

23 KASIM 2022 GÖLYAKA DEPREMİ'NDE GÖZLENEN SAHA ETKİLERİNİN TEK-BOYUTLU ZEMİN DAVRANIŞ ANALİZLERİ İLE MODELENMESİ

THE PERFORMANCE OF 1D SITE RESPONSE APPROACH IN 23 NOVEMBER, 2022 GOLYAKA EARTHQUAKE

Rabia GUNDOĞDU¹, Gözde TUFEKCIBASI ERDOĞAN², Onur INDIR³, Okan ILHAN⁴ &
Abdullah Can ZÜLFİKAR⁵

ÖZET

Bu çalışma, 23 Kasım 2022 tarihinde Gölyaka (Düzce)'da meydana gelen 5.9 büyüklüğündeki depremin iki farklı istasyonda (TK8101 ve TK8110) gözlemlenen spektral ivme (S_i) değerlerini bir boyutlu zemin davranış analizleri (ZDA) ile modellemeyi amaçlamaktadır. Zemin materyalinin içsel sönümlemesini yansıtan D_{min} ile 1D yüksek-frekans spektral azalım (κ_0) parametresi dikkate alınarak ölçeklenmiş D_{min} 'i dikkate alan iki farklı set tek-boyutlu (1D) nonlineer (NL) ve eşdeğer-lineer (EL) zemin davranış analizi (ZDA) gerçekleştirilmiştir. EL analizleri, rezonans tepkisini yüksek tahmin ettiği için NL ZDA'ya göre gözlemlenen veriden daha fazla sapma göstermiştir. 1D ZDA'lar, maksimum S_i 'nin gözlemlendiği rezonans periyotlarını doğru tahmin etmiş ancak büyüklüklerini özellikle TK8110 istasyonunda aşırı tahmin etmiştir. κ_0 parametresi dikkate alınarak yapılan ZDA'lar, özellikle kısa periyotlarda (< 0.1 sn) daha doğru sonuçlar vermiştir. Çalışma, zemin etkilerinin bölgeye özgü zemin faktörleri ile belirlenmesinin önemini vurgulamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Zemin etkisi, tek-boyutlu zemin davranış analizi, Gölyaka (Düzce)

¹Yüksek Lisans Öğrencisi, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, rabiagundodu50@gmail.com (Sorumlu yazar)¹

² Doktora Öğrencisi, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü

³ Yüksek İnşaat Mühendisi, Akademi Etüt Proje Müh. Müş. Ltd. Şti.

⁴ Dr. Öğr. Üyesi, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü

⁵ Doç. Dr., İstanbul Teknik Üniversitesi Afet Yönetimi Enstitüsü



ABSTRACT

This study aims to model the spectral acceleration (SA) values observed at two different stations (TK8101 and TK8110) during the 5.9 magnitude earthquake that occurred on November 23, 2022, in Gölyaka (Düzce) using one-dimensional site response analyses (SRA). Two different sets of one-dimensional (1D) nonlinear (NL) and equivalent-linear (EL) site response analyses (SRA) were conducted, considering (i) original D_{min} , which reflects the inherent damping of the soil material, and (ii) D_{min} scaled according to the high-frequency spectral decay parameter (κ_0). EL analyses showed greater deviation from the observed data compared to NL SRA, as they overestimated the resonance response. While 1D SRAs accurately predicted the resonance periods where maximum SA was observed, they significantly overestimated the amplitudes, particularly at the TK8110 station. SRAs that considered the κ_0 parameter yielded more accurate results for low V_{S30} station (i.e., TK8101) and short periods (< 0.1 seconds). The study emphasizes the importance of producing site-specific soil factors to determine the site effects at the site of interest.

Keywords: Site effects, one-dimensional site response analyses, Düzce

1. GİRİŞ

23 Kasım 2022 tarihinde, Türkiye'nin kuzeybatısında yer alan Düzce ilinin Gölyaka ilçesinde meydana gelen 5.9 büyüklüğündeki deprem bölgede geniş çapta etkiler yaratmıştır (Ertürk vd. 2022). Bu sismik olay, yoğun deprem etkinliği ile bilinen bir sismojenik bölgede gerçekleşmiş ve Düzce il merkezindeki mahalleler ile ilçelerde birçok betonarme ve yığma yapıda çeşitli derecelerde hasara yol açmıştır. Sağlık Bakanlığı'nın açıklamasına göre, toplamda 2 kişinin hayatını kaybettiği ve 93 kişinin yaralandığı bu depremde (Özalp, S. ve Kürçer, A., 2022) yapılan alan incelemeleri, betonarme yapılarındaki hasarların tasarım eksiklikleri ve inşaat aşamasındaki yetersizliklerden kaynaklandığını göstermiştir. Betonarme binalardaki başlıca hasar faktörleri arasında kısa kolon oluşumu, yetersiz derz açıklıkları, kolon-kiriş bağlantı hataları, yetersiz bindirme boyları, zayıf dolgu duvarlar, düzensizlikler, yetersiz enine donatı, korozyona eğilimli düz donatı çubukları, işçilik hataları, düşük beton kalitesi ve zayıf kesme duvarları bulunmaktadır. Yığma yapılarda ise uygunsuz dikey duvar bağlantı detayları, dar kapı ve pencere açıklık mesafeleri, düşük mukavemetli yığma birimleri, başlıca hasar nedenleridir (Ertürk vd. 2022).

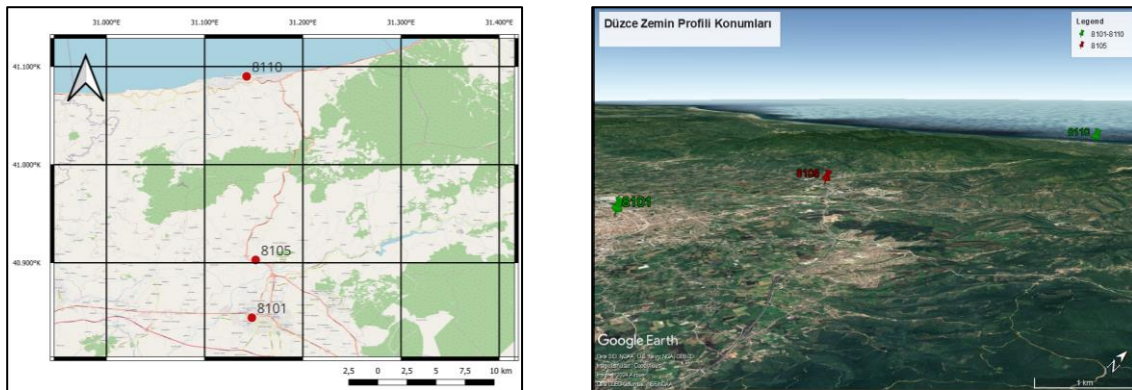
Düzce ili, Kuzey Anadolu Fay Zonu içerisinde yer alan Karadere Segmenti, Düzce Segmenti, Hendek, Çilimli ve Yığılca gibi aktif fayları içermektedir (Emre vd., 2011). Dahası, Gölyaka'nın bulunduğu bölgede, nehir dominasyonlu alüvyal yelpazeler ve görsel tortul zonlar ile kaplı geniş bir alan yer almakta ve litolojisi çakıl, kum, silt ve kilden oluşmaktadır (Jeolojik Yapı, Düzce Valiliği, 2023). Bu sebeple, diğer bir deyişle yüksek sismisitenin varlığı ve yumuşak zemin davranışının olumsuz etkileri, izmit (17 Ağustos 1999, $M_w = 7.4$) ve Düzce Depremleri (12 Kasım 1999, $M_w = 7.2$) esnasında ciddi yıkıma yol açmış, 710 ölü, 2678 yaralı ve bina stokunda geniş çaplı hasar meydana getirmiştir. 1999 depremlerinde, 16666 konut ve 3837 iş yeri ağır hasar görmüş, binlerce diğer binada orta ve hafif hasarlar tespit edilmiştir (KOERI, 2022).



Yukarıdaki bahsedildiği üzere Düzce ovasının alüvyal özellikleri göz önüne alındığında, bu durumun gözlenen yapısal hasara katkıda bulunabilecek zemin etkilerine yol açabileceği düşünülmektedir. Zemin etkilerinin, sismik tehlike hesaplamalarına dahil edilmesi, zemin büyütme fonksiyonları (Stewart vd., 2020; Hashash vd., 2020), V_{S30} tabanlı zemin büyütme faktörleri (Borcherdt, 1994) ve 1D ZDA' lar (Idriss ve Seed, 1968; Hashash vd., 2010) yardımıyla gerçekleştirilebilmektedir. TBDY (2019)' de özellikle son iki yöntem önerilmektedir. Fakat, TBDY (2019)' da sunulan yerel zemin faktörleri, Seyhan ve Stewart (2014) tarafından Amerika Birleşik Devletleri'nin batı yakasının deprem ve saha karakteristiğince domine edilen bir veri seti kullanılarak geliştirilen değerler olarak benimsenmiştir ve bölgeye-özü olmaktan uzak olduğu düşünülmektedir. Bu sebeple, bu çalışma kapsamında TBDY (2019)' da önerilen diğer yöntem olan sahaya özü 1D doğrusal olmayan (NL) ve eşdeğer-doğrusal (EL) ZDA'nın, Düzce/Gölyaka depremini kaydeden istasyonlardaki (TK8101 ve TK8110) zemin etkilerini ne ölçüde temsil ettiği irdelenmiştir.

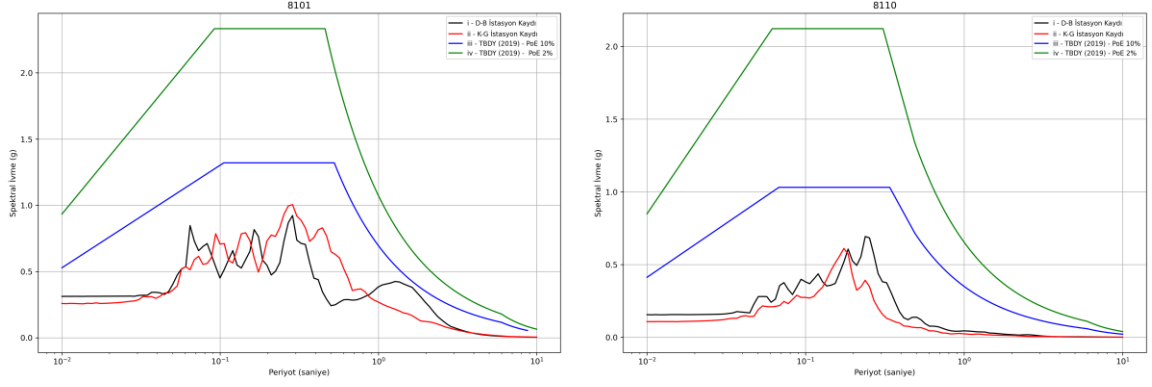
2. KUVVETLİ YER HAREKETİ İSTASYONLARI

Çalışma kapsamında 1D ZDA' lar için seçilen istasyonların konumu Şekil 1' de sunulmuştur. V_{S30} (üst 30 m'deki ortalama kayma dalgası hızı (V_s)) değeri 914 m/s olan TK8105 istasyonu ana kayanın zemin yüzeyine çıktığı bir alana yerleştirilmiş olup, TK8101 ($V_{S30} = 282$ m/s) ve TK8110 ($V_{S30} = 407$ m/s) istasyonları sırasıyla ZD (TBDY, 2019) ve ZC olarak sınıflandırılmış ve sedimenter bölgeler olarak değerlendirilmiştir. Düzce/Gölyaka depremi esnasında gözlenen hasarlar dikkate alınarak, seçilen istasyonlarda kaydedilen kuvvetli yer hareketlerinin spektral ivmeleri (SA) öncelikle Türkiye Deprem Yönetmeliği tasarım spektrumu (TBDY, 2019) ile karşılaştırılmıştır:

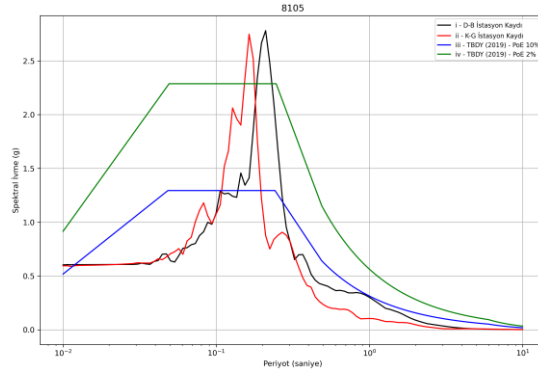


Şekil 1. Seçilen istasyonların yerleşimleri

- TK8101 ve TK8110 istasyonlarında kaydedilen hareketlerin spektral ivme değerlerinin, TBDY (2019) tarafından önerilen 50 yılda %10 ve %2 aşılma olasılığına (PoE) için geliştirilmiş tasarım spektrumlarından düşük olduğu gözlenmiştir (Şekil 2). Sadece TK8101 istasyonunun kuzey-güney (KG) kaydı, 1.5 sn periyodunda TBDY (2019) %2 PoE spektrumuna oldukça yakın SA değerleri üretmektedir.
- TK8105 istasyonları için gözlemlenen hareketlerin spektral ivme değerleri, 0.1s ile 0.3s arasındaki periyotlar için TBDY (2019) %2 ve %10 PoE tasarım spektrumlarından belirgin şekilde daha büyüktür (Şekil 3).



Şekil 2. (a) TK8101 ve (b) TK8110 istasyonlarında Düzce/Gölyaka depremi esnasında ölçülen kuzey-güney (KG) ve doğu-batı (DB) kayıtlarının spektral ivme değerleri ve TBODY (2019) %2 ve %10 aşılma olasılığına sahip tasarım spektrumları



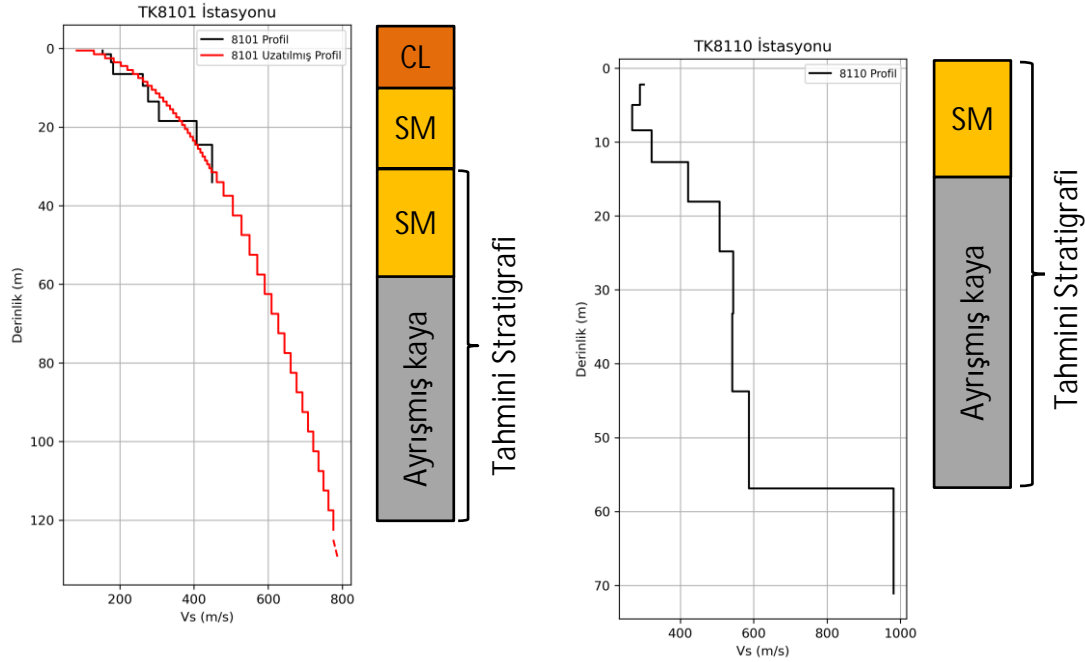
Şekil 3. (a) TK8105 istasyonunda Düzce/Gölyaka depremi esnasında ölçülen kuzey-güney (KG) ve doğu-batı (DB) kayıtlarının spektral ivme değerleri ve TBODY (2019) %2 ve %10 aşılma olasılığına sahip tasarım spektrumları

1-D ZDA' lar kapsamında TK8101 ve TK8110 için kullanılan V_s profilleri, Şekil 4' de sunulduğu üzere Orta Doğu Teknik Üniversitesi Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi ve Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) tarafından sağlanmıştır. Analizler için referans koşulu TK8105 istasyonu ana kaya olarak seçilmiş olup $V_{s30} = 914$ m/s şeklinde belirlenmiştir. TK8110'un bu referans V_s değerine 58 m civarında ulaştığı görülmüş, TK8101'in V_s profili ise $V_s = 914$ m/s' ye kadar aşağıdaki denklem yardımıyla uzatılmıştır (Sykora ve Stokoe, 1983).

$$V_s = C \times z^{n_v} \quad (1)$$

Burada z derinliği, n_v V_s profili üzerindeki derinlik etkisini tanımlayan bir parametreyi ve C ise sıfır derinlikteki hızdan bağımsız bir parametreyi ifade eder.





Şekil 4. (a) TK8101 ve (b) TK8110 V_s profilleri ve zemin stratigrafi

3. TEK-BOYUTLU (1D) ZEMİN DAVRANIŞ ANALİZLERİ

Bu çalışmada, DEEPSOIL V7.0 (Hashash vd., 2020) yazılımı kullanılarak 1D lineer olmayan (NL) ve eşdeğer-lineer (EL) ZDA analizi yapılmıştır. ZDA için gerekli parametreler aşağıdaki gibi belirlenmiştir:

1. Analizler kapsamında yer hareketi verisi olarak, ana kaya istasyonu olan TK8105' de Düzce/Gölyaka depremi esnasında kaydedilmiş veri kullanılmıştır.
2. İki farklı D_{min} kullanan iki set ZDA yapılmıştır: (i) Darendeli (2001) tarafından sağlanan ve sadece içsel zemin malzeme sönümünü temsil D_{min} ve (ii) dalga saçılım etkilerini temsil etmek amacıyla bölge için Altındal ve Askan (2022) tarafından önerilen hedef κ_0 (yüksek frekanslı spektral azaltma parametresi) ile ölçeklendirilmiş zemin D_{min} .
3. MRD eğrileri Darendeli (2001) kullanılarak hesaplanmış ve TK8101' in zemin stratigrafisi Orta Doğu Teknik Üniversitesi Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi ve Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) tarafından yayımlanan sondaj logundan alınmıştır (Şekil 4). TK8110 için bu şekilde bir veri bulunmaması sebebiyle, jeoloji ve V_s profiline uygun bir stratigrafi seçilmiştir (Şekil 4). İçsel sürtünme açısı (ϕ), TPM (1996)' de sunulan plastisite indeksi (PI)- ϕ ilişkisine göre belirlenmiş ve sükunet halindeki yanal zemin basıncı (K_0) Jaky (1948)'nin ϕ' ye bağlı denklemi kullanılarak hesaplanmıştır.
4. Groholski vd. (2016) tarafından geliştirilen genel quadratic/hyperbolic (GQ/H) modeli, Darendeli (2001) modeli tarafından üretilen MRD eğrilerinden hesaplanan gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinin, yüksek birim şekil değiştirme değerlerinde (10%) zemin kesme dayanımına asimptot oluşturması için kullanılmıştır. Her bir

zemin tabakasının kesme dayanımı, Mohr-Coulomb teorisi kullanılarak hesaplanmıştır.

3.1. κ_0 -Düzeltilmesi ile D_{min} Profilleri

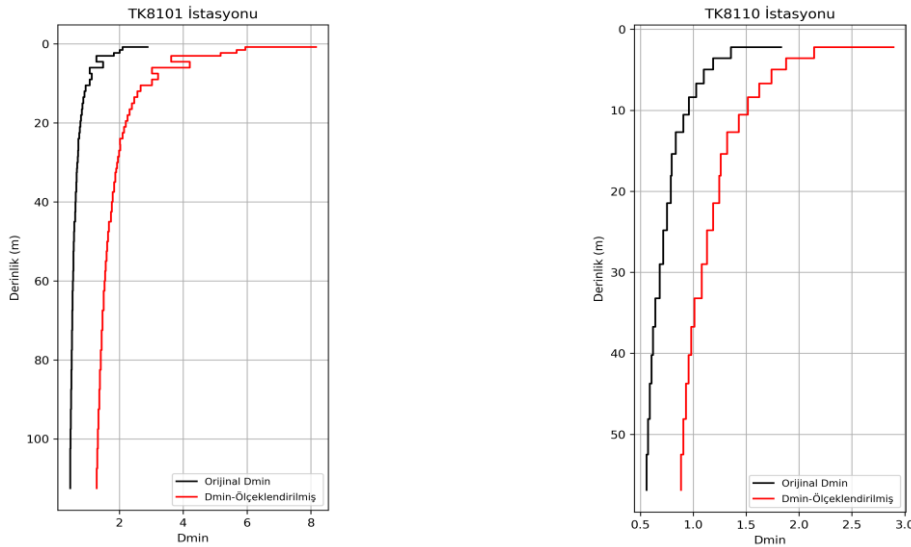
Darendeli (2001) tarafından önerilen D_{min} değeri sadece zeminin sönüm etkisini içermekte, dalga saçılım etkileri kaynaklı sönüm etkilerini göz önünde bulundurmamaktadır. Bu sebeple, yüksek D_{min} değerleri ile yapılan analizler zemin etkilerinin olduğundan daha yüksek olarak hesaplanmasına sebep olabilmektedir (Xu vd., 2020). Bu sebeple, Darendeli (2001) tarafından önerilen D_{min} değerlerine aşağıdaki denklem yardımıyla κ_0 düzeltmesi uygulanarak, dalga saçılım etkilerinin dikkate alındığı ikinci set ZDA' lar gerçekleştirilmiştir (Anderson ve Hough, 1984; Ktenidou ve ark., 2015).

$$\Delta\kappa_0 = \int_0^H \frac{1}{Q(z) * V_S(z)} * dz = \int_0^H \frac{2 * D_{min}(z)}{V_S(z)} * dz \quad (2)$$

Burada $\Delta\kappa_0$, zemin katmanlarına (diğer bir deyişle, yüzeydeki κ_0 ile ZB zemin sınıfı ($760 \text{ m/s} \leq V_{S30} \leq 1500 \text{ m/s}$) olarak tanımlanan referans koşulundaki κ_0 arasındaki fark) karşılık gelen κ_0 değeridir. $Q(z)$ zemin derinliğine bağlı yer hareketi parametresi azalımı olarak düşünülebilir. Altındal ve Askan (2022) tarafından önerilen hedef κ_0 değerlerine göre D_{min} ölçeklendirilmesi aşağıdaki gibi yapılmıştır:

- TK8101 ve TK8110 için $\Delta\kappa_0$ değerleri, sırasıyla zemin sınıfları olan ZD ve ZC için κ_0 ve ZB için önerilen κ_0 arasındaki fark olarak hesaplanmıştır.
- Denklem (2)'nin sağ tarafındaki D_{min} değerleri, hedef $\Delta\kappa_0$ 'ı yakalamak için bir ölçekleme faktörü (ψ) ile çarpılmıştır.

TK8101 ve TK8110 için orijinal D_{min} (Darendeli (2001) D_{min}) ve ölçeklenmiş D_{min} ve profilleri Şekil 5'te sunulmuştur.

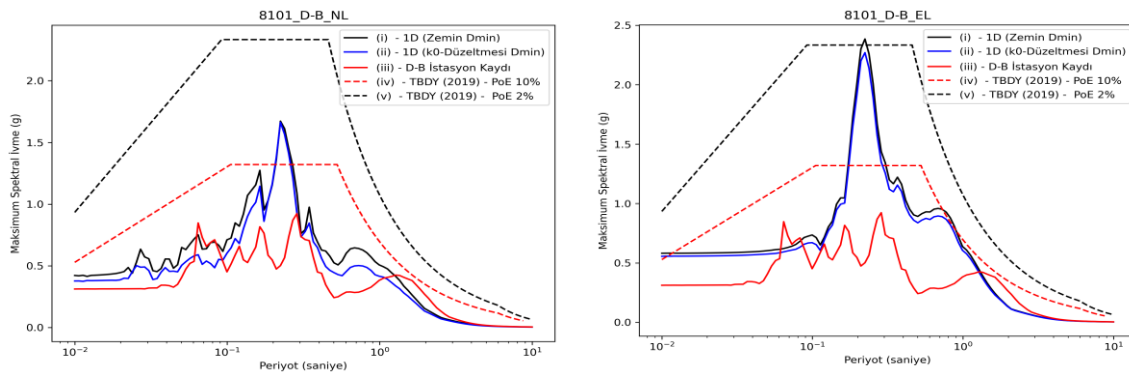


Şekil 5. TK8101 ve TK8110 İstasyonları için Darendeli (2001) ve ölçeklendirilmiş D_{min} profilleri

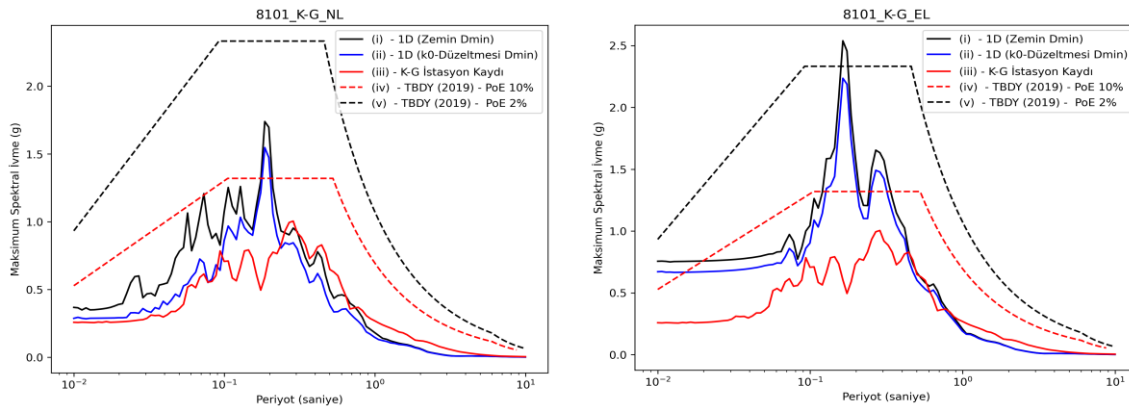


3.2. Kaydedilen ve Simüle Edilen Yüzey Spektrumlarının Karşılaştırılması

Bu bölümde, TK8101 ve TK8110 profilleri kullanılarak yürütülen 1D NL ve EL ZDA sonuçları, bu istasyonların Düzce/Gölyaka depremi sırasında yüzeyde kaydedilen hareketlerle ve TBDY (2019) tarafından önerilen %2 ve %10 aşılma olasılığına sahip tasarım spektrumlarıyla karşılaştırılmıştır. Şekil 6' dan Şekil 9' a kadar sunulduğu üzere, EL analizleri ilgili sahadaki zemin etkisini gözlenen değerlere ve NL ZDA' dan elde edilen sonuçlara nazaran oldukça yüksek tahmin etmekte, bu durumun da Kim vd. (2016)' da detaylandırıldığı üzere, EL tipi ZDA' nın rezonans tepkisini fazla tahmin etmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Dahası, TK8101 istasyonu için κ_0 düzeltmesi yapılan 1D NL ZDA' ların, orijinal D_{min} kullanılan 1D NL ZDA' lara göre ilgili istasyonun yüzeyinde kaydedilen verilere düşük periyotlarda (< 0.1 sn) daha yakın sonuçlar ürettiği gözlenmiştir (Şekil 6 ve Şekil 7).



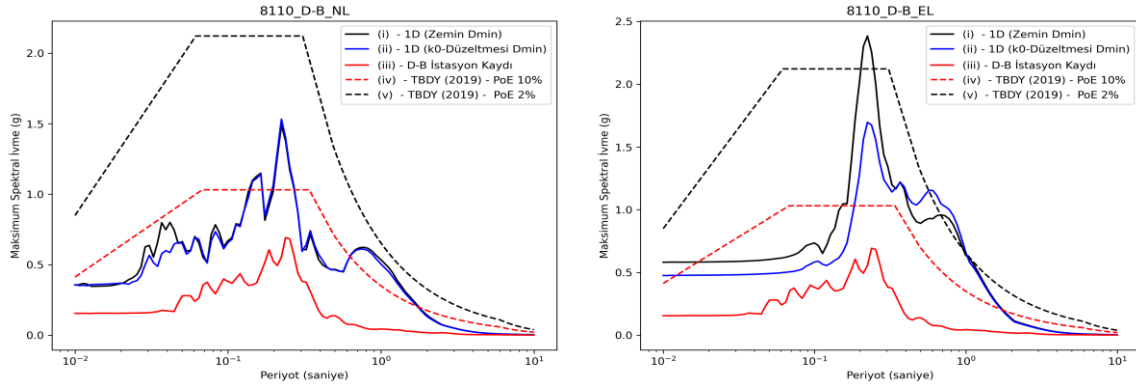
Şekil 6. TK8101' nin Düzce/Gölyaka depremi esnasında D-B yönünde kaydettiği verinin Si değeri, 1D ZDA (a) NL ve (b) EL' den elde edilen yüzey Si değerleri ve TBDY (2019) tarafından PoE %2 ve %10 aşılma olasılığı için önerilen tasarım spektrumları



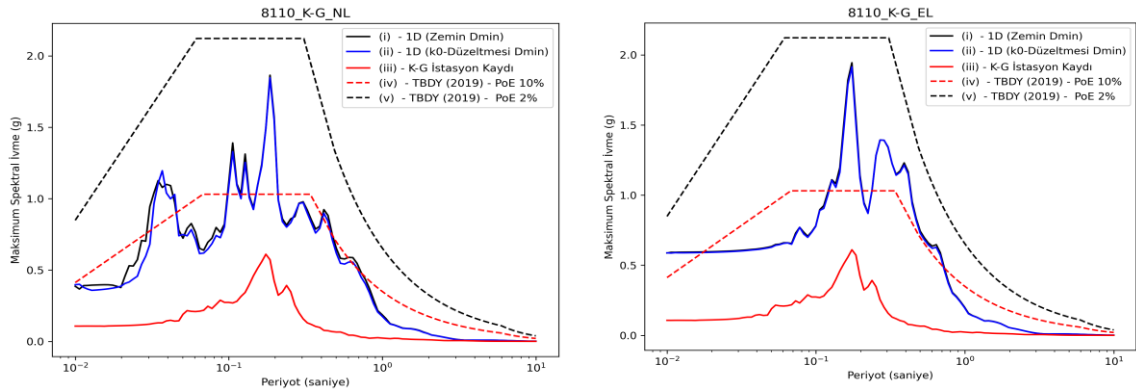
Şekil 7. TK8101' nin Düzce/Gölyaka depremi esnasında K-G yönünde kaydettiği verinin Si değeri, 1D ZDA (a) NL ve (b) EL' den elde edilen yüzey Si değerleri ve TBDY (2019) tarafından PoE %2 ve %10 aşılma olasılığı için önerilen tasarım spektrumları

TK8110 istasyonu için κ_0 düzeltmesinin ihmal edilebilir olduğu gözlenmiştir (Şekil 8 ve Şekil 9). Bu durumun, ilgili sahanın rijitliğinin yüksekliği sebebiyle ($V_{S30} = 407$ m/s) D_{min} etkilerinin düşük olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ek olarak, TK8110 için yürütülen 1D NL ZDA sonuçlarının, yine aynı istasyonda kaydedilen verilerden gözle görülür biçimde fazla olması, (i) ilgili istasyon için zemin stratigrafisinin jeoloji ve V_s' ye bağlı tahmininden

kaynaklanan epistemik belirsizliğin yüksekliği, ve (ii) TK8110 istasyonunun, ana kaya istasyonu olan TK8105' e görece uzak olmasından kaynaklanan -iki istasyon arası mesafe yaklaşık 21 km- input verisindeki yol (path) etkileri yardımıyla açıklanabilir. Son olarak, 1D NL ZDA' lardan elde edilen sonuçların, birkaç istisna hariç (ör., şekil 6' da 0.2-0.3 sn aralığı), TBDY (2019)' ın önerdiği tasarım spektrumlarından düşük olduğu görülmüştür.



Şekil 8. TK8110' nin Düzce/Gölyaka depremi esnasında D-B yönünde kaydettiği verinin Si değeri, 1D ZDA (a) NL ve (b) EL' den elde edilen yüzey Si değerleri ve TBDY (2019) tarafından PoE %2 ve %10 aşılma olasılığı için önerilen tasarım spektrumları



Şekil 9. TK8110' nin Düzce/Gölyaka depremi esnasında K-G yönünde kaydettiği verinin Si değeri, 1D ZDA (a) NL ve (b) EL' den elde edilen yüzey Si değerleri ve TBDY (2019) tarafından PoE %2 ve %10 aşılma olasılığı için önerilen tasarım spektrumları

4. SONUÇLAR

23 Kasım 2022'de gerçekleşen Gölyaka/Düzce Depremi, Düzce bölgesindeki betonarme ve yığma yapıların gözle görülür hasarlarına ve can kaybına yol açmıştır. Bu çalışma, ilgili deprem esnasında Düzce ilindeki kuvvetli yer hareketi istasyonlarında (TK8101 ve TK8110) gözlenen zemin etkilerini 1D NL ve EL ZDA' lar ile modellemeyi hedeflemiş, ikincil motivasyonunu TBDY (2019)' da önerilen zemin faktörlerinin bölgeye özgü olmamasından almıştır. Ayrıca, dalga saçılımından kaynaklı sönüm etkilerini göz önünde bulundurmak için, orijinal D_{min} ve k_0 düzeltmesi uygulanan D_{min} olmak üzere iki farklı set 1D NL ve EL ZDA koşturulmuştur.



EL analiz sonuçlarının rezonans tepkisini yüksek tahmin etmesinden dolayı, NL ZDA' ya göre gözlenen veriden oldukça fazla olduğu görülmüş, bu sebeple NL ZDA' dan elde edilen değerler esas alınmıştır. Diğer yandan, κ_0 düzeltmesinin düşük rijitliğe sahip olan istasyonda (TK8101) etkili olduğu gözlenmiş ve κ_0 düzeltmesi içeren 1D NL ZDA' lardan elde edilen yüzey spektral ivmelerin, orijinal D_{min} ile yürütülen 1D NL ZDA' lardan elde edilenlere göre, deprem esnasında ölçülen veriye düşük periyotlarda daha yakın olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, TK8110 istasyonu için 1D NL ZDA' lardan elde edilen yüzey spektral ivmelerin yine aynı istasyonda gözlenen değerlerden gözle görülür ölçüde farklı olmasının, (i) ilgili istasyon ile kaydettiği kuvvetli yer hareketi verisi girdi olarak kullanılan ana kaya istasyonu (TK8105) arasındaki mesafenin ve (ii) TK8110 için zemin stratigrafisinin ile alakalı epistemik belirsizliğin yüksek olmasından kaynaklandığı söylenebilir.

KAYNAKLAR

- Deprem.gov.tr (no date) AFAD. Available at: <https://deprem.afad.gov.tr/home-page> (Accessed: 27 September 2023).
- Anderson, J. G., and S. E. Hough (1984). A model for the shape of the Fourier amplitude spectrum of acceleration at high frequencies, *Bulletin Seismological Society of America*, 74, 1969–1993.
- Altindal, A. and Askan, A. (2022) 'Predictive kappa (κ) models for Turkey: Regional effects and uncertainty analysis', *Earthquake Spectra*, 38(4), pp. 2479–2499.
- Borcherdt, R. D. (1994). Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification). *Earthquake spectra*, 10(4), 617-653.
- Building Seismic Safety Council (BSSC) 2015a NEHRP Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures, Volume 1: Part 1 Provisions, Part 2 Commentary, FEMA P-1050-1 Washington, D.C. 555 pp
- Earthquake engineering research center: WELCOME TO EERC (no date) EARTHQUAKE ENGINEERING RESEARCH CENTER | Welcome to EERC. Available at: <http://eerc.metu.edu.tr/> (Accessed: 27 September 2023).
- Emre Ö, Duman TY, Özalp S (2011) 1:250.000 Scale Turkey Active Fault Map Series, Adapazarı (NK 36-13) Map. Serial No: 14. General Directorate of Mineral Research and Exploration, Ankara, Turkey. ISBN: 978-605- 5310-00-4.
- Erturk et all. (December 2022). Seismic damage assessment based on site observation following the Duzce (Golyaka) earthquake (Mw = 5.9, November 23, 2022)
- Earth Manual (1990). Denver, CO: U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Reclamation.
- N.Hasancebi and R. Ulusay, "Empirical correlations between shear wave velocity and penetration resistance for ground shaking assessments," *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 66, no. 2, pp. 203–213, 2006.
- Hashash, Y. M., Ilhan, O., Harmon, J. A., Parker, G. A., Stewart, J. P., Rathje, E. M., ... & Silva, W. J. (2020). Nonlinear site amplification model for ergodic seismic hazard analysis in Central and Eastern North America. *Earthquake Spectra*, 36(1), 69-86.
- Hashash, Y.M.A., Musgrove, M.I., Harmon, J.A., Ilhan, O., Xing, G., Numanoglu, O., Groholski, D.R., Phillips, C.A., and Park, D. (2020) "DEEPSOIL 7.0, User Manual". Urbana, IL, Board of Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign.

- Hashash, Y., Phillips, C., & Groholski, D. R. (2010). Recent advances in non-linear site response analysis.
- Idriss, I. M., & Seed, H. B. (1968). Seismic response of horizontal soil layers. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 94(4), 1003-1031.
- KOERI (Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute) (2022). Department of Earthquake Engineering, Bogazici University. <http://www.koeri.boun.edu.tr/>.
- Maden Tetkik Ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) MTA Jeoloji Araştırmaları Diri Fay Ve Paleosismoloji Araştırmaları (2023) [<http://yerbilimleri.mta.gov.tr/anasayfa.aspx>]
- Özalp, S. And Kürçer, A. (2022) 23 Kasım 2022 Gölyaka (Düzce) Depremi (Mw 6,0) Saha Gözlemleri Ve Değerlendirme Raporu, Maden Tetkik Ve Arama Genel Müdürlüğü.
- Stewart, J. P., Parker, G. A., Atkinson, G. M., Boore, D. M., Hashash, Y. M., & Silva, W. J. (2020). Ergodic site amplification model for central and eastern North America. Earthquake Spectra, 36(1), 42-68.
- Tao, Y. and Rathje, E. (2020) 'Taxonomy for evaluating the site-specific applicability of one-dimensional ground response analysis', Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 128, p. 105865
- T.C. Düzce Valiliği (no date) Jeolojik Yapı, T.C. Düzce Valiliği. Available at: <http://duzce.gov.tr/jeolojik-yapi> (Accessed: 03 October 2023).URL-2 <https://csb.gov.tr/bakan-kurum-duzcede-181-yapimiz-agir-hasarli-hepsini-hizlayikacagiz-bakanlik-faaliyetleri-36313> 28.11.2022
- Xu, B., Rathje, E. M., Hashash, Y., Stewart, J., Campbell, K., & Silva, W. J. (2020). κ_0 for soil sites: Observations from Kik-net sites and their use in constraining small-strain damping profiles for site response analysis. Earthquake Spectra, 36(1), 111-137.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
ZDA	Zemin davranış analizi	1D	Bir boyutlu
SA- Sı	Spektral ivme	KAFZ	Kuzey Anadolu fay zone
κ_0	Yüksek frekanslı spektral azalım parametresi	Vs	Kayma dalgası hızı
D _{min}	Zemin materyalinin içsel sönümlenmesini yansıtan viskoz sönümlenme	TBDY	Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
NL	Lineer olmayan	AFAD	Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı
EL	Eşdeğer-lineer	D-B	Doğu-batı yönü
K-G	Kuzey-güney yönü	Mw	Deprem büyüklüğü
PoE	Yıllık dönüş periyodu	MRD	Modülüs azaltma ve sönümlenme eğrilerini ölçekleme faktörü
GQ/H	Quadratic/hyperbolic modeli	ψ	

