AVRUPA VE ORTADOĞU İÇİN HESAPLANAN YER HAREKETİ TAHMİN DENKLEMLERİNİN TÜRKİYE İLE UYUMLULUĞUNUN İRDELENMESİ

M.A. Sandıkkaya[1] ve S. Akkar[2]

[1] *Araştırmacı, İnşaat Müh. Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara*
[2] *Profesör, İnşaat Müh. Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara*
Email: askaya@metu.edu.tr

ÖZET:

Akkar vd. (2013a), Avrupa ve Ortadoğu bölgeleri için üretilen yer hareketi tahmin denklemlerinin sonuncusunu, Akkar vd. (2013b) tarafından hazırlanmış olan güncel veri tabanı kullanılarak sunmuştur. Önerilen denklemler sismik tehlike çalışmaları için gerekli olan bilgiler ışığında daha önceden modellenmiş ve aynı bölge için geçerli olan denklemlere göre bir takım yenilikler içermektedir. Noktasal ve sonlu fay mesafe birimleri için üretilmiş olan bu denklemlerin geçerli olduğu magnitüd bandı muadillerine göre arttırılmıştır. Moment magnitüd büyüklüğünün (M_w) taban değeri M_w 4'e indirilmiş ve kaynak-istasyon aralığı 200 km'ye çıkarılmıştır. Bu denklemlerle 0-4 s aralığında spektral ordinatlar için tahminde bulunulabilmektedir. Son olarak bu denklemlere hem doğrusal hem de doğrusal olmayan zemin davranımı eklenmiştir. Avrupa ve Ortadoğu bölgelerini etkileyen sismik aktiviteler göz önüne alındığında Türkiye önemli bir yere sahiptir. Bu savı kanıtlar mahiyette Akkar vd. (2013a) çalışmasında kullanılan kuvvetli yer hareketi kayıtlarının yarısından fazlası (%55) Türkiye'dendir. Akkar vd. (2013a) tahmin denklemi, bu özelliğinden dolayı ülkemizde önemi son zamanlarda çok daha iyi anlaşılan olasılıksal sismik tehlike çalışmalarında önemli bir yere sahip olabileceği düşünülmektedir. Bu bildiride Akkar vd. (2013a) tahmin denkleminin üretilmesinde kullanılan Türk ve Avrupa kayıtları dikkate alınarak residüel analizleri yapılacaktır. Deprem-içi ve arası residüeller belli sismik parametrelere (moment büyüklüğü ve mesafe) göre değerlendirilip söz konusu denklemin Türkiye için kullanım limitleri ve uyumluluğu tartışılacaktır. Ayrıca denklemin diğer Avrupa'da ve Ortadoğu'da bulunan ülkeler için uyumluluğu da bildiriye konu olan bu çalışma sırasında karşılaştırılmış olacaktır. Çalışma sonunda bu denklemin gelecekte daha da geliştirilmesine yarayabilecek bölgesel farklılıkların irdelenmesine olanak sağlayacak gerekli ilk veriler de elde edilecektir.

ANAHTAR KELİMELER: Sismik tehlike, kuvvetli yer hareketi, yer hareketi tahmin denklemi.

1. GİRİŞ

İlk Avrupa ve çevresi için üretilen tahmin denklemi Ambraseys vd. (1996) tarafından geliştirilmiştir. Bu denklemde M_s'e bağlı birinci dereceden doğrusal fonksiyon ile magnitüd ölçeklemesi yapılmış ve mesafe azalımı için kırılan fayın yeryüzündeki izdüşümüne olan en yakın uzaklık ile tarif edilen R_{JB} (Joyner ve Boore, 1981) mesafe birimi kullanılmıştır. Zemin etkisi ise V_{S30} (kayma dalga hız profilinin ilk 30 m için zaman ortalaması) temelli saha grupları için göz önüne alınmıştır. Bommer vd. (2003), bu modele fay tipi etkisini – ters faydan veya normal faydan elde edilen spektral ivmenin yan atımlı faydan elde edilen spektral ivmeye olan oranı – eklemiştir. Ambraseys vd. (2005), M_s yerine M_w kullanmaya başlamış ve mesafe azalım modeline de magnitüd etkisini eklemiştir. Akkar ve Bommer (2007) ile ikinci dereceden magnitüd ölçeklemesine geçilmiştir. Akkar ve Bommer (2010) ve Bommer vd. (2012) modellerinde de aynı fonksiyon kullanılmıştır.

Bu bölge için üretilmiş denklemler göz önüne alındığında son pan-Avrupa denklemi Akkar vd. (2013, bundan sonra A2013 ile anılacaktır) tarafından üretilmiştir. Önerilen denklemler sismik tehlike çalışmaları için gerekli olan bilgiler ışığında muadillerine göre bir takım yenilikler içermektedir. Bu denklemin türetilmesinde kullanılan veri tabanı, Akkar vd. (2013b) tarafından hazırlanan en güncel Avrupa veri bankasından itina ile seçilerek oluşturulmuştur. Seçilen 1041 üç bileşenli ivme zaman serilerinin tamamı saha ölçümleri sonucu V_{S30} değerleri belirlenmiş 322 istasyonda kaydedilmiştir. 200 km'den kısa mesafede alınan bu kayıtların M_w değerleri 4'ten büyüktür. Kullanılan 221 depremin hepsinin fay tipi (ters-, normal- ve yanal-atımlı olmak üzere) bellidir. Daha iyi bir regresyon yapabilmek için tek kayıt içeren depremler kullanılmamıştır. Bu hassas kıstasların uygulanmasından sonra bile daha evvelki sürümlerine göre kayıt sayısı yaklaşık 2 kat artmıştır. Magnitüd ölçeklemesinde son modeller gibi ikinci dereceden bir fonksiyon kullanılmış ancak yüksek magnitüdlü depremlerin etkisini yakalayabilmek için doğrusal kısımda kırık bir fonksiyon tercih edilmiştir. Mesafe ölçeklemesi ve fay tipi etkisinde daha önceki modellerin aynısı kullanılmıştır. Zemin davranışı ise Sandıkkaya vd. (2013) tarafından önerilen doğrusal olmayan saha büyütme oranı modeli kullanılarak sağlanmıştır. Bu tarz bir zemin modelinin kullanılması Avrupa tahmin denklemleri açısından bir ilktir.

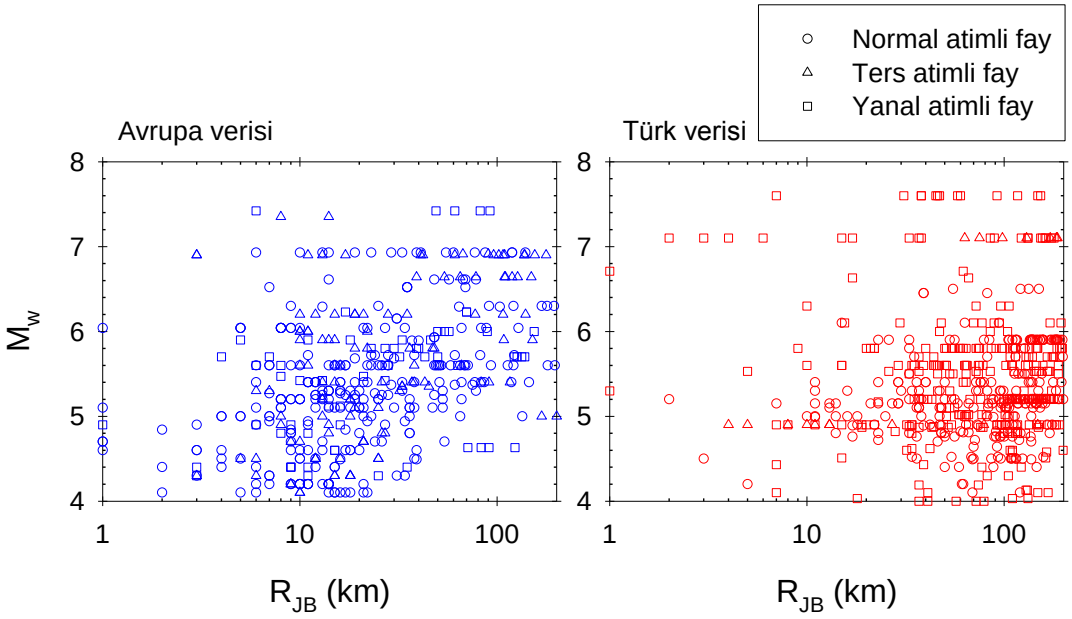
Avrupa ve Ortadoğu bölgelerini etkileyen sismik aktiviteler göz önüne alındığında Türkiye önemli bir yere sahiptir. Bu savı kanıtlar mahiyette A2013 çalışmasında kullanılan kuvvetli yer hareketi kayıtlarının yarısından fazlası (%55) Türkiye'dendir. Bu özelliği ile ülkemizde önemi son zamanlarda çok daha iyi anlaşılan olasılıksal sismik tehlike çalışmalarında önemli bir yere sahip olabileceği düşünülmektedir. Bu bildiride A2013 tarafından üretmekte kullanılan Türk ve Avrupa kayıtları dikkate alınarak residüel analiz yapılacaktır. Ayrıca denklemin diğer Avrupa'da ve Ortadoğu'da bulunan ülkeler için uyumluluğu da bildiriye konu olan bu çalışma sırasında karşılaştırılmış olacaktır.

Bu bağlamda, A2013 çalışmasında elde edilen deprem-içi ve arası residüellerin magnitüd ve mesafe ölçeklemeleri Türk ve Avrupa kayıtları için ayrı ayrı incelenecektir. Bu değerlendirmeler ışığında söz konusu denklemin Türkiye için kullanım limitleri ve uyumluluğu tartışılacaktır. Çalışma sonunda Akkar vd. (2013) modelinin gelecekte daha da geliştirilmesine yarayabilecek bölgesel farklılıkların irdelenmesine olanak sağlayacak gerekli ilk veriler de bu çalışma da sunulacaktır.

2. VERİ TABANI

Bu çalışmada kullanılan kayıtlar A2013 çalışmasında kullanılan (seçme yöntemi önceki kısımda belirtilen) veri tabanı ile aynıdır. Denklemlerin uyumluluğunun incelenmesinin yanı sıra bir sonraki denklemler içinde temel oluşturacak bilgiler etmek amacında olduğumuz için veri tabanına dışarıdan Türk kayıtları eklenmemiştir. Daha geniş bir Türk verisi ile bu denklemi test etmek faydalı olabilir. Bu tarz çalışmaların detayları Kale ve Akkar (2013)'te verilmiştir.

M_w-R_{JB} dağılımı Türk ve Avrupa verisi için Şekil 1'de ayrı ayrı karşılaştırılmıştır. Türk veri tabanı incelendiğinde tüm veriler içerisinde ters-atımlı fayların oranın çok az olduğu görülür. Aynı şekilde yakın mesafe kayıtlarının Avrupa verisine göre daha az olduğu tespit edilmişken uzak mesafe kayıtlarında da Türk verisi baskındır. M_w 7'den büyük depremlerin çoğu Türkiye'dendir (1999 Kocaeli ve Düzce, 2010 Van depremleri). Düşük magnitüd bandında ise Avrupa depremleri daha ağırlıktadır.



Şekil 1. Avrupa ve Türk verisinin karşılaştırılması

3. METOT

A2013te sunulan denklemler Abrahamson ve Youngs (1992) tarafından önerilen "*random effects regression*" algoritması ile hesaplanmıştır (Denklem 1).

$$\ln (Y_{ij}) = f(M, R, \Theta) + (R_{ij}) \quad (1)$$

Bu denklemde, "Y_{ij}", "i" depreminde alınan "j" kaydının spektral ivmesidir. "f(M, R, Θ)" ise ilgili kaydın spektral ivmesinin kaynak, mesafe ve diğer parametreler ile modellenmesi sonucunda hesaplanan tahminidir. İkisi arasındaki fark toplam residüel (R_{ij}) olarak adlandırılır. Bir residüel negatif değerde olması tahmin denkleminin güvenli tarafta sonuç verdiğini gösterir. Pozitif çıktığında ise bulunulan tahmin güvenilir olamayan taraftadır. Modelleme esnasında toplam residüel deprem-arası residüel (η_i) ve deprem-içi residüel (ε_{ij}) olmak üzere ikiye ayrılır (Denklem 2). Normal dağılım gösteren deprem-arası ve deprem-içi residüellerin ortalaması 0'dır. Standard sapmaları ise sırasıyla τ ve ϕ'dir.

$$(R_{ij}) = \eta_i + \varepsilon_{ij} \quad (2)$$

Deprem-arası residüel depremin kaynak etkisinin değişkenliğini deprem-içi residüel ise kayıtların arasındaki değişkenliği ifade eder. Elde edilen bu residüeller parametreler bazında incelenerek denklemlerin limitleri ve uyumlulukları araştırılabilir ve varsa eksiklikleri saptanabilir. Örnek olarak Scasserra vd. (2009) İtalyan veri tabanı kullanılarak NGA (Power vd., 2008) denklemlerini bu tip bir metot ile incelemiştir.

4. SONUÇLAR

Türk ve Avrupa verisi için deprem içi ve deprem arası residüellerin pik yer ivmesi (T = 0 s), kısa (T = 0,2 s), orta (T = 1 s) ve uzun (T = 4 s) periyoddaki dağılımları Şekil 2'de incelenmiştir. Her iki veri grubu içinde normal

dağılıma uygun bir şekilde "0" çevresinde yoğunlaşan ve her iki yöne doğru (pozitif ve negatif) hızlıca azalan bir davranış gözlenmiştir. Yalnız Türk kayıtları incelendiğinde (her bir çubuktaki yüzdeleri grafikte belirtilmiştir), A2013 güvenli tarafta sonuçlar vermekte ve Avrupa depremleri için ise güvenilir olmayan tarafta sonuçlar vermektedir.

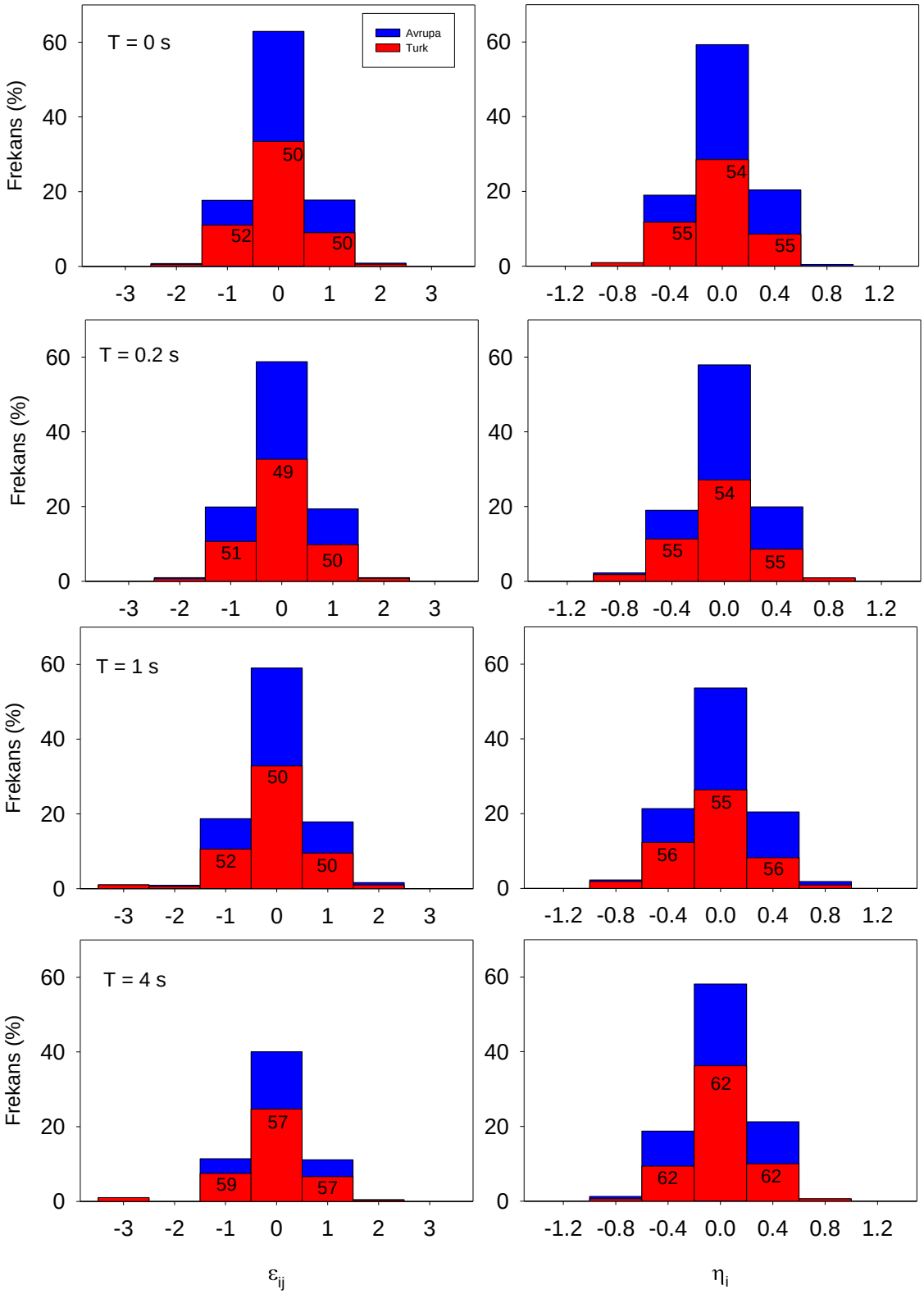
Deprem-arası residüeller deprem bilgisiyle ile alakalı olan değişkenliği ifade etmektedir. Ancak şuna dikkat edilmelidir ki bazı deprem parametreleri artık deprem-içi residüeller de etkilidir (M_w parametresinin mesafe ölçeklemesinde kullanılması gibi). Ancak bu etki, bu çalışmada göz ardı edilmiştir. A2013 denkleminde deprem kaynak modellenmesi deprem büyüklüğünün yanı sıra fay tipi ile de ifade edilmiştir. Fay tiplerine göre yapılan residüel incelemede herhangi bir olumsuz eğilim gözlenmemiştir ve bu nedenle daha detaylıca bir incelemeye gerek duyulmamıştır.

Deprem-içi residüellerde ise hem mesafe hem de zemin etkileri mevcuttur. Bu residüellerin ayrılması çalışmaları halen devam etmektedir (Al Atik vd., 2010). Ancak A2013 denklemlerinin elde edilmesinde dışarıdan temin edilen bir saha modeli kullanıldığı için zemin etkisinin bu residüellerdeki değişimi ihmal edilerek gösterilmeyecektir. Şekil 3 ve 4'te Türk ve Avrupa verisi için sırasıyla deprem-arası ve deprem-içi residüellerin saçılımı M_w ve R_{JB}'ye göre verilmiştir. Her iki şekil, Şekil 2 ile uyumlu olması için 4 periyodda incelenmiştir. Ayrıca bu residüeller kendi aralarında gruplanıp her grubun kendi ortalaması ve karşılık gelen standart sapması da bu şekillere eklenmiştir.

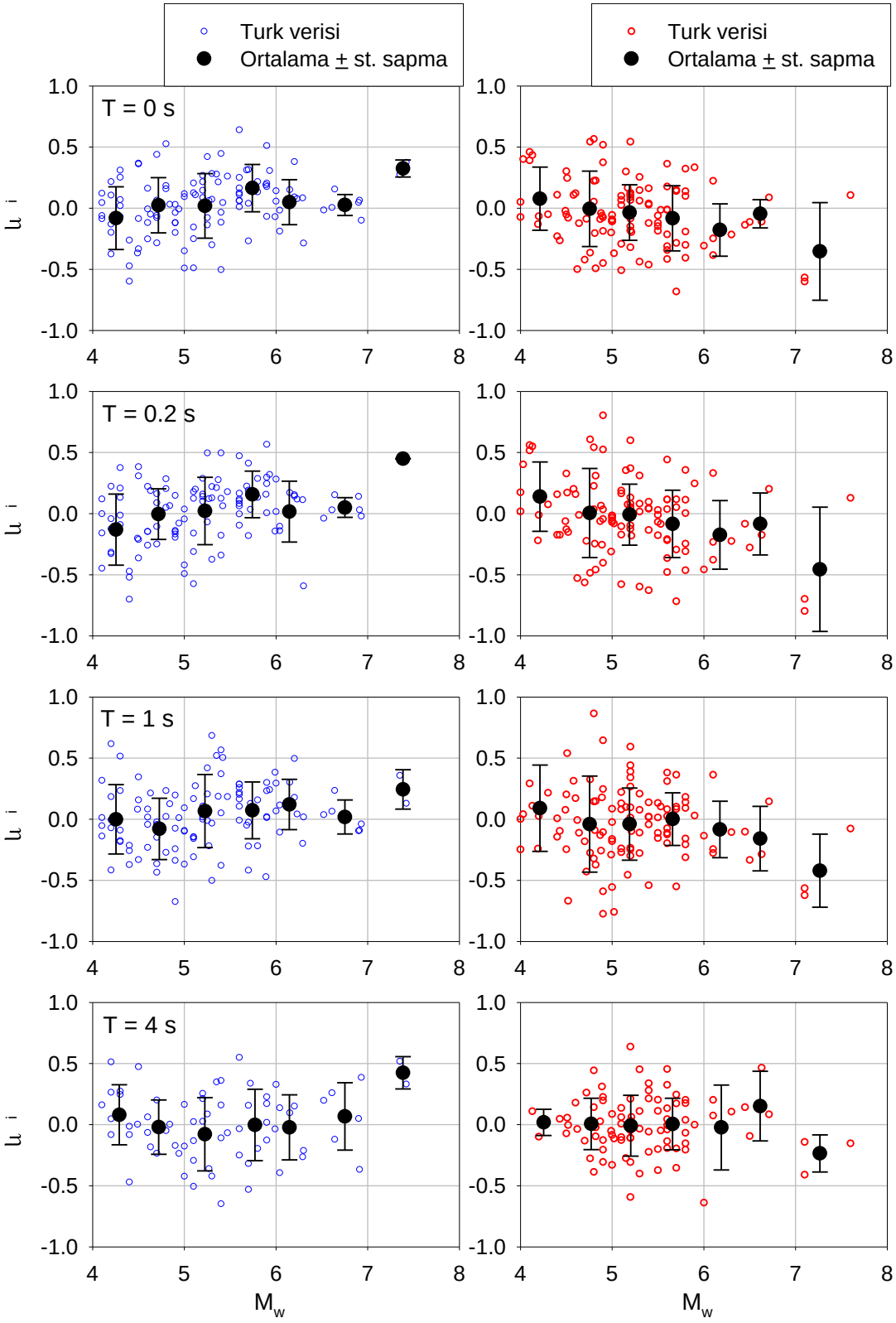
Hem Türk hem de Avrupa verisi M_w 7 ye kadar gayet iyi bir saçılım göstererek başarılı bulunmuştur. Avrupa için pozitif tarafta bir eğilim gözükürken bu Türk verileri için negatif tarafta çıkmıştır. Büyük magnitüdlü depremler incelendiğinde bu etki daha da baskın hissedilmiştir. Avrupa verisinin bu eksikliği veri azlığından kaynaklanmaktadır. Türk verisinde ise Kocaeli depremi için daha iyi sonuç alınırken Düzce ve Van depremleri için çok güvenli tarafta kalan kestirimler çıkmaktadır. Mesafeye göre residüellerin dağılımları incelendiğinde her iki grup içinde A2103 başarılı sonuçlar vermiştir. Ancak yüksek R_{JB} değerlerinde Avrupa verisinin arttırılması daha iyi bir dağılım elde edebilmek için gereklidir.

5. ÖNERİLER

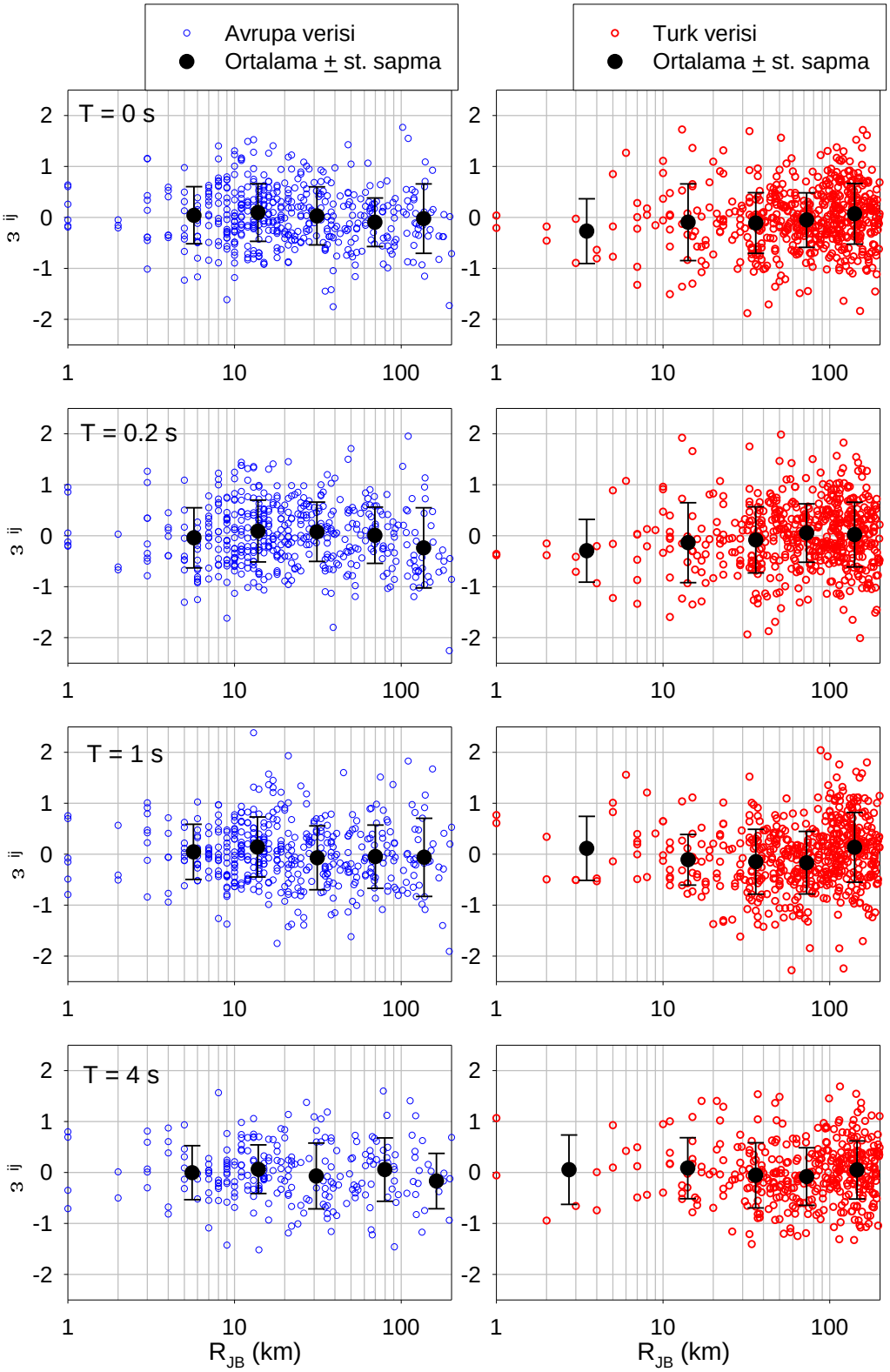
A2013 tarafından üretilen denklemlerin deprem-arası ve deprem-içi residüelleri Türk ve Avrupa verisi için ayrı ayrı incelenmiştir. Yapılan inceleme sonucunda yeni denklemlerin Avrupa için güvenli olmayan tarafta tahminde bulunulduğu görülmüş ancak bu varsayımın sadece yüksek magnitüdlü depremlerde etkin olduğu gözlemlenmiştir. Türk verisi içinse özellikle Düzce ve Van depremleri dışında gayet başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Türetilen bu denklemler hem daha geniş bir ölçekte hem de getirmiş olduğu yeniklikler göz öne alındığında Avrupa ve çevresin için önemli katkılar sağlayacaktır. Türk verisinin kullanılan veri tabanındaki baskınlığı deprem-arası ve deprem-içi residüellerdeki başarılı tahminleri değerlendirildiğinde önerilen depremlerin sismik tehlike çalışmalarında kullanılması için hiçbir sakınca görülmemiştir.



Şekil 2. Deprem arası (ε_{ij}) ve deprem içi (η_i) residüellerin Türk ve Avrupa verisi için dağılımları



Şekil 3. Türk ve Avrupa depremleri için deprem içi (η_i) residüellerin M_w'ya göre saçılımları



Şekil 4. Türk ve Avrupa kayıtları için deprem içi (ε_{ij}) residüellerin R_{jb}'ye göre saçılımları

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.

Akkar, S. ve Bommer, J.J. (2007). Prediction of elastic displacement response spectra at multiple damping levels in Europe and the Middle East. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* **36:**1275-1301.

Akkar, S. ve Bommer, J.J. (2010). Empirical equations for the prediction of PGA, PGV and spectral accelerations in Europe, the Mediterranean and the Middle East. *Seismological Research Letters* **81:**195-206.

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. *Bulletin of Earthquake Engineering*, DOI 10.1007/s10518-013-9461-4.

Akkar, S., Sandıkkaya, M.A., Şenyurt, M., Azari, A.S. ve Ay, B.Ö. (2013b). Reference database for seismic ground-motion in Europe (RESORCE). *Bulletin of Earthquake Engineering*, (değerlendirmede).

Al Atik, L., Abrahamson, N.A., Bommer, J.J., Scherbaum, F., Cotton, F. ve Kuehn, N. (2010). The variability of ground-motion prediction models and its components. *Seismological Research Letters* **81:**783-793.

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

Ambraseys, N.N., Simpson, K.A. ve Bommer, J.J. (1996). The prediction of horizontal response spectra in Europe. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* **25**:371-400.

Bommer, J.J., Akkar, S. ve Drouet, S. (2012). Extending ground-motion prediction equations for spectral ordinates to higher response frequencies. *Bulletin of Earthquake Engineering* **10**:379–399.

Bommer, J.J., Douglas, J. ve Strasser, F.O. (2003). Style-of-faulting in ground motion prediction equations. *Bulletin of Earthquake Engineering* **1**:171-203.

Joyner, W.B. ve Boore, D.M. (1981). Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California, earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America* **71**:2011-2038.

Kale, Ö. ve Akkar, S. (2013). A new perspective for selecting and ranking ground-motion prediction equations (GMPEs): The Euclidian distance-based ranking method. *Bulletin of the Seismological Society of America* **103**(2A): 1069-1084.

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.

Sandıkkaya, M.A., Akkar, S., Bard, P-Y. (2013a). A nonlinear site amplification model for the new pan-European ground-motion prediction equations. *Bulletin of the Seismological Society of America* **103**: 19-32.
Scasserra, G., Stewart J.P., Bazzurro, P., Lanzo, G., ve Mollaioli F. (2009). A Comparison of NGA Ground-Motion Prediction Equations to Italian Data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **99**: 2961-2978.