



Sakarya ili için olasılığa dayalı sismik tehlike analizi

Engin Harman^{1*}, Hüseyin Serdar Küyük²

06.12.2014 Geliş/Received, 09.09.2015 Kabul/Accepted

ÖZ

Bu çalışmada, Sakarya ilini etkileyen en güncel aktif deprem kaynakları etkisinde, pik yer ivmesine ait yıllık aşılma oranları, sismik tehlike eğrisi aracılığıyla hesaplanmıştır. Ayırıklaştırma analizi yapılarak, şehir merkezinde en çok etki oluşturabilecek olası fay uzaklıkları ve deprem büyüklükleri bulunmuştur. Bununla birlikte, bölgeye ait pik yer ivmesi, periyodu 0.2s ve 1.0s olan spektrum ivmelerinin, 50 yılda %10 ve %2 aşılma ihtimaline göre sismik tehlike haritaları elde edilmiştir. Tepki ivme spektrumundaki ivme değerleri, yönetmelik ile kıyaslandığında ortalama her periyod için 1.5-2 katı daha yüksek ivme değerleri elde edildiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Sakarya, olasılıksal sismik tehlike analizi, sismik tehlike haritası, pik yer ivmesi

Probabilistic seismic hazard analysis for the city of Sakarya

ABSTRACT

In this study, the probability of exceedance of peak ground acceleration are calculated by seismic hazard curves after compiling active faults around Sakarya province. Possible fault distances and earthquake magnitudes that affect the city center most, are determined by deaggregation analysis. In addition seismic hazard maps are derived for PGA and spectral accelerations at 0.2 and 1 s in terms of exceedance of 10% and 2% in 50 years. Compared the design spectrum, calculated acceleration response spectrum gave 1.5 to 2 times higher in average for all periods.

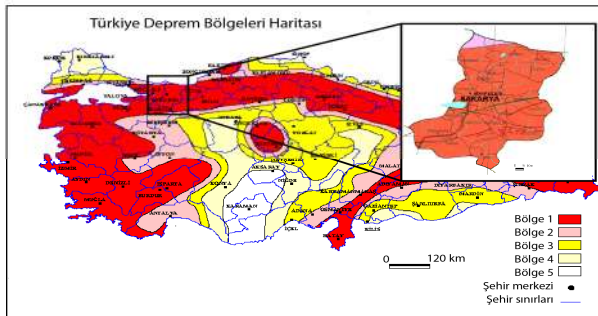
Keywords: Sakarya city, probabilistic of seismic hazard analysis, , seismic hazard maps, peak ground acceleration

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Deprem kuşağında bulunan ülkemizde, özellikle de Marmara Bölgesi'nde tarihte şiddetli ve hasarlara yol açan depremler meydana gelmiştir. Gelecekte olabilecek depremlerin oluşturacağı tehlikeleri, hasarları ve etkilerini tahmin etmek için son yıllarda sismik tehlike analizi çalışmaları hız kazanmıştır. Deprem tehlikesi belirleme çalışmalarında sismik tehlike analizleri, tasarım yer hareketi geliştirilmesinin önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Sismik tehlike analizi iki şekilde yapılabilir. Bunlardan birincisi deterministik sismik tehlike analizi (DSTA) olup, belirli bir deprem senaryosu kapsamında belirli bir yerde ve belirli bir boyuttaki depremin oluşacağını varsayan sismik senaryoların geliştirilmesini kapsar. İkinci yöntem ise olasılıksal sismik tehlike analizidir. OSTA' da incelenen bölgede etkili olabilecek tüm depremlerin boyutu, yerleri ve tekrar sürelerinin yanı sıra bu değişkenlerle ilgili belirsizlikler de değerlendirilir.

OSTA, sismik kaynakların geometrileri, ilgilenilen sahaya uzaklıkları, azalım ilişkileri ve beklenen depremlerin büyüklüklerindeki belirsizlik durumlarını dikkate alarak belirli bir aşılma olasılığına göre, yer hareketi parametrelerinin tahmin edilebilmesi amacıyla geliştirilmiştir. İstanbul başta olmak üzere farklı bölgeler ve şehirler için ülkemizde özellikle son yıllarda sismik tehlikenin araştırılması konusunda birçok çalışma yapılmıştır [1] [2] [3] [4] [5] [6].

Sismik olarak hareketli olan Sakarya ilinin tümüne yakını Türkiye Deprem Bölgeleri haritasında 1. derece deprem bölgesi olarak tanımlanmıştır (Şekil 1, [7]).



Şekil 1. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası (Referans 7'den değiştirilmiştir.) (Turkish Earthquake Zone of Ministry Public Works and Settlement, after Reference 7).

Sakarya ili, dünyadaki en aktif fay sistemlerinden biri olan Kuzey Anadolu Fay Hattı üzerinde konumlanmaktadır. Sakarya çevresinde, son yüzyılda Adapazarı-Hendek 1943, Bolu-Abant 1957, Adapazarı 1967, Kocaeli 1999, Düzce 1999 gibi büyük yıkıcı depremler meydana gelmiştir. Şehir, son üç asırda

meydana gelen dokuz adet önemli depremler ile sarsılmıştır (Tablo 1).

Tablo 1. Sakarya ili çevresinde meydana gelen $M \geq 6$ 'dan büyük depremler. (Large earthquakes with $M \geq 6$ occurred around Sakarya)

Tarih	Odak Noktası		Manyetüd (M)	Kaynak
	Enlem	Boylam		
25/05/1719	40.70	29.80	6.8	Ambraseys
22/05/1766	40.80	29.00	6.6	Ambraseys
10/07/1894	40.70	29.60	6.8	Ambraseys
20/06/1943	40.84	30.73	6.4	KOERI
26/05/1957	40.67	31.00	6.7	Ambraseys
18/09/1963	40.77	29.12	6.3	KOERI
22/07/1967	40.70	30.70	6.7	Ambraseys
17/08/1999	40.76	29.97	7.4	Gülkan&Kalkan
12/11/1999	40.74	31.21	7.2	Gülkan&Kalkan

Bu çalışmada Sakarya şehir merkezi (40.77 K – 30.40 D) için olasılıksal sismik tehlike analizi yapılmıştır. Öncelikle, olasılıksal tehlikeye katkıda bulunan kaynak ve fay uzaklıkları hesaplanmıştır. Kaya zeminde oluşabilecek pik yer ivmeleri (PYİ), azalım ilişkilerine bağlı olarak elde edilmiştir. Şehir için ivme tepki spektrumları hesaplanmış ve Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik' de (DBYHB) verilen birinci bölge tepki spektrum değerleriyle kıyaslanmıştır. PYİ ve spektrum periyotlarının 0.2s ve 1.0s değerleri için yıllık aşılma oranları bulunmuştur. Hesaplanan her bir parametre için Sakarya şehrine ait olasılıksal deprem tehlike haritaları oluşturulmuştur.

2. YÖNTEM (METHOD)

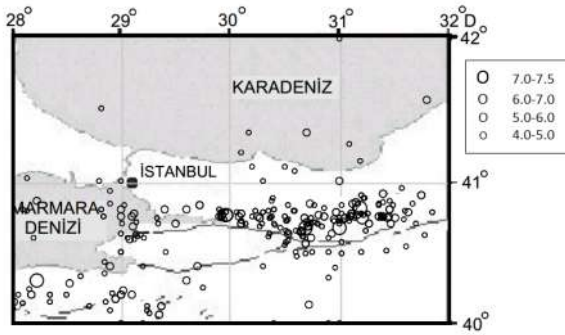
Olasılıksal sismik tehlike analizi dört aşamalı olarak hesaplanmıştır. Birinci aşamada Sakarya şehrini etkileyen deprem kaynakları belirlenmiştir. İkinci aşamada her bir kaynak bölgesindeki depremlerin büyüklüğüne ait belirsizlikler, deprem yinelenme ilişkileri ile tanımlanmıştır. Üçüncü aşamada yer hareketi genlikleri, azalım ilişkileri kullanılarak hesaplanmıştır. Dördüncü aşamada depremin yeri, boyutu ve azalım ilişkilerindeki belirsizlikler birleştirilerek, belirli bir zaman aralığındaki aşılma olasılıkları cinsinden yer hareketi parametreleri bulunmuştur.

2.1. Birinci Aşama (First Step)

Kuzey Anadolu Fay (KAF) Sistem, dünyanın en önemli yanal-atımlı fay sistemlerinden biridir [8] [9] [10] [11]. 1939 Erzincan depremi ile başlayan, batıya doğru yayılan bir eğilim, fay zonu üzerindeki yıkıcı depremlerde 1939, 1942, 1943, 1944, 1957, 1967 ve son olarak Ağustos ve Kasım 1999 tarihleri depremler meydana gelmiştir [12]

[13] [14]. Son yıkıcı depremler olan, 1999 Kocaeli ve 1999 Düzce depremleri sonucunda, sırasıyla 145 km ve 40 km uzunluğunda km toplam 185 km yüzey kırığı(yırtılmasına) oluşmasına neden olmuştur [15] [16]. İncelenen bölgede KAF doğudan batıya Gerede-Bolu-Mudurnu, Düzce, Hendek, Akyazı-Sapanca-İzmit-Karamürsel, Geyve-İznik-Gemlik, İzmit körfezi-Marmara Denizi, Yalova-Çınarcık boyunca uzanmaktadır. Marmara Bölgesi'nde içinde KAF sistemini 22 ± 3 mm / yıl sağ yanal atımlı olarak tanımlayabiliriz. [17] [18]. Le Pichon ve diğerleri (2001) tarafından Marmara Denizi'nin altındaki ana fayların 23 mm / yıl olarak kayma oranı esas alınmıştır [19]. Diğer fay segmentleri için Straub vd. (1997) tarafından yapılan GPS ölçümleri kullanılmıştır [17].

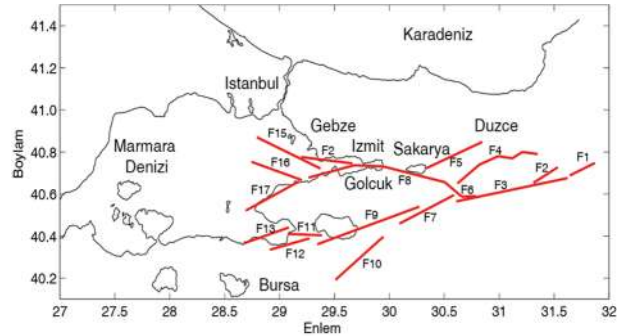
Deprem kaynaklarının belirlenmesinde Sakarya bölgesinin jeolojik ve tektonik durumu, daha önce meydana gelen depremler referans alınarak incelenmiştir. Bu çalışmada kullanılan depremler, AFAD, Deprem Araştırma Bölümü, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Uluslararası Sismoloji Merkezi ve ABD Jeoloji Araştırmaları kurumlarının veri tabanlarından derlenmiştir. Büyüklüğü 4'ten büyük 1901 ile 2004 yılları arasında meydana gelen depremlerden öncül ve artçı depremler temizlenmiştir. 103 yıllık deprem kataloğu Marmara bölgesindeki depremleri (39-43 enlem 26-32 boylam) kapsamaktadır. Sakarya çevresinde deprem tehlikesi oluşturacak faylar literatürdeki haritalarından faydalanılarak tekrar değerlendirilmiştir [20].



Şekil 2. Bölgede meydana gelen tarihsel ve aletsel depremler (The historical and instrumental earthquakes occurred in the region) [20].

Tespit edilen kaynaklar çizgisel olarak tanımlanmıştır ve bu kaynaklar üzerinde sismik tehlike oluşturabilecek en küçük deprem moment büyüklüğü değeri dört olarak kabul edilmiştir [21] [22]. Sakarya çevresinde aletsel kaydı veya tarihsel bilgileri olan deprem kayıtları derlenerek, sismik kaynak modelleri oluşturulmuş ve harita üzerinde gösterilmiştir (Şekil 3, Tablo 2). Değerlendirilen fayların kayma oranları 10 mm/yıl'a eşit ve büyük olanları çalışmaya dâhil edilmiştir. Marmara

Denizi'ndeki faylar için Le Pichon vd. (2003) ile Armijo vd. (2005) diğer faylar için Saroğlu vd. (1992) ile Hendek fayı (F5) MTA'nın güncel aktif fay verilerinden ve bölgedeki çalışmalardan yararlanılmıştır [19] [23] [24] [25] [26]. Bu karmaşık fay sistemi 17 fay segmenti ile tanımlanmış ve her fayın birbirinden bağımsız kırılacağı kabul edilmiştir. Yanal atımlı olmayan faylarda dip açısı fayın ortalama derinliği ve incelenecek konuma uzaklığın hesaplanması için önemlidir çünkü faya uzaklık deprem azalım ilişkilerinde en önemli parametrelerden bir tanesidir. Literatürden derlenen kaynaklarda dip genişliği ve fay derinlikleri gibi bilgiler kesin olarak belirlenemediği için düzlemsel kaynaklar yaklaşık çizgisel kaynak olarak değerlendirilmiştir. Kaynaklarda derinliği belirtilmeyen faylar için 10 km derinlik kabul edilmiştir [27].



Şekil 3. Sismik kaynak modeli (Seismic Source Model)

2.2. İkinci Aşama (Second Step)

Deprem büyüklükleri ile meydana gelme ilişkileri, belirlenen deprem kaynakları ve incelenmiş zaman aralığı için belirlenmiştir. Bu çalışmada yinelenme ilişkisi, depremlerin büyüklüğü ile oluş sayıları arasındaki ilişkiyi dikkate alan Gutenberg ve Richter (1944) denklemi ile tanımlanmıştır [28].

$$\log(\lambda_m) = a - bM \quad (1)$$

Bu denklemde, M deprem büyüklüğünü, a ve b regresyon katsayılarını, λ_m farklı büyüklüklerdeki depremlerin yıllık ortalamasını göstermektedir. Farklı büyüklükteki depremlerin belirli bir zaman periyodundaki görülme veya aşılma olasılıkları Poisson dağılımı (P) ile tahmin edilmiştir.

$$P(N \geq 1) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (2)$$

$$\lambda = -\frac{\ln(1 - P)}{t} \quad (3)$$

Burada, N belirli bir depremin oluş sayısını temsil eden değişkeni, t zaman aralığını, λ değeri de olayın ortalama oluşma oranını ifade eder. Crowley ve Bommer (2006)

incelenilen bölgede oluşan 100 yıllık $M \geq 5$ depremleri için b katsayısını 0.69 olarak kullanmıştır. [4]. Weichert (1980) maksimum olabilirlik yöntemi ile Marmara bölgesi için b değerini 0.72 olarak hesaplamıştır [29]. N. Sayıl, İ.Osmanşahin, Marmara bölgesinin deprenselliğinin incelenmesi makalesinde Adapazarı için b değerini 0.65 hesaplamışlardır. [20]. Ayrıca Marmara bölgesi için b değerinin 0.84 ila 2.04 değerleri arasında ve güney Marmara bölgesi için 0.5 ile 0.7 aralığında değiştiğine dair literatürde çalışmalar mevcuttur [30] [31]. Derlenen deprem katalogları incelenerek, Kalkan vd. (2009) ile paralel olarak a ve b regresyon katsayıları sırasıyla 3.6 ve 0.72 olarak alınmıştır [5].

Tablo.2 Sismik Kaynak Karakteristikleri (Characteristic of Seismic Source Model)

Fay Adı	Fay uzunluğu (km)	Karakteristik Deprem Büyüklüğü (M_w)	Kayma miktarı (mm/y)	Aktivite Oranı (deprem/y)
F1	21	6.6	20	0.0124
F2	21	6.6	20	0.0122
F3	90	7.3	20	0.0124
F4	66	7.2	20	0.0056
*F5	44	6.4	13	-
F6	26	6.7	20	0.0107
F7	48	7.0	20	0.0070
F8	112	7.5	23	0.0045
F9	82	7.3	20	0.0049
F10	45	7.0	20	0.0073
F11	30	6.8	20	0.0097
F12	31	6.8	20	0.0094
F13	36	6.9	20	0.0085
F14	20	6.6	23	0.0148
F15	51	7.1	23	0.0077
F16	36	6.9	20	0.0085
F17	41	7.0	20	0.0077

* 2012 yılında güncel fay haritasına eklenmiş aktif fay [25] [26].

2.3. Üçüncü Aşama (Third Step)

Kuvvetli yer hareketinin pik ve spektral ivme dağılımı, deprem büyüklüğü, kaynağa uzaklık ve kaynak mekanizmasına bağlı olarak, azalım ilişkileri ile hesaplanmıştır. Bu parametreler logaritmik dağılım gösterdiği için bulunması istenen yer hareketi parametresinin logaritması, $\ln(Y)$, depremin büyüklüğü (M) ve mesafeye (R) bağlı olarak dalga genlikleri, yırtılma alanı, malzeme sönümü, yer hareketi parametreleri ve zemin özellikleri gibi parametreler ile birlikte hesaplanmıştır. Tipik bir azalım ilişkisi denklemi aşağıdaki gibi tanımlanabilir;

$$\ln(Y) = c_1 + c_2 M + c_3 (M - c_4)^2 + c_5 \ln(R + c_6 \exp(c_7 M)) + c_8 R + f(\text{kaynak}) + f(\text{ze min}) \quad (4)$$

Bu denklemde $f(\text{kaynak})$, kaynak oluş mekanizması, $f(\text{zemin})$ yerel zemin karakteristiği ve c_n 'ler regresyon katsayılarıdır. Kaya zemin koşullarında oluşacak pik ve spektral ivmeleri bulmak için dört farklı yer hareketi tahmin modeli kullanılmıştır. Bu azalım ilişkilerinin ikisi literatürden Abrahamson-Silva (1997), Boore vd. (1997) seçilmiş olup, diğer iki tanesi ise son yıllarda geliştirilmiş yeni nesil azalım ilişkilerini içeren Campbell-Bozorgnia (2008) ve Idriss (2008) çalışmalarından seçilmiştir [32] [33] [34] [35].

2.4. Dördüncü aşama (Fourth Step)

Yer hareketi parametrelerinin aşılma olasılıkları belirlenmiştir. Toplam olasılık teoremine göre, bir yerleşim yerinde, belirli bir yer hareketi genliğinin aşılma olasılığı, tehlikeye katkıda bulunan parametrelerin bütün deprem kaynakları, büyüklükleri ve mesafelerine göre integralleri alınarak bulunur. Dolayısıyla, belirli bir konumdaki sarsıntı seviyesinin (x), ortalama yıllık aşılma olasılığı aşağıdaki formülle hesaplanmıştır [36].

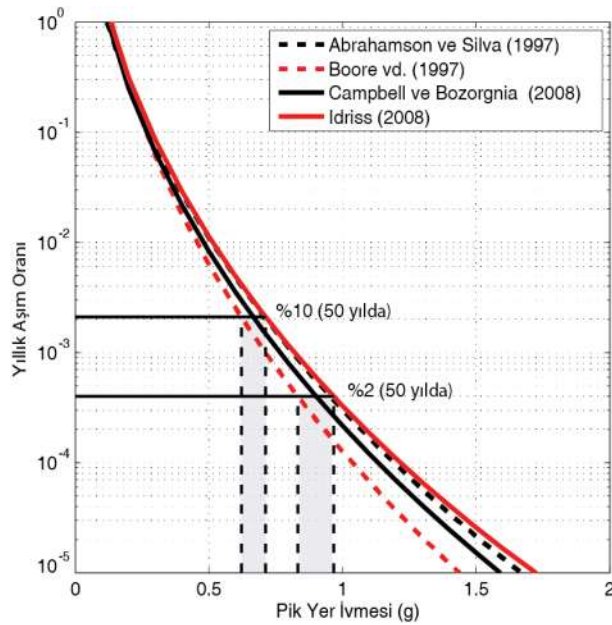
$$\zeta(x \geq X) = \sum_{i=1}^I v_i \iint f_i(M) f_i(R | M) P(x \geq X | M, R) dR dM \quad (5)$$

Bu denklemde v_i , i'nci kaynağın yıllık ortalama oranını, f_i olasılıksal yoğunluk fonksiyonunu, P argümanın olasılığını ifade etmektedir. Bu aşamada, Sakarya şehri için belirlenen depremlerin yeri, boyutu ve azalım ilişkilerindeki belirsizlikler çözümlenerek PYİ, spektral periyod 0.2s ve 1.0s için 50 yılda %2 ve %10 aşılma olasılıkları cinsinden yer hareketi parametreleri, Denklem 5 kullanılarak hesaplanmıştır.

Olasılıksal sismik analizini mevcut ücretsiz CRISIS-2007 veya ücretli EZ-FRISK gibi programlar ile gerçekleştirmek mümkündür [37] [38]. Hali hazırda kullanılan ondan fazla program Payton, Fortran, C, Java dilleri gibi çeşitli dillerde yazılmıştır. Bu çalışmada açık kaynaklı kullanımı daha kolay Visual Basic tabanlı EXCEL programı kullanılmıştır [39] [40]. Yazılım çekirdeğinde Cornell-McGuire metodunu kullanmaktadır [41] [42].

3. SONUÇLAR (CONCLUSION)

40.77 K, 30.40 D, koordinatlarında bulunan Sakarya şehri merkezi için yıllık aşılma oranları, dört farklı azalım ilişkisi kullanılarak, pik yatay yer ivmesi için hesaplanmıştır (Şekil 4). Azalım ilişkisine göre elde edilen sonuçlar farklılık göstermektedir. 50 yılda %2 ve %10 aşılma olasılıkları incelendiğinde, %2 aşılma olasılığındaki sonuçların daha geniş bir bantta olduğu okunmaktadır (Şekil 4, gri alanlar). En yüksek değerleri Idriss (2008) azalım ilişkisi verirken en küçük değerleri Boore vd. (1997) azalım ilişkisi vermektedir (Tablo 3). Önümüzdeki 50 yıl içerisinde, azalım ilişkilerinin ortalama değeri, %2 aşılma olasılığı için 0.92g, %10 aşılma olasılığı için ise 0.68g olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4. Sakarya şehir merkezi için sismik tehlike eğrisi (Seismic hazard curve for the Sakarya city center)

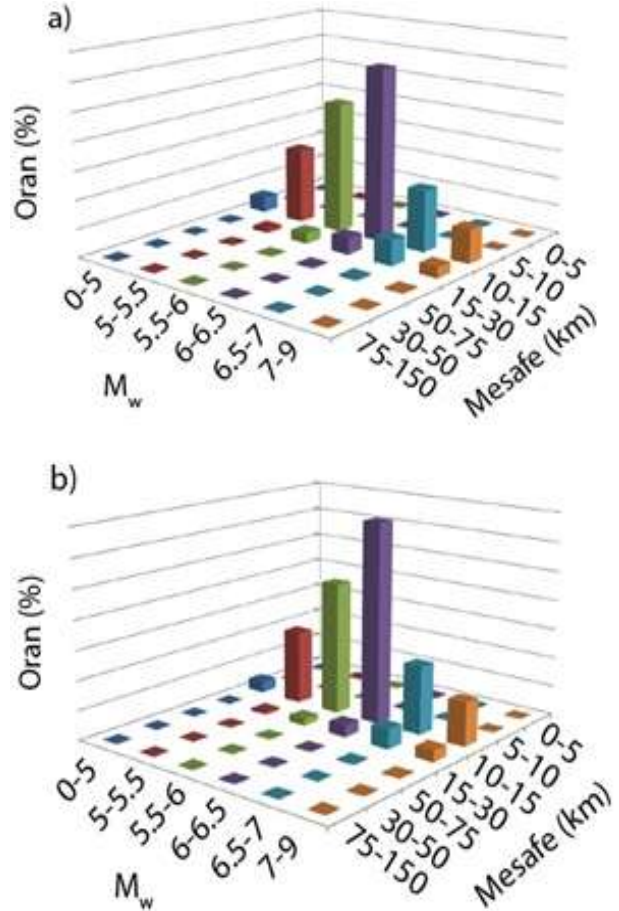
Tablo 3. Sakarya için farklı aşılma olasılığı oranlarına göre en büyük pik yatay yer ivmeleri (Horizontal peak ground acceleration for various exceedance probabilities for Sakarya)

Azalım İlişkisi	50 yılda %2 aşılma olasılığı (g)	50 yılda %10 aşılma olasılığı (g)
Abraham&Silva(1997)	0.96	0.71
Boore vd, (1997)	0.84	0.63
Campbell& Bozorgnia(2008)*	0.90	0.67
Idriss, (2008)*	1.00	0.72
Azalım İlişkileri Ortalaması	0.95	0.68

3.1. Ayırıklaştırma analizi sonuçları (Results of deaggregation analysis)

Sismik tehlike eğrisi sonucunda, verilerin daha iyi algılanabilmesi ve yorumlanabilmesi açısından deprem ayırıklaştırma grafikleri üretilmiştir. Sakarya merkezi için 50 yılda %10 ve %2 aşılma olasılığı için bölgede tehlike oluşturabilecek depremlerin hangi büyüklük aralığında, hangi oranla, ne kadar mesafede oluşacağı ihtimali ayrı ayrı hesaplanmıştır (Şekil 5).

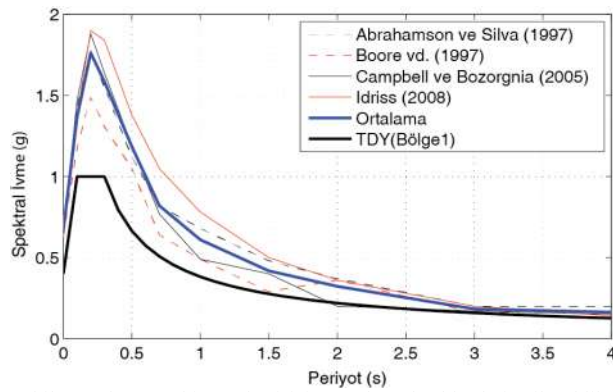
Tehlikenin şehir merkezine 10 ila 30 km yakınlıktaki faylardan geleceği anlaşılmaktadır. Özellikle yakın kaynaklı fayların (10-15 km, Şekil 2'deki F5 ve F8 fayları) katkısı çoktur. Deprem büyüklükleri açısından değerlendirildiğinde, oran olarak en çok tehlikeyi oluşturan deprem büyüklüğü 6 – 6.5 büyüklüğündeki depremler olduğu görülmektedir. Büyüklüğü 5'den küçük depremlerin toplam tehlikeye katkısı çok düşük orandadır.



Şekil 5. Kaya zemin koşullarında, pik yer ivmesi için, 50 yılda a) %10 ve b) %2 aşılma riski olan deprem büyüklükleri yüzde katkı oranlarına göre ayırıklaştırılmış hali (Deaggregation results of magnitude rates contribution in 50 years for a) 10% and b) 2% exceed).

3.2. Deprem Spektrumlarının Kıyaslanması (Comparison of Earthquake Spectra)

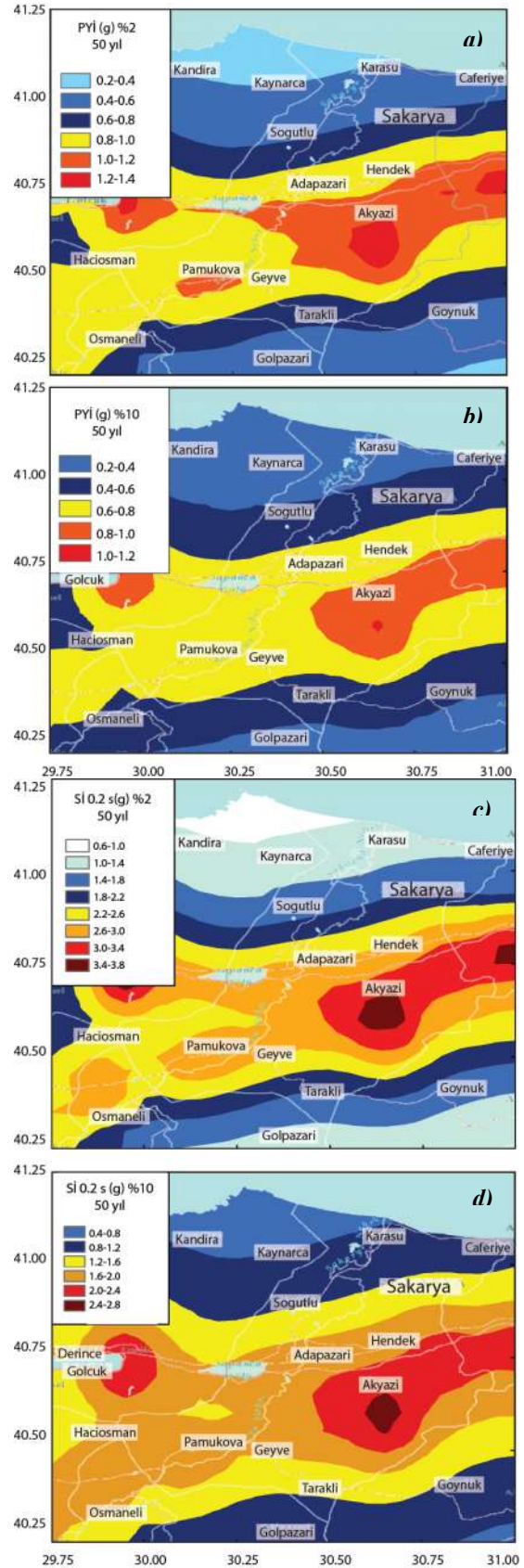
DBYBHY (2007) uyarınca birinci deprem bölgesine ait tasarım spektrum eğrisi Z1 zemini için oluşturulmuştur. Ayrıca bu çalışmada azalım ilişkilerinde tanımlanan her bir periyot için %5 sönüm oranı dikkate alınarak spektral ivme değerleri hesap edilmiştir (Şekil 6). Her bir azalım ilişkisinin ürettiği spektrum değerleri farklı olsa da, hepsi tasarım spektrumundan daha büyük değerlere sahiptir. Azalım ilişkilerinden elde edilen spektrum değerlerinin ortalamaları alındığında (Şekil 5, mavi çizgi) elde edilen spektrum ivme değerlerinin, DBYBHY (2007) tasarım ivme spektrumu değerlerinden 1.5-2 katı fazladır. Yüksek periyotlarda farklar azalmaktadır.

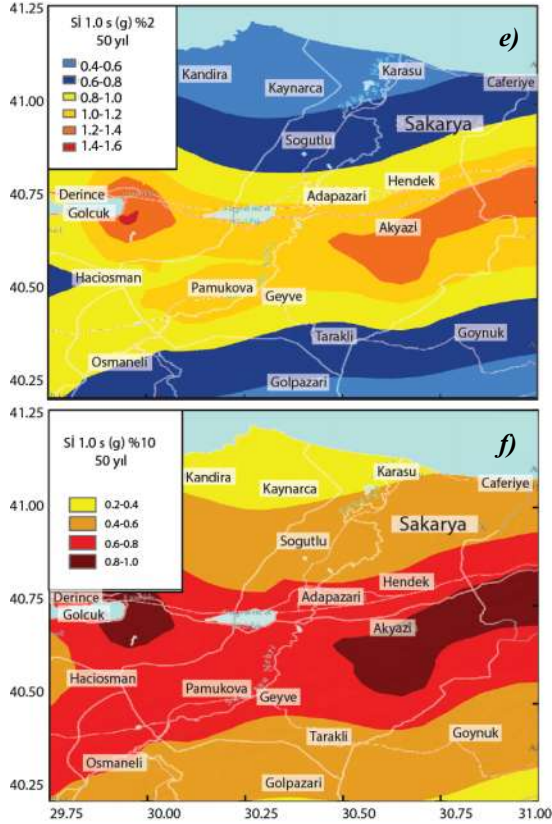


Şekil 6. Sakarya şehir merkezi için yapılan olasılıksal sismik tehlike analizi sonucu elde edilen tepki ivme spektrumu ile DBYBHY (2007) tasarım tepki spektrumunun karşılaştırılması. (Comparison of response spectra derived by probabilistic seismic hazard analysis with design response spectrum given by Regulations on Buildings to be constructed in Earthquake Zones for Sakarya city center)

3.3. Sismik Tehlike Haritaları (Seismic hazard maps)

Benzer analizler, tüm Sakarya ili ve çevresi için de tekrarlanmış ve olasılıksal sismik tehlike haritaları elde edilmiştir (Şekil 7). PYİ değerinin 50 yılda %2 ve %10 aşılma olasılıkları değerlendirildiğinde Akyazı ilçesi ve civarı 1.2 ila 1.4 g değerlerine ulaşmıştır (Şekil 7 a-b). Pamukova ve Sapanca gölünün güneyi, muhtemel kuvvetli bir yer hareketine maruz kalacaklardır. Genel olarak kuzeye doğru gidildiğinde PYİ'nin aşılma değerleri 0.4 g'nin altına inmektedir. Spektral ivmeler için elde edilmiş tehlike haritaları incelendiğinde, PYİ değerlerinden farklı da olsa aynı dağılım şekli gözlenmektedir (Şekil 7 c-f). 0.2s periyot için maksimum değer 3.0 g'lere çıkarken, 1.0s periyodu için bu değer maksimum 1.6g olarak bulunmuştur. Şekil 2' de gösterilen F4, F6, F7 ve F8 faylarının kesişim noktası olan Akyazı, PYİ ve her periyot için maksimum sonuçlar üretmektedir.





Şekil 7. Sakarya için yapılan olasılıksal sismik tehlike analizi sonucu elde edilen, kaya zeminde 50 yılda %2 ve %10 aşılma ihtimaline göre bölgeye ait sismik tehlike haritaları (a,b,c,d,e,f) (Seismic hazard maps of the region for exceedance of 2% and 10% in 50 years at rock site. (a,b,c,d,e,f))

4. TARTIŞMA VE DEĞERLENDİRME (DISCUSSING AND ASSESSMENT)

Bulunan en büyük yatay yer ivmeleri ile 0.2 ve 1 saniye için ivme spektrum değerleri Marmara bölgesi ve Sakarya çevresinde geçmişte yapılmış olan diğer çalışmalar ile Tablo 4' de karşılaştırılmıştır. Diğer çalışmalar ile bu çalışmada bulunan sonuçlar paralellik gösterse de, bazı durumlarda farklı sonuçlar elde edilmiştir.

Kalkan vd.'nin deprem kaynakları ve moment büyüklükleri büyük oranda bu çalışma ile eşleşmesine rağmen hesaplanan sonuçlar %10 daha yüksek bulunmuştur [5]. Bunun en büyük sebeplerinden birisi 2012 yılında yenilenen MTA fay haritalarına bölgedeki diri faylardan birisi olarak eklenen Hendek fayının (F5 fayı, Şekil 3) bu çalışmaya dâhil edilmesinden kaynaklanmaktadır.

Türkiye için genel bir çalışma olan, Ulaştırma Bakanlığı, Deprem Tehlikesi Belirlemesi çalışması sonuçlarında Sakarya için bulunan değerlerin, bu çalışmaya göre genellikle daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir [43].

Yüzde %10 aşılma olasılıkları için elde edilen değerler bu çalışma ile örtüşse de, %2 aşılma olasılıkları adı geçen çalışmada 0.5-0.8g mertebeleri oranında daha fazla bulunmuştur.

Tablo 4. Bölge için yapılan geçmiş çalışma sonuçları ile bu çalışmanın karşılaştırılması (Comparison with other studies in literature for the region)

Çalışma adı	PGA		T = 0,2 s		T = 1,0 s	
	%2 a.o (g)	%10 a.o (g)	%2 a.o (g)	%10 a.o (g)	%2 a.o (g)	%10 a.o (g)
Kalkan vd.(*)	0.9*	0.5*	2.2*	1.2*	0.9*	0.5*
Ulaştırma Bakanlığı (*)	1.0	0.7	2.31	1.54	1.39	0.8
R. S. Ocak	0.92	0.60	2.6*	1.6*	1.0*	0.6*
Bu çalışma	0.95	0.68	2.49	1.73	0.93	0.63

* Haritadan okunan değer aralıklarının ortalaması, a.o. = aşılma olasılığı

2011 yılında, R.S. Ocak tarafından, Kuzey Anadolu Fay hattı boyunca uzanan Düzce, Sakarya, Sapanca, İzmit, Gölcük, İzmit ve Gemlik kent merkezleri incelenmiştir [6]. Bu çalışma ile kıyaslandığında, 50 yılda aşılma olasılığı % 2 olan en büyük yatay yer ivmesi değeri aynı iken, 50 yılda aşılma olasılığı % 10 olan en büyük yatay yer ivmesi değerinde %12 bir artış gözlenmektedir. R.S. Ocak'ın çalışmasındaki 0.2 ve 1.0 s periyodları için %2 aşılma olasılığı spektral ivmeleri, bu çalışma ile elde edilen değere göre daha fazla iken, aynı saniyeler için %10 aşılma olasılığı değerleri düşüktür. Muhtemel farklılıkların sebebi, seçilen kaynak modelleri (analizlerde F5 kaynağının olmayışı) ve regresyon katsayıları arasındaki farklardan kaynaklandığı düşünülmektedir.

Bu çalışmada elde edilen spektrum ivmeleri, DBYBHY tasarım spektrum eğrilerine kıyasla çok daha yüksek olarak hesaplanmıştır. DBYBHY' nin önermiş olduğu genel tasarım spektrumunun gelecekte revize edilirken OSTA'lardan yararlanmasında fayda olacaktır. Bu anlamda, aktif faylara yakın yerleşim merkezleri için tasarım spektrumlarının tasarım için yetersizken, Sakarya şehrinin kuzeyi gibi yerleşim yerlerinde yapılacak olan binalar için ise aşırı tasarım söz konusudur.

Literatürde, Sakarya şehri için ilk defa yapılan ayrıklaştırma sonuçları, bölge için tehlike oluşturabilecek depremin, hangi deprem büyüklük aralığında ve ne kadar mesafede hangi oranda meydana gelebileceği hakkında fikir vermektedir. Bu çalışma sonucunda, Sakarya'da 50 yılda %10 ve %2 aşılma olasılıklarına göre, PYİ için %30-35 oranla en büyük tehlike oluşturabilecek deprem büyüklüğü 6-6.5 arası ve şehir merkezinden 10-15 km uzaklığında olan depremlerdir. Bu bağlamda Sakarya şehir merkezinin, mevcut yerleşim merkezinin kuzeyine, Camili-Korucuk

yerleşim merkezlerine taşınmasının çok yerinde olduğu anlaşılmaktadır.

Aktif faylara çok yakın yerleşim yerleri olan, Akyazı, Pamukova, Arifiye, Sapanca Gölünün güneyindeki mevcut yapıların tekrar değerlendirilmesi, şehir planlaması ve şehir afet yönetimi planlarının tekrar gözden geçirilmesi gerekmektedir. Elde edilen sismik tehlike haritaları, gelecekte Sakarya bölgesinde meydana gelebilecek depremlerin etkisi hakkında bilgi sağlamaktadır. Afet yönetiminden sorumlu kamu kuruluşlarından özellikle belediyeler, Valilik ve Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı gibi kurumlar için Sakarya şehri ve çevresindeki sismik tehlikenin azaltılması, değerlendirilmesi ve oluşabilecek hasarın yönetilebilmesi açısından bu çalışma sonuçları yararlı olacaktır.

KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] E. Seyrek ve H. Tosun, "Tehlike Analiz Yöntemlerinin Ülkemizdeki Büyük Beton Barajların Toplam Riski Üzerindeki Etkisi," Gazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi, cilt 28, no. 1, 67-75, 2013.
- [2] K. Atakan, A. Ojeda, M. Meghraoui, A. A. Barka, M. Erdik ve A. Bodare, "Seismic Hazard in Istanbul following the 17 August 1999 Izmit and 12 November 1999 Düzce Earthquakes," Bulletin of the Seismological Society of America, cilt 1, no. 92, 466-482, 2002.
- [3] M. Erdik, K. Demircioğlu, K. Şeşetyan, E. Durukal ve B. Siyahi, "Earthquake hazard in Marmara region, Turkey," Soil Dyn. Earthq. Eng., cilt 1, no. 24, 605-631, 2004.
- [4] H. Crowley ve J. J. Bommer, "Modeling seismic hazard inearthquake loss models with spatially distributed exposure," Bull. Eq. Eng., no. 4, 249-273, 2006.
- [5] E. Kalkan, P. Gülkan, N. Yılmaz ve M. Çelebi, "Reassessment of probabilistic seismic hazard in the Marmara Region," Bull. Seismol. Soc., cilt 99, no. 4, 2127-2146, 2009.
- [6] R. S. Ocak, Probabilistic Seismic Hazard Assessment of Eastern Marmara an evaluation of Turkish Earthquake Code Requirements, Ankara: ODTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2011.
- [7] D. A. D. Başkanlığı, Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası, Ankara: T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, 1996.
- [8] A. M. Sengör, "The North Anatolian Transform Fault: its age, offset and tectonic significance," J. Geol. Soc., cilt 136, no. 2, 69-82, 1979.
- [9] D. P. McKenzie, "Active tectonics of the Mediterranean region," Geophys. J. R. Astron. Soc., cilt 30, no. 1, 9-85, 1972.
- [10] A. A. Barka, "The North Anatolian Fault Zone," Ann. Tecton, cilt 6, no. 1, 64-95, 1992.
- [11] A. A. Barka ve K. Kandinsky-Cade, "Strike-slip fault geometry in Turkey and its influence on earthquake activity," Tectonics, cilt 7, no. 6, 63-84, 1988.
- [12] A. A. Barka, "Slip distribution along the North Anatolian fault associated with the large earthquakes of the period 1939 to 1967," Bull. Seismol. Soc. Am., cilt 86, 1238-1254, 1996.
- [13] R. S. Stein, A. A. Barka ve J. H. Dieterich, "Progressive failure on the North Anatolian fault since 1939 by earthquake stress triggering," Geophys. J. Int., cilt 128, 594-604, 1997.
- [14] Reilinger R., McClusky S., Vernant P., Lawrence S., Ergintav S., Cakmak R., Ozener H., Kadirov F., Guliev I., Stepanyan R., Nadariya M., Hahubia G., Mahmoud S., Sakr K., ArRajehi A., Paradissis D., Al-Aydrus A., Prilepin M., Guseva T., Evren E., Dmitrova A., Filikov S.V., Gomez F., Al-Ghazzi R., Karam G., "GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions," J. Geophys. Res.111, B05411., 2006.
- [15] A. A. Barka, H. S. Akyüz., E. Altunel, G. Sunal ve Z. Çakır, "The surface rupture and slip distribution of the 17 August 1999 Izmit earthquake (M 7.4), North Anatolian Fault," Bull. Seismol. Soc. Am., cilt 92, 43-60, 2002.
- [16] H. S. Akyüz, Hartleb R., Barka A., Altunel E. ve Sunal G., "Surface rupture and slip distribution of the 12 November 1999 Düzce earthquake (M 7.1), North Anatolian Fault, Bolu, Turkey," Bull. Seismol. Soc. Am., cilt 92, 61-66, 2002.
- [17] C. Straub, H. G. Kahle ve C. Schindler, "GPS and geologic estimates of the tectonic activity in the Marmara Sea region, NWAnatolia," J. Geophys. Res., cilt 102, no. 27, 587-601, 1997.
- [18] S. McClusky ve 2. coauthors, "Global Positioning System constraintson," J. Geophys. Res., cilt 105, 5695-5719, 2000.
- [19] X. Le Pichon, "The active main Marmara fault, Earth Planet," Sci. Lett., cilt 192, 595-616, 2001.
- [20] N. Sayıl ve İ. Osmaşahin, "Marmara bölgesinin depremselliğinin incelenmesi," Uluslararası Deprem Sempozyumu, Kocaeli, 2005.
- [21] N. N. Ambraseys, "Comparison of frequency of occurrence of earthquakes with slip rates from long-term seismicity data: the cases of Gulf of

- Corinth, Marmara Sea and Dead Sea Fault Zone,” *Geophys. J. Int.*, cilt 165, no. 2, 516-526, 2006.
- [22] P. Gülkan ve E. Kalkan, “Attenuation modeling of recent earthquakes in Turkey,” *Journal of Seismology*, cilt 6, no. 3, 397-409, 2002.
- [23] R. Armijo, Pondard N., Meyer B., Mercier de LepInay B., Uçarkus G., Malavieille J., Dominguez S., Gustcher M-A. Beck, Çagatay N., Cakir Z., Imren C., Kadir E. and Natalin and Marmarascreps cruise party, “Submarine fault scarps in the Marmara Sea pull-apart (North Anatolian Fault): implications for seismic hazard in Istanbul,” *Geochem., Geophys., Geosyst.*, cilt 6, 1-29, 2005.
- [24] F. Saroğlu, O. Emre ve İ. Kuşçu, *Active fault map of Turkey*, Ankara: MTA, 1992.
- [25] Ö. Emre, Doğan A., Duman T.Y., Özalp T., 1:250.000 Türkiye Diri Fay Haritaları Serisi, Ankara: MTA, 2012.
- [26] S. Cambazoğlu, *Preparation of a Source Model for the Eastern Marmara Region Along the North Anatolian Fault Segments and Probabilistic Seismic Hazard Assessment of Düzce Province.*, Ankara: Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2012.
- [27] E. Harman ve H. S. Küyük, “Probabilistic seismic hazard analysis for the city of Sakarya,” *Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, İstanbul, 2014.
- [28] B. Gutenberg ve C. H. Richter, “Frequency of earthquakes in California,” *Bulletin of the Seismological Society of America*, cilt 34, 185-188, 1944.
- [29] D. H. Weichert, “Estimation Of The Earthquake Recurrence Parameters For Unequal Observation Periods For Different Magnitudes,” *Bull. Seismol. Soc. Am.*, cilt 70, no. 4, 1337-1346, 1980.
- [30] M. Utkucu, E. Budakoğlu ve H. Durmuş, “Marmara Bölgesinde (KB Türkiye) depremsellik ve deprem tehlikesi üzerine bir tartışma,” *Hacettepe Üniversitesi, Yerbilimleri Dergisi*, cilt 32, no. 3, 187-212, 2011.
- [31] H. Yalçın, L. Gülen, M. Utkucu, *Türkiye ve Yakın Çevresinin Aktif Fayları Veri Bankası ve Deprem Tehlikesinin Araştırılması*, Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Bülteni, Yerbilimleri, 34 (3), 133-160, 2013.
- [32] N. A. Abrahamson ve W.J. Silva, “Empirical Response Spectral Attenuation Relations for Shallow Crustal Earthquakes,” *Seismological Research Letters*, cilt 68, no. 1, 94-127, 1997.
- [33] D. M. Boore, “Equations For Estimating Horizontal Response Spectra and Peak Acceleration From Western North American Earthquakes: A Summary of Recent Work,” *Seismological Research Letters*, cilt 68, no. 1, 128-153, 1997.
- [34] K. W. Campbell ve Y. Bozozogonia, “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*, cilt 24, no. 1, 139-171, 2008.
- [35] I. M. Idriss, “An NGA Empirical Model for Estimating the Horizontal Spectral Values Generated By Shallow Crustal Earthquakes,” *Earthquake Spectra*, cilt 24, no. 1, 217-242, 2008.
- [36] L. Reiter, *Earthquake Hazard Analysis: Issues and Insights*, New York: Colombia University Press, 1990.
- [37] E.-A. CAPRA, “Comprehensive Approach for Probabilistic Risk Assessment,” <http://www.ecapra.org/>.
- [38] EZFRISK®. 7.25, “Software for earthquake ground-motion estimation,” Developed by Risk Engineering Inc., <http://www.ezfrisk.com/index.html>.
- [39] J. P. Wang, D.R. Huang, C.T. Cheng , K.S. Shao, Y.C. Wu, C.W.Chang, “Seismic hazard analyses for Taipei city including deaggregation, design spectra, and time history with excel applications,” *Computers & Geosciences*, cilt 52, 146-154, 2013.
- [40] J. P. Wang, D.R. Huang, Z.J. Yang, “Deterministic seismic hazard map for Taiwan developed using an in-house Excel-based program,” *Computers & Geosciences*, cilt 48, 111-116, 2012.
- [41] C. A. Cornell, “Engineering seismic risk analysis,” *Bulletin of the Seismological Society of America*, cilt 58, no. 5, 1583-1606, 1968.
- [42] C. A. Cornell, H.Banon, A.F. Shakal, “Seismic motion and response prediction alternatives,” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, cilt 7, 295-315, 1979.
- [43] M. Erdik, K. Şeşetyan, M. B. Demircioğlu ve E. Durukal, *Ulaştırma Bakanlığı Demiryolları, Limanlar ve Havameydanları İnşaatı Genel Müdürlüğü Kıyı Yapıları, Demiryolları ve Hava meydanları İnşaatları Deprem Teknik Yönetmeliği için Deprem Tehlikesi Belirlemesi*, İstanbul: Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, 2006.