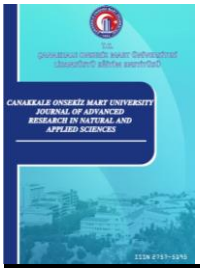
e-ISSN 2757-5195



Çanakkale Onsekiz Mart University
Journal of Advanced Research in Natural and Applied Sciences
Open Access

doi.org/10.28979/jarnas.1147638 2023, Cilt 9, Sayı 1, Sayfa: 167-182 dergipark.org.tr/tr/pub/jarnas

Çok Katlı Betonarme Bir Binanın Altsistem Yaklaşımı İle Analizi

Hüseyin Taştan[1,*], Mehmet Özgür[2]

[1]Çanakkale Savaşları Gelibolu Tarihi Alan Başkanlığı, Çanakkale, Türkiye
[2]İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Çanakkale, Türkiye

Makale Tarihçesi
Gönderim: 01.08.2022
Kabul: 22.10.2022
Yayım: 05.03.2023

Araştırma Makalesi

Öz – Türkiye, bulunduğu coğrafyada ki aktif faylar sebebiyle sıklıkla büyük depremler ile yüzleşmekte, can kayıpları yaşanmakta ve maddi hasarlar oluşmaktadır. Bu bakımdan yapı tasarımında, deprem kuvvetini etkileyebilecek tüm parametrelerin göz önünde bulundurulması ve hesaplamalara dahil edilmesi oldukça önemlidir. Bu çalışmada, kazıklı temel sistemine sahip betonarme bir yapı ile temel zemini arasındaki etkileşim incelenmiştir. Zemin-kazık-yapı etkileşimi, altsistem yaklaşımı "Yöntem I" ile hesaplamalara yansıtılmış olup üstyapı, temel ve kazıklarda iç kuvvet, yer değiştirme ve şekil değiştirme talepleri elde edilmiştir. Sonuçları mukayese edebilmek için aynı yapı, kazıklara tanımlanan yatay yatak katsayısı yayları ile tasarım spektrumu etkisinde analiz edilmiş ve son olarak ise etkileşimsiz durumda ki sonuçlar için yine aynı yapı zemine ankastre mesnetli şekilde modellenerek hesaplama yapılmıştır. Her üç yöntemden elde edilen sonuçlar mukayese edilerek zemin-kazık-yapı etkileşimi irdelenmiştir.

Anahtar Kelimeler *– Altsistem yaklaşımı, yöntem I, zemin-kazık-yapı etkileşimi*

Analysis of a Multi-Storey Reinforced Concrete Building with Substructure Approach

[1]Çanakkale Wars Gallipoli Historical Site Presidency, Çanakkale, Türkiye
[2]Departman of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Çanakkale Onsekiz Mart University, Çanakkale, Türkiye

Article History
Received: 01.08.2022
Accepted: 22.10.2022
Published: 05.03.2023

Research Article

Abstract – Due to the active faults in its geography, Turkey is frequently faced with major earthquakes, loss of life and material damage occur. In this respect, it is very important to consider all the parameters that can affect the earthquake force in the building design and to include them in the calculations. In this study, the interaction between a reinforced concrete structure with a pile foundation system and the foundation soil was investigated. The soil-pile-structure interaction has been reflected in the calculations with the subsystem approach "Method I" and the internal force, displacement and deformation demands of the superstructure, foundation and piles have been obtained. In order to compare the results, the same structure was analyzed under the influence of the design spectrum with the horizontal bearing coefficient springs defined for the piles, and finally, the same structure was modeled with a fixed support on the ground for the results in the non-interacting condition. The results obtained from all three methods were compared and the soil-pile-structure interaction was examined.

Keywords *– Substructure method, method I, soil-pile-structure interaction*

[1] hsyn-tastan@hotmail.com
[2] mehmetozgur@comu.edu.tr
*Sorumlu Yazar

1. Giriş

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 (TBDY 2018) ile zemin-kazık-yapı etkileşimi analiz yöntemleri resmi olarak yönetmelikte yerini almış ve uygulamaya girmiş durumdadır. Yapısal analizlerin zemin etkisinden bağımsız olarak gerçekleştirilmesi eksik/hatalı bir yaklaşımdır. Nitekim TBDY 2018 Bölüm 16'da, zemin-kazık-yapı etkileşimi hesaplamalarının uygulama esasları ve hangi şartlar altında zorunlu olduğu açıklanmıştır. Her ne kadar TBDY 2018'de teorik olarak zemin-kazık-yapı etkileşimi ile ilgili hususlara yer verilmiş olsa da uygulamaya yönelik örnekler (özellikle Yöntem I) ve bu alandaki araştırma sayısı oldukça azdır. Zemin-kazık-yapı etkileşimi hesap yöntemleri, diğer yapısal analiz yöntemleri ile karşılaştırıldığında, tamamlanan araştırma ve uygulama sayısı açısından oldukça bakir bir alan olup bu alandaki bilimsel çalışmaların artırılması, zemin-kazık-yapı etkileşimi hesap yöntemlerinin doğru uygulanması açısından büyük önem arz etmektedir. Türkiye'de yüksek yapı stoğunun büyük bir kısmının aktif fay güzergâhlarında kalıyor olması, zemin-kazık-yapı etkileşiminin yapısal davranış parametreleri üzerindeki etkisinin doğru belirlenmesini hayati bir ihtiyaç kılmaktadır (Öcal ve İnce, 2012).

Keshishian (2001), Doktora tez çalışmasında, büyük açıklıklı sistemler için (köprü vb.), yapı-zemin etkileşiminin analiz sonuçları üzerinde ki etkilerini incelemiştir. Yapı-zemin etkileşimini dikkate alarak yaptığı hesaplamalar neticesinde, zemin ortamının deprem yer hareketinin ivme genliklerinde artırıcı ya da azaltıcı etkileri olabileceği, bu sebeple yapı-zemin etkileşiminin sisteme etkiyecek dinamik yükleri doğrudan etkileyeceği ve hesaplamalarda dikkate alınması gerektiği hususlarını belirtmiştir.

Mamuk (2010), Yüksek Lisans tez çalışmasında, üstyapı ile temel zemini arasındaki etkileşimi incelemiştir. Çalışmaları neticesinde, zemin-yapı etkileşimi modelinin, zemini rijit kabul eden yaklaşımdan farklı olduğunu, etkileşimli modelde periyotların, gerilmelerin, iç kuvvetlerin zemin özelliklerine göre değiştiğini, yapı periyodunun rijit zeminli modele göre daha yüksek olduğunu ve etkileşimin yapıya etkiyen deprem kuvvetini değiştirdiğini ifade etmiştir.

Anderson, Carey ve Amin (2011), büyük ölçekli ağır sanayi yapılarının varlığının yapı-zemin etkileşimi kapsamında yakın civardaki diğer binalar üzerinde oluşturacağı etkileri incelemişlerdir. Çalışmaları sonucu, yapı-zemin etkileşiminin varlığına bağlı olarak çevre yapıların bazılarının yapısal tepkilerinde artış meydana geldiğini belirtmişlerdir.

Aydınoğlu (2011), zayıf zeminlerde inşa edilecek kazık temelli binalarda, zemin özellikleri ve kazıkların etkisi ile deprem dalgalarında meydana gelebilecek değişimi ve bu değişimin etkilerini belirleyebilmek için çalışmalar yapmıştır. Çalışmasında, zemin-yapı etkileşiminin kazık tasarımı bakımından çok önemli bir işlevinin olduğu, kazıkların zayıf zemine oranla çok daha rijit oldukları için büyük etkilere maruz kaldıkları ve dinamik etkiler altında kazıkların doğru tasarlanabilmesi için kinematik etkileşim hesaplamasının zorunlu olması gerektiği hususlarını ifade etmiştir.

Siyahi, Çetin ve Bilge (2013), zemin ortamı ile üstyapı arasındaki etkileşimin hesaplanmasında altsistem yaklaşımının kullanılabileceğini ifade etmişlerdir. Ayrıca sistemin davranışının kinematik etkileşim hesabı ile belirleneceği ve deprem yer hareketinin, kazıklı temel sisteminin rijitliğine göre artma ya da azalma gösterebileceğini belirtmişlerdir.

Pulikanti ve Ramancharla (2013), kazık temellerle desteklenen çerçeve sistemleri incelemişler ve kazıklarda meydana gelebilecek yanal yer değiştirmeleri tespit edebilmek için analitik yöntemler kullanmışlardır. Çalışmaları neticesinde, yapı tepkisinin doğru tayin edilebilmesi için statik ve dinamik durumlar için zemin etkisinin değerlendirilmesi gerektiği, bu etkileri hesaplama noktasında zemin ortamının doğrusal olmayan davranışına dikkat edilmesi gerektiği ve sonlu elemanlar yönteminin oldukça verimli olduğu, zemin ortamını Winkler yayı olarak temsil etmenin doğru sonuçlar verebildiği fakat zeminin pasif direncinin de etkisinin önemli olduğu hususlarını vurgulamışlardır.

Kavitha, P. E., Beena, K. S. ve Narayanan K. P. (2016), yanal yüklü kazıklar için zemin-yapı etkileşimi problemini incelemişlerdir. Yükleme türü ve analiz yöntemlerinin, zemin davranışını tahmin etmede önemli rol oynadığı, yanal yükleme altında zemin yüzeyinin eğiminin zemin-kazık etkileşimini etkilediğini belirtmişlerdir. Ayrıca zemin-kazık sisteminin dinamik yükler etkisi altında analizinde, sistemin doğal frekansının zemin ortamının özelliklerinde ki varyasyonların incelenerek hesaplanması gerektiğini vurgulamışlardır.

Sarıoğlu (2020), Yüksek Lisans tez çalışmasında, zemin-yapı etkileşimli ve etkileşimsiz durumlar için, düşük ve orta yükseklikteki betonarme binalarda, statik ve dinamik analiz yöntemlerini incelemiştir. Çalışmaları sonucunda, görece rijit zeminlerde etkileşimsiz ve etkileşimli modellerdeki deplasman değerlerinin birbirine yakın olduğunu, zemin-yapı etkileşimli durumda, zemin rijitliği düştükçe eksenel yük oranlarının arttığı ve buna bağlı olarak kolon moment kapasitelerinde artış meydana geldiğini belirtmiştir.

Kara, Bozdoğan ve Keskin (2020), düzlem çerçeve sistemlerde zemin-yapı etkileşiminin 4 farklı model üzerinden periyotlar üzerinde ki etkilerini incelemişlerdir. Modelleme de zemin ortamı ve üstyapının birlikte ele alındığı ortak sistem yaklaşımını kullanmışlarıdr. Zemin ortamının yeterli büyüklükte modellenmesi gerektiği aksi halde zemin etkisinin sisteme yeterince yansıtılamayacağı ve zemin ile yapının doğrusal olmayan davranışının hesaplamalarda dikkate alınması gerektiğini belirtmişlerdir.

Yiğit, M. A., Onur, M. İ. ve Balaban, E. (2022), yer altı suyu etkisinde kum ve kil tabakalı zeminlerde teşkil edilmiş tekil/grup kazıklar için Yöntem III kapsamında yapı-kazık-zemin etkileşimini incelemişlerdir. Kazıkların rijitliği arttıkça, kazık-zemin arası rijitlik farkı arttığı için moment değerlerinin arttığını, kazıkların deprem etkisi altında davranışının statik yükler etkisinde ki davranışından farklı olduğu ve bu sebeplerle deprem bölgelerinde yapı-kazık-zemin etkileşiminin hesaplamalara dahil edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir.

Bu çalışmada ise altsistem yaklaşımıyla zemin-kazık-yapı etkileşiminin, yapıların zaman tanım alanında doğrusal olmayan yöntem ile deprem hesabını ne ölçüde değiştirdiği ortaya konulmaya çalışılmıştır. Karşılaştırma yapabilmek için TBDY 2018 Bölüm 16'da açıklanan Yöntem I ve yatak katsayısı yöntemi ile deprem hesabı yapılarak sonuçlar mukayese edilmiştir. Ayrıca sistem zemine ankastre şekilde mesnetlenerek etkileşimsiz duruma ait sonuçlar da elde edilmiştir. Böylelikle zemin-kazık-yapı etkileşiminin üstyapıda daha elverişli bir durum oluşturup oluşturmadığı hususu ve her koşulda üstyapı performansına olumlu etkisi olduğu önyargısı sorgulanmış ve açığa çıkarılmaya çalışılmıştır.

1.1. Zemin-Kazık-Yapı Etkileşimi Analiz Yöntemleri

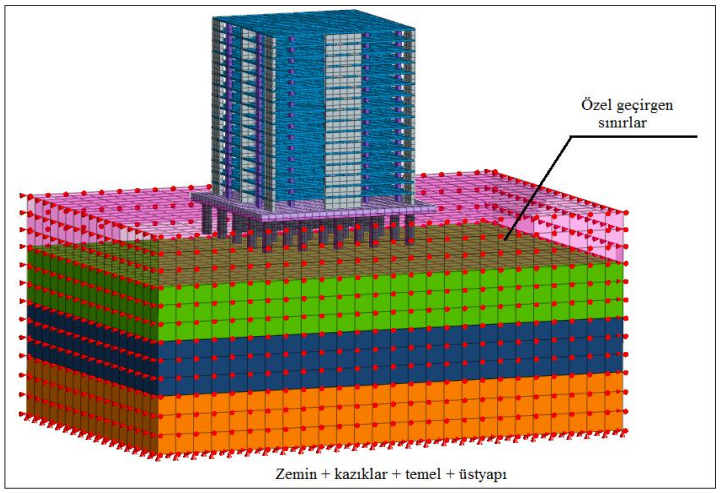
TBDY 2018 Bölüm 16'da zemin-kazık-yapı etkileşimi ile ilgili esaslara yer verilmekte olup burada ortak sistem yaklaşımı ve altsistem yaklaşımı olmak üzere iki hesap yöntemi sunulmaktadır. Bu iki yöntemin uygulama koşulları ise Tablo 1'de yer almaktadır.

Tablo 1
Analiz yöntemlerinin uygulama koşulları (TBDY, 2018)

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

1.1.1. Ortak Sistem Yaklaşımı ile Zemin-Kazık-Yapı Etkileşimi

Ortak sistem yaklaşımında, zemin ortamı, kazıklar, bodrum kutusu (varsa), temel ve üstyapı, 3 boyutlu olarak Şekil 1'de gösterildiği gibi birlikte modellenir (Siyahi, Çetin, ve Bilge, 2013). Zemin ile üstyapının birlikte modellendiği bu yaklaşımda, zemin geometrisindeki doğrusal olmayan formlar, zemine ait mekanik özelliklerin tabakalı zemin ortamı şartlarında ki değişimi ve üstyapı temelinin zemin ortamına gömülü olması durumları 3 boyutlu modellere rahatlıkla yansıtılabilir. Gerek ortak sistem yaklaşımında, gerekse de altsistem yaklaşımında, sisteme tabanda x, y ve z yönlerinde tutulu olacak şekilde, yan kısımlarda ise deprem dalgalarının zemin sınırlarından yansıyarak tekrar yapıya dönmemesi için özel geçirgen sınırlar tanımlanarak zemin sınır koşulları idealize edilir (Kausel, 1988).



Şekil 1. Ortak sistem yaklaşımı hesap modeli

Ortak sistem yaklaşımında, zemin ortamında ki girdi hareketleri modelin tabanında ve yan kısımlarında tanımlanır, bu hareketten etkilenen sistemin harekete karşı gösterdiği tepki, Denklem 1.1'e göre hesaplanır (Karabörk, Deneme, ve Bilgehan, 2010).

$$[M] \cdot \{\ddot{u}\} + [k] \cdot \{u\} = -|[M] \cdot \{\ddot{u}ff(t)\}| \quad (1.1)$$

1.1.2. Altsistem Yaklaşımı ile Zemin-Kazık-Yapı Etkileşimi

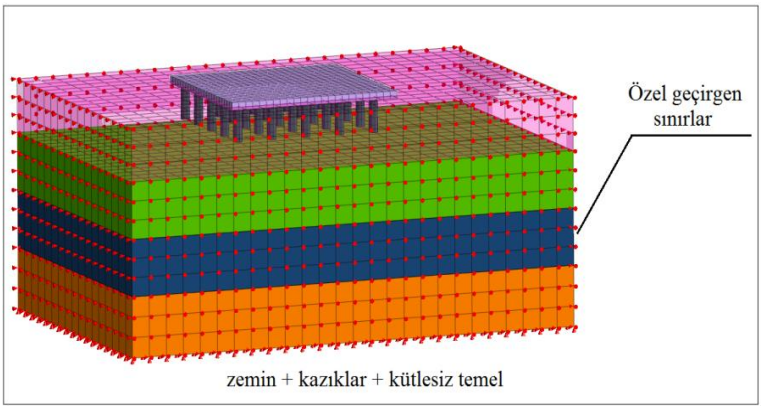
Altsistem yaklaşımında, genel sistem, "zemin ortamı+kazıklar+kütlesiz temel" altsistemi (kinematik etkileşim) ve "kütleli temel+üstyapı" (eylemsizlik etkileşimi) altsistemi olarak iki aşamada ele alınır (TBDY, 2018). Bu hesap yönteminde, yapı temeli geçiş elemanı olup kinematik etkileşim aşamasında hesaplanan parametreler yapı temeli aracılığıyla üstyapıya yani eylemsizlik etkileşimi aşamasına aktarılmaktadır.

a) Altsistem Yaklaşımında Kinematik Etkileşim:

Altsistem yaklaşımı kapsamında iki ana hesap aşamasından ilki olan kinematik etkileşim, üstyapının atalet etkilerinin göz önüne alınmadığı "zemin+kazık+kütlesiz temel" altsistemini temsil etmektedir. Kinematik etkileşim kapsamında en az 11 çift deprem kaydı ile yatay eksenler (x,y) doğrultusunda "zemin+kazık+kütlesiz temel" altsistemine taban kayasından etki ettirilerek yapılacak analizler neticesinde;

- Temel seviyesi deprem kayıtları,
- Kazıklarda ki iç kuvvetler ve şekil değiştirme talepleri (her bir kazıkta 22 analiz ile hesaplanan sonuçların en büyük mutlak değerlerinin ortalaması),

elde edilir (TBDY, 2018). "Zemin+kazık+kütlesiz temel" altsistemini temsil eden örnek bir kinematik etkileşim hesap modeli Şekil 2'de yer almaktadır.



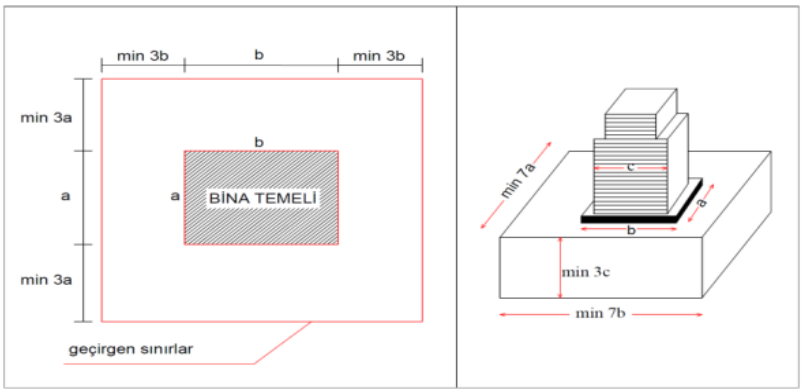
Şekil 2. Kinematik etkileşim sistem hesap modeli

a1) Zemin Ortamı Geometrik Ölçülerinin Belirlenmesi:

Zemin-kazık-yapı etkileşimi analizlerinde, zeminin deprem kaydı üzerinde ki etkisinin hesaplamalara doğru şekilde yansıtılabilmesi için zemin ortamının yeterli büyüklükte modele dahil edilmesi gerekmektedir. Zemin ortamı sonsuz olarak kabul edilmektedir fakat pratikte bu şekilde modelleme yapmak mümkün değildir. Bu sebeple özel geçirgen sınırlara ihtiyaç duyulmaktadır. Dinamik analizlerde zemin etkisinin hesaplara dahil edilebilmesi için TBDY 2018'de zemin ortamının ölçüleri ile ilgili olarak;

- Düşeyde en büyük bina genişliğinin üç katı ve en uzun kazık boyundan,
- Yatayda ise, her iki doğrultuda temel genişliğinin 7 katından daha az olmayacaktır,

denilmekte olup zemin ortamına ait asgari geometrik ölçüler Şekil 3'te yer almaktadır.



Şekil 3. Zemin ortamı için ihtiyaç duyulan asgari geometrik ölçüler

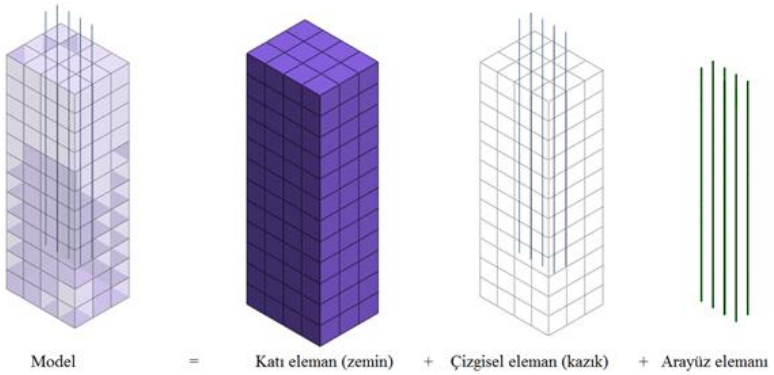
a2) Kazıkların Modellenmesi ve Arayüz Elemanlarının Tanımlanması:

Zemin-kazık-yapı etkileşimli hesaplamalarda, kazıklar çubuk eleman olarak modellenmeli ve kazık ile zemin arasına uygun arayüz elemanlarının tanımlanması gerekmektedir. Bilgisayar destekli sayısal çözümlemelerde, kullanılan yazılımların birçoğu kazıkların modellenmesi ile ilgili olarak üç seçenek sunmaktadırlar. Bunlar;

- Dolu gövdeli katı eleman modeli,
- Kiriş-katı eleman bağlantı modeli,
- Çizgisel eleman modeli

şeklindedir. Dolu gövdeli katı eleman modelinde ve kiriş-katı eleman bağlantı modelinde, sonlu eleman ağı oluşturma işlemleri her kazık için detaylı olarak yapılmak zorundadır. Bu durumda kazık sayısının fazla olduğu büyük modellerde, sonlu eleman ağı çok büyük boyutlarda olacağı için analiz süreleri çok fazla uzamaktadır.

Çizgisel eleman modelinde ise, Şekil 4'te gösterildiği şekliyle zemin ortamı yine 3 boyutlu katı eleman olarak, kazıklar ise 1 boyutlu çizgisel eleman olarak modellenir. Bu yöntemde 3 boyutlu sonlu eleman yoğunluğu azalacağı için analiz süreleri de diğer iki yönteme kıyasla daha kısa olacaktır. Doğrusal olmayan sürtünme-kayma özellikleri, kazık-zemin arayüz elemanlarına tanımlanabilmektedir.



Şekil 4. Çizgisel eleman kazık model

Kazık yüzeyi ile zemin ortamı arasında sürtünme kaynaklı bir kuvvet söz konusudur. Bu sürtünme etkisi, kazıklar ile zemin ortamına ait malzeme rijitliklerine, birim alan ve yüzeye dik yönde etki eden kuvvete bağlıdır. Yay parametreleri; normal direnç modülü (K_n, K_t), kohezyon (c_s, c_n), içsel sürtünme açısı (φ_s, φ_n), çevre uzunluğu, normal yöndeki kuvvet için boşluğa, g (gap) ve efektif gerilmeye bağlı olup referans bağıntılar Tablo 5'te yer almaktadır (Bilal, Fahjan, ve Önen, 2014). Dayanım azaltma faktörü R katsayısı ise, zemin ortamının ve kazık elemanların malzeme özelliğine göre farklı değerler alır. Bu kapsamda R katsayısı;

- Kum zemin - çelik kazık durumu; R = 0,6 - 0,7
- Kil zemin - çelik kazık durumu; R = 0,5
- Kum zemin - betonarme kazık durumu; R = 0,8 - 1
- Kil zemin - betonarme kazık durumu; R = 0,7 - 1

arasında değerler almaktadır (Ünsal, 2017).

a3) Uygun Deprem Kayıtlarının Seçilmesi ve Ölçeklendirilmesi:

Zemin-kazık-yapı etkileşimi hesaplamalarında, Türkiye Deprem Tehlike Haritası (TDTH) aracılığıyla yapının konumuna, yerel zemin sınıfına ve deprem düzeyine bağlı olarak elde edilen tasarım spektrumları kullanılamaz. Bu şekilde üretilen spektrumlar etkileşimin yansıtılmasında yetersiz kalmaktadır. Bunun yerine en az 11 çift (x ve y yönlerinde olmak üzere 22 kayıt) deprem kaydı takımı seçilerek sisteme ayrı ayrı etkitilmelidir.

Deprem kayıtlarının seçimi ve ölçeklendirilmesi ile ilgili hususlar, TBDY 2018 Bölüm 2.5.'te yer almaktadır. 2.5'te, proje alanının depremsellik özelliklerinin araştırılarak ilgili parametrelerin elde edilmesi (fay tipi, büyüklük, fay yırtılma derinliği vb.) ve bu parametreler kullanılarak deprem kayıtlarının seçilmesi istenmektedir. Seçilen kayıtların ölçeklendirilmesi işlemi ise, yine Bölüm 2.5.3'te belirtildiği üzere, TDTH'den elde edilecek proje alanına özgü tasarım spektrumuna uyuşum sağlayacak şekilde yapılmalıdır.

Bu çalışmada deprem kayıtları, TBDY 2018' de belirtilen hususlar çerçevesinde Pasific Earthquake Research Center (PEER) veri tabanından temin edilerek ölçeklendirilmiştir.

a4) Özdeğer Analizi ve Sönüm Sabitleri:

Zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analizlerde kullanılacak sönüm değerlerini belirleyebilmek için öncelikle özdeğer (eigenvalue) analizi yapılarak sistemin kritik titreşim modlarının belirlenmesi gerekmektedir. Böylelikle yüksek kütle katılımının sağlandığı kritik titreşim modlarına karşılık gelen periyotlar elde edilir. Özdeğer analizi sonucunda, yüksek kütle katılım faktörü olan birinci ve ikinci mod kontrol edilip bu modlar arasında ki sönüm oranlarına göre dinamik analizlerin yapılması gerekmektedir. Burada kullanılacak sönüm sabitleri, genel kabul olarak 0,05 (%5) seçilerek hesaplamalar yapılıyor olsa da, daha doğru bir çözüm yapabilmek için sönüm sabitleri de hesaplanarak çözüme dahil edilebilir. Sönüm sabitleri, hacimsel modül (λ), kesme modülü (G), elastisite modülü (E), poisson oranı (v) ve yüzey alanına bağlı olarak Denklem 1.2, 1.3 ve 1.4'de yer alan bağıntılar kullanılarak hesaplanabilmektedir.

Birincil dalga; $$Cp = \rho \cdot A \cdot \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} = W \cdot A \cdot \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{W \cdot 9{,}81}} = Cp \cdot A \tag{1.2}$$

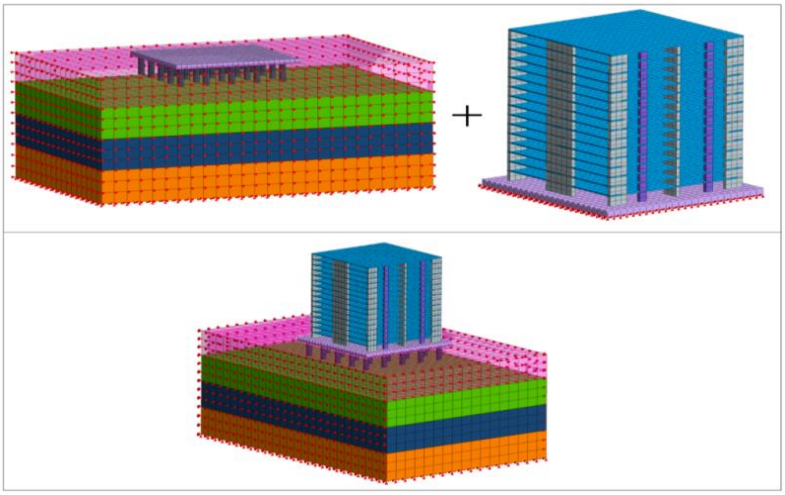
İkincil dalga; $$Cs = \rho \cdot A \cdot \sqrt{\frac{G}{\rho}} = W \cdot A \cdot \sqrt{\frac{G}{W \cdot 9{,}81}} = Cs \cdot A \tag{1.3}$$

Konum; $$\lambda = \frac{v \cdot E}{(1+v) \cdot (1-2 \cdot v)} \qquad G = \frac{E}{2 \cdot (1+v)} \tag{1.4}$$

b) Altsistem Yaklaşımında Eylemsizlik Etkileşimi:

Eylemsizlik etkileşimi üstyapı ve üstyapı temelinde zamana bağlı doğrusal olmayan davranış ile ilgilenir. Doğrusal olmayan kazık-zemin etkileşim yayları üstyapı temeline tanımlanır ve kinematik etkileşimden elde edilen temel seviyesi deprem kayıtları etkisinde zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler yapılarak

üstyapı ve üstyapı temelinde iç kuvvetler, şekil değiştirme ve yer değiştirme taleplerinin zamana bağlı değişimleri elde edilir. Nihai kazık iç kuvvetleri, kinematik etkileşim ve eylemsizlik etkileşiminden elde edilen sonuçların mutlak değerce toplamı şeklinde belirlenir. Kinematik etkileşim ve eylemsizlik etkileşimi hesap modelleri ve bu modellerin süperpozisyonu Şekil 5'te yer almaktadır.



Şekil 5. Kinematik etkileşim - eylemsizlik etkileşimi - genel sistem hesap modelleri

b1) Doğrusal Olmayan Kazık-Zemin İlişkisinin Tanımlanması

TBDY 2018'de zemin-kazık-yapı etkileşimli hesaplamalarda, kazık davranışı ve kazık-zemin etkileşim elemanlarının temsilinde *p-y, t-z* ve *Q-Z* yaylarının kullanılması gerektiği belirtilmektedir. *P-y* yöntemi, zeminin plastik özelliklerinin hesaba katıldığı ve şekil değiştirmelerin bunların bir fonksiyonu olarak tanımlandığı yöntemdir (Öztürk ve Işık, 2015). *P-y* yayları, kazık boyunca belirli aralıklarla her bir kazık için kazık yüzeyine tanımlanmalıdır. Burada *y*; kazıkta meydana gelen yatay yönlü yer değiştirmeyi, *p* ise; zeminin kazık birim uzunluğuna uygulamış olduğu kuvveti ifade etmektedir.

P-y eğrilerinin elde edilmesinde bilgisayar destekli yazılımlar kullanılabileceği gibi literatürde yer alan referans eğriler kullanılarak da hesaplama yapılabilir. TBDY 2018 Bölüm 16C.6.2'de *p-y* yayları için, Bölüm 16C.6.3'de ise, *t-z* ve *Q-Z* yayları için kaynaklar yer almaktadır.

b2) Doğrusal Olmayan Üstyapı Analizleri

Eylemsizlik etkileşiminde sistem; kütlesi tanımlanmış temel (varsa bodrum kutusu) ve üstyapı şeklinde modellenir. Bu altsistemde, temel tabanına doğrusal olmayan *p-y* yayları etkitilerek temel-zemin ilişkisi tanımlanır. Aynı altsisteme kinematik etkileşimde elde edilen temel seviyesi deprem kayıtları tanımlanarak zaman-tanım alanında doğrusal olmayan analizler yapılır. Üstyapı ve üstyapı temelinde iç kuvvetler ile zamana bağlı kuvvet-deplasman değişimleri elde edilir. Temel tabanında tanımlanmış olan *p-y* yaylarından yararlanılarak kazıklar için iç kuvvetler elde edilir. Bu kuvvetler kinematik ekileşimden elde edilen kazık iç kuvvetleri ile toplanarak nihai kuvvetler elde edilmiş olur.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Saha Çalışmaları Ve Mühendislik Verilerinin Temini

Bu çalışmada, analizlerde kullanılan zemin ortamına ait dinamik-elastik mühendislik parametreleri, proje alanında yapılan arazi çalışmaları ve laboratuvar deneyleri neticesinde hazırlanan Veri ve Geoteknik Raporundan temin edilmiştir.

Proje alanına ait spektral ivme katsayıları, TDTH kullanılarak, proje alanının koordinatları, yerel zemin sınıfı ve deprem düzeyi parametreleri aracılığıyla elde edilmiştir.

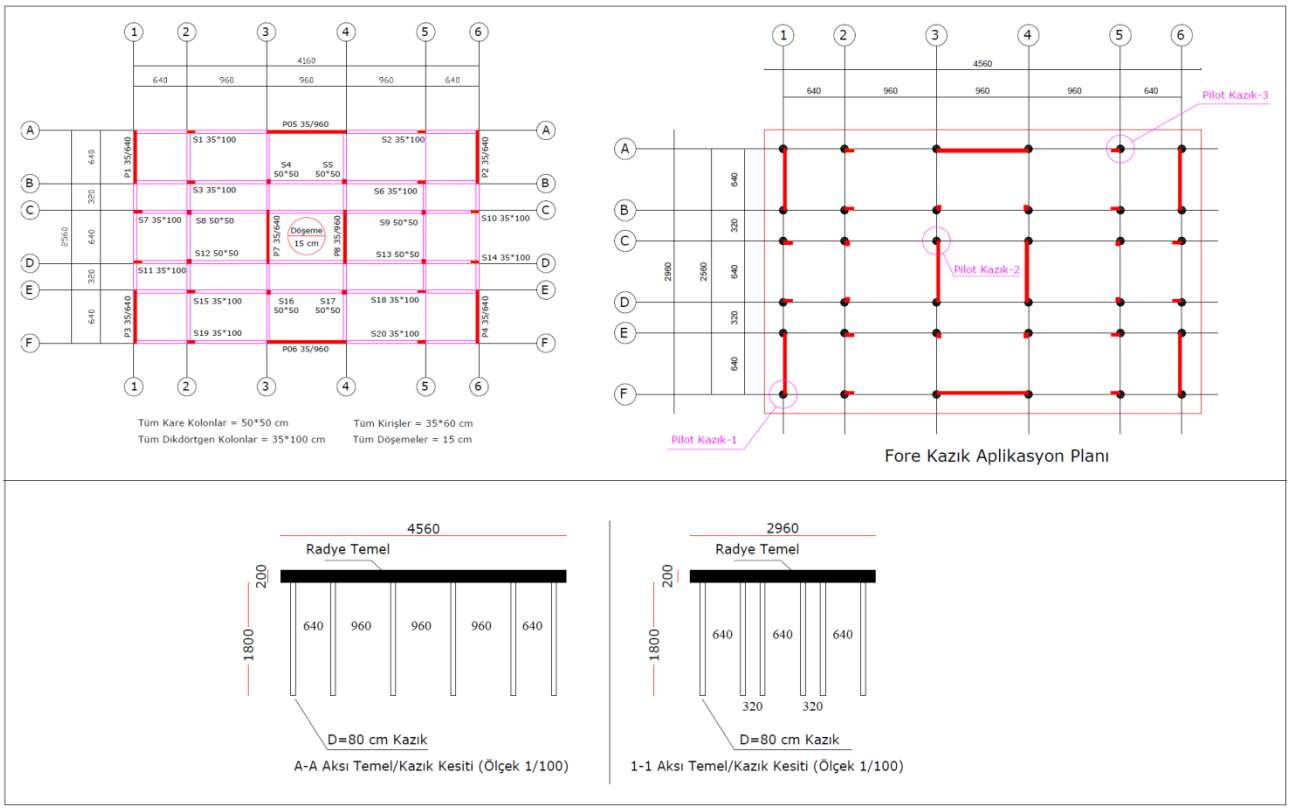
Analizlerde kullanılan 11 çift deprem kaydı, PEER veri tabanı üzerinden, alana özgü spektral ivme katsayıları referans alınarak hesaplanan ölçek katsayıları ile birlikte elde edilmiştir.

2.2. Uygulanan Yöntem

Zemin-kazık-yapı etkileşiminin yapısal davranış parametreleri üzerindeki etkisi, aynı binanın, altsistem yaklaşımı (Yöntem I) ile ve yatak katsayısı yöntemiyle ayrı ayrı analiz edilerek sonuçların mukayese edilmesi şeklinde incelenmiştir. Ayrıca etkileşimsiz duruma ait sonuçları görebilmek için sistemin zemine ankastre şekilde mesnetlendiği rijit modelin de analizi yapılarak sonuçlar elde edilmiştir. Sonuçları mukayese ederken sistemde ki 36 adet kazıktan, sistemi temsil etmek üzere orta bölgeden ve yan kısımlardan birer adet olmak üzere toplamda 3 adet pilot kazık belirlenerek karşılaştırmalar bu kazıklar üzerinden yapılmıştır.

2.2.1. Üstyapı Geometri Bilgileri

Üstyapı, her bir katı 3 m yüksekliğinde 23 kattan oluşup, bina toplam yüksekliği (H_N) 69 m'dir. Katlara ait kalıp planı, temel kesitleri ve pilot kazıkları da gösterir aplikasyon planı Şekil 6'da yer almaktadır. Temel sistemi, 2 m yüksekliğinde radye temel ve radye temelin tabanında 80 cm çapına sahip 18 m boyunda betonarme kazıklar (fore kazık) şeklindedir. Kazıklar düşey taşıyıcı sistem elemanlarının düğüm noktaları ve grup etkisi dikkate alınarak (min 3D mesafe) aplike edilmiştir.



Şekil 6. Kalıp planı ve temel kesitleri

2.2.2. Zemin Ortamı ve Malzeme Parametreleri

Proje alanında 10 adet çok kanallı yüzey dalgası analizi, 5 adet mikrotremör ve 5 adet düşey elektrik sondaj ölçümlerini içeren jeofizik araştırmalar yapılarak dinamik-elastik mühendislik parametreleri elde edilmiştir. Aynı zamanda 35 m derinlikte olmak üzere 3 ayrı lokasyonda zemin araştırma sondajı yapılarak jeolojik zemin kesiti elde edilmiştir (Şekil 7). Her kuyuda standart penetrasyon deneyi, presiyometre deneyleri, yeraltı su seviyesi ölçümleri ve laboratuvar deneyleri yapılmıştır. 30 metre derinlik için hesaplanan ortalama kayma dalgası hızı ($V_{(S)30}$) değeri 452-553 m/sn arasında olup TBDY 2018 Bölüm 16.4.1'e göre yerel zemin sınıfı ZC olarak belirlenmiştir. Zemin ortamına ait tasarım parametreleri Tablo 2'de, tabakalara ait dinamik-elastik mühendislik parametreleri Tablo 3'de ve a1'de belirtilen hususlara göre belirlenen zemin geometrisi ise Şekil 8'de yer almaktadır.

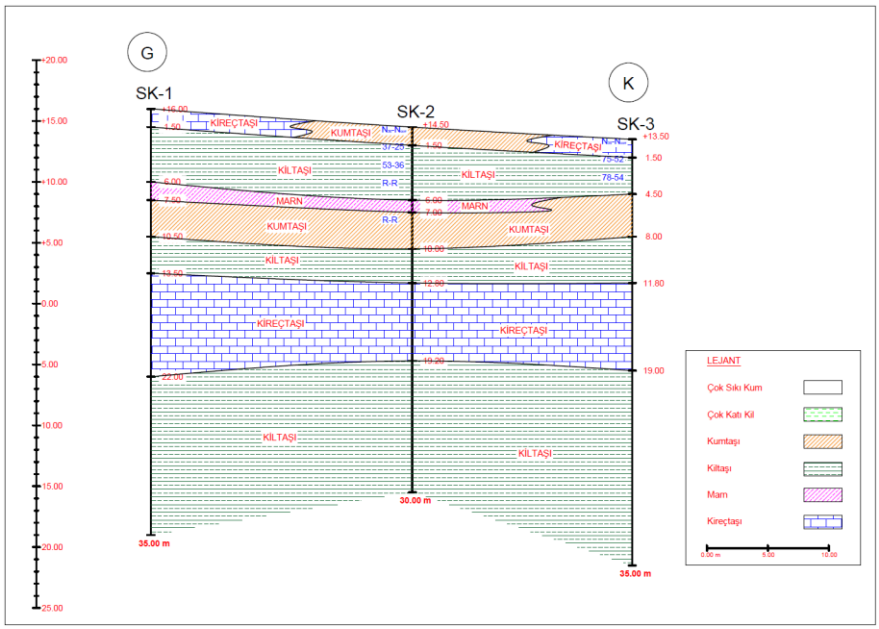
Tablo 2
Zemin ortamı tasarım parametreleri

Zemin Tabakaları	Kumtaşı	Kireçtaşı	Kiltaşı	Marn	Taban Kayası
Bünye modeli	Mohr Coloumb	Mohr Coloumb	Mohr Coloumb	Mohr Coloumb	Mohr Coloumb
K_0	0,809	0,794	0,794	0,809	0,794
Termal katsayı	1,00E-06	1,00E-06	1,00E-06	1,00E-06	1,00E-06
E (kN/m^2)	250.000	250.000	250.000	250.000	250.000
υ	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
γ (kN/m^3)	26	21,8	21,3	21,3	21,4
C (kN/m^2)	550	570	570	550	590
Ø (°C)	11	11,88	11,88	11	12,2

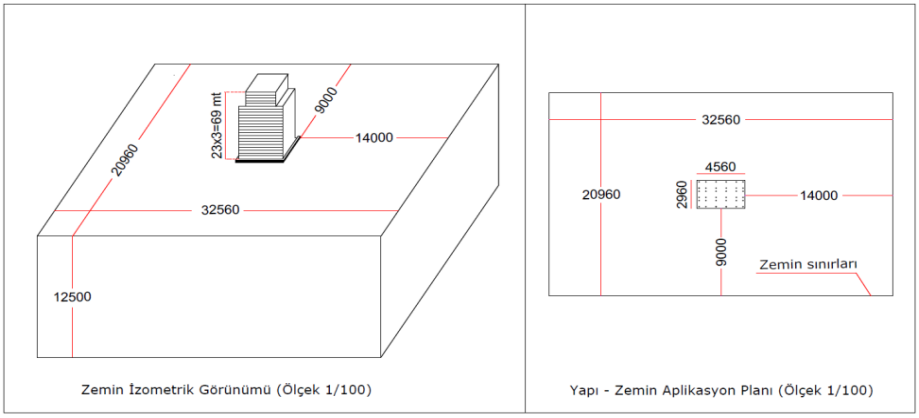
Tablo 3
Tabakalara ait dinamik-elastik mühendislik parametreleri

Sismik Hızlar ve Elastik Parametreler

Ölçü No	Tbk. No	Vp	Vs	Hız Oranı	Ka-lınlık	De-rin-lik	Yoğun-luk (γ)	Pois-son Oranı (υ)	Kes.Mod. (Gsec)	Els. Mod. (E)	Blk. Mod. (K)	V(S)30	TA	T0	TB
		m/sn	m/sn	Vp/Vs	m	m	gr/cm3		kg/cm2	kg/cm2	kg/cm2	m/sn	sn	sn	sn
1	1	815	399	2,0	3,5	3,5	1,66	0,34	2637	7080	7486	479	0,16	0,24	0,36
	2	1395	435	3,2	18,5	22	1,89	0,45	3585	10369	32088				
	3	1940	701	2,8			2,06	0,42	10110	28812	63951				
2	1	838	526	1,6	2,1	2,1	1,67	0,17	4615	10844	5560	524	0,15	0,22	0,33
	2	1100	458	2,4	19,7	21,8	1,79	0,40	3745	10449	16609				
	3	1833	799	2,3			2,03	0,38	12949	35810	50886				
3	1	880	447	2,0	5,4	5,4	1,69	0,33	3374	8948	8577	500	0,14	0,21	0,31
	2	1135	527	2,2	8,2	13,6	1,80	0,36	4997	13618	16516				
	3	950	435	2,2	10,7	24,3	1,72	0,37	3257	8906	11190				
	4	1750	729	2,4			2,01	0,40	10656	29729	47197				
4	1	820	434	1,9	6,5	6,5	1,66	0,31	3125	8158	6988	488	0,16	0,24	0,36
	2	950	449	2,1	16,3	22,8	1,72	0,36	3470	9411	10906				
	3	1764	702	2,5			2,01	0,41	9901	27839	49314				
5	1	767	359	2,1	5,5	5,5	1,63	0,36	2103	5718	6794	452	0,16	0,24	0,35
	2	1000	465	2,2	11	16,5	1,74	0,36	3769	10268	12407				
	3	800	381	2,1	6,5	23	1,65	0,35	2393	6478	7361				
	4	1833	677	2,7			2,03	0,42	9297	26422	55756				
6	1	815	518	1,6	2,4	2,4	1,66	0,16	4444	10321	5076	537	0,15	0,22	0,33
	2	1503	448	3,4	16	18,4	1,93	0,45	3874	11244	38438				
	3	1750	746	2,3			2,01	0,39	11158	30997	46526				
7	1	905	495	1,8	5,7	5,7	1,70	0,29	4166	10720	8371	536	0,13	0,2	0,3
	2	1966	542	3,6	7,3	13	2,06	0,46	6064	17693	71700				
	3	950	485	2,0	11,4	24,4	1,72	0,32	4048	10718	10135				
	4	1850	746	2,5			2,03	0,40	11314	31746	54496				
8	1	950	462	2,1	24,5	24,5	1,72	0,35	3673	9883	10634	492	0,16	0,24	0,36
	2	1700	685	2,5			1,99	0,40	9340	26210	45073				
9	1	850	400	2,1	6,2	6,2	1,67	0,36	2678	7273	8523	461	0,18	0,26	0,4
	2	950	423	2,2	13,6	19,8	1,72	0,38	3079	8477	11427				
	3	1400	585	2,4			1,90	0,39	6489	18095	28514				
10	1	579	372	1,6	9,8	9,8	1,52	0,15	2104	4834	2292	553	0,14	0,21	0,31
	2	1390	691	2,0	15,6	25,4	1,89	0,34	9038	24147	24521				
	3	1900	861	2,2			2,05	0,37	15172	41597	53655				



Şekil 7. Sondaja dayalı jeolojik zemin kesiti



Şekil 8. Modellemeye esas zemin ortamı geometrik ölçüleri

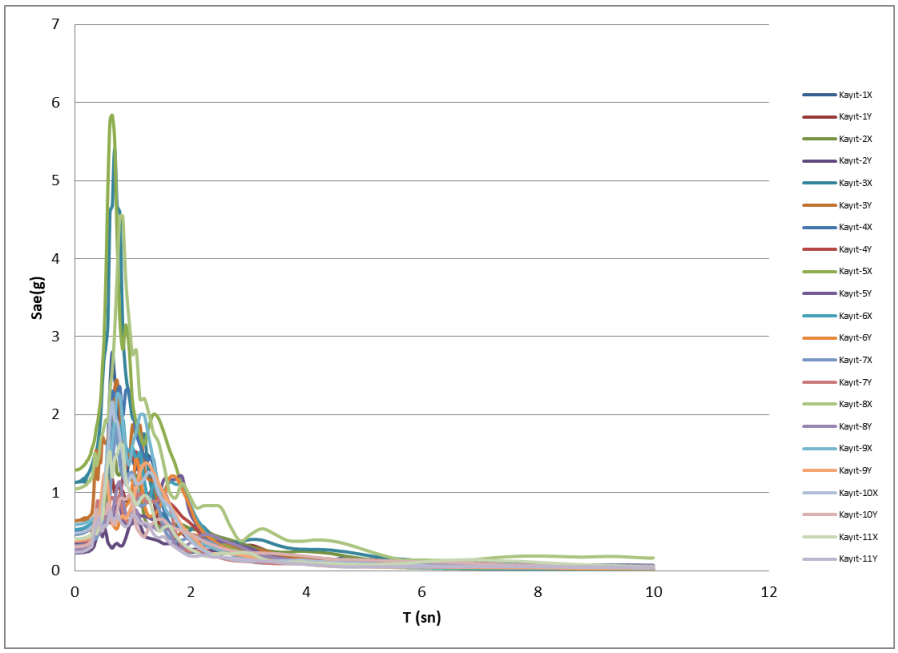
2.2.3. Deprem Kayıtları Ve Ölçek Katsayıları

Sahaya özel uygun deprem kayıtlarının doğru seçilebilmesi için öncelikle proje alanının depremselliği araştırılmış ve bölgede meydana gelen depremlere ait veriler elde edilmiştir. Bu kapsamda Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi Deprem Sorgulama Sistemi kullanılarak proje alanını kapsayacak şekilde 100 km yarıçaplı dairesel bir alan taranarak 1990-2021 yılları arasında 3 ila 9 büyüklüğünde olan depremler araştırılmıştır. Aynı zamanda Marmara Bölgesinde 1912 ile 1999 yılları arasında büyüklüğü 6,0 ile 7,4 arasında değişen 15 adet yıkıcı deprem ve Biga Yarım Adası ile Ganos fayı yakın çevresinde 2003-2010 yılları arasında 3,5'ten büyük olan depremler araştırılmıştır. Sahanın deprem özellikleri (fay tipi, büyüklük, fay yırtılma mesafesi, V_S) tespit edildikten sonra, bu özellikler ve proje alanına ait deprem düzeyi-1 (DD-1) için spektral veriler (S_{DS}, S_{D1}, T_L) PEER arama motoruna girilerek proje alanı ile uyumlu deprem kayıtları ve bu kayıtlara ait ölçek katsayıları elde edilmiştir. Ölçek katsayıları Denklem 2.1'e göre hesaplanmıştır. Elde edilen deprem kayıtları ve ölçek katsayıları Tablo 4'te, 11 çift kayda ait ölçeklenmiş ivme spektrumları ise Şekil 9'da yer almaktadır.

Tablo 4
Seçilen deprem kayıtlarına ait parametreler (PEER, 2020)

Kayıt Çifti	Kayıt Adı	YÖN	PGA (g)	PGV (m/sn)	PGD (m)	$V_{(S)30}$ (m/sn)	Büyüklük	Ölçek Katsayısı
1	IMPVALL.H_H-CPE147.AT2	x	0,17	0,12	0,052	471,53	6,53	2,3195
	IMPVALL.H_H-CPE237.AT2	y	0,16	0,19	0,079			
2	IMPVALL.H_H-PTS225.AT2	x	0,11	0,18	0,140	348,69	6,53	2,7492
	IMPVALL.H_H-PTS315.AT2	y	0,21	0,18	0,120			
3	SUPER.B_B-SUP045.AT2	x	0,58	0,24	0,023	362,38	6,54	1,9502
	SUPER.B_B-SUP135.AT2	y	0,84	0,44	0,052			
4	LANDERS_DSP000.AT2	x	0,17	0,19	0,082	359,00	7,28	2,6067
	LANDERS_DSP090.AT2	y	0,15	0,21	0,078			
5	LANDERS_MVH045.AT2	x	0,22	0,30	0,050	396,41	7,28	2,3153
	LANDERS_MVH135.AT2	y	0,16	0,22	0,100			
6	KOBE_KAK000.AT2	x	0,24	0,21	0,064	312,00	6,90	1,7733
	KOBE_KAK090.AT2	y	0,32	0,27	0,088			
7	DUZCE_1062-N.AT2	x	0,12	0,10	0,090	338,00	7,14	2,7612
	DUZCE_1062-E.AT2	y	0,26	0,18	0,089			
8	DUZCE_375-N.AT2	x	0,89	0,37	0,053	454,20	7,14	1,7713
	DUZCE_375-E.AT2	y	0,51	0,20	0,074			
9	HECTOR_HEC000.AT2	x	0,27	0,26	0,200	726,00	7,13	1,4445
	HECTOR_HEC090.AT2	y	0,33	0,45	0,110			
10	TOTTARI_SMN001NS.AT2	x	0,24	0,13	0,054	331,00	6,61	2,5217
	TOTTARI_SMN001EW.AT2	y	0,25	0,19	0,100			
11	DUZCE_498-NS.AT2	x	0,40	0,24	0,180	425,00	7,14	1,6114
	DUZCE_498-EW.AT2	y	0,35	0,25	0,180			

$$lnf = \frac{\sum_i w(Ti) \ln\left(\frac{Sa^{referans}(Ti)}{Sa^{kayıt}(Ti)}\right)}{\sum_i w(Ti)} \quad (2.1)$$



Şekil 9. 11 çift kayda ait ivme spektrum grafiği

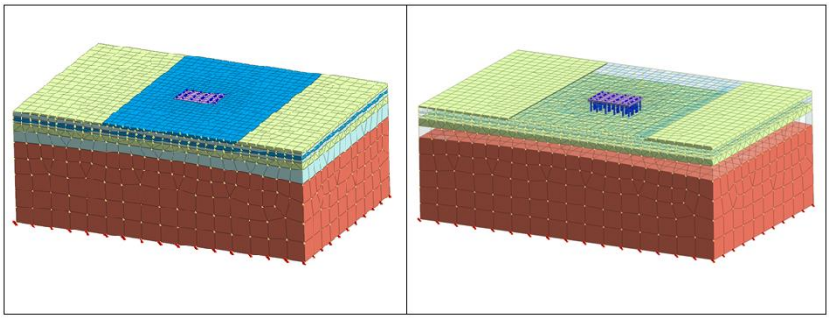
2.2.4. Kinematik Etkileşim Hesap Modeli ve Doğrusal Olmayan Analizler

Kinematik etkileşim hesap modeli Şekil 10'da yer almaktadır. Tablo 4'te yer alan 11 çift deprem kaydı ölçeklenerek bu sistemin tabanından etkitilmiştir. Yapılan zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analizler sonucu temel seviyesi deprem kayıtları ve kazıklarda meydana gelen iç kuvvetler elde edilmiştir.

Kazık-zemin arayüz parametrelerinin hesaplanmasında kullanılan referans bağıntılar ile K_n ve K_t değerleri, Tablo 5'te yer almaktadır.

Tablo 5
Kazık-zemin arayüz parametreleri

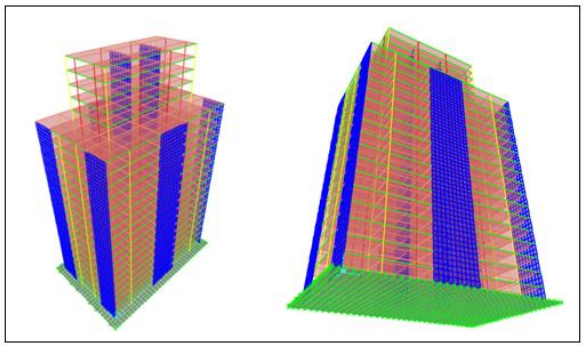
Parametre	Birim	Referans	Değer
$E_{oed,i}$	kN/m²	E*(1-ν) / (1+ν)*(1-2ν)	300.000
L	m	-	18
t_v	Boyutsuz	0,01 - 0,1	0,10
R	Boyutsuz	0,7 - 1	0,70
E	kN/m²	-	250.000
v_{soil}	Boyutsuz	-	0,25
G_{soil}	kN/m²	E/2*(1+ν)	100.000
G_i	kN/m²	R* G_{soil}	70.000
K_n	kN/m³	E_{oed}/(L*t_v)	166.667
K_t	kN/m³	G_i /(L*t_v)	38.889



Şekil 10. Kinematik etkileşim hesap modeli

2.2.5. Eylemsizlik Etkileşimi Hesap Modeli ve Üstyapı Analizleri

Eylemsizlik etkileşiminde, temel tabanına tanımlanan doğrusal olmayan *p-y* yayları ve kinematik etkileşimde elde edilen temel seviyesi deprem kayıtları etkisinde dinamik üstyapı analizleri yapılmış ve kinematik etkileşimden elde edilen sonuçlarla birleştirilmek üzere kazıklar için iç kuvvetler elde edilmiştir. Modellemede; radye temel, perdeler ve döşemeler kabuk eleman olarak, kolonlar ve kirişler ise çubuk eleman olarak modellenmiştir (Şekil 11). Kabuk elemanlar 50x50 cm ölçülerinde sonlu elemanlara ayrılmıştır. Temelde ki sonlu elemanların düğüm noktalarına *p-y* yayları tanımlanarak etkileşim modele aktarılmıştır. *P-y* yayları, Sap2000 yazılımında, "Link/Support Property Data" penceresinde "Multilineer Plastic" ve "Nonlineer" seçenekleri seçilerek, *p-y* değerlerinin yazılıma girilmesi ile tanımlanmıştır.

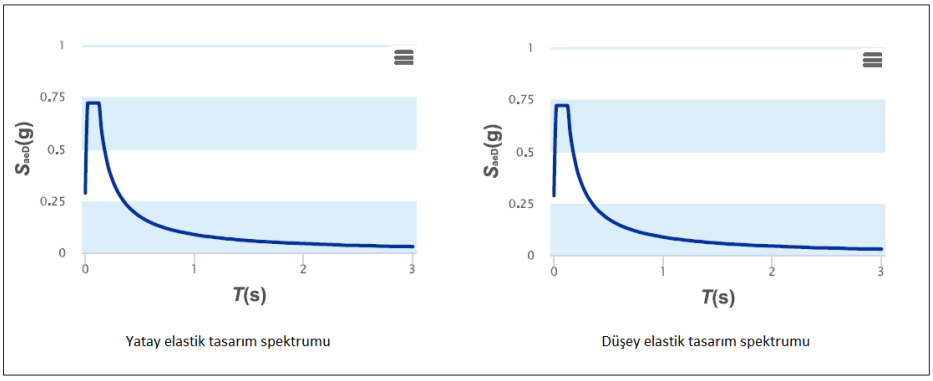


Şekil 11. Eylemsizlik etkileşimi sistem hesap modeli

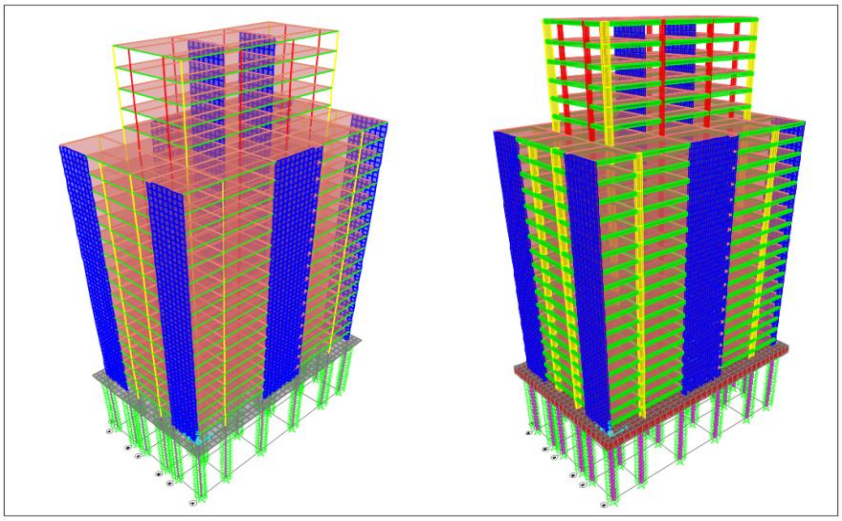
2.2.6. Yatak Katsayısı Yöntemi Hesap Modeli ve Doğrusal Dinamik Analiz

"Kazık+temel+üstyapı" modelinin, TBDY 2018'de belirtilen hususlar kapsamında TDTH ile yapının konumu, yerel zemin sınıfı ve deprem düzeyine (DD-2) bağlı olarak elde edilen tasarım spektrumu ve çalışma

sahasına ait veri ve geoteknik raporundan alınan yatay yatak katsayısı kullanılarak TBDY 2018'e uygun şekilde doğrusal analiz yapılmış, elde edilen sonuçlar, altsistem yaklaşımından elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Analizde kullanılan proje alanına özel tasarım spektrumları Şekil 12'de, hesap modeli ise Şekil 13'de yer almaktadır.



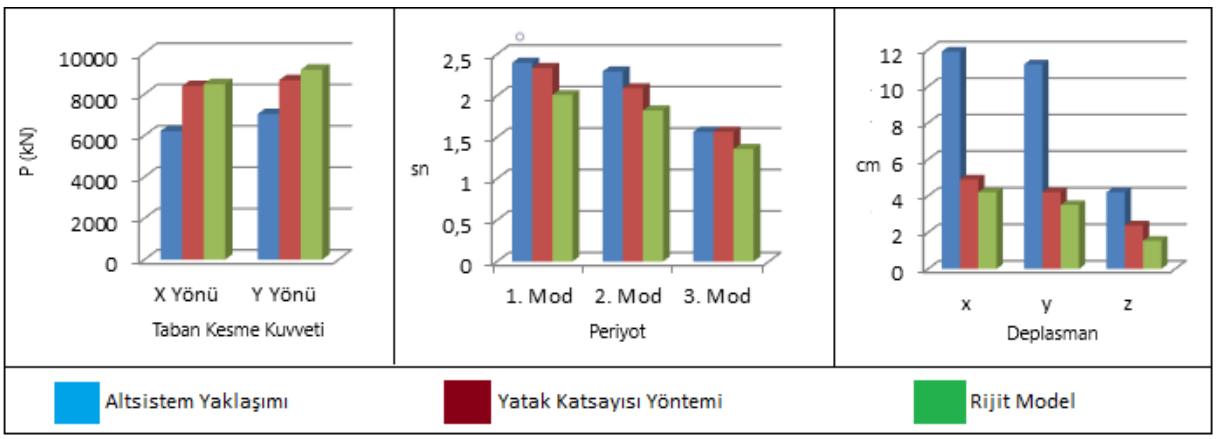
Şekil 12. DD-2 elastik tasarım spektrumları (TDTH İnteraktif Web Uygulaması, 2021)



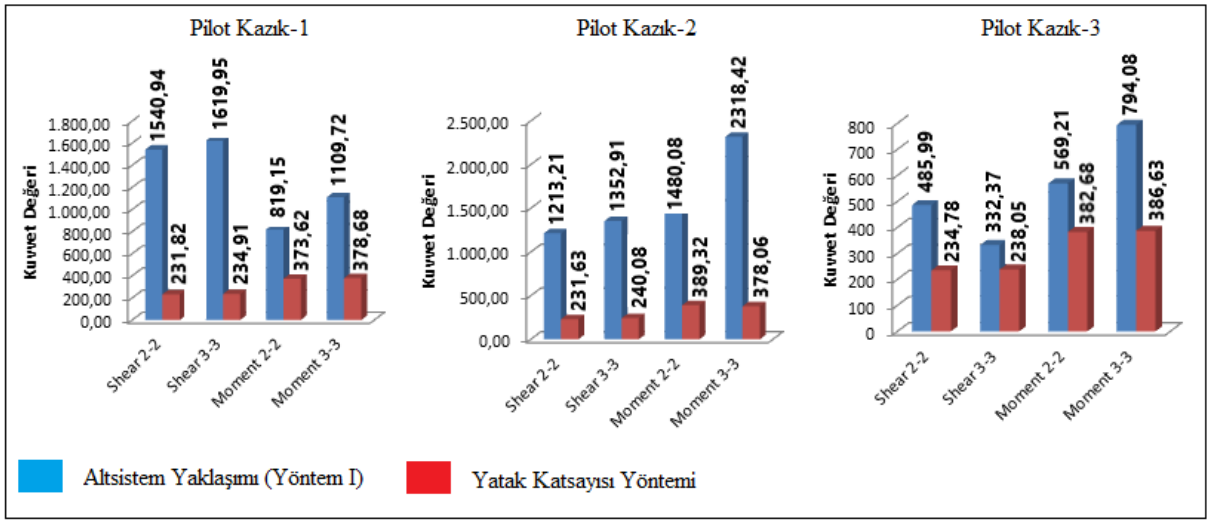
Şekil 13. Yatak katsayısı yöntemi hesap modeli

3. Bulgular ve Tartışma

Farklı hesap yöntemlerine göre elde edilen taban kesme kuvvetleri, doğal titreşim periyotları ve deplasman değerleri arasındaki ilişki Şekil 14'de, kazık iç kuvvetleri arasındaki ilişki ise Şekil 15'te yer almaktadır.



Şekil 14. Hesap yöntemine bağlı elde edilen sonuçlar arasındaki ilişki



Şekil 15. Hesap yöntemine bağlı kazık iç kuvvetlerindeki değişim

Elde edilen sonuçlara bakıldığında, taban kesme kuvveti bakımından yatak katsayısı ve rijit model sonuçlarının birbirine yakın olduğu, altsistem yaklaşımı sonuçlarının ise her iki yön içinde diğer iki yönteme kıyasla yaklaşık %25 oranında daha düşük olduğu,

Doğal titreşim periyotları bakımından, ilk 3 mod için altsistem yaklaşımı ve yatak katsayısı yöntemi sonuçlarının birbirine yakın olduğu, rijit modelde ise periyot değerlerinin diğer iki yönteme kıyasla yaklaşık %15 oranında daha düşük olduğu,

Sistem deplasmanlarına bakıldığında ise, yatak katsayısı ve rijit model değerlerinin birbirine yakın olduğu, altsistem yaklaşımı sonuçlarının ise özellikle x ve y yönleri için yaklaşık %110 oranında daha fazla olduğu görülmüştür.

Kazık iç kuvvetleri bakımından, altsistem yaklaşımında elde edilen sonuçların diğer iki yönteme kıyasla her bir kazıkta farklı olmakla beraber ortalama %600 oranında daha fazla olduğu tespit edilmiştir

4. Sonuçlar

Bu çalışma sonucunda, altsistem yaklaşımı ile elde edilen kazık iç kuvvetlerinin, yatak katsayısı yöntemi ile elde edilen değerlere göre oldukça büyük olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, kazıkların rijitliklerinin zemin ortamına kıyasla çok daha büyük olması sebebiyle, kazıkların deprem etkisiyle zeminde meydana gelen şekil değiştirmelere uyum sağlayamaması sonucu, zemin tabakalarının kazıklara yüklenerek kazıklarda büyük iç kuvvetler oluşturduğu tezini destekler niteliktedir.

Altsistem yaklaşımı ve yatak katsayısı yöntemlerinden elde edilen periyot değerlerinin rijit modele (etkileşimsiz) kıyasla daha yüksek olduğu görülmüştür. Yapı ile zemin arasında ki ilişkinin ankastre mesnetlerle temsil edildiği rijit sistemlerde yapı periyodunun, zemin-yapı ilişkisinin yatak katsayısı ya da kuvvet-yer değiştirme yaylarıyla temsil edilen etkileşimli sistemlere kıyasla daha yüksek olması beklenilen bir durumdur. Periyot uzamasına bağlı olarak beklenildiği üzere etkileşimli modellere etkiyen taban kesme kuvvetinde azalma meydana gelmiştir. Benzer şekilde periyot değerlerinde ki artışa paralel olarak, etkileşimli modellerde ki deplasman değerlerinin de rijit modele göre daha büyük olduğu tespit edilmiştir.

TBDY 2018'de eylemsizlik etkileşimi hesaplamalarının etkileşimli ve etkileşimsiz olarak 2 şekilde yapılarak elverişsiz olan duruma göre üstyapı dizaynının yapılması gerektiği belirtilmektedir. Bu çalışma özelinde, üstyapıya etkiyen taban kesme kuvvetinin rijit modelde daha yüksek olduğu ve üstyapı dizaynında rijit modelden hesaplanan iç kuvetlerin dikkate alınması gerektiği görülmektedir. Kazık dizaynında ise kinematik etkileşim ve eylemsizlik etkileşiminden elde edilen sonuçlar birleştirilmelidir. Bu şekliyle TBDY 2018'in, gerek kazık iç kuvettleri, gerekse de üstyapı yönünden sistemi en güvenli tarafta tutmaya çalıştığı görülmektedir.

Elde edilen sonuçlar, görece iyi zeminlerde, etkileşimli durumda, etkileşimsiz duruma kıyasla üstyapıya etkiyecek deprem kuvvetinde azalma olacağı görüşü ile örtüşmektedir. Fakat belirtilmelidir ki, özellikle kazık

temelli yapılarda, dinamik yükler altında kazık iç kuvvetlerinin doğru tespit edilerek kazık dizaynının yapılabilmesi için zemin-kazık-yapı etkileşimin hesaplamalara dahil edilmesi en doğru yaklaşım olacaktır.

Yazar Katkıları

Hüseyin Taştan: Modellemelerin ve analizlerin yapılması, sonuç çıktılarının raporlanması ve yazım.

Mehmet Özgür: Çalışma iş planı ve organizasyonu, literatür taraması ve raporlamaların değerlendirilmesi.

Çıkar Çatışması

Yazarlar çıkar çatışması bildirmemişlerdir.

Kaynaklar

Anderson, L., Carey, S. ve Amin, J. (2011). Effect of Structure, Soil and Ground Motion Parameters on Structure-Soil-Structure Interaction of Large Scale Nuclear Structures. *Structures Congress*, Las Vegas, USA. https://doi.org/10.1061/41171(401)249

Aydınoğlu, M. N. (2011). Zayıf Zeminlerde Yapılan Binalarda Dinamik Zemin-Kazık-Yapı Etkileşimi İçin Uygulamaya Yönelik Bir Hesap Yöntemi. Erişim adresi: http://www.koeri.boun.edu.tr/depremmuh/raporlar/Aydinoglu_Etkilesim_Rapor.pdf.

Bilal, O., Fahjan, Y. ve Önen, Y. H. (2014). Kazık-Zemin Arayüzeyi Parametrelerinin Dinamik Deprem Analizi Açısından Değerlendirmesi. http://dx.doi.org/10.13140/2.1.3778.1281

Kara, D., Bozdoğan, K.B. ve Keskin, E. (2020). Çerçeve Sistemlerin Yapı Zemin Etkileşimli Serbest Titreşim Analizi. *Politeknik Dergisi*, 23(4), 1347-1355. https://doi.org/10.2339/politeknik.598627

Karabörk, T., Deneme, İ. ve Bilgehan, R. (2010). Temeli İzole Edilen Yapılarda Dinamik Zemin-Yapı Etkileşimi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 26(1): 77-87. Erişim adresi: https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/236264

Kausel, E. (1988). Local Transmtiting Boundaries. *J. Eng. Mech. Div. ASCE*, Vol 114, pp. 1011-1027. https://doi.org/10.1061/%28ASCE%290733-9399%281988%29114%3A6%281011%29

Kavitha, P. E., Beena, K. S. ve Narayanan K. P.(2016). A Review On Soil-Structure Interaction Analysis Of Laterally Loaded Piles. *Innov. Infrastruct. Solut. 1:14.* https://link.springer.com/article/10.1007/s41062-016-0015-x

Keshian, P. G. (2001). *Analysis of Interconnected Systems Accounting for Spatial Variability of Ground Motions and Soil-Structure Interaction.* (Doktora Tezi), Universty of California, Berkeley.

Mamuk, F. (2010). *Üç Boyutlu Dinamik Zemin-Yapı Etkileşimi* (Yüksek Lisans Tezi). Erişim adresi: https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Öcal, C., İnce, H. H. (2012). Türkiye'de Mevcut Yapı Stoğu ve Kentsel Dönüşüm. *SDU International Technologic Science*, Vol.4, No 2, pp. 89-95. Erişim adresi: https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/254810

Öztürk, P. S. ve Işık, N. S. (2015). Sıvılaşan Zeminlerde Kazık Davranışının P-Y Yöntemi ile İncelenmesi. *International Sustainable Buildings Symposium (2 nd)*. Erişim adresi: http://www.isbs2015.gazi.edu.tr/belgeler/bildiriler/349-354.pdf.

PEER, (2020). Pacific Earthquake Engineering Research Center Ground Motion Database. (2021, 21 Mart). Erişim adresi: https://ngawest2.berkeley.edu/site.

Pulikanti, S. ve Ramancharla, P. K. (2013). SSI Analysis Of Framed Structures Supported On Pile Foundations: A Review. *Frontier in Geotechnical Engineering (FGE)*, Vol.2, Issue 2. Erişim adresi: https://www.academia.edu/24683081/SSI_Analysis_of_Framed_Structures_Supported_on_Pile_Foundations_A_Review.

Sarıoğlu, İ. (2020). *Statik İtme Ve Zaman Tanım Alanında Dinamik Analiz Yöntemlerinin Zemin Yapı etkileşimi Dikkate Alınarak İncelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Erişim adresi: https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Siyahi, B., Çetin, K. Ö. ve Bilge, H. T. (2013). Geoteknik Deprem Mühendisliği Açısından Zemin-Temel-Yapı Etkileşimine Kritik Bakış. *ZMGM (Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Derneği) Geoteknik Sempozyumu,* (5), Çukurova Üniversitesi, Adana. Erişim adresi: https://www.researchgate.net/publication/259936494_C71_Geoteknik_deprem_muhendisiligi_acisin

dan_zemin-temel-yapi_etkilesimine_kritik_bakis_Critical_glance_at_soil-foundation-structure_interaction_from_a_geotechnical_earthquake_engineering_perspective

TDTH İnteraktif Web Uygulaması, (2021). Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. Erişim adresi : https://www.turkiye.gov.tr/afad-turkiye-deprem-tehlike-haritalari

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, (2018). Afet ve Acil Durum Daire Başkanlığı. Erişim adresi : https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/03/20180318M1-2-1.pdf

Ünsal, S. (2017). GTS NX ile Kolay 3D Fore Kazıklı Köprü Temeli Analizi (2021, 19 Şubat). Erişim adresi: https://www.youtube.com/watch?v=bX50Dz4m198.

Yiğit, M. A., Onur, M. İ., Balaban E. (2022). Kazıklı temellerde zemin kazık etkileşimi parametrelerinin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 37(2), 625-640. https://doi.org/10.17341/gazimmfd.825224.