



## Assessment of Soil-Structure Interaction in Reinforced Concrete Buildings Based on Structure to Soil Stiffness Ratio

Mehmet Ozgur<sup>1</sup> and Kanat Burak Bozdogan<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Canakkale Onsekiz Mart University, Engineering Faculty, Department of Civil Engineering, 17020 Canakkale, Türkiye  
ORCID: 0000-0003-4158-3962, 0000-0001-7528-2418

### Keywords

Soil-structure interaction, Period elongation, Stiffness ratio

### Highlights

- \* Effects of soil-structure interaction (SSI) on seismic design of buildings are assessed
- \* SSI is investigated for different soil conditions
- \* SSI is more important for rigid buildings on soft soils

### Aim

Aim of the study is to determine if SSI is expected to be significant for different soil conditions

### Location

--

### Methods

Significance of SSI in design is assessed with the help of the structure to soil stiffness ratio

### Results

It is shown that, SSI should be taken into account for buildings founded on site classes ZE, ZD and ZC and can be neglected for site classes ZB and ZA

### Supporting Institutions

The authors declare that this study has used no support data from other institutions

### Financial Disclosure

The authors declare that this study has received no financial support

### Peer-review

Externally peer-reviewed

### Conflict of Interest

The authors have no conflicts of interest to declare

### Manuscript

Research Article

Received: 05.10.2022

Revised: 17.04.2023

Accepted: 29.05.2023

Printed: 30.06.2023

### DOI

10.46464/tdad.1184558



Content of this journal is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International Non-Commercial License

### Corresponding Author

Mehmet Ozgur

Email: mehmetozgur@comu.edu.tr

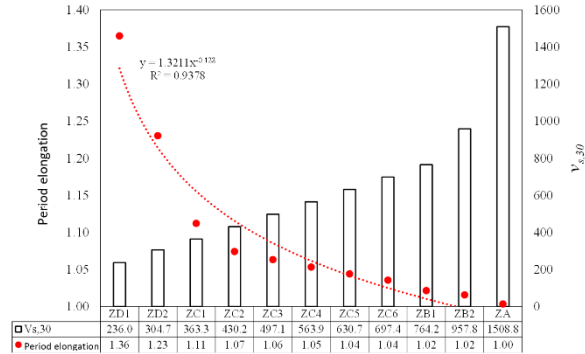


Figure  
Period elongation due to SSI for different local soil classes

### How to cite:

Ozgur M., Bozdogan K.B., 2023. Assessment of Soil-Structure Interaction in Reinforced Concrete Buildings Based on Structure to Soil Stiffness Ratio, Turk Deprem Arastirma Dergisi 5(1), 69-84, <https://doi.org/10.46464/tdad.1184558>



## Betonarme Binalarda Zemin-Yapı Etkileşiminin Yapının Zemine Rijitlik Oranı Yardımıyla Değerlendirilmesi

Mehmet Özgür<sup>1</sup> ve Kanat Burak Bozdoğan<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 17020 Çanakkale, Türkiye  
ORCID: 0000-0003-4158-3962, 0000-0001-7528-2418

### ÖZET

Zemin-yapı etkileşimi (ZYE) binanın periyodunu uzatırken yapısal sönüm oranını artırır. Binanın dinamik özelliklerindeki söz konusu değişim genellikle dinamik davranış açısından elverişli kabul edildiğinden ZYE tasarım yönetmeliklerinin birçoğunda ihmal edilmektedir. Fakat çok sayıda araştırma ZYE'nin ihmal edilmesinin binanın dönme sünekliği talebinin ve tepe deplasmanının olduğundan az hesaplanması yoluyla güvensiz tasarıma neden olduğunu işaret etmektedir. Bu sebeple ZYE'nin öneminin belirlenmesi güvenli tasarım için gereklidir. Bu çalışmada ZYE'nin tasarımdaki önemi periyot uzamasını kontrol eden en önemli parametre olan yapının zemine rijitlik oranı yardımıyla değerlendirilmiştir. Rijitlik oranı, farklı kat adedine sahip çerçeve taşıyıcı sisteme sahip binalarda farklı zeminler için hesaplanmış ve %5 periyot uzamasına sebep olan 0.1 değeri eşik kabul edilmiştir. ZYE'nin ZE, ZD ve ZC zeminlerde göz önüne alınması gerektiği, ZB ve ZA zeminlerde ihmal edilebileceği gösterilmiştir.

### Anahtar kelimeler

Zemin-yapı etkileşimi, Periyot uzaması, Rijitlik oranı

### Öne Çıkanlar

- \* Binaların sismik tasarımında ZYE'nin sonuçları değerlendirilmiştir
- \* ZYE, farklı zemin koşulları için ele alınmıştır
- \* ZYE, zayıf zeminler üzerinde bulunan rijit yapılar için daha önemlidir

### Makale

Araştırma Makalesi

Geliş: 05.10.2022  
Düzeltilme: 17.04.2023  
Kabul: 29.05.2023  
Basım: 30.06.2023

### DOI

10.46464/tdad.1184558

### Sorumlu yazar

Mehmet Özgür  
Eposta:  
mehmetozgur@comu.edu.tr

## Assessment of Soil-Structure Interaction in Reinforced Concrete Buildings Based on Structure to Soil Stiffness Ratio

Mehmet Ozgur<sup>1</sup> and Kanat Burak Bozdogan<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Çanakkale Onsekiz Mart University, Engineering Faculty, Department of Civil Engineering, 17020 Çanakkale, Türkiye  
ORCID: 0000-0003-4158-3962, 0000-0001-7528-2418

### ABSTRACT

Soil-structure interaction (SSI) results in higher structural damping ratio and elongated fundamental natural period of the building. Generally, these modifications on dynamic properties of the building are regarded to be favorable for dynamic response and SSI is neglected in most of the design codes. However, extensive research points out that neglecting the role of SSI can be a misconception that lead an unsafe design by underestimating the rotational ductility demand and top displacement of the building. Therefore, it is essential to determine if SSI is expected to be significant for safe design of the buildings. In this study, the significance of SSI in design is assessed with the help of the structure to soil stiffness ratio that is considered as the most important parameter controlling the period elongation. Stiffness ratio is determined for buildings with moment-resisting frames and varying number of storeys resting on different soil conditions and a threshold of 0.1 is assumed as the critical value that yields a period elongation of 5%. It is shown that, SSI should be taken into account for buildings founded on site classes ZE, ZD and ZC and can be neglected for site classes ZB and ZA.

### Keywords

Soil-structure interaction, Period elongation, Stiffness ratio

### Highlights

- \* Effects of SSI on seismic design of buildings are assessed
- \* SSI is investigated for different soil conditions
- \* SSI is more important for rigid buildings on soft soils

### Manuscript

Research Article

Received: 05.10.2022  
Revised: 17.04.2023  
Accepted: 29.05.2023  
Printed: 30.06.2023

### DOI

10.46464/tdad.1184558

### Corresponding Author

Mehmet Ozgur  
Email:  
mehmetozgur@comu.edu.tr

## 1. GİRİŞ

Depreme dayanıklı yapı tasarımı için yapıların dinamik özelliklerinin doğru belirlenmesi gerekmektedir. Hakim doğal titreşim periyodu, yapıların dinamik özelliklerini değerlendirirken ele alınan parametrelerin başında gelmektedir. Özellikle davranış spektrumunu esas alan eşdeğer deprem yükü gibi yöntemlerde, deprem kuvvetini temsil eden taban kesme kuvveti ve yer değiştirmenin belirlenmesi için hakim periyot kullanılmaktadır (Xiong ve diğ. 2016).

Yapısal analizlerde genellikle zemin-temel arakesitinde ankastre mesnetlerin kullanılması ile zemin-temel sisteminin rijit olduğu kabulü yapılmaktadır. Buna karşın, zemin-temel sisteminin daha gerçekçi bir yaklaşımla esnek kabul edilmesi ile zemin-yapı etkileşimi (ZYE) yapısal analize dahil edilebilmektedir. ZYE'nin göz önüne alınması halinde (atalet etkileşimi ile) sönüm oranının artması ve periyodun uzaması söz konusudur (Steward ve diğ. 1999, Behnamfar ve Banizadeh 2016, Kara ve diğ. 2020, Forcellini 2021). Periyodun uzaması, genel olarak spektral ivmenin ve beraberinde taban kesme kuvvetinin azalmasına neden olmaktadır. Ayrıca zemin-temel sisteminin rijit veya esnek kabul edildiği birçok çalışmada periyodun uzaması ile elastoplastik davranış içinde süneklik talebinin azaldığı ifade edilmiştir (Newmark ve Hall 1969, Ciampoli ve Pinto 1995, Elnashai ve Mc Clure 1996, Bazaios ve diğ. 2022). Bu nedenlerle, yapıların ZYE'den elverişli yönde etkilendiği düşünülerek güvenli tarafta kalma tercihi nedeniyle ZYE birçok yönetmelikte olduğu gibi Türkiye'de de göz ardı edilmektedir (TBDY 2018).

Bu görüşlerin aksini savunan, bir başka deyişle ZYE'nin yapıları belirli şartlar dahilinde olumsuz yönde etkilediğini öne süren çalışmalar da mevcuttur. De Carlo ve diğ. (2000), köprü ayaklarının sismik analizini Eurocode 8 davranış spektrumu ve 5 farklı yapay ivme kaydıyla gerçekleştirmiştir. Sonuç olarak, özellikle rijit yapıların tasarımında ZYE'nin dikkate alınmaması nedeniyle eğrilik sünekliği talebinin ve tepe yer değiştirmesinin olması gerekenden önemli ölçüde düşük tahmin edildiğini ifade etmişlerdir. Ayrıca, esnek ve narin köprü ayaklarının temel dönmesi nedeniyle büyük tepe yer değiştirmeleri yapabileceği ortaya konmuştur. 1995 Kobe depreminde, Hanshin otoyolunda, köprü tabliyesinin göçmesi bu şekilde açıklanmıştır (Mylonakis ve Gazetas 2000). Aydemir (2013), yumuşak zemine oturan 0.1-3.0 sn periyot aralığında tek serbestlik dereceli bir sistem üzerinde rijitlik azalımının, dayanım azaltma katsayısı ve elastik olmayan deplasman oranını nasıl değiştirdiğini ZYE'yi dahil ederek incelemiştir. Dayanım azaltma katsayısının, gerek rijitlik azalımı (Modifiye Clough davranışı) gerekse rijitlik azalısız (elastoplastik davranış) modellerde ZYE ile azaldığı ortaya konmuştur. Bu sonuç, ZYE'nin özellikle yumuşak zeminlerde göz ardı edilmesinin, taban kesme kuvvetinin olduğundan az kabul edilmesi yoluyla, güvensiz bir tasarıma yol açacağı anlamına gelmektedir. Bir diğer çalışmada, yapısal periyodun, yer hareketi baskın periyodunun 1.2 katından fazla olması durumunda, periyot uzamasının süneklik talebini artıracığı gösterilmiştir (Miranda ve Bertero 1994).

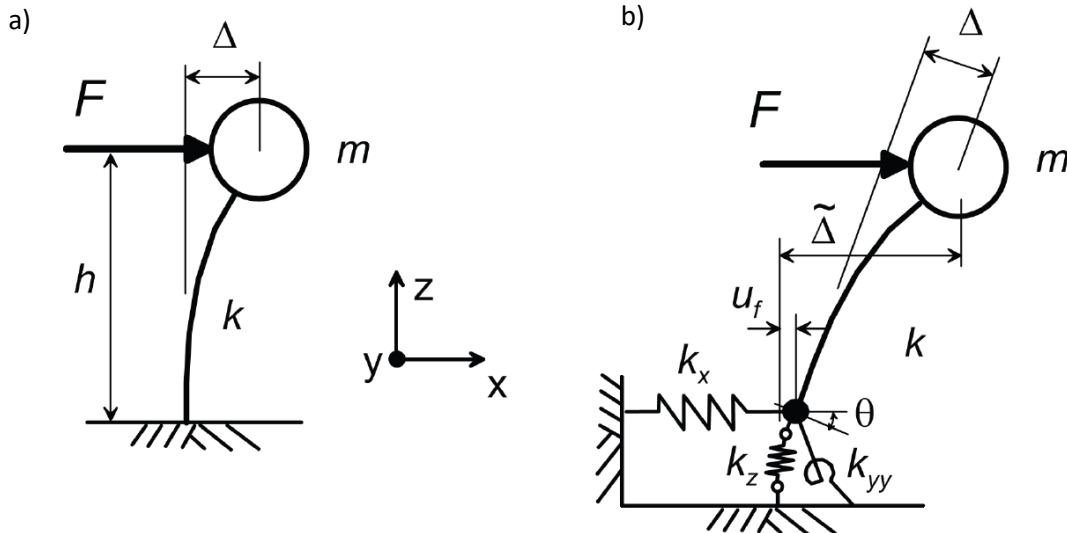
Yukarıda özetlenmeye çalışılan literatür taraması, ZYE'nin yapıları her zaman elverişli yönde etkilediği görüşünün eksik olduğunu işaret etmektedir. Bu durumda, yapıların depreme dayanıklı tasarımını sağlayabilmek için ZYE'nin ne derecede etkin olabileceği tüm saha koşullarında ve her tür yapı için irdelenmelidir. ZYE'nin etkinlik derecesi aslında periyodu ne kadar uzatacağını ifade etmektedir. ZYE ile periyodun ne kadar uzayacağını kontrol eden zemin-yapı ortak sistemine ait bazı boyutsuz parametreler mevcuttur (Veletsos ve Nair 1975, Bielak 1976). Bunların içinde yapının zemine rijitlik oranı ( $R_s$ ) en önemli parametre olarak değerlendirilmektedir (Ciampoli ve Pinto 1995, NIST 2012).  $R_s$  değerinin artmasıyla periyot uzamasının arttığı görülmektedir (NIST 2012). FEMA (2020) söz konusu değer 0.1'i aşması halinde ZYE'nin yapıların sismik tasarımında mutlaka değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Fakat bu değer önerilirken yapının taşıyıcı sistemi ile ilgili herhangi bir ayırım yapılmadığı görülmektedir. Ozgun ve Bozdogan (2022), ZYE'nin betonarme binalarda sismik tasarım parametrelerine etkilerini inceledikleri çalışmalarında, eşik  $R_s$  değerinin kayma kirişi davranışı gösteren çerçeve, eğilme kirişi davranışı gösteren perde-çerçeve ve karma

davranış gösteren perde-çerçeve sistemlerde farklılık gösterdiğini ifade etmişlerdir. Bununla birlikte çerçeve sistemlerde FEMA (2020) tarafından önerilen eşik  $R_s$  değeri 0.1 için periyodun ZYE ile %5 arttığını göstermişlerdir.

Bu çalışmada betonarme çerçeve taşıyıcı sistemli binalarda ZYE'nin etkin olup olmadığı farklı yerel zemin sınıflarında incelenmiştir. Bunun için kat planı aynı olmakla birlikte kat adedi 10'a kadar olan binaların ZF dışında tüm yerel zemin sınıflarında  $R_s$  değerleri hesaplanmıştır.  $R_s$  değerinin 0.1'i aşması durumunda periyodun ZYE ile en az %5 artacağı ve sismik tasarımda ZYE'ye yer verilmesi gerektiği kabul edilmiştir. Böylelikle farklı yerel zemin sınıflarında ZYE'nin etkin olması beklenen bina kat adetleri elde edilmiştir.

## 2. PERİYOT UZAMASI

ZYE, en genel ifadesiyle, zemin ve üzerindeki üstyapının etkileşim içinde olması demektir. Bu etkileşimin iki boyutu olduğu kabul edilmektedir. Bunlardan ilki, temel girdi hareketinin, temeldeki dengelenme (base-slab averaging) ve gömülme etkileri nedeniyle serbest saha hareketinden farklılaşması anlamına gelen kinematik etkileşimdir. Diğeri ise, zemin-yapı ortak sisteminin sönüm oranının artması ve periyodunun uzaması ile sonuçlanan atalet etkileşimidir. Yer hareketi ile zemin üzerinden yapıya aktarılan sismik dalgaların bir kısmının temelden yansması ve bir diğeri kısmının da yapının en üstünden yansıyarak yeniden temel üzerinden zemine aktarılması ortak sistemin sönüm oranında artışa neden olmaktadır. Öte yandan, ZYE ile zemin-temel sisteminin rijit yerine esnek kabul edilmesi, ortak sistem periyodunda artışa neden olmaktadır. Bu artışın boyutunun ne olacağını tek serbestlik dereceli bir sistem üzerinden incelemek mümkündür. Şekil 1a'da zemin-temel sisteminin rijit kabul edildiği ankastre temelli sistem, Şekil 1b'de ise zemin-temel sisteminin esnek kabul edilerek düşey ve yatay ötelenme yaylarına ilaveten dönme yayıyla temsil edildiği esnek temelli sistem görülmektedir. Ankastre temelli sisteme etkiyecek yatay statik kuvvetin ( $F$ ) neden olacağı ötelenme ( $\Delta$ ), sistemin rijitliği ( $k$ ) yardımıyla Eşitlik 1 ile hesaplanmaktadır.



Şekil 1: Tek serbestlik dereceli sistem a) Ankastre temel, b) Esnek temel (NIST 2012)  
Figure 1: Single degree of freedom system a) Rigid base, b) Flexible base (NIST 2012)

$$\Delta = \frac{F}{k} \quad (1)$$

Ankastre temelli sistemin sönümsüz doğal titreşim periyodu ( $T$ ), Eşitlik 2 ile hesaplanmaktadır. Burada,  $m$ , sistemin kütesidir. Çok serbestlik dereceli sistemler için 1'inci modun etkin kütesi kullanılmalıdır.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (2)$$

Eşitlik 1 ve Eşitlik 2 beraber değerlendirildiğinde  $T$  periyodunun karesi için Eşitlik 3 elde edilmiş olur.

$$T^2 = (2\pi)^2 \frac{m \Delta}{F} \quad (3)$$

Esnek temelli sistemin ötelenmesi ( $\bar{\Delta}$ ) ve sönümsüz doğal titreşim periyodunun ( $\bar{T}$ ) karesi sırasıyla Eşitlik 4 ve Eşitlik 5 ile elde edilmektedir.

$$\bar{\Delta} = \frac{F}{k} + \frac{F}{k_x} + \left( \frac{F h}{k_{yy}} \right) h \quad (4)$$

$$\bar{T}^2 = (2\pi)^2 \frac{m \bar{\Delta}}{F} = (2\pi)^2 m \left( \frac{1}{k} + \frac{1}{k_x} + \frac{h^2}{k_{yy}} \right) \quad (5)$$

Eşitlik 4 ve Eşitlik 5'te  $k_x$  ve  $k_{yy}$  sırasıyla yatay yayın ve dönme yayın rijitlikleridir.  $2B \times 2L$  boyutlarında ( $L > B$ ) yüzeyde bulunan bir temel için söz konusu rijitlikler zeminin kayma modülü ( $G$ ) ve Poisson oranı ( $\nu$ ) kullanılarak Eşitlik 6 ve Eşitlik 7 ile hesaplanmaktadır (ASCE 2010, NIST 2012).  $h$  ise yapının yüksekliğini ifade etmektedir.

$$k_x = \frac{GB}{2-\nu} \left[ 6.8 \left( \frac{L}{B} \right)^{0.65} + 2.4 \right] \quad (6)$$

$$k_{yy} = \frac{GB^3}{1-\nu} \left[ 3.73 \left( \frac{L}{B} \right)^{2.4} + 0.27 \right] \quad (7)$$

$G$  ise, zeminin kayma dalgası hızı ( $v_s$ ) ve yoğunluğu ( $\rho_s$ ) yardımıyla Eşitlik 8 ile hesaplanmaktadır.

$$G = \rho_s v_s^2 \quad (8)$$

Eşitlik 8 ile elde edilen  $G$ , Eşitlik 6 ve Eşitlik 7'de zeminin kayma birim deformasyonu ile uygun olacak şekilde azaltılmış olarak kullanılır. Poisson oranının zeminler için dar bir aralıkta değiştiği düşünüldüğünde, zemin-temel sisteminin rijitliği belirli bir temel boyutu için büyük oranda  $G$ 'ye bağlıdır.

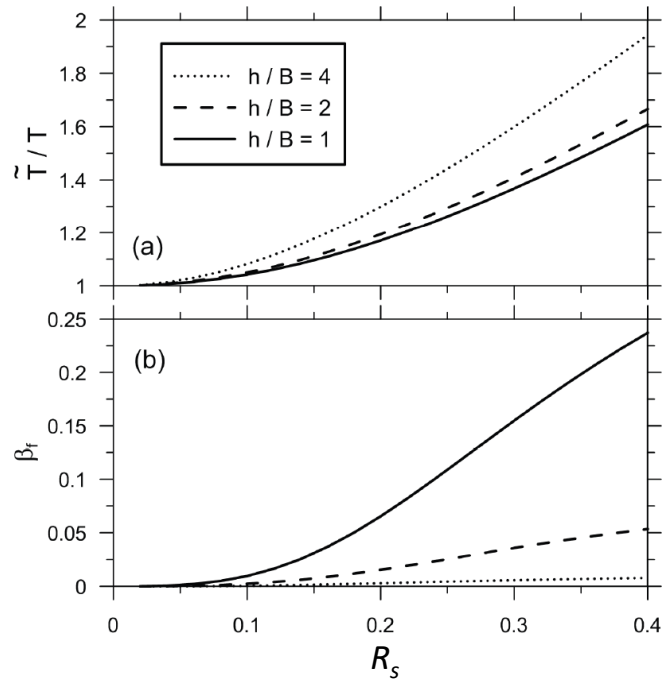
Zemin yoğunluğunun da dar bir aralıkta değiştiği düşünüldüğünde zemin-temel sisteminin rijitliğini belirleyen parametrenin  $v_s$  olduğu söylenebilir. Eşitlik 2 ve Eşitlik 5 beraber değerlendirildiğinde periyot uzaması ( $\bar{T}/T$ ) için Eşitlik 9 elde edilmiş olur.

$$\frac{\bar{T}}{T} = \sqrt{1 + \frac{k}{k_x} + \frac{kh^2}{k_{yy}}} \quad (9)$$

Eşitlik 9, modal yükseklik ( $h_n$ , yapı yüksekliğinin 2/3'ü kabul edilebilir) kullanılması şartıyla çok serbestlik dereceli sistemler için de kullanılabilir. Eşitlik 9 irdelendiğinde periyot uzamasının, yapının ve zemin-temel sisteminin rijitliklerine bağlı olduğu görülmektedir. Bu nedenle ZYE ile periyot uzaması üzerinde en etkili parametrenin yapının zemine rijitlik oranı ( $R_s$ ) olduğu düşünülür.  $R_s$ , Eşitlik 10 ile elde edilebilir.

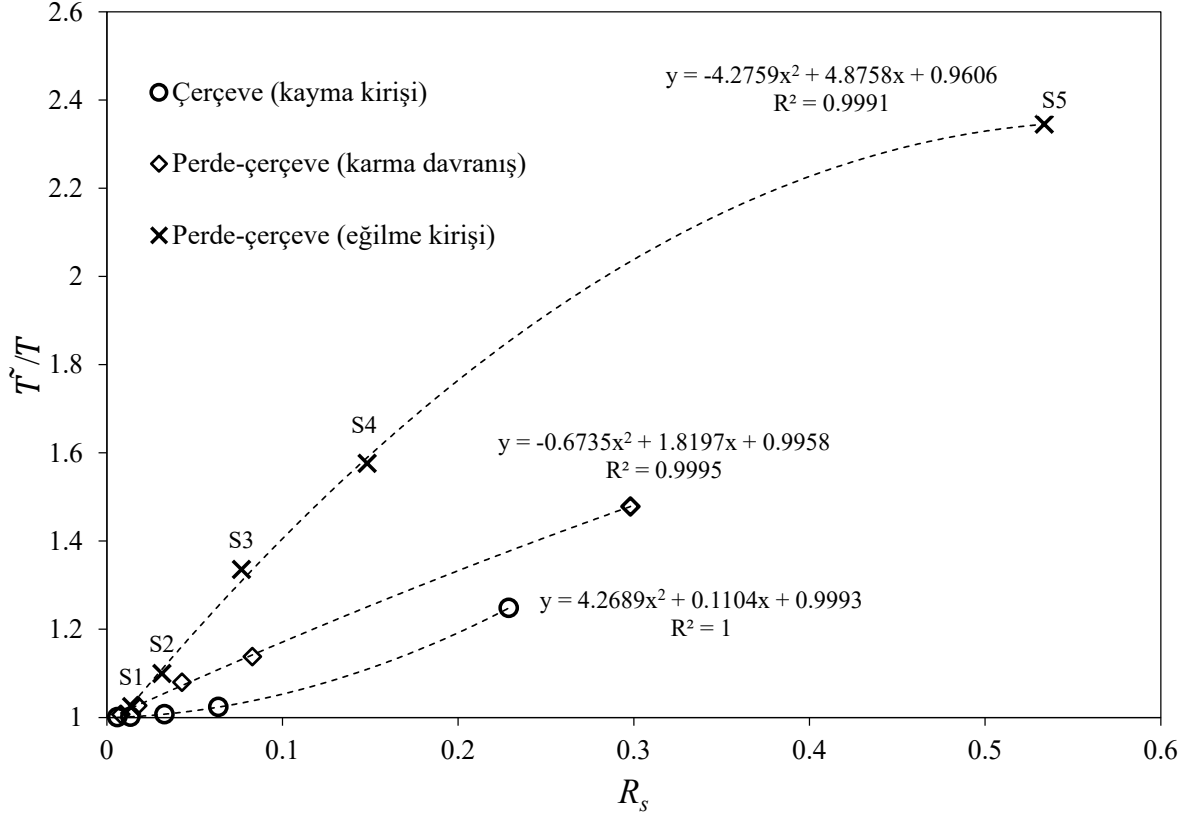
$$R_s = \frac{h_n}{v_s T} \quad (10)$$

Eşitlik 10'da  $h_n/T$  yapı rijitliğinin bir göstergesi olarak yer almaktadır.  $h_n/T$  değerinin azalmasıyla yapı rijitliğinin de azaldığı bilinmektedir.  $v_s$  ise daha önce belirtildiği üzere belirli bir temel boyutu için zemin-temel sisteminin rijitliğini ifade etmektedir. Betonarme çerçeve sistemli binalarda  $R_s$  ile  $\bar{T}/T$  ve temel sönümü ( $\beta_f$ ) arasındaki ilişki Şekil 2'de görülmektedir. Şekil 2'den diğer tüm faktörler eşitken artan  $h/B$  oranı ile devrilme momentinin (overturning moment) ve temel dönmesinin ( $\theta$ ) artmasına bağlı olarak yüksek binalarda ZYE'nin daha fazla periyot uzamasına neden olduğu sonucuna varmak mümkündür. Farklı taşıyıcı sistemlere sahip binalarda  $R_s$  ile  $\bar{T}/T$  arasındaki ilişkinin farklılaştığı görülmektedir. Şekil 3'te kayma kirişi davranışı gösteren çerçeve, eğilme kirişi davranışı gösteren perde-çerçeve ve karma davranış gösteren perde-çerçeve sistemlerde  $R_s$  ile  $\bar{T}/T$  arasındaki ilişki görülmektedir.



Şekil 2:  $\bar{T}/T$  ve  $\beta_f$ 'nin  $R_s$  ile değişimi (NIST 2012)

Figure 2: Variation of  $\bar{T}/T$  and  $\beta_f$  with  $R_s$  (NIST 2012)



Şekil 3: Farklı taşıyıcı sistemler için  $\tilde{T}/T$ 'nin  $R_s$  ile değişimi (Ozgun ve Bozdogan 2022)  
 Figure 3: Variation of  $\tilde{T}/T$  with  $R_s$  for different structural systems (Ozgun ve Bozdogan 2022)

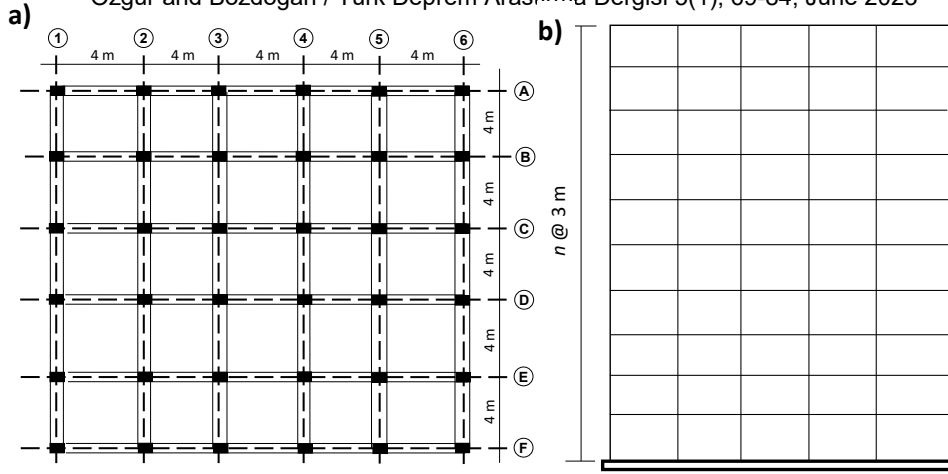
Şekil 3'te görülen taşıyıcı sistemlerin tamamında  $R_s$  ile  $\tilde{T}/T$  arasında oldukça anlamlı bir ilişki mevcuttur ve söz konusu ilişkinin taşıyıcı sisteme göre şekillendiği anlaşılmaktadır. Periyot uzaması özellikle rijit binalarda  $R_s$ 'ye daha fazla duyarlıdır. Başka bir deyişle bina rijitliği arttıkça periyot uzamasının anlamlı bir değere ulaşması için gereken  $R_s$  değeri azalmaktadır. Şekil 2 ve Şekil 3 birlikte değerlendirildiğinde betonarme çerçeve sistemli binalarda periyodun ZYE ile %5 uzaması için  $R_s$ 'nin 0.1 olması gerektiği görülmektedir.

### 3. MATERYAL ve METOD

Bu bölümde ZYE'nin değerlendirilmesi için yapılan analizlerde ele alınan binalar ve saha şartlarını ifade eden zemin koşulları hakkında bilgiler verilmiştir.

#### 3.1) Bina Parametreleri

Analizlerde kullanılan binanın kat planı Şekil 4a'da görülmektedir. Her iki yönde de 4 m'lik 5 açıklık yer almaktadır. Kolon ebatları kat adedi ( $n$ ) ile değişmektedir. Kolon ebatları Tablo 1'de verilmiştir. Kirişler tüm modellerde 25/40 cm boyutunda alınmıştır. Şekil 4b'de binanın karşıdan görünümü yer almaktadır. Kat adedi 1 ile 10 arasında değişmektedir. Kat yüksekliği ve kütlesi tüm katlarda eşit olup sırasıyla 3 m ve 57 t'dur. Beton sınıfı olarak C30 seçilmiştir.



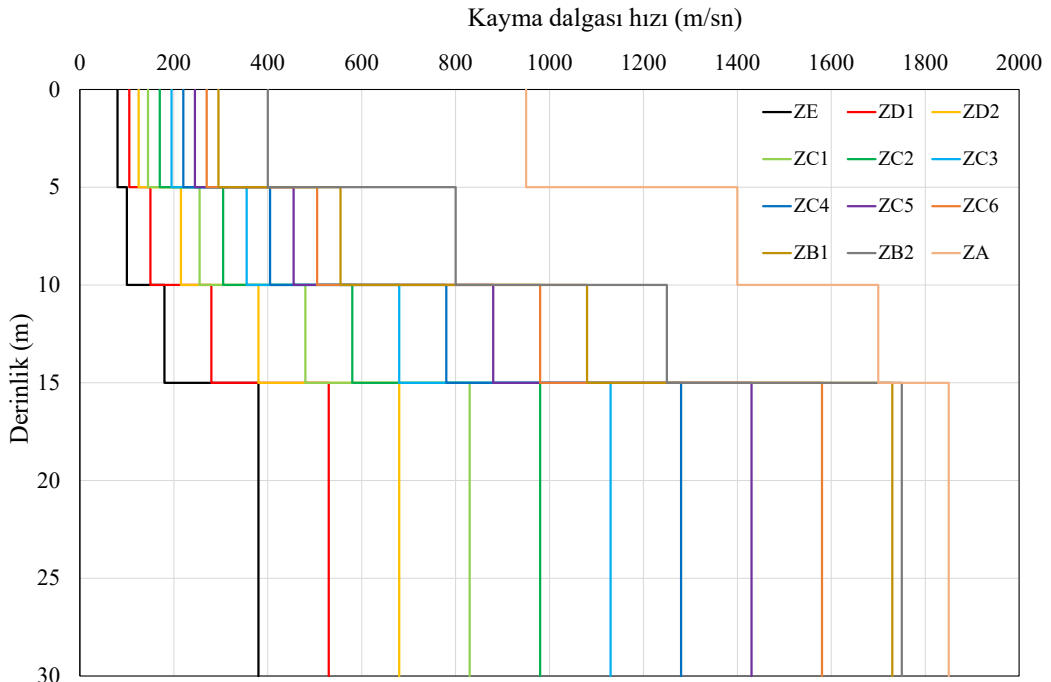
Şekil 4: Bina konfigürasyonu a) Plan, b) Karşıdan görünüm  
Figure 4: Building configuration a) Plan, b) Elevation

Tablo 1: Kolon kesitlerinin kat adedi ile değişimi  
Table 1: Variation of column cross-section with number of storeys

$n$	Kolon kesitleri (cm)
1-4	30/30
5-6	35/35
7-8	40/40
9-10	45/45

### 3.2) Zemin Profilleri

Zeminin periyot uzamasındaki etkisini ortaya koyabilmek için 12 farklı zemin profili oluşturulmuştur. Zemin profilleri 30 m kalınlıkta olup düşük birim deformasyon kayma dalgası hızının ( $v_s$ ) derinlikle değişimi Şekil 5'te görülmektedir.



Şekil 5: Zemin profillerine ait kayma dalgası hızlarının derinlikle değişimi  
Figure 5: Variation of shear wave velocity of soil profiles with depth



Oluşturulan zemin profillerinin yerel zemin sınıflarını belirlemek amacıyla temel alt kotundan itibaren aşağıya doğru en üst 30 m için ortalama kayma dalgası hızı ( $v_{s,30}$ ) Eşitlik 11 ile hesaplanmıştır.

$$v_{s,30} = 30 / \sum(h_i/v_{si}) \quad (11)$$

Eşitlik 11'de  $h_i$  en üst 30 m içinde kalan herhangi bir tabakanın kalınlığını ve  $v_{si}$  ilgili tabakadaki düşük birim deformasyon kayma dalgası hızını ifade eder. Yerel zemin sınıfı  $v_{s,30}$  ile belirlendikten sonra temel dönmesi etkili derinliği boyunca ortalama düşük birim deformasyon kayma dalgası hızı ( $v_{s,a}$ ) hesaplanmıştır. Bunun için izlenen adımlar şu şekildedir:

- Temel gömülme derinliği ( $e$ ) belirlenir: Tekil temeller ve bağ kirişlerinin toplam alanı binanın taban alanının %75'ini aşıyorsa gömülme derinliği temel alt kotuna, aksi halde temel üst kotuna göre hesaplanır (ASCE 2010). Bu çalışmada  $e$  değeri, temel üst kotu esas alınarak 0.2 m kabul edilmiştir.
- Efektif profil derinliği ( $z_p$ ) temel boyutları yardımıyla hesaplanır (NIST 2012).

$$z_p = (B^3L)^{0.25} \quad (12)$$

$B$  analiz edilen aksa paralel yönde temel uzunluğunun yarısı (10 m) ve  $L$  diğer yönde temel uzunluğunun yarısıdır (10 m).

- Temel dönmesi için etkin derinlik ( $r$ ) hesaplanır:

$$r = e + z_p \quad (13)$$

- Temel dönmesi için etkin derinlik boyunca ortalama yüksek birim deformasyon kayma dalgası hızı hesaplanır (ASCE 2010).

$$v_{s,a} = \sum d_i / \sum(d_i/v_{s,i}) \quad (14)$$

$d_i$  yüzey ile etkili derinlik arasındaki herhangi bir tabakanın kalınlığını ve  $v_{s,i}$  ilgili tabakadaki düşük birim deformasyon kayma dalgası hızını ifade eder. Düşük birim deformasyon durumu deprem için geçerli olmadığından yüksek birim deformasyon kayma dalgası hızı ( $v_{sy,a}$ ) geçerli olacaktır. Bu nedenle  $v_{sy,a}$  kısa periyot için tasarım spektral ivme katsayısı ( $S_{DS}$ ) ile belirlenen ve Tablo 2'de görülen azaltma katsayıları ile Eşitlik 15 yardımıyla düzeltilir. Bu çalışmada tüm zeminler için  $S_{DS}$  1 g (9.81 m/sn<sup>2</sup>) kabul edilmiştir.

$$v_{sy,a} = v_{s,a} \frac{v_{sy,a}}{v_{s,a}} \quad (15)$$

Tablo 3'te zemin profillerinin belirlenen yerel zemin sınıflarına ilaveten  $R_s$  değerinin hesaplanmasında kullanılmak üzere hesaplanan  $v_{sy,a}$  değerleri görülmektedir. Yüksek birim deformasyon için kayma dalgası hızının zayıf zeminlerde çok daha önemli ölçüde azaldığı görülmektedir.

Tablo 2: Yüksek birim deformasyon için kayma dalgası hızı azalım katsayıları (ASCE 2010)  
 Table 2: Reduction factors of shear wave velocity for high level of strain (ASCE 2010)

Yerel zemin sınıfı	$v_{sy}/v_s$		
	$S_{Ds}/2.5$		
	$\leq 0.1$	0.4	$\geq 0.8$
ZA	1.00	1.00	1.00
ZB	1.00	0.97	0.95
ZC	0.97	0.87	0.77
ZD	0.95	0.71	0.32
ZE	0.77	0.22	<sup>a</sup>
ZF	<sup>a</sup>	<sup>a</sup>	<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Sahaya özel zemin tepki analizleri ile belirlenir.

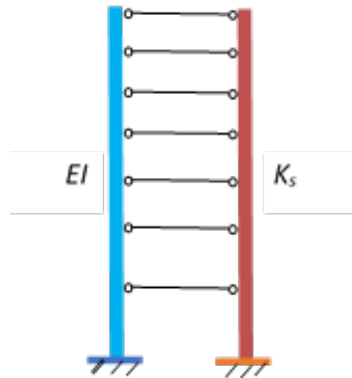
Not: Ara değerler için doğrusal interpolasyon uygulanabilir.

Tablo 3: Zemin profilleri için etkili derinlik boyunca ortalama kayma dalgası hızları  
 Table 3: Average shear wave velocities of soil profiles over effective depth

Zemin	ZE	ZD1	ZD2	ZC1	ZC2	ZC3	ZC4	ZC5	ZC6	ZB1	ZB2	ZA
$v_{s,30}$ (m/sn)	166.9	236.0	304.7	363.3	430.2	497.1	563.9	630.7	697.4	764.2	957.8	1508.8
Sınıf	ZE	ZD	ZD	ZC	ZC	ZC	ZC	ZC	ZC	ZB	ZB	ZA
$v_{s,a}$ (m/sn)	88.9	123.5	158.1	184.9	225.0	258.6	292.1	325.5	359.0	392.4	533.3	1131.9
$v_{sy,a}/v_{s,a}$	0.22	0.71	0.71	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.97	0.97	1.00
$v_{sy,a}$ (m/sn)	19.6	87.7	112.3	160.9	195.8	225.0	254.1	283.2	312.3	380.6	517.3	1131.9

### 3.3) Modal Parametreler

Bu çalışmada ele alınan binaların dinamik parametrelerinin bulunması için literatürden bilinen eğilme-kayma kiriş modeli kullanılmıştır (Miranda ve Reyes 2002, Bozdogan ve diğ. 2005). Bu modele göre binaların yatay yükler altındaki davranışı bir eğilme-kayma kirişi olarak temsil edilebilir. Salt çerçevelerden oluşan binalar eksenel deformasyonlar ihmal edilirse bir kayma kirişi olarak modellenebilirken yalnızca dolu perdelerden oluşan binalar ise bir eğilme kirişi olarak modellenebilir. Perde ve çerçevelerin birlikte kullanıldığı binalar ise eğilme-kayma kirişi olarak modellenebilir. Şekil 6'da eğilme-kayma kirişi modeli görülmektedir. Şekil 6'da görülen iki ucu mafsallı çubuklar döşemeleri temsil etmektedir.



Şekil 6: Eğilme kayma kirişi  
 Figure 6: Flexural shear beam

Bu modele göre Eşitlik 16 ile verilen boyutsuz  $k$  parametresi binanın davranışını temsil etmektedir.

$$k = h \sqrt{\frac{K_s}{EI}} \quad (16)$$

Eşitlik 16'da  $h$  bina yüksekliğini  $K_s$  kayma rijitliğini ve  $EI$  ise kolon ve perdelerin eğilme rijitliklerinin toplamını göstermektedir.  $K_s$  ve  $EI$  rijitliklerinin bulunmasına ilişkin ayrıntılar literatürde (Bozdogan ve diğ. 2005) mevcuttur.

$k=0$  değeri salt perdelerden oluşan binaları temsil ederken,  $k=1,5-5$  arası perde çerçevelerden oluşan binaları  $k=5-20$  arası ise salt çerçevelerden oluşan binaları temsil etmektedir. Eğilme–kayma kiriş modeline göre hakim periyot Eşitlik 17 ile hesaplanmaktadır (Miranda ve Reyes 2002, Bozdogan ve diğ. 2005).

$$T = S_1 h^2 \sqrt{\frac{m}{EI}} \quad (17)$$

Eşitlik 17'de  $S_1$  1. mod katsayısını,  $m$  ise yayılı kütle göstermektedir.

Binaları temsil eden eğilme–kayma kiriş modeli için SAP 2000 programı kullanılmıştır (CSI 2022). Analizlerde kat kütlelerinin kat hizalarında ayrı olarak etkidiği ve burulmanın ihmal edildiği kabulleri yapılmıştır. Çalışmada 1 den 10 kata kadar kiriş modelleri kullanılarak analizler gerçekleştirilmiş ve ele alınan binalar için Eşitlik 17'de yer alan  $S_1$  değerleri ile etkin yükseklikler bulunmuştur.  $S_1$  değerlerinin kolay bir şekilde bulunabilmesi için SAP 2000 ile yapılan çözümlerde  $S_1=T_1$  olması için  $h$ ,  $EI$  ve  $m$  parametreleri Eşitlik 18 ile verilen koşulu sağlayacak şekilde seçilmiştir. Böylece SAP 2000'de bulunan hakim periyot değerleri doğrudan  $S_1$  değerlerini vermiştir.

$$h^2 \sqrt{\frac{m}{EI}} = 1 \quad (18)$$

Yapılan analizler sonucunda  $S_1$  ve etkin yükseklik oranları ( $\alpha$ ) bulunarak Tablo 4'te verilmiştir. Tablo 4'te yer alan  $S_1$  değerleri ve Eşitlik 17 kullanılarak binaların hakim periyotları hesaplanmıştır. Etkin kesit yükseklikleri ise bina yüksekliği ile etkin kesit yüksekliği oranının çarpımı ile bulunmuştur. Tablo 5'te hesaplanan hakim periyot ve etkin yükseklikler görülmektedir. Çalışmada TBDY (2018) ile uyum sağlamak üzere çatlama kesit kabulü yapılmıştır. Çatlama kesitin rijitliğinin yarıya düştüğü kabulü ile periyotları bulmak için Eşitlik 17'den elde edilen değerler Eşitlik 2'nin gerektirdiği üzere  $1.4 (\sqrt{2})$  ile çarpılmıştır.

Tablo 4: Kat adedine bağlı olarak  $S_1$  ve  $\alpha$  değerleri  
Table 4:  $S_1$  and  $\alpha$  values vs. number of storeys

$n$	$S_1$	$\alpha$
1	1.850	1
2	0.777	0.838
3	0.495	0.798
4	0.365	0.738
5	0.318	0.720
6	0.263	0.706
7	0.254	0.699
8	0.222	0.691
9	0.223	0.688
10	0.203	0.683

Tablo 5: Çatlamış kesit kabulüyle hesaplanan  $T$  ve  $h_n$  değerleri  
 Table 5:  $T$  and  $h_n$  values with cracked section assumption

$n$	$T$ (sn)	$h_n$ (m)
1	0.115	3.000
2	0.194	5.028
3	0.277	7.182
4	0.364	8.856
5	0.364	10.800
6	0.433	12.708
7	0.436	14.679
8	0.498	16.584
9	0.500	18.576
10	0.562	20.490

#### 4. BULGULAR

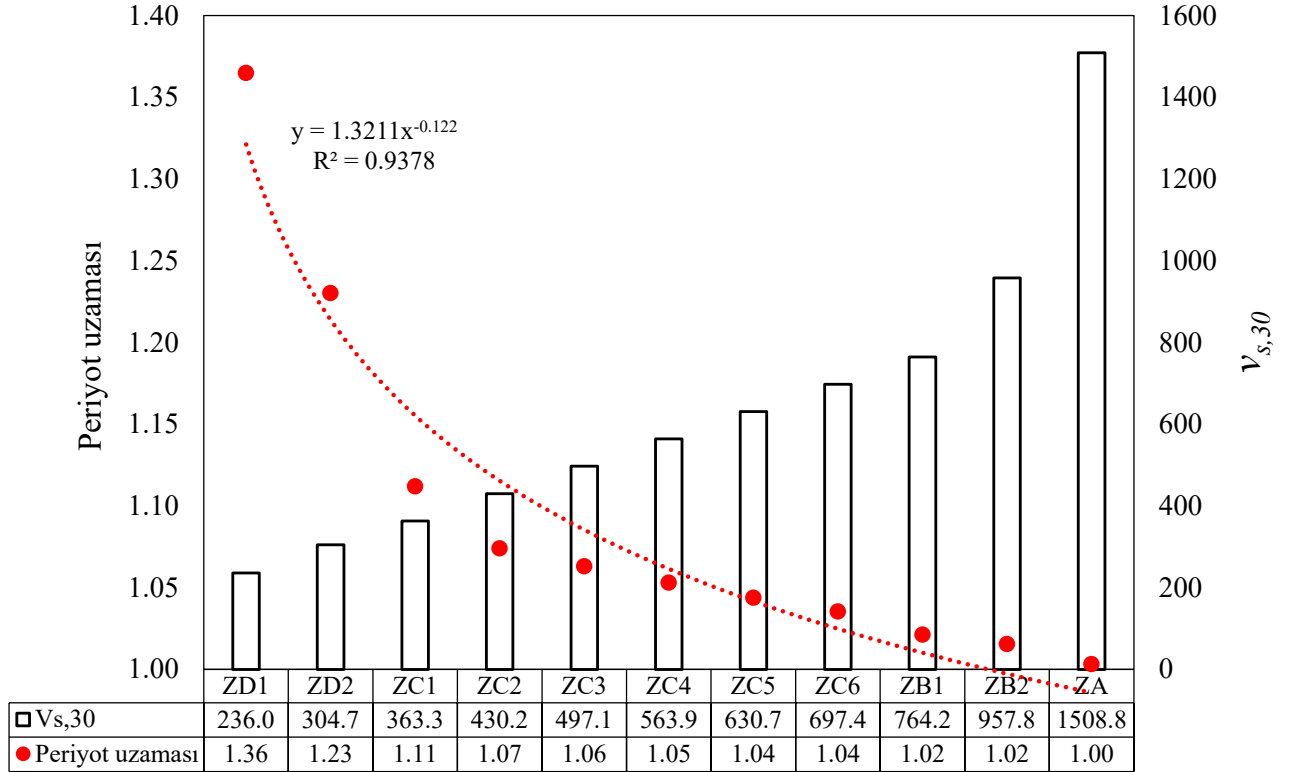
Çalışmada ele alınan zemin profilleri üzerinde yer alan farklı kat adedine sahip binaların  $R_s$  değerleri Eşitlik 10 yardımıyla ve Bölüm 3'te elde edilen ilgili parametrelerle hesaplanmıştır. Hesaplanan  $R_s$  değerleri Tablo 6'da görülmektedir. Tablo 6'dan görülebileceği üzere kat adedinin ve beraberinde modal yüksekliğin artmasıyla  $R_s$  değeri artmaktadır. Bu durumu daha yüksek binalarda kolon kesitlerinin artırılmış olması ile açıklamak mümkündür. Aynı kat adedine sahip binalarda ise yerel zemin sınıfı olarak ZE'den ZA'ya doğru  $R_s$  değeri azalmaktadır. Ele alınan zemin profilleri içinde ZE, ZD ve görece zayıf ZC ( $v_{s,30} \leq 560$  m/sn) zemin sınıflarında 10 kata kadar tüm binalarda  $R_s$ 'nin 0.1 kritik değerini aştığı görülmektedir. Bu durum söz konusu zemin sınıflarında ZYE'nin 10 kata kadar binalarda etkin olacağını işaret etmektedir. Görece sağlam ZC ( $v_{s,30} > 560$  m/sn) zemin sınıfında ise ZYE'nin etkin olacağı kat adedinin zemin profiline göre değiştiği görülmektedir. ZYE'nin etkin olacağı kat adedi ZC5 için 5 kat, ZC2 için 7 kat olarak belirlenmiştir. ZC sınırına çok yakın olan görece çok zayıf ZB1'de ( $v_{s,30} = 764.2$  m/sn) 9 kat ve üzeri yapılarda ZYE'ni etkin olması beklenirken, ZB ve ZA zeminlerde 10 kata kadar ZYE'nin etkin olmayacağı görülmektedir.

Tablo 6:  $R_s$  değerleri  
 Table 6:  $R_s$  values

$n$	$R_s$											
	ZE	ZD1	ZD2	ZC1	ZC2	ZC3	ZC4	ZC5	ZC6	ZB1	ZB2	ZA
1	1.33	0.30	0.23	0.16	0.13	0.12	0.10	0.09	0.08	0.07	0.05	0.02
2	1.33	0.30	0.23	0.16	0.13	0.12	0.10	0.09	0.08	0.07	0.05	0.02
3	1.33	0.30	0.23	0.16	0.13	0.12	0.10	0.09	0.08	0.07	0.05	0.02
4	1.24	0.28	0.22	0.15	0.12	0.11	0.10	0.09	0.08	0.06	0.05	0.02
5	1.52	0.34	0.26	0.18	0.15	0.13	0.12	0.10	0.09	0.08	0.06	0.03
6	1.50	0.33	0.26	0.18	0.15	0.13	0.12	0.10	0.09	0.08	0.06	0.03
7	1.72	0.38	0.30	0.21	0.17	0.15	0.13	0.12	0.11	0.09	0.07	0.03
8	1.70	0.38	0.30	0.21	0.17	0.15	0.13	0.12	0.11	0.09	0.06	0.03
9	1.90	0.42	0.33	0.23	0.19	0.17	0.15	0.13	0.12	0.10	0.07	0.03
10	1.86	0.42	0.32	0.23	0.19	0.16	0.14	0.13	0.12	0.10	0.07	0.03

Hesaplanan  $R_s$  değerleri yardımıyla farklı zemin profilleri üzerinde yer alan ve yüksekliği 10 kata kadar olan binalarda ZYE ile gerçekleşmesi beklenen ortalama periyot uzaması Ozgun ve Bozdogan (2022) tarafından önerilen Eşitlik 19 yardımıyla hesaplanmış ve Şekil 7'de gösterilmiştir. Eşitlik 19,  $R_s$  için yaklaşık 0.25'e kadar çalışılmış olduğu için Şekil 7'de ZE zemin sınıfı gösterilmemiştir.

$$\tilde{T}/T = 4.2689 R_s^2 + 0.1104 R_s + 0.9993 \quad (19)$$



Şekil 7: Farklı yerel zemin şartlarında periyot uzaması  
Figure 7: Period elongation for different local soil conditions

## 5. SONUÇLAR

Yapıların depreme dayanıklı tasarımı için deprem etkisinin analiz modeline en doğru şekilde yansıtılması büyük önem taşımaktadır. ZYE'nin tüm yapılarda sönüm oranını ve periyodu artırdığı genel kabul görmektedir. İlk bakışta bu kabullerden hareketle ZYE'nin taban kesme kuvvetini azaltarak yapıları elverişli yönde etkilediği akla gelmektedir. Fakat mevcut literatürde ZYE'nin eğrilik sünekliği talebine ilaveten temel dönmesi nedeniyle tepe yer değiştirmesini önemli ölçüde değiştirmek suretiyle yapıları olumsuz yönde etkileyebileceğini öne süren çalışmalar da vardır. Bu durum göz önüne alındığında ZYE'nin etkin olup olmayacağını tüm saha şartları ve bina konfigürasyonları için değerlendirilmesi gerektiği sonucuna varılabilir.

Söz konusu değerlendirmeyi yaparken kullanılacak en uygun parametre yapının zemine rijitlik oranıdır. Bu oranın 0.1'i aşması halinde ZYE'nin etkin olabileceği ve dinamik analizde yer alması gerektiği düşünülmektedir. Bu çalışmada farklı saha şartlarını temsilen oluşturulan zemin profilleri üzerinde 1 kattan 10 kata kadar betonarme çerçeve sistemli binaların bulunması halinde yapının zemine rijitlik oranı değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen bulgulardan varılan sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

Yerel zemin sınıfından bağımsız olarak kat adedinin artmasıyla bina rijitliği ve beraberinde yapının zemine rijitlik oranı düşey yapı elemanlarındaki kesit artışı nedeniyle artmaktadır. Dolayısıyla ZYE'nin etkin olma potansiyeli artmaktadır. Periyot uzaması, görece çok zayıf ZB zeminde 9 katlı binada 1.05'i bulmaktadır.

Aynı kat adedine sahip binalarda zemin sınıfı olarak ZE'den ZA'ya doğru yapının zemine rijitlik oranı azalmaktadır. Dolayısıyla ZB ve ZA zemin sınıflarında (görece çok zayıf ZB hariç) 10 kata kadar ZYE'nin etkin olması beklenmemelidir.

10 kata kadar tüm binalarda ZE, ZD ve görece zayıf ZC zemin sınıflarında ZYE etkin olmaktadır. Periyot uzaması için kullanılan Eşitlik 19'un yapının zemine rijitlik oranı olarak 0.25'e kadar çalışılmış olmasından dolayı ZE zemin sınıfı periyot uzaması açısından değerlendirme dışında bırakıldığında periyot uzamasının ZD zemin sınıfında 1.80 kata, ZC zemin sınıfında 1.25 kata ulaştığı görülmektedir.

Görece sağlam ZC zemin sınıfında ZYE'nin hangi kat adedinden sonra etkin olacağı zemin profiline başka bir deyişle temel dönmesi için etkili derinlik boyunca ortalama yüksek birim deformasyon kayma dalgası hızına bağlıdır. Kayma dalgası hızının azalmasıyla ZYE'nin etkin olacağı kat adedi azalmaktadır.

Yukarıda sıralanan sonuçların ışığında ZYE'nin özellikle zayıf zemin koşullarında görece rijit yapılar için dinamik analizlerde göz önüne alınması gerektiği değerlendirilmiştir.

## KAYNAKLAR

ASCE, 2010. Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, ASCE/SEI 7-10, American Society of Civil Engineers, Virginia-USA, Erişim adresi: [https://www.waterboards.ca.gov/waterrights/water\\_issues/programs/bay\\_delta/california\\_water\\_fix/exhibits/docs/dd\\_jardins/DDJ-148%20ASCE%207-10.pdf](https://www.waterboards.ca.gov/waterrights/water_issues/programs/bay_delta/california_water_fix/exhibits/docs/dd_jardins/DDJ-148%20ASCE%207-10.pdf)

Aydemir M.E., 2013. Soil structure interaction effects on structural parameters for stiffness degrading systems built on soft soil sites, *Structural Engineering and Mechanics* 45(5), 655-676.

Bazaios K., Gerolymos N., Bouckovalas G., Chaloulos Y., 2022. SSI effects on seismic settlements of shallow foundations on sand, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 155, 107025.

Behnamfar F., Banizadeh M., 2016. Effects of soil-structure interaction on distribution of seismic vulnerability in RC structures, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 80, 73-86.

Bielak J., 1976. Modal analysis for building-soil interaction, *Journal of Engineering Mechanics* 102, 771-786.

Bozdogan K.B., Ozturk D., Nuhoglu A., 2005. A practical method for dynamic analysis of multistorey buildings according to continuum approximation model, *Journal of Engineering and Natural Sciences* 4, 65-77.

Ciampoli M., Pinto P.E., 1995. Effects of soil-structure interaction on inelastic seismic response of bridge piers, *Journal of Structural Engineering* 121(5), 806-814.

CSI, 2022. SAP2000 Integrated Software for Structural Analysis and Design, Computers and Structures Inc., Berkeley, California-USA.

De Carlo G., Dolce M., Liberatore D., 2000. Influence of soil-structure interaction on the seismic response of bridge piers, 12th World Conference on Earthquake Engineering, Upper Hut, New Zealand, Erişim adresi: <https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/0438.pdf>

Elnashai A.S., McClure D.C., 1996. Effect of modelling assumptions and input motion characteristics on seismic design parameters of RC bridge piers, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 25(5), 435-463.

FEMA, 2020. A Practical Guide to Soil-Structure Interaction, FEMA P-2091, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.-USA, Erişim adresi: <https://www.fema.gov/sites/default/files/documents/fema-p-2091-soil-structure-interaction.pdf>

Forcellini D., 2021. A Novel Framework to Assess Soil Structure Interaction (SSI) Effects with Equivalent Fixed-Based Models, *Applied Sciences* 11(21), 10472.

Kara D., Bozdoğan K.B., Keskin E., 2020. ereve sistemlerin yapı zemin etkileřimli serbest titreşim analizi, *Politeknik Dergisi* 23(4), 1347-1355.

Miranda E., Bertero V., 1994. Evaluation of strength reduction factors of earthquake-resistant design, *Earthquake Spectra* 10(2), 357-379.

Miranda E., Reyes C.J., 2002. Approximate lateral drift demands in multistory buildings with nonuniform stiffness, *Journal of Structural Engineering* 128(7), 840-849.

Mylonakis G., Gazetas G., 2000. Seismic soil-structure interaction: beneficial or detrimental?, *Journal of Earthquake Engineering* 4(3), 277-301.

Newmark N.M., Hall W.J., 1969. Seismic design criteria for nuclear reactor facilities, 4th World Conference on Earthquake Engineering, Santiago de Chile, Erişim adresi: [https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/4\\_vol2\\_B4-37.pdf](https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/4_vol2_B4-37.pdf)

NIST, 2012. Soil-Structure Interaction for Building Structures, NISTGCR - 12-917-21, National Institute of Standards and Technology, Maryland-USA, Erişim adresi: [https://tsapps.nist.gov/publication/get\\_pdf.cfm?pub\\_id=915495](https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=915495)

Ozgun M., Bozdogan K.B., 2022. Betonarme Binalarda Zemin-Yapı Etkileşiminin Sismik Tasarım Parametrelerine Etkileri, *El Cezeri* 9(2), 507-521.

Steward J.P., Seed R.B., Fenves G.L., 1999. Seismic soil-structure interaction in buildings. II: Empirical Findings, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 125(1), 38-48.

TBDY, 2018. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliđi, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Erişim adresi: [https://www.afad.gov.tr/kurumlar/afad.gov.tr/2309/files/TBDY\\_2018.pdf](https://www.afad.gov.tr/kurumlar/afad.gov.tr/2309/files/TBDY_2018.pdf)

Veletsos A.S., Nair V.V., 1975. Seismic interaction of structures on hysteretic foundations, *Journal of Structural Engineering* 101, 109-129.

Xiong W., Jiang L.Z., Li Y.Z., 2016. Influence of soil-structure interaction (structure-to-soil relative stiffness and mass ratio) on the fundamental period of buildings: experimental observation and analytical verification, *Bulletin of Earthquake Engineering* 14(1), 139-160.

### **ARAŞTIRMA VERİSİ** (*Research Data*)

Çalışma kapsamında kullanılan zemin profilleri ve bina konfigürasyonları, saha şartlarını ve betonarme çerçeve binaları temsil edecek şekilde yazarlar tarafından oluşturulmuştur.

### **ÇIKAR ÇATIŞMASI / İLİŞKİSİ** (*Conflict of Interest / Relationship*)

Araştırma kapsamında herhangi bir kişiyle ve/veya kurumla çıkar çatışması/ilişkisi bulunmamaktadır.

### **YAZARLARIN KATKI ORANI BEYANI** (*Author Contributions*)

- Çalışmanın tasarlanması (*Designing of the study*): M.Ö., K.B.B.
- Literatür araştırması (*Literature research*): M.Ö.
- Saha çalışması, veri temini/derleme (*Fieldwork, collection/compilation of data*): M.Ö., K.B.B.
- Verilerin işlenmesi/analiz edilmesi (*Processing/analysis of data*): M.Ö., K.B.B.
- Şekil/Tablo/Yazılım hazırlanması (*Preparation of figures/tables/software*): M.Ö., K.B.B.
- Bulguların yorumlanması (*Interpretation of findings*): M.Ö., K.B.B.
- Makale yazımı, düzenleme, kontrol (*Writing, editing and checking of manuscript*): M.Ö., K.B.B.