

## Fema (273, 356, 368, 369, 440), Eurocode 8 ve DBYBHY (2007) Yönetmeliklerinde Yapı-Zemin Etkileşimi Problemi

İlyas Devran ÇELİK<sup>1</sup>, Mehmet FENKLİ<sup>2</sup>, Mustafa SİVRİ<sup>3</sup>, Nurettin Alpay KIMILLI<sup>1</sup>, Deniz BAYRAKTAR<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Isparta.

<sup>2</sup>Süleyman Demirel Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Bölümü, Isparta.

<sup>3</sup>Süleyman Demirel Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu İnşaat Bölümü, Isparta.

**Özet:** Deprem gibi dinamik yükler altında, yapı davranışının yapı-zemin etkileşiminden bağımsız olması söz konusu değildir. Zeminin yapıya olan etkisinin karşılığında, yapıda zemini hem kinematik hem de dinamik bakımdan değiştirecek böylece zemin, yapının davranışını yapı da zeminin davranışını etkileyecektir. Ancak, uygulamalarda bu durum çoğu kez ihmal edilmektedir. Günümüzde sadece modern deprem şartnamelerinde yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmaktadır.

Bu çalışmada yapı-zemin etkileşimi konusu, uluslararası deprem yönetmeliklerinde Federal Emergency Management Agency (FEMA) (273, 356, 368, 369, 440), Eurocode-8 ve ulusal deprem yönetmeliğimiz Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY) (2007)'de karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** FEMA, EUROCODE8, DBYBHY 2007, Yapı-Zemin Etkileşimi

### Soil-Structure Interaction Problems for Fema (273, 356, 368, 369, 440), Eurocode 8 and DBYBHY (2007) Codes

**Abstract:** Under dynamic loads such as earthquakes, soil-structure interaction is independent of the behavior of the structure is not in question. At the impact of the structure on the ground, so the ground floor of the structure will change from both kinematic and dynamic maintenance, building the behavior of the structure will affect the behavior of the ground. However, in practice often it is neglected in this case. Today, only the soil-structure interaction is taken into account in modern earthquake codes.

Soil-structure interaction issues in this study, the Federal Emergency Management Agency in the international earthquake regulations (FEMA) (273, 356, 368, 369, 440), the Eurocom-8 and national seismic our regulations for the Regulation on Building to be Built in Seismic Zones (DBYBHY) (2007) It was also examined comparatively.

**Keywords:** FEMA, EUROCODE8, DBYBHY 2007, Soil-Structure Interaction

## 1. GİRİŞ

Günümüzde depreme dayanıklı yapı tasarımında yaygın olarak kullanılmakta olan deprem hesap yöntemlerinde yapı-zemin etkileşimi çoğu kez ihmal edilmekte ya da üzerinde fazla durulmamaktadır. Bunun en önemli nedeni, yapıların zemine mesnetlenmelerinin rijit olduğu kabulüne

dayanmasıdır. Halbuki özellikle son yıllarda meydana gelen Kobe (1995), Northridge (1994), Marmara (1999) vb. depremlerinde hasar görmüş yapıların incelenmesiyle depremde yapı-zemin etkileşiminin özellikle yüksek binalar, P-δ etkilerinin önem kazandığı narin yapılar (çelik yapılar gibi), nükleer santraller, barajlar gibi ağır masif yapılar için yapı-zemin etkileşiminin dikkate

alınmasının önemi bir kez daha ortaya çıkmıştır. Yapı-zemin etkileşiminin önem kazandığı yapıların deprem hesabında zeminin şekil değiştiren ve yapının davranışına eylemsizlik yönünden etkide bulunan bir dinamik sistem olarak ele alınması gerekmektedir. Zeminin yapıya olan etkisinin karşılığında, yapı da zemini hem kinematik hem de dinamik bakımdan değiştirecektir. Böylece zemin, yapının davranışını, yapı da zeminin davranışını etkileyecektir.

Dinamik yükler altındaki yapı, oturmuş olduğu zeminle etkileşime gireceği için, sadece yapının analizi yapılmamalı, yapı ve zeminden oluşan toplam alan analiz edilmelidir. Zemin, yarı sonsuz, homojen, elastik bir ortamdır. Dalga yansımalarını önlemek ve dalga yayılımının gerçektekine benzer durumun modellenmesi amacıyla, yarı sonsuz zemin ortamı, yarı uzaydan bölünmeli ve buraya uygun yapay sınırlar yerleştirilmelidir. Titreşen bir yapıdan yayılan dalgaların, yapay sınırlardan geçerek sonsuz zemin ortamına doğru yayılmasını sağlamak, yani zemin ortamının sınırsızlığı nedeniyle radyasyona uğramaları gerekmektedir. Bu durum, yapıdan zemine aktarılan dinamik enerjinin, zeminde yutulması anlamına gelmektedir. Bu enerji kaybı, “radyasyon sönümü” veya “geometrik sönüm” olarak adlandırılır. Dinamik bir modelde, yarı sonsuz zemin ortamının radyasyon sönümü göz önünde bulundurulmalıdır.

Üzerinde yapı olmasa bile, bir yandan zeminin diğer yandan temel sistemi rijitliklerinin farklı olmasından dolayı temel hareketi, serbest alan hareketinden farklı olacaktır. Serbest alandaki herhangi bir kontrol noktasında elde edilen hareket ile temel-zemin etkileşim yüzeyinin herhangi bir noktasındaki hareketin farklı olması kinematik etkileşim olarak adlandırılmaktadır. Kinematik etkileşimi etkileyen parametreler taban alan ortalaması (taban plağı düzlemi), temele gömülme oranı

ve dalga dağılımıdır. Temel seviyesindeki bu hareket, yapı tabanında atalet kuvvetleri ve dönme momentlerini büyütür üst yapıda salınımlar meydana getirir. Böylece temelde, kazıklarda ve zeminde ek dinamik kuvvetler ve yerdeğiştirmeler oluşur. Buna atalet etkileşimi denir.

Yapı-zemin etkileşimi, yapı-zemin sistemini üç yoldan etkiler. İlki, özellikle yapının esas moduna (1. periyot) ait periyodu büyütür, yapının rijit cisim hareketini değiştirmek suretiyle sistemin dinamik karakteristiğini değiştirir. İkincisi, zemin bölgesinin modal sönümünü dolayısıyla, tüm yapı-zemin sisteminin sönümünü artırır. Üçüncüsü ise, serbest alan yer hareketini değiştirerek etkiler. Yapı-zemin etkileşiminin sonucu olarak, yapıdaki şekil değiştirmelerden zemin gerilmeleri, zemindeki gerilmelerden ise yapı iç kuvvetleri etkilenir.

## 2. ULUSAL VE ULUSLARARASI YÖNETMELİKLERDE YAPI-ZEMİN ETKİLEŞİMİ PROBLEMİ

Deprem gibi, herhangi bir dinamik etkiye maruz bir yapıda yapının oturmuş olduğu zemin özellikleri yapının davranışını doğrudan etkiler. Bu etkileşim, yapıda meydana gelen yer değiştirmelerin, iç kuvvetlerin ve şekil değiştirmelerin etkilenmesi şeklinde olacaktır. Dolayısıyla, yapı ve zemin arasındaki etkileşimlerin, yapıların deprem hesabında dikkate alınması gerekmektedir. Veletsos ve ekibi tarafından yapı-zemin etkileşimi probleminin çözümüne yönelik geliştirilen yöntem, ilk olarak ATC 3-06 (1978) yönetmeliğinde yerini almıştır. Daha sonra, diğer uluslararası yönetmeliklerde de konunun önemine değinilerek, özellikle yapı-zemin etkileşiminin hangi durumlarda göz önüne alınması gerekliliği ve çözüm yöntemleri üzerinde durulmaya başlanmıştır. Bu çalışmada yapı-zemin etkileşiminin, FEMA 273, 356; Eurocode-8, FEMA 368, 369; FEMA 440 ve DBYBHY (2007) yönetmeliklerindeki yeri incelenmiştir.

## 2.1. Federal Emergency Management Agency (FEMA) 273, 356 (2000) Yönetmeliklerinde Yapı-Zemin Etkileşimi

FEMA 273 (1997) ve FEMA 356 (2000) yönetmeliklerinde; Yapı-zemin etkileşiminden dolayı, esas periyodun artarak spektral ivme artışlarına neden olan özellikle yakın alan depremleri altında yumuşak zemine oturan yapılarda yapı-zemin etkileşim etkilerinin değerlendirilmesi gerekliliği belirtilmiştir. Ayrıca, yapı-zemin etkileşiminin hesaplanmasında basit yöntem ve açık yöntem olmak üzere başlıca iki yöntem sunulmuş ancak, bu yöntemler hakkında detaylı bilgi ve matematiksel çözüm yöntemlerine değinilmemiştir. Bu yöntemlerden basitleştirilmiş yöntemin kullanılması durumunda, eleman ve bileşenlerindeki talep azalmasının, yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmayan elemanlardaki talep azalması değerinin %25'ini geçmemesi gerekliliği vurgulanmıştır. Kullanılan hesap yöntemlerine göre, yönetmelikte önerilen yapı-zemin etkileşimi çözüm yöntemleri değişiklik göstermektedir. Lineer Statik Prosedür (LSP) kullanılması durumunda basitleştirilmiş yöntem, Lineer Dinamik Prosedür (LDP), Nonlinear Statik Prosedür (NSP), veya Nonlinear Dinamik Prosedür (NDP) yöntemlerinin uygulanması durumunda ise açık model yönteminin kullanılması önerilmektedir.

## 2.2. Eurocode 8 (Design of Structures for Structures for Earthquake Resistance- Part 1) Standardında Yapı-Zemin Etkileşimi

1994'de yürürlüğe giren Eurocode 8 (2003)'de temelini Veletsos'un attığı bir yöntemle yapı-zemin etkileşiminin;

- ikinci mertebe (P- $\delta$ ) etkilerinin önemli rol oynadığı yapılarda,

- köprü ayağı, kıyı yapıları, silolar ve deniz yapıları gibi ağır veya derin temel sistemlerine sahip yapılarda,

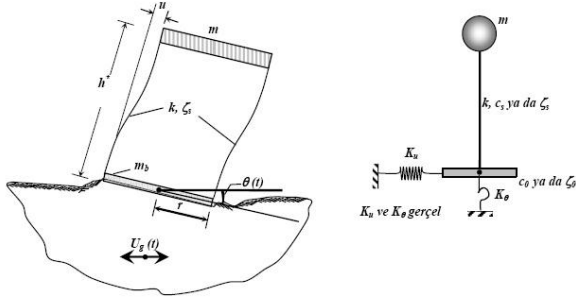
- kuleler ve bacalar gibi narin yapılarda

- ortalama kayma dalgası hızı  $v_{s,max}=100$  m/s olan yumuşak zemine yerleşmiş yapılarda (S<sub>1</sub> zemin sınıfı gibi) dikkate alınması gerektiği önerilmektedir. Ayrıca, sıradan yapıların büyük bir kısmında, yapı-zemin etkileşim etkilerinin üstyapı elemanlarında eğilme momenti ve kesme kuvveti etkilerini azaltmasından dolayı önemli olduğu belirtilmektedir.

## 2.3. FEMA (Federal Emergency Management Agency) 368, 369 (2001) Yönetmeliklerinde Yapı-Zemin Etkileşimi

NEHRP (National Earthquake Hazard Reduction Provisions) FEMA (368, 369) Yönetmeliklerinin temelini Veletsos'un (1988) yaklaşımı oluşturmaktadır. Şekil 1.'de gösterildiği gibi temel sistemine belli bir açıyla gelen SH dalgasına maruz kütleli yüzeysel dairesel ya da eşdeğer dairesel rijit temel sisteminin, zamana bağlı olarak hem yatay hem de dönme serbestlik dereceleri doğrultularında hareket edebildiği kabulü yapılmaktadır. Tek kütleli sistem olarak düşünülen bu yöntem, iki adımda açıklanmaktadır. İlki, bahsedilen harekete karşı temel-zemin sisteminin tepkilerini belirlemek, ikincisi yapı-temel-zemin sisteminin eşdeğer sönüm değerlerini bulmaktır (Livaoğlu, 2005).

Bu yönetmeliklerde, yapı-zemin etkileşiminin sadece eylemsizliğe bağlı etkileşimi dikkate alınmakta, kinematik etkileşim etkileri ihmal edilmektedir.



Şekil 1. Veletsos yaklaşımına ait mekanik model (Livaoglu, 2005)

FEMA 368 ve FEMA 369 (2001) yönetmeliklerinde, yapıdaki periyot değerleri arttırılarak temel-zemin sisteminin esnekliği dikkate alınmakta, sönüm değerinin arttırılmasıyla da radyasyon ve histerik etkiye bağlı harcanan enerji dikkate alınmaktadır. Bu durum, tabanda harmonik titreşime maruz kalan ankastre ve elastik zemine oturan sistemlerin karşılaştırılmasıyla açıklanmaktadır.

Tasarım, deprem kuvveti ve yapıdaki yerdeğiştirmelerin belirlenmesinde, yapı-zemin etkileşimi sisteme ilave edilmelidir. Yapı-zemin etkileşiminin tasarımda dikkate alınması durumunda; taban kesme kuvveti, yanal kuvvet ve devirme momenti azalırken, yanal yerdeğiştirme ve ikinci mertebe etkileri (P-δ) artar.

FEMA 368 ve 369 yönetmeliklerde geçen **Eşdeğer Yanal Kuvvet Yönteminde**, yapı zemin etkileşiminin, sadece esas titreşim modundaki yapılar üzerinde etkili olduğu varsayımı yapılmaktadır. Ancak, gerçekte efektif yapı ağırlığı ve yanal kuvvetlerin dikey dağılımının dikkate alınması durumunda yapı-zemin etkileşiminin yüksek modlar üzerinde de etkili olduğu belirtilmektedir.

Yapı-zemin etkileşim etkileri ihmal edilen sistemin taban kesme kuvveti aşağıdaki gibidir;

$$V = C_s(T, \beta) \bar{W} + C_s(T, \beta) [W - \bar{W}] \quad (2.1)$$

Burada;

$\bar{W}$  = Esas periyodunda titreşen yapının efektif ağırlığı,  
 $\bar{W} = 0.7W$  (Tek kütleli olarak değerlendirilen sistemin ağırlığının %70'ini ifade etmektedir.)

$\check{V}$  = Etkileşime giren sistemin taban kesme kuvveti aşağıdaki formülle ifade edilir;

$$\check{V} = C_s(\check{T}, \beta) \bar{W} + C_s(T, \beta) [W - \bar{W}] \quad (2.2.)$$

Denklemin ilk bölümündeki  $C_s$ , esnek tabanlı yapının periyot ( $\check{T}$ ) ve sönüm faktörü ( $\beta$ ); ikinci bölümdeki  $C_s$  değeri ise, rijit tabanlı yapının periyot ve sönüm faktörü olarak değerlendirilmektedir.

“Taban kesme kuvvetindeki azalma”, aşağıdaki formülle ifade edilir:

$$C_s(\check{T}, \beta) = C_s(\check{T}, \beta) \left( \frac{\beta}{\check{\beta}} \right)^{0.4} \quad (2.3)$$

$$\Delta V = [C_s(T, \beta) - C_s(\check{T}, \beta)] \bar{W} \quad (2.4)$$

Denklem 2.3, denklem 2.4’de yerine konduğunda,  $\Delta V$  aşağıdaki formüle dönüşür:

$$\Delta V = \left[ C_s(T, \beta) - C_s(\check{T}, \beta) \left( \frac{\beta}{\check{\beta}} \right)^{0.4} \right] \bar{W} \quad (2.5)$$

NEHRP (National Earthquake Hazard Reduction Provisions) FEMA (368, 369) yönetmeliklerinde, yapı-zemin etkileşimi hesaba katılarak elde edilen taban kesme kuvvetinin ( $\check{V}$ ), sistemin ankastre çözümünden elde edilecek taban kesme kuvvetinin ( $V$ ) %70’inden az olmaması önerilmektedir.

Yapının efektif periyodu aşağıdaki bağıntıyla hesaplanır:

$$\check{T} = T \sqrt{1 + 25\alpha \left( \frac{r_a \bar{h}}{v_s^2 T^2} \right) \left[ 1 + \left( \frac{1.12 \bar{h}^2}{\alpha_\theta r_m^3} \right) \right]} \quad (2.6)$$

Yapı-temel sistemi için efektif sönüm faktörü,  $\tilde{\beta}$  aşağıdaki bağıntıyla hesaplanabilir:

$$\tilde{\beta} = \beta_o + \frac{0.05}{\left(\frac{\tilde{T}}{T}\right)^3} \quad (2.7)$$

Bu formüldeki  $\beta_o$  değeri Şekil 2.'de belirtilen temel sönüm faktörüdür.

$S_{DS} = 0.375$  ile uyumlu olan  $\beta_o$  değeri, Şekil 2.'deki kesikli ve düz çizgilerden elde edilen ortalama sonuçlardan belirlenmektedir.

Sisteme ait tepki spektrumu değeri, yapı esnekliği ve değiştirilmiş periyodun ankastre sistemin periyot oranına bağlı olarak Şekil 2. yardımıyla belirlenmektedir.

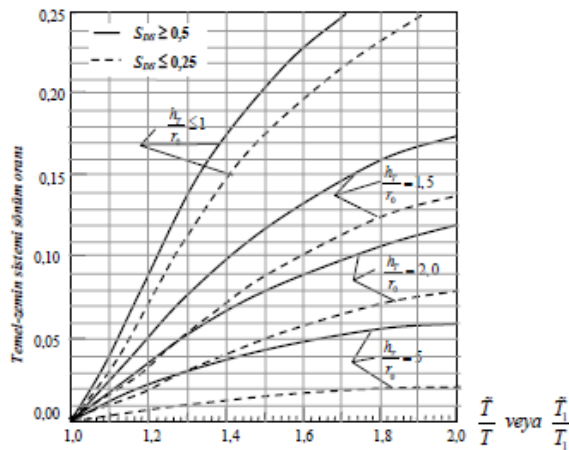
$$\tilde{\zeta} = f\left(S_{D,S}, \frac{h^*}{r}, \frac{\tilde{T}}{T}\right) \quad (2.8)$$

Burada,

$(S_{DS})$  = Periyodu (1 s)'den az olan sistemlerin spektrum ivme katsayısını,

$\tilde{T}/T$  = Değiştirilmiş periyodun ankastre sistemin periyoduna oranını,

$h_T/r_0$  = Tek kütleli sistemin yüksekliğinin temel yarıçapına oranını göstermektedir.



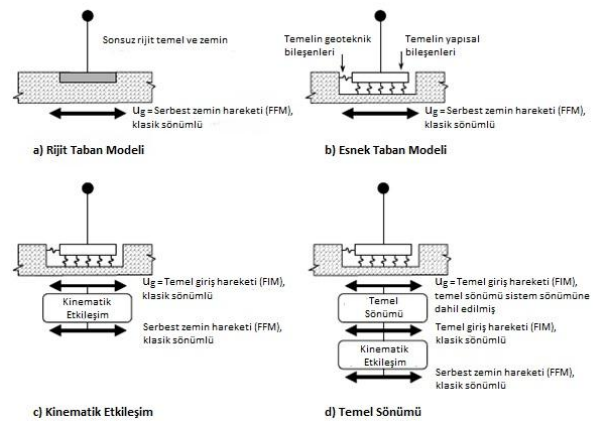
Şekil 2. Temel-zemin sisteminin sönüm oranının periyot oranıyla değişimi (FEMA 368)

## 2.4. FEMA 440 (2005) Yönetmeliğinde Yapı-Zemin Etkileşimi

FEMA 440 Yönetmeliğinde, yapısal modelin doğrusal olmayan statik analiz yöntemleri için, yapı ve onu destekleyen zemin arasındaki etkileşim etkilerini içeren basitleştirilmiş etkiler sunulmuştur. Yapı-zemin etkileşim etkileri üç ana kategoriye ayrılmaktadır. Bunlar:

- Zemin-temel sisteminin esnekliği hakkında bilgi (Esnek temel etkileri)
- Zeminden yapıya aktarılan yer hareketlerinin filtrelenmesi (Kinematik Etkiler)
- Zemin-yapı sistemindeki enerjiyi radyasyon ve histerik sönüm olarak dağıtma (Temel sönüm etkisi)

Günümüzde kullanılan FEMA 356 ve ATC 40'da yer alan analiz işlemleri kısmi olarak yapısal analiz modelindeki temelin geoteknik bileşenleri, rijitlik ve dayanım aracılığıyla esnek temel etkilerinin bulunmasında yol göstericidir. Fakat bu işlemler, kinematik etkileşim veya temel sönüm etkilerinden kaynaklanan bir indirgemeyi kapsamaz.



Şekil 3. Temel modeli kabulleri (FEMA 440)

Şekil 3.a'da rijit temele oturan serbest zemin hareketi ile harekete geçen yapısal bir model gösterilmiştir. Serbest zemin hareketi, etrafında herhangi bir yapı olmadığı kabul edilen yüzeydeki tek bir noktanın teorik hareketidir.

Şekil 3.b'de esnek temelle doğrudan birleştirilmiş yapısal model gösterilmiştir. ATC 40 ve FEMA 356, yapısal modelin elastik olmayan analizinde temellerin esneklik ve dayanımıyla ilgili yer alan koşullarda, serbest zemin hareketi olarak %5 sönümlü sismik talep kullanılır. Yapısal sistem tepkisinin bir sonucu, temel sisteminin yapısal ve geoteknik parçalarında deformasyonlara neden olmasıdır (elastik ve elastik olmayan). Bu deformasyonlar bazen eylemsiz yapı-zemin etkileşimi olarak adlandırılır. Modellemedeki bu gelişmeler sayesinde yapı davranışının olası tepkisinin daha doğru gösterimi sağlanmaktadır.

Şekil 3.c'de yapı-zemin etkileşimi, yapıya etki eden yer hareketinin karakterinde ve şiddetinde bir filtreleme yapmasını sağlar. Kinematik etkileşim sonucu, zeminin üzerinde veya içerisinde yer alan rijit temel elamanlar serbest zemin hareketinden ayrılır. Yaygın olarak tanımlanan bu iki etki, taban alan ortalaması ve zemine gömülü olma etkisidir. Taban alan ortalaması etkisi, yapı içinde ve temel ayağının altındaki her noktada ani hareketin aynı olmadığı kabulüne dayanmaktadır. Gömülü olma etkisi, zemin tabakalarından derinliklere inildikçe yer hareketindeki azalmadır. Hem taban alan ortalaması hem de zemine gömülü olma durumu, üst yapıdan bağımsız olan temel seviyesindeki hareketin karakteridir (temel giriş hareketi, FIM olarak adlandırılır). Bu etkiler, serbest zemin hareketinin yüksek frekanslı (kısa periyotlu) bileşenlerine uygulanan bir filtredir.

Şekil 3.d'de temel esnekliğine ek olarak yapı zemin etkileşim ataletinin bir başka sonucu olan temel sönüm etkileri gösterilir. Temel sönümleme etkisi, temel ve onu çevreleyen zeminin göreceli hareket etmesinden kaynaklanır. Bu temelden uzaklaşan radyasyon enerjisi ve zeminin histerik sönümüyle ilgilidir.

#### 2.4.1. Kinematik Etkiler için Yöntemler

Temel tabanındaki çeşitli yer hareketlerinin ortalaması, dalga yayılımı ve gömülme etkilerinden dolayı yapı temeline uygulanan yer hareketlerinin, serbest alandaki yer hareketlerinden farklı olması kinematik etkileşim olarak adlandırılmaktadır. Kinematik etkileşim, kısa periyotlu (periyot  $\sim < 0.5$  s), plan boyutları büyük olan veya zemine 10ft. ( $\sim 3$  m.) veya daha fazla gömülü yapılar için önem arz etmektedir.

Kinematik etkileşim etkilerini anlatmak için, tepki spektrum oranı faktörü (RRS) kullanılmaktadır. RRS basitçe, temeldeki tepki spektrum ordinatlarının serbest zemindeki tepki spektrum ordinatlarına oranıdır. RRS'nin değerlendirilmesinde, düşünülmesi gereken iki olgu temel taban ortalaması ve gömülü temel oranıdır. Temel taban ortalaması, hemen hemen bütün binalarda belirli büyüklüklerde bulunmaktadır. Temel seviyesinde birbirine büyük kirişler veya betonarme plaklarla bağlanmış tekil temellerde veya radye temellerde meydana gelmekle birlikte, sadece temel sisteminde yatay bağlantıları olmayan esnek döşemeli binalarda ve çatı diyaframlarında ihmal edilmelidir. Temel ayakları gömülü olsa bile, bu etkiler bodrumsuz binalarda düşünülmemelidir. Temel gömülme etkisi, temel derinliğinin 10ft. ( $\sim 3$  m.) büyük olması durumunda önem arz etmektedir. Sağlam kayaya oturan temeller için (A ve B sınıf), gömülü olma etkisi ve yumuşak killi zeminler gibi, sınıf zemini E olan zeminlerde ise kinematik etkileşim etkileri ihmal edilebilir. Analizler için, periyodun (T) fonksiyonu olarak bu iki kinematik etkileşim etkileri için basitleştirilmiş işlemler aşağıda önerilmektedir.

#### 2.4.2. Temel Sönümü İçin Yöntemler

Temel-zemin sönümlemesi, zeminin histerik davranışıyla ilgili olmakla beraber (yapı elemanlarının histerik davranışıyla karıştırılmamalıdır) aynı zamanda, temelden

zemine enerji yayılımı ile ilgilidir (ör: radyasyon sönümü). Bu temel zemin etkileri, özellikle temel zeminin yumuşak olduğu durumlarda (zemin sınıfı D-E) rijit yapı sistemleri (ör: perde duvar) için önem arz etmektedir. Temel sönüm etkileri, değiştirilmiş sistem-sönüm oranı ile sunulmaktadır. Temel sönümü ihmal edilen yapı için, ilk yapı sönümü  $\beta_i$  ile gösterilir ve genellikle %5 alınır. Yalnızca, temel-zemin etkileşiminden kaynaklanan sönüm  $\beta_f$  ile gösterilir. Sonuçta, temel-zemin etkileşimi ve yapı sönümünü içine alan tüm sistemin sönüm oranı  $\beta_o$  ile gösterilir. Sönüm oranının  $\beta_i$ 'den  $\beta_o$ 'a değişmesi elastik tepki spektrumunu değiştirir. Eğer,  $\beta_o > \beta_i$  olursa, spektral ordinatlarda indirgeme yapılmaktadır.

Tasarım için basitleştirilmiş yöntemde izlenen adımlar aşağıda belirtilmiştir.

Sabit temel ( $T$ ) ve esnek temel ( $\tilde{T}$ ) kabulleri yapılan yapısal modelin lineer periyotları belirlenir. Zeminin yay rijitliği FEMA 356 ve ATC 40'dan elde edilmiştir. Zemin rijitliğinin hesaplanmasında, efektif zemin kayma modülü tahmini kullanılmalıdır.

1. Ankastre temel durumu için, SDOF salınımının efektif yapısal rijitliği denklem 2.9'da belirtildiği gibi belirlenir.

$$K_{sabit}^* = M^* \left( \frac{2\pi}{T} \right)^2 \quad (2.9)$$

Burada,  $M^*$ ; toplam kütle ile efektif kütle katsayısının çarpımıyla elde edilen birinci moda ait efektif kütledir.

2. Öteleme için eşdeğer temel yarıçapı denklem 2.10'da gösterildiği gibi belirlenir.  $A_f$ , Temel elemanları yanal olarak birbirine bağlanmış temelin iz düşüm alanını ifade etmektedir.

$$r_x = \sqrt{\frac{A_f}{\pi}} \quad (210)$$

3. Temelin öteleme rijitliği,  $K_x$  belirlenir. Öteleme rijitliği aşağıdaki formülle belirlenir.

$$K_x = \frac{8}{2 - \nu} G r_x \quad (2.11)$$

Denklemden belirtilen,  $G$ = Efektif zemin kayma modülü,  $\nu$ = poisson oranını (kumlar için  $\sim 0.3$ , killer için  $\sim 0.45$ ) ifade etmektedir.

4. Dönme için eşdeğer temel yarıçapının,  $r_\theta$  hesaplanması için, öncelikle birinci efektif dönme rijitliği,  $K_\theta$  denklem 2.12'deki formülle belirlenir.

$$K_\theta = \frac{K_{sabit}^* (h^*)^2}{\left( \frac{\tilde{T}}{T} \right)^2 - 1 - \frac{K_{sabit}^*}{K_x}} \quad (2.12)$$

Burada,  $h^*$ = Efektif yapı yüksekliğidir. Bir katlı yapılar için toplam yükseklik, çok katlı yapılar için, temelden birinci mod şeklinin merkezine olan dikey uzaklık olarak alınır. İkinci durumda,  $h^*$ 'in toplam yapı yüksekliğinin %70'i olarak almak genellikle iyi bir kabuldür.  $K_x$ 'in doğru değerlendirmesinin gereksiz olduğu ve oranının yaklaşık sıfır olduğu durumlarda,  $K_x$ , genellikle  $K_{sabit}^*$ 'ten daha büyüktür. Daha sonra, dönme için eşdeğer temel yarıçapı,  $r_\theta$  denklem 2.13'deki formülle hesaplanır:

$$r_\theta = \left( \frac{3(1 - \nu)K_\theta}{8G} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.13)$$

Zeminin kayma modülü  $G$ , poisson oranı  $\nu$  temelin yay rijitliğinin belirlenmesinde kullanılan ile uyumlu olmalıdır.

5. Temel derinliği,  $e$  belirlenir.

6. Statik itme analizi ile oluşturulan yapı modeli kullanılarak, efektif periyot

uzunluk oranı,  $\tilde{T}_{eff}/T_{eff}$  belirlenir. Bu oran denklem 2.14'deki şekilde ifade edilmiştir:

$$\frac{\tilde{T}_{eff}}{T_{eff}} = \left\{ 1 + \frac{1}{\mu} \left[ \left( \frac{\tilde{T}}{T} \right)^2 - 1 \right] \right\}^{0.5} \quad (2.14)$$

Bu formüldeki  $\mu$ , sistemin beklenen düktilite talebidir (yapı ve zemin etkilerini içeren), Çözümünden önce düktilite belirlenmeli, daha sonra kontrol edilmelidir.

7. Sabit tabanlı yapının birinci sönüm oranı belirlenir, bu değer genellikle %5 olarak alınır.

8. Şekil 4. ve 5.'de gösterildiği gibi,  $\tilde{T}_{eff}/T_{eff}$ ,  $e/r_x$  ve  $h/r_Q$  bağlı radyasyon sönümünden dolayı oluşan temel sönümü,  $\beta_f$  belirlenir.

Bu grafiklerdeki eğrinin denklemi aşağıda gösterilmiştir:

$$\beta_f = \alpha_1 \left( \frac{\tilde{T}_{eff}}{T_{eff}} - 1 \right) + \alpha_2 \left( \frac{\tilde{T}_{eff}}{T_{eff}} - 1 \right)^2 \quad (2.15)$$

Bu formüldeki  $\beta_f$  yüzdendir ve  $\alpha_1, \alpha_2$ , değerleri denklem 2.16, 2.17'de belirtildiği şekilde hesaplanır:

$$\alpha_1 = c_e \exp(4.7 - 1.6 h/r_\theta) \quad (2.16)$$

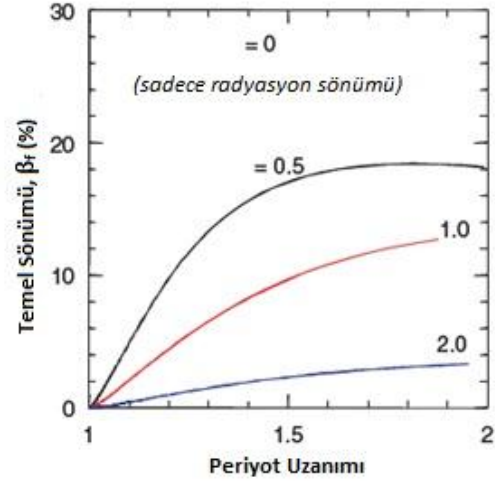
$$\alpha_2 = c_e (25 \ln(h/r_\theta) - 16) \quad (2.17)$$

Denklem 2.16 ve 2.17'deki  $c_e$  değeri ise denklem 2.18 ile ifade edilmektedir.

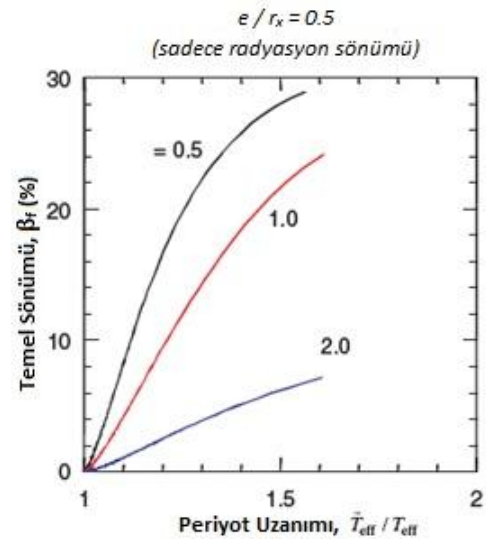
$$c_e = 1.5(e/r_x) + 1 \quad (2.18)$$

Yukarıdaki eşitlikler daha çok  $\tilde{T}_{eff}/T_{eff} < 1.5$  olması durumunda daha çok

uygulanabilir ve  $\tilde{T}_{eff}/T_{eff}$ 'nin yüksek değerlerine göre daha iyi sonuçlar verir.



Şekil 4. Sabit gömülme oranı  $e/r_x = 0$ , temel rijitlik dönme rijitliğinin değişik değerleri için, efektif periyot uzanım oranının  $\tilde{T}_{eff}/T_{eff}$ 'nin bir fonksiyonu olan temel sönümü,  $\beta_f$  için bir örnek



Şekil 5. Sabit gömülme oranı  $e/r_x = 1.5$ , temel rijitlik dönme rijitliğinin değişik değerleri için, efektif periyot uzanım oranının  $\tilde{T}_{eff}/T_{eff}$ 'nin bir fonksiyonu olan temel sönümü,  $\beta_f$  için bir örnek



9.  $\beta_i, \beta_f$  ve  $\tilde{T}_{eff}/T_{eff}$ , kullanılarak, esnek taban sönüm oranı  $\beta_0$  aşağıdaki formülle belirlenir.

$$\beta_0 = \beta_f + \frac{\beta_i}{\left(\frac{\tilde{T}_{eff}}{T_{eff}}\right)^3} \quad (2.19)$$

10. Sönüm oranının  $\beta_i$ 'nin  $\beta_0, \beta_0$ 'a değişmesi durumunda, spektral ordinatlar üzerindeki etkisi belirlenir ve temel giriş hareket spektrumu (FIM) değiştirilir (Eğer kinematik etkiler ihmal edilirse, temel giriş hareketi serbest-alan hareketine eşit olur)

## 2.5. DBYBHY 2007 (Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik) Yapı-Zemin Etkileşimi

Türkiye için 2007'de yürürlüğe giren "Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelikte" ise yapı-zemin etkileşimiyle ilgili herhangi bir kısıtlama ya da yönlendirme bulunmamaktadır. Zemin özellikleri ivme spektrumu ve buna bağlı olarak elastik deprem yüklerinin belirlenmesinde rol oynamaktadır.

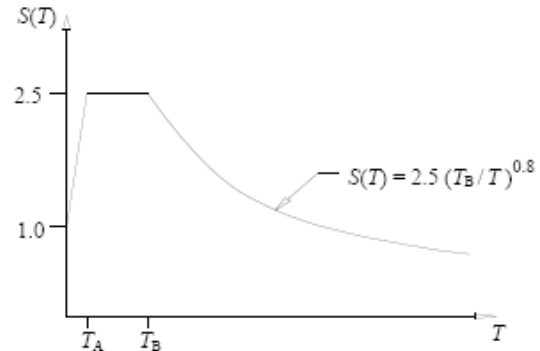
DBYBHY 2007 yönetmeliğinde zeminler 4 sınıfa ayrılmakta olup, yönetmeliğin 6.2. bölümünde zemin koşullarının belirlenmesi ile ilgili detaylı bilgiler verilmektedir. Yönetmeliklerde öncelikle maksimum elastik deprem yüklerinin tanımlanması söz konusu olduğundan, genellikle düşey ekseninde spektral ivmenin yatay ekseninde binanın doğal titreşim periyodunun temsil edildiği ivme spektrumunun tanımı yapılır. Bu bağlamda %5 sönüm için spektral ivme denklemi aşağıdaki formülle ifade edilmiştir.

$$\begin{aligned} A(T) &= A_0 I S(T) \\ S_{ae}(T) &= A(T) g \end{aligned} \quad (2.20)$$

Burada,  $S_{ae}(T)$ , doğal titreşim periyodu  $T$ 'ye bağlı olarak spektral ivmeyi,  $g$  yerçekimi ivmesini,  $A(T)$  ise Spektral İvme Katsayısı olarak adlandırılan boyutsuz büyüklüğü göstermektedir. Burada  $A_0$  deprem bölgelerine göre değişen Etkin Yer İvme Katsayısı'nı,  $I$  binanın kullanım amacı veya türüne göre tanımlanan Bina Önem Katsayısını, Spektrum Katsayısı  $S(T)$  ise, şekil 6.'da gösterilen Boyutsuz Spektrum Katsayısını göstermektedir. Yatay ekseninde gösterilen  $T_A$  ve  $T_B$  karakteristik periyotları, zemin sınıflarına bağlı olarak çizelge 1.'de verilen Spektrum Karakteristik Periyotlarını göstermektedir. Spektrum Katsayısı  $S(T)$ , Spektrum karakteristik periyotları ve bina doğal periyodu  $T$ 'ye bağlı olarak denklem (2.21) ile hesaplanmaktadır.

Çizelge 1. Spektrum karakteristik periyotları ( $T_A, T_B$ ) (DBYBHY, 2007)

Yerel Zemin Sınıfı	$T_A$ (saniye)	$T_B$ (saniye)
Z1	0.10	0.30
Z2	0.15	0.40
Z3	0.15	0.60
Z4	0.20	0.90



Şekil 6. Spektrum katsayısı  $S(T)$ 'nin periyot  $T$ 'ye göre değişimi (DBYBHY, 2007)

$$\begin{aligned} S(T) &= 1 + 1.5 \frac{T}{T_A} \quad 0 \leq T \leq T_A \\ S(T) &= 2.5 T_A \leq T \leq T_B \\ S(T) &= 2.5 \left(\frac{T_B}{T}\right)^{0.8} \quad T_B \leq T \end{aligned} \quad (2.21)$$

### 3. TARTIŞMA VE SONUÇ

Uluslararası deprem yönetmeliklerinde, yapı-zemin etkileşimi konusu ve çözüm yöntemleri detaylı olarak belirtilmiş olmasına rağmen, DBYBHY (2007)'de yapı-zemin etkileşimi ile ilgili herhangi bir kısıtlama ya da çözüm yöntemleri bulunmamaktadır.

FEMA 273 (1997) ve FEMA 356 (2000) yönetmeliklerinde, yapı-zemin etkileşiminin hesaplanmasında basit yöntem ve açık yöntem olmak üzere başlıca iki yöntem sunulmuş ancak, bu yöntemler hakkında detaylı bilgi ve matematiksel çözüm yöntemlerine değinilmemiştir. Basitleştirilmiş yöntemin kullanılması durumunda, eleman ve bileşenlerindeki talep azalmasının, yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmayan elemanlardaki talep azalması değerinin %25'ini geçmemesi gerektiği vurgulanmıştır.

Eurocode-8 (2003) standardında, yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması gereken durumlar belirtilmiş ancak, herhangi bir çözüm yöntemi önerilmemiştir.

FEMA (368, 369) Yönetmeliklerinde, yapı-zemin etkileşiminin sadece atalet etkileşimi dikkate alınmakta, kinematik etkileşim etkileri ihmal edilmektedir. Yapı-zemin etkileşimi hesaba katılarak elde edilen taban kesme kuvvetinin ( $\check{V}$ ), sistemin ankastre çözümünden elde edilecek taban kesme kuvvetinin ( $V$ ) %70'inden az olmaması önerilmektedir.

Yapı-zemin etkileşiminin, yöntemler arasında en kapsamlı olarak sunulduğu, kinematik ve atalet etkileşiminin ele alındığı yönetmelik FEMA 440 (2005)'dir. Bu yönetmelikte yapı-zemin etkileşim etkileri, esnek temel etkileri, kinematik etkiler, temel sönüm etkisi olmak üzere üç ana kategoriye ayrılmaktadır. FEMA (368, 369)'de sadece atalet etkileşim etkileri dikkate alınırken FEMA 440'da kinematik ve temel sönüm

etkileri, detaylı bilgi ve matematiksel çözüm yöntemleriyle ele alınmıştır.

DBYBHY (2007)'de ise, zemin sınıfları hakkında bilgiler verilmiş, elastik tasarım ivme spektrumlarının oluşturulmasında, yerel zemin koşullarının göz önünde bulundurulması gereğine yer verilmiş ancak, yapı-zemin etkileşimiyle ilgili herhangi bir kısıtlama ya da yönlendirme bulunmamaktadır.

### KAYNAKLAR

DBYBHY, 2007. Deprem Bölgesinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara.

EUROCODE-8, 2003. Design of Structures for Earthquake Resistance-Part 1, European Committee for Standardization 225s.

FEMA 273, 1997. NEHRP Guidelines for The Seismic Rehabilitation of Buildings. FEMA, (ATC-33 Project), Washington, D.C. USA.

FEMA 356, 2000. Prestandard And Commentary For The Seismic Rehabilitation of Buildings. ASCE, Reston, VA, USA.

FEMA 368, 2001. The 2001 NEHRP Recommended Provisions For New Buildings And Other Structures Part 1: Provision, NEHRP, Washington, D.C. USA.

FEMA 369, 2001. The 2001 NEHRP Recommended Provisions For New Buildings And Other Structures Part 2: Provision, NEHRP, Washington, D.C. USA.

FEMA 440, 2005. Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures, FEMA, (ATC-55 Project), Washington, D.C. USA. Karabörk, T., Doğuş S., Bilgehan P.R., 2007.

Çok katlı çelik yapı sistemlerinin yapı-zemin etkileşimi ile doğrusal olmayan dinamik analizi. Teori ve Uygulamada Zemin-Yapı

Etkileşimi Sempozyumu Bildiriler Kitabı, İstanbul Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Avcılar Kampüsü, 8-9 Kasım 2007.

Livaoğlu, R., 2005. Ayaklı depoların sıvı-yapı-zemin etkileşimleri dikkate alınarak

deprem davranışlarının incelenmesi. KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora tezi, 282 sf., Trabzon.

Wolf, J.P., 1994. Foundation Vibration Analysis Using Simple Physical Models, Prentice-Hall, Englewood, 423 sf., USA