

Güncel Avrupa Sismik Tehlike ve Risk Modeliyle 23 Kasım 2022 Düzce Depreminin Değerlendirilmesi

Seyhan Okuyan Akcan¹, Senem Tekin², Ali Yeşilyurt³, A. Can Zülfikar⁴

Öz

Sismik aktivitesi yüksek olan Kuzey Anadolu Fayı Zonu (KAFZ) üzerinde yer alan Düzce ili, deprem tehlikesi yüksek bir bölge durumundadır. Bu bölgede yaşanan 17 Ağustos 1999 MW 7.6 Kocaeli depremi sonrasında Bolu-Düzce arasındaki Düzce fayı üzerindeki gerilme enerjisi 12 Kasım 1999 tarihinde açığa çıkarak MW 7.2 Düzce depremini meydana getirmiştir. 23 yıl sonra, bu bölgede KAFZ-Karadere Segmenti'nde, 23 Kasım 2022 günü Mw=5.9 büyüklüğünde ve merkez üssü Düzce-Gölyaka olan bir deprem meydana gelmiştir. 6.81 kilometre derinlikte kaydedilen bu deprem başta İstanbul ve Ankara olmak üzere Bolu, Sakarya, Kocaeli, Kütahya, Bilecik, Bursa ve İzmir'e kadar geniş bir alanda hissedilmiştir. Gölyaka ve Cumayeri ilçelerinde ve faya yakın yerlerdeki bazı köylerde hafif, orta ve yer yer ağır yapısal hasar meydana gelmiştir. Bu çalışmada, Düzce ilinin depremselliği, Güncel Avrupa Sismik Tehlike Modeli (ESHM20) kullanılarak olasılıksal sismik tehlike analizleriyle değerlendirilmiştir. 23 Kasım 2022 Mw 5.9 Gölyaka'da gerçekleşen deprem, AFAD istasyonlarına ait kayıtlar, güncel deprem tehlike modeli ve tasarım spektrumlarıyla birlikte değerlendirilmiştir. Olasılıksal sismik tehlike analizine bağlı sismik risk analizinde, Güncel Avrupa Sismik Risk Modelinde (ESRM20) Düzce ili için tanımlanan eski yönetmelik ve yeni yönetmelik uyumlu az ve orta katlı betonarme yapı sınıfları dikkate alınmıştır. Sismik tehlike analizine bağlı olarak Düzce ili için sismik risk değerlendirilmesi kayıp eğrileri aracılığıyla gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Düzce, Deprem, Sismik Tehlike, Sismik Risk, ESHM20, ESRM20

Evaluation of 23rd November 2022 Düzce Earthquake with Current European Seismic Hazard and Risk Model

Abstract

Düzce province, which is affected by the North Anatolian Fault Zone (NAFZ) with high seismicity, is a region with high earthquake hazard and risk. After the August 17, 1999 MW 7.6 Kocaeli earthquake, the tensile energy on the Düzce fault between Bolu and Düzce was released on November 12, 1999, resulting in the MW 7.2 Düzce earthquake. 23 years later, an earthquake with a magnitude of Mw 5.9 occurred in this region

¹ Doktora Öğrencisi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, BOUN, İstanbul

İlgili yazar e-posta/Corresponding author e-mail: seyhan.okuyan@boun.edu.tr ORCID No: 0000-0001-6824-8182

² Doç.Dr., Madencilik ve Maden Çıkarma Bölümü, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, ADYÜ, Adıyaman
e-posta / e-mail: senemtekin@adiyaman.edu.tr ORCID No: 0000-0001-7734-9700

³ Dr.Öğr.Üyesi, Deprem Mühendisliği Bölümü, Deprem Mühendisliği ve Afet Yönetim Enstitüsü, ITU, İstanbul
e-posta / e-mail: aliyesilyurt15@gmail.com ORCID No: 00000-0002-9442-1687

⁴ Doç.Dr., İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, GTU, Kocaeli
e-posta / e-mail: aczulfikar@gtu.edu.tr ORCID No: 0000-0001-6610-3334

Bu makaleye atıf yapmak için / To cite this article

Akcan, S. O., Tekin, S., Yeşilyurt, A., Zülfikar, A.C., (2023). Güncel Avrupa Sismik Tehlike ve Risk Modeliyle 23 Kasım 2022 Düzce Depreminin Değerlendirilmesi. *Afet ve Risk Dergisi*, 6(4), 1218-1233.

on the KAFZ-Karadere Segment on 23.11.2022 with the epicenter in Düzce-Gölyaka. This earthquake, which was recorded 6.81 kilometers below the ground, was felt in a wide area from Istanbul and Ankara to Bolu, Sakarya, Kocaeli, Kütahya, Bilecik, Bursa, and Izmir. Light, medium and severe structural damage occurred in Gölyaka and Cumayeri districts and some villages close to the fault. In this study, the seismicity of Düzce province was evaluated by probabilistic seismic hazard analysis using the Current European Seismic Hazard Model (ESHM20). November 23, 2022 MW 5.9 Gölyaka earthquake records of AFAD stations are evaluated together with the current seismic hazard model and design spectra. In the seismic risk analysis based on probabilistic seismic hazard analysis, low and medium storey reinforced concrete building classes in accordance with the old regulations and new regulations defined for Düzce province in the Current European Seismic Risk Model (ESRM20) were taken into consideration. Seismic risk assessment for Düzce province based on seismic hazard analysis is performed by means of loss curves.

Keywords: Düzce, Earthquake, Seismic Hazard, Seismic Risk, ESHM20, ESRM20

1. GİRİŞ

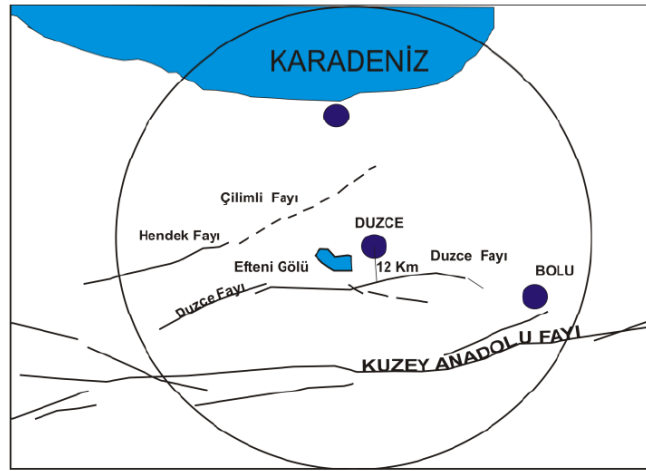
Türkiye, dünyanın önemli aktif kuşaklarından biri olan Alp-Himalaya orojenik kuşağı üzerinde yer almaktadır. Ülkemizde sismik olarak aktif olan başlıca Doğu Anadolu Fay Zonu, Ege Graben sistemi, Doğu Anadolu sıkışma bölgesi, Karadeniz sıkışma bölgesi, Ölü Deniz Fayı ve Kuzey Anadolu Fayı olmak üzere birçok aktif fay hattı yer almaktadır. Kuzeyindeki, Asya-Avrupa levhası ile güneyindeki Anadolu levhacığını birbirinden ayıran Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ), sismik olarak dünyanın en diri fay hatlarından birisi olup, içerisinde birçok fay parçasını (segment) barındıran, 1200km uzunluğunda, sağ yönlü doğrultu atımlı bir fay sistemidir (Özmen, 2000; Kalafat, 2011; Demirtaş, 2019). 1939-1999 yılları arasında, Kuzey Anadolu Fay Zonu üzerinde meydana gelen tarihsel büyük depremlere bakıldığında, genelde doğudan batıya doğru bir sismik göçün olduğu görülmektedir (Barka, 1996; Özalp vd., 2013; Demirtaş, 2019; Kozacı ve Altunel, 2022). Aletsel dönemde ilk kez 1939 yılında 7.9 büyüklüğünde Erzincan depremi ile 350 km lik bir yüzey kırığı oluşmuş ve ardından sırasıyla bu fay zonu üzerinde, 1942'de 7.4'lük Niksar-Erbaa, 1943'de 7.6 büyüklüğünde Tosya, 1944'de 7.3 lük Bolu-Gerede, 1957'de 7.0 büyüklüğünde Abant, 1967'de 7.1'lik Mudurnu depremi, 7.6'lık 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi ve son olarak 7.2'lik 12 Kasım 1999 Düzce depremi meydana gelmiştir (Kalafat,2000). KAFZ'de gerçekleşen depremler sonucunda, Erzincan ile Marmara Denizi arasında toplam 1100 km uzunluğunda yüzey faylanması oluşmuştur (Özalp vd.,2013).

KAFZ, kuzeyde İzmit Körfezi'nden geçerek Marmara Denizi'nin kuzeyini takiben Saroz körfezine uzanır, ortada İznik Gölü'nün güney kısımlarından geçip Gemlik Körfezi'ne oradan da Biga Yarımadası'nı keserek Ege Denizi'ne ulaşmaktadır. Güneyde ise Bursa, Apolyont ve Manyas göllerini takiben Yenice-Gönen'den Edremit körfezine gitmekte olarak üç koldan oluşmaktadır (Kalafat, 2011; Naimi ve Tufan, 2021). Bolu ilinin batısında, üç ana kola ayrılan KAFZ'nin kuzey kolu üzerinde oluşan 17 Ağustos 1999 İzmit ($M_w = 7.6$) ve 12 Kasım 1999 Düzce ($M_w = 7.2$) depremleri Marmara Bölgesi'nde çok geniş bir alanı etkileyerek birçok can ve mal kaybına sebep olurken, ekonomik ve sosyal alanda önemli kesintilere neden olmuştur (Emre vd.,2000; Şengör vd., 2005; Özalp vd.,2013; Demirtaş,2019). 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi sonrasında KAFZ üzerinde kırılmayan segmentlerden birisi olan Bolu-Düzce arasındaki Düzce fayı, üzerindeki gerilme enerjisi 12 Kasım 1999 da açığa çıkarak Düzce depremini meydana getirmiştir (Özden vd., 2000). Düzce ve çevresinde Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) verilerine göre 1900-2022 yılları arasında büyüklüğü 4 ve 5 arasında olan 271 deprem, 5 ve 6 arasında 29 deprem, 6 ve 7 arasında 2 deprem, 7'den büyük 3 deprem kayda geçmiştir. 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminde olduğu gibi 12 Kasım 1999 Düzce depreminde de zeminlerin niteliği hasarın yüksek olmasına sebep olmuştur (Özmen ve Bağcı.,2000).

Düzce, Hendek ve Çilimli fayları, Düzce havzasına en yakın ve deprem potansiyeli taşıyan aktif faylardır (Şekil 1) (MTA, 1999). Düzce Fayı; Akyazı-Kaynaşlı arasında uzanan, Efteni gölünün güneybatısında çatallanan D-B uzantılı, yaklaşık uzunluğu 70 km olup sağ yönlü doğrultu atımlı aktif bir faydır (Şaroğlu vd., 1987). 12 Kasım 1999'da Mw 7.2 Düzce depremi bu fay boyunca gerçekleşmiştir (Özden vd., 2000).

Hendek Fayı; Düzce havzasının batısında Sapanca Gölü-Hendek-Cumayeri arasında uzanan KD-GB uzanımlı olup sağ yönlü doğrultu atımlı fay mekanizmalı, yaklaşık 50 km uzunluğundadır (Emre vd., 1999b). 17 Ağustos 1999 Mw 7.6 Kocaeli depremiyle Hendek fayı üzerinde aşırı gerilme olduğu düşünülmektedir (Özmen ve Bağcı, 2000; Ateş, 2021).

Çilimli fayı; Düzce havzasının kuzeyinde Cumayeri-Konuralp arasında uzanan ve yaklaşık olarak 13 km uzunluğundadır. MTA (1999) raporunda Çilimli fayı aktif fay olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 1. Düzce ve çevresini etkileyen faylar (Ateş,2021)

23 Kasım 2022 günü, Türkiye saati ile 04:08'de merkez üssü Gölyaka'da (Düzce) yerin 6.81 km derinliğinde Mw 5.9 büyüklüğünde bir deprem meydana gelmiştir (AFAD,2022). Düzce, Adapazarı, Kocaeli, Bolu, Ankara, İstanbul ve Eskişehir ve çevredeki birçok il ve ilçede bu deprem hissedilmiştir. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) deprem değerlendirme raporunda bu deprem ve artçılarının Karadere Segmenti'ne uyumlu olarak KD-GB yönünde yoğunlaştığı, KD-GB doğrultulu sağ yanal doğrultu atımlı bir fay mekanizmasında olduğu saptanmıştır (MTA,2022). Ana şoktan, 23.11.2022 16:08'e kadar geçen zamanda, büyüklükleri 0.9 ile 4.3 arasında değişen 146 artçı deprem kaydedilmiştir (AFAD,2022).

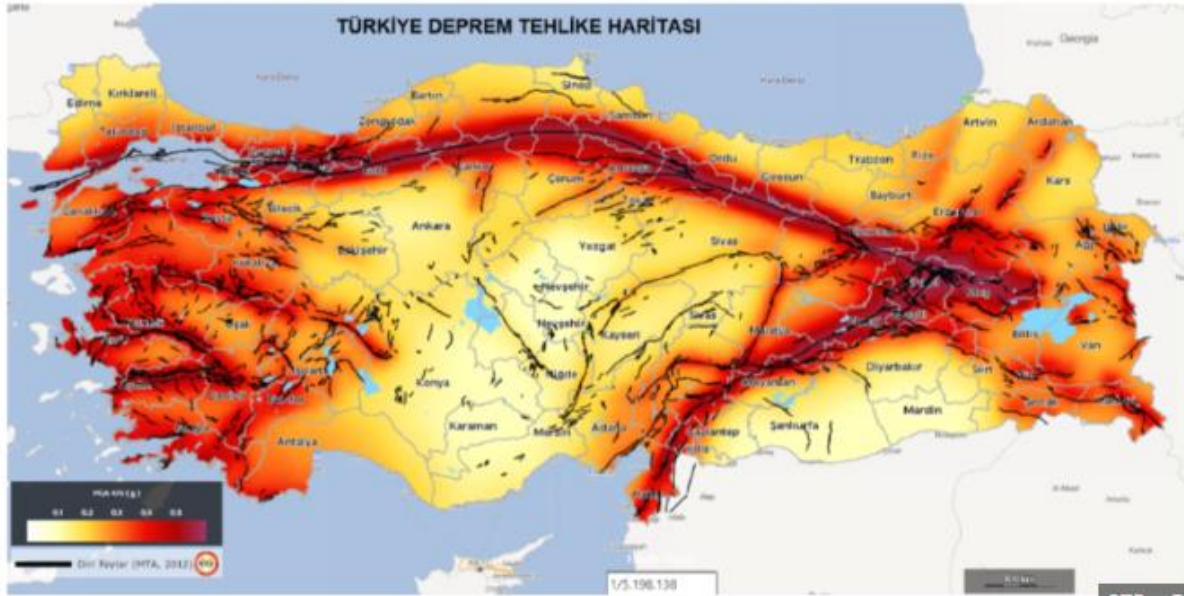
Bu çalışma kapsamında, 2020 Avrupa Güncel Deprem Tehlike Modeli (ESHM20) kullanılarak, 23 Kasım 2022 Gölyaka (Düzce) depremi ve Düzce ilinin depremselliği değerlendirilmiştir. Düzce için olasılıksal deprem tehlike haritaları ve tehlikeye bağlı risk analiz sonuçları sunulmuştur. Sismik tehlike ve risk analizleri Küresel Deprem Modeliyle (GEM) bağlantılı olarak geliştirilen, açık kaynaklı yazılım, OpenQuake (Pagani vd.,2014a), kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Düzce ilinin deprem tehlike düzeyi, PGA (Peak Ground Acceleration-Maksimum Yer İvmesi), SA (0.2sn) (Spektral İvme-0.2sn) ve SA(1.0sn)- (Spektral İvme-1.0sn) parametrelerinin dağılımıyla değerlendirilmiştir. PGA ve spektral ivmelerin (SA0.2sn) ve SA (1.0sn), 50 yılda %10 aşılma olasılığına karşılık gelen tek tip tehlike spektrum ve tehlike haritaları geliştirilmiştir. ESHM20 modeli kullanılarak gerçekleştirilen Olasılıksal Sismik Tehlike Analizinden (OSTA) elde edilen sahaya özel spektrumlar, Türkiye Bina ve Deprem Yönetmeliği-2018 (TBDY2018) kapsamında sunulan hedef spektrumlarla karşılaştırılmıştır. AFAD istasyonlarından alınan kayıtlar, ESHM20 modelinden elde edilen sahaya özel spektrumlarla incelenmiştir. Ayrıca, halen aktif halde bulunan Çilimli fayının olası kırılması durumunda Düzce ili için sismik tehlike haritaları oluşturulmuştur.

23.11.2022 günü, Gölyaka (Düzce) ($M_w=5.9$) depreminde ana şoktan, 25.11.2022 'e kadar geçen zamanda, büyüklükleri 0.9 ile 4.3 arasında değişen 230 artçı deprem kaydedilmiştir (Şekil 4). Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü'nün (KRDAE) hazırladığı Değiştirilmiş Mercalli Şiddet Ölçeği'nde (The Modified Mercalli Intensity Scale) tahmini şiddet dağılım haritası depremin merkezindeki şiddet değerinin $I_0=VI$ (herkes tarafından hissedildi, hafif hasar) olduğunu göstermektedir.



Şekil 4. 23.11.2022 Düzce-Gölyaka Depremi ve Artçı Şoklar (URL 2)

Türkiye Deprem Tehlike Haritası, 18 Mart 2018 tarihli ve 30364 sayılı (mükerrer) Resmî Gazete'de yayımlanmış olup, 1 Ocak 2019 tarihinde yürürlüğe girmiştir. Güncel tehlike haritasında Türkiye için PGA dağılımları gösterilmiştir (Şekil 5). Düzce iline ait 475 yıl tekerrür süreli yer hareketi seviyesi için PGA değerleri 0.3g-0.7g arasında değişmektedir.



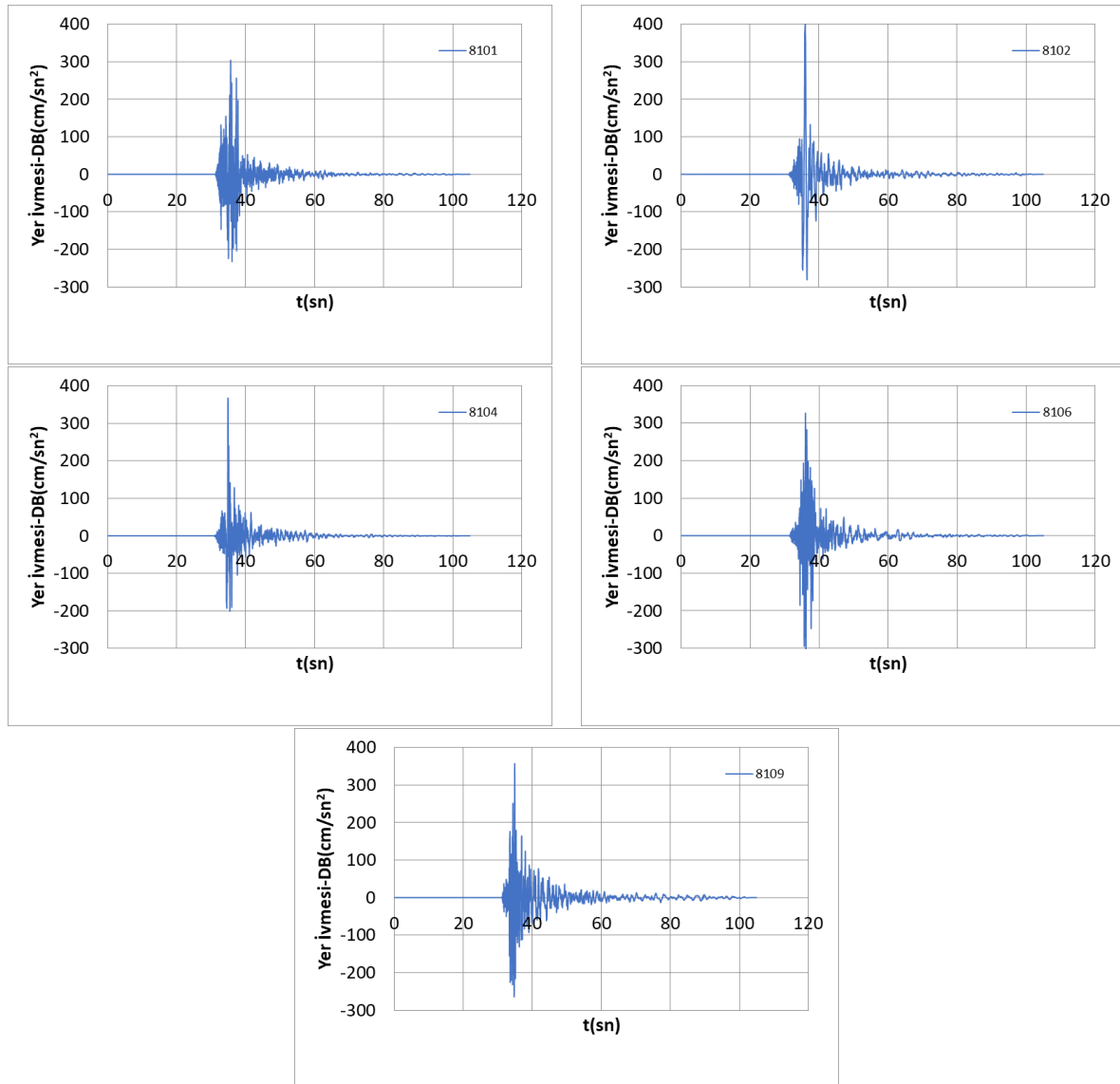
Şekil 5 Türkiye Deprem Tehlike Haritası (URL 2)

Bu çalışmada, deprem merkez üssüne yakın AFAD istasyonlarına ait kayıtlar değerlendirilmiştir. Tablo 1'de bu istasyonlardan alınan kayıtlara ait kırılma düzlemine en yakın mesafe (Rrup), Kuzey-Güney (KG), Doğu-Batı (DB), Aşağı-Yukarı (AY) doğrultularda en büyük yer ivmesi değerleri ve istasyonların bulunduğu konumdaki zemin sınıflarına ait bilgiler gösterilmiştir. Bu

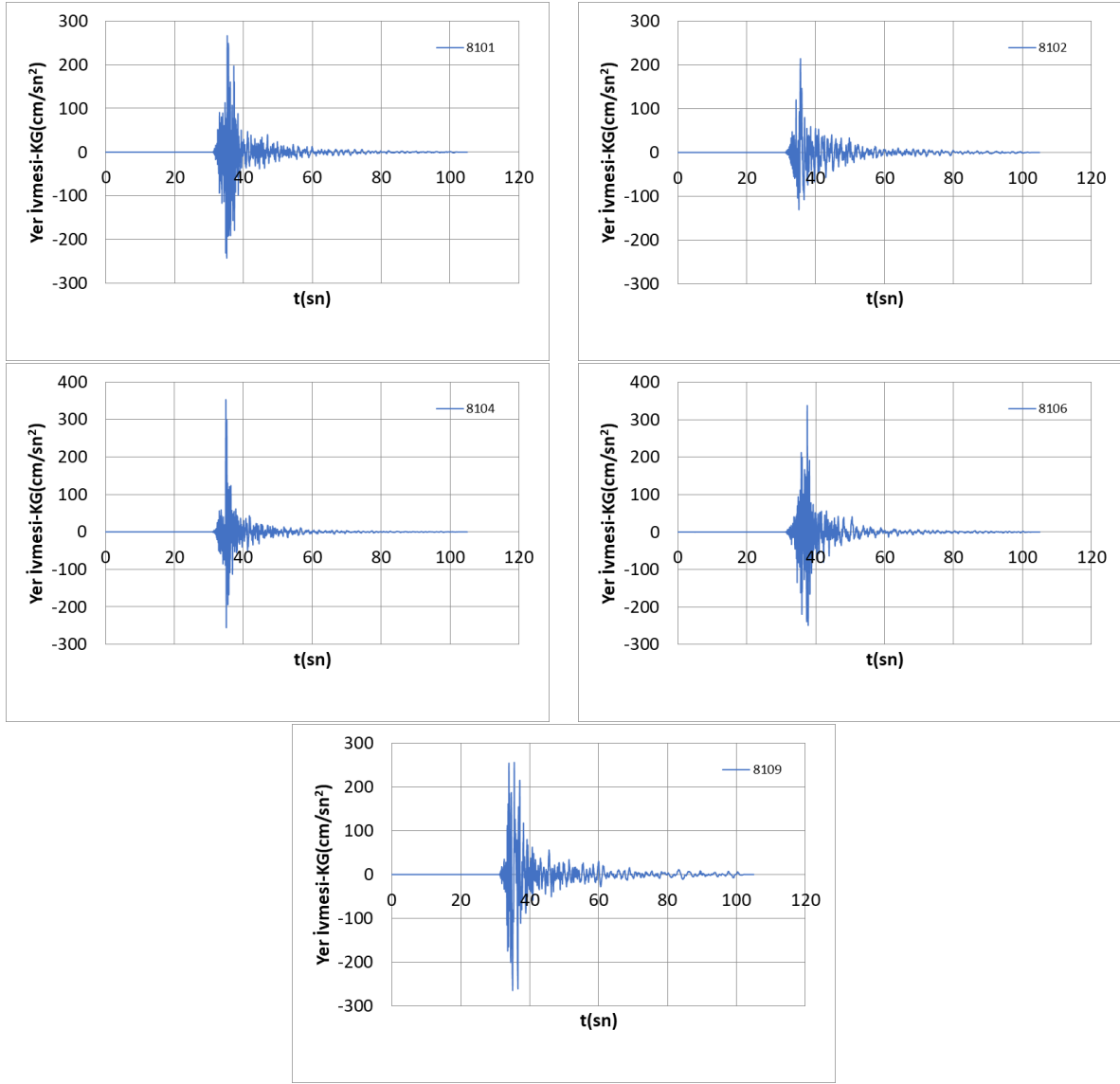
İstasyonlar zemin bakımından çoğunlukla ZD (TBDY2018; $180\text{m/sn} < V_{s30} < 360\text{m/sn}$) zemin sınıfında yer almaktadır. En büyük PGA değerinin $0.4g$ (İstasyon no: 8102) olduğu görülmektedir. Bu istasyonlara ait kayıtların zaman geçmişi DB ve KG bileşenleri için Şekil 6 ve 7'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Deprem Merkez Üssüne Yakın AFAD Düzce İstasyon Bilgileri

İstasyon	Boylam	Enlem	PGA_KG(cm/sn^2)	PGA_DB(cm/sn^2)	PGA_YA(cm/sn^2)	Rrup(km)	Zemin Sınıfı
8101	31.14888	40.84364	291.644	306.754	251.968	12.374	D
8102	31.1644	40.8342	218.043	407.756	244.309	13.189	D
8104	31.18043	40.86109	353.192	367.137	226.694	15.018	D
8106	31.11238	40.76705	343.105	377.304	226.159	11.420	D
8109	31.01439	40.781	265.329	356.871	237.468	5.623	D



Şekil 6. 23.11.20222 Gölyaka (Düzce) Depremine Ait AFAD İstasyon Kayıtları –DB



Şekil 7. 23.11.2022 Gölyaka (Düzce) Depreminin Ait AFAD İstasyon Kayıtları –KG

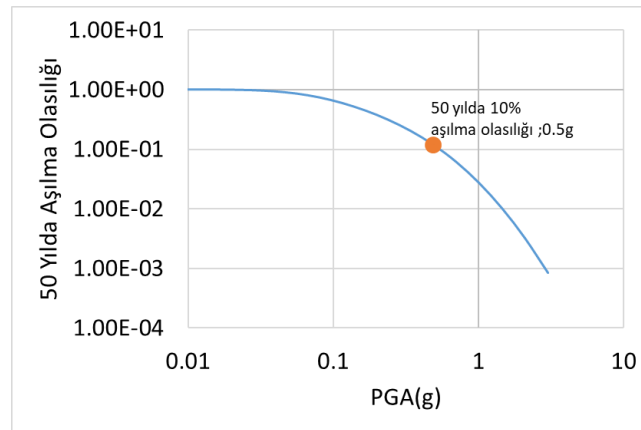
2.2. Olasılıksal ve Senaryo Esaslı Sismik Tehlike Analizi

Bir bölgedeki sismik tehlike, şiddet seviyesi (fiziksel ölçüm), zamansal ve mekânsal ölçümlerle değerlendirilmektedir. Sismik tehlike değerlendirmesi için olasılıksal sismik tehlike analizi (OSTA) ve deterministik sismik tehlike analizi (DSTA) olmak üzere iki yaklaşım yaygın olarak kullanılmaktadır (Wang, 2011; İnce, 2016; Harmandar, 2022). DSTA'da, deprem kaynak konumlarının ve büyüklüklerinin belirsiz değerlerinin aksine, kaynak parametrelerinin kesin değerleri belirlenir, belirli bir sismik senaryo geliştirilir ve yer hareketi tehlikesinin değerlendirilmesi buna göre yapılır (Demircioğlu vd.,2018; Harmandar, 2022). OSTA modeli, ilk olarak Cornell (1968) tarafından belirli bir sahadaki sismik tehlikeyi bir olasılık dağılımı ile nicilemek için geliştirilmiştir. OSTA, yer hareketi parametreleri açısından tüm olası senaryoları oluşturarak en büyük yer ivmesi (PGA), en büyük yer hızı (PGV), spektral ivme (SA) ve şiddet (MMI) dağılımlarını hesaplayarak, hasar ve can kaybına neden olabilecek farklı yer hareketi düzeylerinin belirli bir zaman dilimindeki aşılma olasılığını tahmin etmektedir (Mulargia vd., 2017; Gerstenberger vd., 2020, Harmandar, 2022). OSTA sonucunda, geoteknik ve yapı mühendisliği analizlerinde yaygın olarak kullanılan yer hareketi parametrelerinden olan PGA, SA

(0.2sn) ve SA(1.0sn) dağılımları belirli bir mantık ağacıyla birlikte azalım ilişkileri kullanılarak elde edilmektedir.

SHARE (Woessner vd., 2015), EMME (Danciu vd., 2016), ESHM20 (Danciu vd.,2021) Türkiye'nin de dahil olduğu zamandan bağımsız bölgesel sismik tehlike modelleridir. 2013 Avrupa Sismik Tehlike Modeli (ESHM13), AB-FP7 projesi "Avrupa'da Sismik Tehlikenin Uyumlaştırılması" (SHARE, 2009-2013) sonucunda elde edilmiştir (Woessner vd., 2015). 2014 Orta Doğu Deprem Modeli (EMME14), 2010-2014 yılları arasında geliştirilen güncel sismik tehlike modelidir (URL 1). Avrupa Birliği tarafından kurulan "Avrupa için Sismoloji ve Deprem Mühendisliği Araştırma Altyapısı İttifakı" (SERA) projesi kapsamında, 2020 Avrupa Sismik Tehlike Modeli (ESHM20), güncel veri setleri (deprem katalogları, aktif faylar, yer sarsıntısı kayıtları), bilgileri (tektonik ve jeolojik) ve modelleri (sismojenik kaynaklar, yer sarsıntısı) kullanarak ESHM13 sismik tehlike modelinin güncel hali olarak, olasılıksal ve zaman bağımsız analizlere dayalı olarak geliştirilmiştir (Danciu vd., 2021). Bu tehlike modellerinde, alan kaynaklarından, arka plan bölgeleri ve fay kaynaklarını kullanarak bir mantık ağacı yapısında çoklu modelleme yaklaşımları kullanılmaktadır.

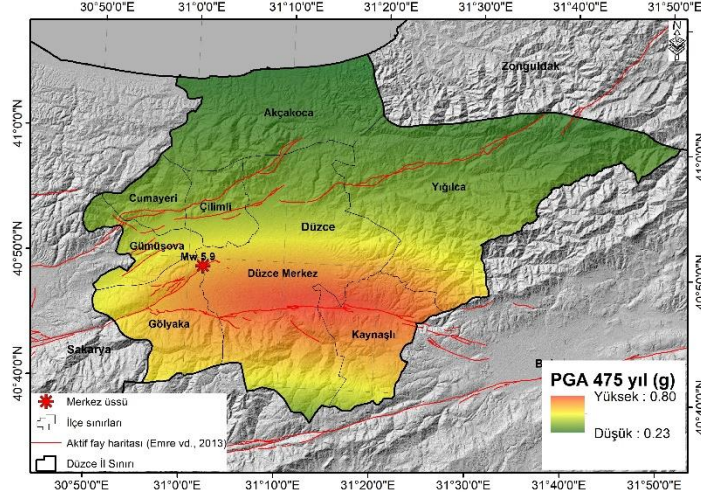
Bu çalışma kapsamında, ESHM20 modeli, OpenQuake programında kullanılarak Düzce ili için olasılıksal sismik tehlike analizi gerçekleştirilmiştir. Düzce bölgesine ait sismik tehlike analizleri Düzce merkez V_{s30} dağılımına bağlı olarak ZD (TBDY2018;180m/sn< V_{s30} <360m/sn) zemin koşulları altında gerçekleştirilmiştir. Düzce-Gölyaka deprem merkez üssüne özel olasılıksal sismik tehlike analizi sonucunda 50 yıl için sismik tehlike eğrisi elde edilmiştir (Şekil 8). Sismik tehlike eğrisi incelendiğinde, TBDY2018'de tasarım depremi olarak bahsedilen, 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan deprem seviyesinde (DD-2) yaklaşık olarak 0.5g PGA seviyesi beklenmektedir (Şekil 8). İstasyon kayıtları incelendiğinde, 8102 numaralı istasyonda okunan en büyük yer ivmesi 0.4g'dir. 23.11.2022-Gölyaka (Düzce) depreminin tasarım deprem seviyesine yakın olduğu gözlemlenmiştir.



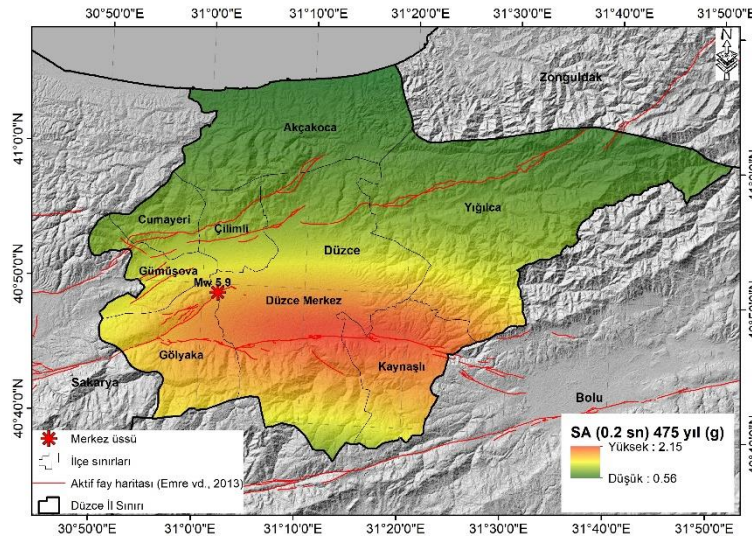
Şekil 8. Düzce İli Sismik Tehlike Eğrisi ve 50 Yılda Aşılma Olasılığı %10 Olan Deprem Seviyesi için Beklenen PGA Değeri

Sismik tehlike analizleri sonucunda, güncel sismik tehlike modeline bağlı olarak, ZD zemin koşullarında, Düzce ili için 50 yılda aşılma olasılığı %10 (DD-2) olan deprem seviyesi için bölgede sismik tehlike dağılımları elde edilmiştir (Şekil 9-10-11). Şekil 9'da DD-2 deprem seviyesine ait bölgede PGA dağılımları gösterilmiştir. Analizler sonucunda, 475 yıl tekerrür süreli deprem seviyesinde (DD-2) Düzce merkez civarında yaklaşık 0.5g seviyesinde PGA beklenmektedir.

Yapılara ait tepki spektrumlarının oluşturulmasında önemli olan SA(0.2sn) ve SA(1.0sn) dağılımları da DD-2 deprem seviyeleri için Şekil 10-11'de sunulmuştur. SA(0.2sn) dağılımları, 475 yıl tekerrür süreli deprem seviyesinde (DD-2) Düzce merkez civarında 2.0g seviyesinde beklenmektedir. SA(1.0sn) dağılımları, 475 yıl tekerrür süreli deprem seviyesinde (DD-2) Düzce merkez civarında 0.8g seviyesinde beklenmektedir.

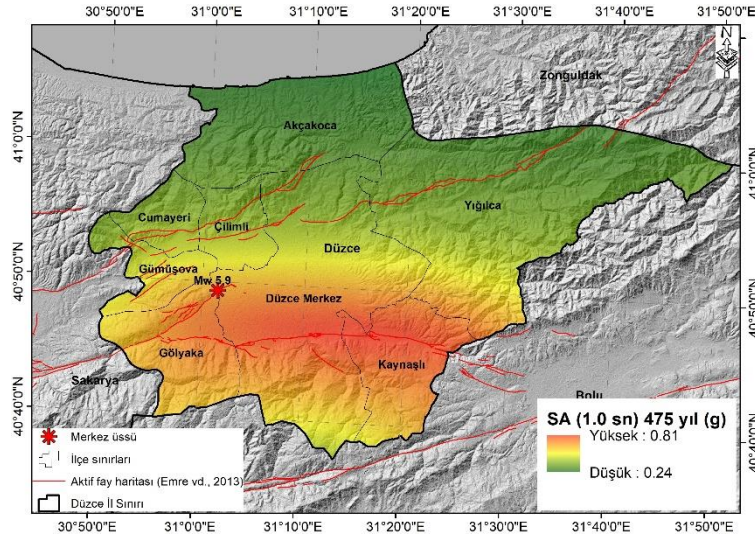


Şekil 9. 475 Yıl Tekerrür Süreli Deprem Seviyesi (DD-2) PGA Dağılımı

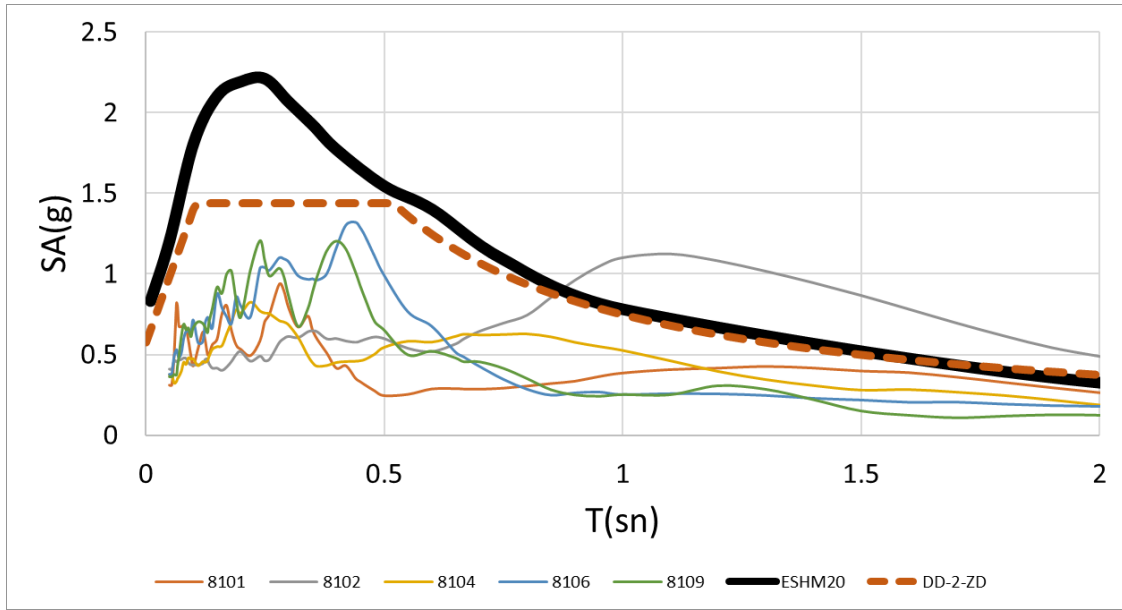


Şekil 10. 475 Yıl Tekerrür Süreli Deprem Seviyesi (DD-2) SA(0.2sn) Dağılımı

Deprem merkezine yakın AFAD istasyonlarına ait kayıtların spektral değerlendirilmesi, TBDY 2018 ele alınarak, merkez üssü Düzce-Gölyaka zemin koşullarına uygun ESHM20 sismik tehlike analiz modelinden elde edilen spektrum ile yapılmıştır. Şekil 12 'de görüldüğü gibi kayıtlara ait spektrumlar, güncel Türkiye deprem yönetmeliğinin önerdiği DD-2 seviyesinde ZD zemin sınıfı için spektrum eğrisine ulaşamamıştır. Ayrıca, Düzce-Gölyaka için ZD zemin koşullarında ESHM20 sismik tehlike modelinden elde edilen spektrum eğrisi de TBDY 2018 plato bölgesinde spektrum eğrisinin üzerinde kalırken, 0.5sn 'den yüksek periyotlarda TBDY2018 spektrumuyla örtüşmektedir. Ayrıca sismik tehlike analizinden elde edilen spektrum, 0.1sn'den düşük periyotlarda da TBDY2018 spektrumuna yaklaşmaktadır.



Şekil 11. 475 Yıl Tekerrür Süreli Deprem Seviyesi (DD-2) SA(1.0sn) Dağılımı

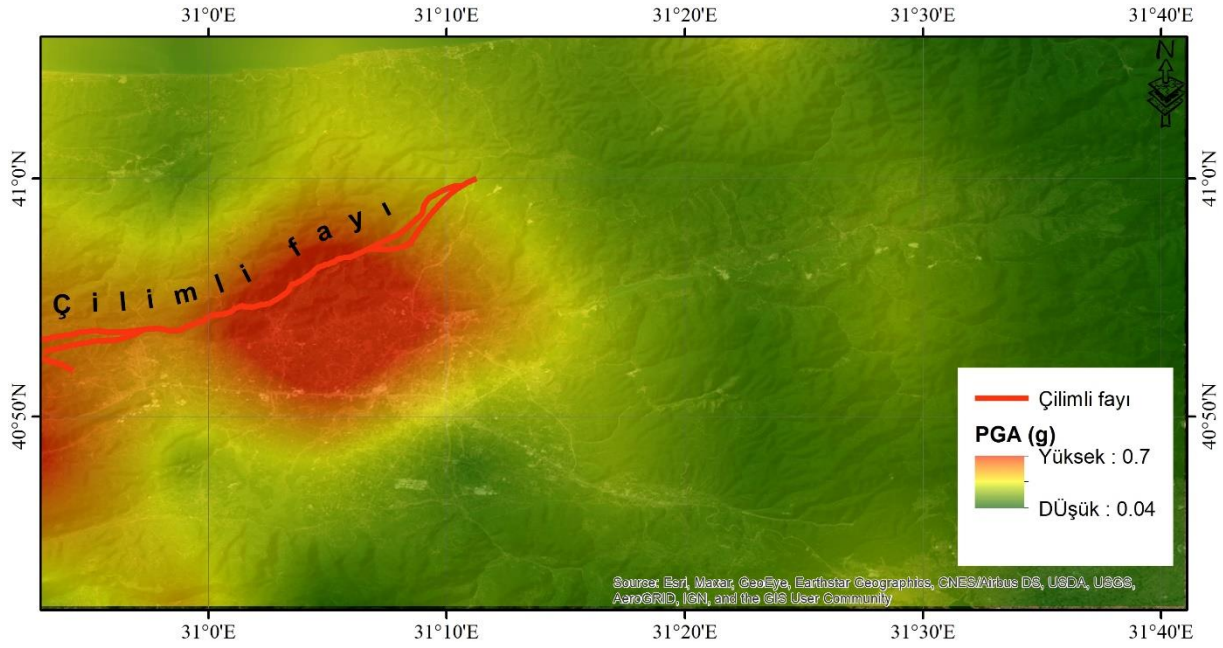


Şekil 12. İstasyon Kayıtlarına Ait Spektrumların TBDY2018 ve ESHM20 Sismik Tehlike Modelinden Elde Edilen Düzce-Gölyaka'ya Ait Spektrumlarla Karşılaştırılması

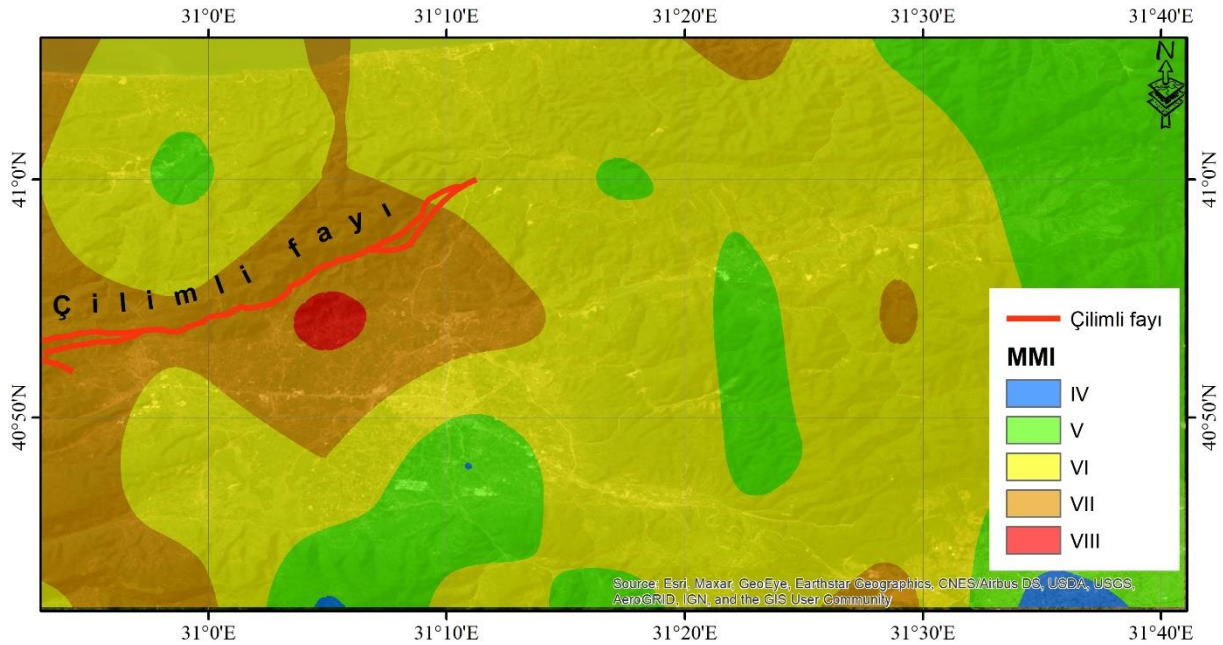
Düzce bölgesinde halen aktif fay olarak gözlemlenen Çilimli fayının üreteceği olası depremin moment büyüklüğü Wells and Coppersmith (1994) eşitliği ile $M_w = 6.5$ tahmin edilebilmektedir.

$$M_w = 4.86 + 1.32 * \text{Log}L \quad (3)$$

Chiou ve Youngs (CY2014) yer hareketi tahmin denklemleri için Çilimli fayına ait senaryo esaslı sismik tehlike analizi OpenQuake ile gerçekleştirilmiştir. Çilimli fayının Düzce ilindeki etkisi PGA ve MMI dağılım haritalarıyla sırasıyla Şekil 13 ve Şekil 14'te gösterilmiştir. MMI dağılımı Düzce'de 9 şiddet seviyesi görülebileceğini göstermektedir.



Şekil 13. Çilimli Fayına Ait Olası Deprem Senaryosu Sonucunda Ait Düzce İlinde PGA Dağılımı



Şekil 14. Çilimli Fayına Ait Olası Deprem Senaryosu Sonucunda Düzce İlinde MMI Dağılımı

2.3. Olasılıksal Sismik Risk Analizi

Sismik tehlike ve risk analizleri, depremlerin sebep olabileceği olası yıkıcı etkileri ve ekonomik kayıpları önlemede önem arz etmektedir. Avrupa Birliği'nin Horizon 2020 araştırma ve yenilik programı tarafından SERA, RISE, EPOS-IP, EPOS-SP projeleri çerçevesinde desteklenen ve Küresel Deprem Modeli (GEM) ile iş birliğiyle yeni, açık bir sismik risk modeli olan Avrupa Sismik Risk Modeli (ESRM20) geliştirilmiştir (Crowley vd.,2021). ESRM20 modelinde Türkiye geneli için yapı sınıflandırılması yapılmış ve yapı stoğu belirtilmiştir. Yapıların yönetmeliklere göre

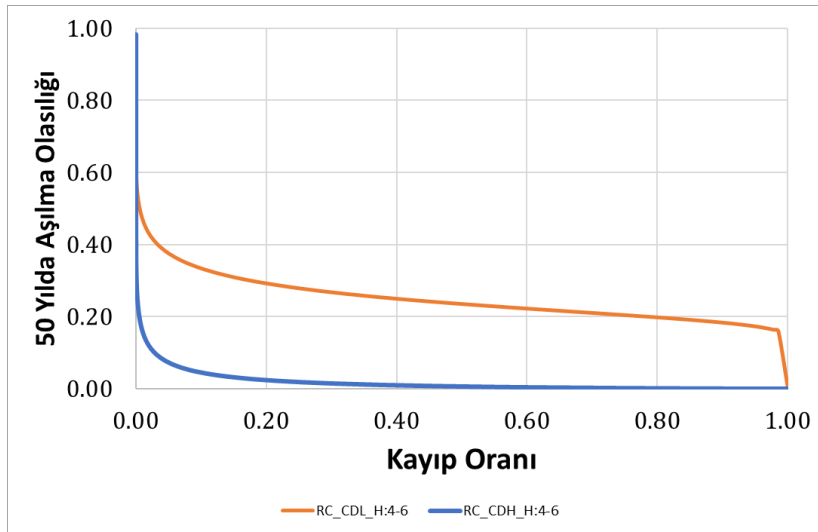
ayrıştırılmasında Türkiye için 1995-1997 arası eski yönetmelik (CDL), 1997 sonrası ise yeni yönetmelik (CDH) olarak dikkate alınmaktadır.

Bu çalışmada, ESHM20 modelinden elde edilen sismik tehlike sonuçları ESRM20 modeliyle birlikte kullanılarak Düzce ili için sismik risk analizi gerçekleştirilmiştir. Sismik risk analizinin yapılması ilgili bölgede bina envanterlerinin tüm fiziksel, coğrafik özellikleriyle tanımlanmasını gerektirmektedir. Bu çalışmada yapı sınıfı esaslı sismik risk analizi gerçekleştirilmiş olup 3 temel yapı sınıfı dikkate alınmıştır. ESRM20 modelinde Düzce ili için tanımlanan eski yönetmelik uyumlu (CDL) betonarme (RC), orta katlı (H:4-6); RC_CD_L_H:4-6 ve yeni yönetmelik uyumlu (CDH) betonarme (RC), az katlı (H:1-3) ve orta katlı (H:4-6) olarak tanımlanan; RC_CD_H_H:1-3, RC_CD_H_H:4-6, yapı sınıfları dikkate alınmıştır. Düzce ilinde bulunan bu yapı sınıflarına ait bina sayısı Tablo 2'de belirtilmiştir.

Tablo 2. Dikkate Alınan Yapı Sınıflarına Ait Bina Sayıları

Yapı Envanteri	Sayısı
RC-CDH-H:1-3	1943
RC-CDH-H:4-6	1554
RC-CDL-H:4-6	3783

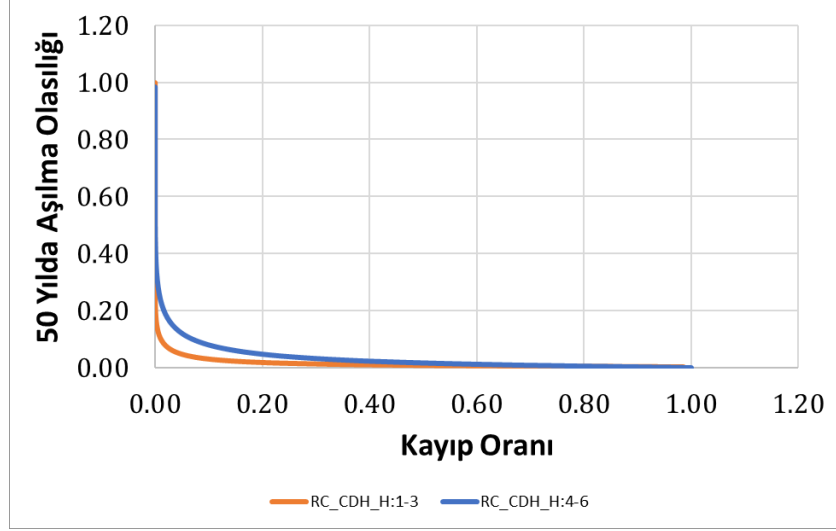
Düzce ilinde ele alınan üç farklı yapı sınıfı için olası ekonomik kayıp eğrileri, kırılma eğrileri aracılığıyla hesaplanmıştır (Şekil 15-16). Sismik risk analizi sonucunda elde edilen ekonomik kayıp değerleri, yapıların belirlenen şiddet değerinde maruz kalacağı yenilenme maliyetini temsil etmektedir. Şekil 15'de risk analizi sonucunda, RC_CD_H_H:4-6 ve RC_CD_L_H:4-6 yapı sınıflarına ait elde edilen olası kayıp eğrileri verilmiştir.



Şekil 15. RC_CD_H_H:4-6 ve RC_CD_L_H:4-6 Yapı Sınıflarına Ait Elde Edilen Kayıp Eğrisi

Şekil 15'de açıkça görüldüğü üzere 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan deprem tehlikesine göre ekonomik kayıp oranı değerinin, RC_CD_L_H:4-6 yapı sınıfında %90'dan daha yüksek olduğu görülmektedir. Aynı deprem tehlike düzeyi için RC_CD_H_H:4-6 yapı sınıfı için bu değer yaklaşık %10 seviyesinde kaldığı gözlemlenmiştir.

Şekil 15'te sunulan kayıp eğrileri için elde edilen bu kayıp oranı değerleri dikkate alındığında RC_CDH_H:4-6 yapı sınıfında DD-2 seviyesindeki bir depremde hafif düzeyde (kullanılabilir düzey) hasar beklenirken RC_CDL_H:4-6 yapı sınıfı için ise göçme öncesi hasar durumu öngörülmektedir.



Şekil 16 RC_CDH_H:1-3 ve RC_CDH_H:4-6 Yapı Sınıflarına Ait Elde Edilen Kayıp Eğrisi

Benzer şekilde, Şekil 16'da RC_CDH_H:1-3 ve RC_CDH_H:4-6 yapı sınıflarına ait elde edilen kayıp eğrileri sunulmuştur. RC_CDH_H:1-3 yapı sınıfı için 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan deprem tehlikesine göre ekonomik kayıp oranının %1 mertebelerinde olduğu, RC_CDH_H:4-6 yapı sınıfı için ise bu değer %10 mertebelerinde olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar dikkate alındığında, bu deprem sonucunda bölgede ele alınan bu iki yapı sınıfı için ekonomik kayıp oranının 1%-10% arasında değişim göstereceği söylenebilmektedir.

3. SONUÇ VE ÖNERİLER

Aktif bir deprem kuşağı içinde yer alan Düzce ili, tarihsel ve aletsel dönemlerde çok sayıda deprem yaşamıştır. Bu çalışmada, 23 Kasım 2022'de Düzce-Gölyaka merkezli gerçekleşen deprem, bölgenin depremselliği dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, Düzce ili için güncel Avrupa Sismik Tehlike Modeli olan ESHM20 kullanılarak bölgesel sismik tehlike analizleri zemin koşulları da gözönüne alınarak gerçekleştirilmiştir. Sismik tehlike analizinden elde edilen tehlike eğrisi incelendiğinde, deprem merkez üssü-Gölyaka için DD-2 seviyesinde beklenen depreme ait PGA değeri 0.5g olmaktadır. AFAD istasyonlarından alınan kayıtlarda maksimum PGA değeri, 8102 nolu istasyonundan 0.4g olarak okunmaktadır. Gerçekleşen depremin yaklaşık DD-2 seviyesinde olan tasarım depremine yakın olduğu söylenebilmektedir. Merkez üssüne yakın istasyonlardan okunan kayıtlara ait spektrumlar TBDY2018 ve ESHM20 analizleriyle birlikte karşılaştırılmıştır. Yönetmeliğin önerdiği hedef spektrum, 0.1sn-0.5sn periyot aralığında kayıtlara ait spektrumların üst seviyesinde kalmaktadır. ESHM20 analizinden elde edilen spektrumun da 0.5sn'den yüksek periyotlarda TBDY2018 spektrumunun üzerinde kaldığı gözlemlenmiştir. Sismik tehlike analizinden elde edilen PGA dağılım haritasına bakıldığında tasarım depremi seviyesinde (DD-2) Düzce-Merkez bölgesinde beklenen PGA değeri 0.5g-0.7g aralığındadır. Düzce ilinde halen aktif olan Çilimli fayında olası bir kırılma sonucunda, Mw 6.5 büyüklüğündeki bir depremin gerçekleşmesi sonucunda, MMI şiddet 9 değerine ulaşmaktadır. Bununla beraber, beklenen PGA seviyesi de 0.5g-0.7g arasında olmaktadır.

ESRM20-Avrupa Sismik Risk Modelinde Düzce ilinde bulunan az ve orta katlı yönetmelik uyumlu betonarme yapı sınıfları için sunulan kırılmalı eğrileri kullanılarak kayıp eğrileri elde edilmiştir. H:4-6 yükseklik için 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan deprem tehlike düzeyi dikkate alındığında, RC_CDH yapı sınıfı için ekonomik kayıp oranının %90 civarında olduğu tespit edilmiştir. RC_CDH yapı sınıfı için ise bu değer %10 mertebelerinde olduğu gözlemlenmiştir. RC_CDH_H:1-3 ve RC_CDH_H:4-6 yapı sınıflarına ait kayıp eğrileri incelendiğinde, 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan deprem tehlike düzeyi için ekonomik kayıp oranının sırasıyla %1 ve %10 mertebelerinde olduğu tespit edilmiştir. Bu bilgiler ışığında, 1999 Mw 7.2 Düzce depremi sonrası yüksek hasar görülebilirlik potansiyeline sahip mevcut yapı stokunun yenilenmesi veya güçlendirilmesinin 23 Kasım 2022 Mw=5.9 Gölyaka (Düzce) depremi sonucu sınırlı hasarın oluşmasında etkin olduğu düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Ateş, A. (2021). Antik Konuralp Kentinde Tarihsel Dönem Depremlerinin Antik Yapılara Etkisinin ve İzlerinin Araştırılması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (25), 582-593.
- Barka, A. (1996). Slip distribution along the North Anatolian fault associated with the large earthquakes of the period 1939 to 1967. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86(5), 1238-1254.
- Chiou, B. S. J., & Youngs, R. R. (2014). Update of the Chiou and Youngs NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1117-1153.
- Cornell, C.A., 1968. Engineering seismic risk analysis. *Bulletin Journal of Seismological Society of America*, 58:1583-1606.
- Crowley, H., Dabbeek, J., Despotaki, V., Rodrigues, D., Martins, L., Silva, Romão, V., Pereira, X., N., Weatherill, G., Danciu, L. (2021) *European Seismic Risk Model (ESRM20)*. EFEHR Technical Report 002 V1.0.0, <https://doi.org/10.7414/EUC-EFEHR-TR002-ESRM20>
- Danciu L, Sesetyan K, Demircioğlu MB, Elias A, Gülen M, Zare M, Rovida A, Basili R, Stucchi M, Tsereteli N, Khan A, Kharakhanian A, Yalçın H, Erdik M, Giardini D (2016) The 2014 earthquake model of the Middle East: seismogenic sources. *Bull Earthq Eng*. doi:10.1007/s10518-016-9989-1
- Danciu L., Nandan S., Reyes C., Basili R., Weatherill G., Beauval C., Rovida A., Vilanova S., Sesetyan K., Bard P-Y., Cotton F., Wiemer S., Giardini D. (2021) - The 2020 update of the European Seismic Hazard Model: Model Overview. EFEHR Technical Report 001, v1.0.0, <https://doi.org/10.12686/a15>
- Demircioğlu, M. B., Şeşetyan, K., Duman, T. Y., Can, T., Tekin, S., & Ergintav, S. (2018). A probabilistic seismic hazard assessment for the Turkish territory: part II—fault source and background seismicity model. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16, 3399-3438.
- Demirtaş, R. T. (2019). Türkiye Diri Fayları ve Deprem Etkinlikleri Paleosismolojik Çalışmalar ve Gelecek Deprem Potansiyelleri. *Ankara. Search in*.
- Douglas, J. (2003). Earthquake ground motion estimation using strong-motion records: a review of equations for the estimation of peak ground acceleration and response spectral ordinates. *Earth-Science Reviews*, 61(1-2), 43-104.
- Emre, Ö., Taymaz, T., Duman, T. Y., & Dogan, A. (2000). 1999 Gölcük ve Düzce'depremlerinin yüzey kırıkları ve sismolojik özellikleri. *Bilim Teknik*, 386, 38-42.

Emre, Ö., Duman, T.Y., Doğan, A., Ateş, Ş., Keçer, M., Erkal, T., Özalp, S., Yıldırım, N., Güner, N., 1999 b, 12 Kasım 1999 Düzce depremi saha gözlemleri ve ön değerlendirme raporu. MTA Genel Müdürlüğü, 18 s.

Gerstenberger, M. C., Marzocchi, W., Allen, T., Pagani, M., Adams, J., Danciu, L., ... & Petersen, M. D. (2020). Probabilistic seismic hazard analysis at regional and national scales: State of the art and future challenges. *Reviews of Geophysics*, 58(2), e2019RG000653.

Harmandar, E. (2022). Spectral-based Probabilistic Seismic Hazard Analysis for Fethiye, Muğla. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 96(1), 376-385.

İçişleri Bakanlığı, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. Türkiye bina deprem yönetmeliği, TBDY-2018, Ankara, 2018.

İnce, Y. (2016). *Kahramanmaraş ve çevresinin olasılıksal sismik tehlike analizi* (Doctoral dissertation, Sakarya Üniversitesi (Turkey)).

Kalafat, D. (2011). Marmara Bölgesi'nin Depremselliği ve Deprem Ağının Önemi, 1. *Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*, 11, 14.

Kalafat, D., Yılmaz, M. (2000), 12 Kasım 1999 Düzce Depremi, Ön Jeolojik Saha Gözlemleri, http://www.koeri.boun.edu.tr/seismo/12_kasim_1999_duzce_depremi.html.

Kozacı, Ö., & Altunel, E. (2022). Characteristics of the North Anatolian Fault at the eastern end of Marmara seismic gap based on multidisciplinary field evidence. *Geophysical Journal International*, 229(3), 1785-1803.

M.T.A, Genel Müdürlüğü ve Ankara Üniversitesi (A.U). (1999). "17 ağustos 1999 depremi sonrası düzce (bolu) ilçesi alternatif yerleşim alanlarının jeolojik incelenmesi", TÜBİTAK Yer Deniz Atmosfer Bilimleri ve Çevre Araştırma Grubu Raporu, Ankara.

MTA (Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü), https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgimerkezi/deprem/pdf/23.11.2022_Duzce_Golyaka.pdf
01.12.2022

Mulargia, F., Stark, P. B., & Geller, R. J. (2017). Why is probabilistic seismic hazard analysis (PSHA) still used?. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 264, 63-75.

Naimi, S., & Tufan, T. (2021). Olası İstanbul depremi ile yapılan kentsel dönüşüm çalışmaları ve alınan önlemlerin irdelenmesi. *AURUM Journal of Engineering Systems and Architecture*, 5(1), 89-108.

Özalp, S., Ömer, E. M. R. E., & Doğan, A. (2013). Kuzey Anadolu Fayı Güney Kolu'nun Segment Yapısı Ve Gemlik Fayının Paleosismik Davranışı, Kuzey Anadolu. *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, 147(147), 1-17.

Özden, S., Tatar, O., Mesci, B. L., Koçbulut, F., Tutkun, S. Z., Doğan, B., & Tüvar, O. (2000). 12 Kasım 1999 Düzce depremi ve bölgesel tektonik anlamı. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 43(2), 61-69.

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.

Özmen, B., Bağcı, G. (2000). "12 Kasım 1999 Düzce depremi raporu", T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğü Deprem Araştırma Dairesi, Türkiye, 2000.

Pagani M, Monelli D, Weatherill G, Danciu L, Crowley H, Silva V, Henshaw P, Butler L, Nastasi M, Panzeri L, Simionato M, Vigano D (2014a) OpenQuake engine: an open hazard (and Risk) software for the global earthquake model. *Seismol Res Lett* 85(3):692-702.

Şaroğlu, F., Emre, Ö., & Boray, A. (1987). Türkiye'nin diri fayları ve depremsellikleri. *MTA. Rap*, 394.

Şengör, A. M. C., Tüysüz, O., Imren, C., Sakıncı, M., Eyidoğan, H., Görür, N., ... & Rangin, C. (2005). The North Anatolian fault: A new look. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 33, 37-112.

T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı
<https://deprem.afad.gov.tr/assets/pdf/23kasim2022GolyakaDuzceMW59.pdf>

Ulusay, R., Tuncay, E., Sonmez, H., & Gokceoglu, C. (2004). An attenuation relationship based on Turkish strong motion data and iso-acceleration map of Turkey. *Engineering Geology*, 74(3-4), 265-291.

URL 1, <http://hazard.efehr.org/> (Son Erişim: 06.12.2022)

URL 2, <https://deprem.afad.gov.tr/> (Son Erişim: 06.12.2022)

Wang, Z. (2011). Seismic hazard assessment: issues and alternatives. *Pure and Applied Geophysics*, 168(1), 11-25.

Wells, D. L., & Coppersmith, K. J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the seismological Society of America*, 84(4), 974-1002.

Woessner J, Danciu L, Giardini D, Crowley H, Cotton F, Grünthal G, Valensise G, Arvidsson R, Basili R, Demircioglu MB, Hiemer S, Meletti C, Musson RW, Rovida A, Sesetyan K, Stucchi M (2015) The 2013 European Seismic Hazard Model: key components and results. *Bull Earthq Eng* 13:3553-3596. doi:10.1007/s10518-015-9795-1