

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**  
**ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**YAPI KAZIK ZEMİN ETKİLEŞİMİ ETKİLERİNİN PLAXIS**  
**PROGRAMI İLE İNCELENMESİ**

**SEVDE KURT**

**KOCAELİ 2024**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**  
**ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**YAPI KAZIK ZEMİN ETKİLEŞİMİ ETKİLERİNİN**  
**PLAXİS PROGRAMI İLE İNCELENMESİ**

**SEVDE KURT**

**Doç. Dr. Aydın KAVAK**  
**Danışman, Kocaeli Üniv. ....**

**Dr. Öğr. Üyesi Erkan AKPINAR**  
**Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv. ....**

**Dr. Öğr. Üyesi Erdiñ KESKİN**  
**Jüri Üyesi, Kırklareli Üniv. ....**

**Tezin Savunulduğu Tarih: 31.01.2024**

## ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez/proje çalışmasında,

- Bu tezin/projenin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin/Projenin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez/proje çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

Bu tez/proje çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

Bu tez/proje çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler ..... tarafından ..... no'lu proje kapsamında maddi/alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Sevde KURT

## YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/projemin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları bende kalacak, tezimin/projemin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki makale, kitap, tebliğ, lisans, patent gibi çalışmalarda kullanımı, danışmanımın isim hakkı saklı kalmak koşuluyla ve her iki tarafın bilgisi dâhilinde bana ait olacaktır.

Tezin/projenin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin/projenin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan **“Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge”** kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.

Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.

Tezim/projem ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

Sevde KURT

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmam süresince benden bilgi, güven ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen değerli tez danışmanım Doç. Dr. Aydın KAVAK'a, lisansüstü eğitimim boyunca göstermiş olduğu ilgi ve yardımlarından dolayı rahmetli hocam Doç. Dr. Utkan MUTMAN'a çok teşekkür eder, sevgi ve saygılarımı sunarım.

Ayrıca tez çalışmamın her aşamasında benden desteğini eksik etmeyen kardeşim İnşaat Mühendisi Melek KURT'a ve tez aşamasında modelleyip analiz ettiğim yapının, mimari projesini çizen kardeşim Mimar Salih KURT'a ve mimarlık öğrencisi Erva KURT'a çok teşekkür eder, sevgi ve saygılarımı sunarım. Yaşamım boyunca benden destek ve sevgilerini eksik etmeyen, beni her türlü kararında destekleyen annem Filiz KURT ve babam Behçet KURT'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ocak - 2024

Sevde KURT



## İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ.....	i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI.....	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
TABLolar DİZİNİ.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	viii
ÖZET.....	ix
ABSTRACT.....	x
1. GİRİŞ.....	1
1.1.Konunun Tanımı.....	1
1.2.Konu ile İlgili Önceki Çalışmalar.....	5
1.3. Bu Çalışmanın Amaç ve Kapsamı.....	7
2.GENEL BİLGİLER.....	9
2.1. Yapı-Kazık-Zemin Etkileşim Yöntemleri.....	9
2.1.1. Direkt (Doğrudan) Yöntem.....	11
2.1.2. Altsistem Yöntemi.....	13
2.1.2.1. Kinematik Etkileşim.....	14
2.1.2.2. Eylemsizlik Etkileşimi.....	16
2.2. 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine Göre Yapı-Kazık-Zemin Etkileşimi.....	17
2.3. Çözüm Metotları.....	19
2.3.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	20
2.3.2. Winkler Temeline Oturan Kiriş Yöntemi.....	21
2.4. Kazıklar.....	22
2.4.1. Kazıklarda Yük Aktarım Mekanizması.....	23
2.4.1.1. Uç Kazıkları.....	23
2.4.1.2. Sürtünme Kazıkları.....	25
2.4.2. Kazıklarda Grup Etkisi ve Grup Taşıma Gücü.....	27
3.SAYISAL ÖRNEK.....	30
3.1. Arazi Zemin Modeli ve Yapı Hakkında Bilgiler.....	30
3.1.1. İnşaat Sahası ve Yapı Hakkında Bilgiler.....	30
3.1.2.Zemin Araştırmaları.....	31
3.2. Yapı-Kazık-Zemin Sisteminin Modellenmesi ve Analiz Edilmesi.....	33
3.2.1.Zeminin Modellemesi.....	33
3.2.2.Yapının Modellemesi.....	34
3.2.3. Deprem Kaydı Seçilmesi ve Ölçeklendirmesi.....	36
3.2.4. Seçilen Deprem Kaydının Analiz Programına Girilmesi.....	40
4. ANALİZ ÇIKTILARI.....	41
4.1. Dinamik Analiz Sonucu Kazıklardaki Moment Değerleri.....	42
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	56
KAYNAKLAR.....	58
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER.....	61
ÖZGEÇMİŞ.....	62

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	a) Eylemsizlik etkileşimi sonucu kazıktaki gerilme dağılımı b) Kinematik etkileşim sonucu kazıktaki gerilme dağılımı c) Sıvılaşma sonucu kazıktaki gerilme dağılımı.....	2
Şekil 2.1.	Sismik yapı-zemin-temel etkileşimi.....	10
Şekil 2.2.	Direkt (Doğrudan) yöntem modeli.....	12
Şekil 2.3.	Altsistem yöntem modeli .....	14
Şekil 2.4.	Kinematik etkileşim modeli .....	15
Şekil 2.5.	Eylemsizlik etkileşim modeli .....	16
Şekil 2.6.	Dinamik sınırsız ortam ve yapı etkileşimi modeli.....	20
Şekil 2.7.	Kinematik zemin- kazık etkileşimi için analitik model.....	21
Şekil 2. 8.	Uç kazığı .....	24
Şekil 2.9.	Sürtünme kazığı.....	26
Şekil 2.10.	Rijit başlıklı kazık grubunun düşey, yatay ve moment yüklerine maruz kalan eksenel-yanal deplasmanı .....	27
Şekil 2.11.	Tekil ve grup kazıklarda gerilme soğanı .....	28
Şekil 3.1.	Yapı kesiti .....	30
Şekil 3.2.	Kazık yerleşim planı.....	31
Şekil 3.3.	Zemin tabakaları.....	34
Şekil 3.4.	Zemin modeli .....	34
Şekil 3.5.	Zeminin yan ve alt yüzeylerindeki geçirgen sınırlar .....	35
Şekil 3.6.	Yatay elastik tasarım spektrumu .....	36
Şekil 3.7.	RSN3548_LOMAP_LEX000.AT2 depremine ait ivme, hız ve deplasman grafikleri.....	37
Şekil 3.8.	RSN3548_LOMAP_LEX000.AT2 depremin etkin süresi.....	37
Şekil 3.9.	RSN1108_KOBE_KBU000.AT2 depremine ait ivme, hız ve deplasman grafikleri.....	38
Şekil 3.10.	RSN1108_KOBE_KBU000.AT2 depremin etkin süresi .....	38
Şekil 3.11.	RSN1161_KOCAELI_GBZ000.AT2 depremine ait ivme, hız ve deplasman grafikleri.....	39
Şekil 3.12.	RSN1161_KOCAELI_GBZ000.AT2 depremin etkin süresi.....	39
Şekil 3.13.	Plaxis programında ölçeklendirilmiş deprem kaydı.....	40
Şekil 3.14.	Analiz faz adımları.....	40
Şekil 4.1.	Grup kazıklarının yanal yük etkisi altında göçmesi .....	41
Şekil 4.2.	Kazık grubunda yatay yük etkisinde çakışan gerilme bölgeleri.....	41
Şekil 4.3.	Ø80 fore kazıkta tekrarlı yükleme sonucu $M_3$ moment değişimleri (Mavi/kırmızı: $t=9,0$ saniyedeki dinamik analiz sonucu $M_3$ değeri, sarı: maksimum noktadaki $M_3$ değeri).....	42
Şekil 4.4.	Ø80 fore kazık için $t=4,5$ saniyede eylemsizlik etkileşiminin moment değeri ( $M_3$ ).....	43
Şekil 4.5.	Ø80 fore kazık için $t=9,0$ saniyede eylemsizlik etkileşiminin moment değeri ( $M_3$ ).....	43
Şekil 4.6.	Ø80 fore kazık için $t=9,0$ saniyede kinematik etkileşiminin moment değeri ( $M_2$ ).....	44
Şekil 4.7.	Ø110 fore kazıkta tekrarlı yükleme sonucu $M_3$ moment değişimleri (Mavi/kırmızı: $t=9,0$ saniyedeki dinamik analiz sonucu $M_3$ değeri, sarı: maksimum noktadaki $M_3$ değeri ) .....	44

Şekil 4.8.	Ø110 fore kazık için t=5,58 saniyede eylemsizlik etkileşiminin moment değeri ( $M_3$ ).....	45
Şekil 4.9.	Ø110 fore kazık için t=9,0 saniyede eylemsizlik etkileşiminin moment değeri ( $M_3$ ).....	45
Şekil 4.10.	Ø110 fore kazık için t=9,0 saniyede kinematik etkileşiminin moment değeri ( $M_2$ ).....	46
Şekil 4.11.	Ø80 fore kazıkta tekrarlı yükleme sonucu $M_3$ moment değişimleri (Mavi/kırmızı:t=13,0 saniyedeki dinamik analiz sonucu $M_3$ değeri, sarı: maksimum noktadaki $M_3$ değeri ) .....	46
Şekil 4.12.	Ø80 fore kazık için t=8,06 saniyede eylemsizlik etkileşiminin moment değeri ( $M_3$ ).....	47
Şekil 4.13.	Ø80 fore kazık için t=13,0 saniyede eylemsizlik etkileşiminin moment değeri ( $M_3$ ).....	47
Şekil 4.14.	Ø80 fore kazık için t=13,0 saniyede kinematik etkileşiminin moment değeri ( $M_2$ ).....	48
Şekil 4.15.	Ø110 fore kazıkta tekrarlı yükleme sonucu $M_3$ moment değişimleri (Mavi/kırmızı: t=13,0 saniyede dinamik analiz sonucu $M_3$ değeri, sarı: maksimum noktadaki $M_3$ değeri ) .....	48
Şekil 4.16.	Ø110 fore kazık için t=8,06 saniyede eylemsizlik etkileşiminin moment değeri ( $M_3$ ).....	49
Şekil 4.17.	Ø110 fore kazık için t=13,0 saniyede eylemsizlik etkileşiminin moment değeri ( $M_3$ ).....	49
Şekil 4.18.	Ø110 fore kazık için t=13,0 saniyede kinematik etkileşiminin moment değeri ( $M_2$ ).....	50
Şekil 4.19.	Ø80 fore kazıkta tekrarlı yükleme sonucu $M_3$ moment değişimleri (Mavi/kırmızı:t=13,0 saniyede dinamik analiz sonucu $M_3$ değeri, sarı: maksimum noktadaki $M_3$ değeri ) .....	50
Şekil 4.20.	Ø80 F fore kazık için t=7,02 saniyede eylemsizlik etkileşiminin moment değeri ( $M_3$ ).....	51
Şekil 4.21.	Ø80 fore kazık için t=13,0 saniyede eylemsizlik etkileşiminin moment değeri ( $M_3$ ).....	51
Şekil 4.22.	Ø80 fore kazık için t=13,0 saniyede kinematik etkileşiminin moment değeri ( $M_2$ ).....	52
Şekil 4.23.	Ø110 fore kazıkta tekrarlı yükleme sonucu $M_3$ moment değişimleri (Mavi/kırmızı: t=13,0 saniyede dinamik analiz sonucu $M_3$ değeri,sarı: maksimum noktadaki $M_3$ değeri ) .....	52
Şekil 4.24.	Ø110 fore kazık için t=7,02 saniyede eylemsizlik etkileşiminin moment değeri ( $M_3$ ).....	53
Şekil 4.25.	Ø110 fore kazık için t=13,0 saniyede eylemsizlik etkileşiminin moment değeri ( $M_3$ ).....	53
Şekil 4.26.	Ø110 fore kazık için t=13,0 saniyede kinematik etkileşiminin moment değeri ( $M_2$ ).....	54

## TABLolar DİZİNİ

Tablo 3.1. Sondaj kuyusu 2 standart penetrasyon testi .....	31
Tablo 3.2. Dinamik parametreler.....	32
Tablo 3.3. Sondaj derinlik, koordinat (UTM) ve kesilen birimlere ait bilgiler .....	33
Tablo 3.4. Seçilen deprem kayıtları.....	36
Tablo 4.1. Dinamik analiz sonuçları moment değerleri .....	54



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$A_p$	: Kazık ucundaki en kesit alanı
$c$	: Kazık uç bölgesindeki kohezyon
$D$	: Kazık çapı
$f$	: Herhangi bir derinlikteki ( $z$ ) sürtünme direnci
$f_{av}$	: Ortalama birim sürtünme direnci
$\Delta L$	: Birim kazık boyu artışı ( $p$ ve $f$ değerlerinin sabit olduğu)
$N_c^*, N_q^*, N_\gamma^*$	: Taşıma gücü faktörleri
$M_2$	: Kinematik etkileşimin moment değeri
$M_3$	: Eylemsizlik etkileşimin moment değeri
$p$	: Kazık kesitinin çevresi
$p_g$	: Grup kesitinin çevresi
$q_p$	: Birim alandaki uç direnci
$Q_p$	: Kazık uç taşıma kapasitesi
$q'$	: Kazık ucundaki efektif düşey gerilme
$Q_{g-u}$	: Grup kazıklarının nihai yük taşıma kapasitesi
$Q_u$	: Grup içindeki kazıkların, grup etkisi olmadan tek tek nihai yük taşıma kapasitesi
$\gamma$	: Zemin birim hacim ağırlık
$\emptyset$	: Çap

## Kısaltmalar

BYS	: Bina Yükseklik Sınıfı
ÇŞB	: Türkiye Cumhuriyeti Çevre ve Şehircilik Bakanlığı
DTS	: Deprem Tasarım Sınıfı
Mag	: Moment Magnitüd
MASW	: Multi- Channel Analysis of Surface Waves (Yüzey Dalgasının Çok Kanallı Analizi)
Rjb	: Joyner-Boore Mesafesi
Rrup	: Fay Kırığına En Yakın Mesafe
TBDY	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
UTM	: Universal Transverse Mercator (Evrensel Enlem Merkatörü)

# YAPI KAZIK ZEMİN ETKİLEŞİMİ ETKİLERİNİN PLAXİS PROGRAMI İLE İNCELENMESİ

## ÖZET

Yapı-kazık-zemin etkileşimi konusu gün geçtikçe artan yapılaşma ile önem kazanmaktadır. Bu konu, sismik etki altında yapılan analizlerde hem yapının kazıklı temeli de içinde barındıran zemin ortamına hem de bu kazıklı temelin bulunduğu zemin ortamının üstyapıya olan etkilerine bağlıdır. Türkiye coğrafi konumu itibariyle aktif fay hatlarının çerçevelediği tektonik plakalar arasında bulunmaktadır. Bu tez kapsamında incelenen yapının bulunduğu Marmara Bölgesi geneli çoğunlukla deprem etkisinde dayanımı az olan alüvyon zeminden oluşmaktadır. Tez kapsamında incelenen yapı bu anlamda önem kazanmaktadır. Analizler 80 cm ve 110 cm olmak üzere iki ayrı kazık çapına sahip kazık gruplarıyla yapı ve zemin birlikte Plaxis programında modellenerek yapılmıştır. Her iki kazık çapı için modellere üç ayrı deprem verisi uygulanarak analiz gerçekleştirilmiştir. Toplamda altı adet dinamik analiz gerçekleştirilmiştir. Analizler sonrasında kazık grubu etkisinde eylemsizlik ve kinematik etkileşim sonucu moment değerleri elde edilmiştir. Tüm deprem verileri ile gerçekleştirilen analizlerin çıktıları incelendiğinde kinematik ve eylemsizlik etkileşimi moment değerlerinin kazık çapındaki artış ile arttığı sonucuna varılmıştır. Eylemsizlik etkileşimi sonucu maksimum moment değerlerine ulaşılmıştır. Deprem kayıtlarının maksimum olduğu noktalarda, maksimum moment değerleri elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Eylemsizlik Etkileşimi, Kinematik Etkileşim, Moment, Plaxis, Yapı-Kazık-Zemin Etkileşimi.

# INVESTIGATION OF BUILDING PILE SOIL INTERACTION EFFECTS USING PLAXIS PROGRAM

## ABSTRACT

The issue of structure-pile-soil interaction is gaining importance with increasing construction. This issue depends on both the ground environment that includes the pile foundation of the building and the effects of the ground environment where this pile foundation is located on the superstructure in the analyzes carried out under seismic effect. Due to its geographical location, Türkiye is located between tectonic plates framed by active fault lines. The Marmara Region, where the structure examined within the scope of this thesis is located, mostly consists of alluvial soil that has low resistance to earthquake effects. The structure examined within the scope of the thesis gains importance in this sense. The analysis was carried out by modeling the structure and the ground together in the Plaxis program, using pile groups with two different pile diameters of 80 cm and 110 cm. Analysis was carried out by applying three separate earthquake data to the models for both pile diameters. A total of six dynamic analyzes were performed. After the analyses, moment values were obtained as a result of inertia and kinematic interaction under the influence of the pile group. When the results of the analyzes performed with all earthquake data were examined, it was concluded that the kinematic and inertia interaction moment values increased with the increase in pile diameter. Maximum moment values were reached as a result of inertia interaction. Maximum moment values were obtained at the points where earthquake records were maximum.

**Keywords:** Inertia Interaction, Kinematic Interaction, Moment, Plaxis, Structure-Pile-Soil Interaction.

# 1. GİRİŞ

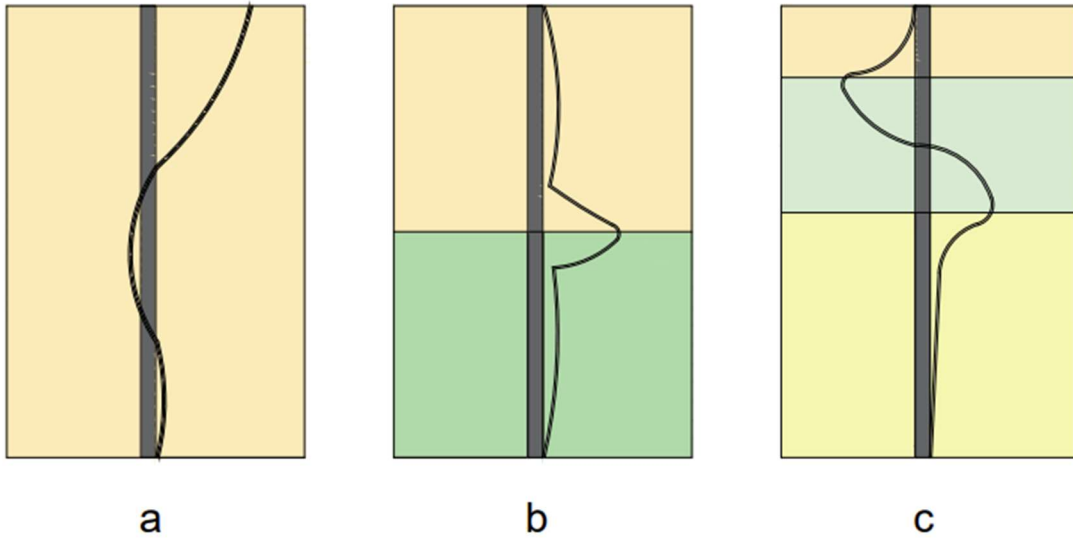
## 1.1.Konunun Tanımı

Ülkemiz coğrafi konumu itibari ile yüksek derecede deprem riski taşımaktadır (Kahramanoğlu ve Ulay, 2017). Yapılaşmanın kıyı kesimlere doğru artmasından dolayı yapılar genellikle deprem riski yüksek bölgelerde inşa edilmektedir. Deprem esnasında gerçekleşen tekrarlı ve geçici yüklenme etkileri sonucunda kohezyonsuz, doymuş veya kısmen doymuş zeminlerde oluşan zemin sıvılaşması, büyük hasarlara, can ve mal kayıplarına sebep olmaktadır (Alpaslan, 2013). Bu sebepten çoğunlukla zemin iyileştirme yöntemleri bu ortamlar için zorunluluk arz etmektedir. Zemin iyileştirme yöntemleri ucuz ve kolay olarak görülmektedir, fakat bazı zemin ve yapı sorunları durumlarında bu yöntem yetersiz kalmaktadır. Bu yetersizlikler ile üstyapı ve zemin arasındaki dinamik etkileşim problemleri ortaya çıkmakta ve kazıklı derin temel sistemine başvurulmaktadır.

2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği kapsamında doğrusal olmayan davranış, yapısal kısma ait çok sayıda konuda güçlendirilmiştir. Aynı şekilde yönetmelik kapsamında geoteknik alanda zemin yapıları, sıvılaşma davranışları, temel tasarımına dayanak sağlayacak birçok alanda ve özellikle de zemin-yapı etkileşimi konusunda birtakım prensipler, ikazlar ve öneriler yer almaktadır.

Deprem yükleri altında yapı-kazık-zemin dinamik etkileşimi alt sistem ve ortak sistem (doğrudan çözüm) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Alt sistem yöntemi ile analizde deprem etkisi altındaki kazık hem kendi etrafını kapsayan zemin ile (kinematik etkileşim) hem de üst yapının titreşimi ile (eylemsizlik etkileşimi) gerilmelerine uğramaktadır (Taştan ve Özgür, 2023). Deprem etkileri sonucunda kazıklarda oluşan eylemsizlik etkileşimi, kinematik etkileşim ve sıvılaşma durumları yanal yayılım etkisi ile oluşmaktadır. Deprem dinamik etkisi sonrasında üst yapının ataleti ile gerçekleşen eylemsizlik (atalet) etkileşimi etkileri genellikle kazıkların üst seviyelerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Depremin gerçekleştiği zemin eğer tabakalı bir zemin ise bu zemin tabakalanma bölgeleri yani rijitlik değişim bölgeleri kinematik etkileşim sonucu en büyük moment değerlerinin ortaya çıktığı bölümleri oluşturmaktadır. Eylemsizlik etkileşimi sonucu oluşan gerilme yoğunlaşmaları kazık üst noktalarına yakın kısımlarda oluşurken kinematik etkileşim sonucundaki gerilme yoğunlaşmaları zemin tabakalanma

bölgelerinde yani çok daha derinlerde gerçekleşmektedir (Şekil 1.1.a ve Şekil 1.1.b). Zemin tabakalı ise sıvılaşma problemi ile bu tabaka değişim bölgelerinde yanal yayılma ile oluşacak gerilmeler üst seviyelere çıkmaktadır (Şekil 1.1.c). Kazıklı derin temele sahip yüksek yapılarda deprem esnasında en büyük hasarın görülebileceği bölge, kazığın temel ile birleştiği yüzeye yakın ve eylemsizlik etkileşiminden kaynaklanmaktadır. Bu bölgede oluşan kesme kuvvetleri kazıkları zorlamaktadır (Kurt ve Kavak, 2024).



Şekil 1.1. a) Eylemsizlik etkileşimi sonucu kazıktaki gerilme dağılımı b) Kinematik etkileşim sonucu kazıktaki gerilme dağılımı c) Sıvılaşma sonucu kazıktaki gerilme dağılımı

Gelişen şehirleşme ile gün geçtikçe yapı artışı gözlemlenmektedir. Bu yapı artışı çoğunlukla dikey mimari şeklinde gelişmektedir. Aynı şekilde yapılaşmanın artış gösterdiği bu bölgeler genellikle taşınmış zemin olan alüvyon yani yumuşak zeminlerden meydana gelmektedir (Davranve diğ., 2023). Yapı-kazık-zemin etkileşimi, son yıllarda kat sayıları giderek artan yüksek binaların deprem bölgelerinde inşa edilmeleri ile daha da önem kazanmaktadır. Bu yüzden Yapı-kazık-zemin etkileşimi konusu inşaat mühendislerinin her alanında karşısına çıkmaktadır. Yapı-kazık-zemin etkileşimini analiz ederken zemin, yapı ve kazıklardan oluşan sistemin doğru ve gerçekçi modellenmesi önem teşkil etmektedir (Sağlam, 2006). Bu şekilde zayıf zemin üzerine inşa edilecek temeller, yüksek yapılar, havaalanları, otoyollar, barajlar, silolar vb. bütün yapılar için zeminin doğru modellenmesi fazlası ile önemli bir konudur.

Dünyada önem arz etmiş (1985 Mexico City, 1989 Loma Prieta, 1992 Erzincan, 1995 Dinar, 1999 Marmara-Düzce) depremler sonucu yapı-kazık-zemin etkileşiminin önemi anlaşılmıştır (Berrak, 2017). 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği ile de deprem bölgelerinde zayıf zeminler üzerine yapılacak olan kazıklı temeller için gerekli olan deprem etkisi altındaki yapı-kazık-zemin etkileşiminin önemi artmış durumdadır. Bu konuda yürürlükteki Deprem Yönetmeliği 16.C'de, yapı-kazık-zemin etkileşimi için 3 adet analiz yöntemi sunulmuştur. Bunlardan Yöntem I direk yöntem olarak, Yöntem II ve Yöntem III ise altsistem yöntemi olarak çözüm metotları sunmaktadır (TBDY, 2018).

Yapı tasarımında kullanılan deprem verilerine yerel zemin koşullarını dahil etmek için geliştirilen bazı pratik yöntemler bulunmaktadır (Aydınoglu, 2011). TBDY-18 Bölüm 2'de deprem yer hareketi spektrumları ile bu konuya değinilmiştir. Yönetmelikte harita spektral ivme katsayılarına ve yerel zemin etki katsayılarına bağlı olarak standart biçimde veya sahaya özel deprem tehlikesi analizleri kullanılarak deprem yer hareketi spektrumları oluşturulmaktadır (TBDY, 2018). Yer hareketi spektrumları yatay ve düşey elastik tasarım spektrumları olmak üzere iki çeşittir ve bu spektrumlar 4 bölgeden oluşmaktadır. Bölüm 2.5'e göre bina taşıyıcı sistemlerinin zaman tanım alanında deprem hesabında kullanmak amacıyla en az on bir adet deprem kaydı seçilmeli ve aynı depremden en fazla üç adet olmalıdır. Bu deprem kayıtları seçilirken tasarıma esas deprem yer hareketi düzeyi ile uyumlu olan deprem büyüklükleri, fay uzaklıkları, kaynak mekanizmaları ve yerel zemin koşulları göz önünde tutulmalıdır (TBDY, 2018). TBDY-18'e göre tasarlanan yapı, yüzeysel temele sahip ise mühendislik kayası olarak da adlandırılan ana kayadan gelen sismik dalgalar temelden yansıyarak zemine geri dönmekte, bu nedenle yapıda bir etki oluşturmamakta. Eğer yapı, gömülü veya kazıklı temele sahip ise yapı-kazık-zemin etkileşimi gerçekleşebilir. Üstyapının dâhil edilmediği serbest alan için belirtilen ivme spektrumu farklılık oluşturmaktadır. Fakat deprem etkisi ile üst yapının analizine bağlı elde edilen dinamik hareket eylemsizlik etkileşimi için önemlidir (TBDY, 2018).

Genellikle yapı tasarımlarında üstyapı ve temel sistemi ayrı olarak düşünülmektedir ve temel tasarımında zemin etkisi dikkate alınmamaktadır Zeminin rijit varsayıldığı bu yöntemde, özellikle kuvvetli yer hareketlerine maruz kalacak bölgelerde yapılacak yapılar için yapı taşıyıcı sisteminde meydana gelecek iç kuvvetler ve yer değiştirmeler

daha küçük mertebelerde kalmaktadır. Bu nedenle, yapı ile zemin arasındaki etkileşimin tek taraflı ele alınmaması gerekmektedir. Deprem hareketi ile zeminin oluşturduğu tepki, yapının oluşturduğu tepkiyi etkileyecektir. Bununla beraber dinamik etki ile yapının oluşturduğu tepki de zeminin oluşturduğu tepkiyi etkileyecektir. Yanal etki oluşturan deprem gibi kuvvetler ile zemin ortamındaki gerilme sorunu arttığı için yapı tasarımında zemin etkileri önem taşımaktadır. Ülkemizin özellikle kıyı kesimleri önemli derecede alüvyon zemin tabakalarından oluşmaktadır ve yapılaşma bu kısımlara kaymaktadır. 17 Ağustos 1999 tarihinde Kocaeli’de meydana gelen deprem sonrası yapısal hasarların etkisi ile önemli derecede can ve mal kayıpları yaşandığı bilinmektedir. Bu yapısal hasarların nedenlerinden biri yapılaşmanın kalın alüvyon tabakalardan oluşan zeminler üzerinde gerçekleştirilmesidir. Sismik riskin yüksek olduğu zayıf zemin koşullarına sahip bölgelerde zemin, yapı ve temel (kazıklar) sistemi arasındaki ilişki gerçekçi oluşturularak analiz edilip depreme karşı güvenilir şekilde tasarım yapılması gerekliliği önemli bir meseledir.

Deprem hareketi, ana kayadan çıkan sismik dalgaların yapının bulunduğu ortama doğru hareketi olarak tanımlanabilmektedir (Kramer, 1996). Bu deprem dalgaları doğru seçilmeli ve zemin, temel (kazıklar) ve yapı üzerinde oluşturacağı etkiler yorumlanmalıdır. Mühendislik kayası olarak adlandırılan ana kayadan çıkan bu sismik dalgalar, frekansa ve zeminin malzeme özelliklerine bağlı olarak temele ulaşana kadar büyüyebilir ya da küçülebilir.

Dinamik etki altında yapı kazık modeli oluşturulurken, yapı temelinin deprem yer hareketi üzerine etkileri ve üst yapının ataletinden kaynaklı atalet yüklerinin etkileri dikkate alınmalıdır. Bununla birlikte, zemin profiline, kazık özelliklerine, kazık boyutuna ve uyarılma frekansına bağlı olarak, kazık tepkisi serbest alan tepkisinden daha büyük veya daha az olabilmektedir. Bu dinamik etki sonucu kinematik ve eylemsizlik etkilerini analiz etmek adına, doğrusal olmayan Winkler Foundation yöntemi ve Sonlu Elemanlar yöntemi olarak iki yaklaşım kullanılmaktadır. Bu kullanılan yöntemler temel ve üst yapı tasarımında kullanılmasının yanında analitik transfer ve empedans fonksiyonlarının geliştirilmesi amacı ile de kullanılabilir (Balendra, 2005).

Gelişen mühendislik yapıları (köprüler, su siloları, açık deniz platformları, kazıklı temel vs.) ile kazıklı temel tasarımı sıklıkla artmaktadır. Ve yapılar için deprem etkisi altında

yapı-kazık-zemin etkileşimi konusu önem kazanmaktadır. Depremler esnasında kazıkların ve kazık gruplarının gösterebileceği davranışlar üzerinde tahmin yapmak, geoteknik mühendisleri için zorlu bir durum oluşturmaktadır. Bu sebepten deprem etkisi altında bir yapıda oluşan sismik etki yapı ve temel (kazıklar) sisteminin tasarımı kapsamında temelin depremin oluşturduğu yer hareketlerine etkisi, yapının uğradığı deprem yükleri etkisindeki temelin uyumu ve üstyapının uğradığı eylemsizlik yükleri incelenmelidir (Çetin ve diğ., 2013).

## **1.2.Konu ile İlgili Önceki Çalışmalar**

1950’li yıllardan sonra yapı-zemin etkileşimi önemli bir konu olmaya başlamıştır. Bu tarihten itibaren dinamik yapı-zemin etkileşimi konusunda çalışmalar önem kazanmıştır (Yerli, 1998). Yapı-zemin etkileşimi problemi biraz daha genişletilip kazıkların dâhil edilmesi ile yapı-kazık-zemin etkileşimi incelenmeye başlanmıştır.

1985 yılında Wolf ve Oberhuber tarafından yayınlanan makalede yapı-zemin etkileşimi konusunda çeşitli zemin fonksiyonlarıyla, yüzeysel temele sahip yapılarda zaman tanım alanında araştırmalar yapılmıştır. Doğrusal olmayan zemin-yapı etkileşim analizi için de sismik ortam, doğrusal bir analize dayalı olarak ayrıklaştırılmış ve sınırsız bölgeler arasındaki arayüzde belirlenen serbest alan hareketi ile tanımlanmıştır. Doğrusal olmayan yapı ile düzensiz bir zemini analiz etmek için temel hareket denklemi zaman tanım alanında formüle edilmiştir (Wolf ve Oberhuber, 1985). Mehmet Nuray Aydınoglu hocamızın 1993 yılında yayınlamış olduğu makalede doğrudan ve alt sistem yöntemi için bir arada geliştirilen bir ortak formülasyon elde edilmiştir. (Aydınoglu, 1993). 2005 yılında Kocaeli’de gerçekleşen deprem sempozyumunda Çağlar, Garip ve Yaman tarafından depremin dinamik etkisi altında sonlu elemanlar yöntemi ile zaman tanım alanında betonarme yapıların tutumu incelenmiştir. Bu incelenen yapı, zemine gömülü temele sahiptir ve 1999 Marmara deprem kaydı etkisinde SAP2000 programı ile analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar grafikler ile yorumlanmıştır (Çağlar ve diğ., 2005). Yapı-zemin-temel etkileşimi üzerine Girgin, Mısıır, Özden ve Kahraman tarafından 2008 yılında yapılan çalışmadaki çözümlerle yapı, zemin ve temel etkileşiminin yapısal tasarıma etkisi incelenmiştir. Değişken ve sabit yatak katsayısı metodu ile analizler ortaya koyularak, betonarme kolona ait donatı oranı için yürürlükteki ulusal yönetmelikler

ışığında hesap yapılmıştır. Bunun sonucunda yapı tasarımı aşamasında yapı-zemin etkileşimi etkisi açıklanmıştır (Girgin ve diğ., 2008).

Kinematik ve eylemsizlik etkileşimi üzerine de birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. 2009 yılında yapılan bir çalışmada, dinamik yapı-kazık-zemin etkileşimini tek serbestlik dereceli yapıyı destekleyen tek bir kazık ile üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Dinamik etki altında kazık deplasmanı incelenerek, kinematik ve eylemsizlik etkileşiminin katkılarına değinilmiştir (Rovithis ve diğ., 2009).

Son zamanlarda TBDY-18 yürürlüğe girmesi sonucunda yapı-kazık-zemin etkileşimi önem kazanmıştır. TBDY-18'e göre sınılaşma ile eylemsizlik ve kinematik etkileşimi üzerine, 2019 yılında gerçekleştirilen çalışmada güncel yönetmelikteki Yöntem III'e göre yapı-kazık-zemin etkileşimi analizleri yapılmış ve kazıklı temel tasarımı gerçekleştirilmiştir (Bayat ve diğ., 2019).

Radye temel üzerine inşa edilmiş 7 katlı bir hastane yapısına ait kazıklı radye temel sisteminin, düşey yükler altında üç farklı analiz ve modelleme yaklaşımı ile basit çözüm yaklaşımlarının daha detaylı analiz yöntemlerine göre kabul edilebilirliği araştırılmıştır. İlk yöntem olarak basit yaklaşım kullanılmıştır. Bu basit modelleme yaklaşımının amacı, yapıyı hızlı bir şekilde değerlendirmek ve genel davranışını anlamaktır. Basit yaklaşımda, düşey kazık kuvvetlerinin etkileri kazıklara aktarılmadan ve kazık ile radye temelin etkileşimine dair yük-deformasyon bağlantıları üzerinde durulmadan, radye temelin bulunduğu düzeyde kazıkların ve radye temelin temas sınırlarına sabit mesnet yerleştirilerek gerçekleştirmiştir. Sadece düşey yükler altında boyutlandırılan benzer yapılar üzerine odaklanılmış ve bu bağlamda basit yaklaşımın emniyet ve ekonomi açısından uygunluğu değerlendirilmiştir (Kutlu ve Kılıç, 2019).

2013 yılında kazıklı radye temel için etkileşim etkileri üzerinde durularak tasarlanan bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada radye temel bir grup kazık ve zemin tarafından desteklenen levha şeklinde düşünülmüştür. Temelde yük etkisi ile oturma hesabı yapılarak kazıkların nihai yük kapasitesi üzerinde durulmuştur. Kazıkların doğrusal olmayan davranışı ile kazıklı derin temelin doğrusal olmayan davranışının oluşabilmesini desteklediği düşünülmüştür. Önerilen bu yöntemle, eğilme momentinin etkisiyle radye temeldeki oturma miktarı ve yayılımının hesaplanması amaçlanmıştır. Yöntemin

doğrulanması amacıyla, homojen silis kumu içinde bulunan farklı kazık uzunluklarına sahip 16 kazıklı ve 9 kazıklı temel sistemlerinin santrifüj testleri yapılmış ve Plaxis 3D ile modellenerek analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar arasında karşılaştırma yapılmış ve birbiri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Yöntemin kazıklı radye temeldeki oturma miktarını ve gerilme dağılımını oldukça iyi bir şekilde tahmin edebildiği gösterilmiştir (Nguyen ve diğ., 2013).

Plaxis 3D sonlu elemanlar programı kullanılarak gerçekleştirilen başka bir çalışma da 2014 yılında gerçekleştirilmiştir. Kazıklı radye temel sistemini analiz edilerek temelin oturma davranışı üzerinde durulmuştur. Kazık sayısı, kazık uzunluğu, kazık düzeni ve kazık aralığının kazıklı radye temelin davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sayısal sonuçlar ile kazıklı radye temelin oturma davranışı kazık sayısı, kazık uzunluğu, kazık düzeni ve kazık aralığı gibi çeşitli faktörlere bağlı olduğunu kanısına varılmıştır. Derin (kazıklı) radye temelin, yüzeysel radye temele göre çok daha etkili bir biçimde oturmayı azaltma yeteneğine sahip olduğu vurgulanmıştır. Aynı şekilde kazık uzunluğu artması ile temelin oturma miktarının azalacağı gözlemlenmiştir. Kazık aralığındaki artışın oturmanın artmasına neden olacağına değinilmiştir (Vu ve diğ., 2014).

2015 yılında gerçekleştirilen doktora tez çalışmasında kum birimi içerisindeki kazıklı radye temel sistemi incelenmiştir. Kazıkların aralığı, yüzey pürüzlülüğü, radye temele uygulanan düşey yükün merkezi, tabakalı zemin durumlarının tesirleri incelenmiştir. Kazık aralığının artması ile kazıklara etkileyen yüklerde de artış gözlemlenmiştir. Fakat kazık aralığının 4 kazık çapından büyük olması durumunda, her bir kazık tek bir kazık gibi davranış göstermiştir. Gerçekleştirilen deneyler sonrasında Plaxis 3D sonlu elemanlar programı ile analizler gerçekleştirilmiş ve ulaşılan sonuçlar deneysel sonuçlar ile kıyaslanmıştır. Aralarında uyum gözlemlenmiştir ve temel mühendisliğinde pratik kullanım adına tasarım değişkenleri ileri sürülmüştür (Bağrıaçık, 2015).

### **1.3. Bu Çalışmanın Amaç ve Kapsamı**

Türkiye coğrafi konumu nedeniyle aktif fay hatlarının çerçevelediği tektonik plakalar arasında bulunmaktadır. Bu tez kapsamında incelenecek yapı-kazık-zemin sistemi Marmara Bölgesinde bulunmaktadır ve bu bölgenin zemini çoğunlukla alüvyon malzemedir oluşmaktadır. Belirtilen bu ortamlarda inşa edilecek yapılarda yapı-kazık-

zemin etkileşimi çok daha önem kazanmaktadır. 2019 yılında yürürlüğe girmiş olan Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği bu hususta zorunluluk getirmektedir. Bu sebepten yapı-kazık-zemin etkileşimi konusu çokça önemli olmaktadır. Deprem yer hareketlerine maruz kalan yapıların analizinde, temel ile üst yapı arasındaki etkileşimin doğru bir şekilde hesaba katılması gerekmektedir. Bu tez çalışması kapsamında, gelişen bilgisayar yazılımları sayesinde yapı, kazık ve zemin tek bir modelde birleştirilerek Plaxis programı ile analiz yapılarak yapı-kazık-zemin etkileşimi konusuna değinilmiştir.

Modellenen yapı, kazık, zemin sisteminin dinamik yük etkisi altında analizi için tanımlanan sonsuz emici sınırlar önemli bir faktördür. Bir bütün olarak analiz edilen modelde ölçeklendirilerek yüklenen deprem kayıtları ana kayadan verilmiştir. İlk olarak kazıklı temele ulaşan kayıtlar sonrasında üst yapıya iletilmiştir. Daha sonra üst yapıdan tekrar zemin ortamına ulaşarak eylemsizlik etkileşimi incelenmiştir. Ayrıca, zemin tabakalanma noktalarında kinematik etkileşim değerleri incelenmiştir.

Bu çalışmanın amacı; yapı, kazık ve zemin sisteminin konuma uygun deprem verileri kullanılarak yapılan dinamik analiz ile yapının ataletinden kaynaklı eylemsizlik etkileşimi, zemin tabakalanma bölgelerindeki kinematik etkileşim sonucu oluşan moment değerlerinin elde edilmesi ve bu değerler üzerine tartışmaktır. Ayrıca, deprem etkisi altında kazık gruplarındaki en büyük zorlanmaların olduğu durumun tespit edilmesi amaçlanmıştır.

## 2.GENEL BİLGİLER

### 2.1. Yapı-Kazık-Zemin Etkileşim Yöntemleri

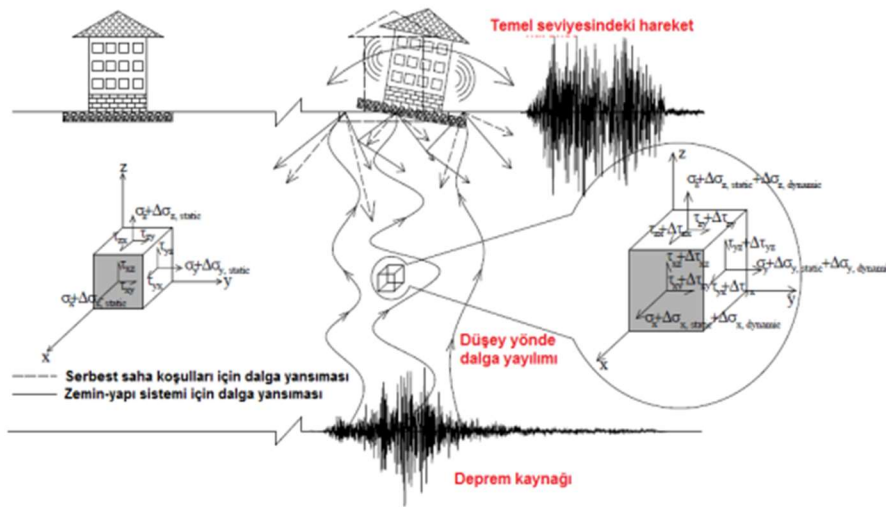
Yapı-kazık-zemin genel olarak, deprem verileri etkisi ile sismik uyarı altında kazıkların da içinde bulunduğu zemin ortamı ile üst yapının etkileşiminden oluşmaktadır. Yani deprem hareketi altında hem zeminin oluşturduğu tepki yapının oluşturduğu tepkiyi hem de üst yapının oluşturduğu tepki zeminin meydana getirdiği tepkiyi etkileyecektir. Bu sebepten yapılar ile kazıklar arasında gerçekleşen etkileşim tek taraflı olmamaktadır. Hem zemin ortamından hem de üst yapıdan meydana gelecek dinamik etkileşim dahilinde gerçekleşecek belli beklentiler oluşmaktadır. Deprem verisi altında yapı, kazık ve zemin davranışlarının birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

Yapı temelinin yüzeysel olması durumunda görece yumuşak zeminlerde, yapılar için dinamik yapı-zemin etkileşimi genellikle binayı elverişli yönde etkilemekte ve zeminden binaya geçen deprem dalgalarının meydana getirdiği eşdeğer deprem yüklerini azaltmaktadır. Bu nedenle güvenli tarafta kalma tercihi sebebiyle yüzeysel temele sahip binalarda (bodrumlu binalar olmak üzere) yapı-zemin etkileşimi ihmal edilebilmektedir. Kazıklı derin temele sahip yapılarda, bu kazıklı temel deprem etkisinde zeminde meydana gelen deplasmanlara karşı direnç göstermekte ve kazık çevresine yakın alanlarda zeminin oluşturacağı tepkiyi değiştirmektedir. Bu dinamik etki altındaki etkileşim hem zemin modeline hem de seçilen deprem verisine göre önemli derecede değişmektedir. Özellikle alüvyon gibi yumuşak zemine sahip alanlarda yapılacak derin temeller çok daha önem taşımaktadır. Bu bölgelerde yapılacak yapılaşma için hem kazıkların yapı ve zeminle etkileşimi hem de kazıkların birbirleri ile etkileşimi muhakkak incelenmelidir. Etkileşim sonucu kazıklarda ve yapıda gerçekleşen deplasman boyutu tespit edilmelidir.

Analiz için seçilen deprem verileri sisteme taban kayasından tanımlanmaktadır. Tanımlanan bu veriler, zemin ortamı içerisinde yayılarak bir kısmı yapı temelinden yansıyarak geri dönmekte, bir kısmı da bu kazıklı temel ortamından üst yapıya ulaşmakta ve sonrasında yapı ataletinden kaynaklanan etkiler ile kazıkların da içinde bulunduğu zemin ortamına geri dönmektedir. Deprem verisi zemin koşullarına bağlı olarak büyüme veya azalma biçiminde davranış gösterebilmektedir (Uyanık ve diğ., 2021).

Yerel zemin koşulları ve yapının bulunacağı bölgenin çevresinde bulunan aktif fay hatları önemli bir konu olmaktadır. Yapı tasarım aşamasında deprem tehlike haritaları ile aktif fayların tespit edilmesi gerekmekte olup bölgeye uygun tepki spektrumları ile spektral etkiyi geoteknik modelleme yaparak, modellenen yapıya etkisi belirlenmektedir. Yapı-kazık-zemin etkileşiminin karmaşıklığı sebebi ile sismik etki altında temel tasarımında birçok zorlukla karşılaşılmaktadır. Sistemin tasarımında zemin mekaniği, yapı dinamiği ve temel mühendisliği, yapı-kazık-zemin etkileşiminde ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tasarım aşamasında yapı, geoteknik ve deprem mühendislerinin etkileşimli çalışması gerekmektedir. Gelişen yazılım teknolojisi dâhilinde doğrusal olmayan zemin üzerinde zorlu tasarım gerektiren bu problem sonlu elemanlar programları ile çözülebilmektedir. Bu şekilde daha doğru ve gerçekçi analiz çıktıları elde edilebilmektedir. Çünkü yapılan analizdeki hedef, tasarlanacak yapıların sağlamlığıdır.

Şekil 2.1.'de görüldüğü üzere serbest zemin ve yapı olması durumunda bu sismik etki farklılık oluşturmaktadır. Bununla beraber alüvyon ve kaya gibi zeminlerde de bu etki değişim göstermektedir. Deprem etkisi altında yapının temelinde oluşacak etki ile serbest alan yer hareketinden çok daha farklı durumlar ortaya çıkmaktadır. Sismik dalgalar bu zemin ortamında farklı noktalara yayılır ve farklı şekillerde temel ortamına çarpabilmektedir. Geniş alanda yayılan bu dalgalar genlik ve faz bakımından çeşitli biçimlerde etkilenebilmektedir.



Yapı-zemin-kazık etkileşimi konusu iki yöntem ile analiz edilmektedir. Birincisi, üstyapının ve kazıklı temellerin bulunduğu zeminin birlikte analiz edildiği doğrudan yöntemdir. İkincisi ise, kazılarla birlikte zeminin ve üstyapının ayrı olarak modellenip analiz edilmesi ile oluşan alt sistem yöntemidir. Bu analizlerde doğrudan yöntem kullanılırken ana kayadan yayılan dalgaların yansımaları önlemek adına yapay "viskoz" sınırlar geliştirilmiştir. Tasarım ve analiz aşamasında, temel sertliği ve sönümlenmesi, temel giriş hareketleri ve serbest alan yer hareketlerinin doğru anlaşılıp yorumlanması önemli bir noktadır. Temelde elde edilen deformasyonlar bu etkiler ile ilgilidir. Deprem etkisi altında yapıda belli titreşimler meydana gelmektedir. Yapının titreşimi sonucu yapıdan tekrar zemin ortamına gelen deprem dalgaları temelin kazıkla birleştiği üst noktalarda eylemsizlik etkileşimine sebep olmaktadır. Bu etkileşim ile moment ve burulma değerleri elde edilmektedir. Kazıkların bu kısımlarında yer değiştirmeler ve rotasyonlara neden olmaktadır. Bu oluşan yer değiştirmeler modellenen genel sistemin sönümlenmesini etkileyen radyasyon sönümlenmesi ve histeretik toprak sönümlenmesi yoluyla enerji dağılımına yol açmaktadır. Yayılan deprem dalgaları ya serbest zeminde ya da zemin üzerinde bulunan yapıya etki etmektedir. Bu iki durumda da farklı hareketler ortaya çıkmaktadır. Eğer serbest alan olarak incelenecekse bu kısımda dalga yayılımı ve gömme etkileri nedeniyle temel hareketlerinin serbest alan hareketlerinden sapmasına neden olduğu kinematik etkileşim, yapı temeli bulunuyorsa burada da yapı ataletinden kaynaklı yer değiştirmeler ve rotasyonlar elde edilmektedir. Yapı temelinde sismik yük etkisi ile eğilme, aksel ve kayma deformasyonları meydana gelmektedir. Bunlar üst yapı ve zeminden kaynaklanan kuvvet ve yer değiştirmeler ile gerçekleşmekte olup temel tasarımında önemli bir faktör olmaktadır. Özellikle de kazıklı derin temeller için önemli bir faktördür. Bu etkileri değerlendirebilmek için doğrudan ve altsistem yöntemleri olarak iki yaklaşım kullanılmaktadır (Balendra, 2005).

### **2.1.1. Direkt (Doğrudan) Yöntem**

Bu yöntem ile analiz gerçekleştirirken yapı, kazıklı temel ve zemin birlikte modellenerek süperpozisyon hipotezini kullanmadan tek adımda analiz edilmektedir.

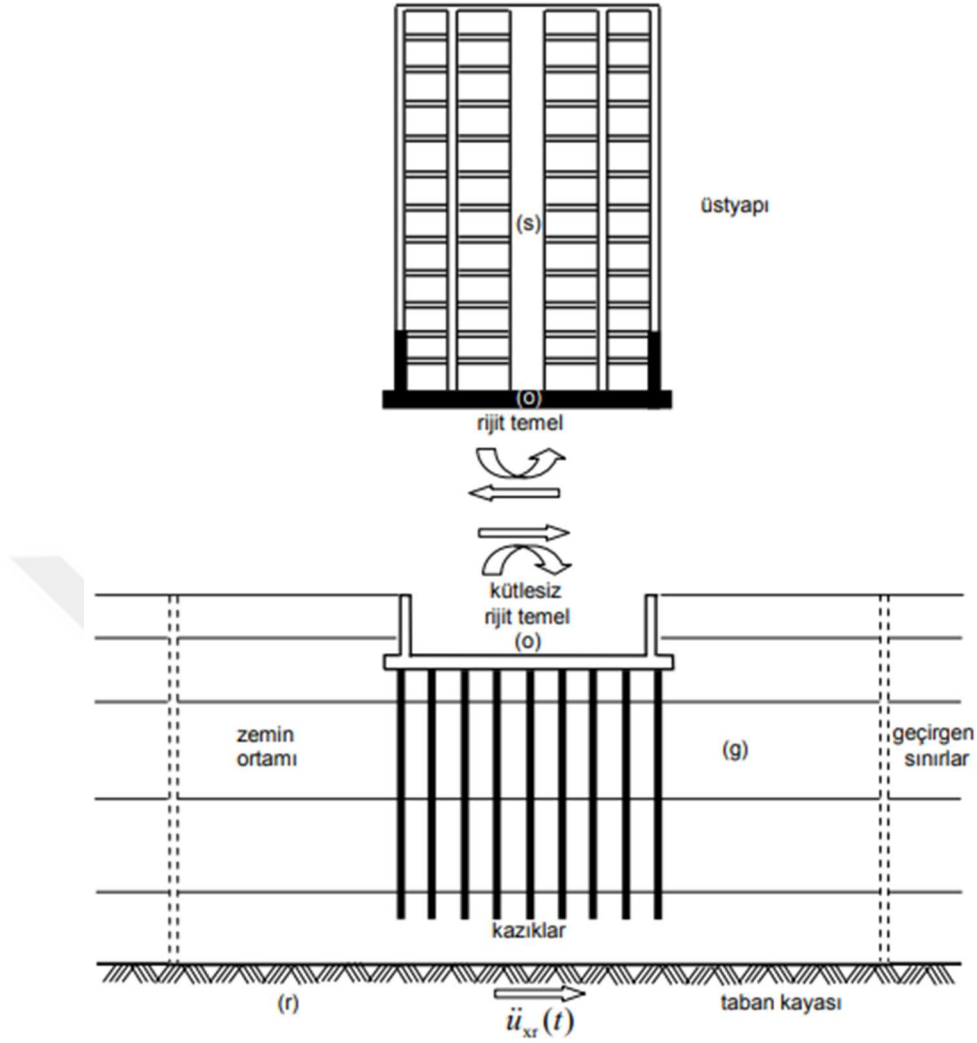
Direk yöntem ile modellenen sisteme deprem verisi verilerek gerçekleştirilen dinamik analizler sonlu elemanlar, sonlu farklar veya zemin özelliklerine ait eşdeğer doğrusal temsili uygulanarak oluşturulur. Genellikle analizler için sonlu elemanlar



### 2.1.2. Altsistem Yöntemi

Yapı-kazık-zemin etkileşimi analiz yöntemlerinden diğeri Altsistem Yöntemidir. Altsistem Yöntemi analizinde yapı ve zemin ayrı olarak modellenip süperpozisyon yaklaşımı ile toprağın temas yüzeyleri ile yapı arasındaki uyuma göre birleştirilerek gerçekleştirilmektedir. Zemin ve yapı ayrı ayrı analiz edilmektedir ve aradaki temas yüzeyi ile bu ayrı modeller arasında yük aktarımı sağlanmaktadır. Yapı-kazık-zemin etkileşimi analizinde yapısal tepki için bu kuvvetler önem arz etmektedir. Bu sebepten analizler doğru gerçekleştirilerek, doğru kuvvetler elde edilmelidir. Bu sistemde üstyapı ve kazıklı temel ile zemin süperpozisyon ilkesine göre ayrı modellenerek dinamik analiz gerçekleştirilmektedir (Taştan ve Özgür, 2023). Şekil 2.3'te, süperpozisyon ilkesi ile üstyapı ve kazıklı temel ile zemin ortamı ayrı olarak incelenmiştir. Bu şekilde görüldüğü üzere yapı-kazık-zemin etkileşim modeli üç bölgeye ayrılmıştır. Kazıklı zemin ortamı g ile ana kaya r ile temel o ile ve üstyapı s ile ifade edilmektedir. Altsistem yaklaşımı, kinematik ve eylemsizlik etkileşimi olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Deprem etkisi altında gerçekleştirilen dinamik analizlerde üstyapı, temel şekli, zemin tabakaları ve deprem verisi önemlidir (Aydinoğlu, 2011).

Dinamik etki altında kinematik etki, üstyapı olmaması durumundaki etkidir. Zemin yüzeyindeki veya altındaki sert temelerde gömme etkileri nedeni ile temel hareketlerinin serbest alan hareketlerinden sapmasına ve temel ataletine neden olmaktadır. Sonrasında dinamik etki altındaki temelden üstyapıya yük aktarımı gerçekleşmektedir ve üstyapı harekete geçirilmektedir. Ardından üstyapıdan tekrar zemin ortamına bu deprem dalgaları dönmektedir. Bu kısımda işin içine üstyapı ataletinden kaynaklı eylemsizlik etkileşimi girmektedir. Eylemsizlik etkileşimi etkileri, sismik uyarılma sırasında temelin ve alttaki zemin katmanlarının yapısal ataleti ve deforme olabilirliği ile doğrudan ilişkilidir. Dinamik etki altında üstyapıdan kaynaklı eylemsizlik etkileşimi taban kayması, moment ve burulmaya neden olmaktadır. Temel arayüzünde ise yer değiştirme ve dönme anlamında karşılaşmaktadır. Bu yer değiştirmeler, genel sistemi önemli ölçüde etkileyebilecek radyasyon sönümlemesi ve histeretik toprak sönümlemesi yoluyla enerji kaybına sebep olmaktadır (NIST GCR 12-917-21, 2012).



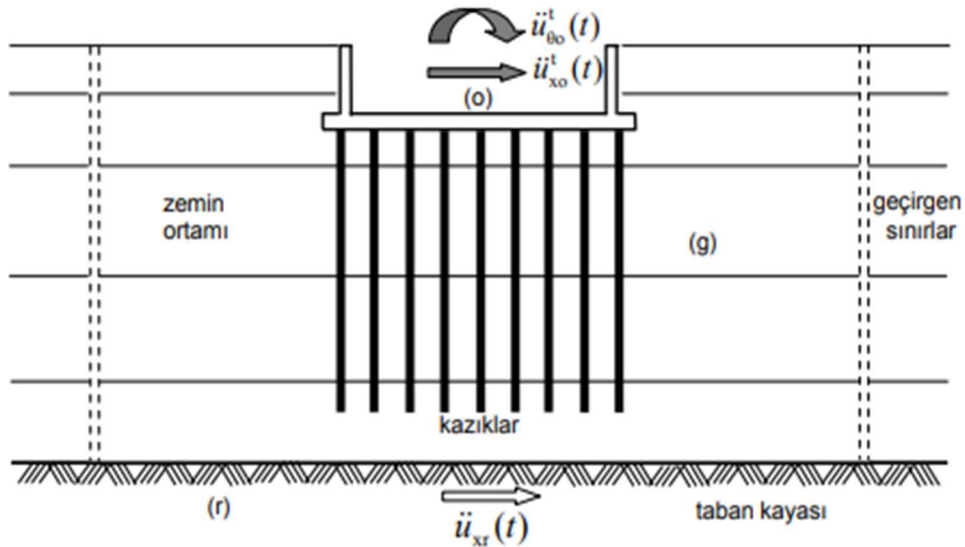
Şekil 2.3. Altsistem yöntem modeli (Aydınöğlü, 2011)

### 2.1.2.1. Kinematik Etkileşim

Altsistem yönteminin ilk adımı kinematik etkileşimdir. Kinematik etki, deprem verisi ile ana kayadan çıkan sismik dalgaların üstyapıya ulaşmaya kadar zemin ortamında gerçekleştirdiği değişimler ile aynı zamanda derin temele (kazıklı temel) sahip yapılarda, kazıkların sismik etki altında oluşturduğu deplasmanlar olarak tabir edilebilmektedir. Yatay deprem kuvvetleri etkisindeki yapı-kazık-zemin etkileşimi Şekil 2.4'teki gibi tanımlanabilmektedir. Düşey olarak yayılma gösteren kesme dalgaları zemin yüzeyine geldiği anda yatay ve düşey kuvvetler oluşturur. (Aydınöğlü, 2011).

Üst yapı olmadığında, gerçekleşen serbest alan hareketi, temelin varlığında oluşan hareketten farklılık gösterebilmektedir. Buradaki serbest alan tabiri yapı temelinin bulunduğu konumdan oldukça uzaktaki yüzey toprağının hareketini belirtmektedir. Yani kinematik etkileşimden kaynaklı olarak temel varlığı serbest alan hareketini etkilememektedir (Balendra, 2005). Zemine gömülü halde veya yüzeyde bulunan rijit temeller ve serbest alandaki kazıklı temelde incelenen kinematik etkileşim farklılık göstermektedir. Kazıklara sahip derin temeller buldukları zemine göre çok daha rijit olmaktadır. Bu sebeple, dinamik etki altında ana kayadan sisteme verilen deprem dalgası bu rijit malzeme ile karşılaştığı zaman yansıyor ve tekrar geri dönebilmektedir. Aynı şekilde kazıklı temele sahip sistemde kazıkların kendi kütleleri ile oluşturdukları sarsılmalar neticesinde zemin ortamına kayma dalgaları yayabilmektedir (NIST GCR 12-917-21, 2012).

Üst yapının olmadığı kazıklı temellerde, dinamik etki altında kinematik etkileşim sonucu kazıklarda elde edilen transfer fonksiyonları ilk olarak temele ve sonrasında üstyapıya aktarılmaktadır. Kinematik etkiler, frekansa bağlı transfer fonksiyonlarıyla belirtilmekte olup transfer fonksiyonu, yapının olmama durumunda temel hareketinin serbest alan hareketine olan oranı olarak belirtilmektedir. Temel ortamından dalga geçişi ile temel elemanlarında kinematik gerilmeler oluşmaktadır.

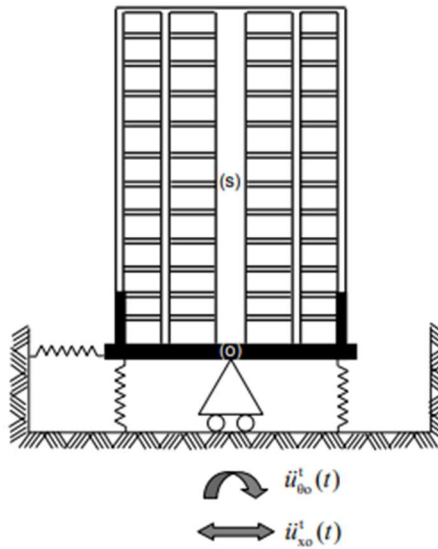


Şekil 2.4. Kinematik etkileşim modeli (Aydınoglu, 2011)

### 2.1.2.2. Eylemsizlik Etkileşimi

Altsistem yönteminin ikinci adımı ise eylemsizlik etkileşimidir. Ana kayadan sisteme verilen deprem dalgaları zemin ortamından temele ulaşarak üstyapıya geçmektedir. O anda yapıda dinamik etki ile salınım oluşmaktadır. Daha sonrasında bu deprem dalgaları üstyapıdan tekrar zemin ortamına geri dönmektedir. Bu geri dönen sismik etki yapı ataletinden kaynaklı olarak eylemsizlik etkileşimini oluşturmaktadır. Eylemsizlik etkileşimi üstyapıda, kesme kuvveti, moment ve burulma gibi etkilere sebep olmaktadır. Bu etkiler sonucu temel ve zemin arayüzünde deformasyonlar ve rotasyonlar oluşmaktadır. Bu yer değiştirmeler, genel sistem sönümlemesini önemli ölçüde etkileyebilen radyasyon sönümlemesi ve histeretik toprak sönümlemesi yoluyla enerji dağılımına yol açmaktadır (Çetinkaya ve diğ., 2015).

Eylemsizlik etkileşimindeki asıl amaç, deprem kuvvetlerinin kinematik etkileşim altında transfer fonksiyonları ile üstyapıya etki ettirilmesi ve ardından bu deprem kuvvetlerinin tekrar zemine geri iletilmesini araştırmak ve kazıklarda meydana gelen iç kuvvetleri hesaplamaktır. Bu anlamda kazıkları birleştiren radye temelin esnekliği yapı içerisindeki ivmeyi etkilemektedir. Kazıkta eylemsizlik etkileşimi genellikle kazık ve temelin bağlantı noktasında gerçekleşmektedir. Kazıklarda gerçekleşen en büyük kuvvetler bu eylemsizlik etkileşimi sonucu kazık üst noktalarında yani radye temelle yakınlaştığı bölgelerde gerçekleşmektedir. Bu kısımlardaki büyük kesme kuvvetleri kazıkları zorlamaktadır.



Şekil 2.5. Eylemsizlik etkileşim modeli (Aydınöğlü, 2011)

## 2.2. 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine Göre Yapı-Kazık-Zemin Etkileşimi

Yapı-kazık-zemin etkileşimi problemi için 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği Bölüm 16C'de önerilen üç farklı yöntem bulunmaktadır.

Yöntem I yerel zemin sınıfı ZD, ZE veya ZF olduğunda, DTS=1, 1a, 2, 2a olan kazıklı Yüksek Binalar (BYS=1) için geçerlidir. Kinematik etkileşim için, Yöntem I'e göre zemin ortamı sonlu elemanlar veya sonlu farklar yöntemiyle analiz edilmek amacıyla 3 boyutlu modellenmelidir. Mühendislik taban kayasından sisteme verilen deprem dalgaları, zemin ortamından dışarı doğru yayılırken içeri yansımalarını engellemek için geçirgen sınırlar kullanılmalıdır. Kazıkların modellenmesi ise, kazık ve zemin arayüzüne uygun çubuk elemanlar şeklinde olmalıdır. Bina temeli de kütsüz, sonsuz rijit eleman olarak, bodrum kat perdeleri ile (zemin kat seviyesine kadar) birlikte modellenmelidir. Bu modelde taban kayasından sisteme uygulanacak on bir çift deprem kaydıyla yirmi iki analiz gerçekleştirilmelidir ve zaman tanım alanında hesap yöntemi ile hesap yapılmalıdır. Temel seviyesindeki deprem kayıtları ile deprem spektrumlarına ulaşılabacaktır. Bu çıktılar, sonrasında eylemsizlik etkileşimi hesabında kullanılacaktır. Yöntem I'e göre eylemsizlik etkileşimi için, temel-kazık-zemin sistemine statik tekil kuvvetler uygun şekilde etki ettirilmeli ve etkileşim yaylarına ait doğrusal olmayan kuvvet-deplasman eğrileri elde edilmelidir. Sistem; üstyapı, bina temeli ve bodrum katları ile bunların kütleleri göz önüne alınarak modellenmelidir. P-y eğrilerinden elde edilen etkileşim yayları bina tabanına etki ettirilmeli ve uygun histeretik davranış modeli uygulanmalıdır. Geoteknik analizlerden elde edilen ivme-zaman deprem kayıtları, temel seviyesinden üst yapıya verilmelidir. Analiz sonucunda üst yapıda ve üst yapı temelinde (bodrumlar dahil) zamana bağlı kuvvet-deplasman değişimleri elde edilecektir. Eylemsizlik etkileşimi sonucu elde edilen iç kuvvet ve şekil değiştirme değerleri kinematik etkileşim hesabında elde edilenler ile yönetmeliğe uygun şekilde birleştirilmelidir (TBDY, 2018).

Yöntem II yerel zemin sınıfı ZD, ZE veya ZF olduğunda, DTS=3, 3a, 4, 4a olan kazıklı Yüksek Binalar (BYS=1) ve DTS=1a, 2a olan kazıklı binalar (BYS=2,3) için geçerlidir. Bu yöntemde kinematik etkileşim, zemin ortamı için herhangi bir modelleme yapılmadan kazıklar çubuk eleman olarak modellenmelidir. Kazık düğüm noktalarına, kazık ve zemin arasındaki kuvvet-deplasman bağıntısı için doğrusal olmayan p-y, t-z yayları ve

kazıkların uç kısmına da Q-Z yayları uygulanarak modelleme gerçekleştirilmedi. Bina temeli de bodrum katları ile kütlesiz ve sonsuz rijit eleman şeklinde tasarlanmalıdır. Bodrum perdeleri ile zemin arasında yatay kuvvet-deplasman ilişkisini belirtmek amacıyla p-y eğrileri kullanılmalıdır. Yöntem I'deki gibi ana kayadan her iki yönde 11 deprem kaydı sisteme uygulanacaktır. Temel seviyesindeki deprem kayıtları ile deprem spektrumlarına ulaşılabilecektir. Bu çıktılar, sonrasında eylemsizlik etkileşimi hesabında kullanılacaktır. Yöntem II'deki eylemsizlik etkileşimi hesap adımları, Yöntem I için açıklanan hesap adımları ile aynı olup yalnızca hesap modelinde farklılık vardır. Yöntem I'deki temel-kazık-zemin ortamı modeli yerine Yöntem II'de temel-kazık-zemin yayları (p-y, t-z, Q-Z yayları) modeli göz önüne alınmaktadır. Yöntem II ortak sistem yaklaşımı ise yapı-kazık-zemin sistemi, kinematik etkileşim ve eylemsizlik etkileşimi modelleri birlikte modellenerek ortak sistemin zaman tanım alanında hesabı yapılmaktadır.

Yöntem III yerel zemin sınıfı ZD, ZE veya ZF olduğunda, DTS=1a, 2a olan kazıklı Yüksek Binalar (BYS1) ve DTS= 1a, 2a olan kazıklı binalar (BYS=2,3) için geçerlidir. Yöntem III ile gerçekleştirilen kinematik etkileşim Yöntem II'nin basite indirgenmiş şeklindedir. Temel, kazık ve zemin arasında gerçekleştirilen kinematik etkileşim analizi ile kazık iç kuvvet talepleri hesaplanmaktadır. Bu hesap için iki doğrultuda on bir deprem kaydı kullanılacak ve her bir analizden elde edilen sonuçların maksimum mutlak değer ortalaması alınacaktır. Analiz sonucu elde edilen kazıklardaki eğilme momentleri  $R=2.5$ 'e bölünerek azaltılacaktır ancak kesme ve aksel kuvvetler için herhangi bir azaltma yapılmayacaktır. Yöntem I ve Yöntem II 'de türetilen etkin temel hareketleri'ne ait deplasman ve spektrumlar, Yöntem III'te hesaplanmamaktadır. Eylemsizlik etkileşimi hesabında kullanılan tasarım spektrumu, serbest zemin davranış analizleri sonucu temel taban kısmında oluşan spektrumların ortalaması olarak alınabilmektedir. Yöntem III ile eylemsizlik etkileşimi hesabı ise yapı, temel, kazık ve zemin yayları (p-y, t-z ve Q-Z yayları) ile bu yayların doğrusal davranışları hesaba katılarak ortak sistem için yapılmaktadır. Rijit perdelerine sahip bodrumlu yapılar için doğrusal deprem hesabı iki adımlı gerçekleştirilecek ve kazıklar bodrum elemanları ile birlikte hesaba katılacaktır. Eylemsizlik etkileşimi sonucu kazıklardaki iç kuvvetler için de bodrum kısmı için kullanılan R ve D katsayıları kullanılmalıdır. Bodruma sahip olmayan yapılarda eylemsizlik etkileşimi dahilinde kazıklarda oluşan iç kuvvetlere, yapı taşıyıcı sistemi için R ve D katsayıları değiştirilmeden kullanılacaktır. Kazıklarda eylemsizlik ve kinematik

etkileşim sonucu tüm deprem hesaplarında elde edilen iç kuvvetler birleştirilecektir (TBDY, 2018).

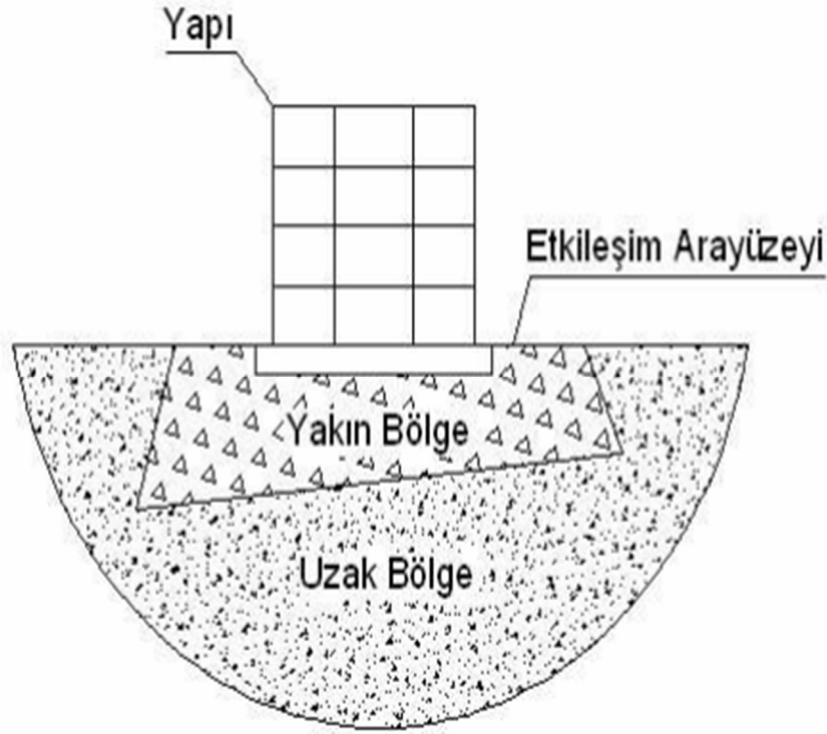
### **2.3.Çözüm Metotları**

Yapı, kazık ve zemin sisteminin analizi için sonlu elemanlar yöntemi ve doğrusal olmayan p-y eğrisine bağlı Winkler temeline oturan kiriş yöntemi olarak iki yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemler, kazıklı temellerin gerek statik gerekse dinamik yanal yüklere karşı tasarım ve analizinde yüksek kullanım potansiyeline sahip modellerdir (Balendra, 2005).

Yapı-kazık-zemin etkileşimi konusunda araştırmacıların karşısındaki en önemli problem, birbirinden bağımsız değişkenlerin sayısındaki çokluktur. Bu nedenle eldeki problemin çözümü için bazı özel kabullerin yapılması gerekmektedir. Bu alanda özellikle yapısal davranış üzerinde çalışan araştırmacılar, problemlerdeki bu belirsizliklerin azaltılması ve işlem kolaylığı amacıyla zemini ve kazıkları Winkler kirişi modeline göre yaylar ve sönüm elemanları ile temsil etmişlerdir (Taştan ve Özgür, 2023). Winkler temeline oturan kiriş yöntemi basite indirgenmiş bir yöntemdir ve bilgisayar kapasitesi anlamında ekonomiktir. Sonlu elemanlar yöntemi ise etkin bir yapı-kazık-zemin etkileşimi modeli için bellek kapasitesi ve hızı yüksek bilgisayarlara ihtiyaç duyulması açısından pratikte uygulamaya geçirilmesi zor ve zahmetli bir yöntem olarak görülmekteydi. Fakat gelişen teknoloji ile sonlu elemanlar yöntemi kullanımı gün geçtikçe artış göstermektedir. Bu aynı zamanda analizlerde zaman tasarrufu sağlamaktadır. 1950’li yıllarda ilk olarak uçak gövdelerinde oluşan gerilmelerin incelenmesi amacıyla kullanılan sonlu elemanlar yöntemi ilerleyen yıllarda birçok mühendislik alanında farklı problemlerin çözümü için kullanılmaya başlanmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ile kullanılan birçok malzeme modeli ve yenilme kriteri sayesinde günümüzde zeminin ve yapının doğrusal olmayan davranışlarının modellenmesi mümkün olmaktadır. Sonlu Elemanlar Metodu, zemin ortamının doğrusal olmama durumunu ve kazık-zemin arayüzündeki ayrımı dikkate alarak, zaman alanındaki tek kazık ve kazık gruplarının tepki analizini incelemek için uygun bir araçtır (Balendra, 2005).

### 2.3.1.Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi, herhangi bir sürekli ortam için sınır değer problemlerinin analizinde faydalı çözüm aracı olmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi gelişen bilgisayar yazılımları ile birçok problemin çözümünde kolaylık sağlamaktadır. Özellikle katmanlı zemin ortamındaki kazıklar gibi karmaşık geometriler için plastisite alanında, analitik veya yarı analitik formülasyonlar aracılığıyla doğrusal olmayan çözümlenmesi zor olan analizler sonlu elemanlar yöntemi ile çok daha kolay bir şekilde çözülebilir olmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi ile yapı-kazık-zemin sisteminin dinamik analizi çeşitli unsurların (örn., sınır koşulları, yük uygulaması, vb.) genel olarak ele alınmasıyla gerçekleştirilmektedir (Balendra, 2005).



Şekil 2.6. Dinamik sınırsız ortam ve yapı etkileşimi modeli (Mamuk, 2010)

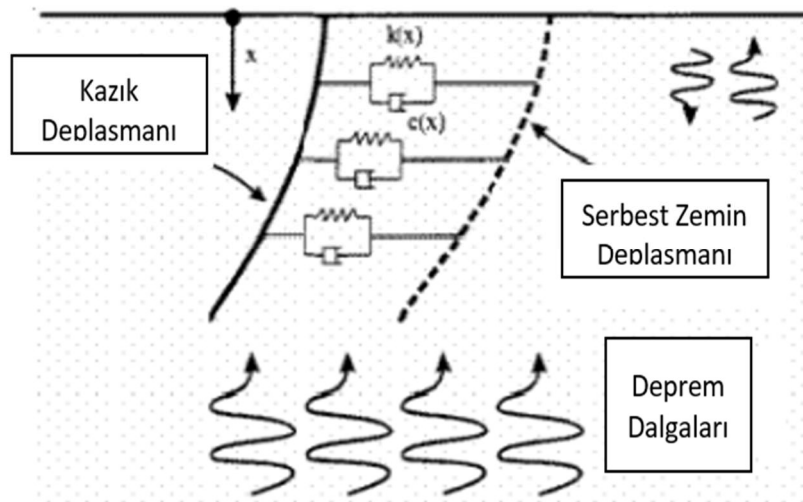
Geçmişte sonlu elemanlar yöntemi ile analizler sadece yakın bölgeler dikkate alınarak gerçekleştirilmekteydi (Şekil 2.6). Statik problemleri çözme aşamasında iyi bir yaklaşım olarak görülen bu yöntem dinamik çözümlerde ihmal edilen yapay sınırlardan yansıyan sismik dalgalar sonuçların hatalı çıkmasına sebep olmaktaydı (Karabörk, 2009). Statik

analizlerde, ilgilenilen bölgeden belirli bir uzaklıkta sabit sınır koşulları uygulanabilmektedir. Ancak dinamik problemlerde, bu tür sınır koşullarında dışı doğru yayılan dalgalar modele geri yansıyabilmektedir (Balendra, 2005). Bu anlamda viskoz sınır, geçişli sınır, karma modeller, sınır eleman, sınır koşulları çözümü, ölçekli sınır koşulları ve sonsuz elemanlar modeli gibi pek çok yapay sınır modeli geliştirilmiştir (Karabörk, 2009).

Sınır özellikleri tanıtılmaya çalışılırken en önemli amaç iletilen deprem dalgalarının sınırlardan yansıyıp tekrar problemin ele alındığı bölgeye dönmesini önlemektir. Bu sorun sonlu-sonsuz eleman modelleriyle aşılabilmektedir. Daha büyük bir model bu sorunu en aza indirebilmektedir çünkü malzeme sönümlenmesi sonlu sınırlardan yansıyan dalgadaki enerjinin çoğunu emmektedir. Bununla birlikte, model boyutundaki artış, hesaplama süresinde istenmeyen bir artışa sebep olacaktır. Bu anlamda bu sınırlar önem kazanmaktadır (Balendra, 2005).

### 2.3.2. Winkler Temeline Oturan Kiriş Yöntemi

Winkler temeline oturan kiriş yöntemi, zemin-kazık etkileşimi analizinde kullanılan bir modelleme yöntemidir. Bu yöntem, kazık temelinin zemin ile etkileşimini anlamak ve bu etkileşimin dinamik koşullar altında nasıl değiştiğini incelemek amacıyla geliştirilmiştir (Santos,2003).



Şekil 2.7. Kinematik zemin- kazık etkileşimi için analitik model (Santos,2003)

Genellikle kirişlerin zemine oturduğu noktalarda yaylar kullanılmaktadır. Dinamik Winkler temeline oturan kiriş yöntemi, kazıklı derin temellerin aksenel yönde sismik yükler etkisindeki eylemsizlik ve kinematik etkilerini analiz etmek için kullanılmaktadır. Winkler temeline oturan kiriş yöntemi genellikle kinematik etkileşim analizlerinde uygulanmaktadır ve derin temelli sistemde bulunan kazıklarda meydana gelecek yer değiştirmeyi nonlineer şekilde elde etmektedir. Bu yöntem Şekil 2.7'de gösterilmektedir. Derin temel sistemindeki kazıklar şekilde görüldüğü gibi eşit uzunluğa sahip kirişlerle gösterilmektedir. Burada dinamik etki ile kazık-zemin etkileşimi yay (k) ve sönüm (c) ögeleri kullanılarak incelenmektedir (Santos,2003).

#### **2.4. Kazıklar**

Üstyapı, temel ile zemin ortamına yük ileterek zemin ortamında gerilme ve deformasyonlar meydana getirmektedir. Elde edilen deformasyon ve gerilme değerleri belli sınırlar içinde kalmalıdır. Bu sınırlar içinde kalmaması durumunda ise derin temel çözümüne gidilmektedir. Kazıklı temeller, derin temel yöntemlerinden biridir. Kazıklar sayesinde tabakalı ya da zayıf zeminlerde, durumlarında üstyapıdan gelen yüklerin daha derindeki sağlam zemine aktarılması sağlanmaktadır. Kazıkların kullanılması, genellikle mühendislik değerlendirmeleri, zemin etütleri ve yapı tasarımı süreçleri içinde belirlenmektedir. Uygun kazık tipi seçimi; zemin koşullarına, yerel iklim koşullarına ve yapının özelliklerine bağlı olarak yapılmaktadır. Böylece kazıklar, yapıların daha güvenli ve dayanıklı olmasına katkı sağlamaktadır (Altun, 2010).

Taşıyıcı kazıklar, inşaat mühendisliğinde uzun bir geçmişe sahiptir ve inşaat mühendisliği için ilk sanat ve bilim örneği olarak bilinmektedir. Mühendislik bilimi ve deneyimlerin birleşimiyle geliştirilen bir yöntemdir. Bu sayede yapılar, zemin koşullarına ve çevresel etmenlere bağlı olarak daha güvenli ve dayanıklı hale getirilebilmektedir. Britanya'da Roma dönemine ait ahşap kazıklar bulunmaktadır. Bu kazıklar, o dönemin inşaat teknikleri ve mühendislik uygulamaları hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır. Roma İmparatorluğu'nun Britanya'da gerçekleştirdiği altyapı projelerinin başarılı bir şekilde tamamlandığını ve bu projelerin kalıcı etkiler bıraktığını göstermektedir. Benzer şekilde Venedik'te de yapılaşma aşamasında bu tür yapılara başvurulduğu bilinmektedir. Bu sayede Venedik'in yüzen şehir yapısı, tarih boyunca şehre benzersiz bir karakter kazandırmakla beraber şehrin ekonomik, kültürel ve stratejik açıdan önemli bir rol

oynamasına olanak tanımıştır. Kazık seçimi; mühendislik değerlendirmeleri, zemin koşulları, yapı gereksinimleri ve yerel faktörlere bağlı olarak yapılmaktadır. İlk kazıklar genellikle ahşap malzemeden imal edilmiştir. Ahşap, o dönemdeki inşaat uygulamaları için uygun bir seçenektir çünkü hafif, dayanıklı ve işlenebilir bir malzemedir. Modern inşaat uygulamalarında, mühendisler genellikle yerel zemin koşullarına en uygun ve ekonomik çözümü belirlemek için farklı malzeme seçeneklerini dikkate almaktadır. Zamanla inşaat teknolojisi ve malzeme bilimi ilerledikçe çelik, beton ve diğer modern malzemeler ahşap kazıkların yerini almıştır. Bu malzemeler, daha yüksek taşıma kapasitesine sahiptir ve çeşitli zemin koşullarına daha iyi uyum sağlamaktadır. Ancak, ahşap kazıkların tarihsel ve geleneksel bir önemi vardır ve belirli uygulamalarda hala kullanılmaktadır (Boran, 2001).

#### **2.4.1. Kazıklarda Yük Aktarım Mekanizması**

Kazığın uç kısmının sağlam zeminde bulunup bulunmamasına göre iki farklı kazık türü vardır. Bunlar; uç kazığı ve yüzer (sürtünme) kazıktır. İki tür kazık arasındaki temel fark, kazığın uç kısmının zemindeki sağlamlığı ve sıkışabilirliğidir.

**Uç Kazığı:** Bu tür kazıklar, genellikle zeminin sıkışabilir olmayan sağlam bir tabakasına kadar inmektedir. Kazığın ucu, zemindeki sağlam tabakaya dayanır ve taşıma kapasitesini genellikle bu sağlam zemin tabakasına olan yüksek mukavemetinden almaktadır.

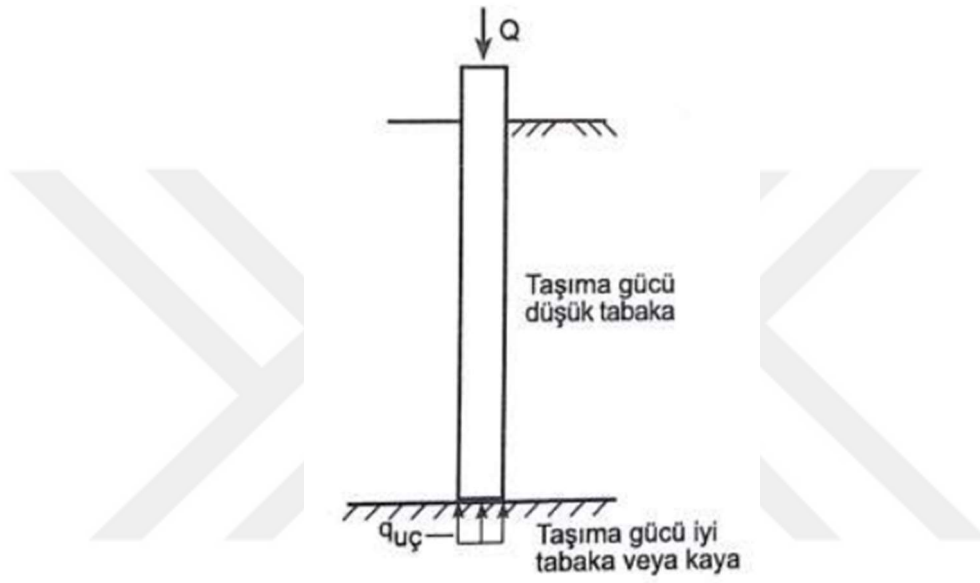
**Yüzer Kazık veya Sürtünme Kazığı:** Bu tür kazıklar, zeminin içine gömülüdür ve genellikle sıkışabilir veya az mukavemetli zeminlerde bulunmaktadır. Yüzer kazıkların taşıma kapasitesi, kazığın yüzey alanı ile zemin arasındaki sürtünme kuvvetine dayanmaktadır. Yani, kazığın yüzeyiyle zemin arasındaki sürtünme, taşıma kapasitesini belirlemektedir.

Bu kazık türleri genellikle inşaat projelerinde temel sistemlerinin bir parçası olarak kullanılmaktadır. Projede karşılaşılan zemin koşulları ve tasarım gereksinimleri, hangi tip kazıkların kullanılacağını belirlemede önemli rol oynamaktadır (Birand, 2007).

##### **2.4.1.1. Uç Kazıkları**

Sahada gerçekleştirilen zemin araştırmaları sonucunda yeterli derinlikte ve sağlam bir zemin tabakası bulunmakta ise, genellikle bu sağlam zeminin temel taşıyıcı elemanlar

için kullanılması tercih edilmektedir. Kazıkların bu sağlam zemine uzatılması, daha iyi taşıma kapasitesi sağlamaktadır ve genellikle daha güvenli bir temel sistemine olanak tanımaktadır. Uç kazıklarının taşıma kapasitesi, uçlarındaki basınçlara dayanmaktadır. Uç alanındaki basınç, zemin tabakasında kazığın ne kadar derinleştiğine ve kazığın ucuyla zemin arasındaki temas alanına bağlı olarak değişmektedir. Daha büyük bir uç alanı, genellikle daha yüksek taşıma kapasitesine yol açmaktadır (Birand, 2007).



Şekil 2.8. Uç kazığı (Kabaca ve Vural, 2018)

#### Uç Taşıma Kapasitesi

Uç kazıkları, sağlam ve sıkışabilir olmayan bir zemin tabakasına oturacak şekilde tasarlanmaktadır. Bu, üstyapıdan gelen yüklerin düşey yönde sağlam bir zemin tabakasına iletilmesini sağlamaktadır. İyi bir zemin tabakası, kazıkların taşıma kapasitesini artırarak yapıya dayanıklılık sağlamaktadır. Üstyapıdaki yükler, kazıkların uçları aracılığıyla sağlam zemin tabakasına iletiildiği için, kazıklar genellikle bu sağlam zemin tabakasına kadar uzatılmaktadır. Bu durumda, kazıkların taşıma kapasitesi, uç kazığının ucu ile zemin arasındaki temas alanındaki basınçlara dayanmaktadır. Kazıkların kesit direnci, genellikle kazık malzemesinin basınç mukavemetinden kaynaklanır. Bu nedenle, sağlam zemin tabakasının taşıma gücü, kazığın kesit direnci ile ilişkili olmaktadır. Bu tasarım,

yapıya gelen yüklerin güvenli bir şekilde zemine aktarılmasını sağlamak ve yapıya dayanıklılık kazandırmaktadır (Orhan, 2019).

Kazık ucundaki birim alandaki nihai taşıma direnci Terzaghi metodu ile Eşitlik (2.1) ve Eşitlik (2.2)'deki gibi ifade edilmektedir (Orhan, 2019).

$$q_u = q_p = c * N_c^* + q' * N_q^* + \gamma * D * N_\gamma^* \quad (2.1)$$

$$Q_p = A_p q_p \Rightarrow A_p (c * N_c^* + q' * N_q^*) \quad (2.2)$$

$q_p$  : Birim alandaki uç direnci

$N_c^*, N_q^*, N_\gamma^*$  : Taşıma gücü faktörleri

$D$  : Kazık çapı

$Q_p$  : Kazık uç taşıma kapasitesi

$c$  : Kazık uç bölgesindeki kohezyon

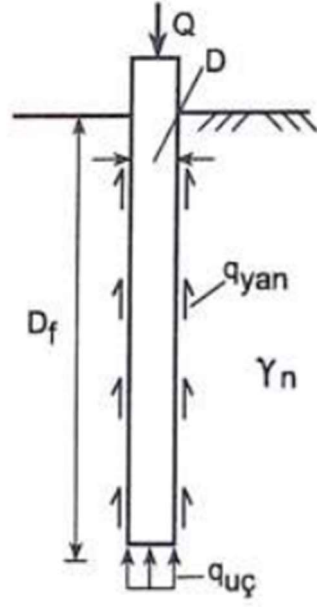
$A_p$  : Kazık ucundaki enkesit alanı

$\gamma$  : Zemin birim hacim ağırlığı

$q'$  : Kazık ucundaki efektif düşey gerilme

#### 2.4.1.2. Sürtünme Kazıkları

Uygun derinlikte sağlam bir zemin tabakası bulunmuyorsa uç kazık kullanmak mantıklı bir yöntem olmamaktadır. Bu durumda, sürtünme kazığı tercih edilmektedir (Şekil 2.9). Kazığın yük taşıma kapasitesi, kazığın gömülü olduğu zemin ile kazığın yan yüzeyi arasındaki sürtünmeye dayanmaktadır. Sürtünme kazıkları tasarımı, zeminin özelliklerine, yerel koşullara ve projenin gereksinimlerine bağlı olarak yapılmaktadır. Çok daha uzun tasarlanan sürtünme kazıkları zeminin üst kısımlarındaki zayıf tabakaları geçerek daha sağlam bir tabakaya ulaşabilmektedirler. Bu, yapıya daha iyi taşıma kapasitesi sağlamaktadır.



Şekil 2.9. Sürtünme kazığı (Kabaca ve Vural, 2018)

Sürtünme kazıklarının uzunlukları, bir dizi faktöre bağlı olarak belirlenmektedir. Bu faktörler arasında zeminin kayma dayanımı, etkiyen yük, kazığın boyutları ve yerel zemin koşulları bulunmaktadır. Sürtünme kazıkları, zeminle olan sürtünmelerine dayandıkları için, kazığın uzunluğu genellikle zeminin mukavemet özellikleriyle ilişkili olmaktadır. Çekme kazıkları, hidrostatik basınçtan kaynaklanan yükselmeye direnmek veya büyük zemin yüklerini desteklemek gibi özel durumlar için tasarlanmıştır. Ayrıca bu kazıklar, çekme kuvvetlerine karşı direnç sağlamaktadır. Yüksek gerilimli kuleler, rüzgâr ve buz yükleri gibi durumlarda çekme etkilerini karşılamak için çekme kazıkları veya ankrajlar kullanılabilir. Çekme etkisinin karşılanması için kazıkların yerleştirilmesi, genellikle zeminin yeterli taşıma kapasitesine sahip olduğu bir derinliğe kadar yapılmaktadır. Bu, kazığın zemine gömülme derinliğini ve uzunluğunu belirlemektedir. Bu tür özel durumlar, yapı mühendisliği ve geoteknik mühendislik projelerinde dikkate alınan özel tasarım gereksinimlerini içermektedir (Birand, 2007).

#### Kazık Çevre Sürtünme Direnci

Kohezyonsuz zeminler ile kazık arasında fiziksel anlamda sürtünme gerçekleşmektedir. Kohezyonlu zeminlerde ise adezyon sebebiyle çevre sürtünmesi direnci

gerçekleşmektedir. Kazığın çevre sürtünmesi ise kazığın yüzey alanı boyunca Eşitlik (2.3)'teki gibi hesaplanmaktadır (Orhan, 2019).

$$Q_s = \Sigma p * \Delta L * f \quad (2.3)$$

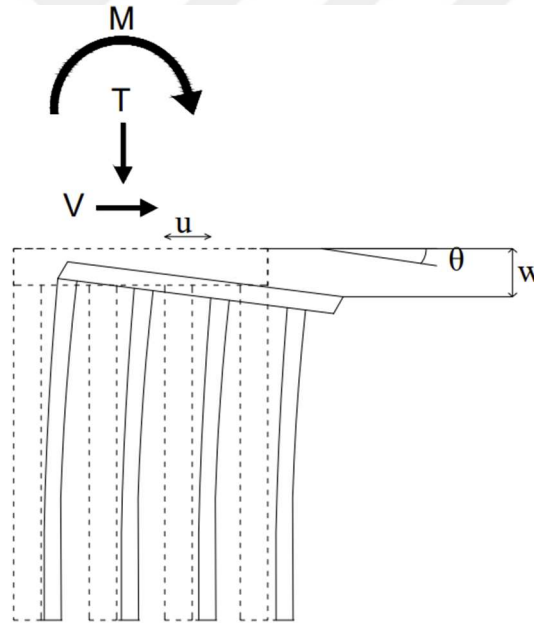
$p$  : Kazık enkesitinin çevresi

$\Delta L$  : Birim kazık boyu artışı ( $p$  ve  $f$  değerlerinin sabit olduğu)

$f$  : Herhangi bir derinlikteki ( $z$ ) sürtünme direnci

Kazık çevre sürtünmesi kazık içindeki her zemin tabakası için ayrı ayrı hesaplanıp toplanması ile gerçekleşmektedir.

#### 2.4.2. Kazıklarda Grup Etkisi ve Grup Taşıma Gücü



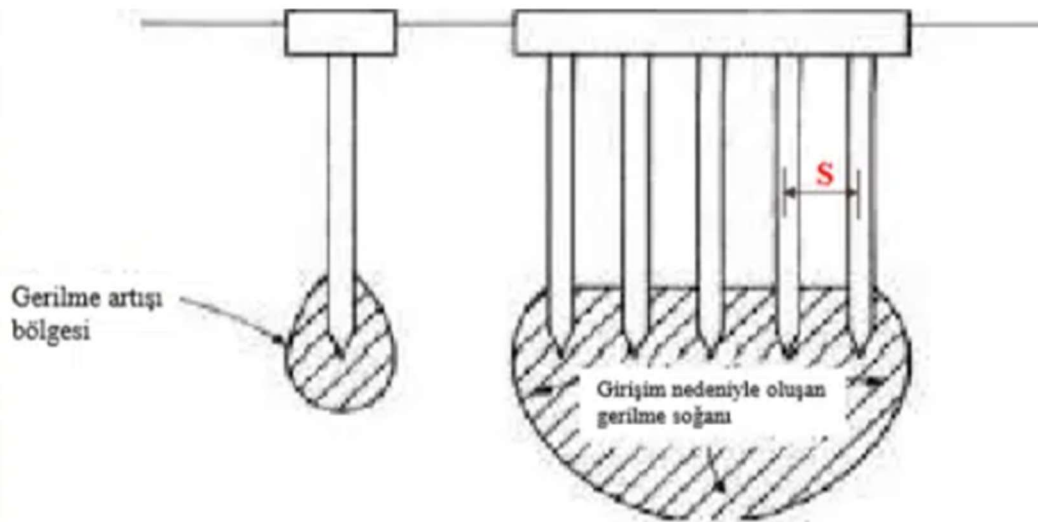
Şekil 2.10. Rijit başlıklı kazık grubunun düşey, yatay ve moment yüklerine maruz kalan eksenel-yanal deplasmanı

Grup halinde modellenen kazıklar, genellikle üst yapıdan gelen yükleri sağlam zemine iletme amacıyla kullanılmaktadır. Kazık grupları, genellikle birbirine paralel sıralar halinde düzenlenerek, radye temelin altına yerleştirilmektedir. Bu tasarım, özellikle zayıf zemin koşullarında, bina yükünü daha homojen bir şekilde zemine iletme için

kullanılmaktadır. Amaç, binanın stabilitesini ve dayanıklılığını artırabilmektedir. Ancak, her proje özeldir ve zemin koşulları, yükleme durumları, bina geometrisi ve diğer faktörler dikkate alınarak uygun tasarım yapılması gerekmektedir.

Radye temel üzerine Şekil 2.10'da görüldüğü üzere hem aksel hem de yanal harmonik yükler uygulandığında, kazık grubu bu yükler etkisi ile zorlanmaktadır. Burada; V, T ve M üzerine uygulanan dikey yükü, yatay yükü ve momenti temsil etmektedir. Kazık grubu için  $w$ ,  $u$  ve  $\theta$ , sırasıyla başlığın dikey yer değiştirmesini, yatay yer değiştirmesini ve dönme açısını ifade etmektedir.

Kazık gruplarının taşıma gücünün belirlenmesi karmaşık bir problemdir. Bu taşıma gücü, kazık grubundaki kazıkları bütün olarak ele alıp hesaplanmaktadır. Kazık grubunda kazık başlarında yapılacak yanal yükleme ile kazıkların zemine iletecekleri gerilmeler grup içerisinde kazıkların etki alanları birbiriyle kesişebilmektedir. Özellikle baş taraftaki kazıklar (hareketin tersi yönündeki sırada bulunan kazıklar) ciddi zorlanmalara maruz kaldığı bilinmektedir. Bu durum da kazıklardaki yük taşıma kapasitelerinin azalmasına neden olmaktadır. Grup kazıklarının taşıma kapasitesi, gruptaki kazıkların tek tek elde edilen taşıma kapasiteleri toplamından daha az olmaması beklendiği için Şekil 2.11'de görülen gerilme soğanlarının birbiri ile kesişmeyecek şekilde kazıklar tasarlanması gerekmektedir (Sarıkamış, 2022).



Şekil 2.11. Tekil ve grup kazıklarda gerilme soğanı (Sarıkamış, 2022)

Grup kazıklarının yük taşıma kapasitesi Eşitlik (2.4)'teki gibi hesaplanmaktadır (Orhan, 2019).

$$n = \frac{Q_{g-u}}{\sum Q_u} \quad (2.4)$$

$n$  : Grup etkisi

$Q_{g-u}$  : Grup kazıklarının nihai yük taşıma kapasitesi

$Q_u$  : Grup içindeki kazıkların, grup etkisi olmadan tek tek nihai yük taşıma kapasitesi

Kazıklar arasındaki gerilme etkileşim alanları için pek çok çalışma yapılmıştır. Birçok mühendis tarafından grup etkisi altındaki kazıkların sürtünme kazıkları şeklinde etkileri için amprik ve yarı amprik formüller üretilmiştir.

Bu etki aşağıda verilen iki şekilde;

1- ( $L_g * B_g * L$ ) boyutlarında blok kazıkları,

2- Bireysel kazıklar,

Olarak incelenebilmektedir.

Sürtünme kapasitesi altında nihai yük taşıma kapasitesi hesabı blok kazıkları için Eşitlik (2.5)'te gösterilmiştir.

$$Q_{g-u} \approx f_{av} * p_g * L \quad (2.5)$$

$p_g$  : Grup kesitinin çevresi

$f_{av}$  : Ortalama birim sürtünme direnci

Bireysel kazıklarda sürtünme kapasitesi Eşitlik (2.6)'ya göre aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$Q_u \approx p * L * f_{av} \quad (2.6)$$

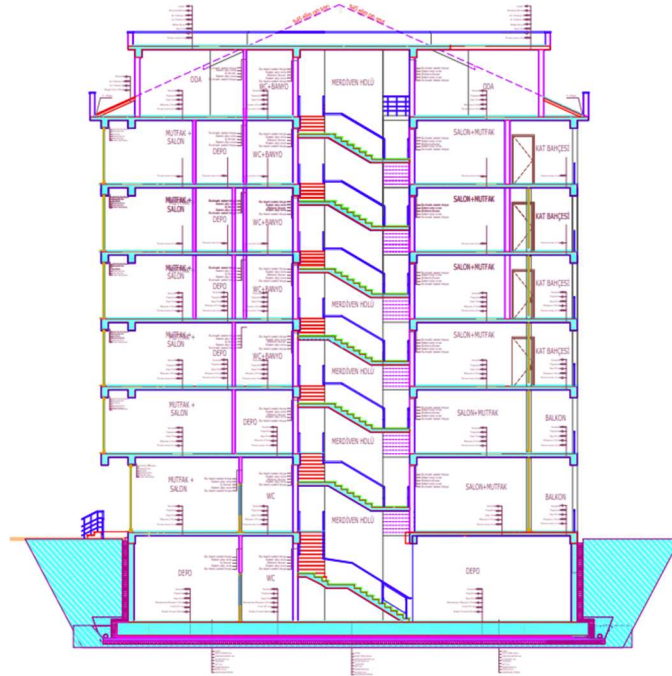
### 3.SAYISAL ÖRNEK

#### 3.1. Arazi Zemin Modeli ve Yapı Hakkında Bilgiler

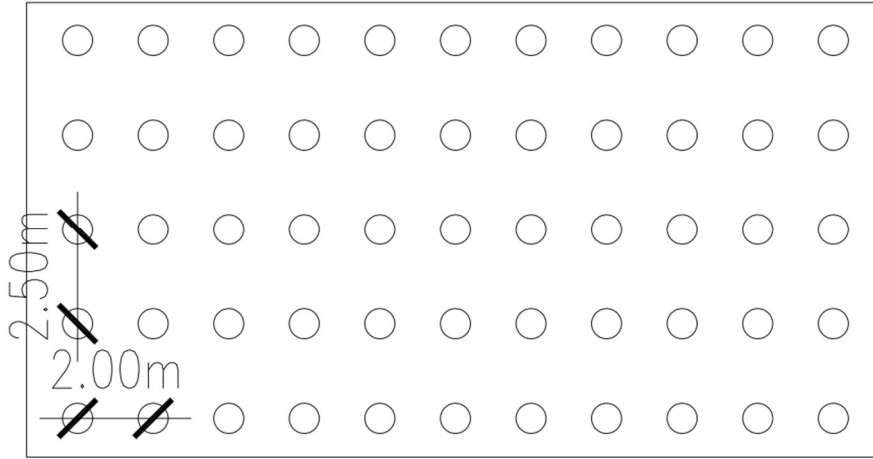
##### 3.1.1.İnşaat Sahası ve Yapı Hakkında Bilgiler

Ülkemizde fay hatlarının yoğunlaştığı ve aynı zamanda çoğunlukla alüvyon zemine sahip Marmara Bölgesi için gerçekleştirilecek olası depremler ile insanlar üzerinde sosyal, ekonomik ve psikolojik olarak büyük etkiler ile karşılaşılacağı düşünülmektedir. Bu tez çalışmasında Marmara Bölgesi sınırları içerisinde kazıklı temele sahip bir yapı incelendi. Bu gibi zayıf zeminlere inşa edilen yapılar için yapı-kazık-zemin etkileşimi hesabı önemli bir konudur.

Marmara Bölgesi'nde yapılacak bodrum kat, zemin kat, 5 normal kat ve çatı katı olacak şekilde betonarme taşıyıcı sistemi olarak modellendi (Şekil 3.1). Yapı konut olarak kullanılacak olup temel alanı temel alanı 22 metre ve 12,25 metre boyutlarındadır. Yapı radye temel yüksekliği 50 santimetre olarak belirlendi. Kazıklı temel için kazıklar Şekil 3.2'deki gibi uzun kenarda 2,0 metre kısa kenarda 2,5 metre aralıklarla yerleştirildi.



Şekil 3.1. Yapı kesiti



Şekil 3.2. Kazık yerleşim planı

### 3.1.2.Zemin Araştırmaları

Tablo 3.1. Sondaj kuyusu 2 standart penetrasyon testi

Sondaj Derinliği (m)	Kuyu İçi Deneyler	Örnek Derinliği (m)	Standart Penetrasyon Testi (SPT)			
			Darbe Sayısı			
			0 - 15	15 - 30	30 - 45	N
21	21,00 - 21,45	SPT-14	7	10	13	23
22,5	22,50 - 22,95	SPT-15	10	13	16	29
24	24,00 - 24,45	SPT-16	17	16	21	37

Tablo 3.2. Dinamik parametreler

HIZLAR	SEMBOL	BİRİMİ	1.TABAKA	2.TABAKA
P Dalgası Hızı - Düz Atış	( $V_p$ )	m/s	332	955
P Dalgası Hızı - Ters Atış	( $V_p$ )	m/s	324	940
S Dalgası Hızı - Düz Atış	( $V_p$ )	m/s	129	205
P Dalgası Hızı - Ort.	( $V_p$ )	m/s	328	948
	Tabaka Derinlikleri			
	<b>SEMBOL</b>	<b>BİRİMİ</b>	<b>1.TABAKA</b>	<b>2.TABAKA</b>
Derinlikler	(h)	m	2,83	3,11
	Elastik Parametreler			
	<b>SEMBOL</b>	<b>BİRİMİ</b>	<b>1.TABAKA</b>	<b>2.TABAKA</b>
Yoğunluk	(d)	gr/cm <sup>3</sup>	1,32	1,72
Poisson Oranı	(P)	-	0,41	0,48
Kayma Modülü	(G)	kg/cm <sup>2</sup>	220	723
Elastisite Modülü	(E)	kg/cm <sup>2</sup>	618	2133
Bulk Modülü	(K)	kg/cm <sup>2</sup>	1127	14477
Zemin Büyütmesi			2,85	

Arazide  $V_{s30}$  kayma dalgası hızını tespit etmeye yönelik olarak MASW (Yüzey Dalgasının Çok Kanallı Analizi Yöntemi) çalışması;  $V_p$ ,  $V_p'$ ,  $V_s$  hızlarını ve dinamik parametreleri tespit edebilmek için de Sismik Kırılma ölçümü yapıldı ve jeofizik veriler Tablo 3.2'de verildi. MASW çalışmasından elde edilen S-dalgası hız değerleri kullanılarak 30 m derinliğe kadar olan ortalaması  $V_{s30}=198$  m/s olarak hesaplandı. Bu hesaplama sonucunda 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne göre yerel zemin sınıfı ZD olarak belirlendi.

Arazide sondaj çalışmaları yapılarak, örselenmiş ve örselenmemiş zemin numuneleri alındı. Zeminin yapısal özelliklerini belirlemek amacıyla laboratuvar deneyleri yapıldı ve sonuçlar Tablo 3.1 ve Tablo 3.3'te verildi.

Tablo 3.3. Sondaj derinlik, koordinat (UTM) ve kesilen birimlere ait bilgiler

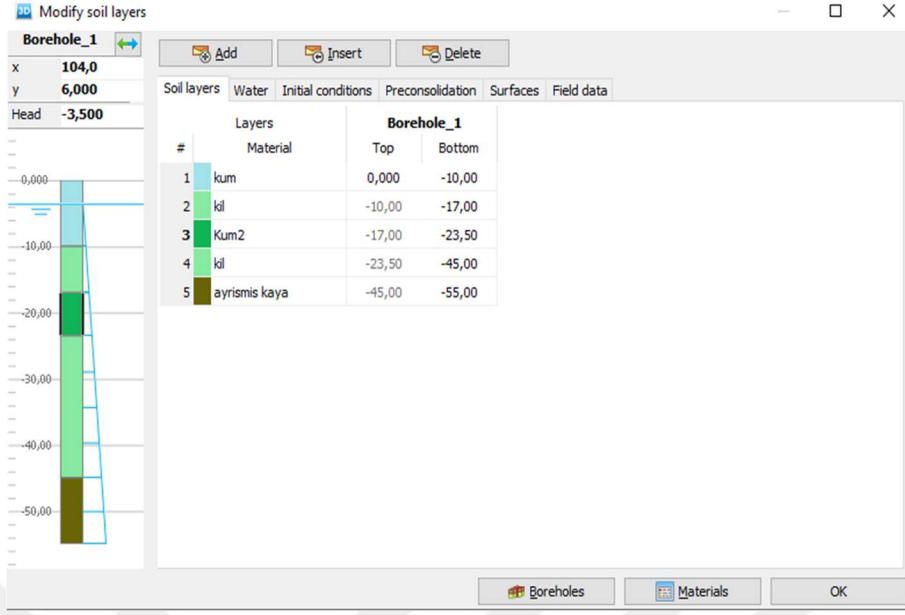
Sondaj No.	Numune No.	Derinlik (m)	Su İçeriği (%)	Birim Hacim Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	Elek Analizi				Atterberg Limitleri			Zemin Sınıfı
					Çakıl (%)	Kum (%)	Silt (%)	Kil (%)	LL (%)	PL (%)	PI (%)	
SK-1	CR	2,50-3,00	15,2	1,886	4,56	47,99	47,45		27,0	17,0	10,0	SC
SK-1	SPT	3,00-3,45	9,4		26,20	59,38	14,42		NP	NP	NP	SM
SK-1	SPT	6,00-6,45	21,1		0,00	23,19	76,81		41,0	20,0	21,0	CI
SK-1	UD	8,50-9,00	40,0	1,905	0,00	3,98	96,02		58,0	28,0	30,0	CH
SK-1	SPT	12,00-12,45	16,8		0,00	19,00	81,00		43,0	22,0	21,0	CI
SK-1	SPT	13,50-13,95	19,2		4,01	66,78	29,21		NP	NP	NP	SM
SK-1	SPT	15,00-15,45	19,4		3,02	45,79	51,19		28,0	18,0	10,0	CL
SK-1	UD	17,45-19,50	22,3	1,985	1,24	49,65	49,11		29,0	19,0	10,0	SC
SK-1	SPT	23,50-24,00	24,7	1,935	0,00	8,31	91,69		52,0	26,0	26,0	CH
SK-2	SPT	4,50-4,95			0,00	28,36	71,64		37,0	20,0	17,0	CI
SK-2	SPT	6,00-6,45	13,3	1,847	34,88	48,45	16,67		NP	NP	NP	SM
SK-2	SPT	7,50-7,95	13,7		26,50	54,55	18,95		NP	NP	NP	SM
SK-2	SPT	9,00-9,45	16,8		0,00	3,10	96,90		63,0	31,0	32,0	CH
SK-2	SPT	12,00-12,45	21,5		3,39	38,76	57,85		29,0	18,0	11,0	CL
SK-2	SPT	13,50-13,95	16,9		0,00	4,55	95,45		60,0	30,0	30,0	CH
SK-2	UD	17,50-18,00	18,4	1,930	2,55	18,99	78,46		42,0	21,0	21,0	CI
SK-2	SPT	18,00-18,45	24,2		0,86	37,64	61,50		30,0	19,0	11,0	CL
SK-2	SPT	19,50-19,95	22,0		0,00	7,80	92,20		53,0	25,0	28,0	CH
SK-2	SPT	24,00-24,45	18,1		0,00	3,48	96,52		61,0	29,0	32,0	CH
SK-3	UD	2,50-3,00	13,9	1,914	6,27	19,34	74,39		36,0	18,0	18,0	CI
SK-3	SPT	3,00-3,45	18,5		0,00	7,94	92,06		53,0	26,0	27,0	CH
SK-3	SPT	4,50-4,95	18,6		6,28	26,04	67,68		31,0	19,0	12,0	CL
SK-3	SPT	6,00-6,45	16,8	1,860	23,33	63,71	12,96		NP	NP	NP	SM
SK-3	SPT	7,50-7,95	15,5		40,62	51,09	8,29		NP	NP	NP	SW-SM
SK-3	SPT	10,50-10,95	21,9		0,00	5,29	94,71		59,0	28,0	31,0	CH
SK-3	UD	14,50-15,00	22,3	1,928	0,00	6,28	93,72		53,0	25,0	28,0	CH
SK-3	UD	17,50-18,00	24,1	1,895	1,25	49,68	49,17		29,0	19,0	10,0	SC
SK-3	CR	22,50-23,00	20,7	1,934	0,00	4,62	95,38		63,0	30,0	33,0	CH

### 3.2. Yapı-Kazık-Zemin Sisteminin Modellenmesi ve Analiz Edilmesi

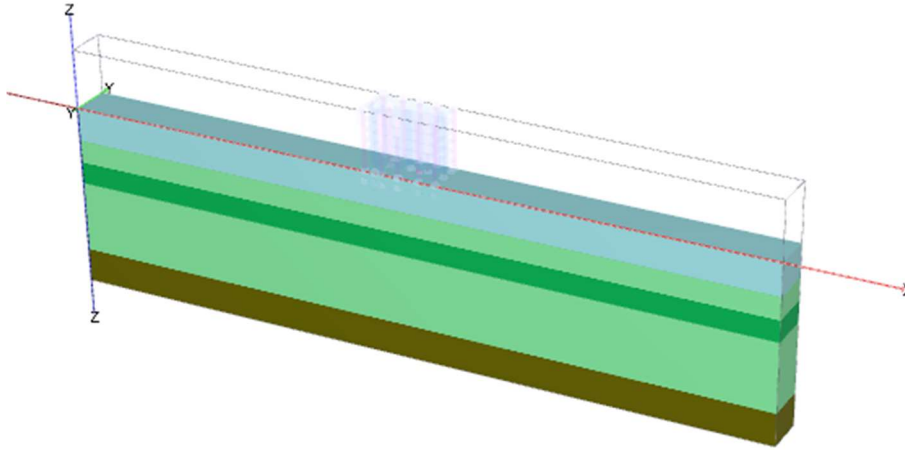
Bu tez kapsamında yapının uzun ekseninde 3 farklı deprem verisi ile analiz gerçekleştirildi. Bu analiz için modelin x ekseninin her iki tarafında temel genişliğinin 3 katı alındı. Temelin diğer boyutu 12,25m olarak sınırlandırıldı. Belirtilen karelaça aralıkları ile 80 ve 110 cm kazık çaplarına sahip iki farklı çapta kazıklar modellendi. Kazık çaplarına göre elde edilen sonuçlar karşılaştırıldı. Yapı-kazık-zemin etkileşim analizi ile birlikte Plaxis sonlu elemanlar programı kullanılarak gerçekleştirildi. Hardening Soil with Small Strain ile oluşturulan model en uygun çözüm modelini oluşturdu.

#### 3.2.1. Zeminin Modellemesi

Sondaj çalışmasına bakıldığında zemin modeli 10 metre kum, 7 metre kil, 6,5 metre kum, 21,5 metre kil ve sonrasında ana kaya birimlerinden oluşmaktadır (Şekil 3.3 ve Şekil 3.4). Yer altı su seviyesi zemin değerlerine bakılarak yüzeyden 3,5 metre derinliktedir.



Şekil 3.3. Zemin tabakaları



Şekil 3.4. Zemin modeli

### 3.2.2.Yapının Modellemesi

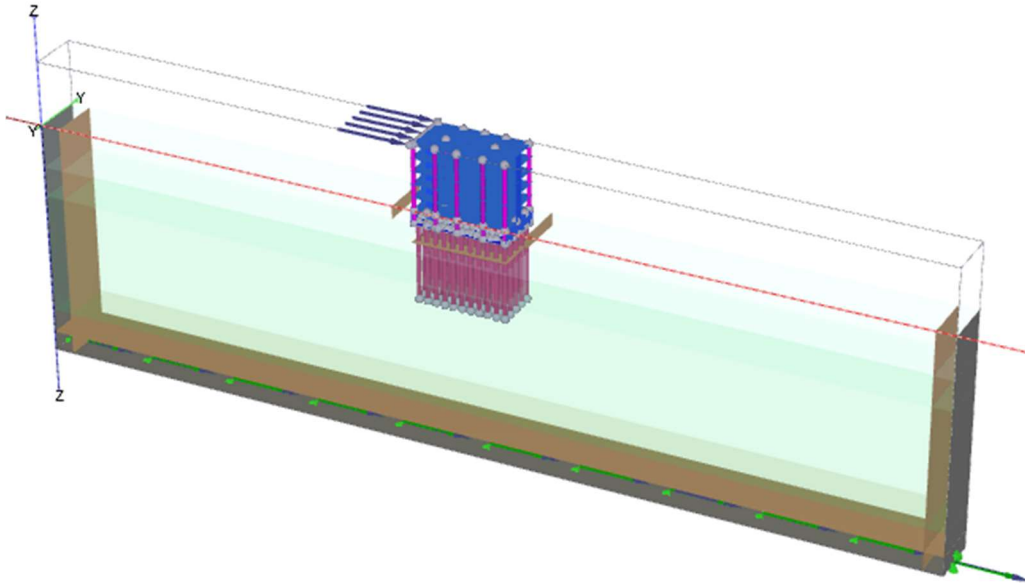
Tez kapsamında gerçekleştirilen analiz sonucunda elde edilen eylemsizlik ve kinematik etkileşimi, binanın kütlesi ve yüksekliğinden etkilenmektedir. Modelde kolonlar beam, döşemeler ve perdeler shell eleman olarak adlandırılan plate elemanlar ile lineer olarak

oluşturuldu. Döşemeler modellenirken kiriş elemanlar bu döşemeler içine dâhil edilip kalınlıkları yüksek alınarak plate eleman olarak girildi. Aynı şekilde hareketli yük tanımlanmayıp bu yük yerine malzemenin birim hacim ağırlığı artırılarak çözüm sağlandı. Bu kısımda bina geometrisi tanımlanırken yapı kütlesi ve yüksekliği eylemsizlik etkileşimi sonucu kazıklarda oluşacak gerilmeler anlamında önemli bir faktör olmaktadır. Deprem verileri için bina doğal periyodu üzerinden gidildi. Toplamda yedi katlı olarak tasarlanan yapıda kat başına 0,1 s doğal periyot gibi düşünüldü ve 0,7 s üzerinden analiz gerçekleştirildi.

Üstyapı modellendikten sonra 20 metre uzunluğunda, belirtilen karelajda kazık grubu modellendi (Şekil 3.5). Kazık grubu zemin içerisinde 7 metre kum, 7 metre kil, son 6 metre de yine kum birimi içerisinde kalacak şekilde oluşturuldu.

Bu kazık grubuna yanal sürtünme ve uç direnci tanımlanabilmesi gerekmektedir. Bu sebepten kazıklara embaded beam eleman tanımlanarak kazık modeli oluşturulmuş oldu.

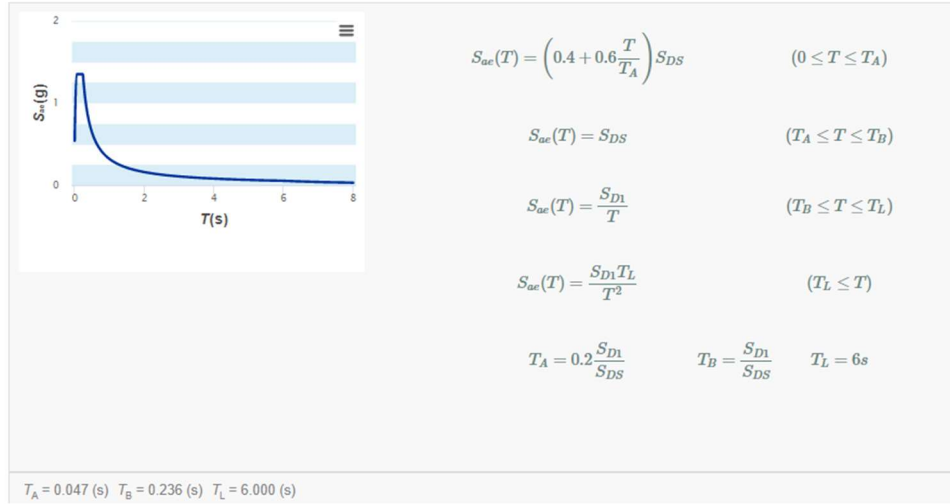
Modellenen yapı-kazık-zemin ortamında dinamik veriler ile analiz yapılabilmesi için geçirgen sınır oluşturulması gerekmektedir. Zeminin yan ve alt yüzeylerinde geçirgen sınır oluşturabilmek adına ara yüz eleman atandı (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Zeminin yan ve alt yüzeylerindeki geçirgen sınırlar

### 3.2.3. Deprem Kaydı Seçmesi ve Ölçeklendirmesi

Deprem sisteme ana kayadan verildi. Bu sebepten sebeple, DD-2 deprem yer hareketi düzeyi ve ZB zemin sınıfı için tasarım spektrumu oluşturuldu (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Yatay elastik tasarım spektrumu

Modellenen yapı-kazık-zemin sisteminin analizi için uygun deprem kayıtları Peer veri tabanından seçildi. Tablo 3.4'te verilen deprem yer hareketi kayıtları sisteme x doğrultusu boyunca verildi (Şekil 3.7-3.9-3.11). Bu deprem kayıtlarının analiz süresinin belirlenebilmesi için etkin süreleri bulundu (Şekil 3.8-3.10- 3.12).

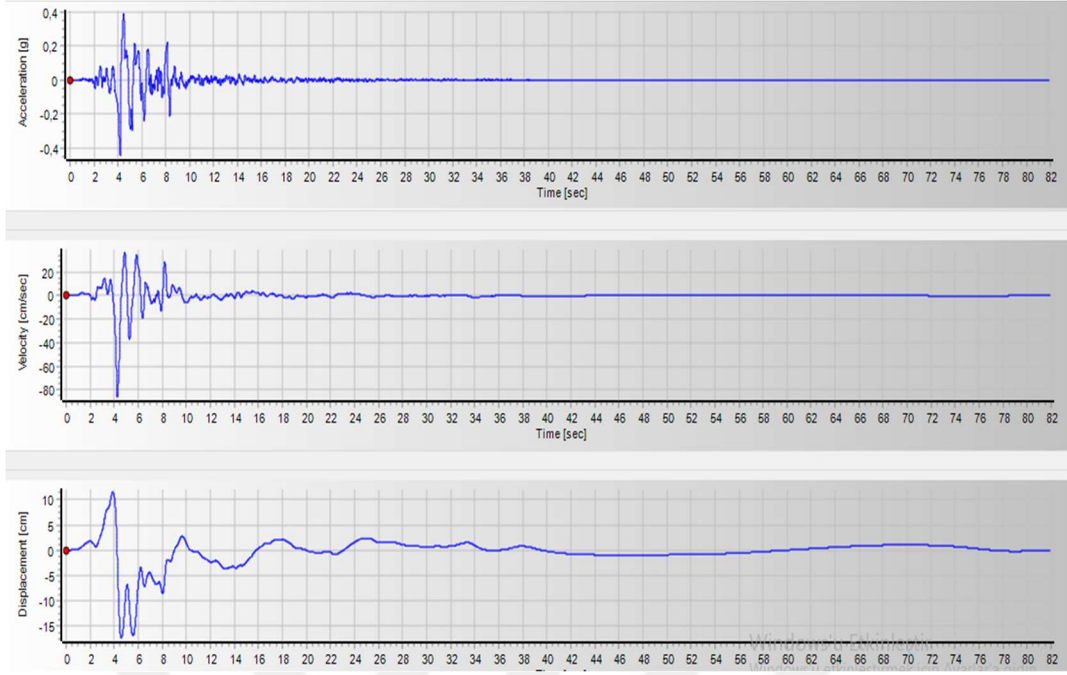
Tablo 3.4. Seçilen deprem kayıtları

Deprem Verisi	Mag	Rjb(km)	Rrup(km)
1- RSN3548_LOMAP_LEX000.AT2	6,93	3,22	5,02
2-RSN1108_KOBE_KBU000.AT2	6,9	0,9	0,92
3-RSN1161_KOCAELI_GBZ000.AT2	7,51	7,57	10,92

\*Rrup: fay kırığına en yakın mesafe

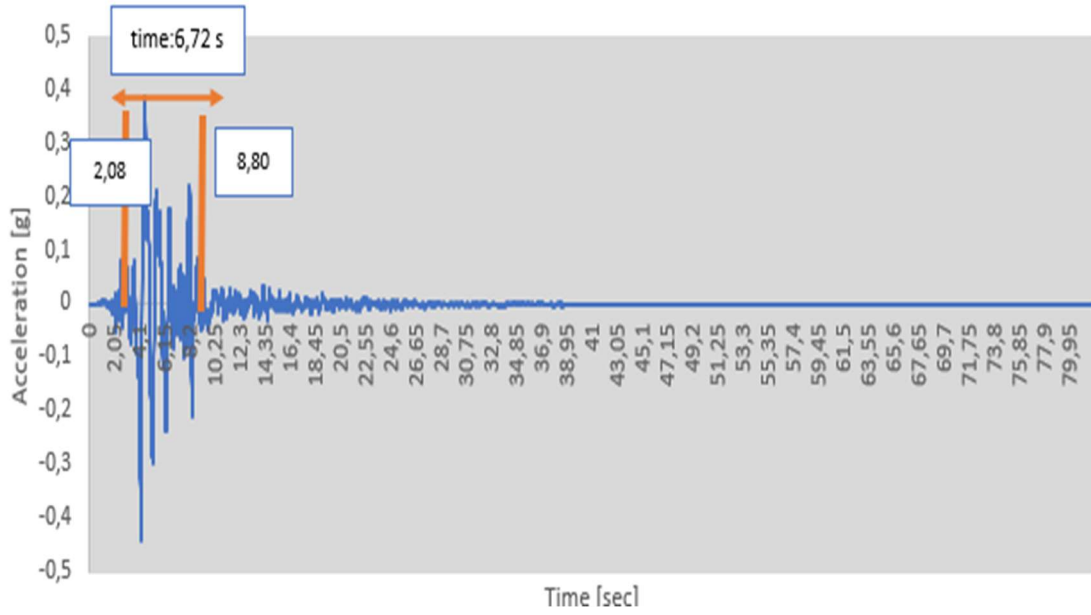
\*Rjb: Joyner-Boore mesafesi

\* Mag: moment magnitüd

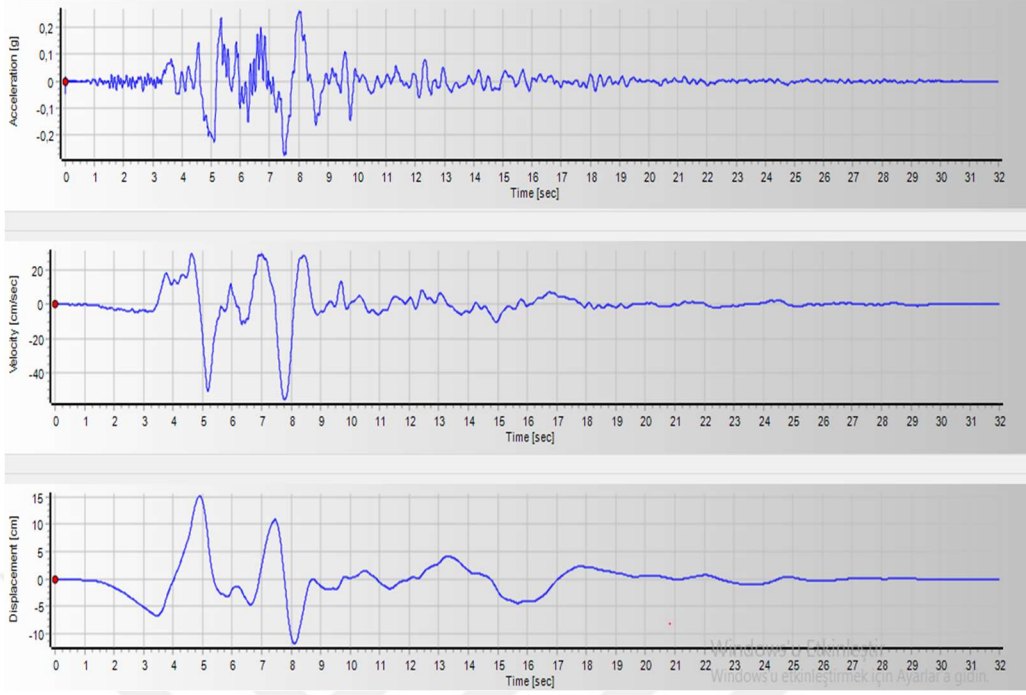


Şekil 3.7. RSN3548\_LOMAP\_LEX000.AT2 depremine ait ivme, hız ve deplasman grafikleri

Depremın etkin süresi, 2,08 ile 8,8 saniye arasındaki 6,72 saniyedir. Seçilen deprem kaydının ilk 9 saniyesi için analiz yapılmıştır.

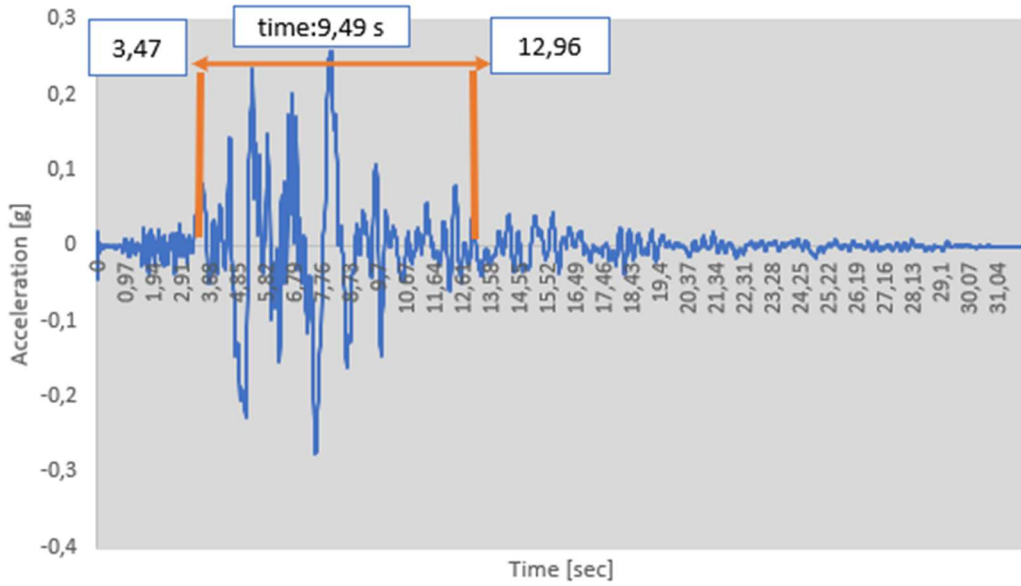


Şekil 3.8. RSN3548\_LOMAP\_LEX000.AT2 depremin etkin süresi

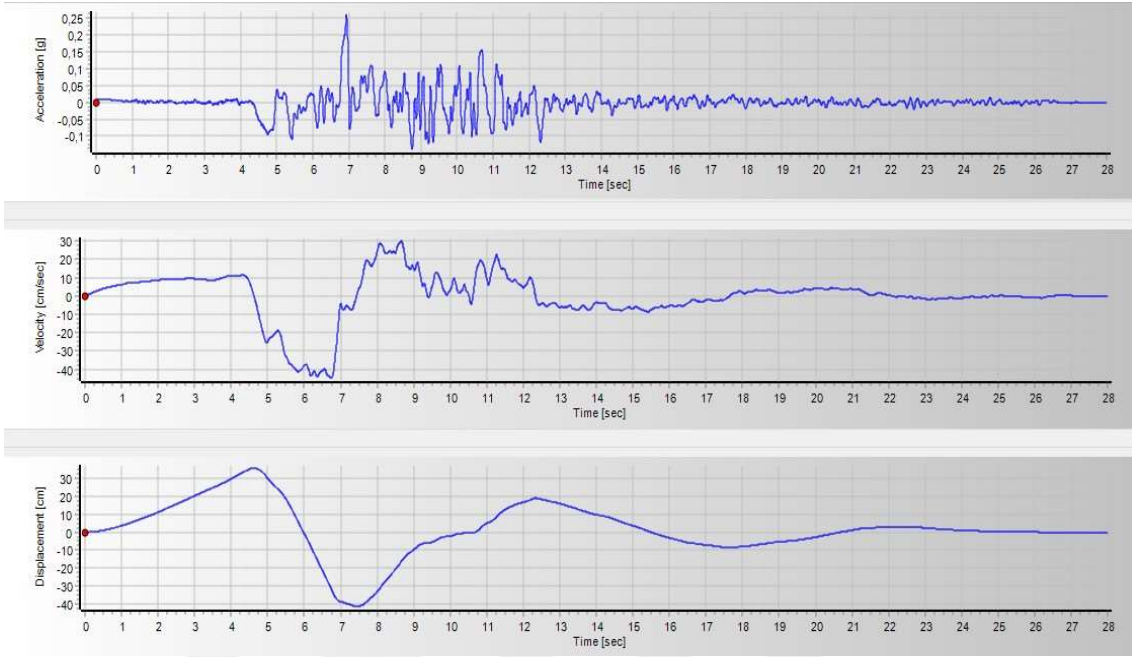


Şekil 3.9. RSN1108\_KOBE\_KBU000.AT2 depremine ait ivme, hız ve deplasman grafikleri

Deprem etkin süresi 3,47 ile 12,96 saniye arasındaki 9,49 saniyedir. Seçilen deprem kaydının ilk 13 saniyesi için analiz yapılması uygun görüldü.

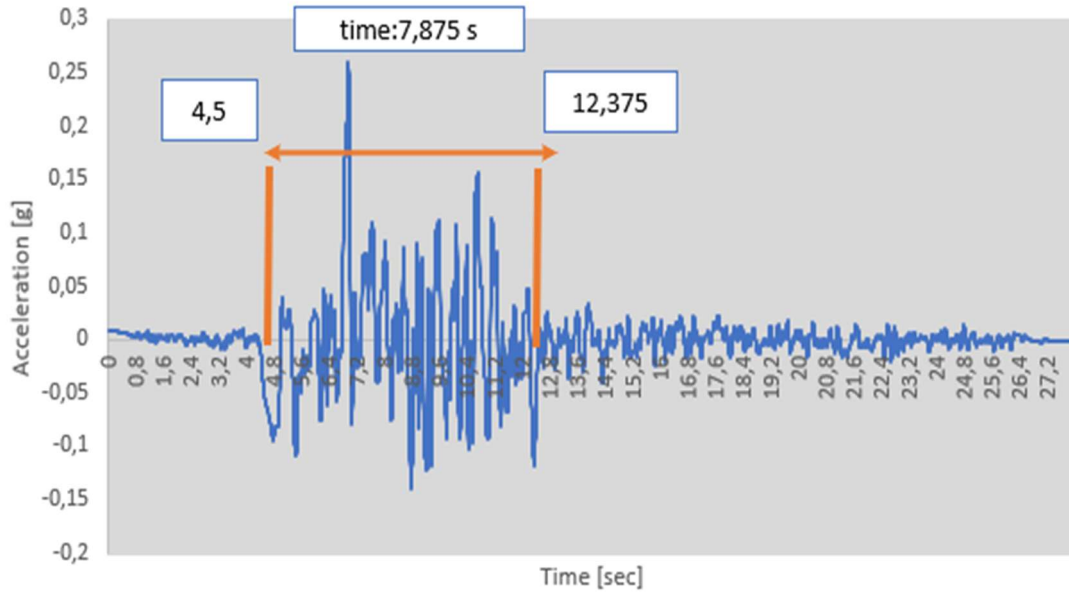


Şekil 3. 9. RSN1108\_KOBE\_KBU000.AT2 depremin etkin süresi



Şekil 3.11. RSN1161\_KOCAELI\_GBZ000.AT2 depremine ait ivme, hız ve deplasman grafikleri

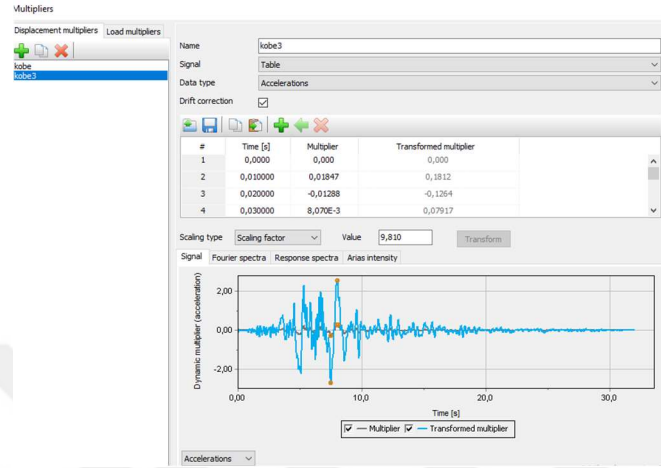
Depremin etkin süresi 4,5 ile 12,375 saniye arasındaki 7,875 saniyedir. Seçilen deprem kaydının ilk 13 saniyesi için analiz yapılması uygun görüldü.



Şekil 3. 10. RSN1161\_KOCAELI\_GBZ000.AT2 depremin etkin süresi

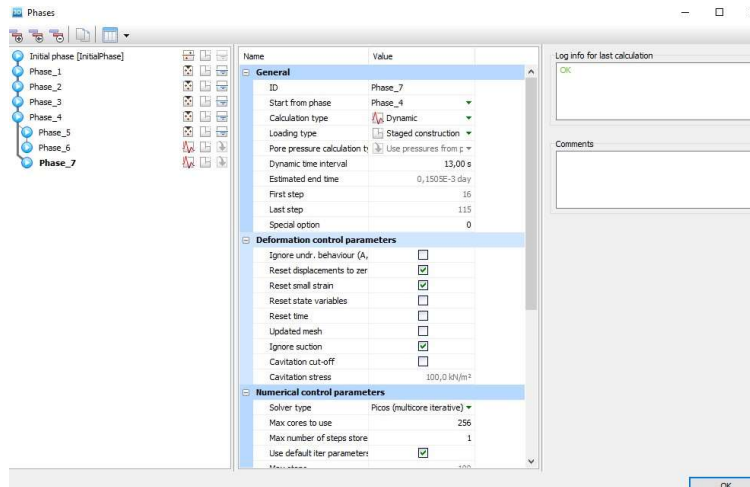
### 3.2.4. Seçilen Deprem Verisinin Analiz Programına Girilmesi

Bu deprem kayıtları dinamik analiz için Plaxis programına girilirken birim eşitlemek için yer çekimi ivmesi ( $g=9,81\text{m/s}^2$ ) ile ölçeklendirildi (Şekil 3.13).



Şekil 3. 11. Plaxis programında ölçeklendirilmiş deprem kaydı

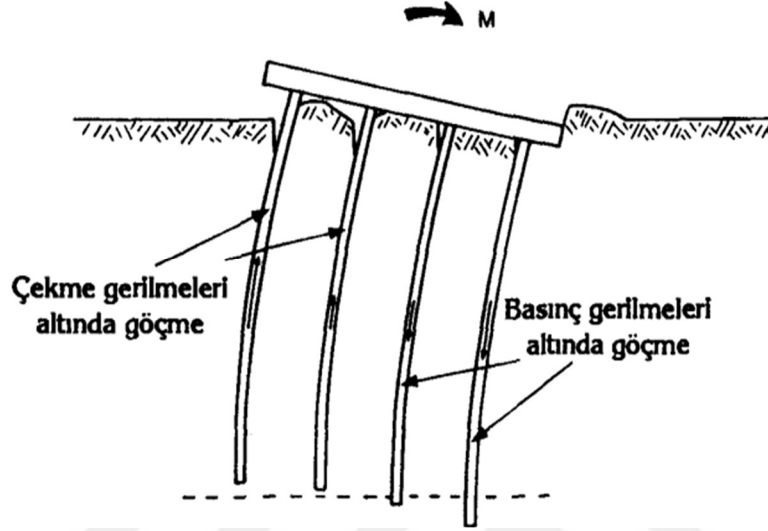
Deprem verileri sisteme sadece x doğrultusu için ana kayadan verildi ve sistemin dinamik çözümü gerçekleştirildi. Doğru sonuç alınabilmesi adına analiz yedi adımda gerçekleştirildi (Şekil 3.14). Faz 6'da yapı doğal periyodunu görebilmek için 5 saniyelik dinamik analiz yapıldı ve sonuçları 80 ve 110 cm çapına sahip kazıklar için karşılaştırıldı. Faz 7'de ise seçilen deprem kayıtları ile sistem analiz edildi ve hem kazık çaplarına hem de deprem verisine göre elde edilen sonuçlar incelendi.



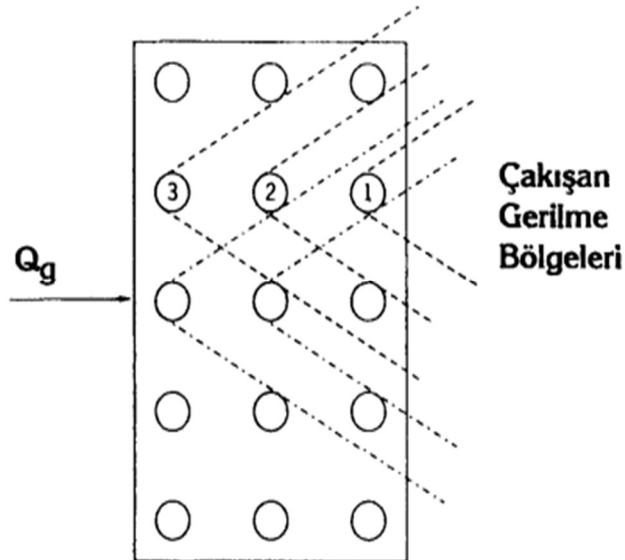
Şekil 3. 12. Analiz faz adımları

#### 4. ANALİZ ÇIKTILARI

Kazıklardaki bu grup etkisi sadece deplasmanlar bakımından sistemi etkilememektedir. Aynı zamanda oluşacak momentler de sistemi etkilemektedir (Şekil 4.1). Bu moment etkileşimi eylemsizlik etkileşiminin bir parçasıdır.



Şekil 4.1. Grup kazıklarının yanal yük etkisi altında göçmesi (Boran, 2001)

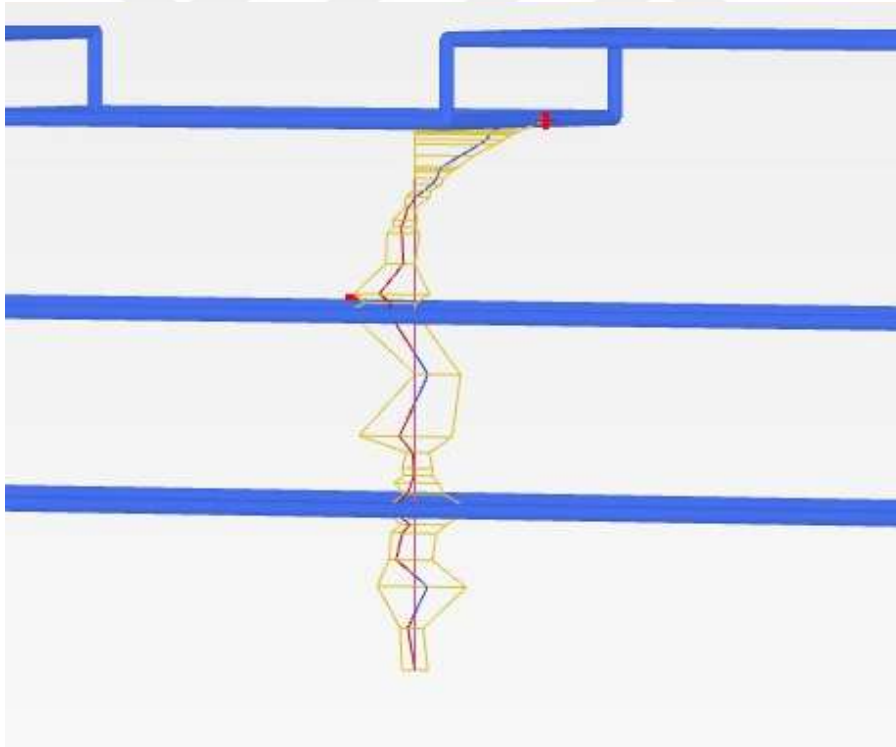


Şekil 4.2. Kazık grubunda yatay yük etkisinde çakışan gerilme bölgeleri (Boran, 2001)

Grup kazıklarının kenar kısımlarında oluşacak deplasman ve moment değerleri için farklı durumlar ortaya çıkabilmektedir. Bu olası durumlar için kazık karelajının kenar kısımlarında kalanlar göz önüne alınarak farklı bir bakış açısıyla değerlendirilmelidir. Çünkü deprem esnasında özellikle depremin etkilediği doğrultunun zıt tarafında kenar kısımlarda kalan grup kazıkları ortadaki kazıklardan daha çok etkilenebilmektedir (Dadaşbilge, 2016). Bu sebeple, dinamik analiz sonuçlarına bakılırken hareketin tersi yönündeki kazıklar dikkate alındı (Şekil 4.2).

#### 4.1. Dinamik Analiz Sonucu Kazık Gruplarında Moment Değerleri

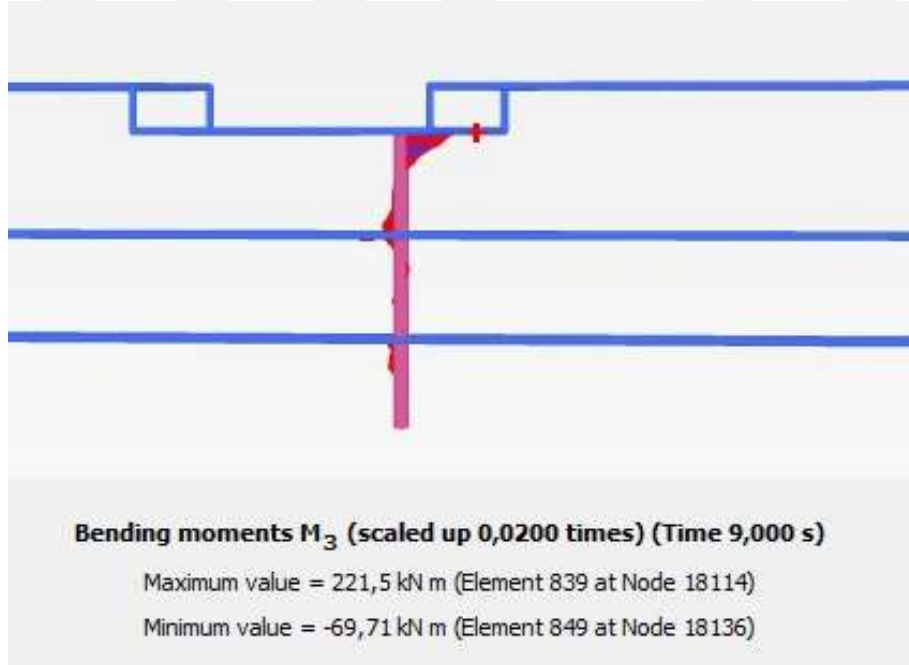
RSN3548\_LOMAP\_LEX000.AT2 deprem yer hareketi için 80 cm çapına sahip kazık grubunda dinamik analiz sonucu elde edilen analiz sonuçları aşağıdaki gibidir (Şekil 4.3-4.6). İvme değerinin maksimum olduğu anda yani 4 ve 6. saniye aralığında eylemsizlik etkileşiminden kaynaklı moment değeri maksimumdur (Şekil 4.4).



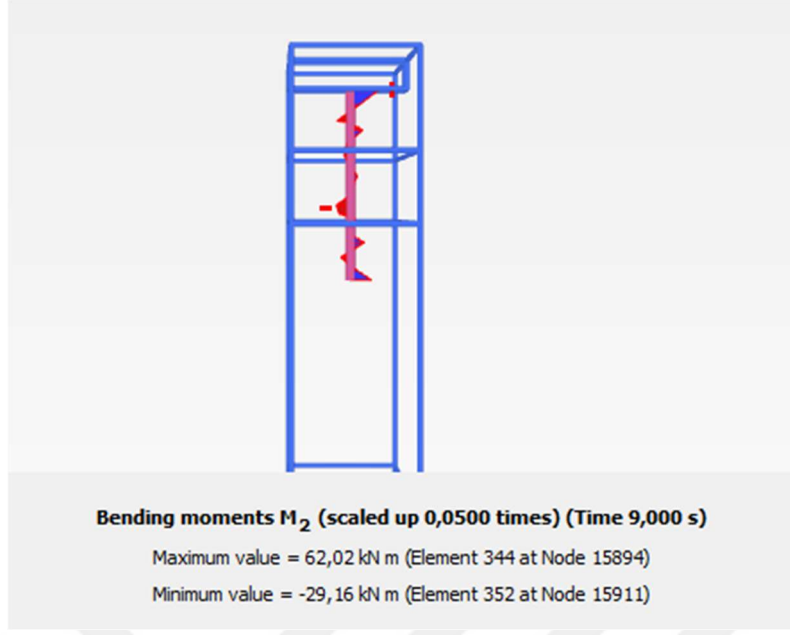
Şekil 4.3. Ø80 fore kazıkta tekrarlı yükleme sonucu  $M_3$  moment değişimleri (Mavi/kırmızı:  $t=9,0$  saniyede dinamik analiz sonucu  $M_3$  değeri, sarı: maksimum noktadaki  $M_3$  değeri)



Şekil 4.4. Ø80 fore kazık için  $t=4,5$  saniyede eylemsizlik etkileşiminin moment değeri ( $M_3$ )

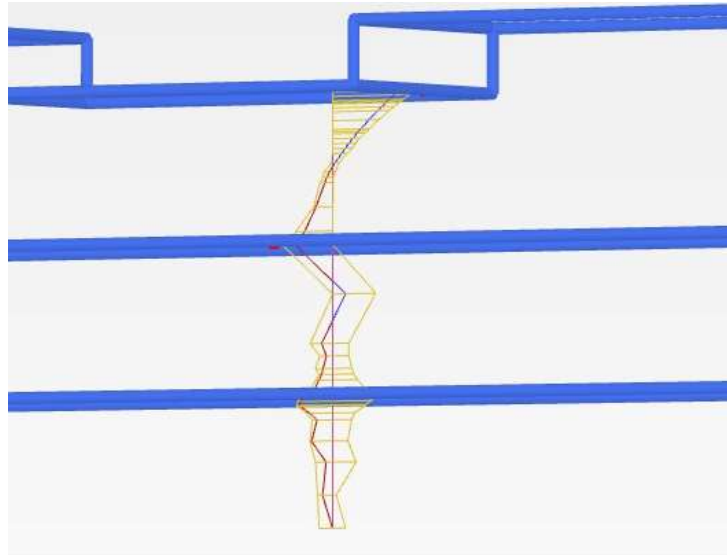


Şekil 4.5. Ø80 fore kazık için  $t=9,0$  saniyede eylemsizlik etkileşiminin moment değeri ( $M_3$ )

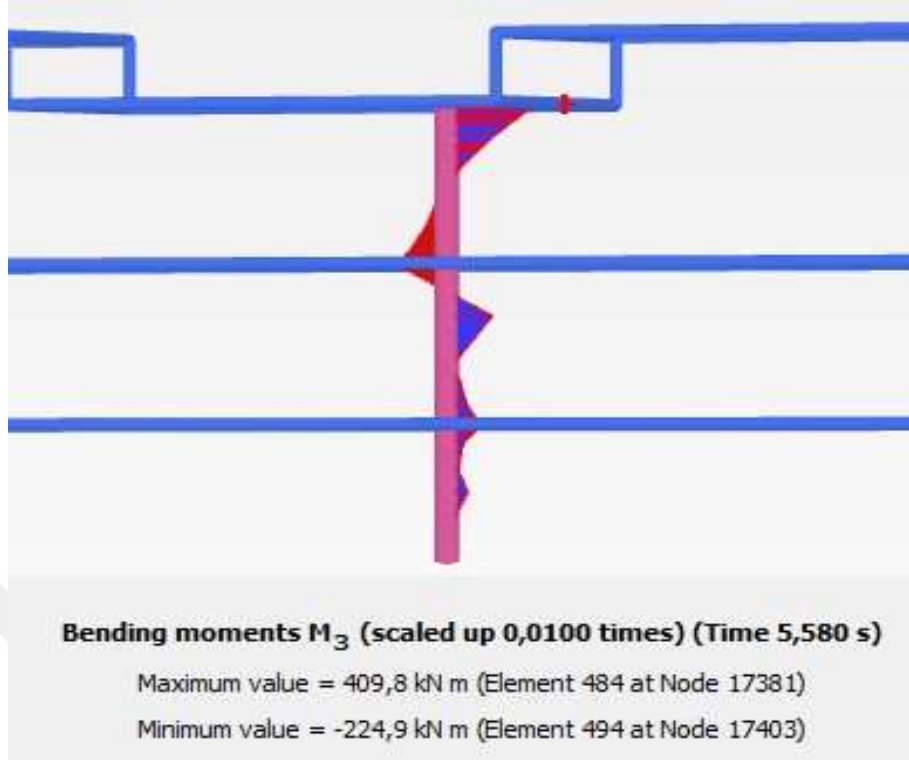


Şekil 4.6. Ø80 fore kazık için  $t=9,0$  saniyede kinematik etkileşiminin moment değeri ( $M_2$ )

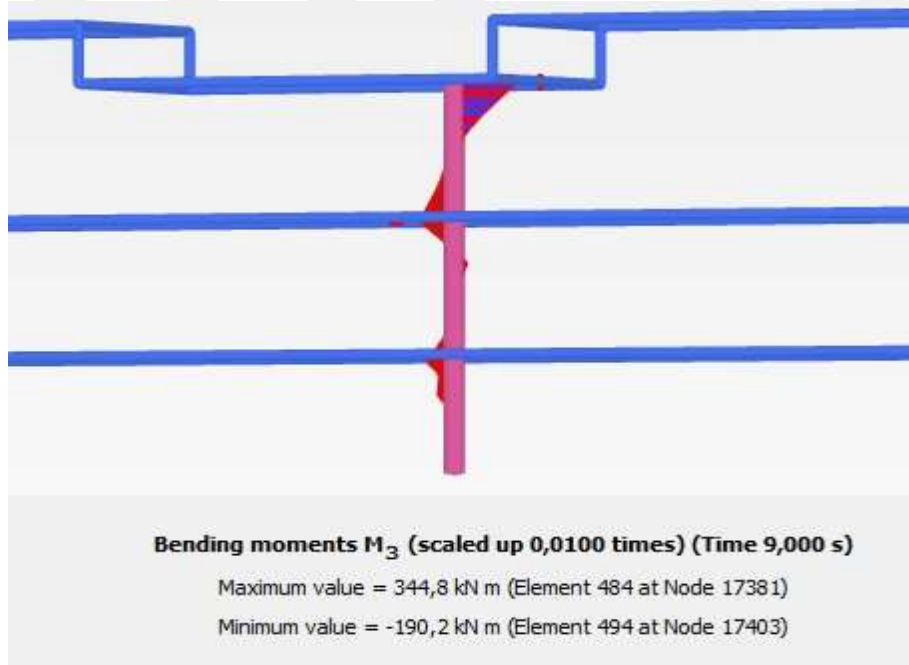
RSN3548\_LOMAP\_LEX000.AT2 deprem yer hareketi için 110 cm çapına sahip kazık grubunda dinamik analiz sonucu elde edilen analiz sonuçları verilmiştir (Şekil 4.7-4.10). İvme değerinin maksimum olduğu anda yani 4 ve 6. saniye aralığında eylemsizlik etkileşiminden kaynaklı moment değeri maksimumdur (Şekil 4.8).



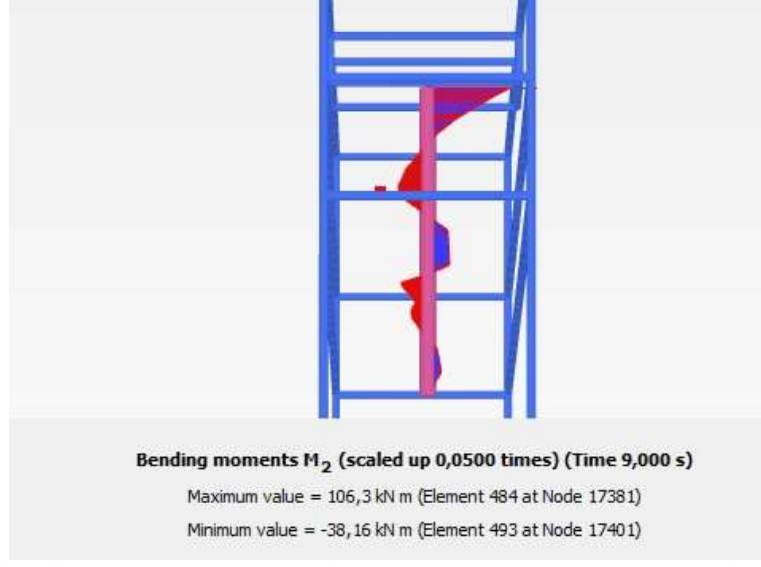
Şekil 4.7. Ø110 fore kazıkta tekrarlı yükleme sonucu  $M_3$  moment değişimleri (Mavi/kırmızı:  $t=9,0$  saniyede dinamik analiz sonucu  $M_3$  değeri, sarı: maksimum noktadaki  $M_3$  değeri)



Şekil 4. 8. Ø110 fore kazık için t=5,58 saniyede eylemsizlik etkileşiminin moment değeri ( $M_3$ )

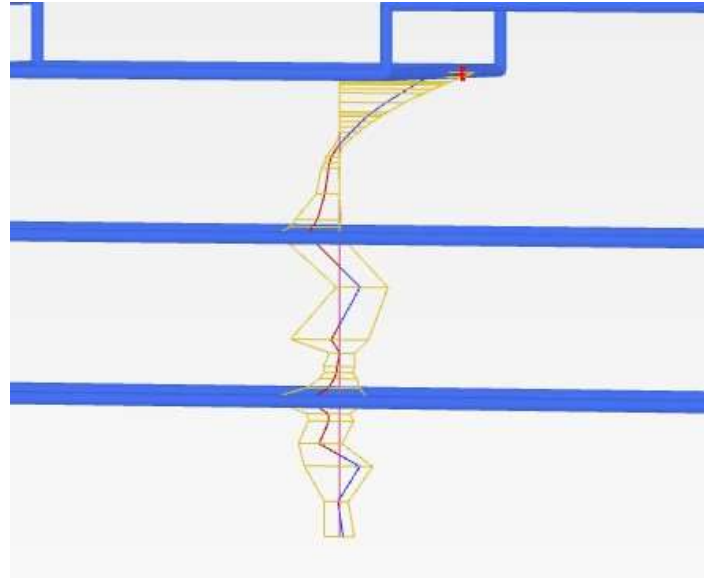


Şekil 4.9. Ø110 fore kazık için t=9,0 saniyede eylemsizlik etkileşiminin moment değeri ( $M_3$ )

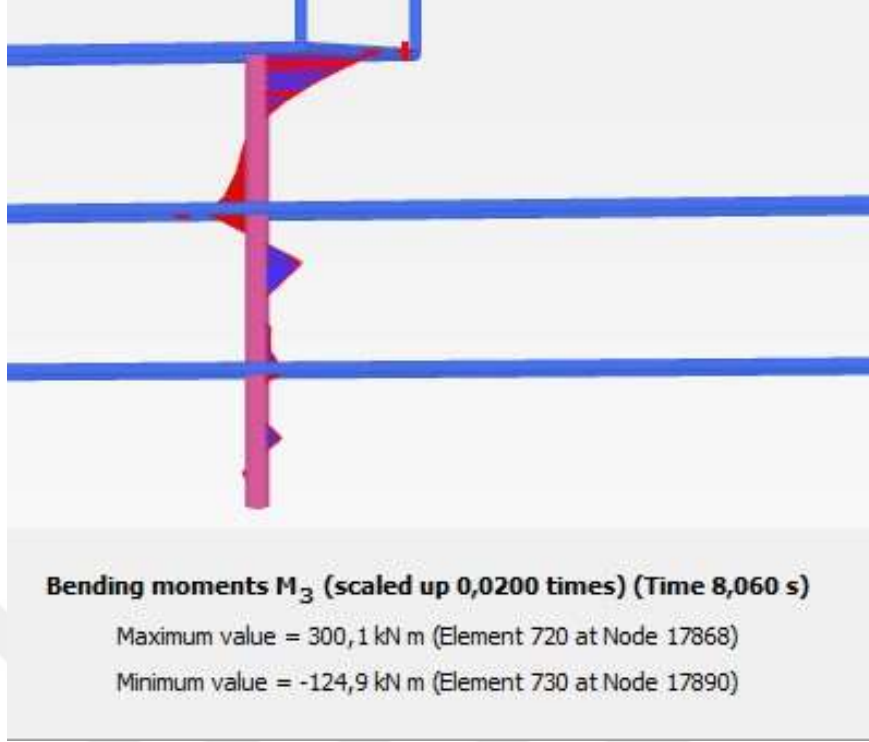


Şekil 4.10. Ø110 fore kazık için  $t=9,0$  saniyede kinematik etkileşiminin moment değeri ( $M_2$ )

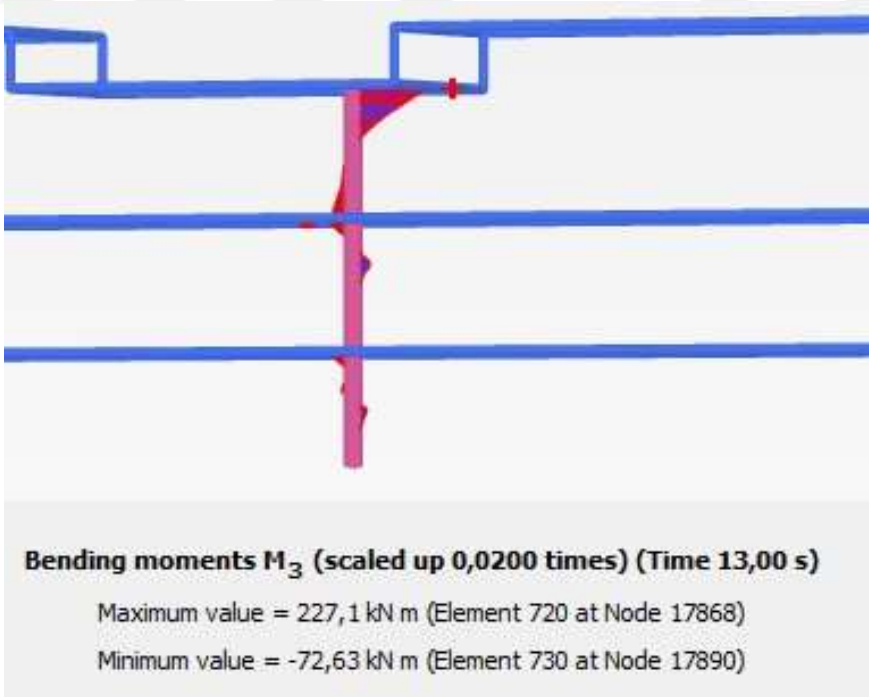
RSN1108\_KOBE\_KBU000.AT2 deprem yer hareketi deprem yer hareketi için 80 cm çapına sahip kazık grubunda dinamik analiz sonucu elde edilen analiz sonuçları verilmiştir (Şekil 4.11-4.14). İvme değerinin maksimum olduğu anda yani 6 ve 9. saniye aralığında eylemsizlik etkileşiminden kaynaklı moment değeri maksimumdur (Şekil 4.12).



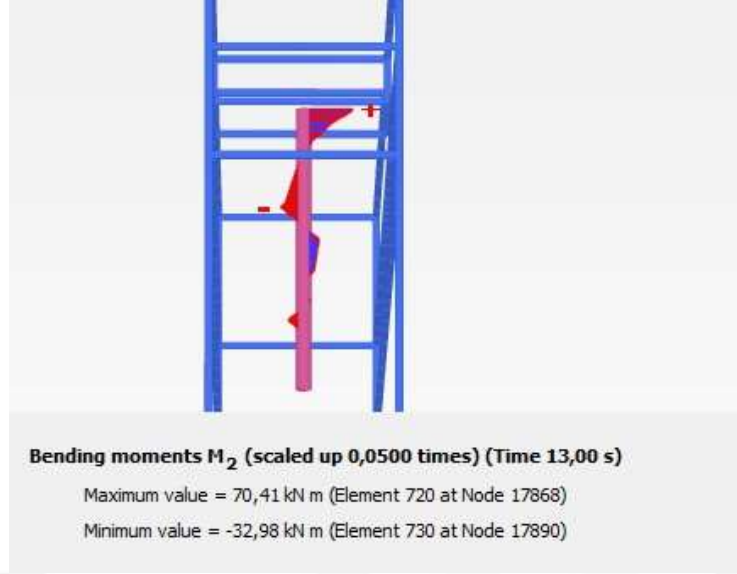
Şekil 4.11. Ø80 fore kazıkta tekrarlı yükleme sonucu  $M_3$  moment değişimleri (Mavi/kırmızı:  $t=13$  saniyede dinamik analiz sonucu  $M_3$  değeri, sarı: maksimum noktadaki  $M_3$  değeri)



Şekil 4.12. Ø80 fore kazık için t=8,06 saniyede eylemsizlik etkileşiminin moment değeri ( $M_3$ )

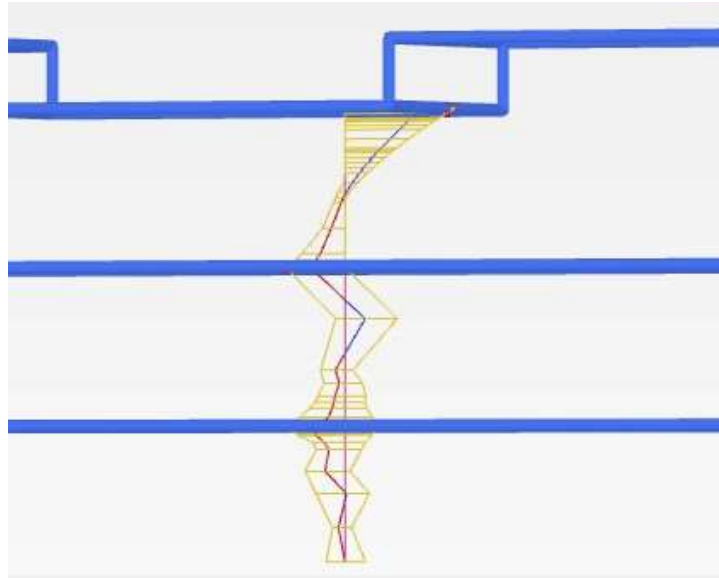


Şekil 4.13. Ø80 fore kazık için t=13 saniyede eylemsizlik etkileşiminin moment değeri ( $M_3$ )

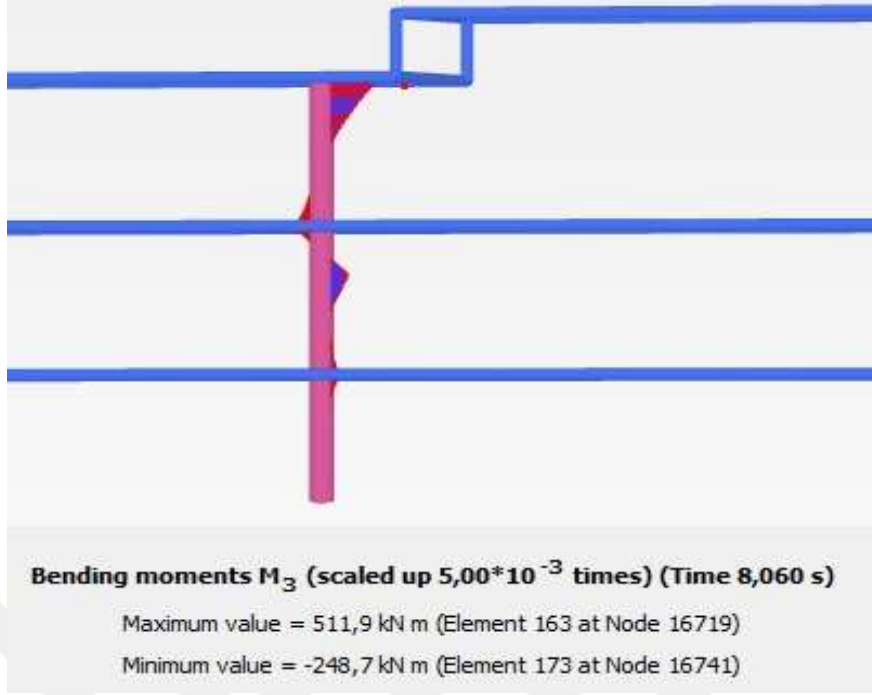


Şekil 4.14. Ø80 Fore Kazık için için t=13 saniyede kinematik etkileşimin Moment Değeri (M2)

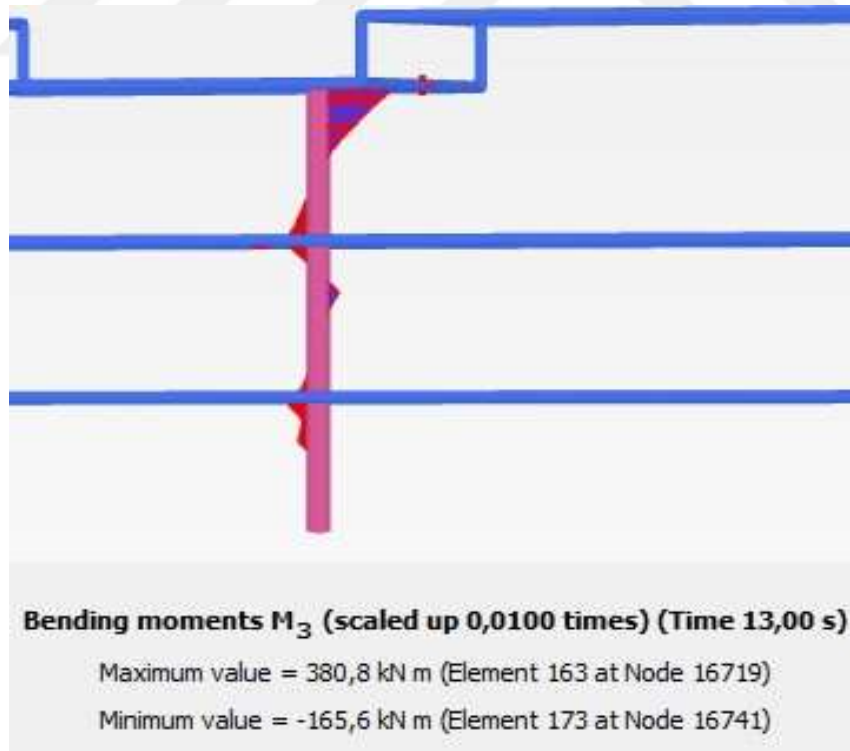
RSN1108\_KOBE\_KBU000.AT2 deprem yer hareketi için 110 cm çapına sahip kazık grubunda dinamik analiz sonucu elde edilen analiz sonuçları verilmiştir (Şekil 4.15-4.18). İvme değerlerinin maksimum olduğu anda yani 6. ve 9. saniye aralığında eylemsizlik etkileşiminden kaynaklı moment değeri maksimumdur (Şekil 4.16).



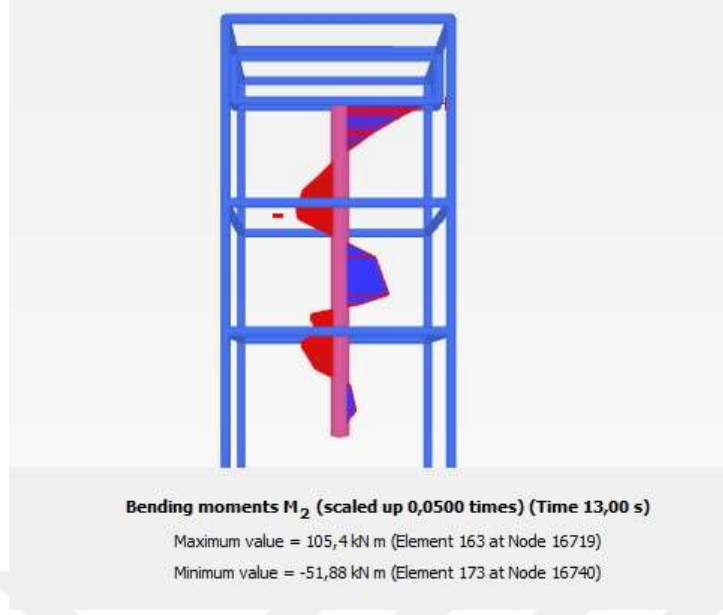
Şekil 4.15. Ø110 fore kazıkta tekrarlı yükleme sonucu  $M_3$  moment değişimleri (Mavi/kırmızı: t=13 saniyede dinamik analiz sonucu  $M_3$  değeri, sarı: maksimum noktadaki  $M_3$  değeri)



Şekil 4.16. Ø110 fore kazık için  $t=8,06$  saniyede eylemsizlik etkileşiminin moment değeri ( $M_3$ )

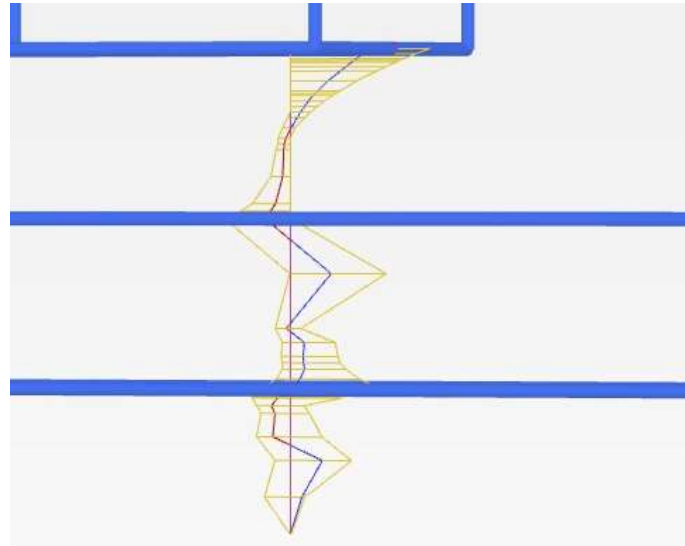


Şekil 4.17. Ø110 fore kazık için  $t=13$  saniyede eylemsizlik etkileşiminin moment değeri ( $M_3$ )

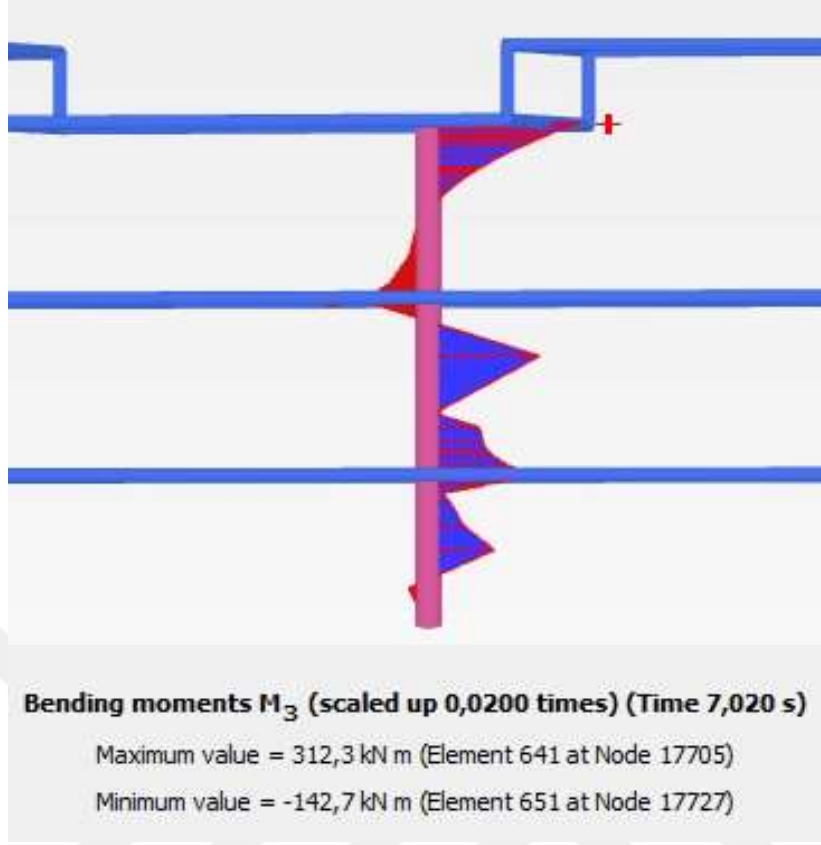


Şekil 4.18. Ø110 fore kazık için  $t=13,0$  saniye kinematik etkileşiminin moment değeri ( $M_2$ )

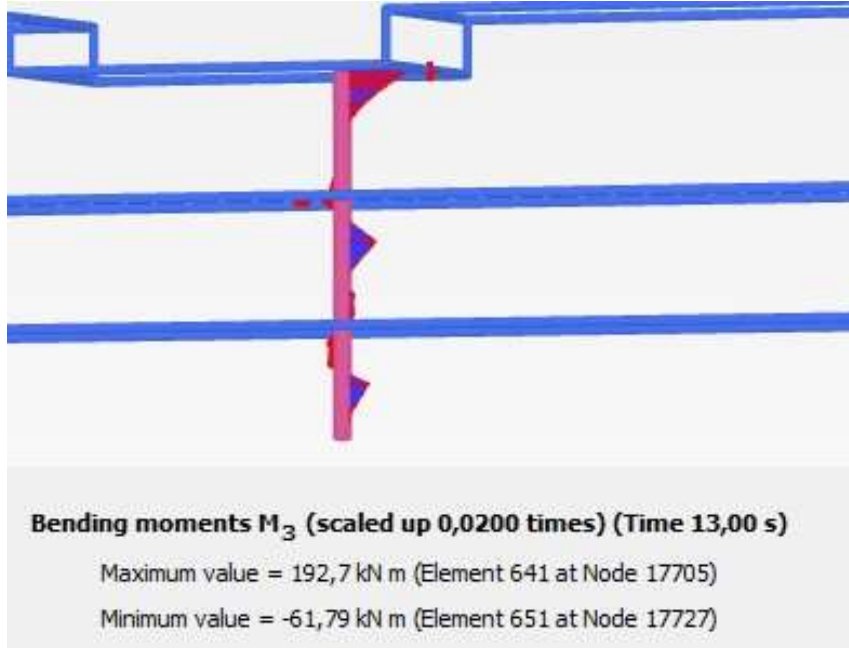
RSN1161\_KOCAELI\_GBZ000.AT2 yer hareketi 80 cm çapına sahip kazık grubunda dinamik sonuçlar verilmiştir (Şekil 4.19-4.22). İvme değerlerinin maksimum noktaya ulaştığı anda yani 6 ve 9. saniye aralığında eylemsizlik etkileşiminden kaynaklı moment değeri maksimumdur (Şekil 4.20).



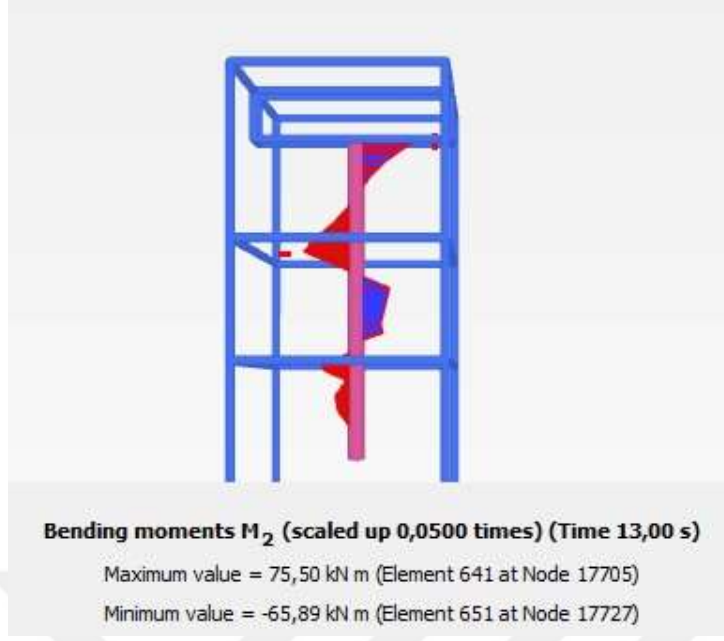
Şekil 4.19. Ø80 fore kazıkta tekrarlı yükleme sonucu  $M_3$  moment değişimleri (Mavi/kırmızı: için  $t=13,0$  saniyede dinamik analiz sonucu  $M_3$  değeri, sarı: maksimum noktadaki  $M_3$  değeri)



Şekil 4.20. Ø80 fore kazık için  $t=7,02$  saniyede eylemsizlik etkileşiminin moment değeri ( $M_3$ )

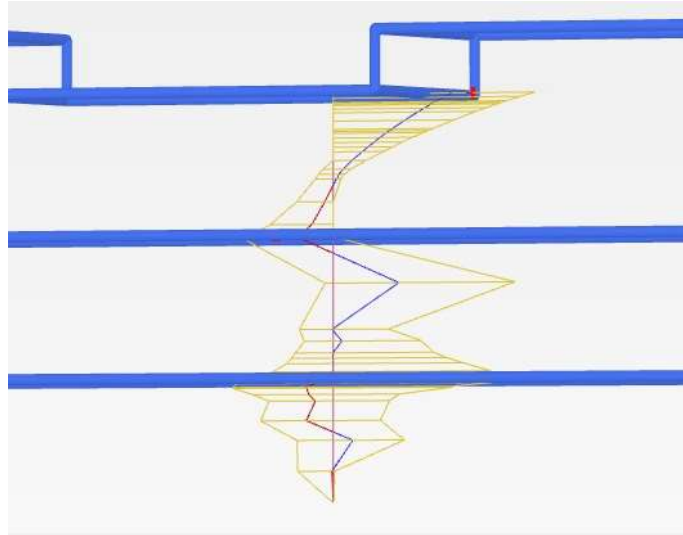


Şekil 4. 21. Ø80 fore kazık için  $t=13,0$  saniyede eylemsizlik etkileşiminin moment değeri ( $M_3$ )

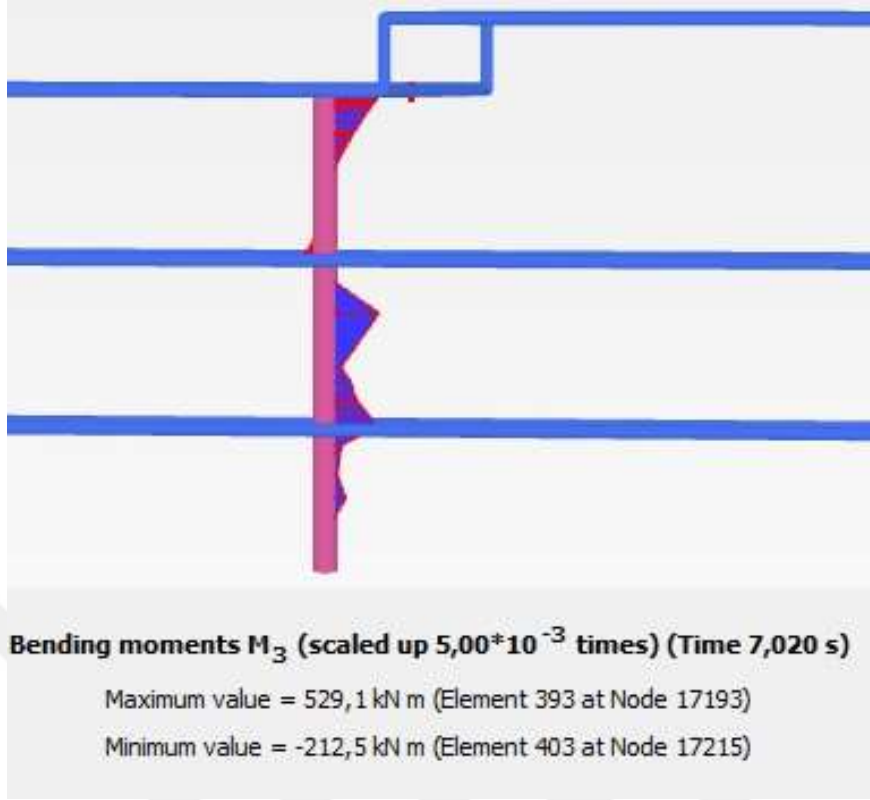


Şekil 4.22. Ø80 fore kazık için t=13 saniyede kinematik etkileşimin moment değeri ( $M_2$ )

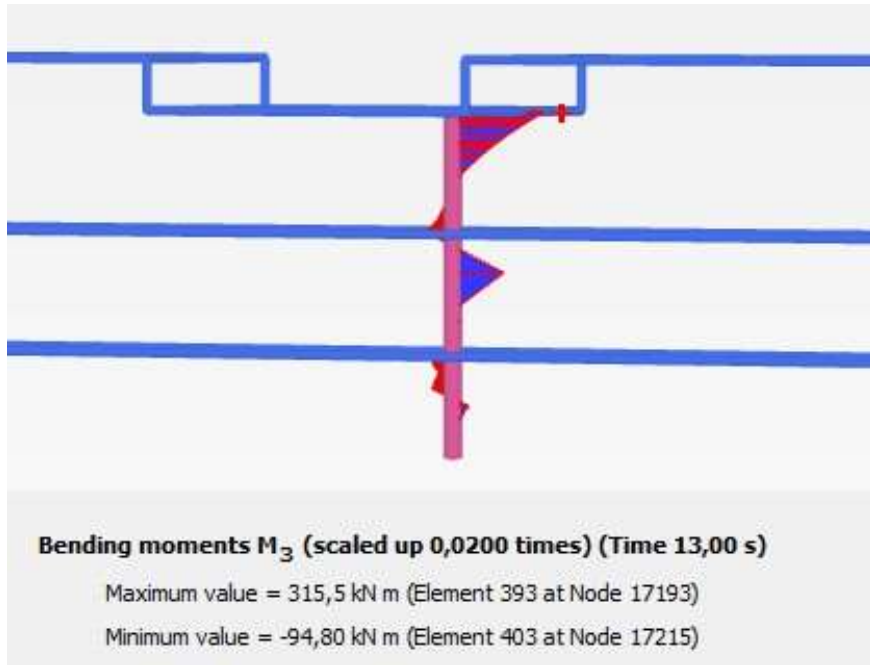
RSN1161\_KOCAELI\_GBZ000.AT2 deprem yer hareketi için 110 cm çapına sahip kazık grubunda dinamik analiz sonucu elde edilen sonuçlar verilmiştir (Şekil 4.23-4.26). İvme değerlerinin maksimum olduğu anda yani 6. ve 9. saniye aralığında eylemsizlik etkileşiminden kaynaklı moment değeri maksimumdur (Şekil 4.24).



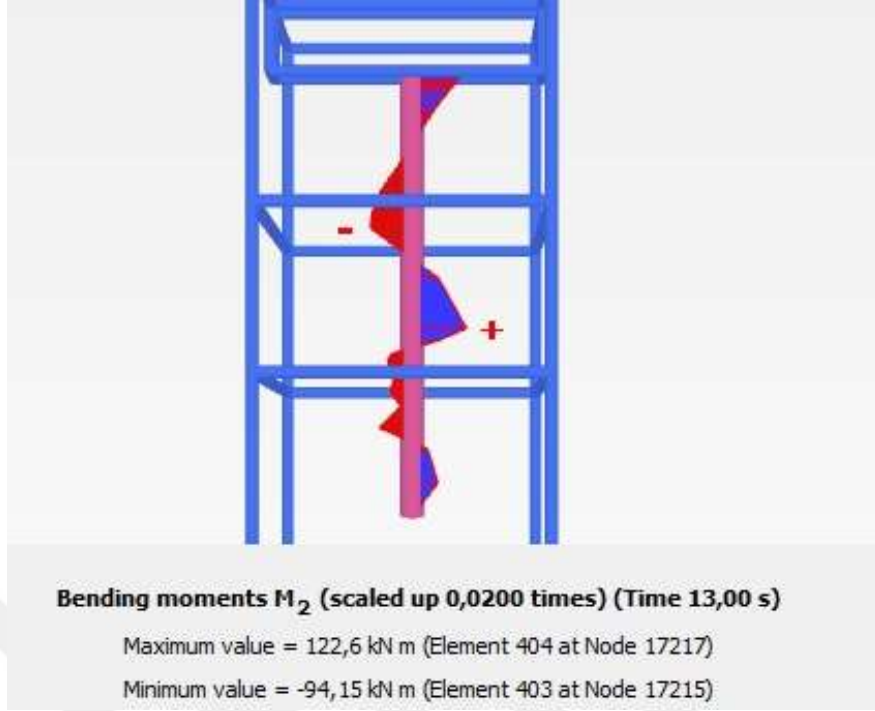
Şekil 4.23. Ø110 fore kazıkta tekrarlı yükleme sonucu  $M_3$  moment değişimleri (Mavi/kırmızı: t=13 saniyede dinamik analiz sonucu  $M_3$  değeri, sarı: maksimum noktadaki  $M_3$  değeri)



Şekil 4.24. Ø110 fore kazık için  $t=7,02$  saniyede eylemsizlik etkileşiminin moment değeri ( $M_3$ )



Şekil 4. 25. Ø110 fore kazık için  $t=13$  saniyede eylemsizlik etkileşiminin moment değeri ( $M_3$ )



Şekil 4.26. Ø110 fore kazık için t=13 saniyede kinematik etkileşimin moment değeri ( $M_2$ )

Tablo 4.1. Dinamik analiz sonuçları moment değerleri

Deprem Verisi	Kazık Çapı	Moment (kNm)		
		$M_2$	$M_3$	$M_3$ Max
1. Deprem Kaydı - RSN3548_LOMAP_LEX000.AT2	Ø 80	62,02	221,5	267,1
	Ø 110	106,3	344,8	409,8
2. Deprem Kaydı - RSN1108_KOBE_KBU000.AT2	Ø 80	70,41	227,1	300,1
	Ø 110	105,4	380,8	511,9
3. Deprem Kaydı - RSN1161_KOCAELI_GBZ000.AT2	Ø 80	75,5	192,7	312,3
	Ø 110	122,6	315,5	529,1

Tablo 4.1’te dinamik analiz sonucu elde edilen moment değerleri bulunmaktadır. Bu tabloda, seğilen 1. ve 2. deprem kayıtları ięin dinamik analiz sonucu kazıklarda elde edilen moment değerleri karşılaştırıldığında, deprem magnitudü ęok değişmeden fay kırığına en yakın mesafe azaldıkęa bu moment değerlerinde artış geręekleřmektedir. 3. deprem kaydı ile geręekleřtirilen dinamik analiz sonucu moment değerlerine bakıldığında ise fay kırığına en yakın mesafe artsa bile, en bryk moment değerleri elde edilmiştir. Buradan anlaşılan deprem magnitudünde geręekleřen artış moment değerlerinde artışa sebep olmaktadır. En bryk moment değerleri 3. deprem kaydı ile geręekleřtirilen dinamik analiz sonucu elde edilmesine rağmen, 13 saniyelik dinamik analizi sonrası diğer deprem kayıtları ile geręekleřtirilen analizlerden daha dűřk moment ( $M_3$ ) değerleri elde edilmiştir. Bunun sebebi analiz suresinin, diğer kayıtlar ile yapılan analizlere gbre deprem suresinden daha uzun olmasıdır.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Gün geçtikçe daha gerçekçi sonuç elde edebilmek adına gelişen yazılım teknolojisi, yapı-kazık-zemin sistemini birlikte modellemek ve analiz etmek için olanak sağlamaktadır. Bu tez kapsamında da bu gelişen yazılım programlarından biri olan Plaxis programı ile yapı-kazık-zemin sistemini birlikte modellenmiştir. Yapının bulunduğu konuma uygun deprem verileri altında analiz gerçekleştirilmiştir. Bütün deprem verileri ile yapılan analizler sonucunda en büyük moment değerleri üçüncü orta sıra kazıklarda görülmüştür. Analiz dar sistem üzerinde yapıldığından dolayı bu sonuç olası bir durumdur. Kazıklardaki moment değerleri kazık çapının artması ile değişim göstermiştir ve taşıma kapasitesinde artış meydana gelmiştir. İncelenen modeldeki gibi zemin tabakalı ise, zemin tabaka geçiş bölgelerinde, yani rijitlik değişim bölgelerinde kinematik etkileşim sonucu elde edilen moment ( $M_2$ ) değerleri büyüktür. Yani kinematik etkileşimden kaynaklanan gerilme yoğunlaşmaları tabaka değişikliğinin gerçekleştiği daha derin kısımlarda gözlenmiştir. Eylemsizlik etkileşimi sonucu elde edilen eylemsizlik momentleri ( $M_3$ ) ise üst yapının ataletinin etkisi ile meydana geldiğinden dolayı, genellikle kazığın üst kısımlarında yani yapı-kazık birleşim bölgesinde yoğunlaşmıştır. Eylemsizlik etkileşimi ile elde edilen moment değerleri kinematik etkileşim sonucu elde edilen moment değerlerine göre daha büyüktür. Bu sebepten deprem etkisi sonucunda sistemde en büyük zorlanmalar bu eylemsizlik etkileşimi sonucundadır. Ayrıca seçilen deprem kayıtlarına ait ivmenin maksimum olduğu aralıkta, elde edilen moment değerleri ( $M_3$ ) de maksimumdur. Analiz sonucu her bir deprem verisi ile yapılan çıktılar incelendiğinde yaklaşık yakın değerler elde edilmekte ve kazık çapının artması ile bu değerlerde artış gözlemlenmektedir. Analizler sonucu kazıklarda kinematik ve eylemsizlik etkileşimi sonucu elde edilen moment değerlerini en çok etkileyen husus deprem magnitüdü olmaktadır. Aynı magnitüde sahip deprem verilerinde ise fay kırığına en yakın mesafe, bu moment değerleri için etkileyici bir durum oluşturmaktadır. Deprem anında kazıklarda oluşacak en büyük moment değerleri deprem magnitüdü büyük olduğu durum olarak elde edilmiştir. Kazık donatı tasarımı gerçekleştirilirken bu kazıklarda meydana gelen maksimum moment değerleri kullanılması gerekmektedir.

Buradan anlaşıldığı üzere inşa edilen yüksek katlı yapılar ile tasarlanan kazıklı temeller deprem etkisinde gerçekleştirilen en büyük kazık zorlanmalarını eylemsizlik etkileşimi

sonucu elde etmektedir. Bu bölgelerde oluşan kesme kuvvetleri kazıkları zorlayarak ciddi hasarlar meydana getirebilmektedir. Bu sebeple derin temele sahip yüksek yapılar için bu etkileşimin incelenmesi önemlidir. Elde edilen değer hem kazık özelliklerinden hem de zemin özelliklerinden etkilenmektedir. Kinematik ve eylemsizlik etkileşimi üst yapıya aktarılacak etkiler bakımından fazlaca önem taşımaktadır ve muhakkak bu etkiler dikkate alınmalıdır. Derin temele sahip yapılar için dinamik analiz altında kazık çapının değişimi hem yapının zemine etkisi hem de zeminin yapıya etkisi için önemlidir. Yapılan tüm analizler sonucunda anlaşıldığı üzere Marmara Bölgesi gibi hem aktif fay hatlarının fazlalıkla görüldüğü hem de zayıf zemin olarak bilenen alüvyon zemine sahip yerlerde bu yapı-kazık-zemin etkileşimi analizini yapmak büyük önem taşımaktadır. Bu analiz ve incelemelerin alanında uzman geoteknik ve yapı mühendisleri tarafından gerçekleştirilmesi doğru bir yaklaşım olacaktır.

## KAYNAKLAR

- Alpaslan, N. (2013) Zemin Sıvılaşması ve Mekanizması. *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi*, 3(2), 67–89.
- Altun, S. (2010), *Zemin İyileştirme Yöntemleri, Derin Temeller ve Uygulama Örnekleri*. İnşaat Mühendisleri Odası İzmir Şubesi. Eski.imo.org.tr., (Ziyaret tarihi: 15 Ocak 2024).
- Aydinoğlu, M. N. (1993). Development of Analytical Techniques in Soil-Structure Interaction. *Developments in Dynamic Soil-Structure Interaction*, 25–42.
- Aydinoğlu, M. N. (2011). Zayıf Zeminlerde Yapılan Binalarda Dinamik Yapı-Kazık-Zemin Etkileşimi için Uygulamaya Yönelik Bir Hesap Yöntemi, *Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü*, 2011 / 1.
- Boran, E. (2001). Yatay Yüklü Tek ve Grup Kazıklarının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Üç Boyutlu Nonlinear Analizi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 104186.
- Birand, A. A. (2007). *Kazıklı Temeller*. Teknik Yayınevi.
- Bağrıaçık, B. (2015). Kohezyonsuz Zeminlerde Düşey Yüklü Kazıklı Radye Temellerin Analizi. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 405166.
- Balendra, S. (2005). Numerical Modeling of Dynamic Soil-Pile-Structure Interaction. Master of Science in Civil Engineering, Washington State University. Department of Civil and Environmental Engineering, Washington.
- Çağlar, N., Garip Z.Ş., Yaman, Z. D. (2005). Deprem Etkisindeki Betonarme Yapılarda Yapı-Zemin Etkileşimi, *2005 Deprem Sempozyumu*, Kocaeli, Türkiye, 23-25 Mart 2005.
- Çetin, K., Bilge H., Yunatçı, A., Oral, S. ve Siyahi, B. (2013). Yüksek Katlı Yapı Sistemlerinde Sismik Zemin-Kazık-Radye-Yapı Etkileşimi Üzerine Bir Değerlendirme, *Prof. İsmet Ordemir'i Anma Toplantısı ve 7. ODTÜ Geoteknik Mühendisliği Sempozyumu*, ODTÜ Kongre ve Kültür Merkezi A Salonu, Ankara, Türkiye, 22 Kasım 2013 Cuma.
- Çetinkaya, M. Y., Çelebi, E., Kırtel, O. (2015). Sismik Yüklere Maruz Yapı-Zemin Ortak Sisteminin Çözüm Sürecinde Temel-Zemin Etkileşiminin Sönümü. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 7(3), 25–30.
- Dadaşbilge, O. (2016). Derin Temeller. İTÜ İnşaat Fakültesi Mühendisliğe Hazırlık Kulübü İms 2012 Seminerleri.

- Davran, S., Özocak, A., Sert, S., Bol, E. (2023). Alüvyon Zeminlerin Sıvılaşma Potansiyelinin Sayısal Analiz ile Belirlenmesi ve Zemin İyileştirmesinin Analize Etkileri. *Gazi Üniversitesi Politeknik Dergisi*. DOI: 10.2339/politeknik.1105277
- Eseller-Bayat, E. E., Sezen, A., Alver, O., Göktürk, D., Gündüz, M. Ş., Önder, Z. E., Umay, İ., Üstüner., O. (2019). TBDY 2018'e Göre Geoteknik Tasarım, Sıvılaşma Analizi ve Yapı Zemin Kazık Etkileşimi Örneği: Vaka Analizi. 8. *Uluslararası Geoteknik Sempozyumu*, İTÜ Süleyman Demirel Kültür Merkezi, İstanbul, 13-15 Kasım 2019.
- Fırat, B. (2017). Marmara Bölgesi'nin Kuvvetli Yer Hareketi Karakteristiklerinin Belirlenmesi. Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 472511.
- Girgin, S. C., Mısır, S., Özden, G., Kahraman, S. (2008). Yapı- Zemin Etkileşiminin Yapısal Tasarımdaki Rolü. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 10(1), 27-37.
- Kabaca, H., Vural, İ. (2018). Teorik Nihai Kazık Taşıma Gücü Hesaplamaları ile Kazık Yükleme Yöntemlerin Karşılaştırmalı Analizi. *Academic Perspective Procedia*, 1(1), 862-873.
- Karabörk, T. (2009). Yapı-Zemin Etkileşimi Dikkate Alınarak Betonarme Yapıların Doğrusal Olmayan 3 Boyutlu Dinamik Analizi. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 5(1), 25-36.
- Karamanoğlu, M., Ulay, G. (2017). Deprem Riski Yüksek Bölgelerde İç Mekan Düzenlemelerinin İncelenmesi (Tosya örneği). *Kastamonu Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 17(1), 186-193.
- Kramer, L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering* (2nd ed.). New Jersey, Prentice-Hall.
- Kutlu, Z. N., Kılıç, İ.E. (2019). Pile Group Foundation Behavior Analysis of a Building Under Axial Loading. *Uluslararası 8. Geoteknik Sempozyumu*, Süleyman Demirel Kültür Merkezi-İTÜ Ayazağa Kampüsü, İstanbul, 13-15 Kasım 2019.
- Mamuk, F. (2010). Üç Boyutlu Dinamik Zemin-Yapı Etkileşimi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 10464.
- NIST GCR 12-917-21, *Consultants Joint Venture, Soil-Structure Interaction for Building Structures*, U.S. Department of Commerce National Institute of Standards and Technology; 2012.
- Nguyen, D. D. C., Jo, S., Kim, D. (2013). Design Method of Piled-Raft Foundations Under Vertical Load Considering Interaction Effects. *Computers and Geotechnics*, 47, 16-27.

- Orhan, M. (2019). Geoteknik Mühendisliği ve Temel İnşaatı. Gazi Kitabevi.
- Rovithis, E. N., Pitilakis, K. D., Mylonakis, G. E. (2009). Seismic Analysis of Coupled Soil-Pile-Structure Systems Leading to the Definition of a Pseudo-Natural SSI Frequency. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29(6), 1005–1015.
- Sağlam, A. (2006). Derin Kazılarda Görülen Stabilite Problemleri ve İlgili Çözüm Kriterlerinin Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 181769.
- Santos, J. A. (2003). Simplified Methods for Kinematic Soil-Pile Interaction Analysis. *9th. International Conference on Enhancement and Promotion of Computational Methods in Engineering and Science*. EPMESC IX, Macau, 467-471. 20(4), 19-35.
- Sarıkamış, M. R., (2022). *Kazık Grupları Nedir? Dikkat Edilmesi Gerekenler Nelerdir?*. Sanal Şantiye, <https://www.sanalsantiye.com/kazik-gruplari-nedir-dikkat-edilmesi-gerekenler-nelerdir/> (Ziyaret tarihi: 15 Ocak 2024).
- Taştan, H. ve Özgür, M. (2023). Çok Katlı Betonarme Bir Binanın Altsistem Yaklaşımı ile Analizi. *Journal of Advanced Research in Natural and Applied Sciences*, 9(1),167–182.
- Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. (2018). *T.C. Resmi Gazete* (30364, 18 Mart 2018 ). ÇŞB (TC Çevre ve Şehircilik Bakanlığı).
- Uyanık, O., Ekin, N., Çoşkun, O. (2021). Zemin ve Deprem Parametrelerinden İvme Azalım İlişkisi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 23(68), 575–593.
- Wolf, J. P., Oberhuber, P. (1985). Non-Linear Soil-Structure-Interaction Analysis Using Dynamic Stiffness or Flexibility of Soil in the Time Domain. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 13(2), 195–212.
- Vu, A., Pham, D., Nguyen, T., He, Y. (2014). 3D Finite Element Analysis on Behaviour of Biled Raft Foundations. *Applied Mechanics and Materials*, 580–583, 3–8. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.580-583.3.
- Yerli, H., R. (1998). İki ve Üç Boyutlu Dinamik Yapı Zemin Etkileşimi Problemlerinin Sonlu ve Sonsuz Elemanlar Kullanılarak Analizi. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 77091.

## KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

**Kurt, S.,** Kavak, A. (2024), Yapı Kazık Zemin Etkileşiminin Plaxis 3D Programı ile Analizi, *7. Uluslararası Haliç Multidisipliner Bilimsel Araştırmalar Kongresi*, İstanbul, 23-25 Ocak 2024.



## ÖZGEÇMİŞ

İlk, orta ve lise eğitimimi Kocaeli’nde tamamladı. 2015 yılında girdiği Bartın Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nden 2019 yılında İnşaat Mühendisi meslek unvanı ile bölüm ikincisi olarak mezun oldu. 2019 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans programına başladı. 2022 yılından beri Kocaeli Büyükşehir Belediyesi’nde İnşaat Mühendisi olarak görev yapmakta.

