4. Ulusal
Genç Geoteknik Mühendisleri Sempozyumu

14 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

GGM4

DARBE YÜKLERİ ALTINDA EPS GEOKÖPÜK TAMPON TABAKASININ SAYISAL ANALİZİ

NUMERICAL ANALYSIS OF EPS GEOFOAM CUSHION LAYER UNDER IMPACT LOADS

Mert Can ÖZTÜRK[1], Burak EVİRGEN[2], Bekir Tuna KAYAALP[3]

ÖZET

Kaya koruma galerilerinde, kaya düşmesinin oluşturduğu darbe yükü altında yapısal güvenliği sağlamak amacıyla tampon tabakalar kullanılmaktadır. Genleştirilmiş polistiren (EPS) geoköpük yüksek deformasyon kapasitesi ve düşük birim hacim ağırlığı ile kaya koruma galerine yönelik güncel bir uygulama olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışmada, laboratuvar ölçekli darbe deneylerini temsil edecek şekilde üç boyutlu sayısal modeller oluşturulmuş ve farklı yoğunluğa sahip EPS geoköpük tabakaların darbe yükleri altındaki davranışı incelenmiştir. ABAQUS/CAE yazılımı ile yapılan sayısal analizlerde, EPS geoköpük tampon tabakalarının yüzeyine düşen kayayı temsil etmek üzere 50 kg kütleye sahip küresel çarpma elemanı, yalnızca yer çekimi etkisi altında EPS geoköpük yüzeyine düşürülmüştür. Farklı yoğunluklara sahip EPS geoköpük tampon tabakalarında darbe yükleri neticesinde meydana gelen düşey deformasyonlar ve gerilme dağılımları değerlendirilmiştir. Sayısal analiz sonuçları EPS yoğunluğunun tampon tabakasının yalnızca darbe enerjini dağıtma konusunda etkili olmadığını aynı zamanda darbe sonrası tekrar kullanılabilirliği üzerinde de belirleyici rol oynadığını göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: *EPS Geoköpük, Kaya Düşmesi, Tampon Tabaka, Sonlu Elemanlar Metodu*

ABSTRACT

Buffer layers are used in rockfall protection galleries to enhance structural safety under impact loads caused by falling rocks. Because of its low unit weight and high deformation capacity, expanded polystyrene (EPS) geofoam has become a contemporary solution for rockfall protection galleries. In this study, three-dimensional numerical models were developed to represent laboratory-scale impact conditions, and the behavior of EPS geofoam layers with different densities under impact loading was investigated. In the numerical simulations performed using ABAQUS/CAE, the falling rock was modeled as a 50 kg rigid spherical impact element striking the surface of EPS geofoam buffer layers within the influence of gravity. EPS geofoam buffer layers with different densities were evaluated in terms of vertical deformation and stress distribution under impact loading. The numerical analysis results indicate that EPS density is not only effective in dissipating the impact energy within the buffer layer but also plays a decisive role in determining the post-impact reusability of the buffer system.

Keywords: *EPS Geofoam, Rockfall, Cushion Layer, Finite Element Analysis*

[1] Arş. Gör., Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, mertcan.ozturk@ibu.edu.tr (Sorumlu Yazar)
[2] Doç. Dr., Eskişehir Teknik Üniversitesi, burakevirgen@eskisehir.edu.tr
[3] Dr. Öğr. Üyesi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, btk@eskisehir.edu.tr

1. GİRİŞ

Kaya düşmeleri; özellikle dik yamaçlarda ve dağlık arazilerde, yerçekimi veya sismik kuvvetlerin etkisiyle kaya kütlelerinin kopması ve yamaç aşağı hareket etmesini içeren doğal tehlikelerdir (Akın vd., 2020; Dorren vd., 2003; Volkwein vd., 2011). Bu olayların ani şekilde gerçekleşmesi; yerleşim yerleri, altyapı ve ekosistemler için ciddi bir tehdit oluşturmakta; can kayıplarına, ekonomik zararlara ve uzun vadeli çevresel hasarlara yol açabilmektedir (Akın vd., 2020; Collins ve Stock, 2016; Jaboyedoff vd., 2005). Karayolları, demiryolları ve tünellerin sıklıkla dik ve dar arazilerden geçmesi nedeniyle özellikle ulaşım koridorları kaya düşmelerine karşı savunmasızdır (Bostjančić ve Pollak, 2020; Carlà vd., 2019; Cignetti vd., 2021) (Şekil 1). Demiryolu hatlarına ulaşan kaya blokları, operasyonları aksatabilir, raylara zarar verebilir veya ölümcül kazalara neden olabilir. Öte yandan uzun süreli kapanmalar, yolcu ve yük taşımacılığında önemli lojistik ve ekonomik aksamalara yol açabilir (Bostjančić ve Pollak, 2020; Macciotta vd., 2017).



Şekil 1. Kaya düşmeleri ve ulaştırma altyapısı üzerindeki etkisi (Ali vd., 2021)

Türkiye; jeolojik yapısı, engebeli topografyası, sismik hareketliliği, iklim koşulları ve insan faaliyetleri nedeniyle kaya düşmelerine karşı hassasiyet arz eden bir konumdadır. AFAD ve AYDES istatistiklerine göre, heyelanlar ve kaya düşmeleri, ülkedeki etkileri bakımından doğal tehlikeler arasında ikinci sırada yer almaktadır (Akın vd., 2020). Özellikle Doğu Anadolu, Karadeniz ve Akdeniz bölgelerindeki dik yamaçlar boyunca sıkça görülen kaya düşmeleri, yolların kapanmasına, trafiğin aksamasına ve can kayıplarına yol açabilmektedir. Mevcut KGM kayıtları ve önceki çalışmalar, tekrarlayan donma-çözülme döngülerinin çatlaklı kaya kütlelerini gevşetmesi nedeniyle kış aylarında kaya düşmesi faaliyetinin arttığını ifade etmektedir (Anaçali ve Şirin, 2015; Collins ve Stock, 2016).

Kaya düşmesi koruma galerileri (Şekil 2), özellikle kaynak bölgesi ile risk altındaki bölgenin arasındaki mesafenin alternatif önlem sistemleri için yetersiz kaldığı durumlarda, altyapıyı korumaya yönelik etkili bir mühendislik önlemi olarak öne çıkmaktadır (Akın vd., 2020; Vogel vd., 2009). Son dönemdeki gelişmeler bu yapıların enerji sönümleme kapasitesini yaklaşık 10.000 kJ seviyesine çıkarmış olsa da geleneksel galeri sistemlerinde zamanla yapısal hasarlar oluşabilmekte ve bu durum orta ve uzun vadede önemli ölçüde bakım gerektirebilmektedir (Vogel vd., 2009). Bu yapıların darbe performansı büyük ölçüde galeri çatısının üzerine yerleştirilen ve düşen blokların kinetik enerjisini sönümlemeye dayalı yastıklama tabakasına bağlıdır. Geleneksel yastıklama sistemleri sadece kum malzemeden oluşurken, güncel araştırmalar yapısal güvenliği arttırmak ve darbe etkisinin azaltılmasını amaçlayan yenilikçi sistemlere odaklanmaktadır (Ho vd., 2013; Vogel vd., 2009). Bu bağlamda, genleştirilmiş polistiren (EPS) geoköpük; düşük yoğunluğu, yüksek şekil değiştirme kapasitesi ve darbe enerjisini sönümleyip iletilen kuvvetleri azaltma yeteneği sayesinde umut verici bir yastıklama malzemesi olarak öne çıkmıştır.

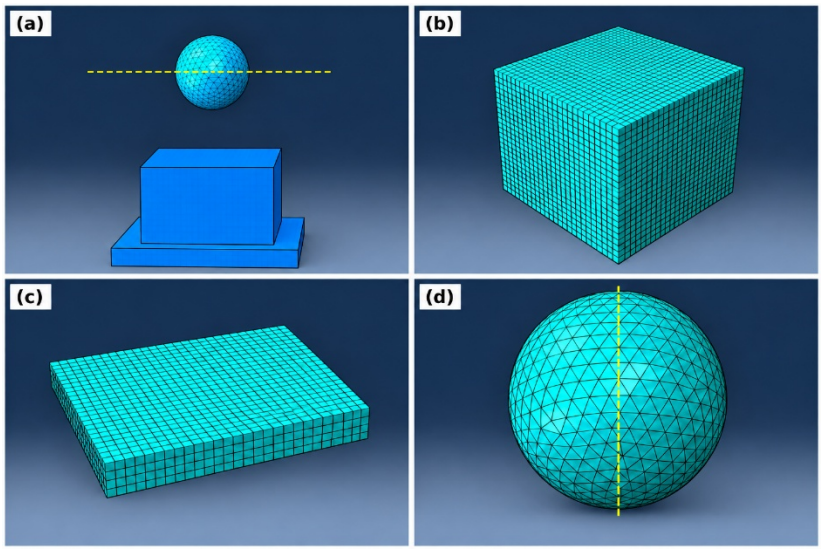
Bu çalışma, kapsamlı kaya düşmesi projesi kapsamında gerçekleştirilecek deneysel çalışmalara altyapı oluşturmak amacıyla, 60 × 60 × 60 cm boyutlarında ve iki farklı yoğunluğa sahip EPS geoköpükten oluşan deney sistemine, küresel formdaki 50 kg kütlenin düşürülmesini esas alan sayısal analizleri kapsamaktadır. Kaya koruma galerilerinde EPS yoğunluğunun enerji yutma ve kalıcı deformasyon üzerindeki etkilerinin birlikte değerlendirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. İki farklı EPS yoğunluğunu aynı darbe koşullarında karşılaştırarak galeri tampon tabakalarının malzeme seçimine sayısal bir temel sunulmuştur.



Şekil 2. Örnek bir kaya koruma galerisi (Green, 2016)

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Sayısal analizler, 50 kg kütleli küresel bir çarpma elemanının farklı yoğunluklardaki EPS geoköpük bloklar üzerine serbest düşmesini temsil edecek şekilde ABAQUS/CAE 2020 yazılımında gerçekleştirilmiştir (Şekil 3). Modelde EPS tabakası 600×600×600 mm, altındaki C30 beton plaka ise 800×800×150 mm boyutlarında oluşturulmuştur. Kayayı temsil eden çarpma elemanı 300 mm çapında küresel geometriye sahip olacak şekilde modellenmiştir. Kürenin alt noktası ile EPS üst yüzeyi arasındaki net düşme mesafesi 1000 mm olarak belirlenmiştir. Buna göre teorik çarpma enerjisi (E=mgh) bağıntısıyla 490,5 J, temas öncesi teorik çarpma hızı ise 4,43 m/s olarak hesaplanmıştır. Küreye başlangıç hızı uygulanmamış; hareket yalnızca serbest düşme biçiminde yerçekimi ivmesiyle sağlanmıştır.



Şekil 3. (a) Sayısal modelin genel görünümü, (b) EPS geoköpük bloğun sonlu eleman ağı, (c) beton plakanın sonlu eleman ağı ve (d) küresel çarpma elemanının sonlu eleman ağı.

EPS20 ve EPS30 geoköpüklerin doğrusal elastik başlangıç davranışları sırasıyla 6,0 ve 9,0 MPa elastisite modülleri ile temsil edilmiş, her iki malzeme için Poisson oranı 0.10 alınmıştır. EPS'nin ezilebilir ve basınca duyarlı hücresel yapısı, izotropik pekleşme kabulüne dayanan "Crushable Foam" modeliyle tanımlanmıştır. Karakteristik pekleşme davranışı basınç deneylerinden ve literatürden elde edilen akma gerilmesi-plastik şekil değiştirme çiftleriyle programa girilmiştir (Abdelrahman vd., 2008). C30 beton plaka ve küresel çarpma elemanı dâhil olmak üzere, modelde kullanılan malzemelerin temel özellikleri Tablo 1'de, EPS20 ve EPS30 için kullanılan pekleşme parametreleri ise Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 1. Malzeme parametreleri

Malzeme	**Yoğunluk (kg/m³)**	**Elastisite Modülü (MPa)**	**Poisson Oranı**
EPS20	20,0	6,0	0,10
EPS30	30,0	9,0	0,10
C30/37 Beton Plaka	2400,0	30000	0,20
Küre	3536,8	50000 (temsili)	0,25 (temsili)

Tablo 2. EPS20 ve EPS30 için modelde kullanılan pekleşme parametreleri

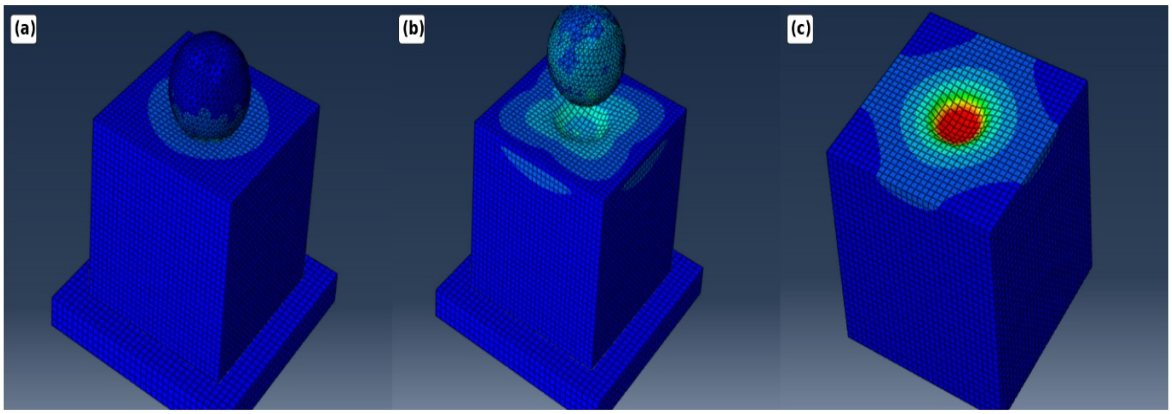
EPS20		**EPS30**	
Akma gerilmesi (MPa)	**Plastik şekil değiştirme**	**Akma gerilmesi (MPa)**	**Plastik şekil değiştirme**
0,040	0,0000	0,075	0,0000
0,045	0,0025	0,120	0,0067
0,065	0,0092	0,180	0,0300
0,100	0,0333	0,230	0,0744
0,130	0,0783	—	—

Çarpma problemi toplamda 0,60 s süren "Dynamic/Explicit" analiz adımı kullanılarak çözülmüştür. Küre-EPS ve EPS-beton etkileşimleri, normal yönde uygulanan sert temas formülasyonu ve 0,20 sürtünme katsayısı kullanan kayıplı teğetsel formülasyon ile genel temas algoritması aracılığıyla modellenmiştir. Beton plakanın alt yüzeyindeki üç öteleme serbestlik derecesi de tamamen kısıtlanırken, EPS bloğunun 600×600 mm iç boyutlarına sahip bir akrilik test kutusu içindeki sınırlamasını temsil etmek amacıyla karşıt yanal yüzeylere dik yer değiştirmeler kısıtlanmış ve düşey hareket serbest bırakılmıştır. EPS bloğu ve beton plakanın ağ modeli oluşturulurken sekiz düğümlü azaltılmış entegrasyonlu katı elemanlar kullanılmış, küre ise dört yüzlü katı elemanlarla oluşturulmuştur.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

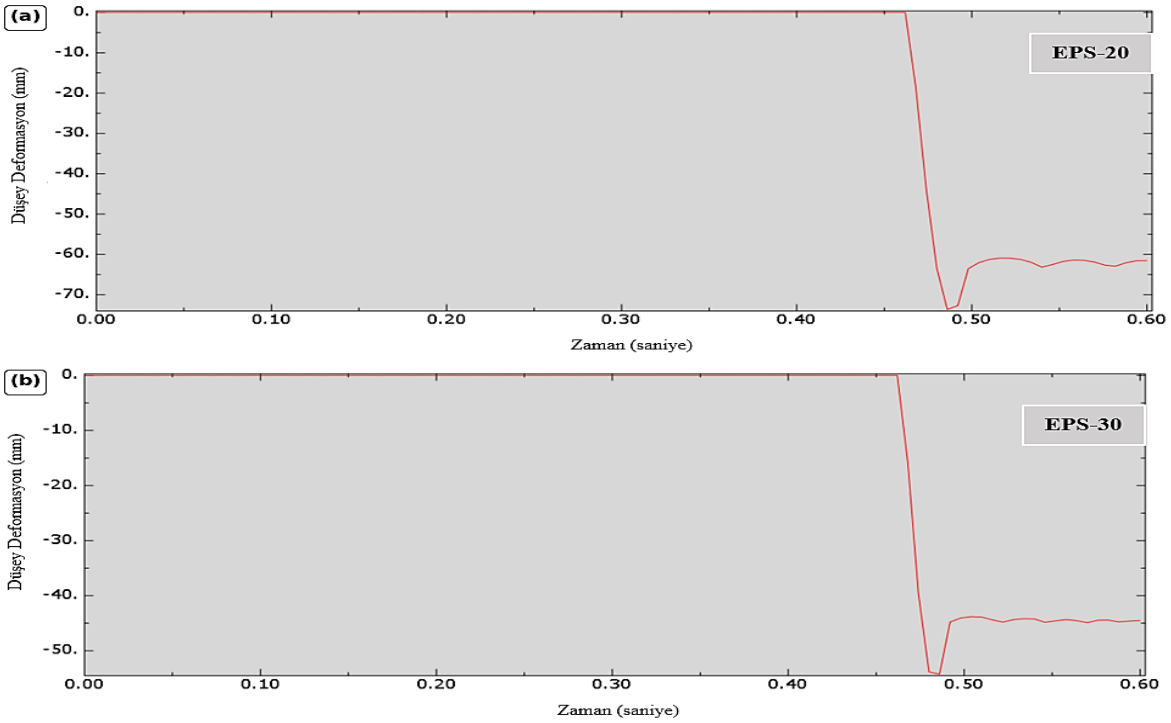
Sayısal analizlere göre, küresel kaya ile EPS yüzeyi arasındaki temas, çarpma bölgesinde belirgin bir lokal yer değiştirmeye ve gerilme yığılmasına yol açmıştır. Çarpma sürecinde EPS'nin hücresel yapısındaki ezilme ve plastik deformasyon nedeniyle kürenin kinetik

enerjisinin bir kısmı kaybolmuş; geriye kalan enerji ise kürenin geri sıçramasına ve sistem içinde elastik enerji alışverişine neden olmuştur. Temas ve penetrasyon aşamasındaki çarpma sonrasında kürenin geri sıçraması ve bunun sonucunda EPS yüzeyinde meydana gelen kalıcı deformasyon ile gerilme dağılımı Şekil 4'te gösterilmektedir. EPS yoğunluğunun çarpma davranışı üzerindeki etkisi, EPS20 ve EPS30 modellerinden elde edilen deformasyon, gerilme ve plastik enerji sonuçları karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.



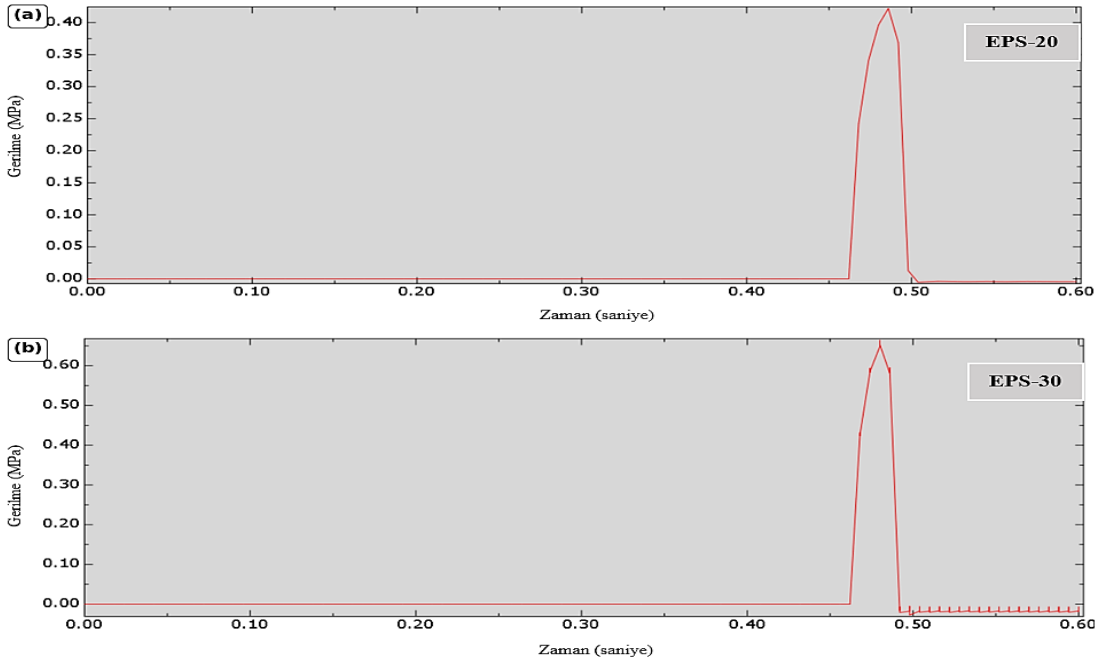
Şekil 4. EPS geoköpüğün darbe davranışı: (a) temas ve penetrasyon, (b) darbe sonrası geri sıçrama, (c) kalıcı deformasyon ve gerilme konturu.

Kürenin EPS yüzeyine temas etmesinin ardından her iki malzemede de düşey yer değiştirme hızla artmış; EPS20 ve EPS30 için maksimum değerler sırasıyla yaklaşık 74 mm ve 54 mm olarak tespit edilmiştir (Şekil 5). Çarpma sonrası geri sıçramanın ardından deformasyon EPS20 için yaklaşık 62 mm, EPS30 için ise 45 mm seviyelerinde dengelenmiştir. Bu durum her iki malzemede de önemli ölçüde kalıcı deformasyon meydana geldiğini göstermektedir. EPS30'un maksimum ve kalıcı deformasyon değerlerinin EPS20'nin sonuçlarına kıyasla yaklaşık %27 daha düşük olması, artan yoğunluk ve rijitliğin çarpma altındaki deformasyon direncini iyileştirdiğini ortaya koymaktadır. Çarpma sonrasında gözlemlenen kısmi salınımların, kürenin geri sıçraması neticesinde sistem içindeki geçici dinamik titreşimlerden kaynaklandığı düşünülmektedir. ASTM D6817/D6817M (2025) standardına göre EPS geoköpüklerin tasarımında, %1 birim deformasyon düzeyi elastik tasarım sınırı olarak kabul edilirken %5 ve %10 düzeyindeki değerler, yalnızca bazı özel uygulamalar için tercih edilmektedir. 600 mm yüksekliğindeki başlangıçtaki numune boyutu dikkate alındığında, EPS20 ve EPS30 için sırasıyla yaklaşık %10,3 ve %7,5 olarak belirlenen kalıcı birim şekil değiştirme düzeyleri söz konusu elastik sınırı aşmaktadır. Bu değerlendirme ile darbe bölgesinde kalıcı deformasyon geliştiğini doğrulanmaktadır.



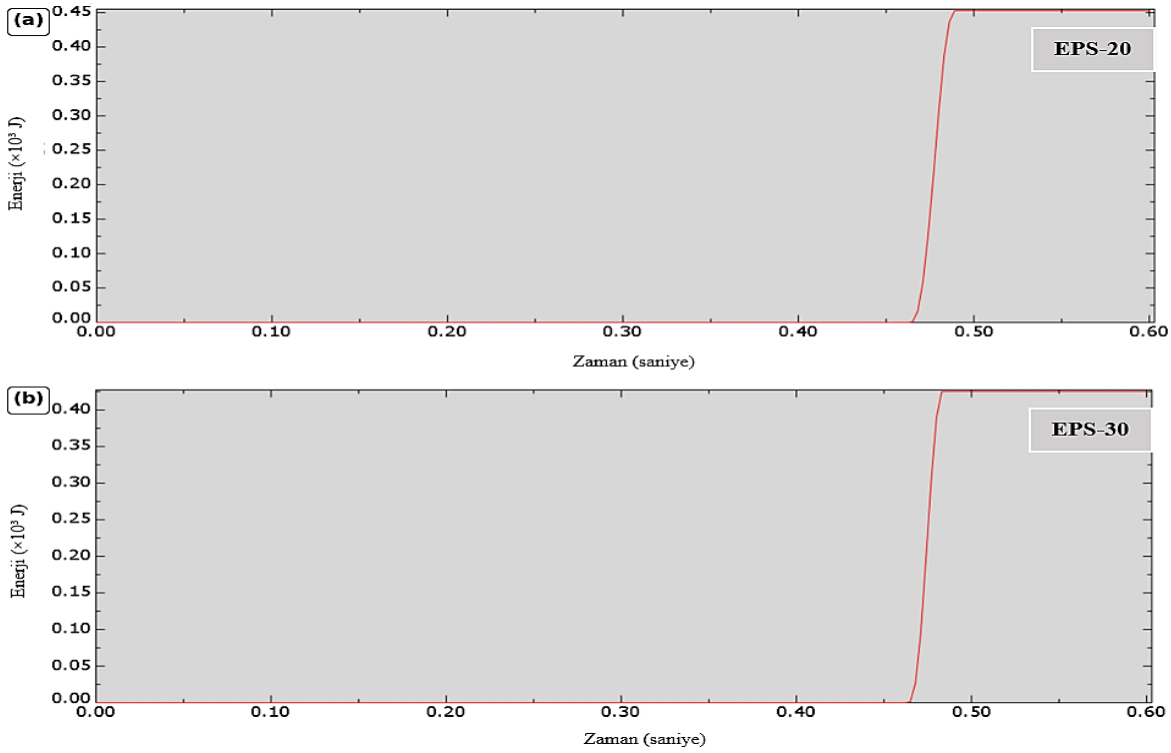
Şekil 5. Düşey deformasyonun zamana bağlı değişimi: (a) EPS20 ve (b) EPS30

Şekil 6'da görüldüğü üzere küre-EPS temasının ardından gerilme değerleri ani şekilde yükselmektedir. EPS20 ile EPS30 için sırasıyla yaklaşık 0,42 ve 0,65 MPa tepe gerilme değerlerine ulaşmıştır. EPS30'da oluşan maksimum gerilmenin EPS20'ye göre yaklaşık %55 daha yüksek olması, yoğunluk ve rijitlik artışıyla birlikte malzemenin darbeye karşı daha yüksek gerilme reaksiyonu verdiğini göstermektedir. Temasın sona ermesiyle oluşan gerilmeler hızla sönümlenerek sıfıra yaklaşmaktadır. Dolayısıyla, EPS30 kullanımında yoğunluk artışına paralel meydana gelen rijitlik artışıyla birlikte daha düşük şekil değiştirme ve daha yüksek tepe gerilmesi elde edilmiştir.



Şekil 6. Gerilmenin zamana bağlı değişimi: (a) EPS20 ve (b) EPS30

Darbe sonrasında plastik şekil değiştirmeye harcanan enerji EPS20'de 452,66 J ve EPS30'da ise 424,92 J düzeyine ulaşmıştır. Bu değerler başlangıç potansiyel enerjisinin sırasıyla yaklaşık %91,7 ve %85,6'sına karşılık gelmektedir (Şekil 7). EPS20'de plastik şekil değiştirmeye harcanan enerjinin EPS30'a göre 27,51 J daha yüksek olması, daha düşük rijitliğe sahip EPS20'nin darbe altında daha fazla ezilme ve kalıcı deformasyon göstermesiyle ilişkilendirilmiştir. EPS30 daha düşük plastik enerji yutmasına rağmen deformasyonu sınırlandırmış; kalan enerji ise elastik şekil değiştirme, kürenin geri sekme kinetiği, temas-sürtünme etkileri ve diğer enerji bileşenleri arasında dağılmıştır. EPS20 modelinde maksimum sıkışma anında iç enerjinin %83,14'ü plastik, %16,25'i elastik ve %0,61'i yapay enerjiden oluşmuş; kinetik ve sürtünme enerjileri sırasıyla 0,80 J ve 1,50 J düzeyinde kalmıştır. Benzer şekilde EPS30 modelinde maksimum sıkışma anında iç enerjinin %79,01'i plastik, %20,27'si elastik ve %0,72'si yapay enerjiden oluşmuş; kinetik ve sürtünme enerjileri sırasıyla 0,10 J ve 0,93 J düzeyinde kalmıştır.



Şekil 7. Plastik enerji yutma davranışı: (a) EPS20 ve (b) EPS30

4. SONUÇ

Bu çalışma, EPS geoköpük yoğunluğunun tampon tabakanın darbe enerjisini sönümleme biçimi, kalıcı deformasyon düzeyi ve darbe sonrası kullanılabilirliği üzerinde belirleyici olduğunu ortaya koymuştur. Elde edilen sonuçlar, kaya düşmesi gibi ani darbe etkisine maruz kalan koruma sistemlerinde EPS geoköpük seçiminin sayısal modelleme ile nicel olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir. Daha düşük yoğunluğa sahip EPS20, ezilme ve plastik şekil değiştirme yoluyla daha yüksek enerji yutma kapasitesi sergilemiş; ancak meydana gelen yüksek kalıcı deformasyon, malzemenin tekrarlı darbeler karşısındaki kullanılabilirliğinin sınırlanabileceğini göstermiştir. EPS30 ise daha düşük deformasyon geliştirerek bütünlüğünü daha iyi korumasına rağmen, yüksek rijitliği nedeniyle darbe etkisinde daha yüksek gerilmelerin oluşmasına neden olmuştur. Dolayısıyla EPS yoğunluğu seçiminde yalnızca sönümlenen enerji miktarı değil, izin verilebilir kalıcı deformasyon,

aktarılan gerilme, beklenen darbe sayısı ve darbe sonrasında bakım veya değiştirme gereksinimi birlikte değerlendirilmelidir. Bununla birlikte, EPS'nin tek başına tampon tabaka olarak kullanılması yerine üzerine kum, kırmataş, geri dönüştürülmüş agrega veya benzeri granüler malzemelerin yerleştirildiği kompozit sistemlerin geliştirilmesi önerilmektedir. Kurulan sayısal model, farklı darbe enerjisi ve katman konfigürasyonları için genişletilebilir yapıdadır; ilerleyen çalışmalarda deneysel verilerle desteklenmesi planlanmaktadır. Bu yaklaşım, sistemin tekrarlı darbeler karşısındaki performansının iyileştirilmesi açısından önem taşımaktadır.

TEŞEKKÜR

"Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından kabul edilen 125M462 numaralı 1001 projesi kapsamında desteklenmiştir."

KAYNAKLAR

Abdelrahman, G. E., Kawabe, S., Tsukamoto, Y. ve Tatsuoka, F. (2008), "Small-Strain Stress-Strain Properties of Expanded Polystyrene Geofoam", Soils and Foundations, 48(1), 61–71.

Akın, M., Dinçer, İ. ve Orhan, A. (2020), "KAYA DÜŞMELERİNDEN KAYNAKLI AFETLERİN DEĞERLENDİRİLMESİNE YÖNELİK TEKNİK KILAVUZ", Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD). www.afad.com.tr

Ali, S., Haider, R., Abbas, W., Basharat, M. ve Reicherter, K. (2021), "Empirical assessment of rockfall and debris flow risk along the Karakoram Highway, Pakistan", Natural Hazards, 106, 2437-2460.

Anaçali, İ. ve Şirin, A. (2015), "Heyelan tanımlama ve veri oluşturma kılavuzu", Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM).

ASTM D6817M-17 (2025), "Standard specification for rigid cellular polystyrene geofoam".

Bostjančić, I. ve Pollak, D. (2020), "Rockfall threat assessment along railways in carbonate rocks in Croatia", Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 79, 3921–3942.

Carlà, T., Nolesini, T., Solari, L., Rivolta, C., Dei Cas, L. ve Casagli, N. (2019), "Rockfall forecasting and risk management along a major transportation corridor in the Alps through ground-based radar interferometry", Landslides, 16(8), 1425–1435.

Cignetti, M., Godone, D., Bertolo, D., Paganone, M., Thuegaz, P. ve Giordan, D. (2021), "Rockfall susceptibility along the regional road network of Aosta Valley Region (northwestern Italy)", Journal of Maps, 17(3), 54–64.

Collins, B. D. ve Stock, G. M. (2016), "Rockfall triggering by cyclic thermal stressing of exfoliation fractures", Nature Geoscience, 9(5), 395–400.

Dorren, L. K. A. (2003), "A review of rockfall mechanics and modelling approaches", Progress in Physical Geography, 27(1), 69–87.

Green, R. (2016), "Rockfall: Design considerations for passive protection structures", New Zealand Geotechnical Society Guidelines.

Ho, T. S., Takasfita, N. ve Masuya, H. (2013), "Experimental study concerning impact characteristics by collision of weight on sand cushion over steel beam", GEOMATE Journal, 4, 471–476.

Jaboyedoff, M., Dudt, J. P. ve Labiouse, V. (2005), "An attempt to refine rockfall hazard zoning based on the kinetic energy, frequency and fragmentation degree", Natural Hazards and Earth System Sciences, 5, 621–632.

Macciotta, R., Martin, C. D., Cruden, D. M., Hendry, M. ve Edwards, T. (2017), "Rock fall hazard control along a section of railway based on quantified risk", Georisk, 11(3), 272–284.

Vogel, T., Labiouse, V. ve Masuya, H. (2009), "Rockfall protection as an integral task", Structural Engineering International: Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE), 19(3), 304–312.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama
E	Çarpma enerjisi (J)
m	Düşen elemanının kütlesi (kg)
g	Yerçekimi ivmesi (m/s²)
h	Net düşme mesafesi (m)