UZUN PERİYOTLU YER HAREKETİNİN KARAKTERİZASYONU

M.Erdik[1], E.Harmandar[1], K.Şeşetyan[1] ve M.B.Demircioğlu [1]

[1] *Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul*
Email: erdik@boun.edu.tr

ÖZET

Yüksek binaların, sismik taban yalıtımlı yapıların, uzun köprü ve yapıların, nükleer santraller gibi hassas yapıların performansa göre tasarımı için uzun periyotlu yer hareketlerinin titizlikle değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu değerlendirmelerde; deplasman davranış spektrumunun tahmini için kullanılan/kullanılacak ampirik ve teorik yöntemler; fay yakın sahası etkilerinin göz önünde bulundurulması ve analizi; farklı sönüm oranları için spektrum ölçeklendirilmesi ve uzun periyotlu yer hareketlerinin zaman tanım alanında simülasyonu önemli bir yer teşkil etmektedir. Bu konular, bağlantılı olarak, uzun periyot sınırlarında tasarım spektrumunun modifikasyonu için gerekli esasları; uzun periyotlu yer hareketlerinin zaman tanım alanında simülasyonu için gerekli ilkeleri ve uzun periyot etkisi göz önünde bulunduracak yer hareketi kayıtlarının seçimi ve ölçeklendirilmesi için gerekli kuralları kapsamaktadır.

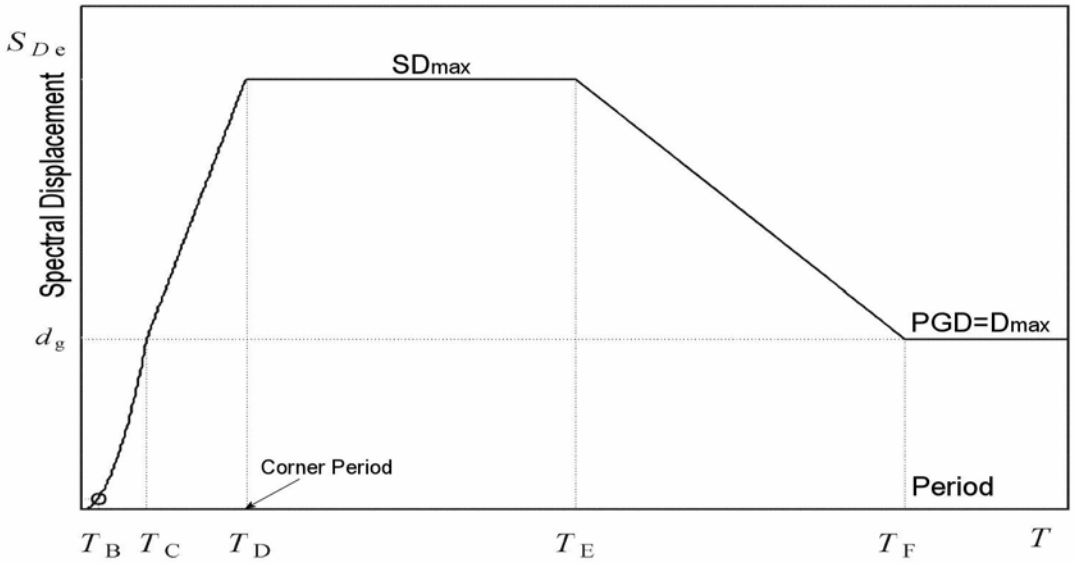
Bu makale, bu konuları araştırmayı ve gözden geçirmeyi amaçlamaktadır. Buradan hareketle, en büyük deplasman ve 10 s'deki spektral ivmeler için yer hareketi tahmin denklemlerinin geliştirilmesi üzerinde durulmuştur. Ayrıca, Marmara bölgesindeki 10s'deki spektral ivmeler için deprem tehlikesinin değerlendirilmesi ve ayrışımı (deaggregation) örnek bir uygulama olarak gösterilmiştir.

1. GİRİŞ

Son yıllarda, yapıların tasarımında performansa göre tasarım, deprem mühendisliği alanında en önemli araştırma ve tatbik etme yöntemlerinden biri olmuştur. Buna bağlı olarak deplasman davranış spektrumunun önemi artmıştır. Uzun açıklıklı (kablolu/asma) köprüler, yüksek binalar, sismik taban yalıtımlı yapılar ve elastik sınırlar üstünde deformasyona dayalı tasarımı yapılmış yapılar; ivme ve ya hız spektral limitlerinin aşıldığı periyotlardaki yapılara örnek teşkil etmektedir.
Performansa dayalı tasarım yönteminde; uzun periyotlardaki en büyük deplasman (PGD) değerleri doğru bir biçimde bulunmalıdır. Günümüzdeki yönetmeliklerde verilen deprem davranış spektrumda bu periyotlardaki değerlerin doğruluğu yeterli değildir. Ayrıca, zaman tanım alanında doğrusal olmayan (lineer olmayan) analizlerde yer hareketi kayıtlarının simülasyonu ve seçilmesi için gerekli kurallara ihtiyaç duyulmaktadır.
Yer hareketi tasarımının yer bağımlı değerlendirilmesindeki son gelişmeler göstermiştir ki verilen bir yıllık aşılma olasılığı (veya ortalama dönüş periyodu), verilen bir konum ve verilen bir deprem yer hareketi parametresi için hangi deprem senaryosunun (veya hangi deprem büyüklüğü, M, ve uzaklık, R, ikilisinin) hangi belirsizlik terimi, ε, ile bu deprem hareketi parametresine katkı sağladığı "deprem tehlikesi ayırımı analizi" ile belirlenir.
Yer hareketlerinin simülasyonlarında bir çok fiziksel modeller ve bunlara bağlı nümerik teknikler kullanılmasına rağmen, tutarlı sonuçlar elde edilememektedir ve gelişigüzel kullanılmasından dolayı tasarım için gerçekçi yer hareketleri bulunamamaktadır. Uzun periyot aralıklarında spektral değerlerin doğru olmayan bir biçimde tanımlanması deplasmana dayalı deprem tasarım metotlarının uygulamasını etkilemiştir. Özellikle fay yakın saha koşulları için uzun periyotlu deprem yer hareketlerinin değerlendirilmesinde gerçekçi tekniklerin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun için, uzun periyot aralığında (2-10 s) davranış spektrumunun modifiye edilmesi için ilkeler, uzun periyotlu yer hareketlerinin simülasyonu için prensipler ve uzun periyot etkisini göz önünde bulunduracak yer hareketi kayıtlarının seçimi ve ölçeklendirilmesi için kurallar incelenmelidir.

2. DEPLASMAN SPEKTRUMU

Deplasman spektrumu deplasmana dayalı tasarım yöntemlerinde en önemli girdilerden biridir. IBC (2006) ve EC8 (2003) gibi bazı yönetmeliklerin deplasman spektrumunu tanımlamalarına rağmen, bu spektrum kararlı harmonik davranış altındaki en büyük davranış varsayımıyla genellikle ivme spektrumundan üretilir. İvme spektrumun deplasman spektrumuna dönüştürülmesi, gerçekçi olmayan spektral şekiller ve ordinatlara sebep olabilmektedir (Tolis ve Faccioli 1999, Bommer ve Elnashai 1999). Şekil 1'de EC8 (2003)'e ait deplasman davranış spektrumu gösterilmektedir.



Şekil 1. Elastik deplasman spektrumu (EC8)

Bu spektruma ait temel özellikler aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir:

- Spektral deplasman platosu (SDmax, Şekil 1), M<5.5 için T_D=1.2 s'den başlamaktadır (Köşe periyodu, T_D'nin gösterimi için makalenin bundan sonraki bölümlerinde T_C kullanılacaktır);
- SDmax platosu zemin şartlarına bağlı olarak kontrol periyodu, T_E'ye kadar devam etmektedir (A tipi zemin sınıfı için T_E=4.5 s, B tipi zemin sınıfı için T_E=5 s, diğer zemin sınıfları için T_E=6 s);
- Dmax platosu T_F= 10 s'den başlamaktadır;
- En büyük spektral deplasmanın en büyük deplasmana oranı, MSD/Dmax, 2.5 'tir.

En büyük deplasman ile en büyük ivme arasındaki bağlantı EC8 (2003)'de

$$Dmax = 0.025\, A_{max}\, S\, T_C\, T_D \qquad (1)$$

denklemiyle gösterilmiştir. Burada, S zemin büyütme katsayısıdır. Köşe periyodu,T_C, depremin büyüklüğüne (M<5.5 ve ya M>5.5) ve zemin sınıfına bağlı değişmektedir ve spektral değerler bu periyottan sonra sabittir. Deplasman davranış spektrumu için en önemli parametrelerden biridir.

Deplasman spektrumu kontrol köşe periyodundan sonra en büyük deplasman (PGD) değerine yaklaşmaktadır. Uzun periyotlarda (10 s üzeri) bu spektrum deprem büyüklüğüyle doğrusal olarak ölçeklenmektedir.

IBC (2006)'daki spektral ordinatlarla karşılaştırıldığında EC8 (2003)'deki ordinatlar uzun periyotlarda çok düşük kalmaktadır. IBC (2006)'daki deplasman platosu 4 ile 16 s'lik köşe periyotlarından başlarken EC8 (2003)'deki Tip 1 spektrumu sadece köşe periyodu, 2 s'den başlamaktadır.

Genellikle köşe periyodu ya ampirik dataya ya da sismik kaynak ölçeklendirme modellerine dayanarak hesaplanmaktadır. Bu bağlamda, NEHRP (2003) için köşe periyoduna ve moment büyüklüğüne bağlı bir denklem geliştirildi:

$$\log T_D = -1.25 + 0.3\, M_W \tag{2}$$

2.1 Spektral Deplasman Tahmin Denklemleri

Bommer ve Elnashai (1999), Faccioli vd. (2004), Akkar ve Bommer (2007) and Cauzzi vd. (2007); mevcut yer hareketi verilerini kullanarak spektral deplasman amplitüdleri için ampirik denklemler geliştirmişlerdir. Şekil 2'de farklı deprem büyüklükleri ve kayalık zeminler için Cauzzi vd. (2007)'nin oluşturduğu deplasman davranış spektrumları gösterilmektedir.

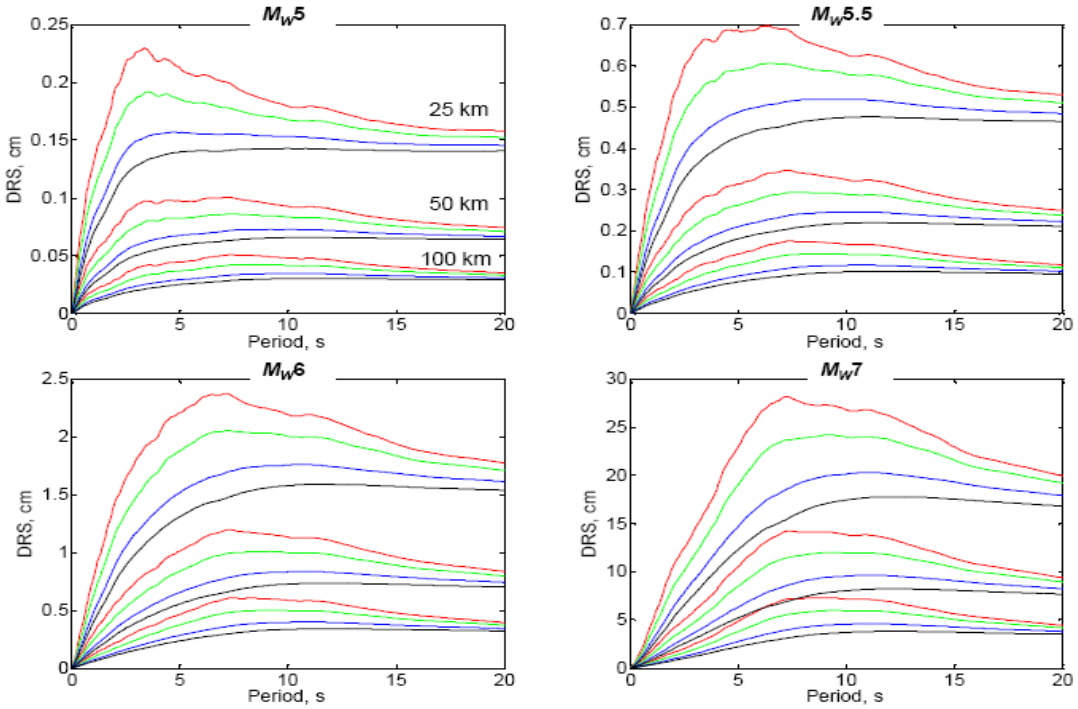
2.2 Sönüm ölçeklenmesi (Spektrum azaltma katsayıları)

Deprem yönetmeliklerinde, sönüm oranı %5'in üzerinde olan spektrumların bulunması için sönüm oranı %5 olan spektral ordinatlara ölçeklendirme katsayıları (η) uygulanır (Şekil 3). Herhangi bir sönüm oranı (ξ) için deplasman davranış spektrumlarının sönüm oranı %5'lik elastik spektrumla bağlantılı denklemler; EC8 (1998) için Denklem 3'de, EC8 (2003) için Denklem 4'de gösterilmiştir:

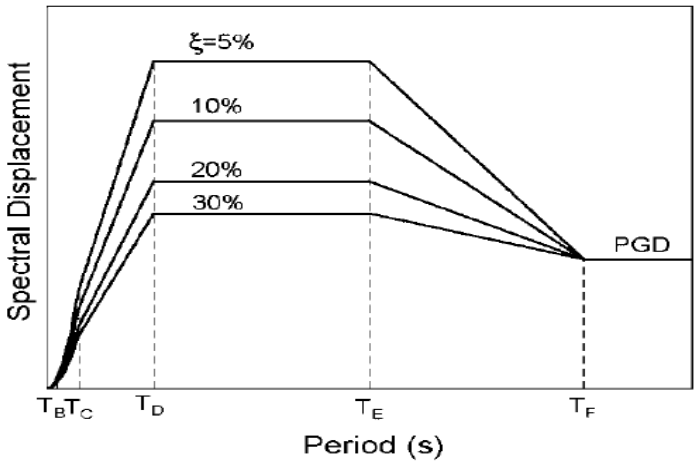
$$\eta = \sqrt{\frac{0.07}{0.02 + \xi}} \tag{3}$$

$$\eta = \sqrt{\frac{0.10}{0.05 + \xi}} \tag{4}$$

Priestley vd. (2007), Denklem 3'ün (EC8, 1998) daha iyi olduğu görüşünü paylaşmaktadırlar.



Şekil 2. Kaya zeminler, farklı moment büyüklükleri, uzaklıklar ve sönüm oranları için deplasman spektrumları (Cauzzi vd. 2007)



Şekil 3. Farklı sönüm oranları için deplasman spektrumları (EC8, 2003)

Priestley (2003) ve Priestley vd. (2007) yakın saha ön yönelimli deprem yer hareketleri için Denklem 5'i önermektedir:

$$\eta = \left(\frac{0.07}{0.02 + \xi}\right)^{0.25} \tag{5}$$

3. EN BÜYÜK DEPLASMANIN TAHMİNİ (PGD)

3.1 Ampirik yer hareketi tahmin denklemleri

Gregor ve Bolt 1997'in Kaliforniya verilerinde; Bommer vd. 2000 ve Tromans ve Bommer 2002'in Avrupa verilerinde kullandığı gibi mevcut yer hareketi tahmin denklemleri analog kayıtlara dayanılarak geliştirilmiştir. Bu gibi kayıtlar iyi bilinen cihaz limitlerinden ve 3 s üzerindeki periyotların uzun periyotlu gürültülerden zarar görmektedirler.

Ambraseys vd. (1996) Avrupa için geliştirdikleri spektral ivme tahmin denklemlerinde kullanılan veriler Bommer vd. (2000)'de en büyük deplasman tahmin denklemlerinde de faydalanıldı:

$$log(PGD) = -1.757 + 0.526\,M_s - 1.135\,log\,(r) + 0.114\,S_a + 0.217\,S_s \quad (6)$$

$$r = (d^2 + 10.24)^{0.5} \quad (7)$$

Burada, S_a sıkı zemin için 1, diğerleri için 0 alınmaktadır. S_s yumuşak zeminleri temsil eden bir değişkendir. Zemin sınıflandırmasında yüzeye yakın 30m'deki ortalama kayma hızı (V_{s30}) göz önünde bulundurulmaktadır.

Gregor vd. (2002) en büyük hız (PGV) ve deplasman (PGD) tahmin denklemlerini oluştururken iki veri grubu kullandı. Dinamik olarak adlandırılan birinci veri grubu; PEER'dan alınan, aktif tektonik bölgelerdeki işlenmiş deprem kayıtları oluşturmaktadır. Bu veri grubunun içine 1999 Kocaeli (M7.4), Chi-Chi (M7.6) ve 1999 Düzce depremleri de dahildir. Statik olarak tanımlanan ikinci veri grubu birincisi ile benzer fakat bu grupta yakın kaynaklı (uzaklığı 20 km'den düşük olan) deprem kayıtları statik deplasmanı koruma amaçlı bir işleme tabi tutulmaktadır. Bu iki veri grubunun deprem büyüklükleri 4.4 ile 7.6 arasında ve uzaklıkları 0.1 km ile 267.3 km arasında değişmektedir. Gregor vd. (2002)'nin yer hareketi tahmin denklemi aşağıda gösterilmiştir:

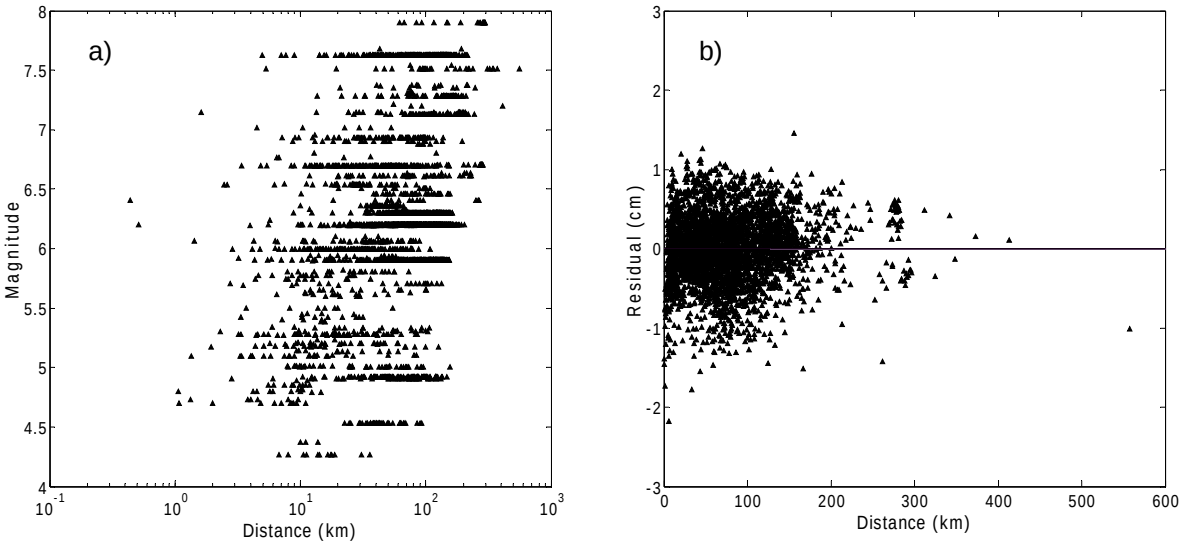
$$ln\,(GM) = \theta_1 + \theta_2 M + (\theta_2 + \theta_3)\,ln\left(D + e^{\theta_4}\right) + \theta_5(1 - S) + \theta_7(M - 6)^2 + \theta_8 F + \frac{\theta_9}{\tanh\,(D + \theta_{10})} \quad (8)$$

Burada GM en büyük yer ivmesi (PGA), PGV ve PGD'yi temsil etmektedir. S kayada 1, diğer zeminlerde ise 0 olarak alınır. M deprem büyüklüğünü, F deprem mekanizmasını ve D uzaklığı (km) temsil etmektedir (Doğrultu-atımlı faylar için F= 0; eğik atımlı ve odak mekanizması bilinmeyen faylar için F=0.5; ters faylar için F=1).

Bu çalışmada, PEER yer hareketi veri bankası kullanılarak en büyük deplasman değerleri (PGD) için yeni bir yer hareketi tahmin denklemi geliştirildi. Kullanılan veri bankasının moment büyüklüğü 4.27 ile 7.9 arasında, uzaklığı 0.44 km ile 557.63 km arasında değişmektedir (Şekil 4a). En büyük deplasman değerleri ortagonal rastgele yönlenmiş iki yatay bileşenin geometrik ortalamasıdır. Geliştirilen yer hareketi tahmin denklemi Denklem 9'da gösterilmiştir:

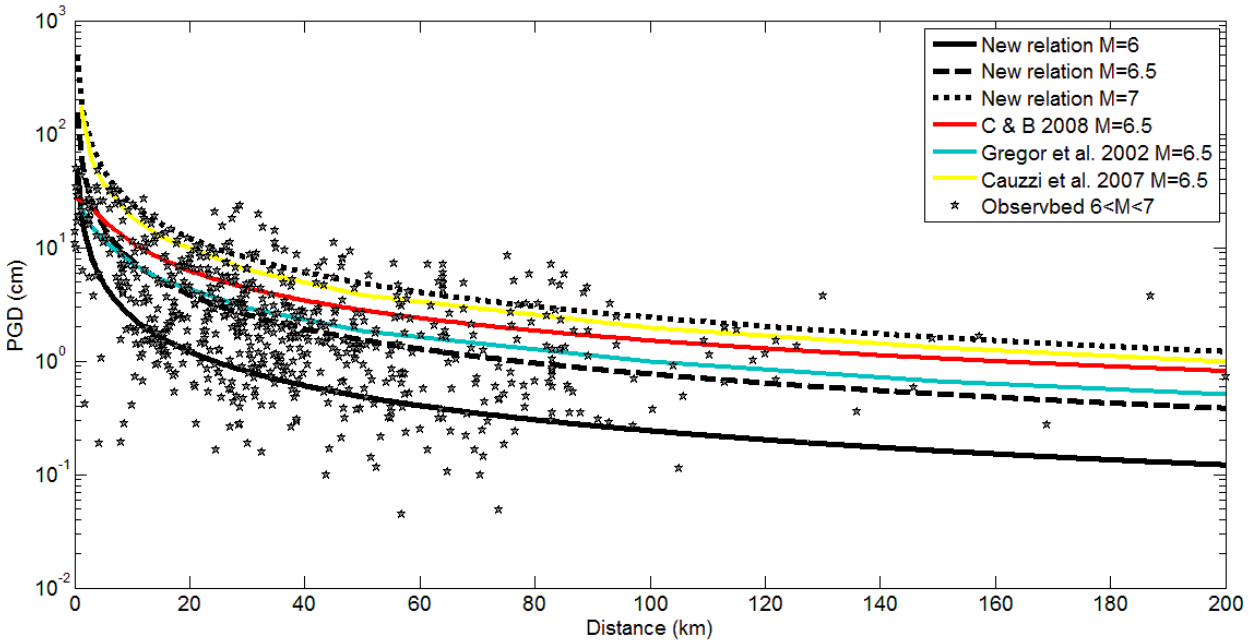
$$PGD = 3.275\left(\frac{1}{r}\right)10^{(M-2)} \quad (9)$$

Burada, PGD en büyük deplasmanı (cm), r merkez üstü uzaklığı ve M moment büyüklüğünü temsil etmektedir. Kayıtlar ve tahmin edilen en büyük deplasman değerleri arasındaki artıklar uzaklığa göre değişimi Şekil 4b'de gösterilmiştir.

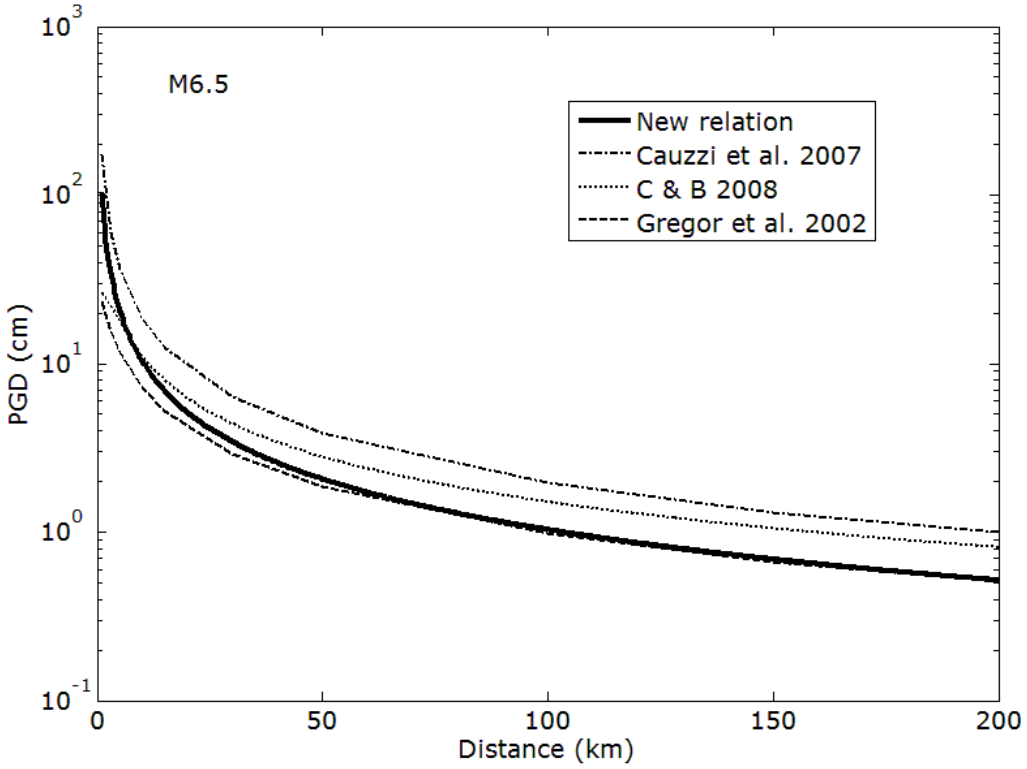


Şekil 4. Verilerin depremin büyüklüğüne ve uzaklığına göre dağılımı (a), artıkların uzaklığa göre dağılımı (b)

Geliştirilen yeni yer hareketi tahmin denkleminden elde edilen PGD değerleri Şekil 5'de kayıtlı verilerle karşılaştırılmıştır. Bu PGD değerleri, Şekil 6'da, Gregor vd. (2002), Cauzzi vd. (2007) ve Campbell ve Bozorgnia (2008) yer hareketi tahmin denklemleriyle kıyaslanmıştır.



Şekil 5. Geliştirilen yer hareketi tahmin denkleminden elde edilen PGD değerlerinin kayıtlı PGD değerleri ile karşılaştırılması



Şekil 6. Geliştirilen yer hareketi tahmin denkleminin Gregor vd. (2002), Cauzzi vd. (2007), ve Campbell ve Bozorgnia (2008) yer hareketi tahmin denklemleriyle karşılaştırılması

3.2 Analitik yer hareketi tahmin denklemleri

Faccioli vd. (2004) ve Priestley vd. (2007) köşe periyodu (T_C) ve deplasman amplitüdü (SDmax) için Denklem 10 ve 11'I önermişlerdir:

$$T_C = 1.0 + 2.5\,(M_W - 5.7) \tag{10}$$

$$SDmax = C_S \frac{1}{r} 10^{(M_W - 3.2)} \tag{11}$$

Burada, r merkez üstü uzaklığı (km) ve C_S zemin katsayısını (sert zeminler için $C_s=1$) temsil etmektedir.

Cauzzi vd. (2007)'de SDmax seviyesinin 10 s'deki spektral deplasman ile tanımlanacağını göstermişlerdir.
Brune modeli kullanılarak Faccioli vd. (2004) uzak saha en büyük deplasman değerleri için teorik bir yer hareketi tahmin denklemleri geliştirmiştir:

$$\log_{10}(d_{max}) = -4.46 + 0.33\log(\Delta\sigma) + M - \log(R) \tag{12}$$

Burada, d_{max} (cm) en büyük deplasman, $\Delta\sigma$ (MPa) gerilme düşüşü ve R odak uzaklığıdır.

Homojen yarı-uzay bir ortamdaki noktasal kayma deplasmanı

$$u(r,t) = \frac{R^{\theta\varphi}}{4\pi\rho\beta^3 r}\frac{M_0}{\tau}\left[\frac{t-\left(r/\beta\right)}{\tau}\right]e^{-\frac{1}{\tau}\left[t-\left(\frac{r}{\beta}\right)\right]} \tag{13}$$

şeklinde gösterilmiştir (Beresnev ve Atkinson, 1997;Erdik ve Durukal, 2003). Burada,
u(r,t): kayma dalgası deplasmanı
$R^{\theta\varphi}$: açısal yayılma tipi katsayısı
ρ: ortamın kütle yoğunluğu
μ: rijitlik kayma modülü
τ: karakteristik yükselme zamanı parametresi ($\tau=1/w_c$, w_c köşe frekanstı)
β: kayma dalgası yayılım hızı
M_0: sismik moment ($M_0=\mu A u_T$; A toplam kırılma alanı ve u_T kaynakta yükselme zamanında ulaşılan toplam yerdeğiştirmedir).
Beresnev (2001) benzer şartlarda köşe frekansını

$$w_c = \frac{1}{\tau} \cong \frac{1}{T} \quad ve \quad T \cong 1.68 \tag{14}$$

denklemiyle göstermiştir. Buradaki yükselme zamanı, T, kaynak yarıçapı (D/2) ve yırtılmanın merkezde başlayıp yayıldığı varsayımı ile, yırtılma hızı V_R ile orantılıdır.

$$T = \left(D/2\right)/V_R \tag{15}$$

formülüyle de ifade edilebilir. Eğer $V_R = 0.8\,\beta$ kabulü yapılırsa

$$\tau \cong 0.74\frac{\left(D/2\right)}{\beta} \tag{16}$$

olarak hesap edilir. Sismik moment

$$M_0 = \mu A u_T \tag{17}$$

ve kayma gerilimi düşmesi

$$\Delta\sigma = \mu\frac{u_T}{D/2} \tag{18}$$

ve dairesel bir dislokasyon varsayımı ile: $A = \pi\left(\frac{D}{2}\right)^2$ bağlantısı kullanılarak sismik moment Denklem 19'da gösterildiği üzere hesaplanır:

$$M_o \cong \Delta\sigma\,\pi\left(\frac{D}{2}\right)^3 \quad ve \quad \left(\frac{D}{2}\right) \cong \left(\frac{M_o}{\pi\,\Delta\sigma}\right)^{1/3} \tag{19}$$

Denklem 16 ve sismik moment $M_0 = \Delta\sigma\left(D/2\right)A$ denklemlerinden

$$\tau \cong 0.5\frac{\left(M_0/\Delta\sigma\right)^{1/3}}{\beta} \tag{20}$$

sonucuna varılır.

Denklem 13'ün t'ye göre t=0 koşulu için türevi alındığında $\tau = t - \frac{r}{\beta}$ 'de u(r,t) en büyük değerine ulaşır:

$$D_{\max} = U_{\max}(r) = \frac{R^{\theta\varphi}}{4\pi\rho\beta^3}\frac{1}{r}\frac{1}{e}\frac{1}{\tau}M_0 \le u_T \tag{21}$$

Burada "e" doğal logaritmanın tabanıdır.

Denklem 20 Denklem 21'de yerine konulduğu takdirde

$$D_{\max}(r) = \frac{R^{\theta\varphi}}{4\pi\rho\beta^3 e}\frac{1}{0.5\left(1/\Delta\sigma\right)^{1/3}}\frac{M_o^{2/3}}{r} \le u_T \tag{22}$$

denklemi elde edilir.

En büyük deplasmanın orantısallığı

$$D_{\max}(r) \propto (1/r)(\Delta\sigma)^{1/3}M_0^{2/3} \tag{23}$$

şeklinde gösterilebilir. Benzer sonuçlar Faccioli vd. (2004) tarafından da elde edilmiştir.

Sismolojide genel olarak kullanılan parametre değerleri ($R^{\theta\varphi}$=0.78, β=3800 m/s; ρ=2800 kg/m^3; e=2.7) ve kayma gerilimi düşmesinin (Δσ) 1 MPa ile 10 MPa arasında değiştiğini (Hanks ve Kanamori, 1979) göz önünde bulundurularak en büyük deplasman

$$D_{\max}(r) = (1.2/r)10^{-10}M_0^{2/3} \quad (\Delta\sigma=1\text{MPa için}) \tag{24}$$

$$D_{\max}(r) = (2.5/r)10^{-10}M_0^{2/3} \quad (\Delta\sigma=10\text{MPa için}) \tag{25}$$

D_{max} (m), M_o (Nm) ve r (m) ile verilmektedir. Ayrıca sismik moment değerini de

$$M_0 = 10^{1.5M_w+9.05} \tag{26}$$

Denklem 24 ve Denklem 25'de yerine koyulursa ve "r" km olarak kullanılırsa en büyük deplasman Denklem 27 ve Denklem 28 ile hesaplanabilir:

$$D_{\max} = (1.2/r)10^{M_w-7} \quad (\Delta\sigma=1\text{Mpa için}) \tag{27}$$

$$D_{\max} = (2.5/r)10^{M_w-7} \quad (\Delta\sigma=10\text{Mpa için}) \tag{28}$$

Erdik ve Durukal (2002) köşe frekansı ($f_c=1/\omega_c$) için Denklem 29'u geliştirmiştir:

$$\log f_c \cong 6.2 - \frac{1}{3}(1.5M_w + 9.05) = 3.2 - 0.5M_w \quad or \quad f_c \cong 10^{(3.2-0.5M_w)} \tag{29}$$

4. BASİTLEŞTİRİLMİŞ DEPLASMAN DAVRANIŞ SPEKTRUMU

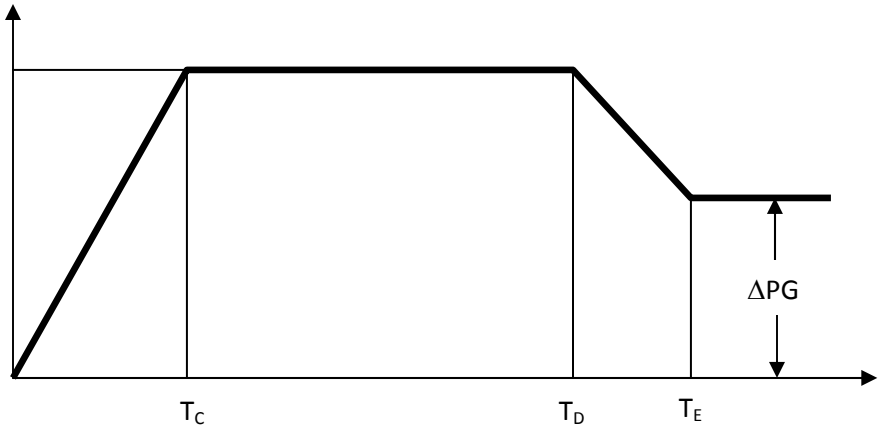
Priestley vd. (2007)'un genel idealize edilmiş deplasman spektrumunu Şekil 7'de gösterilmiştir. Önceki bölümlerde bahsedildiği üzere, deplasman spektrumu köşe periyoduna, T_C , kadar lineer olarak artar, T_D değerine kadar sabit kalır ve T_E değerinde en büyük deplasman (PGD) değerine düşer.
Faccioli vd. (2004) ve Priestley vd. (2007) T_C ve M_W arasındaki bağlantıyı

$$T_D = 1.0 + 2.5\,(M_W - 5.7) \tag{30}$$

ve

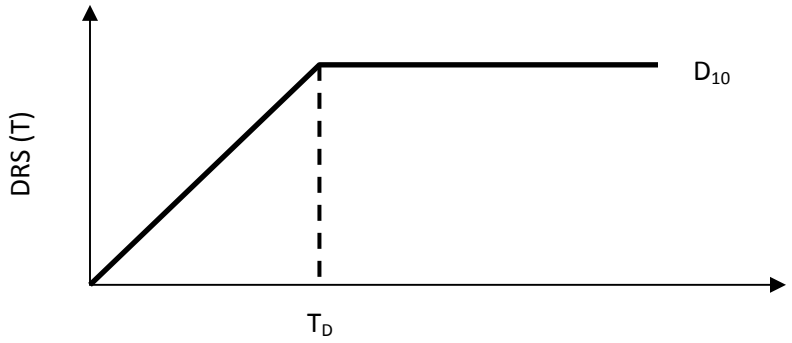
$$Dmax = C_S \frac{1}{r} 10^{(M_W-3.2)} \tag{31}$$

bağlantısını göstermişlerdir. Burada Dmax (mm) %5 sönüm oranı için deplasman genliğini göstermektedir. Zemin katsayısı C_S kaya zeminler için 0.7, sıkı zeminler için 1.0, yumuşak zeminler için 1.4 ve çok yumuşak zeminler için 1.8'dir.



Şekil 7. Elastik deplasman spektrumu genel özellikleri

Cauzzi vd. (2007) %5 sönüm oranı için daha basit bir deplasman spektrum önermişlerdir (Şekil 8).



Şekil 8. Elastik deplasman spektrumuna yaklaşım (Cauzzi vd. 2007)

%5 sönüm oranı için deplasman spektrumu

$$DRS(T) = \frac{D_{10}\,F\,(T, V_{S30})\,\eta}{T_D}\,T \qquad 0 \leq T \leq T_D \tag{32}$$

$$DRS(T) = D_{10}\,F\,(T, V_{S30})\,\eta \qquad T \geq T_D \tag{33}$$

Burada, D_{10} deplasman spektrumda sabit uzun periyot kısmına karşılık gelen spektral değeridir. Köşe periyodu, T_D,

$$T_D = \frac{2\,\pi\,D_{10}}{(PSV)_{max}} \tag{34}$$

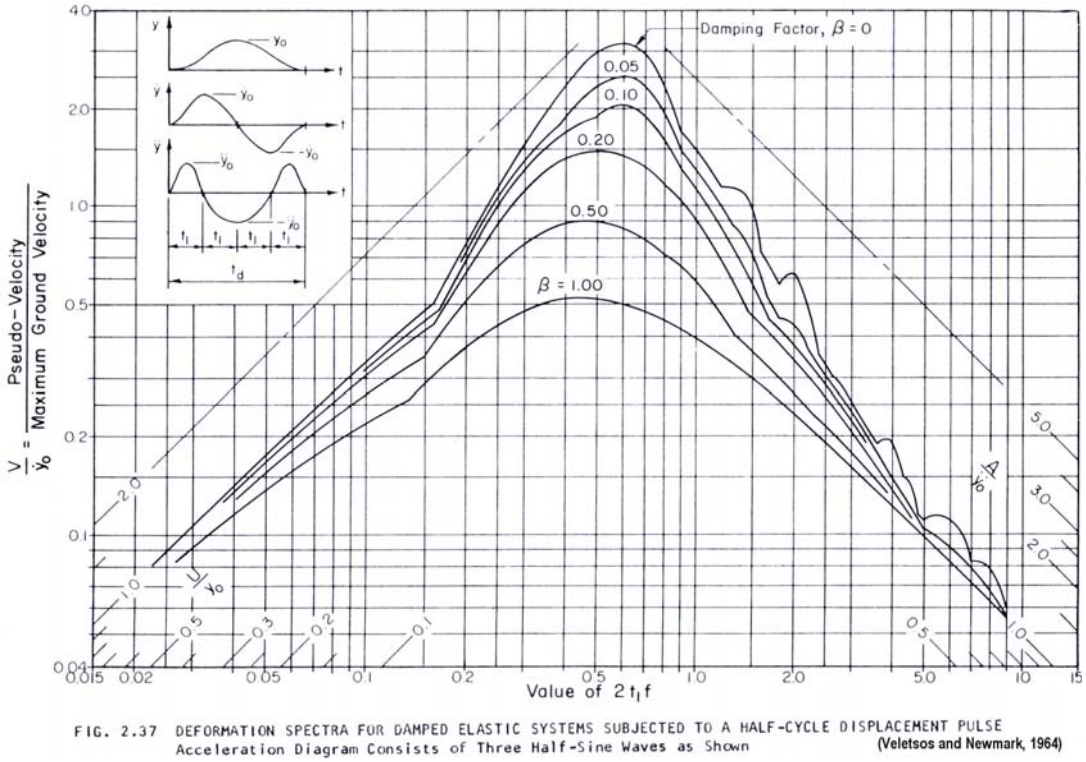
denklemiyle hesaplanır. Burada, $(PSV)_{max}$ sözde hız davranış spektrumun en büyük değeri ve $F(T; V_{S30})$ yerel zemin koşullarına göre değişen spektral büyütme katsayısıdır (A tipi zeminler için $F(T; V_{S30})=1.0$).

5. UZUN PERİYOTLU YER HAREKETLERİ

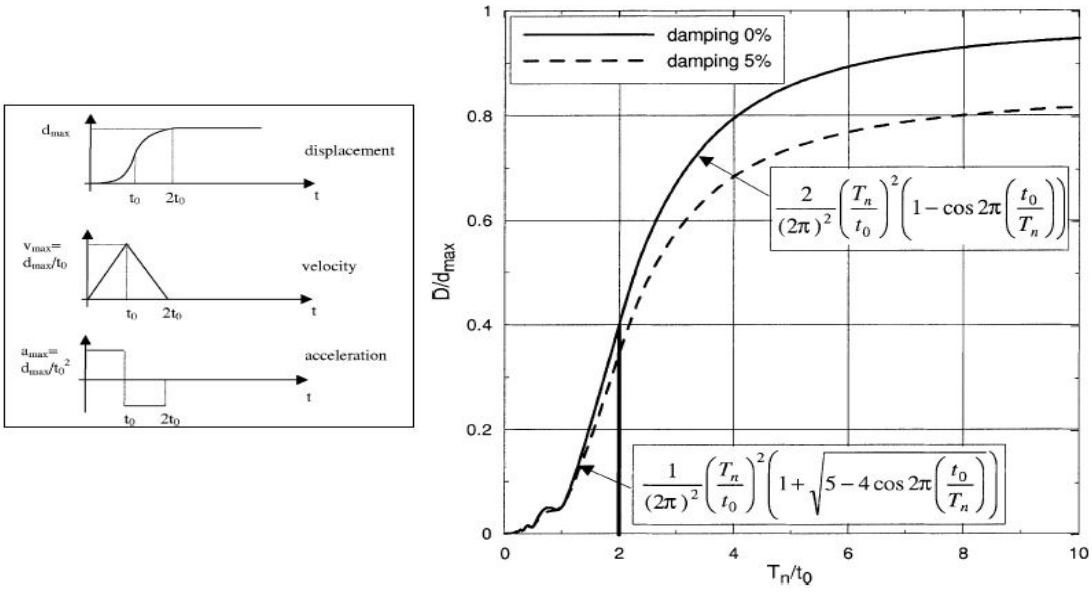
Fay yakın sahası içindeki kayıtlar genellikle kırılmanın yönelim etkisiyle uzun periyotlu pulslar ve kalıcı yerdeğiştirmeler içermektedirler. Büyük depremlerde, yönelim etkisi, 1 m/s civarındaki PGV değerleriyle baskın polarize SH dalgalarını içeren yaklaşık 2-3 s'deki uzun periyotlarla ilişkilidir. Fay yakın saha için depremin büyüklüğüne, yerine ve azimutuna bağlı olarak 0.6 s'den uzun periyotlarda faya dik spektral değerler faya paralel spektral değerlerden daha büyüktür (Somerville vd., 1997). Genel bir kanı oluşuyor ki davranış spektrumu, yakın saha pulslarının sismik talebi için yeterli değildir. Fay yakın sahanın karakterizasyonu için davranış spektrumu yerine zamana bağlı yer hareketine ihtiyaç duyulmaktadır. İleri kırılma yönelim etkisindeki yakın fay yer hareketi, basit zamana bağlı pulslarla gösterilebilir.

Faya dik doğrultudaki ön kırılma yönelim koşullarında fay yakın pulsları periyot, amplitüd ve yarım devir sayısıyla ifade edilmektedir. Veletsos ve Newmark (1964) yarım devir deplasman pulsu için davranış spektrumlarını elde etmiştir (Şekil 9).

Faccioli vd. (2004), farklı yer hareketi pulslarına karşı gelen uzun periyotlu deplasman spektrumları için analitik denklemler üretmiştir. Büyük bir depremin (M_w>7.5) deplasman atımlı pulsu Şekil 10'de gösterilmiştir. Deplasman spektrumları $2t_0$ periyodu ve d_{max} spektral değerine göre basit deplasman pulslarına dönüştürülebilirler (Faccioli vd., 2004). Uzun periyotlardaki deplasman spektrumu, deplasman pulslarının şekillerine bağlı olduğundan ivmeden daha gerçekçidir.



Şekil 9. Yarım devir yerdeğiştirme pulsu için tepki spektrumu (Veletsos ve Newmark, 1964)



Şekil 10. Adım puls için uzun periyot deplasman spektrumu (Faccioli vd., 2004)

Birçok araştırmacı puls benzer ya da faya yakın yer hareketlerini derlemiş ve incelemiştir (Mavroeidis ve Papageorgiou, 2003; Somerville, 2003; Fu ve Menun, 2004; Akkar vd., 2005). Baker (2007) fay yakın sahasındaki yönelimden kaynaklanan güçlü hız pulslarının niceliksel tanımlanması için wavelet analiz yöntemini kullanarak bir yöntem geliştirmiştir.

Somerville (2004) yakın saha içinde faya dik ön yönelim etkisindeki puls periyodunu (T) ve PGV değerlerini depremin büyüklüğüne(M_W) ve faya en yakın uzaklığa (R) bağlı olarak elde etmişlerdir:

$$\log T = -3.1 + 0.5\,M_W \tag{35}$$

$$\log_{10} PGV = -1.0 + 0.5\,M_W - 0.5\,\log_{10} R \tag{36}$$

Denklem 35 ve 36'nın sonucu olarak 1 periyotluk hız ve ivme pulsları ve bunlara bağlı ivme spektrumları Şekil 11, 12 ve 13'de gösterilmiştir.

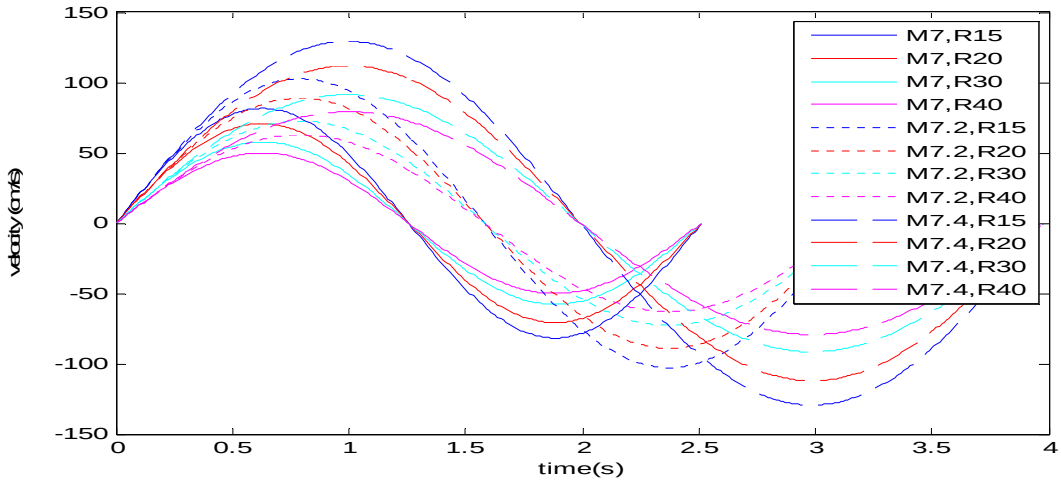


Figure 11. Denklem 36 kullanılarak bulunan hız pulsları

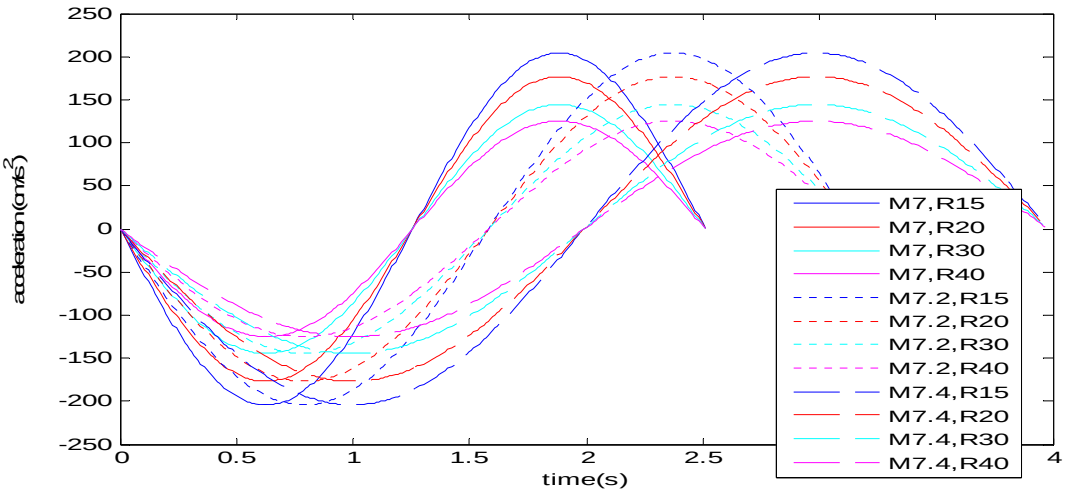


Figure 12. Denklem 36 kullanılarak bulunan hız pulslarına bağlı ivme pulsları

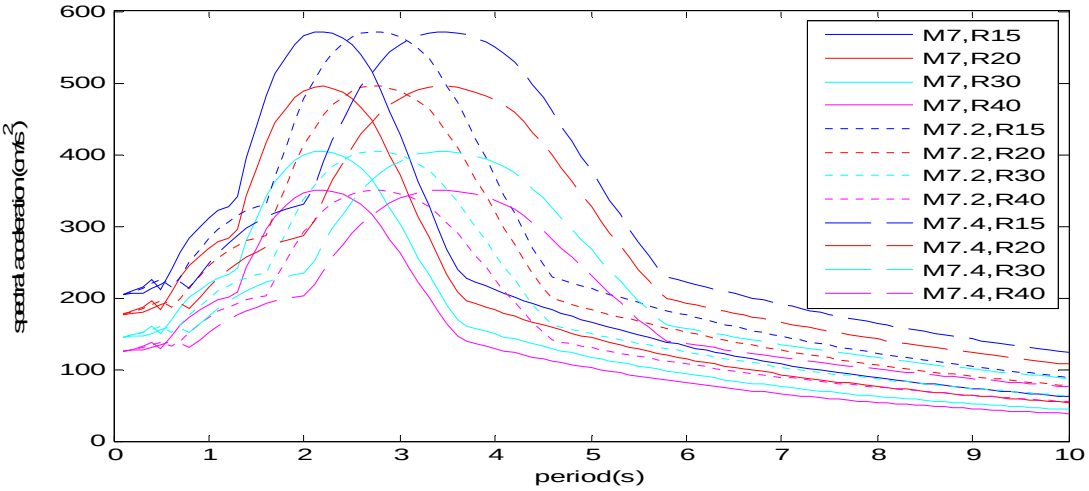
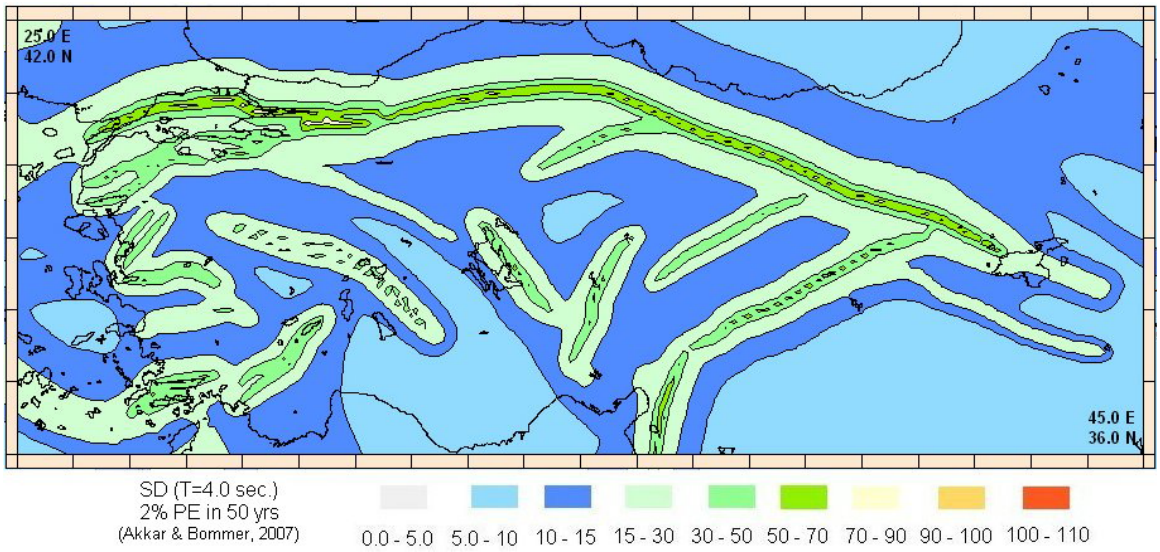


Figure 13. İvme pulslarına bağlı olarak bulunan ivme spektrumları

6. SPEKTRAL DEPLASMAN DEĞERLERİ İÇİN OLASILIKSAL DEPREM TEHLİKE ANALİZİ VE TEHLİKE AYRIŞIMI

Farklı sönüm oranları için spektral deplasman değerlerinin depremin büyüklüğüne ve uzaklığına bağımlılığını yakalamanın en basit yolu farklı sönüm oranları için birçok tasarım spektrumları tanımlanmalıdır. Şekil 14'de Türkiye'de 50 yılda aşılma olasılığı %2 olan %5 sönüm oranı için 4 s'deki spektral deplasmanlar gösterilmiştir. Burada, kırılma yönelim etkisi dikkate alınmadığı için ana fay bölgelerinin 20 km'sinde bu değerler gerçekçi olmayabilirler.



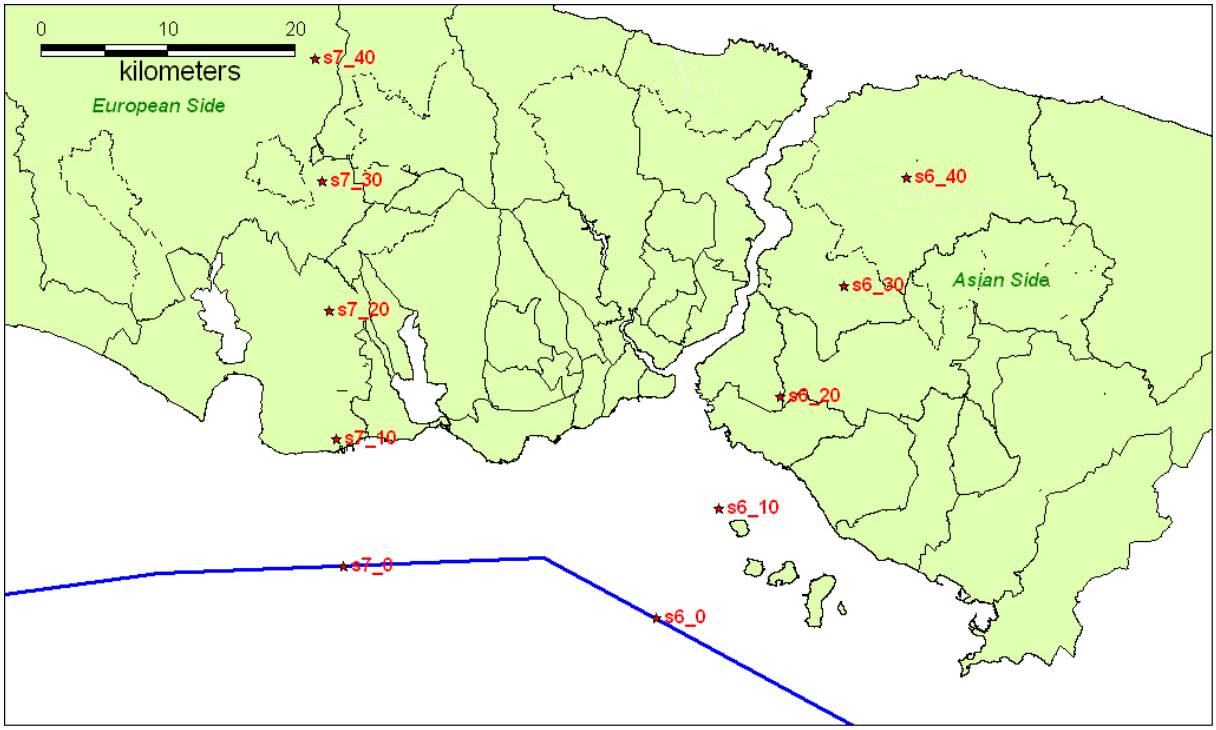
Şekil 14. 2475 yıllık ortalama dönüş periyotları için 4 s'deki %5 sönüm oranlı spektral deplasmanlar

Olasılıksal sismik tehlike ayrışımı, öncelikle depremin büyüklüğünün, uzaklığının ve seçilmiş sismik tehlike sınırını karşılamak için tanımlanan depremin değişkenlerinin belirlenmesini kapsamaktadır (Bazzurro ve Cornell, 1999). Sismik tehlike ayrışımı, seçilmiş sismik tehlike sınırını karşılamak için senaryo depremlerinin tanımlanmasında en etkili yoldur. Bu senaryo depremler; dinamik yapı analizlerinde kullanılmak için davranış

spektrumunun, zamana bağlı ve/veya seçilmiş yer hareketi kayıtlarının tanımlanmasında kullanılır. Önceki bölümlerde bahsedildiği üzere, belli bir periyotta spektral deplasman, depremin büyüklüğüne ve uzaklığına bağlı olarak normal dağılımla ifade edilir:

$$ln(SD(T)) = f(M,R,\alpha) + \varepsilon\sigma \tag{37}$$

Epsilon (ε), yer hareketi parametresinin (SD(T)) tahmini orta değerden sapmasının bir ölçütüdür. Epsilon, kayıt edilen logaritmik spektral deplasmanın yer hareketi tahmin denklemleriyle hesaplanan ortalama tahmin değerinden standart sapma sayısının bir ifadesidir. Deplasman spektrumunun plato kısmına karşılık gelen 10 s'deki spektral deplasman (SD(10s)) için, Avrupa ve Asya yakalarındaki ana Marmara fayından 0, 10, 20, 30, 40 ve 50 km uzaklıktaki noktalar için tehlike ayrışımı yapıldı. Tüm noktalar için zemin sınıfı NEHRP zemin sınıfı B/C sınırı alındı. Bu noktalar Şekil 15'da gösterildi. Tablo 1'de 475 yıllık dönüş periyodu ve Tablo 2'de 2475 yıllık dönüş periyodu için Asya ve Avrupa'daki noktalar için tehlike ayrışımı sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 15. Tehlike ayrışımının yapıldığı noktalar

Tablo 1. Asya yakası için tehlike ayrışımı (SD(10s))

İstasyon ismi		S6_10		S6_20		S6_30		S6_40	
Yıllık dönüş periyodu		10 km		20 km		30 km		40 km	
		Ortalama	Mod	Ortalama	Mod	Ortalama	Mod	Ortalama	Mod
475	M	7.3	7.25	7.3	7.25	7.4	7.25	7.4	7.25
	D	29	11.25	50	21.25	66	31.25	80	41.25
	E	1.3	0.9	1.5	1.1	1.5	1.3	1.5	1.3
2475	M	7.3	7.25	7.4	7.25	7.4	7.25	7.5	7.25
	D	25	11.25	49	21.25	69	31.25	85	41.25
	E	1.9	1.5	2.1	1.9	2.1	1.9	2.1	1.7

Tablo 2. Asya yakası için tehlike ayrışımı (SD(10s))

İstasyon ismi		S7_10		S7_20		S7_30		S7_40	
Yıllık dönüş periyodu		10 km		20 km		30 km		40 km	
		Ortalama	Mod	Ortalama	Mod	Ortalama	Mod	Ortalama	Mod
475	M	7.3	7.25	7.4	7.25	7.4	7.25	7.4	7.25
	D	30	11.25	46	21.25	59	33.75	71	43.75
	E	1.4	1.3	1.5	1.3	1.5	0.9	1.4	1.5
2475	M	7.3	7.25	7.4	7.25	7.5	7.25	7.5	7.85
	D	28	11.25	47	21.25	62	76.25	74	81.25
	E	2	1.5	2.1	1.9	2	2.1	2	1.5

M=Deprem büyüklüğü, D=Uzaklık, E=Epsilon

Uzaklığa bağlı bazı küçük değişiklikler olmasına rağmen, mühendislik görüşüyle, 475 yıllık dönüş periyodundaki SD (10 s) değeri, yer hareketi tahmin denklemlerinden hesaplanan ortalama SD (10 s)'ye 1.3 değerinde standart sapma eklenerek bulunabilir. Aynı şekilde, 2475 yıllık dönüş periyodundaki SD (10 s) değeri de 2.0 değerinde standart sapma eklenerek hesaplanır. Yer hareketi tahmin değerleri için yeni nesil yer hareketi tahmin denklemleri kullanılabilir (http://peer.berkeley.edu/products/nga_project.html, Earthquake Spectra Special Issue on NGA, 2008).

7. BAĞIL ORTALAMA SPEKTRUM VE UYGUN YER HAREKETLERİ

Yapısal tepkiye önemli ölçüde etki eden bir dönem boyunca tepki spektral şeklinin elastik olmayan yapısal tepki ve davranış ile yakın biçimde karşılıklı ilişki içerisinde olduğu çok sayıda çalışma ile bulunmuştur. Önemli ölçüde etki eden dönem, yüksek-modlu etkiler ve elastik olmayan tepki sırasındaki sönümleme nedeniyle, asli yapısal dönemden sırasıyla kısa ve uzun dönemler içerebilir. Uygulamada, ihtimale dayalı bir tepki spektrumunu (eşit ya da yeknesak tehlike spektrumu, UHS) karşılamak üzere, tasarım amacıyla ya da deterministik senaryo depremi tasarım spektrumları için, deprem tehlikesi ayrıştırma temelinde zaman serileri dizinleri oluşturulur ve uygun GMPE'ler belirlenebilir. UHS'nin tek bir depremin yer hareketleri spektrumu olmadığına ve böylesi yapay bir şeklin fiziksel olarak gerçekleştirilemeyeceğine dikkat edilmesi gereklidir. Spektrum, aslında bir dizi depremin spektrumların zarfı olmasından dolayı aşırı konservatif olabilir.
Böylesi şartlar altında, verilen bir periyottaki spektral değer ve ilişkili ε ile şartlandırılmış bir spektrum tanımlamak rasyonel ve uygun olacaktır (Baker, 2008a, b ve 2011). Sonuç olarak ortaya çıkan hedef spektrum (Şartlandırılmış Ortalama Spektrum – Conditioned Mean Spectrum - CMS) ihtimale dayalı deprem tehlikesi ile yer hareketleri seçimi arasında tutarlılık sağlanır. Şartlandırılmış ortalama spektrum ayrıca farklı periyotlardaki spektral ivmeler arasındaki korelasyonun tam olmadığını da yansıtır, böylece eğer bir periyotta yüksek spektral

ivmelenme gözlenmişse, diğer periyotlarda da gözlenme ihtimali oldukça düşüktür. Özellikle yüksek periyotlu yapıların (yüksek bina ve asma köprü gibi) tasarımında şartlandırılmış ortalama spektrum önem kazanmıştır. Şartlandırılmış ortalama hedef spektrum şu maddelerle yapılandırılabilir: (1) Bir hedef Sa(T1) değeri seçilmesi, (2) Diğer periyotlardaki şartlandırılmış ortalama ε değerlerinin hesaplanması, verilen ε(T1) ve (3) Diğer periyotlardaki Sa değerlerinin hesaplanması, verilen M, R ve ε'ler. Şartlandırılmış ortalama spektrum hesaplamasında kullanılan adımlar Şekil 16'de özetlenmiştir.

1. Bir hedef büyüklük ve mesafe için tüm dönemlerdeki logaritmik spektral ivmelenmelerin standart sapmalarını hesaplayın:

$$\overline{\ln Sa}(M, R, T)$$

$$\sigma_{\ln Sa}(T)$$

2. T1 zamanında hedef ε hesaplayın (ayrıştırma ya da ters-hesaplama ile) (Not: T, örneğin (a) bölümünde 1.0-saniyelik dönem olarak gösterilmiştir) :

$$\varepsilon(T_1) = \frac{\ln Sa(T_1)^* - \overline{\ln Sa}(M, R, T)}{\sigma_{\ln Sa}(T_1)}$$

3. Diğer tüm dönemler için şartlandırılmış ortalama hesaplayın, ε (T_1) karşılıklı ilişki katsayısı, ρ, için NGA modellerinde Baker ve Jayaram tarafından verilmiştir (2008):

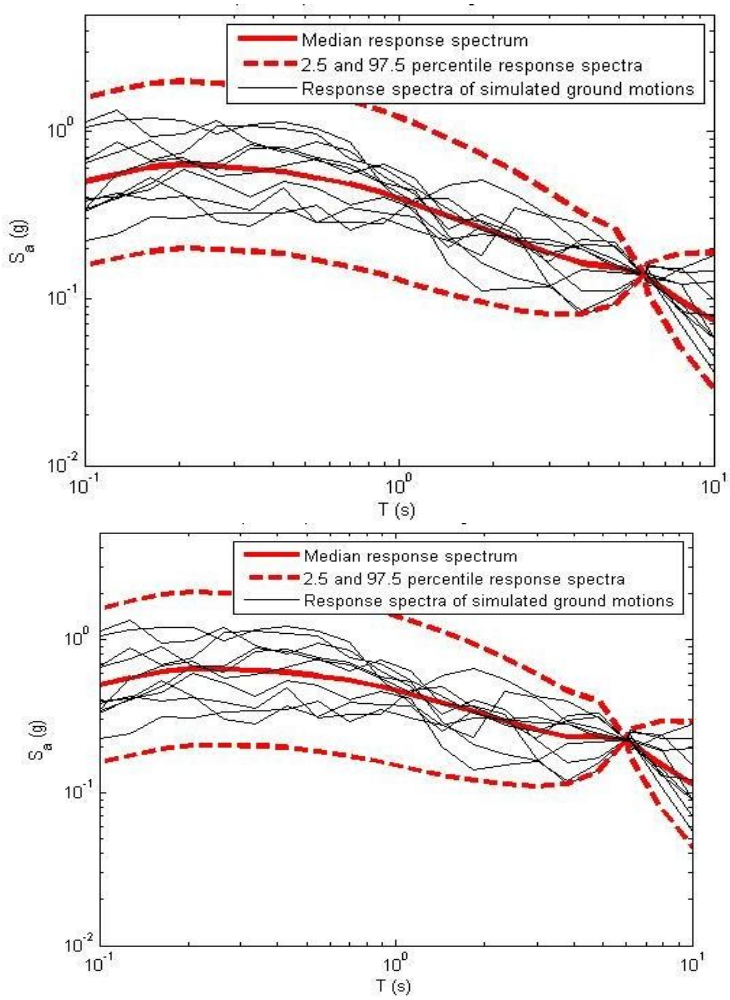
$$\varepsilon(T_2) = \rho\, \varepsilon(T_1)$$

4. Bu bilgiyi kullanarak, tüm dönemlerdeki spektral ivmelenmeleri hesaplayın:

$$\ln Sa(T_2)^* = \overline{\ln Sa}(M, R, T_2) + \sigma_{\ln Sa}(T_2)\, \varepsilon(T_2)$$

Şekil 16. Şartlandırılmış ortalama spektrum hesaplamasında kullanılan adımlar (Baker 2006'dan modifiye edilmiştir)

Baker Araştırma Grubu tarafından hazırlanan MATLAB esaslı yazılım, Campbell ve Bozorgnia (2008) yer hareket modeli temelinde, şartlandırılmış (yapısal ve bölgeye özel) yer hareketlerinin seçiminde kullanılabilir. Hedef ortalama ve ortak değişkenler, önceden tanımlanmış bir hedef senaryo depreme karşılık gelecek şekilde CMS yöntemi temelinde elde edilir. Hedef ortalama ve ortak değişkenler kullanıcı tarafından değiştirilebilir. NGA yer hareketleri için epsilonların karşılıklı ilişkilerinin hesaplanmasında kullanılan fonksiyon, 0,01 s ila 10 s kademesi üzerine oturtulmuş tam olarak ampiriktir. Yer hareketleri seçim algoritması, Jayaram ve arkadaşları tarafından açıklandığı gibi, tek bir gelişigüzel yer hareketi bileşeni (iki-boyutlu yapısal modellerde) ya da iki yer hareketi bileşeninin geometrik ortalaması (üç-boyutlu yapısal modeller için) temelinde olabilir (Baker, 2011).
Örnek olarak, 6 s periyodunda belirlenmiş iki değişik epsilon değerleri ile üretilmiş şartlandırılmış ortalama spektrumlar ve bu spektrum alt ve üst değerleri arasında ölçeklenerek elde edilmiş akselerogramların spektrumları Şekil 17'de sunulmuştur.



Şekil 17. Epsilon = 1.35 ve 2.0 için simülasyonu yapılmış yer hareketlerinin şartlandırılmış tepki spektrumları

8. UZUN PERİYOTLU YER HAREKETLERİNİN BENZEŞİMİ

Fay yakın sahası içinde yer hareketleri modern şartnamelerde yeterince yer almamaktadır. Ayrıca, ampirik yer hareketi veri bankası hayli sınırlı ve yer hareketi tahmin denklemleri, bu yer hareketlerinin hesaplanmasında deprem büyüklüğü ve uzaklığındaki boşluktan yetersiz kalmaktadır. Fay yakın sahası içindeki yer hareketlerinin davranış spektrumunun tanımlanmasında teknikler olmasına rağmen spektral uyumlu teknikler ön yönelimli pulslar üretmemektedirler. Ayrıca, bir tepki analizinden faz karakterini gerçekçi yansıtan üç bileşenli yer hareketi oluşturulamamaktadır.

Taban yalıtımlı bir yapının tasarım analizinde birincil problem yer hareketinin uzun periyotlu bileşenlerinin rasyonel bir şekilde ortaya konulmasıdır. Havza etkisi dışında, uzun periyotlu yer hareketlerini etkileyen en önemli faktör yakın saha etkilerine bağlı ön kırılım yönelim etkisidir (Durukal ve Erdik, 2006).

Bu belirsizlik ve eksiklikler, teorik benzeşim modellerinin kullanılmasının önünü açmıştır. Taban yalıtımlı binaların periyotlarında (2-4s), yakın saha içindeki yer hareketleri, verilen fay kırılma karakteristikleri için deterministik yaklaşımda teorik benzeşim modelleriyle tespit edilebilmektedir. Bu simülasyonlar, taban yalıtımlı

yapıları kapsayan periyot aralığında uygun amplitüd ve faz karakterinde gerçekçi üç eksenli yer hareketleri üretebilirler. Stokastik yaklaşımlarla simüle edilen yer hareketlerine yüksek frekanslı yer hareketleri eklenebilir. Bahsedilen yaklaşım Erzurum'un güneydoğusunda deprem yalıtım tekniği kullanılarak inşa edilen Erzurum Bölge Eğitim ve araştırma Hastanesi'nde ele alınmıştır. Hastanenin en büyük deprem etkisi altında bile kullanılabilir kalması istenmiştir. Sadece, gelişmekte olan taban yalıtım tekniği böyle bir performans kriterini sağlayabilir. Taban yalıtımlı binaların depreme karşı tasarımı uluslararası uygulamalarla bir çok yönetmelikle düzenlenmektedir. Deprem tehlike analizlerinin ve tasarıma bağlı yer hareketlerinin tanımlanması bu yönetmeliklere intibak ettirilmelidir.

Günümüzde tüm frekans aralığı ve istenilen depreme uzaklık için yer hareketleri simüle edilebilmektedirler. Simülasyon ve tahmin teknikleri uygun bir biçimde zemin etkilerini, yakın ve uzak saha etkilerini sonlu faylar için hesaba katabilmektedirler.

Kinematik modelleme yaklaşımı; belli boyut ve oryantasyondaki faydan, belirli zemin koşulları için yer hareketi simülasyonu yapabilmektedir. Bu yaklaşım, dalga yayılım etkisini göz önünde bulundurarak zemine bağlı simülasyonlarda oldukça etkilidir. Bu yaklaşımda, kırılma, fay düzlemi üzerinde varsayılan yırtılma fonksiyonuyla modellenmektedir; daha sonra Elastodinamik temsil teoremi kullanılarak yer hareketi üretilmektedir (Aki ve Richards, 1980). Yırtılma fonksiyonuna ve/veya Green fonksiyonuna bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.

9. SONUÇLAR

Yer hareketlerinin benzeşimi konusunda bir çok fiziksel modeller ve buna bağlı nümerik teknikler olmasına rağmen, tasarım için tutarlı sonuçlar vermemektedirler ve bunların rastgele kullanımı gerçekçi yer hareket tahminlerini yakalayamamaktadır. Deplasmana dayalı tasarım yönteminde uzun periyotlardaki yer hareketlerinin tanımlanması oldukça önem kazanmıştır.

Özellikle fay yakın sahası içinde uzun periyotlu yer hareketlerinin değerlendirmesinde sağlam ve güvenilir tekniklerin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda; (1) 2-10 s arasındaki uzun periyotlarda tasarım spektrumlarının modifikasyonları için gerekli esaslar; (2) uzun periyotlu yer hareketlerinin zaman tanım alanında simülasyonu için gerekli ilkeleri ve (3) uzun periyot etkisini hesaba katacak yer hareketi kayıtlarının seçilmesi ve ölçeklendirilmesi için gerekli kuralları göz önünde bulundurulmalıdır.
uzun periyot sınırlarında tasarım spektrumunun modifikasyonu için gerekli esasları; uzun periyotlu yer hareketlerinin zaman tanım alanında simülasyonu için gerekli ilkeleri ve uzun periyot etkisi göz önünde bulunduracak yer hareketi kayıtlarının seçimi ve ölçeklendirilmesi için gerekli kuralları kapsamaktadır.

REFERANSLAR

Aki, K., Richards, P.G.,(1980). Quantitative Seismology, Freeman and Co., New York.

Akkar S, Bommer JJ. (2007), Empirical prediction equations for peak ground velocity derived from strong-motion records from Europe and the Middle East. Bulletin of the Seismological Society of America; 97(2).

Akkar, S., H. Sucuoglu & A. Yakut (2005), Displacement-based fragility functions for low- and mid-rise ordinary concrete buildings. Earthquake Spectra, 21(4), 901-927.

Ambraseys, N. N, Simpson, K. A. and Bommer, J. J. (1996). Prediction of horizontal response spectra in Europe. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 25, pp. 371 - 400.

Baker, J.W., (2006), Breaking the uniform hazard spectrum into component events: The effect of epsilon on response spectra and structural response: Preprinted presentation from 2006 COSMOS Technical Session entitled "An Evaluation of Methods for the Selection and Scaling of Ground Motion Time series for Building Code and Performance-Based Earthquake Engineering Applications," sponsored by Consortium of Organizations for Strong-Motion Observation Systems and Pacific Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, California, November. http://www.cosmos-eq.org/presentations/TS2006/6-Baker.pdf

Baker, J. W. (2007). Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 97, pp. 1486–1501.

Baker, J.W., Cornell, C.A. (2008a), Vector-valued intensity measures incorporating spectral shape for prediction of structural response: Journal of Earthquake Engineering, Cilt 12, Iss 4, Sayfa 534-554.

Baker, J.W., Jayaram, N. (2008b), Correlation of spectral acceleration values from NGA ground motion models: Earthquake Spectra, Cilt 24, Sayı 1, Sayfa 299-317.

Baker, J. W. (2011), Conditional Mean Spectrum: Tool for ground motion selection. Journal of Structural Engineering, 137(3), 322-331. http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000215.

Bazzurro, P., and Cornell, C.A., On Disaggregation of Seismic Hazard, Bulletin of Seismological Society of America, B.S.S.A., Vol. 89, No.2, pp. 501-520, April, 1999.

Beresnev, I. and G. Atkinson (1997), Modeling Finite Fault Radiation from the n Spectrum, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 87, 67-84.

Beresnev, I. A. (2001), What we can and cannot learn about earthquake sources from the spectra of seismic waves, Bull. Seismol. Soc. Am. 91, 397–400.

Bommer JJ, Elnashai AS (1999). Displacement spectra for seismic design. J Earthquake Engng; 3(1):1–32.

Bommer, J. J., Elnashai, A. S., and Weir, A. G. (2000). Compatible acceleration and displacement spectra for seismic design codes. Proc., 12th World Conf. on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, New Zealand Society for Earthquake Engineering, Inc., Wellington, New Zealand, Paper No. 207.

Campbell, K.W. and Bozorgnia, Y. (2008), NGA ground motion model for the geometric mean horizontal component of PGA, PGV, PGD and 5% damped linear elastic response spectra for periods ranging from 0.01 to 10 s. Earthquake Spectra 24, 139–171.

Cauzzi,C., E.Faccioli and R. Paolucci (2007), A Reference Model For Prediction Of Long Period Response Spectral Ordinates - Deliverable D2 (Task 1), Politecnico di Milano.

Durukal,E and M. Erdik (2006). Characterization Of Strong Ground Motion For The Design Of Seismically Isolated Structures For Near-Fault Conditions, Proceedings Of The 4th World Conference On Structural Control And Monitoring, International Association For Structural Control And Monitoring, San Diego, Ca, Paper No: 234.

Earthquake Spectra Issue about NGA (2008), Volume 24, Issue 1 , pp. 1-341.

EC-8 (1998). Design Provisions for Earthquake Resistance of Structure, Eurocode-8, European Committee for Standardization.

EC8 (2003). Design Provisions for Earthquake Resistance of Structures Publication ENV-2003-2, Comite European de Normalizations, Brussels.
Erdik M., Durukal E (2002). Simulation Modelling of Strong Ground Motion, in Earthquake Engineering Handbook, W-F. Chen and C Scawthorn, editors, CRC Press.

Erdik, M. and E. Durukal (2003), Simulation modeling of strong ground motion, in Earthquake Engineering Handbook, W. F. Chen and C. Scawthorn, CRC Press.

Faccioli E, Paolucci R, Rey J (2004) Displacement spectra for long periods. Earthquake Spectra 20:347-376.

Fu, Q. and Menun, C. (2004). Seismic-environment-based simulation of near-fault ground motions. Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, 1–6 August, 15 pp.

Gregor, N. J. and Bolt, B. A. (1997). Peak strong motion attenuation relations for horizontal and vertical ground displacements. Journal of Earthquake Engineering, Vol. 1, No. 2, pp. 275-292.

Gregor, N. J., Silva, W. J., Wong, I. G. and Youngs, R. R. (2002). Ground-motion Attenuation Relationship for Cascadia Subduction Zone Megathrust Earthquake Based on a Stochastic Finite-fault Model. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 92, pp. 1923-1932.

Hanks, T. C. and Kanamori, H. (1979). A moment magnitude scale. Journal of Geophysical Research, Vol. 84, No. B5, pp. 2348-2350.

IBC (2006), International Building Code, International Code Council, Virginia, USA.

Mavroeidis, G. P., and Papageorgiou, A. S. (2003), A mathematical representation of near-fault ground motions. Bull. Seismol. Soc. Am., 93(3), 1099–1131.

NEHRP (2003), 2003 NEHRP Recommended Provisions for New Buildings and Other Structures (FEMA 450), Building Seismic Safety Council, The National Institute of Building Sciences, USA.

Priestley MJN (2003) Myths and fallacies in earthquake engineering, Revisited. IUSS Press, Pavia (Italy).
Priestley MJN, Calvi GM, Kowalsky MJ (2007) Displacement-based seismic design of structures. IUSS Press, Pavia, Italy, 720 pp.

Somerville, P. G., Smith, N. F., Graves, R.W. and Abrahamson, N.A. (1997). Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity. Seismological Research Letters, Vol. 68, No. (1), pp. 199-222.

Somerville, P. G. (2003). Magnitude scaling of the near fault rupture directivity pulse. Physics of the Earth and Planetary Interiors, Vol. 137, pp. 201-212.

Somerville, G. P. (2004). Near Fault Directivity Pulse Model: Development and Application in Scenario and Probabilistic Maps of Pulse Parameters in the San Francisco Bay Area, URS Greiner Woodward Clyde.

Tolis, S., and Faccioli, E., 1999. Displacement design spectra, *J. Earthquake Eng.* **3**, 107–125.

Tromans, I. J. and Bommer, J. J. (2002). The attenuation of strong-motion peaks in Europe. Proceeding of the 12th European Conference on Earthquake Engineering, London, paper no. 394.

Veletsos, A. S. and Newmark, N. M. (1964). Response spectra for single-degree-of-freedom elastic and inelastic systems. Rept. No. RTD-TDR-63-3096, Vol. III, Air Force Weapons Lab., Albuquerque, N. Mexico.