



Sismik yükler altında yapı-kazık-zemin etkileşimi kapsamında kinematik ve eylemsizlik etkileşim analizlerinin Plaxis-3D sonlu elemanlar programıyla modellenmesi-Bir vaka analizi

Modeling of kinematic and inertial interaction analyses within the scope of structure-pile-soil interaction under seismic loads using plaxis-3d finite element program- A case study

Fatih Çelik^{1,*}

¹ Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye

Öz

Kazıklı radye temel sistemleri yardımıyla üst yapıdan gelen yükler güvenli sağlam zeminlere aktarılmaktadır. Deprem kuvvetleri altında kazıklı radye tasarımları Yapı-Kazık-Zemin etkileşimi (YKZE) analizleriyle yapılmaktadır. Bu çözüm yaklaşımı çeşitli yazılım ve bilgisayar donanım imkânlarına bağlı olarak yarı sonsuz modelleyen yaklaşımlarla çözülebilmektedir. Bu yaklaşımlar zemin ortamı ile yapının birlikte modellendiği ortak sistem modeli veya zemin temel sistemi ile yapının ayrı ayrı çözülerek entegre edildiği alt sistem modelidir. Zemin modelinin daha gerçekçi tanımlanabildiği bir sayısal ortamda kinematik ve eylemsizlik analizlerinin yapılması yeni bir yaklaşım olarak değerlendirilmiştir. Bu çalışmada bu durum amaçlanarak bir vaka analizi olarak Gaziantep ilinde yapılması planlanan toplam 13 katlı yapının kazıklı radye temel sistemi TBDY-2018 (Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği) kapsamında Alt sistem Yöntem-III durumu dikkate alınarak tasarlanmış ve gerek kinematik analiz gerekse de eylemsizlik analizi gelişmiş bir sonlu elemanlar analiz programı olan Plaxis-3D yazılımıyla yapılarak alternatif bir hesap yöntemi sunulmuştur. Bu çalışma ile rijitlik farkı çok yüksek olmayan zemin profilleri arasında kinematik etkileşimin etkin olmayacağı gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: Yapı-Kazık-Zemin etkileşimi, Kinematik etkileşim, Eylemsizlik etkileşim, Kazıklı radye, Alt sistem yöntemi

1 Giriş

Üst yapıdan gelen yüklerin yüzeysel temeller vasıtasıyla zemin profillerine aktarılmasında zemin ortamının stabilite, deformasyon ve sıvılaşma problemleri açısından yetersiz kaldığı durumlarda derin temel sistemlerinden olan kazıklı radye temeller geoteknik mühendisleri tarafından yaygın olarak kullanılmaktadır. Kazıklı radye temel sistemleri yardımıyla üst yapıdan gelen yükler statik şartlar altında güvenli sağlam zeminlere aktarılmaktadır. Buna ek olarak kazıklı radye temel sistemleri olası tekrarlı deprem yükleri altında yapının hasar görmesini sınırlar ya da önemli ölçüde engeller [1]. Bu sebeple kazıklı radye temel sistemlerin

Abstract

With the help of piled raft foundation systems, the loads coming from the superstructure are transferred safely to rigid soil profiles. Piled raft designs under dynamic earthquake forces are made by Structure-Pile-Soil Interaction (SPSI) analyses. This solution approach can be solved with semi-infinite modeling approaches depending on various software and computer hardware possibilities. These approaches are the direct system model in which the soil and the structure are modeled together, or the sub-system model in which the soil-foundation system and the structure are solved separately and integrated. It is believed that performing kinematic and inertial analyses in a numerical analysis where the soil model can be defined more realistically will yield more reliable results. In this study, aiming at this situation, the piled raft foundation system of a total of 13-storey building planned to be built in Gaziantep province was designed as a case study by taking into account the Subsystem Method-III situation within the scope of TBEC-2018 (Turkish Building Earthquake Code) and an alternative calculation method was presented by performing both kinematic analysis and inertial analysis with Plaxis-3D software, an advanced finite element analysis program.

Keywords: Structure-Pile-Soil interaction, Kinematic interaction, Inertial interaction, Piled raft, Sub-System method

tasarımı özellikle sismik etkilere maruz kalan yapıların dayanıklılığı kapsamında önemli yer tutmaktadır. Bu temel sistemlerinin tasarımı her ne kadar geoteknik mühendislerinin sorumluluğunda olsa da disiplinler arası bir çalışmayı zorunlu kılmaktadır. Bu kapsamda geoteknik mühendisliğinin yanı sıra deprem mühendisliği ve yapı mühendisliği gibi alt disiplinlerinde bu tip temel sistemlerin tasarımında Yapı-Kazık-Zemin Etkileşimi (YKZE) açısından katkıları kaçınılmazdır [2].

Deprem kuvvetleri altında, YKZE analizlerinde zemin ve kazık davranışını inceleyen çok sayıda analitik çözüm yaklaşımı literatürde yer almaktadır [3]. Bu çözüm

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: fatihcelik@ohu.edu.tr (F. Çelik)

Geliş / Received: 10.03.2025 Kabul / Accepted: 07.04.2025 Yayınlanma / Published: 15.04.2025

doi: 10.28948/ngumuh.1654961

yaklaşımlarına bağlı YKZE problemleri, çeşitli yazılım ve bilgisayar donanım imkânlarına bağlı olarak yarı sonsuz modelleyen yaklaşımlarla çözülebilmektedir. Bu yaklaşımlar zemin ortamı ile yapının birlikte modellendiği ortak sistem modeli veya zemin temel sistemi ile yapının ayrı ayrı çözülerek entegre edildiği alt sistem modelidir [4]. Bu modellerden alt sistem yöntemi üç aşamadan oluşan bir yaklaşımla çözülmektedir [5]. Bu aşamalar sırasıyla; (1) kinematik etkileşim analizi, (2) eylemsizlik etkileşim analizi ve (3) YKZE analizi kapsamında bu iki etkileşim analiz sonuçlarının birleştirilmesi şeklinde sıralanır. Alt sistem yöntemi analizinin en büyük avantajı, her aşamanın birbirinden bağımsız olarak analiz edilmesidir [6]. Son zamanlarda YKZE ile ilgili yapılmış çalışmalardan bu konunun önemi anlaşılmaktadır [7]. Araştırmacılar daha çok bu çalışmalarda alt sistem yönteminin tasarımcılar açısından esnekliğe sahip olmasının avantajları üzerine değinmişlerdir [8]. Ayrıca başka bir çalışmada, bu yöntem kapsamında dikkate alınan sadece doğrusal zemin ve yapı davranışı için geçerli olan süper pozisyon ilkesinin, doğrusal olmayan modeller doğrusal olmayan zemin yaklaşımında da kullanılabileceği önerilmiştir [9]. Bir diğer deyişle, alt sistem yöntemi prensip olarak doğrusal davranışı esas alır fakat mühendislik pratiğinde doğrusal olmayan davranış için de uygulanabilir. Ortak sistem yöntemi ise; yapı, zemin ve kazıklı temel modellerinin tek bir model altında bütün sistemin sayısal analiz ortamında idealleştirilmesi ve ana kaya olarak tanımlanan taban kayasında etkililen deprem kayıtlarının YKZE kapsamında tüm sisteme etkililerek zaman-tanım alanında analiz edilmesi olarak tanımlanmaktadır [3,4]. Bu yöntemde zemin ortamı, deprem etkileri altında zeminde oluşabilecek yansımaları engellemek için geçirgen sınır koşulları temsil eden “iletken sınırlar” (transmitting boundaries) adı verilen yapay sınır koşullarıyla sınırlandırılır. Yapı-zemin-kazık elemanları sayısal ortamda eş zamanlı olarak tek bütün bir modelle tanımlanır ve deprem yer hareketi taban kayası olarak tanımlanan mostra da etkililir. Alt sistem yönteminde kullanılan süper pozisyon yaklaşımı ortak sistem yönteminde kullanılmadığı için bu yöntemle daha gerçekçi analizlerin yapılabilceği ve daha geçerli sonuçlar elde edilebileceği yaygın olarak kabul görülür [10-13]. Ancak ortak sistem yöntemi her ne kadar alt sistem yöntemine göre daha gerçekçi bir analiz modeli oluştursa da analizlerin tamamlanma sürelerinin çok uzun olması ve güçlü bilgisayar donanımları gerektirmesi sebebiyle zorunlu kalınmadıkça tasarımcılar tarafından çok tercih edilmemektedir. Ortak sistem yönteminde analizler çok sayıda deprem kaydı kullanılarak doğrusal olmayan yaklaşımla zaman-tanım alanında yapıldığından analizlerin tamamlanması çok uzun süreler alabilmektedir. Bu durum bu yöntemin en dikkat çeken dezavantajlarından biri olarak görülmektedir. Daha esnek bir analiz yaklaşımına sahip olan ve ortak sistem yöntemine göre çok daha kısa sürelerde analiz edilebilen alt sistem modeli bu yönüyle tercih edilen bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır.

Alt sistem yönteminde yapı elemanları çubuk eleman, perde ve temel kabuk eleman ve zemin profili ise doğrusal olmayan yaylarla [14-16] (p-y, t-z ve Q-z yayları)

modellenmektedir. Bu yöntemde yapının eylemsizlik davranışının dikkate alınmadığı kinematik etkileşim ve titreşen yapıdan kazık-zemin ortamına geri dönen deprem dalgalarından ötürü oluşan etkilerin değerlendirildiği eylemsizlik etkileşim durumları analiz edilir [4]. Kinematik etkileşimde en az farklı 11 deprem kaydı ile yapılan sahaya özel deprem analiz sonuçlarından elde edilen zemin tabakaları boyunca oluşan yatay deplasmanlar, radye-kazık modeli üzerinde çubuk eleman olarak tanımlanan kazıkların üzerinde farklı aralıklarla tanımlanmış doğrusal olmayan yaylara uygulanarak kazık elemanında oluşan zorlanmalar ve iç tesir değerleri belirlenir. Daha sonra eylemsizlik analizi kapsamında sahaya özel deprem analizi ile taban kayasından temel altı zemin yüzeyine kadar taşınan 11 deprem kaydının dönüştürülmüş ortalama spektrum eğrisi ile analiz edilmiş yapı modelinin temel seviyesinde oluşturduğu taban kesme kuvveti yine radye-kazık modeli üzerinde etkililerek kazıklarda oluşan zorlanmalar ve iç tesir değerleri belirlenir. Son olarak süper pozisyon yöntemiyle kinematik ve eylemsizlik analiz sonuçlarında elde edilen sonuçlar birleştirilir ve YKZE analizi tamamlanarak kazıkların yapısal tasarımı tamamlanır. Bu hesap yaklaşımı dünyada yaygın olarak kullanılan bir hesap yöntemi olarak kabul edilmekte olup sahada yapılan tasarımlar genellikle bu yöntemle yapılır [4]. Bu yöntem her ne kadar genel kabul gören bir yaklaşım olsa da zemin modelinin yaylar yardımıyla temsil edilmesi gerçekçi bir çözümü birebir yansıtmamaktadır. Zemin modelinin daha gerçekçi tanımlanabildiği bir sayısal ortamda kinematik ve eylemsizlik analizlerinin yapılması daha güvenilir sonuçlar verebileceği kanaatini oluşturmaktadır. Bu çalışmada bu durum amaçlanarak bir vaka analizi olarak Gaziantep ilinde yapılması planlanan Bodrum + Zemin + 11 normal kattan oluşan toplam 13 katlı yapının kazıklı radye temel sistemi TBDY-2018 [17] (Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği) kapsamında Alt sistem Yöntem-III durumu dikkate alınarak tasarlanmış ve gerek kinematik analiz gerekse de eylemsizlik analizi dünyada yaygın olarak kabul gören gelişmiş bir sonlu elemanlar analiz programı olan lisanslı Plaxis-3D Ultimate versiyon-2025 yazılımıyla yapılarak alternatif bir hesap yöntemi sunulmuştur.

2 Projenin tanıtılması ve geoteknik karakterizasyon

Bu çalışmada bir vaka analizi kapsamında tasarlanmış kazıklı radye temel sistemine sahip bir yapının alt sistem yöntemi kullanılarak kinematik ve eylemsizlik analizleri ile YKZE analizleri sunulmuştur. Bahse konu bu analizler dünyada yaygın olarak kabul gören gelişmiş bir sonlu elemanlar analiz programı olan lisanslı Plaxis-3D Ultimate versiyon-2025 yazılımıyla yapılmıştır. Çalışmaya ait oluşturulmuş yapı-kazık-zemin modeli, tasarım metodolojisi ve kullanılan yazılım ve detaylar bu bölümde alt başlıklar halinde sunulmuştur.

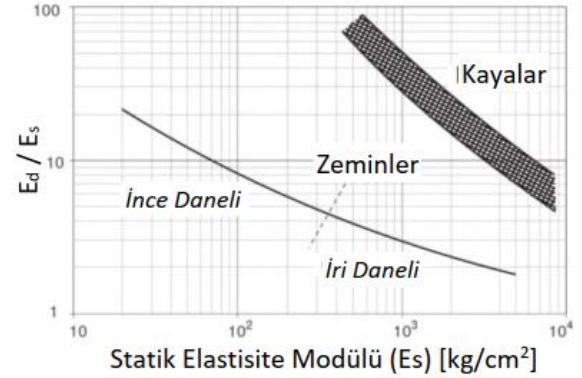
Gaziantep ilinde yapılması planlanan yapı 11.655,52 m²'lik bir alanda yapılacak olup 13 katlı (B+Z+11 katlı) tasarlanmış ve konut amaçlı olarak inşa edilecektir. Toplam yapı yüksekliği 42.7 metredir. Çalışma alanında 10 adet 20 metre derinliğinde zemin incelemeleri için sondaj kuyuları açılmıştır. İnceleme alanında açılan SK-1, SK-3, SK-4 SK-5

kuyularında 14.0 metreden sonra geçilen birim kireçtaşıdır. SK-2 SK-7, SK-9 ve SK-10 nolu kuyuda 14.50 m'den sonra Kireçtaşı birime rastlanmıştır. SK-6 ve SK-8 nolu kuyularda ise 15.0 m den sonra kireçtaşı birimine girilmiştir. İnceleme alanı zemin formasyonu olarak Gaziantep Formasyonu olarak adlandırılan killi kireçtaşı birimden oluşmaktadır. İnceleme alanındaki dolgu vasıfsız olup inşaat atıkları, çöp, demir moloz atıklarından ibaret heterojen yapıdadır. Zaman içerisinde sıkışmış ve orta sıkı-sıkı olarak değerlendirilecek bir yapıdadır. Dolgu birimdeki kayma dalga hızları incelendiğinde orta sıkı-sıkı bir zemin profilinin varlığı görülmektedir. İnceleme alanındaki gözlemler ve yapılan sondaj çalışmalarından alınan numuneler üzerinde yapılan laboratuvar deneylerinden elde edilen veriler sonucunda, çalışma alanı litolojisi killi kireçtaşı olarak görülmüştür. Sondajlar esnasında geçilen en üst birim dolgu olup dolgu altı ise Kireçtaşı birimi olarak tanımlanmıştır. Parsel genel olarak dolgu ile kaplı olup 14.0-15.0 m lik dolgu altındaki Kireçtaşı birim varlığı gözlenmiştir.

Kireçtaşı birim için Roc-Lab programı yardımıyla Hoek-Brown kriterleri dikkate alınarak Mohr-Coulomb parametreleri belirlenmiştir. RQD değeri ortalama %24 olup; "Çok Kötü Kaliteli" olarak sınıflandırılmıştır. Hoek-Brown sınıflaması kapsamında girdi parametreleri; Ortalama tek eksenli basınç dayanımı $\sigma_c = 20.0$ MPa, $GSI=40$, $m_i=10$ ve $E_i=16000$ MPa olarak alınmıştır. Bu kapsamda Hoek-Brown kriterleri; $m_b=0.370$, $s=0.0002$ ve $a=0.511$ olarak belirlenmiştir. Bu değerlere göre Mohr-Coulomb parametreleri; $c=108$ kPa ve içsel sürtünme açısı $\phi=38^\circ$ olarak değerlendirilmiştir. MASW uygulaması ile hesaplanan yüzey kayma dalga hızları (V_s) ve bu değerlere göre hesaplanmış V_{s30} değerlerinin 450-500 m/sn aralığında olduğu belirlenmiştir. Bu değerlere göre ilgili çalışma alanının Yerel Zemin Sınıfının TBDY-2018 yönetmeliği uyarınca "ZC" olarak değerlendirilebileceği anlaşılmıştır.

Dinamik modüllerden statik modüllere geçmek için Alpan (1970) [18] tarafından önerilen ilişki kullanılmıştır (bkz Şekil 1). Statik yüklerde teğet (başlangıç) elastisite modülü (E_0) ile sekant elastisite modülü (E_{50}) arasında $E_0/E_{50}=3.0$ ilişkisi kullanılmıştır. Bununla birlikte, kayma modülü ve elastisite modülü referans gerilme değerine (p'_{ref}) bağımlıdır. Referans gerilme, arazide sismik deneylerinden elde edilen ve modül hesaplarında dikkate alınan V_s değerinin ölçüldüğü noktadaki ortalama efektif gerilme değeridir. P'_{ref} değerleri bu çalışmada 100 kPa alınmıştır.

Drenajsız yükleme şartlarına ait gerilme-deformasyon analizlerinde permeabilite katsayıları önemlidir. Bu problem için seçilen karakteristik permeabilite değeri için zemin profili geçirimsiz kabul edilmiştir. Zemin tabakaları için tanımlanan V_s değerleri ile hesaplanan $G_{0,ref}$ değerleri ve tasarıma esas geoteknik parametreler Tablo 1 ve Tablo 2'de sunulmuştur.



Şekil 1. Dinamik elastisite modülü (E_d) ve statik elastisite modülü (E_s) arasındaki ilişki [18]

3 Deprem kayıt takımlarının belirlenmesi ve kayıtların ölçeklendirilmesi

Tasarım spektrumları belirlenirken Türkiye Deprem Tehlike Haritalarının (TDTH) kullanılması TBDY-2018'de yer alan en önemli yeniliklerden biri olarak görülmektedir. Deprem yer hareketi spektrumu, Spektral İvme Katsayısı ve Tasarım Spektral İvme Katsayısı adı verilen iki kavramla ifade edilmektedir.

Deprem yer hareketi spektrumları %5 sönüm oranı için belirli bir deprem yer hareketi düzeyinde harita spektral ivme ve yerel zemin etki katsayıları dikkate alınarak belirlenir. TDTH, Türkiye ankarası ve civarında olmuş aletsel dönem öncesi ve sonrası birçok depremin ve buna benzer birçok deprem kataloğunun olasılıksal analiz edilmesiyle elde edilmiş sismik tehlike analizleri kapsamında hazırlanmıştır. Boyutsuz kısa periyot harita spektral ivme katsayısı, S_s ve 1.0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı S_1 değerleri $V_{s30} = 760$ m/s olan yüzeydeki jenerik kaya (mostra) için TDTH'tan (<https://tdth.afad.gov.tr/>) faydalanılarak dört farklı yer hareketi düzeyiyle ilişkili olarak elde edilecektir.

Tablo 1. V_s ile hesap edilen kayma modülü ($G_{0,ref}$) ve sekant elastisite modülü ($E_{50,ref}$) değerleri

Birim	Dinamik Parametreler				Statik Parametreler					
	V_s (m/sn)	v	γ (kN/m³)	$G_{0,ref}$ (MPa)	$E_{ur,ref}$ (MPa)	Seçilen E_d/E_s	$E_{0,s}$ (MPa)	$E_{ur,ref}$ (MPa)	E_{ur}/E_{50}	$E_{50,ref}$ (MPa)
Dolgu	350	0.20	19.0	233	559	3.5	160	160	3	53
Kireçtaşı-Kaya	600	0.20	22.0	792	1901	4.5	422	422	3	141

Tablo 2. Sahadaki zemin profilleri için geoteknik tasarım parametreleri

Birim	γ (kN/m ³)	k (m/gün)	K _o	Toplam Gerilme				Efektif Gerilme			
				p' _{ref} (kPa)	E _{50,ref} (MPa)	c (kPa)	Φ (°)	p' _{ref} (kPa)	E' _{50,ref} (MPa)	c' (kPa)	Φ' (°)
Dolgu	19.0	0.6	0.50	100	53	20	38	100	53	20	38
Kireçtaşı-Kaya	22.0	Geçirimsiz	0.50	100	141	108	38	100	141	108	38

Deprem yer hareketi düzeyi belirlendikten sonra TDTH verileri oluşturabilir. Bu çalışmada Deprem Yer Hareketi Düzeyi-2 (DD-2), bir diğer deyişle 50 yılda aşılma olasılığı %10 (tekrarlanma periyodu 475 yıl) olan deprem yer hareketi düzeyi dikkate alınmıştır.

Bu çalışma kapsamında ilgili inceleme sahasında 30 metre derinliği temsil eden ortalama yüzey kayma dalga hızı (V_{s30}) temel tabanı alt kotundan itibaren 582 m/s olarak tanımlanmıştır. TBDY-2018 yönetmeliği kapsamında inşaat sahasının yerel zemin sınıfı bu değere göre ZC olarak belirlenmiştir. Buradan kısa periyot ve 1.0 saniye periyoduna ait harita spektral ivme katsayıları TDTH yardımıyla $S_s=0.410$ ve $S_1=0.144$ olarak tanımlanmıştır. DD-2 durum için $PGA=0.174$ g. ve $PGV=12.493$ cm/sn belirlenmiştir. Çalışma bölgesinde yapılmış saha incelemeleri ve araştırmalara göre jenerik mühendislik kayasının yüzeyden 15 metre derinde olduğu görülmüştür. Bu sebeple yüzeyden 40 metre derinlikteki ZB olduğu değerlendirilen tabakaya etkililen deprem kayıtları zemin yüzeyine taşınarak serbest zemin analizleri yapılmıştır.

Yerel zemin etki katsayıları $F_s=1.300$ ve $F_1=1.500$ olarak belirlenmiştir. Bu değerler kullanılarak kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı $S_{D5}=S_s \cdot F_s=0.533$ olurken 1.0 saniye periyodu tasarım spektral ivme katsayısı $S_{D1}=S_1 \cdot F_1=0.216$ bulunmuştur. Bu değerlere bağlı köşe periyotları T_A ve T_B (0.081, 0.405) tanımlanmıştır.

Taban kayasına etkililen deprem kayıtlarının zemin profillerini geçerek zemin yüzeyine taşınması TBDY-2018 kapsamında sahaya özel deprem analizi olarak tanımlanmaktadır. Genel bir yargı olarak yapı temel tabanın eğimli olmadığı ve zemin profillerinin yatay seyrettiği kabulüne göre sahaya özel deprem analizleri bir boyutlu serbest zemin model durumu ile analiz edilebilmektedir. Eğer bu durumlar oluşmuyorsa iki ya da üç boyutlu zemin davranış analizleri ile sistemin çözülmesi gerekmektedir. TBDY-2018 yönetmeliğine göre tasarımcının inisiyatifinde ZF yerel zemin dışındaki zeminlerde de sahaya özel deprem analizleri yapılabileceği bahsedilmiştir. Ancak böyle bir durumda analizler sonucunda belirlenen tasarım

spektrumunun ordinatlarının TBDY tasarım spektrumunun ordinatlarından düşük olamayacağı vurgulanmıştır.

Sahaya özel zemin davranış analizlerinde kullanılacak en az on bir deprem kaydının $V_{s30}=760$ m/s için TDTH'den seçilen tasarım ivme spektrumuna benzeşmesi gereklidir. TBDY-2018'de deprem kayıtlarının nasıl belirleneceği ve belirlenen kayıtların basit ölçeklendirme yöntemi kullanılarak nasıl ölçeklendirileceği tüm detaylarıyla bahsedilmiştir. Bu durumda analizler için en az on bir deprem kaydı seçilecek ve aynı depremden seçilen kayıt ya da kayıt takımlarının üçü aşmaması zorunluluk arz etmektedir. Deprem kayıtları seçilirken çalışma bölgesi için tanımlanmış deprem yer hareketi düzeyi, deprem büyüklüğü, fay mesafeleri, deprem kaynak mekanizması ve yerel zemin sınıfı ile uyumlu olmalıdır. Öncelikli olarak bahse konu yapının bulunduğu sahaya yakın tasarıma esas deprem yer hareketi düzeyi ile uyumlu geçmiş deprem kayıtları, bulunmuyorsa diğer başka bölgelerden alınacak uyumlu deprem kayıtları kullanılacaktır. Yerel zemin sınıfı, deprem kayıtlarının belirlenmesinde önemli olan parametrelerden bir diğeridir. Bu kapsamda V_{s30} değeri referans alınarak kayıtlar aranmalıdır. Gaziantep ili ve yakın çevresinde irili ufaklı değişik karakterlerde birçok fay sistemi bulunmaktadır. Çalışma alanımız bu fay hatlarına en yakın uzaklığı 27- 60 km'dir. İnceleme alanına çok yakınlık arz eden etkin bir yakın fay durumu gözlemlenmediğinden herhangi bir yakın fay düzeltmesi yapılması gerekli görülmemiştir.

Bölgenin depremselliği değerlendirildiğinde bölgeye yakın diri faylar sebebiyle; 4 adet kayıt takımının belirlenen özellikteki depremlere uyumlu olarak 0-30 km aralığında ve $M_w=6.0-7.7$ deprem büyüklüğü aralığında, diğer 4 adet kayıt takımının 30-60 km aralığında ve $M_w=6.5-7.7$ deprem büyüklüğü aralığında ve son olarak 3 adet kayıt takımının ise yaklaşık olarak 60-150 km aralığında ve $M_w=6.5-7.5$ deprem büyüklüğü aralığında seçilmesi uygun görülmüştür. Çalışma bölgesinde yapılmış saha incelemeleri ve araştırmalara göre jenerik mühendislik kayasının yüzeyden 40 metre derinde olduğu tahmin edilmiştir.

Tablo 3. DD2-ZB durumu için analizlerde kullanılmak için seçilmiş deprem kayıtları ve özellikleri

Deprem No	Kayıt No	Deprem Adı	Yıl	Büyüklük M_w	Fay Tipi	R_{jb} (km)	R_{rub} (km)	$(V_s)_{30}$ (m/s)	Ölçek Katsayısı
E01	1613	Duzce, Turkey	1999	7.14	SS	25.78	25.88	782	1.339
E02	809	Loma Prieta	1989	6.93	R-O	12.15	18.51	714	0.657
E03	989	Northridge-01	1994	6.69	R	9.87	20.45	740	0.508
E04	4064	Parkfield-02, CA	2004	6.00	SS	4.25	4.93	657	0.742
E05	1256	Chi-Chi, Taiwan	1999	7.62	R-O	53.30	56.93	789	1.062
E06	1795	Hector Mine	1999	7.13	SS	50.42	50.42	686	1.165
E07	1626	Sitka, Alaska	1972	7.68	SS	34.61	34.61	650	1.132
E08	6963	Darfield, New Zealand	2010	7.00	SS	57.37	57.65	639	1.739
E09	3938	Tottori, Japan	2000	6.61	SS	72.4	72.4	627	1.606
E10	4892	Chuetsu-oki, Japan	2007	6.80	R	77.51	78.94	656	1.161
E11	1117	Kobe, Japan	1995	6.90	SS	119.64	119.64	609	1.321

Bu sebeple belirlenmiş 11 adet deprem kaydının belirlenmesinde ZB yerel zemin sınırlarında V_{s30} değeri olarak 780-990 m/sn aralığı değerlendirilmiştir. Deprem kayıtları belirlenirken TBDY-2018 yönetmeliğinde tanımlanmış koşullar olan deprem yer hareketi düzeyi, deprem büyüklüğü, fay uzaklığı, kaynak mekanizması ve yerel zemin sınıfı dikkate alınmıştır. Seçilmiş deprem kayıtlarının tamamı PEER Yer Hareketi Veritabanı (Pacific Earthquake Engineering Research) ait <https://ngawest2.berkeley.edu> sitesinde sunulmuş kayıtlardan taranmıştır ve TBDY-2018 yönetmeliğinin önerdiği gibi tasarım spektrumuyla uyumlu depremler arasından belirlenmişlerdir.

İlk aşamada çalışma sahası olan Gaziantep şehri ve civarında vuku bulmuş deprem kayıtları aranmış ve sonra ülkemiz genelindeki uygun kriterlere sahip deprem kayıtları taranmıştır. Analizlerde kullanılmak üzere on bir deprem kaydının tamamı PEER deprem veri tabanından elde edilmiştir. En fazla aynı depremden 3 farklı deprem kaydı yönetmelikteki kriterler dikkate alınarak seçilmiştir. Tablo 3'te görüldüğü üzere PEER veri sisteminde DD-2 deprem düzeyi için deprem kayıtları aranırken depremlerin moment büyüklükleri (M_w), kayıtların temin edildiği istasyona ait bilgiler, bu istasyonun ilgili faya olan mesafesi (R_{rup}) ve istasyonun konumlandığı zemin profilinin V_{s30} değeri gibi temel parametreler göz alınarak filtreleme yapılmıştır. Basit ölçeklendirme aşamasında kayıtlar filtrelenirken ölçek oranı olarak 0.5-2.0 aralığı uygun görülmüştür.

TBDY-2018 yönetmeliğinde, sahaya özel deprem analizi için seçilmiş deprem kayıtlarının tümünün ivme spektrumlarının ortalaması elastik tasarım spektrumu ile basit ölçeklendirme yapılarak Seismomatch (2022) yazılımı kullanılarak ölçeklendirilmiş ve tüm periyot aralıklarında ortalama ivme spektrum eğrisinin ordinatlarının tasarım spektrumu ordinatlarından düşük olmadığı gösterilmiştir. Ölçeklendirme analizinde tolerans 0.1, ölçek faktörü 1.0, minimum periyot 0.05 s, maksimum periyot ise 8 saniye olarak sınırlandırılmıştır. Şekil 2'de ölçeklendirme sonunda elde edilmiş ve DD-2 ZB yerel zemin için orijinal deprem kayıtlarına tepki spektrum eğrisi, ortalama spektrum eğrisi ve tasarıma esas spektrum eğrisi karşılaştırmalı olarak görülmektedir. Ölçeklendirilmiş kayıtlarda kalıcı deplasman tespit edilmemiştir. Ölçeklendirilmiş kayıtlara aynı zamanda

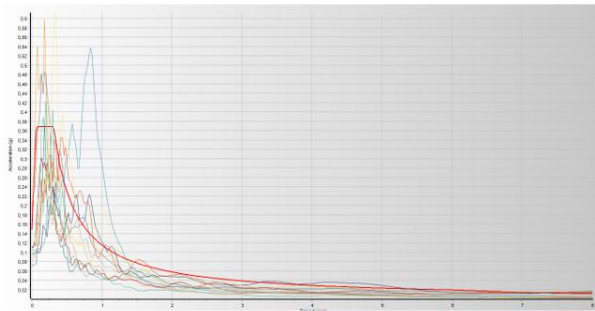
SeismoSignal V.4 yazılımıyla "base line correction" uygulanmıştır.

Yapılması planlanan yapı toplam 13 katlıdır. Yapı periyodu (T_p) kat sayıları değerlendirildiğinde ortalama 1.3 sn olarak değerlendirilmiştir. $0.2T_p = 0.26$ sn ve $1.5T_p = 1.95$ sn olarak hesaplanır. TBDY-2018 yönetmeliğinde "2.5.2.1 (b) Üç boyutlu hesap için seçilen her bir deprem kaydı takımının iki yatay bileşenine ait spektrumların kareleri toplamının karekökü alınarak bileşke yatay spektrum elde edilecektir. Seçilen tüm kayıtlara ait bileşke spektrumların ortalamasının $0.2T_p$ ve $1.5T_p$ periyotları arasındaki genliklerinin, 2.3.4 veya 2.4.1'e göre tanımlanan tasarım spektrumunun aynı periyot aralığındaki genliklerine oranının 1.3'ten daha küçük olmaması kuralına göre deprem yer hareketi bileşenlerinin genlikleri ölçeklendirilecektir" denmektedir. Şekil 2b'de ölçeklendirilmiş 11 deprem kaydının ortalamalarından elde edilen spektrum eğrisi değerlendirildiğinde $0.2T_p$ ve $1.5T_p$ değerleri arasında ortalama spektrum eğrisinin ordinatlarının hedef tasarım spektrumu ordinatlarının üzerinde olduğu görülmektedir. Bu sebeple yönetmeliğin önerdiği şart sağlanmıştır.

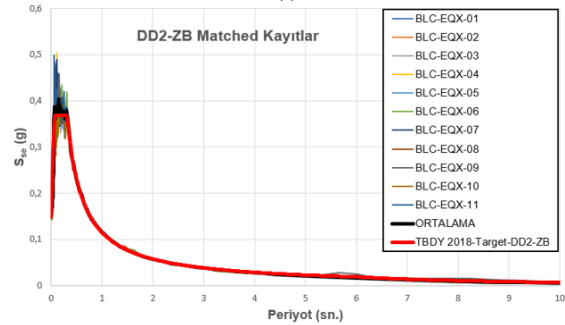
4 Sahaya özel deprem analizi

4.1 Kullanılan zemin modeli ve zaman tanım alanında yapılan analiz

Bu çalışmada zaman tanım alanında sahaya özel zemin tepki analizleri Deepsoil-V7.0 programı yardımıyla yapılmıştır. Dinamik zemin modeli tanımlamalarında General Quadratic-Hiperbolik Model'den faydalanılmıştır. Bu model kayma gerilmesi ile kayma şekil değiştirmesi arasındaki ilişkiyi tanımlamaktadır. Kayma modülü-Sönüm oranı ve birim kayma şekil değiştirme arasındaki bağıntı zemin etütlerinden elde edilen test sonuçlarıyla belirlenmesi daha geçerli bir durumken, bu durum her zaman sağlanamamaktadır. Böyle durumlarda zemin davranışını belirleyen gerilme-şekil değiştirme eğrilerini elde etmek için literatürde sunulmuş genel kabul gören yaklaşımlardan faydalanılmaktadır. Bu sebeple çalışma kapsamında Darendeli (2001) [19] tarafından önerilmiş derinlikle artan efektif gerilme etkisinin dikkate alındığı grafik eğrileri kullanılmıştır.



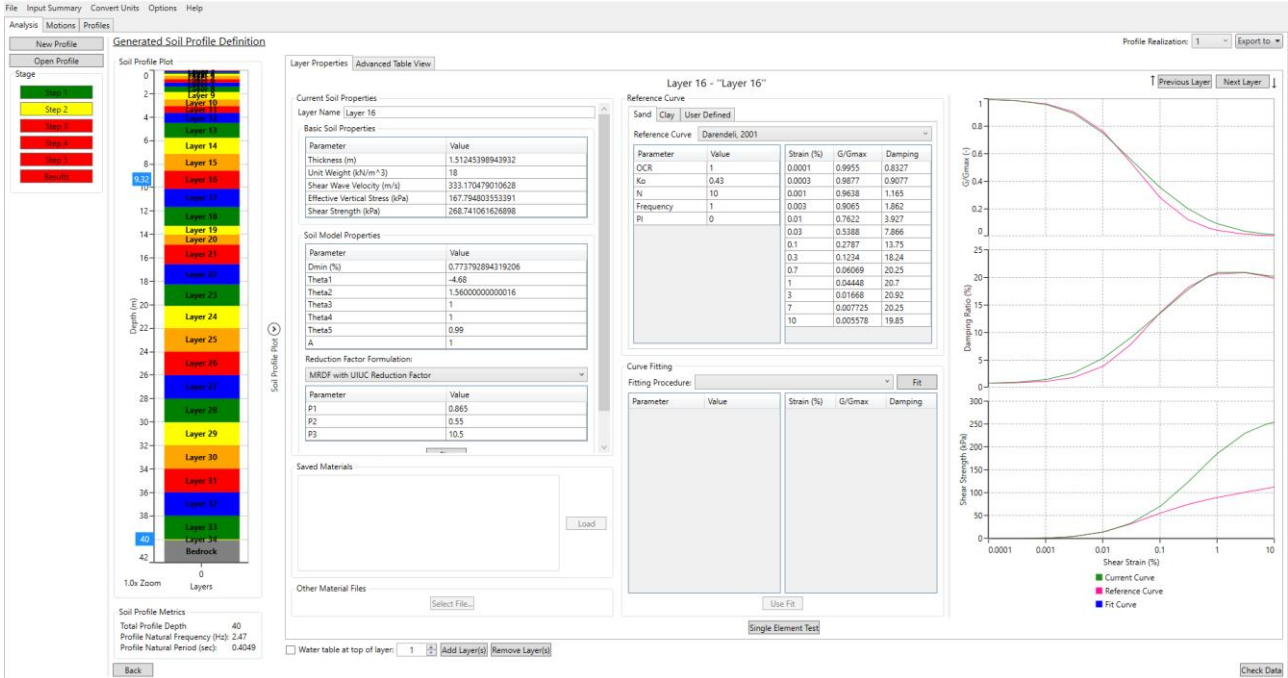
(a)



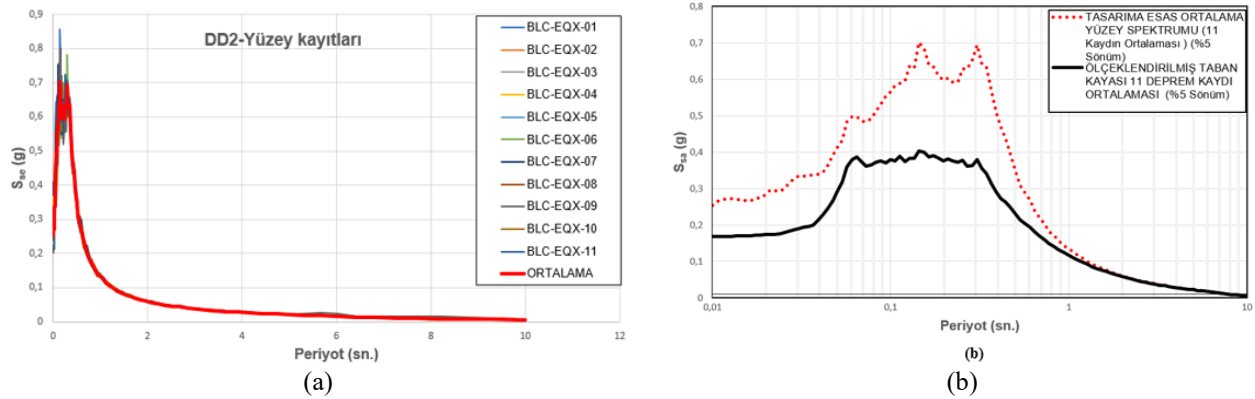
(b)

Şekil. 2. DD-2 ve ZB Şartlarında Kullanılmış orijinal ve ölçeklendirilmiş on bir adet deprem kaydına ait tepki spektrumları. (a) Orijinal kayıtlar, (b) Base Line Correction yapılmış Ölçeklenmiş-Matched kayıtlar

Sahaya özel deprem analizlerinde her bir zemin tabakasına ait maksimum frekans değerleri ($f_{maks}=Vs/4H$) kayma dalga hızı ve zemin profilinin tabaka kalınlığı ile tanımlanır. Bu ifade alınarak, göreceli olarak düşük kayma dalgası hızı değerine sahip tabakaların maksimum frekans değerlerini yüksek tutmak için maksimum frekans 30 olarak değerlendirilmiş ve bunun sonucu 40 m derinliğindeki zemin profili toplam 34 alt tabakayla sınırlandırılmıştır. Kayma modülü azalımı ve sönüm oranı bağıntısının ifade edildiği zemin gerilme-şekil değiştirme eğrisi ilişkisinin gösterildiği gerilme-şekil değiştirme eğrileri ile uyumlu ve yüklem-boşaltma koşulunu yansıtan model parametreleri olan P1 ve P2 değerleri DeepSoil programında otomatik olarak belirlenmiştir. YASS bulunmaması sebebiyle analizlerde artık boşluk suyu basıncı oluşumu dikkate alınmamış ve hesaplara dahil edilmemiştir. DeepSoil programında zaman tanım alanında hazırlanmış model Şekil 3’de sunulmuştur.

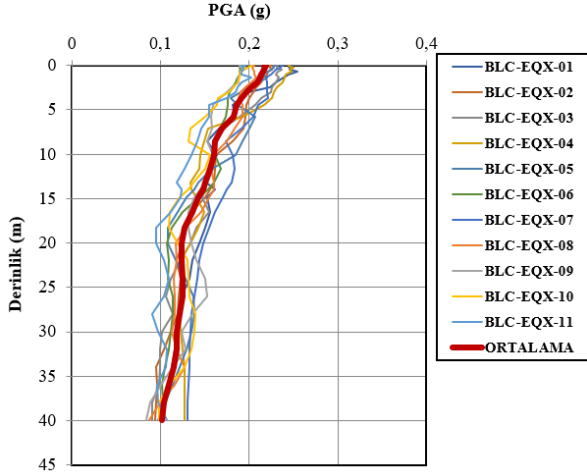


Şekil 3. Deepsoil programında tanımlanmış zemin modeli

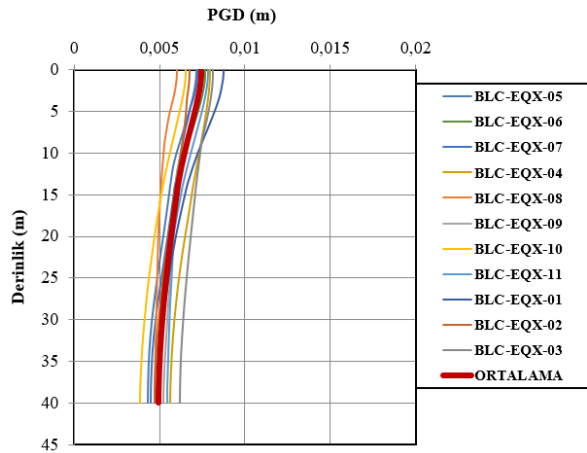


Şekil 4. (a) Sahaya özel deprem analizi sonucunda temel taban seviyesinde tanımlanan ivme kayıtlarına ait yüzey tepki spektrumları (b) Anakaya-Yüzey kayıtları karşılaştırma

Şekil 6’da görüldüğü üzere zemin profillerinin sıkı dolgu tabakalarından ve kireçtaşı kil formasyonlarından oluşması, buna bağlı tabakaların yüksek Vs yüzey kayma dalga hızlarına sahip olması ve Vs₃₀ değerine bağlı kinematik etkileşim çok düşük çıkmıştır. ZC sınıfı zeminlerde kinematik etkileşimin düşük olacağı yargısının bu sonuçlarla örtüştüğü gözlemlenmiştir.



Şekil 5. Serbest saha analizleri sonucunda derinlik boyunca pik yüzey ivmeleri (PGA)



Şekil 6. Serbest saha analizleri sonucunda derinlik boyunca yanal pik yüzey deplasmanları (PGD)

5 Alt Sistem yöntemiyle yapı-kazık-zemin etkileşim (YKZE) analizleri

5.1 Sismik yükler altında YKZE analizleri

Yapılması planlanan yapı temeli altında bulunan kazıklı radye temelde fore kazık uzunluğu projede L=18.0 m, kazık çapı ise D=80 cm değerlendirilmiştir. Merkezden merkeze kazıkların uzaklığı 3.0 m olacak şekilde karelaaj belirlenmiştir. Hesap sonucunda radye temel altında toplam 159 adet fore kazık yerleşimi planlanmıştır. Kazıklar 14 metre dolgu tabakasından geçtikten sonra 4 metre kayaya soketlenecektir.

Bu çalışma kapsamında kazıklı radye sistemin YKZE analizleri Plaxis 3D Ultimate Sonlu Elemanlar yazılımıyla

TBDY-2018 yönetmeliğinde tanımlanmış Yöntem-III metodu kullanılarak yapılmıştır. Analizler kinematik ve eylemsizlik etkileşimi olmak üzere iki aşamada yapılmıştır. Üst yapının kütlesi dikkate alınmadan sahaya özel deprem analizi sonucunda elde edilen tabakalar boyunca yanal deplasmanların fore kazık sisteminde oluşturacağı zorlanmalar ve temel tabanında elde edilen deprem kayıtlarının belirlenmesi kinematik etkileşim olarak tanımlanmıştır. Bununla birlikte üst yapı kütlelerinin deprem etkisi altında yatay ivmelere maruz kalması sonucu oluşan taban kesme kuvvetinin belirlenmesi de eylemsizlik etkisi olarak tanımlanmıştır.

Tablo 4. Sonlu elemanlar analizinde tanımlanmış yapı elemanı mekanik özellikler

Parametre	Sembol	Radye	Perde	Birim
Malzeme Modeli	-	Elastic	Elastic	-
İzotropik	-	Evet	Evet	-
Birim Hacim Ağırlığı	γ	23.0	23.0	kN/m^3
Young Modülü	E_1, E_2	30000000	30000000	kN/m^2
Poisson Oranı	ν_{12}	0.18	0.18	-
Kesit Kalınlığı	d	1.00	0.40	m

Tablo 5. Sonlu elemanlar analizinde tanımlanmış kazık tasarım parametreleri

Parametre	Sembol	Ø80cm kazık	Fore	Birim
Malzeme Modeli	-	Elastic	-	-
Kazık Çapı	D	0.8	-	m
Birim Hacim Ağırlığı	γ	23.0	-	kN/m^3
Young Modülü	E_1, E_2	30000000	-	kN/m^2
Yüzey Sürtünme Direnci	f_s	750.00	-	kN/m
Uç Direnci	f_u	1000.00	-	kN

Plaxis 3D Ultimate programında zemin profili, yapı temeli, bodrumları ve temel altı kazıklar üç boyutlu modellenmiş, binanın X-X ve Y-Y doğrultularında ayrı ayrı kinematik ve eylemsizlik analizleri yapılmıştır. Daha sonra kinematik ve eylemsiz analiz sonuçları süperpoze yöntemiyle birleştirilerek kazıklarda oluşan zorlanmalara bağlı iç tesir kuvvetleri (Eğilme momenti ve kesme kuvvetleri) hesaplanmıştır. Yapı elemanları radye ve perdeye ait mekanik parametreler Tablo 4’de verilmiştir. Kazık elemanları 80’lik 18 metre uzunluğunda “embedded beam” olarak tanımlanmıştır. Kazık için kullanılmış tasarım parametreleri Tablo 6’da görülmektedir. Bu değerlere göre kazıkların betonarme tasarımı yapılarak analiz sonlandırılmıştır. Analizler kapsamında oluşturulmuş üç boyutlu temel-zemin-kazık modeline ait tasarım zemin parametreleri Tablo 6’da verilmiştir. Kazık-zemin ara yüzeyi, statik ve dinamik yükler altında zeminde oluşacak deplasmanlar ve kazıklarda oluşacak kesme kuvvetleri ve momentler açısından önemlidir. Yapılacak olan çalışmada zemin ve kazıkların ara yüzey parametreleri literatürde yaygın kabul gören yaklaşımlar dikkate alınarak belirlenmiştir.

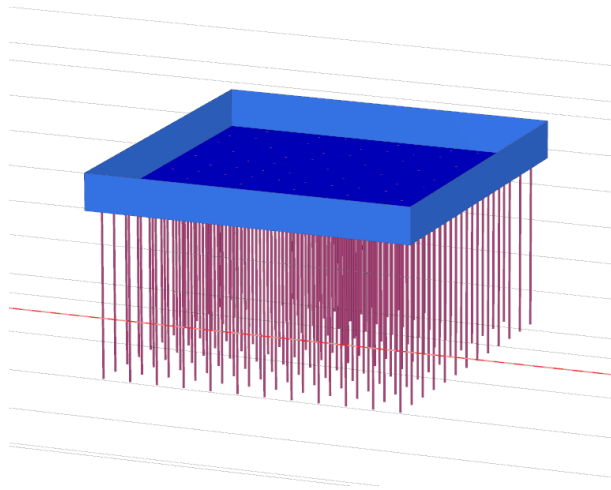
Tablo 6. Sonlu elemanlar zemin modelinde tanımlanmış zemin tasarım parametreleri

Parametre	Sembol	Dolgu	Killi Kireçtaşı-Kaya	Birim
Malzeme Modeli	-	Pekleşen Zemin (HS)	Mohr-Coulomb	-
Davranış Tipi	Drenaj Tipi	Drenajlı	Geçirimsiz	-
Kuru Birim Hacim Ağırlık	γ_{unsat}	18.0	22.0	kN/m^3
Doygun Birim Hacim Ağırlık	γ_{sat}	19.0	22.0	kN/m^3
Poisson Oranı	ν_{ur}	0.2	0.20	-
Young Modülü	E'_{ref}	160000	422000	kN/m^2
Üç eksenli Deneyden Referans Rijitlik	E'^{ref}_{50}	53000	141000	kN/m^2
Odömetre Deneyinden Referans Rijitlik	E'^{ref}_{oed}	53000	141000	kN/m^2
Boşaltma/Tekrar Yükleme Referans Rijitliği	E'^{ref}_{ur}	159000	423000	kN/m^2
Üs (Power)	m	0.5	-	-
Kohezyon	c'_{ref}	20	108	kN/m^2
İçsel Sürtünme Açısı	Φ'	38	38	°
Dilatansi Açısı	Ψ	8	8	°
Permeabilite x-yönü	k_x	0.6	-	m/day
Permeabilite y-yönü	k_y	0.6	-	m/day
Ara Yüzey Katsayısı	R_{inter}	0.85	0.95	-
Başlangıç Yatay Gerilme Katsayısı	K_0	0.3843	0.3843	-

5.2 Kinematik etkileşim analizleri

TBDY-2018 kapsamında yöntem III'e göre kinematik etkileşim analizleri, sahaya özel deprem analizinde elde edilen zemin yer değiştirmelerinin fore kazıklarda neden olacağı kesit tesirleri ve temel taban seviyesinde oluşacak olan ortalama spektrum eğrisinin belirlenmesini kapsamaktadır. Serbest sahada analizlerinde elde edilen derinlik boyu yatay zemin deplasmanları (bkz. Şekil 6) Plaxis 3D yazılımında zemin yüzeyince derinlik boyunca kademe kademe etkililmiş ve kazıklarda oluşan zorlanmalar hesaplanmıştır. Kinematik analizler yapının x-x ve y-y doğrultusunda ayrı ayrı yapılmıştır.

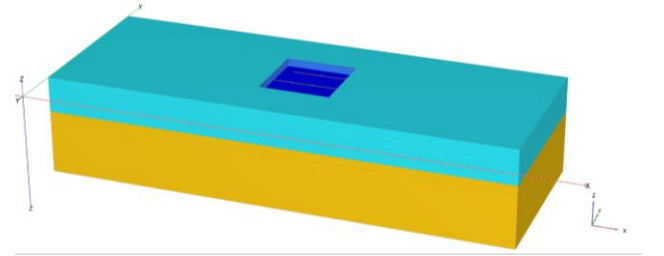
Gerek x-x gerekse de y-y doğrultusunda yapılmış kinematik analizlere ait detaylar aşağıda detaylarıyla bahsedilmiştir. Üç boyutlu yapı temeli, perdesi ve temel altı fore kazık modeli Şekil 7'de görülmektedir



Şekil 7. Üç boyutlu yapı temeli, perdesi ve temel altı fore kazık modeli

X-X Doğrultusunda Yapılmış Kinematik Analizler:

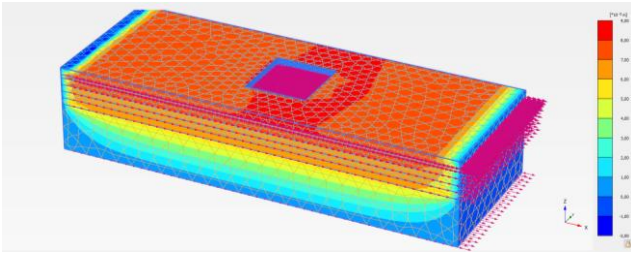
X-X doğrultusunda yapılacak kinematik analizler için Plaxis 3D yazılımında oluşturulmuş üç boyutlu YKZE modeli Şekil 8'de görülmektedir. Yatay hareketlerin X-X doğrultusunda etkitilecek olması sebebiyle sınır koşulları (Boundry condition) Y-Y doğrultusuna göre bu doğrultuda daha fazla uzatılmıştır.



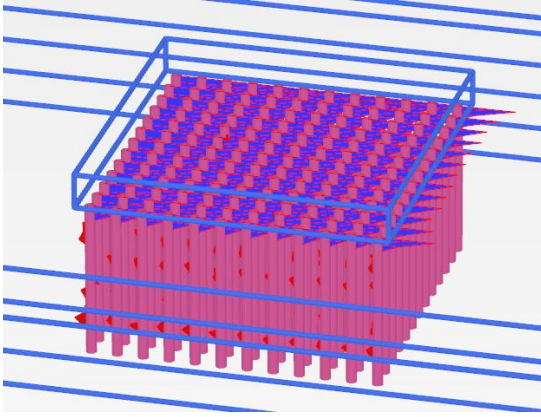
Şekil 8. X-X doğrultusunda yapılacak kinematik analizler için Plaxis 3D yazılımında oluşturulmuş üç boyutlu YKZE modeli

Şekil 9'da X-X doğrultusunda derinlik boyu tabakalı etkililmiş yatay deplasmanlar ve zemin modelinde oluşturduğu hareketler görülmektedir. Yatay deplasmanlar taban kayasında, kazık tabanında ve kademeli sıklıkla kazık yüzeyine kadar etkililmiştir. Zemin yüzeyinde derinlik boyu oluşan bu yatay hareketler fore kazıklarda zorlanmalara ve hareketlere neden olmuştur. Bu zorlanmalar neticesinde fore kazık elemanlarında iç tesir kuvvetleri kapsamında eğilme momentleri, kesme kuvvetleri ve yatay deplasmanlar hesaplanmıştır. Kinematik analizler sonucunda kazıklarda oluşan eğilme momenti, kesme kuvveti ve yatay deplasmanlar sırasıyla Şekiller 10-12'de görülmektedir. Bu analizlere göre kazıklarda oluşan maksimum eğilme

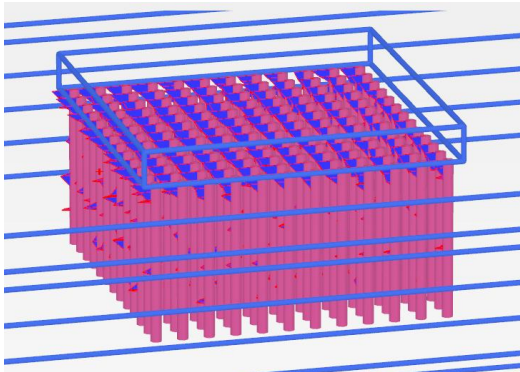
momenti 175 kN.m, maksimum kesme kuvveti 175.1 kN ve maksimum yatay deplasman 8.0 mm hesaplanmıştır. Çalışma alanının depremselliği ve zemin profili değerlendirildiğinde; sahanın yerel zemininin ZC olması, belirli derinliklerde kaya profillerinin bulunması, mostranın derinde olmaması ve dolgu tabakasının da oldukça sıkı olması kinematik etkileşimleri sınırlandırmıştır. Sahaya özel deprem analizlerinde derinlik boyu yatay deplasmanların oldukça düşük olması da bu durumu göstermektedir. Bu sebeple iç tesir değerlerinin düşük değerler hesaplandığı düşünülmektedir. Benzer analizler Y-Y doğrultusu içinde yapılmış ve bu analizlere göre kazıklarda oluşan maksimum eğilme momenti 214.2 kN.m, maksimum kesme kuvveti 193.7 kN ve maksimum yatay deplasman 8.0 mm hesaplanmıştır.



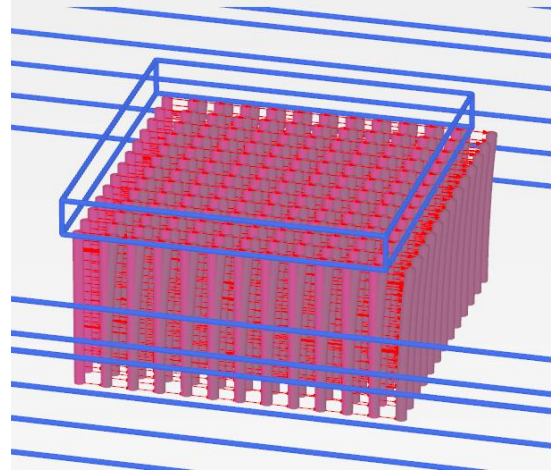
Şekil 9. X-X doğrultusunda derinlik boyu tabakalı etkilenmiş yatay deplasmanlar ve zemin modelinde oluşturduğu hareket



Şekil 10. X-X doğrultusunda kinematik analiz sonucu belirlenmiş eğilme momentleri ($M_{max}=175$ kN.m)



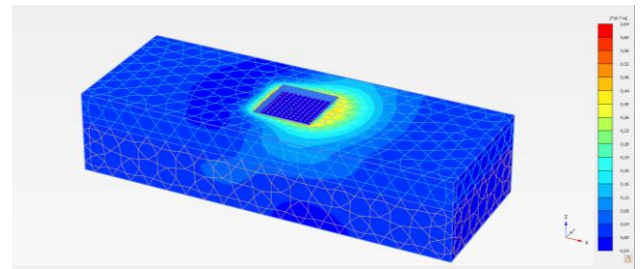
Şekil 11. X-X doğrultusunda kinematik analiz sonucu belirlenmiş kesme kuvvetleri ($Q_{max}=175.1$ kN)



Şekil 12. X-X doğrultusunda kinematik analiz sonucu belirlenmiş kazıklarda oluşan yatay hareketler ($D_{max}=8.0$ mm)

5.3 Eylemsizlik etkileşim analizleri

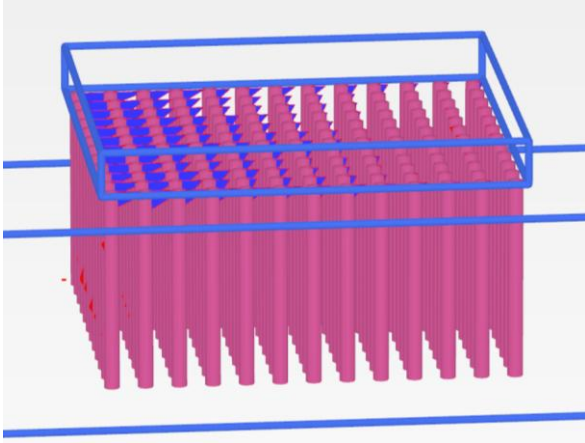
Deprem etkisi sonucu yatay ivmelere maruz kalan üstyapı kütlelerinin oluşturduğu taban kesme kuvvetinin hesaplanması eylemsizlik etkileşimi olarak tanımlanır. Bu sebeple yapının bütününe etkileyen eş değer deprem kuvveti (taban kesme kuvveti) kazıklı-radye temel sistemine etkililir ve ilgili yönetmelikte Yöntem III'e göre eylemsizlik etkileşimi yapılır. Bu çalışmada taban kesme kuvveti, sahaya özel deprem analizlerinde elde edilen ortalama spektrum eğrisi kullanılarak hesaplanmıştır (bkz. Şekil 4). Taban kesme kuvvetleri yapılan üst yapı analizlerinde $E_x=4485$ kN ve $E_y=1205$ kN olarak elde edilmiştir. Bu değerler bölgenin depremselliği, yapının perdeli yapı olması sebebiyle tasarımda kullanılan yüksek R ve D azaltma katsayıları dikkate alındığında düşük değerler olarak hesaplanmıştır. Eylemsizlik etkileşim analiziyle en kritik moment, kesme kuvveti ve yatay yer değiştirme değerleri belirlenen taban kesme kuvvetinin kazıklı radye temel sistemine etkililmesiyle hesaplanmıştır.



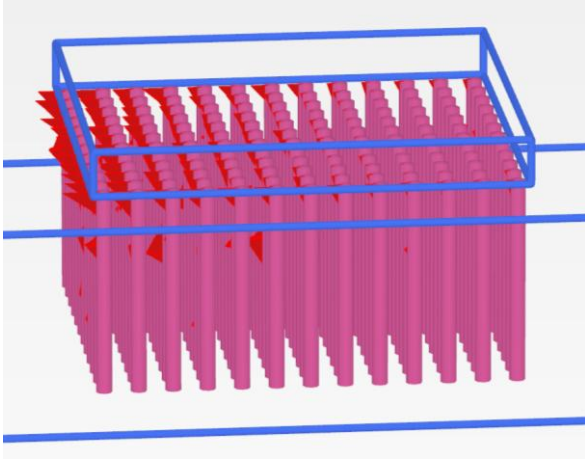
Şekil 13. X-X doğrultusunda temel seviyesinde taban kesme etkililmiş model ve zemin modelinde oluşturduğu hareket

X-X Doğrultusunda Yapılmış Eylemsizlik Analizleri:

X-X doğrultusunda yapılacak eylemsizlik analizleri için Plaxis 3D yazılımında oluşturulmuş üç boyutlu YKZE modeli Şekil 13'de görülmektedir. Taban kesme kuvveti temel seviyesinde X-X doğrultusunda etkitilecek olması sebebiyle sınır koşulları (Boundary condition) Y-Y doğrultusuna göre bu doğrultuda daha fazla uzatılmıştır.



Şekil 14. X-X doğrultusunda eylemsizlik analiz sonucu belirlenmiş eğilme momentleri ($M_{\max}=84.4$ kN.m)

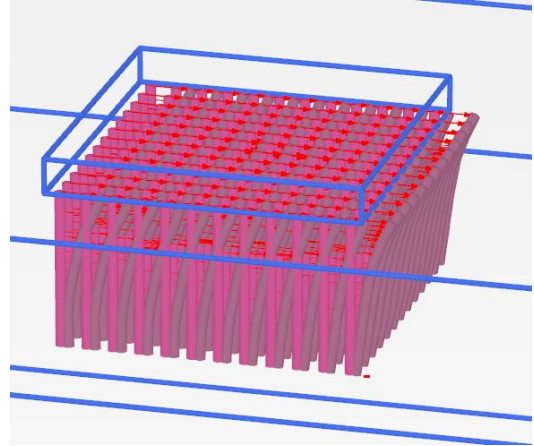


Şekil 15. X-X doğrultusunda eylemsizlik analiz sonucu belirlenmiş kesme kuvvetleri ($Q_{\max}=73.5$ kN)

Şekil 13’de X-X doğrultusunda temel seviyesinde taban kesme kuvveti etkililmiş model ve zemin modelinde oluşturduğu hareketler görülmektedir. Zemin yüzeyinde derinlik boyu oluşan bu yatay hareketler fore kazıklarda zorlanmalara ve hareketlere neden olmuştur. Bu zorlanmalar neticesinde fore kazık elemanlarında iç tesir kuvvetleri kapsamında eğilme momentleri, kesme kuvvetleri ve yatay deplasmanlar hesaplanmıştır. Eylemsizlik analizler sonucunda kazıklarda oluşan eğilme momenti, kesme kuvveti ve yatay deplasmanlar sırasıyla Şekiller 14-16’da görülmektedir.

Bu analizlere göre kazıklarda oluşan maksimum eğilme momenti 84.4 kN.m, maksimum kesme kuvveti 73.5 kN ve maksimum yatay deplasman 0.58 mm hesaplanmıştır. Çalışma alanının depremselliği ve zemin profili değerlendirildiğinde; sahanın yerel zemininin ZC olması, belirli derinliklerde kaya profillerinin bulunması, mostranın derinde olmaması ve dolgu tabakasının da oldukça sıkı olması eylemsizlik etkileşimleri sınırlandırmıştır. ZC yerel zemin sınıfı bir zemin profilinde beklenildiği üzere eylemsizlik etkileri ihmal edilecek seviyelerde oluşmuştur. Benzer durum Y-Y eksininde yapılan analizlerde de gözlemlenmiştir. Bu analizlere göre kazıklarda oluşan

maksimum eğilme momenti 84.4 kN.m, maksimum kesme kuvveti 73.5 kN ve maksimum yatay deplasman 0.58 mm hesaplanmıştır.



Şekil 16. X-X doğrultusunda eylemsizlik analiz sonucu belirlenmiş kazıklarda oluşan yatay hareketler ($D_{\max}=0.58$ mm)

5.4 Süperpoze yaklaşımıyla kinematik ve eylemsizlik etkileşimlerin birleştirilmesi:

TBDY 2018 16C.5 başlığı altında verilen yaklaşımla, YKZE analizi sonucunda elde edilmiş kinematik ve eylemsizlik etkileşim sonuçları süperpoze yöntemi ile birleştirilmiştir.

Kazıkta Toplam Çıktılar x ve y yönünde	Göz önüne alınan doğrultu -x yönünde	Göz önüne alınan doğrultu -y yönünde
$M_x = M_{x,kinematik} + M_{x,eylemsizlik}$ $V_x = V_{x,kinematik} + V_{x,eylemsizlik}$ $D_x = D_{x,kinematik} + D_{x,eylemsizlik}$ $M_y = M_{y,kinematik} + M_{y,eylemsizlik}$ $V_y = V_{y,kinematik} + V_{y,eylemsizlik}$ $D_y = D_{y,kinematik} + D_{y,eylemsizlik}$	$M_T = M_x + 0.3M_y$ $V_T = V_x + 0.3V_y$ $D_T = D_x + 0.3D_y$	$M_T = M_y + 0.3M_x$ $V_T = V_y + 0.3V_x$ $D_T = D_y + 0.3D_x$

Şekil 17. Kinematik etkileşim ve eylemsizlik etkileşim etkilerinin birleştirilmesi

Bu yaklaşıma göre kazıkların tasarımı için kullanılacak nihai kesit tesirleri dikkate alınan deprem doğrultusunda elde edilen sonuçlarla zıt yöndeki sonuçların %30’unun toplanması ile hesaplanmıştır (bkz. Şekil 17). Hem kinematik hem de eylemsizlik etkileşim analizlerinde fore kazıklar doğrusal davranış sergilediği kabul edilen çubuk elemanlar olarak değerlendirilmiştir. Bu sebeple, kinematik etkileşim analizi sonucu elde edilmiş eğilme momentleri $R=2.5$ davranış katsayısı ile, eylemsizlik etkileşiminden elde edilen kesit tesirleri ise bodrumlu yapılarda davranış katsayısı olan $R=1.5$ katsayısı ile azaltılmıştır. Tablo 7’de YKZE analizlerinden elde edilmiş ve azaltma katsayıları ile yeniden hesaplanmış kesit tesir değerleri verilmiştir. Bu tabloya göre kinematik ve eylemsizlik etkilerinin birbirine yakın değerlerde olduğu görülmektedir. Bu sonuçlara göre en yüksek kesit tesirleri X doğrultusunda $M_T=178$ kN.m, $V_T=312$ kN ve yatay yer değiştirme is Y doğrultusunda $D=11$ mm olarak hesaplanmıştır.

Tablo 7. YKZE analizleri sonucunda en kritik kazıkta gözlemlenen eğilme momenti (M), kesme kuvveti (V) ve yatay yer değiştirme (D) değerleri

Analiz	Yükleme Yönü	Doğrusal Analiz (Azaltılmamış Sonuçlar)				Davranış Katsayılarıyla (Azaltılmış Sonuçlar)			
		M (kN.m)	V (kN)	D (m)		M (kN.m)	V (kN)	D (m)	
Kinematik Etkileşim	(X)-12	175.0	175.1	0.0080		70.0	175.1	0.0080	
	(Y)-13	215.0	194.0	0.0080		86.0	194.0	0.0080	
Eylemsizlik Etkileşim	(X)-12	85.0	74.0	0.0006		56.7	49.3	0.0004	
	(Y)-13	81.0	76.0	0.0006		54.0	50.7	0.0004	
Toplam	(X)-12	260.0	249.1	0.0086		126.7	224.4	0.0084	
	(Y)-13	296.0	270.0	0.0086		140.0	244.7	0.0084	
Birleştirilmiş Toplam	(X)-12	348.8	330.1	0.0112		168.7	297.8	0.0109	
	(Y)-13	374.0	344.7	0.0112		178.0	312.0	0.0109	

6 Sonuçlar

Bu çalışmada bu durum amaçlanarak bir vaka analizi olarak Gaziantep ilinde yapılması planlanan Bodrum + Zemin + 11 normal kattan oluşan toplam 13 katlı yapının kazıklı radye temel sistemi TBDY-2018 (Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği) kapsamında Alt sistem Yöntem-III durumu dikkate alınarak tasarlanmış ve gerek kinematik analiz gerekse de eylemsizlik analizi dünyada yaygın olarak kabul gören gelişmiş bir sonlu elemanlar analiz programı olan lisanslı Plaxis-3D Ultimate versiyon-2025 yazılımıyla yapılarak alternatif bir hesap yöntemi sunulmuştur. Bu kapsamda çalışmanın neticesinde varılmış önemli sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulduğu gibidir.

1.Kazıklı radye temel sistemlerin tasarımı özellikle sismik etkilere maruz kalan yapıların dayanıklılığı kapsamında önemli yer tutmaktadır. Bu temel sistemlerinin tasarımı her ne kadar geoteknik mühendislerinin sorumluluğunda olsa da disiplinler arası bir çalışmayı zorunlu kılmaktadır. Bu kapsamda geoteknik mühendisliğinin yanı sıra deprem mühendisliği ve yapı mühendisliği gibi alt disiplinlerinde bu tip temel sistemlerin tasarımında Yapı-Kazık-Zemin Etkileşimi (YKZE) açısından katkıları kaçınılmazdır.

2.YKZE analizlerinde zemin modelinin yaylarla temsil edilerek çözüm yapılması her ne kadar genel kabul gören bir yaklaşım olsa da zemin modelinin yaylar yardımıyla temsil edilmesi gerçekçi bir çözümü birebir yansıtmamaktadır. Zemin modelinin daha gerçekçi tanımlanabildiği bir sayısal ortamda kinematik ve eylemsizlik analizlerinin yapılabileceği bu çalışma ile sunulmuştur.

3.Zemin profillerinin sıkı dolgu tabakalarından ve kireçtaşı kil formasyonlarından oluşması, buna bağlı tabakaların yüksek Vs yüzey kayma dalga hızlarına sahip olması ve Vs30 değerine bağlı kinematik ve eylemsizlik etkileşim çok düşük çıkmıştır. ZC sınıfı zeminlerde kinematik ve eylemsizlik etkileşiminin düşük olacağı yargısının bu sonuçlarla örtüştüğü gözlemlenmiştir.

4.Taban kesme kuvvetleri yapılan üst yapı analizlerinde Ex=4485 kN ve Ey=1205 kN olarak elde edilmiştir. Bu değerler bölgenin depremselliği, yapının perdeli yapı olması sebebiyle tasarımda kullanılan yüksek R ve D azaltma katsayıları dikkate alındığında düşük değerler olarak hesaplanmıştır.

Teşekkür

Bu çalışmanın hazırlanmasında önemli katkısı olan Sebzeci İnşaat firmasına ve firma sahibi sayın İnş. Müh. Tefvik Sebzeci'ye teşekkürü bir borç bilirim.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %13

Kaynaklar

- [1] M.A. Yiğit, M.İ. Onur ve E. Balaban, Kazıklı temellerde zemin kazık etkileşimi parametrelerinin incelenmesi. GUMMFD, 37(2) 625–640, 2022. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.825224>.
- [2] O. Bilal ve Y. Fahjan, Dinamik yapı-kazık-zemin etkileşimi bağlamında temel gömme derinliğinin spektral tepki üzerindeki etkisi. Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, 30(1), 44-52, 2024. <https://doi.org/10.5505/pajes.2023.05046>
- [3] E. Keskin, Betonarme Çerçevesel Bir Yapıda Yapı-Kazık-Zemin Etkileşimi Dikkate Alınarak Kazık Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2018.
- [4] M.N. Aydınoğlu, Zayıf Zeminlerde Yapılan Binalarda Dinamik Yapı-Kazık-Zemin Etkileşimi İçin Uygulamaya Yönelik Bir Hesap Yöntemi. Boğaziçi Üniversitesi Yayınları, İstanbul, Türkiye, Teknik rapor 2011/1, Mayıs 2011. http://www.koeri.boun.edu.tr/depremmuh/raporlar/Aydinoglu_Etkilesim_Rapor.pdf
- [5] H.R. Tabatabaieifar, B. Fatahi ve B. Samali, Seismic Behavior of Building Frames Considering Dynamic Soil-Structure Interaction. International Journal of Geomechanics, 13(4): 409-420, 2013. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.19435622.000023](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.19435622.000023)
- [6] G. Mylonakis, A. Nikolaou ve G. Gazetas, Soil-pile-bridge seismic interaction: kinematic and inertial effects. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 26(3), 337-359, 1997. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)10969845\(199703\)26:3<337::AID-EQE646>3.0.CO;2-D](https://doi.org/10.1002/(SICI)10969845(199703)26:3<337::AID-EQE646>3.0.CO;2-D).
- [7] M. Kutanis ve M. Elmas, Non-Linear Seismic Soil-Structure Interaction Analysis Temeld on the

- Substructure Method in the Time Domain. Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences, 25(6), 617-626, 2001.
- [8] J.A. Gutierrez ve A.K. Chopra, A substructure method for earthquake analysis of structures including structure-soil interaction. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 6(1), 51-69, 1978. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290060107>.
- [9] J.P. Wolf, Dynamic soil-structure interaction. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1985.
- [10] Y. Hayashi ve I. Takahashi, Soil-structure interaction effects on building response in recent earthquakes. Third UJNR Workshop on Soil-Structure Interaction, California, 2004. https://www.pwri.go.jp/eng/ujnr/tc/a/ssi_w3/Contributions/Hayashi.pdf
- [11] D. Chu ve K.Z. Truman, Effects of pile foundation configurations in seismic soil-pile-structure interaction. 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, 2004.
- [12] A.S. Hokmabadi, A. Fagher and B. Fatahi, Seismic strain wedge model for analysis of single piles under lateral seismic loading. Australian Geomechanics, 46(1), 31-41, 2011. <https://www.issmge.org/uploads/publications/59/67/2.1.UHSSA.pdf>
- [13] R.I. Borja, W.H. Wu, A.P. Amies and H.A. Smith, Nonlinear Lateral, Rocking and Torsional Vibration of Rigid Foundations. Journal of Geotechnical Engineering Structures, 120(3), 491-513, 1994. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)07339410\(1994\)120:3\(491\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)07339410(1994)120:3(491))
- [14] H. Matlock and L. Reese, Generalized Solutions for Laterally Loaded Piles. Soil Mechanics and Foundation Div., 86(5), 63-91, 1960. <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0000303>
- [15] L.C. Reese and R.C. Welch, Lateral Loading of Deep Foundations in Stiff Clay. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 101(7), 633-649, 1975. <https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0000177>
- [16] L.C. Reese, W.R. Cox and F.D. Koop, Field testing and analysis of laterally loaded piles in stiff clay. Proc. 7th Offshore Technology Conference, Houston, Texas, pp.671-690, 1975.
- [17] TBDY-2018: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, 18 Mart 2018.
- [18] I. Alpan, The geotechnical properties of soils. Earth-Science Reviews, 6(1), 5-49, 1970. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(70\)90001-2](https://doi.org/10.1016/0012-8252(70)90001-2)
- [19] M.B. Darendeli, Development of a New Family of Normalized Modulus Reduction and Material Damping Curves. Doktora Tezi, Texas University, 362s, Austin, Texas, 2001. <https://repositories.lib.utexas.edu/items/efea68dd-895b-4f28-ac6e-71872ca5291a>

