



SİSMİK YÜKLER ALTINDA KÖPRÜ KAZIKLARININ ANALİZİ

Uğur ERDEM

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAZİRAN 2019

Uğur ERDEM tarafından hazırlanan “SİSMİK YÜKLER ALTINDA KÖPRÜ KAZIKLARININ ANALİZİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Nail ÜNSAL

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

İkinci Danışman: Öğr. Gör. Dr. Erhan TEKİN

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Başkan: Doç. Dr. Berna UNUTMAZ

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Hacettepe Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Prof. Dr. Sami Oğuzhan AKBAŞ

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Onur PEKCAN

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Tez Savunma Tarihi: 20/06/2019

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....
Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Uğur ERDEM

20/06/2019

SİSMİK YÜKLER ALTINDA KÖPRÜ KAZIKLARININ ANALİZİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Uğur ERDEM

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2019

ÖZET

Bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemi ile fore kazıklı temele sahip bir köprü göz önüne alınarak, kazıklar, zemin ve yapısal elemanların bütünüyle sayısal olarak modellenmesi ve kazıkların tekil olarak ayrı modellenmesi durumunda, sismik yükler altında kazık-zemin-yapı etkileşiminin incelenmesi ve kazıklar üzerindeki tesirlerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Analiz için bir karayolu köprüsü olan Yeşilırmak Köprüsü seçilmiştir. Yeşilırmak Köprüsü, üç sıra fore kazıklı temellere sahip bir köprü olup, köprü kazıklarının yeraltı su seviyesinin altında kalan sert kil içinde yer aldığı kabul edilmiştir. Analizi yapılan karayolu köprüsü, tüm elemanları ile SAP2000 yazılımında modellenmiş ve zeminin doğrusal olmayan davranışını tanımlamak amacıyla p-y yöntemi ile hesaplanan yük ve deplasman değerleri, kazıklara plastik bağlantı elemanları olarak tanımlanmıştır. Kazıklara etkileyen deprem yüklerinin hesaplanmasında zaman-tanım alanında analiz yöntemi kullanılmıştır. Deprem analizlerinde köprünün bulunduğu Samsun ili Çarşamba ilçesi baz alınarak, fay tipi, faya olan uzaklık, kayma dalgası hızı, zemin özellikleri ve deprem magnitüd özelliklerinden faydalanılarak geçmişteki benzer deprem kayıtları bulunmuş, köprüye özel tepki spektrumuna göre ölçeklendirilmiş ve sayısal modele etki edilmiştir. Ayrıca, LPile yazılımında, her sıradaki kazıklar ayrı olarak modellenerek kazıklar üzerindeki moment, kesme ve deplasman değerlerinin karşılaştırılması yapılmış ve deprem yükleri altında kazık, temel ve yapı etkileşimi ile tek olarak modellenen kazık davranışı arasındaki farklar ortaya koyulmuştur.

Bilim Kodu : 91105
Anahtar Kelimeler : Deprem, Zaman Tanım Alanında Analiz, Kazık, Köprü, Zemin-Kazık-Yapı Etkileşimi
Sayfa Adedi : 89
Danışman : Prof. Dr. Nail ÜNSAL
2. Danışman : Öğr. Gör. Dr. Erhan TEKİN

ANALYSIS OF BRIDGE PILES UNDER SEISMIC LOADS

(M. Sc. Thesis)

Uğur ERDEM

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2019

ABSTRACT

This study aims to investigate pile-soil-structure interaction and pile reactions for a highway bridge using finite element method modelling piles, soil and structural members together and modelling single piles under seismic forces. For analysis, Yeşilırmak Bridge is chosen which is a highway bridge. Yeşilırmak Bridge has foundations with three row of bored piles and piles are extending into stiff clay with free water. The analyzed bridge is modelled with all bridge members in SAP2000 software and nonlinear property of soil is assigned to piles as plastic link members. While computing earthquake loads, time history analysis is used. In earthquake analysis in Samsun city Çarşamba district location, fault type, distance to fault, shear wave velocity, soil properties and magnitude properties are used to find proper earthquake records and this records are scaled according to site specific response spectrum of the bridge and loads are applied to numerical model. Also, single piles at each row are modelled in LPile software and moment, shear and displacement values are compared, and also differences are presented in pile behaviour of model with pile-foundation-structure interaction and model with single pile.

Science Code : 91105

Key Words : Earthquake, Time History Analysis, Pile, Bridge, Soil-Pile-Structure Interaction

Page Number : 89

Supervisor : Prof. Dr. Nail ÜNSAL

Co Supervisor : Lecturer Dr. Erhan TEKİN

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmalarım esnasında benden desteğini esirgemeyen ve beni yönlendiren tez danışmanlarım Dr. Erhan TEKİN ve Prof. Dr. Nail ÜNSAL'a, beni yüksek lisans eğitimine teşvik eden ve mühendislik bilinci kazanmamda büyük emekleri olan İnş. Müh. Çaęlar KERİMOğLU'na ve İnş. Müh. Derya BAHÇECİ'ye, mühendislik alanında beraber çalıştığım tüm kıymetli meslektaşlarıma, beni yetiştiren ve bugünlere gelmemi sağlayan aileme ve bana her zaman destek olan hayat arkadaşım kıymetli eşime teşekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
3. ANALİZİ YAPILAN KÖPRÜNÜN TARİFİ.....	7
4. YAPILAN ÇALIŞMALAR	11
4.1. Deprem Yüklerinin Oluşturulması	11
4.1.1. Zaman tanım alanında hesap yöntemi	11
4.1.2. Deprem kayıtlarının seçimi	11
4.1.3. Deprem kayıtlarının ölçeklendirilmesi	14
4.2. Kazıklar İçin p-y Eğrilerinin Oluşturulması	20
4.2.1. p-y yöntemi.....	20
4.2.2. Reese ve diğerleri (1975) yöntemi ile tekrarlı yükler altında sert kildeki kazıklar için p-y eğrilerinin belirlenmesi	23
4.3. Kazıklarda Grup Etkisi.....	26
4.4. SAP2000 Yazılımı ile Yapılan Analizler.....	29
4.4.1. Analiz girdileri	29
4.4.2. SAP2000 analiz çıktıları.....	47

	Sayfa
4.5. LPile Yazılımı ile Yapılan Analizler.....	50
4.4.1. LPile analiz girdileri.....	50
4.4.1. LPile analiz çıktıları.....	54
4.6. SAP2000 ve LPile Yazılımlarından Elde Edilen Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	55
5. SONUÇ.....	51
KAYNAKLAR.....	65
EKLER.....	67
EK-1. SAP2000 yazılımı kazık analizi sonuçları.....	68
EK-2. LPile yazılımı kazık analizi sonuçları.....	80
ÖZGEÇMİŞ.....	89

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. KSK-10 numaralı sondaja ait SPT deney sonuçları	9
Çizelge 3.2. KSK-10 numaralı sondaja ait laboratuvar deney sonuçları.....	10
Çizelge 4.1. Deprem kayıtları taranırken kullanılan değerler	12
Çizelge 4.2. Seçilen deprem kayıtlarının özeti	12
Çizelge 4.3. AASHTO (2011) şartnamesine göre zemin sınıflandırması	15
Çizelge 4.4. AASHTO (2011) şartnamesine göre F_a ve F_{pga} değeri	16
Çizelge 4.5. AASHTO (2011) şartnamesine göre F_v değeri	16
Çizelge 4.6. AASHTO (2011) şartnamesine göre oluşturulan tepki spektrumu parametreleri.....	18
Çizelge 4.7. Deprem ölçek katsayıları.....	19
Çizelge 4.8. “k” için verilen temsili değerler	24
Çizelge 4.9. ϵ_{50} için verilen temsili değerler	25
Çizelge 4.10. Yeşilirmak Köprüsü kazıkları p-y eğrisi için kullanılacak parametreler .	25
Çizelge 4.11. Kazıklardaki farklı sıralar için P_m çarpan değerleri.....	28
Çizelge 4.12. SAP2000 analizinde kullanılan beton malzeme özellikleri	30
Çizelge 4.13. SAP2000 analizinde kullanılan eleman boyutları	30
Çizelge 4.14. Elastomer mesnetlere tanımlanan rijitlik değerleri.....	32
Çizelge 4.15. Köprü üstyapısını oluşturan elemanlara ait birim yükler	32
Çizelge 4.16. Birinci sıradaki kazıkta oluşan tesirler	49
Çizelge 4.17. İkinci sıradaki kazıkta oluşan tesirler	49
Çizelge 4.18. Üçüncü sıradaki kazıkta oluşan tesirler.....	50
Çizelge 4.19. LPile modelinde kazık başlarına etki edilen yük değerleri	54
Çizelge 4.20. LPile kazık modellerinden elde edilen moment, kesme ve deplasman değerleri	55

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Analizi yapılan köprünün planı	7
Şekil 3.2. Analizi yapılan köprünün profili	7
Şekil 3.3. Analizi yapılan köprünün orta ayak temel planı.....	8
Şekil 3.4. Analizi yapılan köprünün elastomer mesnet boyutları	8
Şekil 4.1. Imperial Valley depremi yatay yön-1 ivme zaman grafiği.....	12
Şekil 4.2. Imperial Valley depremi yatay yön-2 ivme zaman grafiği.....	13
Şekil 4.3. Landers depremi yatay yön-1 ivme zaman grafiği	13
Şekil 4.4. Landers depremi yatay yön-2 ivme zaman grafiği	13
Şekil 4.5. Kocaeli depremi yatay yön-1 ivme zaman grafiği.....	14
Şekil 4.6. Kocaeli depremi yatay yön-2 ivme zaman grafiği.....	14
Şekil 4.7. Tasarım tepki spektrumu	15
Şekil 4.8. Köprü için oluşturulan tasarım tepki spektrumu	18
Şekil 4.9. Deprem kayıtlarının ölçeklendirilmiş spektrumu	20
Şekil 4.10. p-y yöntemi için kullanılan analitik model.....	21
Şekil 4.11. Yanal yüklenmiş bir kazık etrafındaki birim basınç dağılımı	21
Şekil 4.12. Tekrarlı yükler altındaki kazıklar için tam ölçekli deneylerden elde edilmiş p-y eğrileri.....	22
Şekil 4.13. Tekrarlı yükler için sert killerdeki kazıklara ait p-y eğrisi	23
Şekil 4.14. Ac (tekrarlı yükler için) ve As (statik yükler için) sabit değerleri.....	24
Şekil 4.15. Yeşilirmak Köprüsü kazıkları için farklı derinliklere ait p-y eğrileri.....	26
Şekil 4.16. Kazık grubu ve gerilme dağılımı.....	27
Şekil 4.17. Kazık sıraları ve yanal yükün yönü	28
Şekil 4.18. SAP2000 köprü modeli genel görünümü	29

Şekil	Sayfa
Şekil 4.19. SAP2000 köprü modeli elemanların boyutları ile genel görünümü	29
Şekil 4.20. Köprü kolon kesiti	31
Şekil 4.21. Köprü başlık kirişi kesiti.....	31
Şekil 4.22. Köprü üstyapı yüklerinin yayılı olarak yüklenmesi.....	33
Şekil 4.23. Imperial depremi x yönü zaman tanım alanında analiz fonksiyonu tanımlaması.....	34
Şekil 4.24. Imperial depremi y yönü zaman tanım alanında analiz fonksiyonu tanımlaması.....	35
Şekil 4.25. Landers depremi x yönü zaman tanım alanında analiz fonksiyonu tanımlaması.....	36
Şekil 4.26. Landers depremi y yönü zaman tanım alanında analiz fonksiyonu tanımlaması.....	37
Şekil 4.27. Kocaeli depremi x yönü zaman tanım alanında analiz fonksiyonu tanımlaması.....	38
Şekil 4.28. Kocaeli depremi y yönü zaman tanım alanında analiz fonksiyonu tanımlaması.....	39
Şekil 4.29. Imperial depremi yükleme durumu-1	40
Şekil 4.30. Imperial depremi yükleme durumu-2	41
Şekil 4.31. Landers depremi yükleme durumu-1	42
Şekil 4.32. Landers depremi yükleme durumu-2	43
Şekil 4.33. Kocaeli depremi yükleme durumu-1	44
Şekil 4.34. Kocaeli depremi yükleme durumu-2	45
Şekil 4.35. Kazıklara atanan yük deformasyon özellikleri tanımlanmış bağlantı elemanı.....	46
Şekil 4.36. p-y eğrilerine göre belirlenen bağlantı elemanlarının kazıklara yayılı yay olarak atanması	47
Şekil 4.37. Köprü sayısal modelinin deprem yükleri altında deforme görüntüsü	48
Şekil 4.38. LPile program ayarları ve hesap yöntemi seçimi	51

Şekil	Sayfa
Şekil 4.39. LPile kazık kesit tipi seçimi.....	51
Şekil 4.40. LPile kazık geometrik boyutlarının girilmesi.....	52
Şekil 4.41. LPile beton özelliklerinin tanımlanması.....	52
Şekil 4.42. LPile kazık donatı özelliklerinin tanımlanması.....	53
Şekil 4.43. LPile zemin özellikleri tanımlanması.....	53
Şekil 4.44. LPile yazılımındaki kazık yükleme sembolojisi.....	54
Şekil 4.45. Birinci sıra kazıklar için SAP2000 ve LPile moment değerleri.....	56
Şekil 4.46. İkinci sıra kazıklar için SAP2000 ve LPile moment değerleri.....	56
Şekil 4.47. Üçüncü sıra kazıklar için SAP2000 ve LPile moment değerleri.....	57
Şekil 4.48. Birinci sıra kazıklar için SAP2000 ve LPile kesme değerleri.....	57
Şekil 4.49. İkinci sıra kazıklar için SAP2000 ve LPile kesme değerleri.....	58
Şekil 4.50. Üçüncü sıra kazıklar için SAP2000 ve LPile kesme değerleri.....	58
Şekil 4.51. Birinci sıra kazıklar için SAP2000 ve LPile deplasman değerleri.....	59
Şekil 4.52. İkinci sıra kazıklar için SAP2000 ve LPile deplasman değerleri.....	59
Şekil 4.53. Üçüncü sıra kazıklar için SAP2000 ve LPile deplasman değerleri.....	60

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
A_c	Tekrarlı yükler için sabit değer
A_s	Efektif maksimum yatay yer ivmesi
cm	Santimetre
C_{sm}	Elastik sismik tepki katsayısı
c_u	Drenajsız kayma mukavemeti
D	Kazık çapı
F_a	0.2 saniye periyot için yerel zemin etki katsayısı
F_{pga}	Maksimum yatay yer ivmesi katsayısı
F_v	1.0 saniye periyot için yerel zemin etki katsayısı
k_c	Tekrarlı yükler için p-y eğrisinde kullanılan sabit değer
km	Kilometre
kN	Kilonewton
kPa	Kilopascal
L	Kazık boyu
m	Metre
M	Moment
mm	Milimetre
MPa	Megapascal
N_{ort}	Ortalama standart penetrasyon sayısı
p	Yanal zemin direnci
P_c	Kazık maksimum zemin direnci
P_m	Kazık grupları için zemin direnci çarpanı
PGA	Maksimum yer ivmesi
s	Saniye
S_1	1.0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı
S_a	Tepki spektrumu ivme katsayısı
S_{D1}	1.0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı

Simgeler	Açıklamalar
S_{Ds}	Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı
S_s	Kısa periyot harita spektral ivme katsayısı
T	Periyot
T₀	Sabit tasarım spektrum ivme bölgesinin ilk periyodu
T_m	m moduna ait periyot
T_s	Sabit tasarım spektrum ivme bölgesinin son periyodu
V	Kesme kuvveti
v_s	Kesme dalga hızı
y	Deplasman
y₅₀	p-y eğrilerinde tanımlanmış belirli deplasman değeri
y_p	p-y eğrilerinde tanımlanmış belirli deplasman değeri
z	Derinlik
γ'	Zemin efektif birim hacim ağırlığı
ε₅₀	Zeminin gerilme farkının yarısındaki eksenel gerinim

Kısaltmalar	Açıklamalar
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
LRFD	Load and Resistance Factor Design
PEER	The Pacific Earthquake Engineering Research Center
SPT	Standart Penetrasyon Testi

1. GİRİŞ

Köprüler ulaşım ağlarında önemli bir yere sahiptir. Karayolu ve demiryolu köprü temelleri, yüksek düşey ve yatay yüklere maruz kaldıklarından dolayı çoğunlukla kazıklı temele sahip olacak şekilde tasarlanmaktadır. Köprülerin temelindeki kazıklar, üstyapıdan gelen yükleri daha derinde bulunan sağlam zemine veya kaya birimlere aktarmaktadır.

Sismik yükler altındaki kazıkların davranışları karmaşık bir zemin-yapı etkileşimi davranışı olup, deprem bölgelerindeki yapıların bütünlüğünü etkileyebilmektedir. Kazıklı temeller, deprem esnasında ve hemen öncesinde büyük hasar görebilmektedir (Chatterjee, Choudhury ve Poulos, 2015).

Kazıklardaki yanal yüklerin zemine aktarılması zemin-yapı etkileşimi ile ilgili bir problem olup, zemin direnci kazıkların hareketlerine bağlı iken, kazıklardaki hareketler ve oluşan tesirler ise zemin direncine bağlıdır. Bu sebeple kazıklı temel analizleri geoteknik ve yapısal yönleri ile yapay olarak ayrılamaz (Coduto,1994).

Deprem esnasında oluşan deprem dalgaları, deprem kaynağından çıktıktan sonra yapının bulunduğu zemini ve kazıklı temeli etkilemektedir. Kazıklı temelin titreşimi ile yapı salınımı oluşmakta ve bu salınım tekrardan temele etki ederek kazıklar üzerindeki yükleri değiştirmektedir. Deprem esnasında zemin tepkisinin yapı hareketini, yapı tepkisinin ise zemini etkilediği durum, literatürde zemin-yapı etkileşimi olarak isimlendirilir (Siyahi, Cetin ve Bilge, 2013).

Özellikle deprem bölgelerinde tasarlanacak köprüler için sismik yüklerin kazıklara olan etkisi büyük tesir kuvvetleri oluşturduğundan kazık tasarımı önem kazanmaktadır. Köprü tasarımında genelde önce yapı mühendisi köprüyü modellemekte ve temelde oluşan yükleri geoteknik mühendisine iletmektedir. Geoteknik mühendisi ise elde edilen yüklere göre kazık tasarımını yapmaktadır. Fakat bu durumda modellemeler ayrı yapıldığında, zemin-kazık-yapı etkileşimi çoğunlukla göz ardı edilmektedir.

Zemin-kazık-yapı etkileşimi analizi, sonlu elemanlar yöntemi ile analiz yapabilen yazılımlarda, kazıklı temel, üstyapı ve doğrusal olmayan zemin özellikleri tanımlanarak

bütün bir modelleme ile yapılabilmektedir.

Bu çalışmada, Samsun ilinde yer alan bir karayolu köprüsü olan Yeşilırmak Köprüsü modelleme çalışması için seçilmiştir. Köprüye sismik yükler etki ettirilerek kazıklar analiz edilmiştir. Sismik yükler hesaplanırken zaman tanım alanında hesap yöntemi kullanılmıştır. Zaman tanım alanında hesap yöntemi kullanılırken saha koşullarına uygun olacak şekilde deprem kayıtları bulunmuş ve tasarım tepki spektrumu ile uyumlu olacak şekilde ölçeklenmiştir. Ölçeklenirken kullanılan katsayılardan ötürü zemin büyütme analizine gerek duyulmamıştır. Zeminin doğrusal olmayan özellikleri ise p-y yöntemi ile hesaplanarak kazıklara atanan doğrusal olmayan yaylar ile tanımlanmıştır. Doğrusal olmayan ve zaman tanım alanında deprem analizi için SAP2000 yazılımı kullanılmıştır. Köprü temellerindeki her bir sıra kazık için tek kazıklar LPile yazılımı ile modellenerek kazıklardaki tesirler SAP2000 analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Geçmişte yapı-zemin ilişkisi ve kazıklardaki yanal yük etkisi altında zemin davranışını incelemek amaçlı birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların bir kısmında zemin elastik ve doğrusal olarak kabul edilmiş olup bir kısmında ise zeminin doğrusal olmayan davranış sergilediği varsayılmış ve bu doğrultuda zemin özelliklerini belirlemeye yönelik çalışmalar yapılmıştır.

Winkler (1867), zeminin yük ve deplasman ilişkisinin zemin yatak modülü vasıtası ile oluşturulan birbirine yakın ve bağımsız yaylar ile tanımlanarak idealize edilebileceğini belirtmiş, pratik bir çözüm olarak zeminin doğrusal davrandığı bir model oluşturmuştur. Bu yöntem basit ve pratik olmakla birlikte zeminin gerçekte doğrusal olmayan davranışından dolayı zemin-yapı ilişkisini tamamen doğru olarak tanımlayamamaktadır.

McClelland ve Focht (1956), ilk defa zemin direnci-deplasman eğrisi olan p-y eğrisini ortaya koymuştur. Doğrusal olmayan p-y eğrileri yardımıyla derinliğe bağlı zemin yatak katsayısı elde edilmesi amaçlanmıştır. McClelland ve Focht (1956), laboratuvar ortamında örselenmemiş kil ve yanal yüklenmiş boru kazık kullanarak kazık reaksiyonları için yatak katsayısı hesaplamaya yönelik bir prosedür ortaya koymuş ve korelasyon elde etmişlerdir.

Matlock ve Reese (1960), yanal yüklü kazıklardaki problemlere rasyonel çözümler bulmak amacıyla zeminin doğrusal olmayan yük-deformasyon karakterini ortaya koymayı amaçlamıştır. Farklı derinliklerde değişen zemin yatak katsayısı göz önünde bulundurularak zeminin yapı-kazık-zemin sisteminde tatmin edici bir uyum elde edilene kadar zemin yatak katsayısında düzeltme yapmışlardır. Yapılan çalışmalar sonucunda elastik kazık ve rijit kazık teorisi için basit denklemler verilmiştir.

Davisson ve Gill (1963), iki tabakalı sistemin yanal yüklü kazıkların davranışlarına olan etkisini analitik olarak incelemek amaçlı çalışma yapmışlardır. Zeminin rijitliğini tanımlamak için zemin yatak katsayısı kullanılmış olup, yüzeydeki tabakanın rijitliği alttaki tabakaya göre tanımlanmıştır. İki tabakanın göreceli rijitliği ve göreceli kalınlığı araştırılmış ve zemin-kazık etkileşimi üzerine etkileri ortaya koyulmuştur.

Broms (1965), yanal yüklü kazıklar için, kısa kazıklarda zemindeki kayma göçmesi varsayımı, uzun kazıklarda ise eğilme sonucu plastik yenilme varsayımını kullanarak kazıklardaki tesirler ve dayanımlar için basitleştirilmiş çözümler üretmiştir. Bu çözümler, kil ve kumda yer alan başlıklı ve başlıksız kazıklar için ayrı ayrı verilmiştir.

Poulos (1971) tarafından yanal yüklenmiş tek kazık için elastik bir çözüm ortaya koyulmuştur. Poulos (1971), zemini elastik ve homojen olarak kabul etmiştir. İnce, dikdörtgen ve yükseklik boyunca sabit zemin basıncının etki ettiği bir kazık modellenmiştir. Winkler (1867) tarafından kurulan modelden farklı olarak Mindlin Plaka Teoremi kullanarak zemin davranışını tanımlanmış ve Winkler (1867) modeli ile sonuçları karşılaştırmış ve elastik teori üzerine kurulmuş modelinde Winkler (1867) modelinden daha düşük kazık deplasman değerleri elde edilmiştir.

Meyer ve Reese (1979), COM623 sonlu farklar bilgisayar yazılımını kullanarak yanal yüklü kazıklar üzerinde çalışma yapmıştır. Meyer ve Reese (1979), kil ve kumda yapılan yanal kazık yükleme deneyleri ile mevcut p-y yöntemleri kullanılarak elde edilmiş sonuçları karşılaştırmıştır.

Bazı araştırmacılar, kazıkların sayısal modelleri doğrultusunda analiz yaparak yanal yüklemeler altında elde edilen sonuçlar ile kazık ve kazık gruplarının davranışlarını incelemişlerdir.

Greimann, Wolde-Tinsae ve Yang (1987) integral bir köprü kenar ayağındaki kazık-zemin etkileşimini ve kazık gerilmelerini incelemek için doğrusal olmayan yöntemlere uygun olacak şekilde bir algoritma geliştirmişlerdir. Numerik örnekler ile sonlu elemanlar yönteminin ve bilgisayar yazılımının güvenilirliği doğrulamışlardır.

Selby ve Arta (1991) sonlu elemanlar yöntemi ile yanal yük altındaki kazık gruplarının üç boyutlu analizini yapmışlardır. Kazıklar arasındaki mesafesi ve temel gömülme mesafesi değiştirilerek kazıklar üzerindeki etkiler gözlemlenmiştir. Analizler sonucu kazıklar arasındaki mesafe arttığında kazıkların grup rijitliğinin arttığı sonucuna varılmıştır.

Wu ve Finn (1997) deprem yükleri altındaki tek kazık ve kazık gruplarının doğrusal olmayan dinamik analizini yapmak için PILE-3D yazılımını kullanmışlardır. Üç boyutlu çalışma

yaparak deprem yüklerini zaman tanım alanı analizi ile uygulamışlardır. Yapılan çalışmada titreşim seviyesi ile kazıklı temelin rijitliği azaldığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca sismik olaylarda, zeminin kayma-gerilme rijitliğine bağlı olarak, kazıklardaki ötelenme rijitliği azalmaktadır.

Duncan ve Arsoy (2003) integral köprülerdeki kazık başlarında oluşan yatay deplasman sonucu kenar ayak, yaklaşım dolgusu, temel ve kazıklar arasındaki karmaşık etkileşimi incelemek amaçlı Sage ve LPile yazılımlarını kullanarak sonlu elemanlar yöntemi ile analiz yapmışlardır. Yapılan analizler sonucu bu etkileşimin kazıklar üzerinde olumlu etkisi olduğu ortaya çıkmıştır. Bu etkileşimler neticesinde zeminin daha yumuşak davranış sergiledikleri ve bu durumun kazıklardaki kesme ve moment değerlerini azalttığı görülmüştür.

Zhu (2003) tarafından yapılan çalışmada yanal yük etkisi altındaki köprü kazıkları için mekanik model kurularak, sonlu farklar yöntemi kullanılarak kazıkların dinamik tepkileri analiz edilmiştir. Yapılan analiz sonucunda yapı tipi ve kazığın narinlik oranı, yatay titreşimi kazık-zemin sertliğine kıyasla daha çok etkilediği ortaya çıkmıştır.

Maheshwari, Truman, Naggar ve Gould (2004), zeminin doğrusal olmayan davranışını ve zemin-kazık arayüzüne bağlı olarak tek bir kazığın ve kazık gruplarının dinamik davranışlarını incelemişlerdir. Kinematik yükleme ile yapılan analizler sonucu doğrusal ve doğrusal olmayan fonksiyonlar ile kazıktaki etkileşimin sonuçları karşılaştırılmıştır. Zeminin doğrusal olmayan davranışının dinamik rijitliği azalttığı belirtilerek kazık grupları için doğrusal olmayan zemin davranışının da grup rijitliğini azalttığı sonucuna varılmıştır.

Chen (2014) kablo askılı iki açıklıklı bir köprüyü üç boyutlu sonlu elemanlar yazılımı olan Midas / Civil ile modelleyerek kazık-zemin-yapı etkileşiminin göz önüne alındığı ve alınmadığı iki durum için sismik davranışını analiz etmiştir. Yapılan çalışma sonucunda kazık-zemin etkileşiminin göz önüne alındığı durumda köprü rijitliğinin azaldığı ve deplasmanların azaldığı sonucuna varılmıştır.

Khodair ve Abdel-Mohti (2014) tarafından yapılan çalışmada eksenel ve yanal yüklere maruz kalan kazıklar için sayısal analiz yapılmıştır. Kazıklar için SAP2000 ve Abaqus/Cae yazılımları ile iki ve üç boyutlu sonlu elemanlar modeli kurularak kil içerisindeki kazığın kazık-zemin etkileşimi analiz edilmiştir. Bu çalışmada üst yapı ve temel modellenmeden

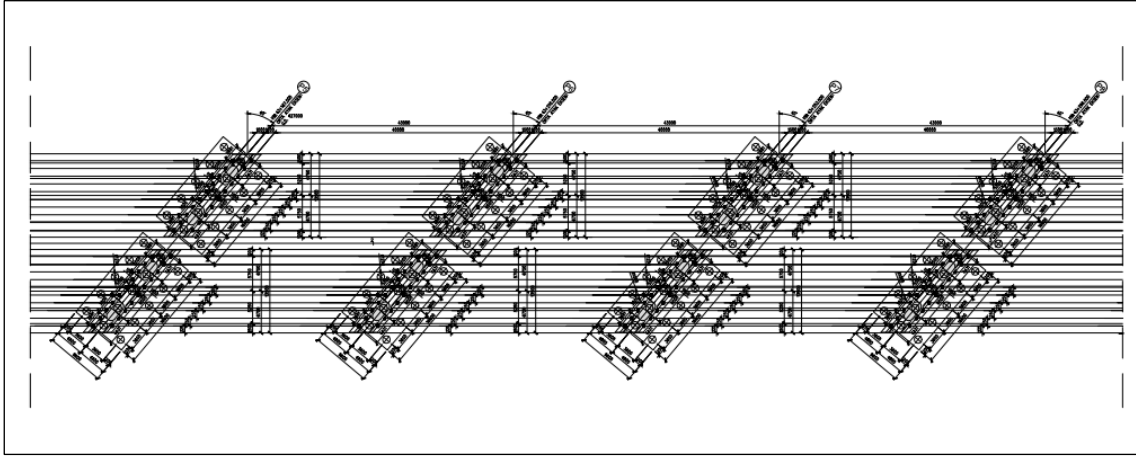
sadece kazıklar modellenmiştir. SAP2000 yazılımında kazıklara atanan yayların sayısını artırarak ve Abaqus/Cae yazılımında kazık etrafında göz önüne alınan zemin genişliğini artırarak sonuçları kıyaslamışlardır. Yapılan analizler sonucunda Abacus/Cae yazılımındaki modelde kazık etrafındaki zemin genişliğinin artırılması sonucu kazıkta oluşan moment tesirinin ve deplasmanın azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca SAP2000 programında kazıklara atanan yayların sayısının artırılması durumunda daha doğru moment ve yanal deplasman sonuçlarına ulaşıldığı ortaya çıkmıştır.

Chatterjee ve diğerleri (2015) sonlu elemanlar yöntemi kullanarak deprem esnasında tek bir kazık üzerindeki moment ve deplasman miktarını hesaplayacak analitik bir yöntem önermişlerdir. Önerilen bu yöntemin geçerliliğini dinamik test sonuçları ile değerlendirmişlerdir. Yapılan çalışmalarda kazık uzunluğunun çapına olan oranının, düşey yükün, sismik yük karakterlerinin ve yatay yük katsayısının sonuçlara etkisi irdelenmiştir. Yapılan analizler sonucu depremin maksimum ivmesinden ziyade süresinin ve frekansının kazıklar üzerinde daha çok etkisi olduğu tespit edilmiştir. Kazığa etki eden düşey yükün artmasının, kazıktaki deplasman ve moment değerlerini artırdığı görülmüştür. Kazık uzunluğunun sabit kaldığı ve kazık çapının arttığı durumda ise kazıklar üzerindeki deplasmanın azaldığı fakat normalleştirilmiş momentin arttığı tespit edilmiştir.

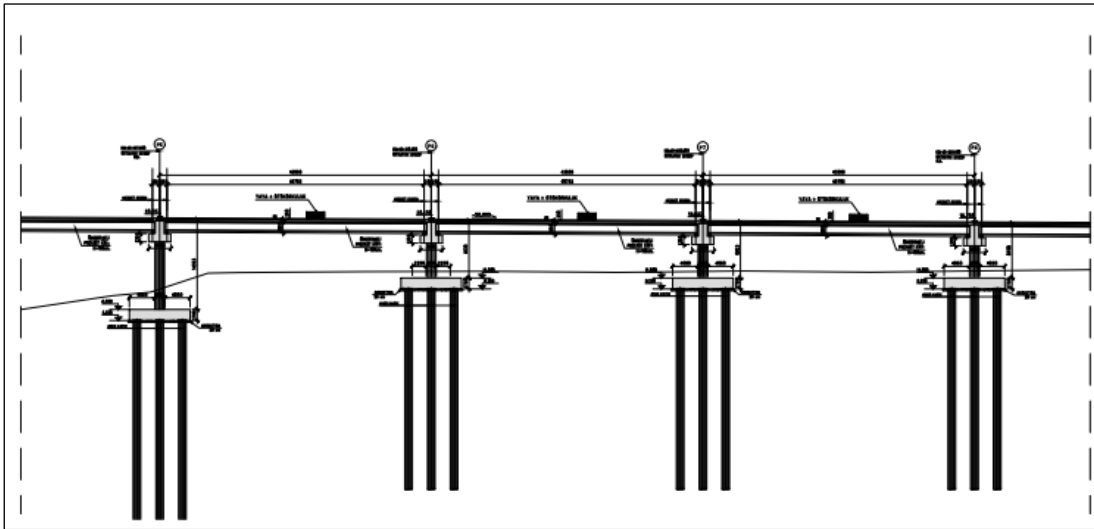
Sarıca, Askan ve Caner (2016), Türkiye'deki deprem kayıtlarından faydalanarak oluşturulan yeni bir tasarım spektrumu ile AASHTO tarafından önerilen tasarım spektrumları arasındaki farkları ortaya koymak için bir çalışma yapmışlardır. Seçilmiş köprüleri LARSA 4D sonlu elemanlar programı ile modelleyerek, tasarım tepki spektrumu ve lineer zaman tanım alanında analiz yöntemi ile analiz etmişlerdir. Analizler sonucunda AASHTO tasarım spektrumunun, küçük-orta moment magnitüd seviyelerinde daha güvenli tarafta kaldığı gözlenmiş fakat en yüksek moment magnitüd aralığı göz önüne alındığında, sahaya bağlı tepki spektrumunun, AASHTO tasarım tepki spektrumuna göre daha yüksek yapısal tesirlere yol açtığı sonucuna varılmıştır.

3. ANALİZİ YAPILAN KÖPRÜNÜN TARİFİ

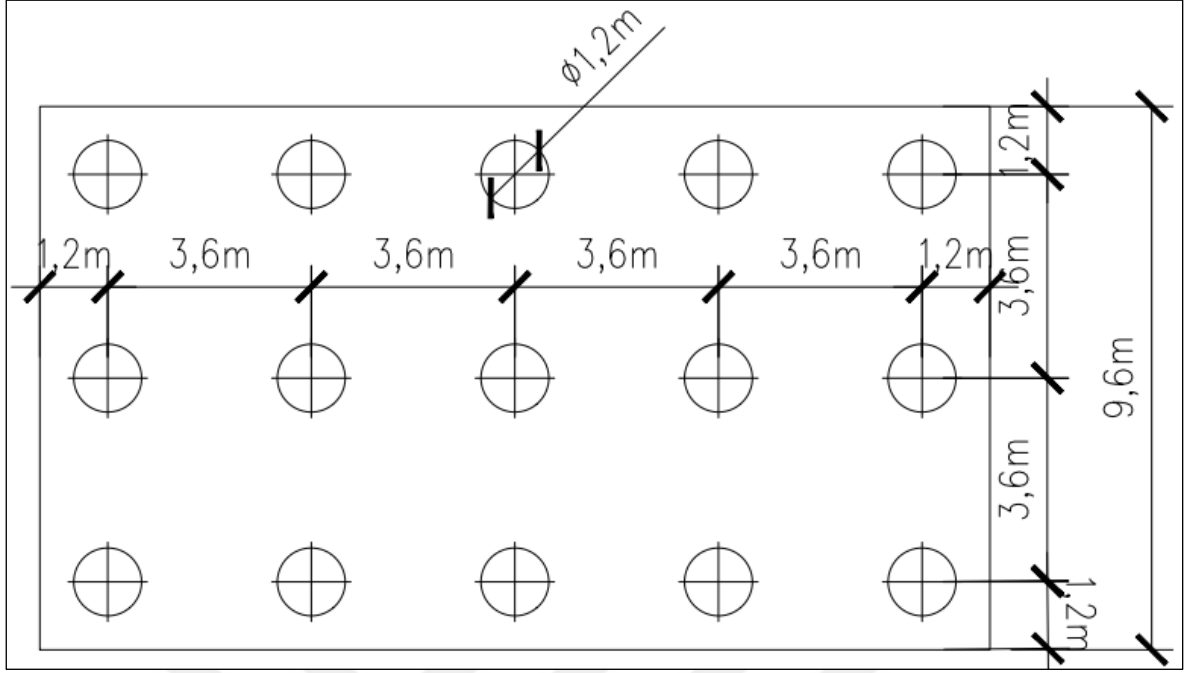
Analizi yapılan köprü bir Samsun ili Çarşamba ilçesinde Yeşilirmak Nehri üzerinde projelendirilmiş bir karayolu köprüsü olup 10 açıklıklıdır ve köprü üstyapısı öngermeli prekast kirişlerden oluşmaktadır. Açıklıklar 40,70 metre uzunluktadır. Her bir köprü orta ayağı kazıklı temele sahiptir. İnceleme konusu orta ayak temelinde 15 adet 1,20 m çapında boyları (L) 34 m olan fore kazık bulunmaktadır. Köprüde her üç açıklıkta bir genişleme derzi kullanılmıştır. Sismik analiz için modellemede iki genişleme derzi arasındaki kesim dikkate alınmıştır. Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’de analizi yapılan köprünün plan ve profilleri gösterilmiştir. Ayrıca köprü temelindeki kazıkların yerleşimi Şekil 3.3’te verilmiştir.



Şekil 3.1. Analizi yapılan köprünün planı (Temelsu Uluslararası Müh. Hiz. A.Ş., 2016)

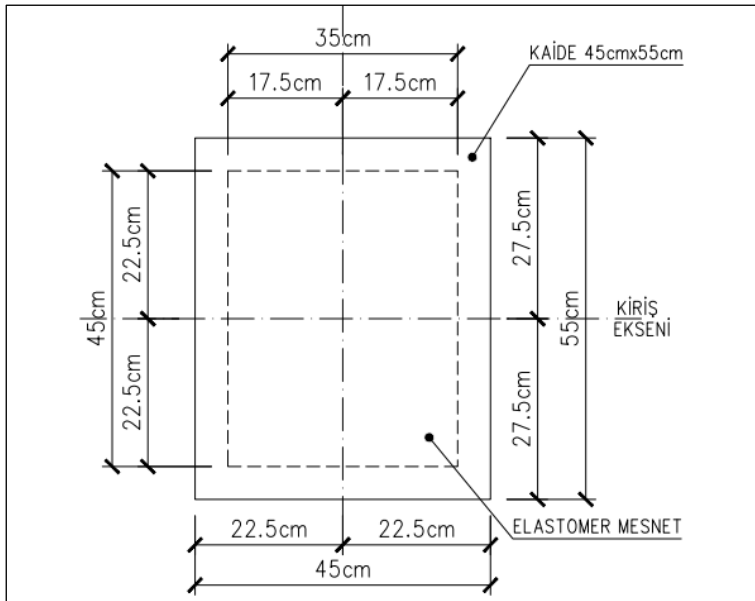


Şekil 3.2. Analizi yapılan köprünün profili (Temelsu Uluslararası Müh. Hiz. A.Ş., 2016)



Şekil 3.3. Analizi yapılan köprünün orta ayak temel planı ve kazık yerleşimi (Temelsu Uluslararası Müh. Hiz. A.Ş., 2016)

Köprünün üstyapısı 1,80 m yüksekliğinde kirişlerden oluşmakta olup, üstyapı ağırlığının fazla olması sebebiyle yüksek deprem etkisine maruz kalmaktadır. Köprü kirişleri elastomer mesnetler üzerine oturmaktadır ve oluşacak deprem etkisinin sönümlenmesinde elastomer mesnetlerin önemli bir etkisi bulunmaktadır. Elastomer mesnet boyutları Şekil 3.4.'te verilmiştir.



Şekil 3.4. Analizi yapılan köprünün elastomer mesnet boyutları

Köprünün analiz yapılan orta ayak bölgesinde yapılmış olan 30,00 m derinliğindeki KSK-10 numaralı sondajda, yaklaşık 0,40 m bitkisel toprak sıyrmasından sonra 8,60 m'ye kadar orta katı, açık kahverenkli, düşük orta plastisiteli kil, 8,60-29,30 m aralığında çok katı-sert, açık kahverenkli, yüksek plastisiteli kil, 29,30-30,00 m aralığında sıkı kahverenkli, nemli, ince taneli kum birimine rastlanılmıştır. Sondajın karot verimi %50-100 aralığında değişmektedir. Sondajda ölçülen yeraltı suyu düzeyi 4,20 m'dir (Temelsu Uluslararası Müh. Hiz. A.Ş., 2016). Sondajda yapılan SPT deneylerinin özeti Çizelge 3.1'de verilmiştir. Ayrıca KSK-10 numaralı sondaja ait laboratuvar deney sonuçları Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. KSK-10 numaralı sondaja ait SPT deney sonuçları (Temelsu Uluslararası Müh. Hiz. A.Ş., 2016)

KSK-10					
Manevra Boyu (m)	Standart Penetrasyon Deneyi				
	Darbe Sayısı				
	0-15 cm	15-30 cm	30-45 cm	SPT-N	SPT-N ₆₀
1,50-1,95	3	4	4	8	6,0
3,50-3,95	7	5	5	10	7,5
4,50-4,95	6	7	9	16	12,0
6,00-6,45	5	8	10	18	13,5
7,50-7,95	7	7	10	17	12,8
9,50-9,95	5	7	11	18	13,5
10,50-10,95	8	11	13	24	18,0
12,10-12,55	9	12	14	26	19,5
13,50-13,95	9	10	12	22	16,5
15,50-15,95	9	12	17	29	21,8
16,50-16,95	10	12	16	28	21,0
18,50-18,95	10	11	19	30	22,5
19,50-19,95	11	13	17	30	22,5
21,30-21,75	13	16	21	37	27,8
22,50-22,95	9	11	17	28	21,0
24,25-24,70	12	18	21	39	29,3
25,50-25,95	13	17	22	39	29,3
27,00-27,45	11	14	19	33	24,8
28,50-28,95	10	13	17	30	22,5

Çizelge 3.2. KSK-10 numaralı sondaja ait laboratuvar deney sonuçları (Temelsu Uluslararası Müh. Hiz. A.Ş., 2016)

Numune No	Derinlik (m)	Doğal Birim Hacim Ağırlık (g/cm ³)	Kuru Birim Hacim Ağırlık (g/cm ³)	Elek Analizi		Atterberg Limitleri			Zemin Sınıfı USCS	Üç Eksenli Basınç (UU)		Konsolidasyon Deneyi	
				No. 4 Kalan (%)	200 Geçen (%)	LL (%)	PL (%)	PI (%)		c (kPa)	Φ (°)	Şişme Yüzdesi (%)	Şişme Basıncı (kgf/cm ²)
SPT-1	1,50	-	-	1,4	63,3	40,9	22,3	18,6	CL	-	-	-	-
UD-1	3-3,5	-	-	1,1	70,5	41,2	23,3	17,9	CL	-	-	-	-
SPT-3	4,50	-	-	2,0	64,1	40,7	21,4	19,3	CL	-	-	-	-
SPT-4	6,00	-	-	1,2	61,7	42,9	24,1	18,8	CL	-	-	-	-
SPT-5	7,50	-	-	2,2	60,9	43,1	21,9	21,2	CL	-	-	-	-
UD-2	9,00-9,50	18,54	14,05	0,0	94,8	71,1	26,5	44,6	CH	71,21	9,00	1,94	20,228
SPT-7	10,50	-	-	0,4	76,2	61,0	25,4	35,6	CH	-	-	-	-
SPT-8	12,00	-	-	0,0	97,0	72,4	28,2	44,2	CH	-	-	-	-
SPT-9	13,50	-	-	0,0	95,9	68,0	26,1	41,9	CH	-	-	-	-
UD-3	15,00-15,50	-	-	0,0	97,0	61,7	29,2	32,5	CH	-	-	-	-
SPT-11	16,50	-	-	0,0	95,0	79,8	27,2	52,6	CH	-	-	-	-
SPT-12	18,00	-	-	1,5	81,6	81,9	30,3	51,6	CH	-	-	-	-
SPT-13	19,50	-	-	0,0	91,1	66,2	25,2	41,0	CH	-	-	-	-
SPT-14	21,00	-	-	1,4	71,8	46,3	25,7	20,6	CL	-	-	-	-
SPT-15	22,50	-	-	1,4	82,3	56,2	27,5	28,6	CH	-	-	-	-
UD-7	24,00-24,50	18,10	13,83	0,0	84,5	76,5	29,8	46,6	CH	60,86	9	2,18	23,724
SPT-17	25,50	-	-	4,7	61,1	38,0	20,7	17,3	CL	-	-	-	-
SPT-18	27,00	-	-	0,2	86,6	56,5	26,3	30,2	CH	-	-	-	-
SPT-19	28,50	-	-	1,5	61,3	46,1	21,3	24,8	CL	-	-	-	-

4. YAPILAN ÇALIŞMALAR

4.1. Deprem Yüklerinin Oluşturulması

4.1.1 Zaman tanım alanında hesap yöntemi

Deprem yükleri hesaplanırken zaman tanım alanında hesap yöntemi kullanılmıştır. Zaman tanım alanında hesap yöntemi, daha önce kaydedilmiş deprem yer hareketlerini kullanarak yapay yer hareketi oluşturmak ve bu hareketi yapı modeli üzerine etki ettirerek doğrusal veya doğrusal olmayan deprem analizi yapmaya olanak sağlamaktadır. Genelde özel köprüler için kullanılan bu hesap yöntemi tasarım yapan mühendisin aşırı güvenli tarafta kalmasını önlemektedir. Zaman-tanım alanında analiz yöntemi kullanılırken AASHTO LRFD Sismik Köprü Tasarımı için Kılavuz Şartname (2011) referans alınmıştır.

4.1.2. Deprem kayıtlarının seçimi

Daha önce kayıt altına alınmış deprem hareketleri kullanılarak tepki spektrumuna uyumlu olacak şekilde deprem hareketleri oluşturulmaktadır. Seçilen deprem kayıtları tepki spektrumuna uygun olacak şekilde ölçeklendirilmelidir. Köprülerin doğrusal olmayan ve elastik olmayan modelinde dinamik yer hareketini uygulamak için, tepki spektrumuna uygun olacak şekilde en az üç adet deprem kaydı kullanılmalıdır (AASHTO, 2011).

Deprem ivme kayıtlarının elde edilmesinde Pasifik Deprem Mühendislik Araştırma Merkezi (PEER) (2019) veri tabanı olarak kullanılmıştır. Deprem kayıtlarının seçilmesinde fay tipi, sismik kaynağın proje bölgesine olan uzaklığı ve proje sahası koşulları göz önünde bulundurulmuştur. Deprem kaydı araştırmasında kullanılan parametreler Çizelge 4.1'de verilmiştir. AASHTO (2011) şartnamesine göre SPT değerlerinin 15 - 50 arasında olması sebebiyle kayma dalgası hızı, V_{s30} değeri 182-365 m/s değerleri arasında arama yapılmıştır.

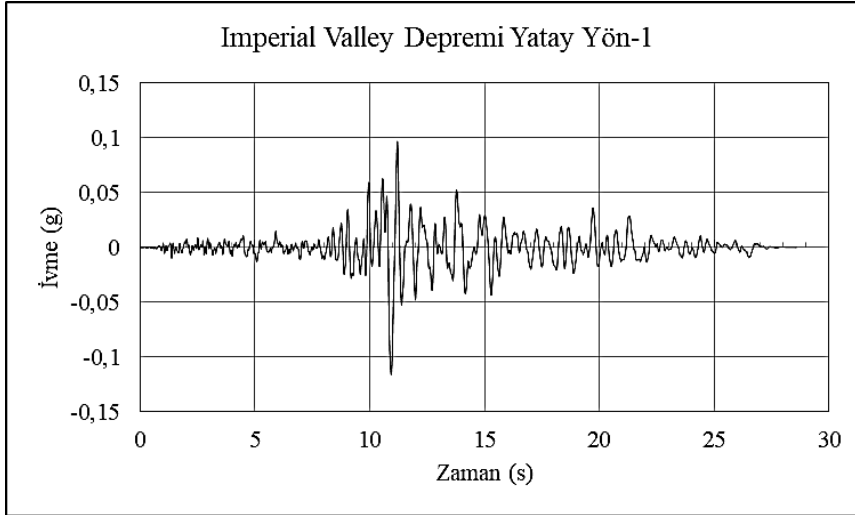
Çizelge 4.1. Deprem kayıtları taranırken kullanılan değerler

Fay Tipi	Yanal Atım
Magnitüd	6-8
Fay Kırığına Olan Uzaklık (km)	50-55
Dalga Hızı, V_{s30} (m/s)	182-365

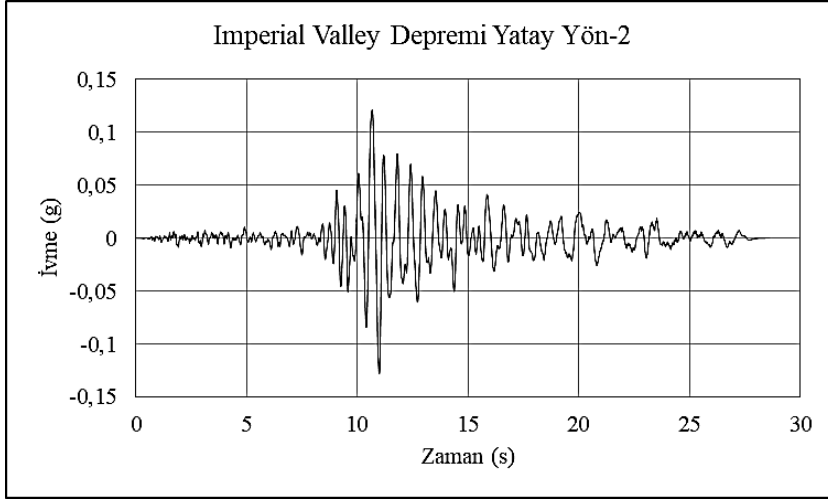
Belirlenen deprem özelliklerine göre uygun olarak PEER veri tabanında bulunan deprem kayıtları Çizelge 4.2’de verilmektedir. Ayrıca deprem kayıtlarına ait ivme-zaman grafikleri Şekil 4.1-4.6’da verilmiştir.

Çizelge 4.2 Seçilen deprem kayıtlarının özeti

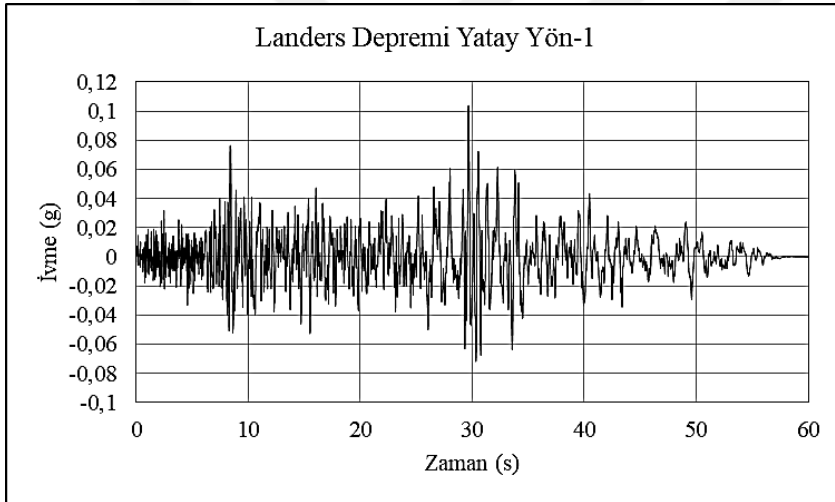
Numara	Deprem Adı	Yıl	Deprem Şiddeti	Fay
1	Imperial Valley	1979	6,53	Yanal Atım
2	Landers	1992	7,28	Yanal Atım
3	Kocaeli	1999	7,51	Yanal Atım



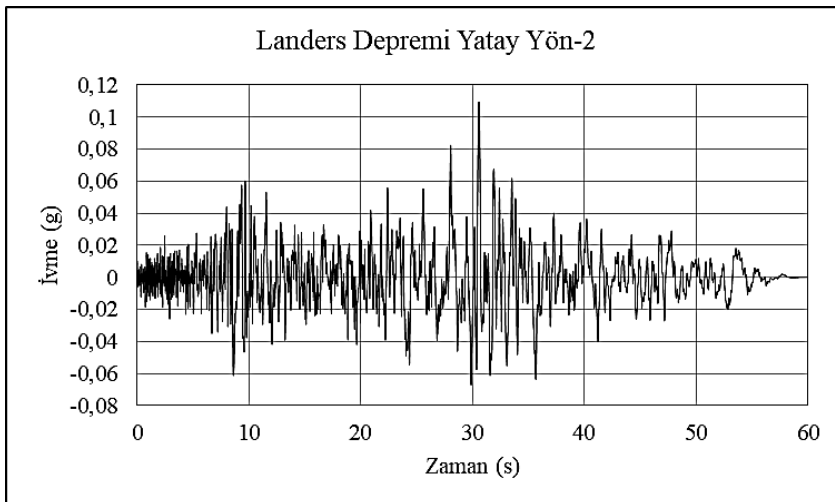
Şekil 4.1. Imperial Valley depremi yatay yön-1 ivme zaman grafiği



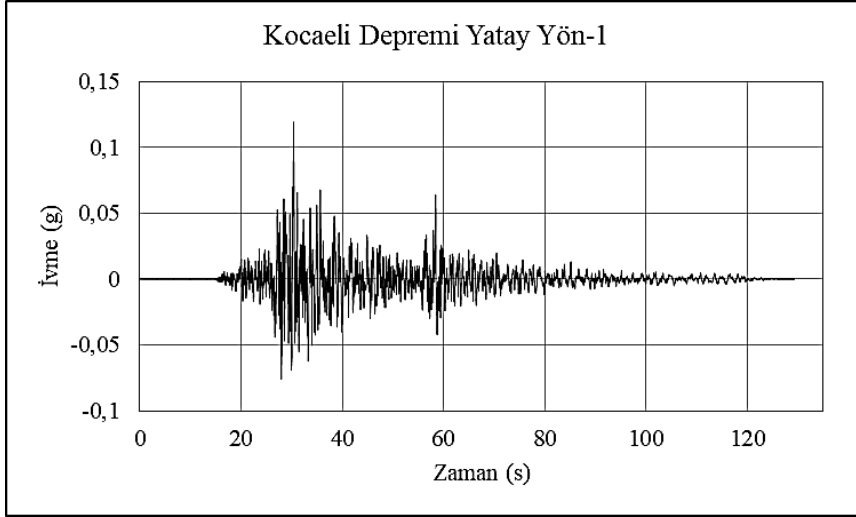
Şekil 4.2. Imperial Valley depremi yatay yön-2 ivme zaman grafiği



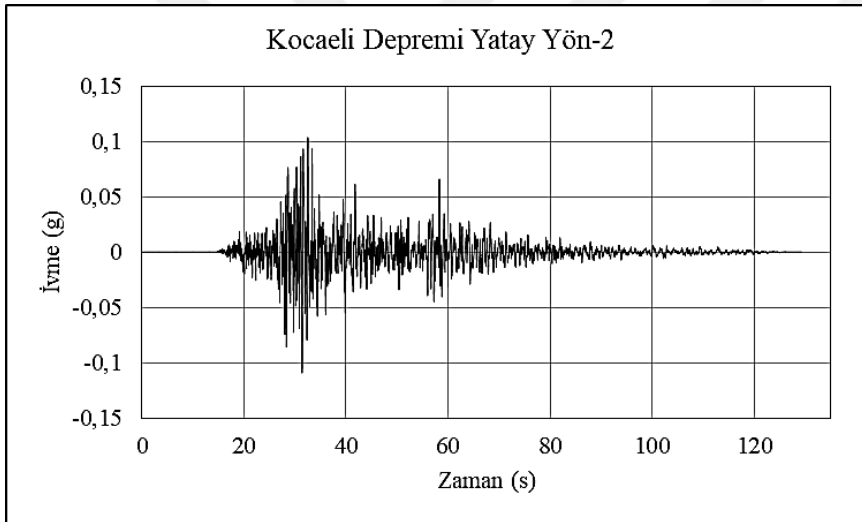
Şekil 4.3. Landers depremi yatay yön-1 ivme zaman grafiği



Şekil 4.4. Landers depremi yatay yön-2 ivme zaman grafiği



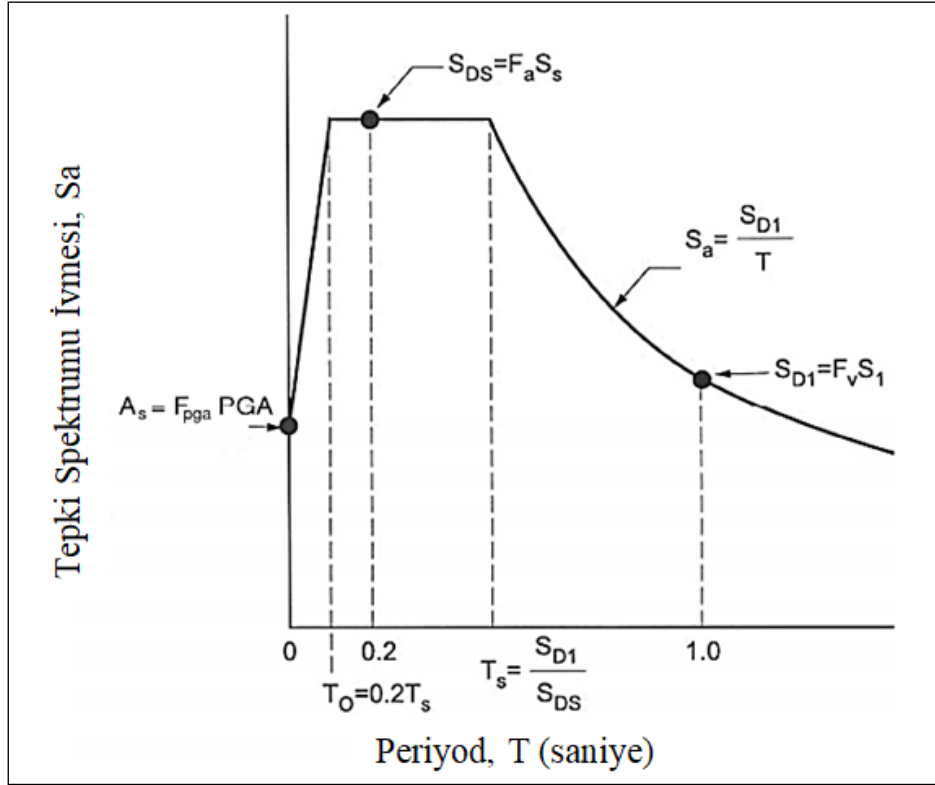
Şekil 4.5. Kocaeli depremi yatay yön-1 ivme zaman grafiği



Şekil 4.6. Kocaeli depremi yatay yön-2 ivme zaman grafiği

4.1.3. Deprem kayıtlarının ölçeklendirilmesi

Elde edilen deprem kayıtları tasarım spektrumuna uyumlu olacak şekilde AASHTO (2011)'da belirtilen şekilde ölçeklenmelidir. Bu nedenle önce tasarım tepki spektrumu oluşturulmalıdır. AASHTO (2011) şartnamesine uygun tasarım tepki spektrumu Şekil 4.7'de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Tasarım tepki spektrumu (AASHTO,2011)

Tepki spektrumunu oluşturmak amaçlı ilk önce zemin sınıfı belirlenmiştir. AASHTO (2011) şartnamesine göre seçilecek zemin sınıfına ait özellikler Çizelge 4.3'te verilmiştir. Köprü ayak bölgesinde yapılan laboratuvar deneyleri sonucu kayma dayanımı, C değerlerinin 71,21 kPa ve 60,86 kPa olması ve SPT N değerlerinin 8-39 arasında değişmesi sebebiyle zemin sınıfı D seçilmiştir.

Çizelge 4.3. AASHTO (2011) şartnamesine göre zemin sınıflandırması

Zemin Sınıfı	Zemin Tipi ve Profili
A	Sert Kaya (Kesme dalga hızı, $v_s > 1524$ m/sn)
B	Kaya (Kesme dalga hızı, 762 m/sn $< v_s < 1524$ m/sn)
C	Çok sıkı zemin ve ayrılmış kaya (365 m/sn $< v_s < 762$ m/sn yada $N_{ort} > 50$ yada $C_u > 95$ kPa)
<u>D</u>	<u>Sert zemin (182 m/sn $< v_s < 365$ m/sn yada $15 < N_{ort} < 50$ yada 47 kPa $< C_u < 95$ kPa)</u>
E	Zemin ($v_s < 182$ m/sn yada $N_{ort} < 15$ yada $C_u < 47$ kPa)
F	Organik zemin, yüksek plastisiteli kil, kalın yumuşak/orta yumuşak kil tabakası

Maksimum yer ivmesi (PGA) Türkiye Deprem Tehlike Haritaları (2019) verilerine göre köprünün bulunduğu bölgeye uygun olacak şekilde 0.209 olarak belirlenmiştir. AASHTO (2011) şartnamesine göre F_a değeri Çizelge 4.4'te belirtildiği üzere 1,4 olacak şekilde belirlenmiştir.

Çizelge 4.4. AASHTO (2011) şartnamesine göre F_a ve F_{pga} değeri

Zemin Sınıfı	PGA \leq 0,10 Ss \leq 0,25	PGA = 0,20 Ss = 0,50	PGA = 0,30 Ss = 0,75	PGA = 0,40 Ss = 1,00	PGA \geq 0,50 Ss \geq 1,25
A	0,80	0,8	0,8	0,8	0,8
B	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
C	1,2	1,2	1,1	1,0	1,0
D	1,6	<u>1,4</u>	1,2	1,1	1,0
E	2,5	1,7	1,2	0,9	0,9
F	-	-	-	-	-

Türkiye Deprem Tehlike Haritaları (2019) verilerine göre S_1 değeri 0,174, S_s değeri ise 0,488 olarak belirlenmiştir ve buna göre F_v değeri 2,10 olarak seçilmiştir. AASHTO (2011) şartnamesine göre F_v değerleri Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.5. AASHTO (2011) şartnamesine göre F_v değeri

Zemin Sınıfı	$S_1 \leq$ 0,1	$S_1 =$ 0,2	$S_1 =$ 0,3	$S_1 =$ 0,4	$S_1 \geq$ 0,5
A	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
B	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
C	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3
D	<u>2,4</u>	<u>2,0</u>	1,8	1,6	1,5
E	3,5	3,2	2,8	2,4	2,4
F	-	-	-	-	-

AASHTO (2011) şartnamesine uygun olacak şekilde oluşturulacak tepki spektrumu için gerekli hesaplamalar yapılmıştır. T_0 'dan küçük olan periyotlar için elastik sismik tepki katsayısı, C_{sm} Eşitlik 4.1'deki gibi hesaplanmaktadır. A_s ve S_{ds} hesaplaması Eşitlik 4.2 ve 4.3'te verilmiştir.

$$C_{sm} = A_s + (S_{DS} - A_s) \left(\frac{T_m}{T_0} \right) \quad (4.1)$$

$$A_s = F_{pga} PGA \quad (4.2)$$

$$S_{DS} = F_a S_s \quad (4.3)$$

T_m değeri m 'inci moda ait periyodu temsil etmekte olup 6 saniye olarak belirlenmiştir. T_0 ise $0,2 T_s$ 'ye denk gelen periyodu temsil etmektedir. T_s Eşitlik 4.4'te verilmiştir.

$$T_s = S_{D1} / S_{DS} \quad (4.4)$$

S_{DS} ve S_{D1} Eşitlik 4.5 ve Eşitlik 4.6'da gösterilmiştir.

$$S_{DS} = F_A S_s \quad (4.5)$$

$$S_{D1} = F_V S_1 \quad (4.6)$$

Hesaplamalara göre T_0 periyodu 0,107 saniye, T_s periyodu ise 0,5348 saniye olarak belirlenmiştir. T_0 ile T_s periyotları arasında kalan kısımda elastik sismik tepki katsayısı Eşitlik 4.7'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$C_{sm} = S_{DS} \quad (4.7)$$

T_s periyodundan daha büyük periyotlarda ise elastik sismik tepki katsayısı Eşitlik 4.8'deki gibi hesaplanmaktadır.

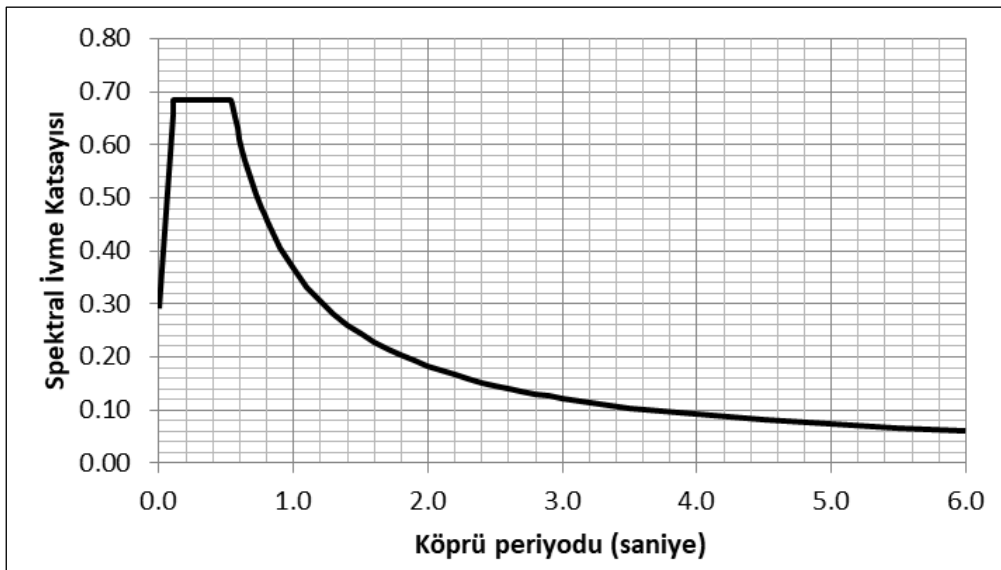
$$C_{sm} = S_{D1} / T_m \quad (4.8)$$

Eşitlikler ve seçilen değerler ışığında Yeşilirmak Köprüsü için oluşturulacak tasarım tepki spektrumu için belirlenen parametreler Çizelge 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4.6. AASHTO (2011) şartnamesine göre oluşturulan tepki spektrumu parametreleri

Zemin Sınıfı	D
0.2 saniye periyot için yerel zemin etki katsayısı, F_a	1,4
1.0 saniye periyot için yerel zemin etki katsayısı, F_v	2,1
Maksimum yatay yer ivmesi katsayısı, F_{pga}	1,4
Maksimum yatay yer ivmesi, PGA	0,209 g
Kısa periyot harita spektral ivme katsayısı, S_s	0,488
1.0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı, S_1	0,174
Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı, S_{DS}	0,6832
1.0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı, S_{D1}	0,3654
Efektif maksimum yatay yer ivmesi, A_s	0,2926 g
Sabit tasarım spektrum ivme bölgesinin son periyodu, T_s	0,5348 sn
Sabit tasarım spektrum ivme bölgesinin ilk periyodu, T_0	0,1070 sn

Çizelge 4.6'da verilen değerlere göre oluşturulan köprü tasarım spektrumu Şekil 4.8'de sunulmuştur.



Şekil 4.8. Köprü için oluşturulan tasarım tepki spektrumu

Oluşturulan tasarım spektrumu PEER sistemine yüklenerek seçilen deprem kayıtlarının ölçeklendirilmesinde kullanılmıştır. PEER veri tabanında ölçeklendirme için kullanılacak yöntem olarak kayıtların hedef tepki spektrumu ile uyumlu olması açısından programın teknik kılavuzunda belirtilen şekilde en küçük karesel ortalama hata (MSE) seçilmiştir. Bu yöntemde önce MSE hesaplanmıştır (Eşitlik 4.9). Bu eşitlikte spektral ivme S_a olarak, ağırlık fonksiyonu w olarak, periyot T olarak, ölçek katsayısı ise f olarak gösterilmiştir.

$$MSE = \frac{\sum_i w(T_i) \{ \ln[S_a^{hedef}(T_i)] - \ln[f \times S_a^{kayıt}(T_i)] \}^2}{\sum_i w(T_i)} \quad (4.9)$$

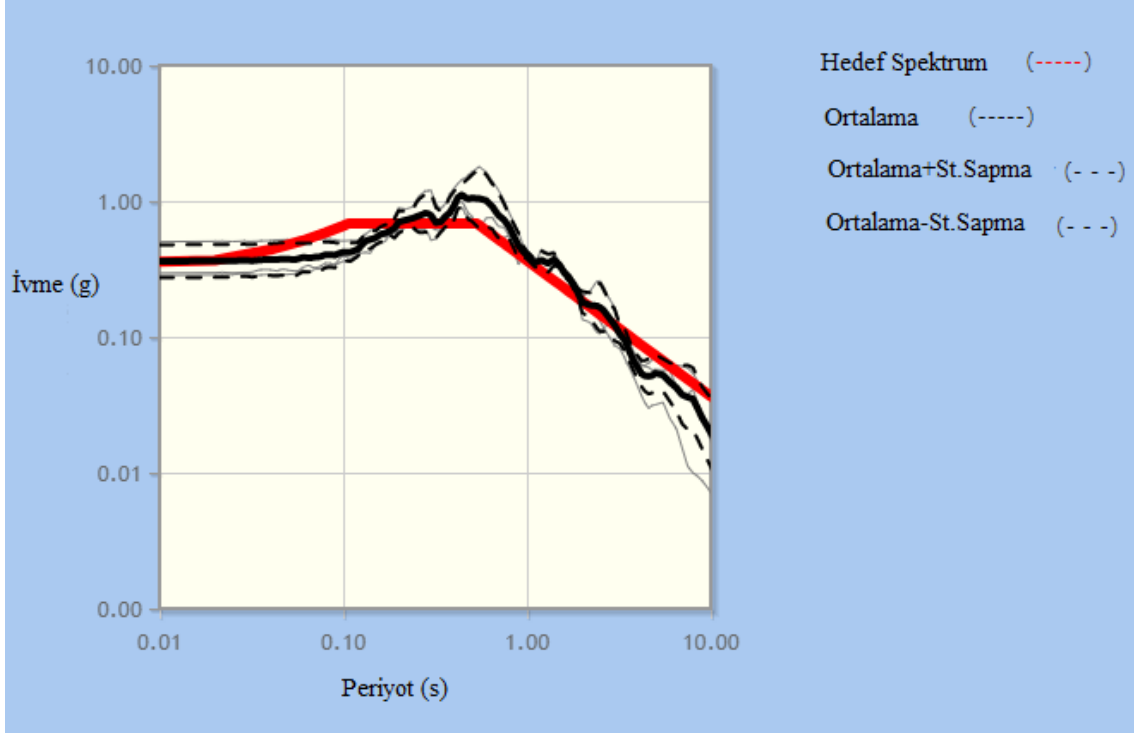
MSE değerinin minimize edilerek hesaplandığı ölçek katsayısının hesaplaması Eşitlik 4.10'da verilmiştir.

$$\ln f = \frac{\sum_i w(T_i) \ln \left(\frac{S_a^{hedef}(T_i)}{S_a^{kayıt}(T_i)} \right)}{\sum_i w(T_i)} \quad (4.10)$$

Oluşturulan tasarım spektrumu ile deprem kayıtları arasındaki spektral ivme uyumu için kullanılan, minimize karesel ortalama hata yöntemi ile elde edilmiş deprem ölçek katsayıları Çizelge 4.7'de verilmiş olup, deprem kayıtları bu katsayılara göre ölçeklendirilmiştir. Ayrıca ölçekli tepki spektrumu Şekil 4.9'da verilmiştir.

Çizelge 4.7. Deprem ölçek katsayıları

Deprem Adı	Ölçek Katsayıları
Imperial Valley	2,73
Landers	1,76
Kocaeli	1,71

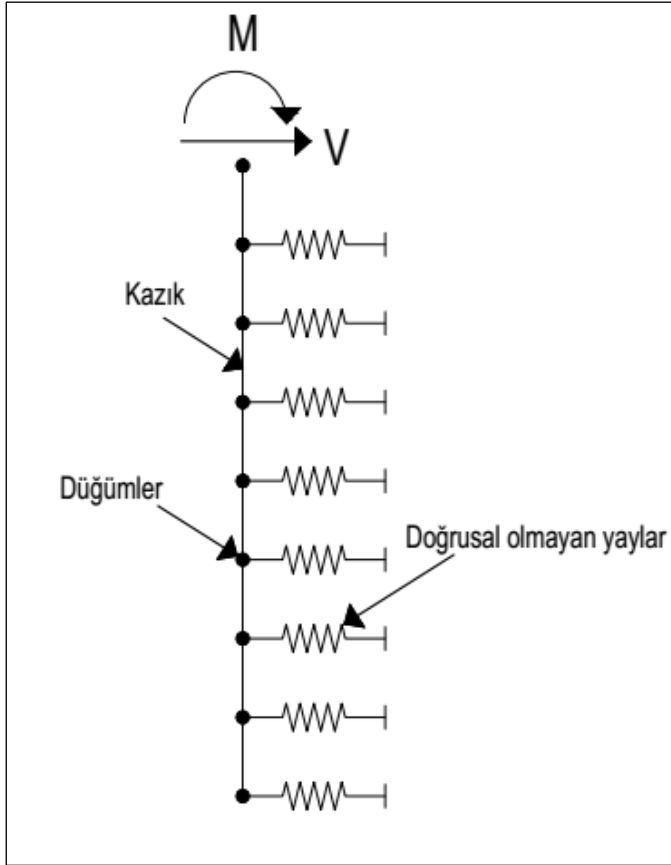


Şekil 4.9. Deprem kayıtlarının ölçeklendirilmiş spektrumu

4.2. Kazıklar İçin p-y Eğrilerinin Oluşturulması

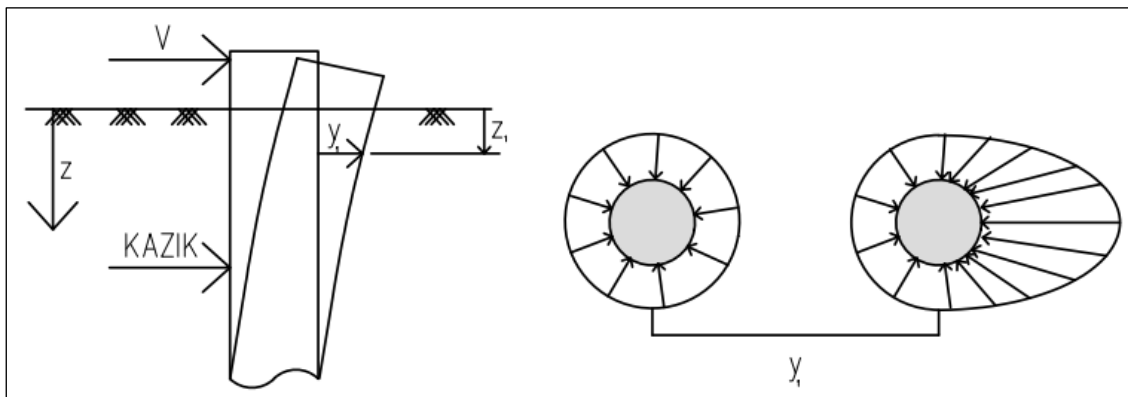
4.2.1. p-y yöntemi

Kazıklar ve zemin arasındaki etkileşimin modellenmesinde bir dizi doğrusal olmayan yay kullanılmaktadır. Bu yöntemde yapı, düğüm noktaları ile belirli aralıklarda bölünerek, bu düğüm noktalarında zemini yansıtan doğrusal olmayan yaylar kullanılır. Her bir aralıkta yapı için uygun eğilme rijitliği tanımlanarak doğrusal olmayan yaylara yük-deformasyon özellikleri p-y eğrileri vasıtasıyla tanımlanır (Coduto, 1994). Şekil 4.10'da kazık ve p-y yönteminde kazıklar için tanımlanan yaylar gösterilmektedir.



Şekil 4.10. p-y yöntemi için kullanılan analitik model

p-y yönteminin merkezinde kazık ve zemin arasındaki yanıl yük ve sapma ilişkilerinin tanımlanması bulunmaktadır. p kazığın yanıl zemin direnci olup, y ise yanıl sapmadır (Coduto, 1994). Zemin ve kazık arasındaki ilişki p-y eğrileri ile tanımlanmaktadır. Yanıl yükleme altındaki bir kazığın yükleme öncesi ve sonrası kazık etrafındaki basınç dağılımını Şekil 4.11’de gösterilmiştir.

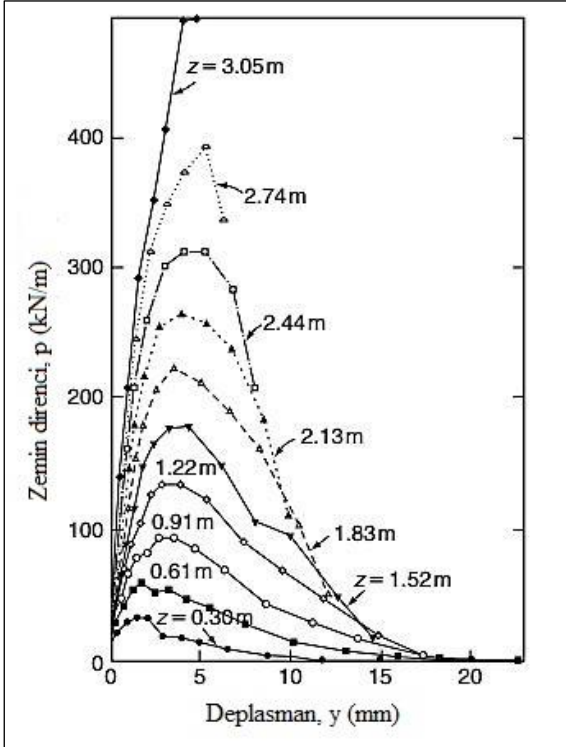


Şekil 4.11. Yanıl yüklenmiş bir kazık etrafındaki birim basınç dağılımı

Kazıktaki bir nokta için p-y eğrisi, birçok faktöre bağlıdır, faktörlerden bazıları şunlardır (Coduto,1994) :

- Kazık geometrisi
- Zemin tipi
- Yükleme tipi (kısa süreli statik yükleme, uzun süreli statik yükleme, tekrarlı yükler, dinamik yükler)
- Kazık ve zemin arasındaki sürtünme
- Kazık derinliği
- İmalat yöntemleri
- Grup etkisi

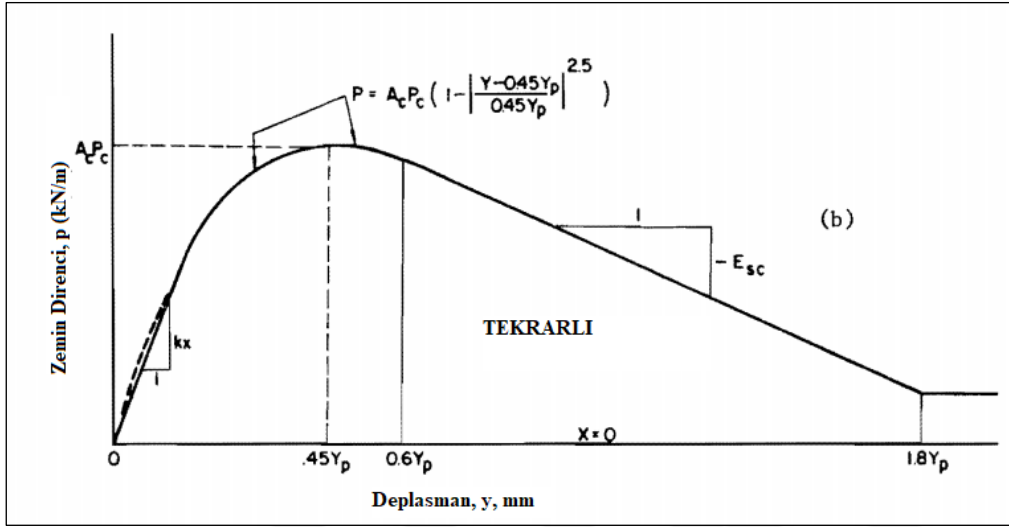
Bu faktörlerin etkileri tam olarak kanıtlanmamış olduğundan dolayı, p-y eğrilerini ampirik olarak geliştirmek için tam ölçekli deneyler gerekli olmuştur (Coduto,1994). Reese, Cox ve Koop (1975) tarafından sert killer için 641 milimetre çapında ve 15.20 metre uzunluğundaki kazıklar ile tam ölçekli deneyler yapılmıştır. Tekrarlı yükler altında yapılan deney sonuçlarına göre farklı derinlikler için elde edilmiş p-y eğrileri Şekil 4.12’de verilmiştir.



Şekil 4.12. Tekrarlı yükler altındaki kazıklar için tam ölçekli deneylerden elde edilmiş p-y eğrileri (Reese ve diğerleri, 1975)

4.2.2. Reese ve diğerleri (1975) yöntemi ile tekrarlı yükler altında sert kildeki kazıklar için p-y eğrilerinin belirlenmesi

Reese ve diğerleri (1975) tarafından yapılan tam ölçekli deneyler üzerine, tekrarlı yükler altındaki sert kil içindeki kazıklara uygulanacak p-y eğrisi Şekil 4.13’de tanımlanmıştır.

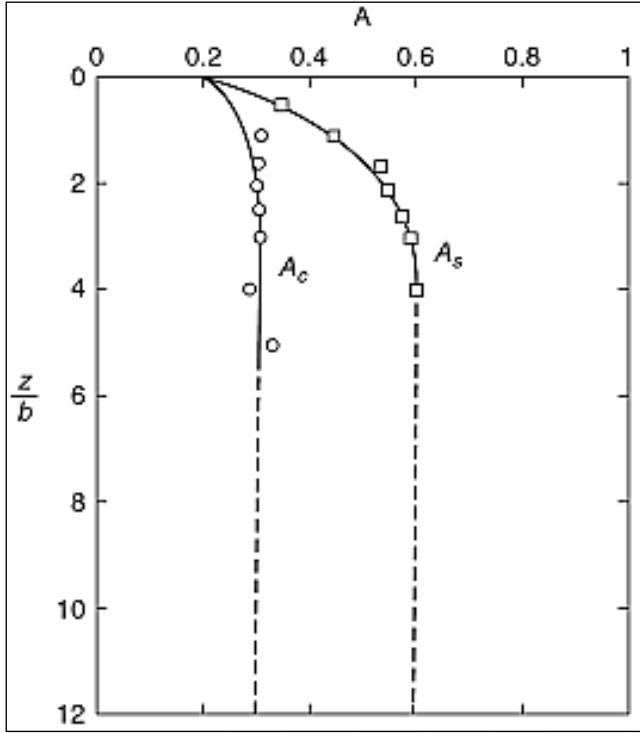


Şekil 4.13. Tekrarlı yükler için sert killerdeki kazıklara ait p-y eğrisi (Reese ve diğerleri, 1975)

Sabit bir değer olan A_c değeri Şekil 4.14’de gösterilmiştir. Kazık üst noktasında ve daha aşağıdaki noktalardaki maksimum zemin direnci olan P_{c1} ve P_{c2} değerini hesaplamak için Eşitlik 4.11 ve 4.12 kullanılmıştır. D kazık çapını, c_u drenajsız kayma dayanımını, z derinliği, γ' ise zemin efektif birim hacim ağırlığını temsil etmektedir. P_{c1} ve P_{c2} değerlerinden küçük olan maksimum zemin direnci değerini vermektedir.

$$P_{c1} = 2c_u D + \gamma' D z + 2,83c_u \quad (4.11)$$

$$P_{c2} = 11c_u D \quad (4.12)$$



Şekil 4.14. A_c (tekrarlı yükler için) ve A_s (statik yükler için) sabit değerleri (Reese ve diğerleri, 1975)

p-y eğrisinin ilk düz kısmı için Eşitlik 4.13 kullanılmaktadır. Eşitlikte kullanılan k ise zeminin drenajsız kayma dayanımına göre Çizelge 4.8’de verilen değerlerden seçilmiştir.

$$p = (kz)y \quad (4.13)$$

Çizelge 4.8. “k” için verilen temsili değerler (Reese ve diğerleri, 1975)

Drenajsız Kayma Dayanımı (kPa)	50-100	100-200	200-400
k_s (statik yükler için) MN/m ³	135	270	540
k_c (tekrarlı yükler için) MN/m ³	55	110	540

p-y eğrisinin parabolik olan ikinci kısmı için Eşitlik 4.14 kullanılmaktadır. p-y eğrisindeki parabolik kısım, düz olan ilk kısmın sonundan başlayarak deplasmanın $0.60y_p$ değerine ulaştığı noktaya kadar devam etmektedir. y_{50} ve y_p değerleri Eşitlik 4.15 ve 4.16 kullanılarak hesaplanmaktadır. Ayrıca drenajsız kayma dayanımına göre temsil ε_{50} değerleri Çizelge 4.9’da verilmiştir.

$$p = A_c P_c \left(1 - \left| \frac{y - 0,45y_{50}}{0,45y_{50}} \right|^{2,5} \right) \quad (4.14)$$

Çizelge 4.9. ε_{50} için verilen temsili değerler (Reese ve diğerleri, 1975)

Drenajsız kayma dayanımı (kPa)	50-100	100-200	200-400
ε_{50}	0.007	0.005	0.004

$$y_{50} = \varepsilon_{50} D \quad (4.15)$$

$$y_p = 4,1 A_c y_{50} \quad (4.16)$$

p-y eğrisindeki parabolik kısım bittikten sonra tekrar düz kısım başlamakta ve bu kısım Eşitlik 4.17'de tanımlanmaktadır. Deplasman değeri $1.8y_p$ değerine ulaşıldıktan sonra p-y eğrisinin son kısmı başlamaktadır. p-y eğrisinin son kısmı Eşitlik 4.18'de verilmiştir.

$$p = 0,936 A_c P_c - \frac{0,085}{y_{50}} p_c (y - 0.6y_p) \quad (4.17)$$

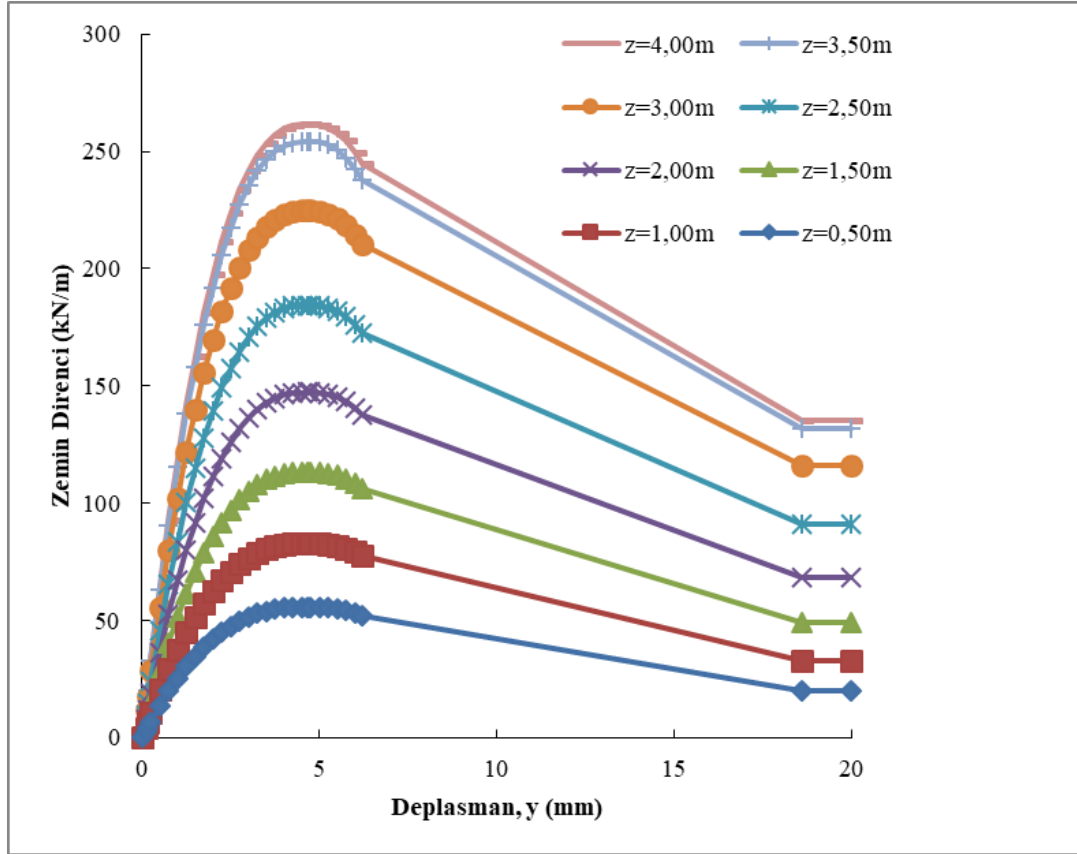
$$p = 0,936 A_c P_c - \frac{0,102}{y_{50}} p_c y_p \quad (4.18)$$

Analizi yapılan Yeşilirmak Köprüsü kazıklarına ait p-y eğrisi için hesaplanan girdi parametreleri Çizelge 4.10'da verilmektedir.

Çizelge 4.10. Yeşilirmak Köprüsü kazıkları p-y eğrisi için kullanılacak parametreler

k_c	55 MN/m ³
ε_{50}	0,007
C	66,04 kPa
γ'	8,3 kN/m ³
D	1,2m
y_{50}	8,4 mm
y_p	10,332 mm
$0,45y_p$	4,65 mm
$0,6y_p$	6,2 mm
$1,8y_p$	18,6 mm

Seçilen ve hesaplanan parametre değerlerine göre farklı derinlikler için Reese ve diğerleri (1975) tarafından önerilen sert killerde su tablası altındaki kazıklar için p-y eğrileri oluşturulmuş olup Şekil 4.15'te gösterilmiştir.



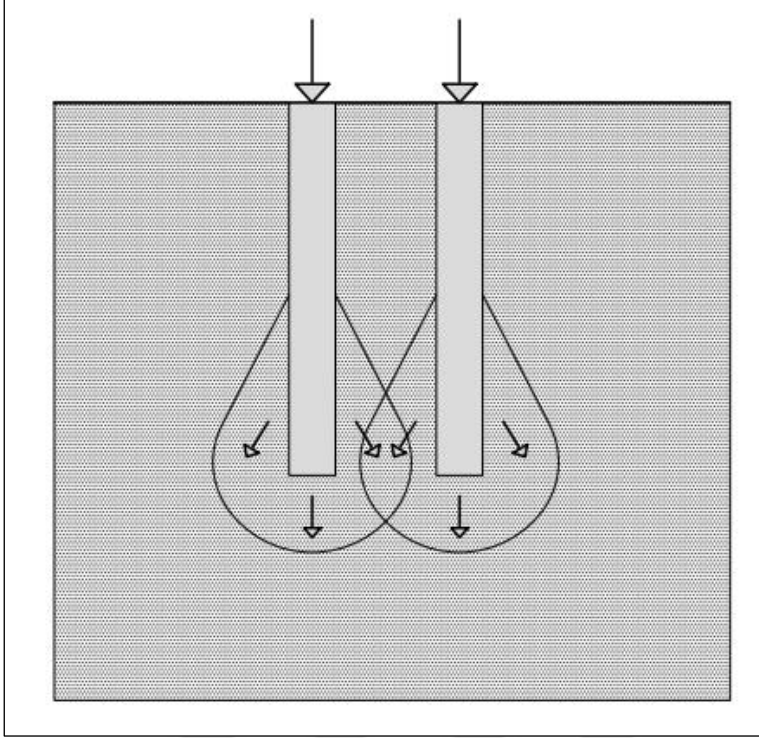
Şekil 4.15. Yeşilirmak Köprüsü kazıkları için farklı derinliklere ait p-y eğrileri

4.3. Kazıklarda Grup Etkisi

Kazıklı temellerdeki kazıklar genelde grup olarak yerleştirilirler. Kazıklar grup olarak yerleştirilmeleri sayesinde üst yapıdan gelen yükleri dağıtarak daha derindeki zemine aktarmaktadırlar. Kazık gruplarının üstünde kazık başlığı yapılmaktadır ve çoğu zaman kazık başlığı zemin ile temas etmektedir. Kazık grubu ve gerilme dağılımı şematik olarak Şekil 4.16'da gösterilmiştir.

Grup kazıklarının taşıma kapasitelerini belirlemek oldukça karmaşık olmakla birlikte henüz grup etkisi tamamen çözümlenebilmiş değildir. Kazıklar birbirlerine yakın oldukları durumda, kazıklar tarafından zemine aktarılan gerilmelerin üst üste bindiği ve kazıkların

taşıma kapasitelerinin azaldığı kabul edilmektedir. Pratikte kazıklar arasındaki mesafe merkezden merkeze minimum 2,5 D, genelde ise 3-3,5 D olmaktadır (Das, 2011).



Şekil 4.16. Kazık grubu ve gerilme dağılımı

Kazık gruplarında yanal yüklerin analizi daha karmaşık hale gelmektedir. Moment yükleri farklı yönde dağıtılırken, kesme bir yönde dağılmaktadır. Bu sebeple, yükleme tipleri birbirinden ayrı olarak değerlendirilmelidir. Grup davranışını etkileyen bazı faktörlerden dolayı yanal yükleri değerlendirmek zordur (O'Neill, 1983). Aşağıda bu faktörlerden bazıları verilmektedir:

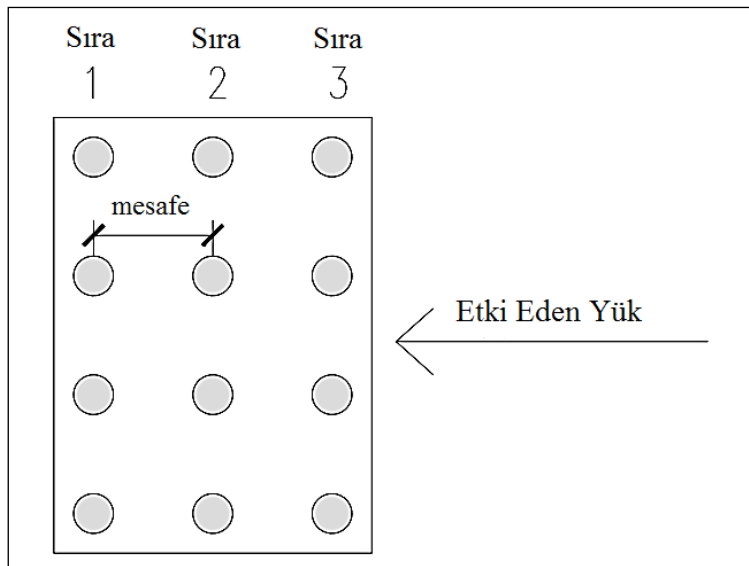
- Kazıkların sayısı, boyutu, aralığı ve düzenlenmesi
- Zemin tipi
- Kazıkların birleşme tipi
- Başlık ve ayrı temeller arasındaki etkileşim
- Kazık başlığı ve zemin arasındaki düşey temas kuvveti
- Başlık kenarı ve zemin arasında gelişen yanal direnç
- İçteki kazıklar ve ön sıradaki kazıkların p-y eğrilerinin arasındaki farklar
- Kazık yerleşimi ve sırası
- Kazıkların eğimi

Kazıklı temellerdeki yanal yüklerin değerlendirilmesinde kazık-zemin-kazık etkileşimi göze alınmalıdır (O'Neill, 1983). Bir kazık yanal olarak hareket edince o kazığın arkasında bulunan zemindeki gerilmenin bir kısmı azalmaktadır. Bu zemin sırası ile arka sıradaki kazığın yanal hareketine göre daha az direnç göstermektedir (Coduto, 1994). Bu sebeple aynı kazık başlığı altındaki farklı sıralardaki kazıklar farklı p-y eğrilerine sahip olabilmektedir.

Kazıkların yanal yüklerini değerlendirirken grup etkileri göz önüne alınmalıdır. Eğer p-y yöntemi kullanılıyorsa, p değerleri P-çarpanı, P_m , ile çarpılarak grup etkisi hesaba katılmalıdır. P_m çarpanları yatay yük testleri sonucunda elde edilmiştir (AASHTO, 2010). Kazık sıraları için tanımlanan P_m çarpanları Çizelge 4.11'de verilmiştir. Ayrıca kazık sıraları ve yük yönünün tarifi Şekil 4.17'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.11. Kazıklardaki farklı sıralar için P_m çarpan değerleri (AASHTO, 2010)

Kazıklar arası mesafe	P-çarpanı, P_m		
	Sıra 1	Sıra 2	Sıra 3 ve fazlası için
3D	0,70	0,50	0,35
5D	1,00	0,85	0,70



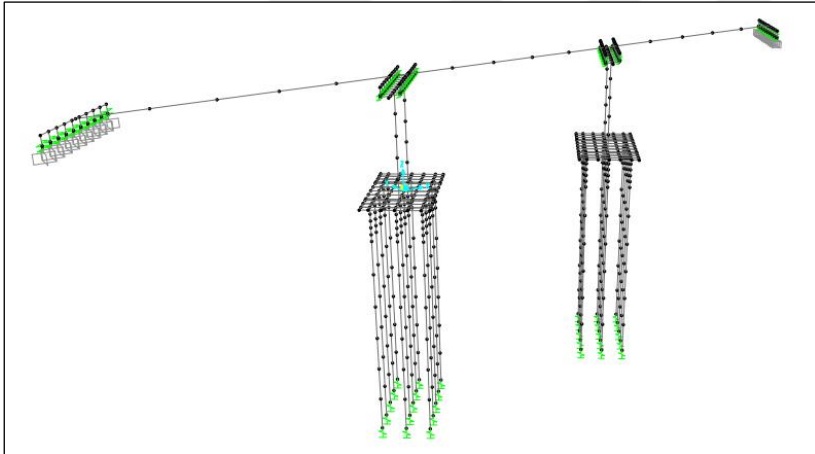
Şekil 4.17. Kazık sıraları ve yanal yükün yönü (AASHTO, 2010)

Kazık gruplarında birçok kazık imal edildiğinden dolayı, grubun yatay direnci çalışılmış ve grup direncinin, tekil kazıkların dirençleri toplamından daha az olduğu sonucu bulunmuştur (AASHTO, 2010).

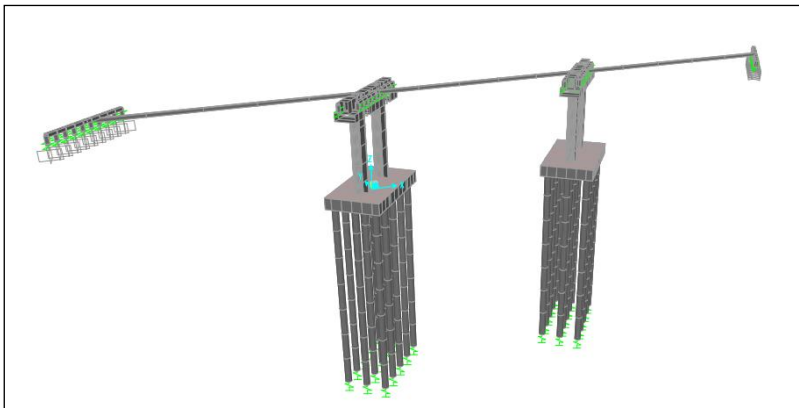
4.4. SAP2000 Yazılımı ile Yapılan Analizler

4.4.1. Analiz girdileri

SAP2000 yazılımı kazıklar, üstyapı ve doğrusal olmayan zemini tanımlamaya olanak sağladığı gibi zaman tanım alanında analiz için mühendisler tarafından pratikte çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sebeple Yeşilirmak Köprüsü kazıkları için yapılacak analizler için köprü modellemesinde SAP2000 yazılımı kullanılmıştır. Köprü model görüntüleri Şekil 4.18 ve Şekil 4.19’da verilmiştir.



Şekil 4.18. SAP2000 köprü modeli genel görünümü



Şekil 4.19. SAP2000 köprü modeli elemanların boyutları ile genel görünümü

Malzeme tanımlanması

Köprü elemanları betonarme olup; kazıklar için tasarlanan beton sınıfı C25 ve karakteristik silindir basınç dayanımı, f_{ck} , 25 MPa'dır. Köprü üstyapısını oluşturan prefabrik öngermeli kirişlerin beton sınıfı C45 diğer tüm elemanların beton sınıfı ise C30'dur. Tasarlanan köprü için seçilen betonarme sınıfları SAP2000 yazılımında tanımlanmıştır. Köprü üstyapısının ağırlığı ölü yük olarak programa tanıtıldığı için kiriş elemanlarına ayrıca malzeme tanımlanması yapılmamış olup rijit ve ağırlıksız elemanlar olarak tanımlanmıştır. Çizelge 4.12'de kazıklar ve diğer betonarme elemanlar için tanımlanmış C25 ve C30 beton sınıflarının SAP2000 yazılımında tanımlanmış hali verilmiştir.

Çizelge 4.12. SAP2000 analizinde kullanılan beton malzeme özellikleri

Beton Sınıfı	Birim Ağırlık (kN/m ³)	Elastisite Modülü (kN/m ²)	Kayma Modülü (kN/m ²)	Poison Oranı
C25	25	31476000	13115000	0,2
C30	25	32837000	13682083	0,2

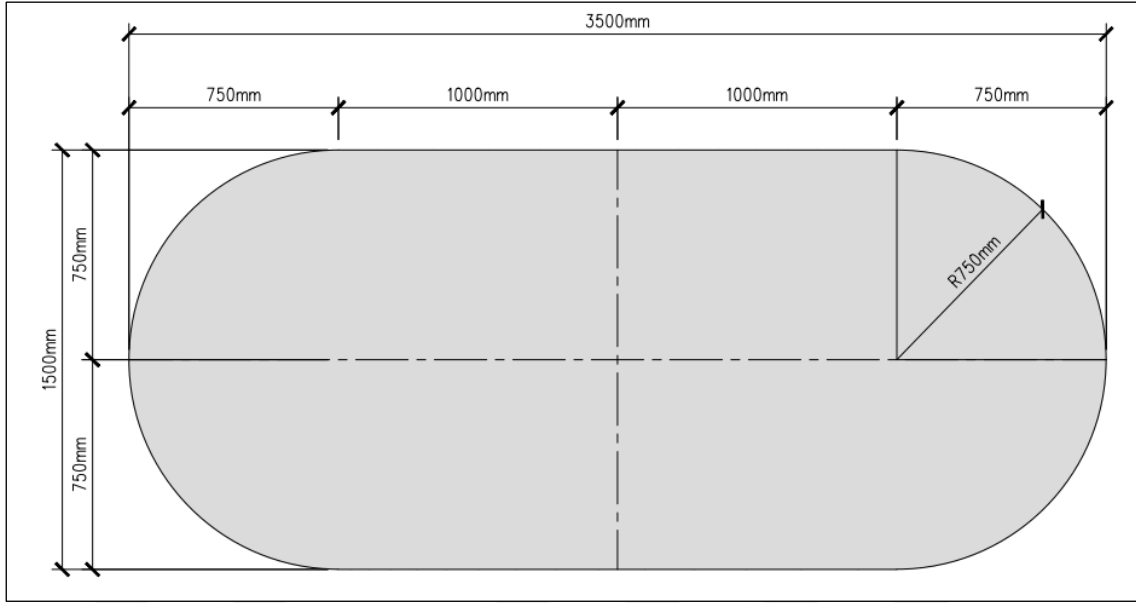
Eleman tanımlanması

Köprü kazıkları, başlık kirişleri, kolonlar ve köprü üstyapısı çubuk elemanlar olarak, kazıkların üstünde yer almakta olan radye ise kabuk eleman olarak tanımlanmıştır. Kabuk eleman olan başlık kirişi kazıkların bağlandığı noktalarda ve kolon ile birleşilen yerde bağlantı özellikleri tanımlanarak ilgili rijitlik elemanlara verilmiştir. Çizelge 4.13'te elemanların geometrik özellikleri verilmiştir.

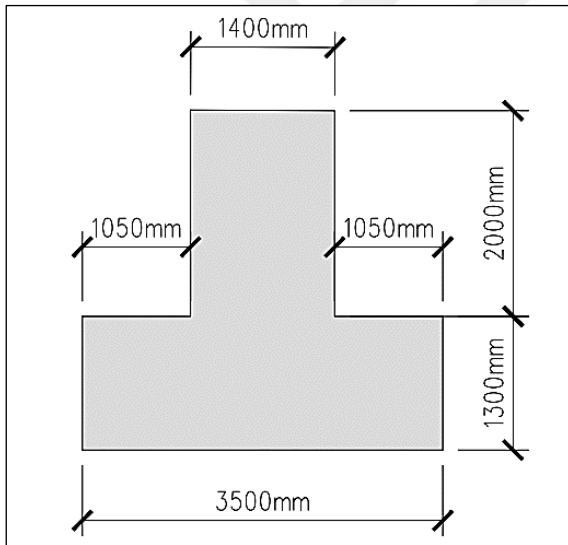
Çizelge 4.13. SAP2000 analizinde kullanılan eleman boyutları

Kesit	Beton Sınıfı	Kesit Tipi	Eni/Çapı	Boy	Alan (m ²)
Kazık	C25	Circle	1,2		1,13097
Başlık Kirişi	C30	Özel Kesit			7,35
Kolon	C30	Özel Kesit			4,75581
Fiktif Eleman	C30	Rectangular	0,5	0,5	0,25

Özel kesitlere sahip olan kolon ve başlık kirişleri SAP2000'de "Section Designer", Kesit Tasarımı kısmında hazırlanmıştır. Şekil 4.20'te kolon kesiti, Şekil 4.21'de ise başlık kirişi kesiti gösterilmektedir.



Şekil 4.20. Köprü kolon kesiti



Şekil 4.21. Köprü başlık kirişi kesiti

Köprü prekast kirişleri elastomer mesnetler üzerine oturmaktadır. Elastomer mesnetler köprüdeki deprem etkilerini oldukça değiştirmektedir. Mesnetlerin doğru tanımlanması analizlerin sonuçlarını önemli ölçüde değiştirebilmektedir. Elastomer mesnetler SAP2000 modelinde bağlantı (link) elemanları olarak tanımlanmıştır ve elastomer malzeme özellikleri bu bağlantı elemanına aktarılmıştır. Elastomer mesnet için tanımlanmış riitlik değerleri Çizelge 4.14'te verilmiştir.

Çizelge 4.14. Elastomer mesnetlere tanımlanan rijitlik değerleri

Yön	U1	U2	U3
Rijitlik Değerleri (kN/m)	3134009	22329	22329

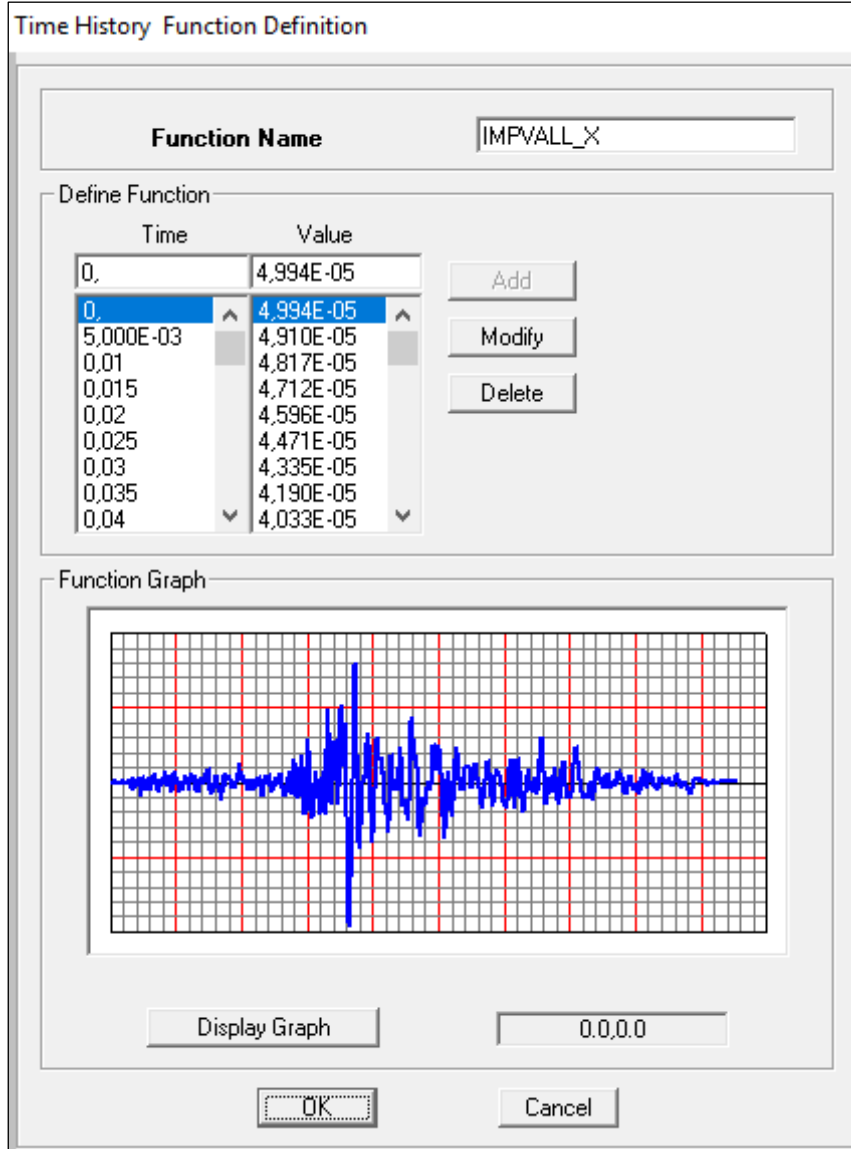
Köprü modelinde kazıklardaki tesirleri değiştirmeyecek fakat sadece yük aktarımı yapan diğer elemanlar fiktif elemanlar olarak tariflenmiştir. Fiktif elemanların ağırlığı sıfır ve rijitliği çok yüksek olarak seçilerek, tamamen rijit ve yükü olduğu gibi aktaracak şekilde tanımlanmıştır.

Yük tanımlanması

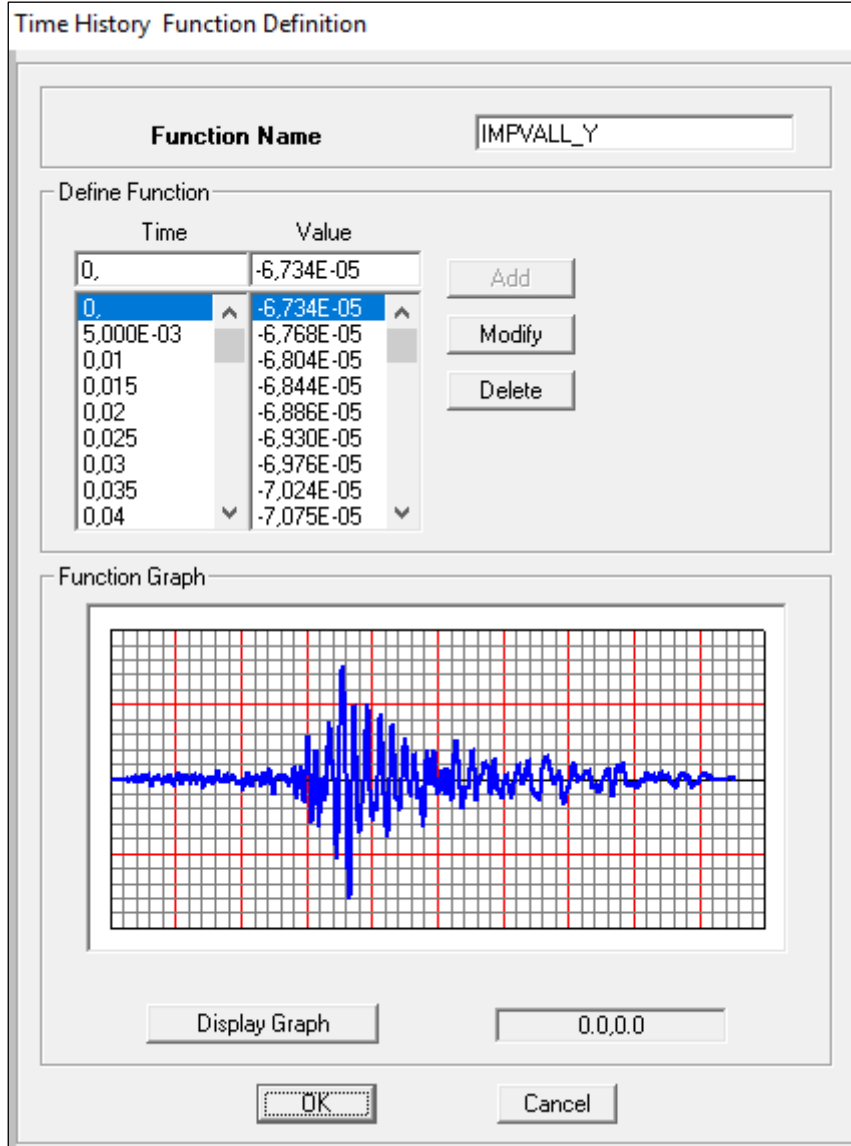
Köprü kazıklarındaki deprem etkileri göz önüne alınacağı için SAP2000 analizlerinde sadece ölü yük ve deprem yükü göz önünde bulundurulmuştur. Deprem yükleri zaman tanım analizi yöntemi ile tanımlanmıştır. Deprem yüklerini en çok etkileyen unsurlardan biri köprü üstyapısının ağırlığıdır. Köprü üstyapısı arttıkça kolonlarda ve temelerde oluşan tesirler artmaktadır. SAP2000 analizinde ölü yükler tanımlanan malzeme özellikleriyle oluşturulmuştur. Ayrıca köprü üstyapısını oluşturan prekast kirişler, asfalt, betonarme döşeme, kaldırım yükü, korkuluk ve yaya yükü ayrıca hesaplanarak yayılı yük olarak SAP2000 modeline eklenmiştir. Hesaplanan ölü yükler Çizelge 4.15'te verilmektedir. Köprüde 10 adet kiriş bulunduğundan hesaplanan yükler 10 ile çarpılarak etki edilmiştir. Üstyapı yüklemesi Şekil 4.22'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.15. Köprü üstyapısını oluşturan elemanlara ait birim yükler

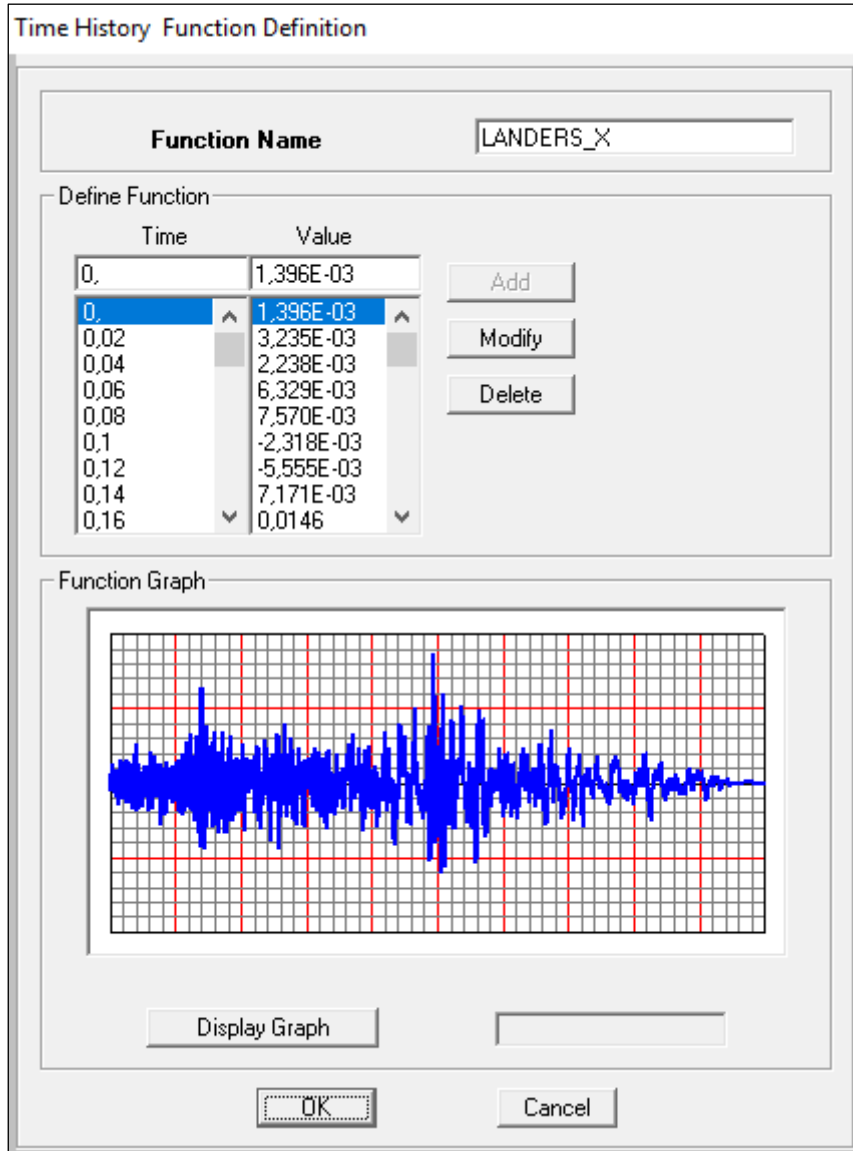
Kiriş yükü	18,9146 kN/m
Döşeme yükü	8,2720 kN/m
Asfalt yükü	1,4200 kN/m
Kaldırım yükü	1,5300 kN/m
Korkuluk yükü	0,2940 kN/m
Yaya yükü	0,7350 kN/m
Toplam	3,1166 kN/m
10 kiriş için toplam	311,66 kN/m



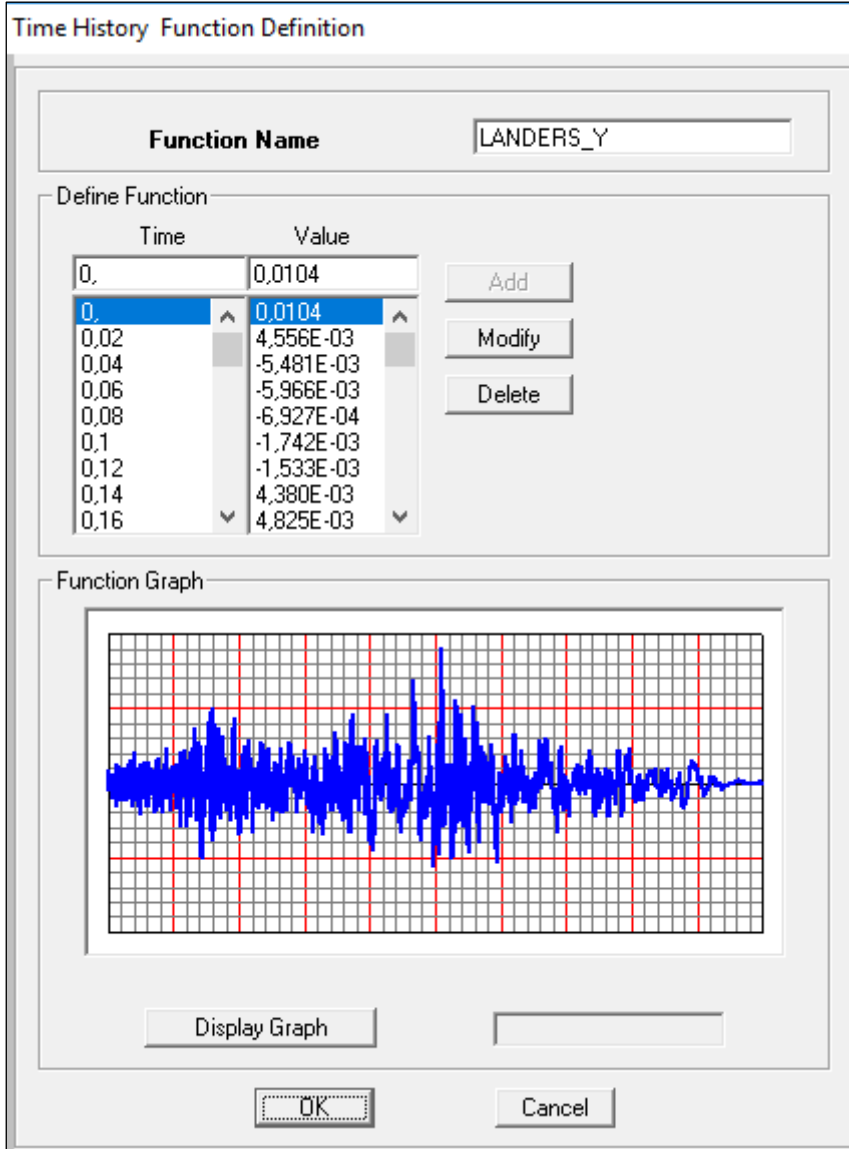
Şekil 4.23. Imperial depremi x yönü zaman tanım alanında analiz fonksiyonu tanımlaması



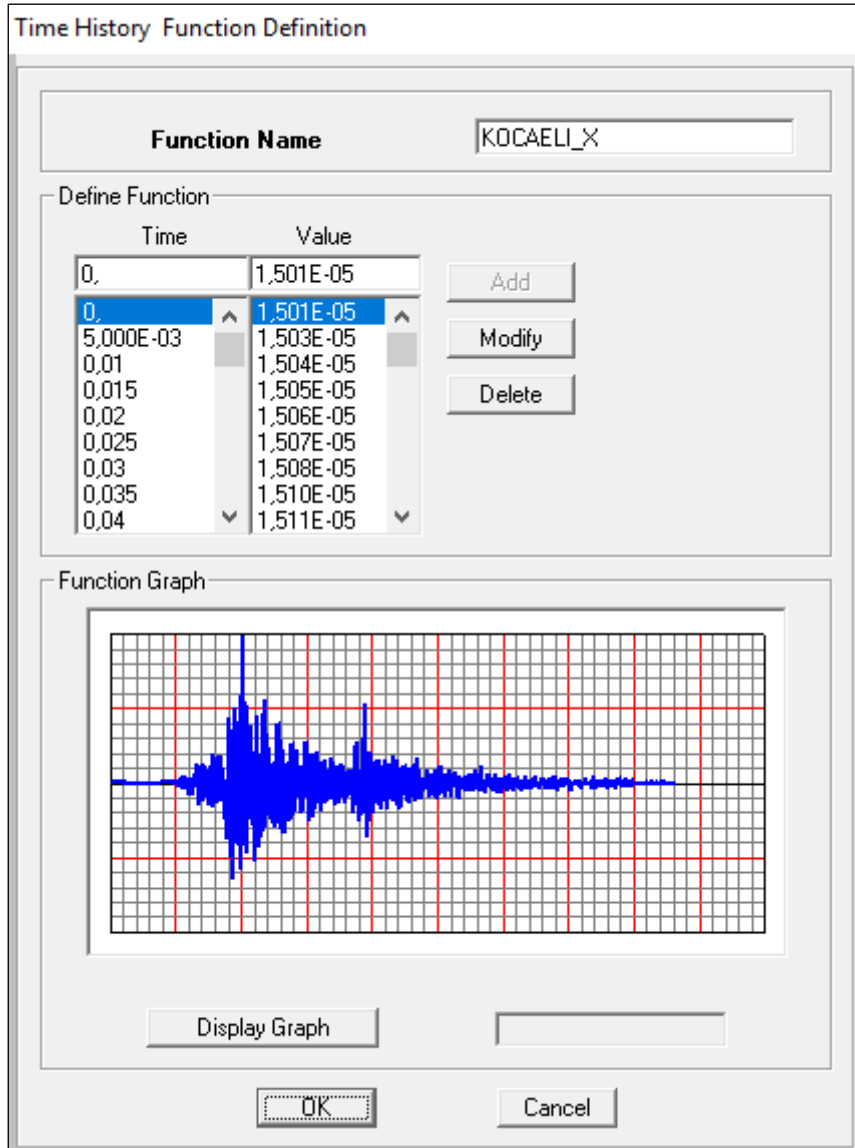
Şekil 4.24. Imperial depremi y yönü zaman tanım alanında analiz fonksiyonu tanımlaması



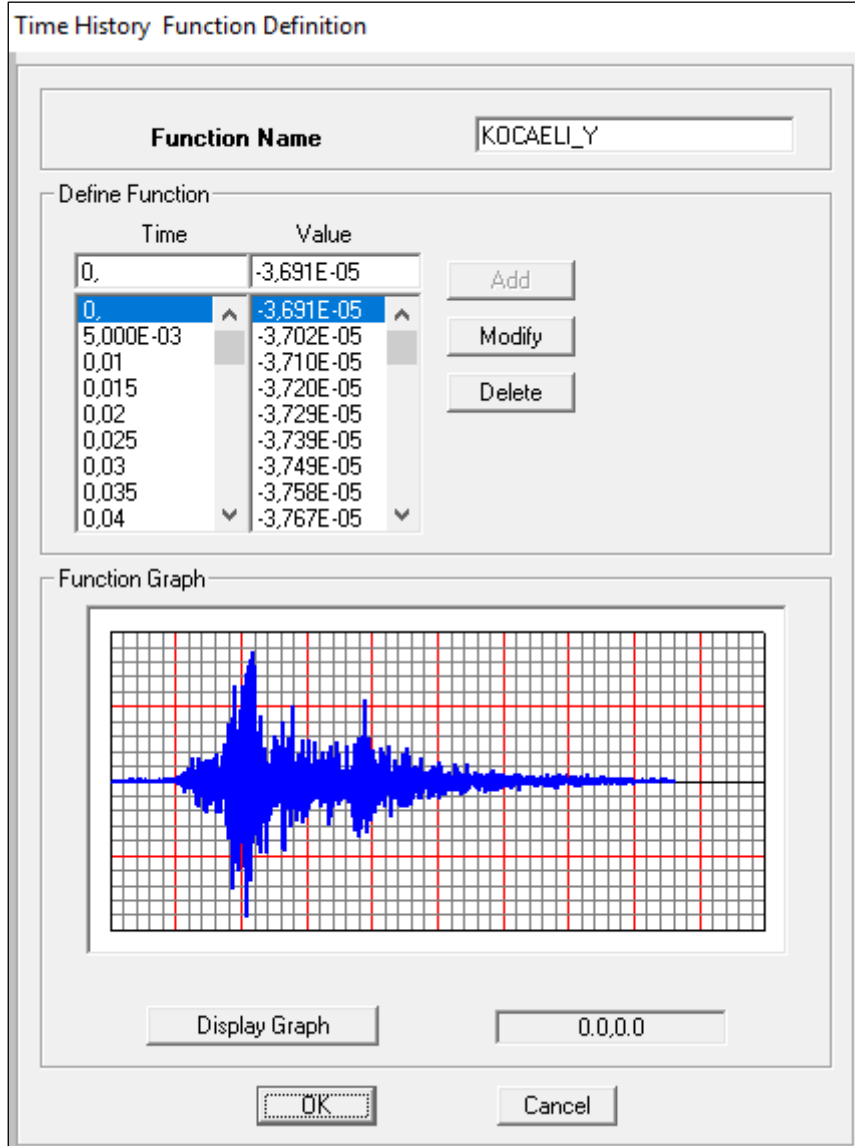
Şekil 4.25. Landers depremi x yönü zaman tanım alanında analiz fonksiyonu tanımlaması



Şekil 4.26. Landers depremi y yönü zaman tanım alanında analiz fonksiyonu tanımlaması



Şekil 4.27. Kocaeli depremi x yönü zaman tanım alanında analiz fonksiyonu tanımlaması



Şekil 4.28. Kocaeli depremi y yönü zaman tanım alanında analiz fonksiyonu tanımlaması

Elde edilen deprem kayıtları SAP2000 yazılımına zaman tanım alanında fonksiyon olarak tanımlandıktan sonra, bu fonksiyonlar ayrı ayrı yükleme durumları (load case) olarak etkilmiş, fonksiyonlar Çizelge 4.7’de verilen büyültme katsayıları ve yerçekimi ivmesi olan 9.81 m/s^2 değeri ile çarpılarak SAP2000 yazılımına aktarılmıştır. Tanımlanan yükleme durumları Şekil 4.29-4.34’de verilmiştir.

Load Case Data - Nonlinear Modal History (FNA)

Load Case Name: Notes: Load Case Type:

Initial Conditions: Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State
 Continue from State at End of Modal History

Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Analysis Type: Linear Nonlinear
Time History Type: Modal Direct Integration

Modal Load Case: Use Modes from Case:

Time History Motion Type: Transient Periodic

Loads Applied

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Accel	U1	IMPVALL_X	26,78
Accel	U1	IMPVALL_X	26,78
Accel	U2	IMPVALL_Y	26,78

Show Advanced Load Parameters

Time Step Data: Number of Output Time Steps:
Output Time Step Size:

Other Parameters: Modal Damping:
Nonlinear Parameters:

Şekil 4.29. Imperial depremi yükleme durumu-1

Load Case Data - Nonlinear Modal History (FNA)

Load Case Name: Notes:

Load Case Type:

Initial Conditions:

Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State

Continue from State at End of Modal History

Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Analysis Type:

Linear

Nonlinear

Time History Type:

Modal

Direct Integration

Modal Load Case:

Use Modes from Case:

Time History Motion Type:

Transient

Periodic

Loads Applied:

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Accel	U2	IMPVALL_X	26,7813
Accel	U2	IMPVALL_X	26,7813
Accel	U1	IMPVALL_Y	26,7813

Show Advanced Load Parameters

Time Step Data:

Number of Output Time Steps:

Output Time Step Size:

Other Parameters:

Modal Damping:

Nonlinear Parameters:

Şekil 4.30. Imperial depremi yükleme durumu-2

Load Case Data - Nonlinear Modal History (FNA)

Load Case Name: LANDERS_1 Notes:

Load Case Type: Time History

Initial Conditions:

Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State

Continue from State at End of Modal History
Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Analysis Type:

Linear Nonlinear

Time History Type:

Modal Direct Integration

Time History Motion Type:

Transient Periodic

Modal Load Case:

Use Modes from Case: MODAL

Loads Applied:

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Accel	U1	LANDERS_Y	17,29
Accel	U1	LANDERS_X	17,29
Accel	U2	LANDERS_Y	17,29

Show Advanced Load Parameters

Time Step Data:

Number of Output Time Steps: 3000

Output Time Step Size: 0,02

Other Parameters:

Modal Damping: Constant at 0,05

Nonlinear Parameters: Default

Şekil 4.31. Landers depremi yükleme durumu-1

Load Case Data - Nonlinear Modal History (FNA)

Load Case Name: LANDERS_2 Notes:

Load Case Type: Time History

Initial Conditions:

Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State

Continue from State at End of Modal History

Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Analysis Type:

Linear

Nonlinear

Time History Type:

Modal

Direct Integration

Modal Load Case:

Use Modes from Case: MODAL

Time History Motion Type:

Transient

Periodic

Loads Applied:

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Accel	U2	LANDERS_Z	17,29
Accel	U2	LANDERS_X	17,29
Accel	U1	LANDERS_Y	17,29

Show Advanced Load Parameters

Time Step Data:

Number of Output Time Steps: 3000

Output Time Step Size: 0,02

Other Parameters:

Modal Damping: Constant at 0,05

Nonlinear Parameters: Default

Şekil 4.32. Landers depremi yükleme durumu-2

Load Case Data - Nonlinear Modal History (FNA)

Load Case Name: Notes:

Load Case Type:

Initial Conditions:

Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State

Continue from State at End of Modal History

Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Analysis Type:

Linear

Nonlinear

Time History Type:

Modal

Direct Integration

Modal Load Case:

Use Modes from Case:

Time History Motion Type:

Transient

Periodic

Loads Applied:

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Accel	U1	KOCAELI_X	16,83
Accel	U1	KOCAELI_X	16,83
Accel	U2	KOCAELI_Y	16,83

Show Advanced Load Parameters

Time Step Data:

Number of Output Time Steps:

Output Time Step Size:

Other Parameters:

Modal Damping:

Nonlinear Parameters:

Şekil 4.33. Kocaeli depremi yükleme durumu-1

Load Case Data - Nonlinear Modal History (FNA)

Load Case Name: Notes:

Load Case Type:

Initial Conditions:

Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State

Continue from State at End of Modal History

Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Analysis Type:

Linear

Nonlinear

Time History Type:

Modal

Direct Integration

Modal Load Case:

Use Modes from Case:

Time History Motion Type:

Transient

Periodic

Loads Applied:

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Accel	U2	KOCAELI_X	16,831
Accel	U2	KOCAELI_X	16,831
Accel	U1	KOCAELI_Y	16,831

Show Advanced Load Parameters

Time Step Data:

Number of Output Time Steps:

Output Time Step Size:

Other Parameters:

Modal Damping:

Nonlinear Parameters:

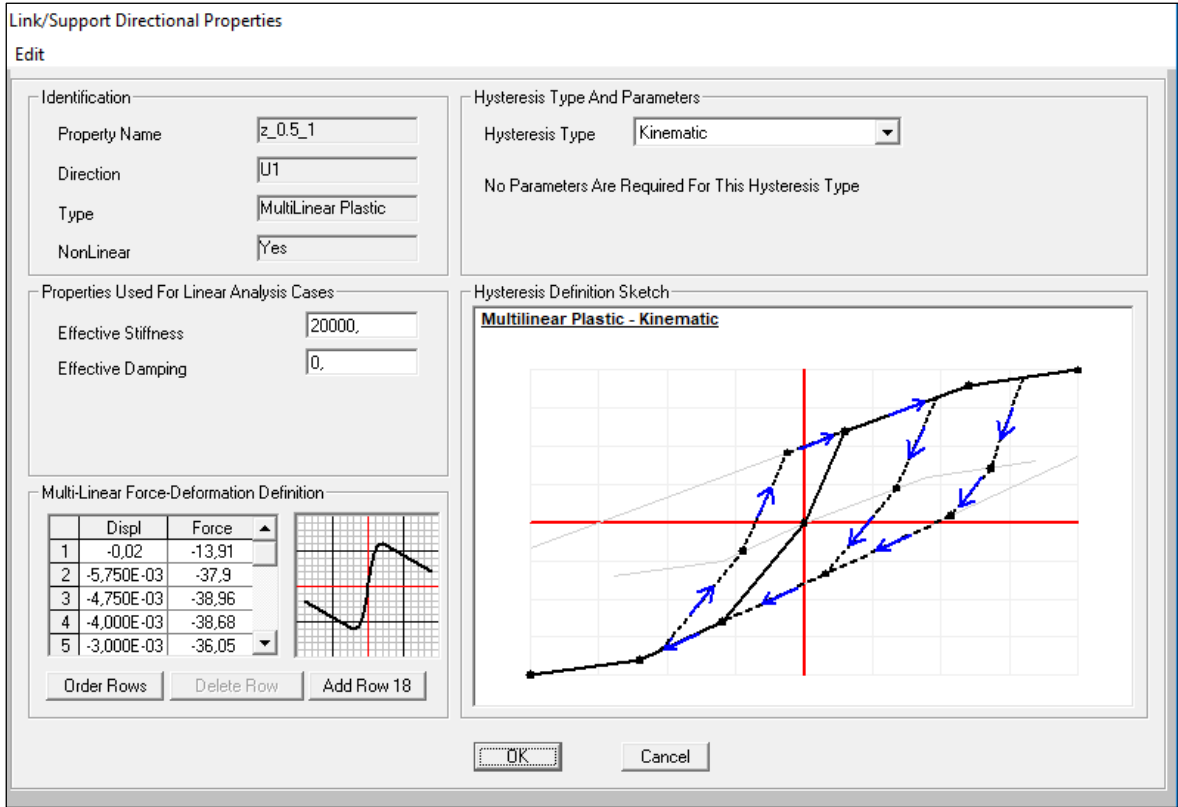
Şekil 4.34. Kocaeli depremi yükleme durumu-2

Oluşturulan yükleme durumları için her iki yönde de deprem kayıtları girilmiş olup, analiz için doğrusal olmayan (nonlinear) analiz tipi seçilmiştir. Buna göre ilgili deprem durumu yük kombinasyonu AASHTO (2010)'da belirtildiği gibi 1 ölü yük + 1 deprem yükü olacak şekilde SAP2000 yazılımında tanımlanmıştır.

Doğrusal olmayan zemin özelliklerinin tanımlanması

Deprem esnasında yatay yükler altındaki kazıkların hareketi sonucu zeminde oluşacak doğrusal olmayan davranışın doğru tanımlanması analiz sonuçlarını etkilemektedir. Bu sebeple doğrusal olmayan zemin davranışının kazıklara doğru tanımlanması önemlidir. p-y eğrileri geoteknik mühendisleri tarafından belirlenmekte olup, kazık boyunca zeminin

doğrusal olmayan özelliğini temsil etmektedir. Yeşilirmak Köprüsü kazıkları için yapılacak analizde Bölüm 5’te hesaplanan p-y eğrilerine göre SAP2000 yazılımında kazıklar için doğrusal olmayan bağlantı elemanları tanımlanmıştır. Bağlantı elemanlarının yük deformasyon değerleri kazık sırası ve derinliğe bağlı olarak değişmektedir. Her derinlik ve kazık sırası için ayrı ayrı bağlantı elemanları tanımlanarak ilgili kazıklara tanımlanmıştır. Örnek olarak 0.5 metre derinlikte birinci sıradaki kazıklar için atanan bağlantı elemanı Şekil 4.35’te gösterilmiştir. SAP2000 yazılımında doğrusal olmayan zemin özelliğinin tanımlamaya fırsat veren çoklu doğrusal plastik bağlantı elemanları (multi-linear plastic link) tanımlanmıştır.



Şekil 4.35. Kazıklara atanan yük deformasyon özellikleri tanımlanmış bağlantı elemanı

Her sıradaki kazıklar için farklı derinliklerde farklı bağlantı elemanları tanımlandıktan sonra, bu bağlantı elemanları çubuk elemanlar olarak tanımlanmış olan kazıklara yayılı yay olarak atanmıştır. p-y eğrilerine göre belirlenmiş doğrusal olmayan bağlantı elemanlarının, kazıklara yayılı yay olarak tanımlanması Şekil 4.36’da gösterilmiştir.

Assign Springs Along Frame Object

Spring Type

Simple
Spring Stiffness per Unit Length
Simple Spring Resists

Link Property

Spring Positive Local 1-Axis Orientation

Parallel to Line Object Local Axis

In Line Object 2-3 Plane
Counterclockwise Angle from Line +2-Axis

User Specified Direction Vector
Coordinate System
Global X Component
Global Y Component
Global Z Component

Positive Local 2-Axis Orientation

Link Local 2-Axis Angle From Default Orientation

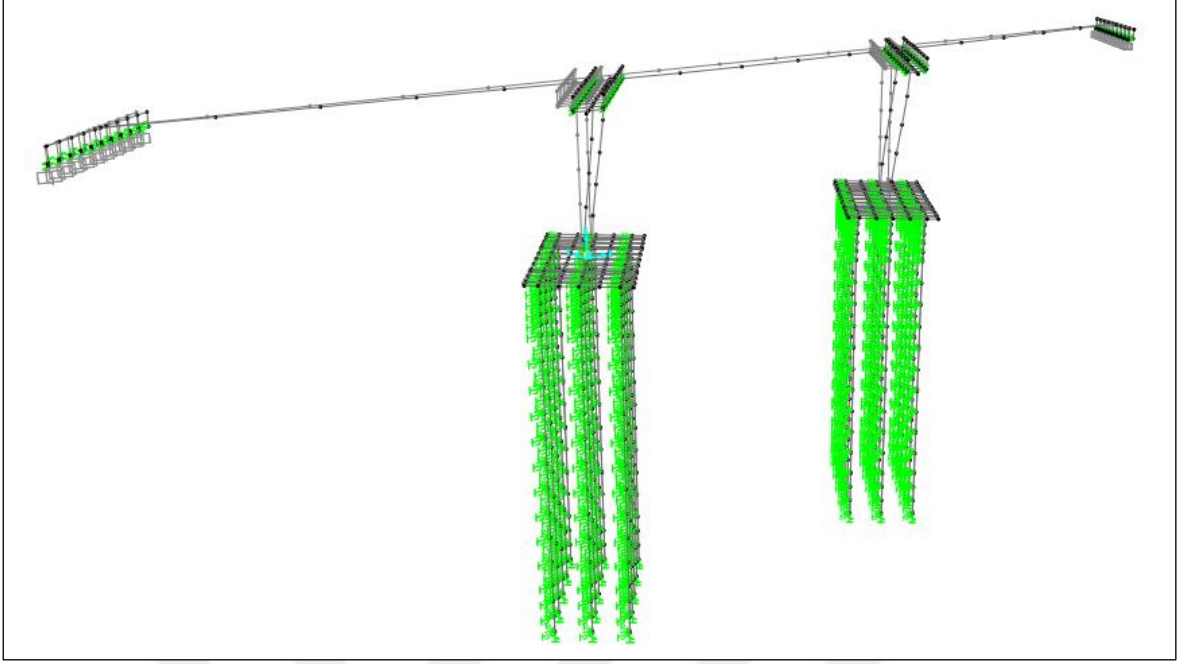
Options

Add to Existing Springs
 Replace Existing Springs
 Delete Existing Springs

Şekil 4.36. p-y eğrilerine göre belirlenen bağlantı elemanlarının kazıklara yayılı yay olarak atanması

4.4.2. SAP2000 analiz çıktıları

SAP2000 yazılımında modellenen Yeşilırmak Köprüsü için yapılan eleman, malzeme ve deprem yükü tanımlamalarından sonra program analizi tamamlanmıştır. Doğrusal olmayan zemin özellikleri tanımlandığından dolayı zaman tanım alanında analiz yapılırken de doğrusal olmayan yöntem seçilmiştir. Buna göre köprü kazıklarında oluşan deprem tesirleri elde edilmiştir. Bölüm 7.1.4'te tanımlanmış olan depremlerin hepsi kontrol edilerek en elverişsiz olana göre durum değerlendirmesi yapılmıştır. Köprü deprem esnasında birinci modda gerçekleşen deformasyonlar Şekil 4.37'de gösterilmiştir.



Şekil 4.37. Köprü sayısal modelinin deprem yükleri altında deforme görüntüsü

Analiz yapılan köprünün ilgili orta ayak aksı baz alınarak bu ayakta bulunan 34 metre uzunluğundaki temel altı kazılarının her sırasından bir adet kazık analiz için seçilmiştir. Bu kazıklarda deprem ve ölü yük durumu için oluşan moment ve kesme yük tesirleri grafiksel olarak EK-1’de verilmiştir. Ayrıca SAP2000 yazılımında üç sıradaki kazıklarda deprem ve ölü yüklerin oluşturduğu toplam moment, kesme ve deplasman değerleri Çizelge 4.16-4.18’de verilmiştir.

Çizelge 4.16. Birinci sıradaki kazıkta oluşan tesirler

Derinlik	Moment (kN.m)	Kesme (kN)	Deplasman (mm)
0,00	-747,74	244,10	2,29
1,00	-534,77	212,91	2,39
2,00	-355,60	179,17	2,32
3,00	-209,99	145,61	2,13
4,00	-95,89	114,09	1,89
6,50	65,50	64,56	1,18
9,00	112,03	18,61	0,58
11,50	99,96	-4,82	0,18
14,00	67,82	-12,85	-0,03
16,50	36,48	-12,54	-0,10
19,00	14,09	-8,96	-0,11
21,50	1,46	-5,05	-0,08
24,00	-3,67	-2,05	-0,05
26,50	-4,23	-0,23	-0,02
29,00	-2,68	0,50	0,00
31,50	-0,99	0,51	0,01
34,00	0,00	0,00	0,00

Çizelge 4.17. İkinci sıradaki kazıkta oluşan tesirler

Derinlik	Moment (kN.m)	Kesme (kN)	Deplasman (mm)
0,00	-724,42	242,64	2,37
1,00	-513,60	210,36	2,44
2,00	-337,50	176,10	2,35
3,00	-195,08	142,41	2,15
4,00	-84,04	111,04	1,89
6,50	71,09	62,05	1,18
9,00	113,91	17,13	0,57
11,50	100,10	-5,52	0,17
14,00	67,38	-13,10	-0,03
16,50	35,99	-12,56	-0,10
19,00	13,73	-8,91	-0,11
21,50	1,26	-4,98	-0,08
24,00	-3,77	-2,01	-0,05
26,50	-4,27	-0,21	-0,02
29,00	-2,69	0,63	0,00
31,50	-1,46	0,74	0,01
34,00	0,00	0,00	0,00

Çizelge 4.18. Üçüncü sıradaki kazıkta oluşan tesirler

Derinlik	Moment (kN.m)	Kesme (kN)	Deplasman (mm)
0,00	-629,45	151,35	2,57
1,00	-488,13	141,32	2,61
2,00	-331,65	157,04	2,48
3,00	-186,09	146,91	2,26
4,00	-73,41	115,13	1,98
6,50	81,04	64,67	1,22
9,00	121,01	17,78	0,58
11,50	104,34	-5,82	0,18
14,00	70,48	-13,69	-0,04
16,50	36,78	-13,13	-0,11
19,00	13,83	-9,33	-0,11
21,50	1,08	-5,23	-0,08
24,00	-4,03	-2,13	-0,05
26,50	-4,45	-0,22	-0,02
29,00	-2,79	0,65	0,00
31,50	-1,50	0,80	0,01
34,00	0,00	0,28	0,00

4.5. LPile Yazılımı ile Yapılan Analizler

LPile, uluslararası tanınırlığı olan, p-y metodu kullanarak tek kazığın yanal yük altında analizini yapabilen bir bilgisayar yazılımıdır. LPile yazılımında zemin-kazık etkileşimi göz önüne alınmaktadır. Bu yazılımda kazıkların üzerinde kalan yapılar modellenememesine rağmen üstyapıdan gelen yük tesirleri kazık başına yük olarak verilebilmektedir. SAP2000 analizindeki sonuçlar ile karşılaştırma yapmak amacı ile Yeşilirmak Köprüsü kazıkları için üç ayrı tek kazık modeli hazırlanarak analiz yapılmıştır.

4.5.1. LPile analiz girdileri

LPile analizi yapılırken tasarımı yapılan köprünün tasarım felsefesine uygun olacak şekilde tekrarlı yükler seçilmiştir. Kazıkların yanal yükler altındaki davranışlarının incelenmesi için tekrarlı yüklerin seçilmesi önemlidir. Yazılımda seçilen ayarlar Şekil 4.38’de gösterilmiştir.

Program Options and Settings

Computational Options

Conventional Analysis Mode

LRFD Analysis Mode

Nonlinear EI Only Mode (Interaction diagram, input required)

The options below are available for conventional and LRFD modes

Use Modification Factors for p-y Curves (input required)

Include Shearing Resistance at Pile Tip (input required)

The options below are available only for conventional analysis mode

Use Loading by Single Distributed Load Profile (input required)

Use Separate Distributed Load Profiles for Each Load Case

Use Loading by Single Soil Movement Profile (input required)

Use Separate Soil Movement Profiles for Each Load Case

Compute Pile-Head Stiffness Matrix Values (input required)

Compute Push-over Analysis (input required)

Compute Pile Buckling Analysis (input required)

Engineering Units of Input Data and Computations

US Customary Units (inches, feet, and pounds)

SI Units (millimeters, meters and kilonewtons)

Loading Type and Number of Cycles of Loading

Static Loading

Cyclic Loading Number of Cycles of Loading

Analysis Control Options

Number of Pile Increments

Maximum Number of Iterations

Convergence Tolerance on Deflections (m)

Limit on Excessive Deflection of Pile Head (m)

Data from Load Test

Input Data from Load Test for Comparison to Computed Values

Output Options

Generate p-y Curves at User-Specified Depths (input required)

Print Pile Response Every nodes

Output Summary Tables Only

Use Narrow Output Report Format

Text Viewer Options

Use Internal Text Viewer (faster)

Use External Viewing Program

Internet Update Notice Query

Check Internet for Program Update on Program Startup

Şekil 4.38. LPile program ayarları ve hesap yöntemi seçimi

Analizi yapılan köprü kazıklarının boyutları ve malzeme özellikleri LPile yazılımında tanımlanmıştır. Kazık kesiti için dairesel betonarme fore kazık seçeneği seçilmiştir. Kazık boyu 34 metre olarak tanımlanmış olup kazık çapı 1200 mm olarak tanımlanmıştır. Ayrıca malzeme özellikleri olarak C25 beton sınıfı tanımlanmış olup donatı olarak köprü kazıklarındaki daha önce tasarlanmış olan donatı adeti girilmiştir. Tanımlanan kazık özellikleri Şekil 4.39 – 4.42’de gösterilmiştir.

Section 1, Top Number of Defined Sections = 1 Total Length = 34,00 m

Section Type

Section Type and Shape

Rectangular Concrete Pile

Round Concrete Shaft (Bored Pile)

Round Concrete Shaft with Permanent Casing

Round Shaft with Permanent Casing and Core

Steel Pipe Pile

Round Prestressed Concrete Pile

Round Prestressed Concrete Pile with Void

Square Prestressed Concrete Pile

Square Prestressed Concrete Pile with Void

Octagonal Prestressed Concrete Pile

Octagonal Prestressed Concrete Pile with Void

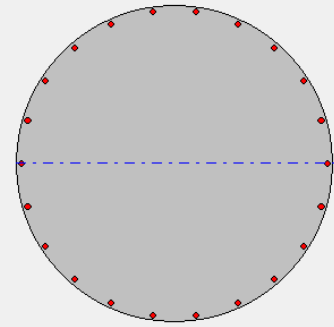
Elastic Section (Non-yielding)

Elastic Section with Specified Moment Capacity

Pile with Defined Non-linear Bending

Show

Section Profile



Şekil 4.39. LPile kazık kesit tipi seçimi

Elevation Dimensions		Drilled Shaft Section Dimensions:	
Length of Section (m)	<input type="text" value="34"/>	Section Diameter (mm)	<input type="text" value="1200"/>
Elastic Section Properties:		Section Depth (mm)	<input type="text" value="0"/>
Structural Shape	<input type="text" value="Select Shape"/>	Corner Chamfer (mm)	<input type="text" value="0"/>
	At Top	At Bottom	Casing Wall Thickness (mm)
Elastic Sect. Width (mm)	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
No data required (mm)	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	Core Void Diameter (mm)
Area (mm ²)	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	Core Wall Thickness (mm)
Mom. of Inertia (mm ⁴)	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	Flange Thickness (mm)
Plas. Mom. Cap. (m-kN)	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	Web Thickness (mm)
Shear Capacity (kN)	<input type="text" value="919"/>	Elastic Mod. (kN/m ²)	<input type="text" value="0"/>

Şekil 4.40. LPile kazık geometrik boyutlarının girilmesi

Concrete Properties:	
Compressive Strength (kN/m ²)	<input type="text" value="25000"/>
Max. Coarse Aggregate Size (mm)	<input type="text" value="0,05"/>
<input type="button" value="View Stress-Strain Curve"/>	
<input type="button" value="View Advice for Concrete Slump"/>	

Şekil 4.41. LPile beton özelliklerinin tanımlanması

Reinforcing Bar Properties:

Yield Stress (kN/m²) Elastic Modulus (kN/m²)

Continue Rebar Pattern and Size from Section Above

Bar Size Number of Bars

Bar/Bundle Options
 Single Bars
 2-Bar Bundles
 3-Bar Bundles

Concrete Cover to Edge of Bar (mm)

Automatically position bars in circle

Offset Reinforcement Pattern from Centroid of Section Offset (m)

Bar Spacing = 139,26 mm, Area of Steel = 11680,44 sq. mm, Percentage of Steel = 1,03%

Şekil 4.42. LPile kazık donatı özelliklerinin tanımlanması

Betonarme kazık özellikleri tanımlandıktan sonra kazığın içinde yer alacağı zemin tipi seçilmiştir. Zemin özellikleri tanımlanmasında SAP2000 analizi ile uyum içinde olması açısından su altındaki sert kil seçeneği seçilmiştir. Seçilen zemin tipi Şekil 4.43'te gösterilmiştir.

Soil Layers

Layer	Select p-y Curve Type	Vertical Depth Below Pile Head	Vertical Depth Below Pile Head	Press Button to Enter
	from Drop-down List	of Top of Soil Layer (m)	of Bottom of Soil Layer (m)	Soil Properties
1	Stiff Clay with Free Water (Reese)	0	34	1: Stiff Clay with Free Water

All positive depth coordinates are defined as vertical distances below the pile-head.
 If the pile-head is embedded below the ground surface, the top layer must extend from the ground surface (defined by a negative vertical depth) to some point below the pile head.
 Select the p-y soil type using the drop-down list in the left table column.

Stiff Clay with Free Water 1

1=Top, 2=Bottom	Effective Unit	Undrained	Non-default	Non-default
	Weight, (kN/m ³)	Cohesion, c, (kN/m ²)	Strain Factor E50	k, (kN/m ³)
1	8.3	66.04	0.007	55000
2	8.3	66.04	0.007	55000

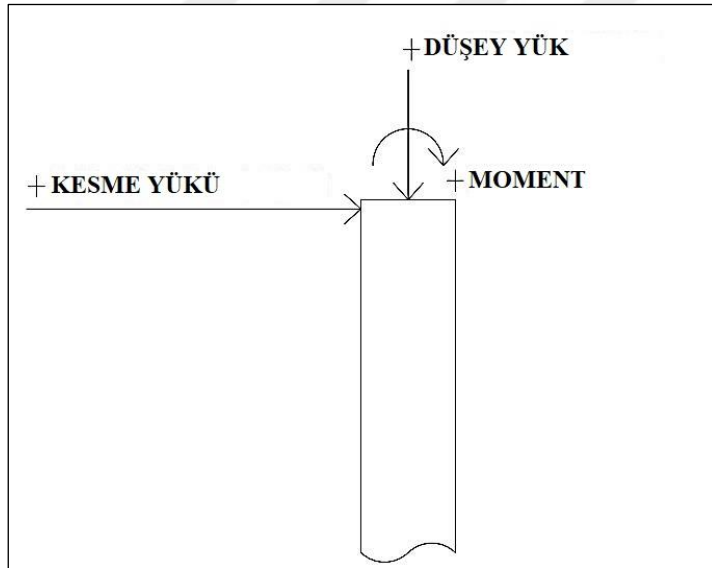
LPile linearly interpolates over vertical depth to compute values between the top and bottom of the layer.
 LPile will substitute default values for E50 and k if input values equal zero.

Şekil 4.43. LPile zemin özellikleri tanımlanması

LPile yazılımında kazık ve zemin özellikleri tanımlandıktan sonra SAP2000 analizinden elde edilen kazık yük tesirleri LPile modeline etki edilmiştir. Üç sıra kazık için LPile yazılımında ayrı modeller kurulmuştur. LPile modellerinde kazık üst noktalarına etki edilen yükler Çizelge 4.19’da verilmiştir. Ayrıca LPile yazılımındaki yükleme sembolojisi Şekil 4.44’te gösterilmiştir.

Çizelge 4.19. LPile modelinde kazık başlarına etki edilen yük değerleri

	Yük Tipi	Kesme Yüğü (kN)	Düşey Yüğü (kN)	Moment (kN-m)
1.Sıra Kazık	Ölü Yüğü	33,43	1952,41	-119,92
	Deprem Yüğü	210,67	-232,53	-627,76
	Yük Tipi	Kesme Yüğü (kN)	Düşey Yüğü (kN)	Moment (kN-m)
2.Sıra Kazık	Ölü Yüğü	11,97	1978,33	-35,49
	Deprem Yüğü	230,66	-2,08	-688,46
	Yük Tipi	Kesme Yüğü (kN)	Düşey Yüğü (kN)	Moment (kN-m)
3. Sıra Kazık	Ölü Yüğü	-9,69	1913,67	53,39
	Deprem Yüğü	161,05	212,21	-682,84



Şekil 4.44. LPile yazılımındaki kazık yükleme sembolojisi

4.5.2. LPile analiz çıktıları

Sayısal modelin kurulması ve yüklemelerin tamamlanmasının ardından LPile yazılımında üç sıra için kazık analizleri tamamlanmıştır. Kazık modellerinden elde edilen deplasman,

moment ve kesme değerleri Çizelge 4.20’de verilmiştir. Ayrıca Lpile analiz sonuçları grafik olarak SAP2000 analizi karşılaştırması ile Bölüm 5’te verilmiştir.

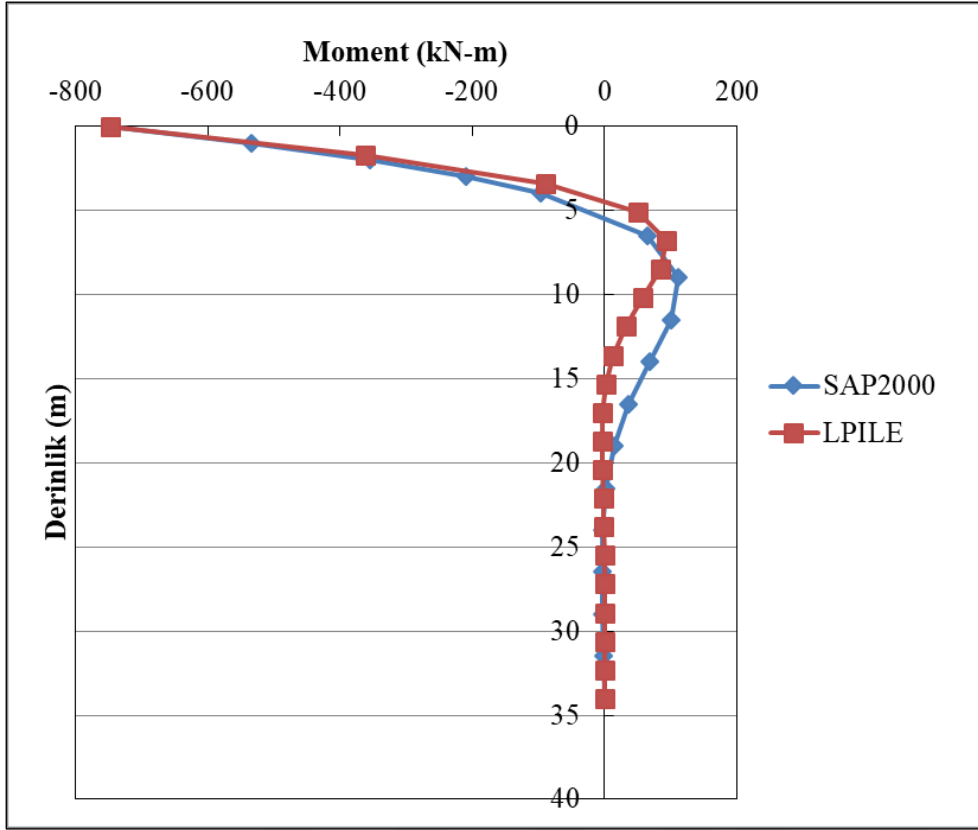
Çizelge 4.20. LPILE kazık modellerinden elde edilen moment, kesme ve deplasman değerleri

Derinlik (m)	1. Sıra Kazık			2. Sıra Kazık			3. Sıra Kazık		
	Moment (kN.m)	Kesme (kN)	Deplasman (mm)	Moment (kN.m)	Kesme (kN)	Deplasman (mm)	Moment (kN.m)	Kesme (kN)	Deplasman (mm)
0	-747,68	244,10	0,82	-723,95	242,63	0,88	-629,45	151,36	0,09
1,7	-362,19	198,17	0,97	-342,13	195,13	1,00	-380,89	136,61	0,37
3,4	-89,20	120,17	0,78	-75,08	116,35	0,78	-177,55	99,69	0,41
5,1	50,16	48,34	0,49	58,16	45,03	0,49	-45,54	56,79	0,33
6,8	92,59	6,09	0,25	95,92	3,86	0,24	22,19	24,89	0,22
8,5	84,46	-12,54	0,08	84,96	-13,72	0,07	46,27	5,25	0,12
10,2	58,30	-16,55	0,00	57,52	-16,97	-0,01	45,82	-4,47	0,05
11,9	32,12	-13,62	-0,04	31,03	-13,62	-0,04	34,89	-7,61	0,01
13,6	13,06	-8,76	-0,04	12,13	-8,59	-0,04	22,01	-7,17	-0,01
15,3	1,99	-4,46	-0,03	1,38	-4,27	-0,03	11,32	-5,30	-0,02
17	-2,92	-1,55	-0,02	-3,23	-1,40	-0,02	4,07	-3,25	-0,02
18,7	-4,05	0,02	-0,01	-4,16	0,11	-0,01	0,01	-1,61	-0,01
20,4	-3,40	0,63	0,00	-3,39	0,68	0,00	-1,73	-0,53	-0,01
22,1	-2,21	0,70	0,00	-2,16	0,71	0,00	-2,07	0,06	0,00
23,8	-1,14	0,53	0,00	-1,09	0,53	0,00	-1,73	0,30	0,00
25,5	-0,42	0,32	0,00	-0,38	0,31	0,00	-1,18	0,33	0,00
27,2	-0,03	0,14	0,00	-0,01	0,13	0,00	-0,68	0,26	0,00
28,9	0,10	0,03	0,00	0,11	0,02	0,00	-0,31	0,17	0,00
30,6	0,09	-0,03	0,00	0,10	-0,03	0,00	-0,11	0,08	0,00
32,3	0,03	-0,03	0,00	0,04	-0,04	0,00	-0,02	0,03	0,00
34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

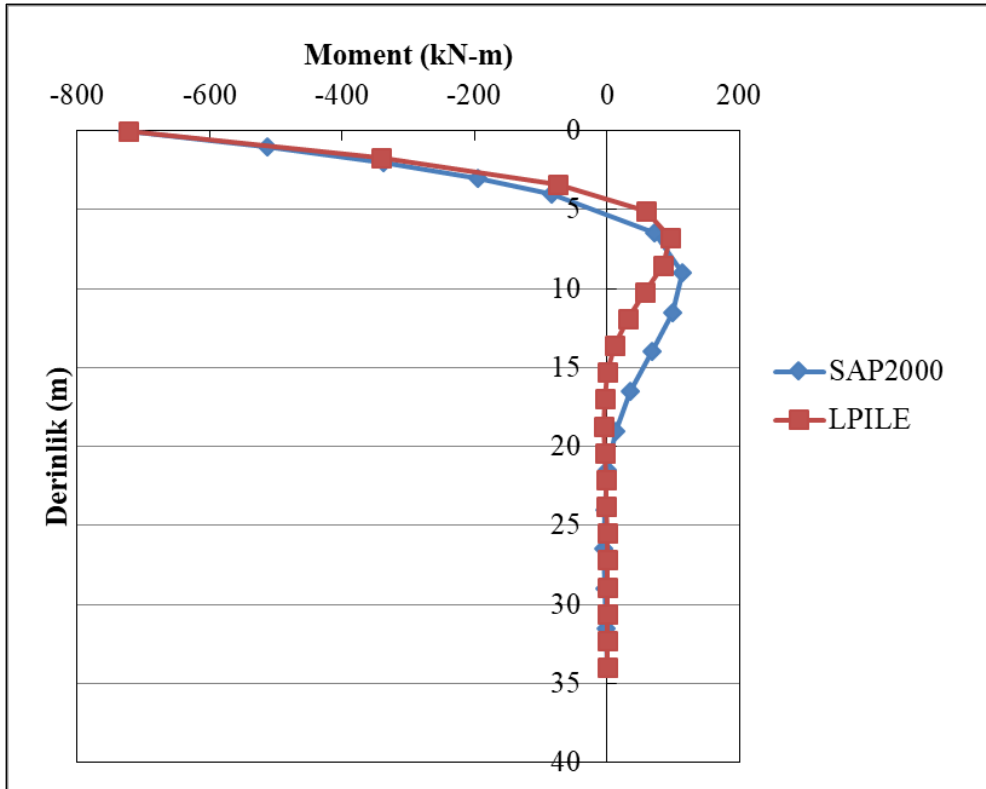
Analiz sonuçları her kazık için ayrıca grafiksel olarak Ek-2’de verilmektedir.

4.6. SAP2000 ve LPILE Yazılımlarından Elde Edilen Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

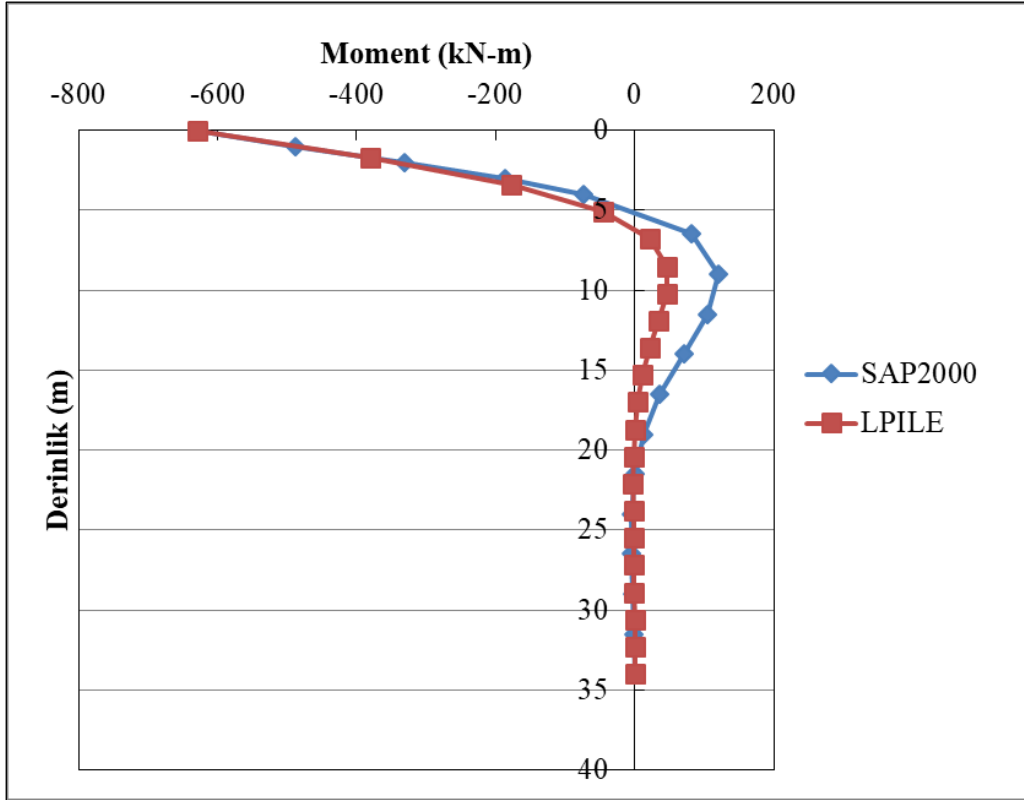
Yeşilirmak Köprüsü için yapılan deprem analizi ve SAP2000 modelinde kazıktaki yanal yüklerin tesirlerinin elde edilmesinin ardından, kazık başındaki yük tesirleri LPILE programında üç sıra kazık için uygulanmıştır. İki yazılımda da analizler tamamlandıktan sonra her sıradaki kazıklar için farklı derinliklerden moment, kesme ve deplasman değerleri okunarak hazırlanmış karşılaştırmalı grafikler Şekil 4.45 - 4.53’te verilmektedir.



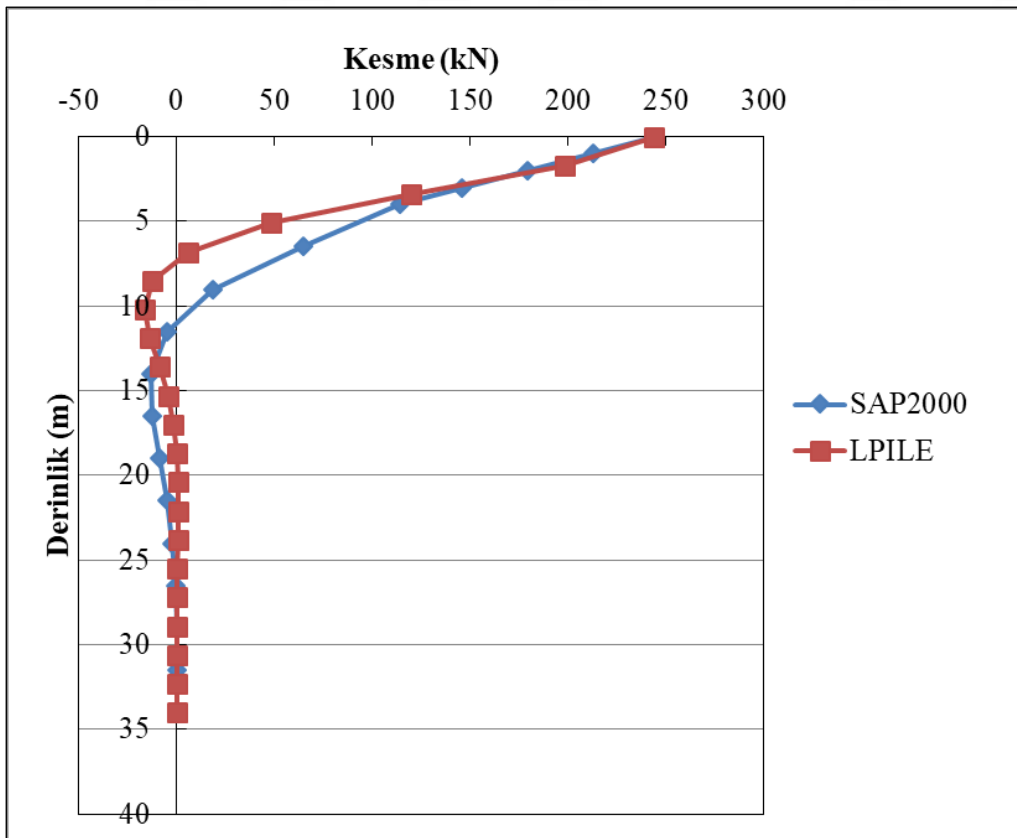
Şekil 4.45. Birinci sıra kazıklar için SAP2000 ve LPile moment değerleri



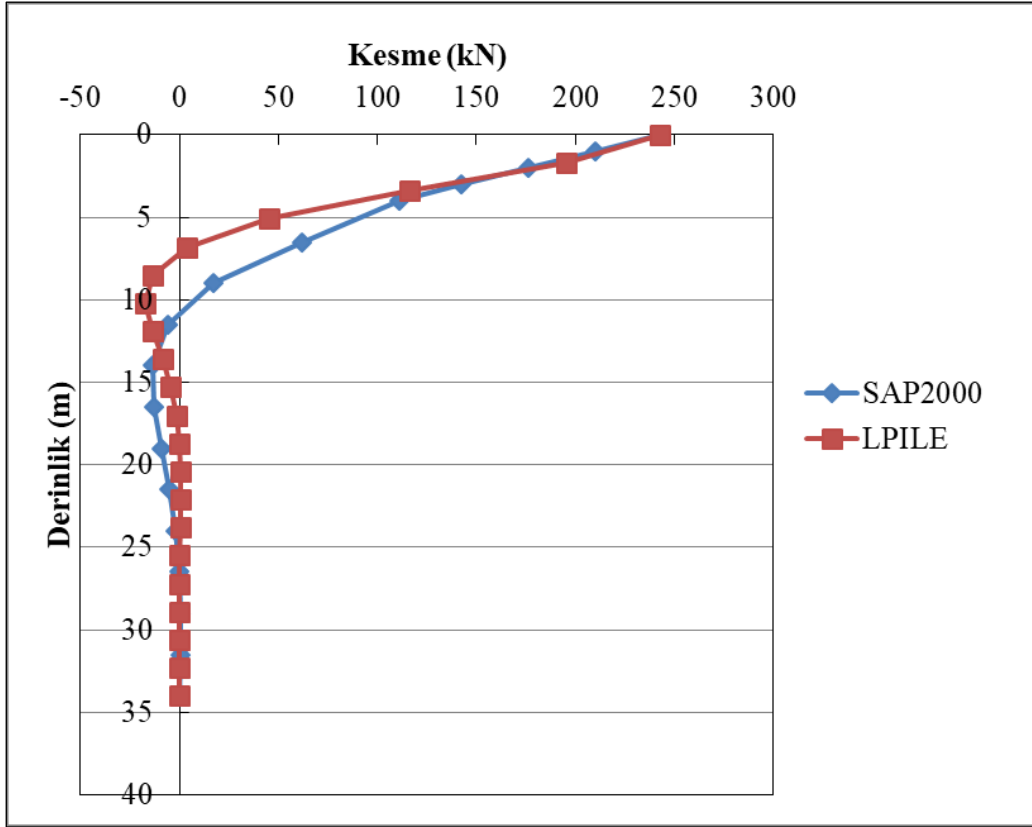
Şekil 4.46. İkinci sıra kazıklar için SAP2000 ve LPile moment değerleri



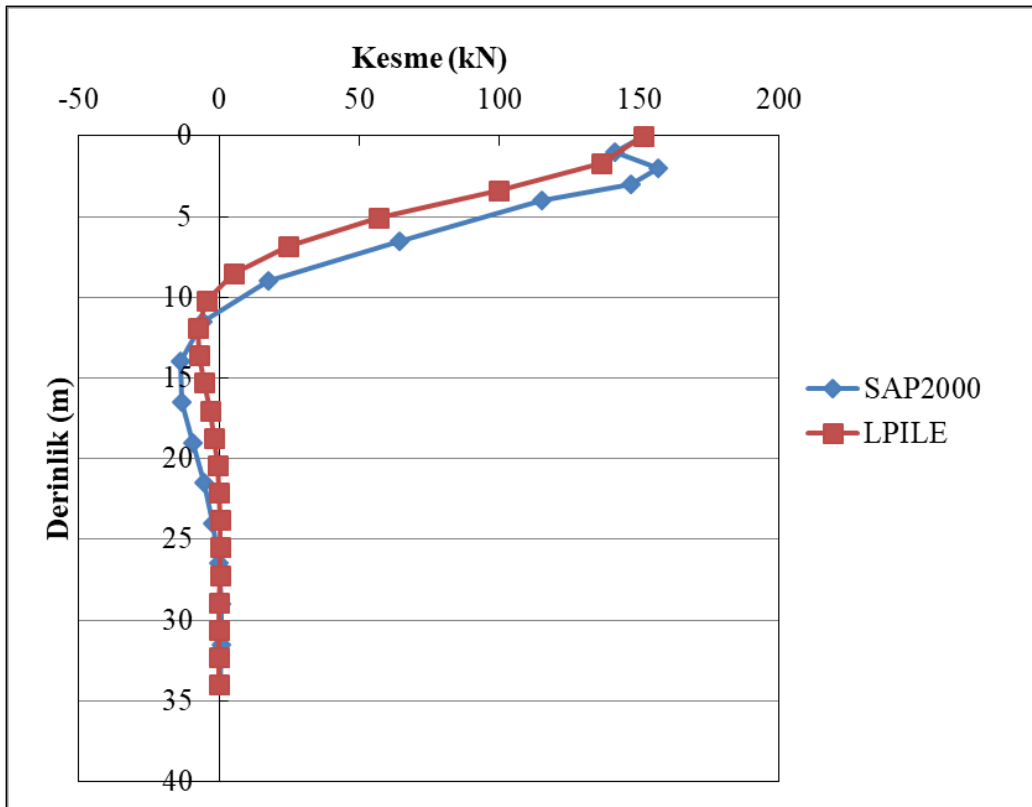
Şekil 4.47. Üçüncü sıra kazıklar için SAP2000 ve LPILE moment değerleri



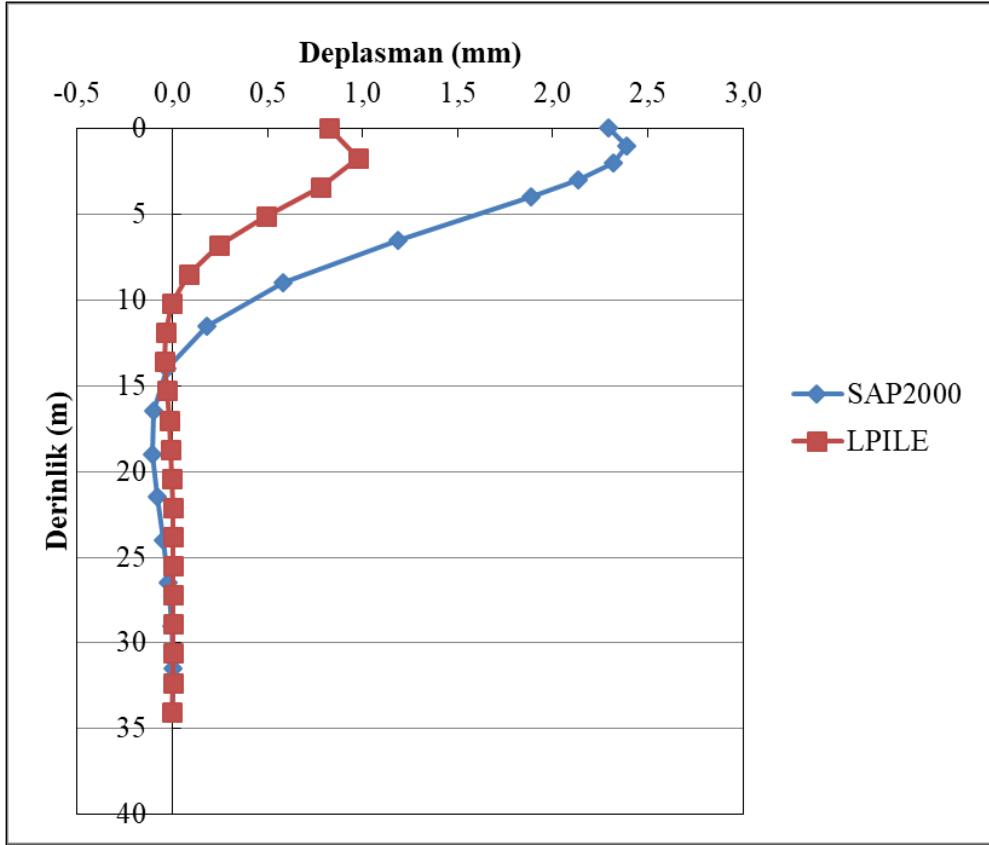
Şekil 4.48. Birinci sıra kazıklar için SAP2000 ve LPILE kesme değerleri



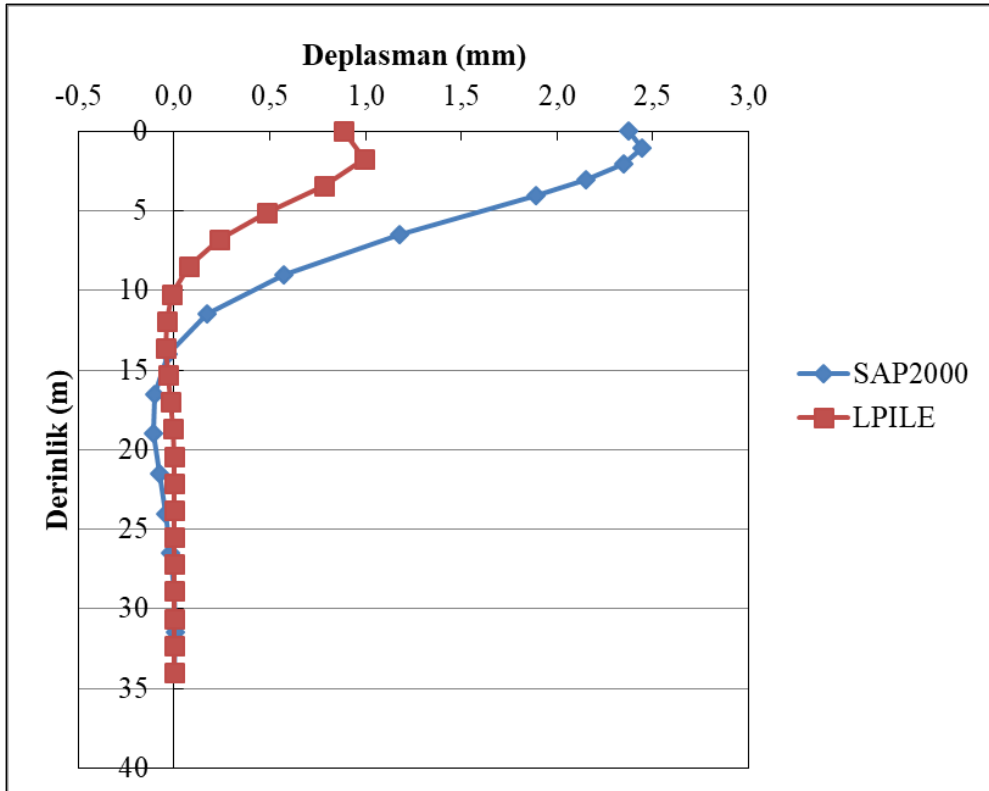
Şekil 4.49. İkinci sıra kazıklar için SAP2000 ve LPile kesme değerleri



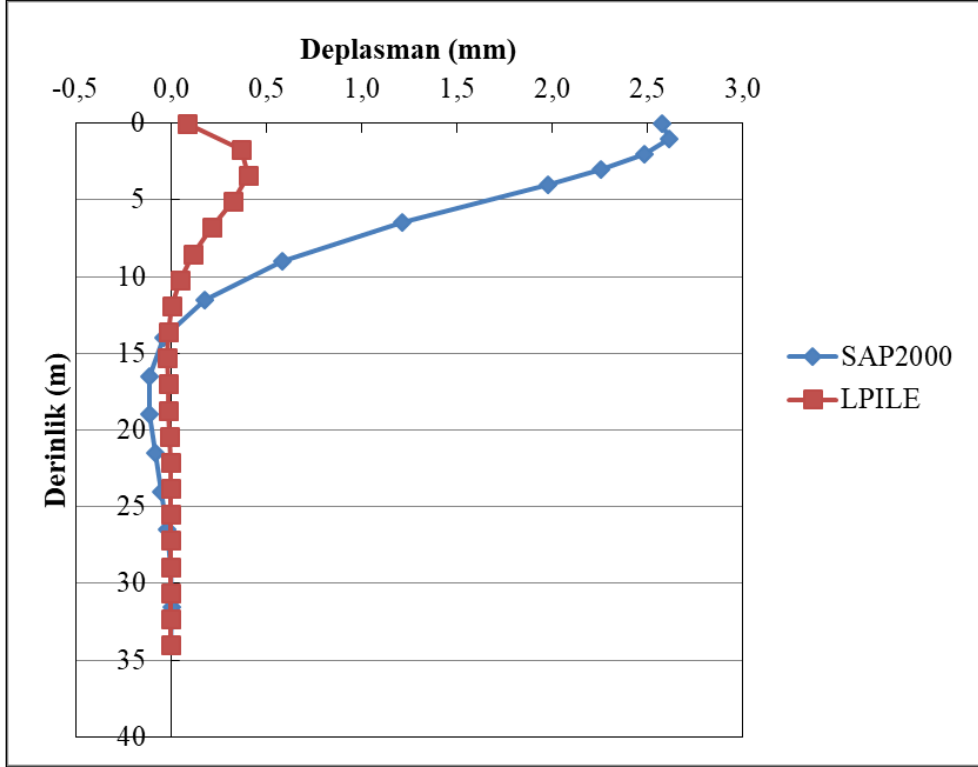
Şekil 4.50. Üçüncü sıra kazıklar için SAP2000 ve LPile kesme değerleri



Şekil 4.51. Birinci sıra kazıklar için SAP2000 ve LPile deplasman değerleri



Şekil 4.52. İkinci sıra kazıklar için SAP2000 ve LPile deplasman değerleri



Şekil 4.53. Üçüncü sıra kazıklar için SAP2000 ve LPILE deplasman değerleri

5. SONUÇ

Günümüzde sayıları devamlı artmakta olan karayolu ve demiryolu ağlarının önemli ve ayrılmaz bir parçası olan köprülerin birçoğu, köprülere etki eden yükler ve zemin koşulları nedeniyle kazıklı temellere oturmaktadır. Özellikle deprem bölgelerinde tasarlanan köprülerde yapı mühendisi ve geoteknik mühendisinin ortak paydada buluşması, kazıkların deprem yükleri altındaki davranışlarının doğru tespit edilmesi açısından önem arz etmektedir.

Bu çalışmada, projesi Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından yaptırılan ve 34 metre uzunluğundaki kazıklı temeller üzerine oturmakta olan Yeşilirmak Köprüsü, sonlu elemanlar programı SAP2000 yazılımı ile modellenerek, köprü kazıklarının zaman tanım alanında analiz yöntemi ile deprem yükleri altındaki davranışlarının incelenmesi amaçlanmıştır. Köprü kazıklarının su altındaki sert kil içinde yer aldığı göz önüne alınarak, zeminin doğrusal olmayan davranışlarını tanımlamak amacıyla p-y yöntemi kullanılmış ve kazık modellerine doğrusal olmayan bağlantı elemanları tanımlanmıştır. Köprü tüm yapısal elemanları ve kazıklı temelleri ile birlikte bir bütün olarak modellenmiş ve zaman tanım alanında analiz yöntemi ile deprem yükleri altında kazıkların yük tesirleri elde edilmiştir. Köprü temelinde üç sıra kazık bulunması sebebiyle kazıkların grup etkisi altında davranışları da göz önünde bulundurulmuş ve p-y eğri değerleri kazıklara tanımlanırken ilgili katsayılarla çarpılmıştır. Elde edilen tesirler sonucu kazık başına etki eden yükler kullanılarak üç sıra kazık için LPile yazılımında tek kazık modellemesi yapılmış ve tek kazık modelinin sonuçları ile köprü bütün modeli arasındaki kazık tesirleri karşılaştırılmıştır.

SAP2000 yazılımında yapılan analizlerde, ölü yük ve deprem yükleri altındaki kazıklardaki moment, kesme ve deplasman değerlerinin üst kısımlarda kazığın diğer noktalarına nazaran oldukça yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Birinci ve ikinci sıradaki kazıkların moment değerleri en üst noktada -747 kN.m ve -723 kN.m iken ilk 5 metrede nötrlenmiş ve daha sonra moment yönü değişerek 9 metre derinlikte +112 kN.m ve +113kN.m değerlerine ulaşmıştır. Bu sonuçlar doğrultusunda deprem etkisi altında moment değerlerinin 9 metre derinlikte kazık üst noktasına göre yaklaşık %85 azaldığı ve kazık tabanına kadar sıfırlanma eğiliminde olduğu gözlenmiştir. Üçüncü sıradaki kazıkta ise moment değeri kazık üst noktasında -629 kN.m iken 9 metre derinlikte yaklaşık %80 oranında azalarak +121 kN.m

değerine ulaştığı belirlenmiştir. Birinci ve ikinci sıradaki kazıklar için kesme değeri göz önüne alındığında kazık üst noktasındaki kesme değeri sırası ile +244 kN ve +242 kN iken 15 metre derinliğe kadar kesme değeri azalarak ve yön değiştirerek yaklaşık %95 oranında azalarak - 12 kN ve -13 kN değerlerine ulaştığı ve kazık tabanına kadar nötrlendiği görülmüştür. Üçüncü sıradaki kazıkta ise kazık üst noktasındaki kesme değeri yaklaşık +150 kN iken 15 metre derinlikte -13 kN değerine geldiği ve yaklaşık %91 oranında azaldığı görülmüştür. SAP2000 yazılımında yapılan analizlerde görülen kazık üst noktasında görülen deplasman değerlerinin birinci, ikinci ve üçüncü sıradaki kazıklarda sırası ile 2,39 mm, 2,40 mm ve 2,61 mm olduğu görülürken bu değerler 17 metre derinlikte yaklaşık 0,01 mm değerine kadar düşmektedir ve kazık tabanında sıfırlanmaktadır.

LPile yazılımında tek kazık olarak modellenen kazıklarda ise kazık üst noktalarındaki yük tesirleri benzer çıkmakla birlikte negatif yöndeki maksimum moment ve kesme değerleri SAP2000 yazılımında sırası ile 9 metre ve 15 metrede gözlenirken, LPile yazılımında 7 metre ve 10 metre derinlikte gözlenmiştir. Ayrıca LPile yazılımında yapılan kazık analizinde birinci, ikinci ve üçüncü sıradaki kazık üst noktasında deplasman değerleri sırası ile 0,97 mm, 0,99 mm ve 0,40 mm olarak görülmüştür olmakla birlikte bu değerler SAP2000 analizi sonuçlarından birinci sıradaki kazık için %60, ikinci sıradaki kazık için %59 ve üçüncü sıradaki kazıkta ise %85 daha düşük olduğu görülmüştür. İki modelleme yöntemi arasındaki deplasman farkı maksimum 2,00 mm olduğundan tasarımı etkilemeyecek kadar küçük olsa da köprünün bütün halde modellenerek deprem yükleri altında incelenmesi sonucu kazık yanal deplasman değerlerinin daha yüksek olduğu sonucu elde edilmiştir.

Yeşilirmak Köprüsü'nün Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından onaylanmış olan hesap raporuna göre köprü, deprem yükleri altında modellenirken temeller modellenmeden, orta ayak kolonlarının altı ankastre mesnet olarak tanımlanmıştır. Daha sonra ankastre mesnetteki tesirler ayrı bir kazıklı temel modeline etki edilerek kazıklar üzerindeki deprem etkisi incelenmiştir. Günümüzde köprü tasarımı yapılırken birçok mühendis bu yöntemi kullanmaktadır. Köprü onaylı hesap raporuna göre kazık ucundaki statik yükleme altındaki maksimum eksenel kuvvet 2586 kN, sismik yük altındaki eksenel kuvvet ise 1871 kN olarak belirtilmiştir. Bu sonuçlardan Yeşilirmak Köprüsü için kazık boyunu belirleyen yükleme tipinin statik yükleme olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır. Ayrıca köprü onaylı hesap raporuna göre kazıkta oluşan maksimum moment, normal yükler altında 1485 kN.m ve sismik yük altında 815 kN.m olarak belirtilmiştir. Bu çalışma kapsamındaki sismik yük

altındaki analizlerde ise maksimum momentin 747 kN.m olduğu göz önüne alındığında, köprü tasarımında kullanılan deprem yükü altındaki hesap momentinin bu çalışma kapsamında hesaplanan momentten yaklaşık %10 daha yüksek olduğu ve güvenli tarafta kalındığı sonucuna ulaşılmıştır. Sonuçlar göz önüne alındığında, sismik yüklerin köprü kazıklarına etkisinin belirlenmesi için köprü modellemesinin doğrusal olmayan zemin özellikleri ve üstyapı ile bir bütün olarak sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi geoteknik mühendisliği açısından önem arz etmektedir.





KAYNAKLAR

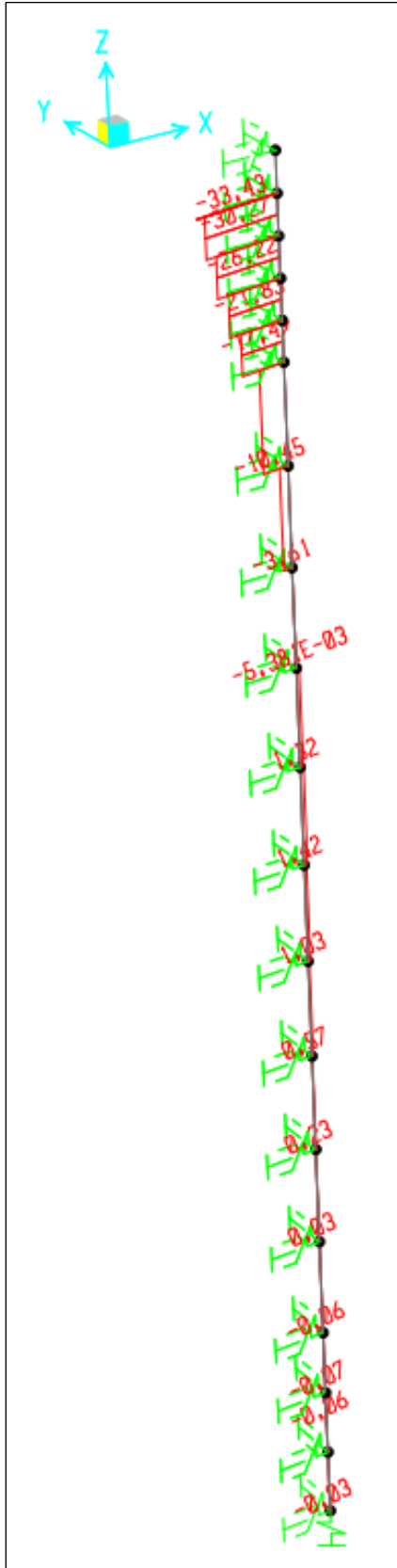
- AASHTO (2010). *LRFD Bridge Design Specifications*, American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO, Washington, D.C., 89.
- AASHTO (2011). *Guide Specification for LRFD Seismic Bridge Design*, American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO, Washington, D.C., 14,45,47,52.
- Broms, B.B. (1965). Design of laterally loaded piles. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Engineering*, 91(3), 79-99.
- Chatterjee, K., Choudhury, D., and Poulos, H. (2015). Seismic analysis of laterally loaded pile under influence of vertical loading using finite element method. *Computers and Geotechnics*, 67, 172-186.
- Chen, Y. (2014). Effect of pile-soil-structure interaction on the cable-stayed bridge in response to the earthquake. *Applied Mechanics and Materials*, 539, 731-735.
- Coduto, D. (1994). *Foundation design*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 535,547.
- Das, B. M. (2011). *Principles of foundation engineering*, SI (Seventh edition). Connecticut: Cengage Learning, 617-618.
- Davisson, M.T. & Gill, H.L. (1963). Laterally loaded piles in a layered soil system. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Engineering*, 89(3), 63-94.
- Duncan, J. & Arsoy, S. (2003). Effect of bridge-soil interaction on behavior of piles supporting integral bridges. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1849(1), 91-97.
- Greimann, L., Wolde-Tinsae, A., and Yang, P. (1987). Finite element model for soil-pile interaction in integral abutment bridges. *Computers and Geotechnics*, 4(3), 127-149.
- İnternet: Pacific Earthquake Engineering Research Center (2019). Peer Ground Motion Database.
URL:<http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fngawest2.berkeley.edu%2F&date=2019-05-10>, Son Erişim Tarihi: 10.03.2019
- İnternet: Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (2019). Türkiye Deprem Tehlike Haritaları.
URL:<http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Ftdth.afad.gov.tr%2FTDTH%2Fmain.xhtml&date=2019-05-28>, Son Erişim Tarihi: 01.03.2019
- Khodair, Y. & Abdel-Mohti, A. (2014). Numerical analysis of pile–soil interaction under axial and lateral loads. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 8(3), 239-249.

- Matlock, H. & Reese, L. C. (1960). Generalized solutions for laterally loaded piles. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, 86, 63-91
- Mestav Sarica, G., Askan, A., & Caner, A. (2016). Development of mean site-dependent response spectra for new bridge designs in Turkey. *Structure and Infrastructure Engineering*, 13(8), 1002-1012.
- McClelland, B. & Focht, Jr. (1956). Soil modulus for laterally loaded piles. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 82(4), 1-22.
- Meyer, B.C. & Reese, L.C. (1979). Analysis of single piles under lateral loading; Center for Transportation Research The University of Texas at Austin Report No FHWA/TX-79/38+244-1, *FHWA Report*, Austin.
- O'Neill, M.W. (1983). *Group action in offshore piles*. Proceedings of the Specialty Conference on Geotechnical Engineering in Offshore Practice, ASCE.
- Poulos, H.G. (1971). Behavior of laterally loaded piles: I-single piles. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 97(5), 711-731.
- Reese, L.C., Cox, W.R. and Koop, F.D. (1975). *Field testing and analysis of laterally loaded piles in stiff clay*. Proceedings of the VII Annual Offshore Technology Conference, Houston, Texas, 2(OTC 2312): 672–690.
- Selby, A. & Arta, M. (1991). Three-dimensional finite element analysis of pile groups under lateral loading. *Computers & Structures*, 40(5), 1329-1336.
- Siyahi, B., Cetin, K.O. ve Bilge H.T. (2013). *Geoteknik deprem mühendisliği açısından zemin-temel-yapı etkileşimine kritik bakış*, 5. Geoteknik Sempozyumu, Adana.
- Temelsu Uluslararası Mühendislik Hizmetleri A.Ş. (2016). Çarşamba çevre yolu jeolojik-jeoteknik etüt raporu; Temelsu, Ankara.
- Winkler, E. (1867). *Die Lehre von der Elasticitaet und Festigkeit mit besonderer Rücksicht auf ihre Anwendung in der Technik*. Prag, 1-2.
- Wu, G. & Finn, W. (1997). Dynamic nonlinear analysis of pile foundations using finite element method in the time domain. *Canadian Geotechnical Journal*, 34(1), 44-52.
- Zhu, B. (2003). Transient response of piles-bridge under horizontal excitation. *Journal of Zhejiang University Science*, 4(1), 28.



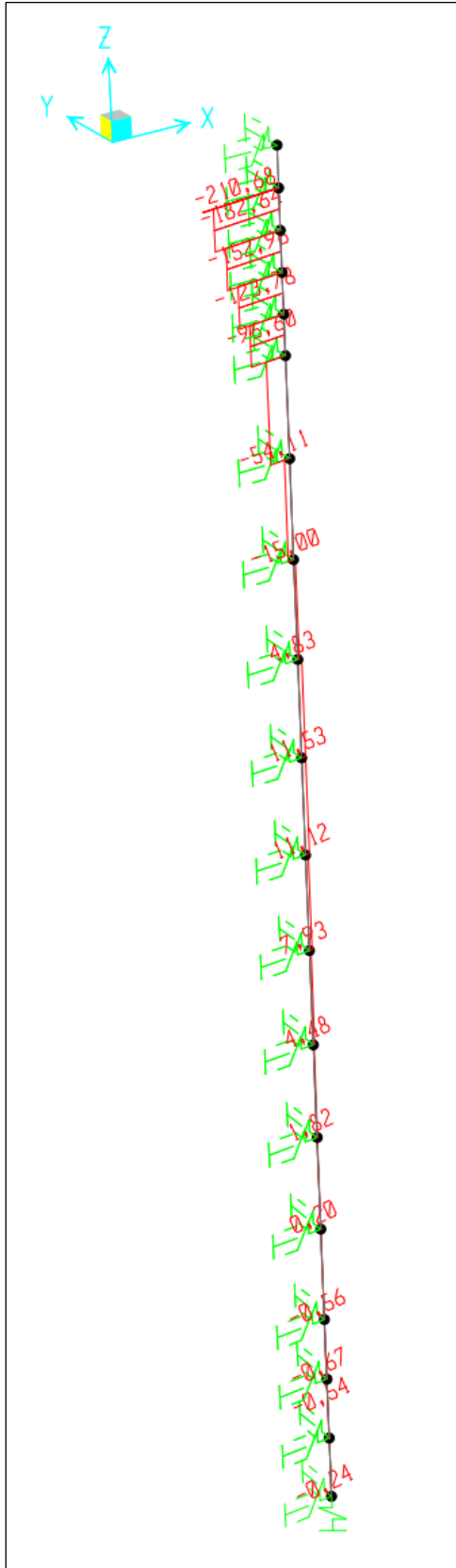
EKLER

EK-1. SAP2000 yazılımı kazık analizi sonuçları



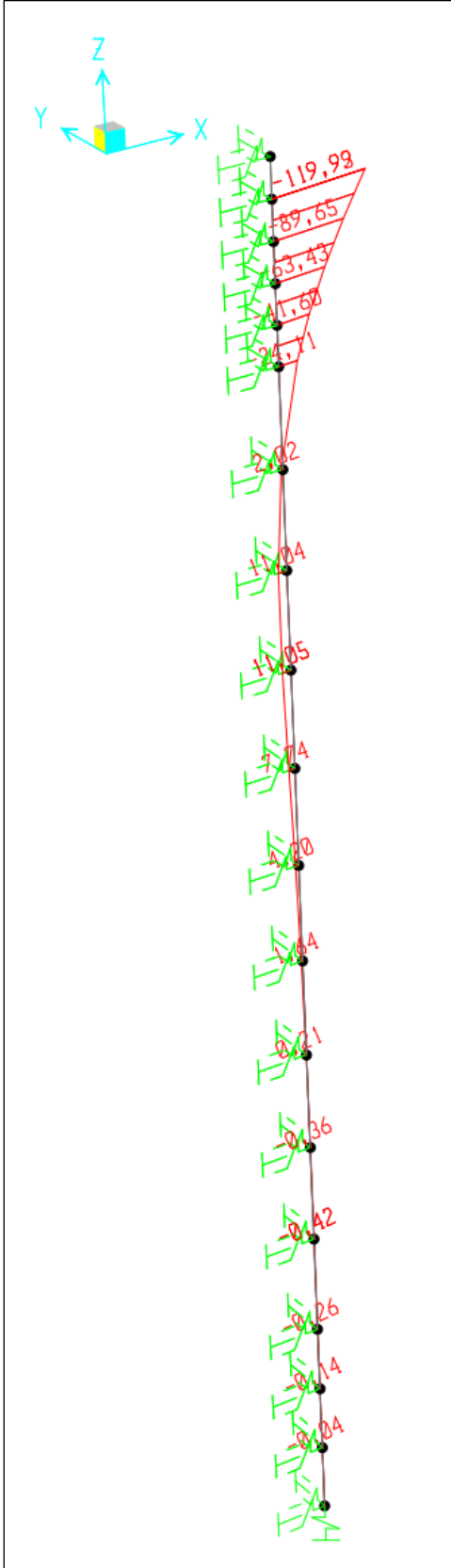
Şekil 1.1. Birinci sıra kazık için ölü yük durumunda kesme tesirleri (kN)

EK-1. (devam) SAP2000 yazılımı kazık analizi sonuçları



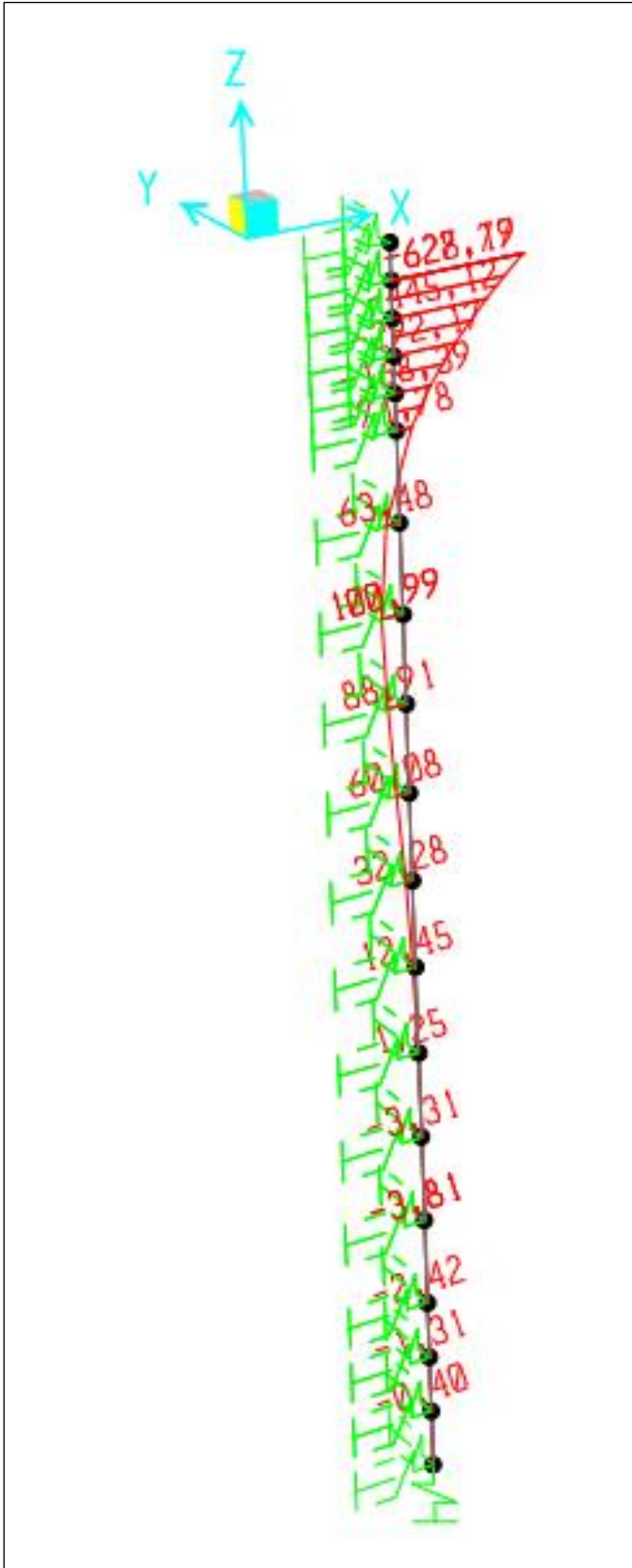
Şekil 1.2. Birinci sıradaki kazık için deprem yükü kesme tesirleri (kN)

EK-1. (devam) SAP2000 yazılımı kazık analizi sonuçları



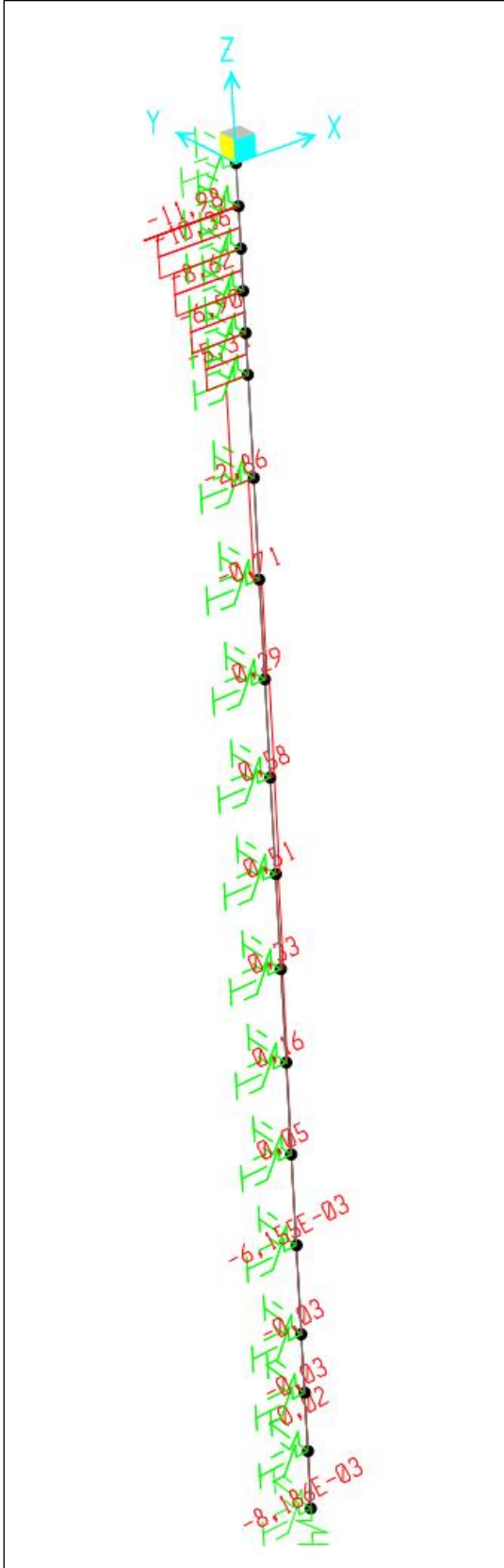
Şekil 1.3. Birinci sıradaki kazık için ölü yük moment tesirleri (kN.m)

EK-1. (devam) SAP2000 yazılımı kazık analizi sonuçları



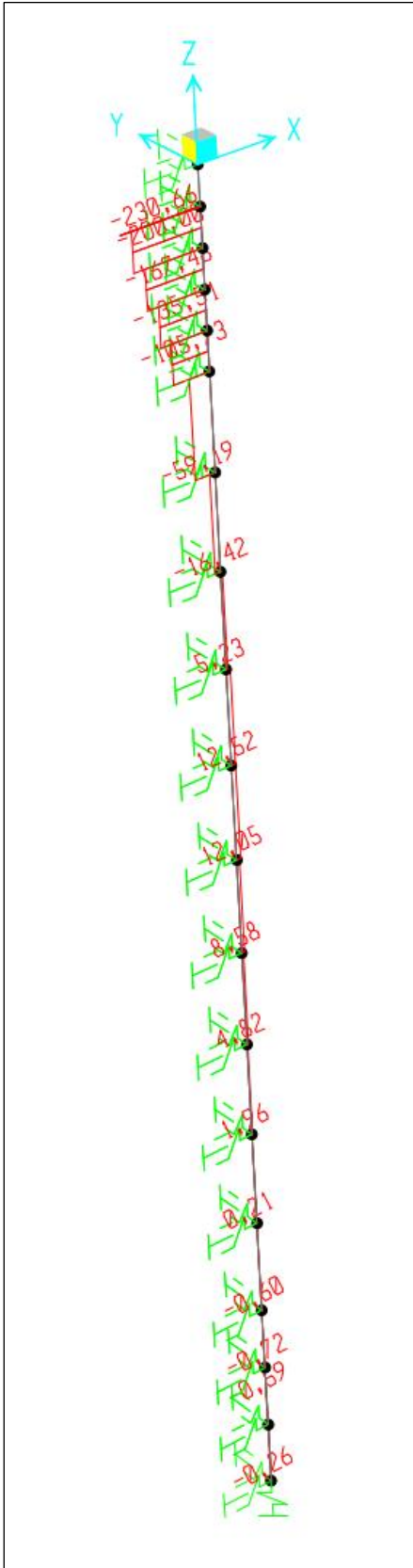
Şekil 1.4. Birinci sıradaki kazık için deprem yükü moment tesirleri (kN.m)

EK-1. (devam) SAP2000 yazılımı kazık analizi sonuçları



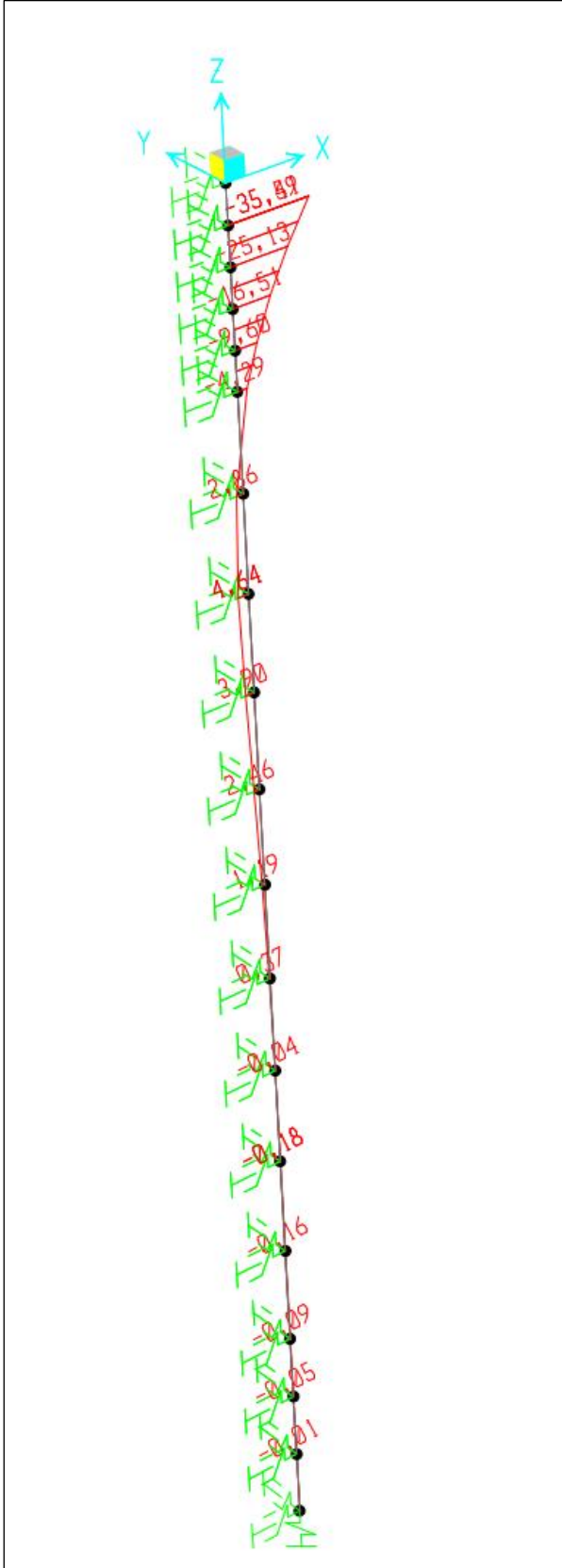
Şekil 1.5. İkinci sıradaki kazık için ölü yük durumunda kesme tesirleri (kN)

EK-1. (devam) SAP2000 yazılımı kazık analizi sonuçları



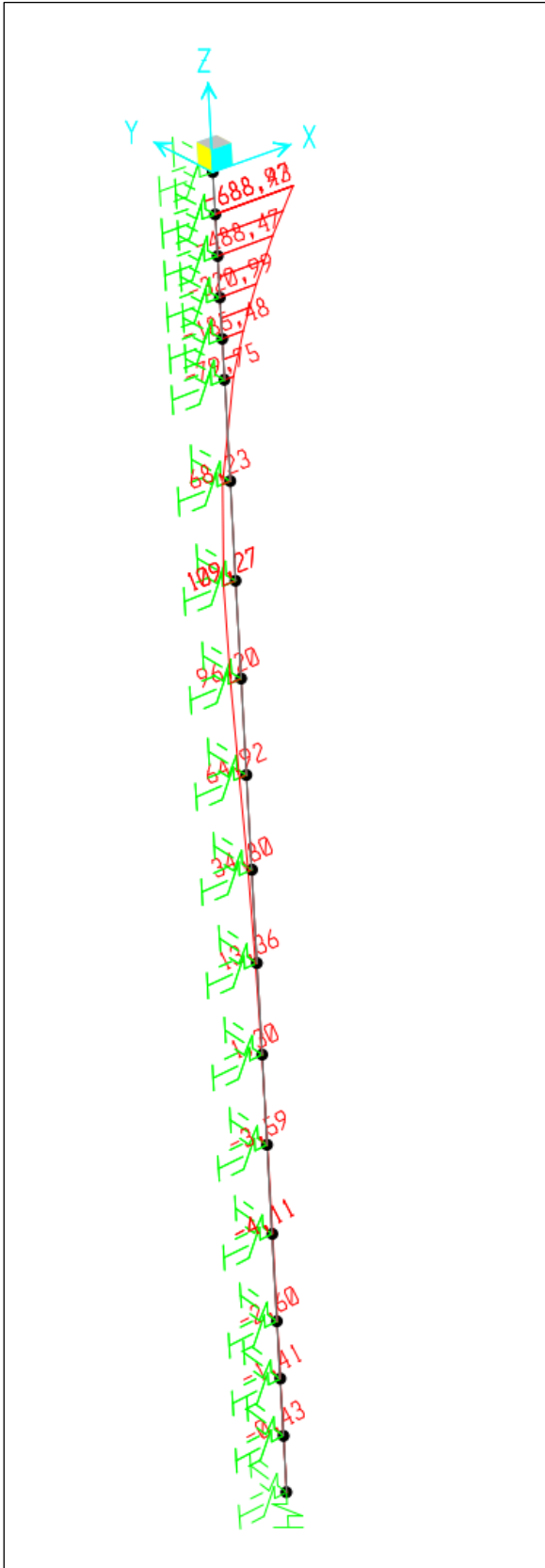
Şekil 1.6. İkinci sıradaki kazık için deprem yükü durumunda kesme tesirleri (kN)

EK-1. (devam) SAP2000 yazılımı kazık analizi sonuçları



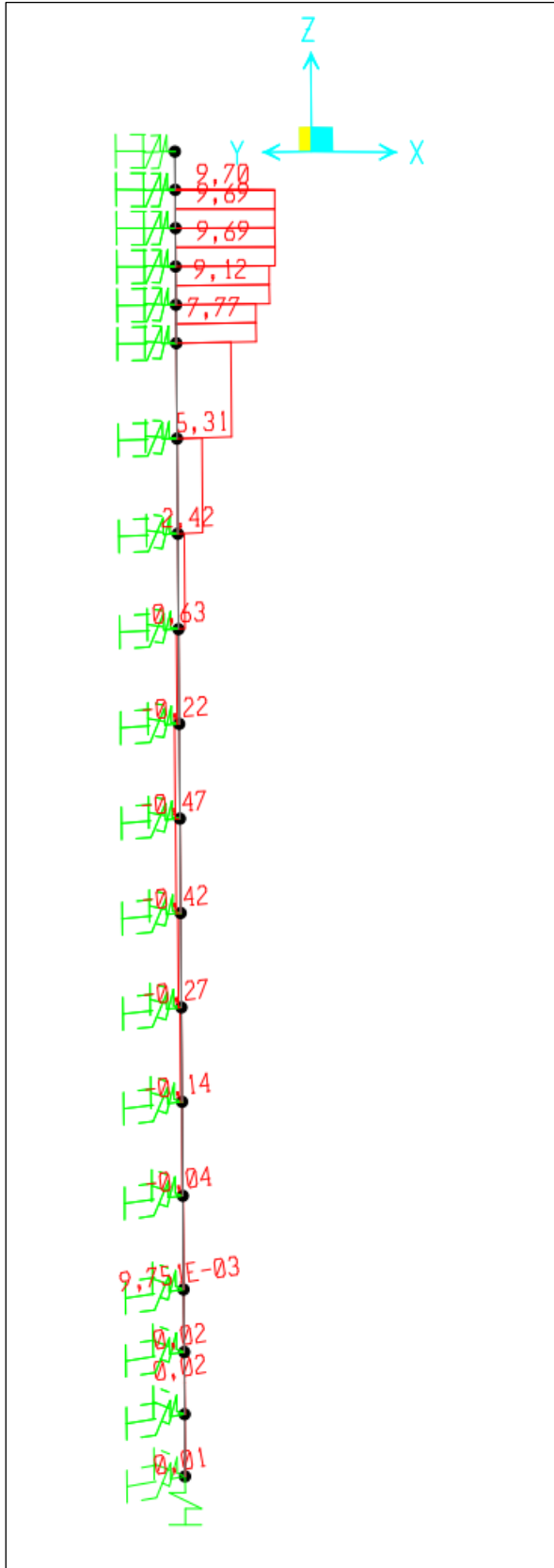
Şekil 1.7. İkinci sıradaki kazık için ölü yük durumunda moment tesirleri (kN.m)

EK-1. (devam) SAP2000 yazılımı kazık analizi sonuçları



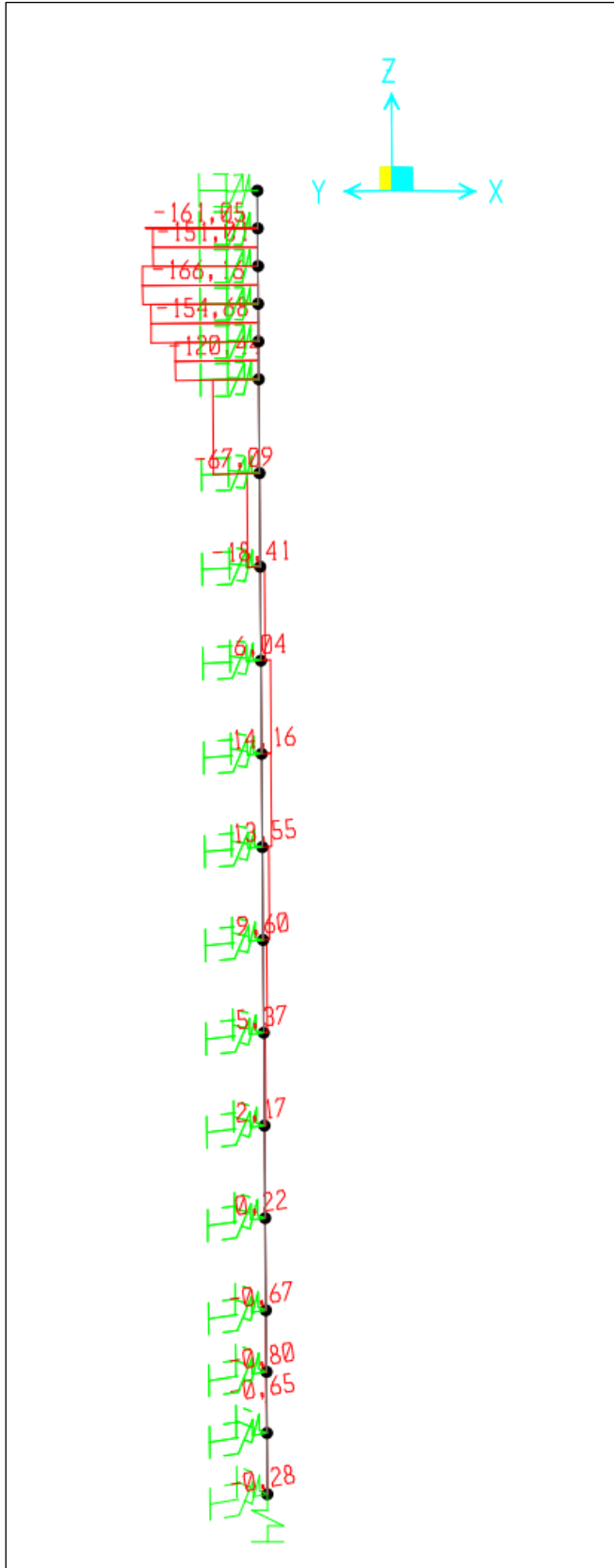
Şekil 1.8. İkinci sıradaki kazık için deprem yükü durumunda moment tesirleri (kN.m)

EK-1. (devam) SAP2000 yazılımı kazık analizi sonuçları



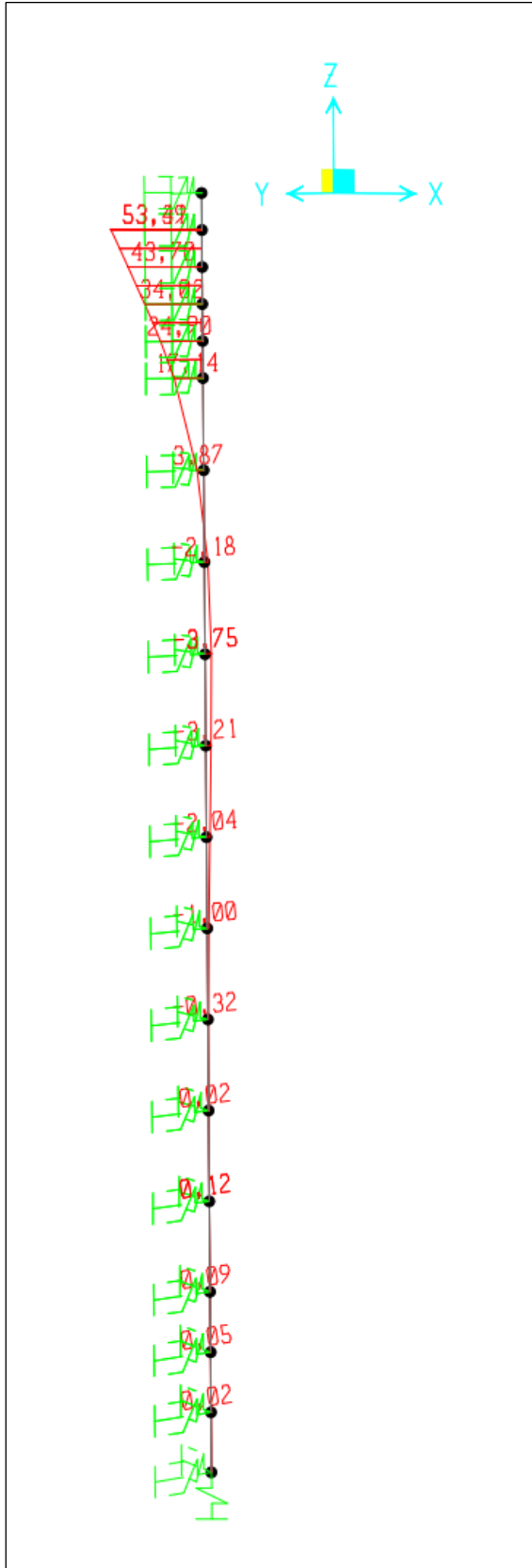
Şekil 1.9. Üçüncü sıradaki kazık için ölü yük durumunda kesme tesirleri (kN)

EK-1. (devam) SAP2000 yazılımı kazık analizi sonuçları



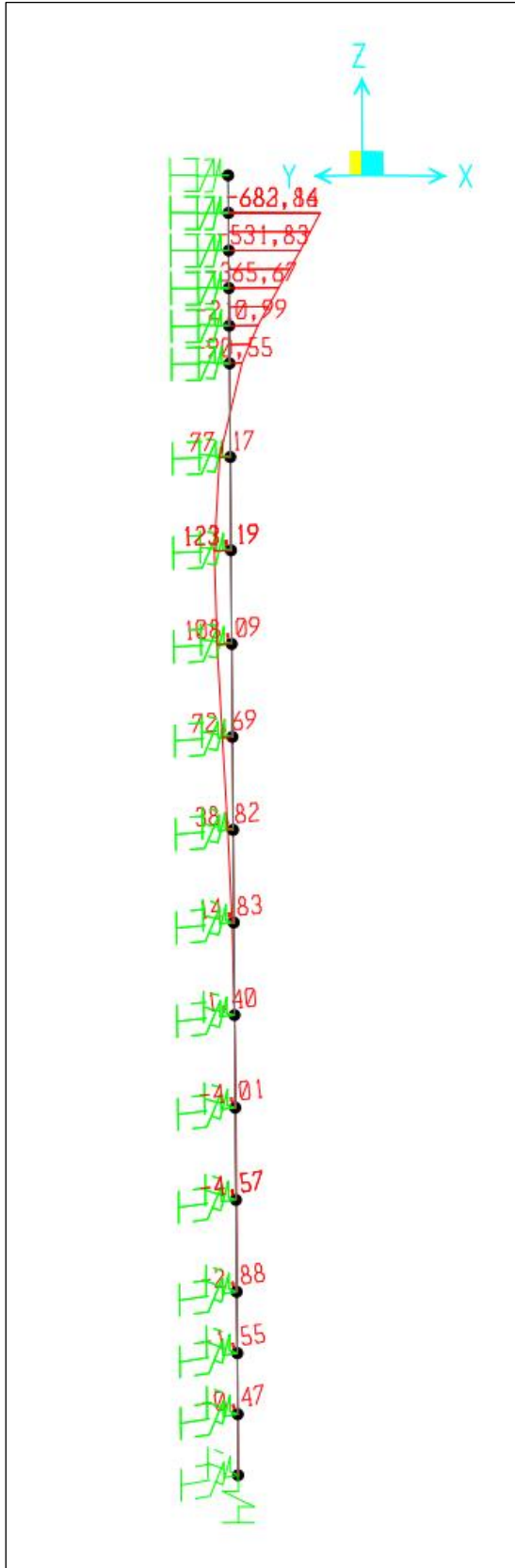
Şekil 1.10. Üçüncü sıradaki kazık için deprem yükü durumunda kesme tesirleri (kN)

EK-1. (devam) SAP2000 yazılımı kazık analizi sonuçları



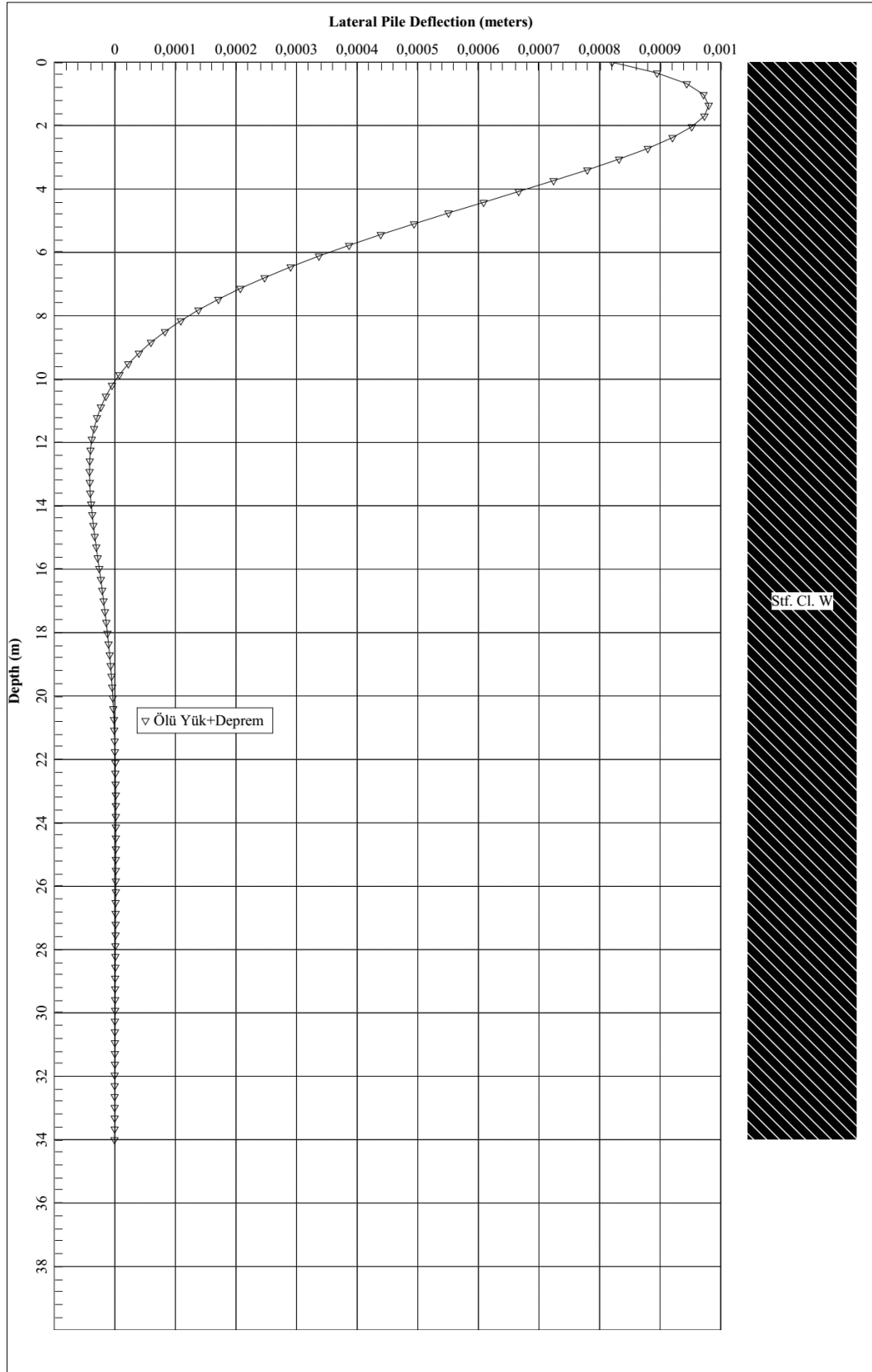
Şekil 1.11. Üçüncü sıradaki kazık için ölü yük durumunda moment tesirleri (kN.m)

EK-1. (devam) SAP2000 yazılımı kazık analizi sonuçları



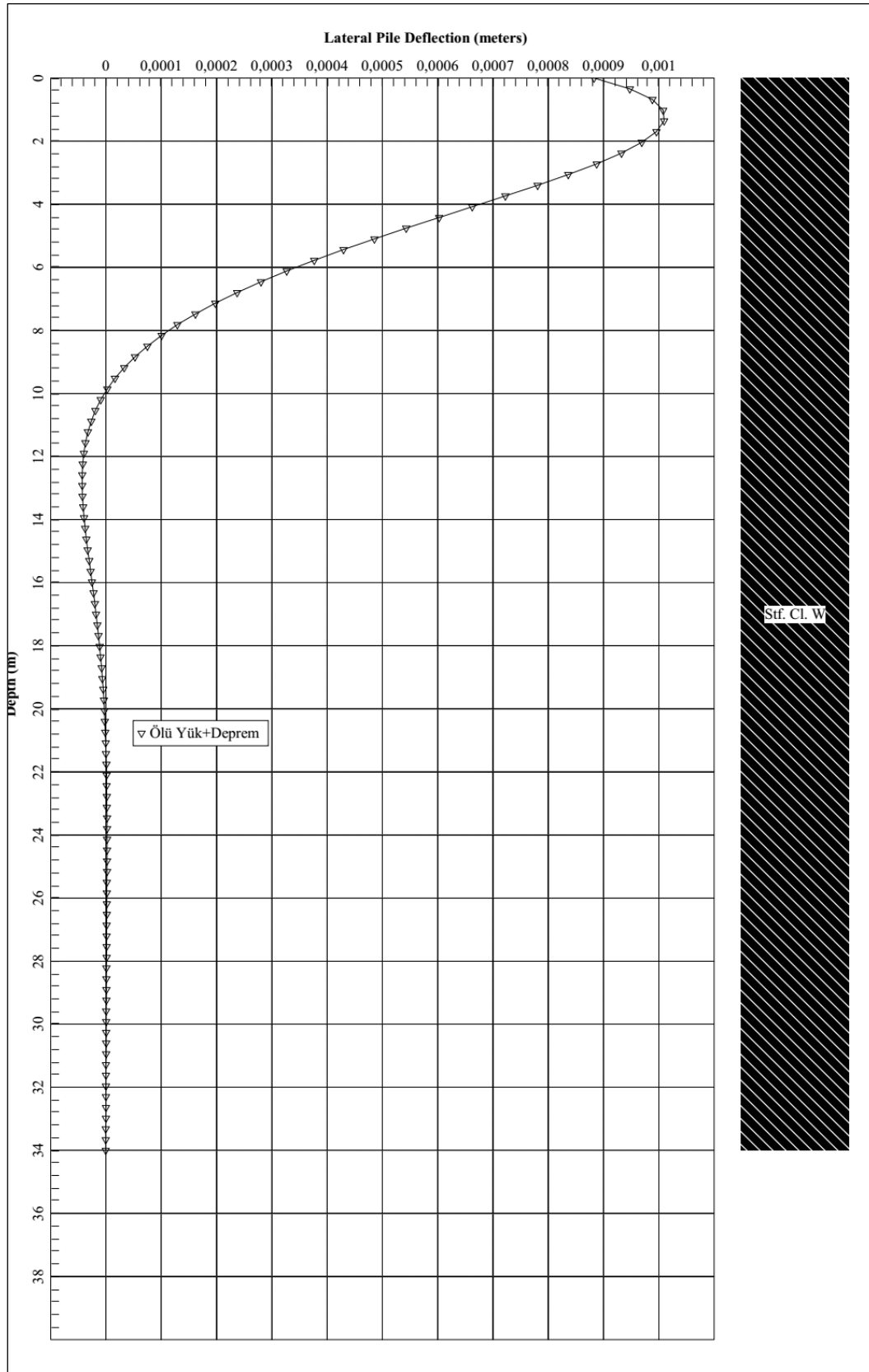
Şekil 1.12. Üçüncü sıradaki kazık için deprem yükü durumunda moment tesirleri (kN.m)

EK-2. LPile yazılımı kazık analizi sonuçları



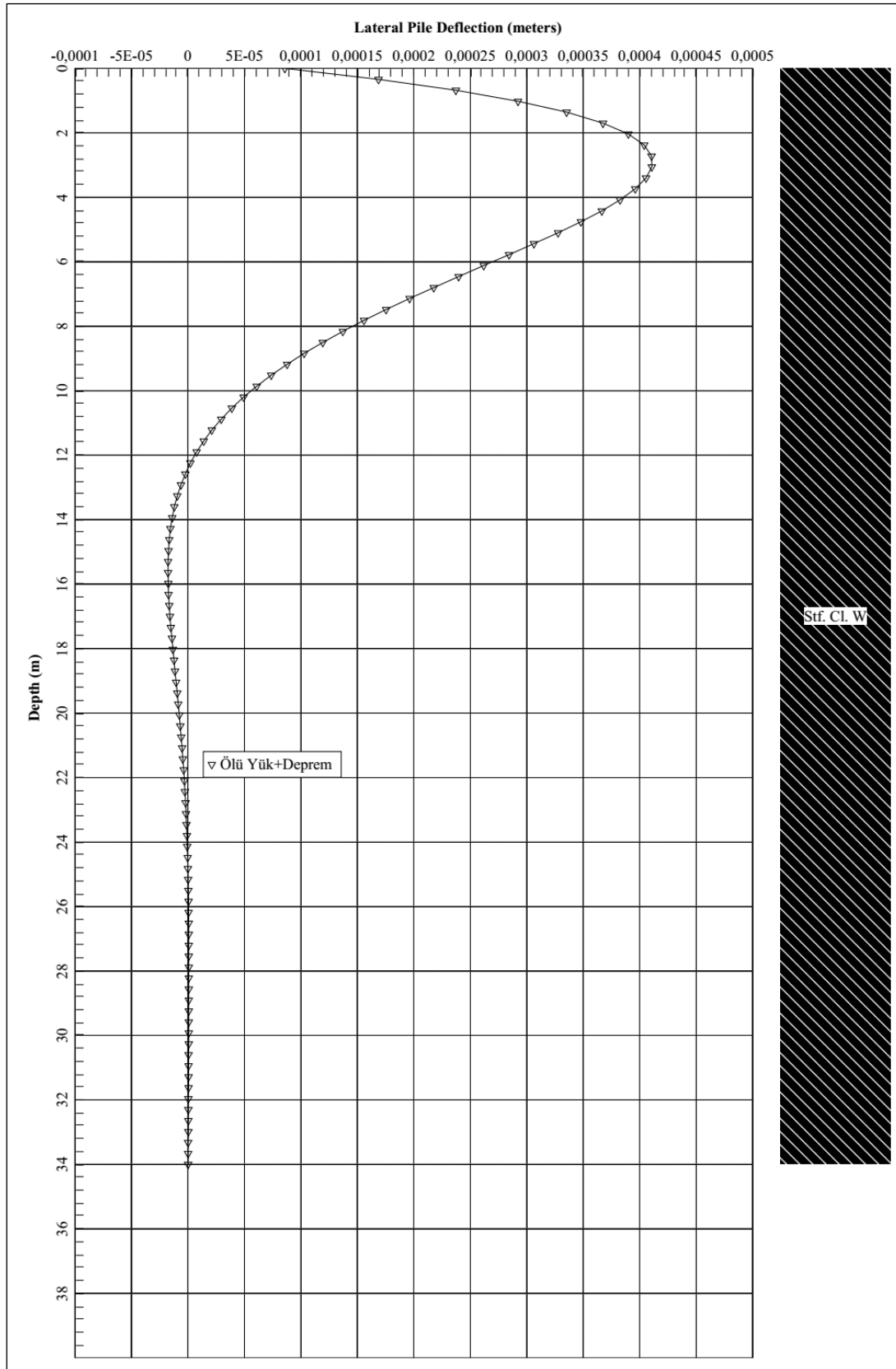
Şekil 2.1. LPile analizi birinci sıra kazık yanal deplasman grafiği

EK-2. (devam) LPile yazılımı kazık analizi sonuçları



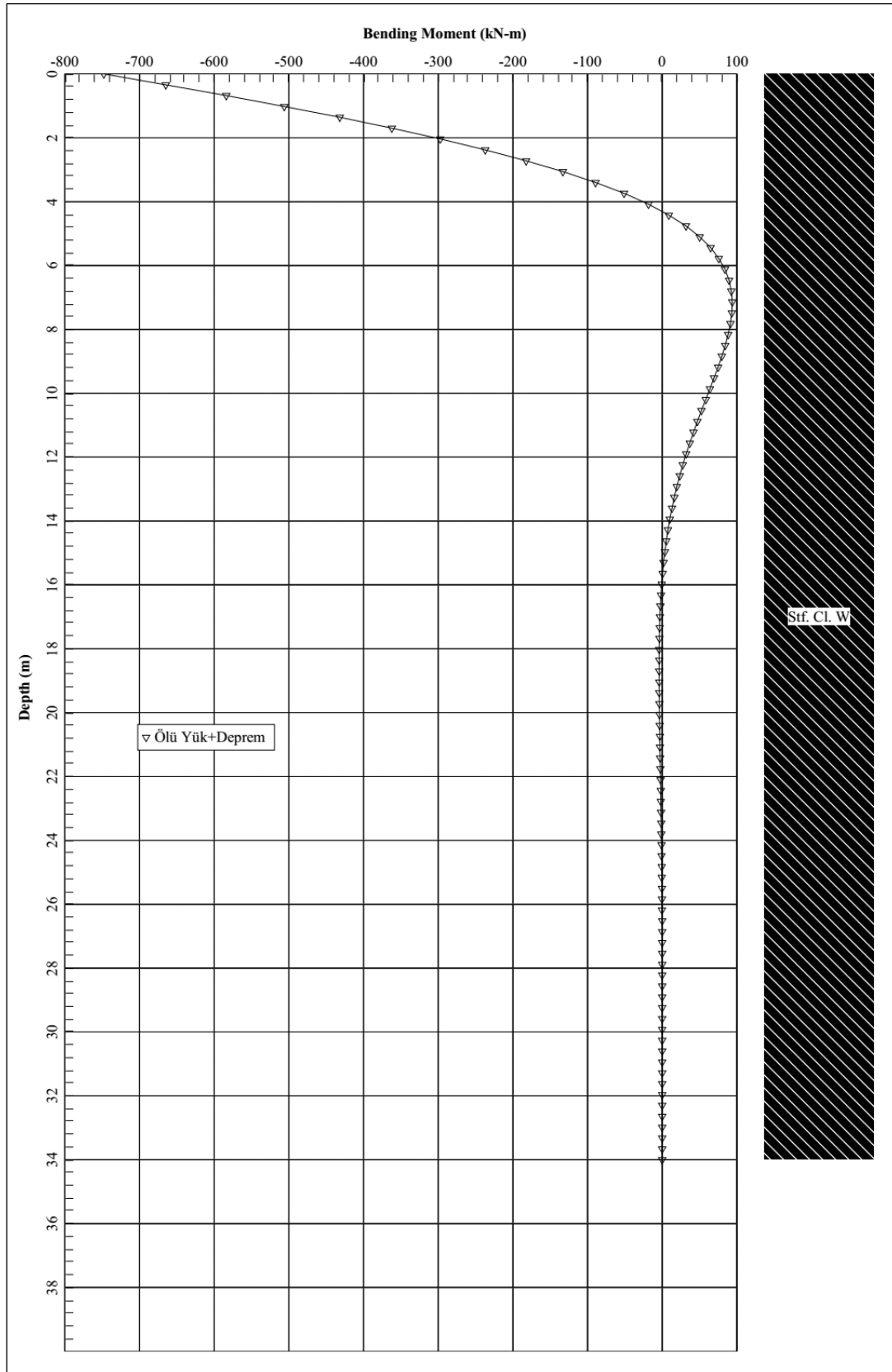
Şekil 2.2. LPile analizi ikinci sıra kazık yanal deplasman grafiği

EK-2. (devam) LPile yazılımı kazık analizi sonuçları



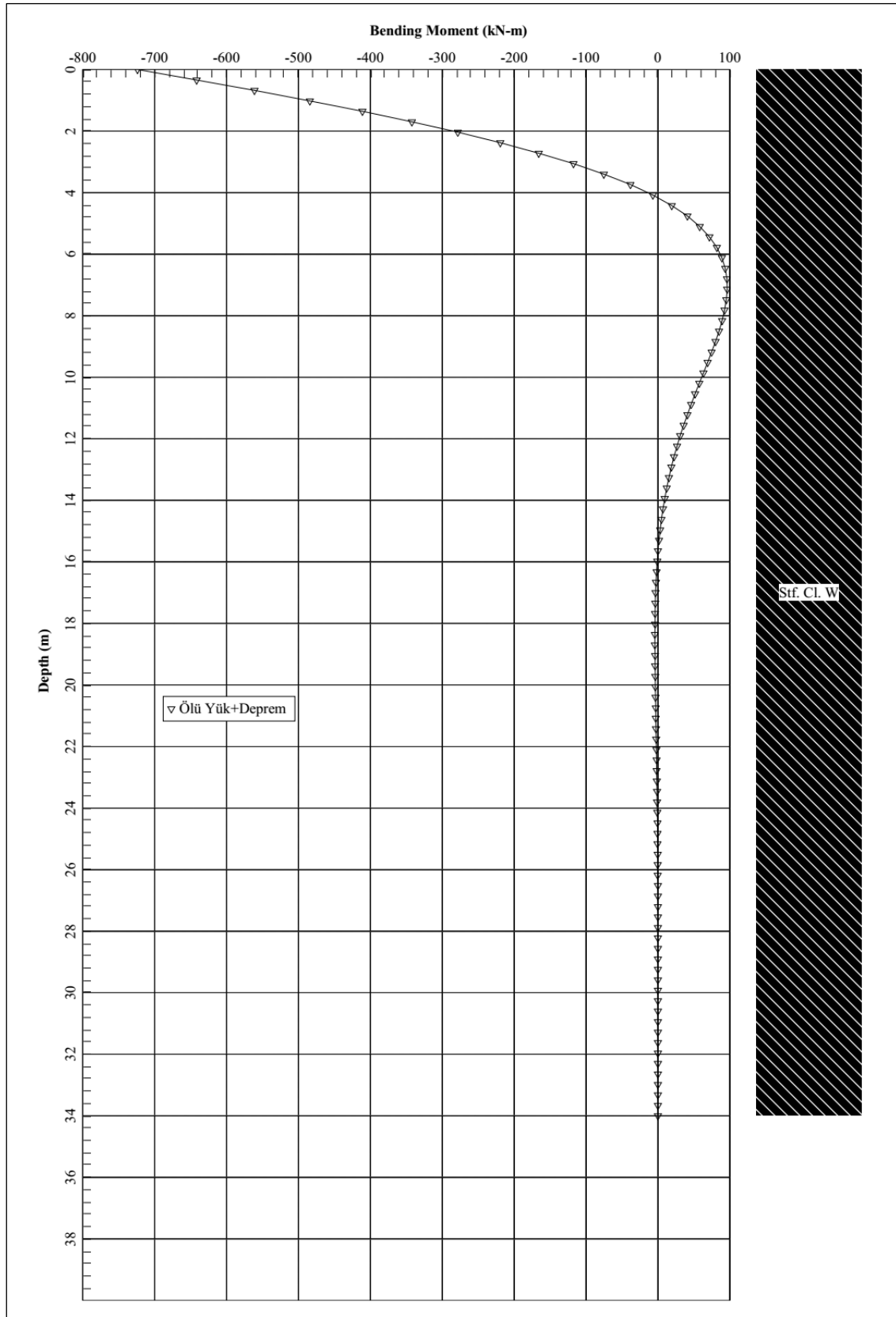
Şekil 2.3. LPile analizi üçüncü sıra kazık yanal deplasman grafiği

EK-2. (devam) LPile yazılımı kazık analizi sonuçları



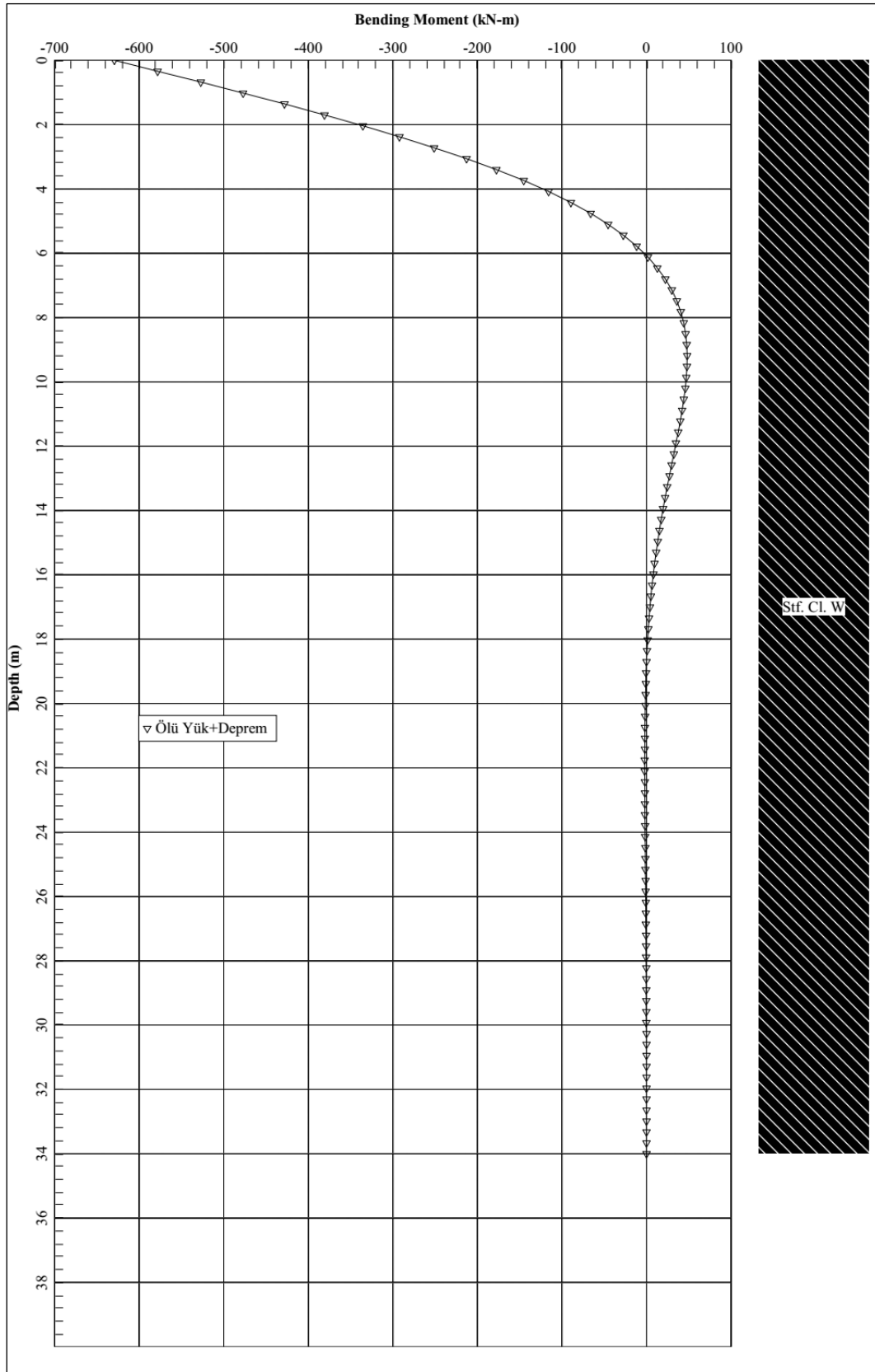
Şekil 2.4. LPile analizi birinci sıra kazık moment grafiği

EK-2. (devam) LPile yazılımı kazık analizi sonuçları



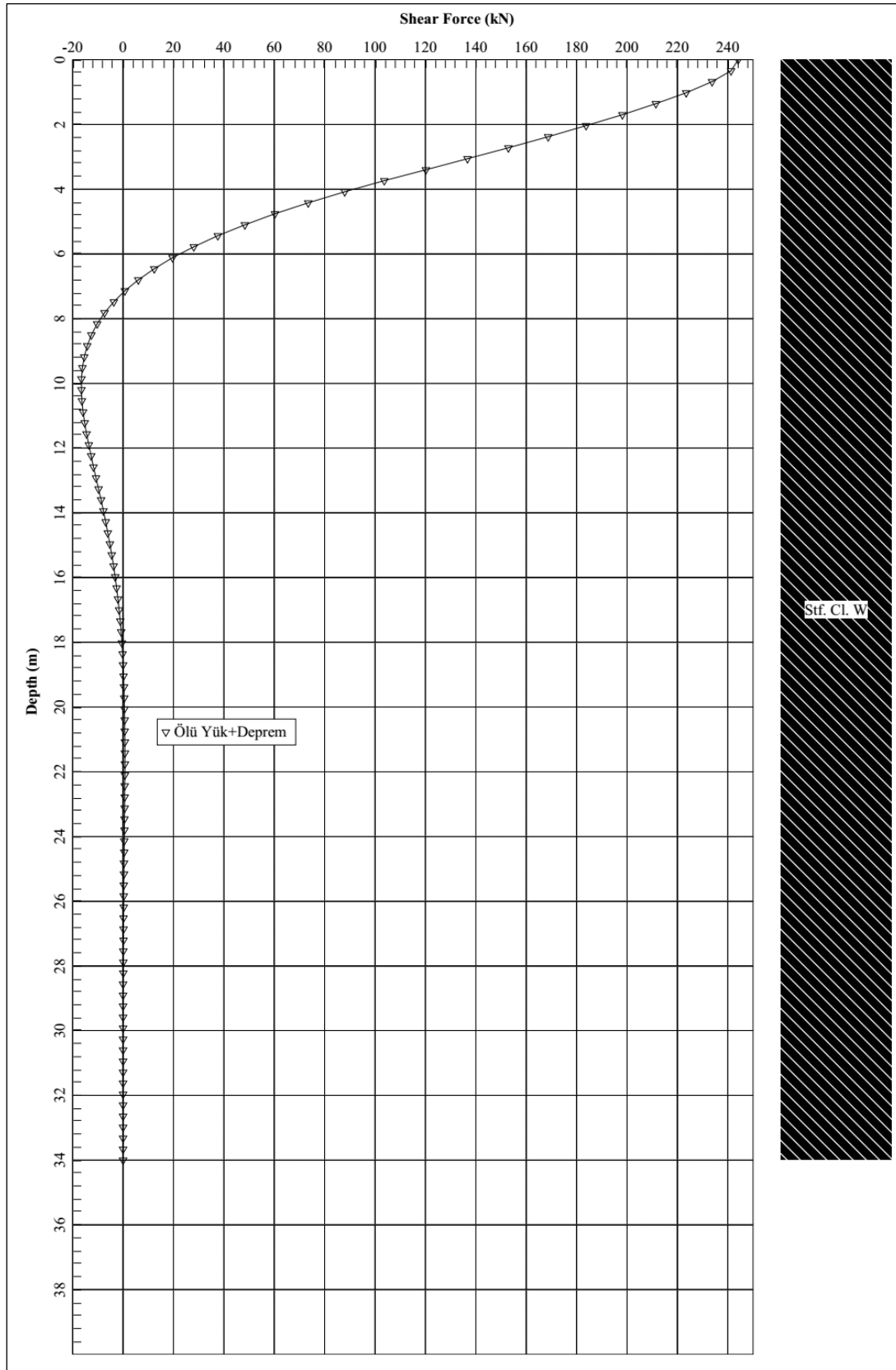
Şekil 2.5. LPile analizi ikinci sıra kazık moment grafiği

EK-2. (devam) LPile yazılımı kazık analizi sonuçları



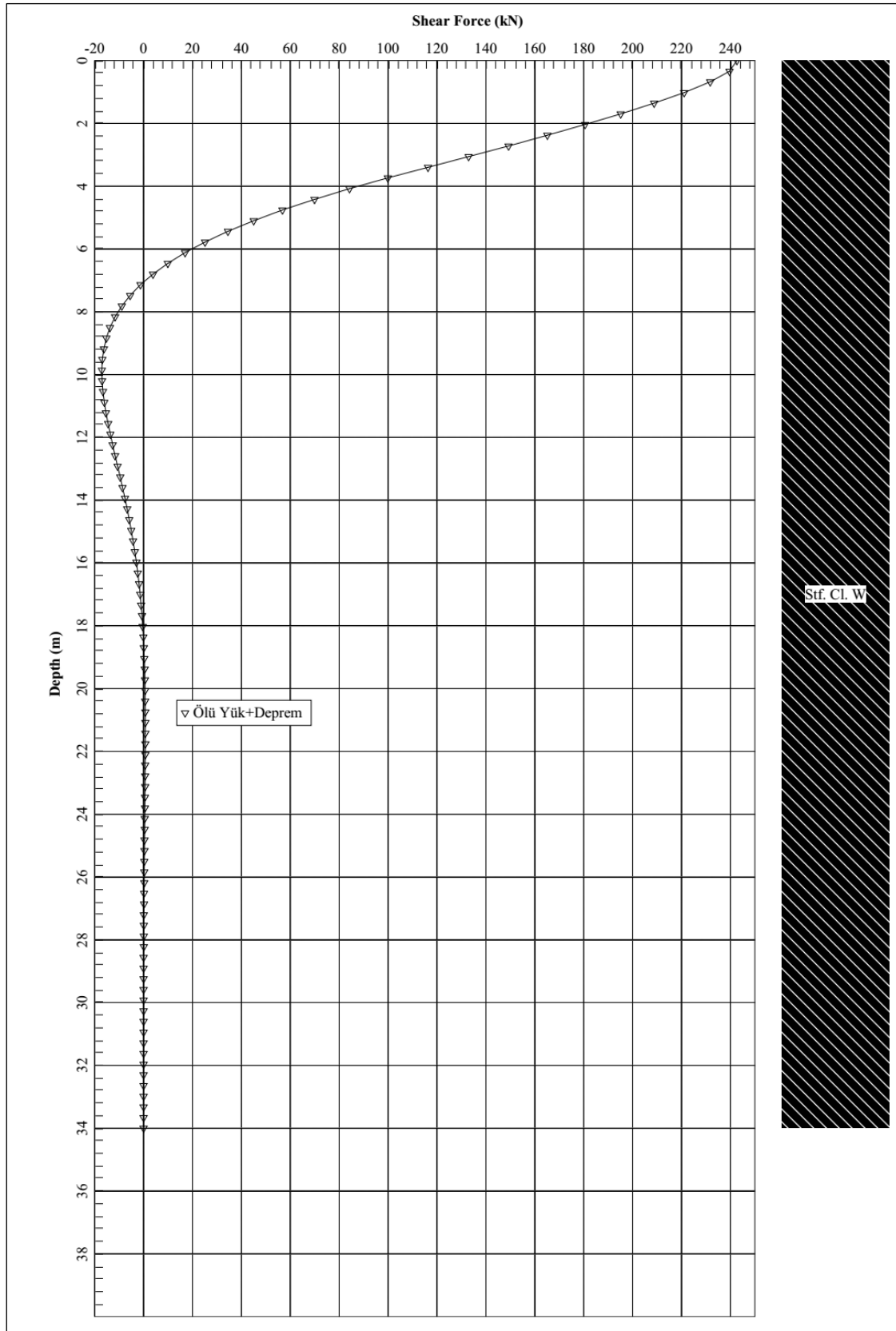
Şekil 2.6. LPile analizi üçüncü sıra kazık moment grafiği

EK-2. (devam) LPile yazılımı kazık analizi sonuçları



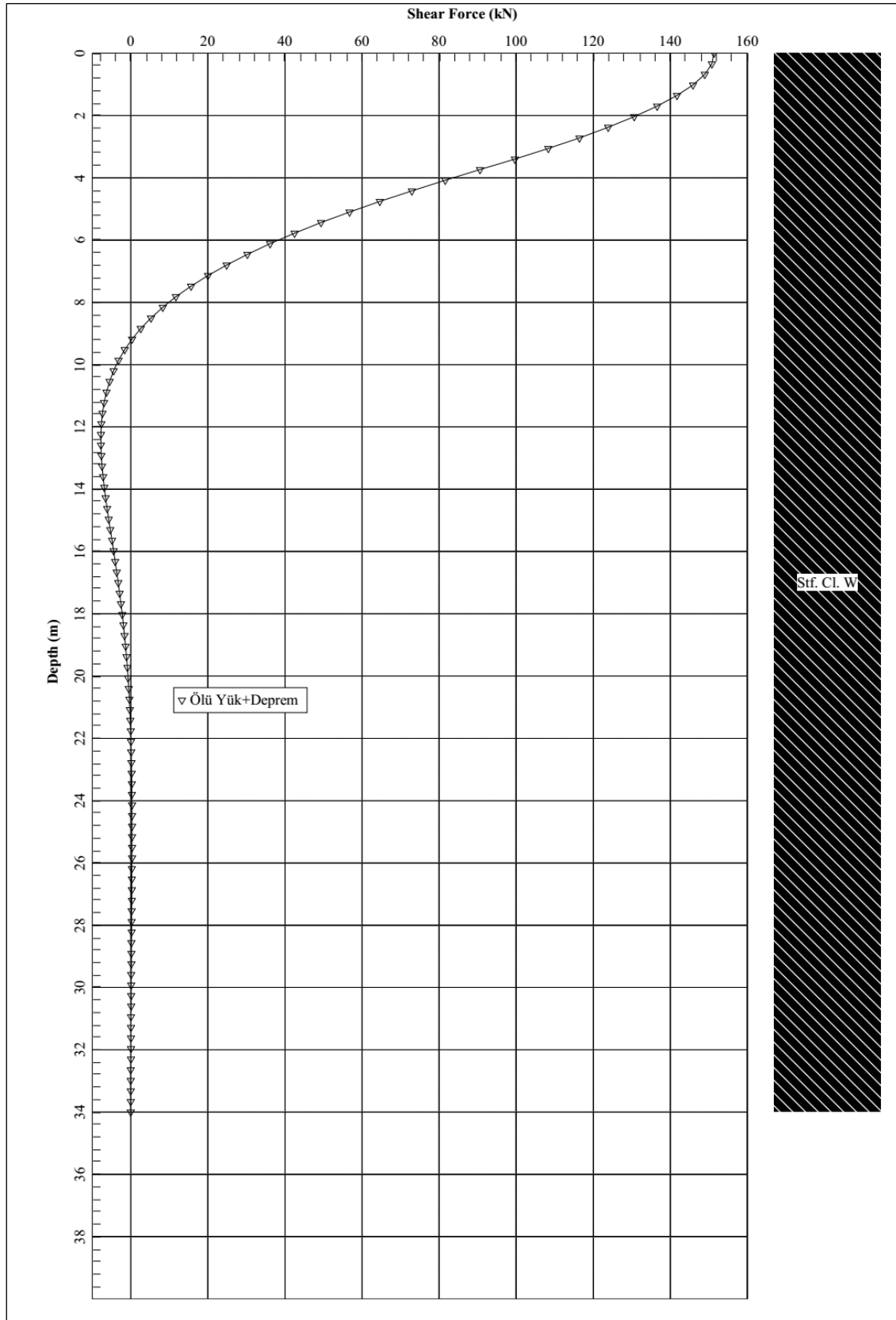
Şekil 2.7. LPile analizi birinci sıra kazık kesme grafiği

EK-2. (devam) LPile yazılımı kazık analizi sonuçları



Şekil 2.8. LPile analizi ikinci sıra kazık kesme grafiği

EK-2. (devam) LPile yazılımı kazık analizi sonuçları



Şekil 2.9. LPile analizi üçüncü sıra kazık kesme grafiği

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ERDEM, Uğur
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 14.06.1989, Ankara
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0(312)442 47 20
 e-mail : ujure@yahoo.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	ODTÜ / İnşaat Mühendisliği	2012
Lise	Ankara Atatürk Anadolu Lisesi	2007

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2018-Halen	Temelsu Uluslararası Müh. Hiz. Aş.	Demiryolu Proje Sorumlusu
2016-2018	Arup	Raylı Sistemler Mühendisi
2012-2016	Lava Mühendislik Ltd. Şti.	Ulaştırma Proje Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Erdem, U., Tekin, E., Unsal, N. (2019, June). *Analysis of bridge piles under seismic loading*. 4th Eurasian Conference on Civil and Environmental Engineering, Istanbul, Turkey

Hobiler

Sinema, Kitap.



GAZİ GELECEKTİR..