

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ORCID : - - -

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :
ORCID : - - -

Trabzon

ÖNSÖZ

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır. “Kazıklı Radye Temelli Yüksek Katlı Yapılarda Yastık Tabakasının Yapı-Zemin Etkileşimi Açısından İncelenmesi” isimli tez çalışmasını bana öneren, her aşamasında desteğini ve tecrübesini paylaşan ve danışmanlığımı üstlenen Hocam Sayın Prof. Dr. Erol ŞADOĞLU’na en içten teşekkürlerimi sunarım. Öğrenim hayatım süresince bana her türlü desteği veren ve yanımda olan aileme teşekkür eder, bu çalışmanın akademik literatüre katkıda bulunmasını ve ülkemize faydalı olmasını temenni ederim.

Berna EROĞLU

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Kazıklı Radye Temelli Yüksek Katlı Yapılarda Yastık Tabakasının Yapı-Zemin Etkileşimi Açısından İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Erol ŞADOĞLU’nun sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, analizleri ilgili programlarda yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 17 / 02 / 2023

Berna EROĞLU

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLO DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Dinamik Yapı Zemin Etkileşimi	1
1.3. Yapı Zemin Etkileşim Modelleri.....	6
1.3.1. Ayrık Model	6
1.3.2. Elastik Model.....	7
1.3.2.1. Bir Parametrelili Model	7
1.3.2.2. İki Parametrelili Model	10
1.3.2.3. Üç Parametrelili Zemin Modelleri	13
1.3.3. Sonlu Eleman Modeli	15
1.3.3.1. Model ve Sınırlar	16
1.3.3.2. Sonlu Eleman Seçimi	20
1.4. Yapı Zemin Etkileşimi İçin Analiz Yöntemleri	21
1.4.1. Doğrudan Yaklaşım.....	21
1.4.2. Alt Sistem Yaklaşımı.....	23
1.4.2.1. Kinematik Etkileşim	23
1.4.2.2. Ataletsel Etkileşim.....	25
1.5. Kazıklı Temeller	26
1.6. Kazıklı Radye Temeller.....	27
1.6.1. Kazıklı Radye Temellerin Hesap ve Tasarımı.....	28
1.6.2. Bağlantılı Kazıklı Radye Temeller	31
1.6.3. Bağlantısız Kazıklı Radye Temeller	32
1.7. Kazıklı Radye Temellerde Yapı Zemin Etkileşimi	35
1.8. Literatür Araştırması.....	37

1.8.1.	Yapı Zemin Etkileşimi ile İlgili Yapılan Çalışmalar.....	37
1.8.2.	Kazıklı Radye Temellerle İlgili Yapılan Çalışmalar	40
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	42
2.1.	Elasto-Plastik Zemin Tanımlanması.....	42
2.2.	Zemin Kazık Radye Yapı Sisteminin Modellenmesi	43
2.3.	Betonarme Çok Katlı Yapının Boyutlandırılması	45
2.4.	Betonarme Çok Katlı Yapının Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması	46
2.5.	Deprem Yüklerinin Tanımlanması ve Analiz Modeli	47
3.	BULGULAR VE İRDELEME.....	52
3.1.	Yapıdaki Rölatif Kat İvmeleri ve Ötelenmeler.....	52
3.1.1.	1 Yönündeki Rölatif Kat İvmeleri ve Ötelenmeler	53
3.1.2.	2 Yönündeki Rölatif Kat İvmeleri ve Ötelenmeler	56
3.1.3.	3 Yönündeki Rölatif Kat İvmeleri ve Ötelenmeler	59
3.2.	Kazıklara Etkiyen Yükler ve Kazıklardaki Oturmalar	62
3.2.1.	Radyesiz Durumda Kazıklara Etkiyen Yükler ve Kazıklardaki Oturmalar	63
3.2.2.	Kazıklı Radye Temelde Kazıklara Etkiyen Yükler ve Oturmalar	65
3.2.3.	Kazık ve Radye Bağlantısının 40 cm Yastık Elemanla Kesildiği Durumda Kazıklara Etkiyen Yükler ve Oturmalar	67
3.2.4.	Kazık ve Radye Bağlantısının 30 cm Yastık elemanla Kesildiği Durumda Kazıklara Etkiyen Yükler ve Oturmalar	68
3.2.5.	Kazık ve Radye Bağlantısının 40 cm Yastık Elemanla Kesildiği ve Kazık Sayısının Azaltıldığı Durumda Kazıklara Etkiyen Yükler ve Oturmalar	70
3.3.	Yapıya Etkiyen Maksimum Yükler.....	73
3.4.	Radye Temele Etkiyen Maksimum Yükler	74
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	77
5.	KAYNAKLAR.....	79
ÖZGEÇMİŞ		

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

KAZIKLI RADYE TEMELLİ YÜKSEK KATLI YAPILARDA YASTIK TABAKASININ YAPI-ZEMİN ETKİLEŞİMİ AÇISINDAN İNCELENMESİ

Berna EROĞLU

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışmanı: Prof. Dr. Erol ŞADOĞLU
2023, 82 Sayfa

Ülkemizin büyük çoğunluğunun fay hatları üzerinde olması deprem etkilerinin yüksek olmasına sebep olmaktadır. Bu etkileri azaltmak için yumuşak zeminlerde yapı temelinde kazık kullanılmaktadır. Son yıllarda kazıklı radye imalatlarında kullanılan yastık eleman, kazık ve yapının davranışını etkilemektedir. Bu çalışma kazık ve radye bağlantısının yastık elemanla kesilmesi durumunda yapı-zemin etkileşimi sırasındaki kazık, temel ve yapı davranışlarını incelemiştir. Üst yapı, temel ve zemin SAP2000’de modellenmiştir. Zemin sınıfı ZD olan bölgede 1999 Düzce depremi yükleri kullanılmış olup SAP2000’de zaman tanım alanında analiz yapılmıştır.

Temelde bağlantılı ve bağlantısız olmak üzere iki farklı uygulama üzerinden yapılan analiz sonuçlarına göre yastık kullanımı durumunda yapıdaki ötelenmelerin %20 daha az olduğu görülmüştür. Taşıma gücü zayıf zeminde yapının taşıma kapasitesini arttırmıştır. Yastık kullanımında kazıklara etkiyen yükler azalmış ve oturma miktarları da %8 azalmıştır. Farklı oturmalar arasındaki farkın ise yastık kullanımı durumunda 1 cm daha az olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yapı Zemin Etkileşimi, Kazıklı Radye Temel, Deprem, Yastık Eleman

Master Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF CUSHION LAYER IN TERMS OF STRUCTURE-SOIL INTERACTION IN HIGH-RISE BUILDINGS WITH PILED RAFT FOUNDATIONS

Berna EROĞLU

Karadeniz Technical University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Department
Supervisor: Prof. Dr. Erol ŞADOĞLU
2023, 82 Pages

The fact that the majority of our country is on fault lines causes the effects of earthquakes to be high. In order to reduce these effects, piles are used in the foundation of the structure in soft soils. In recent years, the cushion element used in pile raft manufacturing affects the behaviour of the pile and the structure. This study investigated pile, foundation and building behaviour during the structure-soil interaction when the pile and raft connection is interrupted by the cushion element. Superstructure, foundation and soil are modelled in SAP2000. In the region with soil class ZD, the 1999 Düzce earthquake loads were used and the analysis was performed in the time history in SAP2000.

According to the results of the analysis performed on two different applications, basically connected and unconnected, it has been observed that the displacements in the structure are less than 20% in case of cushion use. It has increased the bearing capacity of the structure on soft soil. In the use of cushion, the loads acting on the piles decreased and the amount of settlements decreased by 8%. It was determined that the difference between different settlements was 1 cm less in the case of using cushion.

Key Words: Soil Structure Interaction, Pile Raft Foundations, Earthquake, Cushion Element

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. Tek kütleli dinamik sistem modelleri	2
Şekil 2. Kaya veya zeminde kurulmuş yapıların dinamik tepkisi	5
Şekil 3. Yapı ve zemine ait ayrık matematik model.....	7
Şekil 4. Bir parametrelili zemine oturan bir kiriş şeması (Winkler Modeli)	8
Şekil 5. Winkler modeline göre zeminin yer değiştirme durumları	9
Şekil 6. Filonenko-borodich modeline göre zeminin yer değiştirme durumları.....	11
Şekil 7. İki parametrelili zemine oturan bir kiriş şeması	12
Şekil 8. Elastik bir zemine oturan bir plak şeması (Kılıçer, 2016).....	13
Şekil 9. Sonsuz sistem	16
Şekil 10. İki boyutlu modelin sistematik görünüşü	17
Şekil 11. Basitleştirilmiş üç boyutlu modelin sistematik görünüşü	17
Şekil 12. İletim sınırlı basitleştirilmiş üç boyutlu modelin sistematik görünüşü	19
Şekil 13. Yapıyla etkileşim durumunda zeminde yapılan kabuller	19
Şekil 14. Rayleigh dalga sınırı sonuçları	20
Şekil 15. Zemin-yapı etkileşim analizinin doğrudan yöntemi.....	22
Şekil 16. Eşdeğer zemin-yapı sisteminin yapay kayıta tepkisi.....	22
Şekil 17. Açık arazi hareketlerinin noktalı çizgilerle ifade edilen kinematik etkileşimi.....	24
Şekil 18. Düşey olarak yayılan s dalgalarına göre gömülü bir temelin beşikleme titreşim şeklinde tepkisi.....	25
Şekil 19. (a) Kinematik etkileşim analizi (b) Ataletsel etkileşim analizi.	26
Şekil 20. Radye temel ve kazıklı radye temel	28
Şekil 21. Üç aşamalı bir yük oturma eğrisi	30
Şekil 22. Bağlantılı kazıklı radye temel	32
Şekil 23. Bağlantısız kazıklı radye temel	35
Şekil 24. Radye temele ait dört farklı uygulama	37
Şekil 25. Kazıklı radye temele ait iki farklı uygulamanın SAP2000 görünüşü.....	42
Şekil 26. Radye temele ait sonlu elemanlar modeli.....	44
Şekil 27. Kazık ile radye bağlantısının yastık elemanla kesilmesi.....	44

Şekil 28. SAP2000 programında zeminine sonlu model tanımlanan yapı	47
Şekil 29. AFAD interaktif web uygulaması - sismik tehlike haritası detay raporu.....	48
Şekil 30. SAP2000 programında seçilen zemine göre spektrum bilgilerinin girilmesi	49
Şekil 31. Deprem hesap yöntemi seçimi (Doğangün, 2014)	50
Şekil 32. SAP2000 programında zaman tanım alanında analiz	51
Şekil 33. Uç ve iç bölgelerin taşıyıcı elemanda temsil ettiği yerler	53
Şekil 34. U1, U2 ve U3 yönlerinin ifade ettiği yönler.....	53
Şekil 35. 1 yönünde yapıda rölatif ivmelerin katlara göre değişimi.....	54
Şekil 36. 1 yönünde yapıdaki rölatif kat ötelenmelerinin katlara göre değişimi.....	56
Şekil 37. 2 yönünde yapıda rölatif ivmelerin katlara göre değişimi.....	57
Şekil 38. 2 yönünde yapıdaki rölatif kat ötelenmelerinin katlara göre değişimi.....	59
Şekil 39. 3 yönünde yapıda rölatif ivmelerin katlara göre değişimi.....	60
Şekil 40. 3 yönünde yapıdaki rölatif kat ötelenmelerinin katlara göre değişimi.....	62
Şekil 41. Yüksek katlı yapının temeline ait kazık yerleşim planı	63
Şekil 42. Kazıklardaki normal kuvvet ve oturma değerlerinin grafik ile gösterimi	64
Şekil 43. Kazıklardaki normal kuvvet ve oturma değerlerinin grafik ile gösterimi	66
Şekil 44. Kazıklardaki normal kuvvet ve oturma değerlerinin grafik ile gösterimi	68
Şekil 45. Kazıklardaki normal kuvvet ve oturma değerlerinin grafik ile gösterimi.....	69
Şekil 46. Kazık sayısının azaltıldığı durumda kazık yerleşimi	70
Şekil 47. Kazıklardaki normal kuvvet ve oturma değerlerinin grafik ile gösterimi	71
Şekil 48. Kazıkların beş farklı tasarım durumunda oturma değerlerinin değişimi.....	73
Şekil 49. Yapıya etkileyen maksimum yükler.....	74
Şekil 50. Radye temele etkileyen maksimum yükler	75

,

TABLO DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Çeşitli zemin türleri için yatak katsayısı değer aralıkları	9
Tablo 2. Pürüzsüz ve pürüzlü temel için yer değiştirme fonksiyonlarının karşılaştırılması	20
Tablo 3. TBDY 2018 – kazık temelli binalarda yapı zemin etkileşim analiz yöntemi parametreleri.....	36
Tablo 4. Yapı elemanlarının boyutları.....	46
Tablo 5. Radyesiz durumda kazıklara etkiyen yükler	64
Tablo 6. Kazıklı radye temelde kazıklara etkiyen yükler	66
Tablo 7. Kazık ve radye bağlantısının 40 cm yastık elemanla kesildiği durumda kazıklara etkiyen yükler	67
Tablo 8. Kazık ve radye bağlantısının 30 cm yastık elemanla kesildiği durumda kazıklara etkiyen yükler	69
Tablo 9. Kazık ve radye bağlantısının 40 cm yastık elemanla kesildiği ve kazık sayısını azaltıldığı durumda kazıklara etkiyen yükler	71

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

u	: Yatay Yer Değiştirme
u_{ϕ}	: Yatay Dönüş
ω	: Sönümlenmemiş Titreşim için doğal dairesel frekans,
m	: Kütle
h	: Yükseklik
K_x	: Öteleme Rijitliği
K_{ϕ}	: Dönme Rijitliği
P	: Yoğunluk
T	: Membran Kuvveti
w	: Plâgın Düşey Yer Değiştirmesi
k	: Zemin Yatak Katsayısı
∇	: Laplace Operatörü
D	: Eğilme rijitliği
$2t$	: Zemin Kayma Parametresi
G	: Elastik Zemin Kayma Modülü
ϕ_z	: Zeminin Düşey Yer Değiştirme Değeri
E_s	: Elastisite Modülü
v_s	: Dalga Yayılma Hızı
c_s	: Sönümleme Oranı
φ	: Düşey Yer Değiştirme Fonksiyonu
ϕ	: Zeminin Düşey Yer Değiştirmesi
γ	: Zemin Yüzey Parametresi
τ	: Kayma Gerilmesi
$\dot{u}$	: Zemindeki Teğet Yer Değiştirme
M	: Kütle Matrisi
M_{zemin}	: Zeminin Kütle Matrisi
M_{yap}	: Yapının Kütle Matrisi
$\ddot{u}_{\text{ff}}$	: Sınır Düğüm Noktalarında Tanımlanmış Açık Arazi İvmesi
K_{pr}	: Kazıklı Radyenin Rijitliği

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

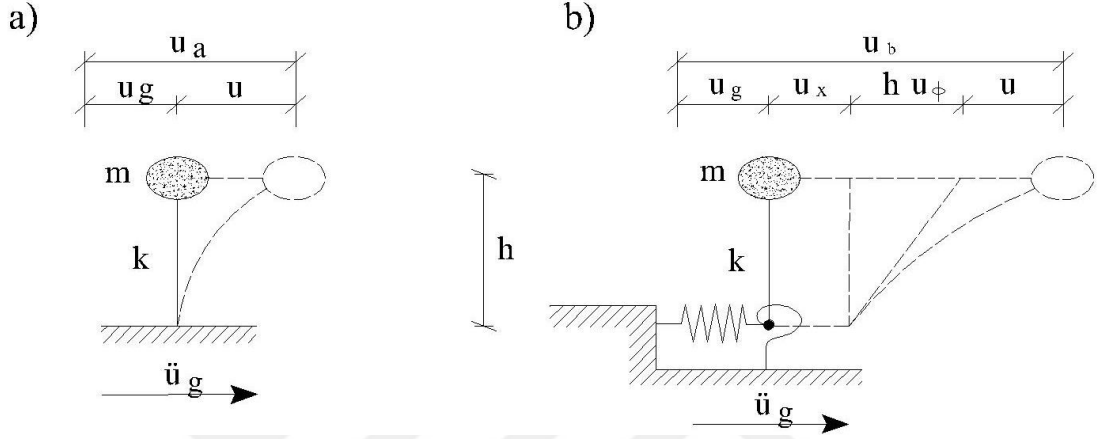
Ülkemizin üç farklı önemli fay hatlarını içermesi ve değişken zemin koşullarına sahip olması özellikle yapı tasarımlarında farklı tasarımları gerektirmektedir. Deprem etkisi altında yapı zemin etkileşiminin fazla olması, yapı zemin etkileşimlerinin etkin modellenmesi ve uygun hesap yöntemlerinin geliştirilmesi gerektiğini göstermektedir. Yapı zemin etkileşim modelleri ayırık sistemler üzerine basit yapılar için geliştirilmeye başlanmış olup gelişen teknolojiyle birlikte program destekli çözümler ile daha komplike ve yoğun yapı zemin etkileşimi durumundaki problemlere yönelik modeller geliştirilmiştir. Geline son aşamada en etkin model olarak sonlu eleman modeli kullanılmaktadır. Etkileşim analizi yapılacak olan yapının zemin içinde belli koşullara dayanarak sonsuz ortam yerine sonlu bir zemin içinde analiz edilmesi hesapları kolaylaştırır. Özellikle deprem etkisi altında sınılaşmaya uğrayıp taşıma gücünü kaybeden zeminlerde uygulanan kazıklı radye temellerin tasarımında sonlu bir zemin içindeki etkileşim etkilerinin iyi analiz edilmesine bağlıdır.

1.2. Dinamik Yapı Zemin Etkileşimi

İnşaat mühendisliği yapıları, zeminle karşılıklı olarak etkileşim halindedirler. Kuvvetli depremler ve diğer şiddetli dinamik uyarıların etkisiyle dinamik zemin yapı etkileşimi meydana gelir. Bu nedenle bu koşullar altında zemini ve yapıyı ayrı ayrı analiz etmek yerine bütüncül dinamik bir sistem olarak analiz etmek gerekir.

Yapısal etki aralığı içindeki yer hareketi, yapının kendi etkileri nedeniyle değişir. Bu etkiler, doğal zemin ortamı ve yapıdaki kütle, geometri, rijitlik ve sönümlmelerdeki değişikliklerden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, zeminin yapılı ve yapısız hareketinde farklılıklar bulunur ve bu farkın ölçeği, etkileşim etkilerinin öneminin bir göstergesidir.

Bir zemin-yapı etkileşim sisteminin rijitliğindeki fark, etkileşim etkisi olmayan yapısal sistemle aşağıda kıyaslanmıştır. Şekil 1'de gösterilen, kütlesi (m) ve rijitliği (K) olan bir sistemin basitleştirilmiş bir örneğidir. Etkileşim etkileri olmayan model, (a) tabanında sabitlenirken, (b) etkileşim etkisine sahip model esnek bir zemin ortamı tabanına sahiptir; rijitlik ve dönme (K_x) ve (K_ϕ) kısaltmalarıyla ifade edilmiştir (Lysmer, 1979).



Şekil 1. Tek kütleli dinamik sistem modelleri (a) Sabit tabanlı model (b) Esnek zemin ortamındaki model

Sabit tabanlı modelin (u_a) yatay yer değiştirmesi,

$$u_a = u_g + u \quad (1)$$

(u_g) tabanın yer değiştirmesi iken, sönümlenmemiş titreşim için doğal dairesel frekans,

$$\omega_a = \sqrt{k/m} \quad (2)$$

Tabanda esnek bir şekilde desteklenen modelin yatay yer değiştirmesi (u_b),

$$u_b = u_g + u_x + h \cdot u_\phi + u \quad (3)$$

olarak ifade edilir.

Burada, (u_x) ve (u_ϕ) esnekliği nedeniyle tabanın yatay yer değiştirmesi ve dönüşüdür.

Sistemin kuvvet ve momentlerinin dinamik eşitlikleri için koşullar,

$$m\ddot{u}_b + K_u = 0 \quad (4)$$

$$K_u - K_x u_x = 0 \quad (5)$$

$$K u_h - K_\varphi u_\varphi = 0 \quad (6)$$

Sistemin hareket denklemi,

$$m \left(\frac{K}{K_x} + \frac{K h^2}{K_\varphi} \right) \ddot{u} + K_u = -m\ddot{u}_g \quad (7)$$

Denkleme göre, sönümlenmemiş titreşimler (ω_b) için sistemin doğal dairesel frekansı aşağıdaki formülle belirtilmiştir.

$$\omega_b = \frac{\omega_a}{\sqrt{1 + \frac{K}{K_x} + \frac{K h^2}{K_\varphi}}} \quad (8)$$

Bu formüle göre gevşek zeminlerde rijit sistemler için etkileşim etkilerinin daha yüksek olması gerekir. Sıkı zeminlerde kurulan esnek yapısal sistemler durumunda ise etkiler daha düşük, sert kayalar da ise temellerde etkilerin ihmal edilebilir düzeyde olduğu söylenebilir.

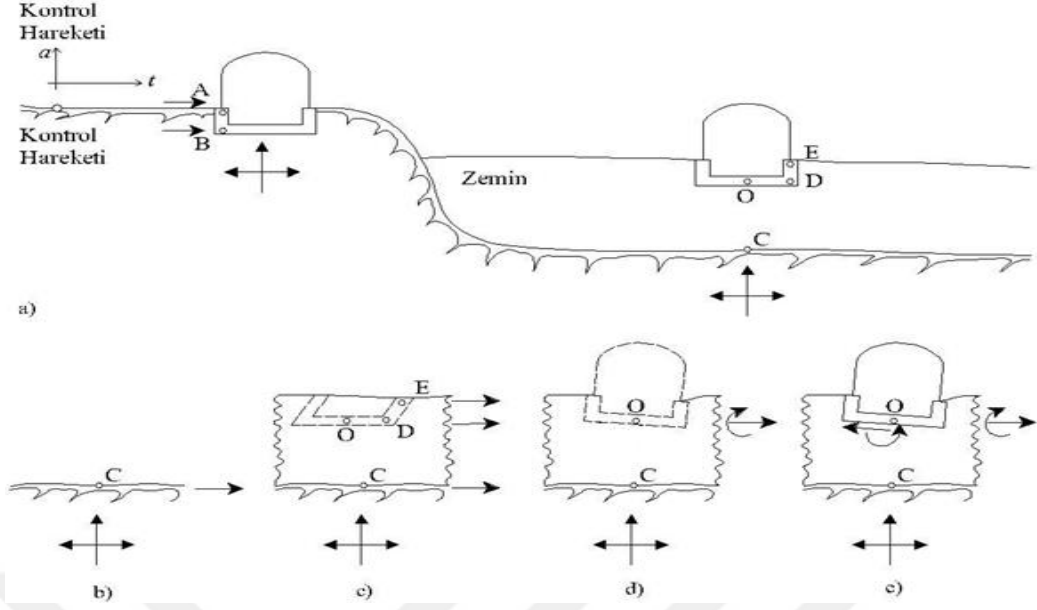
Yapı-zemin etkileşim sistemlerindeki sönümleme, yapısal ve zemin malzemelerindeki malzeme sönümlemesinden ve yapı etrafındaki daha geniş zemin ortamındaki radyasyonel sönümlemekten kaynaklanır. Yani yapıdan zemine tersine çevrilebilir şekilde yapıya aktarılan enerji, yarı sonsuz ortam boyunca yayılır ve yarı sonsuz ortamın artan hacmini kaplayarak geometrik olarak zayıflar. Radyasyon olarak tanımlanan bu zayıflama çok önemlidir ve yapı - zemin etkileşimi sisteminin toplam sönümlemesinin, tabana sabitlenmiş yapısal sistemlerin sönümlemesine kıyasla daha büyük olduğu sonucuna varılmıştır.

Dinamik etkileşim etkilerinin önceden nicel olarak belirlenmesi mümkün değildir, niteliksel olarak da önceden belirlemek bir dereceye kadar mümkündür. Bu etkileşim

örnekleri Şekil 2’de gösterilmiştir. Şekil 2’de biri sert kayada diğeri yumuşak zeminde kurulmuş iki özdeş yapının davranışlarını karşılaştırılmıştır:

Şekil 2. (a) 'da yapıların yerleri gösterilmektedir. Şekil 2. (a)’da temel yapısının sert olduğu ve uyarmanın düşey olarak yayılan kayma dalgalarından kaynaklandığı varsayılmaktadır. Uyarma, kaya yüzeyindeki kontrol noktasında verilen kontrol hareketi ile tanımlanır. Kayanın rijitliği göz önüne alındığında, kayaya oturan yapının tabanındaki giriş uyarımının herhangi bir yapı olmaksızın serbest alandaki kontrol noktası hareketine ve bu harekete çok benzer olacağı tahmin edilebilir. Ayrıca, yapının tabanında önemli bir etki beklenmemektedir, böylece tabanda sabit olarak analiz edilebilir.

Bununla birlikte, yumuşak zemine oturan yapının yani alttaki şekillerde yapının davranışının önemli ölçüde farklılık göstereceği ifade edilmiştir: Şekil 2. (b) de, sadece kontrol hareketine eşdeğer olan C noktasındaki hareket ile bir kaya çıkıntısı gösterilmektedir. Şekil 2. (c)’de, D ve E noktalarındaki karakteristik hareketlerle temsil edilen, herhangi bir yapı olmaksızın serbest alan sahasının tepkisi gösterilmektedir. Bu hareketler yapısız temelin bir sonucu olarak yataydır ve kontrol hareketinden farklılık gösterir. Şekil 2. (d)’de yer değiştirmenin meydana gelmesi ile değil, aynı zamanda zemindeki dönme ile de karakterize edilir ve kinematik etkileşim olarak tanımlanır. Şekil (e)’de ise toprağın kütlesinden ve hareketinden kaynaklanan yapının etkisindeki zeminin tepkisi gösterilmektedir. Burada yapının kütlesi nedeniyle ek eylemsizlik kuvvetleri gelişir. Bu yanıt, eylemsizlik etkileşimi veya ataletsel olarak tanımlanır. (Lysmer, 1979)



Şekil 2. Kaya veya zeminde kurulmuş yapıların dinamik tepkisi (a) Kaya yapısı ve zemin yapısından oluşan sistem (b) Kaya yüzeyi (c) Serbest alan (d) Kinematik etkileşim (e) Ataletsel etkileşim

Dinamik etkileşim probleminin çözümü karmaşık bir konudur ve bu karmaşıklık dinamik sistem ve dinamik uyarıları içerir. Dinamik sistem, sürekliliği ve sınırlı oranlara sahip yapıyı temsil eden zemin ortamından oluşur. Zemin ortamı, önemli doğrusal olmayan davranışları olan, özelliklerine göre farklılık gösteren çeşitli malzemelerden oluşur ve zemin katmanlarının geometrisi genellikle karmaşıktır.

Özellikle deprem durumunda dinamik uyarılar oldukça karmaşık hale gelir. Kuvvetli deprem yer hareketi birkaç tür dalgadan kaynaklanır ve rastgele bir süreçtir. Bu nedenle, dinamik etkileşim probleminin çözümü için basitleştirmeler yapılması gerekir. Sorunla ilgili basitten karmaşığa çok sayıda yöntem ve çözüm geliştirilmiştir. Bazılarında, zemin ortamının süreklilik olarak analiz edildiği, diğerlerinde ise ayrıklaştırılmış modellerle temsil edildiği ifade edilmiştir. Bu yöntemlerin çoğunda, analizler iki temel aşamada gerçekleştirilir, birinci aşamada herhangi bir yapı olmadan serbest alanda dinamik yanıtın analizi olarak ve ikinci aşamada ise etkileşimin doğrudan analizi olarak gerçekleştirilmelidir. Yöntemlerin çoğunda, hem yapı hem de zemin ortamı, doğrusal bünye denklemleriyle modellenir ve doğrusal modellerin uygulanmasının, analizi basitleştiren süper pozisyon ilkesinin uygulanmasını sağladığı belirtilmiştir.

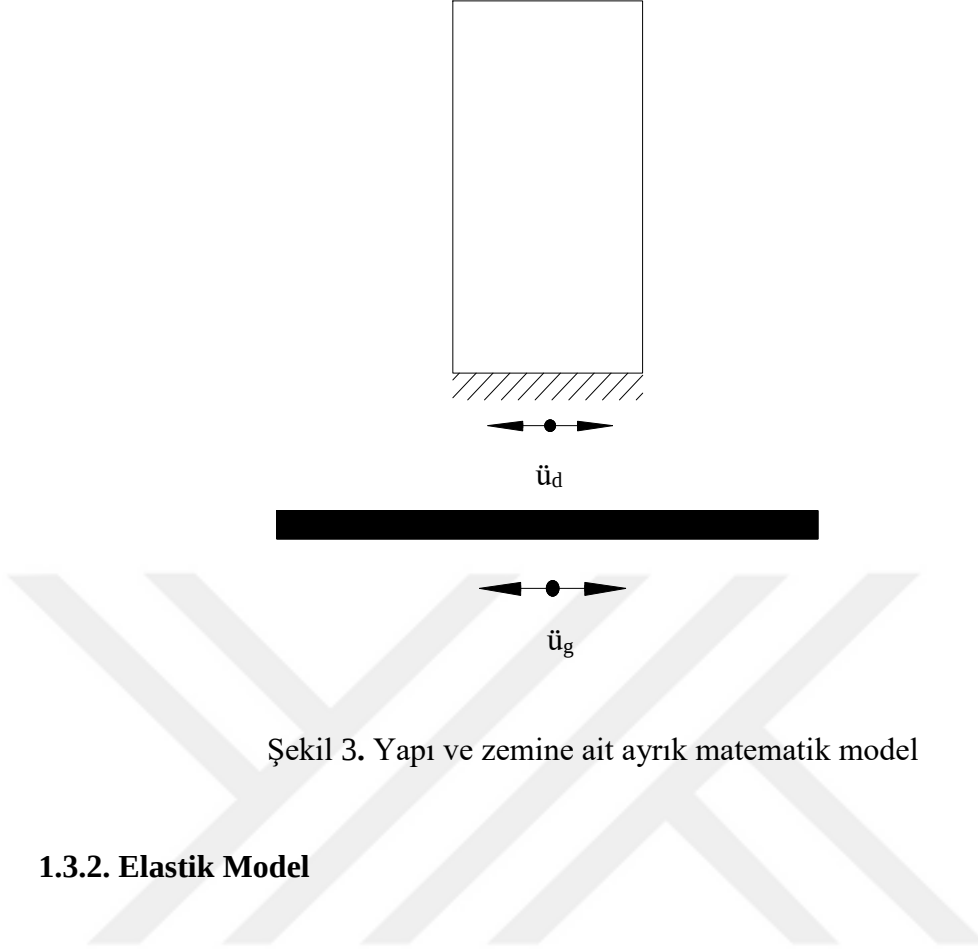
1.3. Yapı Zemin Etkileşim Modelleri

Deprem etkisindeki bir yapının davranış analizi için kendi yapısal özelliklerinin çevresiyle birlikte incelenmesi model seçimi için gereklidir. Ancak kompleks özellikteki yapıların davranışlarını tek bir model üzerinden kesin olarak belirlemek mümkün değildir. Bu nedenle dinamik analizlerde model seçimi aşağıdaki unsurlara bağlı olarak yapılmalıdır (Dumanoglu, 1979).

1. Model zemin özelliklerine ve deprem büyüklüğüne bağlı değişebilir. Zeminin titreşim dalgaları zeminin her yönünde yayıldığı için yarı sonsuz zemin ortamı sınırlı bir hacme eşitlenmelidir.
2. Modelde yer hareketi kesit boyunca değişebilir. Bu da her kesitte etkinin farklı olabileceğini gösterir. Ayrıca yapının zemin içinde kalan bölgelerine etkiyen kuvvetler de derinliğe ve zemin özelliklerine bağlı olarak değişecektir.
3. Seçilecek modelde yayılımının üç boyutlu olmasının yanı sıra farklı ve birbirine yakın olarak inşa edilmiş yapılarda yapı-zemin ilişkileri ayrıca dikkate alınmalıdır.

1.3.1. Ayrık Model

Bu model, üzerinde yapı bulunmayan, yer hareketi etkisindeki zeminde kullanılabilir. Bu çözümde dinamik etkinin düşey, bir boyutlu yayılan kayma (s) dalgaları ile oluştuğu kabul edilmektedir. Yapı tabanı seviyesindeki yer hareketi etkisinde, tabana ankastre kabul yapının dinamik hesabında kullanılır. Özellikle bina türü daha basit yapılar için bu matematik model uygundur fakat bu model, zemine kısmen gömülü ağır yapılarda doğru sonuçlar vermez. Ayrıca zemin tabakalı değilse, zemin özellikleri kesit boyunca değişiyorsa ve tabandaki sınırdaki eğim varsa uygulanmaz (Dumanoglu, 1979).



Şekil 3. Yapı ve zemine ait ayırık matematik model

1.3.2. Elastik Model

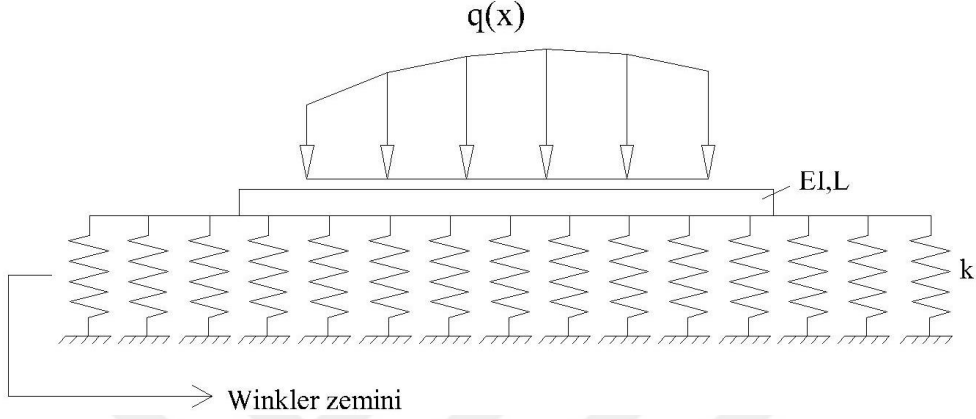
1.3.2.1. Bir Parametrelili Model

Zeminin lineer-elastik davrandığı kabulü, yapı zemin etkileşimini incelemek için yaygın olarak yapılan kabullerdendir. Zemindeki lineer olmayan etkilerin yerine ise lineer eşdeğerlilik metodu kullanılır. Bu çalışmalar içerisinde geçen en basit yöntem Winkler yay modelidir (Özgan, 2000).

Winkler modeline göre; zeminin birbirine sonsuz yakın lineer ve elastik yaylardan meydana geldiği ve zeminin düşey yer değiştirmesinin (w) sadece o noktaya etki eden taban basıncına (p) ve idealleştirilmiş zemindeki yay sabitine (k) bağlı olduğu kabul edilmektedir (Şekil 4). Bu durumda yayların sadece doğrudan yükleme durumunda şekil değiştirdikleri ancak yayların birbirini etkilemediği kabul edilmektedir. Bu durumda zemin tamamen süreksiz bir ortam olarak kabul edilir. Bir parametrelili modelde taban basıncı,

$$P(x,y) = kw(x,y) \quad (9)$$

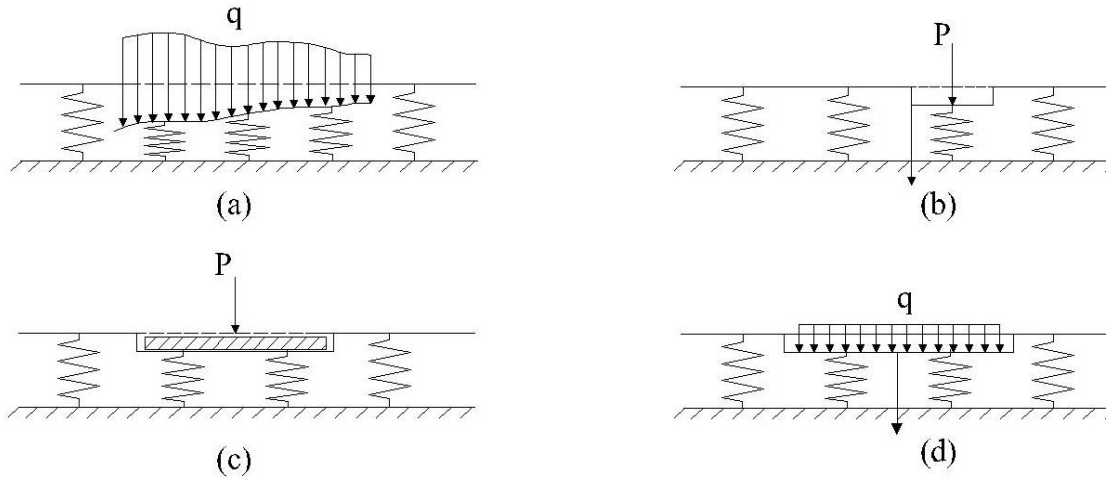
Burada k elastik yay katsayısı olup uygulamada “yatak katsayısı olarak adlandırılmaktadır. Bu parametre, düşey yer değiştirme bir birim olduğunda birim genişlikteki birim alana gelen tepki kuvvetini ifade etmektedir. Bu zemin modeli küçük şekil değiştirmeler durumunda uygun olmaktadır.



Şekil 4. Bir parametrelili zemine oturan bir kiriş şeması (Winkler Modeli)

Winkler modelinin en büyük eksikliği yaylar arasındaki etkileşimi dikkate almaması, zemine etkiyen kuvvetlerin sadece etki ettikleri noktada şekil değişimi yaptığını kabul etmesidir (Şekil 4). Bu duruma göre yüklü alan dışında zemin etkisi ihmal edilir. Oysa zemin yüzeyindeki bir noktada oluşan yer değiştirme sadece o noktaya etki eden kuvvetten değil aynı zamanda diğer noktalardaki kuvvetlerden de etkilenmektedir (Özgan, 2000).

Winkler modelinde elastik bir zemine oturan kirişin herhangi bir noktasındaki çökme (w) aynı noktadaki taban basıncı (p) ile orantılıdır. Fakat bu durum zeminde sadece bazı kabuller yapıldığında sağlanabilmektedir (Erusta,1996). Gerçekte herhangi bir noktada oluşan çökmeye bu noktanın etrafındaki diğer yüklerin de etkisi vardır. Winkler modelinde bu durum dikkate alınmaz. (Özgan, 2000).



Şekil 5. Winkler modeline göre zeminin yer değiştirme durumları (a) Düzgün yayılı olmayan yük altında (b) Tekil yük altında (c) Rijit bir tabaka ile aktarılan yük altında (d) Düzgün yayılı yük altında

Winkler modelinde çeşitli zemin sınıfları için gerekli olan yatak katsayıları deneylerle bulunur. Çeşitli zemin türleri için yatak katsayısı değerleri aşağıda verilmektedir (Bowles, 1982) .

Tablo 1. Çeşitli zemin türleri için yatak katsayısı değer aralıkları

Zemin Türü	k (kN/m ³)
Balçık, turba	< 2000
Kil, plastik	12000 - 24000
Kil, yarı sert	24000 - 48000
Kil, sert	48000 <
Kum, gevşek	4800 - 16000
Kum, orta sıkı	9600 - 80000
Kum, sıkı	64000 - 128000
Kum-çakıl, sıkı	100000 - 150000

1.3.2.2. İki Parametrelili Model

Zemin ortamının karmaşık olması, Winkler modelinin sadece küçük yer değiştirmeler için sonuç vermesinden dolayı zeminin gerçek davranışını ifade etmez. Bu yüzden bir takım idealleştirmelere göre bazı araştırmacılar ile yeni modeller geliştirmiştir:

1. Filonenko-Borodich Modeli
2. Hetenyi Modeli
3. Pasternak Modeli
4. Vlosov Modeli
5. Reissner Modeli

Borodich (1940), Winkler modelinde yaylarının yüzeylerinin sabit bir T gerilmesine sahip elastik bir zar gibi olduğunu varsaymıştır (Şekil 6). Bu şekilde yaylar arasında süreklilik sağlamıştır. Yani sisteme yük etkidiğinde yüzeyde gerilmeler oluşmaktadır. Bu modelde zeminin tepki fonksiyonu T membran kuvvetini, ∇ laplace değişkenini göstermek üzere (Özgan, 2000)

$$p(x,y) = k w(x,y) - T \nabla^2 w(x,y) \quad (10)$$

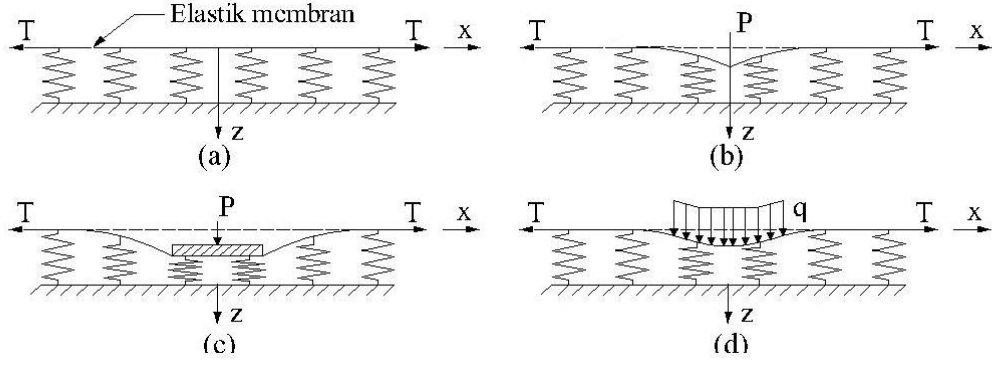
Bu ifadedeki Laplace değişkeni ise

$$\nabla = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \quad (11)$$

Bir boyutlu problemler için ilk denklem,

$$p = kw(x) - \frac{d^2 w(x)}{dx^2} \quad (12)$$

şeklindedir.



Şekil 6. Filonenko-borodich modeline göre zeminin yer değiştirme durumları (a) Yüksüz durum (b) Tekil yük altında (c) Rijit bir tabaka ile aktarılan yük altında (d) Yayılı yük altında

Hetenyi (1946); Winkler yaylarının üzerinde eğilme rijitliği D olan bir plak olduğunu varsaymıştır. Bir boyutlu problemler için ise plak yerine kirişi dikkate almıştır. Bu modele göre zeminin tepki fonksiyonu (Özgan, 2000),

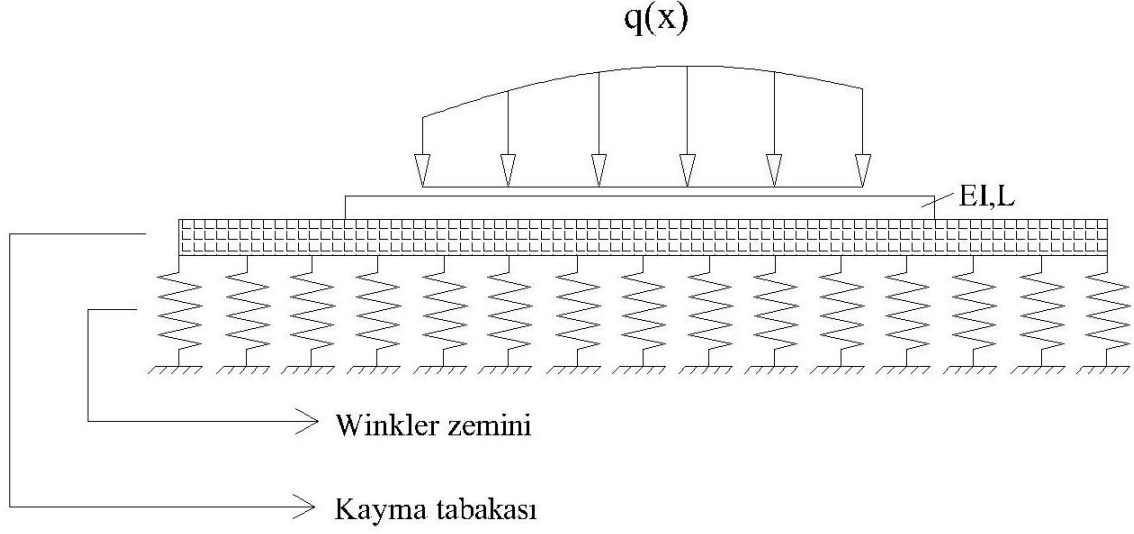
$$p(x,y) = k w(x,y) - D \nabla^2 w(x,y), \quad (13)$$

ifadesi ile verilmektedir. Bir boyutlu problemler için bu ifade

$$p = kw(x) + D \frac{d^4 w(x)}{dx^4} \quad (14)$$

Pasternak (1954), yayların üzerinde sıkışmayan düşey elemanlardan oluşan ve sadece düşey yönde yer değiştirme yapabilen, kesme etkisinde şekil değiştirmeye uğrayan bir kayma tabakası dikkate almıştır (Şekil 7). Bu modele göre zeminin tepki fonksiyonu, G elastik zeminin kayma modülünü göstermek üzere,

$$p(x,y) = k w(x,y) - G \nabla^2 w(x,y) \quad (15)$$



Şekil 7. İki parametrelili zemine oturan bir kiriş şeması

Vlasov(1966), plaklar için iki parametrelili modeli geliştirmiştir. Bu modelde zemin tabakasındaki kayma şekil değiştirmeleri dikkate alınır. Plaklar üzerine geliştirilen bu modele göre zeminin tepki fonksiyonu, $2t$ zemin kayma parametresini göstermek üzere,

$$p(x,y) = kw(x,y) - 2t \nabla^2 w(x,y) \quad (16)$$

ifadesiyle verilmektedir. Bu ifade bir boyutlu problemler için

$$p = kw(x) - 2t \frac{d^2 w(x)}{dx^2} \quad (17)$$

şeklini almaktadır. Bu bağıntıdaki k , t , D ve G parametrelerinin hesabında kesin bir yöntem olmamakla birlikte zeminin özelliklerinden doğrudan elde edilebilmektedirler.

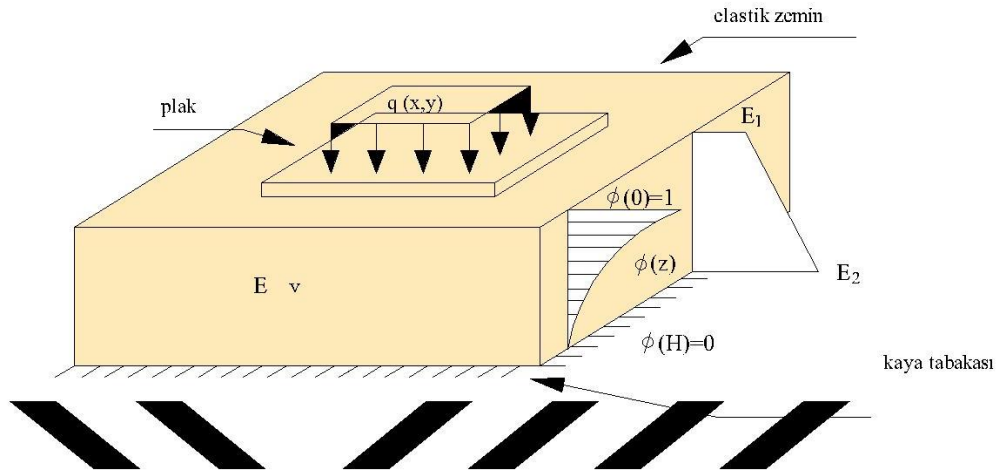
Bir ve iki parametrelili modellerin kesin sonuç vermemesinin sebepleri: statik modellerdir yani dinamik etkiler göz ardı edilir; sadece zeminin düşey yöndeki etkilerini tanımlarlar. Zemin içerisindeki değişimi dikkate almazlar; zemin tabakalarının aynı özellikte olduğunu ve elastik davrandığını kabul ederler. Ayrıca bir ve iki parametrelili modellerde parametreler kuramsal ifadelerdir ve bu parametrelerin alabileceği değerlerle zemin özellikleri arasında kesin bir ilişki yoktur.

1.3.2.3. Üç Parametrelili Zemin Modelleri

Daha emniyetli hesaplar için kayma etkilerini de dikkate alan Vlasov modeli üzerinde zemin parametrelerini kapsamlandıran çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmaların iki parametrelili modellerden ayrılan en önemli özelliği zeminin elastik özelliklerinin de hesaba katılarak yöntemler geliştirilmeye çalışılmasıdır (Kılıçer, 2016).

Bu modellerden en bilineni Geliştirilmiş Vlasov modelidir. Bir ve iki parametrelili zemin modellerinde zemin içerisindeki değişimler kuramsaldır. Bu parametrelerin alabileceği değerler ile zemin özellikleri arasındaki bağlantılar da kuramsaldır. Bu yöntemin farkı zemin elastik özelliği göz önünde bulundurularak zemin yatak katsayısı (k) ve zemin kayma (2t) parametrelerinin hesaplanmasıdır.

Zemin parametrelerini; yükleme durumuna, malzeme özelliklerine, yapının geometrisine ve zemin derinliğine bağlı olarak hesaplayan yöntem günümüzde Geliştirilmiş Vlasov modeli ya da Üç Parametrelili Model olarak adlandırılmaktadır. Üç parametrelili elastik zemine oturan bir plak şeması şekil 8’de verilmektedir (Vallabhan, Das, 1988).



Şekil 8. Elastik bir zemine oturan bir plak şeması (Kılıçer, 2016)

Bu modelde alt zeminin etkisi, plağın yer değiştirmelerine (w) bağlı olarak aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$q_z = -2t\nabla^2 w + kw \quad (18)$$

Bu ifadedeki zeminin birinci parametresi olarak da adlandırılan, zemin yatak katsayısı k ,

$$k = \int_0^H \frac{E_s (1-\nu_s)}{(1+\nu_s)(1-2\nu_s)} \left(\frac{\partial \phi(z)}{\partial z} \right) dz \quad (19)$$

ifadesinden ve zeminin ikinci parametresi olarak bilinen, zemin kayma parametresi $2t$,

$$2t = \int_0^H G_s \phi(z)^2 dz \quad (20)$$

ifadesinden hesaplanmaktadır. Yukarıdaki ifadelerde H zemin derinliğini, ν_s zeminin Poisson oranını ve G_s ise zeminin kayma modülünü göstermektedir. Eşitlikte $2t$ parametresi sıfıra eşitlendiğinde plağa ait zemin tepkisi elde edilmektedir. Zeminin düşey yer değiştirmesinin değişimini $\phi(z)$

$$\phi(z) = \frac{\sinh \gamma \left(1 - \frac{z}{H} \right)}{\sinh \gamma} \quad (21)$$

olmak üzere zemin yüzey parametresi diye adlandırılan γ boyutsuz katsayısı

$$\left(\frac{\gamma}{H} \right)^2 = \frac{(1-2\nu_s)}{2(1-\nu_s)} \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} (\nabla w)^2 dx dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} w^2 dx dy} \quad (22)$$

ifadesiyle verilmektedir. $\phi(z)$ fonksiyonu $z=0$ için $\phi(z)=1$ ve $z=H$ için $\phi(z)=0$ değerini almaktadır. Yani H derinliğinde zeminin düşey yer değiştirmesi sıfır iken zeminin yüzeyindeki düşey yer değiştirmesi plağın düşey yer değiştirmesine eşit olmaktadır.

Bu İfadelere göre k ve $2t$ parametreleri zeminin malzeme özelliklerine, zeminin derinliğine ve $\phi(z)$ fonksiyonuna bağlıdır. $\phi(z)$ fonksiyonu ise zemin derinliğine ve γ parametresine bağlı olarak hesaplanabilmektedir. γ parametresinin de dış yükler etkisi altında plağın yer değiştirmelerine, zeminin Poisson oranına ve zemin derinliğine bağlı olarak değişmektedir. Zemin parametreleri hesabındaki karmaşıklık ardışık yaklaşım gerektirmektedir ve şu yol izlenir:

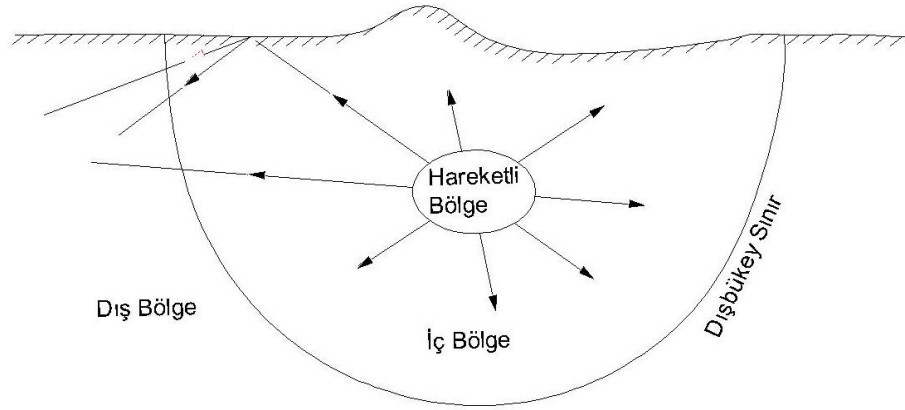
1. Zemin yüzey parametresi (γ) için başlangıç değeri belirlenir.
2. (γ) ile (k ve $2t$) hesaplanır.

3. Hesaplanan zemin parametreleri (k ve $2t$) kullanılarak yapı sistemi analiz edilir.
4. Analiz sonucuna göre düşey yer değiştirmeler (w) kullanılarak eşitlikte yeni (γ) hesaplanır.
5. Son iki iterasyonda hesaplanan zemin yüzey parametreleri (γ) arasındaki fark önceden belirlenen bir hata payından küçük olana kadar iterasyona devam edilir.

1.3.3. Sonlu Eleman Modeli

Pratikte karşılaşılan karmaşık geometrilerin çoğu için kapalı form çözümleri bulmak mümkün değildir. Bu nedenle, sonlu bir kütlede sayısal yöntemlere başvurmak gerekir. Bu yöntemlerle yalnızca sınırlı sayıda düğüm noktası düşünülebilir; bu nedenle sayısal yöntemler doğrudan sonsuz sistemlere uygulanamaz. Burada özel bir viskoz sınır koşulu olan sonlu bir sistem tarafından sonsuz bir sistemin yaklaşık olarak tahmin edilebildiği genel bir yöntem geliştirilmiştir (Lysmer ve Kuhlemeyer, 1969). Ortaya çıkan modelin, sıradan sayısal yöntemlerle analiz edilebilir olduğu fakat sonlu elemanlar yöntemiyle daha kolay ele alındığı görülmüştür. Kararlı haldeki temel titreşim problemlerinin analizi için sonlu modeli kullanan örnekler göstermiştir ki yarım sonsuz uzay ile önerilen sonlu model arasındaki yakın denklik vardır ve yöntem daha önce çözilemeyen problemler için de uygundur (Lysmer ve Kuhlemeyer, 1969).

Sonsuz bir sistemin tipik bir örneği şekilde gösterilmektedir. Tüm bozukluk kaynaklarını ve tüm düzensiz geometrik özellikleri kapsayan hayali bir dış bükey sınırdaki enerjinin yayılması sadece iç bölgeden dış bölgeye gerçekleşir ve sınıra gelen tüm enerji dış bölgeye aktarılır. Bu yüzden dış bölgenin iç bölge üzerindeki etkisi bu enerjinin soğurulmasıyla aynıdır. Bu gözlem, doğrudan, sınıra gelen tüm enerjinin emilmesini sağlayan bir sınır şartına tabi olan ve iç bölgeden oluşan sonlu bir modele göre iç bölgenin dinamik tepkisinin belirlenmesi fikrine götürür (Lysmer ve Kuhlemeyer, 1969).

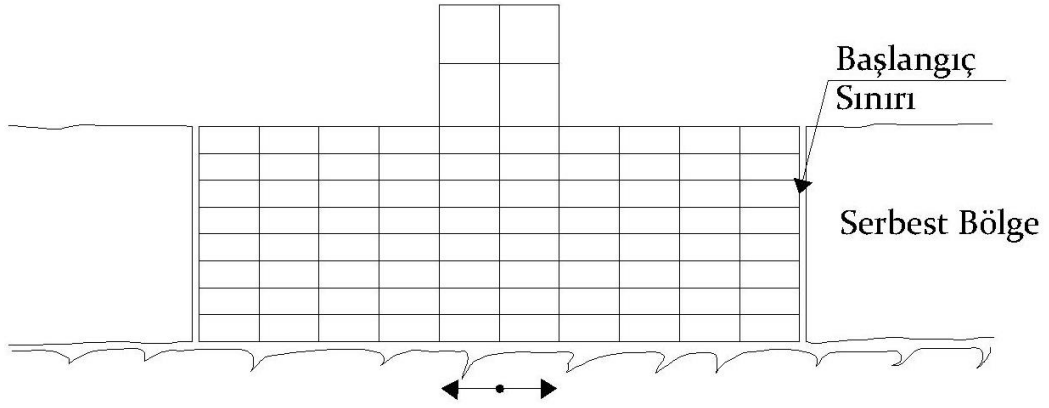


Şekil 9. Sonsuz sistem

1.3.3.1. Model ve Sınırlar

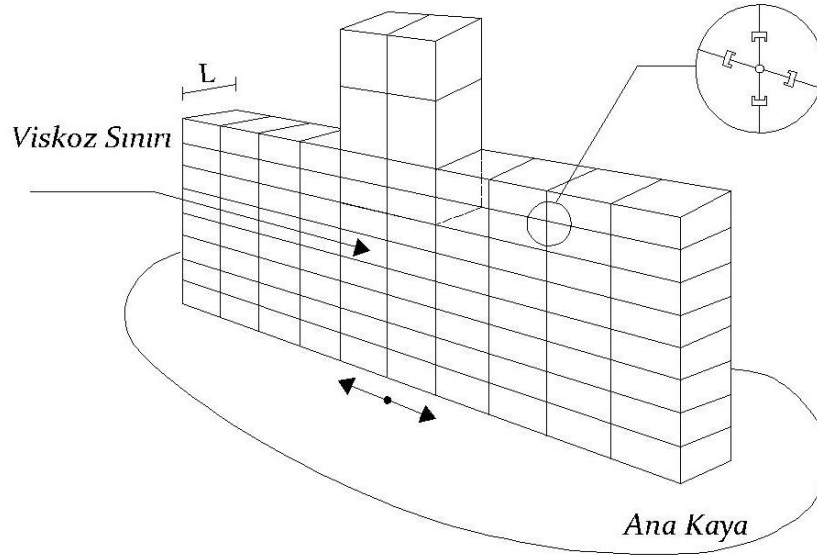
Zemin ortamı temelde sürekli ve model zeminin sadece bir kısmını içerdiğinden, zemin ortamının ayrıklaştırılması gerekir. Bu nedenle modelin sınırlarının tanımlanması sorunu ortaya çıkacaktır. Bir alternatif olarak model sınırlarını yapıdan yeterince uzağa koymak önerilmiştir. Bu temel sınırlar, modelin etrafındaki zemin gerilmelerine eşdeğer kuvvetlerin ve yer değiştirmelerin model etrafındaki zemine eşdeğer olduğu serbest sınırlar olarak tanımlanabilir. Bu sınırlar yapının pratik etkisinin ötesinde olacak şekilde ayarlanmalıdırlar, böylece yeterli hacimde zemin kütlesi sağlarlar, bu da radyasyon sönümlenmesi yoluyla yapıdan tersine çevrilebilir yayılan enerjiyi zayıflatır. Diğer bir deyişle model sınırlarının hareketinin, serbest alandaki harekete yakın olması gerekir. Bunu sağlamak için, genellikle modelin ana kayaya kadar derinlere inmesi veya yeterince sert zemin ortamına ulaşması, yanlamasına ise her yönde yapının birkaç genişliği kadar geniş olması gerekir. Bu oranların bir sonucu olarak ve sonlu elemanların boyutlarını sınırlandırma ihtiyacı göz önünde bulundurularak çok sayıda eleman içeren modeller elde edilir, bu da analizi oldukça karmaşık hale getirir.

Temel sınırları olan tipik bir model örneği, Şekil 10'da gösterilmektedir. Bu model, yapıdan yeterince uzakta düzlem şekil değiştirmelere neden olan ve dikey yayılan uyarıma sahip iki boyutlu sonlu elemanlara sahiptir (Lysmer, 1979).



Şekil 10. İki boyutlu modelin sistematik görünüşü

Aynı şekilde dinamik etkileşim, üç boyutlu olarak da temsil edilebilir. Modeller sorunu oldukça karmaşık hale getirir. Bu nedenle problemin üç boyutlu analizi pratik olarak eksenel simetrik yapılar için geliştirilir. Bununla birlikte, özel viskoz sınırlar getirilerek üçüncü boyut etkilerinin dikkate alınabileceği basitleştirilmiş üç boyutlu modeller geliştirilmektedir. Tipik bir basitleştirilmiş üç boyutlu model Şekil 11’de gösterilmektedir. Yapının genişliğine eşit genişlikte bir kesitteki zemin ortamının yapısını ve bir bölümünü içerir (Lysmer, 1979).



Şekil 11. Basitleştirilmiş üç boyutlu modelin sistematik görünüşü

Bu model durumunda, temel sınırlar yeterli bir mesafede iken, uyarma dikey olarak yayılır ve model düzleminde gerilmeye neden olur. Bununla birlikte, model düzlüğüne dik yönde yayılan dalgaların etkisini dahil etmek için modeli sınırlandıran her iki düzlükte viskoz sınırlar belirlenmiştir. Bu iki düzlükte kesme gerilmesinin geçerli olacağı ve normal gerilmenin küçük ve ihmal edilebilir olduğu varsayılabilir. Viskoz sınırlar, düzlüklerin her düğüm noktasında dikey ve yatay sönümleyiciler ile tanımlanabilir. Birim alan başına sönümleyiciler (c_s) şu şekilde tanımlanabilir:

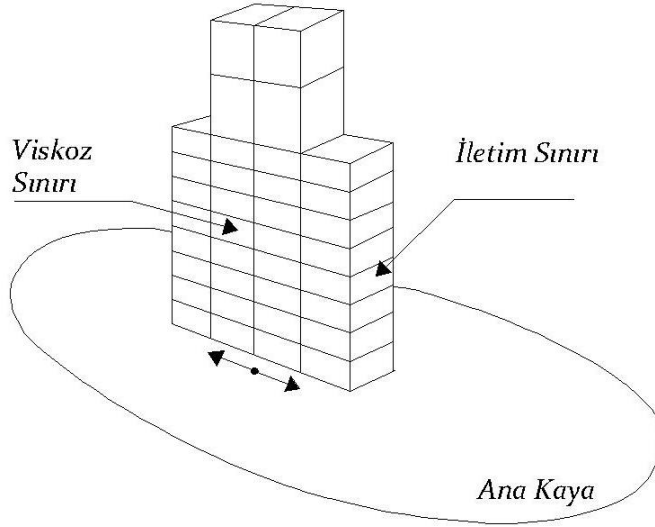
$$c_s = \rho v_s \quad (23)$$

Burada, (ρ) kütle yoğunluğu, (v_s) ise zemin için kayma dalgası yayılma hızıdır. Sönümleyicilerde oluşan gerilmeler, zemindeki teğet yer değiştirmenin hızlarıyla orantılıdır, ($\dot{u}$):

$$\tau(t) = c_s \dot{u}(t) = \rho V_s \dot{u}(t) \quad (24)$$

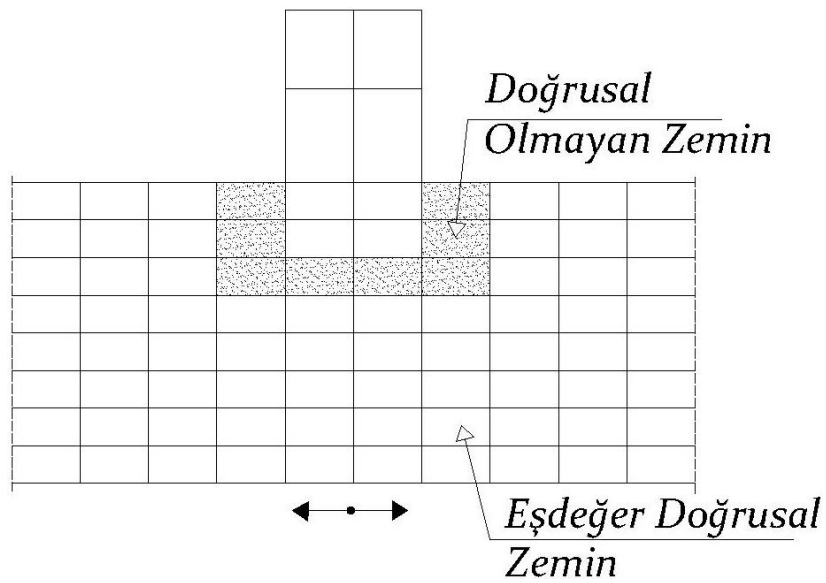
Dahil edilen zemin kütesinin toplam hacmini, dolayısıyla sonlu elemanların sayısını azaltmak için, ancak aynı zamanda modelden enerji radyasyonu sağlamak için özel iletim sınırları getirilmiştir. Sınırlar, sınırın her düğüm noktasında yay sönümleyici sistemlerden oluşan iletici elemanlar içerir.

Oluşan iletim enerjisi, sınır yer değiştirmeleriyle orantılıdır. Bu sebeple sınırlardaki enerji iletimi yapıya yakın konumlandırılabilmekte ve böylelikle model elemanlarının sayısı önemli ölçüde azalmaktadır. İletim sınırları olan modelin tipik bir örneği Şekil 12’de gösterilmektedir. Bu model, yukarıdaki modelde iletim sınırları eklenerek elde edilir. Modelin boyutundaki azalmanın etkisi, şekillerdeki her iki modelin karşılaştırılmasıyla tahmin edilebilir (Lysmer, 1979).



Şekil 12. İletim sınırlı basitleştirilmiş üç boyutlu modelin sistematik görünüşü

Daha önce tartışılan modellerin zemin malzemesi doğrusal, yani eşdeğer doğrusal özellikler ile temsil edilmektedir. Doğrusal olmayan özelliklerin eklenmesi, analizin daha da karmaşılaşmasına neden olur ve pratik olarak gerçekleştirilmesi zordur. Bu nedenle, yapının sadece zeminle ilk temas ettiği yerdeki modeller doğrusal olmayan özellikte kabul edilirken kalan kısmın modeli doğrusal özelliktedir. Böyle bir model Şekil 13'te sunulmuştur (Lysmer, 1979).



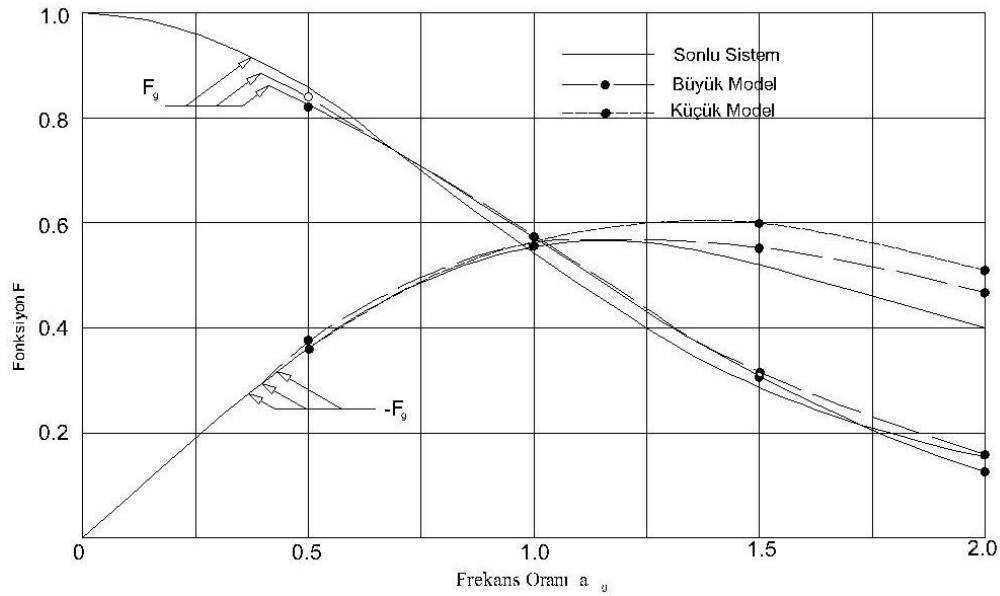
Şekil 13. Yapıyla etkileşim durumunda zeminde yapılan kabuller

1.3.3.2. Sonlu Eleman Seçimi

Sonlu elemanlar yönteminin doğruluğu, en büyük elemanın kenarının uzunluğunun sistemde yayılan elastik dalgaların minimum dalga boyuna bölünmesiyle elde edilir (Lysmer ve Kuhlemeyer, 1969).

Tablo 2. Pürüzsüz ve pürüzlü temel için yer değiştirme fonksiyonlarının karşılaştırılması

a ₀	F_1		F_2	
	Pürüzsüz Temel	Pürüzlü Temel	Pürüzsüz Temel	Pürüzlü Temel
0.5	0.8312	0.8089	0.3688	0.3533
1.0	0.5593	0.5604	0.5473	0.5185
1.5	0.3115	0.3327	0.5442	0.5332



Şekil 14. Rayleigh dalga sınırı sonuçları

Bu oran için doğru sonucun yaklaşık olarak 1/12 den daha az olması gerekir. Kusurlu dalga soğrulmasından kaynaklanan doğruluk, kusurlu dalga emilimi nedeniyle uyarılmış bölgeden viskoz sınıra olan mesafeye bağlıdır. Hata, bu mesafe ile minimum dalga boyu arasında artan bir oranla azalır. Model, belirli bir problem için çalışma frekansı aralığında

doğru olmalıdır. Yukarıdaki açıklamalardan frekansta bir artışın olduğu açıktır bu da eleman boyutunda bir azalma gerektirir ve modelin tüm boyutlarının küçültülmesine izin verir (Lysmer ve Kuhlemeyer, 1969)

Sayısal sonuçlardan 2 temel model elde edilir:

1. 238 düğüm noktalı küçük bir model ve vizkoz sınırına olan mesafe Rayleigh dalga boyunun 3/4 katı
2. 682 düğüm noktalı daha geniş bir model ve sınıra olan mesafe Rayleigh dalga boyunun 1-1/2 katı

1.4. Yapı Zemin Etkileşimi İçin Analiz Yöntemleri

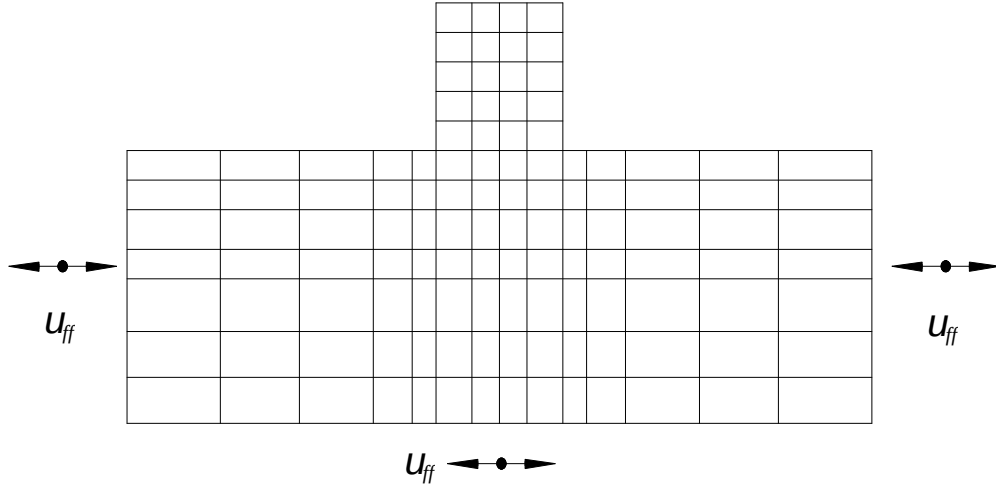
Dinamik yapı zemin etkileşimi için doğrudan ve alt sistem yaklaşımı olmak üzere iki farklı yaklaşım önerilmiştir.

1.4.1. Doğrudan Yaklaşım

Doğrudan yöntemlerle analiz yapı-zemin sisteminin kurucu bütün elemanlarını içerir ve bu yaklaşım genellikle sonlu eleman modelini kullanır. Bu amaçla zeminin sadece sistemin dinamik tepkisi için önemli olan kısmının dahil edilmesi gerektiği ifade edilmiştir. Yapılan basitleştirmelere göre, iki boyutlu sonlu elemanlarla modelleme yapılır ardından modelin sonlarına özel sınırlar getirilir. Uyarının dikey yayımlı ve zemin malzemesinin eşdeğer doğrusal özellikte olduğu kabul edilir. Ayrıca, sistem analizinden önce genellikle serbest alan analizinin yapılması gerekir.

Doğrudan yöntemde zemin-temel-yapı sistemi tek adımda modellenir ve analiz edilir. Açık arazi hareketleri modelin tabanında ve yanlarında Şekil 15'deki gibi tanımlanır. Bir sonlu eleman modeli için etkileşim tepkisi aşağıdaki hareket denklemlerinden hesaplanır (Kramer, 2003) .

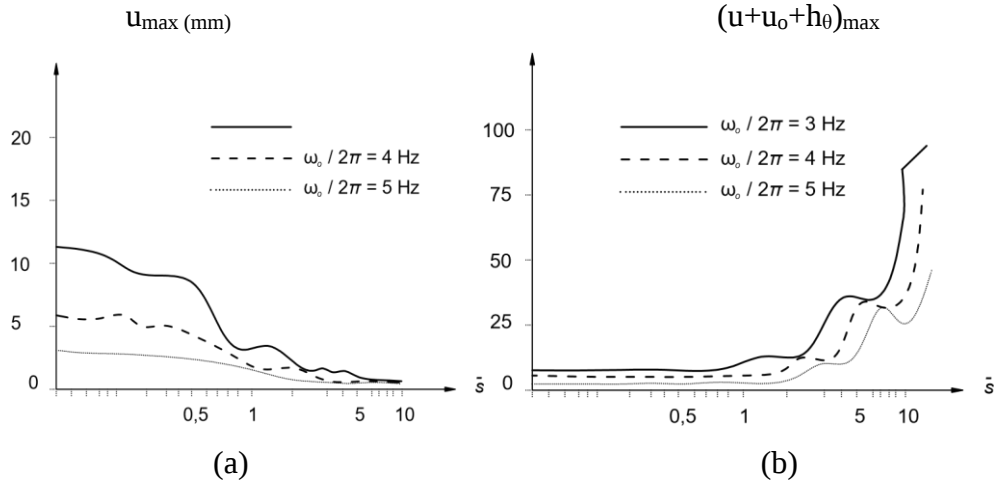
$$[M]\{\ddot{u}\} + [K *]\{u\} = -[M]\{\ddot{u}_{ff}(t)\} \quad (25)$$



Şekil 15. Zemin-yapı etkileşim analizinin doğrudan yöntemi

Problemin tümü modellenir ve sınırlarda uygulanan açık arazi hareketine tepki bir adımda belirlenir.

Burada $\{\ddot{u}_{ff}(t)\}$: sınır düğüm noktalarında tanımlanmış açık arazi ivmeleridir. Doğrudan yöntemin kullanımında zemin ve yapının birlikte davranışını eşit kuvvette ele alabilecek bir bilgisayar programı gereklidir.



Şekil 16. Eşdeğer zemin-yapı sisteminin yapay kayıta tepkisi ($h=1$, $v=0,33$, $\xi=0,025$, $\xi_g=0,05$) (a) Maksimum yapısal distorsiyon, (b) Açık araziye göre kütlenin maksimum yer değiştirmesi (Wolf, 1985)

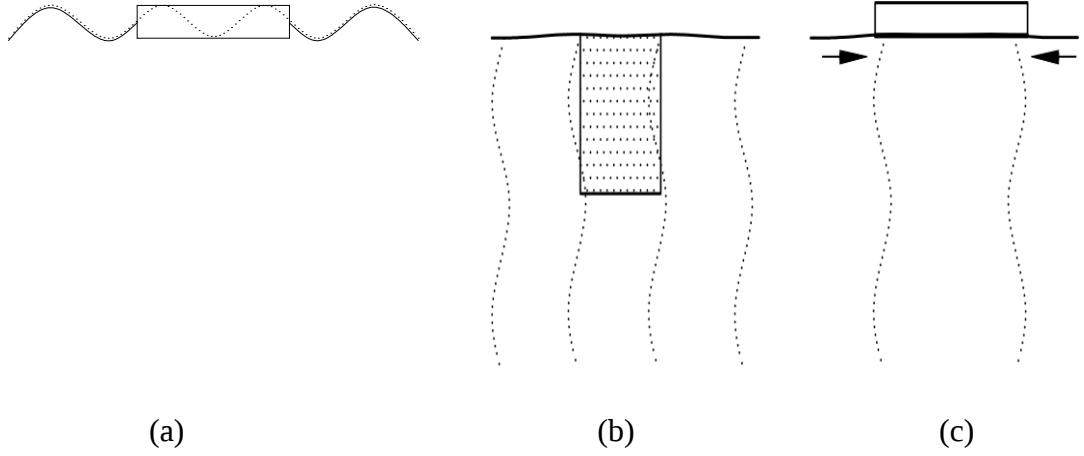
1.4.2. Alt Sistem Yaklaşımı

Eşdeğer doğrusal yöntemler durumunda süper pozisyon ilkesinin uygulanması dinamik zemin-yapı etkileşim probleminin aşamalar halinde analiz edilmesini sağlar. Böylece her bir aşama bağımsız olarak çözülebilir ve elde edilen sonuçlar entegre edilebilir. Buna yönelik problem tanımlı alt yapı yöntemlerinin çözümü için bir yaklaşım geliştirilmiştir. Bu yaklaşımda zemin kütlesi sürekli ve yapı ayırık modeller olarak kabul edilir.

1.4.2.1. Kinematik Etkileşim

Deprem etkisinde zeminlerde hem yatay hem düşey yönde yer değiştirmeler gerçekleşir. Zemin yüzeyinde olan veya bir miktar derine inen temel dinamik uyarımlara etkileşim etkisinde olmayacak kadar rijit ise temelin hareketi kinematik etkileşim olarak belirlenir. Şekil 17 (a)'da kütlesi radye temel olan temelin eğilme rijitliği, temelin açık arazi hareketinin yatay yönde değişen düşey bileşenine ayak uydurmasına engel olur. Şekil 17 (b)'de gömülü kütlesiz temelin rijitliği, temelin açık arazi hareketinin düşey yönde değişen yatay bileşenine ayak uydurmasına engeldir. Şekil 17 (c)'de bloğun eksenel rijitliği bağlantısız açık arazi hareketinin oluşumunu engeller. Kinematik etkileşim bu durumların her birindeki temelin hareketine tesir etmektedir. Ancak bu problemlerin hepsinde kinematik etkileşim söz konusu değildir. Şekil (a)'daki temelin yüzeyinin düşey olarak yayılan s dalgalarına (sadece yatay partikül hareketi) maruz kalması halinde zemin hareketi kısıtlanmaz; sonuçta da kinematik etkileşim oluşmaz. Kinematik etkileşim temel sistem rijitliğinin açık arazi hareketlerini engellediği durumlarda gelişmektedir (Kramer, 2003).

Kinematik etkileşim ayrıca yapılarda farklı titreşim modları oluşturabilmektedir. Şekil 17 (b)'deki gömülü temeli göz önüne alınız. Dalga boyu temel derinliğine eşit olan ve düşey yönde yayılan s dalgalarına maruz kaldığında temele net bir devrilme momenti uygulanabilir ve bunun sonucu olarak açık arazi hareketi tamamıyla ötelenmeli bile olsa temelin sallanmasına ve kaymasına neden olur. Farklı bir frekanstaki dalga boyu dönmeye izin vermeyen bir durum oluşturabilir. Yatay olarak yayılan bu dalgalar benzer bir şekilde temelin vurulması titreşimine neden olabilir (Kramer, 2003).



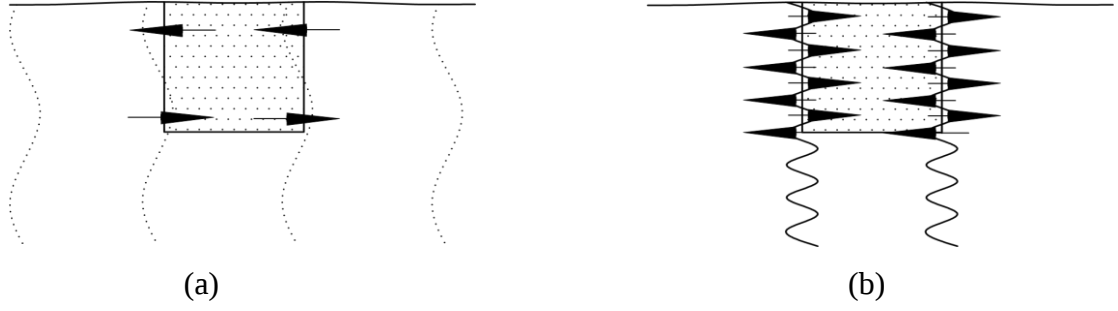
Şekil 17. Açık arazi hareketlerinin noktalı çizgilerle ifade edilen kinematik etkileşimi

(a) Yüzeydeki temelin fleksürel rijitliği o temelin açık arazi hareketinin düşey bileşenini takip etmesine engel olur, (b) blok temelin rijitliği o temelin açık arazi hareketinin yatay bileşenini takip etmesine engel olur, (c) yüzey temelinin aksenal rijitliği temelin hemen altındaki zeminin dağınık olarak deforme olmasını engeller.

Temelin rijit fakat kütlesi olduğu varsayılmak suretiyle sadece kinematik etkileşimden kaynaklanan deformasyonlar denklem (26) ya göre hesaplanmıştır (Kramer, 2003):

$$[M_{\text{zemin}}]\{\ddot{u}_{KI}\} + [K *]\{u_{KI}\} = -[M_{\text{zemin}}]\ddot{u}_b(t) \quad (26)$$

Burada M_{zemin} yapı ve temelin kütlesiz varsayıldığı durumdaki kütle matrisidir. Yukardaki eşitlik Şekil 18’de gösterilen problemi tanımlamaktadır. Eşitlik temel girdi hareketi olarak tanımlanan $\{u_{KI}\}$ için çözülür.



Şekil 18. Düşey olarak yayılan s dalgalarına göre gömülü bir temelin beşikleme titreşim şeklinde tepkisi

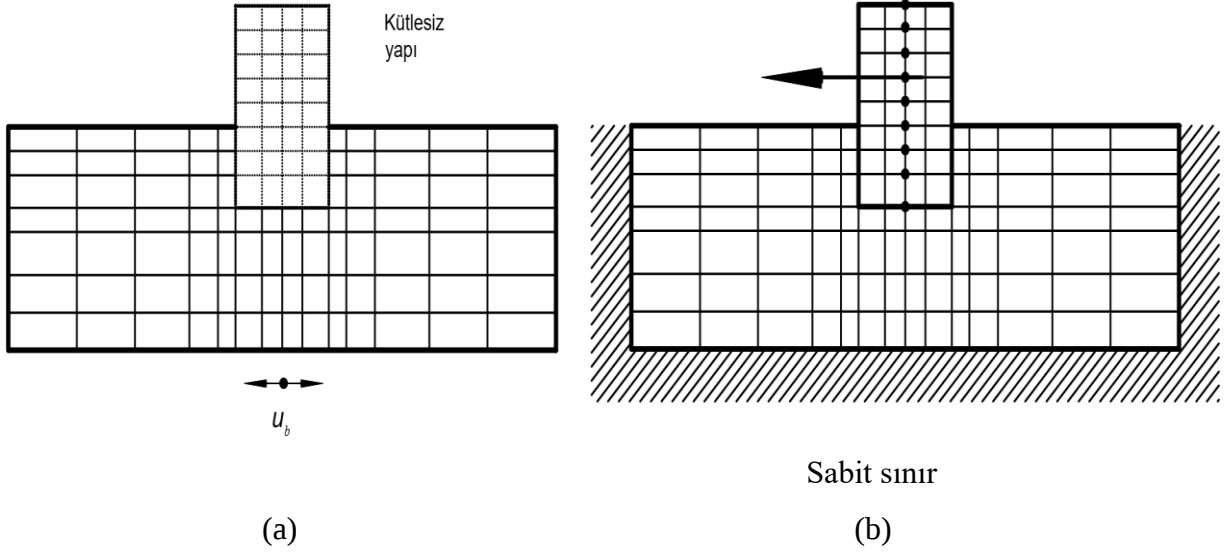
(a) Belirli frekanslarda dalga boyu dengersiz devrilme momentlerinde beşiklemeye neden olacak tarzdadır, (b) diğer frekanslarda (ve dalga boylarında) beşikleme bastırılabilir (Kramer, 2003).

1.4.2.2. Ataletsel Etkileşim

Yapının ve temelin bir kütlesi vardır ve bu kütle bunların dinamik olarak tepki vermelerine neden olur. Tabandaki zeminin uyumlu olması halinde temel ile zemine iletilen kuvvetler sabit tabanlı yapıda oluşmayan bir temel hareketi üretecektir. Sonuçta oluşan tepkide zemin uyumluluğunun etkileri ataletsel etkileşimden ileri gelmektedir. Ataletsel etkileşimden dolayı oluşan deformasyonlar (27) hareket denklemlerinden hesaplanabilir (Kramer, 2003) .

$$[M]\{\ddot{u}_{II}\} + [K *]\{u_{II}\} = -[M_{yapı}]\{\ddot{u}_{KI}(t) + \ddot{u}_{II}(t)\} \quad (27)$$

Burada M, zeminin kütesiz varsayıldığı durumdaki kütle matrisidir. Yukarıdaki eşitliğin sağ tarafının yapı temel sistemi üzerindeki atalet yükünü temsil etmektedir. Bu atalet yükü taban hareketine ve kinematik etkileşimin tesirlerini yansıtan temel girdi ve hareketine bağlıdır. Ataletsel etkileşim analizinde atalet yükü sadece yapıya uygulanır. Zeminin tabanı hareketsizdir. Yukarıdaki eşitlik Şekil 19'a karşılık gelir (Kramer, 2003).



Şekil 19. (a) Kinematik etkileşim analizi (b) Ataletsel etkileşim analizi.

1.5. Kazıklı Temeller

Ağır yapılarda, yumuşak ve yumuşağa yakın zeminlerde, kohezyonlu zeminlerde ve gevşek zeminlerde taşıma gücü düşüktür ve yüksek oturmalar mevcuttur. Bir yapı sığ temellerle ve bu koşullardaki zeminlere zemin taşıma gücü ve oturma problemlerinden dolayı taşıttırılmayabilir. Suyu doymun kohezyonsuz zeminler deprem gibi titreşimlerde sıvılaşmaya uğrar. Sıvılaşmaya uğrayan zeminin taşıma gücü sıfır olur. Sıvılaşmış zeminlerde yapılar zemine gömülür, yapısal hasar olmasa bile yapı göçmüş sayılır. Böyle zeminlerde yapılar radye temelli inşa edilemeyebilir. Bu durumda yapılması gerekenler; yapının yeri değiştirilebilir, temel zemini ıslahı yapılabilir, zemin iyi dereceli çakıllarla sıkıştırılabilir veya derin temel yapımı tercih edilebilir.

Derin temeller yapı yüklerini, derinlerdeki tabakalarına aktaran temellerdir. Başlıca türü kazıklı temellerdir. Kazıklı temeller; uzun silindirik veya prizmatik, ahşap, betonarme, çelik elemanlardır. Kazıklar ya hazır olarak zemine çakılırlar ya da çeşitli yollarla kaplanmış veya uzun silindirik boşluk oluşturarak betonarme oluşturulurlar.

Kazıklı temel yapımı akarsu vb. etkilerle temel çevresinde oyulma vb. olayların önlenmesinde de uygun olur. Yeraltı suyunun varlığı veya yüzeye yakın olması sığ temellerde inşaatı zorlaştırır. Suyun tahliyesi, yan yüzeylerin kaplanması vb. durumlar inşaat

için sıkıntılı durumlardır. Kazıklı temel inşası bunu gerektirmez. Ayrıca kazıklı temeller yanal yükleri karşılamada da (rıhtımlar, gemi bağlam yerleri ve depremler) çok etkindir.

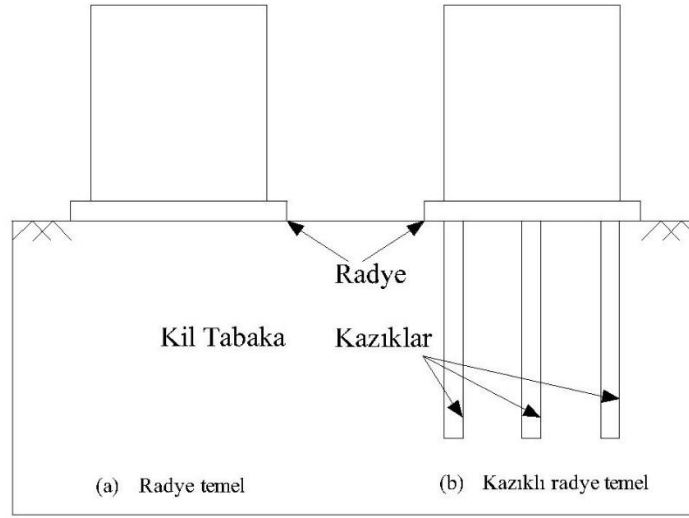
1.6. Kazıklı Radye Temeller

Radye temellerde yapı alanını kapsayacak şekilde temel imalatı yapılır. Radye temel deprem anında binanın ve temelin bir bütün olarak hareket etmesini sağlar. Kazıklı radye temel ise normal radyenin daha sağlam bir türüdür. Bu tür temellerde kazıklar temel seviyesinden daha derine yapılarak zeminle bağlantısı sağlanır. Böylece radye temel, zeminle bütünleşik şekilde deprem dayanıklılığını artırır. Kazıklar ve radyenin birlikte tasarlanması durumunda önemli dayanıklılık sağlanabileceğini göstermiştir (Toğrol ve Tan 2002).

Kazık başlığı tasarım olarak bir radyedir. Radye altındaki zeminin yumuşak kil veya gevşek kum olması halinde oturma kaynaklı zeminin radye ile temasını kesilebilmektedir. Bu nedenle hesapların kazık radye zemin etkileşimi ihmal edilerek yapılması normal görülebilir. Radyenin zemine etkin bir temas etmesi durumunda kazıklı temel üst yapı yükünü hem kazıklar hem de radye ile aktarır. Bu durumda kazıklı temel zemin etkileşim tasarımına yeni bir yaklaşım getirilmesi gerekmektedir. Bu yaklaşıma göre sisteme kazık radye sistemi denebilir (Birand, 2007).

Kazıklı radye sistemleri genellikle üst yapının kazıksız radye temel ile taşınabildiği ancak oturma miktarlarının fazla olduğu durumlarda ortaya çıkmıştır. Farklı oturmalar ise radyeyi zorlar. Bir kazık radye sistemi hem oturma miktarlarını azaltmak ve hem de radyedeki farklı oturmaları gidermek gibi iki belirli işlevi yerine getirir (Birand, 2007).

Radyede meydana gelebilecek eğilme momentlerinin ve kesme kuvvetlerinin en alt düzeye indirilmesi için kazık radye ile beraber çalışsa dahi rijit bir radye altındaki kazık gruplarında köşelerdeki kazıkların yüklerinin ortalama kazık yükünün çok üstüne çıkabileceği göz önüne alınmalıdır (Birand, 2007).



Şekil 20. Radye temel ve kazıklı radye temel

1.6.1. Kazıklı Radye Temellerin Hesap ve Tasarımı

Kazıklı radye temeller zemin taşıma gücü zayıf olan ve deprem riski yüksek olan bölgelerde kullanılır. Yapımı zor ve maliyetlidir Kazıklı radye temellerde yük zemine radye ve kazıklar aracılığıyla taşındığı için yük taşıma mekanizması karmaşıktır. Elastisite teorisine ve sonlu eleman metotlarıyla yapılan çalışmalara göre kazıklı radye temeller için düşey yük taşıma mekanizması pratik kullanım için yaygındır. Yatay yüklerde veya deprem süresince ise yük taşıma mekanizması çok sınırlıdır. Bunun sebebi kazıklı radyenin pratikte tasarımının radye olarak düşünülmesidir. Deprem boyunca radye kazık ve zemin arası dinamik etkileşiminden dolayı kazıklı radye temelin davranışı çokça karışık hale geldiği için tasarım prosedürü bu mekanizmanın etkisine uygun olmalıdır (Nakai, 2004).

Kazıklı radye tasarımında göz önünde bulundurulması gereken hususlar şu şekilde belirtilmiştir (Toğrol ve Tan, 2002):

1. Kazıklı radyenin yük oturma davranışı
2. Kazıklar ve radyenin yükü paylaşım oranı
3. Radye altındaki yerine göre kazıklara gelen yükler
4. Sistemin iç kuvvetler ve moment değerleri

Poulos (2001) tarafından kazıklı radyelerin hesap ve tasarımı için geliştirilen yönteme göre kazıklı radyenin rijitliği K_{pr} , kazık grubunun rijitliği K_p radyenin rijitliği K_r kazık ile radye arasındaki etkileşim faktörü α_{cp} 'ye bağlı olarak yazabiliriz.

$$K_{pr} = \frac{K_p + K_r (1 - \alpha_{cp})}{1 - \alpha_{cp}^2 K_r / K_p} \quad (28)$$

Radyenin rijitliği elastisite teorisi ile hesaplanır. Tek kazığın rijitliği elastisite teorisi ile hesaplanıp grup rijitlik azaltması sayısı ile çarparak kazık grubunun rijitliği bulunur.

Radye tarafından taşınan yükün (Q_r), toplam yüke (Q_t) oranı (29) denklemi ile hesaplanır.

$$\frac{Q_r}{Q_t} = \frac{K_r (1 - \alpha_{cp})}{(K_p + K_r (1 - \alpha_{cp}))} = X \quad (29)$$

Radye kazık etkileşim faktörü

$$\alpha_{cp} = 1 - \ln\left(\frac{r_c}{r_0}\right) / \xi \quad (30)$$

olarak yazılabilir. Burada r_c kazık başlığının ortalama yarıçapı r_0 kazığın yarıçapını göstermektedir.

$$\zeta = \ln\left(\frac{r_c}{r_0}\right) \quad (31)$$

$$r_m = 0.25 + \xi [2.5 \rho (1 - v_s) - 0.25]L \quad (32)$$

olarak hesaplanır. (32) ifadesinde

$$\xi = \frac{E_{sl}}{E_{sb}}, \quad (33)$$

$$\rho = \frac{\bar{E}_s}{E_{sl}} \quad (34)$$

v_s : Zeminin poisson oranı

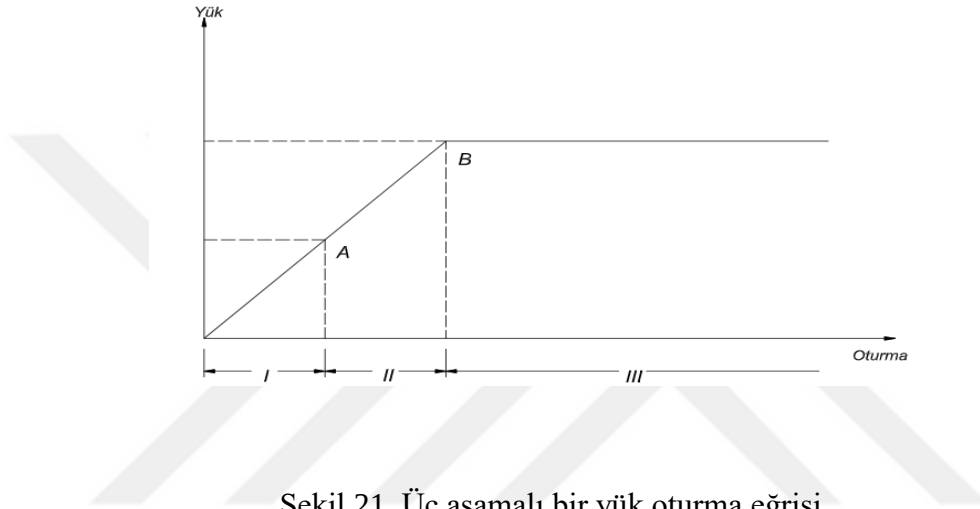
L : Kazık boyu

E_{sl} : Kazığın ucu seviyesindeki zeminin elastisite modülü

E_{sb} : Kazığın altındaki taşıyıcı zeminin elastisite modülü

$\bar{E}_s$: Kazık boyunca zeminin ortalama elastisite modülüdür.

Bu yöntem ile üç aşamalı bir yük oturma eğrisi elde edilir.



Şekil 21. Üç aşamalı bir yük oturma eğrisi

Bu şekilde yükün radye tarafından (I), radye ve kazık tarafından (II), kazık tarafından (III) taşındığı halleri görülmektedir.

Kazıklı radyenin rijitliği (28) denkleminde hesaplanabilir. Kazık grubunun nihai taşıma gücü Q_u olduğuna göre kazıkların nihai taşıma gücünün uyanacağı (mobilize olacağı) Q_1 yükü,

$$Q_1 = Q_u (1 - X) \quad (35)$$

olarak hesaplanır. Bu noktadan sonra temel sisteminin rijitliği sadece radyenin rijitliğine (K_r) bağlıdır ve bu durum kazıklı radye sisteminin nihai yüküne ulaşılan kadar devam eder.

Kazıklı radyelerin hesaplanması için çeşitli yöntemler önerilmiştir. Yaylı sistemlerin temeli, çeşitli elemanlarla arasında etkileşime izin vermediği için tavsiye edilmemiştir. Radyenin şeritler ile hesaplanmasına dayanan analitik yöntemlerin hatalı sonuçlar verdiği ve dikkate alınan zeminin kalınlığının momentleri büyük ölçüde etkilemediği sonucuna varılır.

Bununla birlikte oturmalar üzerinde de etkili değildir. Kazıklı radye temelin üstündeki yapının rijitliği, radyenin rijitliğinin artmasına yol açmakta, bu yüzden farklı oturmalarla sınırlı kaldığı da ifade edilmiştir (Toğrol ve Tan, 2002).

1.6.2. Bağlantılı Kazıklı Radye Temeller

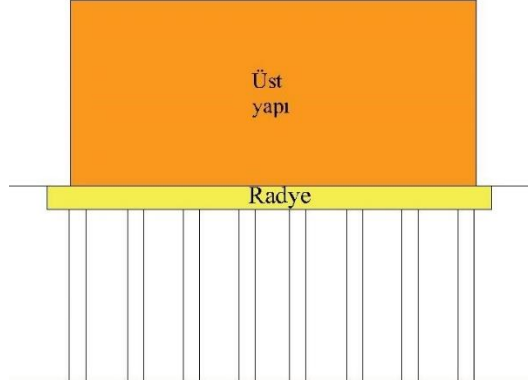
Geleneksel kazıklı radye temel tasarımında kazıklar radyelerle bağlantılıdır ve yeterli derinlikte zemine kadar uzanır. Kazıklar, radye oturmalarını azaltmakta etkili iken radyenin tasarımını etkileyecek olan önemli kayma gerilmeleri ve eğilme momentlerine sebep olur (Ata, Badrawi, Nabil, 2014).

Bağlantılı kazıklı radye temellerde kazıklar, radye ve zemin olmak üzere üç yük taşıma elementi bulunur. Göreceli rijitliğe göre, radye toplam yükü yapıdan zeminin en üstüne bağlı kazıklara aktarır. Klasik kazık temel tasarımında bütün yüklerin kazıklar tarafından desteklendiği varsayılır. Kazıklı radye temellerde radyenin dağılımı bütün sistemin elverişliliği ve maksimum taşıma kapasitesi hesaba katılarak yapılır (Ata, Badrawi, Nabil, 2014).

Yapılan çalışmalar kazık kullanımının radye oturmalarını azalttığı sonucuna vararak yapıda her kolonun altına kazık yerleştirilmesini önermiştir. Sonlu elemanlar metodu kullanılarak yapılan bir çalışmaya göre kazıklı radye sistemdeki kazıkların yük dağılımı kazık rijitliği, radye rijitliği ve kazığın uzunluğunun genişliğe oranına bağlıdır. Kazık uzunluğu arttıkça kazık rijitliğinin azaldığı ve yük dağılımının daha üniform olduğu gözlemlenmiştir. Sonlu elemanlara dayanan başka bir çalışmada kazıklar arasındaki yük dağılımının zemin tabakasının rijitliği ve kalınlığından etkilendiği belirlenmiştir. Zemin tabakası daha kalın olduğunda kazıklar tarafından taşınan yük dağılımının arttığı gözlemlenmiştir. Kazıklı radye sistemde radye zemin ara yüzü ile doğrusal olmayan yük oturmaları arasındaki tek yönlü bir teması inceleyen bir numerik yöntemle göre yapılan çalışmada, kazıklar oturma azaltıcı ve maksimum yük taşıma kapasitelerine ulaşabilmiş olarak davrandığı için yük dağılımının doğrusal olmadığı varsayılması gerektiği belirtilmiştir (Ata, Badrawi, Nabil, 2014).

Radye ve kazıklar arasındaki oturma ve yük dağılımı kazıklı radye temel tasarımını belirleyen ana faktörlerdir. Kazık başlığı üniform olmayan düşey yüklerle yüklendiğinde eğer başlık kalınlığı kazık çapından daha az olursa yük ana olarak yüklü alanın çevresindeki

kazıklar tarafından taşınır. Eğer başlık kalınlığı kazık çapından daha büyükse yükün tipinin taşıma bölgesindeki kazık dağılımına etkisi olmaz (Ata, Badrawi, Nabil, 2014).



Şekil 22. Bağlantılı kazıklı radye temel

1.6.3. Bağlantısız Kazıklı Radye Temeller

Kazıklı radye temeller uygulanırken kazıkların radyeyle bağlantılı olduğu klasik yöntem yaygın olarak kullanılmaktadır. Son yıllarda yapılan bazı çalışmalar ve uygulamalar; kazık ile radye bağlantısının granüler malzemeden oluşan yastık olarak adlandırılan ara elemanla kesildiğinde yapı davranışında, yapı zemin etkileşiminde ve maliyet olarak bir takım değişiklikler olduğunu göstermiştir.

Kazıklı radye temeller için geliştirilen Poulos analiz yöntemine göre kazık kullanımının temellerin maksimum taşıma kapasitesini ve oturma davranışlarını geliştirdiği görülmüştür. Sıkıştırılmış kil zeminde kazıklı radye temeller sonlu eleman metodu olarak modellenir. Kazık-radye etkileşimi yükün ve oturmaların artmasıyla yüzey sürtünmelerinin artmasına sebep olur. Sonlu eleman modelleri üzerinde yapılan analizler göstermiştir ki kazık başlığının bağlantılı olduğu koşulda yapının tepkisi temel tipiyle kıyaslandığında çok daha küçüktür. Aynı zamanda kazıkların taşıma kapasitelerinin radye ile kazığın bağlantılı olmadığı durumda dahi etkilenmediği görülmüştür. Yani kazıkların radye ile bağlantılı olmadığı durumda bile dinamik yapı zemin etkileşimine önemli katkısı olduğu sonucuna varılmıştır (Ata, Badrawi, Nabil, 2014) .

Kazık ve radyelerdeki yüksek gerilme problemlerinin üstesinden gelmek için başka bir uygulama yöntemi olarak kazıkların bağlantısının radyelerden kesilmesi ve bu kazıkların

yapının bir elemanı olmaktan ziyade zemin güçlendirme elemanı olarak davranmalarını istenmiştir. Bu yüzden radye ve bağlantısız kazıklar arasına yastık dolgu malzemesi yerleştirilmesi önerilmiştir. Bu malzemenin kum çakıl karışımı bir malzeme olması gerektiğini belirtmiştir. Yapılan çalışmalar bu dolgununun zeminin taşıma kapasitesinin değişmesinde ve kazıkların yük taşıma mekanizmasının değişmesinde önemli bir rol oynadığını göstermiştir (Zhu, 2017).

Klasik kazıklı radye tasarımında kazıklar oturmaları azaltmak için kullanıldığı zaman taşıma kapasitelerini tam kullanırken, kazık sayılarını minimize edilerek ekonomik bir temel elde etmek mümkündür. Kazıklı radye temelde kazık başlığında yüksek eğilme momentleri ve eksenel yük gerilmeleri oluşur. Aktif sismik bölgelerde eğer kazıklar yapısal olarak radye ile bağlantılı ise kazık başlığında periyodik ve dinamik yanal yüklerden dolayı yüksek yatay kesme kuvvetleri ve eğilme momentleri oluşabilir. Bir kazıklı radye temel sisteminin üst yapı ve temel zemini arasında iletilen moment ve kesme kuvvetlerini sınırlandıran agregat yatak içermesi durumunda, kazıkların yük taşıma kapasitesi geoteknik kapasitelerinden ziyade yapısal kapasiteleri tarafından yönetilir. Ayrıca, yastık adı verilen sıkıştırılmış agregadan oluşan bir tabakayla kazık ve radyenin bağlantısı kesildiğinde kazık ve radyenin arasındaki kısıtlama reaksiyonları da azalır. Yastık direkt olarak üst yapıdan kazıklara gelen yükü engeller. Bu durumda kazıkların fonksiyonu doğal yapı elemanları olmak yerine zemin destekleyici olur.

Bağlantısız kazıklı radye temel, kazıkların radyeyle bağlantısı olmadığı için normal kazıklı radyeden farklıdır. Araştırmacılar tarafından yapılan numerik analizlere göre, kum çakıl malzemedan yapılan yastık tabaka alt zeminin taşıma kapasitesinin değişmesinde ve kazıkların yük taşıma mekanizmasının değişmesinde önemli rol oynamaktadır. Yapılan bir elasto-plastik analize göre kazık boyunca maksimum eksenel gerilme, yastığın kalınlık ve rijitliğine bağlı olarak farkı derinliklerde oluşur. Yapılan üç boyutlu sonlu bir analiz, yastık kalınlığı arttıkça genel oturmanın ve rijitliğinin azalacağını göstermiştir.

Bağlantısız kazıklı radye davranışı model deneyleri uygulanarak da araştırılmıştır. Yapılan bir santrifüj testine göre bağlantısız kazıklı radye temel dinamik yapı zemin etkileşimine önemli katkı sağlamıştır. Radyeden ayrılmış ve boşluğun yastık malzemeyle doldurulduğu bağlantısız kazıklı radye temel modelinde kazıkların yüksek gerilme problemlerinin üstesinden geldiği görülmüştür.

Granül yastığın etkisini araştırmak üzere yapılan deneysel çalışmalara göre, radye ve kazık başları arasına deforme olabilen bir yastığın yerleştirilmesi, boşluğun üst kısmında

negatif yüzey sürtünmesi oluşturan zemin kazık yapısının aşağı doğru göreceli yer değiştirmesine izin verir. Böyle bir mekanizma temelde araya koyulan yastığın kalınlığı ve rijitliği tarafından yönetilir. Bağlantısız kazıklı radye temel sistemde kazıklar zeminin düşey destekleyicisi olarak davranır ve mekanik özellikleri yeni bir kompozit ve daha sert malzemeden oluşturularak geliştirilir (Zhao, 2021).

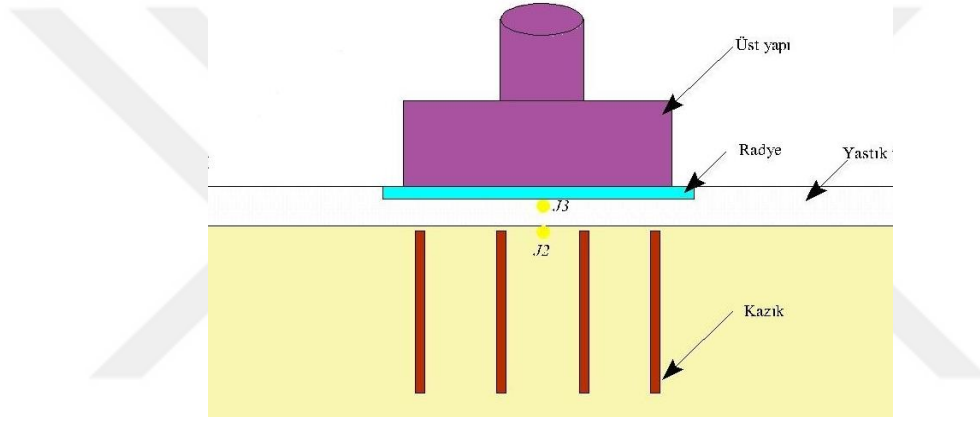
Sismik izolasyon ve taşıma kapasitesini arttırmak için rijit kazık kompozit temellerde bazı teknolojiler geliştirilmiştir. Rijit kazık kompozit temel, kazık ve belli kalınlıkta kum çakıl yastık tabaka içeren yapay bir temeldir. Kazıklar zemin tabakasına etkili bir dayanıklılık sağlar ve kazıklar arasındaki zemin ve kazıklar eş zamanlı olarak yük taşır. Kum yastık sismik dalgalardan yapıya taşınan sismik enerjiyi absorbe eder ve dağıtır ve bu da rezonansı önler, sismik izolasyon sağlar ve titreşimi azaltır.

Kazık ve radye arasındaki yastığın yukarı doğru yayılan sismik kuvvetleri dağıttığı ve yer hareketinin yoğunluğu ile yastığın titreşim azaltıcı etkisini arttırdığı keşfedilmiştir. Yastığın kompozit kazıklı radye temellerde kayma ve eksenel gerilme üzerindeki etkisini araştıran bir araştırmada, yastığın kazık başlığının maksimum gerilmesini azalttığı görülmüştür. Agregada yastıkta kum yastığa göre daha büyük yer değiştirmeler olduğu deneyimlenmiştir. Fakat sismik enerji emilimi ve dağılımında agregada yastık kum yastıktan daha iyi performans göstermiştir. Bununla birlikte agregada yastık daha iyi izolasyon etkisine etkisine sahiptir ve temelin rezonans frekansının daha hızlı azalmasını sağlar.

Kalın yastık ince yastıktan daha iyi performans gösterir. Sismik izolasyon etkisini geliştirmek için kalın tek boyutta birleştirilmiş kum yastıkları kullanılmalıdır. Fakat bu yastıklar sismik kuvvetler altında zemin sıvılaşmasına karşı hassastır. Yeterli sismik izolasyon etkisinden dolayı granül yastığın sismik izolasyon ve enerji dağılımı için nükleer tesis temellerinde kullanılması uygundur. Yastıklar nükleer santrallerin temellerini sağlamlaştırmanın temel yolu olarak benimsenmiştir.

Agregada kalınlığı ile sismik izolasyon performansının doğru orantılı olduğu keşfedilmiştir. Kalınlık oranı 0,2-0,3 olan granül yastık ivmeyi %10-15 azaltır. Ayırık eleman metodu kullanılarak farklı kalınlıktaki agregada yastıklarının farklı temel taban basınçlarında üst yapı üzerindeki sismik izolasyon etkisi karşılaştırmalı olarak araştırılmıştır. Granül yastıkların üst yapının sismik cevabını azaltmada etkili olduğu ve yastık kalınlığı arttıkça sismik izolasyonun arttığı fakat taban basıncı arttıkça sismik izolasyonun azaldığı keşfedilmiştir.

Agrega yastığının kazıklı temellerin sismik izolasyon etkisi üzerindeki etkisini ölçmek için farklı malzemelerden yapılmış yastıklar üzerinde bir dizi yatay kesme testi uygulanmıştır. Yastıkların enerji dağılım kapasitesinin malzemenin iç sürtünme açısıyla daha az ilişkili olduğu fakat düşey yüklemeden önemli derece etkilendiği sonucuna varılmıştır. Bir kayma yer değiştirmesi için, agrega yastığının enerji dağılım kapasitesi, üstyapıda yukarı doğru iletilen artan kesme kuvvetinin eşlik ettiği düşey yükle birlikte artmıştır. Rijit kazıklı kompozit temellerin sismik izolasyon etkisini araştırmak için sarsma masası testleri yapılmış ve bir agrega yastığının iyi sismik izolasyon etkisine sahip olduğu keşfedilmiştir.



Şekil 23. Bağlantısız kazıklı radye temel

1.7. Kazıklı Radye Temelerde Yapı Zemin Etkileşimi

Yapı zemin etkileşimi deprem etkisi altında zemin ortamı ve üst yapının etkileşim durumudur. Zeminden temele ulaşan deprem dalgaları kısmen temelden yansıyarak zemine geri dönmekte, bir kısmı da üst yapıda titreşimlere sebep olarak zemine geri dönmektedir (Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği Ek 16C, 2018).

Temel sığ temel ise; yumuşak zeminlerde dinamik yapı zemin etkileşimi genellikle binayı olumlu etkiler ve zeminden binaya geçen dalgaların deprem yüklerini azaltır. Güvenli tarafta kalmak için sığ temelli binalarda yapı zemin etkileşimi ihmal edilebilir.

Yumuşak zeminlerde kazıklı binalarda ise yapı-kazık-zemin etkileşimi özellikle kazıkların deprem davranışını etkiler. Deprem yer hareketinin etkisi altında kazıklar önemli

şekil değiştirmelere ve zorlanmalara maruz kalır. Kazıklar ise karşılık olarak temeldeki etkin temel hareketini değişikliğe uğratabilir. Üst yapının eylemsizlik özelliğinin göz önüne alınmadığı temel-kazık-zemin sistemindeki bu oluşuma kinematik etkileşim denir. Zayıf zeminlerde üst yapıdan kazık zemin ortamına dönen deprem dalgalarından dolayı kazıklar ek zorlanmalar gerçekleştirebilir. Bu durumda zayıf zeminlerde temeli kazıklı binalarda yapı-kazık-zemin etkileşimi göz önünde bulundurulmalıdır.

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği Ek 16C'ye göre temeli kazıklı binalarda yapılacak kinematik etkileşim ve ataletsel etkileşim analizleri verilen tabloya göre üç yöntem ile ele alınır. Belirtilen her bir yöntemde belirtilen parametreler için kinematik etkileşim, ataletsel etkileşimi ve ortak sistem yaklaşımı ile ayrı ayrı analiz yapılır.

Tablo 3. TBDY 2018 – Kazık temelli binalarda yapı zemin etkileşim analiz yöntemi parametreleri

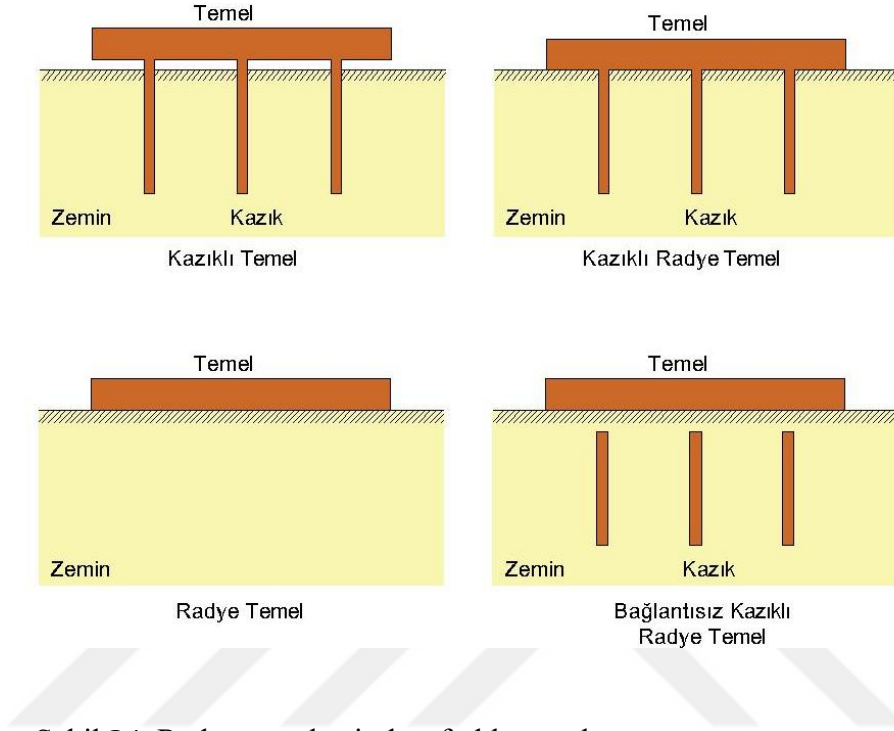
Analiz Yöntemi	Deprem Tasarım Sınıfı	Bina Sınıfı	Yükseklik	Yerel Zemin Sınıfı
Yöntem I	DTS = 1, 1a, 2, 2a	BYS = 1		ZD, ZE, ZF
Yöntem II	DTS = 1a, 2a	BYS = 2, 3		ZD, ZE, ZF
	DTS = 3, 3a, 4, 4a	BYS = 1		
Yöntem III	DTS = 1a, 2a	BYS $\geq$ 4		ZD, ZE, ZF
	DTS = 1, 2, 3, 3a	BYS $\geq$ 2		

Radye temellere kazık eklenmesi durumunda, temel kaymaları artar, devrilme momentlerinde az da olsa artış olur ve maksimum ivmeler azalır. Maksimum kayma gerilmeleri devrilme momentleri ve maksimum ivmeler üzerine yapılan bazı analizlere göre kazıklı radyelerin kazıklı temellere göre temel kaymaları %5, devrilme momentleri %12 ve ivmeleri %20 daha küçüktür, bu kazıklı radyelerin kazıklı temellerden daha çok yapı zemin etkileşimi içinde olmasından kaynaklanır.

Eğer kazıklar radye ile bağlantılı değilse dinamik cevabı bağlantılı duruma göre biraz daha fazla olur. Bu cevaplar maksimum ivmelenme hariç radye temellerden de fazladır maksimum ivmelenme bağlantısız durumda radye temellerden daha küçüktür.

Yapının dinamik cevabı radye ve zemin arasında bağlantı olduğunda önemli oranda azalır. Kazık başlığıyla bağlantılı olduğu durum koşullarının bir üst yapının tepki özellikleri üzerindeki etkisi, temelin türüne kıyasla çok küçüktür. Fakat bağlantı koşulu bu kazıkların

taşıma kapasitesini etkiler. Radyenin altındaki zemine yerleştirilen kazıkların üst yapının tepki özelliklerine önemli etkisi vardır. Sonuç olarak kazıkların sismik tasarım için bile zemin iyileştirme olarak kullanılmasının önemli olduğu anlaşılmaktadır (Phuyal, 2020).



Şekil 24. Radye teme ele ait dört farklı uygulama

Yapılan testler sonucu yukarıda verilen dört durum kıyaslandığında, radye ve zemin arasında bağlantı olduğunda yapının tepkisinin önemli derecede azaldığı görülmüştür. Bağlantısız kazıklı radye temel durumunda radyelerin çok daha fazla yük taşıdığı belirtilmiştir. Bu yapıya gelen yükün azalacağı anlamına gelir.

1.8. Literatür Araştırması

1.8.1. Yapı Zemin Etkileşimi ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Figuerola (2010), bu çalışmada mevcut bir yapı sisteminin yapı zemin etkileşimi dikkate alınarak, ilave betonarme perde kullanılarak güçlendirme durumundaki performans değerlendirmesini yapmıştır. Radye temel sonlu eleman olarak modellenmiştir. Elastik Winkler zemin tipi kullanılmıştır. Doğrusal olmayan itme analizleri ve performans

değerlendirmeleri için SAP2000 programı kullanılmıştır. Türk Deprem Yönetmeliğinde (2007) tanımlanan farklı zemin türleri dikkate alınmıştır. Güçlendirmenin perde ile yapıldığı durumda, radye temel kalın levha sonlu eleman olarak modellenmiştir. Uygulanan farklı güçlendirme yöntemlerinin birbiriyle karşılaştırılması için hasar değerlendirmeleri yapılmıştır.

Bahçecioğlu (2011), bu çalışmada yapı zemin etkileşim problemlerinin çözümü için paralel dinamik sonlu elemanlar yönteminin geliştirilmesi ve uygulanmasını hedeflemiştir. Bu amaçla öncelikle, sonlu elemanlar analizi kütüphanesi oluşturulmuştur. Daha sonra bu kütüphaneye paralel dinamik çözüm yöntemini uygulayan algoritmalar eklenmiştir. Paralel dinamik çözüm algoritması örtük Newmark integral algoritması üzerine kuruludur. Bu algoritma MPI (Message Passing Interface) kullanılarak paralel hale getirilmiştir. Toprak malzemesinin sayısal modellenmesi için doğrusala eşdeğer malzeme modeli kullanılmıştır. Uygulanan doğrusala eşdeğer malzeme modelinin ilave doğrulama testleri EduShake programı ile yapılan karşılaştırmalarla gösterilmiştir. Çeşitli testler yapılarak uygulanan algoritmalar değerlendirilmiş ve paralel performansı gösterilmiştir.

Erdoğan (2012), yaptığı çalışmada yapı zemin etkileşiminin ön yüzü beton kaplı kaya dolgulu barajların tasarımına etkisini araştırmak için kullanılan sonlu eleman modelinin değerlendirmesini yapmıştır.

Akkaya (2013), bu çalışmada farklı zemin ve yapı rijitlikleri için çok açıklıklı köprülerin sismik yükler altında incelenmesini ve zemin-yapı etkileşimi altında köprü davranışını incelenmesini yapmıştır. Bu çalışmada temel LARSA yazılımı ile üç farklı sonlu eleman modeliyle tasarlanmış ve değerlendirilmiştir.

Akgül (2014), bu çalışmada ilk olarak doğrusal olmayan sıvı-yapı-zemin etkileşimi modelleme teknikleri incelemiştir. Ardından silindirik tankların dinamik davranışlarının değerlendirilmesi için nümerik modeller oluşturmuştur. Tank-sıvı-zemin etkileşim modellerinde 3 farklı zemin tipi ve 3 farklı deprem yer hareketi kullanılmıştır. Sonuç olarak bu çalışmada sıvı-yapı-zemin etkileşimi için kullanılan nümerik yöntem ve doğrusal olmayan davranışın tank sistemine etkisi incelenmiştir.

Kılıçer (2016), bu çalışmada yapı-zemin etkileşiminin betonarme yapıların tasarımına etkisi, Geliştirilmiş Vlasov modeli kullanılarak incelemiştir. Bu amaçla SAP2000 paket programı ile MATLAB'te kodlanan yazılımın eş zamanlı kullanıldığı bir çözüm tekniği geliştirilmiştir. Bu amaçla SAP2000 paket programında geliştirilmiş Vlasov modeli kullanılarak incelemiştir. Bir radye temel örneği üzerinden zemin modellerinin, zemin

özelliklerinin, deprem bölgesinin ve kat sayısının sonuçlar üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Elde edilen yapı doğal titreşim periyotları, kolon eksenel kuvvetleri, kolon eğilme momentleri ve kolonların boyuna donatı oranları her bir zemin modeli için karşılaştırılmıştır. Yapıla çalışma yapı-zemin etkileşiminin betonarme yapıların tasarımına etkisinin ihmal edilemeyecek düzeyde olduğunu göstermiştir.

Faizan (2017), bu çalışmada Türkiye'deki hızlı tren güzergâhlarında inşa edilen demiryolu köprülerinin farklı zemin ve farklı deprem etkileri altındaki dinamik davranışlarını incelemiştir. Yapı-zemin modelinin zaman tanım alanındaki dinamik analizleri için sonlu elemanlar yöntemine dayalı PLAXIS 2D bilgisayar yazılımı kullanılmıştır.

Ergün(2018), bu çalışmada kara tipi bir rüzgâr türbininin yapı zemin etkileşim davranışını Continuum Model, Global Spring Model ve API Spring Model Sonlu eleman modellerinde ANSYS programı aracılığıyla ayrı ayrı incelemiştir.

Sarıkaya (2018), yapmış olduğu çalışmada olası bir deprem durumunda tünel, yapı ve zemin etkileşiminin zemin büyütmesine olan etkilerini incelemiştir. Bu çalışma sırasında tünel-yapı-zemin etkileşimleri adı altında PLAXIS 2D programında nümerik analizler yapılmıştır. Analizlerin birinci bölümünde tünel ve yapının zemin büyütmesine etkisini tam olarak anlamak amacıyla analizlerde tünel, yapı ve zeminin olduğu, sadece tünel ve zeminin ve sadece yapı ve zeminin olduğu üç farklı durumda analizler tekrarlanmıştır. Analizlerin ikinci bölümünde ise yüzeydeki ivme dağılım alanlarını görmek amacıyla analizlere sadece zeminin olduğu durum eklenerek dört farklı durum için analizler yapılmıştır.

Özşam (2019), bu çalışmada ETABS programını kullanılarak deprem yükleri yapı-zemin etkileşimli ve etkileşimsiz 2 boyutlu çok katlı çelik çerçeveler için doğrusal ve doğrusal olmayan zaman adım analizi yapmıştır.

Xie, Chi, Wang (2020), bu çalışmada yapı sistemlerin maliyetini azaltmak ve performansını geliştirmek için kazıklı radye temel tasarımında değişken rijitlik tasarımının etkisini incelemişlerdir. Bu sayısal olarak araştırmada çok katmanlı bir zemine oturan nükleer bir tesisi incelemişlerdir. Yüksek deprem riski olan bölgelerde zemin kazık yapı sisteminin dinamik özelliklerinin deprem anındaki zemin kazık yapı etkileşiminden dolayı değiştiği sonucuna varılmıştır.

Özel (2019), bu çalışmada SAP2000'de modellenen tarihi bir yığma köprünün yakın ve uzak fay depremleri etkisinde 3D sonlu elemanlar yapı zemin etkileşimi modeli ile mikrotremor ölçülerinin karşılaştırmasını yapmıştır.

Al-Dayyeni (2019), bu çalışmada iki farklı çözüm yöntemiyle SAP2000’de modellenen betonarme bir çerçevenin yapı zemin etkileşim davranışını incelemiştir.

İnci (2019), bu çalışmada köprüler için yapı zemin etkileşim davranışlarını doğrudan ve alt sistem yaklaşımı olarak iki farklı yöntemde analiz etmiştir. Alt sistem yaklaşımında kinematik ve eylemsizlik etkileşimlerini ayrı ayrı değerlendirmiştir.

Sarı (2020), yapmış olduğu bu çalışmada sanayi bacalarının dinamik davranışına yapı zemin etkileşim etkisini incelemiştir. Seçilen sanayi bacasını farklı zemin tipleri üzerindeki davranışı ANSYS sonlu eleman programıyla sayısal olarak incelenmiştir.

Ahmadi (2020), bu çalışmada, temel altındaki zeminin geoteknik koşullarının, 3-boyutlu çerçeve tipi betonarme yapıların sismik performansına etkisini incelenmiştir. Yapı-zemin etkileşimi alt sistem yaklaşımı kullanılarak modellenmiştir. Yapıların performans durumları SAP2000 paket programı yardımı ile gerçekleştirilmiştir.

Forcellini (2021), bu çalışmada kazık temellerin yapı zemin etkileşimiyle analitik kırılgenlik eğrilerini incelemiştir. Çalışmada, sünekliğe dayalı üç sınır durumu kullanılarak kırılgenlik eğrilerinin olasılık temelli yaklaşımı uygulanmıştır. Doğrusal olmayan dinamik analizler, farklı deforme olabilirliğe sahip üç kohezyonsuz zemin üzerine kurulmuş üç yığın konfigürasyonu potansiyellerini değerlendirmek için OPENSEES PL ile gerçekleştirildi.

1.8.2. Kazıklı Radye Temellerle İlgili Yapılan Çalışmalar

Ata, Badrawi, Nabil (2014), bu çalışmada kazık ve radye arasında granül malzeme koyarak kazık ve radye zemin etkileşimini incelemiştir. Bu çalışmanın ana amacı çeşitli geometri ve ölçülerde bağlantısız radyenin performansını incelemek. Bu parametreler yastık kalınlığını, özelliğini ve kazık sayısını, kazık çapını, uzunluğunu ve radye kalınlığını içerir.

Söylemez (2015), bu çalışmada geleneksel kazıklı radye temellerin statik ve dinamik analizi iki farklı yaklaşımla yapmıştır. Bu çalışmayı sonlu elemanlar metodu ile PLAXİS 3D programında yapmıştır.

Alver (2015), bu çalışmada oturma esaslı tasarım yaklaşımlarını kullanarak kazıklı radye temellerin tasarım ilkelerini araştırmıştır. Oturmalar Randolph yöntemi ve PLAXİS 3D ile sonlu elemanlar kullanılarak hesaplanmıştır.

Mahmood, Al-Wakel, Abdulwahhab (2017), bu çalışmada kazıklı radye temellerin üç boyutlu analizinin düşey titreşimlere dinamik cevabını araştırmışlardır. Kazıklı radye temel PLAXİS 3D programı aracılığıyla modellenmiştir. Zemin modeli Mohr-Coulomb seçilirken,

yapı malzemesi lineer elastik kabul edilmiştir. Sonuçlar göstermiştir ki, zemine gömülü kazık başlığının kalınlığının artması maksimum yer değiştirme genliğini azaltır. Dahası, temel ve sınırlar arasındaki mesafenin artması ve zemin yoğunluğunu artması temelin dinamik cevabını önemli derece minimize etmektedir.

Zhu (2017), bu çalışmada bağlantısız kazıklı radyelerin yük dağılımı analizini ve kullanılan yastık elemanın başarısızlığını incelemiştir. Yastığın basit bir hata modunun, görüntülerdeki pikselleri takip eden ve bir yer değiştirme alanı üreten dijital görüntü korelasyon yöntemi kullanılarak elde edilen yastık kayma düzlemi olduğu ileri sürülmüştür.

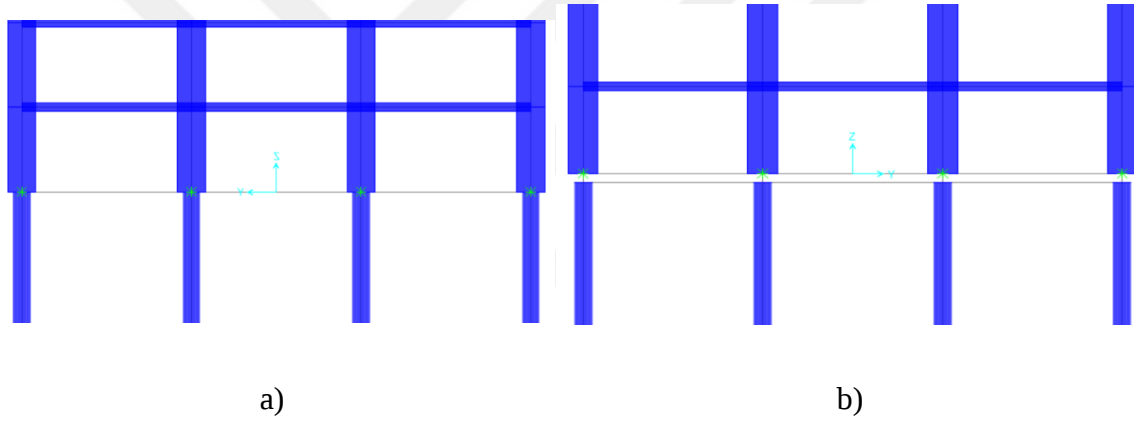
Popa, Muşat (2018), bu çalışmada rijit kaplamalarla desteklenmiş bir radye temelin taşıma kapasitesini, oturma kontrol etkinliğini ve ekonomik olarak kazık temellere bir alternatif olabileceğini araştırmışlardır. Bu çalışmada rijit radye temel üç boyutlu sonlu eleman olarak PLAXİS 3D programı kullanılarak modellenmiştir.

Xie, Chi (2019), bu çalışmada kazıklı radye temellerdeki farklı oturumları azaltmak için kazık etkileşimi temeline dayanan, kazık grupları arasındaki etkileşimi basite indirgeyen etkileşim faktörünü inceleyen bir optimizasyon modeli geliştirmişlerdir. Bu çalışma için kazıklı radye temel doğrusal olmayan elastik zemin ortamında ANSYS programı kullanılarak modellenmiştir. Çalışmalar sonucunda yapılan optimizasyonlarla radyedeki oturma farklılıklarının yaklaşık %80 azaldığı görülmüştür.

Phuyal (2020), bu çalışmada zayıf bir zeminde bulunan rüzgar tribününe ait bir kazıklı radye temelde zemin iyileştirme etkinliğinin analitik ve sonlu elemanlar analizleriyle ayrı ayrı değerlendirmesini yapmış ve bu analizleri karşılaştırmıştır. Zemin ve kazıklı radye temel ABAQUS programında modellenmiştir ve analizler bu program üzerinden yapılmıştır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu tez kapsamında çok katlı betonarme üst yapıya ait kazıklı radye temelin, iki farklı uygulamasının deprem yükü altında yapı zemin etkileşim modeli üzerinde dinamik karakteristiklerinde meydana gelen değişimler ile yapısal davranışlarının belirlenmesinin karşılaştırılması olarak incelenmesi amaçlanmıştır. Karşılaştırılması amaçlanan iki farklı uygulamada, sistemlerde biri üst yapı, radye temel ve kazıklardan oluşurken diğer sistemde kazık ile radye arasında yastık adı verilen sıkıştırılmış granüler malzemeden oluşan bir tabaka bulunmaktadır. Bu tabaka ile kazık radye bağlantısı kesilmiştir.



Şekil 25. Kazıklı radye temele ait iki farklı uygulamanın SAP2000 görünüşü (a) Bağlantılı kazıklı radye temel (b) Bağlantısız kazıklı radye temel

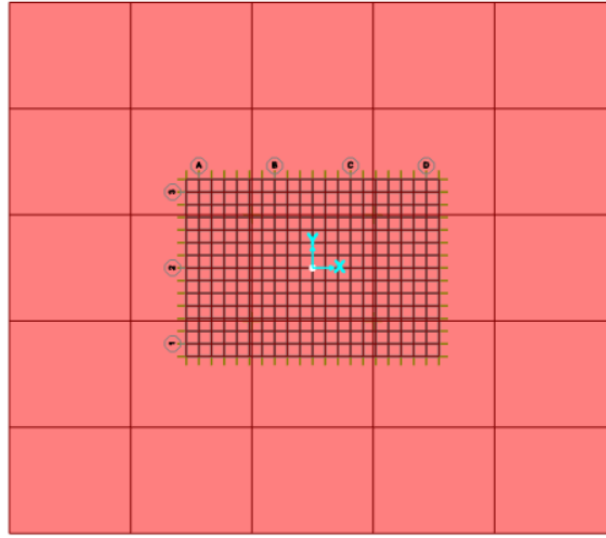
2.1. Elasto-Plastik Zemin Tanımlanması

Deprem etkisi altındaki zeminlerin dinamik davranışı, zeminde oluşan şekil değiştirmelere bağlı değişir. Elasto-plastik davranışta şekil değiştirme seviyesinde zeminlerin gerilmeye bağlı şekil değiştirme özellikleri ön planda iken, daha büyük şekil değiştirme seviyelerinde yük altında zemindeki mukavemet kayıpları ve plastik şekil değiştirme özellikleri öne çıkmaktadır.

Doğrusal olmayan zeminlerde ve üst yapının rijit kabullerle düşey yük olarak simule edilmediği koşullarda dinamik zemin yapı etkileşim etkileri genellikle elasto-plastik analiz gerektirir. Yapı zemin problemini başarılı bir şekilde çözmek için hem zeminin hem de yapının doğrusal olmayan analizi dikkate alınmalıdır. Fakat zeminin farklı tabakalarında zemin sınıfının değişkenlik göstermesi özellikle sonlu eleman modelinde analizleri zorlaştırmaktadır. Bu sebeple bu çalışmada yapı davranışı lineer elastik kabul edilerek analiz yapılmıştır. Yani, radye ve kazıklar elastik malzemeler olarak modellenmiştir. Doğrusal olmayan zemin davranışında ise (yumuşak kil zemin tabakası) elasto-plastik malzeme olarak modellenmiştir.

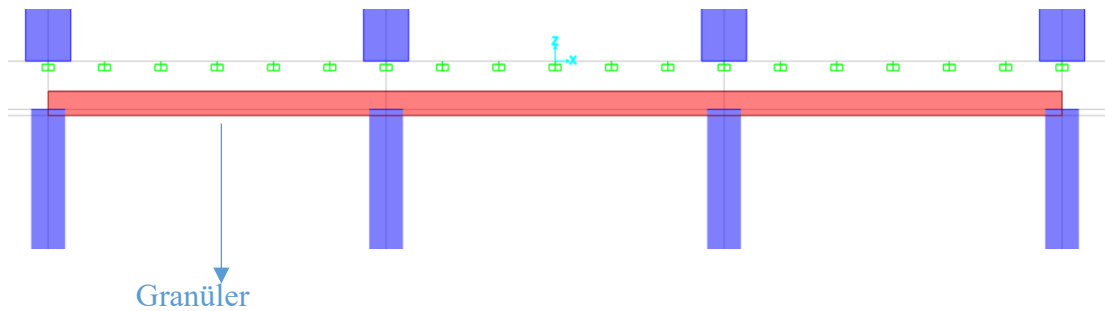
2.2. Zemin Kazık Radye Yapı Sisteminin Modellenmesi

Geometrik modellemeye dayanarak zemin-kazık-radye yapı elemanının 3 boyutlu sonlu eleman modeli geliştirilir. Bu model fonksiyonel olarak 4 bölümden oluşur: zemin, kazık grubu, radye ve üst yapı. Bu sistemin üst yapısı derin yumuşak zemine oturur. Benzer bazı çalışmalarda rijit kabuller yapılarak üst yapı düşey yük olarak simule edilmiştir. Bu çalışmada ise üst yapı betonarme çerçeve sistem, temel ise; radye, kazıklar ve zemin sürekli katı elemanlar olarak modellendi. Zemin ortamının simülasyon süresince, sistemin dinamik cevabında sınır koşullarının etkisini azaltmak için x y yönündeki yanal sonlu model sınırları radyenin yanal boyutlarının yaklaşık dört katı seçildi (Şekil 26). Model derinliğinin ise ana kayanın 5 m altında olması gerekir. 3 boyutlu sonlu modelin nihai boyutu buna göre elde edilir. Zemin-kazık ara yüzleri boyunca üç boyutlu sonlu model tanımlanır ve sistem davranışı lineer elastik olarak idealleştirilir. Kazık ile radyeler ve üst yapı ile radyenin arasındaki düğüm noktaları rijit bağlantılar olarak modellenir (Xie, Chi, Wang, 2020).



Şekil 26. Radye temele ait sonlu elemanlar modeli

Üst yapı yüksekliğinin sürekli artması ile derin temeller yaygın olarak kullanılmaktadır. Derin temellerin dinamik etkileşiminin incelenmesi çok önemlidir. Üst yapı ile zeminin ortak davranışını doğrudan dikkate alarak geliştirilen sonlu eleman modeli üzerinde gerçekleştirilen sayısal analizlerde, dinamik davranışı belirleyen etkin sistem parametreleri olarak iki farklı uygulama ile analizler yapılmıştır. Analiz yapılan uygulamalardan biri klasik kazıklı radye temel iken, diğer uygulama ise yastık elemanla kazık radye bağlantısının kesilmesidir (Şekil 27).



Şekil 27. Kazık ile radye bağlantısının yastık elemanla kesilmesi

Şekil 27’de kazık ve radye bağlantısının 40 cm yastık eleman ile kesildiği gösterilmektedir. Bu yastık tabakasının malzemesi, genellikle kum agregası karışımından

oluşur. Yastığın davranışını etkileyen en önemli parametre elastisite modülüdür. Bu çalışmada yastığın elastisite modülü benzer çalışmalar incelenerek 4×10^4 olarak belirlenmiştir (Ata, Badrawi, Nabil, 2014).

Geliştirilen yöntemin etkinliğini ve yapı zemin etkileşim özelliğinin üst yapının etkisindeki radye-kazık-zemin grubunun dinamik davranışını gösterebilmek amacıyla bu çalışma yapılmıştır. Depremden dolayı yapıda meydana gelen rölatif ötelenmeler; yapıda, temelde ve kazıklarda meydana gelen maksimum gerilmeler; kazıklardaki oturmalar farklı uygulama koşullarına göre karşılaştırılmıştır.

2.3. Betonarme Çok Katlı Yapının Boyutlandırılması

Üst yapı, temel ve kazıklar boyutlandırılırken kolon ve kiriş boyutları her kolon eleman için aynı belirlenmiştir. Bunun sebebi yapıya etkileyen maksimum yüklerin farklı boyutlu elemanlar üzerinden kıyaslanmasının bu değişkenden etkilenmesini engellemek ve daha rijit bir üst yapı elde etmektir.

Yapılarda kullanılması gereken minimum radye temel kalınlığı 30 cm'dir. Özellikle yüksek katlı olarak sınıflandırılan yapılarda radye kalınlığının 100 cm'nin altında olmaması gerekir. Bu sebeple radye temel kalınlığı 100 cm olarak belirlenmiştir.

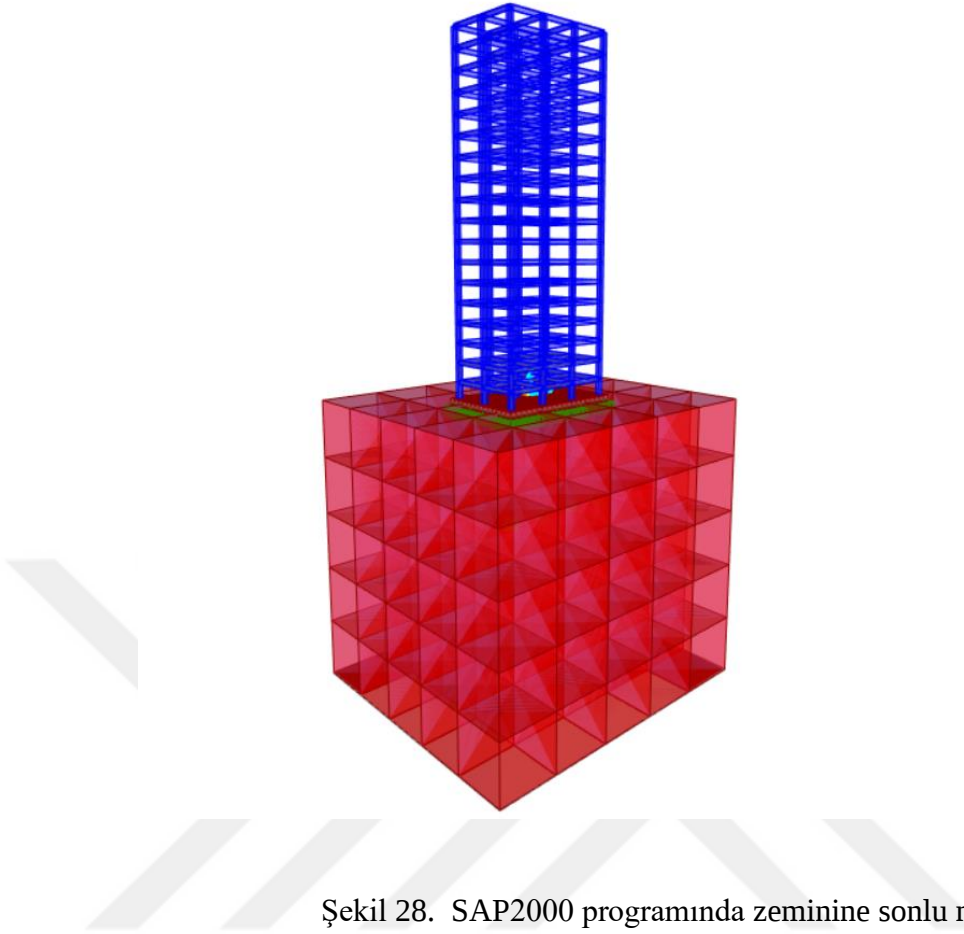
Oluşturulan yapı-zemin modelinde kazıkların zeminle doğrudan bağlantısı vardır. Burada kazıklar yapı yüklerinin kazık çevresinde oluşan zemin sürtünmesi ile tamamen veya kısmi olarak zemin sürtünmesini karşılayan kazıklar olan sürtünme kazığı olarak tasarlanmıştır. Her kolonun altına bir kazık gelecek şekilde tasarım yapılmıştır.

Tablo 4. Yapı elemanlarının boyutları

ELEMAN	BOYUT
Kolon	50/80 cm
Kiriş	30/70 cm
Radye Temel	100 cm (Yükseklik)
Kazıklar	Çap:80 cm Yükseklik:15 m

2.4. Betonarme Çok Katlı Yapının Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması

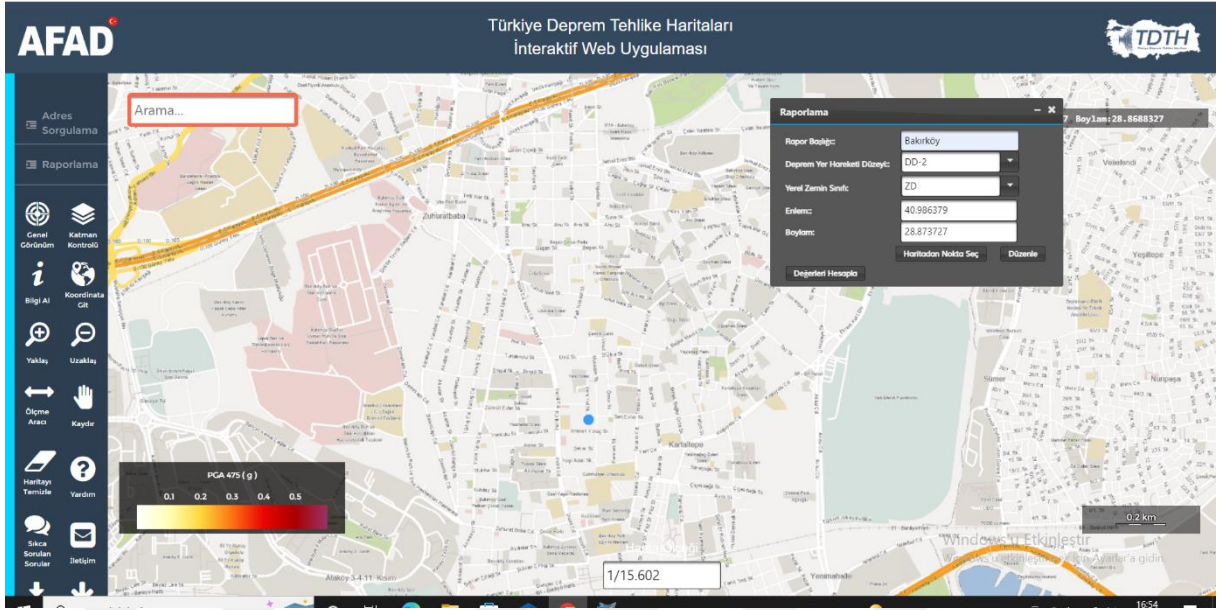
Betonarme çok katlı yapıya ait ankastre mesnetli ve yarı sonsuz zemin ortamlı sonlu eleman modelleri SAP2000 (V22) programı kullanılarak oluşturulmuştur. Yapılan çalışmalar göz önünde bulundurularak sonlu model radye-kazık-zemin sisteme tanımlanmıştır. Yapı-zemin etkileşiminin betonarme çok katlı yapının dinamik davranışına etkisini belirlemek amacıyla modelleme yapılırken bütün elemanlar katı eleman olarak modellenmiştir. Yapı-zemin etkileşiminin incelendiği her bir sonlu eleman modelinde yarı sonsuz zemin ortamı, zemin parametrelerinin belirlenmesinde 15 metre kazıklar göz önünde bulundurularak literatürdeki bilgiler ışığında sonlu model sınırları x,y yönünde radye yanal boyutlarının dört katı, z yönünde de kazık uzunluğunun dört katı olarak belirlenmiştir. Çalışma kapsamında radye temel, kazıklar ve zeminden oluşturulan sayısal modelde 1 metre aralıklarla sonlu eleman ağları oluşturulmuştur (Xie, Chi, Wang, 2020).



Şekil 28. SAP2000 programında zeminine sonlu model tanımlanan yapı

2.5. Deprem Yüklerinin Tanımlanması ve Analiz Modeli

Yapılan bu çalışmada analiz raporu oluşturmak için AFAD Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması kullanılmıştır. Rapor için seçilen konum İstanbul-Bakırköy olup, zemin sınıfı ise ZD olarak seçilmiştir. Bu rapordaki veriler göz önünde bulundurularak SAP2000’de spektrum değerleri girilmiştir.



Şekil 29. AFAD interaktif web uygulaması - sismik tehlike haritası detay raporu

Burada seçimi yapılan DD-2 deprem yer hareketi düzeyini tanımlar. TBDY 2018 deprem yönetmeliğine göre DD-2, Deprem Yer Hareketi, spektral büyüklüklerin 50 yılda aşılma olasılığının %10 ve buna karşı gelen tekrarlanma periyodunun 475 yıl olduğu seyrek deprem yer hareketine karşılık gelmektedir. Bu deprem yer hareketi, standart tasarım deprem yer hareketi olarak da adlandırılmaktadır. DD-2 kullanılmasının uygun olduğu yapı türleri başlıca insanların kısa süreli ve yoğun olarak bulunduğu binalar ve diğer binalar, alışveriş merkezleri, spor tesisleri, sinema, tiyatro, konser salonları, ibadethaneler, konutlar, işyerleri, oteller, bina türü endüstri yapıları, otopark, depo, antrepo, bina türleridir (TBDY-2018). Burada modellenen bina konut amaçlı bina olduğu için deprem yer hareketi DD-2 olarak belirlenmiştir.

Response Spectrum TSC-2018 Function Definition

Function Name: TSC 2018

Function Damping Ratio: 0,05

Parameters

0.2 Sec Spectral Accel, Ss: 1,157

1 Sec Spectral Accel, S1: 0,316

Long-Period Transition Period: 6,

Site Class: ZD

Site Coefficient, Fs: 1,0372

Site Coefficient, F1: 1,984

Design Spectrum Direction: Horizontal

Calculated Values for Response Spectrum Curve

SDS = $F_s * S_s$: 1,2

SD1 = $F_1 * S_1$: 0,6269

Define Function

Period	Acceleration
0,	0,48
0,1045	1,2
0,5224	1,2
0,8	0,7837
1,	0,6269
1,2	0,5225
1,4	0,4478
1,6	0,3918

Function Graph

Convert to User Defined

Display Graph

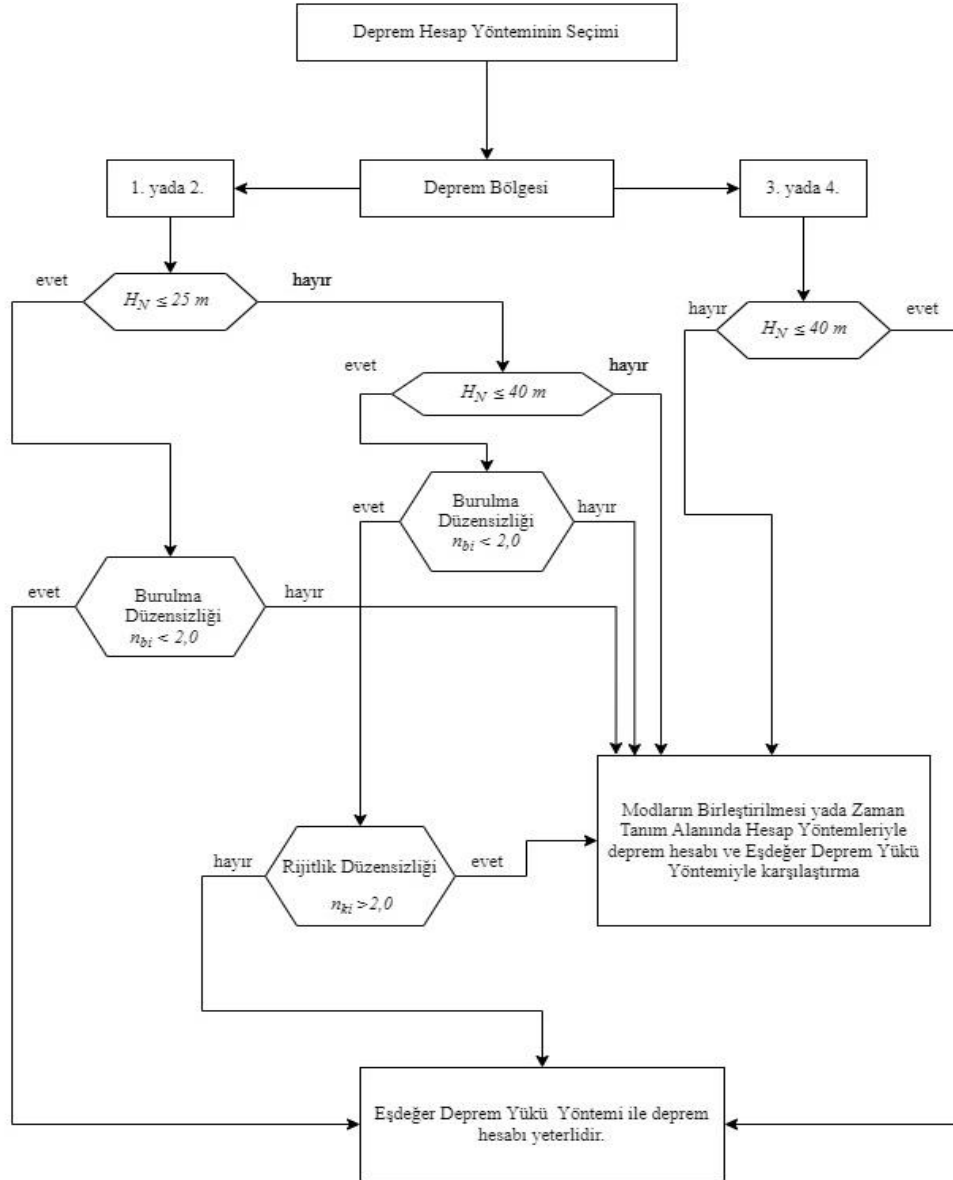
OK Cancel

Şekil 30. SAP2000 programında seçilen zemine göre spektrum bilgilerinin girilmesi

Binaların deprem yükü hesaplanırken eşdeğer deprem yükü yöntemi, mod birleştirme yöntemi ve zaman tanım alanında hesap yöntemi olmak üzere üç farklı hesap yöntemi kullanır. Eşdeğer deprem yükü sadece birinci modun dikkate alındığı dinamik bir yöntem olarak kabul edilmektedir. Bu yöntem bazı durumlarda yetersiz kalabilmektedir. Yetersiz kaldığı durumlarda mod birleştirme ve zaman tanım alanında hesap yöntemlerinin kullanılması uygun olmaktadır.

Hesap yöntemine karar verirken başlıca dört parametre kullanılır. Bu parametreler deprem bölgesi, bina yükseklik sınıfı, burulma düzensizliği ve rijitlik düzensizliğidir (Doğangün, 2014).

Bu çalışmada seçilen deprem bölgesi 1. Derece deprem bölgesi ve bina yüksekliği 40 metreden fazla olduğu için çözüm yöntemi doğrudan zaman tanım alanında çözüm olarak belirlenir.



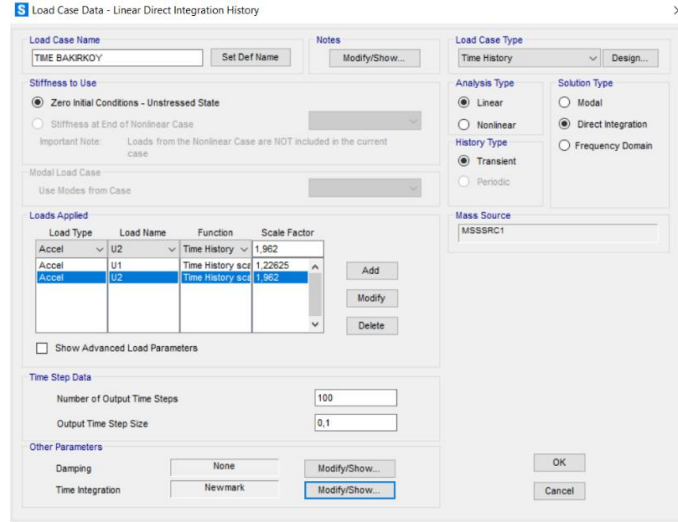
Şekil 31. Deprem hesap yöntemi seçimi (Doğangün, 2014)

TBDY 2018'e göre bina taşıyıcı sistemlerinin zaman tanım alanında deprem hesabında kullanılacak deprem kayıtlarının seçimi, tasarıma esas deprem yer hareketi düzeyi ile uyumlu deprem büyüklükleri, fay uzaklıkları, kaynak mekanizmaları ve yerel zemin koşullarına göre yapılacaktır. Binanın bulunduğu bölgede tasarıma esas deprem yer hareketi düzeyi ile uyumlu geçmiş deprem kayıtları varsa öncelikle bu kayıtlar kullanılmalıdır. Sahaya özel deprem tehlikesini en iyi araştıran depremlere ait büyüklük ve fay uzaklığı bilgilerinin belirlenmesi için deprem tehlikesi ayrıştırma işleminden yararlanılabilir. Yeterli sayı veya nitelikte deprem kaydı seçimi yapılmamışsa, zaman tanım alanında benzeştirilmiş

yer hareketi kayıtları kullanılabilir. Bu tür kayıtların kullanılması durumunda, binanın bulunduğu sahanın sismik kaynak, dalga yayılım ve yerel zemin özellikleri dikkate alınacaktır. Benzeştirme için kullanılacak model parametrelerinin, söz konusu bölgede meydana gelmiş depremlerde kaydedilmiş gerçek deprem kayıtları ile uyumlu olduğu gösterilecektir. Bir veya iki boyutlu hesap için seçilecek deprem kayıtlarının ve üç boyutlu hesap için seçilecek deprem kaydı takımlarının sayısı en az on bir olmalıdır. Aynı depremden seçilecek kayıt veya kayıt takımı sayısı ise üçü aşmamalıdır.

Dinamik yapı zemin etkileşimi sırasında, yapı davranışını ve kazık davranışını inceleyen bu çalışmada etkin yer hareketi olarak 1999 Düzce deprem girdileri kullanılmıştır. Çalışmada 1999 düzce depremine ait ivme-zaman verileri ile üst yapı etkisindeki temelin dinamik davranışı incelenmiştir. Düzce depreminde elde edilen yer değiştirme ilişkileri yapıya ve temele etkileyen maksimum yükler sayısal veriler üzerinden, yapı-zemin etkileşimi de dikkate alınarak temelde iki farklı uygulama için farklı parametreler kullanılarak karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Deprem yükü olarak 1999 Düzce depremi ivme verileri tanımlanmış, hareketli yük ve sabit yük kombinasyonları oluşturulmuş ve zaman tanım alanında analiz yapılmıştır.



Şekil 32. SAP2000 programında zaman tanım alanında analiz

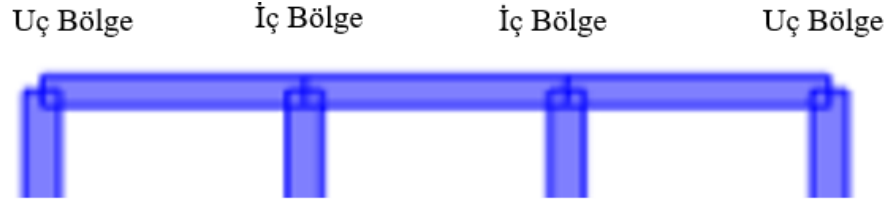
3. BULGULAR VE İRDELEME

Yapılan bu çalışma temelde kazıklı radye temelin bağlantılı ve bağlantısız iki farklı uygulamasının sonlu modelle oluşturulan yapı zemin etkileşimi sırasındaki dinamik analiz verilerini karşılaştırmayı amaçlamaktadır. Bu çalışmada her iki uygulamaya ait ankastre mesnet durumundaki rölatif ötelenmeler ve asal gerilmeler incelenmiştir.

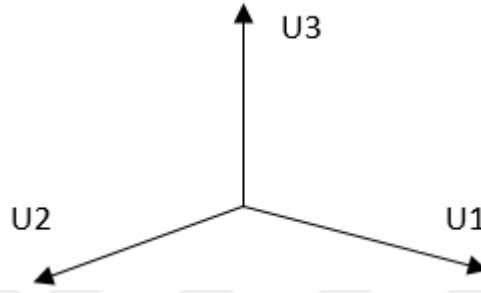
Yapılan bu çalışma için taşıma kapasitesi düşük ZD zemin sınıfı seçilmiştir. Bu zemin deprem yükü altında büyük deformasyonlar gösteren zemin sınıfıdır. Kazıklar bu deformasyonları engellemek için yapılır. Bu çalışmada deprem sırasında kazık zemin etkileşimi sırasında kazıkların davranışı radyenin davranışı ve bağlantısız durumda yastığın etkisi sayısal veriler göz önünde bulundurularak detaylı incelenmiştir.

3.1. Yapıdaki Rölatif Kat İvmeleri ve Ötelenmeler

Yapıda, kazıklarda ve radyede deprem anında, yapı zemin etkileşim etkilerinin fazla olduğu sırada kazıkların etkilerini incelemek için farklı parametrelerde analizler yapılmıştır. Yapıdaki rölatif ötelenme ve ivmeleri incelemek için yapıda kazıksız radye temelli olması durumunda, kazık ve radyenin bağlantılı olması durumunda, kazık ve radye bağlantısının 40 cm yastık elemanla kesildiği durumda, kazık ve radye bağlantısının 30 cm yastık elemanla kesildiği durumda, kazık ve radye bağlantısının 40 cm yastık elemanla kesildiği ve kazık sayısının azaltıldığı durumda üst yapıda gerçekleşen rölatif ivmeler ve buna bağlı ötelenmeler incelenmiştir. Üst yapıda her bir durumda katlardaki rölatif değişimleri göstermek için 18. kat, 9.kat ve 1. kattaki değişiklikler uç ve iç bölge olmak üzere iki durumda aşağıda verilen sayısal veriler üzerinden değerlendirilmiştir. Şekil 33'te uç ve iç bölgelerin taşıyıcı elemanda temsil ettiği yerler gösterilmiştir. Burada uç ve iç bölge için maksimum iki değer üzerinden değerlendirme yapılmıştır.



Şekil 33. Uç ve iç bölgelerin taşıyıcı elemanda temsil ettiği yerler



Şekil 34. U1, U2 ve U3 yönlerinin ifade ettiği yönler

3.1.1. 1 Yönündeki Rölatif Kat İvmeleri ve Ötelenmeler

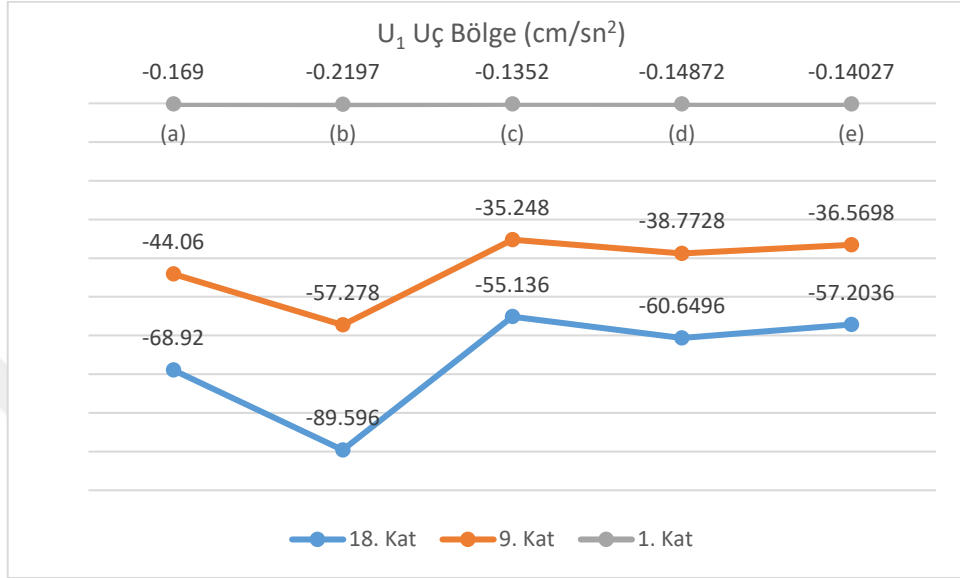
Şekil 35'te 1 yönünde rölatif ivmelerin, Şekil 36'da 1 yönünde rölatif ötelenmelerin katlara göre değişimi uç ve iç bölgeler için ayrı ayrı gösterilmiştir. Bu şekillerde aşağıdaki notasyon kullanılmıştır:

- (a): Kazıksız radye temeli
- (b): Kazıklı radye temeli
- (c): Kazıklı ve 40 cm yastık tabakalı radye temeli
- (d): Kazıklı ve 30 cm yastık tabakalı radye temeli
- (e): Kazıklı 40 cm yastık tabakalı kazık sayısı azaltılmış radye temeli

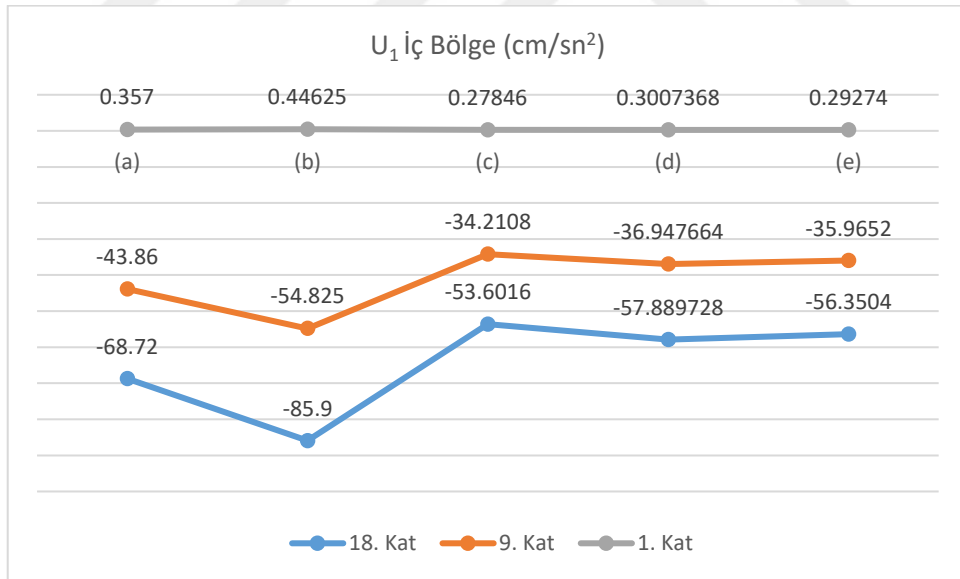
ifade etmektedir.

Şekil 35'te 1 yönünde ivme değerleri incelendiğinde en fazla ivmelerin 18. katta, en az ivme değerlerinin 1. katta olduğu görülmüştür. 18. kattaki ivme değerleri 1. kattaki ivme değerlerinin ortalama 300 katıdır. Şekil 35'te a ve b uç ve iç bölgelerdeki ivme değerleri kıyaslandığında uç bölgedeki rölatif ivmelerin iç bölgeden yaklaşık %5 daha fazla olduğu belirlenmiştir.

Şekil 35'te farklı imalatlardaki rölatif ivme değerleri irdelendiğinde en fazla rölatif ivmelerin (b) durumunda yani kazıklı radye temel durumunda, en düşük ivmelerin ise kazık radye bağlantısının yastık elemanla kesildiği (c) durumunda olduğu görülmüştür.



a. Uç Bölge



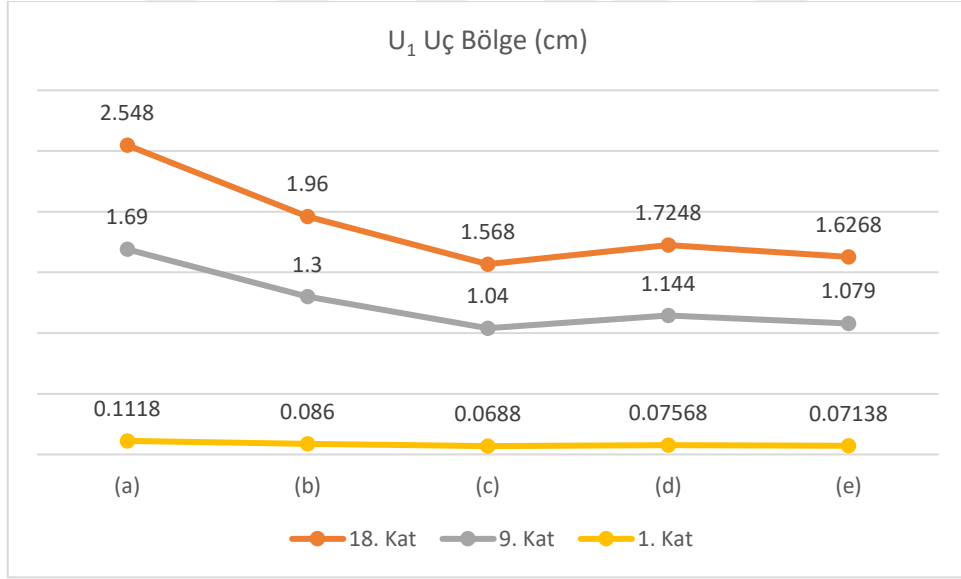
b. İç Bölge

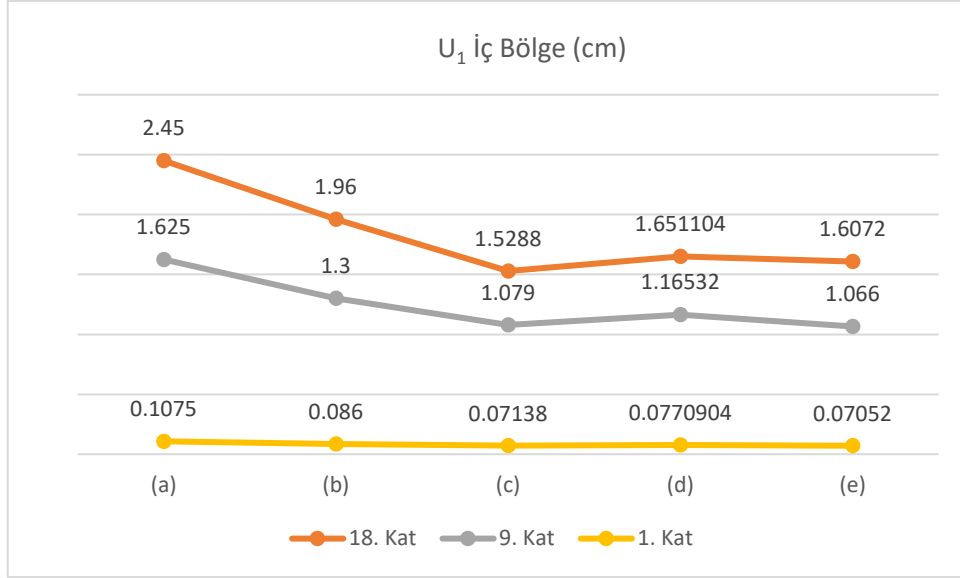
Şekil 35. 1 yönünde yapıda rölatif ivmelerin katlara göre değişimi

Şekil 36'ta 1 yönündeki rölatif ötelenmeler incelendiğinde en fazla ötelenmelerin beş farklı durum için 18. katta, en az 1. katta olduğu görülmektedir. Beş farklı durumdaki ötelenmeler arasındaki farkın kat sayısı azaldıkça belirgin olarak azaldığı hatta ihmal

edilebilir düzeye geldiği görülmektedir. Kazıksız durumda uç bölgede 2,55 cm ve iç bölgede 2,45 cm olduğu görülmektedir. Bu sonuca göre yapıya ait çerçeve sistemde uç bölgelerde daha fazla ötelenmelerin olduğu sonucuna varılmıştır.

Rölatif ötelenmelerin beş farklı durumda irdelendiğinde en fazla rölatif ötelenmelerin olduğu durum kazık kullanılmayan (a) durumudur. Bunu bu ötelemeyi %25 azaltan kazık kullanımı (b) takip ederken, 40 cm yastık ile kazık radye bağlantısının kesilmesi durumunda (c) en az rölatif ötelenme gerçekleşmektedir. Burada yastığın yapıdaki rölatif ötelemeleri azaltmadaki etkisinin yaklaşık %20 olduğu sonucuna varılır. Daha ince bir yastık kullanılması durumunda (d) rölatif ötelenmelerin daha fazla olduğu görülmüştür. Bu durumda yastık kalınlığının fazla olmasının da yapıdaki rölatif ötelenmelerinin azaltma etkisi olduğu sonucuna varılabilir. Yastık kullanımı durumunda kazık sayısı azaltıldığında ise (e), rölatif ötelenmelerin (e) durumunda (d) durumuna göre bir miktar arttığı görülmektedir. Buradaki sonuca göre artış ihmal edilebilir ve kazık sayısı azaltılabilir denilebilir fakat bu farkın artması durumunda kazık sayısının korunması gerekebilir.





b. İç Bölge

Şekil 36. 1 yönünde yapıdaki rölatif kat ötelenmelerinin katlara göre değişimi

3.1.2. 2 Yönündeki Rölatif Kat İvmeleri ve Ötelenmeler

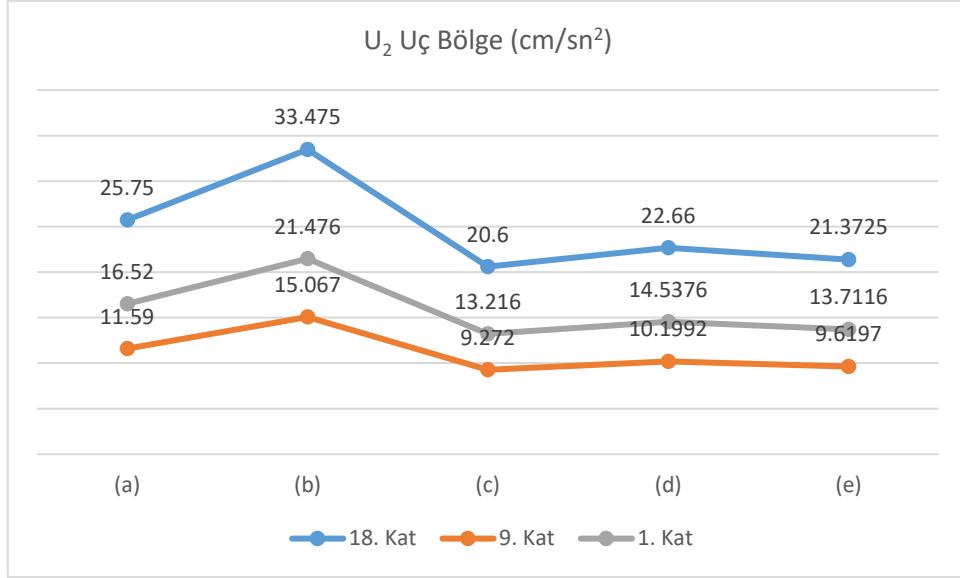
Şekil 37’de 1 yönünde rölatif ivmelerin, Şekil 38’de 2 yönünde rölatif ötelenmelerin katlara göre değişimi uç ve iç bölgeler için ayrı ayrı gösterilmiştir. Bu şekillerde aşağıdaki notasyon kullanılmıştır:

- (a): Kazıksız radye temeli
- (b): Kazıklı bağlantılı radye temeli
- (c): Kazıklı ve 40 cm yastık tabakalı radye temeli
- (d): Kazıklı ve 30 cm yastık tabakalı radye temeli
- (e): Kazıklı 40 cm yastık tabakalı kazık sayısı azaltılmış radye temeli

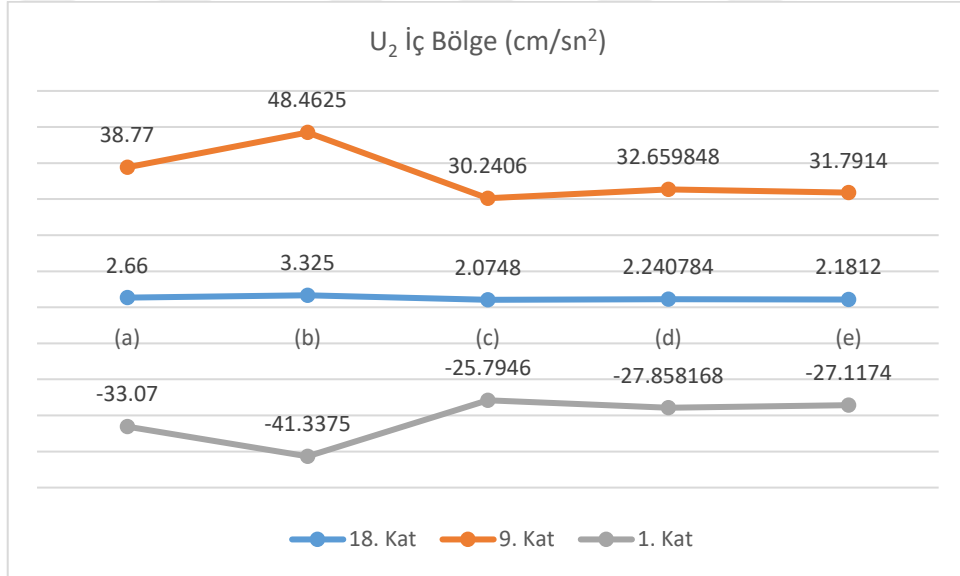
ifade etmekte olup;

Şekil 37’de 2 yönünde ivme değerleri incelendiğinde uç bölgede en fazla ivmelerin 18. katta en az ivme değerlerinin 9. katta, iç bölgede ise en fazla 9. katta en az 18. katta olduğu görülmüştür. Şekil 37’te a ve b (uç ve iç bölgelerdeki) ivme değerleri kıyaslandığında iç bölgedeki rölatif ivmelerin uç bölgeden yaklaşık %30 daha fazla olduğu belirlenmiştir.

Şekil 37’te farklı imalatlardaki rölatif ivme değerleri irdelendiğinde en fazla rölatif ivmelerin (b) durumunda yani kazıklı radye temel durumunda, en düşük ivmelerin ise kazık radye bağlantısının yastık elemanla kesildiği (c) durumunda olduğu görülmüştür.



a. Uç Bölge

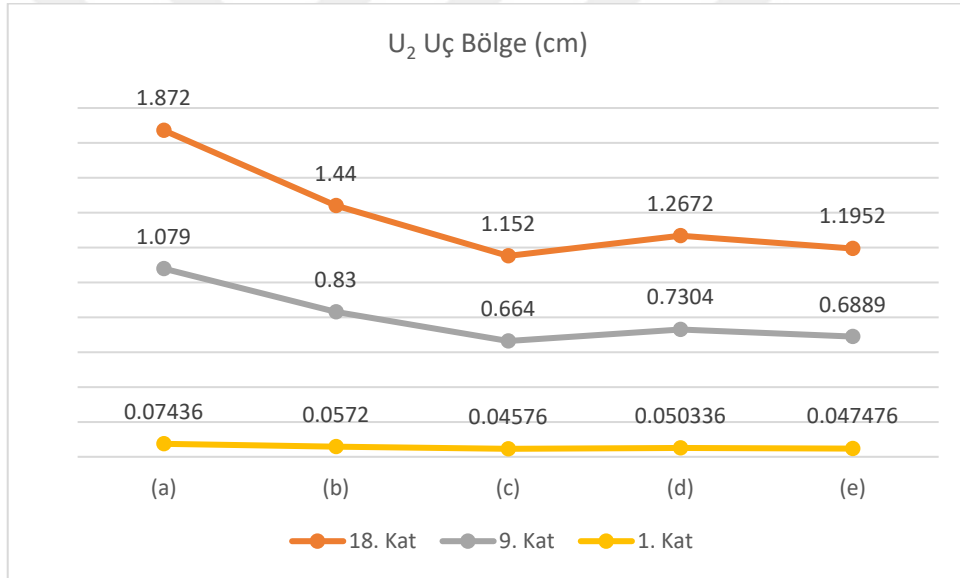


b. İç Bölge

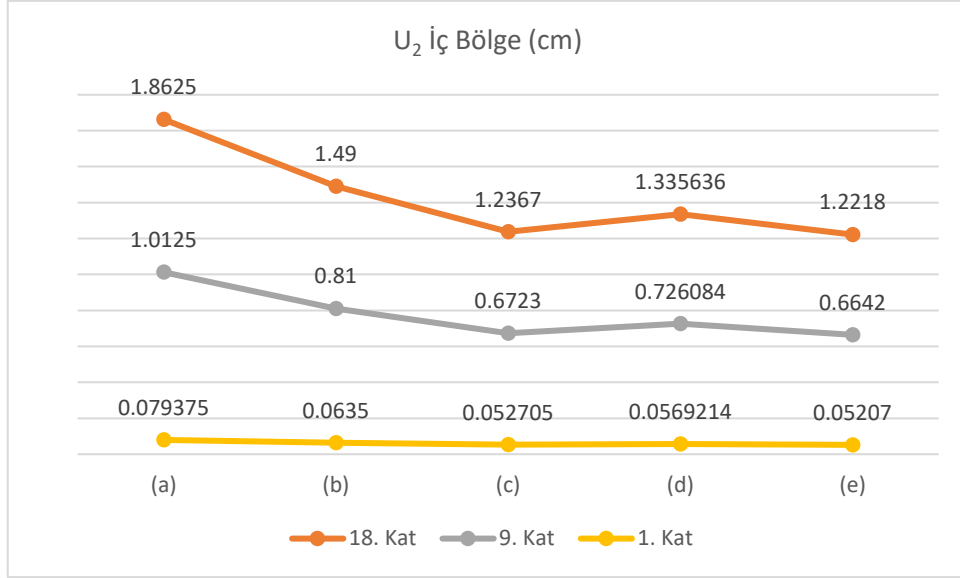
Şekil 37. 2 yönünde yapıda rölatif ivmelerin katlara göre değişimi

Deprem yükünün etkidiği yön 1 yönü olduğu için en fazla ötelenmelerin de bu yönde olduğu görülmektedir. Şekil 38’te 2 yönünde ötelenmeler 1 yönüne göre daha azdır ve en fazla ötelenmelerin beş farklı parametre için 18. katta en az 1. katta olduğu görülmektedir. Beş farklı durumdaki ötelenmeler arasındaki farkın kat sayısı azaldıkça belirgin olarak azaldığı hatta ihmal edilebilir düzeye geldiği görülmektedir. Kazıksız durumda uç bölgede 1,87 ve iç bölgede 1,86 olduğu görülmektedir. Bu sonuca göre bu yönde uç bölgelerde ve iç bölgelerde belirgin fark olmadığı söylenebilir.

Rölatif ötelenmelerin beş farklı durumda irdelendiğinde en fazla rölatif ötelenmelerin olduğu durum kazık kullanılmayan (a) durumdur. Bunu bu ötelemeyi %20 azaltan kazık kullanımı (b) takip ederken, 40 cm yastık ile kazık radye bağlantısının kesilmesi durumunda (c) en az rölatif ötelenme gerçekleşmektedir. Burada yastığın yapıdaki rölatif ötelemeleri azaltmadaki etkisinin yaklaşık %15 olduğu sonucuna varılır. Daha ince bir yastık kullanılması durumunda (d) rölatif ötelenmelerin daha fazla olduğu görülmüştür. Bu durumda yastık kalınlığının fazla olmasının da rölatif ötelenmelerinin azaltma etkisi olduğu sonucuna varılabilir. Yastık kullanımı durumunda kazık sayısı azaltıldığında ise (e), rölatif ötelenmelerin (e) durumunda (d) durumuna göre bir miktar arttığı görülmektedir. Buradaki sonuca göre artış ihmal edilebilir ve kazık sayısı azaltılabilir denilebilir fakat bu farkın artması durumunda kazık sayısının korunması gerekebilir.



a. Uç Bölge



b. İç Bölge

Şekil 38. 2 yönünde yapıdaki rölatif kat ötelenmelerinin katlara göre değişimi

3.1.3. 3 Yönündeki Rölatif Kat İvmeleri ve Ötelenmeler

Şekil 39’da 3 yönünde rölatif ivmelerin, Şekil 40’da 3 yönünde rölatif ötelenmelerin katlara göre değişimi uç ve iç bölgeler için ayrı ayrı gösterilmiştir. Bu şekillerde aşağıdaki notasyon kullanılmıştır:

(a): Kazıksız Radye Temeli

(b): Kazıklı Bağlantılı Radye Temeli

(c): Kazıklı ve 40 cm Yastık Tabakalı Radye Temeli

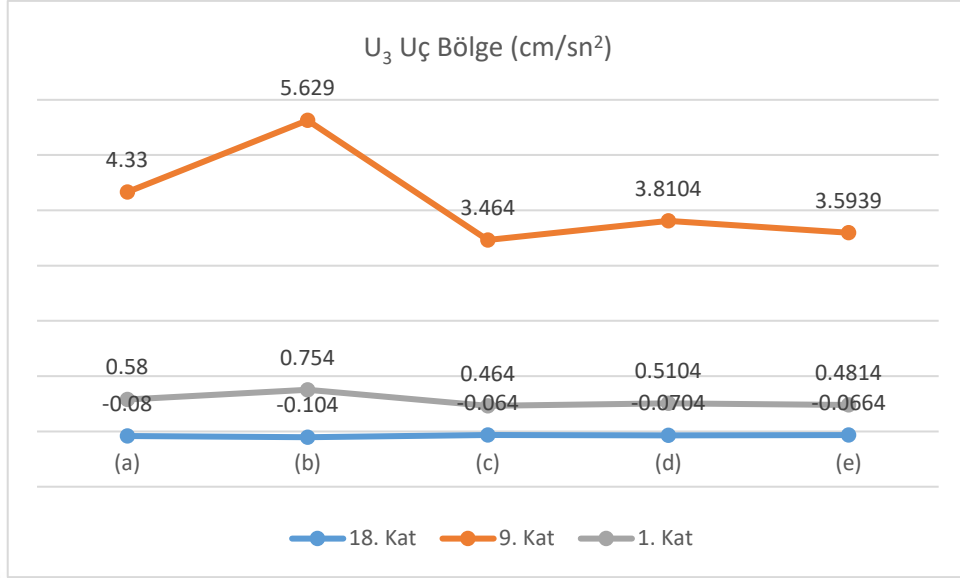
(d): Kazıklı ve 30 cm Yastık Tabakalı Radye Temeli

(e): Kazıklı 40 cm Yastık Tabakalı Kazık Sayısı Azaltılmış Radye Temeli

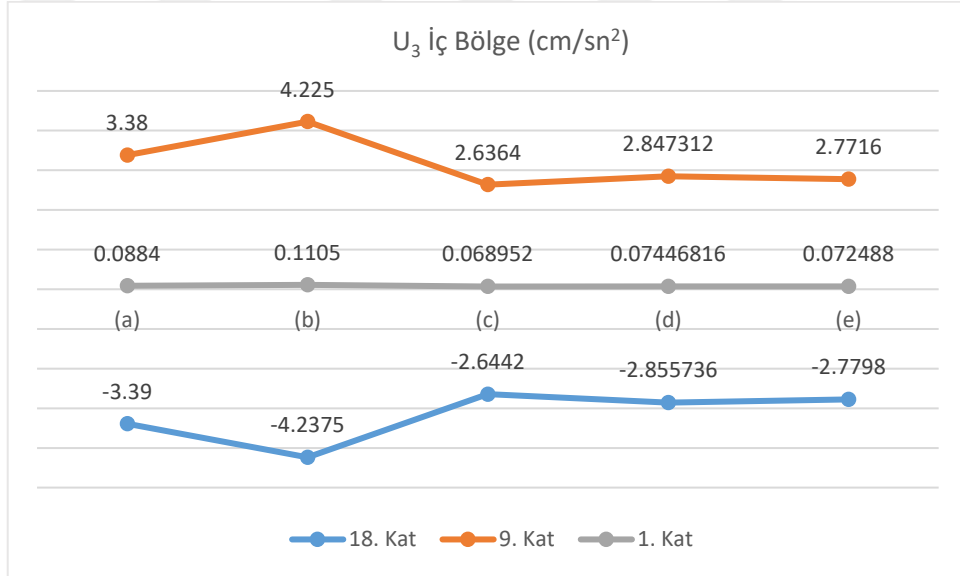
ifade etmekte olup;

Şekil 39’da 3 yönünde ivme değerleri incelendiğinde uç bölgede en fazla ivmelerin 9. katta en az ivme değerlerinin 18. katta, iç bölgede ise en fazla 18. katta en az 1. katta olduğu görülmüştür.

Şekil 39’da farklı imalatlardaki rölatif ivme değerleri irdelendiğinde en fazla rölatif ivmelerin (b) durumunda yani kazıklı radye temel durumunda, en düşük ivmelerin ise kazık radye bağlantısının yastık elemanla kesildiği (c) durumunda olduğu görülmüştür.



a. Uç Bölge



b. İç Bölge

Şekil 39. 3 yönünde yapıda rölatif ivmelerin katlara göre değişimi

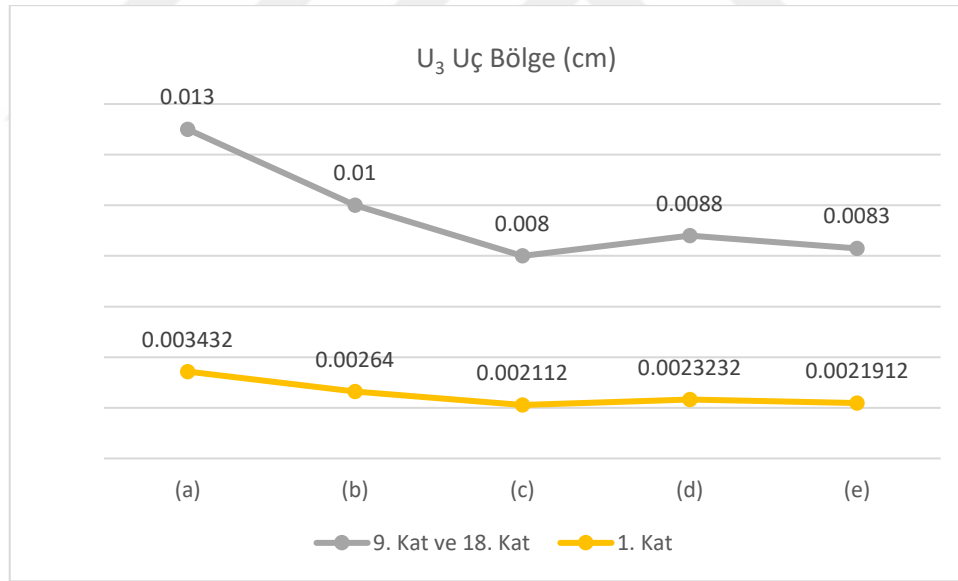
Şekil 40'da 3 yönündeki rölatif kat ötelenmeler incelendiğinde grafiğe göre farklar görülmektedir. Fakat sayısal olarak değerlendirildiğinde ise bu farkların ihmal edilebilir düzeyde olduğu sonucu çıkarılmaktadır. Farklı uygulamalar değerlendirildiğinde, bu uygulamaların 3 yönündeki ötelenmelere etkisinin 1 ve 2 yönündeki rölatif ötelenmelerle aynı olduğu söylenebilir.

Rölatif kat ötelenmeleri, bağlantısız durumda farklı yastık tabakaları, bağlantılı radye ve kazıksız radye durumlar için gösterilmiştir. Rölatif kat ötelenmeleri kat sayısı arttıkça

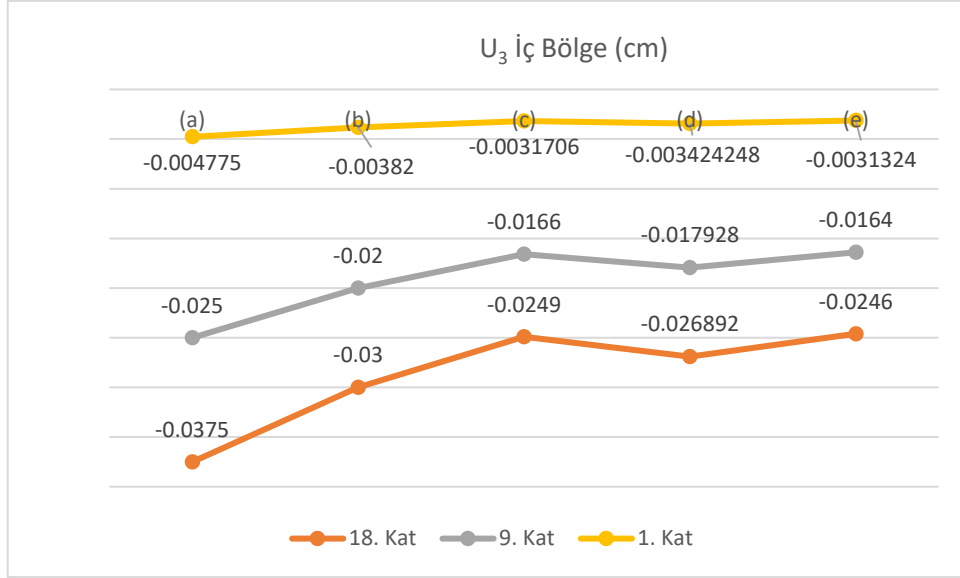
artmakta olup, en yüksek ötelenme 18. katta oluşmuştur. Ayrıca, en yüksek rölatif kat ötelenmeleri kazıksız radye temelde belirlenmiş olup, en düşük ötelenmeler ise 40 cm yastık tabakalı radye temelde gözlenmiştir. Bu sonuca göre kazıkların yapıya gelen yükleri azaltma etkisinden dolayı rölatif kat ötelemelerinin azalmasını sağladığı sonucuna varılabilir. Aynı şekilde yastık kullanımının da kat ötelemelerini azalttığı sonucu çıkarılır.

Yastık kalınlığına bağlı ötelenmelerde uygulamada tercih edilen iki yastık kalınlığı incelendiğinde yastık kalınlığının ötelenmeyi belirgin farkla etkilemediği sonucuna varılır. Fakat yastık kalınlığı arttıkça ötelenmeyi azalttığı etkisi görülmektedir.

Yapıdaki ötelenmeleri incelemek için yapılan bu çalışmada yastık kullanımı durumunda kazık sayısının azaltılabilirliğini incelemek için bağlantısız durumda kazık sayısı azaltılarak yapılan analizde; (c) durumunda (e) durumuna göre ötelenmelerin daha az olduğu sonucu ortaya çıkmıştır fakat bu fark ihmal edilebilir düzeydedir. Bu da yastık kullanılması durumunda kazık sayısının azaltılabilirliğini desteklemektedir. Aynı zamanda daha ekonomik bir tasarım imkânı sağlamaktadır.



a. Uç Bölge

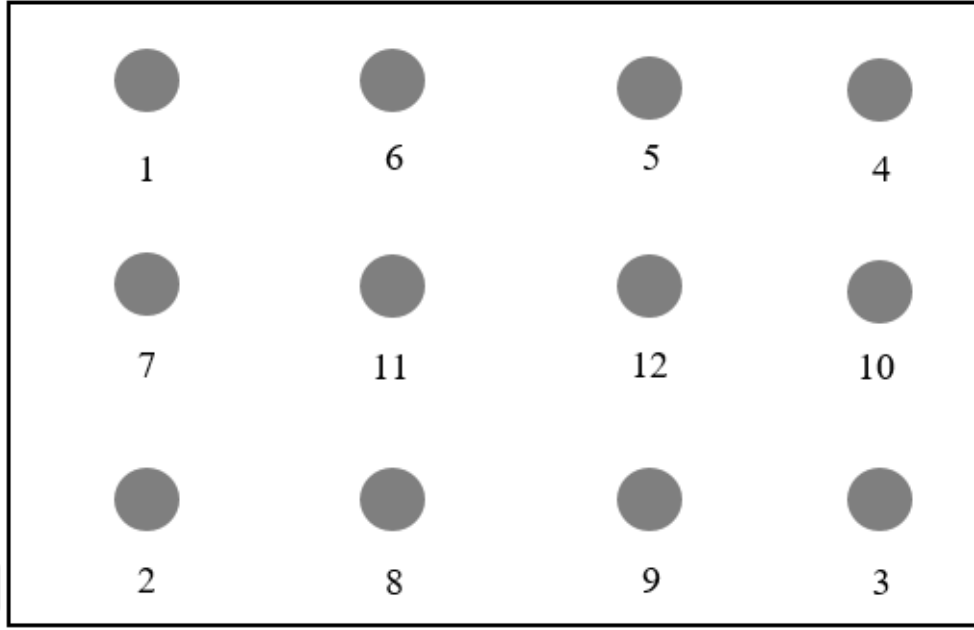


b. İç Bölge

Şekil 40. 3 yönünde yapıdaki rölatif kat ötelenmelerinin katlara göre değişimi

3.2. Kazıklara Etkiyen Yükler ve Kazıklardaki Oturmalar

Deprem etkisinde yapı zemin etkileşimi sırasında kazıklara etkiyen kesme kuvvetleri, eğilme momentleri ve normal kuvvetler her bir kazık için ayrı ayrı incelenmiş olup, normal kuvvetin etkisinde kazıklardaki oturma miktarları ayrı ayrı irdelenmiştir. Bu incelemelerde yastığın etkisini incelemek için yine farklı parametreler üzerinden kıyaslamalar yapılmıştır. Analiz parametreleri başlıca radyesiz durum, radye ve kazıkların bağlantılı olması durumu, radye ve kazık bağlantısının 40 cm yastık elemanla kesilmesi durumu, radye ve kazık bağlantısının 30 cm yastık elemanla kesilmesi durumu, radye ve kazık bağlantısının 40 cm yastık elemanla kesilmesi ve kazık sayısının azaltılması durumlarını kapsar.



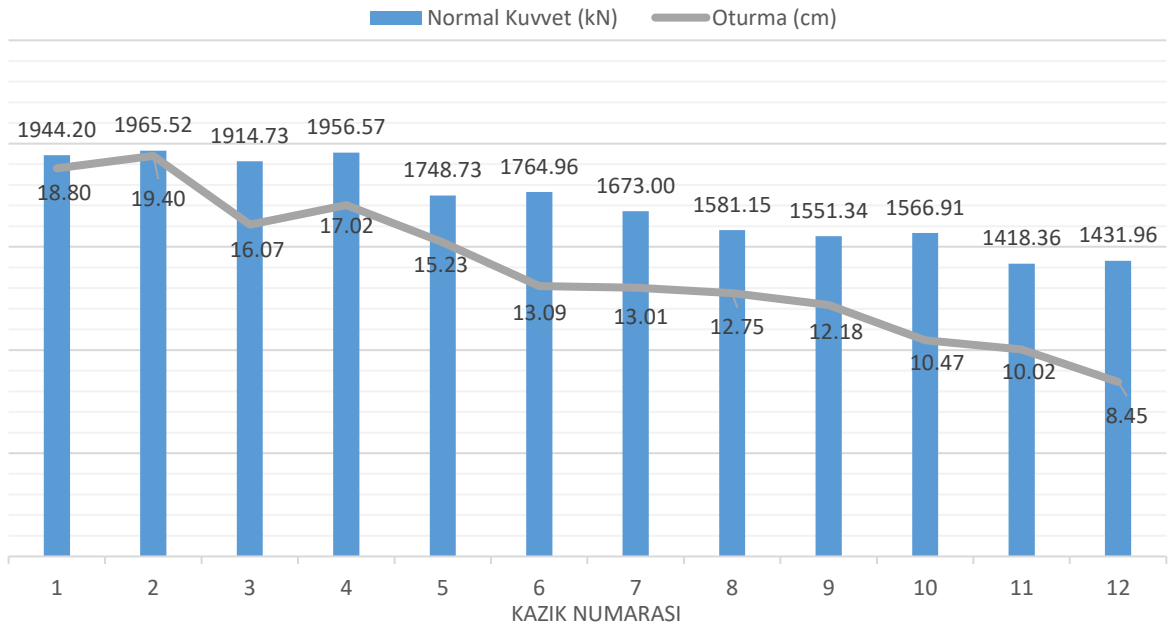
Şekil 41. Yüksek katlı yapının temeline ait kazık yerleşim planı

3.2.1. Radyesiz Durumda Kazıklara Etkiyen Yükler ve Kazıklardaki Oturmalar

Analiz parametrelerinden radyesiz durum radyenin taşıma gücüne etkisini belirlemek için yapılmıştır. Uygulamada kazık ve kolonların doğrudan etkileşimi yoktur. Burada kazık ve kolon bağlantısını sağlamak için her bir düşey eleman (kolonlar) kirişlerle birbirine bağlanmıştır. Kazıklar bu kirişlerin bitimine yerleştirilmiştir. Bu uygulama ile kazık ve kolonun doğrudan bağlantısı engellenmiş ve radyesiz durumda kolonların davranışı gözlemlenmiştir.

Tablo 5. Radyesiz durumda kazıklara etkiyen yükler

Kazık No	Kesme Kuvveti (kN)	Eğilme Momenti (kNm)
1	2073,46	15495,27
2	2074,24	15665,19
3	2012,60	15260,40
4	2033,46	15593,86
5	1835,77	13937,35
6	1820,91	14066,73
7	1750,90	13333,81
8	1643,65	12601,77
9	1615,47	12364,15
10	1582,63	12488,27
11	1470,81	11304,30
12	1421,89	11412,72



Şekil 42. Kazıklardaki normal kuvvet ve oturma değerlerinin grafik ile gösterimi

3.2.2. Kazıklı Radye Temelde Kazıklara Etkiyen Yükler ve Oturmalar

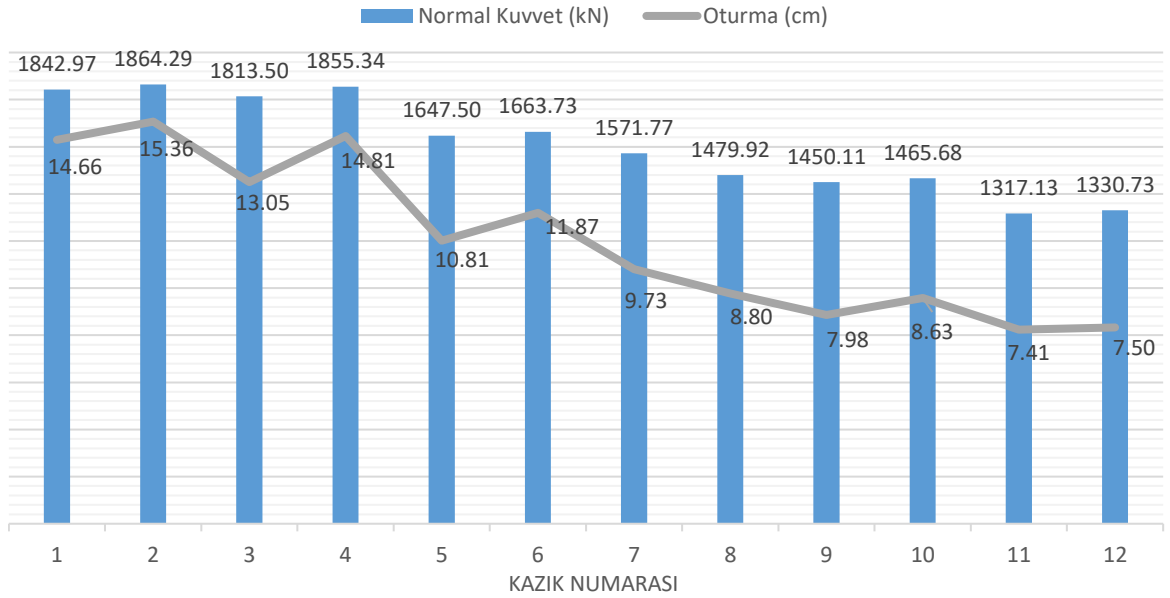
Kazıklı temel ve kazıklı radye temelde her bir kazığa etkiyen kuvvetler Tablo 5 ve Tablo 6’da kıyaslandığında kazık kolon bağlantısının sadece kirişlerle yapıldığı durumda (Tablo 5) kazıklara etkiyen yüklerin, radye bağlantısının olduğu durumdaki (Tablo 6) yüklere göre daha fazla olduğu görülmektedir. Radyenin kazıklara etkiyen kesme kuvvetlerini ve eğilme momentlerini azalttığı sonucuna varılmaktadır.

Normal kuvvetin etkisinde kazıkların oturma miktarları Şekil 42 ve Şekil 49’da verilmiştir. Bu veriler incelendiğinde, kazıklı temel durumunda (Şekil 42), radye kazıklı duruma (Şekil 43) göre her bir kazığa etkiyen normal kuvvet daha fazladır. Bu kuvvetin etkisiyle orantılı olarak da kazıklı temel durumunda kazıkların oturma miktarların da daha fazla olduğu görülmektedir. Kazıklı temelde kazıklardaki maksimum oturma 2 numaralı kazıkta 19.4 cm’dir. Kazıklı radye temelde ise bu değer 15,36 cm’dir. Yaklaşık 4 cm olan bu fark radyenin yük azaltmadaki önemini göstermektedir.

Radyenin farklı oturmalarla etkisini araştırmak için yapılan bu çalışmada iki analiz durumu kıyaslandığında radyesiz temeldeki kazıklardaki en fazla ve en az oturma miktarı arasındaki fark 10.95 cm iken kazıklı radye temelde bu fark yaklaşık 8 cm’dir. Bu farklardan radyenin kazıklardaki farklı oturmaları %30 azalttığı sonucuna varılmaktadır.

Tablo 6. Kazıklı radye temelde kazıklara etkiyen yükler

Kazık No	Kesme Kuvveti (kN)	Eğilme Momenti (kNm)
1	1685,74	14688,47
2	1700,20	14858,39
3	1663,31	14453,60
4	1694,55	14787,06
5	1517,16	13130,54
6	1530,18	13259,93
7	1447,07	12527,00
8	1392,92	11794,96
9	1335,10	11557,35
10	1352,67	11681,46
11	1215,54	10497,50
12	1225,76	10605,92



Şekil 43. Kazıklardaki normal kuvvet ve oturma değerlerinin grafik ile gösterimi

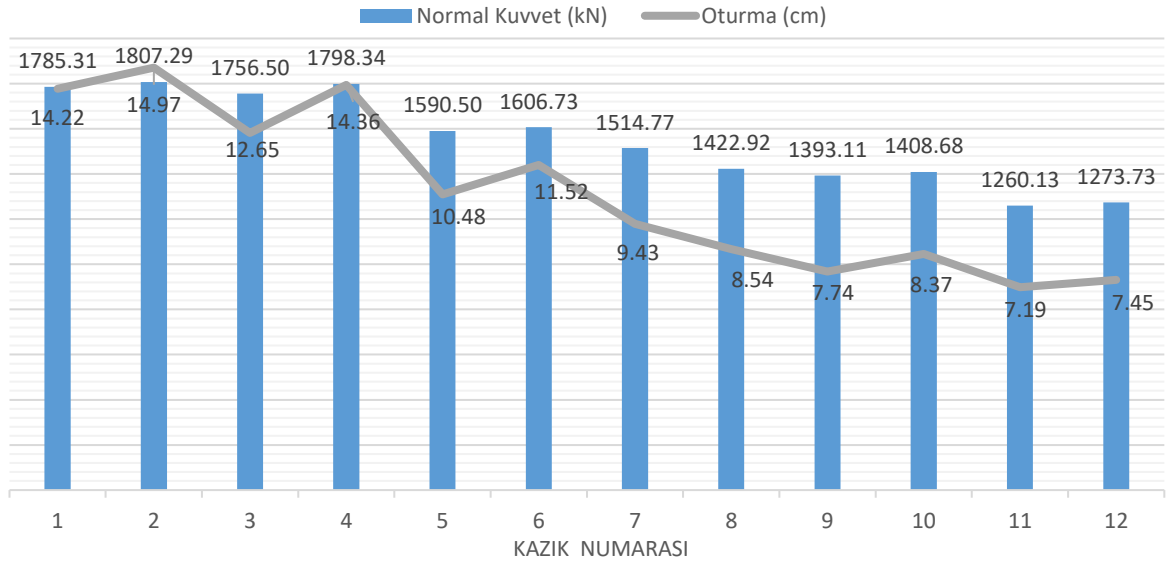
3.2.3. Kazık ve Radye Bağlantısının 40 cm Yastık Elemanla Kesildiği Durumda Kazıklara Etkiyen Yükler ve Oturmalar

Kazıklı radye temel ve kazıklı radye temel bağlantısının 40 cm yastık elemanla kesildiği uygulamalarda her bir kazığa etkiyen kuvvetler Tablo 6 ve Tablo 7 kıyaslandığında, kazıklı radye temelde kazıklara etkiyen yüklerin, radye bağlantısının yastık elemanla kesildiği durumdaki yüklere göre daha fazla olduğu görülmektedir. Yastık elemanın kazıklara etkiyen kesme kuvvetlerini ve eğilme momentlerini azalttığını kanıtlamaktadır.

Tablo 7. Kazık ve radye bağlantısının 40 cm yastık elemanla kesildiği durumda kazıklara etkiyen yükler

Kazık No	Kesme Kuvveti (kN)	Eğilme Momenti (kNm)
1	1770,02	14228,92
2	1785,21	14404,10
3	1746,47	13999,31
4	1779,27	14332,77
5	1593,02	12676,25
6	1606,68	12805,64
7	1519,43	12072,71
8	1462,56	11340,67
9	1401,86	11103,06
10	1420,31	11227,17
11	1276,32	10043,21
12	1287,05	10151,63

Normal kuvvetin etkisinde kazıkların oturma miktarları Şekil 43 ve Şekil 44’de verilmiştir. Bu veriler incelendiğinde, kazıklı radyede bağlantısız kazıklı radye temele göre her bir kazığa etkiyen normal kuvvet daha fazladır. Bu kuvvetin etkisiyle orantılı olarak da kazıklı radye temelde kazıkların oturma miktarların da daha fazla olduğu görülmektedir. Bağlantısız durumda kazıklardaki maksimum oturma 2 numaralı kazıkta 14,97 cm’dir. Bağlantılı durumda ise bu değer 15,36 cm’dir. Burada yastık kullanımının oturmaya azalttığı sonucuna varılır.



Şekil 44. Kazıklardaki normal kuvvet ve oturma değerlerinin grafik ile gösterimi

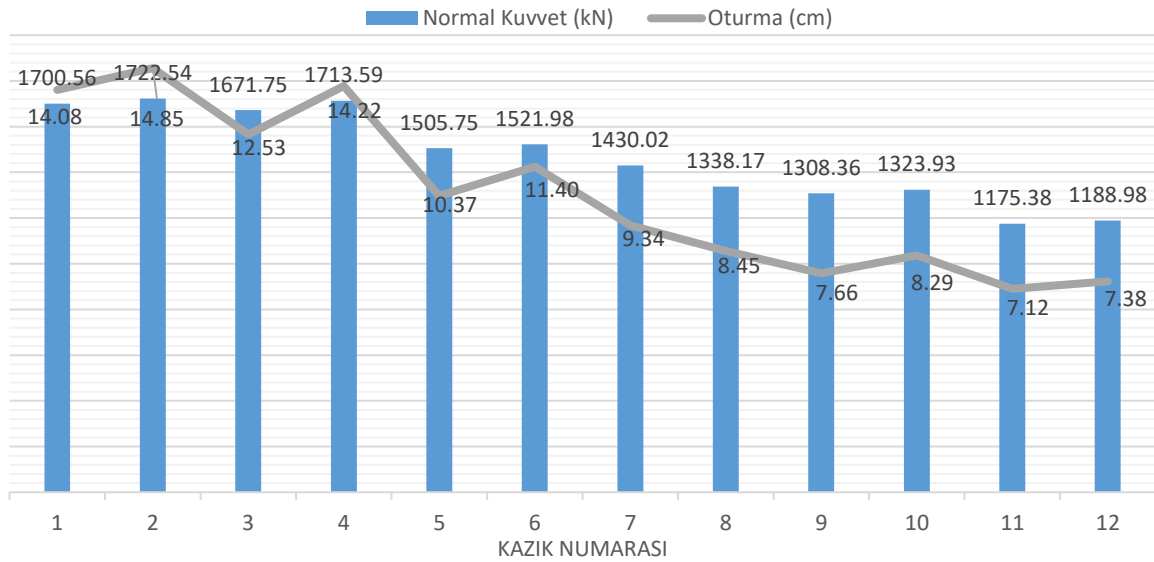
Yastığın farklı oturmalara etkisini araştırmak için yapılan bu çalışmada iki analiz durumu kıyaslandığında bağlantılı radye temeldeki kazıklardaki en fazla ve en az oturma miktarı arasındaki fark 7,95 cm iken bağlantısız kazıklı radye temelde bu fark yaklaşık 7 cm'dir. Bu farklar kazık radye bağlantısının, yastık elemanla kesilmesinin kazıklardaki farklı oturmaları yaklaşık %12 azalttığını gösterir.

3.2.4. Kazık ve Radye Bağlantısının 30 cm Yastık elemanla Kesildiği Durumda Kazıklara Etkiyen Yükler ve Oturmalar

Yastık kalınlığının kazıkların davranışına etkisini inceleyen çalışmaya göre 30 cm yastık kullanıldığında kazıklara etkiyen yüklerde belirgin bir farklılık görülmemektedir fakat 30 cm etkisinde kazıklarda 40 cm yastığa göre, yapı ve kazıklara etkiyen yüklerin aksine kazıklara etkiyen yüklerde az da olsa azalma olduğu sonucu bu grafikten çıkarılan sonuçtur.

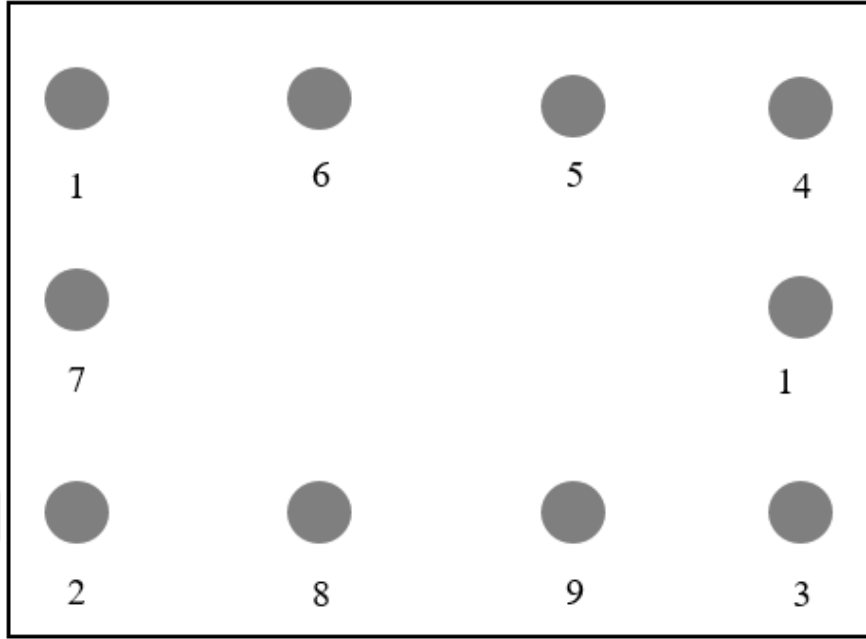
Tablo 8. Kazık ve radye bağlantısının 30 cm yastık elemanla kesildiği durumda kazıklara etkiyen yükler

Kazık No	Kesme Kuvveti (kN)	Eğilme Momenti (kNm)
1	1766,6	13553,46
2	1781,81	13728,64
3	1743,14	13323,85
4	1775,88	13657,31
5	1589,94	12000,80
6	1603,62	12130,18
7	1516,54	11397,26
8	1459,78	10665,22
9	1399,19	10427,60
10	1417,60	10551,72
11	1273,89	9367,75
12	1284,60	9476,17



Şekil 45. Kazıklardaki normal kuvvet ve oturma değerlerinin grafik ile gösterimi

3.2.5. Kazık ve Radye Bağlantısının 40 cm Yastık Elemanla Kesildiği ve Kazık Sayısının Azaltıldığı Durumda Kazıklara Etkiyen Yükler ve Oturmalar



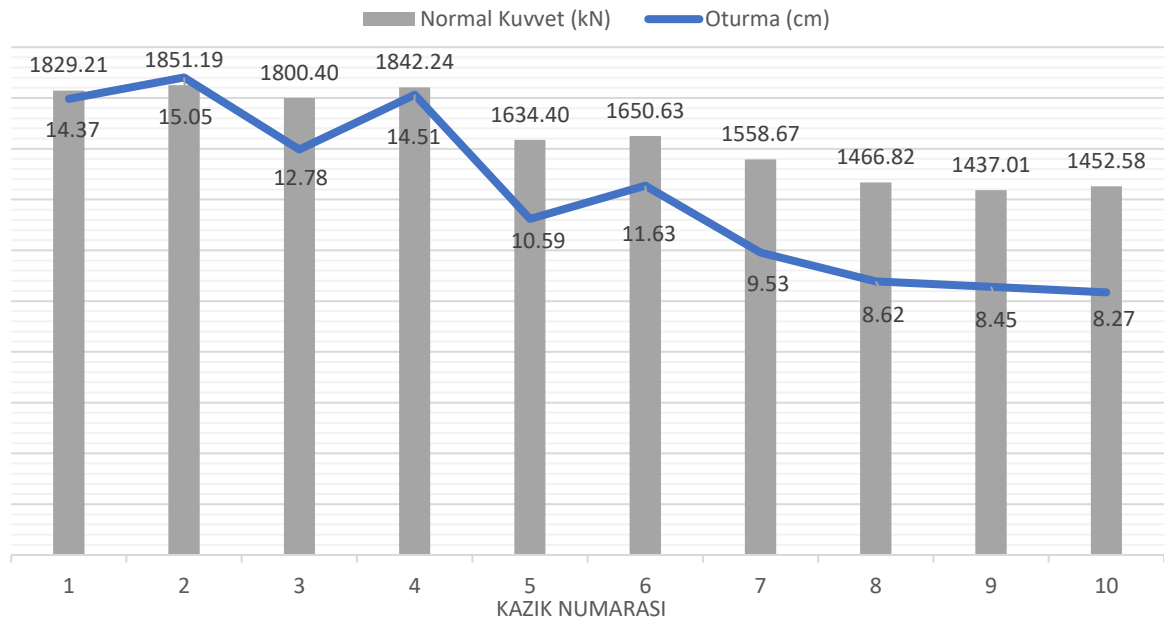
Şekil 46. Kazık sayısının azaltıldığı durumda kazık yerleşimi

Kazık sayısının azaltılmasının etkisini araştırmak için yapılan analiz sonuçlarına göre, Tablo 9’da görüldüğü üzere kazık sayısının azaltılması durumunda kazıklara gelen yük daha az kazığa dağıtıldığı için Tablo 7’deki verilerle kıyaslandığında her bir kazığa gelen yük miktarının arttığı görülmektedir.

Tablo 9. Kazık ve radye bağlantısının 40 cm yastık elemanla kesildiği ve kazık sayısını azaltıldığı durumda kazıklara etkiyen yükler

Kazık No	Kesme Kuvveti (kN)	Eğilme Momenti (kNm)
1	1814,27	14578,80
2	1829,84	14753,98
3	1790,10	14349,19
4	1823,75	14682,65
5	1632,85	13026,14
6	1646,77	13155,52
7	1557,41	12422,60
8	1499,13	11690,56
9	1454,16	11452,94
10	1410,53	11577,06

Şekil 44 ve Şekil 47’deki verilerden de normal kuvvet etkisinde kazıklardaki oturmalar, kazık sayısının azaltıldığı durumda daha fazla olduğu fakat belirgin bir fark olmadığı sonucu çıkarılmaktadır.

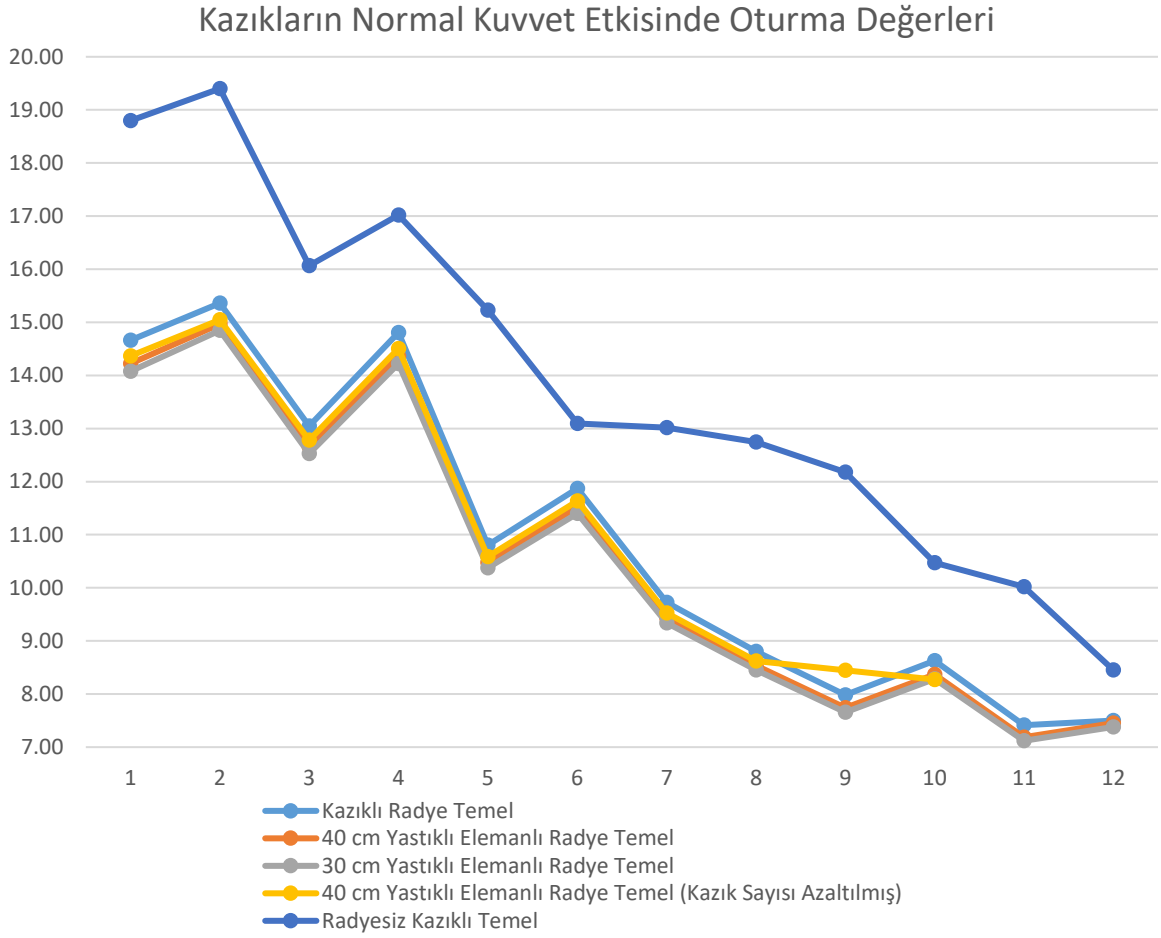


Şekil 47. Kazıklardaki normal kuvvet ve oturma değerlerinin grafik ile gösterimi

Tablolarda kazıklara gelen yükler incelendiğinde; yastık kazıkların yük taşıma mekanizmasının değişmesinde önemli rol oynamaktadır. Yapılan çalışmada bağlantısız kazıklı radye temelin, kazıkların radyeyle bağlantısı olmadığı için normal kazıklı radyeden farklı davranış gösterdiği görülmüştür. Yastık kazıkta oluşan yüksek gerilmeleri ve kesme kuvvetini azaltıcı etki göstermektedir. Yastığın kazıklı radye temellerde kayma ve eksenel gerilme etkisine bakıldığında kazığın gerilmesini azalttığı görülmüştür.

Beş farklı tasarım durumu kıyaslamasında dikkat çeken farklardan biri kazıkların konumuna göre kazıklara etkiyen maksimum kuvvetler değişkenlik göstermesidir. Köşe kazıklar her analizde maksimum yükleri taşıırken bunları yan kazıklar takip etmektedir. Orta kazıkların ise daha az yük taşıdığı değerlerden anlaşılmaktadır.

Beş farklı tasarım durumuna göre oturmaların kıyaslandığı Şekil 48'e göre radyenin ve yastık kullanımının kazıklardaki oturmayı azalttığı etkisi belirgin olarak görülmektedir. Ayrıca diğer grafikler de göz önünde bulundurularak yapılan değerlendirmeye göre kazıklı radye temel durumunda kazıkların farklı oturmaları yastıklı duruma göre daha belirgindir. Sonuç olarak yastık kullanımının kazıklardaki oturma değerleri arasındaki farkı yani kazıklardaki diferansiyel oturmaları azalttığı sonucuna varılmaktadır.



Şekil 48. Kazıkların beş farklı tasarım durumunda oturma değerlerinin değişimi

3.3. Yapıya Etkiyen Maksimum Yükler

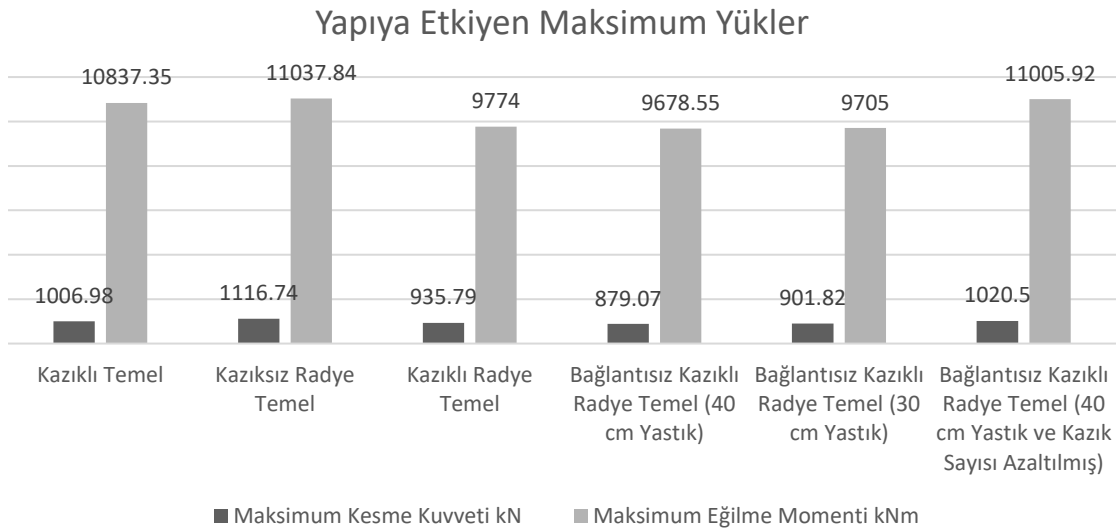
Yapıya etkiyen maksimum yükler, yapıda maksimum yükün etki ettiği bir taşıyıcı elemandan alınmış olup bu taşıyıcı eleman radye temelin hemen üstünde yer alan düşey bir eleman olan kolondur. Bu kolona etkiyen maksimum yükler ise kazıklı temel, kazıksız radye temel, kazıklı radye temel, bağlantısız kazıklı radye temel (40 cm), bağlantısız kazıklı radye temel (30 cm), bağlantısız kazıklı radye temel (40 cm yastık ve kazık sayısı azaltılmış) durumlarında ayrı ayrı analiz edilmiş ve incelenmiştir.

Grafikte üst yapıda düşey bir elemana etkiyen yükler altı farklı uygulamada farklı sonuçlar vermiştir. Bu düşey elemana en fazla yük kazıksız radye temel uygulamasında etkimıştır. Kazık kolon bağlantısının sadece yatay kirişlerle sağlandığı kazıklı temel uygulaması ile sadece radye temel uygulamasının kıyaslandığı ilk iki durumda kazıkların

yapıya etkiyen yükleri azaltmadaki etkisini göstermiştir. Kazıklı temel ve kazıklı radye temeli kıyaslandığı 1. ve 3. durumda ise radyenin hem kesme kuvvetini hem de eğilme momentini azalttığı görülmektedir.

Yastık ile kazık radye bağlantısının kesildiği 4. durumun yapıya etkiyen yüklerin en az olduğu durum olduğu grafikten çıkarılan en önemli sonuçtur. Yastık kalınlığının azaltılması durumunda yani 5. durumda, 4. duruma göre düşey elemana etkiyen yüklerin bir miktar arttığı gözlemlenmiştir. Burada daha kalın yastık kullanımının yükleri azaltıcı etkisinin daha fazla olduğu söylenebilir.

Yastık kalınlığının 40 cm olduğu fakat kazık sayısının azaltıldığı durumda yükler incelendiğinde, neredeyse kazıksız radye temel yani 2. uygulamadaki yük değerlerine yaklaşır yönde olduğu görülmüştür. Buradan kazık sayısının yükleri azaltmadaki etkisinin çok daha önemli olduğu sonucuna varılmaktadır. Yani yastık kullanıldığında kazık sayısı azaltılabilirliğinin değerlendirilmesi yapıldığında bu uygulamadaki sonuçlar kazık sayısı yastık kullanımı durumunda azaltılabilir denebilmesi için yeterli değildir.



Şekil 49. Yapıya etkiyen maksimum yükler

3.4. Radye Temele Etkiyen Maksimum Yükler

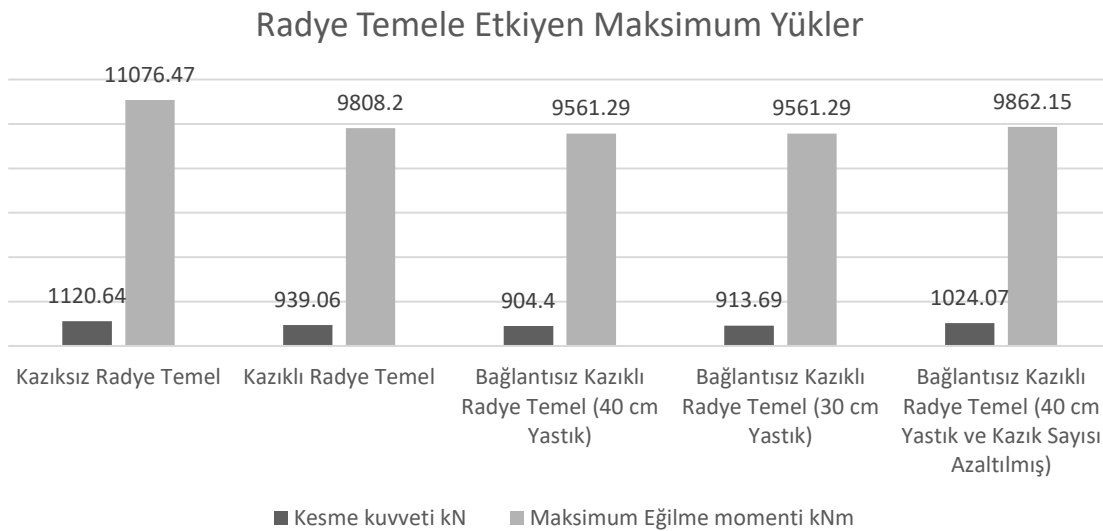
Radye temele etkiyen maksimum yükler ise kazıksız radye temel, kazıklı radye temel, bağlantısız kazıklı radye temel (40 cm), bağlantısız kazıklı radye temel (30 cm), Bağlantısız

kazıklı radye Temel (40 cm Yastık ve Kazık Sayısı Azaltılmış) durumlarında ayrı ayrı analiz edilmiş ve incelenmiştir.

Grafikte radye temele etkiyen yükler beş farklı uygulamada farklı sonuçlar vermiştir. Radye temele en fazla yük kazıksız durumda etkimiştir. Burada 1. ve 2. durumdaki sonuçlara göre yine kazıkların radyeye etkiyen yükleri azaltma etkisi belirgindir.

Yastık ile kazık radye bağlantısının kesildiği 3. durumun temele etkiyen yüklerin en az olduğu durum olduğu grafikten çıkarılan en önemli sonuçtur. Yastık kalınlığının azaltılması durumunda yani 4. durumda, 3. duruma göre temele etkiyen yüklerin bir miktar arttığı gözlemlenmiştir. Burada daha kalın yastık kullanımının yükleri azaltıcı etkisinin daha fazla olduğu söylenebilir.

Yastık kalınlığının 40 cm olduğu fakat kazık sayısının azaltıldığı durumda yükler incelendiğinde, kazıksız radye temeldeki yani 2. uygulamadaki yüklerden fazla olduğu görülmüştür. Buradan kazık sayısının yükleri azaltmadaki etkisinin çok daha önemli olduğu sonucuna varılmaktadır. Yani yastık kullanıldığında kazık sayısı azaltılabilirliğinin değerlendirilmesi yapıldığında bu uygulamada bunun için sonuçlar azaltılabilir denebilmesi için yeterli değildir.



Şekil 50. Radye temele etkiyen maksimum yükler

Radye temel zeminin taşıma kapasitesini artırır fakat deprem anında gerçekleşen farklı oturmaları engellemede yetersiz olabilir. Farklı oturmaları engellemek için

yerleştirilen kazıklara yükler eşit dağılımlı olarak gelmez dolayısıyla zemin etkileşiminde her kazık farklı davranış gösterir. Farklı davranışlar zeminde farklı oturmalar olduğunu gösterir. Radye kazık bağlantısı radyeyi doğrudan etkileşimin bir parçası yaparken radye kazık bağlantısının yastık elemanla kesilmesi durumunda radyenin yükler paylaşılmış olur ve radyede gerçekleşen eğilme momentleri azalır. Yastık eleman radyenin kazıklarla bağlantısını kestiği için radyenin zeminle doğrudan etkileşimi kesilmiş olur. Radyenin bağlantısının kesilmesi yapı temelini daha çok üst yapıyı taşıyan bir eleman haline getirir. Yastık eleman radyeye iletilen sismik etkileri azalttığı için üst yapıya gelen deprem yükü etkisi azalır.

Kazıkların olmadığı durumda yapıya gelen maksimum yükler ve radye temele gelen maksimum yüklere bakıldığında ortak bir değerlendirme yapılacak olunursa kazıkların yapıya ve radye temele gelen maksimum kuvvetleri engellemede etkisinin belirgin olduğu ve taşıma kapasitesine etki ettiği görülmektedir. Yastıklı durumla kıyaslama yapıldığında ise yastığın taşıma kapasitesine katkı sağladığı sonucuna varılmaktadır. Yastıklı durumda kazık sayısının azaltıldığı durum ise bize kazıkların taşıma kapasitesinin etkisinin yastığın tek başına etkili olmayacağını göstermektedir.

Yastık kalınlığının değerlendirilmesi yapılırken ise tasarımların genelde 30 ve 40 cm yapılan ve analizlerde de bu değerlerin kullanıldığı bu çalışmadaki sonuçlara göre yastık kalınlığının taşıma kapasitesine etkisinde belirgin bir farklılığın olmadığı görülmektedir.

Tasarım yapılırken maksimum taşıma kapasitesi göz önüne alınarak daha ekonomik bir tasarım için yastık kullanılması durumunda taşıma kapasitesine göre 30 cm yastık kullanılması uygun olabilir ve yine farkın az olduğu durumlarda kazık sayısının azaltılabileceği sonucuna varılabilir.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Ülkemizin büyük çoğunluğunun fay hatları üzerinde olması, birçok bölgenin riskli deprem etkileri altında olması ve zeminin çeşitlilik göstermesi depreme dayanıklı yapı tasarımının önemini göstermektedir. Özellikle zeminin risk oluşturduğu bölgelerde deprem sırasında zemin sıvılaşması yapılarda göçmeye sebep olmaktadır. Bu göçmeleri engellemek için yumuşak zeminlerde yapı temelinde kazık kullanılmaktadır. Kazık ve radye tasarımı bina deprem davranışını önemli ölçüde etkiler. Kazık tasarımının gerektiği durumlarda yapı maliyeti artmaktadır fakat ilerleyen teknolojiyle birlikte farklı uygulamalar alternatif çözümler sağlamaktadır.

Bu tez kapsamında son yıllarda kazıklı radye imalatlarında kazık ile radyenin bağlantısının granüler yastık elemanla kesildiği tasarım durumunun dinamik etkiler altında yapı ve kazık davranışına etkisi araştırılmıştır. Yüksek katlı üst yapı ve zemin katı eleman olarak SAP2000 paket programında modellenmiştir. Zemin sınıfı ZD olan bölge üzerinde analizler yapılmak üzere deprem raporu oluşturulmuştur. Deprem yükleri etkisi altında davranışlarını incelemek için 1999 yılında Düzce’de meydana gelen depreme ait yükler kullanılmış olup SAP2000 programında zaman tanım alanında analiz yapılmıştır. Yapılan çalışmada yapı zemin etkileşimi sırasındaki dinamik analizler için çeşitli parametreler kullanılarak yastık elemanın yapıya ait şekil değiştirmelere ve gerilmelere etkisi irdelenmiştir.

Esas analiz parametrelerine göre, kazıksız tasarım durumunda yapılan analizde kazıkların yapıya ve temele gelen yükleri önemli ölçüde azalttığı görülmektedir. Radyenin tek başına yeterli olmadığı ve dinamik yapı zemin etkileşim etkisi sırasında kazık kullanımının gerekli olduğu ve yapı güvenliğini önemli derecede arttırdığı sonucuna varılır.

Diğer bir parametre olan ve tezin amacını oluşturan yastık kullanımının etkisini araştırmak için yapılan analizler ise kazıkla radye bağlantısının granüler yastık elemanla kesilmesinin hem yapıya ve radyeye etkiyen hem de kazıklara etkiyen yükleri azaltma etkisi belirgindir. Ayrıca yastık kullanımının kazıklardaki farklı oturmaları azalttığı ve kazık davranışının, taşıma gücünün daha etkin olmasını sağladığı görülmüştür.

Kazıkların imalatlarının, binanın toplam maliyetine etkisi fazladır. Yastık kullanımı, kazıkların çapının veya sayısının azaltılmasını mümkün kılabilir. Bu da yapının toplam maliyetinin azalmasına katkı sağlar.



5. KAYNAKLAR

- Ahmadi, M., 2020. Inelastic Static (Pushover) Analysis For Estimating Seismic Demands of Rc Buildings Including Soil-Structure Interaction, M.Sc. Thesis, Sakarya University Institute Of Science And Technology, Sakarya, Turkey.
- Akgül, A., 2014. Nonlinear Sıvı-Yapı-Zemin Etkileşiminin Modellenmesi ve Silindirik Tankların Dinamik Davranışlarının Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Akkaya, E., 2013. An Investigation of Seismic Behaviour of Multi-Span Bridges on Shallow Foundations with Soil-Structure Interaction Methods, M.Sc. Thesis, The Graduate School of Natural And Applied Sciences of Middle East Technical University, Ankara, Turkey.
- Al-Dayyeni. N.H.M., 2019. A Study on Modeling Soil-Structure Interaction Effects in Buildings, M.Sc. Thesis, The Graduate School of Natural And Applied Sciences of Atılım University, Ankara, Turkey.
- Alver, O., 2015. A Study on Optimization of Piled Rafts. M.Sc. Thesis, Dokuz Eylül University Graduate School of Natural and Applied Sciences, İzmir, Turkey.
- Ata, A., Badrawi, E. ve Nabil, M., Numerical, 2014. Analysis of Unconnected Piled Raft With Cushion, Ain Shams Engineering Journal, December.
- Bahçecioğlu, T., 2011. Parallel Solution of Soil-Structure Interaction Problems on Pc Clusters, M.Sc. Thesis, The Graduate School of Natural And Applied Sciences of Middle East Technical University, Ankara, Turkey.
- Birand, A.A., 2007. Kazıklı Temeller, 2. Baskı, Teknik Yayınevi, Ankara.
- Bowles, E. J., 1982. Foundation Analysis and Design, McGraw-Hill Book Company, Newyork.
- Doğangün, A., 2013. Betonarme Yapıların Hesap ve Tasarımı, 10. Baskı, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Dumanoğlu, A. A., 1978. Ağır Yapıların Dinamik Analizinde Matematik Model Seçimi, Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye, 16-24.
- Ergün, Ö., 2018. Seismic Fragility Curve Development of an Onshore Wind Turbine Incorporating Soil Structure Interaction Effects, M.Sc. Thesis, Boğaziçi University Institute for Graduate Studies in Science and Engineering, İstanbul, Turkey.
- Faizan, A.A., 2017. Demiryolu Köprülerinin Yapı-Zemin Etkileşimi Altında Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, Türkiye.
- Figuerola, F.J., 2010. Performance Analysis of a Retrofitted Existing Reinforced Concrete Structure Considering Soil-Structure Interaction, M.Sc. Thesis, İstanbul Technical University Institute of Science and Technology, İstanbul, Turkey.

- Forcellini D., 2021. Analytical Fragility Curves of Pile Foundations with Soil-Structure Interaction (SSI), *Geosciences*, 11, 66.
- Kılıçer, S., 2016. Yapı Zemin Etkileşiminin Betonarme Yapıların Tasarımına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Turkey.
- Kramer, S., 2003. Geoteknik Deprem Mühendisliği, Gazi Yayınevi, Ankara.
- Lysmer, J. ve Kuhlemeyer, L., 1969. Finite Dynamic Model for Infinite Media, Journal of The Engineering Mechanics Division Proceedings of The American Society of Civil Engineers, August, 859-877.
- Lysmer, J., 1979. Seismic Site and Soil Structure Interaction Analysis, Earthquake Engineering Research Center, University of California.
- Mahmood, M., Al-Wakel, S. ve Abdulwahhab, I., 2020. Three-Dimensional Analysis for Piled Raft Machine Foundation Embedded In Sand, MATEC Web Of Conferences, Baghdad, 162,01023.
- Nakai, S., Kato, H., Ishida, R., Mano, H. ve Nagata, M., 2004. Load Bearing Mechanism of Piled Raft Foundation During Earthquake, Proceedings Third UJNR Workshop on Soil-Structure Interaction, March 29-30, Menlo Park, California.
- Özel, F., 2019. Comparison of Microtremor Measurements and 3- D Soil Structure Interaction Analysis for A Historical Masonry Arch Bridge Under Near-Fault and Far-Fault Earthquakes, M.Sc. Thesis, Gaziantep University Graduate School of Natural & Applied Sciences, Gaziantep, Turkey.
- Özgan, K., 2000. Değiştirilmiş Vlasov Modelini Kullanarak Elastik Zemine Oturan Kirişlerin Serbest Titreşim Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Turkey.
- Özşam, C., 2019. Analysis Of Steel Frames with Soil Structure Interaction Under Seismic Loads, M.Sc. Thesis, University of Gaziantep Graduate School of Natural & Applied Sciences, Gaziantep, Turkey.
- Pasternak, P., L., 1954. On a New Method of Analysis of an Elastic Foundations by means of Two Foundation Constants, Gosudarstvennoe Izdatelstvo Literaturi po Stroitelstvui Arkhitekture, Moskov, Russia.
- Phuyal, S., 2020. Effectiveness of Ground Improvement Around Piled-Raft for Tall Wind Turbines in Weak Soil: Analytical and Finite Element Analyses, M.Sc. Thesis, Clemson University Degree Master of Science Civil Engineering, USA.
- Popa, C.C. And Muşat, V., 2018. Three Dimensional Finite Element Analysis of Foundation Behavior on Soil Reinforced with Rigid Inclusions, Buletinul Institutului Politehnic Din Iaşi, 64(68).
- Sarı, M., 2020. Yapı-Zemin Etkileşiminin Betonarme Sanayi Bacalarının Dinamik Davranışına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Rize, Türkiye.

- Sarıkaya, O., 2018. Tünel-Yapı-Zemin Etkileşiminin Zemin Büyütmesine Etkilerinin Nümerik Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Sesli, H., 2013. Zemin Sınır Şartlarının Yapı-Zemin Etkileşim Sistemlerinin Dinamik Davranışına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye.
- Söylemez, Ş., 2015. Behavior and Design of Piled Raft Foundations Under Dynamic and Static Loading, M.Sc. Thesis, Boğaziçi University Institute for Graduate Studies in Science and Engineering, İstanbul, Turkey.
- Toğrol, E., Tan, O., 2009. Kazıklı Temeller, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, 2018. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Ankara.
- Vallabhan, C. V. G. ve Das, Y. C., 1988. Parametric Study of Beams on Elastic Foundations, Journal of Engineering Mechanics, 114,12, 2072-2082.
- Vlasov, V. Z. ve Leont'ev, N. N., 1966. Beams, Plates and Shells on Elastic Foundations, Translated from Russian, Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem.
- Xie Y., Chi S. ve Wang M., 2020. Influence of Variable Rigidity Design of Piled Raft Foundation on Seismic Performance of Buildings, Research Article, Mathematical Problems In Engineering.
- Xie Y., Chi S. ve Wang M., 2019. Optimization Method of Reducing the Differential Settlements of Piled Raft Foundations Based on Pile-to-Pile Interaction Theory, Research Article, Advances in Civil Engineering.
- Zhao, Y., Gong, W., Ling, X., Li, P., Wang, Z. ve Fan, H., 2021. Model Test on The Vibration Reduction Characteristics of A Composite Foundation With Gravel Cushion Under Different Seismic Wave Amplitudes, Research Article, Shock And Vibration.
- Zhu, X., 2017. Analysis of The Load Sharing Behaviour and Cushion Failure Mode for A Disconnected Piled Raft, Research Article, Advances in Materials Science and Engineering.

ÖZGEÇMİŞ

Berna EROĞLU, İlk ve orta öğrenimini Bayburt'ta tamamladı. 2012 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başladı. 2016 yılında buradan mezun oldu. 2018 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği bölümünde yüksek lisans eğitimine başladı. 2017-2019 yılları arasında özel bir yapı denetim şirketinde kontrol mühendisi olarak çalıştı. 2021 yılında İLBANK Genel Müdürlüğü Uluslararası İlişkiler Daire Başkanlığı'na inşaat mühendisi olarak atandı. Buradaki görevine devam etmektedir.