TÜRKİYE İÇİN GELİŞTİRİLEN YENİ BİR YER HAREKETİ TAHMİN DENKLEMİ VE BU DENKLEMİN ORTA DOĞU BÖLGESİ İÇİN YAPILACAK SİSMİK TEHLİKE ÇALIŞMALARINA UYGUNLUĞUNUN TEST EDİLMESİ

Ö. Kale[1] ve S. Akkar[2]

[1] *Araştırma Görevlisi, İnşaat Müh. Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara*
[2] *Profesör, İnşaat Müh. Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara*
Email: ozkankale@gmail.com

ÖZET:

Bu çalışmada, EMME (Earthquake Model of the Middle East, http://emme-gem.org/) projesi kapsamında derlenen kuvvetli yer hareketi veri tabanı kullanılarak Türkiye için geliştirilmiş yeni bir yerel yer hareketi tahmin denklemi sunulmaktadır. Bu tahmin denklemi, (a) 178 farklı depremden kaydedilen 692 kuvvetli yer hareketi ivme kaydını içeren güncel bir veri tabanı kullanarak, (b) magnitüd uygulanabilirlik bandını genişleterek (M_w=4.0-7.6 arası), (c) Sandıkkaya vd. (2013) tarafından önerilen, Avrupa ve Orta Doğu bölgeleri için geçerli doğrusal olmayan yeni bir zemin modeli göz önüne alarak Akkar ve Çağnan (2010) çalışmasında önerilen modelin yerini almıştır. Modelde mesafe türü olarak fay kırığının yüzeysel projeksiyonuna en yakın mesafeyi temsil eden Joyner-Boore mesafesi kullanılmıştır ve üst limit olarak 200 km seçilmiştir. Tahmin denkleminden doğrultu atımlı, ters ve normal faylar için geometrik ortalama maksimum yer hızı, maksimum yer ivmesi ve 0.01 s ile 4.0 s arasında seçilen değişik periyotlar için yalancı spektral ivme değerleri elde edilebilmektedir. Genişletilmiş bir veri tabanı kullanılması ve son güncellemelere göre iyileştirilen katalog bilgileri rassal değişkenliğin de (deprem içi ve depremler arası değişkenlik) düşürülmesini sağlamıştır. Çalışma kapsamında, türetilen denklem EMME kuvvetli yer hareketi veri tabanı kullanılarak literatürdeki yöntemlere göre test edilmiş ve bu denklemin Orta Doğu ülkelerinde yapılacak sismik tehlike çalışmalarında kullanılabilirliği araştırılmıştır.

ANAHTAR KELİMELER : Yer hareketi tahmin denklemi, kuvvetli yer hareketi ivme kaydı, sismik tehlike

1. GİRİŞ

Türkiye'de ilk deprem kaydı 1973 yılında kurulan kuvvetli yer hareketi istasyonlarından, 19 Ağustos 1976'da meydana gelen Denizli depreminde kaydedilmiştir (Akkar vd., 2010). Yer hareketi verileri kullanılarak türetilen ilk tahmin denklemi ise Aydan vd. (1996) çalışmasında sunulmuştur. Bu denklem sınırlı sayıda yer hareketi kaydı içeren bir veri tabanı kullanılarak maksimum yer ivmesi (PGA) için türetilmiştir. Türkiye'deki kuvvetli yer hareketi veri sayısı 1999 yılında meydana gelen Kocaeli ve Düzce depremlerinden sonra ciddi şekilde artmıştır. Bundan sonra Schwarz vd. (2002) ve Gülkan ve Kalkan (2002) çalışmalarında iki yeni tahmin denklemi daha önerilmiştir. Bu denklemler PGA ve 2.0 s'ye kadar spektral ivme (PSA) tahminleri için türetilmişlerdir. Bu modellerin içinde, ilk olarak Gülkan ve Kalkan (2002) denkleminde moment magnitüd (M_w) ve genişletilmiş kaynak mesafe türü (R_{JB}: fay kırığının yüzeydeki projeksiyonuna en yakın mesafe) kullanılmıştır. 2004 yılında, yeni yer hareketi tahmin denklemleri Ulusay vd. (2004), Özbey vd. (2004) ve Kalkan ve Gülkan (2004) (buradan itibaren sırasıyla Uvd04, Ovd04 ve KG04 olarak anılacaklardır) çalışmalarında önerilmişlerdir. Bu üç tahmin denleminin genel özelliklerine bakıldığında, KG04 ve Ovd04 modelleri Uvd04 modeline göre daha üstün sayılabilmektedir çünkü bu model sadece maksimum yer ivmesi tahminleri yapmakta ve çalışmasında sismik tehlike analizlerinde yer hareketi modellerinin uygulanabilmesi için gerekli olan standard sapma değerini vermemektedir. Daha sonraki yıllarda Bindi vd. (2007) ve Ulutaş ve Özer (2010) tarafından önerilen tahmin denklemlerinin genel

özelliklerine bakıldığında (Douglas, 2011) bu modellerin KG04 ve Ovd04 modelleri kadar gelişmiş olmadıkları görülür.

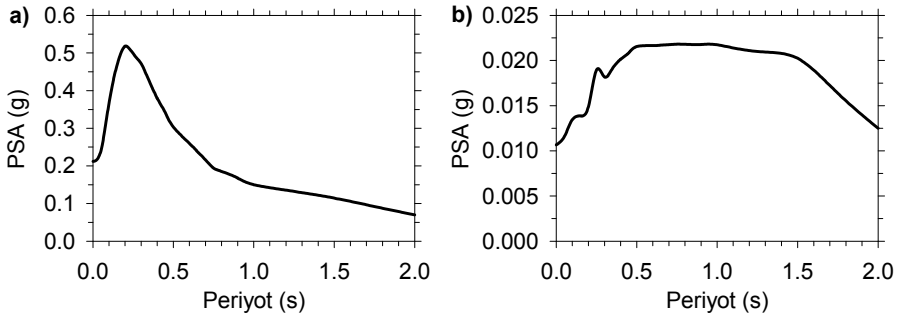
KG04 ve Ovd04 tahmin denklemlerinin türetilmeleri, Türkiye'de kuvvetli yer hareketi modelleme konusundaki en dikkate değer gelişmelerden sayılabilir. Bu modeller Türkiye için geliştirilen yerel tahmin denklemlerinin temel taşlarını oluşturmuşlardır. Ovd04 modeli regresyon analizlerinde Türkiye'nin kuzeybatısından kaydedilen ivme kayıtlarını kullanırken KG04 modeli Türkiye'nin tamamından elde edilmiş ivme verilerini hesaba katmaktadır. Her iki model de tahminlerinde parametre olarak M_w ve R_{JB} genişletilmiş kaynak mesafe türünü kullanmaktadır. Bu iki modelin diğer yerel modellere karşı üstünlüklerine rağmen bu modeller fay türünü ve doğrusal olmayan zemin etkilerini ivme tahminlerinde dikkate almamaktadırlar. Oysaki bu etkilerin de modellemede dikkate alınması yeni jenerasyon tahmin denklemleri için can alıcı unsurlardır (Power vd., 2008; Akkar vd., 2013a).

Yukarıda sayılan gerekliliklerin bilincinde olarak daha detaylı bir biçimde hazırlanmış olan yeni bir yerel yer hareketi tahmin denklemi Akkar ve Çağnan (2010) çalışmasında sunulmuştur (buradan itibaren AC10 olarak anılacaktır). Bu denklem doğrusal ve doğrusal olmayan zemin etkilerini Boore ve Atkinson (2008) çalışmasında kullanılan zemin modeliyle dikkate alarak normal, ters ve doğrultu atımlı faylar için spektral değerler hesaplamaktadır. AC10 modeli uluslararası standartlara göre esas olarak V_{S30} (zemin profilinin 30 m'lik üst tabakasındaki ortalama kesme dalgası hızı) değerine bağlı zemin türü, fay mekanizması ve noktasal (R_{EPI}: dış merkez; R_{HYP}: iç merkez) ve genişletilmiş kaynak (R_{JB}; R_{RUP}: fay kırığına en yakın mesafe) mesafe türlerine göre ciddi ölçüde güncellenen (Akkar vd., 2010; Sandıkkaya vd., 2010) veri tabanı kullanılarak türetilmiştir. Akkar ve Çağnan (2010) çalışmasında, kuvvetli yer hareketi veri tabanının önemini vurgulamak için Uvd04, Ovd04 ve KG04 denklemlerinin AC10 veri setini tahmin etme performansları artık analizi yardımıyla test edilmiştir. Artık analizi sonuçlarına göre bu modellerin genel olarak yüksek sonuçlar verdiği görülmüştür. Bunun nedeni ise bu denklemlerin zemin türü, mesafe ve magnitüd bakımından eski versiyon bir Türk veritabanını kullanmasıdır. Bu durum veri tabanı katalog bilgisinin güncellenmesine ve yeni depremlerle birlikte elde edilen kayıt sayısındaki artışa paralel olarak mevcut tahmin denklemlerinin güncellenmesi gerekliliğini vurgulamaktadır.

AC10 denkleminin türetilmesinden sonra Orta Doğu ve Avrupa bölgelerindeki kuvvetli yer hareketi veri tabanlarının katalog bilgilerinin güncellenmesi çalışmalarına Seismic Hazard Harmonization in Europe (SHARE, http://www.share-eu.org/), Seismic Ground Motion Assessment (SIGMA, http://projet-sigma.com/) ve Earthquake Model of the Middle East Region (EMME, http://www.emme-gem.org/) başlıklı uluslararası prejelerde devam edilmiştir. Bu projelere bağlı olarak da şu an için en güncel ve uygulanabilir denklem olan AC10 modelinin güncellenmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır çünkü bu projelerdeki ortak ülke aktif sığ deprem tekteniği özelliği gösteren bölgeler içinde ana veri kaynağı olan Türkiye'dir. AC10 modelinin güncellenmesi için diğer bir neden ise bu modelin büyük magnitüd ve uzak mesafelerdeki tahminlerinden elde edilen spektrumlarında beklenmeyen spektral şekillerin gözlemlenmesidir. Bu durumla ilgili olarak Şekil 1.a ve 1.b'de doğrultu atımlı, M_W=7.5, kaya zemin sınıfı (V_{S30}=760 m/s), R_{JB}=10 km ve 150 km olan iki deprem senaryosu için elde edilen spektrumlar gösterilmiştir. Türk Deprem Yönetmeliğinde T_A ve T_B (TDY, 2007); Eurocode-8'de (EC8) T_B ve T_C (CEN, 2004); NEHRP'de T_0 ve T_S (BSSC, 2009) ile tanımlanan spektrum ivme platosu köşe periyotları Şekil 1.a'da kolaylıkla elde edilebilirken, Şekil 1.b bu duruma açık ve gerçekçi bir çözüm sunamamaktadır. AC10 denkleminin yerine yeni bir model türetilmesi gerekliliğini ortaya çıkaran son neden ise bu denklemin magnitüd uygulanabilirlik aralığıdır ($5.0 \leq M_w \leq 7.6$). Bu aralığın alt sınırı sismik tehlike analizlerinde kullanılan tahmin denklemlerinin tutarlılığı açısından yeni jenerasyon modellerde M_w 4.0 değerine çekilmiştir (Chiou ve Youngs, 2008; Akkar vd., 2013a).

Bu aşamada yukarıda sayılan durumlar dikkate alınarak, bu çalışma kapsamında Türkiye için yeni bir yerel yer hareketi tahmin denklemi türetilmiştir. Bu denklem sırasıyla 0-200 km ve 4.0-7.6 moment magnitüd (M_w) ve Joyner-Boore mesafe (R_{JB}) aralıkları için geçerlidir. Doğrusal ve doğrusal olmayan zemin etkileri Avrupa ve Orta Doğu bölgeleri için çıkarılmış olan Sandıkkaya vd. (2013) çalışmasında önerilen zemin modeli ile hesaplarda dikkate alınmıştır. Regresyon analizlerinde toplamda 178 adet normal, ters ve doğrultu

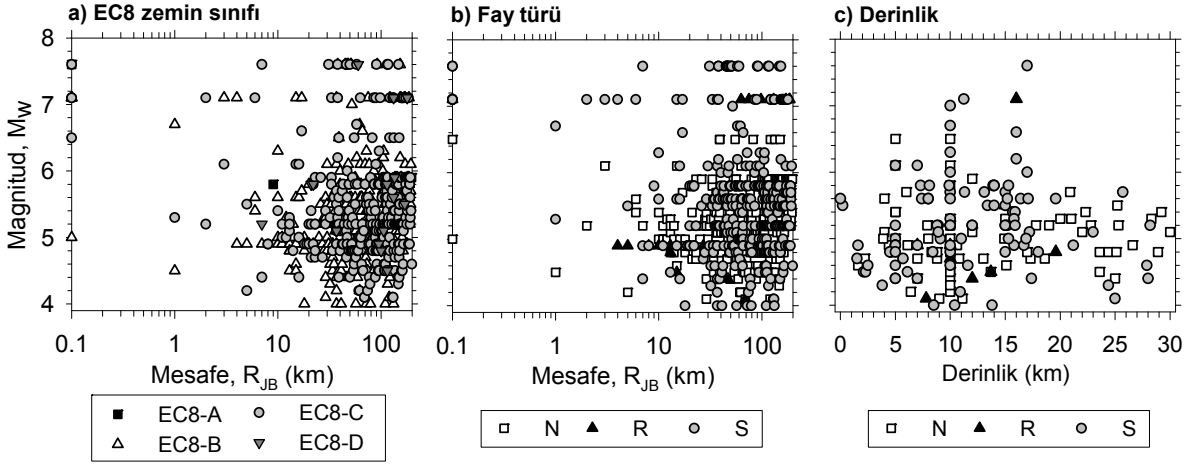
atımlı depremden kaydedilen 692 kuvvetli yer hareketi ivme kaydı kullanılmıştır. Denklemin kısa periyodu Douglas ve Boore (2011) ve Akkar vd. (2011) çalışmalarına göre ivme kayıtlarının düşük geçirimli filtrelemeye daha az hassas oldukları göz önüne alınarak 0.01 s'den başlatılmıştır. Yeni modelde, AC10 modelinde T=2.0 s olan maksimum uzun periyot değeri Akkar ve Bommer (2006) çalışmasındaki önerilere uyularak T=4.0 s'ye çıkarılmıştır.



Şekil 1. AC10 modelinin M_w=7.5, kaya zemin (V_{S30}=760 m/s) ve doğrultu atımlı deprem senaryosu için ivme tepki spektrumları a) R_{JB}=10 km, b) R_{JB}=200 km.

2. YER HAREKETİ VERİ SETİNDEKİ GELİŞMELER

Bu çalışmada kullanılan kuvvetli yer hareketi veri tabanı EMME projesinde derlenen veri tabanından elde edilmiştir. Veri tabanı 178 farklı deprem ve 166 farklı istasyondan kaydedilen 692 ivme kaydından oluşmaktadır. Veri tabanındaki kayıtların M_w değerlerine karşılık çizilen R_{JB} değerlerinin dağılımı zemin sınıfı ve fay mekanizması cinsinden sırasıyla Şekil 2.a ve 2.b'de gösterilmiştir. Kayıtların momet magnitüd ve istasyon kaynak arası mesafe aralıkları sırasıyla $4.0 \leq M_w \leq 7.6$ ve 0 km$\leq R_{JB} \leq$200 km şeklindedir. Bu şekillerde R_{JB}=0 km olan kayıtların mesafeleri şekilsel amaçlı olarak R_{JB}=0.1 km olarak gösterilmiştir. Zemin sınıfları Eurocode-8'de (EC8; CEN, 2004) tanımlanan V_{S30} aralıklarına göre yapılmıştır: A ($V_{S30} \geq 800$ m/s), B (360 m/s$\leq V_{S30} <$800 m/s), C (180 m/s$\leq V_{S30} <$360 m/s) and D ($V_{S30} <$180 m/s). Veri tabanındaki yumuşak ve sert zemin (sırasıyla EC8-B ve -C) kayıtların sayıca baskınlığı açık olarak görülmektedir. Bununla birlikte EC8-A ve -D zemin sınıflarındaki kaya ve çok yumuşak zeminlerden elde edilen kayıtların sayısı da oldukça azdır. Doğrultu atımlı depremlerden elde edilen kayıtlar veri tabanının %56'sını oluşturmaktadır. Veri tabanındaki normal ve ters fay mekanizmalı kayıtların yüzdeleri ise sırasıyla %40 ve %4'dür. Veri setindeki ters fay türündeki kayıtların sayısı oldukça düşüktür. Depremlerin maksimum derinliği aktif sığ deprem tektoniğinde olan bölgeler için kabul edilebilecek bir değer olan 30 km'dir. Şekil 2.c'de depremlerin fay türleri cinsinden derinliğe karşı M_w dağılımları gösterilmiştir.



Şekil 2. Veri tabanının a) EC8 zemin sınıfına b) fay türüne göre R_{JB}'ye karşılık M_w ve c) fay türüne göre derinliğe karşılık M_w dağılımları. (Kısaltmalar: N: normal; R:ters; S: doğrultu atımlı faylar)

Bu çalışma kapsamına önerilen yeni denklemin veri tabanındaki 692 ivme kaydından 347'si AC10 veri tabanında da yer almaktadır. Aslında AC10 veri tabanı Türkiye'de kaydedilmiş, magnitüd ve mesafe aralıkları sırasıyla $5.0 \leq M_w \leq 7.6$ ve 0 km$\leq R_{JB} \leq$200 km olan 433 ivme kaydı içermektedir. AC10 veri setini oluşturan kayıtlar tekrar incelendiğinde, bunlardan bazıları düşük kaliteli olarak sınıflandırılmışlardır. Veri tabanındaki bazı kayıtların M_w değerleri başka magnitüd türlerinden çevrilmiştir ki bu işlem ele alınan parametreye bayas katmaktadır. Bazı depremlerin derinlik değerleri ise 30 km'nin üstündedir ve bu durum daha önceden de bahsedildiği üzere aktif sığ deprem tektoniğini temsil etmede soru işaretleri akla getirmektedir. Bahsedilen bu durumlar dikkate alınarak AC10 veri setinden 86 kayıt çıkarılmıştır ve geriye kalan 347 ivme kaydı, güncellenen katalog bilgileri dikkate alınarak yeni modelin regresyon analizlerinde kullanılmıştır. Bu çalışmada önerilen yeni modelin veri setindeki geriye kalan 345 kuvvetli yer hareketi ivme kaydı ise $M_w<5.0$ olan depremlerden, RESORCE veri tabanından (Akkar vd., 2013b) ve 2007 yılından sonra Türkiye'de meydana gelen depremlerden elde edilmiştir. Bu kaynaklar aynı zamanda EMME veri tabanının da alt kaynaklarını oluşturmaktadır.

3. REGRESYON FONKSİYONU VE KATSAYILARI

Yeni bir yer hareketi modeli önerilirken regresyon analizi için fonksiyon türüne karar vermek önemli noktalardan biridir çünkü bu seçim model tahminlerinin güvenilirliğini doğrudan etkilemektedir. Bununla birlikte fonksiyon türünün NGA modellerinde (Power et al., 2008) olduğu gibi fazla karmaşık olması, denklemlerin düşük performanslar göstermesiyle sonuçlanmaktadır (Kale ve Akkar, 2013). Burada karmaşık ile anlatılmak istenen magnitüd, mesafe, zemin türü ve fay mekanizması gibi temel parametlerin haricinde denklemde ihtiyaç duyulan parametlerdir. Bu ekstra deprem parametreleri genel anlamda Orta Doğu ve Avrupa veri tabanlarında güvenilir olmayan parametrelerdir ve bu bölgeler için modellemede kullanılmaları genelde tercih edilmemektedir. Çalışma kapsamında, bu durumlar ve Akkar vd. (2013a) çalışmasındaki yorumlar da dikkate alınarak Denklem 1'de verilen ve AC10 modelinde de kullanılan fonksiyon kullanılmıştır.

$$\ln(Y) = \ln\left[Y_{REF}(M_w, R_{JB}, SoF)\right] + \ln\left[S(V_{S30}, PGA_{REF})\right] + \varepsilon\sigma_T \tag{1}$$

Bu denklemde $\ln(Y_{REF})$ ile temsil edilen temel model, magnitüd, istasyon kaynak arası mesafe ve fay türünü Denklem 2'de verildiği gibi hesaplarken, doğrusal ve doğrusal olmayan zemin etkileri de Sandıkkaya vd. (2013) çalışmasında önerilen ve ln(S) ile temsil edilen denklemden elde edilmektedir (Denklem 3). Denklem 1'de yer alan σ_T ve ε sırasıyla toplam rassal değişkenlik (veya toplam standart sapma) ve ln(Y) medyan değerinin altındaki veya üstündeki standart sapma sayısını göstermektedir. Toplam rassal değişkenlik (σ_T) deprem içi (σ) ve depremler arası (τ) değişkenlikler olmak üzere iki bileşene ayrılır ve bu bileşenlerin karelerinin toplamının karekökü Denklem 4'de gösterildiği gibi toplam rassal değişkenliği verir.

$$\ln(Y_{REF}) = \begin{cases} M_w \leq c_1 \quad \text{için}; \\ b_1 + b_2(M_w - c_1) + b_3(8.5 - M_w)^2 + \left[b_4 + b_5(M_w - c_1)\right]\ln\sqrt{R_{JB}^2 + b_6^2} + b_8 F_N + b_9 F_R \\ M_w > c_1 \quad \text{için}; \\ b_1 + b_7(M_w - c_1) + b_3(8.5 - M_w)^2 + \left[b_4 + b_5(M_w - c_1)\right]\ln\sqrt{R_{JB}^2 + b_6^2} + b_8 F_N + b_9 F_R \end{cases} \tag{2}$$

$$\ln(S) = \begin{cases} V_{S30} < V_{REF} \quad \text{için}; \\ sb_1 \ln(V_{S30}/V_{REF}) + sb_2 \ln\left\{\left[PGA_{REF} + c(V_{S30}/V_{REF})^n\right] \Big/ \left[(PGA_{REF} + c)(V_{S30}/V_{REF})^n\right]\right\} \\ V_{S30} \geq V_{REF} \quad \text{için}; \\ sb_1 \ln\left\{\min(V_{S30}, V_{CON}) \Big/ V_{REF}\right\} \end{cases} \tag{3}$$

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma^2 + \tau^2} \quad (4)$$

Temel modelde F_N ve F_R olarak gösterilen fay mekanizması değişkenleri sırasıyla normal ve ters fay türleri için 1 değerini alırlar. Diğer durumlarda bu değişkenlerin değeri 0'dır. Gözleme dayalı verideki eğilim dikkate alınarak magnitüd geçiş parametresi, c_1, 6.75 alınmıştır. Denklem 2'de yer alan regresyon katsayıları, Abrahamson ve Youngs (1992) çalışmasında önerilen yöntem dikkate alınarak elde edilmiştir. Bu katsayılar maksimum yer ivmesi (PGA_{GM}; g), maksimum yer hızı (PGV_{GM}; cm/s) ve yalancı spektral ivme (PSA_{GM}; g) değerlerini, yatay bileşenlerin geometrik ortalaması cinsinden tahmin etmede kullanılacaklardır. Bu katsayılardan bazıları hesaplamalarda sabit alınırken bazıları da periyoda bağlı olarak değişmektedir ve bunlar sırasıyla Tablo 1 ve 2'de verilmiştir. Tablo 2'de ayrıca σ_T, σ ve τ değişkenliklerinin periyoda bağlı aldıkları değerler de verilmektedir. Regresyonla ilgili işlem aşamalarına sayfa sınırlamasından dolayı değinilmeyecektir. Yeni denklemde zemin etkilerini hesaplamak için Sandıkkaya vd. (2013) çalışmasında önerilen ve veri tabanında çok sayıda Türk kaydı bulunan zemin modeli kullanılmıştır. Denklem 3'de verilen zemin modelindeki bütün parametreler Sandıkkaya vd. (2013) çalışmasında önerilen değerler olmasına karşın sadece referans kaya zemin (V_{REF}=750 m/s) için elde edilen PGA_{REF} değeri yeni denklemin katsayıları kullanılarak Denklem 2'den elde edilip zemin modelinde kullanılacaktır. Sandıkkaya vd. (2013) çalışmasında, zemin amplifikasyonunu sabitleyen V_{S30} değeri, yüksek ve düşük yer hareketi genlikleri arasındaki geçiş katsayısı, doğrusal olmayan zemin davranışı katsayısı sırasıyla V_{CON}=1000 m/s, c=2.5 ve n=3.2 olarak sabitlenmiştir (Tablo 1). Bunlara ek olarak periyoda bağlı olarak değişen sb_1 ve sb_2 zemin modeli katsayıları da Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. Periyoda bağlı olmayan regresyon ve zemin modeli sabitleri.

c_1	b_2	b_5	b_7	c	n	V_{REF} (m/s)	V_{CON} (m/s)
6.75	0.262	0.155	-0.302	2.5	3.2	750	1000

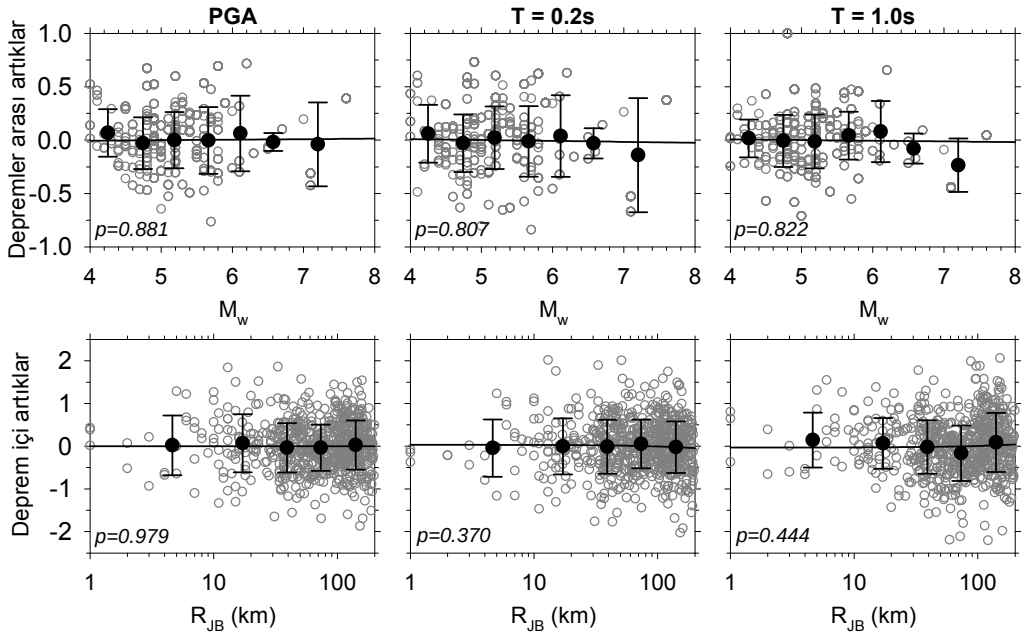
Tablo 2. Seçilen bazı periyotlar için regresyon ve zemin modeli katsayıları (katsayıların tamamı elektronik olarak ilk yazardan istenebilir).

T (s)	b_1	b_3	b_4	b_6	b_8	b_9	σ	τ	σ_T	sb_1	sb_2
PGA	1.47879	-0.04757	-1.17963	7.00	-0.05678	0.05053	0.6197	0.3826	0.7283	-0.41997	-0.28846
PGV	5.02526	-0.12171	-0.85940	4.47	-0.12462	0.14110	0.6175	0.3452	0.7074	-0.72057	-0.19688
0.01	1.49317	-0.0468	-1.18169	7.00	-0.05678	0.05053	0.6196	0.3826	0.7282	-0.41729	-0.28685
0.03	1.60491	-0.04621	-1.19488	7.00	-0.04956	0.05053	0.6266	0.3853	0.7356	-0.34799	-0.26842
0.05	1.88774	-0.03747	-1.24269	7.00	-0.01032	0.05053	0.6418	0.3914	0.7517	-0.21231	-0.22385
0.1	2.44353	-0.02340	-1.34404	7.00	0.02893	0.05052	0.6455	0.4360	0.7790	-0.27064	-0.29293
0.2	2.44499	-0.04394	-1.25796	7.00	-0.07582	0.05040	0.6494	0.4202	0.7735	-0.65315	-0.44644
0.5	0.99351	-0.09630	-0.90602	5.30	-0.11908	0.04581	0.6789	0.4016	0.7888	-0.94614	-0.37408
0.75	0.26692	-0.12897	-0.76026	4.20	-0.11910	0.02883	0.6977	0.3821	0.7955	-1.00786	-0.28957
1	-0.11153	-0.15412	-0.69644	4.00	-0.11910	-0.00451	0.7019	0.3702	0.7935	-1.01331	-0.28702
2	-0.85774	-0.20867	-0.63391	4.00	-0.11910	-0.11465	0.7725	0.3345	0.8418	-0.91007	-0.17336
3	-1.44293	-0.22782	-0.62389	4.00	-0.11910	-0.13033	0.7710	0.3683	0.8545	-0.85793	-0.13336
4	-1.77704	-0.23454	-0.62081	4.00	-0.11910	-0.13033	0.6601	0.3539	0.7490	-0.75645	-0.07749

4. ÖNERİLEN YER HAREKETİ TAHMİN DENKLEMİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

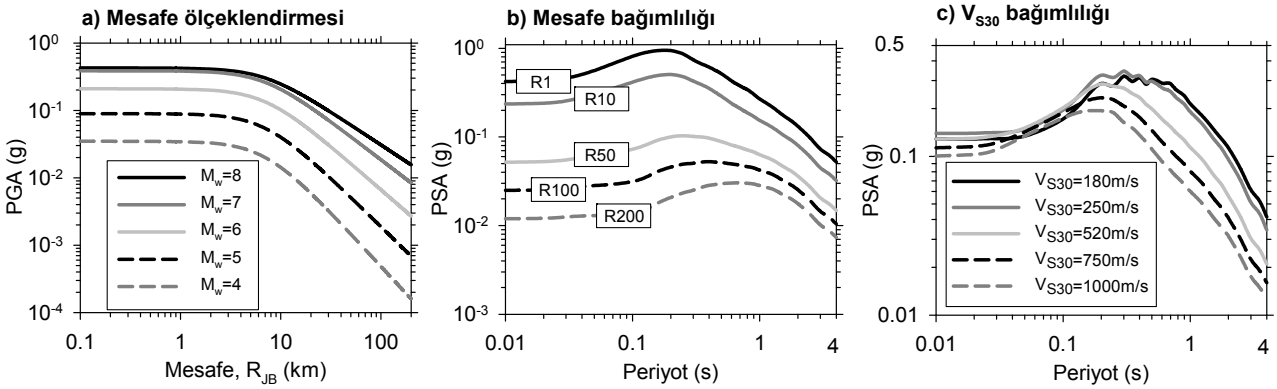
Bu bölümde yeni denklemin genel değerlendirmesi ve bazı denklemlerle karşılaştırmaları yapılmıştır. Şekil 3'de denklemin istatistiksel olarak sağlamasının yapıldığı artık analiz sonuçlarının sayfa sınırlamasından dolayı bir kısmı gösterilmektedir. Burada depremler arası ve deprem içi artıklara bir doğru uydurulmuş ve sonrasında p değerleri hesaplanarak 0.05 anlamlılık düzeyi için genel eğilime bakılmıştır. Buna ek olarak belirli magnitüd ve mesafe kümeleri oluşturulmuş ve bu kümelerde ortalama artık değerleri hesaplanmış ayrıca kümelerin ±1 standart sapma hata bantlarıda şekilde gösterilmiştir. Bütün bu bulgular ışığında model tahminlerinin bayas içermediği kolaylıkla söylenebilir. Depremler arası artıkların küme performansları

değerlendirildiğinde T=1.0 s'de büyük magnitüdlü depremlerin yüksek tahmin edildiği görünmektedir. Burada verilmeyen V_{S30} değerlerine karşılık çizilen deprem içi artıklarda düşük p değerleri elde edilmiştir. Bunların nedeni küme performanslarına bakılarak çok düşük V_{S30} değerli zeminlerin çok düşük tahmin edilmesi ve bazı sert zeminden alınan kayıtların biraz yüksek tahmin edilmesinin olduğu anlaşılmıştır. Fakat bu aralıklara düşen kayıtların sayısı toplam veri sayısının %14'ü olduğu için bu durumun denklemin genel performansını kötü yönde etkilemeyeceği sonucuna ulaşılmıştır.



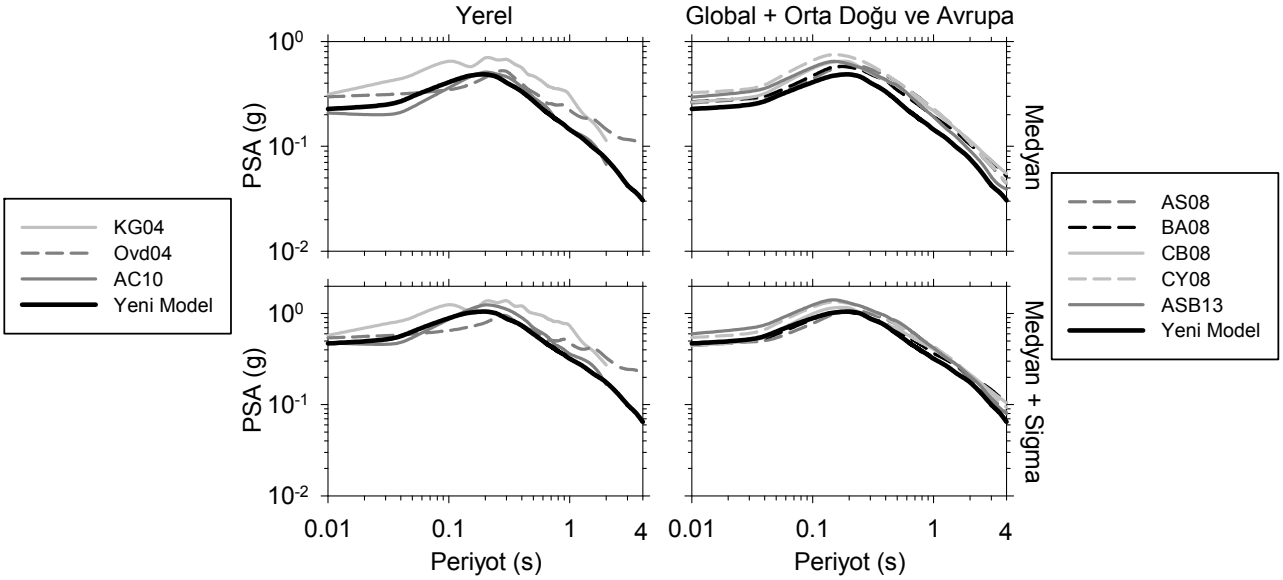
Şekil 3. PGA, T=0.2 s ve 1.0 s için bu çalışmada önerilen denklemin artık analizi irdelemesi.

Şekil 4.a denklemin doğrultu atımlı deprem senaryolu V_{S30}=800 m/s olan kaya zemin için PGA'deki mesafe ölçeklendirmesini göstermektedir. Mesafe eğimi artan magnitüd ile birlikte azalmaktadır. Örneğin M_w=4 için verilen PGA değerleri M_w=8 için verilen PGA değerlerine göre mesafe artışıyla birlikte daha hızlı düşüş göstermektedir. Şekil 4.b ve 4.c ivme tepki spektrumunun R_{JB} ve V_{S30} bağımlılığını seçilen farklı deprem senaryolarına göre örneklendirmektedir. Şekil 4.b'de spektral genlikler artan mesafeyle birlikte azalırken bir yandan da spektrum tepe noktaları uzun periyoda doğru kaymaktadır. Bunun sebebi kısa periyotlarda yer hareketi azalımının uzun periyotlardan daha fazla olmasıdır. Spektrumun V_{S30} bağımlılığını gösteren Şekil 4.c'de ise kısa periyotlarda doğrusal olmayan zemin davranışı belirgin bir şekilde gözlemlenmektedir. Yaklaşık 0.3 s'den sonra spektral değerler artan V_{S30} değerleriyle birlikte düşüşe geçmektedir.



Şekil 4. Doğrultu atımlı deprem senaryosu için a) PGA mesafe ölçeklendirmesi (V_{S30}=800 m/s), b) İvme tepki spektrumu mesafe bağımlılığı (M_w=7.5, V_{S30}=750 m/s), c) İvme tepki spektrumu V_{S30} bağımlılığı (M_w=7, R_{JB}=20 km)

Bu çalışmada türetilen tahmin denkleminin seçilen bazı denklemlerle medyan ve 84 persentil (medyan+sigma) ivme tepki spektrumları Şekil 5'de karşılaştırılmıştır. NGA (AS08: Abrahamson ve Silva, 2008; BA08: Boore ve Atkinson, 2008; CB08: Campbell ve Bozorgnia, 2008; CY08: Chiou ve Youngs, 2008) modelleri için yapılan hesaplamalarda D.M. Boore tarafından yazılan bir bilgisayar programı kullanılmıştır (http://www.daveboore.com/; Kaklamanos vd., 2011). Denklemlerin medyan tahminlerine bakıldığında, yeni model yerel modellerden AC10 ile benzer sonuçlar verirken KG04 ve Ovd04 ile spektral genlikler ve şekiller yönünden farklılaşmaktadır. Özellikle KG04 modelinin yüksek tahminler yaptığı görünmektedir. Diğer tarafta, yeni model spektral şekil bakımından NGA denklemleriyle ve ASB13 (yani Akkar vd., 2013a) ile benzerlikler göstermesine rağmen modelin göreceli olarak düşük genlikler tahmin ettiği görünmektedir. 84 persentil spektrumlarında, yerel modellerle ilgili önceki yorumlar hemen hemen aynı olmasına karşın AC10 modelinin spektral değerleri bu modelin yüksek rassal değişkenlik içermesinden dolayı diğerlerine göre daha fazla artmıştır. Sağ panelde is durum biraz değişmiştir. NGA modellerinin rassal değişkenlikleri yeni modele göre daha düşük olduğu için burada, spektral genlikler birbirlerine daha yakın değerler almıştır. ASB13 modeli ile aradaki fark iki model arasındaki benzer standart sapma değerlerinden dolayı korunmuştur.



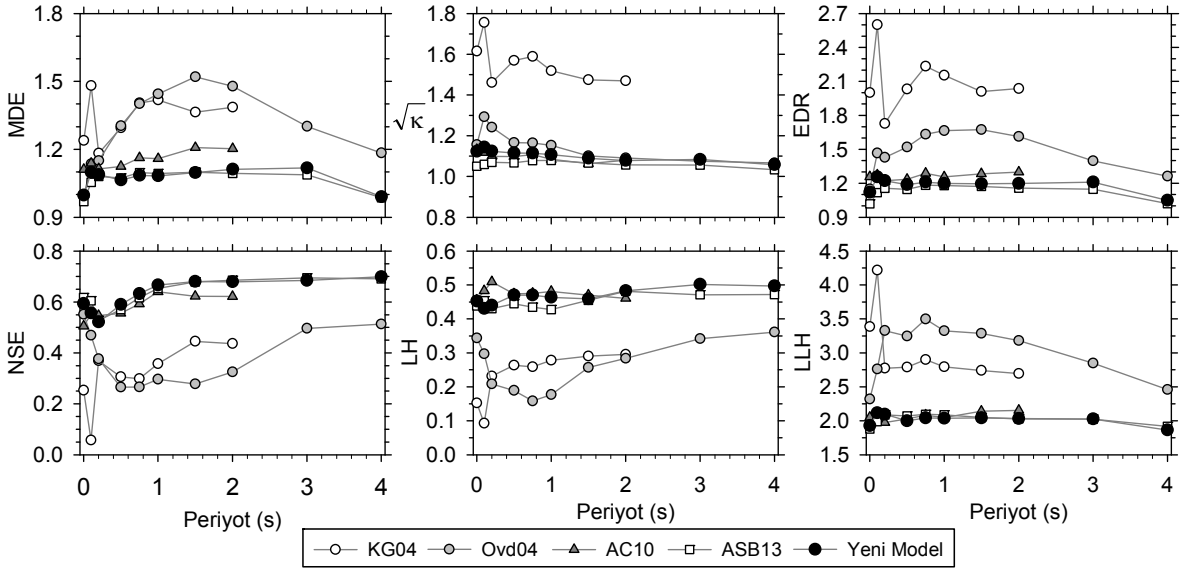
Şekil 5. Yeni Modelin medyan ve medyan+sigma tepki spektrumlarının yerel, global ve Orta Doğu-Avrupa modelleriyle karşılaştırması (M_w=7.5, V_{S30}=800 m/s, R_{JB}=10 km, doğrultu atımlı fay).

5. MODELİN TEST YÖNTEMLERİNE GÖRE BÖLGEYE UYGUNLUĞUNUN ARAŞTIRILMASI

Bu çalışmada önerilen yer hareketi tahmin denkleminin EMME bölgesinde yapılacak sismik tehlike analizlerinde kullanılabilirliği EMME kuvvetli yer hareketi veri setine göre test edilmiştir. Burada yeni denklemle birlikte KG04, Ovd04, AC10 ve ASB13 modellerinin de EMME veri seti üzerindeki performansları değerlendirilmiştir. EMME veri seti ağırlıklı olarak Türkiye ve İran kayıtları olmak üzere Gürcistan, Ermenistan, Ürdün ve Pakistan'da kaydedilmiş ivme kayıtlarından oluşmaktadır. Veri tabanını oluşturan 1869 ivme kaydı normal, ters ve doğrultu atımlı depremlerden elde edilmiştir ve bunların magnitüd ve R_{JB} mesafeleri sırasıyla $4.0 \leq M_w \leq 7.6$ ve $0 \text{ km} \leq R_{JB} \leq 200$ km aralıklarında değişmektedir. Bu çalışmada dikkate alınan test yöntemleri ve bunlar hakkında kısa açıklamalar ilerleyen cümlelerde verilmiştir. Benzerlik (LH; Scherbaum vd., 2004) yöntemi normalize edilmiş artıkların aşılma olasılıklarını hesaplar ve medyan aşılma olasılığı değerini sıralamada kullanılacak LH indeksi olarak verir. LH indeksi için 0.5 ve üzeri değerler, modelin veri seti üzerinde iyi performans gösterdiği anlamını taşır. Logaritmik benzerlik (LLH; Scherbaum vd., 2009) yöntemi yer hareketi tahmin denklemini olasılık dağılımı olarak alır ve gözlemsel verinin bu dağılımda karşılık gelen oluşma olasılığını hesaplar. Bütün veri seti için elde edilen olasılıkların ortalama değeri LLH indeksi olarak rapor edilir. Model etkinlik katsayısı (NSE; Kaklamanos ve Baise, 2011)

yöntemi modeldeki bayası hesaplamaktadır ve -∞ ile 1 arasında (1 en iyi durumu gösterir) değerler alır. Öklid uzaklığına dayalı sıralama (EDR; Kale ve Akkar, 2013) yönteminde gözlemsel veri ile modelin ±3σ bandındaki farkları dikkate alınarak bunların olasılık tabanlı ortalamaları MDE değeri olarak verilir. Buna ek olarak modeldeki bayas (κ) gözlemsel veri ile medyan tahminler arasındaki eğilime göre hesaplanarak bu iki bileşenden EDR sıralama indeksi rapor edilir. Genel olarak MDE ve κ indekslerinin ayrı ayrı göz önüne alınması sahaya özel yapılan sismik tehlike çalışmaları için daha anlamlı iken EDR indeksi bölgesel çalışmalar için daha iyi fikir verebilmektedir. Test yöntemleri hakkında genel bir yorum yapılırsa, NSE yöntemi modelin rassal değişkenliğinin etkisini dikkate almamaktadır. LH ve LLH yötemleri bazı durumlarda rassal değişkenliği büyük olan modelleri destekleyerek bunları daha uygun modeller olarak sunmaktadır. Oysaki rassal değişkeliğin büyük olması özellikle büyük tekerrür periyotlarında yüksek sismik tehlike sonuçları vermektedir (Restrepo-Velez ve Bommer, 2003). EDR yöntemi ise denklemlerin sismik tehlike çalışmalarındaki uygulama yönteminden bir benzeştirme yaparak rassal değişkenlik etkisini sonuçlara daha iyi yansıtmaktadır (Kale ve Akkar, 2013).

Seçilen denklemlerin EMME veri tabanı üzerindeki performanslarının test yöntemlerine göre değerlendirme sonuçlarının periyoda bağlı değişimi Şekil 5'de gösterilmiştir. KG04 ve AC10 modelleri 2.0 s'den sonraki periyotlarda regresyon katsayısı vermediği için bu modeller T=2.0 s'ye kadar değerlendirilebilmiştir. Yöntemlere göre modellerin performansları irdelendiğinde bu çalışmada önerilen yer hareketi tahmin denkleminin EMME veri tabanını çok iyi temsil ettiği çıkarımı yapılabilir. Yeni modelin yanısıra AC10 ve ASB13 denklemlerinin performansları da oldukça iyi görünmektedir. AC10'nun model tahminlerindeki rassal değişkenliği oldukça iyi saptayan MDE cinsinden test sonuçlarına bakıldığı zaman yeni model ve ASB13'e göre biraz daha kötü performansı dikkat çekmektedir. Bu bulgu LH ve LLH yöntemlerinde gözlemlenmemektedir. Bunun nedeni olarak AC10 modelinin standart sapma değerlerinin yeni model ve ASB13 modeline göre daha yüksek olması gösterilebilir çünkü bu yöntemlerin bazı durumlarda yukarıda bahsedildiği gibi yüksek standart sapma değerine sahip denklemleri desteklediği gösterilmiştir (Kale ve Akkar, 2013). KG04 ve Ovd04 denklemlerinin genel değişimine bakıldığında bu denklemlerin EMME veri tabanını temsil etme konusunda başarılı olamadıkları bütün yöntemlerin sonuçlarından açıkça çıkarılabilmektedir. Bu denklemlerin kötü performans düzeylerini eski versiyon Türk veri tabanına göre türetilmiş olmaları açıklayabilir. Bu gözlemler ışığında, EMME bölgesinde yapılacak sismik tehlike çalışmalarından tutarlı sonuçlar elde edebilmek için yer hareketi modeli mantık ağacı uygulamalarında, bu çalışmada önerilen yeni denklem, ASB13 ve AC10 denklemlerinin kullanılabileceği sonucu çıkarılabilir.



Şekil 6. Modellerin seçilen periyotlardaki test sonuçları. Üst satır EDR indeksinin MDE ve κ bileşenlerini (yani $\sqrt{1/N\sum MDE^2}$ ve $\sqrt{\kappa}$) ve EDR indeksini, alt satır ise NSE, LH ve LLH indekslerinn değişimlerini göstermektedir.

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada önerilen yeni yer hareketi tahmin denklemi, yapılan iyileştirmelerle birlikte Akkar ve Çağnan (2010) çalışmasında türetilen denkleminin yerini alacaktır. Yeni denklem $4.0 \leq M_w \leq 7.6$ and $0 \text{ km} \leq R_{JB} \leq 200$ km magnitüd ve mesafe aralıklarında geçerlidir ve bu denklem kullanılarak $0.01 \text{ s} \leq T \leq 4{:}0$ s periyot aralığında %5 sönüm oranı için spektral ivmelerle (PSA_{GM}) birlikte PGA_{GM} ve PGV_{GM} tahminleri de yapılabilmektedir.

Yeni denklemde, veri tabanının sınırlarının genişletilmesinin ve katalog bilgilerindeki iyileştirmelerin ve gelişmelerin sonucu olarak modeldeki rassal değişkenlik AC10'a göre ciddi ölçüde düşürülmüştür. Bazı yerel modellerle yapılan karşılaştırmalar, yeni modelden elde edilen spektral tahminlerin daha düzgün olduğunu göstermiştir. Yeni denklemin ASB13 ve NGA modellerinden daha düşük spektral genlikler tahmin etmesine rağmen spektral şekil olarak bu modellerle uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

Bu çalışma kapsamında türetilen denklemle birlikte seçilen bazı denklemlerin de EMME bölgesinde yapılacak sismik tehlike çalışmaları için uygunluğunun test edilmesi LH, LLH, NSE ve EDR yöntemlerine göre yapılmıştır. EMME veri tabanı kullanılarak yapılan araştırma sonuçlarına göre yeni denklem bu bölgedeki sismik tehlikeyi tahmin etmede ASB13 ve AC10 modelleriyle birlikte oldukça başarılı performans göstermiştir. Sonuç olarak bu üç denklemin EMME bölgesi için yapılacak sismik tehlike mantık ağacı uygulamalarında kullanılmaları önerilmektedir.

KAYNAKLAR

Abrahamson, N.A. ve Youngs R.R. (1992). A stable algorithm for regression analyses using the random effects model, *Bulletin of the Seismological Society of America,* **82**, 505-510.

Abrahamson, N. A., ve Silva, W.J. (2008). Summary of the Abrahamson & Silva NGA groundmotion relations, *Earthquake Spectra,* **24**, 67-97.

Akkar, S. ve Bommer, J.J. (2006). Influence of long-period filter cut-off on elastic spectral displacements. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **35(9)**, 1145-1165.

Akkar, S. ve Çağnan, Z. (2010). A local ground-motion predictive model for Turkey and its comparison with other regional and global ground-motion models. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **100(6)**, 2978–2995.

Akkar, S., Kale, Ö., Yenier, E. ve Bommer J.J. (2011). The high-frequency limit of usable response spectral ordinates from filtered analogue and digital strong-motion accelerograms, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **40**, 1387-1401.

Akkar, S., Sandıkkaya, M.A. ve Bommer, J.J. (2013a). Empirical Ground-Motion Models for Point- and Extended-Source Crustal Earthquake Scenarios in Europe and the Middle East, *Buletin of Earthquake Engineering*, baskıda.

Akkar S., Sandıkkaya, M.A., Şenyurt, M., Azari Sisi, A. ve Ay, B.Ö. (2013b). Reference Database for Seismic Ground-Motion in Europe (RESORCE), *Buletin of Earthquake Engineering*, baskıda.

Aydan, Ö, Sedaki, M. ve Yarar, R. (1996). The seismic characteristics of Turkish earthquakes. *In Proceedings of Eleventh World Conference on Earthquake Engineering*. Paper no. 1270.

Bindi, D., Parolai, S.,. Grosser, H., Milkereit, C. ve Durukal, E. (2007). Empirical ground-motion prediction equations for northwestern Turkey using the aftershocks of the 1999 Kocaeli earthquake. *Geophysical Research Letters*, **34**(L08305).

Boore, D.M., Watson-Lamprey, J. ve Abrahamson, N.A. (2006). Orientation-independent measures of ground motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **96(4A)**, 1502–1511.

Boore, D.M. ve Atkinson, G. (2008). Ground-Motion Prediction Equations for the Average Horizontal Component of PGA, PGV, and 5%-Damped PSA at Spectral Periods between 0.01 s and 10.0 s. *Earthquake Spectra*, **24(1)**, 99-138.

Building Seismic Safety Council (BSSC) (2009). 2009 NEHRP Recommended Seismic Provisions For New Buildings and Other Structures: Part 1, Provisions, Federal Emergency Management Agency (P-750), Washington, D.C.

Campbell, K. ve 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(1)**, 139-171.

Comité Européen de Normalisation, Brussels (CEN) (2004). Eurocode 8: Design of structures for earthquake Resistance - Part 1: General rules, seismic actions, and rules for buildings, EN 1998-1:2004.

Chiou, B. ve Youngs, R. (2008). An NGA Model for the Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra. *Earthquake Spectra*, **24(1)**, 173-215.

Türk Deprem Yönetmeliği (TDY) (2007). Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Deprem Araştırma Dairesi.

Douglas, J. (2011). Ground-motion prediction equations 1964-2010. *Final Report BRGM/RP-59356-FR*.

Douglas, J. ve Boore, D.M. (2011). High-frequency filtering of strong-motion records, *Bulletin of Earthquake Engineering*, **9**,395-409.

Gülkan, P. ve Kalkan, E. (2002). Attenuation modeling of recent earthquakes in Turkey, *Journal of Seismolgy*, **6(3)**, 397-409.

Kaklamanos, J., ve Baise, L.G. (2011). Model validations and comparisons of the next generation attenuation of ground motions (NGA–West) project, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **101(1)**, 160-175.

Kaklamanos, J., Baise, L.G. ve Boore, D.M. (2011). Estimating unknown input parameters when implementing the NGA ground-motion prediction equations in engineering practice, *Earthquake Spectra*, **27**, 1219-1235.

Kale, Ö. ve Akkar, S. (2013). A New Procedure for Selecting and Ranking Ground-Motion Prediction Equations (GMPEs): The Euclidean Distance-Based Ranking (EDR) Method, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **103(2A)**, 1069-1084.

Kalkan, E. ve Gülkan, P. (2004). Site-dependent spectra derived from ground motion records in Turkey. *Earthquake Spectra*, **20**, 1111–1138.

Özbey, C., Sari, A., Manuel, L., Erdik, M. ve Fahjan, Y. (2004). An empirical attenuation relationship for northwestern Turkey ground motion using a random effects approach. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **24(2)**, 115–125.

Power, M., Chiou, B., Abrahamson, N., Bozorgnia, Y., Shantz, T. ve Roblee, C. (2008). An overview of the NGA project, *Earthquake Spectra*, **24**, 3-21.

Restrepo-Velez, L. F., ve Bommer, J.J. (2003). An exploration of the nature of the scatter in ground-motion prediction equations and the implications for seismic hazard assessment, *Journal of Earthquake Engineering*, **7(SI1)**, 171-199.

Sandıkkaya, M.A., Akkar, S. ve Bard, P-Y. (2013). A nonlinear site amplification model for the new pan-European ground-motion prediction equations, *Bulletin of the Seismological Society of America* **103,** 19-32.

Sandıkkaya, M. A., Yılmaz, M.T., Bakır, B.B. ve Yılmaz, Ö. (2010). Site classifcation of Turkish national strong-motion stations, *Journal of Seismology*, **14**, 543-563.

Scherbaum, F., Cotton, F. ve Smit, P. (2004). On the Use of Response Spectral-Reference Data for the Selection and Ranking of Ground-Motion Models for Seismic-Hazard Analysis in Regions of Moderate Seismicity: The Case of Rock Motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **94(6)**, 2164–2185.

Scherbaum, F., Delavaud, E. ve Riggelsen, C. (2009). Model selection in seismic hazard analysis: An information-theoretic perspective. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **99(6)**, 3234–3247.

Schwarz, J., Ende, C., Habenberger, J., Lang, D.H., Baumbach, M., Grosser, H., Milereit, C., Karakisa, S. ve Zünbül, S. (2002). Horizontal and vertical response spectra on the basis of strongmotion recordings from the 1999 Turkey earthquakes, *In Proceedings of the XXVIII General Assembly of the European Seismological Commission (ESC)*.

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

Ulutaş, E. ve Özer, M.F. (2010). Empirical attenuation relationship of peak ground acceleration for eastern Marmara region in Turkey. *The Arabian Journal for Science and Engineering*, **35 (1A)**, 187-203.