

Türkiye ve Çevresi İçin Geliştirilmiş Yer Hareketi Tahmin Denklemlerine Genel Bir Bakış¹

Emre Gürel²

Evren Seyrek³

Özet

Bir yapıya gelecek olan deprem kuvvetlerinin belirlenmesi için deprem yönetmeliklerinde tanımlanan tasarım spektrumları veya sahaya özgü sismik tehlike analizleri ile elde edilmiş spektrum kullanılmaktadır. Sismik tehlike analizi ile yer hareketi parametresini belirlemek için yer hareketi tahmin denklemlerinin seçimi önemli bir süreçtir. Proje sahası ile uyum sağlayan tahmin denklemi önceden belirlenebilir ise önemli bir sorun çözülecektir. Türkiye’de son yıllarda kuvvetli yer hareketi istasyonlarının sayısındaki ve kayıtların sayı ve kalitesindeki artış sismik tehlike çalışmalarına önemli kaynak oluşturmaktadır. Bu çalışma kapsamında, Türkiye için geliştirilmiş yerel yer hareketi tahmin denklemleri incelenmiş ve formları ile ilgili genel bir değerlendirme yapılmıştır.

1. GİRİŞ

Dünya üzerinde farklı lokasyonlarda meydana gelmiş ve verdiği hasarlar sebebiyle ülke ekonomilerini büyük zararlara uğratan çok sayıda deprem yaşanmıştır. Özellikle zeminlerin deprem hasarının büyüklüğü ve dağılımı üzerinde son derece etkili olduğunu gösteren 1964 Alaska, 1994 Niiagata ve 1995 Kobe depremleri gibi önemli depremler meydana gelmiştir (Kramer, 1996). Ülkemiz de dünyanın sismik olarak en aktif bölgelerinden biri olan

- 1 Bu bölüm, Doç.Dr. Evren SEYREK’in danışmanlığında İnş. Yük. Müh. Emre Gürel tarafından Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nde hazırlanan “Yerel Yer Hareketi Tahmin Denklemlerinin Performansının Ege Bölgesi için İncelenmesi” başlıklı Yüksek Lisans tezinden üretilmiştir.
- 2 İnş. Yük. Müh. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü, Kütahya, Türkiye, gurel.emre@hotmail.com, ORCID: 0000-0002-0114-23643
- 3 Doç. Dr., Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, İnşaat Müh. Böl., Kütahya, Türkiye, evren.seyrek@dpu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-4373-6723

Alp-Himalaya deprem kuşağında yer almakta olup hasar yapıcı çok sayıda da deprem yaşanmıştır. Kadırioğlu vd. (2018); 1900 ile 2012 yılları arasında 6.0 veya daha büyük magnitüde sahip 203 adet depremin kaydedildiğini ifade etmiştir. Bu depremler arasındaki en yıkıcı özellikte olan 72 deprem sonucu 90 000'den fazla can kaybına neden olmuştur. Türkiye ekonomisi üzerinde tahmini 50 Milyar dolardan daha fazla ekonomik kayba sebep olan bu depremlerin psiko-sosyolojik etkileri de çok büyük olmuştur (Emre vd., 2018).

Türkiye'nin dünyanın sismik olarak en aktif bölgelerinden biri olması, deprem sonrası can ve mal kayıplarını azaltmak için depreme dayanıklı yapı tasarımı konusunun daha da önemli hale gelmesine neden olmaktadır. Bu kuvvetler maksimum yer ivmesi ve tasarım spektrumu değerlerine dayalı olarak deprem yönetmeliklerinde belirtilen çerçevede ve deprem tehlike veya deprem bölgeleri haritasına göre hesaplanmaktadır. Bu gibi haritalar, depremden etkilenecek yapıların projelendirilmesi aşamasında mühendislere tehlikenin seviyesini belirlemek ve yapıların emniyetli şekilde dizayn edilmesini sağlamak için veriler sunmaktadır. Bu haritaların oluşturulmasında yaygın olarak olasılıksal sismik tehlike analizleri kullanılmaktadır (Seyrek, 2018).

Sismik tehlike analizi ile yer hareketi parametresini belirlemek için yer hareketi tahmin denklemlerinin seçimi önemli bir süreçtir. Ülkemizde de son yıllarda kuvvetli yer hareketi istasyonlarının sayısındaki ve kayıtların sayı ve kalitesindeki artış yer hareketi tahmin denklemlerine çalışmalarına önemli bir kaynak oluşturmaktadır. Kale (2017); yer hareketi kaydı sırasındaki artışın deprem tehlikesini tahmin edebilmeye yönelik çalışmalara büyük faydası olduğunu, sayısal veri artışıyla birlikte zemin koşulu, sismik kaynak-istasyon arası mesafe ve fay türü gibi bilgilerin de güvenilirliğinin artırıldığını ve bu çalışmalara paralel olarak yer hareketi tahmin denklemlerinin sayısının da arttığını ifade etmiştir.

Yer hareketi tahmin denklemleri, deprem tehlike haritası dışında, zemin sıvılaşma analizleri, zemin büyütme analizleri ve mikro bölgeleme gibi uygulama alanlarına girdi sağlamak üzere sıklıkla kullanılmaktadır. 1970'li yılların başından itibaren dünyanın çeşitli bölgeleri için geliştirilen çok sayıda tahmin denklemleri yer almaktadır. Bu denklemlerin oluşturulmasında kullanılan veri setinin genel olarak Avrupa, Uzakdoğu ve Amerika Birleşik Devletleri'ndeki kayıtlı deprem verileri olduğu görülmektedir (Douglas, 2001; Douglas, 2020).

Bir yer hareketi tahmin denkleminin tektonik rejim özelliklerinin yanı sıra deprem büyüklüğü açısından da kullanıldığı veri setine bağlı sınırlamalara

sahip olması, bu ilişkilerin kullanımında daha dikkatli olmayı gerekli kılmaktadır. Kullanılacak tahmin denklemlerinin bölgeye ait kaydedilmiş deprem verilerine bağlı olması tercih edilmektedir. Ülkemizdeki yetersiz yer hareketi kayıt istasyonu sonucu elimizde bulunan yer hareketi kayıtlarının da yeterli sayıda olmaması neticesinde yapılan çalışmalarda yabancı yazarların geliştirdikleri tahmin denklemleri kullanılmıştır (Çeken, 2007). 1996 yılında yürürlüğe girmiş Deprem Bölgeleri Haritası, Gülkan vd. (1993) tarafından gerçekleştirilen proje sonuçları referans alınarak elde edilmiş ve söz konusu çalışmada Joyner ve Boore (1981) yer hareketi tahmin denklemi kullanılmıştır. Bu denklemin seçiminde Türkiye ve Kaliforniya'daki tektonik benzerliklerin büyük rol oynadığı ifade edilmiştir.

Ülkemizde de ivme ölçer istasyonlarının ve kayıt sayılarının artması ile birlikte yerel yer hareketi tahmin denklemlerinin sayısında da artış olmuştur (Gülkan ve Kalkan 2002; Kalkan ve Gülkan 2004; Özbey vd., 2004; Ulusay vd., 2004; Akyol ve Karagöz 2009; Ulutaş ve Özer 2010; Akkar ve Çağnan, 2010; Kale vd., 2015; Erken vd., 2018).

Türkiye ve çevresi için geliştirilmiş yerel yer hareketi tahmin denklemleri içerisinde altı adedi dikkate alınarak çalışmamızda incelemeye tabii tutulmuştur (Kalkan ve Gülkan, 2004; Özbey vd., 2004; Ulusay vd., 2004; Akkar ve Çağnan, 2010; Kale vd., 2015; Erken vd., 2018). İnceleme sırasında uzaklık, fay tipi ve yerel zemin koşullarının etkisi de ayrıca dikkate alınmış ve sonuçlar istatistiksel olarak tartışılmıştır.

2. YER HAREKETİ TAHMİN DENKLEMLERİ

Proje sahası ve çevresinde kuvvetli yer hareketi kaydının bulunmaması halinde öngörülen depremin oluşturacağı yer hareketi parametrelerinin tahmini ampirik denklemlerle yapılabilmektedir (Boore vd. 1997). Azalım ilişkisi, azalım denklemi veya yer hareketi tahmin denklemi olarak da isimlendirilen bu denklemlerin oluşturulması için çok sayıda kaydedilmiş yer hareketine ihtiyaç vardır. Kalkan (2001); söz konusu denklemlerin, bir deprem sırasında oluşan yer titreşimlerinin deprem odağından uzaklaştıkça azalması prensibine dayanarak geliştirdiğini ve kaydedilmiş kuvvetli yer hareketleri veri tabanının değerlendirilmesi sonucu ortaya konulduğunu ifade etmiştir. Bu denklemler deprem büyüklüğü ve kaynak-saha mesafesi gibi bağımsız ve en büyük yer ivmesi veya spektral ivme gibi bağımlı değişken parametreleri içermektedir ve denklemdaki katsayılar çoğunlukla regresyon analizleri ile elde edilmektedir. Söz konusu denklemler yer hareketinin uzaklıkla nasıl değiştiğinden daha fazlasını gösterirler ve hem probabilistik hem de deterministik sismik tehlike analizleri için hayati öneme sahiptirler

(Douglas, 2003). Bu sebeple yer hareketi tahmini ile ilgili bu zamana kadar yapılmış çok sayıda çalışma olduğu ve bu çalışmaların farklı versiyonlarının yayınlanması dikkati çekmektedir.

Literatürde yer alan çalışmaların büyük bir kısmının maksimum yer ivmesi ve spektral ivme değerlerini tahmin etmek için geliştirilen denklemlerden oluştuğu dikkati çekmektedir. Douglas (2003); sadece kısa periyotlu ($T \leq 0.3$ s) yapıların analizi için kullanışlı olmasına rağmen kuvvetli yer hareketini tanımlamak için en büyük yer ivmesi değerinin hala sıklıkla kullanıldığını ifade etmiştir. Douglas (2020), dünyanın farklı bölgelerinde en büyük yer ivmesinin tahmini için geliştirilen 468 adet çalışmayı ve spektral ordinatların tahmini için geliştirilen 302 adet çalışmayı özetlemiştir. İlgili çalışmada sunulan tahmin denklemlerinin sayısı, ilk önerilen tahmin denkleminin üzerinden geçen yaklaşık 45 yıl içerisinde konunun hala önemini ve güncelliğini göstermesi bakımından son derece önemlidir.

Pek çok farklı araştırmacı tarafından 1970’li yıllardan beri ABD, Avrupa ve Uzakdoğu’daki kaydedilen deprem verilerinin kullanılmasıyla yer hareketi tahmin denklemleri günümüze kadar geliştirilmiştir (Douglas, 2020). ABD’de meydana gelen depremler sonucu elde edilen kuvvetli yer hareketi kayıtlarına bağlı olarak oluşturulan azalım ilişkileri (Campbell, 1981; Joyner ve Boore 1981; Boore vd., 1993; Boore vd., 1997) bulunmaktadır. ABD’nin yanı sıra Avrupa’daki ve/veya tüm dünya depremlerinden elde etmiş olduğu verileri göz önüne alarak geliştirilen tahmin denklemleri (Campbell ve Bozorgnia, 1994; Ambraseys, 1995; Ambraseys vd., 2005) de bulunmaktadır.

Sismik tehlike analiz çalışmalarına, sınılaşma analizlerine, depreme dayanıklı yapı tasarımına ve şev stabilitesi analizlerine girdi sağlayan yer hareketi tahmin denklemlerinin en yaygın kullanılan formlarından biri denklem 2.1’de sunulmaktadır.

$$\ln Y = C_1 + C_2 - C_3 \ln R - C_4 R + C_5 F + C_6 S + \sigma_{\ln Y} \quad (2.1)$$

Bu denklem Campbell (2003) tarafından önerilmiş olup “Y” değişkeni, yer hareketi parametresini; “M” değişkeni, deprem magnitudünü; “R” değişkeni, deprem kaynağından sahaya olan uzaklığı; “F” değişkeni, faylanma tipini; “S” değişkeni, yerel zemin koşullarını; “ $\sigma_{\ln Y}$ ” değişkeni ise hesap edilen yer hareketi parametresinin değerindeki belirsizliği belirtmektedir. Bu belirsizlik tahmin denklemlerinin ilk kez geliştirildiği yıllarda sabit alınmasına rağmen günümüzde gerçekleştirilen çalışmalarda bu terimin, deprem büyüklüğü ile ilişkilendirildiği görülmektedir (Campbell ve Bozorgnia 1994; Ambraseys vd., 2005).

Tahmin denklemlerindeki yer hareketi parametresi ivme, hız, yerdeğiştirme veya spektral ivme olabilmektedir. Ancak literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde en sık yatay yer ivmesini belirlemeye yönelik çalışmalara ağırlık verildiği anlaşılmaktadır (Douglas, 2020).

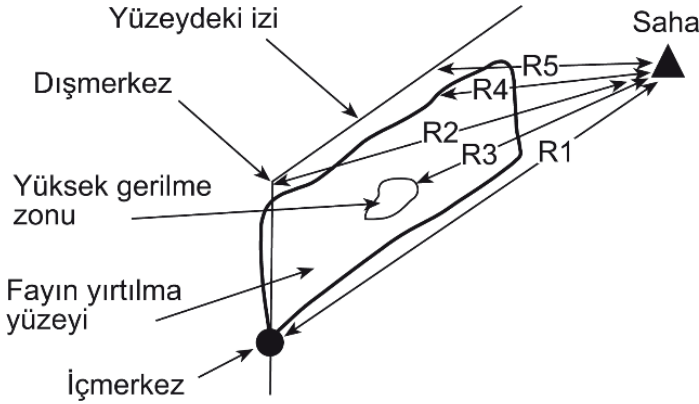
Yer hareketi tahmin denklemlerine ait veri tabanı oluştururken yer ivmesi değerinin genellikle iki farklı şekilde kullanıldığı görülmektedir. Birinci yaklaşımda ilgili istasyonda yer hareketine ait yatay bileşenlerin en büyüğü dikkate alınırken, ikinci yaklaşımda ise yatay bileşen değerlerinin geometrik ortalaması dikkate alınmaktadır. Söz konusu iki farklı yaklaşımı dikkate alarak elde edilmiş gerek yerel gerekse global yer hareketi denklemlerinin literatürde yer aldığı ifade edilmelidir.

Yer hareketi tahmin denklemlerinin değişkenlerinden biri olan deprem magnitudü için farklı ölçüm tekniklerine dayanan yerel magnitud (M_L), yüzey dalgası magnitudü (M_s) ve moment magnitudü (M_w) gibi ölçekler kullanılmaktadır. Kuvvetli depremlerde ölçülen yer sarsıntısı özellikleri küçük depremlere göre kıyasladığında deprem büyüklüğüne daha az duyarlıdır. Bu özellik doygunluk olarak adı verilir. Doygunluk problemi olmayan tek magnitud türünün moment magnitudü olması son yıllarda geliştirilen tahmin denklemlerinde en sık kullanılan magnitud türü olmasına neden olmaktadır.

Tahmin denklemlerinde kullanılan uzaklık parametresi hakkında yapılan farklı tanımlamalar vardır. Şekil 2.1'de gösterilen R_1 'in iç merkez uzaklığı (R_{HYP}), R_2 'nin dış merkez uzaklığı (R_{EPI}), R_3 'ün enerji boşalım zonuna uzaklık (R_{SEIS}), R_4 'ün yırtılma alanına olan en kısa uzaklık (R_{RUP}) ve R_5 'in fay yırtılmasının yeryüzündeki izine en kısa uzaklık olan (R_{JB}) olarak tanımlanmaktadır.

Yer hareketi tahmin denklemlerinde yerel zemin koşullarının etkisi farklı şekillerde dikkate alınmaktadır. Yerel zemin koşullarının etkisinin üst 30 m'deki kayma dalga hızı parametresi kullanılarak dikkate alındığı görülmektedir (Boore vd., 1997; Abrahamson ve Silva 2008; Boore ve Atkinson 2008). Bu yaklaşımın dışında zemin etkisinin regresyon katsayısı olarak da hesaba katıldığı çalışmalar mevcuttur (Ambraseys vd., 2005; Akkar ve Bommer 2010).

Özellikle 2000'li yıllardan sonra geliştirilen yer hareketi tahmin denklemlerinde faylanma türünün de kullanıldığı dikkati çekmektedir (Ambraseys vd., 2005; PEER, 2007). Bommer vd. (2003); gelecekteki depremlerin kaynak mekanizmalarının çoğu bölgede oldukça iyi tahmin edilebileceği için bu etkinin denklemlere dâhil edilmesinin kaliteyi artıracakını ifade etmiştir.



Şekil 2.1. Tahmin denklemlerinde kullanılan uzaklık ölçütleri (Kramer, 1996)

3. YEREL YER HAREKETİ TAHMİN DENKLEMLERİ

Bir yer hareketi tahmin denkleminin; bölgenin tektonik özellikleri, deprem büyüklüğü, kaynak-saha mesafesi açısından da kullanılan veri setine bağlı sınırlamalara sahiptir. Bu sebeple bu denklemlerin kullanımında daha dikkatli olunması gerekmektedir. Özellikle kullanılacak tahmin denklemlerinin bölgeye ait kaydedilmiş deprem verilerine bağlı olması tercih edilmektedir.

Proje sahasına sismik tehlike düzeyinin belirlenmesi için uygun yer hareketi tahmin denkleminin seçimi son derece önemlidir. Ülkemizde de olasılıksal sismik tehlike çalışmalarının başlarında, dünyanın farklı bölgeleri için geliştirilmiş yer hareketi tahmin denklemleri kullanılmıştır (Erdik vd., 1985; Gülkan vd., 1993). Güncellenen deprem katalogları ve diri faylara ait bilgilerin artması ile Türkiye ve çevresi için sismik tehlike çalışmaları artarak devam etmiş ve bu çalışmalarda da farklı bölgeler için geliştirilmiş tahmin denklemlerinin kullanıldığı dikkati çekmektedir (Kayabalı, 2002; Kayabalı ve Akın, 2003).

Türkiye’de 2000’li yıllardan önce sınırlı sayıda yer hareketi kaydı olmasından dolayı çok az sayıda yerel yer hareketi tahmin denkleminin bulunmaktaydı (Aydan vd., 1996; İnan vd., 1996). Farklı araştırmacılar söz konusu bu denklemleri kullanarak elde ettiği tehlike analiz sonuçlarının yakın kaynak etkisi olan alanlarda çok büyük anomaliler yaptığını ifade etmiştir (Kayabalı, 2002; Kayabalı ve Akın, 2003; Ulusay vd., 2004).

1999 yılında meydana gelen Kocaeli ve Düzce depremlerinden sonra bu depremlere ait ivme kayıtları da yer hareketi veri tabanına eklendikten sonra birçok araştırmacı tarafından yerel yer hareketi tahmin denklemleri geliştirilmeye başlanmıştır (Gülkan ve Kalkan 2002; Kalkan ve Gülkan

2004; Özbey vd., 2004; Ulusay vd., 2004; Akyol ve Karagöz 2009; Ulutaş ve Özer 2010; Akkar ve Çağnan 2010; Kale vd., 2015; Erken vd., 2018). Oluşturulan bu denklemlerde ise kuvvetli yer hareketi parametresi olarak; maksimum yatay ve düşey yer ivmesi (PGA). Spektral ivme (S_a) ve maksimum hız (PGV) parametreleri üzerinde çalışıldığı görülmektedir (Seyrek, 2009).

Ülkemizdeki yer hareketi kayıtları kullanılarak 1996 yılında geliştirilen Aydan vd. (1996) ile İnan vd. (1996) yer hareketi tahmin denklemlerinde yerel zemin etkilerinin ve fay tipi etkisinin dikkate alınmadığı görülmektedir. Özellikle zemin etkisinin dikkate alınmaması önemli bir eksiklik olarak göze çarpmaktadır. Bu iki denklemin yanı sıra Bindi vd. (2007) ile Ulutaş ve Özer (2010) tarafından önerilen modellerde de zemin etkisinin dikkate alınmadığı görülmektedir.

Sismik tehlike analizlerine girdi sağlayan yer hareketi tahmin denklemlerinin hangisinin kullanılacağı ile alakalı farklı çalışmalar literatürde yer almaktadır (Cotton vd., 2006; Bommer vd., 2010). Dikkate alınan alanın tektonik özelliklerine uymayan, veri tabanı ve dokümantasyonu yetersiz olan, zaman içerisinde güncellenen, regresyon metodu güncel olmayan, hakem değerlendirmesinden geçmemiş bir kaynaktan yayımlanan tahmin denklemlerinin kullanımı önerilmemektedir (Cotton, 2006; Kale ve Akkar, 2011).

Bu kriterler birlikte değerlendirildiğinde Ulusay vd. (2004); Özbey vd. (2004); Kalkan ve Gülkan (2004); Akkar ve Çağnan (2010); Kale vd. (2015) ve Erken vd. (2018) tahmin denklemlerinin herhangi bir saha için aday tahmin denklemi olarak değerlendirilebileceği düşünülmüştür.

Bu bölümde söz konusu altı yerel yer hareketi denkleminin genel formları verilmiştir. İncelenen denklemler için kronolojik sıra takip edilmiştir.

3.1. Ulusay vd. (2004)

Söz konusu tahmin denklemi Türkiye’de 1976-2003 yılları arasında meydana gelen ve büyüklükleri (M_w) 4.1 ile 7.5 arasında değişen 122 depreme ait 221 kayıt kullanılarak oluşturulmuştur. Denklem için uzaklık ölçütü olarak depremin dış merkezine olan uzaklık (R_{epi}) kullanılmış olup 5.1 km ile 99.7 km arasında değişmektedir.

$$PGA = 2.18xe^{0.0218(33.3M_w - R_e + 7.8427S_A + S_B)} \quad (3.1)$$

PGA: En büyük yatay yer ivmesi (gal)

R_e : Dış merkez uzaklığı, R_{epi} (km).

M: Depremin moment büyüklüğü, M_w

Eşitlik 3.1'de verilen S_A ve S_B terimleri zemin koşulunu modellemek için kullanılmıştır. Kaya ortam için $S_A = S_B = 0$; zemin ortamı için $S_A = 1$ ve $S_B = 0$; yumuşak zemin için $S_A = 0$ ve $S_B = 1$ olarak dikkate alınmaktadır.

3.2. Özbey vd. (2004)

2004 yılında sunulan ve Türkiye'nin kuzeybatısı için geliştirilen bu çalışmada 1999 – 2000 yılları arasında meydana gelen büyüklükleri (M_w) 5.0 ile 7.4 arasında değişen 17 depreme ait 195 ivme kaydı kullanılmıştır. Denklem genel olarak; 17 Ağustos 1999 Kocaeli ve 12 Kasım 1999 Düzce depremleri ve bu iki depremin artçı depremlerinin kuvvetli yer hareketi kayıtlarından oluşmaktadır. Mesafe ölçütü olarak, kırığın düşey projeksiyonuna en yakın yatay uzaklık olan R_{jb} kullanılmıştır. Veri tabanına dâhil edilen kayıtlar için uzaklık ölçütü 5.0 km ile 300.0 km arasındadır.

$$\log(Y) = 3.287 + 0.503(M - 6) - 0.079(M - 6)^2 - 1.1177 \log \sqrt{R^2 + 14.82^2} + 0.141G_1 + 0.331G_2 \quad (3.2)$$

Y: En büyük yatay yer ivmesinin iki bileşeninin geometrik ortalaması, PGA (cm/sn²)

M: Depremin moment magnitudü, M_w

R: Kırığın düşey projeksiyonuna olan en yakın yatay mesafe, R_{JB} (km)

Eşitlik 3.2'de verilen G_1 ve G_2 katsayıları zemin koşulunu ifade etmek için kullanılmış olup. üst 30.0 m'deki kayda dalga hızı esasında değerlendirme yapılmıştır. $V_s \geq 360$ m/s ise $G_1 = 0$ ve $G_2 = 0$; $180 < V_s < 360$ m/s ise $G_1 = 1$ ve $G_2 = 0$; $V_s < 180$ m/s ise $G_1 = 0$ ve $G_2 = 1$ olarak dikkate alınmıştır.

3.3. Kalkan ve Gülkan (2004)

Türkiye'de 1976-2003 yılları arasında meydana gelen büyüklükleri (M_w) 4.0 ile 7.4 arasında değişen 57 depreme ait 112 ivme kaydı dikkate alınarak geliştirilmiştir. Geliştirilen bu denklemde aynı araştırmacıların 2002 yılında yaptıkları çalışmadaki denklemin aynı formunu kullandıkları görülmektedir (Eşitlik 3.3).

$$\ln Y = 0.393 + 0.576(M - 6) - 0.107(M - 6)^2 - 0.899 \ln r - 0.200 \ln \left(\frac{V_s}{1112} \right) \quad (3.3)$$

Y: En büyük yatay yer ivmesi (g)

$r = (r_{cl}^2 + h^2)^{1/2}$ (km) ve $h = 6.91$ km

r_{cl} : Yüzey kırığına en yakın yatay mesafe (km)

M: Moment esasında deprem büyüklüğü, M_w

V_s : Üst 30.0 m'deki ortalama kayma-dalgası hızı (m/sn)

3.4. Akkar ve Çağnan (2010)

2010 yılında geliştirilen bu tahmin denkleminde Türkiye'de meydana gelen 137 depreme ait 433 kayıt kullanılmıştır. Deprem büyüklüğü olarak moment magnitudü (M_w) kullanılmış olmakla birlikte, büyüklükleri $5.0 \leq M_w \leq 7.6$ arasındaki veriler kullanılmıştır. Mesafe ölçütü olarak R_{JB} kullanılmış olmakla birlikte değerleri $0 \leq R_{JB} \leq 200$ km sınırları arasındadır. Geliştirilen bu denklem gerek nonlinear zemin davranışının etkisini gerekse faylanma tipini dikkate almaktadır. Bu yönleriyle diğer tahmin denklemlerinden ayrılmaktadır. Kayıtların %70'i doğrultu atımlı faylanma, % 28'i normal faylanma geri kalan ise ters/bindirme faylanma olaylarını içermektedir. Geliştirilen tahmin denklemleri $M \leq 6.5$ ve $M > 6.5$ için sırasıyla Eşitlik 3.4 ve Eşitlik 3.5'de verilmektedir.

$$\ln Y = 8.92418 - 0.513(M - 6.5) - 0.18555(8.5 - M)^2 + [-1.25594 + 0.18105(M - 6.5)] \ln \sqrt{R_{JB}^2 + 7.33617^2} - 0.02125F_N + 0.01851F_R + F_S \quad (3.4)$$

$$\ln Y = 8.92418 - 0.695(M - 6.5) - 0.18555(8.5 - M)^2 + [-1.25594 + 0.18105(M - 6.5)] \ln \sqrt{R_{JB}^2 + 7.33617^2} - 0.02125F_N + 0.01851F_R + F_S \quad (3.5)$$

Y: En büyük yer ivmesi değeri (cm/s^2)

R_{JB} : Joyner-Boore mesafesi (km)

M: Moment magnitudü (M_w)

İlgili denklemlerde verilen F_N ve F_R faylanma ile ilgili katsayılar olup normal ve ters faylanma için "1" diğer durumlar için "0" değerini almaktadır. Tahmin denklemindeki bir diğer terim olan ve yer büyüme etkisini modellemede kullanılan F_S terimi linear (F_{LIN}) ve nonlinear (F_{NL}) terimlerden oluşmaktadır (Eşitlik 3.6).

$$F_S = F_{LIN} + F_{NL} \quad (3.6)$$

F_{LIN} terimi Eşitlik 3.7 ile hesaplanmakta ve ilgili eşitlikteki referans kayma dalga hızı (V_{REF}); 760 m/s olarak dikkate alınmaktadır. İlgili eşitlikte $b_{lin} = -0.36$ olarak alınmaktadır.

$$F_{LIN} = b_{lin} \ln \left(\frac{V_{S,so}}{V_{ref}} \right) \quad (3.7)$$

F_{NL} terimi ise üç farklı durum için Eşitlik 3.8, 3.9 ve 3.10 ile belirlenmektedir. Eşitliklerdeki pga_{4nl} terimi $V_{s,30}=760$ m/s için hesaplanan PGA değeri olup $pgalow=0.06g$ olarak hesaba katılmaktadır. İlgili eşitliklerde yer alan b_{nl} , c ve d terimlerinin hesabı için Boore ve Atkinson (2008) çalışması esas alınmaktadır.

$$F_{NL} = b_{nl} \ln \left(\frac{PGA_{low}}{0.1} \right) \triangleright pga_{4nl} \leq 0.03g \quad (3.7)$$

$$F_{NL} = b_{nl} \ln \left(\frac{PGA_{low}}{0.1} \right) + c[\ln \left(\frac{PGA_{4nl}}{0.03} \right)]^2 + d[\left(\frac{PGA_{4nl}}{0.03} \right)]^3 \triangleright 0.03 \leq pga_{4nl} \leq 0.09g \quad (3.8)$$

$$F_{NL} = b_{nl} \ln \left(\frac{PGA_{low}}{0.1} \right) \triangleright pga_{4nl} \geq 0.09g \quad (3.9)$$

3.5. Kale vd. (2015)

Türkiye ve İran için oluşturulan tahmin denkleminin geliştirilmesinde kullanılan Türkiye'deki ve İran'daki kayıtlar EMME kuvvetli yer hareketi veri tabanından elde edilmiştir. 2015 yılında yayınlanan bu çalışmada Türkiye'de meydana gelen 175, İran'da meydana gelen 138 deprem dikkate alınmıştır. Toplam yer hareketi kayıt sayısı 1198 olup, bu kayıtların 670 adedi Türkiye'ye geri kalan 528 adedi ise İran'a aittir. Dikkate alınan veri tabanı $4.0 \leq M_w \leq 7.6$ arasındaki verileri dikkate almaktadır. Mesafe tanımı olarak ise R_{jb} kullanılmıştır ve maksimum R_{jb} değeri 200 km'dir. Veri tabanındaki İran kayıtları küçük deprem büyüklüklerinde ($M_w \leq 5.0$) eksiktir. İran ve Türkiye kayıtlarının uzaklık dağılımı ise benzer patern göstermektedir. Veri tabanı büyüklük ve uzaklık açısından birlikte değerlendirildiğinde İran'a ait veriler $M_w < 5.0$ ve $R_{jb} > 80$ km için Türkiye'ye oranla daha kısıtlıdır.

Eşitlik 3.10'da verilen tahmin denkleminin genel formu incelendiğinde deprem büyüklüğü, uzaklık, faylanma türü, anelastik azalım ve saha etkisini modellemek için kullanılan beş ayrı değişken dikkate çekmektedir. İlgili değişkenleri belirlemek için sırasıyla Eşitlik 3.10, 3.11, 3.12, 3.13, 3.14 ve 3.15 kullanılmaktadır.

$$\ln \bar{Y} = f_{mag} + f_{dis} + f_{sof} + f_{aat} + f_{site} \quad (3.10)$$

$$f_{mag} = \begin{cases} (b_1 + \Delta b_1) + (b_2 + \Delta b_2)[M_w - (c_1 + \Delta c_1)] + (b_3 + \Delta b_3)(8.5 - M_w)^2 \triangleright M_w \leq (c_1 + \Delta c_1) \\ (b_1 + \Delta b_1) + (b_7 + \Delta b_7)[M_w - (c_1 + \Delta c_1)] + (b_3 + \Delta b_3)(8.5 - M_w)^2 \triangleright M_w > (c_1 + \Delta c_1) \end{cases} \quad (3.11)$$

$$f_{dis} = (b_4 + \Delta b_4) + (b_5 + \Delta b_5)[M_w - (c_1 + \Delta c_1)] \ln \sqrt{R_{JB}^2 + (b_6 + \Delta b_6)^2} \quad (3.12)$$

$$f_{sof} = (b_8 + \Delta b_8)F_{NM} + (b_9 + \Delta b_9)F_{RV} \quad (3.13)$$

$$f_{\text{aat}} = \begin{cases} 0; R_{\text{JB}} \leq 80\text{km} \\ (b_{10} + \Delta b_{10})(R_{\text{JB}} - 80); R_{\text{JB}} > 80\text{km} \end{cases} \quad (3.14)$$

$$f_{\text{site}} = \begin{cases} sb_1 \ln \left(\frac{V_{S,30}}{V_{\text{REF}}} \right) + sb_2 \ln \left[\frac{\text{PGA}_{\text{REF}+c} (V_{S,30}/V_{\text{REF}})^n}{(\text{PGA}_{\text{REF}+c}) (V_{S,30}/V_{\text{REF}})^n} \right]; V_{S,30} < V_{\text{REF}} \\ sb_1 \ln \left(\frac{\min(V_{S,30}, V_{\text{REF}})}{V_{\text{REF}}} \right); V_{S,30} \geq V_{\text{REF}} \end{cases} \quad (3.15)$$

\bar{Y} : En büyük yer ivmesi (g).

R_{jb} : Joyner-Boore mesafesi (km)

M_w : Moment magnitudü

Yukarıdaki eşitliklerde ifade edilen Δ terimleri Türkiye ve İran arasındaki farkı tanımlamaktadır. Eşitliklerdeki terimleri kullanıldığında İran için tahmin modeli elde edilmektedir. İlgili eşitliklerdeki katsayılar aşağıda verilmektedir.

Zemin koşullarını modellemek için kullanılan Eşitlik 3.15'deki referans kayma dalga hızı (V_{REF}) değeri 750 m/s, V_{CON} değeri ise 1000 m/s olarak dikkate alınmaktadır. PGA_{REF} terimi referans kayma dalga hızı için tahmin edilen yer ivmesi değeridir. Eşitlik 3.15'de ifade edilen sb_1 ve sb_2 katsayıları sırasıyla 0.41997 ve -0.28846 değerlerini almaktadır. Yine aynı eşitlikte yer alan diğer sabitler $c=2.5$ ve $n=3.2$ olarak dikkate alınmaktadır.

3.6. Erken vd. 2018

Kuzeybatı Anadolu'da 1999-2006 yılları arasında meydana gelen, 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi ($M_w=7.4$) ve 12 Kasım 1999 Düzce depremine ($M_w=7.1$) ait ana şok ve artçı şokları da içeren 369 yer hareketi kaydı ile dünyanın farklı yerlerinde meydana gelmiş 7 adet büyük depreme ait 33 kayıt birlikte kullanılarak bu tahmin denklemi oluşturulmuştur. Regresyon analizlerinde kullanılan 110 kuvvetli yer hareketi istasyonunda ölçülen 4.1 ile 7.6 (M_w) arasındaki büyüklüğe sahip depremler dikkate alınmıştır. Toplam 402 kaydın NEHRP (FEMA 450, 2004)'e göre 1 adedi A grubu olarak tanımlanan sert kaya ($V_{s,30} > 1500$ m/s), 38 adedi B grubu olarak tanımlanan kaya ($760 < V_{s,30} \leq 1500$ m/s), 188 adedi C grubu olarak tanımlanan çok sert zemin veya yumuşak kaya ($360 < V_{s,30} \leq 760$ m/s), 173 adedi D grubu olarak tanımlanan sert zemin ($180 < V_{s,30} \leq 360$ m/s) ve 2 adedi E grubu olarak tanımlanan yumuşak zemin ($V_{s,30} < 180$ m/s) üzerinde yer alan istasyonlardan elde edilmiştir. A ve E grubundaki veri eksikliğinden dolayı model B-C grubu ve D grubu için ayrı ayrı oluşturulmuştur. Kaynak-saha mesafesi R_{JB} olarak dikkate alınmış olup 0.1 ile 344.4 km arasında değişmektedir. İlgili tahmin denklemi iki ayrı zemin koşulu (B-C ve D grubu) için Eşitlik 3.16 ve Eşitlik 3.17'de verilmektedir.

$$\ln \text{PGA} = 1.835 + 1.034(M - 6) - 0.252(M - 6)^2 - 1.397 \ln r - 0.069 \ln \frac{V_{s,30}}{V_{\text{ref}}} + F_{\text{NL}} \quad (3.16)$$

$$\ln \text{PGA} = 2.135 + 1.008(M - 6) - 0.163(M - 6)^2 - 1.380 \ln r - 0.133 \ln \frac{V_{s,30}}{V_{\text{ref}}} + F_{\text{NL}} \quad (3.17)$$

PGA: En büyük yatay yer ivmesi (g)

$$r = (R_{\text{JB}}^2 + h^2)^{1/2} \text{ (km) (kaya için } h = 9.718; \text{ kum için } h = 10.510)$$

R_{JB} : Joyner-Boore mesafesi (km)

M: Moment esasında deprem büyüklüğü, M_w

$V_{s,30}$: Üst 30.0 m'deki ortalama kayma-dalgası hızı (m/sn)

V_{REF} : Referans kayma dalga hızı (750 m/s)

Eşitlik 3.16 ve 3.17'de ifade edilen F_{NL} terimi $V_{s,30}$ ve referans kaya ortamındaki yer hareketinin genliğine bağlı olarak nonlinear zemin büyütme etkisi modellemede kullanılmaktadır. Boore ve Atkinson (2008) tarafından tanımlanan bu terim Bölüm 3.4'de açıklandığı için bu bölümde yer verilmemiştir.

4. SONUÇLAR

İncelenen altı yerel yer hareketi tahmin denklemi birlikte değerlendirildiğinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Ulusay vd. (2004) denklemi uzaklık ölçütü olarak R_{epi} kullanırken, Kalkan ve Gülkan (2004) denklemi R_{epi} ve R_{JB} kullanılmaktadır. Diğer üç denklem ise R_{JB} ölçütünü tercih etmiştir.
- Ulusay vd. (2004) tarafından oluşturulan denkleme girdi sağlayan kayıtlardaki uzaklık ölçütünün en büyük değeri (r_{maks}) 99.7 km'dir. Bu değer, dikkate alınan tahmin denklemleri içerisindeki r_{maks} değerlerinin en küçüğüdür. Diğer denklemlerde bu mesafe 200-300 km aralığındadır.
- Ulusay vd. (2004) ve Özbey vd. (2004) denklemleri zemin koşullarını regresyon katsayıları ile modellerken, diğer dört yer hareketi tahmin denklemi $V_{s,30}$ parametresini kullanıldığı anlaşılmaktadır.
- Ulusay vd. (2004) ile Kalkan ve Gülkan (2004) tarafından önerilen tahmin denklemleri yer hareketi parametresi olarak PGA_{maks} kullanırken, Erken vd. (2018) tahmin denklemi hariç diğer üç denklem PGA_{geo} parametresini kullanmıştır. Erken vd. (2018)'de ise yer hareketi parametresinin hangi esasa göre modellendiği belirlenmemiştir.

KAYNAKLAR

- Abrahamson N.A. & Silva W., (2008). Summary of the Abrahamson & Silva NGA ground motion relations. *Earthquake Spectra*, 24(1), 67-97.
- Akkar S. & Bommer J.J., (2010). Empirical equations for the prediction of PGA, PGV ve spectral accelerations in Europe, the Mediterranean region ve the Middle East, *Seismological Research Letters*, 81(2),195-206.
- Akkar S. & Çağnan Z. (2010). A local ground-motion predictive model for Turkey, ve its comparison with other regional ve global ground-motion models, *Bulletin Of the Seismological Society of America*, 100(6), 2978-2995.
- Akyol N. & Karagöz Ö., (2009). empirical attenuation relationships for Western Anatolia, Turkey, *Turkish Journal Of Earth Sciences*, 18, 351-382
- Ambraseys N. N., (1995). The prediction of earthquake peak ground acceleration in Europe, *Earthquake Engineering ve Structural Dynamics*, 24(4), 467-490.
- Ambraseys, N.N., et. al., (2005). Equations for the estimation of strong ground motions from shallow crustal earthquakes using data from Europe ve the Middle East: horizontal peak ground acceleration ve spectral acceleration, *Bulletin Of Earthquake Engineering*, 3(1), 1-53.
- Aydan, Ö., Sadaki, M. ve Yarar, R., (1996). The seismic characteristics of Turkish earthquakes, *Eleventh World Conference on Earthquake Engineering*, Mexico. Paper no 1278.
- Bindi, D., v.d., (2007). Empirical ground-motion prediction equations for northwestern Turkey using the aftershocks of the 1999 Kocaeli earthquake. *Geophysical Research Letters*, 34(L08305), 1-5.
- Bommer J.J., Douglas J. ve Strasser F.O., (2003). *Bulletin of earthquake engineering 1, Style-of-Faulting in Ground-Motion Prediction Equations*, 1, 171-203.
- Bommer J. J., et. al.,(2010). On the selection of ground-motion prediction equations for seismic hazard analysis, *Seismological Research Letters*, 81(5), 783-793.
- Boore, D.M., Joyner, W.B. ve Fumal, T.E., (1997). Equations for estimating horizontal response spectra ve peak acceleration from Western North American earthquakes. *A Summary of Recent Work, Seis. Res. Let.*, 68(1), 128-153.
- Boore D. M. & Atkinson G. M., (2008). Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, ve 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 s ve 10.0 s. *Earthquake Spectra*, 24(1), 99-138.

- Boore, D.M., Joyner, W.B., Ve Fumal, T.E. (1993). Estimation of response spectra ve peak accelerations from western North America earthquakes, an Interim Report, open-file-report 93-509, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia.
- Campbell, K.W. (1981). Near-source attenuation of peak horizontal acceleration. Bulletin of the Seismological Society of America, 71(6), 2039-2070.
- Campbell K. W. & Bozorgnia. Y. (1994). Near-source attenuation of peak horizontal acceleration from worldwide accelerograms recorded from 1957 to 1993. In proceedings of the fifth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, 3, 283-292.
- Campbell K.W. (2003). Strong-motion attenuation relations. in International Hvebook of Earthquake ve Engineering Seismology, San Diego, Academic Press.
- Çeken U. (2007). Marmara bölgesinin kuvvetli yer hareketi azalım ilişkisi modeli, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Cotton, F, et. al. (2006). Criteria for selecting ve adjusting ground-motion models for spesific target regions: Application to Central Europe ve rock sites, Journal of Seismology, 10(2), 137-156.
- Douglas, J., (2001). A comprehensive worldwide summary of strong-motion attenuation relationships for peak ground acceleration ve spectral ordinates (1969 to 2000), Engineering Seismology ve Earthquake Engineering Report No. 01-1, Imperial College of Science, Technology ve Medicine Civil Engineering Department, London.
- Douglas J., (2003). Earthquake ground motion estimation using strong-motion records. A review of equations for the estimation of peak ground acceleration ve response spectral ordinates, Earth-Science Reviews, 61, 43-104.
- Douglas, J., (2020). Ground motion prediction equations (1964-2020). Department of civil ve environmental engineering university of strathclyde, James Weir Building, Glasgow, United Kingdom.
- Emre Ö., v.d., (2018). Active fault database of Turkey. Bull Earthquake Eng, 16, 3229-3275.
- Erdik, M., v.d., (1985). Türkiye’de deprem tehlikesinin istatistiki açıdan değerlendirilmesi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi, Ankara 117, 295-344.
- Erken A., Nomaler G. Ş. ve Gündüz Z. (2018). The development of attenuation relationship for Northwest Anatolia region, Arabian Journal of Geosciences, 11(21), 1-6.
- Gülkan, P. vd. (1993). En son verilere göre hazırlanan Türkiye deprem bölgeleri haritası, rapor no: 93(01), ODTÜ Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi, Ankara.

- Gülkan, P. & Kalkan, E., (2002), Attenuation modeling of recent earthquakes in Turkey, *Journal of Seismology*, 6(3), 397-409.
- İnan, E., v.d. (1996). 1976-1996 yılları arası ivme kayıtları olan deprem kataloğu, Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Deprem Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara.
- Joyner, W.B. & Boore, D.M., (1981). Peak horizontal acceleration ve velocity from strong-motion records including records from the 1978 Imperial Valley, California earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 71(6), 2011-2038.
- Kadirioğlu F.T. vd. (2018). An improved earthquake catalogue ($M \geq 4.0$) for Turkey ve its near vicinity (1900–2012). *Bull Earthquake Engineering* 16, 3317–3338.
- Kale, Ö. v.d. (2015). A ground-motion predictive model for Iran ve Turkey for horizontal PGA, PGV, ve 5% damped response spectrum: investigation of possible regional effects, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105(2A), 963-980.
- Kale, Ö., (2017). Tasarım spektrumu parametreleri için olasılıksal sismik tehlike analizlerine bağlı bir çalışma. *İMO Teknik Dergi*, 2017(488), 8077-8103.
- Kale Ö. & Akkar S. (2011). Yerel ve global yer hareketi tahmin denklemlerinin türkiye için uygulanabilecek sismik tehlike analizlerinde kullanılabilirliklerinin test edilmesi: 1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, ODTÜ, Ankara.
- Kalkan E., (2001). Attenuation relationship based on strong motion data recorded in Turkey, The Middle East Technical University, The Graduate School Of Natural Ve Applied Sciences, Ankara.
- Kalkan E. & Gülkan P., (2004). Site-dependent spectra derived from ground motion records in Turkey. *Earthquake Spectra*, 20(4), 1111-1138.
- Kayabalı, K., (2002). Modeling of seismic hazard for Turkey using the recent neotectonic data, *Engineering Geology*, 63(3-4), 221-232.
- Kayabalı, K. & Akın, M., (2003). Seismic hazard map of Turkey using the deterministic approach, *Engineering Geology*, 69(1-2), 127-137.
- Kramer S.L., (1996). *Geotechnical earthquake engineering*, Prentice Hall, New Jersey.
- Özbey vd. (2004). An empirical attenuation relationship for Northwestern Turkey ground motion using a rveom effects approach, *Soil Dynamics ve Earthquake Engineering*, 24, 115-125.
- PEER, (2007). Boore-Atkinson NGA ground motion relations for the geometric mean horizontal component of peak ve spectral ground motion parameters by David M. Boore ve Gail M. Atkinson, 01, 110 p.

- Seyrek E., (2018, 14-16 Kasım). Mevcut ve revize edilmiş sismik tehlike haritasının Kütahya ve çevresi için mukayese edilmesi: International Congress on Engineering ve Architecture, Alanya.
- Seyrek E., (2009). Baraj yeri sismik tehlike analizlerinde sayısal çözümleme modelleri ve bir uygulama (Doktora Tezi). Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Ulusay v.d., (2004). An attenuation relationship based on Turkish strong motion data ve iso-acceleration map of Turkey, *Engineering Geology*, 74, 265-291.
- Ulutaş E. & Özer M.F (2010). Empirical attenuation relationship of peak ground acceleration for Eastern Marmara Region in Turkey, *The Arabian Journal for Science ve Engineering*, 35, 187-203.