

MARMARA BÖLGESİNİN KUVVETLİ YER HAREKETİ AZALIM İLİŞKİSİ MODELİ

STRONG GROUND MOTION ATTENUATION RELATIONSHIP MODEL FOR MARMARA REGION

Çeken U.⁻¹, Beyhan G.⁻¹, Tüzel B.⁻¹

Posta Adresi: ¹Afet İşleri Genel Müdürlüğü Deprem Araştırma Dairesi, Eskişehir Yolu 12. km. Lodumlu/Ankara

E-posta: ceken@deprem.gov.tr

Anahtar Kelimeler: deprem, kuvvetli yer hareketi, azalım ilişkisi, regresyon analiz

ÖZ Bu çalışmada, bölgesel bazda ve aynı tektonik oluşumda alınan ivme kayıtlarının mesafe, magnitüd ve yerel zemin koşullarının bir fonksiyonu olarak, Marmara Bölgesi için bir matematiksel bağıntı geliştirilmiştir. Bunun için, 1983 yılından günümüze kadar olan zaman aralığında, koordinatları 40-42° Kuzey enlemleri ve 26-32° Doğu boylamları arasında kalan bölgenin, deprem etkinliği kuvvetli yer hareketi kayıtları ile incelenmiştir. Bu zaman diliminde bölgede meydana gelen, büyüklüğü 4.0 ve üzeri 128 depremden alınan toplam 721 ivme kaydı, diğer deprem parametreleri ile birlikte değerlendirilmiştir. Yapılan analizde, bazı kurumlar tarafından (AFET-DAD, KRDAE ve İTÜ) bölgede konumlandırılmış 87 farklı noktadaki istasyondan alınan ivme kayıtları kullanılmıştır. Kayıt alınan noktaların zemin koşulları, üst 30 metredeki ortalama kayma-dalgası hız kriterine göre kategorize edilmiştir. Bölgede meydana gelen diğer depremlerle beraber, özellikle 1999 yılında oluşan iki tahripkar deprem sırasında ve sonrasında kaydedilen ana şok ve artçı şok ivme kayıtları, bölge için yapılan model çalışmasında kullanılmıştır. Ülkemizde ilk defa bu yoğunlukta alınan kayıtlarla, bölge için zengin bir veri kataloğu oluşturulmuştur. Hazırlanan veri seti kullanılarak, en büyük yatay yer ivmesi ve %5 sönüme karşılık gelen elastik spektral ivmelerin; depremin büyüklüğü, uzaklığı ve yerel zemin koşullarının bir fonksiyonu olarak, en iyi istatistiksel uyumu sağlamak için birkaç matematiksel model uygulanmıştır. Çalışma sonunda, çoklu regresyon analiz yöntemi kullanılarak Marmara bölgesi için yeni ve güncel ivme azalım ilişkisi modeli geliştirilmiştir.

ABSTRACT In this study, a new and up-to-date strong-motion attenuation relationship is developed for Marmara region as a function of distance, magnitude and local site conditions. Therefore, earthquake activity in the rectangular region bounded by 40-42° North latitudes and 26-32° East longitudes are examined with strong motion records from 1983 to the present time. 721 acceleration records taken from 128 earthquakes with magnitudes equal or greater than 4.0 are taken into consideration with other earthquake parameters. Acceleration records taken from 87 different locations installed in the region by some institutions (AFET-DAD, KOERI and ITU) are used in this analysis. Local soil conditions are categorized according to average shear-wave velocity within 30 m of the surface. Together with other earthquakes occurred in this region, main shock and aftershock records taken from two destructive earthquakes occurred in 1999 are used in model studies for the region. Great number of records obtained for the first time in our country form a powerful data base. Therefore, a number of mathematical models are applied to obtain best statistical fit to peak ground acceleration and 5% damped elastic spectral accelerations as a function of earthquake magnitude, distance and local site conditions. As a result, up-to-date ground acceleration attenuation model is developed for Marmara region by using multiple regression method.

GİRİŞ

Bu çalışma, Türkiye'nin önemli deprem kuşaklarından olan ve Anadolu'yu D-B yönünde kat eden, Kuzey Anadolu Fayı Sistemi (KAFS)'nin ana yapısal unsurlarından olan Kuzeybatı Anadolu kesimini kapsamaktadır. Çalışma kapsamında, Marmara Bölgesinde farklı kurumlar tarafından (Afet İşleri Genel Müdürlüğü Deprem Araştırma Dairesi, Kandilli Rasathanesi Deprem Araş. Enst. ve İTÜ) işletilmekte olan ivme-ölçer ağlarından elde edilen ivme kayıtları kullanılmıştır. Çalışma bölgesinde, meydana gelen depremlere ait parametreler yeniden incelenmiştir. İstatistik regresyon analiz yöntemi kullanılarak, Marmara bölgesi için yeni ve güncel deprem ivme azalım ilişkisi modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen modelin, yerli ve yabancı sönüm denklemleriyle bazı karşılaştırmaları yapılarak elde edilen sonuçların güvenilirliği görülmüştür.

MODEL PARAMETRELERİ

Çalışma kapsamında, 1983 yılından günümüze (2007) kadar Marmara bölgesinde meydana gelen depremlerden, farklı zemin koşullarında alınan ivme kayıtları kullanılmıştır. Sayısal veriler, 0.2 Hz Low-Cut ve 25 Hz High-Cut frekans aralığında Butterworth-Band geçişli filtre penceresinden geçirilerek incelenmiştir. Kayıtlarda görülen temel çizgisi düzeltmesi (base line correction) giderildikten sonra değerlendirilmiştir. Literatürde yaygın kullanıldığı biçimiyle, pik yer ivmesi (PGA: Peak Ground Acceleration) ve spektral ivme (PSA: pseudo spectral acceleration) tanımlanmıştır. İvme kayıtları için eşik değer ($PGA \geq 1\text{cm/sn}^2$) kabul edilen ve üzeri değerlerden oluşan bir veri kataloğu oluşturulmuştur.

Magnitüd; bölgedeki istasyonların yoğunluğu ve sistematik bir hata öngörüsü ile, genellikle tek kurum (KRDAE) katalog bilgisi (Kalafat vd., 2000) tercih edilmiştir. Bu kataloglarda ise, çoğunlukla süreye bağlı (M_d) magnitüd yer almaktadır. Farklı magnitüd ölçekleri arasında, gerek bu çalışma ve gerekse literatürdeki çalışmalarla geliştirilen ampirik dönüşüm bağıntılarıyla, iki magnitüd ölçeği (M_D ve M_W) belirlenmiştir. PGA için magnitüd aralığı $4.0 \leq M_D - M_W \leq 7.6$, PSA ve ikinci bir PGA modeli için $5.0 \leq M_W \leq 7.6$ aralığındaki depremler kullanılmıştır.

Mesafe; deprem kaynağı ile gözlenen yer arasındaki uzaklık için, kayıt istasyonu ile fay kırığının yer yüzeyindeki izine en yakın mesafe (R_{rup}) tanımı kullanılmıştır. Uzun yüzey kırığı, sığ ve büyük depremlerle oluşacağı ve küçük depremler için zaten böyle bir tanımlama gerekmediğinden, yüzey kırığı oluşturmayan (belirlenemeyen) depremler için, episantr (R_{epi}) mesafesi esas alınmıştır.

Zemin etkisi: İstasyonların bulunduğu zemin şartlarını belirlemede, üst 30 m derinlik için ortalama kayma-dalgası hızına (V_{S30}) göre değerlendirme yapılmıştır. Kayıtların bulunduğu zemin koşulları, Türkiye Deprem Yönetmeliği (TDY-2007)'nde belirtilen zemin parametrelerine (dört kategoride; A:kaya, B:sert zemin, C:yumuşak ve D:çok yumuşak zemin) göre tanımlanmıştır. Bunun için, istasyon yerlerinde yapılan sismik deneyler, kurumların verdiği zemin sınıfı bilgileri ve arazi gözlemleri birlikte değerlendirilmiştir. Yerinde belirlenen ve tahmin edilen kayma-dalgası hızı, Yönetmelikte belirtilen değerlerle ilişkilendirilerek, zemin şartlarının belirlenmesi için zemin indeks değişkenleri tanımlanmıştır.

Kullanılan veri seti, Kuzey Anadolu Fay sisteminin (KAFS), kuzeybatı kesimini kapsamaktadır. Dolayısıyla, aynı deprem karakteristiğine sahip bölgede alınan ivme kayıtları için, fay türüne ilişkin ayrı bir parametre kullanılmamıştır.

ÖNERİLEN AZALIM İLİŞKİSİ MODELİ

Önerilen azalım ilişkisi, en büyük yatay yer ivmesi (PGA) ve %5 sönüm spektral ivme (PSA) değerleri için geliştirilmiştir. PGA için, üç farklı model önerilmiştir. Aynı veri grubu ile M_D ve M_W magnitüd ölçeklerine göre, PGA için eşik değer 0,005g (5 gal), magnitüd $4.0 \leq M_D - M_W < 7.6$ ve mesafe 1-200 km aralığındadır. PGA analizinde, 87 depremden alınan toplam 410 ivme kaydı kullanılmıştır (Model-1 ve Model-2). PGA için Model-1'de ki önerilen bağıntıya alternatif, ikinci bir model (Model-3) önerilmiştir. Model-3'te kullanılan veri grubu, Model-1'e göre mesafe, magnitüd ve kayıt sayısı açısından daha sınırlıdır. Model-3, daha çok yakın mesafe ve büyük depremlerle karakterize edilmektedir. Model-3 için kullanılan veri seti, aynı zamanda PSA azalım modelinde kullanılan aynı veri grubundan oluşmaktadır. PSA için veri kriterleri, $\geq 0,010$ g eşik ivme değeri, magnitüd aralığı $5.0 \leq M_W < 7.6$ ve mesafe 1-100 km ile sınırlıdır. PSA regresyon analizinde, 24 depremden alınmış toplam 127 ivme kaydı kullanılmıştır.

Önerilen azalım ilişkisi modeli, logaritmik bir formda olup, aşağıdaki biçimde ifade edilmektedir;

$$\text{Log}_{10} (\text{PGA/PSA}) = c_1 + c_2 M + c_3 M^2 + c_4 \text{Log}_{10} (R) + c_5 S_B + c_6 S_C + c_7 S_D + \sigma$$

$$R = (R_{rup}^2 + h^2)^{1/2}$$

Burada; PGA: en büyük yatay ivme değeri ($\text{cm/sn}^2 = \text{gal}$), PSA: pseudo spektral ivme (cm/sn^2), C_{1-7} : regresyon katsayılar, M: magnitüd, S_B , S_C ve S_D sırasıyla; A-B, C ve D grubu zeminler için indeks değişkenleri (A grubu zemini temsil eden veri sayısı az sayıda (13) olduğu için, A ve B grubu zeminler birlikte değerlendirilmiştir), R: Mesafe (km), R_{rup} : yüzey kırığına olan en yakın mesafe (yüzey kırığı oluşturmayan veya belirlenemeyen depremler için, episantr (R_{epi}) mesafesi esas alınmıştır), h: regresyonla sağlanan bir değer ve σ : standart sapmadır.

PGA'nin moment magnitüd (M_W) ve süreye bağlı magnitüd (M_D) için üç (Model-1; Model-2 ve Model-3) ve PSA için sadece M_W magnitüd ölçeğine göre bir (Model-4) olmak üzere dört farklı model önerilmiştir. PGA ve PSA için, önerilen azalım ilişkisi modelleri, değişken katsayıları ve diğer istatistik parametrelerle beraber aşağıda verilmiştir.

Model -1: PGA'nin moment magnitüd ($M_W \geq 4$,) ve $R=1-200\text{km}$ için regresyon katsayıları,

$$c_1 = -0.013, c_2 = 0.698, c_3 = -0.029, c_4 = -0.922, c_5 = -0.145, c_6 = -0.059, c_7 = 0.041, h_1 = 5.892, \sigma_1 = 0,2994 \text{ ve korelasyon katsayısı } (r) = 0,766,$$

Zemin grubu, A-B için: $S_B = 1$ ve $S_C = S_D = 0$; C için: $S_C = 1$ ve $S_B = S_D = 0$ ve D için: $S_D = 1$ ve $S_B = S_C = 0$

Model -2: PGA'nin süreye bağlı magnitüd ($M_D \geq 4$) ve $R=1-200$ km için regresyon katsayıları,

$$c_1 = -0.072, c_2 = 0.736, c_3 = -0.028, c_4 = -0.977, c_5 = -0.156, c_6 = -0.064, c_7 = 0.031, h_2 = 6.441, \sigma_2 = 0,313 \text{ ve korelasyon katsayısı } (r) = 0,764$$

Model -3: PGA'nin moment magnitüd ($M_W \geq 5.0$) ve $R=1-100$ km için regresyon katsayıları,

$$c_1 = -2.680, c_2 = 1.566, c_3 = -0.097, c_4 = -0.903, c_5 = -0.125, c_6 = 0.066, c_7 = 0.101, h_4 = 8.927, \sigma_4 = 0,290 \text{ ve } r_4 = 0,775$$

Model -4: PSA'nin moment magnitüd ($M_W \geq 5.0$) ve $R=1-100$ km için regresyon katsayıları, C_{1-7} : Katsayılar (farklı periyod değerleri için) (Tablo 1),

Bu çalışmada geliştirilen PGA ve PSA azalım ilişkisi modelleri; ülkemiz için önerilen ve mevcut veri tabanı ile uyumlu olan, Özbey vd. (2003), Ulusay vd. (2004), Kalkan ve Gülkan (2004) modelleri ile başka ülkeler için geliştirilmiş ve ülkemiz için uygun olduğu düşünülen ve yaygın kullanılan bazı önemli azalım ilişkileri (Boore vd., 1997 ve Sadigh vd., 1997) ile karşılaştırılmıştır. PGA için iki zemin grubuna (A-B ve D) göre, 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi ana şoku sırasında alınan kayıtlarla bir değerlendirme yapılmıştır (Şekil 1). PSA (%5 sönüm) için, Kocaeli depremi ve 12 Kasım 1999 Düzce Depremleri ana şokları sırasında, Sakarya (zemin:A-B) ve Düzce (zemin:D) istasyonlarında kaydedilen D-B bileşenlerin tepki spektrumlarının, TDY-2007 elastik davranış spektrumları ile karşılaştırılmıştır (Şekil 2).

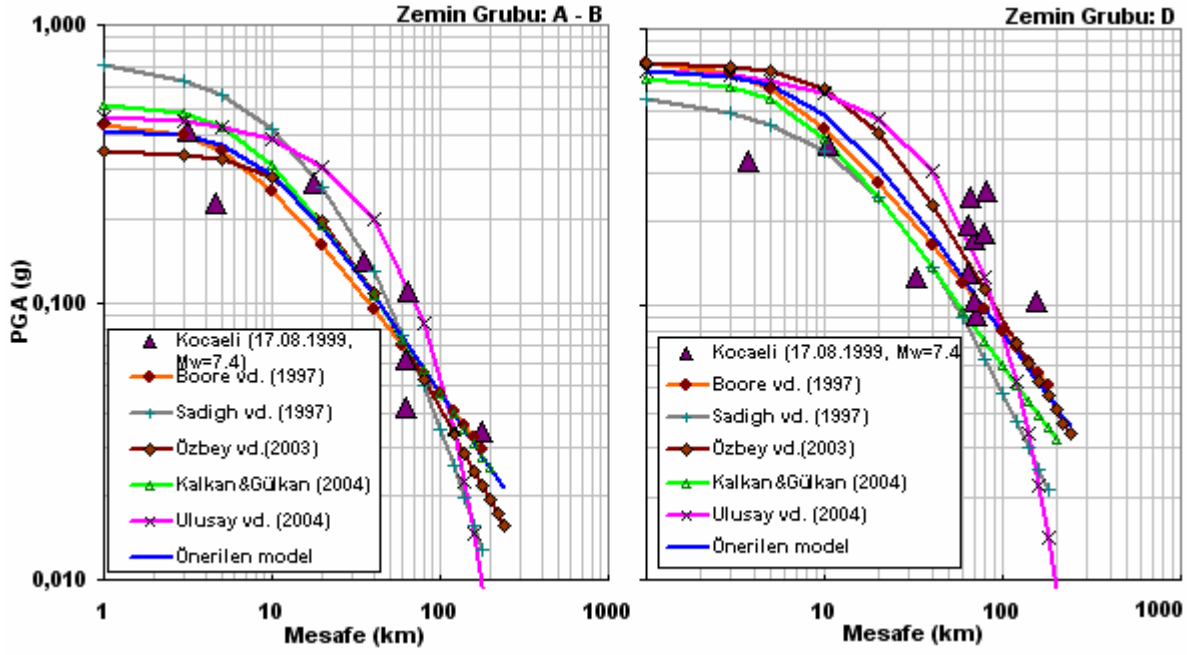
Tablo 1. PGA ve PSA (%5 sönüm)' ün farklı periyot değerleri için azalım ilişkisi ($R \leq 100$ km ve M_w 5.0-7.5 aralığı için kullanılabilir)

$$\text{Log}_{10}(\text{PGA/PSA}) = c_1 + c_2 M_w + c_3 M_w^2 + c_4 \text{Log}_{10}(R) + c_5 S_B + c_6 S_C + c_7 S_D + \sigma$$

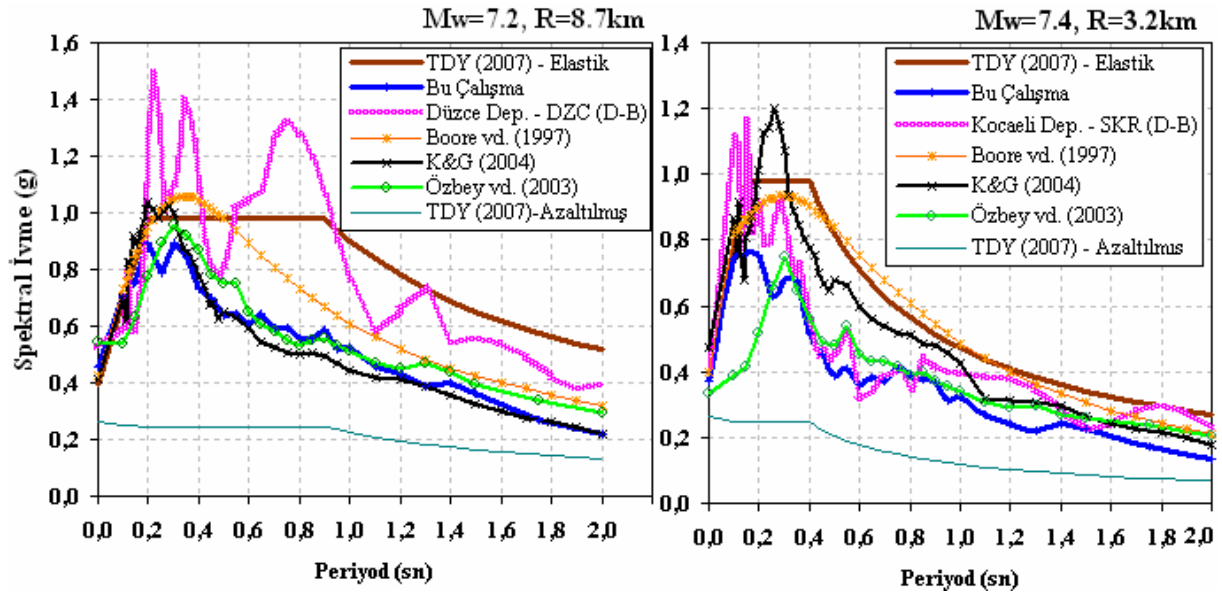
$$R = (R_{rup}^2 + h^2)^{1/2}$$

Periyot (sn)	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	h	σ	r
PGA	-2,680	1,566	-0,097	-0,903	-0,125	0,066	0,101	8,927	0,290	0,775
0,10	-2,529	1,657	-0,108	-0,977	0,000	0,112	0,107	8,941	0,292	0,764
0,15	-1,063	1,140	-0,066	-0,831	-0,096	0,105	0,047	8,377	0,305	0,731
0,20	-1,984	1,434	-0,087	-0,813	-0,204	0,004	0,000	8,820	0,315	0,734
•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
1,00	-5,805	2,141	-0,124	-0,663	-0,241	-0,063	0,191	4,879	0,393	0,792
1,10	-6,323	2,272	-0,134	-0,648	-0,240	-0,001	0,211	4,790	0,401	0,787
•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
2,00	-8,332	2,766	-0,166	-0,719	-0,345	-0,086	0,083	5,714	0,421	0,813
2,25	-9,562	3,129	-0,194	-0,721	-0,369	-0,108	0,061	6,579	0,415	0,822
•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
3,50	-6,396	1,941	-0,089	-0,805	-0,357	-0,092	-0,035	8,105	0,424	0,854
4,00	-6,545	1,969	-0,090	-0,782	-0,436	-0,160	-0,147	7,931	0,428	0,856

(Not: Tüm periyot katsayıları ve detay için referans; Çeken, 2007)



Şekil-1. A-B (solda) ve D (sağda) grubu zeminler için önerilen azalım modelinin diğer sönüm eğrileriyle birlikte, 1999 Kocaeli depreminde ölçülen pik ivmelerle karşılaştırılması



Şekil-2. TDY-2007 elastik tasarım ivme spektrumu ile önerilen ve örnek modellerin DZC (solda) ve SKR (sağda) kaydı ile karşılaştırılması (DZC zemin=D; SKR zemin, A-B)

SONUÇ

Marmara bölgesine için geliştirilen azalım ilişkisi modeli, bölgede alınan kuvvetli hareket kayıtlarını temsil eder niteliktedir. Ayrıca, yerli ve yabancı sönüm denklemleriyle yapılan karşılaştırmalarda, uyumlu ve güvenilir sonuçlar alınmıştır. Bu açıdan, önerilen modelin bölge için yapılacak mühendislik uygulamalarında, çeşitli tahmin ve tehlike analizlerinde kullanılabileceği gibi, Türkiye geneli için de bir alternatif oluşturacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

Boore, D. M., Joyner W. B. and Fumal, T. E. 1997. Equations for estimating horizontal response spectra and peak acceleration from Western North American earthquakes: A Summary of recent work. **Seismological Research Letters**, 68 (1), 128-153.

Çeken, 2007. Marmara Bölgesinin Kuvvetli Yer Hareketi Azalım İlişkisi Modeli, **Yüksek Lisans Tezi**, Jeofizik Müh. Bölümü, Sakarya Üni., Haziran 2007, Sakarya.

Kalafat, D., Öz, G., Kara, M., Öğütçü, Z., Kılıç, K., Pınar, A. ve Yılmaz, M. 2000. 1981-1997 Türkiye ve Dolayları Deprem Kataloğu ($M \geq 4.0$). **B.Ü. Yayını**, İstanbul.

Kalkan, E., and Gülkan, P., 2004. Site-Dependent Spectra Derived from Ground Motion Records in Turkey, **Earthquake Spectra** Vol.20, No.4, Nov. 2004.

Özbey, C., SARI, A., Manuel, L., Erdik, M. and Fahjan, Y. 2003. Empirical Strong Ground Motion Attenuation Relations for Northwestern Turkey. Fifth National Conference on Earthquake Engineering, Istanbul, Turkey.

Sadigh, K., Chang, S. Y., Egan, J. A., Makdisi, F. and Youngs, R. R., 1997. Attenuation relationships for shallow crustal earthquakes based on California strong motion data. **Seismological Research Letters**, V: 68, No: 1, p: 180-189.

TDY-2007. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara, 2007.

Ulusay, R., Tuncay, E., Sönmez, H. and Gökceoğlu, C. 2004. An Attenuation relationship based on Turkish strong motion data and iso-acceleration map of Turkey. **Engineering Geology**, 74, 265-291.