YEREL VE GLOBAL YER HAREKETİ TAHMİN DENKLEMLERİNİN TÜRKİYE İÇİN UYGULANABİLECEK SİSMİK TEHLİKE ANALİZLERİNDE KULLANILABİLİRLİKLERİNİN TEST EDİLMESİ

Ö. Kale[1] ve S. Akkar[2]

[1] *Araştırma Görevlisi, Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi,Orta Doğu Teknik Üniversitesi, 06800 Ankara*
[2] *Profesör, Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi,Orta Doğu Teknik Üniversitesi, 06800 Ankara*
Email: okale@metu.edu.tr

ÖZET:

Olasılıksal sismik tehlike analizlerinde kullanılan yer hareketi tahmin denklemlerinin hesapların yapılacağı bölgeye uygunluklarının araştırılması önemli bir gereksinimdir. Bu çalışmada EMME (Earthquake Model of the Middle East Region) projesi kapsamında ele alınan ülkelerde (Türkiye, İran, Gürcistan, Ermenistan, Pakistan ve Ürdün) sıklıkla kullanılan aktif sığ deprem tektoniğine uygun yerel ve global tahmin denklemleri belirlenerek bu modellerin Türkiye'de yapılacak sismik tehlike çalışmalarına olan uygunlukları irdelenmiştir. Çalışma, bu amaç doğrultusunda EMME projesi kapsamında derlenen ve yine aktif sığ deprem tektoniği özelliğine sahip bölgesel veri tabanı içerisinden Türk ivme kayıtlarını kullanmıştır. Proje kapsamında derlenmiş yer hareketi tahmin denklemleri arasında Cotton vd. (2006) çalışmasında belirtilen kriterlere uygun olarak seçilmiş denklemler Scherbaum vd. (2009) tarafından geliştirilen olasılıksal bir teknikle (LLH yöntemi) test edilmiştir. Çalışmada toplam 1750 Türk ivme kaydı kullanılarak 14 yerel ve global yer hareketi tahmin denklemi test edilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER : Yer hareketi tahmin denklemi, sismik tehlike analizi, kuvvetli yer hareketi, olasılıksal LLH yöntemi

1. GİRİŞ

Olasılıksal sismik tehlike analizinin önemli bileşenlerinden biri olan yer hareketi tahmin denklemleri göz önüne alınan bölgedeki sismotektonik özellikleri en iyi şekilde temsil ederek gelecekte oluşması muhtemel depremler sonucu ortaya çıkacak sismik tehlikeyi en iyi şekilde yansıtmalıdır. Bu konu hesaplamalarda dikkate alınacak yer hareketi tahmin modellerinin söz konusu olan bölgeye uygulanabilirliğinin test edilmesi gerekliliğini ortaya çıkartmaktadır. Yer hareketi tahmin denklemlerinin test edilmesiyle ilgili yöntemlerde elde edilen kayda değer ilerlemelere son yıllarda kuvvetli yer hareketi veri tabanlarındaki olumlu gelişmeler önemli katkılar sağlamaktadır.

Ortadoğu, Akdeniz ve Kafkaslar'da bölgesel sismik tehlike çalışmalarında önemli bir yer tutan Türkiye'nin değişik bölgeleri için yapılan olasılıksal sismik tehlike analizlerini konu alan çalışmalarda yerel ve global tahmin denklemleri kullanılmaktadır. Örneğin, Bursa'nın sismik tehlike analizini konu alan Yunatcı ve Çetin (2006) çalışmasında, Abrahamson ve Silva (1997), Boore vd. (1997), Özbey vd. (2004) ve Kalkan ve Gülkan (2004) yer hareketi tahmin denklemleri göz önüne alınmıştır. Marmara bölgesinin sismik tehlikesi konulu Erdik vd. (2004) çalışmasında kullanılan tahmin denklemleri, Amerika Birleşik Devletleri'nın batı bölgesi için çıkarılmış denklemlerdir. Yine Marmara bölgesinin tehlikesi için yapılan Kalkan vd. (2009) çalışmasında ise yerel tahmin denklemi olarak Kalkan ve Gülkan (2004), global tahmin denklemleri olarak da Boore ve Atkinson (2008), Campbell ve Bozorgnia (2008) ve Chiou ve Youngs (2008) kullanılmıştır. Bu çalışmalar sırasında seçilen yer hareketi modellerinin kullanılmasına, çalışmaları gerçekleştiren araştırmacıların uzman görüşleri sonucu karar

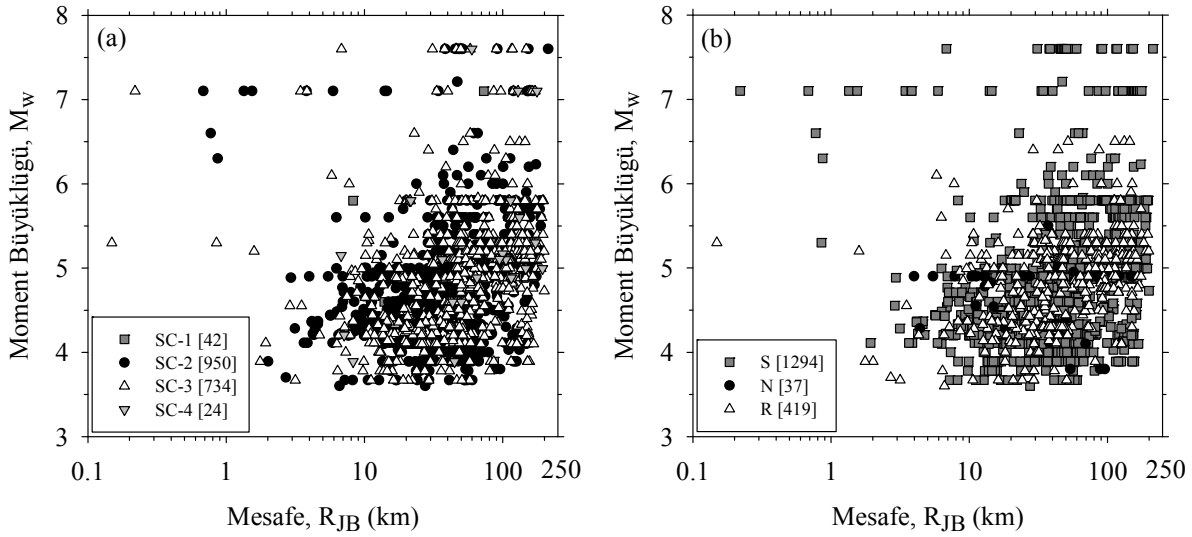
verilmiştir Bu modellerin söz konusu sismik tehlike çalışmaları için uygunluğu herhangi bir yöntem ile sismik tehlike hesaplamaları öncesi değerlendirilmemiştir.

Bu çalışmada, Ortadoğu ve Kafkas ülkelerinin sismik tehlike ve risk modellemesini hedefleyen EMME projesi kapsamında aktif sığ deprem tektoniği özelliği gösteren bölgesel EMME kuvvetli yer hareketi veri tabanını kullanarak yine bu tektonik özelliklere uygun olarak seçilmiş tahmin denklemlerinin Türkiye'ye uygunluğu araştırılmıştır. Çalışmada öncelikle EMME bölgesine uygulanabilme potansiyeli olan tahmin denklemlerinden Cotton vd. (2006) çalışmasındaki kriterlere uyanlar seçilmiş ve diğer modeller elenmiştir. EMME veri tabanından yanlızca Türk ivme kayıtları kullanılarak seçilen denklemler Scherbaum vd. (2009) çalışmasında önerilen LLH yöntemine göre test edilmiştir. Bu yöntem sonucu elde edilen yer hareketi modellerinin performans sıralaması nedenleriyle beraber sunulmuştur.

2. KUVVETLİ YER HAREKETİ VERİ TABANI

Bu çalışmada kullanılan kuvvetli yer hareketi veri tabanı, EMME projesi kapsamında derlenen katalog içinde mevcut olan Türkiye'ye ait deprem ivme kayıtlarından oluşmaktadır. Veri tabanı 1976 yılından bu yana meydana gelen farklı depremlerden elde edilmiş toplam 1750 ivme kaydından oluşmaktadır.

Veri tabanındaki depremlerin moment büyüklükleri (M_w) 3.6 ile 7.6 arasında değişmektedir. Veri tabanındaki her bir ivme kaydının dışmerkezlik (R_{EPI}) ve içmerkez mesafe birimleri (R_{HYP}) depremlere ait dışmerkezlik koordinatları ve derinlik bilgileri kullanılarak hesaplanmıştır. Aynı şekilde fay kırığının yüzeydeki projeksiyonu ile kuvvetli yer hareketi istasyonu arasındaki en yakın yatay mesafeyi tarif eden Joyner-Boore mesafe birimi (R_{JB}) ve fay kırığına en yakın mesafeyi ifade eden mesafe birimi (R_{RUP}) de fay çözümleri mevcut olan depremler için hesaplanarak veri tabaına eklenmiştir. Fay çözümleri bulunamayan ve çoğunluğu $M_w < 5$ olan kayıtların mesafe hesapları için nokta kaynak varsayımından yola çıkılarak $R_{JB} \approx R_{EPI}$ ve $R_{RUP} \approx R_{HYP}$ kabulü yapılmıştır.



Şekil 1. Kayıtların zemin koşulları (a) ve faylanma mekanizmalarına (b) göre mesafe (R_{JB}) değerlerine karşılık moment büyüklüğü (M_w) dağılımları.

Veri tabanını oluşturan pekçok ivme kaydının zemin sınıflandırılması kaydedildikleri sahalara ait V_{S30} (zeminin ilk 30 m'lik profilinden hesaplanan ortalama kesme dalgası hızı) değerleri cinsinden yapılmıştır. Bu bilginin mevcut olmadığı durumlarda tahmini zemin sınıfı bilgileri kullanılmıştır. Veri tabanındaki depremlerin fay

bilgileri ulusal ve uluslarası deprem kataloglarından derlenmiştir. Şekil 1, kuvvetli yer hareketi kayıtlarının zemin koşulları ve fay türlerine göre R_{JB} değerlerine karşılık gelen M_w dağılımlarını göstermektedir. Şekil 1.a'da SC-1, SC-2, SC-3 ve SC-4 olarak gösterilen zemin sınıfları sırasıyla kaya zemin (V_{S30} > 800 m/s), sert zemin (360 < V_{S30} ≤ 800 m/s), yumuşak zemin (180 < V_{S30} ≤ 360 m/s) ve gevşek zemin (V_{S30} ≤ 180 m/s) olarak ifade edilmektedir. Zemin sınıflarına ait kayıt sayıları Şekil1.a üzerinde zemin türlerinin yanında verilmiştir. Doğrultu atımlı fay, normal fay ve ters fay türleri ise sırasıyla S, N ve R ile temsil edilerek Şekil 1.b'de gösterilmiştir ve bu fay türlerindeki kayıt sayıları da aynı şekil üzerinde belirtilmiştir.

3. YEREL VE GLOBAL TAHMİN DENKLEMLERİNİN SEÇİLMESİ

EMME projesinde ele alınan bölgede kullanılabilecek yerel ve global tahmin denklemlerinden Cotton vd. (2006) çalışmasında önerilen yönteme göre bir eleme yapılmıştır. Bu yöntem: 1) tehlike hesaplarına konu olan bölgenin teknotik özelliklerine uymayan, 2) hakem değerlendirmesinden geçmemiş bir kaynakta yayımlanan, 3) veri tabanı ve dokümantasyonu yetersiz olan, 4) daha güncel bir versiyonu bulunan, 5) periyot aralığı çalışmanın kapsamına uygun olmayan, 6) yeterli sismolojik parametreleri bünyesinde içermeyen bir fonksiyon kullanılarak türetilen, 7) regresyon metodu güncel olmayan tahmin denklemlerinin olasılıksal sismik tehlike hesaplarında göz ardı edilmesini önermektedir.

Tablo 1, Cotton vd. (2006) kriterlerine göre seçilen tahmin denklemlerini ve bu denklemlerin genel özelliklerini özetlemektedir. Tablo 1'in ikinci kolonunda verilen kısaltılmalar bu bildirinin ilerleyen kısımlarında tahmin denklemlerini belirtirken kullanılacaktır. Tablonun devam eden üç kolonunda, tahmin denkleminin türetilmesinde kullanılan veri tabanının bölgesi, içerdiği kayıt ve deprem sayısı ve depremlerin moment büyüklüğü sınır değerleri verilmektedir. Altıncı kolon, regresyon denkleminin kullandığı mesafe türünü ve maksimum değerini vermektedir. Bu listede tahmin denklemlerinin mesafe türü olarak çoğunlukla R_{JB} ve R_{RUP} kullanıdığı görülmektedir ve yaklaşık olarak 200 km den daha uzak mesafelerde alınan kayıtlar genellikle denklemlerde kullanılmamaktadır. Tahmin denklemlerinin türetilmesinde kullanılan depremlerin fay türleri yedinci kolonda listelenmektedir. Burada verilen U simgesi, tahmin denkleminde fay türünün dikkate alınmadığını göstermektedir. Aetal05 modelinde T ve O sırasıyla ters ve çapraz fayı simgelemektedir ve bu modelin testinde R (ters fay) olarak dikkate alınmışlardır. Tablo 1'in son kolonu tahmin denkleminin zemin etkilerini hesaba katma şeklini göstermektedir. V_{S30} olarak verilen modeller bu değeri doğrudan regresyon denklemine sokarak zemin etkisini daha kapsamlı bir şekilde dikkate almaktadırlar. "Regresyon Katsayısı" ifadesiyle tanımlanan tahmin denklemleri ise zemin etkisini V_{S30} veya tahmini zemin sınıflarına göre regresyon katsayıları belirleyerek yapmaktadırlar.

Tahmin denlemlerinin çoğu yatay bileşenleri birleştirme yöntemi olarak geometrik ortalama yöntemini kullanmaktadır. KG04, Aetal05 ve Betal10 modelleri iki yatay bileşenden büyük olan değeri kullanmaktadır. Fetal03 modeli kaydın her iki bileşenini (BC) de kullanmayı tercih etmiştir. Getal09, AS08, BA08, CB08 ve CY08 modelleri yatay bileşen tanımı olarak GMRotI50 (Boore vd., 2006) kullanmaktadırlar. Bu çalışmada, BC ve GMRotI50 yatay bileşen tanımını kullanan modeller için benzer sonuçlar veren geometrik ortalama yatay bileşen tanımı kullanılmıştır (Beyer ve Bommer, 2006).

Betal10 modelininin türetilmesi için kullanılan veri tabanında fay mekanizmaları belli olmasına karşın regresyon sonucu çıkan denklemde fay terimine yer verilmemiştir. Aynı çalışmada R_{JB} ve R_{EPI} mesafe türleri için farklı regresyon katsayıları önerilmiştir. Bu çalışmada R_{JB} için verilen katsayılar kullanılmıştır. Bu bildiri kapsamında aktif sığ deprem tektoniği için önerilen yer hareketi tahmin denklemlerinin irdelenmesi nedeniyle Zetal06 modeli kullanılarak yapılan yer hareketi parametresi tahminlerinde bu tip sismotektonik bölgeler için kullanılması önerilen düzeltme terimi denkleme dahil edilmiştir. CF08 modeli fay türü ve zemin etkilerini dikkate alırken farklı yöntemler sunmaktadır. Bu çalışmada, Cauzzi ve Faccioli (2008) makalesinde Denklem 2 ve 8 olarak

verilen ve zemin etkisini katsayılarla hesaba katarken faylanma mekanizmasını da dikkate alan yaklaşım kullanılmıştır.

Tablo 1. Test için kullanılan tahmin denklemleri ve genel özellikleri.

Tahmin Denklemi	Kısaltma	Veri tabanı Bölgesi	Kayıt ve deprem sayısı	M_w aralığı	Mesafe türü ve üst limiti	Fay Türü	Zemin Etkisi Hesaba Katma Şekli
Akkar ve Çağnan (2010)	AC10	Türkiye	433, 137	5.0, 7.6	R_{JB}, 200	S, N, R	V_{S30}
Özbey vd. (2004)	Oetal04	Kuzeybatı Türkiye	195, 17	5.0, 7.4	R_{JB}, 300	U	Regresyon Katsayısı
Kalkan ve Gülkan (2004)	KG04	Türkiye	112, 57	4.0, 7.4	R_{JB}, 250	U	V_{S30}
Akkar ve Bommer (2010)	AB10	Avrupa ve Orta Doğu	532, 131	5.0, 7.6	R_{JB}, 100	S, N, R	Regresyon Katsayısı
Ambraseys vd. (2005)	Aetal05	Avrupa ve Orta Doğu	595, 135	5.0, 7.6	R_{JB}, 99	S, N, T, O	Regresyon Katsayısı
Bindi vd. (2010)	Betal10	İtalya	561, 107	4.0, 6.9	R_{JB} veya R_{EPI}, 100	S, N, R	Regresyon Katsayısı
Zhao vd. (2006)	Zetal06	Japonya, Iran ve Amerika	4726, 269	5.0, 8.3	R_{RUP}, 300	S, N, R	Regresyon Katsayısı
Fukushima vd. (2003)	Fetal03	Batı Avrasya	740, 50	5.5, 7.4	R_{RUP}veya R_{HYP}, 235	U	Regresyon Katsayısı
Ghasemi vd. (2009)	Getal09	İran ve Batı Avrasya	716, 200	5.0, 7.4	R_{RUP}veya R_{HYP}, 100	U	Regresyon Katsayısı
Cauzzi ve Faccioli (2008)	CF08	Global	1164, 60	5.0, 7.2	R_{HYP}, 150	S, N, R	Regresyon Katsayısı
Abrahamson ve Silva (2008)	AS08	Global	2754, 135	5.0, 8.5	R_{RUP}, 200	S, N, R	V_{S30}
Boore ve Atkinson (2008)	BA08	Global	1574, 58	5.0, 8.0	R_{JB}, 200	S, N, R	V_{S30}
Campbell ve Bozorgnia (2008)	CB08	Global	1561, 64	4.0, 8.5	R_{RUP}, 200	S, N, R	V_{S30}
Chiou ve Youngs (2008)	CY08	Global	1950, 125	4.0, 8.5	R_{RUP}, 200	S, N, R	V_{S30}

4. TAHMİN DENKLEMLERİNİN UYGULANABİLİRLİK TESTLERİ

4.1 Test Yöntemi

Cotton vd. (2006) çalışmasında önerilen kriterlere göre seçilen yer hareketi tahmin denklemleri, maksimum yer ivmesi (PGA) ve farklı periyotlarda (T = 0.1 s, 0.2 s, 0.5 s, 0.75 s, 1 s, 1.5 s ve 2 s) hesaplanan spektral ivmeler için Scherbaum vd. (2009) çalışmasındaki olasılıksal yöntem kullanılarak değerlendirilmiştir. Scherbaum vd. (2009) çalışmasında önerilen LLH yöntemi, test edilen yer hareketi modeli ve bu test için kullanılan veri tabanının göstermiş oldukları olasılık dağılımları arasındaki farkı hesaplayarak modelin veri tabanını güvenilir şekilde temsil edebilme özelliğini sayısal olarak hesaplar. Bu şekilde herbir aday model için bulunan değerleri karşılaştırarak, modeller arasında kullanılan veri tabanını en iyi şekilde temsil edebilmeye yönelik bir sıralama yapar. LLH, verilen N gözlem sayılı x örnek setli bir g modelinin negatif ortalama logaritmik benzerliğidir ve

Denklem 1 ile ifade edilmektedir. Buradan elde edilen küçük LLH değerleri modelin veri tabanını daha uygun bir şekilde temsil ettiğini gösterir.

$$LLH_j = -\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \log_2 g_j(x_i) \tag{1}$$

Bu çalışmada veri tabanını oluşturan ivme kayıtlarından daha önce belirtilmiş periyotlar için hesaplanan ivme spektrumu değerleri ile yer hareketi tahmin denklemlerinden bunlara karşılık gelen spektral ivmeler kullanılarak LLH değerleri hesaplanmış ve bu LLH değerlerine göre modeller arasında sıralama yapılmıştır. LLH yöntemi uygulanırken dikkate alınan başlıca hususlar ise şu şekildedir:

- Kuvvetli yer hareketi ivme kaydı her iki yatay bileşeninin olması koşuluyla bu yöntemde kullanılmıştır,
- Her bir yer hareketi tahmin modeli, bu modeli geliştirenler tarafından belirlenen ve Tablo 1'de verilen moment büyüklüğü ve mesafe sınırları dikkate alınarak kullanılmıştır,
- Yine bu modeller için geçerli oldukları zemin sınıfı ve varsa fay türleri dikkate alınmıştır.

Örneğin, AB10 tahmin modelini gözönüne alacak olursak, bu model $5.0 \leq M_w \leq 7.6$, $R_{JB} \leq 100$ km, S-N-R fay tipleri ve kaya-sert-yumuşak zemin türleri için geçerlidir. Eğer veri tabanındaki bir kayıt burada sayılan özellikleri taşıyorsa AB10 modelini test ederken LLH yönteminde kullanılmıştır. Aksi tadirde bu kayıt hesaplarda dikkate alınmamıştır. Bu sebeple, seçilen tahmin denklemlerinde kullanılan kayıt sayıları değişiklik göstermektedir. Kayıtların kullanımıyla ilgili diğer bir husus da kaydın yüksek geçirimli filtre periyoduna, kayıt türüne (analog veya dijital) ve zemin türüne bağlı olan kullanılabilir periyot aralığıdır (Akkar ve Bommer, 2006). Kayıtların kullanılabilir periyot aralıklarına göre de seçilen herbir periyotta dikkate alınan kayıt sayısında farklılıklar olabilmektedir. Kayıt sayılarının dağılımı ile ilgili örneklere Bölüm 4.2'de yer verilmiştir.

4.2. Test Sonuçları

Bölüm 4.1'de açıklanan koşullar dikkate alınarak yapılan analizler sonucunda, her bir model için elde edilen LLH değerlerinin periyotlara göre değerleri Tablo 2'de verilmiştir. Tahmin denklemleri arasında bölgeye daha uygun olanları belirleyebilmek için bir sıralama yapma gereği duyulmaktadır. Farklı periyot değerlerinde elde edilen LLH sonuçlarına bakılacak olunursa bazı modeller PGA ve kısa periyot değerlerinde iyi sonuç verirken bazıları da uzun periyotlarda daha iyi sonuç vermektedir. Bu nedenle her bir model için hesaplanan ve Tablo 2'de verilen ortalama LLH değerleri aşağıdaki gibi elde edilmiştir:

i. 2^{-LLH} değerleri her bir periyot için hesaplanır,
ii. Hesaplanan 2^{-LLH} değerlerinin aritmetik ortalaması alınır,
iii. Ortalama 2^{-LLH} değeri kullanılarak Denklem 2'ye göre ortalama LLH değeri hesaplanır.

$$LLH_{ortalama} = \log_2\left(\frac{1}{2^{-LLH}}\right) \tag{2}$$

Tahmin denklemleri sıralandıktan sonra olasılıksal sismik tehlike analizi mantık ağacı uygulamalarında kullanılmak üzere test edilen modellerin ağırlıkları Denklem 3'de verildiği şekilde hesaplanmaktadır (Scherbaum vd., 2009). Modellerin ağırlıkları hesaplanırken 2^{-LLH} terimi kullanılmaktadır. Yukarıda bahsedilen yöntem sayesinde tahmin denklemlerinin ağırlıklarına göre belirlenen sıralamanın LLH sıralaması ile tutarlı olması sağlanmaktadır.

$$w_j = \frac{2^{-LLH_j}}{\sum_{i=1}^{k} 2^{-LLH_k}} \tag{3}$$

Tablo 2'de ortalama LLH değerlerine göre yapılan sıralama, gözönüne alınan bölge için en iyi sonuç veren yer hareketi tahmin denkleminin Türkiye için yapılmış güncel çalışmalardan olan AC10 modeli olduğunu göstermektedir. LLH = 2.12 değerine sahip olan CF08 modelinin de bölge için iyi seçimlerden biri olacağı söylenebilir. Betal10, Oetal ve Zetal06 modelleri de birbirine yakın sonuçlar vermiştir. En iyi sonuçları veren bu beş modelden AC10 ve Oetal Türkiye için, Betal10 modeli de İtalya için türetilmiş yerel modellerdir. CF08 global bir tahmin denklemiyken beşinci model olan Zetal06 tahmin denklemi de esas olarak Japonya için çıkarılmış yerel bir modeldir ama veri tabanında İran ve Batı Amerika'dan da kayıtlar bulunmaktadır.

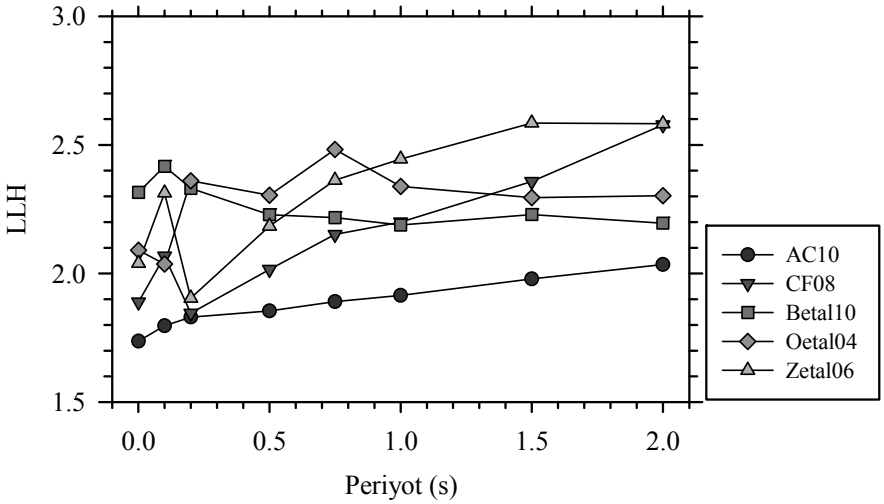
Tablo 2. Ortalama LLH değerlerine göre sıralanmış denklemlerin çalışma için seçilen periyotlardaki LLH değerleri.

Sıra No.	Tahmin Denklemi	PGA	T=0.1 s	T=0.2 s	T=0.5 s	T=0.75 s	T=1 s	T=1.5 s	T=2 s	Ortalama LLH
1	**AC10**	1.74	1.80	1.83	1.85	1.89	1.91	1.98	2.04	**1.88**
2	**CF08**	1.89	2.07	1.85	2.02	2.15	2.20	2.36	2.58	**2.12**
3	**Betal10**	2.32	2.42	2.33	2.23	2.22	2.19	2.23	2.20	**2.26**
4	**Oetal04**	2.09	2.04	2.36	2.30	2.48	2.34	2.29	2.30	**2.27**
5	**Zetal06**	2.04	2.31	1.90	2.18	2.36	2.45	2.58	2.58	**2.28**
6	**CY08**	2.57	2.49	2.39	2.38	2.46	2.48	2.62	2.65	**2.50**
7	**AB10**	2.30	2.35	2.21	2.37	2.57	2.64	3.02	3.10	**2.54**
8	**Aetal05**	2.22	2.25	2.17	2.37	2.51	2.97	3.70	4.38	**2.66**
9	**AS08**	3.04	2.92	2.76	2.65	2.67	2.64	2.78	3.13	**2.81**
10	**Fetal03**	3.83	3.86	3.63	2.77	2.59	2.57	2.35	2.46	**2.89**
11	**Getal09**	-	2.87	2.59	2.78	2.94	2.98	3.12	3.05	**2.89**
12	**BA08**	3.15	3.47	3.18	2.91	2.79	2.74	3.03	3.30	**3.05**
13	**CB08**	4.26	3.70	3.73	3.77	3.57	3.44	3.47	3.61	**3.68**
14	**KG04**	6.00	6.92	4.73	4.60	4.63	4.25	4.47	4.38	**4.79**

Şekil 2 bu beş modelin maksimum yer ivmesi ve seçilen spektral periyot değerlerindeki LLH değerlerinin karşılaştırmasını göstermektedir. Şekilden de açıkça görüldüğü gibi, Betal10 dışındaki modellerin LLH değerlerinde 1 s'den sonra artış görülmektedir. Bu artış CF08 ve Zetal06 modelleri için diğer modellere göre daha belirginken AC10 modeli için değişimin diğer modellere göre daha az olduğu söylenebilir.

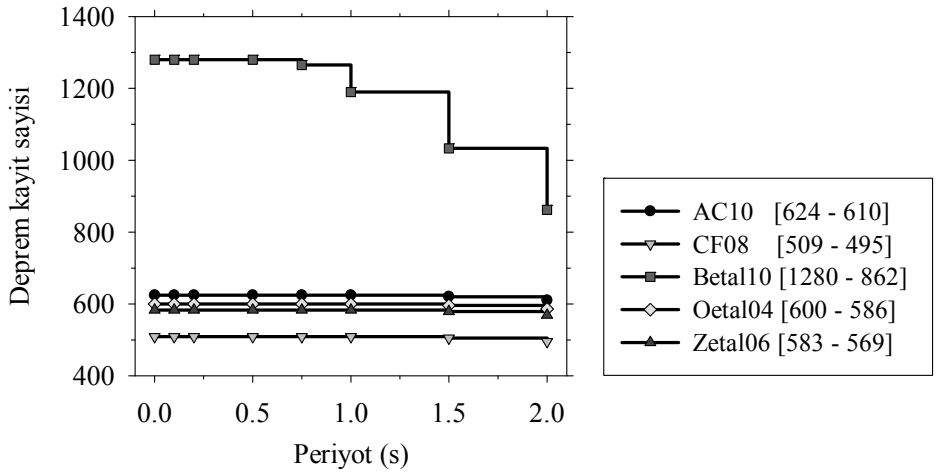
LLH değerlerine göre yapılan test sonuçlarına bakıldığında, yeni nesil azalım ilişkileri (NGA) olarak adlandırılan ve araştırmacılar tarafından en çok tercih edilen tahmin denklemleri olan CY08, AB08, BA08 ve CB08 modellerinin mevcut veri tabanı için çok iyi sonuçlar vermediği ortaya çıkmaktadır. Bu modellerden, CY08 modeli için yapılan analizlerlerden, diğerlerine göre daha makul LLH değerleri elde edilmiştir. NGA modelleri için böyle bir sonucun ortaya çıkması, bu modellerin yer hareketi parametrelerini tahmin ederken kullandıkları parametrelerin çok detaylı olmasına bağlanabilir. Dikkat çekici diğer bir nokta da KG04 tahmin denkleminin Türkiye için çıkarılmış olmasına rağmen LLH sonuçlarına göre yapılan sıralamada en sonda yer almısıdır. KG04 modeli $4 \leq M_w \leq 7.4$ arasındaki depremler için kullanılabilmesine karşın bu çalışmada kullanılan veri tabanındaki $M_w < 5.5$ olan kayıtları iyi tahmin edemediği saptanmıştır. M_w değeri 5.5'den büyük

deprem kayıtları göz önüne alınarak yapılan testlerde, bu model daha iyi performans göstermiştir. Bu gözlem KG04'ün türetilmesi sırasında kullanılan veri tabanında yer alan küçük moment büyüklüğü değerlerine sahip depremlere ait sismolojik parameterelerin (moment büyüklüğü, mesafe, fay mekanizması vb.) güvenilir olmadığı sonucuna işaret edebilir.

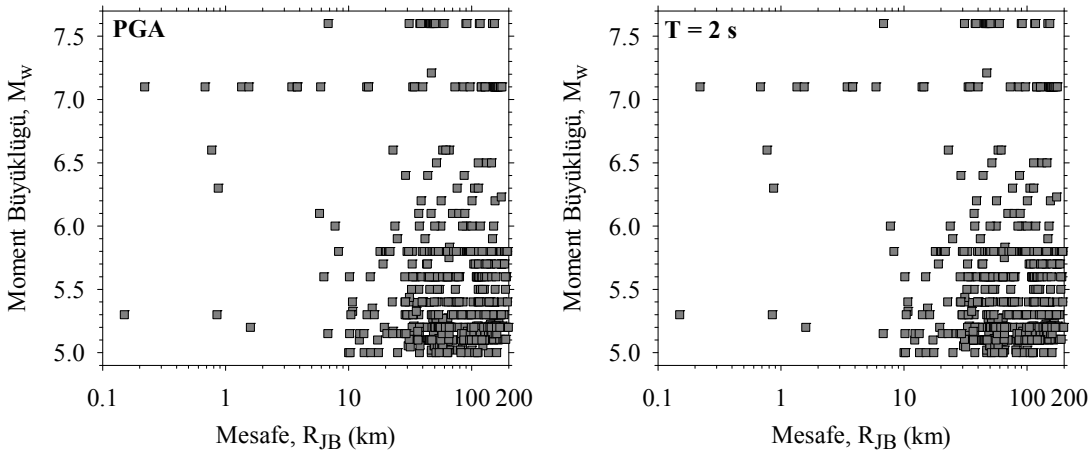


Şekil 2. Test sonuçlarına göre ilk 5 sıradaki tahmin denklemlerinin seçilen periyotlardaki LLH dağılımları.

LLH değerlerine göre yapılan sıralamada ilk beş sırada yer alan denklemlerin testi yapılırken bu çalışmada ele alınan veri tabanında kullanılan kayıt sayılarının seçilen periyot değerlerindeki dağılımı Şekil 3'de verilmiştir. Bu şekilde T = 0 s maksimum yer ivmesini (PGA) temsil etmektedir. Şeklin sağında açıklama kısmında model kısaltmalarının yanında sırasıyla, PGA ve T = 2 s değerlerinde yapılan testlerde kullanılan ivme kaydı sayısı verilmektedir. Artan periyotla birlikte kayıt sayısının azalma nedeni kayıtların kullanılabilir periyot aralığıdır. Ayrıca modelden modele değişen kayıt sayılarının nedeni de Bölüm 4.1'de açıklandığı gibi tahmin denklemlerinin önkoşullarıdır. Şekil 4, AC10 modeli için LLH yöntemine göre yapılan testlerde kullanılan kayıtların R_{JB} değerlerine karşı M_w değerlerinin dağılımını göstermektedir. Şeklin sol sütununda yer alan çizim PGA değerinde kullanılan kayıtları gösterirken sağ sütundaki çizim T = 2 s'deki kayıtların dağılımını vermektedir. PGA ve T = 2 s için kullanılan kayıt sayıları Şekil 3'de görüldüğü gibi sırasıyla 624 ve 610'dur.



Şekil 3. Tahmin denklemleri tarafından kullanılan deprem kayıt sayılarının periyoda göre değişimi.



Şekil 4. Akkar ve Çağnan (2010) modelinin PGA (sol sutün) ve T = 2 s (sağ sütun) için R_{JB} değerlerine karşı M_w dağılımı.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, EMME projesi kapsamında Ortadoğu ve Kafkas ülkelerinin sismik tehlike çalışmaları için kullanılması düşünülen ve Cotton vd. (2006) çalışmasında önerilen yaklaşıma göre seçilen yerel ve global tahmin denklemlerinin Türkiye için uygunluğu, LLH yöntemi (Scherbaum vd., 2009) kullanılarak test edilmiştir. Çalışmada kullanılan veri tabanı, Türkiye sınırları içinde kaydedilmiş $3.6 \leq M_w \leq 7.6$ arasında değişen depremlere ait, zemin ve fay mekanizmaları bilinen, 2 yatay bileşenli 1750 kayıttan oluşmaktadır. LLH yöntemi uygulanarak yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- LLH yöntemine göre yapılan analiz sonuçları, Türkiye'de yapılacak sismik tehlike çalışmaları için AC10, CF08, Betal10, Oetal04 ve Zetal06 modellerinin uygulanabilir olduğunu göstermiştir.
- LLH sonuçlarına göre elde edilen modellerin çeşitliliği, Türkiye ile benzer tektonik yapıya sahip bölgeler için türetilen global veya yerel modeller kullanarak bölgedeki sismik tehlikeyi tahmin etmede iyi sonuçlar alınabileceğini göstermiştir.
- Yeni nesil azalım ilişkileri olarak adlandırılan NGA modellerinden (CY08, AB08, BA08 ve CB08) CY08 dışındakilerin performansı Türk veri tabanı kullanıldığında düşük çıkmıştır.
- İlk beş sıradaki modelin kullandığı kayıt sayılarına bakıldığında AC10, Oetal04 ve Zetal06 modelleri için 600, CF08 modeli için 500 ve Betal10 modeli için de 1300 civarında olduğu görünmektedir. Bu çeşitliliğe rağmen birbirine yakın LLH değerlerine ulaşılması, yöntemin veri setinin boyutuna bağlı olmadığının göstergesi olabilir. Bununla beraber bu gözlemin kesinleştirilmesi için proje kapsamında araştırmalar devam etmektedir.

KAYNAKLAR

Abrahamson, N.A., ve Silva, W.J. (1997). Empirical Response Spectral Attenuation Relations for Shallow Crustal Earthquakes. *Seismological Research Letters*, **68(1)**, 94-127.

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 Bommer, J.J. (2010). Empirical equations for the prediction of PGA, PGV and spectral accelerations in Europe, the Mediterranean region and the Middle East. *Seismological Research Letters*, **81(2)**, 195–206.

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.

Ambraseys, N.N., Douglas, J., Sarma, S.K. ve Smit, P.M. (2005). Equations for the estimation of strong ground motions from shallow crustal earthquakes using data from Europe and the Middle East: Horizontal peak ground acceleration and spectral acceleration. *Bulletin of Earthquake Engineering*, **3(1)**, 1–53.

Beyer, B. and Bommer, J.J. (2006). Relationships between median values and between aleatory variabilities for different definitios of the horizontal component of motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **96(4A)**, 1512–1522.

Bindi, D., Luzi, L., Massa, M. ve Pacor, F. (2010). Horizontal and vertical ground motion prediction equations derived from the Italian Accelerometric Archive (ITACA). *Bulletin of Earthquake Engineering*, **8(5)**, 1209–1230.

Boore, D.M., Joyner, W.B. ve 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**, 128–153.

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.

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.

Cauzzi, C. ve Faccioli, E. (2008). Broadband (0.05 to 20 s) prediction of displacement response spectra based on worldwide digital records. *Journal of Seismology*, **12(4)**, 453–475.

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.

Cotton, F., F. Scherbaum, J. J. Bommer, ve H. Bungum (2006). Criteria for selecting and adjusting ground-motion models for specific target applications: Applications to Central Europe and rock sites. *Journal of Seismology*, **10(2)**, 137–156.

Erdik, M., Demircioğlu, M., Sesetyan, K., Durukal, E. ve Siyahi, B. (2004). Earthquake hazard in Marmara Region, Turkey. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **24**, 605–631.

Fukushima, Y., Berge-Thierry, C., Volant, P., Griot-Pommera, D.-A. ve Cotton, F. (2003). Attenuation relation for western Eurasia determined with recent near-fault records from California, Japan and Turkey. *Journal of Earthquake Engineering*, **7(4)**, 573–598.

Ghasemi, H., Zare, M., Fukushima, Y. ve Koketsu, K. (2009). An empirical spectral ground-motion model for Iran. *Journal of Seismology*, **13**, 499–515.

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.

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.

Yunatcı, A. A., Çetin, K.Ö. (2006). Impact of attenuation models on probabilistic seismic hazard analysis: A case study for Bursa City, Turkey. *Proceedings of the 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, April 18-22, San Francisco, California, USA.

Zhao, J.X., Zhang, J., Asano, A., Ohno, Y., Oouchi, T., Takahashi, T., Ogawa, H., Irikura, K. Thio, H.K., Somerville, P.G. ve Fukushima, Y. (2006). Attenuation relations of strong ground motion in Japan using site classification based on predominant period. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **96(3)**, 898–913.