

ZEMİN-YAPI ETKİLEŞİMİNİN TASARIM SPEKTRUMUNA ETKİSİ

EFFECT OF SOIL-STRUCTURE INTERACTION ON DESIGN SPECTRUM

Mehmet ÖZGÜR¹

ÖZET

Zemin-yapı etkileşimi (ZYE) binaların dinamik davranışını değiştirmektedir. Özellikle zayıf zeminler üzerinde bulunan rijit binalarda ZYE'nin etkisi artmaktadır. Atalet etkileşimi ile binanın periyodu uzarken ayrıca temel sönümü nedeniyle binanın sönüm oranı artmaktadır. Kinematik etkileşim ise etkin temel hareketinin serbest saha hareketinden farklılaşmasına neden olmaktadır. Kinematik etkileşim temelde dengelenme ve gömülü olma etkilerini barındırır. Yüzeysel temelli binaların dinamik özelliklerindeki söz konusu değişimler tasarım açısından genellikle elverişli kabul edildiği için ZYE birçok yönetmelikte ihmal edilmektedir. Bu çalışmada ZYE'nin yatay elastik tasarım spektrumunu nasıl etkilediği ele alınmıştır. ZD, ZC ve ZB zeminlerde tasarım spektrumu etkileşimsiz ve etkileşimli durumlar için karşılaştırılmıştır. ZYE'nin spektral ivmeyi zemin sınıfına bağlı olarak azalttığı gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Zemin-yapı etkileşimi, tasarım spektrumu, spektral ivme

ABSTRACT

Soil-structure interaction (SSI) alters the dynamic response of the buildings. The effect of SSI is magnified in case of stiff buildings on weak soils. Inertial interaction results in higher structural damping ratio and elongated fundamental natural period of the building. Kinematic interaction yields a difference between the free field motion and the foundation input motion. Kinematic interaction includes the base slab averaging and the embedment effects. Generally, these modifications on dynamic properties of the building are regarded to be favorable for design and SSI is neglected in most of the codes. In this study, the effect of SSI on elastic response spectrum is assessed. Response spectra with and without SSI are compared for ZD, ZC and ZB soil classes. It is shown that, SSI reduces the spectral acceleration in accordance to soil class.

Keywords: Soil-structure interaction, response spectrum, spectral acceleration

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, mehmetozgur@comu.edu.tr

1. GİRİŞ

Zemin-yapı etkileşimi (ZYE) en genel ifadesiyle zemin ve üzerindeki üstyapının etkileşimidir. Zemin ortamında yayılan deprem dalgalarının bir kısmı temelden yansırken bir kısmı da yapıya iletilir ve yapının titreşimine neden olur (TBDY, 2018). 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 kısalmasına 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 (FEMA, 2020). 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 temel, 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 temellerde yer hareketinin derinlik boyunca ivme genliğinin değişiyor olmasının göz önüne alınmasıdır. Kinematik etkileşim etkin temel hareketinin serbest saha hareketinden önemli ölçüde farklılaşmasına neden olabilir (FEMA, 2020).

Binaların maruz kalacağı dinamik yüklerin doğru belirlenmesi depreme dayanıklı yapı tasarımı açısından vazgeçilmezdir. Özellikle eşdeğer deprem yükü gibi yöntemler kullanılması durumunda yatay elastik tasarım spektrumu en belirleyici faktör olmaktadır. Tasarım spektrumunun ZYE kapsamında temelde dengelenme, gömülme etkileri ve sönüm oranındaki artış nedeniyle değişmesi söz konusudur. Ayrıca ZYE ile periyodun uzayarak yeni bir değer almasıyla spektrum üzerinden elde edilecek spektral ivme de farklılaşmaktadır.

Spektral ivmenin ve ona bağlı olarak taban kesme kuvvetinin azalımı binaları elverişli yönde etkileyeceği için ZYE çoğu yönetmelikte ihmal edilmektedir. Fakat ZYE nedeniyle eğrilik sünekliği talebinin ve tepe yer değiştirmesinin olması gerekenden daha düşük tahmin edildiğini gösteren çalışmalar da mevcuttur (Carlo vd., 2000). 1995 Kobe depreminde Hanshin otoyolunda köprü tabliyesinin göçmesi bu şekilde açıklanmıştır (Mylonakis ve Gazetas, 2000). Aydemir (2014), ZYE'nin özellikle yumuşak zeminlerde göz ardı edilmesinin, taban kesme kuvvetinin olduğundan az kabul edilmesi yoluyla, güvensiz bir tasarıma yol açacağını ifade etmiştir.

Bu çalışmada ZYE'nin tasarım spektrumunu ne ölçüde etkileyebileceği incelenmiştir. Bunun için ZD, ZC ve ZB zeminlerde tasarım spektrumu etkileşimli ve etkileşimsiz durumlar için elde edilmiştir. Etkileşimli durumda tasarım spektrumu üzerine sönüm oranı, temelde dengelenme ve gömülme etkileri yansıtılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde kullanılan zemin profilleri ve kinematik etkileşim için hesap adımları ele alınmıştır.

2.1. Zemin Profilleri

Zeminin davranış spektrumu üzerindeki etkisini ortaya koyabilmek için 3 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_{D1}) ve yatay elastik tasarım ivme spektrumu köşe periyotları (T_A ve T_B) Tablo 1'de görülmektedir.

Tablo 1. Zemin profillerine ait temel parametreler

Zemin, v_{s0} (m/s)	S1	S2	S3
Derinlik			
0 – 5 m	400	180	140
5 – 10 m	450	210	170
10 – 20 m	1100	500	200
20 – 30 m	1500	900	250
$v_{s,30}$ (m/s)	762,0	362,8	193,4
Yerel zemin sınıfı	ZB	ZC	ZD
S_{DS}	1,00	1,00	1,00
S_{D1}	0,32	0,40	0,52
T_A (s)	0,064	0,080	0,104
T_B (s)	0,320	0,400	0,520

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 1 ile hesaplanmıştır.

$$v_{s,30} = 30 / \sum (h_i / v_{si}) \quad (1)$$

Eşitlik 1'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.

2.2. Temelde Dengelenme

Temelde dengelenme için ilk olarak eşdeğer temel boyutu belirlenir. Eşdeğer temel boyutu en fazla 78 m olarak kullanılabilir. Bunun sebebi temelde dengelenme denkleminin elde edilmesi için kullanılan saha verileridir.

$$b_e = \sqrt{A_{base}} \quad (2)$$

A_{base} temelin oturma alanıdır. Eşdeğer temel boyutu yardımıyla sırasıyla b_0 ve B_{bsa} değerleri hesaplanır.

$$b_0 = 0,0023 \cdot \left(\frac{b_e}{T}\right) \quad (3)$$

$$B_{bsa} = 1 + b_0^2 + b_0^4 + \frac{b_0^6}{2} + \frac{b_0^8}{4} + \frac{b_0^{10}}{12} \quad (4)$$

Eşitlik 3'te yer alan T , davranış spektrumunun ilgili periyodudur ve 0,2 s'den daha düşük alınamaz. Son olarak temelde dengelenme için düzeltme katsayısı (R_{bsa}) Eşitlik 5 ile hesaplanır.

$$R_{bsa} = 0,25 + 0,75 \cdot \left\{ \frac{1}{b_0^2} [1 - (\exp(-2b_0^2))B_{bsa}] \right\} \quad (5)$$

2.3. Gömülme Etkisi

Gömülme etkisi için temel gömülme derinliği (e) ve etkili derinlik boyunca yüksek birim deformasyon için düzeltilmiş ortalama kayma dalgası hızı (v_s) kullanılır. İzlenmesi gereken adımlar aşağıda sıralanmıştır:

- 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, 2016). Bu çalışmada e değeri, temel üst kotu esas alınarak 3 m kabul edilmiştir.
- Efektif profil derinliği (z_p) temel boyutları yardımıyla hesaplanır (NIST, 2012).

$$z_p = (B^3 L)^{0,25} \quad (6)$$

B analiz edilen aksa paralel yönde temel uzunluğunun yarısı ve L diğer yönde temel uzunluğunun yarısıdır. Bu çalışmada B ve L 12,5 m alınmıştır

- Temel dönmesi için etkin derinlik (r) hesaplanır:

$$r = e + z_p \quad (7)$$

- Temel dönmesi için etkin derinlik boyunca ortalama düşük birim deformasyon kayma dalgası hızı hesaplanır (ASCE, 2016).

$$v_{s0,a} = \sum d_i / \sum (d_i / v_{si}) \quad (8)$$

d_i yüzey ile etkin derinlik arasındaki herhangi bir tabakanın kalınlığını ve v_{si} ilgili tabakadaki düşük birim deformasyon kayma dalgası hızını ifade eder. Yüksek birim deformasyon için düzeltme S_{DS} yardımıyla belirlenen ve Tablo 2'de verilen düzeltme katsayıları (v_s/v_{s0}) ile Eşitlik 9 kullanılarak yapılmıştır.

$$v_s = v_{s0} \frac{v_s}{v_{s0}} \quad (9)$$

Tablo 2. v_s/v_{s0} değerleri (ASCE, 2016)

Yerel zemin sınıfı	v_s/v_{s0}		
	$S_{DS}/2,5$		
	$\leq 0,1$	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	^a
ZF	^a	^a	^a

^a Sahaya özel araştırma ile belirlenir.

Not: Ara değerler için interpolasyon uygulanabilir.

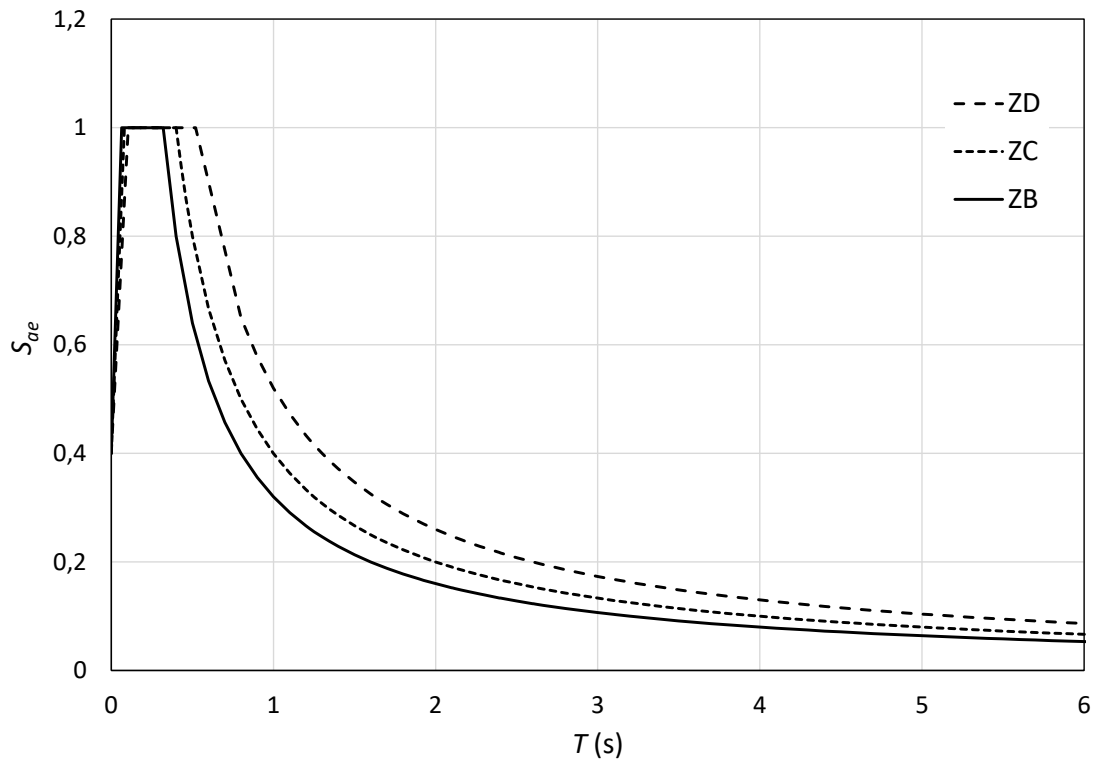
Gömülme etkisi için düzeltme katsayısı (R_{rse}) Eşitlik 10 ile hesaplanır.

$$R_{rse} = 0,25 + 0,75 \cdot \cos(2\pi e/Tv_s) \quad (10)$$

v_s için alt sınır olarak 195 m/s kullanılabilir.

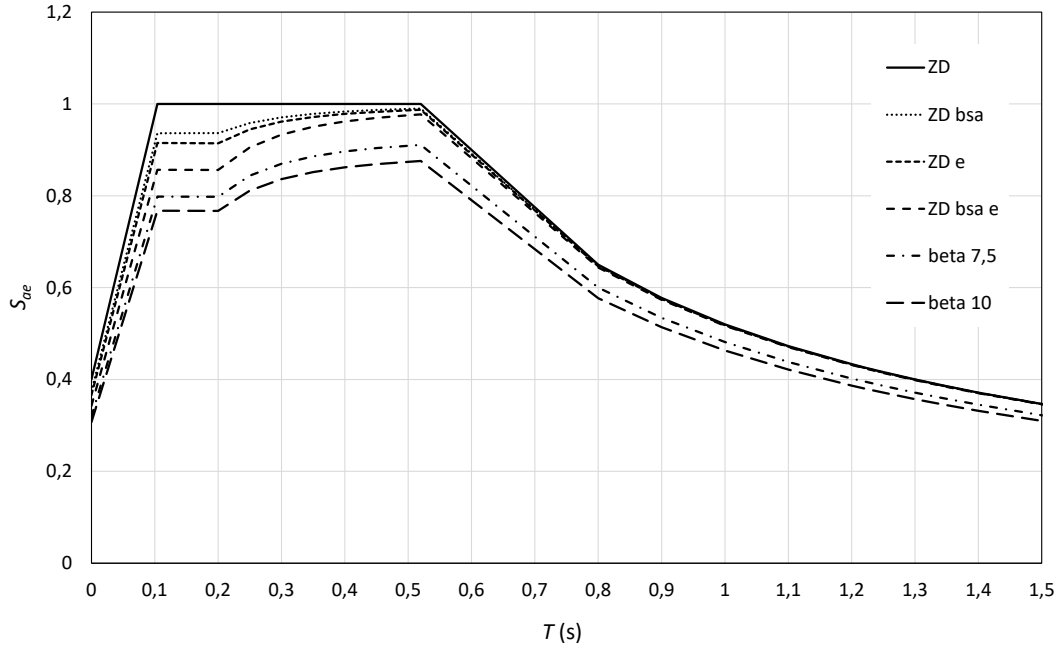
3. BULGULAR

Çalışmada ele alınan zemin profilleri için Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018) esas alınarak elde edilen yatay elastik tasarım spektrumları Şekil 1'de görülmektedir. Karşılaştırma yapabilmek için tüm zeminlerde S_{DS} 1 g kabul edilmiştir.



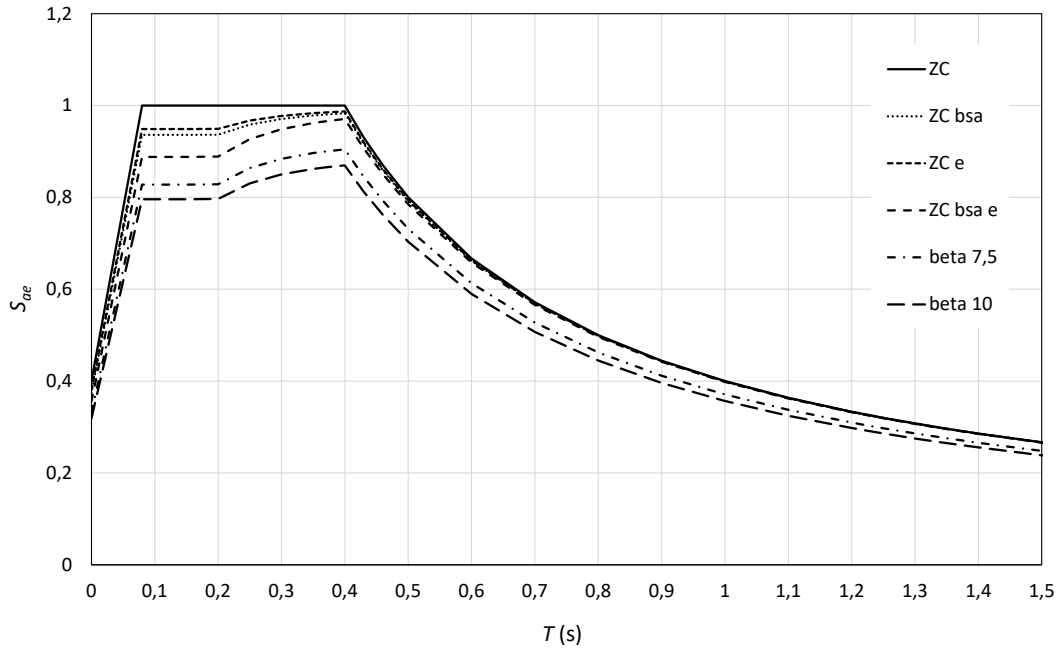
Şekil 1. ZD, ZC ve ZB yerel zemin sınıfları için yatay elastik tasarım spektrumları

ZD, ZC ve ZB zeminler için etkileşimsiz ve etkileşimli tasarım spektrumları sırasıyla Şekil 2, Şekil 3 ve Şekil 4'te görülebilir. Temelde dengelenme etkisi (bsa), gömülme etkisi (e) ve bu iki etkinin birlikte (bsa e) değerlendirilmesine ilaveten sönüm oranının %7,5 (beta 7,5) ve %10 (beta 10) olması durumlarına da yer verilmiştir.



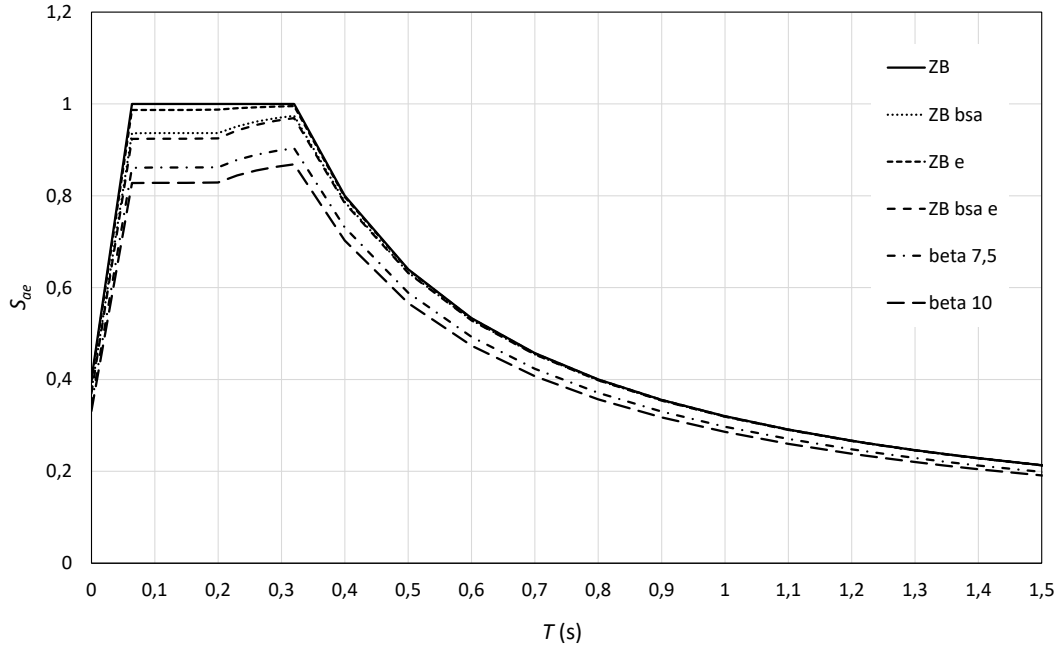
Şekil 2. ZD yerel zemin sınıfı için yatay elastik tasarım spektrumları

ZD yerel zemin sınıfında temelde dengelenme ve gömülme etkileri beraber ele alındığında spektral ivmede görülen en büyük azalış, T_A köşe periyodu ile 0,2 s arasında, %14,1 olmuştur. Sönüm oranının %10 kabul edilmesi durumunda söz konusu azalış %23,3 olmuştur.



Şekil 3. ZC yerel zemin sınıfı için yatay elastik tasarım spektrumları

ZC yerel zemin sınıfında temelde dengelenme ve gömülme etkileri beraber ele alındığında spektral ivmede görülen en büyük azalış, T_A köşe periyodu ile 0,2 s arasında, %11,2 olmuştur. Sönüm oranının %10 kabul edilmesi durumunda söz konusu azalış %20,4 olmuştur.



Şekil 4. ZB yerel zemin sınıfı için yatay elastik tasarım spektrumları

ZB yerel zemin sınıfında temelde dengelenme ve gömülme etkileri beraber ele alındığında spektral ivmede görülen en büyük azalış, T_A köşe periyodu ile 0,2 s arasında, %7,6 olmuştur. Sönüm oranının %10 kabul edilmesi durumunda söz konusu azalış %17,2 olmuştur.

Tüm yerel zemin sınıflarında temelde dengelenme ve gömülme etkileri beraber ele alındığında spektral ivmelerdeki azalışın 0,2 s'den sonra T_B köşe periyoduna doğru zayıfladığı ve T_B köşe periyodundan sonra giderek etkisini kaybettiği görülmektedir.

4. SONUÇLAR

Zemin-yapı etkileşimi (ZYE), atalet etkileşimi ve kinematik etkileşimi içermektedir. Atalet etkileşimi ile ortak sistemin (zemin-temel alt sistemi ve üstyapı alt sistemi) periyodu uzarken sönüm oranında da artış görülmektedir. Kinematik etkileşim ise temelde dengelenme ve gömülme etkileri ile etkin temel hareketinin serbest saha hareketinden farklılaşmasına neden olur. Tüm bu etkilerin yatay elastik tasarım spektrumuna yansıtılması mümkündür. Bu çalışmada ZD, ZC ve ZB yerel zemin sınıflarında gömülü bir plak temel üzerinden tasarım spektrumunun ZYE ile ne ölçüde değiştiği irdelenmiştir. Çalışmada edinilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Temelde dengelenme ve gömülme etkisi ile tasarım spektrumundan elde edilen spektral ivmeler azalmaktadır. Söz konusu azalış zeminin zayıf olması durumunda daha büyük bir boyut kazanmaktadır. Bu sebeple bazı yönetmeliklerde bu etkilerin ZA ve ZB yerel

zemin sınıflarında ihmal edilmesi önerilmektedir. Ayrıca bu etkiler ile spektral ivmenin en fazla %30 azaltılmasına izin verilmektedir.

- Temelde dengelenme ve gömülme etkisi tasarım spektrumunu T_A ve T_B köşe periyotları arasında daha büyük ölçüde etkilemektedir. T_B köşe periyodundan sonra söz konusu etki giderek azalmaktadır.

- Temelde dengelenme ve gömülme etkisinin tasarım spektrumuna yansıtılması için kullanılan eşitlikler gerçek saha verilerinden elde edilmiş olduğundan belirli kullanım kısıtlamaları söz konusudur. Bu kısıtlamalara uyulmaması halinde yanıltıcı sonuçlar ortaya çıkabilir.

KAYNAKLAR

- ASCE (2016), “Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures”, American Society of Civil Engineers.
- 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.
- 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, 1-8.
- FEMA (2020), “A Practical Guide to Soil-Structure Interaction”, Applied Technology Council.
- Mylonakis, G., Gazetas, G. (2000), “Seismic soil-structure interaction: beneficial or detrimental?”, Journal of Earthquake Engineering, 4(3), 277-301.
- NIST (2012), “Soil-Structure Interaction for Building Structures”, National Institute of Standards and Technology.
- TBDY (2018), “Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği”, Afet ve Acil Durum Başkanlığı.

SEMBOL LİSTESİ

A_{base}	Temel alanı	T	Periyot
B	Temel genişliği	T_A ve T_B	Köşe periyotlar
b_e	Eşdeğer temel boyutu	v_s	Düzeltilmiş kayma dalgası hızı (etkin derinlik)
e	Gömülme derinliği	$v_{s,30}$	Ortalama kayma dalgası hızı (30 m)
L	Temel uzunluğu	$v_{s0,\sigma}$	Düzeltilmemiş kayma dalgası hızı (etkin derinlik)
r	Etkin derinlik	ZD, ZC ve ZB	Yerel zemin sınıfları
R_{bsa}	Temelde dengelenme düzeltme katsayısı	z_p	Efektif profil derinliği
R_{rse}	Gömülme etkisi düzeltme katsayısı		
S_{D1}	1 s periyot spektral ivme katsayısı		
S_{DS}	Kısa periyot spektral ivme katsayısı		