

SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE DEPREME BAĞLI HEYELAN TEHLİKE MODELLEMESİ

Fatih SÜNBÜL*, Ayşe Bengü SÜNBÜL GÜNER**

ÖZET

Heyelanlar yerçekimi doğrultusunda toprak, kaya ve organik malzemelerin hareketinden kaynaklı çok karmaşık jeomorfolojik olaylardır. Sayısal modeller, bu jeomorfolojik davranışların ve onların çevre ile etkileşimlerini tahmin etmek etmeye yarayan matematiksel tanımları ifade etmektedir. Sonlu elemanlar yönteminde sayısal model yaklaşımları kullanılarak çok karmaşık fiziksel denklemler basit olarak simüle edilebilmektedir. Bu çalışmada Zonguldak ili, Kozlu İlçesinde heyelan potansiyeli oluşturabilecek bir alanda mevcut yapılar sonlu elemanlar ile modellenerek statik ve dinamik davranışları incelenmiştir. Analizlerde, araziden elde edilen sondaj verileri modelde zemin parametreleri olarak kullanılırken, bölgede yer alan mevcut yapılar temelde taban gerilmesi 50 kPa ve 100 kPa arasında değişen yükler ile temsil edilmiştir. Buna göre şevin kararlı durumunda, model analizde heyelanın akma bölgesinde maksimum yerdeğiştirmeler 28.45 cm olarak elde edilmiştir. Ayrıca, bölgenin depremselliğine uygun olarak seçilen M_w 7.2 Düzce depremi ivme kaydı sayısal modelde kullanılarak, potansiyel heyelan bölgesinin dinamik davranışı incelenmiştir. Dinamik analizlerde, kararlı durum değişerek, çalışma alanında depreme bağlı göçme ve yerdeğiştirme hareketleri elde edilmiştir. Buna göre en büyük düşey ve yatay yerdeğiştirmeler 40-50 cm civarında heyelanın topuk kısmında elde edilmiştir. Deprem anında zayıf zeminin ve ortalama 20° eğimin etkisiyle, zeminde jeomorfolojik deformasyonlar meydana geldiği gözlenmiştir. Tüm analizler değerlendirildiğine, olası bir deprem anında çalışma bölgesinde var olan yerleşim yerlerinde can ve mal kayıplarının yaşanmaması için, bölgede afet tehlikesi azaltma yöntemlerinin uygulanması gerekliliği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sonlu Elemanlar Yöntemi, Heyelan tehlike modelleme, 1999 Mw 7.2 Düzce depremi, Zonguldak ili

*Makalenin Gönderim Tarihi: 21/11/2020, Makalenin Kabul Tarihi: 01/03/2021 Makale Türü: Araştırma
DOI: 10.20854/bujse.829417

*Sorumlu yazar: İzmir Bakırçay Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi Dekanlığı, Seyrek Kampüsü, 35665, Menemen, İzmir, fatih.sunbul@bakircay.edu.tr (ORCID ID: 0000-0002-3590-374X)

** İzmir Bakırçay Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi Dekanlığı, Seyrek Kampüsü, 35665, Menemen, İzmir, absunbul@beun.edu.tr

EARTHQUAKE-INDUCED LANDSLIDE HAZARD MODELLING BY FINITE ELEMENTS METHOD

Fatih SÜNBÜL*, Ayşe Bengü SÜNBÜL GÜNER**

ABSTRACT

Landslides are very complex geomorphological events caused by the movement of soil, rocks and organic materials in the direction of gravity. Numerical models refer to mathematical definitions for predicting these geomorphological behaviours and their interactions with the environment. In finite element method, very complex physical equations can be simulated simply by using numerical model approaches. In this study, the static and dynamic behaviours of the existing structures in an area that could create a landslide potential in Zonguldak province, Kozlu district were examined by finite elements method. In the analyses, the drilling data obtained from the study area were implemented in the model, while the existing buildings in the area were represented with loads varying between 50 kPa and 100 kPa in the basement. Accordingly, in the stability of slope, the maximum displacements in the creep zone of the landslide were obtained as 28.45 cm in the model analysis. In addition, the dynamic behaviour of the potential landslide region was investigated by using the acceleration record of Mw 7.2 Düzce earthquake, selected in accordance with the seismicity of the region in numerical model. During dynamic phase, the steady state has changed, and the earthquake-related collapse and displacement movements were obtained in the study area. Accordingly, the maximum vertical and horizontal displacements were obtained in the toe of the landslide around 40-50 cm. During the earthquake, it was observed that geomorphological deformations occurred in the ground due to the effect of the soft soil and average slope of 20°. In conclusion, it has been determined that disaster hazard reduction methods should be applied in the region in order to prevent loss of life and property in the settlement area in case of a possible earthquake.

Keywords: *Finite Elements Method, Landslide hazard modelling, 1999 Mw 7.2 Düzce earthquake, Zonguldak province*

*Makalenin Gönderim Tarihi: 21/11/2020, Makalenin Kabul Tarihi: 01/03/2021 Makale Türü: Araştırma
DOI: 10.20854/bujse.829417

*Sorumlu yazar: İzmir Bakırçay Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi Dekanlığı, Seyrek Kampüsü, 35665, Menemen, İzmir, fatih.sunbul@bakircay.edu.tr (ORCID ID: 0000-0002-3590-374X)

** İzmir Bakırçay Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi Dekanlığı, Seyrek Kampüsü, 35665, Menemen, İzmir, absunbul@beun.edu.tr

1. GİRİŞ

Heyelan yerbilimleri alanında çalışan farklı disiplinlerden (coğrafya, jeoloji, mühendislik vb.) araştırmacılar tarafından, içinde bulunduğu karmaşık doğasından kaynaklı, çeşitli şekillerde değişen tanımlar içermektedir [1]. Heyelan, fiziksel anlamıyla yerçekimi etkisi altında toprak, kaya ve organik malzemelerin eğim yönünde hareketinden kaynaklanan, dakika mertebesinden yıllar mertebesine kadar devam edebilen bir morfolojik süreci tanımlamak için kullanılan genel bir terimdir [2]. Heyelanlar doğal tehlikesi ile ilişkili olarak, özellikle gelişmekte olan ülkelerde ekonomik büyüme ve durgunluk arasında farka neden olan, her yıl can ve mal kayıplarına neden olan karmaşık bir doğa olayıdır [3, 4]. Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ) verilerine göre son yirmi yıl içerisinde dünyada meydana gelen heyelanlarda toplamda 4.8 milyon insan etkilenmiş ve 18000'den fazla insan hayatını kaybetmiştir [5]. Heyelanlar ayrıca, toprak kayması, kökleşmiş (deep-seated) kaymalar, çamur akması, moloz akması, kaya düşmesi gibi birçok alt çalışma alanlarını da kapsar [6-8]. Bu kütle hareketleri deprem, hızlı kar erimesi, yoğun yağış ile tetiklenebilirler [7]. Elverişli eğimlerde tetiklenme süreleri değerlendirildiğinde, deprem anında veya dakikalar sonra, kar erimesinden saatler veya günler sonra, yoğun yağıştan günler veya haftalar sonra heyelanlar meydana gelebilmektedir [9]. Heyelanlar altı şekilde incelenir; (i) düşme, (ii) devrilme, (iii) kayma, (iv) yanal yayılma, (v) akma ve (vi) karmaşık oluşumlarıdır [10]. Heyelanların meydana gelmesinde geoteknik faktörler ise şu şekilde sıralanabilir; yamaçların kararsız hale gelmesi, efektif gerilme değişimi, malzeme özelliklerinin fiziksel değişimi veya geometrideki değişim. Etkili gerilme değişimi doğrudan dış kuvvetlerin (depremler ve insan etkisi) veya dolaylı olarak yağış etkisiyle malzeme içerisinde oluşan gözenek basıncı değişimleri ile oluşabilir. Son yirmi yılda 1999 Tayvan, 2001 El Salvador, 2005 Pakistan ve 2008 Çin depremleri gibi yıkıcı kütle hareketlerinin akabinde ciddi kayıplar oluşturan heyelanlar meydana gelmiştir [11, 12]. Halbuki, literatürde yer alan birçok araştırmada depremle tetiklenen kütle hareketlerinin etkisinin göreceli olarak az olarak algılanması sonucunda, ilgili kayıplar doğrudan depremin etkisine atfedilmiştir [13]. 13 Ocak ve 13 Şubat 2002'de meydana gelen El Salvador depremlerinden sonra yapılan araştırmalarda deprem tetiklemesiyle oluşan heyelanlarda 1000 kişinin hayatını kaybetmiş olduğu tespit edilmiş, deprem sonunda meydana gelen toplam kayıplarda heyelanların büyük oranda rol aldığı ortaya konmuştur [14, 15]. Dunning vd. [16]'ya göre 2005 Kaşmir (M_w 7.6) Pakistan depreminde tahmin edilen ölüm sayısının %30'u deprem anında meydana gelen

heyelanlardan oluşmaktadır. 2008 Wenchuan (M_w 7.9) Çin depreminde farklı özelliklerde afetler meydana geldiği ve deprem etkisiyle oluşan heyelanlarla birlikte bölgede toplam 20000 insanın yaşamının kaybedildiği belirtilmektedir [17]. Yapılan araştırmalar heyelanların orta ($3.5 < M < 6.5$) ve büyük depremlerle ($M > 6.5$) tetiklenebileceğini göstermektedir [18, 19].

Afet çalışmalarında yerbilimleri araştırmacıları incelemelerini zarar azaltma kavramı üzerinde yoğunlaştırarak, çalışma alanında meydana gelebilecek olası bir afet türü üzerinde sayısal modeller oluşturarak, afetleri simüle edebilmektedirler. Örneğin dik eğimli ve yağış alan bir arazideki yerleşim yerine yakın bir fay hattında meydana gelebilecek deprem, bölge jeolojisine bağlı olarak heyelanlar oluşturabilmektedir. Muhtemel hasar ve kayıplar simülasyon yardımıyla önceden tahmin edilerek, bölgede gerekli afet zarar azaltma yöntemleri uygulanabilmektedir. Dolayısıyla bir çalışma alanında şev stabilitesinin heyelan potansiyelinin değerlendirilmesi o alanda yapılacak detaylı jeolojik ve jeoteknik araştırmalara bağlıdır. Genellikle simülasyonlar, şev stabilitesi sınır elemanları [20], sonlu elemanlar [21], sinir ağları [22], güvenilirlik analizleri [23] veya hibrid yöntemler [24] gibi modellemelerle ortaya konabilmektedir. Bunlardan sonlu elemanlar yöntemi daha açıklayıcı gerilme ve deformasyon bilgisi sağlamaktadır [25, 26]. Sonlu elemanlar yönteminde, non-lineer malzeme davranışı, karmaşık sınır ve yüklenme koşulları altında, şevlerin stabilize analizi, sızma ve gerilme-deformasyon hesaplamaları yanında gerilmeye bağlı gözenek basıncı değişimi araştırmaları da yapılabilmektedir [27]. Ayrıca yöntem vasıtasıyla afet bölgelerinde modeller oluşturularak, afetlerin önceden tahmini, afet önleme ve afet zarar azaltma çalışmalarına envanter oluşturulmaktadır [28].

Bu çalışmada Zonguldak ili Kozlu ilçesinde yer alan bir bölge gerçek zemin parametreleri ile statik ve dinamik yükler altında sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmiştir. Buna göre, çalışma alanında var olan zemin özellikleri ve eğim oranı sayısal modelde yansıtılarak, binaların etkisiyle oluşan yüklenme, model heyelanda tepe, akma bölgesi ve topuk bölgesi için incelenmiştir. Statik ve sismik tehlike haritasına uygun seçilen deprem verisi altında oluşturulan dinamik durumlar için bölgede oluşabilecek deformasyonlar modellenmiş, olası afetin meydana getirebileceği zararlar afet zarar azaltma çerçevesinde değerlendirilmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

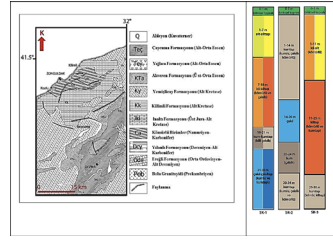
2.1 Çalışma Alanı Klimatolojik ve Jeomorfolojik Özellikleri

Klimatolojik olaylar ile kütle hareketleri arasında bir korelasyon vardır. Sıcaklık ve yağış etkisi, bölgede hâkim olan jeolojik yapı ve arazi eğimi gibi etkenler heyelan oluşum süreçlerinde etkili rol oynamaktadırlar [29]. Meteorolojik karakterli afetlerin mevsimsel dağılımları incelendiğinde, heyelanların yağışın fazla olduğu ilkbahar ve sonbahar mevsimlerinde meydana geldiği ifade edilmiştir. Bununla birlikte bazı heyelanlar yaz aylarında da meydana gelmiştir [30]. Türkiye’de heyelanlar özellikle Karadeniz iklimi görülen yarı nemli, nemli ve çok nemli alanlarda meydana gelmektedir [31]. Çalışma alanı Zonguldak ili Kozlu ilçesinde yer almaktadır. Bu bölgenin yıllık ortalama sıcaklığı 13.7°C, yıllık ortalama yağış miktarını ise 1219.4 mm’dir [32]. Literatürde heyelanların oluşumunu tetikleyen bir diğer önemli unsur olarak arazi eğiminin >20° aşığı durumlarıdır [33]. İnceleme alanı engebeli bir arazide yer almakta, eğim oranı ise 10° ile 45° arasında değişmektedir (Şekil 1).



Şekil 1. Çalışma alanı (Zonguldak-Kozlu) ve eğim profil haritası (Ortalama eğim=20°), araziden elde edilen sondaj noktaları.

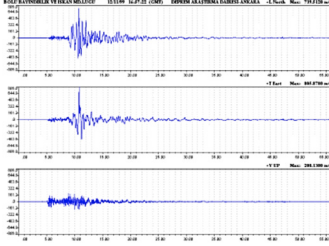
Karadeniz Bölgesinin batı kesiminde yer alan Zonguldak ili, Anadolu’nun başlıca tektonik birliklerinden Pontidler ve İstanbul zonu içerisinde yer alır [34, 35]. Bu havza Paleozoik ve Mesozoik karakterdedir [36]. İnceleme alanı genel olarak İnaltı Formasyonu, Kömürlü birimler ve Kilimli formasyonundan oluşmaktadır (Şekil 2a). Çalışma alanında zemin parametreleri belirlemek amacıyla sondajlar yapılmıştır (Şekil 2b). Maksimum 30 metreye ulaşan sondajlarda ilk on metrede silt-silttaşı, kumtaşı (kumlu, çakıllı ve kömürlü), kil silt; ikinci on metrede kil-kiltaşı (kömürlü ve çakıllı), çakıl, kilttaş; üçüncü on metrede ise çakıl-çakiltaş, kumtaşı (kumlu, çakıllı, kömürlü) birimleri elde edilmiştir [37].



Şekil 2. a) Bölgeye ait jeolojik birimler; b) modelde kullanılan arazi sondaj logları.

Bölge jeolojik olarak incelendiğinde, Paleozoik zamanın beşinci alt bölümü olan Karbonifer (354 milyon yıl-292 milyon yıl) litolojik yapılanmasından günümüze kadar geçen sürede orojenik hareketler gözlenmiştir. Bunların en önemlileri Alpin ve Hersinyen orojenezleridir. Bölgede en etkili deformasyonlar Alpin orojeni zamanında olmuştur. Kuzey Anadolu Fayı (KAF) gibi, Doğu-Batı yönlü büyük gravite fayları bölgeyi çoklu tektonik birliğe ayırmıştır. Bundan dolayı KAF dışında birçok tali faylar da bölgede etkilidir [38]. Zonguldak ili de KAF’a yakınlığı bakımından değerlendirildiğinde, 2. derece deprem bölgesi içerisinde yer almaktadır [39]. Deprem anında yerin ve buna bağlı olarak çevrede oluşacak hız değişimleri ve deformasyonlar ivme kayıtlarından elde edilmektedir. Deprem anında oluşan ani yerdeğişimler altında yapı veya kütle stabilitesini korumaya çalışır. Yapılar düşey ivmelerin oluşturduğu basınç gerilmelerine karşı yeterli dayanım özellikleri göstermelerine rağmen, yatay ivmeler etkisinde oluşan kesme ve çekme kuvvetlerine karşı dayanımı azdır. Model tasarımlarında pik düşey ivme (PVA) genellikle pik düşey ivme (PHA)’nın 2/3’ü kabul edilmektedir [40]. Fakat bazı orta ve büyük magnitüd değerine sahip deprem odaklarının farklı mesafelerinde meydana gelen ivme değişimlerinde bu oranın değişebileceği ifade edilmiştir [41]. Bu değişen özelliklerden dolayı sönüm denklemlerinde pik yatay yer ivmesi tercih edilmektedir [42]. Dinamik tasarımlarda ivme spektrumuna uygun gerçek kuvvetli yer hareketi kaydının seçilmesinde; depremin büyüklüğü, faylanma tipi, çalışma alanının faya olan mesafesi, yarımla yönü, yerel zemin koşulları ve kaydın spektral içeriği dikkate alınmaktadır [43]. Çalışmada dinamik modelde bölgeye yakın ve zemin jeolojik özellikleri benzer olması sebebiyle 1999 Mw 7.2 Düzce deprem kaydı kullanılmıştır (Şekil 3). Bu depreminin, odak derinliği 14 km, en büyük yatay kayma yaklaşık 4 m ve toplam yüzey kırığı uzunluğu 40 km olarak belirlenmiştir [44]. 12 Kasım 1999 Düzce depreminde kent merkezinde depremin oluşturduğu deprem moment büyüklüğü Mw7.2 ve yatay deprem ivmesi değeri 0.52 g olarak kaydedilmiştir.

Ayrıca arazi gözlemleri sonucunda, belirlenen maksimum atım değeri 530 cm sağ-yanal olarak belirlenmiştir [44]. Aynı deprem için Bolu’da bulunan ivme ölçer, yatay deprem ivme değerini 0.81 g olarak kaydetmiştir (Şekil 3). Arazi gözlemlerinde de bu yüksek ivme değerini ifade eden olgular gözlenmiştir. Dinamik analizlerde bu kaydın maksimum ivme zaman aralığı dikkate alınarak deprem için 20 saniyelik ivme zaman aralığı hesaplara dahil edilmiştir.



Şekil 3. Düzce depremi ivme kaydı [44].

2.2 Sonlu Elemanlar Modelleme

Sonlu Elemanlar (SE) yönteminde jeolojik ortamlar bir sürekli ortam gibi düşünülerek çeşitli etkiler karşısında (zemin yükleme, zemin kayma, deprem yüklemesi vs.) fiziksel denklemlerle modellenebilmektedir. Çalışılan jeolojik ortamın homojen olmayışı, ortamda var olan sıvılar etkisiyle malzemenin lineer olmayan davranışı, ortamın zamana bağlı fiziksel değişimleri gibi birçok parametre nümerik denklemler yardımıyla simüle edilebilmektedir [46]. Bu çalışmada Plaxis v9 2D dinamik modül sonlu elemanlar programı ile çalışma alanında zemin verilerinden elde edilen parametreler ile çalışma alanı modellenerek, gerilmeler anındaki davranışı incelenmiştir.

Sonlu elemanlara dayalı analizlerde; model oluşturulurken model boyutu model genişliğinin 2 katı kadar büyütülerek modele yansıtılmıştır [47]. Yeraltı su seviyesi (YASS) hesaba katılmış modellerde derinlik yüzeyden -2.00 m olarak modele yansıtılmıştır. Yapı 15 düğüm noktalı üçgenel elemanlardan oluşturulmuştur. Statik durumda; model sınır koşulları modelin sağ ve sol kenarındaki dikey yönde serbest, model tabanında ise sabit yani yatay ve dikey yönde hareketi engellenmiş olarak alınmıştır. Dinamik analizlerde; standart deprem sınır şartlarını kabul eden kuvvetli yer hareketi ivme zaman- sınır koşulu olarak model tabanından etki ettirilmiştir. Yapılan tüm analizlerde sonlu elemanlar ağı, iyi sıklıktaki “fine-mesh” ağ seçilerek yapılmıştır.

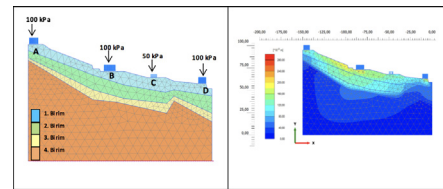
2.2.1 Statik yerdeğiştirme analizi

Statik deformasyon durumunda temel bağıntılar zemin modelini sürekli yapı olarak değerlendirir. Deformasyonlar küçük olarak sınırlanır. Bu deforme olmamış orijinal geometri formülüyle ifade edilir. Sürekli zemin modeli ise sonlu elemanlara dayalı belirlenir. Model Mohr-Coulomb prensibi dahilinde oluşturulmuştur [48]. Buna göre, basit lineer elastik-plastik model olarak bilinen bu modelde plastik davranışı modellemek için üç zemin parametresi c' (kohezyon), ϕ' (içsel sürtünme açısı), Ψ (genleşme açısı) ve elastik davranışı modellemek için ise E' (elastisite modülü) ve ν' (Poisson oranı) kullanılmaktadır [49]. Çalışma alanında ilgili idaresinden temin edilen zemin etüt ve geoteknik raporlarından yapılan sondajlardan elde edilen zemin parametreleri ile oluşturulan sayısal zemin profili arazi koşullarını yansıtan parametreler ile belirlenmiştir (Tablo 1).

Tablo 1. Zemin profili..

Zemin Tabakaları	Birim Hacim Ağırlık (kN/m^3)	Kohezyon (kN/m^2)	İçsel Sürtünme Açısı ($^\circ$)	Elastisite Modülü (MPa)	Poisson Oranı
1. Birim	17,0	5	10	7	0,3
2. Birim	19,8	10	20	50	0,35
3. Birim	18,0	8	20	7,5	0,35
4. Birim	20,0	20	35	150	0,3

Modelde heyelan çalışma alanı kabul edilen bölgede yer alan 4 farklı yapı da simülasyonda gösterilmiştir. Yüzeyde yer alan mevcut yapılar temelde taban gerilmesi 50 kPa ve 100 kPa arasında değişen yükler ile temsil edilmektedir (Şekil 4a). Model heyelan tepe noktası, orta nokta ve topuk kısmı olmak üzere üç kısım için değerlendirilmiştir. Statik durumda çalışma alanında yapıların simülasyonu ile maksimum deformasyon heyelan oluşabilecek kesimde 28.45 cm olarak elde edilmiştir. Zemin yapısı silt ve siltli olan bölgelerde deformasyonlar artarak 1. birimden 4. birim sınırına kadar devam etmiştir (Şekil 4b).



Şekil 4. a) Modelde kullanılan mesh sistemi; b) Statik durumda yerdeğiştirme analizi.

2.2.2 Deprem etkisi altında yerdeğiştirme analizi

Heyelan çalışmaları birkaç vaka analizi dışında genellikle statik olarak modellenmektedir. Depremsellik yoğun olarak gözlemlenen bölgelerde özellikle deprem sonrası oluşabilecek hasarların önüne geçilmesi amacıyla, heyelanlara etki edebilecek ikincil kuvvetlerin de araştırılması gerekmektedir. Dolayısıyla şevnin deprem anında stabilitesini koruyup koruyamamasının araştırılması önemli bir konudur. Araştırma alanı Kuzey Anadolu Fayına yakın bulunmaktadır. Bu bölgede olabilecek bir depremin zemine verebileceği zarar araştırılmıştır. Bu sebeple çalışma alanına M_w 7.2 Düzce depremi simüle edilerek analizler yapılmıştır. Sonlu elemanlar yönteminde eleman seçimi ve eleman tipleri için karşılaşılan probleme uygun eleman tipleri, belirlenen esas (birincil) bilinmeyene göre bir boyutlu, iki boyutlu ya da üç boyutlu elemanlar ve eğri yüzeyler için eğrisel elemanlardır. Eleman düğüm noktaları, eleman bölgesinde bilinmeyen büyüklüğün (örneğin yerdeğiştirme) dağılım eğrisini tanımlamak üzere matematiksel bir fonksiyon yazmak için stratejik noktalar sağlar. Bu çalışmada heyelan modelinde 15 düğüm noktalı, Mohr-Coulomb gerilme modeli kullanılmıştır. Bu model yaklaşımı statik ve dinamik analizlerin temel yaklaşımını oluşturmaktadır [47].

Dinamik analizler sırasında malzeme sönümü zeminin viskoz özelliklerine, sürtünmeye ve plastik şekil değiştirmelere bağlı olarak oluşmaktadır. Kendiliğinden oluşan bu sönüm miktarı, zeminde görülen mevcut sönümden azdır ve zemin içerisindeki sönüm etkilerini gerçek olarak yansıtabilmek için ekstradan sönüm etkisi uygulamak gerekmektedir. Uygulanacak sönüm (C) değeri, zemin kütle matrisi (M) ve rijitlik matrisinin (K) bir fonksiyonu olan Rayleigh sönüm değeri ile uygulanabilmektedir. Bu katsayıların hesabında iki frekans değişkeni kullanılmaktadır. Genellikle geoteknik malzemelerinin sönüm aralıkları %2-%5 arasında alınmaktadır. Bu çalışma kapsamında dinamik denge denkleminin sönümsüz olarak kabul edilmiş ve bu çalışmada kullanılan bilgisayar programı Plaxis'te standart durum analizi yapılarak $\alpha R = \beta R = 0$ değerleri alınarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, kullanılan deprem kaydının aralığı olan 0.01 sn. zaman aralığı kullanılarak maksimum ivmenin kaydedildiği yaklaşık 20 sn'lik ivme kaydı sayısal model tabanından etki ettirilerek sayısal analizler gerçekleştirilmiştir [47]. Dinamik analizlerde Biot [50] zamana bağlı dinamik yük altındaki yerdeğiştirme Eşitlik (1);

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F$$

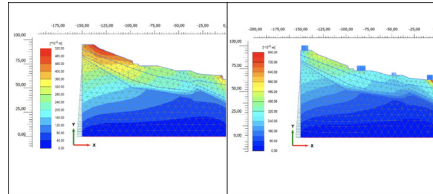
(1)

Burada, M : kütle, u : yerdeğiştirme, C : sönüm değeri,

K : rijitlik değeri, F :yük. Yerdeğiştirme u , hız \dot{u} ve ivme \ddot{u} zamana dayalı değişkenlerdir. Eşitliğin son iki terimi $Ku=F$ statik deformasyona bağlıdır. Sonlu eleman formüllerinde C kütle ve rijitlik matrisinin bir fonksiyonu olarak tanımlanır. M baskın ise düşük frekanslı titreşimler sönümdür veya K baskınsa yüksek frekanslı titreşimler sönümdür. Standart sonlu elemanlar uygulamasında $\alpha R = \beta R = 0$ alınır. Bu denklem zaman tanım alanında tek adımlı atım ve çoklu iterasyon ile Newmark yöntemine göre Eşitlik (1) üzerinde gerçekleştirilmiştir [51].

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Heyelan model alanında hiçbir yapı yükü yokken 20 saniyelik deprem ivme kaydı altında dinamik analizi yapılarak yerdeğiştirmeler simüle edilmiştir. Bu durumda elde edilen maksimum yerdeğiştirme değeri 51.83 cm olarak gerçekleşmiştir (Şekil 5a). Gerçekleşen bu hareket zemin tabakalarının hepsinde etkili olmuş ve kritik kayma düzlemi oluşturmuştur. Tüm yapı yüklerinin modelde analiz edildiği ikinci senaryoda elde edilen maksimum yerdeğiştirme değeri 78.54 cm'dir (Şekil 5b). Kritik kayma düzleminin olduğu bu durumda zemin üzerinde var olan yapıların heyelan oluşumuna katkı sağlayabileceği sonucunu ortaya çıkarmaktadır.

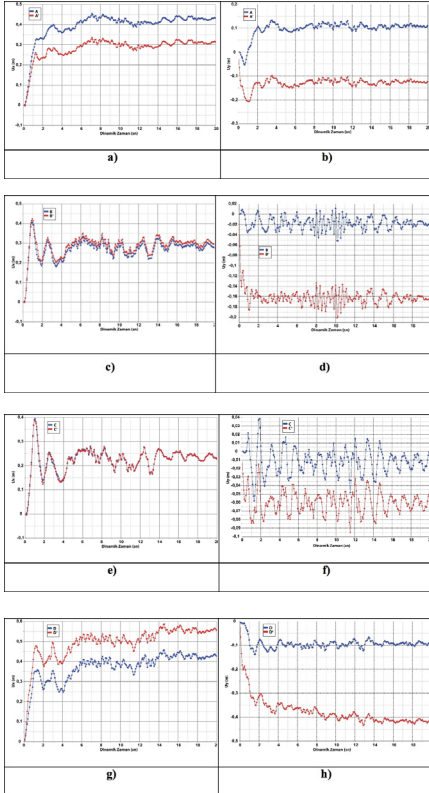


Şekil 5. a) Yapısız dinamik yerdeğiştirme ve b) Yapı varken dinamik yerdeğiştirme; deprem x yönünde uygulanmıştır.

Heyelan modelleme alanında bina yüksüz durumlar A, B, C ve D olarak isimlendirirken bina yükünün var olduğu modeller A', B', C' ve D' üslü indislerle tanımlanmıştır. Modelde 20 sn deprem uygulandığında heyelanın tepe noktasında (taç kısmı) bina yükü yok iken yatay yönde elde edilen maksimum yerdeğiştirme (A_{Uxmax}) 45 cm iken, bina yükünün var olduğu durumda yatay yönde elde edilen maksimum yerdeğiştirme (A_{Uxmax}) 33 cm'dir. Düşey yönde yerdeğiştirmeler incelendiğinde; model heyelan tepe noktası bina yükü yok iken elde edilen maksimum yerdeğiştirme (A_{Uymax}) 13 cm kabarma olarak gerçekleşmiştir. Modelde bina yükü ile birlikte elde edilen maksimum yerdeğiştirme (A_{Uymax}) 20 cm oturma/çökme olarak gerçekleşmiştir (Şekil 6a-6b).

Model heyelanın orta zonuna (kayma bölgesi) gelindiğinde, yatay yönde yerdeğıştirmeler yapı yükstüz ve yapı yüklü olarak birbirine benzer değerler vermiştir. B ve C noktaları için elde edilen maksimum yatay yerdeğıştirme değeri ($B-B'_{Ux_{max}}$ ve $C-C'_{Ux_{max}}$) 40 cm ve ortalama yerdeğıştirme değeri ($B-B'_{Ux_{ort}}$ ve $C-C'_{Ux_{ort}}$) 25-30 cm'dir. B noktasında yükstüz ortamda $BU_{y_{max}} = 4$ cm yükselme iken, yüklü durumda $B'_{Uy_{max}} = 20$ cm oturma/çökme şeklindedir. C noktasında yükstüz ortamda $CU_{y_{max}} = 3$ cm oturma/çökme oluşurken, yüklü durumda $C'_{Uy_{max}} = 9$ cm oturma elde edilmiştir (Şekil 6c-6d-6e ve 6f).

Model heyelanın uç kısmı (topuk bölgesi) incelendiğinde elde edilen yükstüz $D_{Ux_{max}} = 40$ cm, yüklü $D'_{Ux_{max}} = 50$ cm civarındadır. Düşey yerdeğıştirmeler analiz edildiğinde, elde edilen $D_{Uy_{max}} = 10$ cm oturma/çökme ve $D'_{Uy_{max}} = 40$ cm oturma/çökme şeklindedir (Şekil 6g-6h).



Şekil 6. a)- h) Yapısız ve yapı varken deprem süresince yatay (Ux) ve düşey (Uy) yönde yerdeğıştirme.

Afetlerin etkilerinin azaltılması veya önlenmesine yönelik yapılan çalışmalardan bir bölümü afet öncesi, afet oluşabilecek yerin ayrıntılı olarak incelenmesi çalışmalarıdır. Türkiye'de özellikle Karadeniz bölgesinde jeomorfolojik ve meteorolojik sebeplerden dolayı heyelanlar sıklıkla yaşanmaktadır. Heyelanların tekrarlanma periyodu dikkate alındığında ülkemizde en fazla yaşanan afet türü heyelanlardır. Afetlerden etkilenen mesken sayıları incelendiğinde heyelanlar depremlerin hemen ardından gelmektedirler. Bu çalışmada Zonguldak ili, Kozlu ilçesi içerisinde yer alan inceleme alanı heyelan tehlikesi çerçevesinde sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Bu bölge araziden alınan gerçek zemin verileri ile bilgisayar ortamında hem statik hem de gerçek deprem verisi altında modellenmiştir. Araştırma alanı 4 farklı zemin tabakasından oluşmaktadır. Heyelan modeli tepe noktası (taç bölge), orta nokta (kayma bölgesi) ve uç nokta (topuk bölge) olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular şu şekilde özetlenebilir;

Tüm bölge kararlı durumunda (bina yükleri dahil edilmiştir) model heyelanın orta kesiminde maksimum yerdeğıştirmeler 28.45 cm olarak elde edilmiştir. Model heyelana Mw 7.2 depremi etki ettirildiğinde, kararlı durum değışçerek, depreme bağlı yerdeğıştirmeler artmış, kabarmalar ve çökmeler şeklinde yerdeğıştirmeler gözlemlenmiştir. Model heyelanın tepe noktasında yatay yerdeğıştirmeler 33-45 cm arasında değışirken, düşey yerdeğıştirmeler 13-20 cm arasında gerçekleşmiştir. Model heyelanın akma zomu incelendiğinde, yatay yerdeğıştirmeler 25-40 cm arası, düşey yerdeğıştirmeler 3-20 cm arasındadır. Modelde uç kısma (topuk bölgesi) gelindiğinde yatay yerdeğıştirme değerleri 40-50 cm arasında, düşey yerdeğıştirme değerleri ise 10-40 cm arasında olduğu gözlenmiştir.

Elde edilen tüm bu veriler ışığında çalışma alanında meydana gelebilecek büyük bir depremde heyelan meydana gelme olasılığı yüksektir. Çalışma alanının en üst tabakasını oluşturan 1 nolu birim gevşek ve zayıf malzemeden oluşmuştur. Bu zayıf malzeme bölgeden bertaraf edilerek veya iyileştirilerek daha sağlam bir hale getirilmesi önerilmektedir. Modelde topuk bölgede yer alan kısım içinde zemin destekleme yapılması gerekmektedir. Denge durumunda kararlı halde bulunan şev, olağan bir deprem sırasında duyarlılığını koruyamayıp, büyük yerdeğıştirmeler oluşturması neticesinde bölgede var olan yerleşim yerlerinin etkisinin meydana gelmesi muhtemeldir.

KAYNAKLAR

- [1] Margottini, C. (2013). *Landslide Science and Practice*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-31319-6>
- [2] Cruden, D. M. (1991). A simple definition of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 43(1), 27–29. <https://doi.org/10.1007/BF02590167>
- [3] Froude, M. J., & Petley, D. N. (2018). Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(8), 2161–2181. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-2161-2018>
- [4] Petley, D. (2012). Global patterns of loss of life from landslides. *Geology*, 40(10), 927–930. <https://doi.org/10.1130/G33217.1>
- [5] Fisher, D., Hagon, K., Swithern, S., & Walmsley, L. (2018). *World Disasters Report 2018*. International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies.
- [6] Costa, J., & Wieczorek, G. (1987). *Debris Flows/Avalanches: Process, Recognition, and Mitigation*. The Geological Society of America.
- [7] Cruden, D., & Varnes, D. (1996). *Landslides: Investigation and Mitigation*. Chapter 3 - Landslide Types and Processes. Transportation Research Board.
- [8] Hungr, O., Evans, S. G., Bovis, M. J., & Hutchinson, J. N. (2001). A review of the classification of landslides of the flow type. *Environmental and Engineering Geoscience*, 7(3), 221–238. <https://doi.org/10.2113/gsegeosci.7.3.221>
- [9] Malamud, B. D., Turcotte, D. L., Guzzetti, F., & Reichenbach, P. (2004). Landslide inventories and their statistical properties. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29(6), 687–711. <https://doi.org/10.1002/esp.1064>
- [10] Clague, J., & Stead, D. (2012). *Landslides*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511740367>
- [11] Nowicki Jessee, M. A., Hamburger, M. W., Ferrara, M. R., McLean, A., & FitzGerald, C. (2020). A global dataset and model of earthquake-induced landslide fatalities. *Landslides*. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01356-z>
- [12] Valagussa, A., Marc, O., Frattini, P., & Crosta, G. B. (2019). Seismic and geological controls on earthquake-induced landslide size. *Earth and Planetary Science Letters*, 506, 268–281. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.11.005>
- [13] Schuster, R., & Highland, L. (2001). *Socioeconomic and Environmental Impacts of Landslides in the Western Hemisphere*. United States Geological Survey.
- [14] Bird, J. F., & Bommer, J. J. (2004). Earthquake losses due to ground failure. *Engineering Geology*, 75(2), 147–179. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.05.006>
- [15] Bommer, J. J., & Rodríguez, C. E. (2002). Earthquake-induced landslides in Central America. *Engineering Geology*, 63(3–4), 189–220. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(01\)00081-3](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00081-3)
- [16] Dunning, S. A., Mitchell, W. A., Rosser, N. J., & Petley, D. N. (2007). The Hattian Bala rock avalanche and associated landslides triggered by the Kashmir Earthquake of 8 October 2005. *Engineering*

- Geology, 93(3–4), 130–144. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2007.07.003>
of Living with Landslides (pp. 111–117). https://doi.org/10.1007/978-3-319-53485-5_12
- [19] Keefer, D. (1984). Landslides caused by earthquakes. *Geological Society of America Bulletin*, 95(4), 406. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1984\)95<406:LCBE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1984)95<406:LCBE>2.0.CO;2)
- [20] Jiang, Y. (1989). *Slope Analysis Using Boundary Elements*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-83918-4>
- [21] Zdravković, L., & Potts, D. M. (2020). Keynote Lecture: Application of Advanced Numerical Analysis in Geotechnical Engineering Design (pp. 1009–1022). https://doi.org/10.1007/978-981-15-2184-3_132
- [22] Moayedi, H., Mosallanezhad, M., Rashid, A. S. A., Jusoh, W. A. W., & Muazu, M. A. (2020). A systematic review and meta-analysis of artificial neural network application in geotechnical engineering: theory and applications. *Neural Computing and Applications*, 32(2), 495–518. <https://doi.org/10.1007/s00521-019-04109-9>
- [23] Zhang, J., Zhang, L. M., & Tang, W. H. (2011). Slope Reliability Analysis Considering Site-Specific Performance Information. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(3), 227–238. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000422](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000422)
- [24] Stead, D., Eberhardt, E., & Coggan, J. S. (2006). Developments in the characterization of complex rock slope deformation and failure using numerical modelling techniques. *Engineering Geology*, 83(1–3), 217–235. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.06.033>
- [25] Dawson, E. M., Roth, W. H., & Drescher, A. (1999). Slope stability analysis by strength reduction. *Geotechnique*, 49(6), 835–840. <https://doi.org/10.1680/geot.1999.49.6.835>
- [26] Lane, P. A., & Griffiths, D. V. (2000). Assessment of Stability of Slopes under Drawdown Conditions. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(5), 443–450. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2000\)126:5\(443\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:5(443))
- [27] Berilgen, M. M. (2007). Investigation of stability of slopes under drawdown conditions. *Computers and Geotechnics*, 34(2), 81–91. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2006.10.004>
- [28] Heitzler, M., Lam, J. C., Hackl, J., Adey, B. T., & Hurni, L. (2017). GPU-Accelerated Rendering Methods to Visually Analyze Large-Scale Disaster Simulation Data. *Journal of Geovisualization and Spatial Analysis*, 1(1–2), 3. <https://doi.org/10.1007/s41651-017-0004-4>
- [29] Luino, F., De Graff, J., Roccati, A., Biddoccu, M., Cirio, C. G., Faccini, F., & Turconi, L. (2019). Eighty Years of Data Collected for the Determination of Rainfall Threshold Triggering Shallow Landslides and Mud-Debris Flows in the Alps. *Water*, 12(1), 133. <https://doi.org/10.3390/w12010133>
- [30] Şahin, C., & Sipahioğlu, Ş. (2003). Doğal Afetler ve Türkiye. *Gunduz Egitim ve Yay.*
- [31] Duman, T. Y., Çan, T., Emre, Ö., Keçer, M., Doğan, A., Ateş, Ş., & Durmaz, S. (2005). Landslide inventory of northwestern Anatolia, Turkey. *Engineering Geology*, 77(1–2), 99–114. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.08.005>
- [32] MGM, Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Zonguldak İli Hava Durumu, <http://www.mgm.gov.tr> (Ocak 2020)
- [33] Meunier, P., Hovius, N., & Haines, J. A. (2008). Topographic site effects and the location of

earthquake induced landslides. *Earth and Planetary Science Letters*, 275(3–4), 221–232. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.07.020>

[34] Ketin, I. (1983). The overview of the geology of Turkey. Istanbul Technical University, Mining Faculty Special Publications.

[35] Okay, A. I., & Nikishin, A. M. (2015). Tectonic evolution of the southern margin of Laurasia in the Black Sea region. *International Geology Review*, 57(5–8), 1051–1076. <https://doi.org/10.1080/00206814.2015.1010609>

[36] Okay, A. I., Altiner, D., Sunal, G., Aygöl, M., Akdoğan, R., Altiner, S., & Simmons, M. (2018). Geological evolution of the Central Pontides. Geological Society, London, Special Publications, 464(1), 33–67. <https://doi.org/10.1144/SP464.3>

[37] Agan, C. (2009). Farklı Geoteknik Yöntemlerin Heyelan Analizlerinde Kullanımı Ve Karşılaştırmalı Analiz: Zonguldak İli Kozlu İlçesinde Örnek Bir Çalışma. Doktora Tezi.

[38] Bacak, G., & Yilmazer, S. (2011). The Petrographical-Geochemical Properties and Industrial Availability of the Karadeniz Ereğli Andesites (Zonguldak). *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 1(1).

[39] Fırat, O. (2005). 12 Kasım Düzce Depreminin makrosismik araştırması, Y. Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 71 sayfa.

[40] Newmark, N. M. and Hall, W.J. (1982). Earthquake spectra and design. EERI Monograf, 103 pp. Berkeley, California.

[41] Abrahamson, N. A. and Litehiser, J. J. (1989). Attenuation of vertical peak acceleration. *BSSA.*, 79 (3), 549–580.

[42] Ambraseys, N. ve Douglas, J., (2000). Reappraisal of the effect of vertical ground motions on response. ESEE Report 00-4. Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College, London.

[43] Kramer, S. L. (1996). Geoteknik deprem mühendisliği. (Çeviren: Kayabalı, K. 2003) Gazi Kitabevi, 708 s., Ankara.

[44] Demirtaş, R., Erkmen, C., Yaman, M. (2000). 12 Kasım Düzce Depremi Raporu” Editörler: Bülent Özmen ve Günruh Bağcı, Yüzey Kırık Geometrisi, Atım Miktarı Dağılımı ve Gelecek Deprem Potansiyeli. T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara.,61-100s

[45] AFAD, 2020. www.afad.gov.tr, erişim tarihi 05/01/2020

[46] Chen, S.-H. (2019). Computational Geomechanics and Hydraulic Structures. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-8135-4>

[47] Brinkgreve, R., Kumarswamy, S. ve Swolfs, W. (2017). PLAXIS Manual, Delft: Delft University of Technology.

[48] Zienkiewicz, O. (1977). The Finite Element Method (3rd.). McGraw-Hill.

[49] Schanz, T. (2007). Experimental Unsaturated Soil Mechanics. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/3-540-69873-6>

[50] Biot, M. A. (1955). Theory of Elasticity and Consolidation for a Porous Anisotropic Solid. *Journal of Applied Physics*, 26(2), 182–185. <https://doi.org/10.1063/1.1721956>

[51] Wang, Z., & Mei, G. (2012). Numerical Analysis of Seismic Performance of Embankment Supported by Micropiles. *Marine Georesources & Geotechnology*, 30(1), 52–62. <https://doi.org/10.1080/1064119X.2011.572580>