

23 Kasım 2022 Düzce Depreminin (Mw 6,0) Bölgesel Sismisite ve Kuvvetli Yer Hareketleri Açısından Değerlendirilmesi

Erdem BAYRAK^{1,2*}, Kaan Hakan ÇOBAN³

¹ Deprem Araştırma Merkezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye

² İnşaat Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye

³ Jeofizik Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye

*¹ erdmbyrk@gmail.com, ³ h.coban@ktu.edu.tr

(Geliş/Received: 01/02/2024;

Kabul/Accepted: 30/08/2024)

Öz: Düzce ili Gölyaka ilçesinde 23 Kasım 2022 tarihinde TSİ 04:08'de moment büyüklüğü (Mw) 6,0 olan orta büyüklükte bir deprem meydana gelmiştir. Deprem başta Düzce ili olmak üzere Karadeniz, Marmara ve İç Anadolu bölgelerinde de şiddetli bir şekilde hissedilmiştir. Orta büyüklükte meydana gelen bu deprem sonucunda en büyük yer ivmesi yaklaşık 14 km uzaklıktaki 8105 istasyonunun Doğu-Batı bileşeninde 592 gal olarak kaydedilmiştir. Bu çalışma kapsamında ilk olarak 2022 Düzce depremi öncesi bölgede meydana gelen depremlerin zamansal ve mekânsal değişimi incelenmiştir. Anaşok sonrası meydana gelen artçı şoklar ise Gutenberg-Richter ilişkisi yardımı ile incelenerek bölgenin depremselliği ortaya konulmuştur. Daha sonra, yer hareketi tahmin denklemleri ile hesaplanan en büyük yer ivmeleri ile kuvvetli yer hareketi istasyonlarında kaydedilen en büyük yer ivmeleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca ivme kayıtlarından elde edilen tepki spektrumları ile Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine göre elde edilen tasarım tepki spektrumları karşılaştırılmıştır. Bazı istasyonlarda elde edilen en büyük ivme değerlerinin yer hareketi tahmin denklemleri ile hesaplanan ivme değerlerini aştığı gözlenmiştir. İvme kayıtlarından elde edilen tepki spektrumlarının da Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne göre hesaplanan tasarım spektrum seviyelerini aştığı görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Düzce depremi, kuvvetli yer hareketi, tepki spektrumu, yer hareketi tahmin denklemleri, gutenberg-richter ilişkisi

Evaluation of 23 November 2022 Düzce Earthquake in terms of Regional Seismicity and Strong Ground Motions

Abstract: The earthquake with a moment magnitude (Mw) of 6.0 occurred in Gölyaka district of Düzce province at 04:08 on November 23, 2022. The earthquake was strongly felt mainly in Düzce province, but also in the Black Sea, Marmara and Central Anatolia regions. As a result of this moderate magnitude earthquake, the peak ground acceleration was recorded as 592 gal at the East-West component of station 8105, about 14 km away. Firstly, the temporal and spatial variation of earthquakes occurring in the region before the 2022 Düzce earthquake was analyzed. Aftershocks occurring after the mainshock were analyzed with the help of the Gutenberg-Richter relationship and the seismicity of the region was revealed. The peak ground accelerations obtained from ground motion prediction equations are compared with the peak ground accelerations recorded at strong ground motion stations. In addition, the response spectra obtained from the acceleration records are compared with the design response spectra obtained according to the Turkish Building Earthquake Code. It was observed that the maximum acceleration values obtained at some stations exceeded the acceleration values calculated with the ground motion prediction equation. It was also observed that the response spectra obtained from the acceleration records exceeded the design spectrum levels calculated according to the Turkish Building Earthquake Code.

Key words: Düzce earthquake, strong ground motion, response spectrum, ground motion prediction equation, gutenberg-richter relation.

1. Giriş

Dünyadaki en aktif sismik kuşaklardan olan Alp-Himalaya kuşağının bir parçası da Türkiye'dir. Türkiye ve civarı genel olarak yüksek depremsellik seviyesine sahiptir ve bu bölgede tarih boyunca yıkıcı ve hasar yapıcı depremler meydana gelmektedir. Özellikle Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ) ve Doğu Anadolu Fay Zonu (DAFZ) boyunca hasar verici depremler meydana gelmektedir. Bu nedenle araştırmacılar bu iki aktif tektonik birim başta olmak üzere Türkiye için sismik tehlikeyi değerlendiren birçok çalışma yapmıştır [1-12]. Bu depremlerin son örneği ise 2023 Şubat ayında meydana gelen ve ülkenin büyük bir bölümünü etkileyen Mw 7,7 ve 7,6 büyüklüğündeki Kahramanmaraş depremleridir.

* Sorumlu yazar: erdmbyrk@gmail.com. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0001-9907-1463, ² 0000-0001-8034-1486

Düzce kenti ana kayadan uzak bir konumda bulunan ovada yerleşmiştir. Akarsu, kanal ve taşkın ovası çökel alanları üzerinde bulunmakta ve genişlemektedir. Düzce havzasındaki anakaya derinliğinin yaklaşık 260 m civarında olduğu belirlenmiştir [13]. Düzce ve yakın civarındaki en yaşlı birim Düzce ovasının güney batısında Prekambriyen yaşlı meta-granotoyitlerdir [14]. Düzce Fayı, bu birimler ile Kuvaterner alüvyonlar arasındaki sınırı oluşturmaktadır.

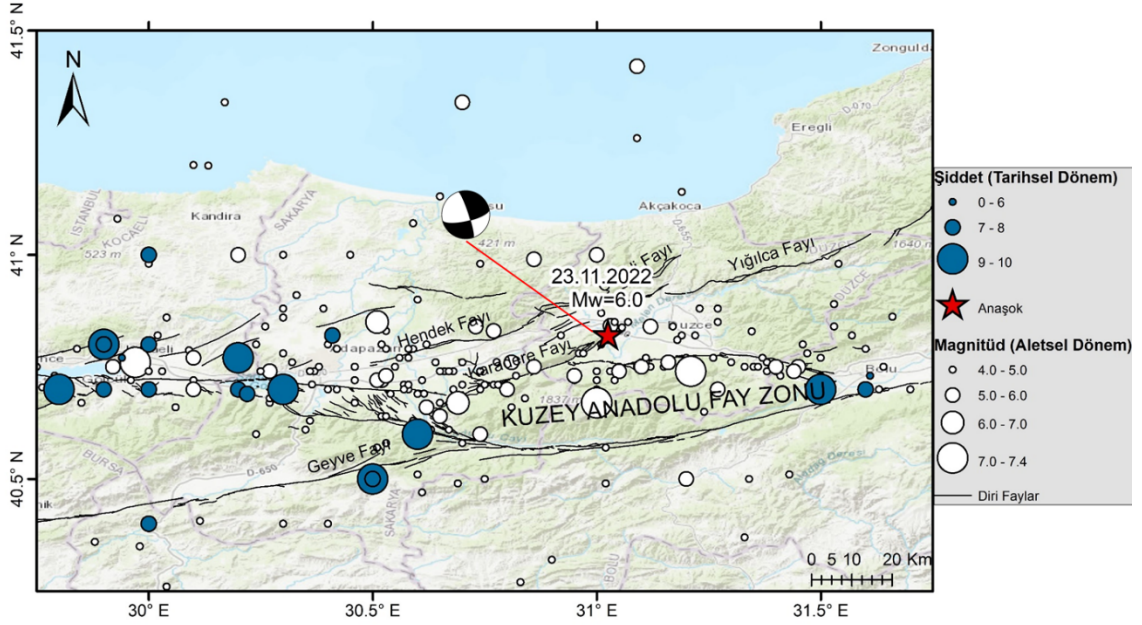
Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü (KOERI)'ne göre Düzce Gölyaka'da 23.11.2022 tarihinde yerel saat ile 04:08'de Mw 6,0 büyüklüğünde bir deprem meydana gelmiştir. Depremin merkez üssüne göre depreme kaynaklık eden fayın KAFZ 'ın bir parçası olan ve yaklaşık 40 km'lik uzunluğa sahip Karadere fayı olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 1). Deprem odak mekanizması çözümlerine göre fayın sağ yönlü doğrultu atımlı olduğu görülmektedir. Deprem başta Düzce olmak üzere Marmara, Batı Karadeniz ve İç Anadolu bölgesinde bulunan birçok ilde hissedilmiş ve paniğe neden olmuştur. Deprem episantrına en yakın konumda bulunan Düzce ilinde hayatını kaybeden vatandaş bulunmazken yaklaşık 40 vatandaşın ise deprem nedeni ile yaralandığı Düzce Valiliği tarafından açıklanmıştır (<http://www.duzce.gov.tr/12-kasim-duzce-depremi>). Türkiye Deprem Tehlike Haritasına göre Düzce ilinde 475 yıllık geri dönüş periyoduna göre beklenen en büyük yer ivmesi değerleri yaklaşık 0,6 g civarındadır. Bu da bölgenin sismik açıdan oldukça tehlikeli olduğunu ve deprem risk azaltma çalışmalarının ivedilikle yapılmasının gerekliliğine işaret etmektedir.

Bu çalışmanın ana amacı Düzce depreminin etki ettiği alanda bulunan kuvvetli yer hareketi verilerinin incelenmesidir. Çalışmanın ilk aşamasında Düzce ve civarının sismisitesi (deprenselliği) Gutenberg-Richter ilişkisi kullanılarak irdelenmiştir. Daha sonra depreme en yakın konumda bulunan 10 adet kuvvetli yer hareketi istasyonundaki ivme verileri üzerinden araştırmalar yapılmıştır. Deprem sonucu istasyonlarda kaydedilen ivme değerleri ile yer hareketi tahmin denklemlerinden (YHTD) elde edilen ivme değerleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca tepki spektrumları ile Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğindeki tasarım spektrumları karşılaştırılmıştır.

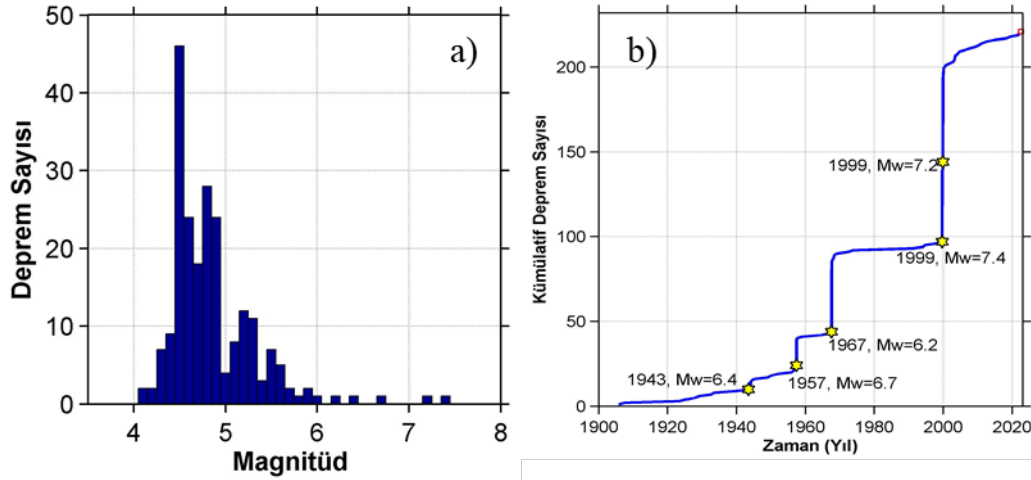
2. Çalışma Alanı Deprenselliği

KAFZ, batıda Saros Körfezi'nden doğuda Karlıova ilçesi yakınlarına kadar yaklaşık 1200 km boyunca uzanan ve Türkiye'nin Karadeniz kıyısına yaklaşık paralel bulunan sağ yönlü doğrultu atımlı bir fay zonudur [13]. KAFZ boyunca son yüzyılda 1939 Erzincan depremi (Ms 7,9) ve 1999 İzmit depremi (Mw 7,4) gibi hasar yapıcı çok sayıda deprem meydana gelmiştir. 1999 İzmit depremi sonucunda KAFZ boyunca beş farklı segmentin kırıldığı araştırmacılar tarafından rapor edilmiştir [15-17]. Karadere segmenti bu 5 segmentin en doğusunda bulunmaktadır ve diğerleri gibi genel olarak D-B yerine K65°D eğilimli olmasıyla farklılık göstermektedir. Karadere segmentinde ölçülen sağ yönlü yer değiştirmeler, maksimum 2,3 m ile D-B eğilimli segmentlerden daha düşük olduğu belirlenmiştir [18-19]. Düzce depremi olasılıksal sismik tehlike analizi yardımı ile değerlendirilmiştir [20]. Yaptıkları çalışmada Düzce merkez için DD-2 tasarım seviyesi için 0,5-0,7g arasında değişen ivme değerleri beklendiği sonucuna varmışlardır.

Çalışma alanında 1900 tarihinden ana şokun meydana geldiği 23.11.2022 tarihine kadar $M \geq 4$ olan depremler B.Ü. Kandilli Rasathanesi Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi (BDTİM) Deprem Sorgulama Sistemi'nden elde edilmiştir. Deprem ajansları depremlerin magnitüd türlerini Mb, Ms, Ml, Md veya Mw olarak hesaplamakta ve kullanıma sunmaktadırlar. B.Ü. Kandilli Rasathanesi BDTİM Deprem Sorgulama Sistemi'nden alınan deprem verileri de farklı magnitüd türlerini içermektedir. Depremlerin aynı magnitüd türüne dönüştürülmesi katalogun homojenleştirilmesi olarak bilinmektedir. Bu amaç için [21] tarafından geliştirilen magnitüd dönüştürme denklemleri kullanılarak katalog moment magnitüdü (Mw) türünden homojen hale getirilmiştir. Homojenleştirilen kataloga göre çalışma alanında aletsel dönemde büyüklükleri 4 ile 7,4 arasında değişen toplam 221 adet deprem meydana gelmiştir (Şekil 1). 1900 yılından itibaren meydana gelen depremlerin büyüklüklerinin çoğunlukla 5'den küçük olduğu gözükmektedir (Şekil 2a). Magnitüdü 6 ve daha büyük depremler ise daha nadir olmaktadır. Kümülatif deprem sayısı grafiğine göre deprem sayısındaki artışlar genellikle 6 ve daha büyük magnitüdü depremlerden sonra olmuştur (Şekil 2b).



Şekil 1. Çalışma alanı ve civarının depremselliği (Beyaz renkli yuvarlaklar aletsel dönem depremlerini (>1900) ifade etmektedir ve B.Ü. Kandilli Rasathanesi BDTİM Deprem Sorgulama Sistemi'nden alınmıştır. Mavi yuvarlaklar ise tarihsel dönem depremlerini (<1900) simgelemektedir ve AFAD-Tarihsel Dönem Deprem kataloğundan alınmıştır. Deprem odak mekanizması da AFAD Odak Mekanizma Çözümleri kataloğundan alınmıştır. Faylar [22] tarafından hazırlanan verilerden sayısallaştırılmıştır).

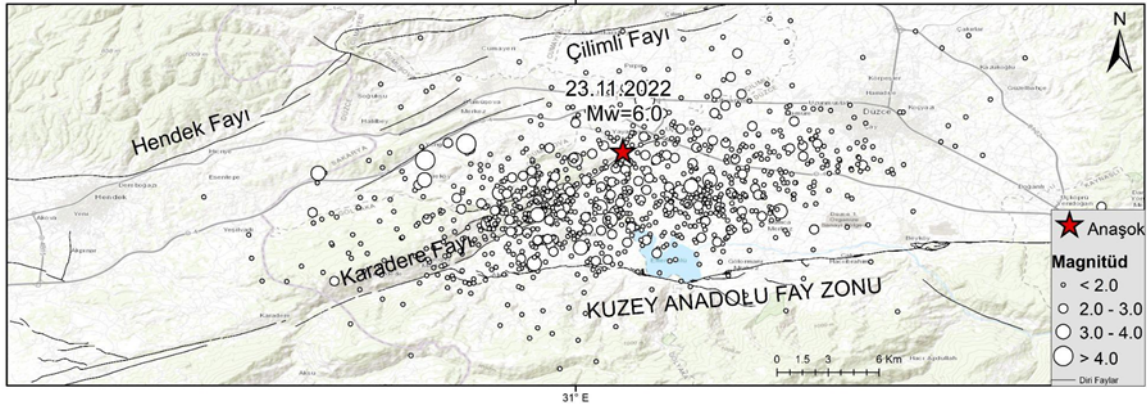


Şekil 2. a) Magnitüd-Deprem Sayısı histogramı b) Yıl-Kümülatif deprem sayısı grafiği.

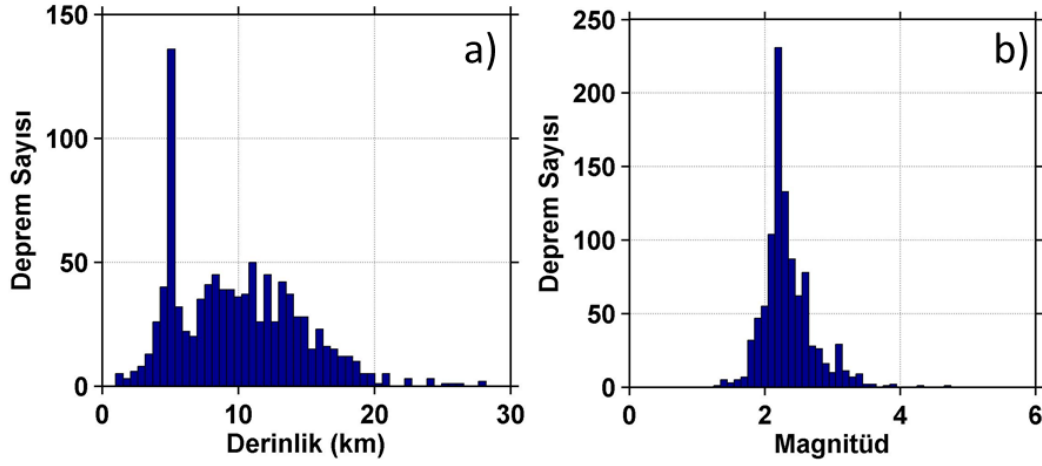
3. Bulgular

3.1. Artçı şok istatistiği

Anaşokun meydana geldiği 23.11.2022 tarihinden 28.12.2023 tarihine kadar geçen sürede toplam 995 adet deprem meydana gelmiştir (KOERİ, Şekil 3). Meydana gelen depremler genel olarak Karadere Fayı üzerinde dağılım göstermektedir. Artçı katalog homojenleştirilmesi için yine [21] tarafından belirlenen denklem kullanılmıştır. Artçı şokların derinlikleri genellikle 20 km'den daha sığ ve magnitüdülerinin de 3'ten küçük olduğu görülmektedir (Şekil 4).

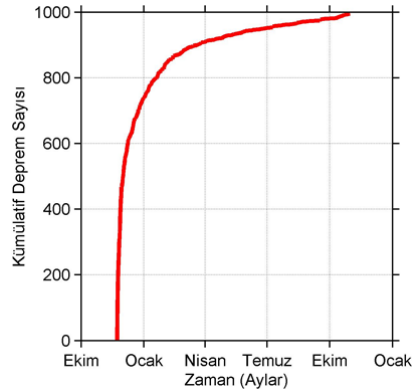


Şekil 3. Anaşoktan sonra 28.12.2023 tarihine kadar meydana gelen depremlerin episantr dağılımı (Deprem verileri B.Ü. Kandilli Rasathanesi BDTİM Deprem Sorgulama Sistemi'nden alınmıştır. Faylar [22] tarafından hazırlanan verilerden sayısallaştırılmıştır).



Şekil 4. a) Derinlik-deprem sayısı histogramı b) Magnitüd-deprem sayısı histogramı (Zmap programı kullanılarak hazırlanmıştır).

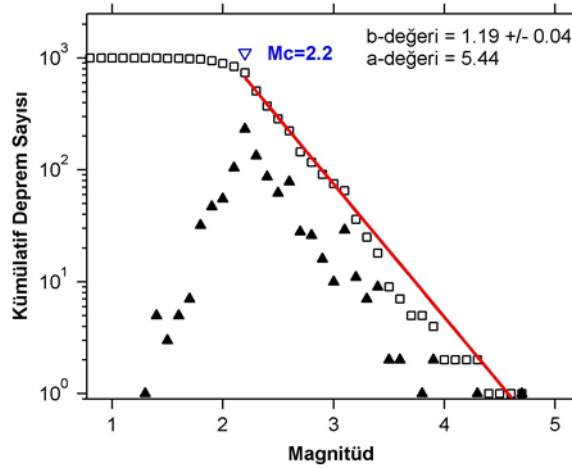
Şekil 5'te verilen zaman-kümülatif deprem sayısı grafiği incelendiğinde, artçı şokların sayısının Şubat ayına kadar artış gösterdiği fakat bu tarihten itibaren azalmaya başladığı açıkça görülmektedir.



Şekil 5. Zaman-kümülatif deprem sayısı grafiği (Zmap programı kullanılarak hazırlanmıştır).

3.2. Gutenberg-Richter ilişkisi

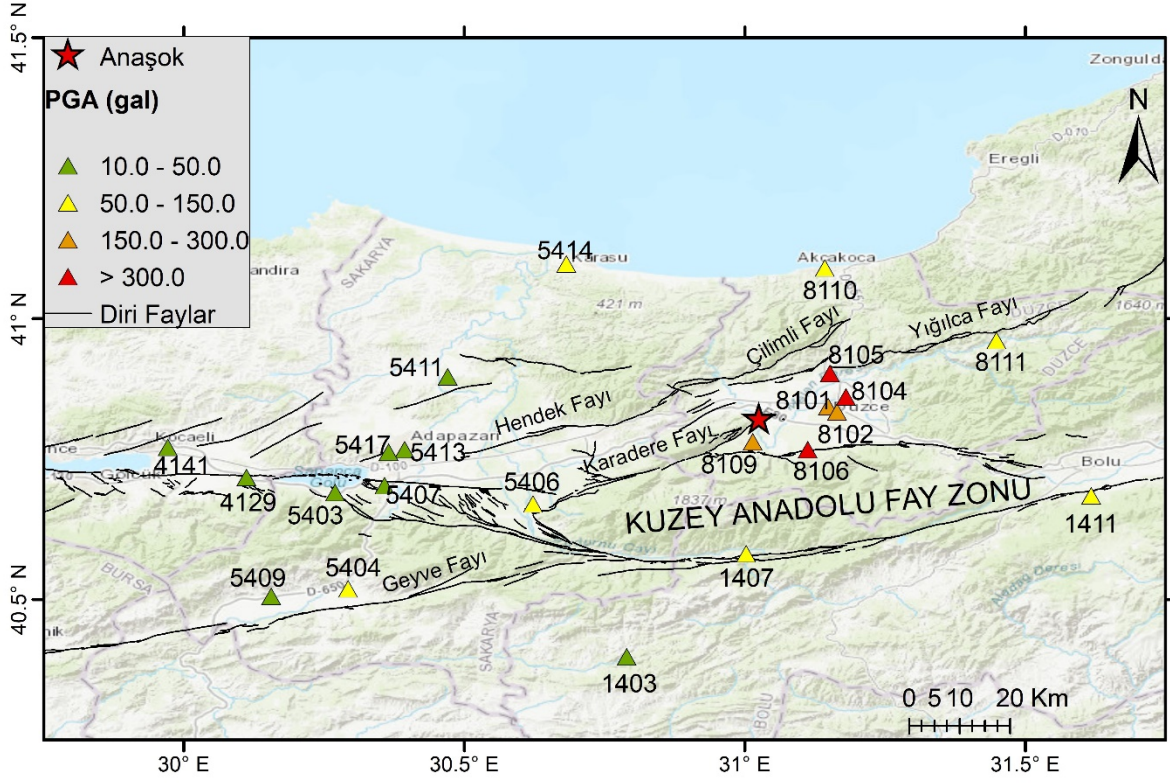
Magnitüd-frekans bağıntısı olarak da bilinen Gutenberg-Richter yasası [23] $\log N = a - bM$ denklemi ile gösterilmektedir. Bu denklemin doğrudan deprem oluşumunun fiziki ile ilgili olduğu belirtilmiştir [24]. Denkleminde, M ; Magnitüdü, N ; kümülatif deprem sayısını, a ve b sabit regresyon katsayılarını göstermektedir. Yapılan çalışmalarda b -değerinin birçok farklı parametreye bağlı olarak değişkenlik gösterdiği tespit edilmiştir. Bunlardan başlıcaları; b -değerinin gerilme seviyesi ile ters orantılı [25-26], fayın heterojenitesi ile doğru orantılı [24], termal sıcaklık ile doğru orantılı [27] olması, artçı şoklarda yüksek b -değeri gözlenirken bunun aksine öncü şoklarda ise düşük b -değeri gözlemlendiği rapor edilmiştir [28]. Sonuç olarak, düşük b -değerinin yüksek gerilme, düşük P-dalga hızı, düşük heterojenite ile ilişkili olduğu söylenebilir. Artçı şok kataloğu kullanılarak Zmap programı [29] ile b -değeri hesaplanmıştır. Artçı şok kataloğu için b -değeri 1,19 ve a -değeri ise 5,44 olarak hesaplanmıştır (Şekil 6). b -değerinin global ortalama olan 1,0 değerinden daha büyük olduğu ve bu değer de düşük gerilim seviyesini işaret ettiği sonucuna varılmıştır [7, 28].



Şekil 6. Gutenberg-Richter ilişkisine göre hesaplanan b -değeri grafiği (Siyah üçgenler deprem sayısını, kare şekiller kümülatif deprem sayısını, mavi ters üçgen M_c değerini ifade etmektedir).

3.3. İvme kayıtlarının değerlendirilmesi

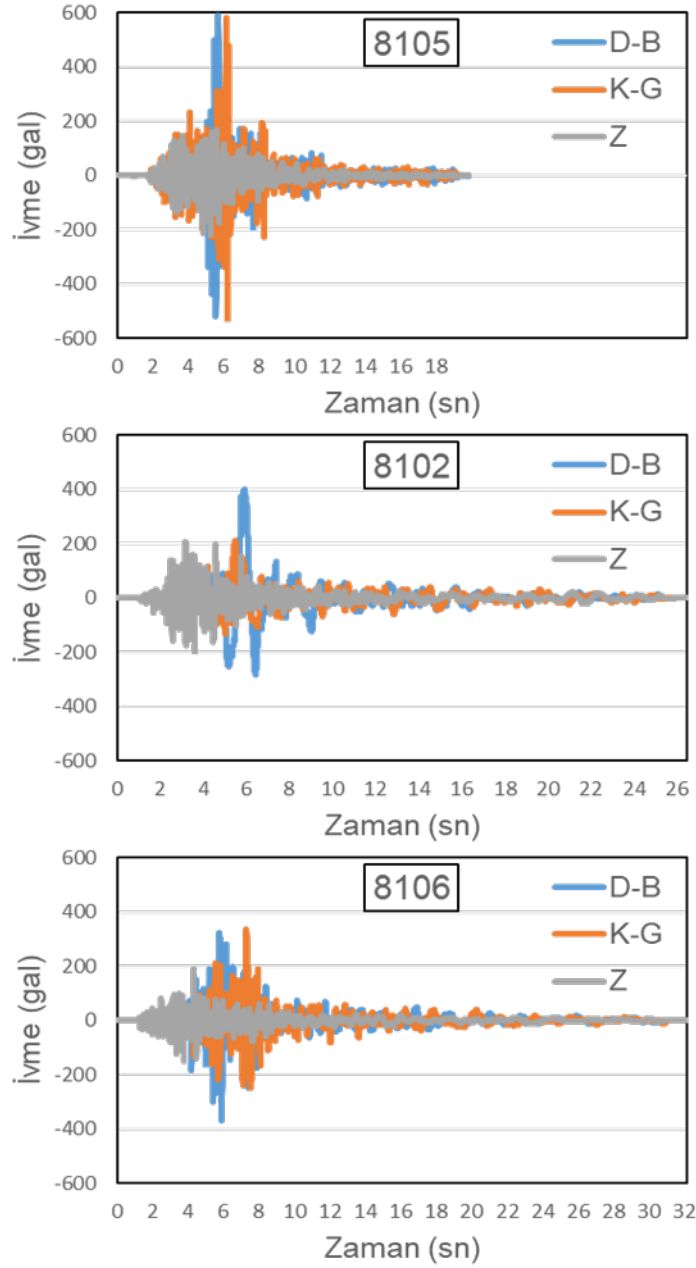
23.11.2022 tarihinde Düzce’de meydana gelen M_w 6,0 büyüklüğündeki deprem çok sayıda kuvvetli yer hareketi istasyonu tarafından kaydedilmiştir. En büyük yer ivmesi 10 gal ve üzeri olarak kaydedilen istasyonların dağılımı Şekil 7’de ve 100 gal ve üzeri olan istasyonlara ait bilgiler ise Tablo 1’de gösterilmiştir. Deprem sonucunda en büyük yer ivmesi deprem episantrına yaklaşık 14 km uzaklıkta bulunan 8105 kodlu istasyonun D-B bileşeninde 592 gal (www.tadas.afad.gov.tr) olarak kaydedilmiştir (Şekil 8). Aynı istasyonun K-G bileşeninde 582 gal ve Z bileşeninde ise 213 gal olarak kaydedilmiştir (Tablo 1). 8102 kodlu istasyonun D-B bileşeninde en büyük yer ivmesi yaklaşık 400 gal olarak kaydedilmiştir. İvme değerleri incelendiğinde Düzce ve civarındaki istasyonlarda 150 gal’den daha büyük değerler gözlenmiştir. Kocaeli ve Sakarya’da bulunan istasyonlarda ise en büyük yer ivmesi değeri 50 gal’den daha küçük olarak elde edilmiştir (Şekil 7). Tablo 1 incelendiğinde, özellikle deprem episantrına 15 km den daha yakın konumda olan istasyonlarda en büyük yer ivmesi değerlerinin 300 gal den daha büyük olduğu görülmektedir. Düşey bileşenlerdeki en büyük ivmesi değerleri yatay bileşenlerdeki en büyük yer ivmesi değerlerinden yaklaşık iki kat daha küçük olarak elde edilmiştir (Tablo 1). Depremin ivme değerinin en yüksek kaydedildiği 3 istasyona ait ivme verileri Şekil 8’de gösterilmiştir. Yatay bileşenlerde yüksek ve düşey bileşende ise daha düşük ivme değerleri her üç istasyondaki kayıta da görülmektedir.



Şekil 7. Depremi kaydeden ivme istasyonlarının dağılımı (İstasyon bilgileri tadas.afad.gov.tr'den alınmıştır. Faylar [20] tarafından hazırlanan verilerden sayısallaştırılmıştır).

Tablo 1. İvme değerinin 100 gal ve daha büyük olarak kaydedildiği istasyonlara ait bilgiler.

Kod	İl	İlçe	PGA K-G	PGA D-B	PGA Z	Repi	Vs30 (m/sn)
8105	Düzce	Düzce Merkez	582	592	212	14	853
8102	Düzce	Düzce Merkez	213	403	208	12	280
8106	Düzce	Düzce Merkez	336	371	191	10	338
8104	Düzce	Düzce Merkez	353	367	227	14	398
8109	Düzce	Gölyaka	265	357	237	5	183
8101	Düzce	Düzce Merkez	246	306	215	11	282
8110	Düzce	Akçakoca	104	151	63	31	407
1411	Bolu	Bolu Merkez	91	141	50	52	229
1407	Bolu	Mudurnu	140	99	67	27	273



Şekil 8. Düzce depreminin 8105, 8102 ve 8106 kodlu istasyonlardaki ivme kayıtları (Deprem kayıtları tadas.afad.gov.tr adresinden elde edilmiştir).

3.3.1. Yer hareketi tahmin denklemleri (YHTD) açısından değerlendirme

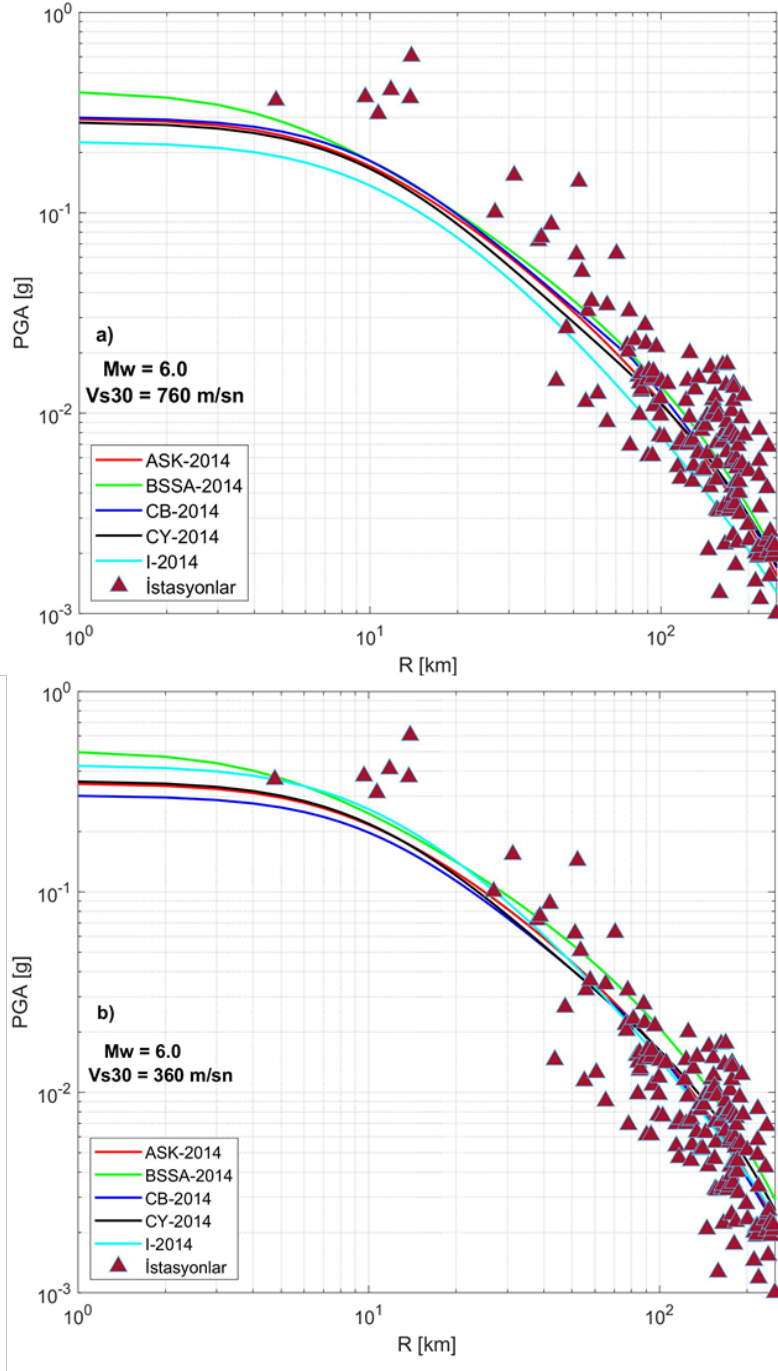
Kuvvetli yer hareketi istasyonlarında kaydedilen en büyük yer ivmesi (PGA) değerleri ile YHTD'den elde edilen değerler karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmayı yapabilmek için 2014 yılında farklı araştırmacılar tarafından geliştirilen yeni nesil YHTD'ler kullanılmıştır. Bu tahmin denklemleri Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi (PEER) tarafından geliştirilen Next Generation Attenuation (NGA) modelleri olarak bilinmektedir (ASK14 [30], BSSA14 [31], CB14 [32], CY14 [33], I14 [34]). Bu çalışma kapsamında, AFAD tarafından işletilen ve 2022 Düzce depremini kaydeden kuvvetli yer hareketi istasyonlarındaki PGA değerleri ile bu YHTD'den elde edilen değerler karşılaştırılmıştır (Şekil 9). Deprem konumu ile istasyonlar arasındaki uzaklığın belirlenmesinde farklı uzaklık tanımlamaları bulunmaktadır. Bunlar episantr uzaklığı (R_{epi}), Joyner-Boore uzaklığı (R_{jb}) ve fay kırığına en yakın uzaklık (R_{rup}) olarak söylenebilir. Düzce depremi için fay modeli çözümü yapılmadığı için

kullanılan YHTD’lerde Repi uzaklığı kullanılmıştır. Depremin derinliği ise 11 km olarak hesaba katılmıştır. Bu tahmin denklemlerinde yerel zeminin PGA üzerindeki etkisini belirlemek için Vs30 değeri kullanılmaktadır. Vs30 değeri 360 m/sn ve 760 m/sn varsayımı yapılarak iki farklı durum için uzaklık-PGA değerleri elde edilmiştir. Yerel zemin özelliklerinin belirlenmesinde en çok kullanılan parametrelerden biri Vs30 değeridir. TBDY’de yerel zemin özelliklerinin belirlenmesinde Vs30 değerini kullanılmaktadır. Vs30 değerine göre yapılan sınıflandırmada hız değeri 360 m/sn’de daha düşük olduğu zaman gevşek birimleri ve 760 m/sn’den daha büyük olduğu zaman daha sağlam zeminleri ifade etmektedir. Bu nedenle Vs30 değeri için 360 m/sn ve 760 m/sn değerleri seçilmiştir. Vs30 değerlerinin seçilmesinde Vs30=760 m/sn varsayımı ile yapılan hesaplamada deprem episantrına 40 km’den daha yakın olan istasyonlarda YHTD’e göre daha yüksek PGA değerleri gözlenmiştir (Şekil 9a). Uzaklık arttıkça istasyonlarda kaydedilen ivme değerleri YHTD ile elde edilen ivme değerlerine yaklaşmaktadır. Bu durumun başlıca nedeni olarak deprem kaynak parametreleri ve YHTD özelliklerinin olduğu söylenebilir. Özellikle YHTD’ler deprem-istasyon arası uzaklıklarının çok yakın olması durumunda başarılı sonuçlar verememektedir. BSSA14 denklemi kullanılarak elde edilen ivme değerlerinin yakın mesafede kaydedilen ivme değerine daha uyumlu olduğu görülmesine rağmen aralarındaki fark nispeten yüksektir. Vs30=360 m/sn varsayımı ile yapılan hesaplamada deprem episantrına en yakın konumda bulunan istasyonda (8109, Repi = 5 km) kaydedilen değere en yakın hesaplama BSSA14 ve I14 denklemleri ile elde edilmiştir (Şekil 9b). Deprem episantrına 20 km’den daha yakın konumda bulunan istasyonlarda gözlenen PGA değerleri YHTD ile elde edilen değerlerden daha yüksektir. Daha uzak mesafelerde ise Vs30=360 m/sn varsayımına göre yapılan hesaplama göre YHTD’e daha uyumlu değerler elde edilmiştir.

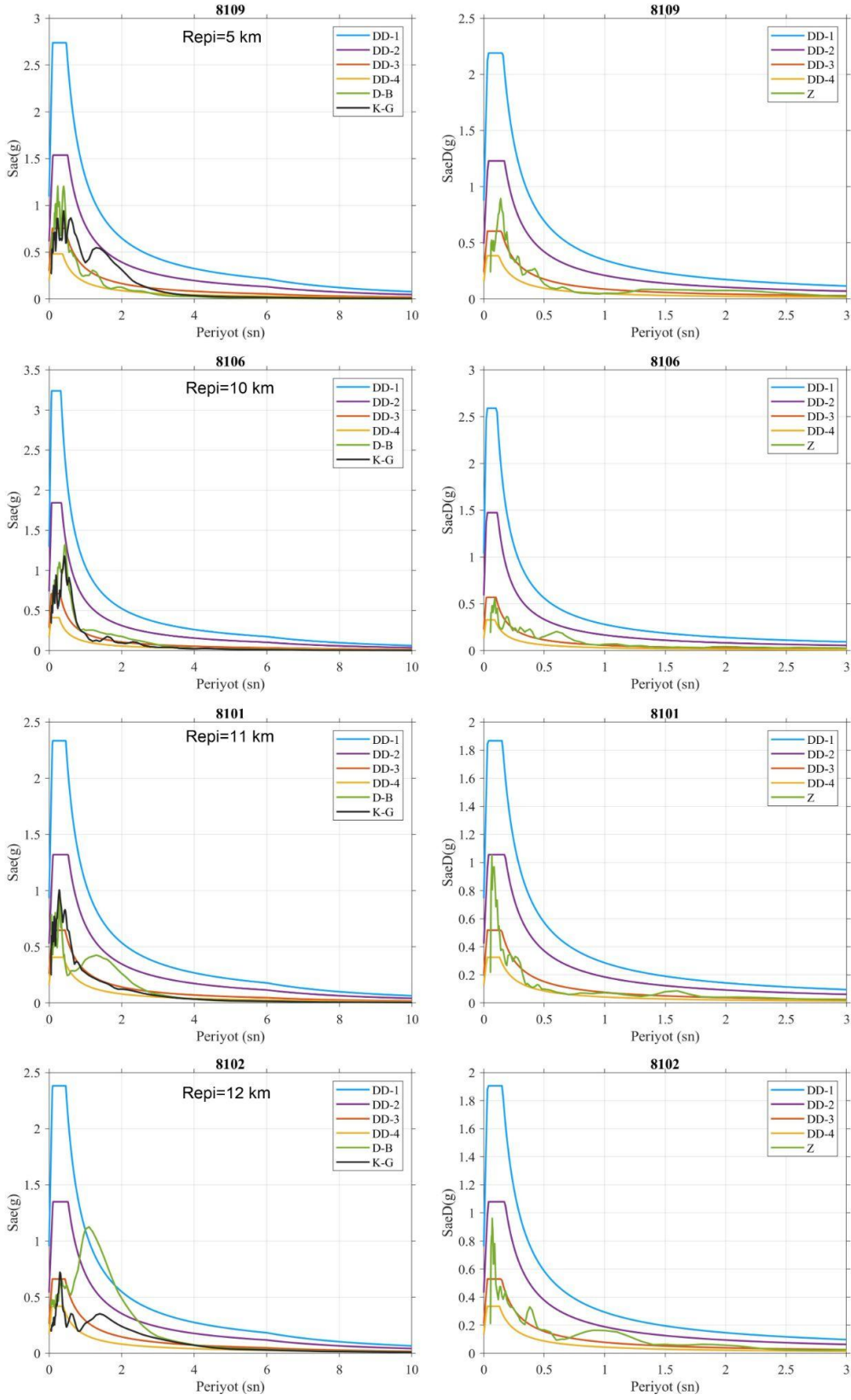
3.3.2. Tepki spektrumları

Tepki spektrumları, yapıların depremler sırasındaki davranışsal etkilerini araştıran bir analiz aracıdır. Bu yöntem, yapıların dinamik özelliklerini nispeten basit bir şekilde araştırmamıza olanak tanır. Buna ek olarak, deprem yer hareketinin mühendislik karakterizasyonu, bir deprem durumunda hasarın sınırlı olmasını ve insan hayatının korunmasını sağlamak için yapıların depreme dayanıklı tasarımı için önemli bir ön koşuldur. Bunun için uluslararası sismik kodlar (Avrupa Eurocode 8, ABD SCE 7-10, İtalyan NTC18, vb.) oluşturulmuştur ve bu kodlar, sismolojik, jeolojik ve jeoteknik parametrelerin bir fonksiyonu olarak elastik tepki spektrumu aracılığıyla yüzeydeki belirli bir noktadaki deprem hareketini tanımlamaktadır. Türkiye açısından Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği [35], 2018 yılında yayınlanmış olup, binalar bu sismik koda tanımlanan tasarım spektrumlarına göre inşa edilmektedir. Bu çalışmada TBDY 2018’e göre farklı deprem seviyeleri için oluşturulan tasarım spektrumları (DD1: 50 yılda %2 aşılma olasılığı ve 2475 yıllık tekrarlanma periyodu, DD2: 50 yılda %10 aşılma olasılığı ve 475 yıllık tekrarlanma periyodu, DD3: 50 yılda %50 aşılma olasılığı ve 72 yıllık tekrarlanma periyodu ve DD4: 50 yılda %68 aşılma olasılığı (30 yılda %50) ve 43 yıllık tekrarlanma periyodu) değerlendirme aşamasında kullanılmıştır.

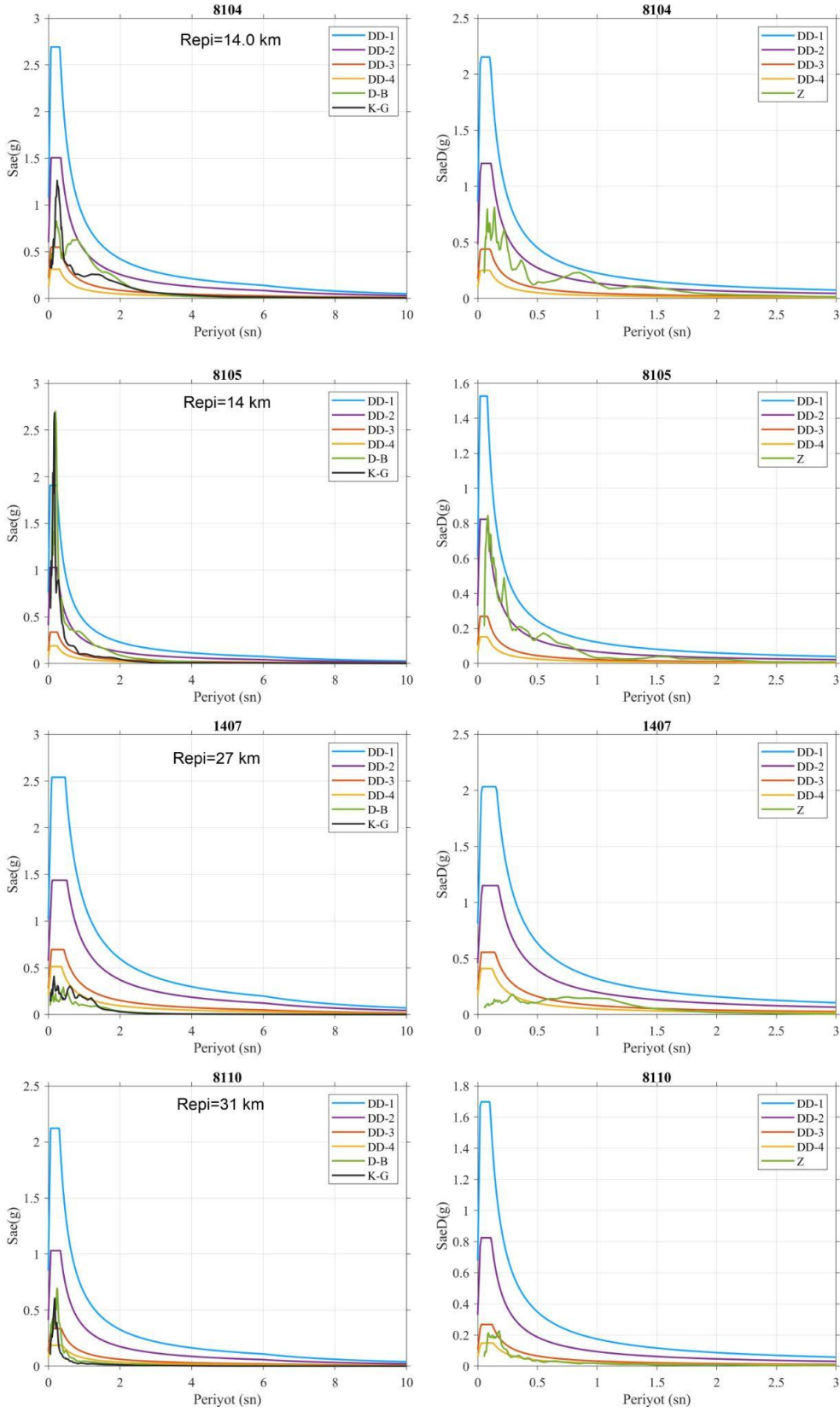
Deprem episantrına yakın konumda bulunan 8 istasyondaki deprem kayıtlarının tepki spektrumları ve TBDY-2018’e göre hesaplanan tasarım spektrumlarının karşılaştırılması yapılmıştır (Şekil 10-11). TBDY-2018’e göre tasarım spektrumu hesaplanırken dört farklı deprem seviyesi de dikkate alınmıştır. Tasarım spektrumu hesaplamasında kullanılan yerel zemin sınıfı ise AFAD tarafından verilen ve Tablo 1’de gösterilen Vs30 değerleri yardımı ile elde edilen zemin sınıfları kullanılmıştır. 8109 ve 8101 kodlu istasyonlarda elde edilen tepki spektrumları DD-3 ve DD-4 tasarım spektrum seviyelerini geçmiştir. 8106 kodlu istasyonda yatay bileşenler (K-G ve D-B) DD-3 ve DD-4’ü geçerken düşey bileşen ise (Z) DD-3 tasarım spektrum seviyesine kadar ulaşmıştır. 8102 kodlu istasyonda özellikle D-B bileşenin yaklaşık 1,5-2 sn periyot aralığında DD-1 spektrum seviyesine kadar ulaştığı diğer bileşenlerin ise DD-3’ü aştığı görülmektedir. 8104 kodlu istasyonda deprem kaydından elde edilen tepki spektrumunun DD-2 tasarım spektrum seviyesine kadar ulaşmaktadır. 8105 kodlu istasyonda ise K-G ve D-B bileşen tepki spektrumlarının DD-1 tasarım spektrum seviyesinin çok üzerinde olduğu Z bileşeninde ise DD-2 seviyesine kadar ulaştığı görülmektedir. 8105 kodlu istasyonun Vs30 değerine göre yerel zemin sınıfının ZB olduğu görülmektedir. Fakat bu tür sağlam zemine göre tepki spektrumunun tasarım spektrumu seviyesini aşmasında deprem kaynak parametrelerinin etkisi olabileceği düşünülmektedir. P-dalgası ilk varışlarına göre yapılan bir çalışmada Düzce depremi anaşokunun doğuya doğru yayıldığı sonucuna varılmıştır [36]. Deprem episantrından uzaklaştıkça tepki spektrum değerlerinin azaldığı ve DD-4 seviyesinin de altında kaldığı görülmektedir (1407 ve 8110 kodlu istasyonlar). Bazı istasyonlarda yüksek PGA ve yüksek tepki spektrumu elde edilmesine rağmen hasarın beklenenden az olduğu görülmektedir. Bunun nedeni olarak 1999 yılında hem İzmit hem de Düzce’de meydana gelen depremler sonucu yapı stoğunun yenilenmesi olarak düşünülmektedir.



Şekil 9. Yer hareketi tahmin denklemleri (YHTD) ile hesaplanan PGA değerleri ile istasyonlarda kaydedilen PGA değerlerinin karşılaştırılması a) $V_{s30}=760 \text{ m/sn}$ senaryosuna göre yapılan karşılaştırma b) $V_{s30}=360 \text{ m/sn}$ senaryosuna göre yapılan karşılaştırma.



Şekil 10. TBDY 2018 ve deprem kayıtlarından elde edilen tepki spektrumlarının karşılaştırılması.



Şekil 11. TBDY 2018 ve deprem kayıtlarından elde edilen tepki spektrumlarının karşılaştırılması.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada 23 Kasım 2022 tarihinde TSİ 04:08'de Düzce Gölyaka merkezli meydana gelen depremin (Mw 6,0) bölgeye etkisi incelenmiş ve bölgesel sismisite açısından detaylı değerlendirilmesi yapılmıştır. Bu bağlamda depremin meydana geldiği bölgede bulunan farklı uzaklıklardaki 10 adet kuvvetli yer hareketi istasyonundaki veriler incelenmiştir. Depremin etkileri bu verilerden elde edilen ivme değerleri ile YHTD ile hesaplanan ivme değerleri karşılaştırılmasıyla ve tepki spektrumları ile Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğindeki tasarım spektrumları karşılaştırılmasıyla değerlendirilmiştir. Sismisite açısından artçı şok dağılımı ve Gutenberg-Richter ilişkileri bölgesel olarak değerlendirilmiştir.

Homojenleştirilmiş artçı şok kataloğu kullanılarak Gutenberg-Richter ilişkisinden *b*-değeri hesaplanmıştır. Elde edilen *b*-değeri yaklaşık 1,12 olup bu değere göre bölgenin gerilim seviyesinin düşük olduğu sonucuna varılmıştır. En büyük yer ivmesi 8105 kodlu istasyonun D-B bileşeninde 592 gal olarak belirlenmiştir. Ayrıca, Vs30 değerinin 360 m/sn ve 760 m/sn olması durumuna göre YHTD ile hesaplanan ivme değerlerinin deprem episantırına yakın konumda bulunan istasyonlarda ölçülen PGA değerlerinden daha az olduğu gözlenmiştir. YHTD ile yapılan bu karşılaştırmalarda deprem ve istasyon arasındaki uzaklıklar için episantır uzaklığı kullanılmıştır. BSSA14 denklemiyle hesaplanan ivme değerlerinin yakın mesafede kaydedilen ivme değerlerine daha uyumlu olduğu, mesafe arttıkça diğer denklemlerde kaydedilen ivme değerlerine yaklaştığı ve uyumlu olduğu gözlenmiştir. Depremin episantır noktasına en yakın olan 8109 istasyonu ivme değerine en yakın BSSA14 ve I14 denklemleriyle hesaplanan ivme değerlerinin yaklaştığı gözlenmiştir. TBDY-2018 tasarım spektrumu ile ivme kayıtlarına ait tepki spektrumlarının karşılaştırılmasında özellikle 8105 kodlu istasyonda tepki spektrumunun DD-1 deprem seviyesine ulaştığı görülmüştür.

Sonuç olarak meydana gelen orta büyüklükteki 2022 Düzce depreminde kaydedilen ivme değerlerinin ve tepki spektrumlarının tahmin edilenlerden ve yönetmelikten daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu durumun nedenleri arasında yerel zemin özellikleri ve deprem kaynak parametreleri bulunmaktadır. Deprem tehlike haritalarının ve yönetmeliklerin hazırlanmasında özellikle yerel zemin özellikleri ve deprem kaynak parametrelerinin dikkate alınması gerekliliği bir kez daha ortaya koyulmuştur.

Teşekkür

Yazarlar editörlere ve hakemlere makaleyi geliştirici yorumlarında dolayı teşekkürlerini sunarlar. Bu çalışmada deprem verileri B.Ü. Kandilli Rasathanesi BDTİM Deprem Sorgulama Sistemi'nden alınmıştır. Tarihsel dönem depremleri, Deprem odak mekanizmaları ve ivmeölçer istasyon bilgileri Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı Deprem Dairesi Başkanlığı (AFAD) ve Türkiye İvme Veritabanı ve Analiz Sistemi (TADAS) üzerinden alınmış ve oluşturulan kataloglardan indirilmiştir. Fay bilgileri Emre vd. 2013' den sayısallaştırılmıştır. Şekil 1 ve 3 ArcMap programı kullanılarak hazırlanmıştır. Yazarlar veri sağlayan tüm kurumlara teşekkür eder. E.B. ve K.H.Ç. fikir sahibi, K.H.Ç. ve E.B. analizleri gerçekleştirdi, E.B. ve K.H.Ç. sonuçları yorumladı, K.H.Ç. ve E.B. makaleyi yazdı.

Kaynaklar

- [1] Erdik M, Demircioglu M, Sesetyan K, Durukal E, Siyahi B. Earthquake hazard in Marmara region, Turkey. Soil Dyn Earthquake Eng 2004; 24(8): 605-631.
- [2] Polat O, Gök E, Yılmaz D. (2008). Earthquake hazard of Aegean Extension Region, Turkey. Turk J Earth Sci 2008; 17: 593-614.
- [3] Kinscher J, Krüger F, Woith H, Lühr BG, Hintersberger E, İrmak TS, Barış S. Seismotectonics of the Armutlu peninsula (Marmara Sea, NW Turkey) from geological field observation and regional moment tensor inversion. Tectonophysics 2013; 608: 980-995.
- [4] Bayrak Y, Bayrak E. Regional variations and correlations of Gutenberg-Richter parameters and fractal dimension for the different seismogenic zones in Western Anatolia. J Asian Earth Sci 2012; 58: 98-107.
- [5] Sayıl N. Evaluation of the seismicity for the Marmara region with statistical approaches. Acta Geod Geophys 2014; 49(3): 265-281.
- [6] Özmen B, Bayrak E, Bayrak Y. An investigation of seismicity for the Central Anatolia region, Turkey. J Seismolog 2014; 18: 345-356.
- [7] Bayrak E, Yılmaz Ş, Softa M, Türker T, Bayrak Y. Earthquake hazard analysis for East Anatolian fault zone, Turkey. Nat Hazard 2015; 76: 1063-1077.
- [8] Çoban KH, Sayıl N. Investigation of the seismicity of East Anatolian fault zone (EAFZ) according to Poisson and Exponential distribution models. Düzce University Journal of Science & Technology 2018; 6(2): 491-500.
- [9] Çoban KH, Sayıl N. Evaluation of earthquake recurrences with different distribution models in western Anatolia. J Seismol 2019; 23: 1405-1422.

- [10] Çoban KH, Sayıl N. Different probabilistic models for earthquake occurrences along the North and East Anatolian fault zones. *Arabian J Geosci* 2020; 13: 971.
- [11] Bayrak E, Çoban KH. Evaluation of 08 August 2019 Bozkurt (Denizli-Turkey, Mw 6.0) earthquake in terms of strong ground-motion parameters and Coulomb stress changes. *Environ Earth Sci* 2023; 82(20): 470.
- [12] Özmen B. Gumbel Uç Değerler Yöntemi ile Ankara İli ve Yakın Çevresinin Deprem Tehlike Analizi. *Resilience* 2023; 7(2): 391-407.
- [13] Özmen B. 2000. Düzce-Bolu Bölgesi'nin Jeolojisi, Diri Fayları ve Hasar Yapan Depremleri s:1-14, 12 Kasım 1999 Düzce Depremi Raporu (Editör: Bülent ÖZMEN ve Günruh BAĞCI). Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Deprem Araştırma Dairesi, Ankara.
- [14] Şengör AMC, Yılmaz Y. Tethyan evolution of Turkey: A plate tectonic approach. *Tectonophysics* 1981; 75: 181-241.
- [15] Şengör AC, Canitez N. The North Anatolian Fault. *Alpine-Mediterranean Geodynamics*, 1982; 7: 205-216.
- [16] Barka AA, Akyüz HS, Sunal G. vd. The surface rupture and slip distribution of the August 17, 1999 İzmit earthquake, M= 7.4, North Anatolian Fault. *Bull Seismol Soc Am America* 2002; 92: 43–60.
- [17] Emre Ö, Awata Y, Duman TY. (eds) Surface Rupture Associated with the 17 August 1999 İzmit Earthquake. General Directorate of Mineral Research and Exploration (MTA) Special Publications 2003; 1.
- [18] Duman TY, Awata Y, Yoshioka T, Emre Ö, Dogan A, Ozalp S. Detailed maps and inventories of the 1999 Izmit surface rupture. General Directorate of Mineral Research and Exploration (MTA) of Turkey, Special Publication Series 2003; 1: 23-28.
- [19] Dikbaş A, Akyüz HS. Paleoseismological investigations on the Karadere segment, North Anatolian fault zone, Turkey. *Turk J Earth Sci* 2011; 20(4): 395-410.
- [20] Okuyan Akcan S, Tekin S, Yeşilyurt A, Zülfiyar AC. Güncel Avrupa Sismik Tehlike ve Risk Modeliyle 23 Kasım 2022 Düzce Depreminin Değerlendirilmesi. *Afet Ve Risk Dergisi*, 2023; 6(4): 1218-1233.
- [21] Kadıroğlu FT, Kartal RF. The new empirical magnitude conversion relations using an improved earthquake catalogue for Turkey and its near vicinity (1900-2012). *Turk J Earth Sci* 2016; 25(4): 300-310.
- [22] Emre Ö, Duman TY, Özalp S, Elmacı H, Olgun Ş, Şaroğlu F. Açıklamalı Türkiye Diri Fay Haritası Ölçek 1:1.250.000, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Özel Yayın Serisi-30, Ankara, Türkiye. ISBN: 978-605-5310-56-1, 2013.
- [23] Gutenberg B, Richter CF. Frequency of earthquakes in California. *Bull Seismol Soc Am* 1944; 34:185–188.
- [24] Mogi K. Magnitude-Frequency Relationship for Elastic Shocks Accompanying Fractures of Various Materials and Some Related Problems in Earthquakes. *Bull Earthq Eng* 1962; 40:831-853.
- [25] Scholz CH. The frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes. *Bull Seismol Soc Am* 1968; 58:399–415.
- [26] Wyss M. Towards a physical understanding of the earthquake frequency distribution. *Geophys J R Astron Soc* 1973; 31:341–359.
- [27] Warren NW, Latham GV. An experimental study of thermally induced microfracturing and its relation to volcanic seismicity. *J Geophys Res* 1970; 75:4455–4464.
- [28] Suyehiro S, Asada T, Ohtake M. Foreshocks and aftershocks accompanying a perceptible earthquake in central Japan. *Pap Met Geophys* 1964; 15: 71-88.
- [29] Wiemer S A software package to analyze seismicity: ZMAP. *Seismol Res Lett* 2001; 72(3): 373-382.
- [30] Abrahamson NA, Silva WJ, Kamai R. Summary of the ASK14 ground motion relation for active crustal regions. *Earthquake Spectra*, 2014; 30(3), 1025-1055.
- [31] Boore DM, Stewart JP, Seyhan E, Atkinson GM. NGA-West2 equations for predicting PGA, PGV, and 5% damped PSA for shallow crustal earthquakes. *Earthquake Spectra* 2014; 30(3), 1057-1085.
- [32] Campbell KW, Bozorgnia Y. NGA-West2 ground motion model for the average horizontal components of PGA, PGV, and 5% damped linear acceleration response spectra. *Earthquake Spectra* 2014; 30(3), 1087-1115.
- [33] Chiou BSI, Youngs RR. Update of the Chiou and Youngs NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra. *Earthquake Spectra*, 2014; 30(3), 1117-1153.
- [34] Idriss IM. Summary of the IM14 GMPE. *Earthquake Spectra*, 2014; 30.
- [35] TBDY. (2018). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.
- [36] Martínez-Garzón P, Becker D, Jara J, Chen X, Kwiatak G, Bohnhoff M. The 2022 MW 6.0 Gölyaka–Düzce earthquake: an example of a medium-sized earthquake in a fault zone early in its seismic cycle. *Solid Earth* 2023; 14(10): 1103-1121.