



Makale / Research Paper

Betonarme Binalarda Zemin-Yapı Etkileşiminin Sismik Tasarım Parametrelerine Etkileri

Mehmet ÖZGÜR^{1a*}, Kanat Burak BOZDOĞAN^{1b}

¹Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü Çanakkale/TÜRKİYE
mehmetozgur@comu.edu.tr

Received/Geliş: 08.07.2021

Accepted/Kabul: 07.10.2021

Öz: Yapıların deprem davranışı birbirlerine bağlı olan zemin, temel ve yapı alt-sistemleri arasındaki etkileşim nedeniyle değişebilmektedir. Genellikle temel, yapının bir bölümü olarak kabul edilir ve bu etkileşim zemin-yapı etkileşimi (ZYE) olarak anılır. ZYE, rijit (ankastre) temel yaklaşımından farklı olarak esnek zemin-temel sistemi, temel sönümü ve yapıya iletilen yer hareketinin filtrelenmesi gibi faktörleri kapsar. Esnek zemin-temel sistemi ve temel sönümüne bağlı olarak sırasıyla ortak sistem periyodunun uzaması ve sönüm oranının artması eylemsizlik etkileşiminin sonuçlarıdır. Öte yandan, serbest saha hareketinin temel girdi hareketinden farklılaşması kinematik etkileşim olarak değerlendirilir. Bu çalışmanın amacı esnek zemin-temel sistemi nedeniyle bina periyodunda gerçekleşen uzamayı farklı yapı sistemlerine sahip binalar ve yerel zemin sınıflarında ortaya koymaktır. Ayrıca periyoda bağlı olan spektral ivme ve deplasman, taban kesme kuvveti ve tepe deplasmanı gibi bazı sismik tasarım parametrelerinin değişimi de gösterilmiştir. ZYE ile elde edilen sismik parametreler, ZYE etkilerinin zayıf zeminler üzerinde yer alan rijit binalar için daha belirgin olduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Zemin-yapı etkileşimi; zemin sınıfı; periyot uzaması.

Effects of Soil-Structure Interaction on Seismic Design Parameters of Reinforced Concrete Buildings

Abstract: The earthquake response of structures can alter due to the interactions between the linked subsystems; soil, foundation and structure. Generally, the foundation is assumed as a part of the structure and the related interaction is then called as soil-structure interaction (SSI). In contrast to approach of rigid (fixed) foundation, SSI comprises factors such as flexible soil-foundation system, foundation damping and filtering the ground motion transmitted to the structure. The period elongation and the increase in the damping ratio of the overall system due to the flexible soil-foundation system and the foundation damping, respectively, are referred as the inertial interaction effects. On the other hand, the difference between the free-field ground motion and the foundation input motion is stated as the kinematic interaction effect. The aim of this study is to determine the period elongation due to the flexible soil-foundation system for buildings with different structural systems resting on soils with different local soil classes. Seismic design parameters related to the period such as spectral acceleration and displacement, base shear force and top displacement are also determined. Seismic parameters obtained with SSI approach point out that the effects of SSI becomes more significant for rigid buildings on weak soils.

Keywords: Soil-structure interaction; soil class; period elongation.

Bu makaleye atf yapmak için

Özgür, M., Bozdoğan, K.B., "Betonarme Binalarda Zemin-Yapı Etkileşiminin Sismik Tasarım Parametrelerine Etkileri" El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi 2022, 9 (2); 507-521.

How to cite this article

Ozgur, M., Bozdogan, K.B., "Effects of Soil-Structure Interaction on Seismic Design Parameters of Reinforced Concrete Buildings" El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 2022, 9 (2); 507-521.

ORCID ID: ^a0000-0003-4158-3962; ^b0000-0001-7528-2418

1. Giriş

Yapıların depreme dayanıklı ve ekonomik tasarımı için belirlenmesi gereken en önemli değişkenlerin başında sismik yükler gelmektedir. Yapının maruz kalacağı sismik yükler kaynak etkileri, güzergâh etkileri, yerel zemin şartları ve zemin-yapı etkileşimi (ZYE) gibi faktörlere bağlıdır. Kaynak etkileri depremin büyüklüğü, fayın kırılma mekanizması ve dış merkezin yapı sahasına göre konumu gibi parametreleri kapsar. Güzergâh etkileri, deprem dalgalarının yayılımı sırasında ivme genliklerindeki artış ya da azalmayı ifade eder. Yerel zemin şartları ise mühendislik ana kayasının üzerinde yer alan, yüzeye yakın ve genellikle yatay kabul edilen nispeten daha az rijit zemin tabakalarında deprem dalgalarının farklılaşmasına neden olur. Sonuçta bu üç faktörün etkileri birleşerek yüzeyde depremin sonucu olan serbest saha (free-field) hareketini şekillendirir. Serbest saha ifadesi bu yer hareketinde yapı ve temel titreşiminin herhangi bir etkisinin olmadığını belirtmek için kullanılmaktadır [1].

Geleneksel yapı tasarımında yapı-zemin arakesitinde ankastre mesnetlerin yer aldığı rijit (ankastre) temel (fixed-base) kullanıldığı için söz konusu serbest saha hareketinin yapıya aynen aktarılması söz konusudur. Ancak geçmiş araştırmalar ve deneyim rijit temel yaklaşımının, yapıların deprem davranışının çoğu zaman doğru olarak elde edilememesine neden olduğunu göstermektedir [2-4]. Bu durumu ZYE ile açıklamak mümkündür. ZYE en genel ifadesiyle zemin ve üzerindeki üstyapının karşılıklı etkileşimidir. Bu etkileşim sırasında zemin ortamında yayılan deprem dalgalarının bir kısmı temelden yansırken bir kısmı da yapıya iletilir ve yapının titreşimine neden olur [5]. Yapı yüksekliği boyunca ilerleyen deprem dalgaları yapının en üstünden geri yansır. Temele doğru ilerleyen yansıyan dalgalar ise temelden kısmen yapıya doğru tekrar yansırken geri kalanı zemine aktarılır. Zemine aktarılan bu deprem dalgalarına yayılım dalgaları denilmektedir. Yayılım dalgalarının artması, yapı titreşimine neden olan deprem dalgalarının azalmasına ve titreşim süresinin kısılmasına sebep olur. Böylelikle yapı-zemin ortak sisteminin sönüm oranı, yapının kendi sönüm oranının (genellikle %5 kabul edilir) üzerinde bir değer alır. Yayılım sönümü, zeminde ve zemin-temel arakesitinde zemin kayma deformasyonu nedeniyle ortaya çıkan zemin çevrimsel sönümü ile birlikte temel sönümü olarak ifade edilir [6]. Ayrıca ZYE kapsamında temellerin rijit kabul edilmemesi nedeniyle ortak sistemin periyodunda bir artış meydana gelir. Söz konusu periyot uzaması, temel sönümü ile birlikte atalet etkileşimi olarak adlandırılır.

ZYE kapsamında değerlendirilen bir diğer etkileşim ise kinematik etkileşimdir. Kinematik etkileşim temelde dengelenme (base slab averaging) ve gömülme etkilerini içerir. Temele yaklaşan eğimli kayma dalgalarının düşey ve yatay bileşenleri arasındaki hız farkı nedeniyle dalga hareketinin temelin farklı noktalarına farklı zamanlarda ulaşması söz konusudur. Bu nedenle yapı tabanı, farklı noktalarda farklı yer hareketlerine maruz kalır. Yani yapının bir köşesi altındaki zemin belirli bir yönde hareket ediyorken, karşı köşesinin altındaki zemin farklı bir yönde hareket eder. Farklı yönlerde gerçekleşen bu hareketler birbirlerini kısmen dengelediği için net hareket azalmış olur. Bu etkiye temelde dengelenme denilmektedir. Gömülme etkisi ise gömülme derinliği fazla olan temelerde yer hareketinin derinlik boyunca ivme genliğinin değişiyor olmasının göz önüne alınmasıdır. Kinematik etkileşim temel girdi hareketinin serbest saha hareketinden önemli ölçüde farklılaşmasına neden olabilir [6].

Bu çalışmada zemin-temel sisteminin rijit temel yerine esnek temel (flexible base) olarak modellenmesi ile periyot uzaması incelenmiştir. Esnek temel, zemin-temel sisteminin ötelenme ve dönme yayları ile modellenmesi yardımıyla oluşturulmuştur. Farklı taşıyıcı sisteme sahip betonarme binalar, farklı yerel zemin sınıflarında incelenerek yapının zemine rijitlik oranı değiştirilmiştir. Daha ziyade büyük taban alanlı binalarda etkili olan temelde dengelenme, birden fazla bodrum kata sahip binalarda etkili olan gömülme etkisi ve temel sönümü ele alınan betonarme binaların taşıyıcı sistemleri nedeniyle çalışmaya dâhil edilmemiştir. Ayrıca periyoda bağlı olan spektral ivme ve

deplasman, taban kesme kuvveti ve tepe noktası deplasmanı gibi bazı sismik tasarım parametrelerinin değişimi de belirlenmiştir.

2. Literatür Özeti

Yapıların hâkim doğal periyodunun belirlenmesi sismik tasarım için vazgeçilmez bir gerekliliktir. Zeminlerin, yapı periyodunu etkilediği uzun zamandır bilindiği için çok sayıda araştırmacı ZYE kapsamında çalışmalar yapmıştır.

Geniş çaplı bir güçlü yer hareketi veri setiyle yapılan bir çalışmada 57 bina ele alınmış ve binaların 1. mod periyodunun uzaması değerlendirilmiştir. Binaların büyük kısmında kinematik etkileşimin etkileri sınırlı kalmakla beraber bazı binalarda periyodun 4 katına kadar uzadığı belirlenmiştir. Derin temelli ve uzun periyotlu yapılarda analiz sonuçlarının ampirik bağlantıların verdiği sonuçlardan uzaklaştığı değerlendirilmiştir [7].

Az katlı olup sığ temellere oturan betonarme binalarda ZYE'nin taban kesme kuvvetini önemli ölçüde artırabileceği görülmüştür. Bu etkinin orta ve çok katlı yapılarda azaldığı ifade edilmiş ve zayıf zeminlerde bu etkinin daha fazla olduğu eklenmiştir. ZYE'nin taban kesme kuvvetine etkisinin depremin frekans içeriğine bağlı olarak değiştiği ve 1 saniyenin altında periyoda sahip adımların ağırlıklı olduğu depremlerde taban kesme kuvvetinin daha fazla arttığı ortaya konulmuştur. Ayrıca bağ kirişlerinin, ZYE ile taban kesme kuvvetindeki artışları azalttığı sonucuna varılmıştır [8].

ZYE'nin etkilerinin yerel zemin sınıfına ve binanın taşıyıcı sistemine bağlı olarak ne ölçüde değiştiği de güncel araştırmalara konu olmaktadır. ZD ve ZE zeminler üzerinde, taşıyıcı sistemi betonarme çerçeve ve perdeli çerçeve olan farklı yükseklikteki binalar üzerinde yapılan çalışmada periyot uzamasının ZE zeminde ve perdeli çerçevelerde daha büyük olduğu görülmüştür. Ayrıca kat adedinin periyot uzamasını değiştirdiği sonucuna varılmıştır. Önemli bir diğer konu da toplam deplasman içinde temel ötelenmesi, temel dönmesi ve kat ötelenmelerinden kaynaklanan deplasman paylarının zemin sınıfına, taşıyıcı sisteme ve kat adedine göre değişimidir. ZE zemin üzerinde dokuz katlı çerçeve sistemde temel ötelenmesi ve dönmesinin payı %22 olurken perdeli çerçevede bu oran %63 olmuştur. Çerçeve sistemde taban kesme kuvvetindeki azalma kat adedinden bağımsız olarak %20 civarında gerçekleşmişken perdeli çerçevede bu değer ZD zeminde %40 ve ZE zeminde %50 olmuştur [9].

Taban kesme kuvvetinde izin verilen azalım taşıyıcı sistem davranış katsayısına göre %30 ile %10 arasında sınırlandırılmıştır [10].

Zeminin kayma dalgası hızının ZYE için ne ölçüde önemli olduğunu gösteren çalışmalar da söz konusudur. 3 katlı betonarme çerçeve ile yapılan bir çalışmada 20 deprem kaydı kullanılarak süneklik, katlar arası maksimum görelî kat ötelemesi ve tepe deplasmanı gibi parametreler farklı performans düzeyleri için incelenmiştir. Statik itme analizi sonuçları kayma dalgası hızının artmasıyla sünekliğin arttığını, kayma dalgası hızının 180 m/s'nin altında olması durumunda ötelenmelerin rijit temelli çözüme göre önemli oranda fazla olduğunu göstermiştir [11].

Doğrusal olmayan ZYE yaklaşımı ile tek serbestlik dereceli sistem üzerinde 33 deprem kaydı ile çalışılmıştır. Süneklik talebinin temelin gömülme derinliği ile birlikte arttığı ve ZYE etkisi ile deplasman talebinin arttığı belirlenmiştir. Zeminin esnek kabul edilmesi ve temeldeki dönme deplasman artışını açıklamaktadır. Çalışmada rijit temelli çözüm ile elde edilen doğal periyot yardımıyla ZYE'li deplasmanın hesaplanabilmesi için bir bağlantı elde edilmiştir [12].

Düzlem çerçevelerde ZYE'nin direkt yöntemle incelendiği bir diğer çalışmada zeminin kayma kirişi olarak modellenmesi ile kabuk elemanlarla modellenmesi durumuna yakın sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca ZYE'nin birinci mod için etkin olduğu, yüksek modlarda etkinin önemli ölçüde zayıfladığı görülmüştür [13].

Konuyla ilgili son yıllarda yapılan çalışmaların bir bölümü de yapısal kontrol sistemlerinin optimizasyonunda ZYE'nin etkilerini ortaya koymaya yöneliktir. Çünkü viskoz sönümleyicilerin rijit zemin kabulüyle tasarlanması hedef sönüm oranının ve hedef katlar arası ötelenme oranının belirlenmesi ile ilgili hataları beraberinde getirebilmektedir. Kumlu zeminlerde rölatif yoğunluğunun optimal sönümleyici dağılımını değiştirdiği maliyet fonksiyonunun minimize edilmesiyle bulunmuştur. Özellikle 1. mod söz konusu olduğunda kumlu zeminin gevşekliliğinin artmasıyla maliyet fonksiyonunun ve sönümleyici sayısının arttığı ortaya konulmuştur [14].

3. Materyal ve Metot

3.1. Modellenen Binalar

Bu analitik çalışmada 3 bina modellenmiştir. Modellenen 10 katlı binaların biri çerçeve sistem diğer ikisi ise perde-çerçeve sisteme sahiptir. Çerçeve sistemli binada (B1) tüm kat yükseklikleri 3 m olarak belirlenmiştir. Her iki yönde her biri 5 m olan eşit 3 aks aralığı bulunmaktadır. Kolon ve kiriş boyutları tüm katlarda sırasıyla 40/40 cm ve 25/40 cm olarak seçilmiştir. Perde/çerçeve sistemli binalarda ise yukarıda tariflenen çerçeveye 25/200 cm (B2) ve 40/400 cm (B3) boyutlarında perdeler eklenmiştir. Tekil temel ile çözülen binalarda kolonların altındaki temeller (T1) 2,2/2,2 m, (B2) ve (B3) binalarında perdelerin altında sırasıyla 1,5/2,2 m (T2) ve 1,5/4,4 m'dir (T3). Temel alt kotu yüzeyden 1 m aşağıdadır.

Üç boyutlu çerçeveler, burulma etkisinin göz ardı edilmesi ile düzlem çerçevelere indirgenmiş ve x yönünde modal analizleri gerçekleştirilmiştir. Binaların yapısal yerleşim planları ve karşıdan görünüşleri Şekil 1'de verilmiştir.

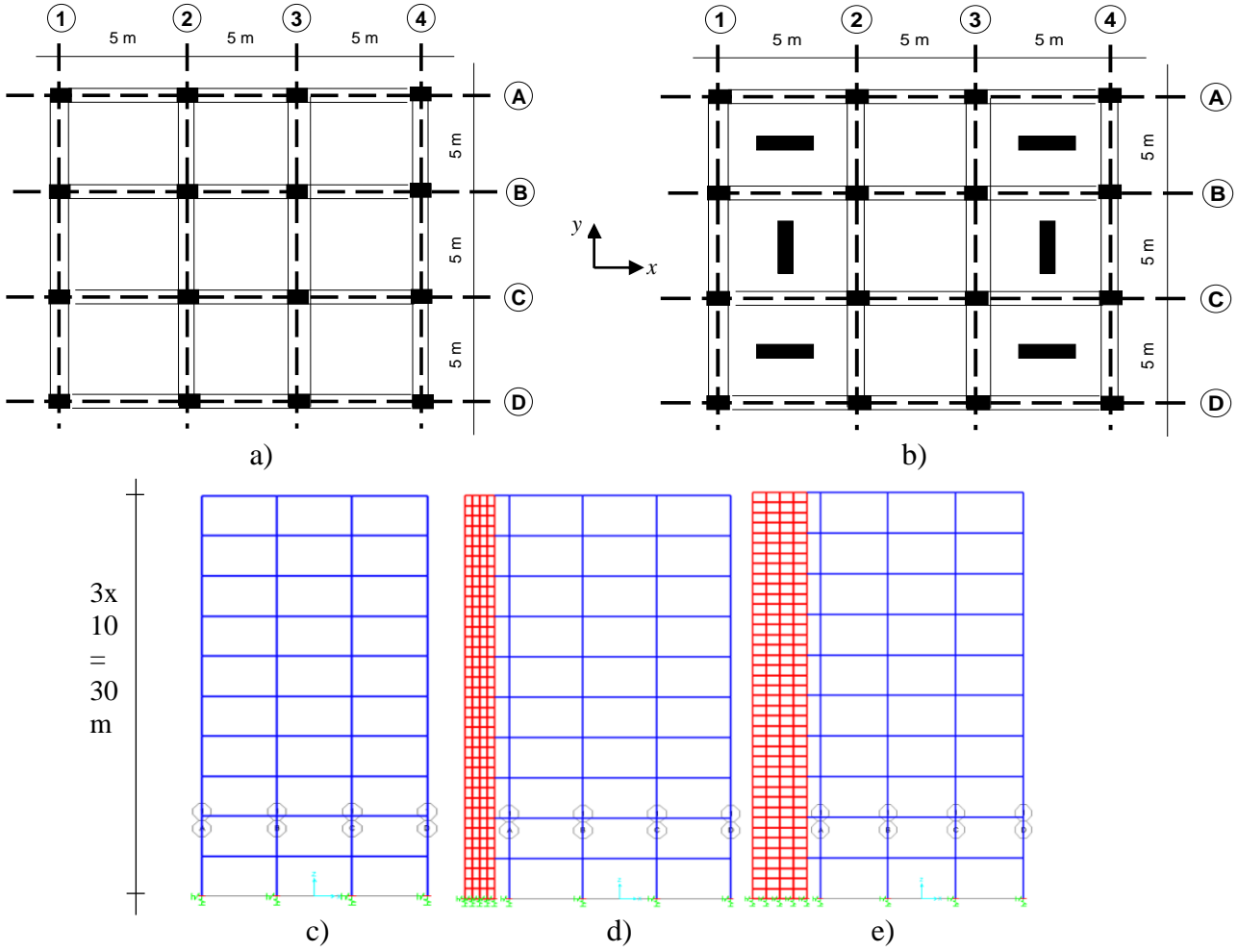
Perde-çerçeve sistemler yatay yükler altında eşdeğer bir eğilme kayma kirişi olarak modellenebilir [15]. Eşdeğer kayma kirişinin kayma rijitliği, eşdeğer eğilme kirişinin eğilme rijitliği ve kat yüksekliğine bağlı olarak perde-çerçeve sistemlerde üç tür davranış ortaya çıkmaktadır. Bunlar eğilme hâkim davranış, kayma hâkim davranış ve karma davranıştır. Bu çalışmada seçilen sistemler bu üç davranışı da yansıtacak şekilde seçilmiştir. Bina yüksekliği, kesit ve malzeme özellikleri birlikte değerlendirildiğinde (B1) kayma, (B3) eğilme davranışının baskın olduğu binalarken, (B2) karma davranış gösteren bir binadır [15]. Binaların analizinde sonlu elemanlar yöntemini kullanan SAP2000 yazılımı kullanılmıştır [16].

3.2. Zemin Profilleri

Zeminin periyot uzamasındaki etkisini ortaya koyabilmek için 5 farklı zemin profili oluşturulmuştur. Zemin profilleri 30 m kalınlıkta olup düşük birim deformasyon kayma dalgası hızının (v_{s0}) derinlikle değişimi, temel alt kotundan itibaren ilk 30 m için ortalama kayma dalgası hızı ($v_{s,30}$), yerel zemin sınıfları, kısa periyot ve 1 s periyot için tasarım spektral ivme katsayıları (sırasıyla S_{DS} ve S_{DI}), yatay elastik tasarım ivme spektrumu köşe periyotları (T_A ve T_B) ve düşük birim deformasyon kayma modülü (G_0) değerleri Tablo 1'de görülmektedir.

Tüm zeminler için Poisson oranı (ν) 0,3 (kum zemin) ve birim hacim ağırlık (γ) 17,66 kN/m³ kabul edilmiştir. G_0 değerleri Denklem 1 ile hesaplanmıştır [6]. Denklem 1'de yerçekimi ivmesi (g) 9,81 m/s² kabul edilmiştir.

$$G_0 = \frac{\gamma v_{s,30}^2}{g} \quad (1)$$



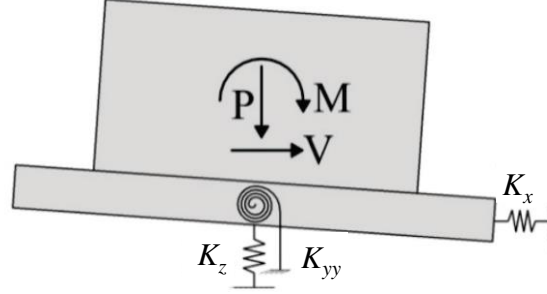
Şekil 1. a) B1 yerleşim planı b) B2 ve B3 yerleşim planı c) B1 karşıdan görünüm d) B2 karşıdan görünüm e) B3 karşıdan görünüm

Tablo 1. Zemin profillerine ait temel parametreler.

Zemin, v_{s0} (m/s)	S1	S2	S3	S4	S5
Derinlik					
0 – 5 m	890	400	180	140	120
5 – 10 m	1210	450	210	170	160
10 – 20 m	1780	1100	500	200	180
20 – 30 m	2200	1500	900	250	160
$v_{s,30}$ (m/s)	1506,5	762,0	362,8	193,4	157,1
Yerel zemin sınıfı	ZA	ZB	ZC	ZD	ZE
S_{DS}	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
S_{DI}	0,28	0,32	0,40	0,52	0,75
T_A (s)	0,056	0,064	0,080	0,104	0,150
T_B (s)	0,280	0,320	0,400	0,520	0,750
G_0 (MPa)	4085,20	1045,23	236,88	67,32	44,42

3.3. Esnek Temel İçin Kullanılan Yaylar

Zemin-temel sisteminin esnekliği temelin ankastre mesnetler yerine yaylarla temsil edilmesi yoluyla sağlanmıştır. Temel iki ötelenme yayı ve bir dönme yayı ile modellenmiştir. Temelin yaylarla temsil edilmesi Şekil 2’de görüldüğü gibidir.



Şekil 2. Temelin yaylarla temsil edilmesi [6]

Yay rijitlikleri hesaplanırken rijit temel-esnek zemin yaklaşımı kullanılmıştır [6]. Aslında 6 serbestlik derecesi için de belirlenmesi gereken ötelenme ve dönme yaylarının rijitliklerinden düzlem çerçeve analizi için gerekli olanlar, $2B \times 2L$ boyutlarında ($L > B$) yüzeyde bulunan bir temel için aşağıdaki denklemlerle hesaplanmıştır [17, 18].

$$K_{z,sur} = \frac{GB}{1-\nu} \left[3,1 \left(\frac{L}{B} \right)^{0,75} + 1,6 \right] \quad (2)$$

$$K_{yy,sur} = \frac{GB^3}{1-\nu} \left[3,73 \left(\frac{L}{B} \right)^{2,4} + 0,27 \right] \quad (3)$$

$$K_{x,sur} = \frac{GB}{2-\nu} \left[6,8 \left(\frac{L}{B} \right)^{0,65} + 2,4 \right] \quad (4)$$

Yay rijitlikleri için kullanılması gereken G değeri, temel dönmesi için etkin derinlik boyunca ortalama $\nu_{s0,a}$ ile hesaplanan değer, yüksek kayma birim deformasyonu için düzeltilmesi ile elde edilir. Etkin derinlik boyunca ortalama $\nu_{s0,a}$ değerinin hesaplanması için aşağıdaki adımlar izlenir [6];

- 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 [10]. Bu çalışmada e değeri, temel üst kotu esas alınarak 0,2 m kabul edilmiştir.
- Efektif profil derinliği (z_p) temel boyutları yardımıyla hesaplanır [17].

$$z_p = (B^3 L)^{0,25} \quad (5)$$

B analiz edilen aksa paralel yönde temel uzunluğunun yarısı ve L diğer yönde temel uzunluğunun yarısıdır.

- Temel dönmesi için etkin derinlik (r) hesaplanır:

$$r = e + z_p \quad (6)$$

- Temel dönmesi için etkin derinlik boyunca ortalama düşük birim deformasyon kayma dalgası hızı hesaplanır [10].

$$v_{s0,a} = \sum d_i / \sum (d_i / v_{si}) \quad (7)$$

d_i yüzey ile etkin derinlik arasındaki herhangi bir tabakanın kalınlığını ve v_{si} ilgili tabakadaki düşük birim deformasyon kayma dalgası hızını ifade eder.

Bu prosedürle elde edilen $v_{s0,a}$ ile hesaplanan etkin derinlik boyunca geçerli G_0 değeri, büyük kayma birim deformasyonu için S_{DS} yardımıyla belirlenen ve Tablo 2’de verilen düzeltme katsayısı (G/G_0) ile çarpılarak düzeltilir. Tablo 3’te zemin profilleri için hesaplanan $v_{s0,a}$ ve G değerleri verilmiştir.

Tablo 2. G/G_0 değerleri [10].

Yerel zemin sınıfı	G/G_0		
	$S_{DS}/2,5$		
	$\leq 0,1$	0,4	$\geq 0,8$
ZA	1,00	1,00	1,00
ZB	1,00	0,95	0,90
ZC	0,95	0,75	0,60
ZD	0,90	0,50	0,10
ZE	0,60	0,05	<i>a</i>
ZF	<i>a</i>	<i>a</i>	<i>a</i>

^a Sahaya özel araştırma ile belirlenir.

Not: Ara değerler için interpolasyon uygulanabilir.

Tablo 3. Hesaplanan $v_{s0,a}$ ve G değerleri.

Zemin	$v_{s0,a}$ (m/s)	G (MPa)
S1	1279,77	2948,04
S2	594,94	605,26
S3	271,82	99,75
S4	172,31	26,72
S5	154,37	2,14

Temelin zemine gömülü olması durumunda rijitlik değerlerinin artacağı kabul edilir. Bunun için kullanılan düzeltme katsayıları aşağıdaki denklemlerle hesaplanmıştır [17,18].

$$\eta_z = \left[1 + \left(0,25 + \frac{0,25}{L/B} \right) \left(\frac{D}{B} \right)^{0,8} \right] \quad (8)$$

$$\eta_{yy} = \left[1 + \frac{D}{B} + \left(\frac{1,6}{0,35 + (L/B)^4} \right) \left(\frac{D}{B} \right)^2 \right] \quad (9)$$

$$\eta_x = \left[1 + \left(0,33 + \frac{1,34}{1 + L/B} \right) \left(\frac{D}{B} \right)^{0,8} \right] \quad (10)$$

Denklemlerde D , temel alt kotunun zemin yüzeyine olan uzaklığıdır. Gömülü bir temelin herhangi bir serbestlik derecesindeki rijitlik (K_{emb}), yüzeyde hesaplanan rijitlik ile düzeltme katsayısının çarpılması ile elde edilir (Denklem 11). Tablo 4'te T1, T2 ve T3 temelleri için farklı zeminlerde hesaplanan yüzeyde yay rijitliği değerleri ile düzeltme katsayısı yardımıyla hesaplanan gömülü temel yay rijitliği değerleri verilmiştir.

$$K_{i,emb} = \eta_i K_{i,sur} \quad (11)$$

Tablo 4. Bina temelleri için hesaplanan yay rijitlikleri ^a

Zemin	S1	S2	S3	S4	S5	
T1	$K_{z,sur}$	2,18E+07	4,47E+06	7,37E+05	1,97E+05	1,58E+04
	$K_{yy,sur}$	2,24E+13	4,60E+12	7,59E+11	2,03E+11	1,63E+10
	$K_{x,sur}$	1,75E+07	3,60E+06	5,94E+05	1,59E+05	1,28E+04
T2	$K_{z,sur}$	1,81E+07	3,72E+06	6,13E+05	1,64E+05	1,32E+04
	$K_{yy,sur}$	1,71E+13	3,51E+12	5,78E+11	1,55E+11	1,24E+10
	$K_{x,sur}$	1,45E+07	2,97E+06	4,89E+05	1,31E+05	1,05E+04
T3	$K_{z,sur}$	2,70E+07	5,54E+06	9,14E+05	2,45E+05	1,96E+04
	$K_{yy,sur}$	8,82E+13	1,81E+13	2,98E+12	7,99E+11	6,42E+10
	$K_{x,sur}$	2,09E+07	4,30E+06	7,08E+05	1,90E+05	1,52E+04
T1	η_z			1,46		
	η_{yy}			2,89		
	η_x			1,93		
T2	η_z			1,53		
	η_{yy}			2,90		
	η_x			2,10		
T3	η_z			1,42		
	η_{yy}			2,37		
	η_x			1,84		
T1	$K_{z,emb}$	3,19E+07	6,54E+06	1,08E+06	2,89E+05	2,32E+04
	$K_{yy,emb}$	6,48E+13	1,33E+13	2,19E+12	5,87E+11	4,71E+10
	$K_{x,emb}$	3,38E+07	6,94E+06	1,14E+06	3,06E+05	2,46E+04
T2	$K_{z,emb}$	2,77E+07	5,68E+06	9,37E+05	2,51E+05	2,01E+04
	$K_{yy,emb}$	4,97E+13	1,02E+13	1,68E+12	4,50E+11	3,61E+10
	$K_{x,emb}$	3,04E+07	6,23E+06	1,03E+06	2,75E+05	2,21E+04
T3	$K_{z,emb}$	3,84E+07	7,88E+06	1,30E+06	3,48E+05	2,79E+04
	$K_{yy,emb}$	2,09E+14	4,29E+13	7,08E+12	1,90E+12	1,52E+11
	$K_{x,emb}$	3,86E+07	7,92E+06	1,31E+06	3,50E+05	2,81E+04

^a Ötelenme ve dönme yaylarının rijitlik birimleri sırasıyla N/mm ve Nmm/rad'dır.

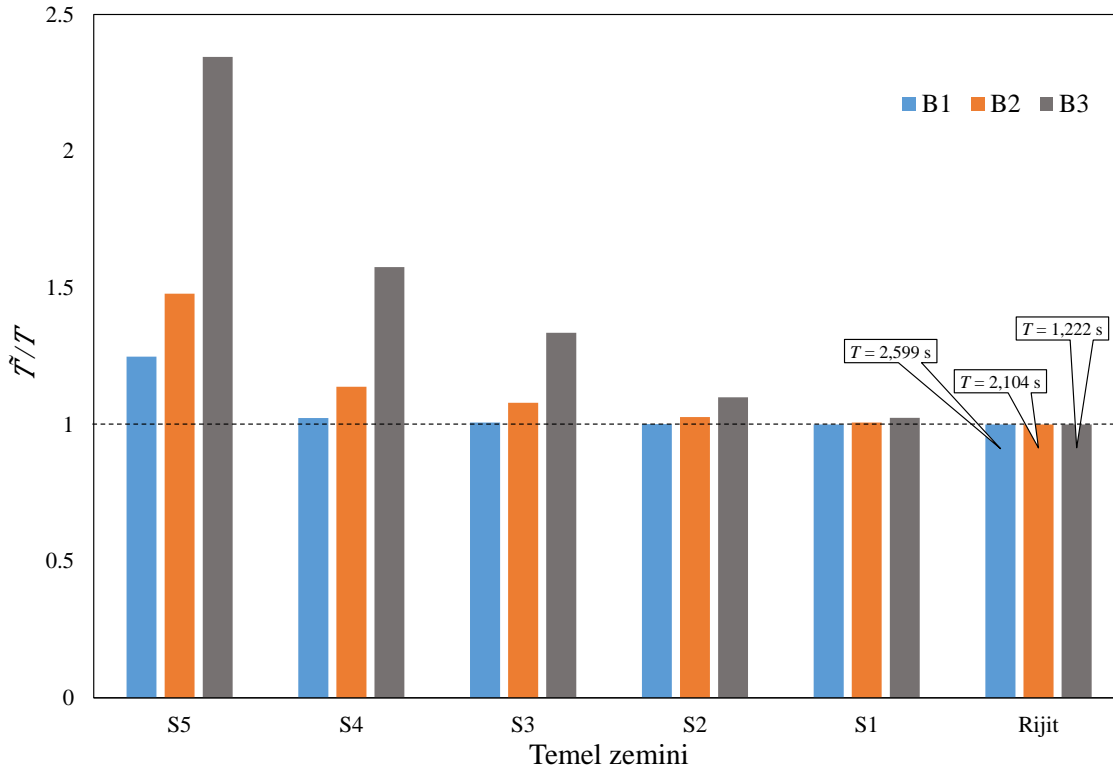
4. Bulgular

Bu analitik çalışmada bulgular ZYE'nin periyot, yatay elastik tasarım spektral ivmesi ve deplasmanı

(sırasıyla $S_{ae}(T)$ ve $S_{de}(T)$), taban kesme kuvveti (V) ve tepe deplasmanı (d) parametrelerine etkileri olarak 4 grupta toplanmıştır.

4.1. Periyot Uzaması

Zemin-temel sisteminin esnek temel olarak modellenmesi ile elde edilen doğal periyot (\tilde{T}), rijit temelli modelin doğal periyoduna (T) oranla daha büyüktür. İki periyot arasındaki bu orana (\tilde{T}/T) periyot uzaması oranı denilir. Şekil 3'te, ele alınan binaların farklı zeminlerde ZYE ile periyot uzaması oranları, gerçekleştirilen serbest titreşim analizine göre birinci mod için görülmektedir. Taşıyıcı sistemden bağımsız olarak, zeminin zayıflamasıyla periyot artışının daha fazla gerçekleştiği görülmektedir. Ayrıca zayıf zeminlerde daha rijit olan taşıyıcı sistemlerde periyot artışını daha büyük olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 3. Farklı zeminler üzerinde analiz edilen binalar için periyot uzama oranları

Daha genel bir karşılaştırma yapmak için yapının zemine rijitlik oranı olarak kabul edilen R_s değeri Denklem 12'ye göre hesaplanıp \tilde{T}/T ile Şekil 4'te ilişkilendirilmiştir.

$$R_s = \frac{\bar{h}}{v_s T} \quad (12)$$

Yukarıdaki denklemde \bar{h} , birinci modun modal yüksekliği olup B1, B2 ve B3 binaları için sırasıyla 20,2 m, 21,3 m ve 22,1 m olarak modal analizden elde edilmiştir. v_s ise etkin derinlik boyunca yüksek birim deformasyon için düzeltilmiş olarak kullanılmıştır. Düzeltme için S_{DS} yardımıyla belirlenen ve Tablo 5'te verilen düzeltme katsayıları (v_s/v_{s0}) Denklem 13'te kullanılmıştır.

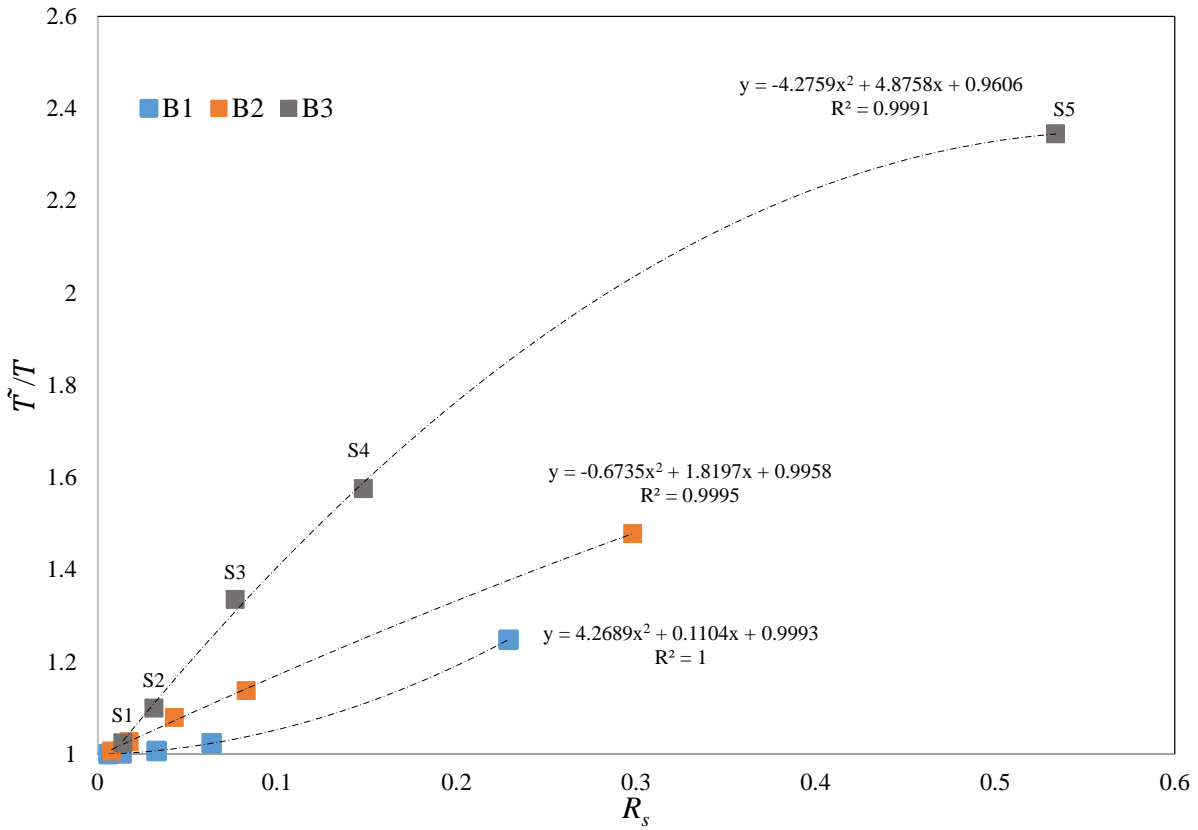
$$v_s = v_{s0} \frac{v_s}{v_{s0}} \quad (13)$$

Tablo 5. v_s/v_{s0} değerleri [10].

Yerel zemin sınıfı	v_s/v_{s0}		
	$S_{DS}/2,5$	$\leq 0,1$	$\geq 0,8$
ZA		1,00	1,00
ZB		1,00	0,97
ZC		0,97	0,87
ZD		0,95	0,71
ZE		0,77	a
ZF		a	a

^a Sahaya özel araştırma ile belirlenir.

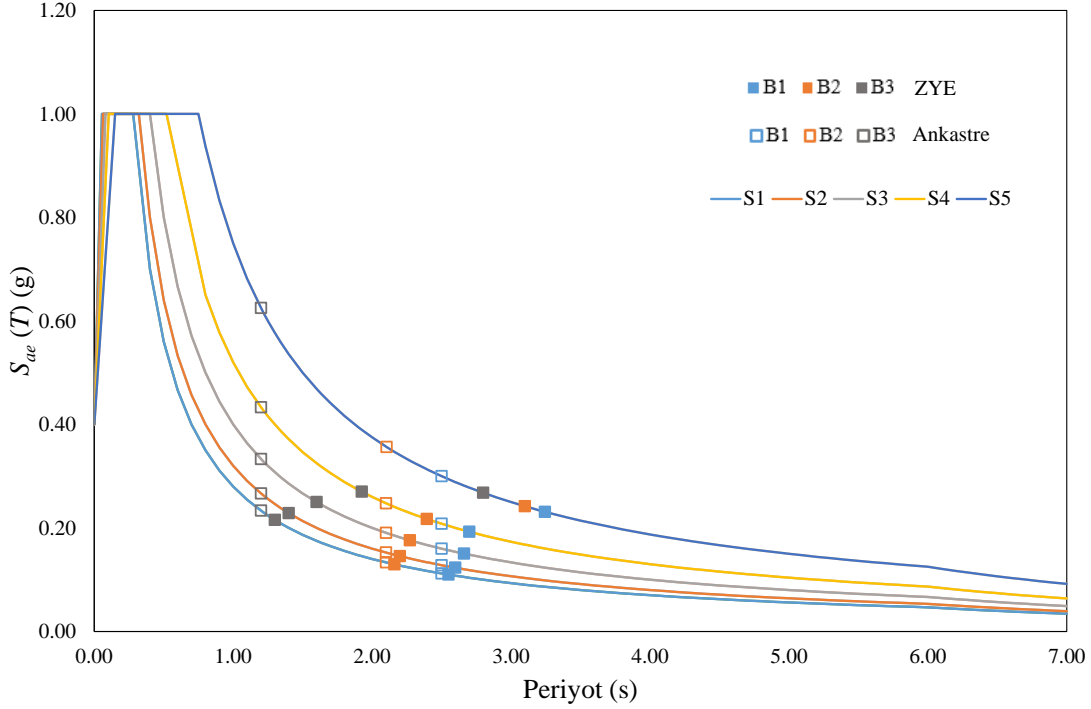
Not: Ara değerler için interpolasyon uygulanabilir.

**Şekil 4.** Periyot uzaması oranının yapının zemine rijitlik oranı ile değişimi

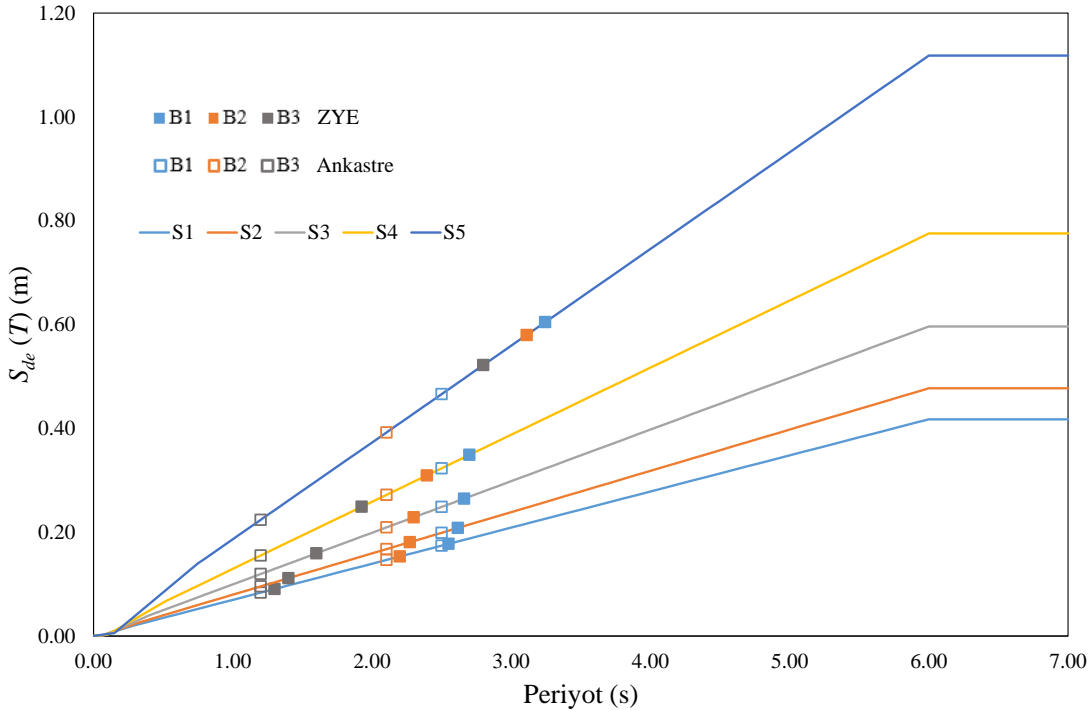
Çalışmada ele alınan taşıyıcı sistemlerin tamamında yapının zemine rijitlik oranı ile periyot uzaması arasında oldukça anlamlı bir ilişki kurulmuştur. Bu ilişkiyi ifade eden matematiksel modeller her bina için Şekil 4’te görülmektedir. Matematiksel modellerin yapı taşıyıcı sistemine göre şekillendiği anlaşılmaktadır. Periyot uzaması özellikle rijit binalarda, yapının zemine rijitlik oranına daha fazla duyarlıdır.

4.2. Yatay Elastik Tasarım Spektral İvmesi ve Deplasmanı

Periyot uzamasının yatay elastik tasarım spektral ivmelerini ve deplasmanlarını ne ölçüde etkilediğini görmek için yatay elastik tasarım ivme ve deplasman spektrumları, tüm zeminler için Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği [6] uyarınca hesaplanıp, sırasıyla Şekil 5 ve Şekil 6'da gösterilmiştir. Şekil 5 ve Şekil 6'da tüm binaların rijit temelli ve esnek temelli periyotlarına karşılık gelen spektral ivmeleri ve deplasmanları işaretlenmiştir.



Şekil 5. Periyot uzaması ile tasarım spektral ivmelerinin değişimi



Şekil 6. Periyot uzaması ile tasarım spektral deplasmanlarının değişimi

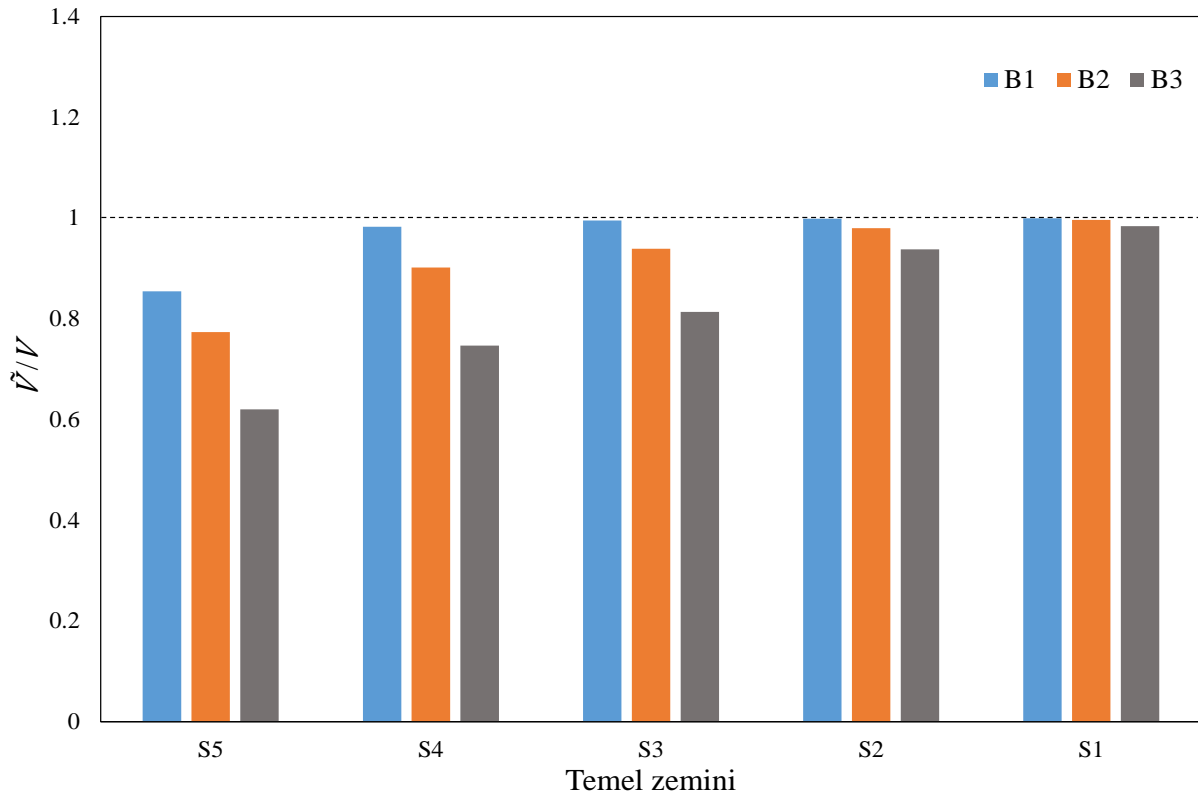
Spektral ivme değerlerinin periyot uzamasının artmasıyla daha fazla düştüğü görülmektedir. Spektral ivmenin en fazla azaldığı şartlar en zayıf zemin üzerinde en rijit yapının bulunması durumudur. ZA ve ZB zeminlerde periyot uzamasının çok sınırlı olması nedeniyle spektral ivmelerin çok etkilenmediği anlaşılmaktadır.

Spektral deplasman değerlerinin periyot uzamasının artmasıyla daha fazla arttığı görülmektedir. Spektral deplasmanın en fazla arttığı şartlar en zayıf zemin üzerinde en rijit yapının bulunması durumudur. ZA ve ZB zeminlerde periyot uzamasının çok sınırlı olması nedeniyle spektral deplasmanların çok etkilenmediği anlaşılmaktadır.

4.3. Taban Kesme Kuvveti

Binanın tümüne etkiyen toplam eşdeğer deprem yükü olarak tanımlanan taban kesme kuvveti SAP2000 yazılımıyla mod birleştirme yöntemine göre yatay elastik tasarım ivme spektrumu yardımıyla elde edilmiştir.

Şekil 7’de ele alınan tüm zeminlerde esnek temelli modellenen binalarda hesaplanan taban kesme kuvvetinin (\tilde{V}), rijit temelli modellenen binalarda hesaplanan taban kesme kuvvetine (V) oranı görülmektedir. Söz konusu oranın 1’e eşit olması durumu taban kesme kuvvetinde ZYE’ye bağlı olarak bir değişim olmadığını ifade eder.



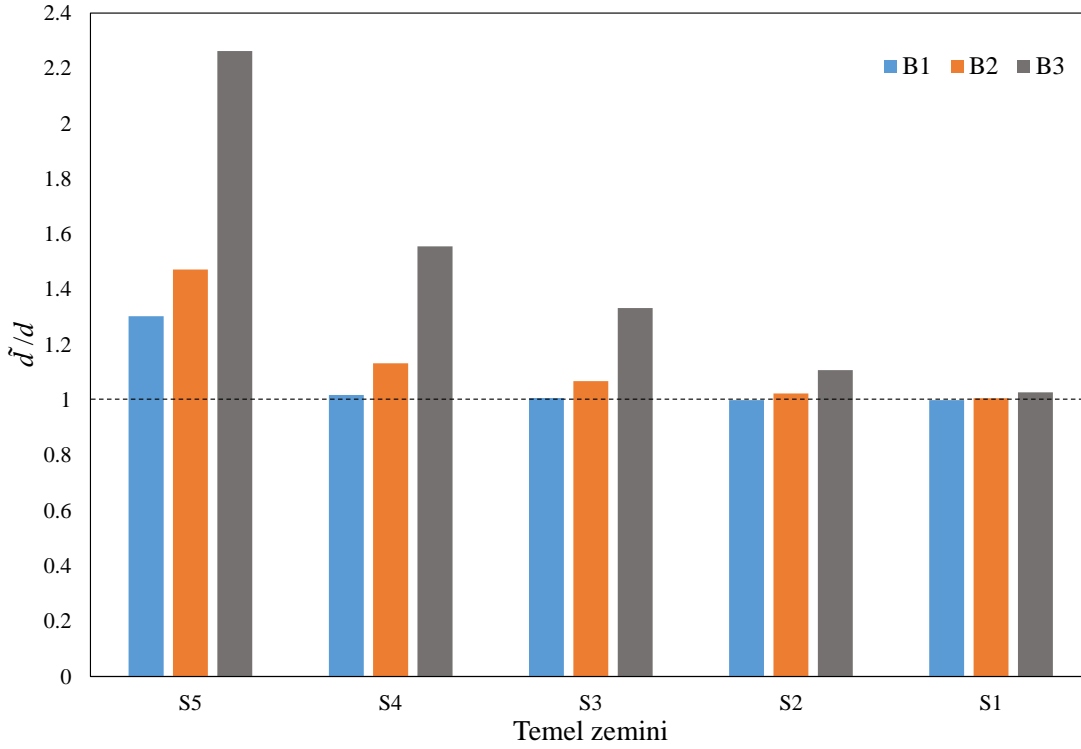
Şekil 7. Farklı zeminlerde ZYE’ye bağlı olarak taban kesme kuvvetinin değişimi

Taban kesme kuvvetinin periyot uzamasına paralel gerçekleşen spektral ivme azalımıyla beraber özellikle ZE, ZD ve ZC zeminlerde azaldığı görülmektedir. Taban kesme kuvvetinin rijit yapılarda daha fazla azaldığı anlaşılmaktadır. Periyot uzamasının sınırlı olduğu ZA ve ZB zeminlerde taban kesme kuvvetinin en fazla %5 kadar azaldığı belirlenmiştir.

4.4. Tepe Noktası Deplasmanı

Tepe noktası deplasmanı yine SAP2000 yazılımıyla mod birleştirme yöntemine göre yatay elastik tasarım deplasman spektrumu yardımıyla elde edilmiştir.

Şekil 8’de ele alınan tüm zeminlerde esnek temelli modellenen binalarda hesaplanan tepe deplasmanının (\tilde{d}), rijit temelli modellenen binalarda hesaplanan tepe deplasmanına (d) oranı görülmektedir. Söz konusu oranın 1’e eşit olması durumu tepe deplasmanında ZYE’ye bağlı olarak bir değişim olmadığını ifade eder.



Şekil 8. Farklı zeminlerde ZYE’ye bağlı olarak tepe noktası deplasmanının değişimi

Şekil 8 incelendiğinde tepe deplasmanının ZYE sonucunda özellikle zayıf zeminler üzerinde bulunan rijit yapılarda önemli ölçüde arttığı görülmektedir. Çerçeve sistemli yapıda tepe deplasmanı sadece ZE zeminde %30 kadar artmıştır.

5. Sonuç ve Öneriler

Bu analitik çalışmada, 5 farklı zemin üzerinde bulunan 3 farklı bina ele alınarak ZYE’nin binaların hâkim doğal titreşim periyodu, yatay elastik tasarım spektral ivmesi ve deplasmanı, taban kesme kuvveti ve tepe deplasmanı parametreleri üzerine etkileri incelenmiştir. Zeminler, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği’nde tanımlanan yerel zemin sınıflarına göre ZA’dan ZE’ye kadar geniş bir aralığı temsil etmektedir. Binalar ise kayma kirişi davranışı gösteren bir çerçeve sistem, eğilme kirişi davranışı gösteren bir perde-çerçeve sistem ve karma davranış gösteren bir perde-çerçeve sistemdir. ZYE binaların rijit temel yerine esnek temel olarak modellenmesi ile temsil edilmiştir. Esnek temel modelinde zemin-temel sistemi, iki ötelenme ve bir dönme yayı ile teşkil edilmiştir. Tüm analizler SAP2000 yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

ZA zemin üzerinde bulunan binalarda periyot uzaması oluşmamış, en büyük periyot uzamaları ise ZE zeminde görülmüştür. Tüm yerel zemin sınıfları birlikte değerlendirildiğinde ZYE’nin etkisi, binanın taşıyıcı sistemine göre değişmekle birlikte her bina için periyot uzaması olarak

belirlenmiştir. Bu durum ZYE için gerekli değerlendirilmenin yerel zemin sınıfına göre değil yapının zemine rijitlik oranına göre yapılması gerektiğine işaret etmektedir. Bu bağlamda bakıldığında tüm binalar için yapının zemine rijitlik oranının artmasıyla periyot uzamasının boyutu artmaktadır.

Yatay elastik tasarım ivme ve deplasman spektrumları incelendiğinde ele alınan binalar için ZYE'ye bağlı periyot uzaması nedeniyle spektral ivmelerin azaldığı ve spektral deplasmanların arttığı görülmektedir. Spektral ivme değerlendirilirken bu çalışmada ele alınan binaların rijit temelli modellerinde elde edilen titreşim periyodunun tüm zeminler için T_B köşe periyodundan büyük olduğu unutulmamalıdır. Titreşim periyodunun T_A köşe periyodundan küçük olduğu binalarda ZYE ile spektral ivmede artış görülebilir.

Spektral ivmelerde görülen azalmaya paralel olarak eşdeğer deprem yükü kabul edilen taban kesme kuvvetinin de ZYE ile azaldığı görülmüştür. ZE zeminde taban kesme kuvvetinde %40'a kadar bir azalma belirlenmiş olup, bazı yönetmeliklerde bu azalmanın %30 ile sınırlandırıldığı unutulmamalıdır. Çerçeve sistemde taban kesme kuvvetinde azalım yalnızca ZE zeminde görülürken azalım oranı %18 olmuştur.

Spektral deplasmanlarda görülen artışa paralel olarak tepe noktası deplasmanının da ZYE ile arttığı görülmüştür. ZE zeminde, perde-çerçeve sistemli yapılarda tepe deplasmanının 2,3 katına kadar çıkabildiği görülürken çerçeve sistemde artışın sadece ZE zeminde ve 1,3 kat ile sınırlı olduğu belirlenmiştir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçların ışığında özellikle zayıf zeminlerin üzerine inşa edilecek rijit binalarda ZYE için bir ön değerlendirme yapılması gerektiği görülmektedir. Bu ön değerlendirilmenin yapının zemine rijitlik oranı üzerinden yapılması ve bu oranın %5'i aşması halinde ZYE'nin tasarımda mutlaka göz önünde bulundurulması önerilmektedir.

Yazarların Katkıları

Bu çalışmanın tüm aşamalarında yazarların ortak ve eşit katkısı bulunmaktadır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar, çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar

- [1]. Steward, J. P., Seed, R. B., Fenves, G. L., "Empirical Evaluation of Inertial Soil-Structure Interaction Effects", Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER 1998/07, California, 1998.
- [2]. Chopra, A. K., Gutierrez, J. A., "Earthquake response analysis of multistory buildings including foundation interaction" Earthquake Engineering Structural Dynamics, 1974, (3): 65–77.
- [3]. Bielak, J., "Modal analysis for building-soil interaction", Journal of the Engineering Mechanics Division ASCE, 1976, 102(5): 771–786.
- [4]. Iguchi, M., "Dynamic interaction of soil-structure with elastic rectangular foundation", 5. Japanese Earthquake Engineering Symposium, Tokyo, Japan, 457–464, 1978.
- [5]. TBDY18, "Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği", 2018.
- [6]. FEMA P-2091, "A Practical Guide to Soil-Structure Interaction", 2020.

- [7]. Steward, J. P., Seed, R. B., Fenves, G. L., “Seismic soil-structure interaction in buildings. II: Empirical Findings”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1999, 125(1): 38–48.
- [8]. Dutta, S. C., Bhattacharya, K., Roy, R., “Response of low-rise buildings under seismic ground excitation incorporating soil–structure interaction”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2004, 24(12), 893–914.
- [9]. Behnamfar, F., Banizadeh, M., “Effects of soil–structure interaction on distribution of seismic vulnerability in RC structures”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2016, (80): 73–86.
- [10]. ASCE/SEI 7–16, “Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures”, 2016.
- [11]. Nguyen, H. D., Shin, M., “Effects of soil–structure interaction on seismic performance of a low-rise R/C moment frame considering material uncertainties”, *Journal of Building Engineering*, 2021, (44): 102713.
- [12]. Asadi-Ghoozhdi, H., Attarnejad, R., “A Winkler-based model for inelastic response of soil–structure systems with embedded foundation considering kinematic and inertial interaction effects”, *Structures*, 2020, (28): 589–603.
- [13]. Kara, D., Bozdoğan, K. B., Keskin, E., “Çerçeve sistemlerin yapı zemin etkileşimli serbest titreşim analizi”, *Politeknik Dergisi*, 2020, 23(4): 1347–1355.
- [14]. Aydın, E., Ozturk, B., Bogdanovic, A., Farsangi, E. N., “Influence of soil-structure interaction (SSI) on optimal design of passive damping devices”, *Structures*, 2020, (28): 847–862.
- [15]. Miranda, E., Reyes, C. J., “Approximate lateral drift demands in multistory buildings with nonuniform stiffness”, *Journal of Structural Engineering*, 2002, 128(7): 840–849.
- [16]. CSI, “SAP2000 Integrated Software for Structural Analysis and Design”, *Computers and Structures Inc., Berkeley, California*.
- [17]. NIST GCR 12-917-21, “Soil-Structure Interaction for Building Structures”, 2012.
- [18]. Pais, A., Kausel, E., “Approximate formulas for dynamic stiffnesses of rigid foundations”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1988, 7(4): 213–227.