöntem III kapsamında değerlendirilmiş olup, tasarım gereksinimlerine göre Yöntem I veya II alternatif olarak kullanılabilir.



Şekil 11. Kazık yerleşim planı.

5.1 Deprem Yükleri Altında Yapı-Kazık-Zemin Etkileşimi Analizleri

Deprem etkileri altında yapı-kazık-zemin etkileşiminin analizi, zemin-yapı dinamiğinin anlaşılması ve deprem tasarımında güvenilir çözümler sunulması açısından büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, TBDY-2018 Yöntem-III çerçevesinde alt sistem yaklaşımı kullanılarak, yapı-kazık-zemin etkileşimi için hem iki boyutlu (2B) hem de üç boyutlu (3B) analizlere yönelik modeller oluşturulacaktır. Bu modeller, deprem etkileri altındaki kinematik ve eylemsizlik etkileşimlerinin belirlenmesi ve analiz edilmesini sağlayacaktır.

5.1.1 Kinematik Etkileşim Analizi

TBDY 2018 kapsamında, farklı zemin türleri için p-y eğrilerinin seçimi tasarımcının inisiyatifine bırakılmamış ve bu konuda standart dahilinde belirlenmiş referanslar sunulmuştur. Bu yaklaşım, kazıkların yanal yükler altındaki davranışlarının doğru şekilde temsil edilmesi için önemli bir rehber sağlamaktadır. Örneğin, yumuşak kil ($s_u < 50$ kPa) için Matlock (1970) yöntemi, su seviyesi altındaki sert kil için Reese ve ark. (1975) yöntemi, su seviyesi üzerindeki sert kil için Welch ve Reese (1972) yöntemi ve kumlar için Reese ve ark. (1974) yöntemi kullanılmaktadır.

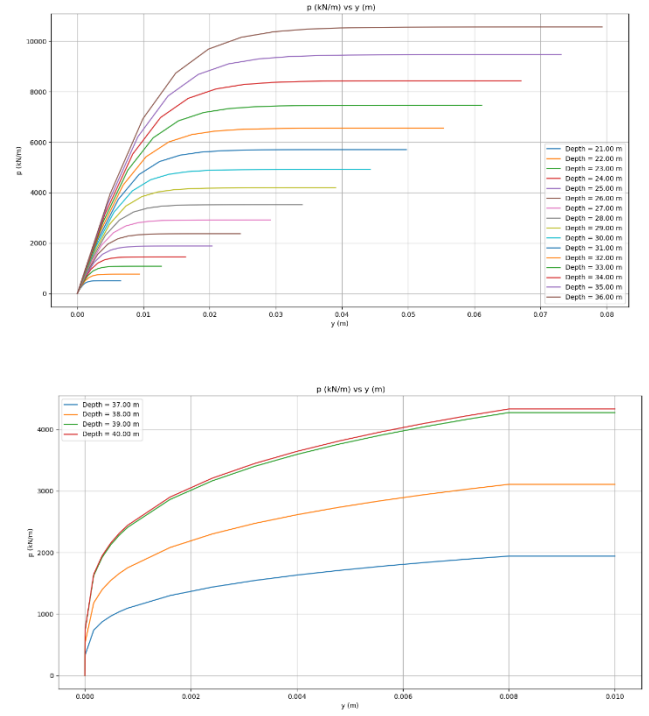
Bu yöntemlerle belirlenen p-y eğrileri Şekil 12 de sunulmaktadır. Bu eğriler kazıkların zeminle etkileşiminden kaynaklanan davranışlarını doğru şekilde yansıtmak amacıyla kinematik etkileşim analizlerinde uygulanmıştır. P-y yayları, yalnızca basınç yönünde çalışacak şekilde tasarlanmış ve zemin profili boyunca her 1 metrede bir kazık düğüm noktalarına atanmıştır. Grup etkileri nedeniyle kazıklardaki dayanım azalmaları, TBDY 2018 Denklem 16C.1 kullanılarak hesaplanan indirgeme faktörleri ile modellenmiştir.

Kazıklar hem statik hem de dinamik yüklere dayanacak şekilde tasarlanıp inşa edilmelidir. Zeminin bu yüklere karşı koyma kapasitesi temel olarak iki faktöre bağlıdır: kazık yüzeyi boyunca gelişen sürtünme direnci ve kazık tabanında zemin tarafından sağlanan uç direnci. Bu dirençlerin kazık yer değiştirmesine bağlı olarak derinlikle nasıl değiştiğini modellemek amacıyla, zemin-kazık etkileşimini açıklayan t-

z eğrileri ve uç direncini gösteren q-z eğrileri kullanılır ve q-z eğrileri için, Amerikan Petrol Enstitüsü'nün (American Petroleum Institute, API) API WSD RP-2A (2000) standardında tanımlanan doğrusal olmayan ilişkilere başvurulabilir. (TBDY 2018, 16C.6.1b)

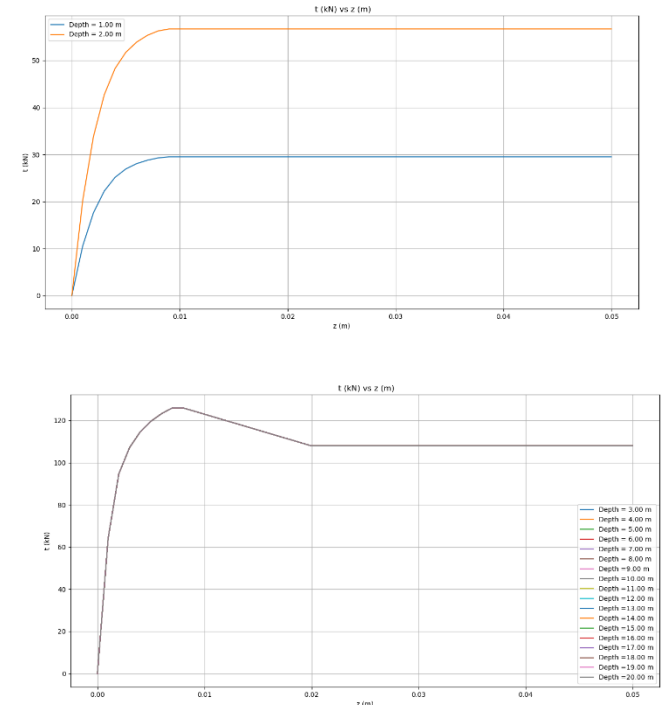
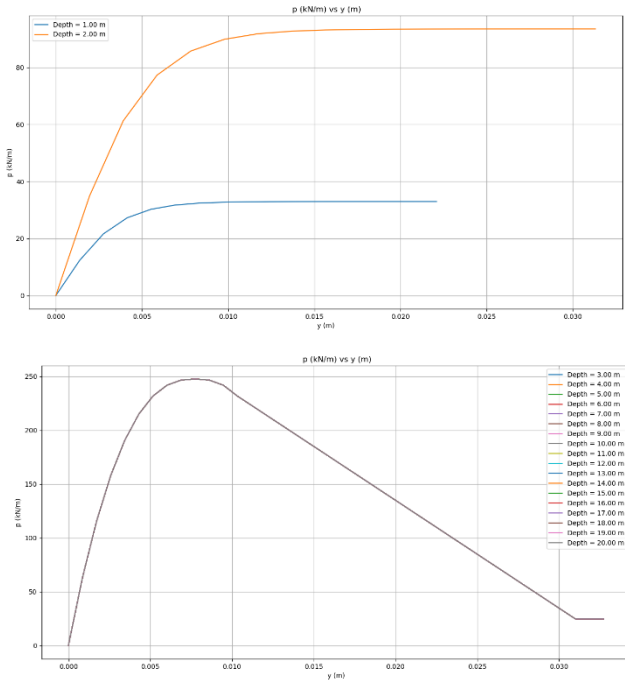
Yatay deprem etkisi altında, zemin davranışları DeepSoil yazılımı ile bir boyutlu serbest alan analizleri ile değerlendirilmiş ve her bir deprem kaydı için p-y yaylarının seviyelerinde maksimum mutlak yer değiştirme talepleri hesaplanmıştır. Elde edilen yer değiştirme zarfları kullanılarak, ETABS ve SAP2000 yazılımlarında oluşturulan kinematik etkileşim modellerinde doğrusal olmayan statik itme analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerden elde edilen eğilme momentleri TBDY 2018 kapsamında R=2.5 faktörüyle azaltılmış, ancak eksenel ve kesme kuvvetleri için azaltma uygulanmamıştır.

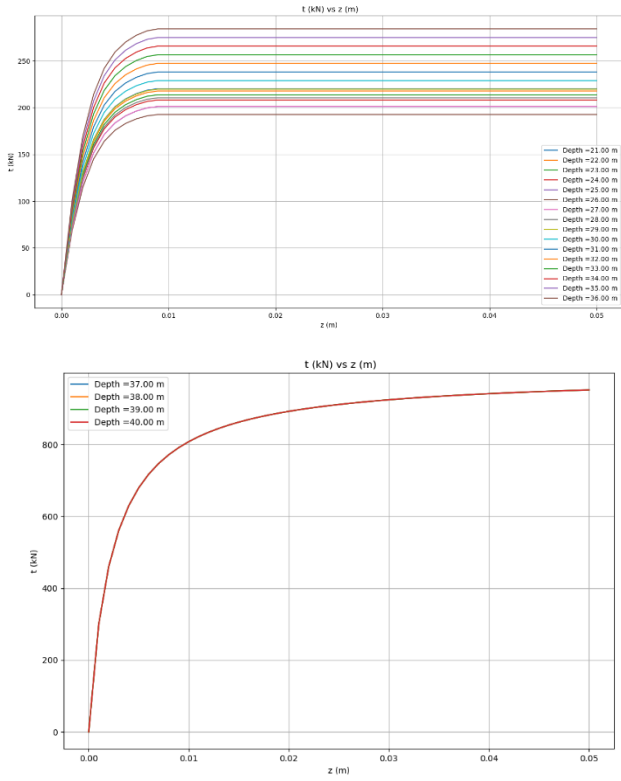
Analizler sonucunda, kazıkların her 1 metre derinlik aralığında p-y ve t-z eğrileri elde edilmiş ve bu eğriler, SAP2000 ve ETABS modellerine kazık derinliği boyunca düğüm noktalarına atanmış link elemanları olarak entegre edilmiştir. Kazık alt ucuna ise q-z eğrisi link eleman olarak tanımlanmıştır. Bu şekilde, kazık-zemin etkileşiminin doğru bir şekilde modellenmesi ve deprem etkileri altındaki dinamik davranışların güvenilir bir şekilde değerlendirilmesi sağlanmıştır.



Şekil 12. P-y eğrileri.

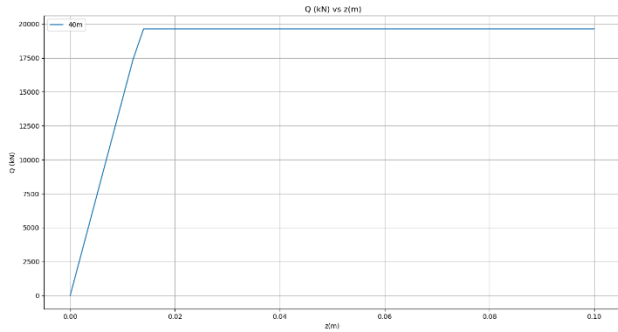
T-z yayları, kil içerikli kumlar, kum içerikli killler, çakıl-kum karışımları ve soketlenen bölgede bulunan kireçtaşı gibi zayıf kaya türleri dahil olmak üzere farklı zemin malzemeleri için tanımlanmıştır. Zemin tabakaları için belirlenen t-z eğrileri Şekil 13'de sunulmuştur.





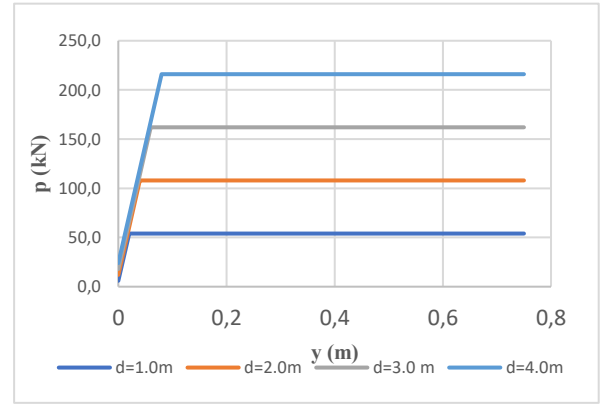
Şekil 13. T-z eğrileri

Q-z eğrileri, kazık ucunda tanımlanan tek tip bir yay olarak modellenmiştir. Q-z değerleri Şekil 14’de gösterilmiştir



Şekil 14. q-z eğrileri.

Bodrum kat çevre duvarlarında tanımlanacak p-y yaylarının belirlenmesinde, TBDY-2018 Örnekler Kitabı’nda (Yakut ve ark., 2018) önerilen yöntem uygulanmıştır. Bu yöntem kapsamında belirtilen adımlar titizlikle izlenerek, bodrum kat çevre duvarları için 1, 2, 3 ve 4 metre derinliklerdeki P-y eğrileri hesaplanmış ve Şekil 15’te sunulmuştur.

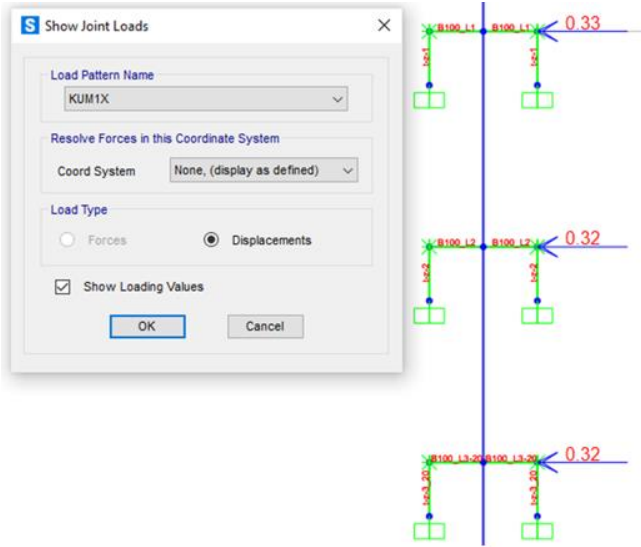


Şekil 15. Bodrum kat çevre duvarları p-y eğrileri.

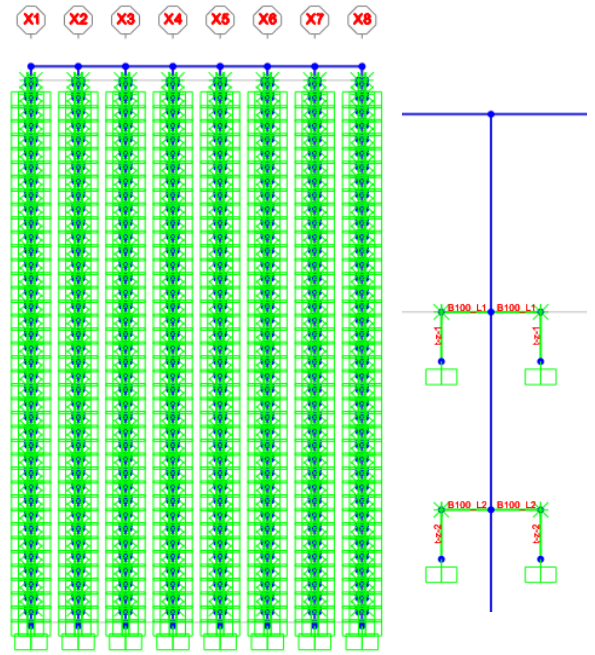
5.1.2 Maksimum Yer Değiştirme Zarflarının Uygulanması

Maksimum yer değiştirme zarfları, serbest saha analizlerinden elde edilen veriler doğrultusunda belirlenmiş ve bu zarflar, zemin profili boyunca p-y yaylarının bulunduğu seviyelerdeki maksimum mutlak yer değiştirme taleplerini temsil etmektedir. DeepSoil programı kullanılarak gerçekleştirilen analizlerde, yatay deprem etkisi altında temel kaya seviyesinden iki yönde uygulanan 11 farklı deprem kaydı ile zamana bağlı maksimum toplam yer değiştirme zarfı hesaplanmıştır (Şekil 7).

Elde edilen maksimum yer değiştirme zarfları, yapı-kazık-zemin etkileşimini doğru bir şekilde modellemek amacıyla ETABS ve SAP2000 analiz modellerine doğrudan aktarılmıştır. Bu işlem, kazık boyunca her bir düğüm noktasına uygun yer değiştirme değerlerinin atanması ile gerçekleştirilmiştir. Zarflar, kinematik etkileşim analizlerinde doğrusal olmayan statik itme analizlerinin yer değiştirme verisi olarak kullanılmıştır. Özellikle, kazık düğüm noktalarındaki p-y yaylarının uçlarına basınç yönünde uygulanan bu değerler, modeldeki zemin davranışının gerçekçi bir şekilde temsil edilmesine olanak sağlamıştır. Örnek bir uygulama Şekil 16’te sunulmuştur.



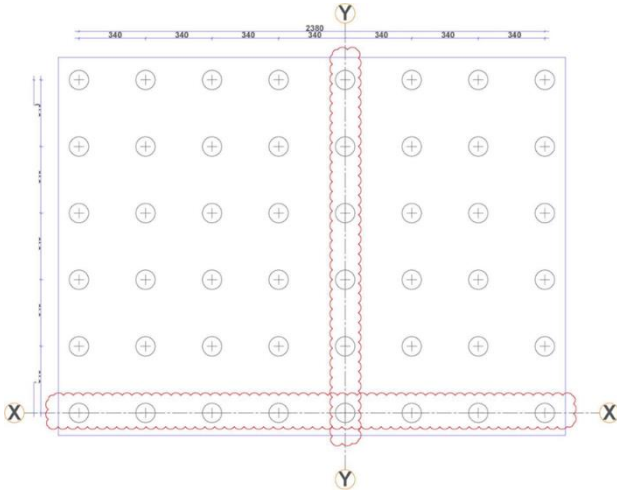
Şekil 16. ETABS ve SAP2000 analiz modelinde maksimum yer değiştirmelerin atanması.



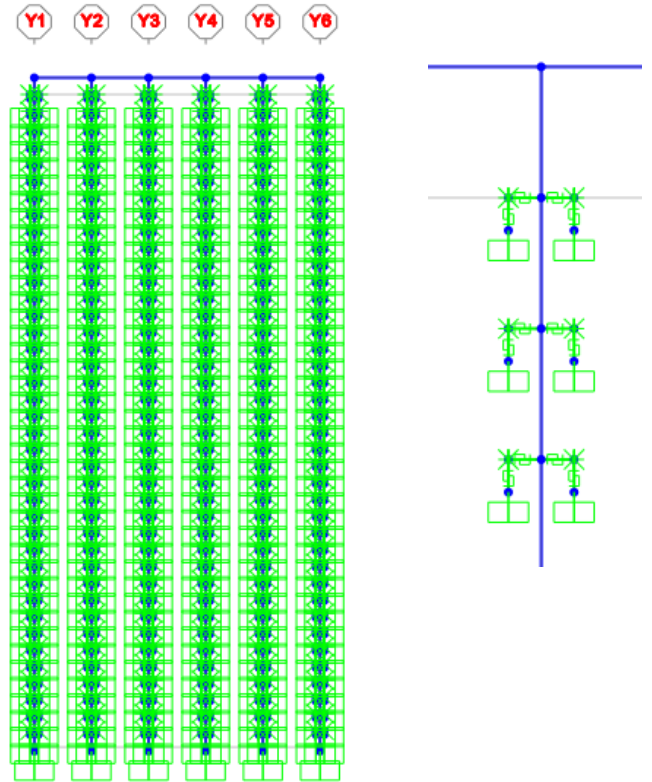
Şekil 18. X eksenini için analiz modeli.

5.1.3 Statik Artımsal Zemin Yer Değiştirme Yüklemesi İçin Yapısal Modellemenin Oluşturulması

Yapı-kazık-zemin etkileşiminin modellenmesinde, doğrusal olmayan statik itme analizi ve kazık-1B zemin etkileşim yöntemi esas alınmıştır. 2B alt sistem analizi için dahil edilen eksenler, Şekil 17'da temel planında gösterilmiştir. X ve Y yönlerine ait modeller, sırasıyla Şekil 18 ve Şekil 19'de sunulmaktadır.

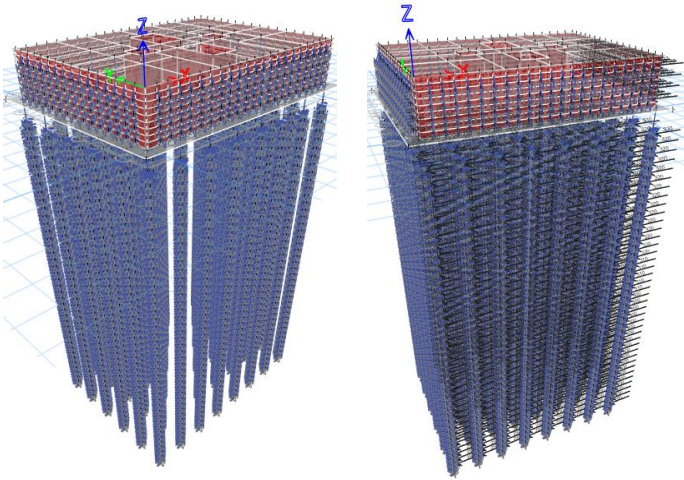


Şekil 17. Kazık yerleşim planında X ve Y eksenleri için analiz modeli.



Şekil 19. Y eksenini için analiz modeli.

3B alt sistemine ait model, Şekil 20'te gösterilmiştir.



Şekil 20. 3B alt sisteme ait model.

Kinematik etkileşim için, derinlikle değişen yer değiştirme değerleri kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Bu yer değiştirme değerleri, tüm 11x2 deprem verisi için DeepSoil yazılımı yardımıyla elde edilmiş olup, analizlerde yer değiştirme yüklemesi olarak değerlendirilmiştir. İlgili yer değiştirme değerleri Tablo 4 ve Tablo 5'te sunulmaktadır

Tablo 4. Yer Değiştirme Yüklemeleri (X Yönü)

Deprem Kaydı	Yükleme Adı	Düğüm Noktası Yük Tipi
EQ 1-1	Kum1X	Yerdeğiştirme Yüklemesi
EQ 2-1	Kum2X	Yerdeğiştirme Yüklemesi
EQ 3-1	Kum3X	Yerdeğiştirme Yüklemesi
EQ 4-1	Kum4X	Yerdeğiştirme Yüklemesi
EQ 5-1	Kum5X	Yerdeğiştirme Yüklemesi
EQ 6-1	Kum6X	Yerdeğiştirme Yüklemesi
EQ 7-1	Kum7X	Yerdeğiştirme Yüklemesi
EQ 8-1	Kum8X	Yerdeğiştirme Yüklemesi
EQ 9-1	Kum9X	Yerdeğiştirme Yüklemesi
EQ 10-1	Kum10X	Yerdeğiştirme Yüklemesi
EQ 11-1	Kum11X	Yerdeğiştirme Yüklemesi

Tablo 5. Yer Değiştirme Yüklemeleri (Y Yönü)

Deprem Kaydı	Yükleme Adı	Düğüm Noktası Yük Tipi
EQ 1-2	Kum1Y	Yerdeğiştirme Yüklemesi
EQ 2-2	Kum2Y	Yerdeğiştirme Yüklemesi
EQ 3-2	Kum3Y	Yerdeğiştirme Yüklemesi
EQ 4-2	Kum4Y	Yerdeğiştirme Yüklemesi
EQ 5-2	Kum5Y	Yerdeğiştirme Yüklemesi
EQ 6-2	Kum6Y	Yerdeğiştirme Yüklemesi
EQ 7-2	Kum7Y	Yerdeğiştirme Yüklemesi
EQ 8-2	Kum8Y	Yerdeğiştirme Yüklemesi
EQ 9-2	Kum9Y	Yerdeğiştirme Yüklemesi
EQ 10-2	Kum10Y	Yerdeğiştirme Yüklemesi
EQ 11-2	Kum11Y	Yerdeğiştirme Yüklemesi

5.1.4 Eylemsizlik Etkileşimi Analizi

TBDY-2018 Yöntem III kapsamında, yapı-kazık-zemin etkileşimini analiz etmek için iki farklı hesap modeli kullanılmıştır. Birinci model, temel tabanında zeminle etkileşimi temsil eden yayları içeren üst yapı, bodrum ve temel sistemini kapsamaktadır. Bu modelde, temel hareketine ait ivme kayıtları uygulanmış ve kazıklarda oluşan iç kuvvetler belirlenmiştir.

Üst yapı, bodrum kat temel sisteminin bir arada bulunduğu hesap modelinde kazık tepe noktalarına noktasal olarak tanımlanan yaylar modelinde, deprem verisi olarak serbest analizi sonucunda temel tabanında elde edilen spektrumların otalaması tasarım spektrumu olarak kullanılabilir. Ancak serbest zaman analizi sonucunda elde edilen tasarım spektrumunun ordinatları TBDY 2018 2.3.4'te verilen tasarım spektrumunun ordinatlarından küçük olmaması gerekmektedir. Elverişsiz olan spektrum eylemsizlik analizinde kullanılır. İlgili modelin oluşturulma aşamaları, Şekil 21'de 2B alt sistem yaklaşımına ait akış şeması ile sıralı bir şekilde sunulmuştur.

İkinci model ise, üst yapı, bodrum, temel ve kazıkların birleşik bir sistem olarak modellenmesini içermektedir. Bu modelde, zeminin davranışı doğrusal olarak ele alınmış ve zemini temsil eden yayların başlangıç rijitlikleri sisteme dahil edilmiştir.

Üst yapı, bodrum kat temel ve kazık(kütlesiz) sisteminin bir arada bulunduğu hesap modelinde geoteknik verilere göre elde edilen non-linear p-y, t-z link elemanları kazıkların düğüm noktalarına kazık taban uç düğüm noktasına ise non-linear q-z link elemanları tanımlanır. Link elemanlar linear davranacak şekilde başlangıç rijitlikleri kullanılarak elde edilen modelde, deprem verisi olarak serbest analizi sonucunda temel tabanında elde edilen spektrumların otalaması tasarım spektrumu olarak kullanılabilir. Ancak serbest zaman analizi sonucunda elde edilen tasarım spektrumunun ordinatları TBDY 2018 2.3.4'te verilen tasarım spektrumunun ordinatlarından küçük olmaması gerekmektedir. Elverişsiz olan spektrum eylemsizlik analizinde kullanılır. Bu modelin oluşturulma aşamaları ise, Şekil 22'de 3B alt sistem yaklaşımına ait akış şeması ile açıklanmıştır.

Her iki model, kazıkların ve yapı-zemin sisteminin deprem etkileri altındaki davranışlarını değerlendirmek üzere kullanılmış ve elde edilen sonuçlar birbiriyle karşılaştırılarak analiz edilmiştir. Bu karşılaştırmalar, modellerin doğruluğu ve tasarım süreçlerinde kullanılabilirliği açısından önemli çıkarımlar sunmaktadır.

Altsistem Yöntemi (2 Boyutlu Model)



X ve Y doğrultuları için ayrı olarak 11 adet deprem kaydı kullanılarak yapılan serbest saha analizlerinden elde edilen zeminin yatay yer değiştirmesinin kazık düğüm noktalarında max deplasman zarfları ve yapı temel tabanında ivme kayıtlarına ait tepki spektrumları elde edilir



Şekil 21. 2B alt sistem yaklaşım akış şeması.

Deprem etkisi altında üstyapı ve yapı temelini bulundugu hesap modelinde üst yapı için linear dinamik analizi yapılır. Aynı X ve Y doğrultuları için elde edilen eylemsizlik etkileşimi iç kuvvetleri le kinematik etkileşim iç kuvvetleri(moment değeri 2.5 oranında azaltılır) birleştirilir X ve Y doğrultuları TBDY 2018,16C5 uyarınca birleştirilir.

Şekil 22. 3B Alt Sistem Yaklaşım Akış Şeması

5.1.5 Kinematik Etkileşim ve Eylemsizlik Etkileşim Etkilerinin Birleştirilmesi

Yapı-kazık-zemin etkileşim analizleri sonucunda, kinematik ve eylemsizlik etkileşim analizlerinden ayrı ayrı elde edilen iç kuvvetler, TBDY 2018 Bölüm 16C.5'e uygun olarak birleştirilmelidir. Bu birleştirme sürecinde, tasarım amacıyla dikkate alınacak iç kuvvetler, birincil deprem yönünde yapılan analizden elde edilen iç kuvvetlerin, dik yönde elde edilen iç kuvvetlerin %30'u ile toplanmasıyla belirlenmelidir (TBDY 2018, Bölüm 4.4.2). İç kuvvet birleştirme tablosu Tablo 6'da sunulmaktadır.

Tablo 6. X ve Y yönleri için kinematik ve eylemsizlik etkileşim etkilerinin birleştirilmesi.

X-doğrultusu	Y-doğrultusu
$M_x = M_{x,kinematik} + M_{x,eylemsizlik}$	$M_y = M_{y,kinematik} + M_{y,eylemsizlik}$
$V_x = V_{x,kinematik} + V_{x,eylemsizlik}$	$V_y = V_{y,kinematik} + V_{y,eylemsizlik}$
$A_x = A_{x,kinematik} + A_{x,eylemsizlik}$	$A_y = A_{y,kinematik} + A_{y,eylemsizlik}$
X doğrultusuna göre birleşim	Y doğrultusuna göre birleşim
$M_{T\ X} = M_x + 0.3M_y$	$M_{T\ Y} = M_y + 0.3M_x$
$V_{T\ X} = V_x + 0.3V_y$	$V_{T\ Y} = V_y + 0.3V_x$
$A_{T\ X} = A_x + 0.3A_y$	$A_{T\ Y} = A_y + 0.3A_x$

İki boyutlu alt sistem yaklaşımı kullanılarak gerçekleştirilen yapı-zemin etkileşimi analizleri sonucunda, en kritik kazıkta gözlemlenen maksimum moment (M), kesme kuvveti (V) ve eksenel kuvvet (A) değerlerinin eylemsizlik etkiler tarafından baskın olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, eylemsizlik etkileşim değerlerinin maksimuma ulaştığı kazık derinliğindeki kinematik etkileşim değerleri alınarak tabloda gösterildiği şekilde birleştirilmiştir. Detaylı sonuçlar Tablo 7'da sunulmaktadır.

Tablo 7. Yapı-zemin etkileşimi analizleri sonucunda en kritik kazıkta oluşan maksimum moment (M), kesme kuvveti (V) ve eksenel kuvvet (A) değerleri. (2B alt yapı yaklaşımı).

Azaltılmamış Analiz Sonuçları				Azaltılmış Sonuçlar(Moment katsayısı(1/2.5))			
Analiz	Yükleme Doğrultusu	M (kN.m)	V (kN)	A (kN)	M (kN.m)	V (kN)	A (kN)
Kinematik	X	204.9	55.9	3868.1	81.9	55.9	3868.1
Etkileşim	Y	266.3	83.3	3981.4	106.5	83.3	3981.4
Eylemsizlik	X	1682.7	628.8	5193.3	1682.7	628.8	5193.3
Etkileşim	Y	1352.1	528.0	4963.2	1352.1	528.0	4963.2
Toplam		X doğrultusu			1764.7	684.8	9061.4
		Y doğrultusu			1458.6	611.4	8944.5
Birleştirilmiş Toplam		X doğrultusuna göre			2202.3	868.2	11744.8
		Y doğrultusuna göre			1988.0	816.8	11662.9

Üç boyutlu alt sistem yaklaşımı kullanılarak gerçekleştirilen yapı-zemin etkileşimi analizleri sonucunda, en kritik kazıkta gözlemlenen maksimum moment (M), kesme kuvveti (V) ve eksenel kuvvet (A) değerlerinin eylemsizlik etkiler tarafından baskın olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, eylemsizlik etkileşim değerlerinin maksimuma ulaştığı kazık derinliğindeki kinematik etkileşim değerleri alınarak tabloda gösterildiği şekilde birleştirilmiştir. Detaylı sonuçlar Tablo 8'de sunulmaktadır.

Tablo 8. Yapı-zemin etkileşimi analizleri sonucunda en kritik kazıkta oluşan maksimum moment (M), kesme kuvveti (V) ve eksenel kuvvet (A) değerleri. (3B alt yapı yaklaşımı).

Azaltılmamış Analiz Sonuçları				Azaltılmış Sonuçlar(Moment katsayısı(1/2.5))			
Analiz	Yükleme Doğrultusu	M (kN.m)	V (kN)	A (kN)	M (kN.m)	V (kN)	A (kN)
Kinematik Etkileşim	X	523.3	159.0	2874.0	209.3	159.0	2874.0
	Y	635.4	199.6	3178.1	254.2	199.6	3178.1
Eylemsizlik Etkileşim	X	2208.5	854.5	5716.8	2208.5	854.5	5716.8
	Y	2150.3	838.9	5716.8	2150.3	838.9	5716.8
Toplam	X doğrultusu				2417.8	1013.5	8590.7
	Y doğrultusu				2404.5	1038.5	8894.9
Birleştirilmiş Toplam	X doğrultusuna göre				3139.1	1325.1	11259.2
	Y doğrultusuna göre				3129.8	1342.6	11472.1

5. Sonuçlar

Bu çalışmada, ZD tipi zemine inşa edilmesi planlanan, bodrum katlı 17 katlı bir yüksek binanın, TBDY 2018'in Bölüm 16'sında belirtilen Yöntem III kullanılarak yapılan yapı-kazık-zemin etkileşimi (SSI) analizleri gerçekleştirilmiştir.

Alt sistem yaklaşımında, binanın üstyapısı üç boyutlu olarak modellenmiştir. Analiz, üstyapı, bodrum, temel ve kazık sisteminin birlikte tek bir modelde modellenmesinin yanı sıra, üstyapı ile bodrum-temel sistemlerinin ayrı ayrı analiz edildiği senaryoları da içermektedir. Kinematik etkileşim analizleri, bodrum, temel ve kazık sisteminin 2B ve 3B

modelleri üzerinde, bodrum ve temel kütlesi dikkate alınmadan yapılmıştır. Ardından, yerel zemin davranışı analizlerinden elde edilen yer değiştirme kayıtları ve ivme spektrumları kullanılarak 11 deprem kaydı, üstyapı ve temel sistemini temsil eden modele uygulanmış ve bu yükler kazık sistemine aktarılmıştır. Elde edilen yükler, temel ve kazık sistemi modeline aktarılmış ve yapı-kazık-zemin etkileşimi analizi tamamlanmıştır.

TBDY 2018'in Bölüm 16'sında (Yöntem III) önerilen şekilde, analizler için ayrı hesaplamalı modeller oluşturulmuştur. İki yaklaşımın her biri için, kritik kazıklarda kinematik ve eylemsizlik etkileşim analizlerinde gözlemlenen maksimum etkiler Tablo 9'da sunulmuştur

Tablo 9. Farklı hesaplama modelleri kullanılarak kazıklarda oluşan iç kuvvetlerin karşılaştırılması.

Analiz Modelleri		2B Altsistem	3B Altsistem
Kinematik	Max Moment(kNm)	2202.2694	3129.7878
Etkileşim+Eylemsizlik	Max Kesme Kuvveti(kN)	868.161	1342.573
Etkileşimi	Max Eksenel Kuvveti(kN)	11662.933	11472.122

Tablo 9'da 2B alt sistem yaklaşımının, 3B alt sistem yaklaşımına kıyasla daha düşük iç kuvvetler ürettiği görülmektedir. Simetrik olarak çözümlenen modelde, 2B ve 3B analizler arasındaki etkileşim farkının bu ölçüde büyük olması beklenmemektedir. Bu farklılığın bodrum yapısından kaynaklanabileceği değerlendirilmektedir.

Elde edilen bulgular, bodrum katlara sahip yüksek yapıların kazık tasarımında, ilk değerlendirme aşamalarında 2B alt sistem yaklaşımının pratik ve yararlı bir ön analiz yöntemi olabileceğini göstermektedir. Ancak sonuçlar, bodrumlu yapılarda 3B alt sistem yaklaşımının daha detaylı analizler ve kesin sonuçlar elde etmek açısından önemli olduğunu da ortaya koymaktadır. 3B modelleme, yapı-kazık-zemin etkileşimini daha kapsamlı bir şekilde değerlendirerek kazık tasarım sürecinde güvenilir sonuçlar elde edilmesine katkı sağlayabilmektedir.

Kaynaklar

- [1] TBDY, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, AFAD, Türkiye, 2018.
- [2] Türk Standartları. (2000). Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları. (TS500). Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [3] Yakut, A., Binici, B., Topkaya, C., Canbay, E.,

Sucuoğlu, H., Tuncay, K., Yılmaz, M. T., Gülkan, P., (2018). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği Örnekler Kitabı. Ankara.

- [4] Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center, PEER Strong Motion Database, <http://peer.berkeley.edu/smcat/>, 2006.
- [5] CSI. SAP2000, V18.Integrated Software for Structural Analysis and Design. Berkeley, CA, USA: Computer and Structures Inc. (CSI), 2018
- [6] ETABS Ultimate (Version 19.0.0) [Computer Software] Extended Three-Dimensional Analysis of Building System, Computers and Structures Inc., Berkeley, California.
- [7] Seismomatch [Computer software]. Earthquake Software for Response Spectrum Matching,
- [8] American Petroleum Institute (API), Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms–working stress design. API Recommended Practice 2A(RP-2A WSD), 20th edn, 193 pp, 1993.
- [9] Reese L. C., Cox W. R., Koop F. D. (1974). Analysis of Laterally Loaded Piles in Sand. 6th Offshore Technology Conference, Houston, Texas, 1974.
- [10] Reese L. C., Cox W. R., Koop F. D. (2011). Field Testing and Analysis of Laterally Loaded Piles in Stiff Clay. 7th Offshore Technology Conference, Houston, Texas.
- [11] Reese L. C., Welch R. C. (1975). Lateral Loading of Deep Foundation in Stiff Clay. Journal of Geotechnical Engineering Division, 101, 7, 633-649.
- [12] Alver, Ozan & Sezen, Atila & Eseller-Bayat, Ece. (2021). TBDY 2018'e Göre Geoteknik Tasarım: Sıvılaşma ve Yapı-Kazık-Zemin Etkileşimi Analizleri. Teknik Dergi. 32. 10.18400/tekderg.744891.
- [13] DeepSoil (2019) “Tutorial and User Manual”, V7, Board of Trustees of University of Illinois at UrbanaChampaign and Youssef Hashash.
- [14] Demir, B.-Peker, A. S.-Tomaç, S. K. (2019). P-Y Eğrileri ve TBDY 2018 Gereklikleri: P-Y Eğrilerinin Oluşturulması. 4. Köprüler ve Viyadükler Sempozyumu, Ankara.
- [15] URL-1:<https://tdth.afad.gov.tr/>, (Ziyaret tarihi: 25 Haziran 2024).
- [16] URL-2: <https://ngawest2.berkeley.edu/>, (Ziyaret tarihi: 30 Temmuz 2024).