

## Döndürülmüş yer hareketleri için hesaplanacak ortalama sönüm azaltma katsayısının kestirimi için yeni bir yaklaşım

### A new approach for estimation of damping reduction factor of oriented ground motion records in an average sense

Gökhan ÖZDEMİR<sup>1\*</sup>, Beyhan BAYHAN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye.

[gokhan\\_ozdemir@anadolu.edu.tr](mailto:gokhan_ozdemir@anadolu.edu.tr)

<sup>2</sup>İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Bursa Teknik Üniversitesi, Bursa, Türkiye.

[beyhan.bayhan@btu.edu.tr](mailto:beyhan.bayhan@btu.edu.tr)

Geliş Tarihi/Received: 25.05.2018, Kabul Tarihi/Accepted: 10.12.2018

\* Yazılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2018.70745

Araştırma Makalesi/Research Article

#### Öz

Bu çalışma, sönüm azaltma katsayısının, yer hareketinin yönüne bağlı değişimini incelemektedir. Bu amaçla, seçilen orijinal yer hareketlerinin, birbirine dik yatay bileşenleri, maksimum yer hızlarına göre gruplandırılmış ve bu yatay bileşenler, 0°'den 180°'ye kadar, 10°'lik artımlarla döndürülmüştür. Orijinal ve döndürülmüş kayıtlara ait sönüm azaltma katsayıları, %10, %20 ve %30 sönüm oranları için hesaplanmıştır. Daha sonra, sönüm azaltma katsayısındaki değişimi, yer hareketinin yönüne bağlı olarak hesap etmek amacıyla, basitleştirilmiş yeni bir yöntem önerilmiştir. Sonuçlar, yer hareketi yönünün, sönüm azaltma katsayısının hesabında önemli bir parametre olduğunu ve bu çalışmada önerilen yöntemin, periyot ve sönüm oranından bağımsız olarak, sönüm azaltma katsayısını ortalama bazda hesaplanması bakımından oldukça başarılı olduğunu göstermiştir.

**Anahtar kelimeler:** Sönüm azaltma katsayısı, Yer hareketinin yönü, Döndürülmüş kayıtlar, Basitleştirilmiş Analiz yöntemi

#### Abstract

This study investigates the dependence of damping reduction factor on ground motion orientation. For this purpose, orthogonal horizontal components of selected as-recorded ground motions, clustered according to their peak ground velocity values, were rotated from 0° to 180° with increments of 10°. Damping reduction factors of all the rotated and original records were computed for damping ratios of %10, %20 and %30. Then, a new simplified method is proposed to estimate the variation in damping reduction factor due to ground motion orientation. The results indicate that ground motion orientation is a significant parameter in computation of damping reduction factor and proposed method is quite satisfactory in estimating damping reduction factor in an average sense regardless of the period and damping ratio.

**Keywords:** Damping reduction factor, Ground motion orientation, Rotated ground motions, Simplified method of analysis

## 1 Giriş

Sabit mesnetli bir yapının sismik performansı, temel seviyesinde düşük yatay rijitlik tanımlanarak; yani sismik taban izolasyonlu bir yapıya dönüştürülerek geliştirilebilir. Bu tür bir yapım tekniği, yapısal periyodun artmasına yol açar; böylece yapısal sisteme, en aza indirgenmiş ivme değerleri ve göreceli kat ötelemeleri ile birlikte azaltılmış deprem kuvvetleri aktarılır. Diğer yandan, yapının sismik performansındaki böyle bir iyileştirme, izolasyon seviyesinde kontrol edilmesinden gereken büyük yer değiştirmeler sebep olur. Bu nedenle, sismik izolasyonlu bir yapının davranışı, genellikle bu tarz yapıların tasarımındaki başlıca unsurlardan biri olan maksimum izolatör deplasmanı (MİD) dikkate alınarak belirlenir. Her ne kadar, MİD'nin belirlenmesi için en gerçekçi yöntem sismik izolasyonlu yapılar ile Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan (ZTADO) analizler gerçekleştirilirse de ön tasarım aşamasında kullanılmak üzere, basitleştirilmiş analiz yöntemleri de mevcuttur. Bu basitleştirilmiş yöntemler, sınırlı durumlar için (sönüm oranı %30'dan, etkin periyot 3.0 s'den az) doğrudan tasarım amaçlı kullanılabilirken, ZTADO analiz sonuçlarının doğruluğunu ölçmek için de kullanılabilir.

Sismik izolasyonlu yapı, basitleştirilmiş analiz yönteminde; yani eşdeğer kuvvet yönteminde, izolatör biriminin eşdeğer doğrusal özellikleri ile idealize edilmiş tek serbestlik dereceli bir sistem ile temsil edilir. İzolatörlerin eşdeğer doğrusal özelliklerini belirlerken eşdeğer kuvvet yönteminde kullanılan

parametrelerden birisi de izolatörün tasarım deplasmanı altındaki histeretik enerji yutma miktarını temsil eden eşdeğer sönüm oranıdır. Sismik izolatörlü yapılarda eşdeğer sönüm oranı genellikle %5'in üzerindedir. Ancak, mevcut şartnamelerde yapıların tasarımında kullanılmak üzere önerilen elastik tepki spektrumları %5 sönüm oranı için hazırlanmıştır. Bu durumda, şartnamelerde %5 sönüm oranı için tanımlanmış elastik tepki spektrumlarını daha yüksek sönüm oranlarının söz konusu olduğu durumlarda da kullanabilmek için uygun bir biçimde değiştirmek gerekir [1]-[2]. Bu değişiklik, %5 sönüm oranı için hesaplanmış spektrum değerlerini Denklem (1) ile tanımlanan sönüm azaltma katsayısı B ile bölerek gerçekleştirilir.

$$B = \frac{S_a(T, 5\%)}{S_a(T, \beta)} \quad (1)$$

Bu denklemde T, yapının periyodunu;  $\beta$ , eşdeğer sönüm oranını;  $S_a$ , pseudo-spektral ivme değerini (maksimum deplasman anındaki ivme) temsil etmektedir. Spektral deplasman  $S_d$  ile  $S_a$  arasında Denklem (2)'de verilen ilişki dikkate alınarak Denklem (1) yeniden düzenlenirse B katsayısı Denklem (3)'te verildiği gibi spektral deplasmanlar cinsinden de ifade edilebilir.

$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} S_a \quad (2)$$

$$B = \frac{S_d(T, 5\%)}{S_d(T, \beta)} \quad (3)$$

Denklem (1) veya Denklem (3) kullanılarak elde edilen B değerleri, tahmin edileceği üzere hesaplarda kullanılan yer hareketine özgüdür ve her bir kayıt için farklılık arz eder. Bu sebeple literatürde, yer hareketi karakteristiğinin bir fonksiyonu olarak sönüm azaltma katsayısındaki değişim üzerine pek çok çalışma bulunmaktadır [3]-[14]. Bu çalışmalarda, yer hareketi karakteristiğini etkileyen zemin tipi, faya olan uzaklık ve depremin büyüklüğü gibi birçok parametre hem uzak kaynaklı hem de yakın kaynaklı yer hareketleri için dikkate alınmıştır. Hatta bu çalışmaların bazıları, şartname hükümlerinin temeli olarak kullanılmıştır. Örneğin; Newmark ve Hall [14] tarafından yürütülen çalışmanın sonuçları, sismik izolasyonlu yapıların tasarımı için International Building Code (IBC) [15] içinde yer almış, Ramirez ve diğ.'nin [13] çalışması da National Earthquake Hazards Reduction Program (NEHRP) [16] şartnamesinde sönüm azaltma katsayıları için önerilen hükümlerin temeli oluşturmuştur. Bahsedilen çalışmalarda, araştırmacılar, eşdeğer kuvvet yönteminde kullanılan B katsayısındaki değişimi ve seçilen yer hareketi için hesaplanan sönüm azaltma katsayılarını hesaplamada kullanılan matematiksel ifadeleri etkileyen parametreleri dikkate almışlardır. Ancak bu çalışmaların hiçbiri yer hareketi yönünün B katsayısına etkisini incelemeyip orijinal yer hareketi kayıtlarının yatay bileşenlerini veya orijinal yer hareketlerine ait faya paralel ve faya dik bileşenleri göz önüne almışlardır. Halbuki, yer hareketi karakteristiği [17]-[20]; dolayısıyla yapıların yer hareketine verdiği dinamik tepki [21]-[24] yer hareketini kayıt etmek için kullanılan sensörlerin yönüne oldukça bağlıdır.

Yer hareketi yönünün, yer hareketi karakteristiğine ve depreme maruz kalan yapıların dinamik tepkisine etkisini dikkate alan araştırma sonuçları şu soruyu akla getirmiştir: Sönüm azaltma katsayısı, B, yer hareketi etkime yönünden nasıl etkilenir? Bu soruya cevap bulmak adına yürütülen bu çalışmanın amaçları;

- Mümkün olabilecek tüm yer hareketi yönlerini dikkate almak amacıyla, orijinal yer hareketi için pek çok etkime açısı göz önünde bulundurularak sönüm azaltma katsayısı B'deki değişimi belirlemek ve B için ortalama değerler hesaplamak,
- Ortalama sönüm azaltma katsayısı için daha önce önerilmiş yöntemlerin hesaplanan ortalama B değerini belirlemedeki yeterliliğini değerlendirmek,
- Yer hareketi etkime yönünün etkisi söz konusu olduğunda, önerilen analitik metotlar ile ortalama anlamında yüksek doğruluk derecesine sahip sönüm azaltma katsayıları hesaplamaktır.

## 2 Seçilen yer hareketi veri tabanı

Literatürde, sönüm azaltma katsayıları üzerine odaklanan çalışmalar, yer hareketinin büyüklüğü, faya uzaklık ve zemin tipi gibi etkenleri hesaba katmıştır [3]-[14]. Bu çalışmalar arasında, Bommer ve Mendis [10] yer hareketi büyüklüğünün B katsayısı üzerindeki etkisinin dikkate değer olduğunu belirtmiştir. Yazarlar, yer hareketi büyüklüğü arttıkça yüksek sönüm oranlarına bağlı olarak spektral yer değiştirmelerde azalma miktarının arttığını vurgulamışlardır. Ayrıca, yazarlar aynı trendin faya uzaklığın artması ile de gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Dolayısıyla, yüksek sönüm oranları için,

spektral ordinatlardaki azalma miktarı, faydan uzaklaştıkça artmaktadır. Bununla birlikte, Bommer ve diğ. [25] deprem kaynağının 10-15 km civarı için sönüm azaltma katsayılarında belirgin bir değişim olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, Bommer ve Mendis [10], yüksek sönüm oranları için, yer hareketi büyüklüğünün ve faya uzaklığın, spektral ordinatları değiştirmede birleşik bir etkiye sahip olduğunun altını çizmişlerdir. Zemin durumu ile ilişkili olarak, Cameron ve Green [8], sismik olarak aktif bölgelerde, zemin koşullarının B katsayısı üzerindeki etkisinin ihmal edilebilecek seviyede düşük olduğunu belirtmişlerdir. Benzer şekilde, Hatzigeorgiou [5] da Amerika Birleşik Devletleri Jeoloji Kurumu'na (USGS) göre B, C ve D olarak sınıflandırılmış bölgelerde kaydedilen yer hareketlerinden elde edilen B değerlerinin zemin tipinden neredeyse hiç etkilenmediğini belirtmişlerdir. Zemin tipinin B katsayısı üzerindeki ihmal edilebilir nitelikteki etkisi, Rezaeian ve diğ. [3] tarafından da rapor edilmiştir. Bu araştırma sonuçlarına dayanarak, yer hareketi büyüklüğünün ve faya olan uzaklığın B katsayısı üzerine etkisinin zemin koşullarına göre daha belirgin olduğu sonucu çıkarılabilir. Rezaeian ve diğ. [3] ve Mollaioli ve diğ.'nin [26] çalışmalarında da belirtildiği üzere zemin koşulunun B katsayısı üzerindeki etkisi ihmal edilebilir.

Yukarıdaki tartışmalar ışığında, bu çalışmada,

- Yer hareketinin büyüklüğü,
- Faya uzaklık ve
- Zemin koşulu kıstaslarında benzer özelliklere sahip yer hareketleri kullanılmıştır.

Burada sunulan çalışmanın ilgi alanının, özellikle yapıları şiddetli depremlerin yıkıcı etkilerinden korumak amacıyla inşa edilen sismik izolasyonlu yapıların tasarımında kullanılan B değerleri olmasından, seçilen yer hareketleri, söz konusu şiddetli deprem özelliklerini taşıyor niteliktedir. Seçilen yer hareketlerinin moment büyüklükleri ( $M_w$ ) 6.5'ten büyük iken, faya en yakın mesafeleri (R) ise 20 km'den azdır. Somerville ve diğ. [27] tarafından yapılan tanımlama gereği yer hareketinin faya en yakın mesafesinin 20 km'den az olması durumunda o hareket yakın-kaynaklı yer hareketi olarak adlandırılmıştır (yer hareketi kayıtlarının atım içermesi şart değildir). Bu doğrultuda belirlenen deprem kayıtları PEER yer hareketi veri tabanından alınmıştır. Seçilen yer hareketi kayıtlarının en üst 30 m'lik zemin profili için ortalama kayma dalgası hızı 180 m/s ile 360 m/s arasında değişmektedir (NEHRP [16] belgesine göre D zemin sınıfı).

Bu çalışmada atıfta bulunulan geçmiş çalışmaların birçoğunda araştırmacılar büyüklük, zemin koşulu ve faya uzaklık gibi çeşitli parametrelere göre grup haline getirdikleri yer hareketleri ile analizler gerçekleştirmişlerdir. Burada sorulması gereken soru şudur: "Özellikle sismik izolasyonlu yapılar söz konusu olduğunda yer hareketlerinin gruplandırılmasında daha farklı parametreler mi kullanılmalı yoksa önceki çalışmalar ile uyumlu bir gruplandırma mı yapılmalıdır?" Bu çalışmanın yazarları, bahsi geçen soruyu cevaplandırabilmek için öncelikle B katsayısının sismik izolatörlü yapıların tasarımında kullanımının anlaşılması gerektiğine inanmaktadır. Sismik izolatörlü yapılar için en önemli tasarım parametrelerinden biri MİD'dir. Şartnamede geçen yöntemler arasında eşdeğer kuvvet yöntemi, izolatör birimlerinin doğrusal olmayan histeretik davranışının eşdeğer doğrusal hale getirilmesine dayanmaktadır. Bu yöntemde B katsayısı, doğrudan elastik tepki spektrumunu modifiye etmek için ve MİD'nin hesabı için kullanılır. Böylece, MİD ile yüksek korelasyona sahip herhangi bir yer hareketi şiddet

parametresi, yer hareketlerinin gruplandırılmasında dikkate alınacak iyi bir aday olacaktır. Bu bağlamda, Avşar ve Özdemir [28] tarafından gerçekleştirilen çalışma burada adres gösterilecektir. Avşar ve Özdemir [28], sismik izolasyonlu bir köprünün doğrusal olmayan zaman tanım alanında tepki analizlerinden elde edilen MİD değerleri ile pek çok yer hareketi şiddet parametresi arasında korelasyonun incelendiği kapsamlı bir çalışma gerçekleştirmiştir. Avşar ve Özdemir [28], çalışmalarında iki grup yer hareketini incelemiştir; birinci grup, atım içermeyen yakın kaynak özelliğine sahip kayıtlardır; ikinci grup ise atım içeren yakın kaynaklı kayıtlardır. Yazarlar, genel olarak kullanılan yer hareketi şiddet parametreleri arasında, Maksimum Yer Hızı (MYH) parametresinin MİD ile en yüksek korelasyonu gösterdiğini belirlemişlerdir. Ayrıca, MYH ve MİD arasındaki korelasyondan nispeten daha yüksek yeni bir şiddet ölçütü önermişlerdir. Ancak, önerilen bu yeni ölçütün, izolatörün özelliklerine (izolatör periyodu ve karakteristik dayanım oranı) duyarlı olduğu vurgusu yapılmıştır. Diğer taraftan, MYH'nın izolatör karakteristiğindeki değişikliklere

hassas olmadığı ve hem atım içeren hem de içermeyen yakın kaynaklı yer hareketleri için MYH'nın incelenen şiddet ölçütleri arasında en yüksek korelasyonu yakaladığını bildirmişlerdir. Yakın kaynaklı yer hareketleri söz konusu olduğunda, doğrusal olmayan sistemlerin davranışını hesaplamada MYH'nın başarısı Yang ve diğ. [29] tarafından da belirlenmiştir. Sonuç olarak, eşdeğer kuvvet yöntemi ile hesap edilen tepki MİD'dır ve sönüm azaltma katsayısı B, bu yöntemde bir girdidir. Diğer şiddet ölçülerinden ziyade MYH'nın B katsayısı cinsinden bir ayırıcı parametre olarak kullanılmasının daha uygun olduğu düşünülmektedir. Bu bilgiler ışığında, seçilen yer hareketleri, maksimum yer hızlarına göre üç gruba ayrılmıştır:

- i. 30cm/s<PGV<50cm/s,
- ii. 50cm/s<PGV<70cm/s, ve
- iii. PGV>70cm/s [28].

Seçilen yer hareketlerinin karakteristikleri Tablo 1-3'te verilmiştir.

Tablo 1: Grup 1, 30 cm/s<MYH<50 cm/s, Mw: Moment büyüklüğü, R: Faya uzaklık, MYİ: Maksimum Yer ivmesi, MYH: Maksimum Yer Hızı, MYD: Maksimum yer değiştirme.

| #  | Deprem             | İstasyon                     | M <sub>w</sub> | R(km) | Bileşen | MYİ(g) | MYH(cm/s) | MYD(cm) |
|----|--------------------|------------------------------|----------------|-------|---------|--------|-----------|---------|
| 1  | Imperial Valley    | Brawley Airport              | 6.5            | 10.4  | 315     | 0.22   | 38.9      | 13.6    |
|    |                    |                              |                |       | 225     | 0.16   | 35.8      | 22.3    |
| 2  | Imperial Valley    | Bonds Corner                 | 6.5            | 2.6   | 230     | 0.77   | 45.9      | 15.0    |
|    |                    |                              |                |       | 140     | 0.59   | 45.2      | 16.7    |
| 3  | Imperial Valley    | El Centro Array #10          | 6.5            | 6.2   | 050     | 0.17   | 47.5      | 31.1    |
|    |                    |                              |                |       | 320     | 0.22   | 41.2      | 18.0    |
| 4  | Loma Prieta        | Gilroy Array #2              | 6.9            | 11.1  | 090     | 0.32   | 39.1      | 12.2    |
|    |                    |                              |                |       | 000     | 0.37   | 32.9      | 7.0     |
| 5  | Loma Prieta        | Gilroy Array #3              | 6.9            | 12.8  | 090     | 0.37   | 44.7      | 19.4    |
|    |                    |                              |                |       | 000     | 0.56   | 35.7      | 8.4     |
| 6  | Northridge         | Canyon Country W Lost Canyon | 6.7            | 12.4  | 270     | 0.48   | 44.9      | 12.6    |
|    |                    |                              |                |       | 000     | 0.41   | 43.0      | 11.8    |
| 7  | Superstition Hills | El Centro Imp Co Center      | 6.5            | 18.2  | 000     | 0.36   | 46.4      | 17.4    |
|    |                    |                              |                |       | 090     | 0.26   | 40.9      | 20.0    |
| 8  | Chi-Chi            | TCU138                       | 7.6            | 9.8   | E       | 0.19   | 41.0      | 36.4    |
|    |                    |                              |                |       | N       | 0.22   | 40.9      | 26.1    |
| 9  | Chi-Chi            | CHY035                       | 7.6            | 12.7  | W       | 0.25   | 45.6      | 12.0    |
|    |                    |                              |                |       | N       | 0.25   | 37.7      | 16.9    |
| 10 | Chi-Chi            | TCU050                       | 7.6            | 9.5   | N       | 0.13   | 42.4      | 52.0    |
|    |                    |                              |                |       | W       | 0.15   | 36.9      | 54.7    |

Tablo 2: Grup 2, 50 cm/s <MYH <70 cm/s, Mw: Moment büyüklüğü, R: faya uzaklık, MYİ: Maksimum Yer İvmesi, MYH: Maksimum Yer Hızı, MYD: Maksimum Yer Değiştirme.

| #  | Deprem          | İstasyon                   | M <sub>w</sub> | R(km) | Bileşen | MYİ(g) | MYH(cm/s) | MYD(cm) |
|----|-----------------|----------------------------|----------------|-------|---------|--------|-----------|---------|
| 1  | Duzce           | Bolu                       | 7.1            | 12.0  | 090     | 0.82   | 62.1      | 13.6    |
| 2  | Imperial Valley | EC Co Center FF            | 6.5            | 7.2   | 000     | 0.73   | 56.4      | 23.1    |
|    |                 |                            |                |       | 092     | 0.23   | 68.8      | 39.6    |
| 3  | Imperial Valley | El Centro Array #8         | 6.5            | 3.9   | 002     | 0.21   | 37.5      | 15.9    |
|    |                 |                            |                |       | 140     | 0.60   | 54.2      | 32.2    |
| 4  | Kocaeli         | Duzce                      | 7.5            | 15.4  | 230     | 0.45   | 49.2      | 35.3    |
|    |                 |                            |                |       | 180     | 0.31   | 58.9      | 44.2    |
| 5  | Kocaeli         | Yarimca                    | 7.5            | 4.8   | 270     | 0.36   | 46.4      | 17.6    |
|    |                 |                            |                |       | 060     | 0.27   | 65.7      | 57.2    |
| 6  | Northridge      | Canoga Park Topanga Canyon | 6.7            | 14.7  | 330     | 0.35   | 62.2      | 51.1    |
|    |                 |                            |                |       | 196     | 0.42   | 60.7      | 20.2    |
| 7  | Northridge      | Saticoy                    | 6.7            | 12.1  | 106     | 0.36   | 32.1      | 9.1     |
|    |                 |                            |                |       | 180     | 0.48   | 61.5      | 22.1    |
| 8  | Chi-Chi         | CHY024                     | 7.6            | 9.6   | 090     | 0.37   | 28.9      | 8.4     |
|    |                 |                            |                |       | W       | 0.28   | 52.9      | 43.6    |
| 9  | Chi-Chi         | TCU101                     | 7.6            | 2.1   | N       | 0.18   | 49.0      | 31.1    |
|    |                 |                            |                |       | W       | 0.20   | 67.9      | 75.5    |
| 10 | Chi-Chi         | TCU109                     | 7.6            | 13.1  | N       | 0.25   | 49.4      | 35.1    |
|    |                 |                            |                |       | W       | 0.16   | 53.1      | 34.8    |
|    |                 |                            |                |       | W       | 0.16   | 50.8      | 46.5    |

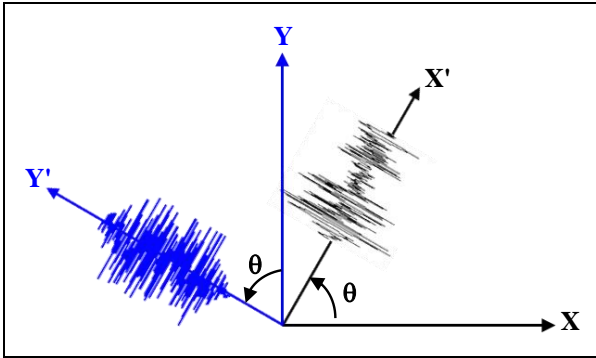
Tablo 3: Grup 3, MYH> 70 cm/s,  $M_w$ : Moment büyüklüğü, R: faya uzaklık, MYİ: Maksimum yer ivmesi, MYH: Maksimum yer hızı, MYD: Maksimum Yer değiştirme.

| #  | Deprem          | İstasyon           | $M_w$ | R(km) | Bileşen | MYİ(g) | MYH(cm/s) | MYD(cm) |
|----|-----------------|--------------------|-------|-------|---------|--------|-----------|---------|
| 1  | Duzce           | Duzce              | 7.1   | 6.6   | 270     | 0.54   | 83.5      | 51.8    |
|    |                 |                    |       |       | 180     | 0.35   | 60.0      | 41.8    |
| 2  | Erzincan        | Erzincan           | 6.7   | 4.4   | NS      | 0.52   | 84.0      | 27.7    |
|    |                 |                    |       |       | EW      | 0.50   | 64.3      | 21.9    |
| 3  | Imperial Valley | El Centro Array #4 | 6.5   | 7.1   | 230     | 0.36   | 76.5      | 58.9    |
|    |                 |                    |       |       | 140     | 0.49   | 37.4      | 19.7    |
| 4  | Imperial Valley | El Centro Array #5 | 6.5   | 4.0   | 230     | 0.38   | 90.5      | 63.0    |
|    |                 |                    |       |       | 140     | 0.52   | 46.9      | 35.3    |
| 5  | Northridge      | Newhall            | 6.7   | 9.4   | 360     | 0.59   | 96.9      | 38.4    |
|    |                 |                    |       |       | 090     | 0.58   | 74.9      | 18.0    |
| 6  | Kobe            | KJM                | 6.9   | 1.0   | 090     | 0.60   | 74.4      | 20.0    |
|    |                 |                    |       |       | 360     | 0.84   | 129.6     | 32.7    |
| 7  | Northridge      | Sylmar Hospital    | 6.7   | 5.3   | 360     | 0.84   | 129.6     | 32.7    |
|    |                 |                    |       |       | 090     | 0.60   | 78.2      | 16.0    |
| 8  | Chi-Chi         | CHY028             | 7.6   | 3.1   | W       | 0.65   | 72.8      | 14.7    |
|    |                 |                    |       |       | N       | 0.82   | 67.0      | 23.3    |
| 9  | Chi-Chi         | TCU102             | 7.6   | 1.5   | W       | 0.30   | 112.5     | 89.2    |
|    |                 |                    |       |       | N       | 0.17   | 77.2      | 44.9    |
| 10 | Kobe            | Takatori           | 6.9   | 1.5   | 000     | 0.61   | 127.2     | 35.8    |
|    |                 |                    |       |       | 090     | 0.62   | 120.7     | 32.7    |

### 3 Yer hareketlerinin döndürülmesi

Sönüm azaltma katsayısı B'deki değişimi yer hareketi yönünün bir fonksiyonu olarak belirlemek amacıyla, seçilen yer hareketlerine ait orijinal kayıtların birbirine dik yatay bileşenleri Şekil 1'de görüldüğü biçimde,  $10^\circ$ 'lik artımlarla döndürülmüştür. Bu döndürme işleminin matematiksel ifadesi Denklem (4)'te verilmiştir. Denklem (4)'te [19] yer alan  $a_x(t)$  ve  $a_y(t)$ , orijinal kayıtlara ait birbirine dik yatay ivme değerleri,  $a_{x'}(t)$  ve  $a_{y'}(t)$  ise döndürülmüş kayıtlara ait birbirine dik yatay ivme değerleridir.

$$\begin{Bmatrix} a_{x'}(t) \\ a_{y'}(t) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_x(t) \\ a_y(t) \end{Bmatrix} \quad (4)$$



Şekil 1: Yer hareketi kayıtlarının döndürülmesi.

Döndürülmüş yer hareketi bileşenlerinin tepki spektrumları, her bir etkiye açısı için, farklı sönüm oranları gözetilerek hesaplanmıştır. Tüm yer hareketlerinin döndürme işlemi tamamlandıktan sonra yönlerin her biri için bir B katsayısı hesaplanmıştır. Daha sonra tek bir kaydın farklı yer hareketi yönleri için hesaplanan B değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak ortalama bir B değeri tespit edilmiştir.

### 4 Araştırmanın önemi

Sönüm azaltma katsayısı B'deki değişimi yer hareketi yönünün bir fonksiyonu olarak belirlemek için, Tablo 1'de verilen ve El

Centro Array#10 numaralı istasyondan elde edilen kayıt, detaylı bir şekilde çalışılmıştır. Bu kaydın birbirine dik iki yatay bileşeni için,  $180^\circ$ 'ye kadar,  $10^\circ$ 'lik artımlarla döndürülmüş ivme değerleri elde edilmiştir. Bu işlem için Denklem (4)'ten yararlanılmıştır. Daha sonra, her bir döndürülmüş ivme kaydı için %5, %10, %20 ve %30 sönüm oranlarına göre elastik tepki spektrumları elde edilmiş ve bu sönüm oranları için B değerleri hesaplanmıştır.

Şekil 2'de, yer hareketi yönünün değişmesi ile sönüm azaltma katsayılarında meydana gelen değişiklik, farklı sönüm oranları için verilmiştir. Şekil 2'de verilen gri çizgiler, farklı 18 açısı ( $10^\circ$ - $180^\circ$ ) dikkate alınarak Denklem (4)'e göre döndürülmüş yer hareketine ait tepki spektrumlarının hesabından sonra, Denklem (1)'e göre bulunmuş B değerlerine karşılık gelmektedir. Şekil 2'deki siyah çizgi, her bir açı için hesaplanmış B değerlerinin ortalama değerine karşılık gelmektedir. Yer hareketi ivme kayıtlarının orijinal yatay bileşenlerinin  $10^\circ$ 'den  $180^\circ$ 'ye kadar döndürülmesi işlemi sonucunda orijinal kaydın X ve Y bileşenleri yer değiştirmiş olur. Örneğin döndürme açısı  $\theta=90^\circ$  olduğunda, kaydın orijinal X bileşeni, aynı kaydın Y bileşeninin yerini almaktadır (Şekil 1). Bu nedenle orijinal kayıtların "kuvvetli" bileşenleri ile dönmüş durumları göz önünde bulundurulduğunda hesap edilen B değerleri aynı zamanda "zayıf" bileşenleri de kapsayacaktır. Burada bahsi geçen "kuvvetli" ifadesi, yer hareketi kaydının daha yüksek MYH'na sahip yatay bileşenini tanımlamak için kullanılmıştır. MYİ, maksimum yer ivmesine, MYD, maksimum yer değiştirmeye karşılık gelmektedir. Sonuç olarak Şekil 2'deki gri çizgiler, Imperial Valley Depreminin, El Centro Array #10 istasyonundan elde edilen ivme kaydının, yatay bileşenlerinin döndürülmüş değerleri için hesaplanmıştır. Şekil 2, sönüm azaltma katsayısının yer hareketi yönüne bağlı olarak değiştiğini açık bir biçimde ortaya koymaktadır. Sönüm azaltma katsayısı B'deki değişim miktarını göstermek amacıyla, orijinal ve döndürülmüş kayıtlar kullanılarak Şekil 3 oluşturulmuştur. Şekil 3'teki siyah kalın çizgi, Şekil 2'de gösterilen ortalama B değerlerini göstermektedir ve bu değerler, Imperial Valley depremi, El Centro Array #10 istasyonundan elde edilen orijinal ivme kaydının her iki yatay bileşeni için hesaplanan B değerleri ile karşılaştırılmıştır.



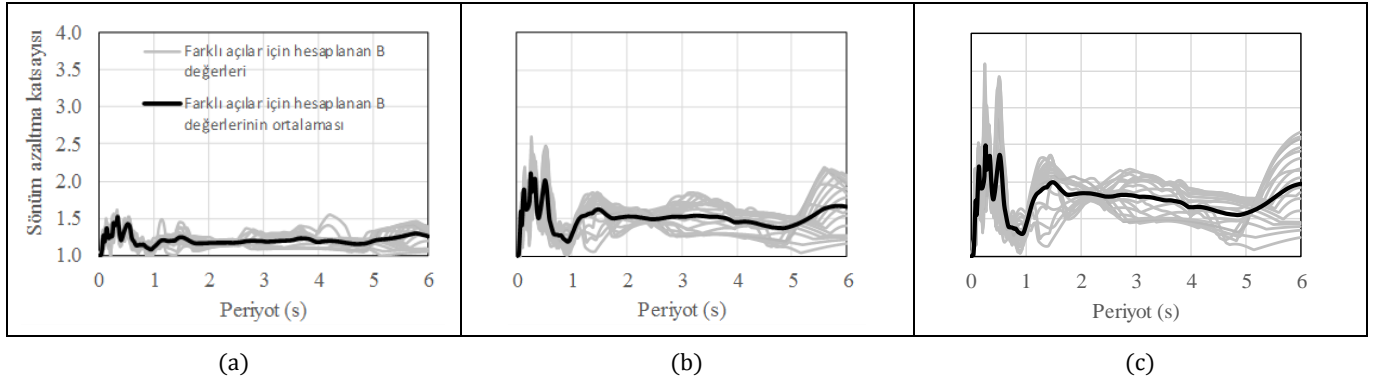
Orijinal deprem kaydının birbirine dik yatay bileşenleri için ayrı ayrı hesaplanan B değerlerinin (Şekil 3), döndürülmüş kayıtlardan elde edilen ortalama B değerlerinden farklı olduğu açıkça görülmektedir. Bu fark, sönüm oranına ve periyot değerine göre değişim göstermektedir. Ayrıca, B katsayısının yer hareketi yönüne duyarlılığı, sönüm oranıyla birlikte artış göstermektedir (Şekil 3). Şekil 2 ve 3 şunu göstermektedir; orijinal yer hareketlerinin "kuvvetli" ve "zayıf" bileşenleri kullanılarak hesaplanan B değeri, döndürülmüş ivme kayıtlarından elde edilen ortalama B değerlerine göre daha farklıdır. Bu farkın seviyesi sönüm oranına ve periyoda göre değişmektedir. Şekil 2 ve 3 göz önüne alındığında, bu değişimin ölçüsünün farklı yer hareketi yönleri için hesaplanması gerekliliği ortaya çıkar. Bu sebeple, ortalama değerlere dayanarak yer hareketi yönünün etkisini dikkate alan ve bir yer kaydı için sönüm azaltma katsayısını hesaplayan basit bir yöntem önerilecektir.

### 5 Yer hareketi yönünün B katsayısı hesabına etkisini incelemek için detaylı araştırma

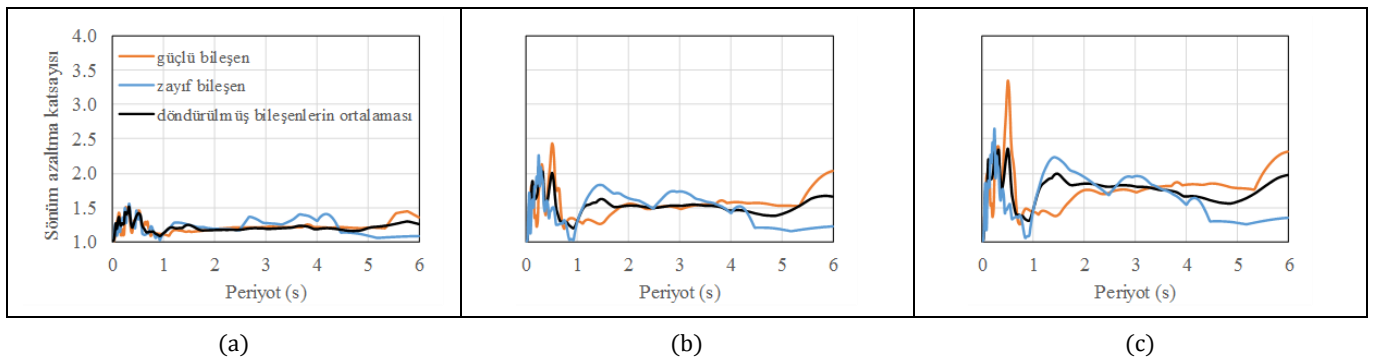
Bu bölümde, bir önceki bölümde anlatılan ve yer hareketi ivme kayıtlarının döndürülmesinde kullanılan yöntem Tablo 1-3'te verilen ivme kayıtlarının birbirine dik yatay bileşenlerinin tamamına uygulanmıştır. Bu bağlamda, 180°'ye kadar 10'ar derecelik artımlarla döndürülen her bir ivme kaydı için B değerleri hesaplanmış ve Şekil 2'de örnek olarak gösterildiği

gibi ortalama değerleri bulunmuştur. Her bir yer hareketi için ortalama B değerleri elde edildikten sonra, bu B değerlerinin de ortalaması alındığında, söz konusu deprem grubu için yer hareketi yönüne bağlı ortalama bir B değeri elde edilmiş olur [11]. Şekil 4'te tüm yer hareketleri için farklı sönüm oranlarında hesaplanan ortalama B değerleri gösterilmektedir. Ayrıca farklı yönler için hesaplanan B değerleri için maksimum ve minimum değerler de Şekil 4'te sunulmuştur.

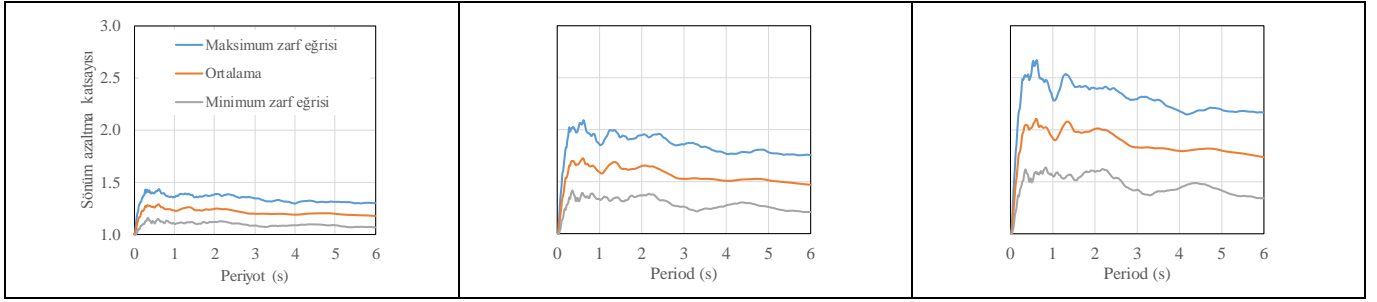
Şekil 4'te, turuncu çizgiyle gösterilen ortalama B değerleri göz önünde bulundurulduğunda şu sonuca ulaşılmıştır; yer hareketi yönünün ortalama B değerleri üzerindeki etkisi, periyodun bir fonksiyonu olarak üç kategoriye ayrılabilir. Şekil 4'te de görüldüğü üzere  $0.2 \text{ s} < \text{periyot} < 2.0 \text{ s}$  ve  $3.0 \text{ s} < \text{periyot} < 6.0 \text{ s}$  aralığında, ortalama B değerleri, periyottaki değişime neredeyse duyarlı değildir. Ancak,  $2.0 \text{ s} < \text{periyot} < 3.0 \text{ s}$  aralığında ortalama B değerlerinde kademeli bir düşüş gözlenmektedir. Sismik izolasyonlu yapıların genelde bu periyot aralığında olduğu göz önünde bulundurulursa, yer hareketi yönünün B üzerindeki etkisi, özellikle sismik izolasyonlu yapılar için önem arz etmektedir. Buna ek olarak, bahsedilen kademeli düşüş, yüksek sönüm oranlarında, periyodun 2.0 ve 3.0 s arasında olduğu değerler için daha da keskin hale gelmektedir. Tablo 1-3'teki yer hareketi kayıtları için, yer hareketi yönüne bağlı olarak, MYH'nın B değerindeki değişime etkisini incelemek amacıyla, Şekil 4'e benzer şekilde, Şekil 5 oluşturulmuştur.



Şekil 2: Imperial Valley depreminin El Centro Array #10 istasyonundan elde edilen ivme bileşenlerinin döndürülmüş değerleri için, sönüm azaltma katsayısı B'deki değişim; (a): %10, (b): %20 ve (c): %30 sönüm oranları için.



Şekil 3: Imperial Valley depreminin El Centro Array #10 istasyonuna ait orijinal deprem kaydının birbirine dik yatay bileşenleri için ayrı ayrı hesaplanan B değerleri ile döndürülmüş kayıtlardan elde edilen ortalama B değerlerinin karşılaştırılması; (a): %10, (b): %20 ve (c): %30 sönüm oranları için.

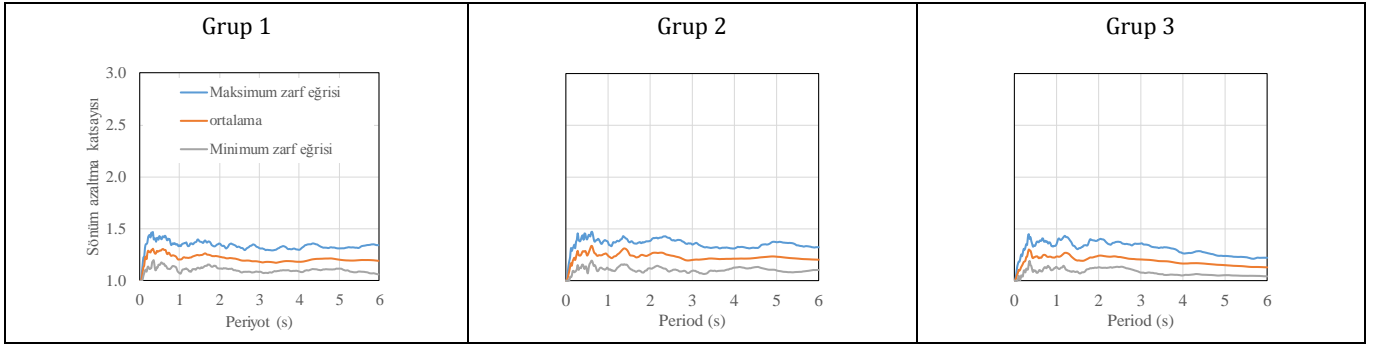


(a): %10.

(b): %20.

(c): %30.

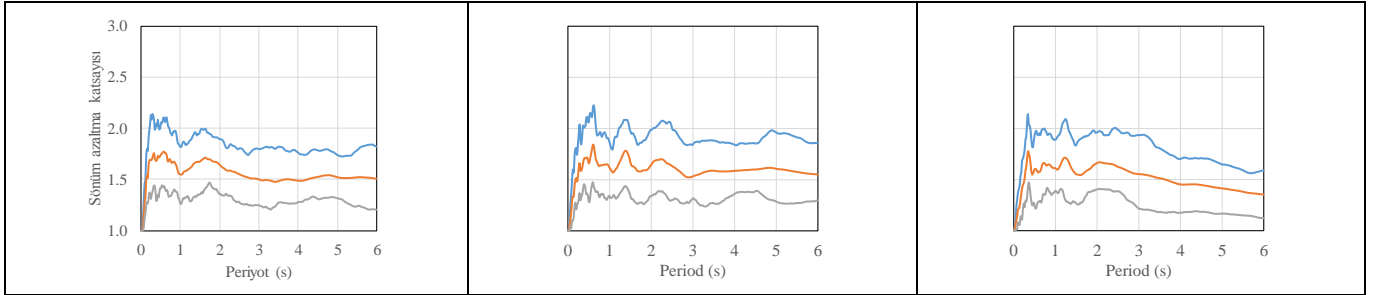
Şekil 4(a): %10, (b): %20 ve (c): %30 sönüm oranları dikkate alınarak hesaplanan B katsayısının yer hareketi yönüne göre değişimi.



(a): Sönüm oranı %10.

(d): Sönüm oranı %10.

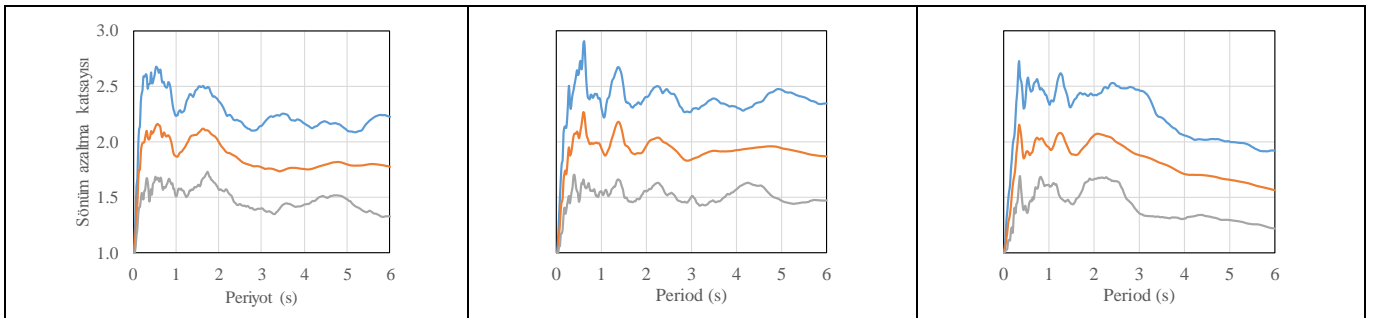
(g): Sönüm oranı %10.



(b): sönüm oranı %20.

(e): sönüm oranı %20.

(h): sönüm oranı %20.



(c): Sönüm oranı %30.

(f): Sönüm oranı %30.

(i): Sönüm oranı %30.

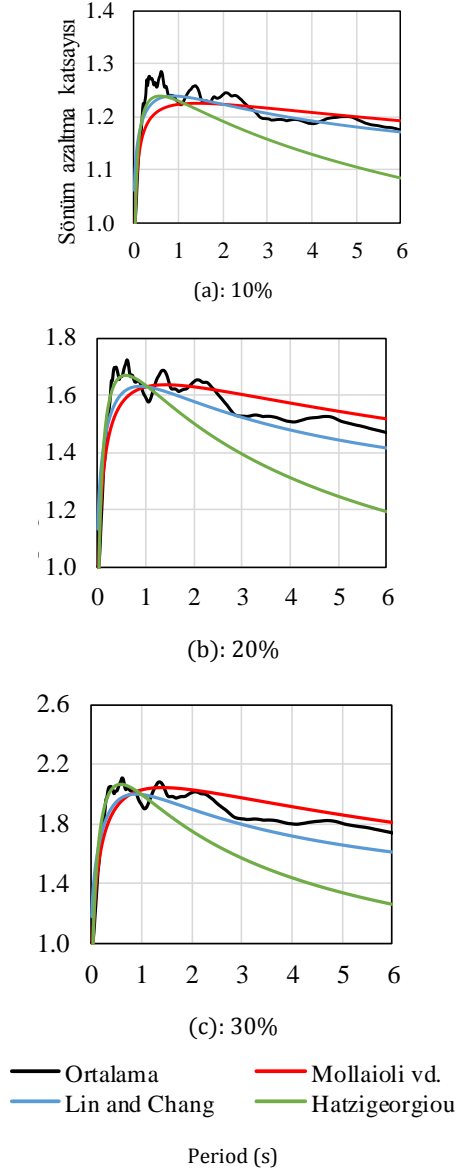
Şekil 5(a): Yer hareketi yönüne bağlı olarak farklı sönüm oranları için maksimum yer hızının B değerindeki değişime etkisi.

Şekil 5(a)-(f), 3.0 s'den büyük periyotlar için ortalama B değerlerinin neredeyse aynı olduğunu ve periyottaki değişime duyarlı olmadığını göstermektedir. 0.2 s ile 2.0 s aralığında, ortalama B değerleri için periyoda bağlı küçük değişimler tespit edilse de ortalama B değeri sabit bir sayıya indirgenebilir. Tüm kayıtların tek bir grup olarak değerlendirildiği duruma benzer şekilde (Şekil 4), ortalama B değerleri, 2.0 s ve 3.0 s arasında kademeli bir şekilde azalmaktadır. Ancak, Şekil 5.g-i, ortalama

B değerlerinin 2.0 s'den itibaren artan periyot değeri ile hızla düştüğünü göstermektedir. Bu grafikler MYH'nın 70 cm/s'den büyük olduğu yer hareketleri için elde edildiğinden, B değerlerinin periyoda bağlı değişiminin özellikle yüksek MYH değerine sahip yer hareketi kayıtları için daha belirgin olduğu görülmektedir.

## 6 B katsayısının hesabı için mevcut yöntemlerin değerlendirilmesi

Bu bölümde, yer hareketlerinin farklı yönleri için elde edilmiş B değerlerinin ortalaması kullanılarak hesaplanan ortalama B değerleri baz alınarak mevcut yöntemlerin doğruluğu incelenecektir. Bu amaç doğrultusunda %10, %20 ve %30 sönüm oranları için hesaplanan ortalama B değerleri kullanılacaktır. Karşılaştırmalarda kullanılan ampirik denklemler ilerleyen paragraflarda tartışılmış ve karşılaştırma sonuçları Şekil 6'da sunulmuştur.



Şekil 6: Yer kayıtlarının farklı yönleri dikkate alınarak farklı sönüm oranları için elde edilen ortalama B değerleri ile mevcut yöntemlerin karşılaştırılması.

### 6.1 Mollaioli ve diğ. 2014

Mollaioli ve diğ. [26], çalışmalarında, regresyon analizine dayanan ve aşağıda verilen Denklem (5)'i önermişlerdir. Regresyon parametreleri, atım periyodunun bir fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. Önerilen yöntemin NEHRP'e göre B, C ve D tipi zeminler, büyüklüğü 5.0 ve 7.6 arasında olan depremler,

atım periyodu 0.4 s ve 9 s arasında olan kayıtlar ve yapısal periyodu 8 sn.'ye kadar olan yapılar için kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Denklem (5)'de yer alan a, b, c, d, e ve f sabitleri, atım periyoduna bağlı olarak farklılaşan katsayılar;  $\xi$ , sönüm oranıdır; T, yapının doğal periyodudur.  $\gamma$ , sönüm oranı %5'ten büyük değerler için 1 alınır. Karşılaştırmalarda atım periyodu  $3s \leq T_p < 4s$  için geçerli olan sabitler kullanılmıştır; çünkü atım periyodu ve moment büyüklüğü ( $M_w$ ) arasındaki ilişki Mollaioli ve diğ. [26] tarafından  $L_n(T_p) = -5.52 + 0.958M_w$  ifadesi ile verilmiştir. Bu ifadeye göre büyüklüğü 7 olan bir depremin yer kaydı için (Tablo 1-3'te verildiği şekilde büyüklüğü 6.5 ve 7.5 arasında olan depremlere ait yer hareketlerini temsilen) atım periyodu 3.27 s olarak hesaplanır.

$$DMF = 1 - (5 - \xi)[1 + a \ln(\xi) + b \ln(\xi)^2][c + d \ln(T) + e(\ln(T))^2][1 - \gamma(1 - f \cdot T^{-0.15})] \quad (5)$$

### 6.2 Hubbard ve Mavroeidis, 2011

Hubbard and Mavroeidis [4] tarafından sönüm azaltma katsayısını hesaplamak için geliştirilen yöntem de Denklem (6)'da verildiği şekilde atım periyodunun bir fonksiyonudur. Bu denklemde  $\beta$ , sönüm oranı; T, yapının doğal periyodu;  $T_p$  ise atım periyodudur.

$$B = 3.4 \frac{\beta^{1.3}}{(T/T_p)^{1.3}} + 1 \quad 0.10 \leq \beta \leq 0.50 \quad (6)$$

Ancak bu denklem, Mollaioli ve diğ.'nin [26] önerisinden farklı olarak sönüm oranına, doğal periyoda ve atım periyoduna bağlı sürekli bir fonksiyondur. Yazarlar, ayrıca önerdikleri yöntemin tüm deprem büyüklükleri için kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Mavroeidis [30] bu konuyla ilgili başka bir makalesinde, Hubbard ve Mavroeidis [4] ve Mollaioli ve diğ. [26] tarafından kullanılan denklemlerin aslında birbirinden farklı olmadığını ve her iki metottan da aynı B değerlerinin üretildiğini göstermiştir.

### 6.3 Hatzigeorgiou, 2010

Hatzigeorgiou [5], çalışmasında, sönüm azaltma katsayılarının hesabı için, sönüm oranının, yapının doğal periyodunun, zemin ve yer hareketi tipinin etkilerinin göz önüne alındığı ampirik ifadeler öne sürmüştür. Hatzigeorgiou [5] tarafından önerilen bu ifadeler Denklem (7)'de verilmiştir.

$$DMF = 1 + (\xi - 5)[1 + c_1 \ln(\xi) + c_2 (\ln(\xi))^2] \cdot [c_3 + c_4 \ln(T) + c_5 (\ln(T))^2] \quad (7)$$

Bu denklemde  $\xi$ , sönüm oranı; T, yapının doğal periyodu,  $c_1$ , zemin ve yer hareketi tipinin fonksiyonu olarak ifade edilen bir sabittir.

### 6.4 Lin and Chang, 2004

Lin ve Chang [9], sönüm azaltma katsayılarını, zemin sınıflandırmasının etkisini dikkate alarak incelemişlerdir. Yazarlar, aşağıda verilen Denklem (8)'i önermişlerdir:

$$B = 1 - \frac{aT^b}{(T+1)^c} \quad (8)$$

Bu denklemde a, b ve c katsayıları, zemin sınıfına bağlı sabitlerdir. T, yapının doğal periyodudur. Şekil 6'da farklı yöntemler için yapılan karşılaştırmalarda, Lin ve Chang [9] tarafından zemin sınıfı D için önerilen sabitler kullanılmıştır.

Şekil 6'da gösterilen siyah kalın çizgi, döndürülmüş yer hareketlerinden elde edilen ortalama B değerlerinin ortalamasıdır  $((B_d)_{ort})_{ort}$ .  $(B_d)_{ort}$ , bir yer hareketi kaydına ait ortalama B değerini verirken,  $((B_d)_{ort})_{ort}$ , Tablo 1-3'te verilen yer hareketi kayıtlarının hepsi için ayrı ayrı hesaplanmış B değerlerinin ortalamasıdır. Şekil 6, Hatzigeorgiou'nun [5] B değerlerinin hesabı için önerdiği yöntemin, doğal periyodu 1.0 sn.'nin altında olan yapılarda, tatmin edici olduğunu göstermektedir. Ayrıca, bu periyot aralığı için, Hatzigeorgiou'nun [5]  $((B_d)_{ort})_{ort}$  değerlerini tahmin etmekteki başarısı, sönüm oranı arttıkça artmaktadır. Hatzigeorgiou'nun [5] B katsayısı için hesap yöntemi, 1.0 sn.'den büyük periyot değerleri için, dikkate alınan tüm sönüm oranlarında  $((B_d)_{ort})_{ort}$  değerleri ile kıyaslandığında başarısız sonuçlar vermektedir. Diğer taraftan, periyodun 1.0 sn.'den büyük olduğu durumlarda, Mollaioli ve diğ.'nin [26] (veya Hubbard and Mavroeidis'in, [4]) ve Lin ve Chang'ın [9] önerdikleri B değerleri Hatzigeorgiou'nun yönteminden elde edilen değerlerden daha başarılı tahminlerde bulunmaktadır. %10 sönüm oranı için, Mollaioli ve diğ. [26] ve Lin ve Chang [9] hem birbirine çok yakın B değerleri üretmekte hem de bu değerler  $((B_d)_{ort})_{ort}$  değerleri ile de oldukça uyumludur. Ancak %20 ve %30 sönüm oranları ve periyodun 1.0 s'den büyük olduğu durumlar için hesaplanan B değerleri birbirinden farklılaşmaktadır. Özellikle periyodun 1.0 s'den büyük olduğu durumlarda, Lin ve Chang [9] ile Mollaioli'nin [26] denklemleri,  $((B_d)_{ort})_{ort}$  değerlerinin değişim gösterdiği bir zarf aralığının alt ve üst sınırlarını belirlemek amacıyla kullanılabilir niteliktedir (Şekil 6). %20 ve %30 sönüm oranları için bu durum daha da belirgindir. Mollaioli ve diğ. [26] tarafından kullanılan hesaplama yöntemi sadece atım içeren yakın kaynaklı deprem kayıtları için geliştirilmişken, Lin ve Chang'ın [9] geliştirdiği hesaplama yöntemi, sunulan bu çalışmaya benzer şekilde, hem atım içeren hem de içermeyen yakın kaynaklı yer hareketleri için önerilmiştir.

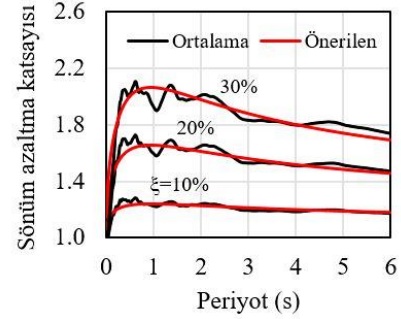
## 7 B katsayısının hesabı için önerilen ampirik formülasyon

Bu kısma kadar yapılan tartışmalar, mevcut yöntemlerin, yer hareketi yönünün  $((B_d)_{ort})_{ort}$  değeri üzerine etkisini yansıtmada sınırlı durumlarda (düşük sönüm oranı ve düşük periyotlar) başarılı olduğunu göstermiştir. Bu sebeple, özellikle büyük periyot değerleri ve sönüm oranları için, yer hareketi yönünün  $((B_d)_{ort})_{ort}$  değeri üzerine etkisini hesaba katan yeni bir metodoloji geliştirmeye ihtiyaç vardır. Bu bölümde, B değerinin hesabında, yer hareketi yönünün etkisini dikkate alan yeni bir yöntem anlatılmaktadır. Bu yöntem, orijinal yer hareketi kaydının muhtemel tüm yönleri için ortalama bir B değeri,  $((B_d)_{ort})_{ort}$ , tahmin etmeyi hedeflemektedir. Bir önceki bölümde yapılan incelemelerde Lin and Chang [9] tarafından geliştirilen hesaplama yönteminin hem bu çalışmada seçilen depremler ile benzer özelliklerde olması hem de daha basit olması nedeniyle, geliştirilecek yeni hesaplama yöntemi benzer yapıda olacak şekilde seçilmiştir. Hataların karesinin minimize edildiği doğrusal olmayan regresyon analizinin sonucuna dayanarak Denklem (8)'de yer alan a, b ve c regresyon katsayıları, Tablo 4'te modifiye edilmiştir. Burada önerilen yöntemin,  $((B_d)_{ort})_{ort}$  değerini tahmin etmedeki başarısı Şekil 7'de sunulmuştur.

Tablo 4: Denklem (8)'in modifiye edilmiş regresyon katsayıları.

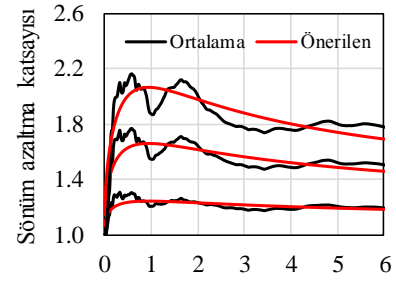
| a                   | b    | c    |
|---------------------|------|------|
| $1.31+0.44\ln(\xi)$ | 0.29 | 0.60 |

Şekil 7 göstermiştir ki burada önerilen ve Tablo 4'te verilen değerler kullanılarak Denklem (8) yardımıyla hesaplanan B değerleri, göz önüne alınan sönüm oranları için  $((B_d)_{ort})_{ort}$  değerlerini tahmin etmekte oldukça başarılı olmuştur.

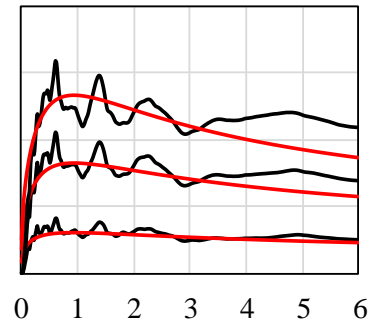


Şekil 7: Farklı sönüm oranları için hesaplanan  $((B_d)_{ort})_{ort}$  değerleri ile Denklem (8) ve Tablo 4 kullanılarak elde edilen B değerlerinin karşılaştırılması.

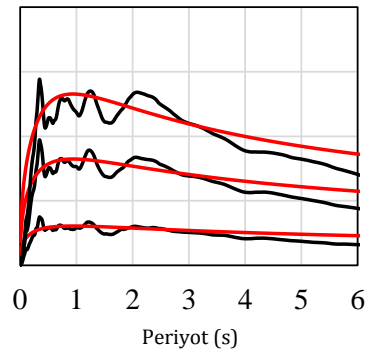
Grup 1



Grup 2



Grup 3



Şekil 8: Önerilen denklemden elde edilen B değerleri ile  $((B_d)_{ort})_{ort}$  değerlerinin farklı yer hareketi grupları için karşılaştırılması.

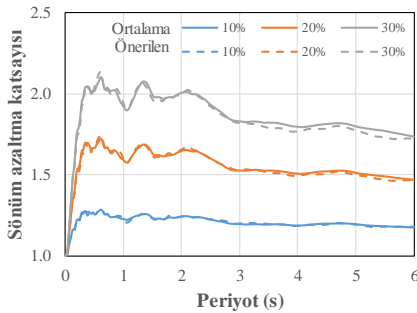


Önerilen yöntemin performansının MYH baz alınarak gruplandırılan yer hareketleri özelinde değerlendirilmesi için hazırlanan grafikler ise Şekil 8'de gösterilmiştir. Şekil 8, bu çalışmada önerilen yöntem kullanılarak elde edilen B değerlerinin, yer hareketi grubuna bakılmaksızın ve %10 sönüm oranı için,  $((B_d)_{ort})_{ort}$  değerlerine yakın sonuçlar verdiğini göstermektedir. Ancak bu yakınlık, sönüm oranı ve MYH değeri arttıkça azalmaktadır. Bu izlenim, periyot değerleri yükseldikçe daha da bariz hale gelmektedir.

## 8 B katsayısının hesabı için önerilen farklı bir yöntem

Bir önceki bölümde, döndürülmüş yer hareketleri için ortalama bir B değeri elde etmek için geliştirilen ampirik denklem anlatılmış ve bu yöntemin doğruluğu karşılaştırmalı bir biçimde tartışılmıştır. Şekil 7 ve 8'den de görülebildiği gibi, bu çalışma kapsamında önerilen yöntem her ne kadar literatürdeki mevcut yöntemlere kıyasla daha başarılı sonuçlar verse de, benzer bir biçimde B katsayısındaki periyoda bağlı ani değişimleri yakalayamamaktadır. B katsayısının hesabında ele alınan bu yaklaşım, yakın-kaynaklı kayıtların özel karakteristiğini yansıtmada eksiklik gösterebilir. Bu amaçla, bu bölüm,  $((B_d)_{ort})_{ort}$  değerini söz konusu ani değişiklikleri de yansıtabilecek bir şekilde hesaplamak için alternatif bir yöntem geliştirmeye ayrılmıştır. Burada önerilen yöntem, yer hareketlerinin her iki yatay ivme bileşenlerine ait tepki spektrumlarının geometrik ortalamalarının hesabına dayanır. Bu yöntemde, öncelikle bir yer hareketine ait her iki yatay doğrultudaki bileşenlerin ivme kayıtları için tepki spektrumları ayrı ayrı hesaplanır. Daha sonra, bu iki tepki spektrumunun geometrik ortalamaları hesaplanır ve hesaplanan tepki spektrumu o yer hareketinin tepki spektrumu olarak kabul edilir. Bu işlem farklı sönüm oranları için tekrarlanırsa, elde edilen geometrik ortalama spektrum değerleri Denklem (1) yardımı ile %5 sönüm oranından büyük sönüm değerleri için B katsayısının hesaplanmasına olanak sağlayacaktır.

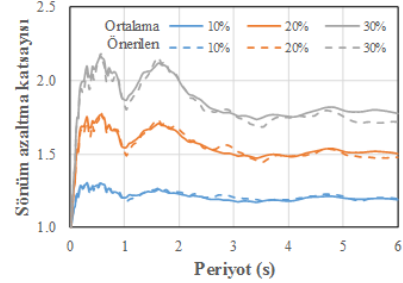
Bu analitik yöntemin Tablo 1-3'te verilen tüm yer hareketi kayıtları için  $((B_d)_{ort})_{ort}$  değerinin hesabındaki başarısını göstermek amacıyla Şekil 9 sunulmuştur. Şekil 9'da,  $((B_d)_{ort})_{ort}$  değerleri ile  $((B_{Geo})_{ort})_{ort}$  değerleri karşılaştırılmıştır. Şekil 9, önerilen analitik yöntemin,  $((B_d)_{ort})_{ort}$  değerlerinin hesabında, periyoda ve sönüm oranına bakılmaksızın oldukça etkili olduğunu göstermektedir.



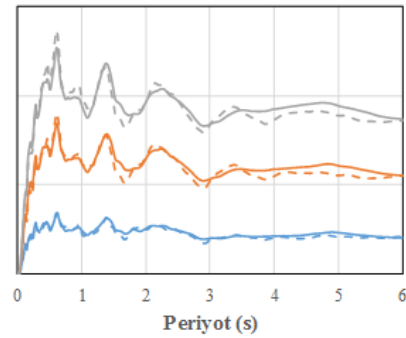
Şekil 9: Seçilen tüm yer hareketlerinin farklı yönleri için, önerilen analitik yöntemden elde edilen  $((B_{Geo})_{ort})_{ort}$  değerleri ile  $((B_d)_{ort})_{ort}$  değerlerinin karşılaştırılması.

Aynı karşılaştırma, Şekil 10'da, MYH'nin etkisini ölçebilmek amacıyla her bir yer hareketi grubu için ayrı ayrı yapılmıştır. Şekil 10 da göstermiştir ki önerilen analitik yöntem ile hesaplanan  $((B_{Geo})_{ort})_{ort}$  değerleri  $((B_d)_{ort})_{ort}$  değerleri ile hemen hemen aynıdır. Şekil 10'da, 3 s'den büyük periyot değerleri için, her ne

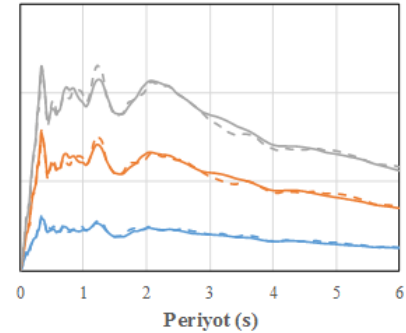
kadar kesikli ve sürekli çizgiler arasında hafif bir farklılaşma bulunsa da (fark, sönüm oranı arttıkça artma eğilimi göstermektedir) bu farklılaşma ihmal edilebilir düzeydedir. Daha da önemlisi, bu bölümde önerilen analitik yöntemin hesaplardaki başarısı sönüm oranına ve periyoda bağlı değildir.



(a) Grup 1



(b) Grup 2



(c) Grup 3

Şekil 10: Yer hareketlerinin farklı yönleri için, önerilen analitik yöntemden elde edilen  $((B_{Geo})_{ort})_{ort}$  değerleri ile  $((B_d)_{ort})_{ort}$  değerlerinin karşılaştırılması.

## 9 Önerilen analitik yöntemin sınırları

B, sönüm azaltma katsayısının kullanımı, yapıların tasarım şartnamelerinde, sönüm oranının %5'ten büyük olduğu belirli bir periyot tanım kümesi için teşvik edilmiştir. Örneğin Eurocede8 [31] tarafından önerilen B değerleri 0.2 s ile 6 s. arasındaki periyot değerlerini kapsamaktadır. Diğer yandan Faccioli ve diğ. [32], Eurocode'da [31] önerilen B değerlerinin 7 sn. periyot değerine kadar uygulanabileceğini belirtmişlerdir. Bommer ve Mendis [10], Cameron ve Green [8] ve Rezaeian ve diğ. [3] bu periyot aralığının 10 s'ye kadarki periyotları da kapsadığını belirtmişlerdir. Ayrıca, Wu ve Hanson [33], Hatzigeorgiou ve diğ. [5], Cameron ve Green [8] ve Hubbard ve Mavroeidis [4], çalışmalarında, sönüm azaltma katsayısına bağlı olarak %30'dan (sismik izolasyonlu yapıların

basitleştirilmiş analizlerinde kullanımına izin verilen maksimum sönüm oranı) büyük sönüm oranlarını dahil etmişlerdir. Bu bağlamda, önerilen analitik yöntemin yüksek sönüm oranlarında ve uzun periyot değerleri için de etkin olup olmadığını görebilmek için Şekil 11 sunulmuştur.

Şekil 11 kullanılarak önerilen analitik yöntemin başarısını 10 sn. periyot değerleri ve %50 sönüm oranları için bile değerlendirmek mümkündür. Şekil 11, Bölüm 8’de tarif edilen analitik yöntem ile hesaplanan  $((B_{Geo})_{ort})_{ort}$  değerlerinin  $(B_d)_{ort})_{ort}$  değerlerini kestirmede yüksek bir başarıya sahip olduğunu göstermektedir. Bu gözlem, hem tüm yer hareketi verisi için (MYH’na göre gruplandırılmamış olan) (Şekil 11(a)), hem de MYH’na göre ayrı ayrı gruplandırılmış olan (Şekil 11(b)-(d)) veri için de geçerlidir. Böylece, önerilen yöntemin 10 sn. periyot değerlerine ve %50 sönüm oranlarına kadar geçerli olduğu söylenebilir.

### 10 Önerilen analitik yöntemin şartnamelerde önerilen B değerleri ile uyumu

Bu bölümde, şartname hükümlerine göre kullanılması gereken B değerleri ile Bölüm 8’de tanımlanan ve yer hareketi yönünün etkisini dikkate alan analitik yöntemle hesaplanan  $((B_{Geo})_{ort})_{ort}$  değerleri karşılaştırılmaktadır (Şekil 12). Bu amaçla, ASCE [1], NEHRP [16] ve Eurocode8 [31] belgelerinde önerilen B değerleri Tablo 5’te sunulmuştur.

Tablo 5: Denklem (8)’in modifiye edilmiş regresyon katsayıları.

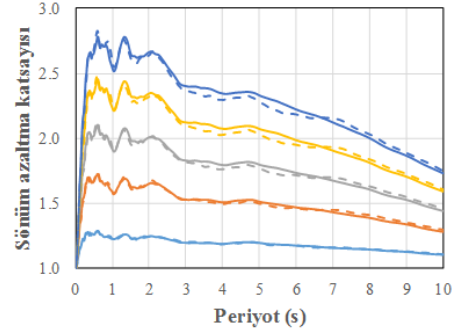
| $\beta$ % | ASCE [1] | NEHRP [16] | EUROCODE 8 [31] |
|-----------|----------|------------|-----------------|
| 10        | 1.2      | 1.2        | 1.2             |
| 20        | 1.5      | 1.5        | 1.6             |
| 30        | 1.7      | 1.8        | 1.9             |

Şekil 12, sönüm oranı %10 olduğunda, periyot değerine bakılmaksızın, burada dikkate alınan şartnamelerin tümünde verilen B değerlerinin,  $((B_{Geo})_{ort})_{ort}$  değerleriyle uyum içinde olduğunu göstermektedir. %20 sönüm oranı için Eurocode’da [31] verilen B değerleri, periyodun 3 s’den küçük olduğu değerler için,  $((B_{Geo})_{ort})_{ort}$  değerlerine oldukça yaklaşmaktadır. Diğer yandan %20 sönüm oranı ve periyodun 3 s’den büyük olduğu durumlar için ASCE [1] ve NEHRP [16] değerlerinin Eurocode’daki [31] değerlere kıyasla  $((B_{Geo})_{ort})_{ort}$  ile daha uyumlu sonuçlar verdiği gözlemlenmektedir. Son olarak, %30 sönüm oranı ve periyodu 3 s’den büyük durumlar için NEHRP’ün [16],  $((B_{Geo})_{ort})_{ort}$  ile en uyumlu sonuçları verdiği sonucuna varılmıştır. Nihayetinde, NEHRP [16] belgesinde sismik izolatörlü yapıların basitleştirilmiş analizinde kullanılmak üzere verilen B değerleri, orijinal yer hareketi değerlerinin döndürülmesi söz konusu olduğunda, en yaklaşık sonuçları sağlamaktadır.

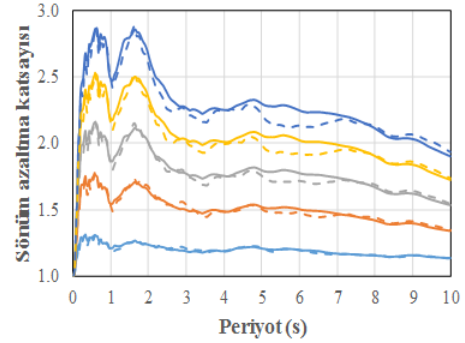
### 11 Sonuçlar

Bu çalışmada, deprem yer hareketi yönünün bir fonksiyonu olarak sönüm azaltma katsayısındaki değişim çalışılmıştır. Bu amaçla, Maksimum Yer Hızlarına göre kümelenmiş üç grup yer hareketi (her bir grup 10 ivme kaydı içermektedir) seçilmiş ve hesaplarda kullanılmıştır. Seçilen yer hareketlerinin orijinal kayıtları, farklı yönleri temsil etmek üzere, 0°’den 180°’ye kadar 10°’lik artımlarla döndürülmüştür. Farklı yer hareketi yönleri göz önüne alındığında, ortalama bazında sönüm azaltma katsayısının hesabında kullanılmak üzere hem ampirik hem de analitik basit yöntemler önerilmiştir. Daha sonra, analitik yöntemin yüksek periyot ve yüksek sönüm oranlarında da başarılı olduğu gösterilmiştir. Son olarak, önerilen analitik

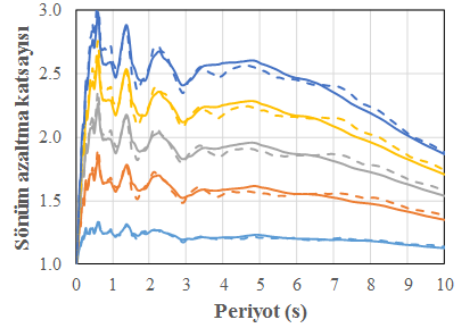
yöntemden elde edilen sönüm azaltma katsayıları ile mevcut şartnamelerde verilen değerler karşılaştırılmıştır. Bu çalışmanın sonuçları aşağıda belirtilen maddelerde özetlenmiştir:



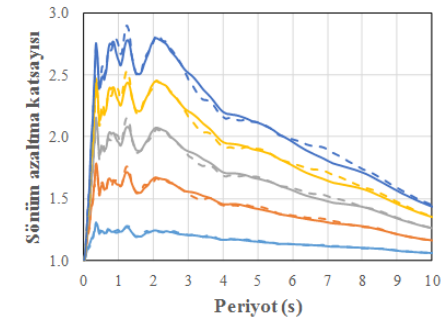
(a): Tüm deprem kayıtları.



(b): Grup 1.



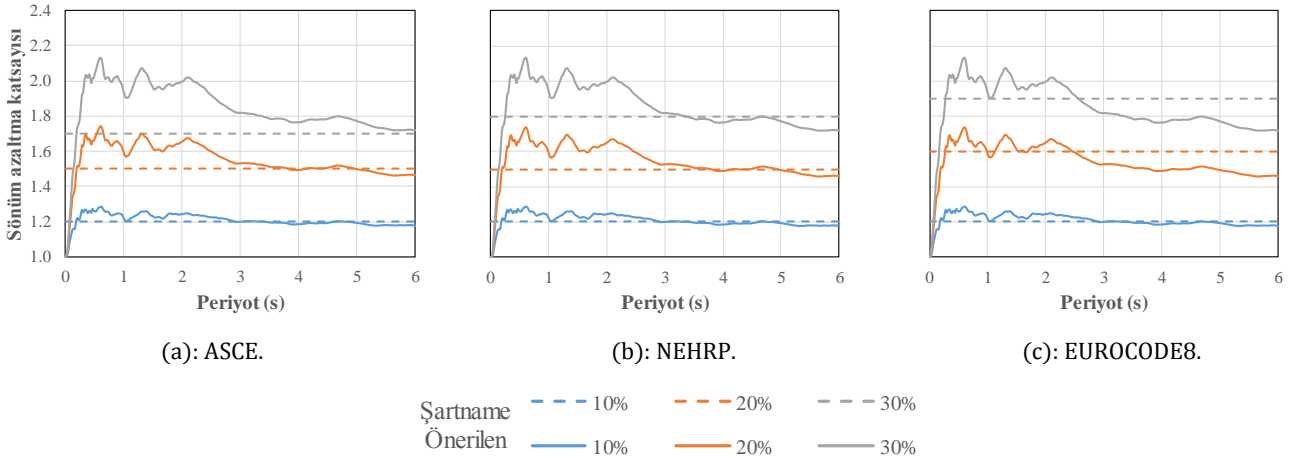
(c): Grup 2.



(d): Grup 3.

Ortalama Önerilen — 10% — 20% — 30% — 40% — 50%  
— 10% — 20% — 30% — 40% — 50%

Şekil 11: Önerilen analitik yöntemden elde edilen  $((B_{Geo})_{ort})_{ort}$  değerleri ile  $(B_d)_{ort})_{ort}$  değerlerinin yüksek sönüm ve uzun periyot değerleri için karşılaştırılması.



Şekil 12: Bölüm 8’de tanımlanan analitik yöntemden elde edilen  $(B_{Geo})_{ort}$  değerleri ile şartnamelerde verilen B değerlerinin karşılaştırılması.

- B, sönüm azaltma katsayısı, yer hareketinin yönüne göre değişmektedir. Bir yer hareketinin orijinal kaydına dayanarak elde edilen sönüm azaltma katsayısı ile orijinal kaydın döndürülmüş verilerinden elde edilen sönüm azaltma katsayıları arasındaki fark, sönüm oranının bir fonksiyonu olarak değişmektedir. Sönüm oranı arttıkça aradaki fark da artmaktadır,
- Tüm yer hareketlerinin bir grupta toplandığı durum göz önünde bulundurulduğunda (deprem kayıtlarının maksimum yer hızına dayanarak alt gruplandırmanın yapılmadığı durum) NEHRP [16] şartnamesinde verilen B değerleri, diğer şartnamelere nazaran, döndürülmüş kayıtlar için elde edilen B değerlerine daha yakın sonuçlar vermektedir. Bu gözlem özellikle 3 sn.’ten büyük periyot değerleri için daha uygundur,
- Önerilen ampirik formülasyon, bu çalışmanın kapsamındaki tüm yer hareketi kayıtları için elde edilen ortalama B katsayısını tahmin etmekte başarılı olmuştur. Ancak, sönüm oranı arttıkça bu başarı azalmaktadır. Buna ek olarak, deprem kayıtlarının maksimum yer hızı arttıkça ampirik yöntemin B değerlerini tahmin etmedeki etkinliği de düşmektedir,
- Önerilen analitik yöntem ise, yer hareketinin yönünü de dikkate alarak hesaplanan ortalama B değerlerini neredeyse mükemmel bir uyumla yakalamaktadır. Ayrıca, önerilen yöntemin başarısı, sönüm oranındaki ve periyot değerindeki değişikliklerden ve de maksimum yer hızına bağlı gruplandırmadan neredeyse hiç etkilenmemektedir.

## 12 Kaynaklar

- [1] Gulkan P, and Sozen M. “Inelastic response of reinforced concrete structures to earthquake motions”. *ACI Journal*, 71(12), 604-610, 1974.
- [2] Shibata A, Sozen M. “Substitute-structure method for seismic design in RC”. *Journal of Structural Division (ASCE)*, 102(1), 1-18, 1976.
- [3] Rezaeian S, Bozorgnia Y, Idriss IM, Abrahamson NA, Campbell KW, Silva WJ. “Damping scaling factors for vertical elastic response spectra for shallow crustal earthquakes in active tectonic regions”. *Earthquake Spectra*, 30(4): 1335-1358, 2014.
- [4] Hubbard DT, Mavroeidis GP. “Damping coefficients for near-fault ground motion response spectra”. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31(3), 401-417, 2011.
- [5] Hatzigeorgiou GD. “Damping modification factors for SDOF systems subjected to near-fault, far-fault and artificial earthquakes”. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 39(12), 1239-1258, 2010.
- [6] Cardone D, Dolce M, Rivelli M. “Evaluation of reduction factors for high-damping design response spectra”. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 7(1), 273-291, 2009.
- [7] Stafford PJ, Mendis R, Bommer JJ. “Dependence of damping correction factors for response spectra on duration and numbers of cycles”. *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, 134(8), 1364-1373, 2008.
- [8] Cameron WI, Green RA. “Damping correction factors for horizontal ground-motion response spectra”. *Bulletin of Seismological Society of America*, 97(3), 934-960, 2007.
- [9] Lin YY, Chang KC. “Effects of site classes on damping reduction factors”. *Journal of Structural Engineering*, 130(11), 1667-1675, 2004.
- [10] Bommer JJ, Mendis R. “Scaling of spectral displacement ordinates with damping ratios”. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 34(2), 145-165, 2005.
- [11] Pavlou EA, Constantinou MC. “Response of elastic and inelastic structures with damping systems to near-field and soft-soil ground motions”. *Engineering Structures*, 26(9), 1217-1230, 2004.
- [12] Lin YY, Tsai MH, Chang KC. “On the discussion of the damping reduction factors in the constant acceleration region for ATC-40 and FEMA 273”. *Earthquake Spectra*, 19(4), 1001-1006, 2003.
- [13] Ramirez OM, Constantinou MC, Whittaker AS, Kircher CA, Chrysostomou CZ. “Elastic and inelastic seismic response of buildings with damping systems”. *Earthquake Spectra*, 18(3), 531-547, 2002.
- [14] Newmark NM, Hall WJ. *Earthquake spectra and design, EERI monograph*. Earthquake Engineering Research Institute, 1982.
- [15] International Code Council. “International building code”. Falls Church, VA, 2000.

- [16] Building Seismic Safety Council. "NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures". Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, 2004.
- [17] Rupakhety R, Sigbjörnsson R. "Rotation-invariant measures of earthquake response spectra". *Bulletin of Earthquake Engineering*, 11(6), 1885-1893, 2013.
- [18] Boore DM. "Orientation-independent, nongeometric-mean measures of seismic intensity from two horizontal components of motion". *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(4), 1830-1835, 2010.
- [19] Boore DM, Watson-Lamprey J, Abrahamson NA. "Orientation-independent measures of ground motion". *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(4A), 1502-1511, 2006.
- [20] Beyer K, Bommer JJ. "Relationships between median values and between aleatory variabilities for different definitions of the horizontal component of motion". *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(4A), 1512-1522, 2006.
- [21] Reyes JC, Kalkan E. "Significance of rotating ground motions on behavior of symmetric- and asymmetric-plan structures: Part 1. Single-story Structures". *Earthquake Spectra*, 31(3), 1591-1612, 2015.
- [22] Moschonas IF, Kappos AJ. "Assessment of concrete bridges subjected to ground motion with an arbitrary angle of incidence: static and dynamic approach". *Bulletin of Earthquake Engineering*, 11(2), 581-605, 2013.
- [23] Rigato AB, Medina RA. "Influence of angle of incidence on seismic demands for inelastic single-storey structures subjected to bi-directional ground motions". *Engineering Structures*, 29(10), 2593-2601, 2007.
- [24] Lopez OA, Torres R. "The critical angle of seismic incidence and the maximum structural response". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 26(9), 881-894, 1997.
- [25] Bommer JJ, Elnashai AS, Chlimintzas GO, Lee D. "Review and Development of Response Spectra for Displacement-Based Design". ESEE Research Report No. 98-3, Imperial College London, 1998.
- [26] Mollaioli F, Liberatore L, Lucchini A. "Displacement damping modification factors for pulse-like and ordinary records". *Engineering Structures*, 78, 17-27, 2014.
- [27] Somerville P, Smith N, Punyamurthula S, Sun J. "Development of ground motion time histories for phase 2 of the FEMA/SAC steel project". Report No. SAC/BD-97-04, Sacramento, CA, 1997.
- [28] Avsar O and Ozdemir G. "Response of seismic-isolated bridges in relation to intensity measures of ordinary and pulselike ground motions". *Journal of Bridge Engineering*, 18(3), 250-260, 2013.
- [29] Yang D, Pan J, Li G. "Non-structure-specific intensity measure parameters and characteristic period of near-fault ground motions". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 38(11), 1257-1280, 2009.
- [30] Mavroeidis GP. "Discussion on displacement damping modification factors for pulse-like and ordinary records". *Engineering Structures*, 100: 249-252, 2015.
- [31] Eurocode 8. "Design of Structures for Earthquake Resistance-Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings". EN 1998-1, Comite Europeen de Normalisation, Brussels, 2004.
- [32] Faccioli E, Villani M, Vanini M, Cauzzi C. *Mapping seismic hazard for the needs of displacement-based design: the case of Italy*. Advances in Performance-Based Earthquake Engineering, 13, 3-14, Springer, 2010.
- [33] Wu J, Hanson RD. "Study of inelastic spectra with high damping". *Journal of Structural Engineering (ASCE)*. 115(6), 1412-1431, 1989.
- [34] American Society of Civil Engineers (ASCE). "Minimum design loads for buildings and other structures". Reston, VA 2010.