Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği
20. Ulusal Konferansı

15-16 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

FARKLI ŞEKİLLERDE SIKIŞABİLİR EPS GEOFOAM TABAKASININ İSTİNAT DUVARININ SİSMİK PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

EFFECTS OF DIFFERENT SHAPES OF COMPRESSIBLE EPS GEOFOAM LAYER ON THE SEISMIC PERFORMANCE OF RETAINING WALLS

Ayşe EDİNÇLİLER[1], Bilge Sultan DEMİRTAŞ[2]

ÖZET

İstinat duvarı arkasında EPS geofoam sıkışabilir tabaka "yastık" kullanımı, duvar boyunca etki eden deprem kaynaklı kuvvetleri ve kalıcı yer değiştirmeleri azaltarak bu yapıların sismik performansını iyileştiren yenilikçi ve etkili bir yöntemdir. EPS geofoam malzemeleri; düşük birim hacim ağırlığı, yüksek titreşim sönümleme kapasitesi, sıkışabilirlik ve düşük yoğunluk gibi belirgin özelliklere sahiptir. Bu çalışmada, istinat duvarının arkasına farklı şekillerde sıkışabilir EPS geofoam yerleştirilmesinin duvarın sismik performansı üzerindeki etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Sayısal analizler, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak PLAXIS 2D programı ile gerçekleştirilmiştir. Yastık malzemesi olarak 10 kg/m³ yoğunluğa ve iki farklı şekle sahip EPS geofoam kullanılmıştır. Yastık şeklinin etkileri, gerçek bir deprem kaydı altında değerlendirilmiştir. Analiz sonuçları yastıklı ve yastıksız durumlar için karşılaştırılmıştır. Yastık şekillerinin istinat duvarının sismik performansının iyileştirilmesinde önemli bir rol oynadığı belirlenmiştir.
Anahtar Kelimeler: *İstinat duvarı, EPS Geofoam yastık, Sismik performans, PLAXIS 2D.*

ABSTRACT

The use of EPS geofoam layer "cushion" behind retaining walls is an innovative and effective approach to improve seismic performance of these structures by decreasing permanent displacements and earthquake-induced forces acting along the wall. EPS geofoam materials possess distinctive properties such as low unit weight, high vibration damping capacity, compressibility, and low density. This study aims to investigate the effects of placing compressible EPS geofoam in different configurations behind a retaining wall on the seismic performance of the wall. The numerical study has been conducted by Finite Element Method using PLAXIS 2D. The EPS geofoam with a density of 10 kg/m^3 and two different shapes are used as cushion materials. The effects of cushion shapes are evaluated under real earthquake motion. The results are examined by comparing the cushioned and uncushioned cases. It is observed that the shape of cushion has a significant role in improving seismic performance of the retaining wall.
Keywords: *Retaining wall, EPS Geofoam cushion, Seismic performance, PLAXIS 2D.*

1. GİRİŞ

EPS geofoam, geoteknik mühendisliğinde hafif dolgu, ısı yalıtımı, titreşim sönümleme ve sıkışabilir dolgu gibi birçok uygulamada kullanılan polimer esaslı bir geosentetik malzemedir (Horvath, 1994). Düşük birim hacim ağırlığı, yüksek sıkışabilirliği, titreşim

[1] Prof. Dr., Boğaziçi Üniversitesi, aedinc@bogazici.edu.tr (Sorumlu yazar)
[2] Arş. Gör., Boğaziçi Üniversitesi, bilge.demirtas@bogazici.edu.tr

sönümleme kapasitesi, suya karşı dayanıklılığı ve kolay uygulanabilirliği sayesinde son yıllarda geoteknik mühendisliği uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmeye başlanmıştır.

Geofoam, geleneksel geosentetiklerin yerine getiremediği bazı işlevleri gerçekleştirebilmekte veya diğer geosentetiklerle birlikte kullanılarak daha ekonomik ve etkin mühendislik çözümleri sunmaktadır (Horvath, 1994). Bu işlevlerden biri olan sıkışabilir dolgu, özellikle zemin veya yapı hareketlerin mobilize edilmesi ve statik ile dinamik yükler altında oluşan zemin basınçların azaltılması amacıyla kullanılmaktadır. Bu kapsamda EPS geofoam, istinat duvarı ile dolgu zemini arasına yerleştirildiğinde kolay deforme olma özelliği sayesinde duvara aktarılan yatay zemin basınçlarını önemli ölçüde azaltabilmekte ve özellikle deprem yükleri altında duvar performansının iyileştirilmesine katkı sağlamaktadır (Horvath, 1997).

EPS geofoam malzemesinin, istinat duvarlarının arkasında hafif ve sıkışabilir yastık tabakası olarak kullanımının, statik ve dinamik yükleme koşullarında duvara aktarılan yanal kuvvetlerin ve meydana gelen kalıcı yer değiştirmelerin azaltılmasında etkili olduğunu ortaya koyan pek çok çalışma vardır (Zarnani ve Bathurst, 2007; Bathurst vd., 2007; Athanasopoulos vd., 2007; Zarnani ve Bathurst, 2009; Ertuğrul ve Trandafir, 2011; Athanasopoulos-Zekkos vd., 2012; Ertuğrul vd., 2012; Ertuğrul ve Özkan, 2012; Ertuğrul ve Trandafir, 2013; Ertuğrul ve Trandafir, 2014; Demirtas, 2023; Edinçliler ve Demirtaş, 2026a; Edinçliler ve Demirtaş, 2026b). Yastık tabakasının sağladığı bu etkinliğin, malzemenin kalınlığı ve yoğunluğunun yanı sıra uygulama yapılan duvarın yüksekliği ile uygulanan yer hareketinin özelliklerine (frekans ve genlik) bağlı olarak değiştiği belirlenmiştir.

EPS geofoamın istinat duvarı arkasında sıkışabilir yastık tabakası olarak kullanıldığı uygulamalarda, tabakanın geometrisi duvarın sismik performansını etkileyen parametrelerden biridir. Athanasopoulos vd. (2007) ve Athanasopoulos-Zekkos vd. (2012) çalışmalarında, maksimum kalınlığın duvarın üst kısmında bulunduğu üçgen geometrinin en uygun performansı gösterdiğini, ancak bu geometri ile sabit kalınlıklı yastık tabakası arasındaki farkın oldukça küçük olduğu belirtilmiştir. Bu nedenle, yapım kolaylığı ve saha uygulamalarındaki pratikliği dikkate alındığında, istinat duvarı yüksekliği boyunca sabit kalınlığa sahip EPS geofoam yastık tabakalarının kullanılması önerilmektedir.

Bu çalışmada, istinat duvarı arkasında sıkışabilir yastık tabakası olarak kullanılan EPS geofoam geometrisinin duvarın sismik performansı üzerindeki etkileri nümerik olarak incelenmiştir. Bu kapsamda, 10 kg/m³ yoğunluğa sahip EPS geofoam, duvar arkasına iki farklı geometride yerleştirilmiş ve analizler PLAXIS 2D programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan nümerik modeller gerçek bir deprem kaydı kullanılarak analiz edilmiş ve farklı yastık geometrilerinin etkinliği, yastıksız referans model ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. EPS geofoam geometrisinin sismik davranış üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla istinat duvarının tepe noktasındaki ivme, spektral ivme ve yer değiştirme tepkileri incelenmiştir.

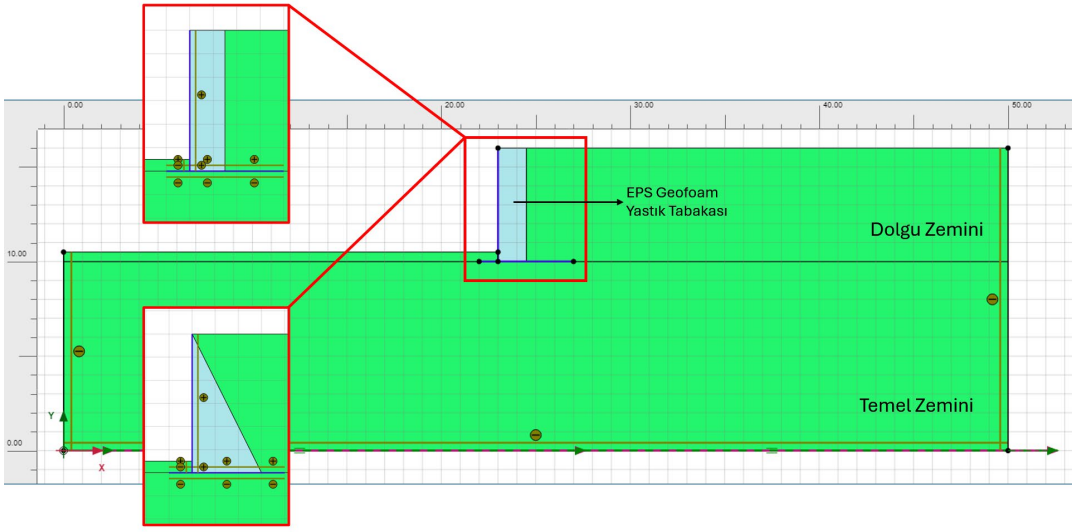
2. NÜMERİK MODEL

Nümerik analizler PLAXIS 2D programı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Analizlerde, düzlem şekil değiştirme (plane strain) koşulları esas

alınmış ve sonlu eleman ağı 15 düğümlü üçgen elemanlar kullanılarak oluşturulmuştur. Ayrıca, dinamik analizlerde modelin düşey sınırlarında, dışarı doğru yayılan sismik dalgaların sınırdan yapay olarak yansıyarak tekrar zemin ortamına dönmesini önlemek amacıyla serbest alan (free-field) sınır koşulları kullanılmıştır.

Çalışma kapsamında üç farklı nümerik model oluşturulmuştur. Bu modellerden biri, 6 metre yüksekliğindeki istinat duvarının yalnızca kum dolgusunu desteklediği yastıksız durumu temsil ederken, diğer modellerde duvar arkasına farklı şekillere (dörtgen ve üçgen) sahip EPS geofoam yastık tabakaları yerleştirilerek oluşturulmuştur. Seçilen deprem hareketini modele uygulamak amacıyla, dinamik analizlerde model tabanına x-doğrultusunda öntanımlı yatay yer değiştirmeler (prescribed horizontal displacements) uygulanmıştır.

Şekil 1'de yastık tabakası bulunan nümerik modeller gösterilmiş ve farklı şekillerde yerleştirilmiş EPS geofoam yastık tabakaları belirtilmiştir.



Şekil 1. Yastık Tabakası Bulunan Nümerik Model ve Farklı Şekillerde Yerleştirilen Yastık Tabakaları.

2.1. Malzemeler ve Deprem Kaydı

Nümerik modelde dolgu ve temel zemini olarak "Silivri Kumu" olarak adlandırılan kuru kum kullanılmıştır. PLAXIS 2D analizlerinde kumun davranışı pekleşen zemin (Hardening Soil) modeli kullanılarak modellenmiştir. Yastık tabakası ise, 10 kg/m³ yoğunluğa sahip EPS geofoam kullanılarak oluşturulmuştur. EPS geofoam yastık tabakasının kalınlığı 1.5 m olarak seçilmiş olup, bu değer istinat duvarı gövde yüksekliğinin %25'ine karşılık gelmektedir. Bu elemanların özellikleri Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1. Silivri Kumu ve EPS Geofoam Özellikleri.

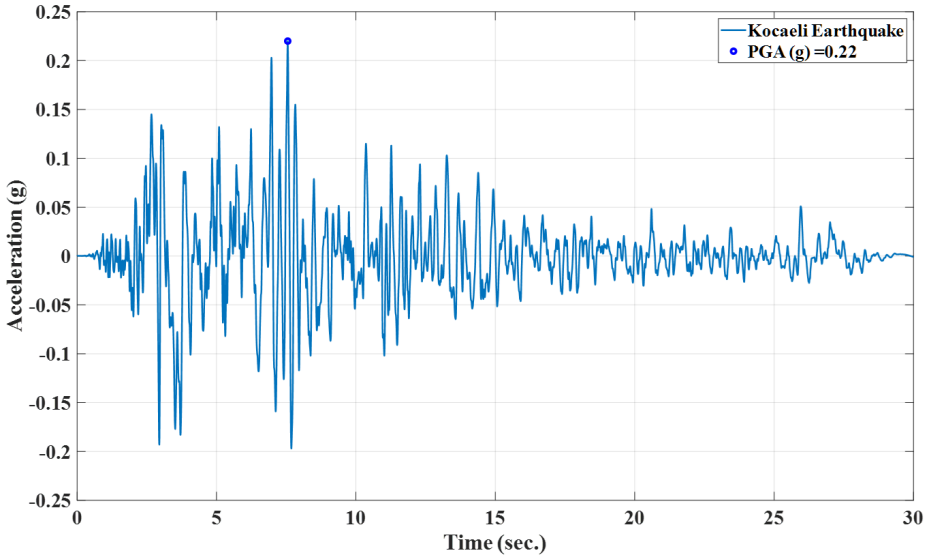
Parametreler	Silivri Kumu	EPS Geofoam
Malzeme Türü	Pekleşen Zemin	Lineer Elastik
γ (kN/m^3)	16.5	0.10
c (kN/m^2)	0	-
Ø	41.48°	-
E (kN/m^2)	22500	3000

Betondan oluştuğu kabul edilen duvar modeli, PLAXIS 2D programında plaka elemanı olarak lineer elastik şeklinde modellenmiştir. Duvar gövde yüksekliği 6 m, taban genişliği ise 5 m olarak belirlenmiştir. Betonun birim hacim ağırlığı ve elastisite modülü sırasıyla 24 kN/m³ ve 70 GPa olarak alınmıştır. Bu parametreler kullanılarak plaka elemanın birim ağırlığı (w), eksenel rijitliği (EA), eğilme rijitliği (EI) ve duvar gövde kalınlığı (d) hesaplanmış ve modele tanımlanmıştır. Hesaplanan değerler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Duvar Modeli için Kullanılan Plaka Özellikleri.

Parametreler	Plaka Özellikleri
Malzeme Türü	Elastik
w (kN/m/m)	8.4
EA (kN/m)	7000000
EI (kN/m2/m)	71460
d (m)	0.35

Nümerik model, Şekil 2'de gösterilen 1999 Kocaeli Depremi İzmit istasyonu kuzey-güney bileşeni kullanılarak dinamik olarak analizler gerçekleştirilmiştir.



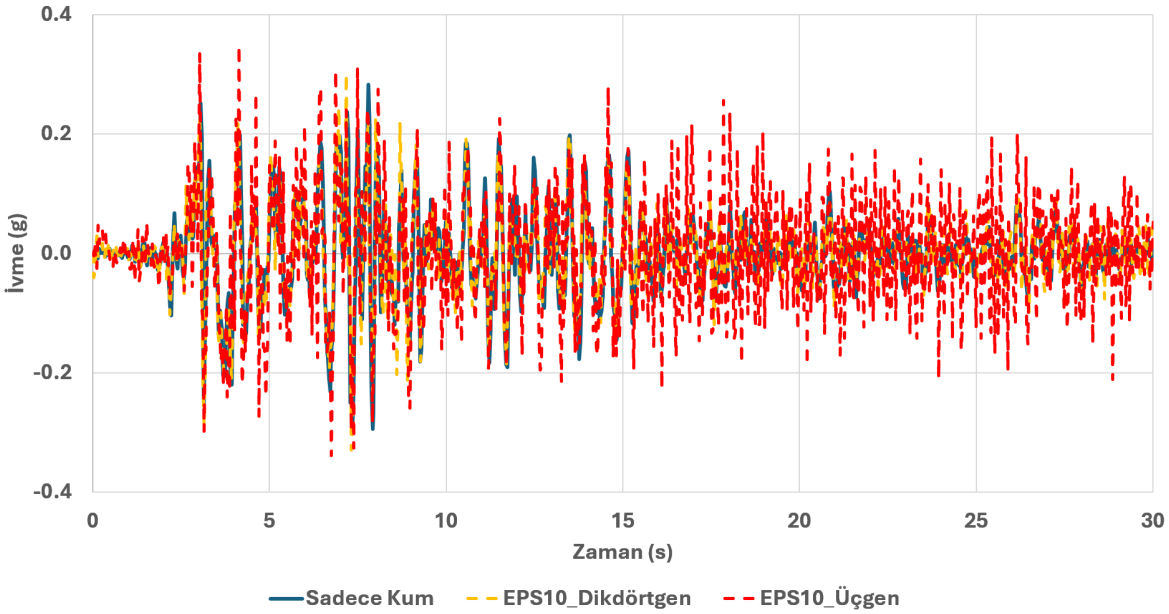
Şekil 2. 1999 Kocaeli Depremi İvme-Zaman Grafiği.

3. NÜMERİK ÇALIŞMA SONUÇLARI

EPS geofoam yastık tabakası şeklinin istinat duvarının sismik performansı üzerindeki etkinliğini değerlendirmek amacıyla, duvar tepe noktasındaki ivme ve yer değiştirme tepkilerinin yanı sıra duvar yüksekliği boyunca oluşan relatif yer değiştirmeler belirlenmiş ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır. 1999 Kocaeli Deprem kaydı altında gerçekleştirilen sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar aşağıdaki bölümlerde detaylı olarak incelenmiştir.

Kocaeli Deprem hareketi altında duvarın tepe noktasında elde edilen ivme-zaman geçmişleri Şekil 3'te karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir. "Mavi sürekli çizgi" yastıksız durumu, "kesikli çizgiler" ise EPS geofoam yastık tabakası kullanılan durumları temsil etmektedir. Yalnızca kum dolgunun bulunduğu (yastıksız) durumda duvar tepe noktasındaki maksimum ivme değeri 0.30g olarak belirlenmiştir. Duvar arkasına farklı şekillerde yastık tabakasının yerleştirilmesiyle ivme değerlerinde sınırlı bir artış meydana geldiği gözlemlenmiştir. "Dörtgen" ve "üçgen yastık" tabakalarının duvar arkasına

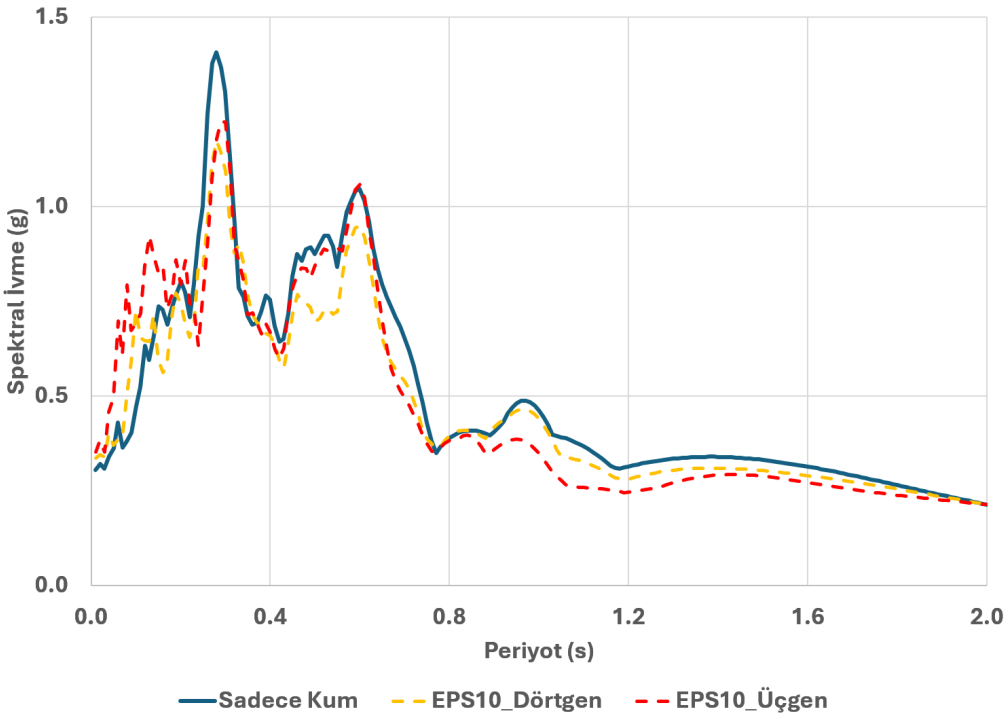
yerleştirilmesiyle, maksimum ivme değerlerinin sırasıyla 0.33g ve 0.35g olduğu bulunmuştur. Bu etkinin kullanılan deprem hareketinin özellikleriyle ilgili olabileceği düşünülmüştür.



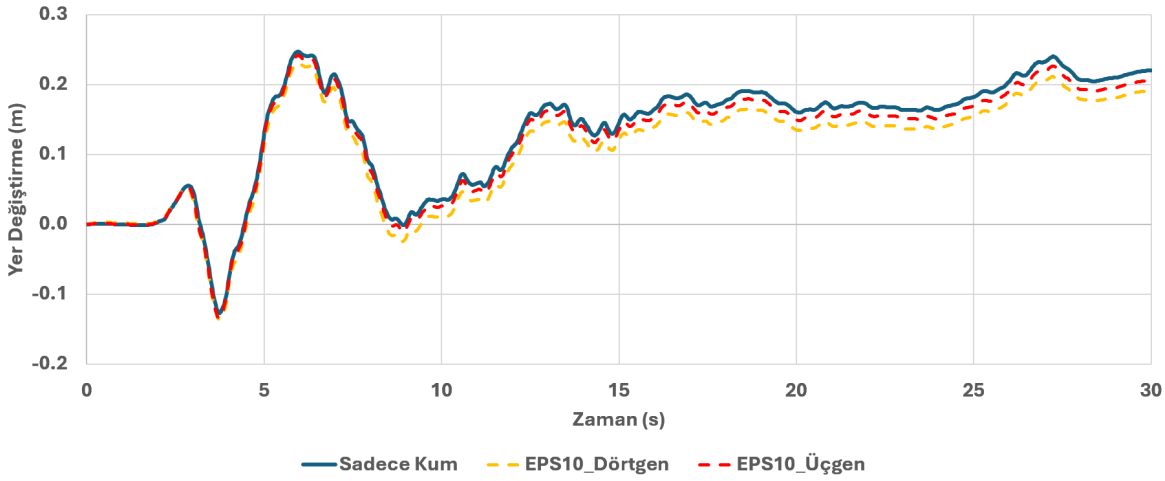
Şekil 3. 1999 Kocaeli Deprem hareketi altında, duvarın en üst noktasındaki ivme-zaman grafiklerinin "yastıksız" ve "yastıklı durumlar" için karşılaştırılması.

Şekil 4'te, Kocaeli Deprem hareketi altında spektral ivme değerlerindeki azalma net bir şekilde gözlenmektedir. "Yastıksız durumda" maksimum spektral ivme değeri 1.41g olarak elde edilirken, "Dörtgen ve Üçgen yastık tabakaları" için bu değerler sırasıyla 1.17g ve 1.22g olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, EPS geofoam yastık tabakasının maksimum spektral ivmenin azaltılmasında etkili olduğunu gösterirken, dörtgen yastık tabakasının %16.7 ve üçgen yastık tabakasının %15.6 mertebelerinde bir azalışa neden olduğu belirlenmiştir. Bu durumda yastık tabakasının şeklinin sismik performans üzerinde etkili olduğu ve dörtgen şeklinin daha iyi performans gösterdiği gözlemlenmiştir.

Şekil 5'te görüldüğü üzere, EPS geofoam yastık tabakasının uygulanması duvarın yer değiştirme tepkilerinde azalma sağlamıştır. Bununla birlikte, yastık tabakası şeklindeki değişimin de yer değiştirme tepkileri üzerinde azalmada olan etkileri net bir şekilde gözlemlenmiştir. Kalıcı yer değiştirmede en yüksek azalma, 0.22m'den 0.19m'ye düşüş ile, dörtgen yastık tabakasında gerçekleşmiştir. Bu değişim miktarı yaklaşık %13'lük bir azalmayı ifade etmektedir. EPS geofoam'un hafif, sıkışabilir ve titreşim sönümleyici özellikleri, istinat duvarının deprem etkileri altındaki kalıcı yer değiştirmelerin azalmasına neden olduğu ve dolayısıyla duvarın sismik performansının iyileştirilmesine katkı sağladığı gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra yastık tabakasının şeklinin de yer değiştirmelerde meydana gelen azalma oranını etkilediği ve dörtgen şeklinde olan yastık tabakasının daha fazla performans artışına neden olduğu görülmektedir.

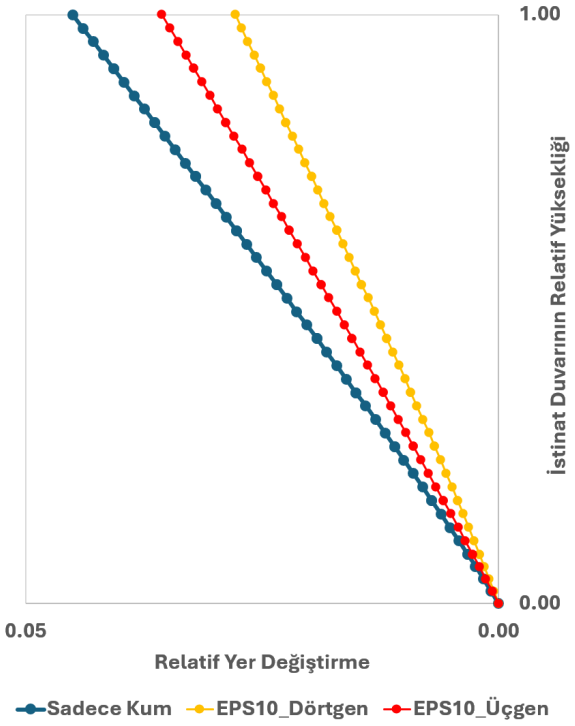


Şekil 4. 1999 Kocaeli Deprem hareketi altında, duvarın en üst noktasındaki spektral ivme-periyot grafiklerinin "yastıksız" ve "yastıklı durumlar" için karşılaştırılması.



Şekil 5. 1999 Kocaeli Deprem hareketi altında, duvarın en üst noktasındaki yer değiştirme-zaman grafiklerinin "yastıksız" ve "yastıklı durumlar" için karşılaştırılması.

İstinat duvarı yüksekliği boyunca meydana gelen relatif yer değiştirme dağılımı Şekil 6'da gösterilmektedir. Elde edilen sonuçların, Şekil 5'te verilen yer değiştirme tepkileriyle uyumlu olduğu görülmektedir. En yüksek yer değiştirme azalması duvarın tepe noktasında meydana gelmiştir. Dörtgen yastık tabakalı durum için, yer değiştirme değeri 0.045 m'den 0.028 m'ye düşerek yaklaşık %38 oranında azalma göstermiştir. Bununla birlikte, üçgen şeklindeki yastık tabakası nedeniyle meydana gelen yer değiştirme 0.036m olup, %21'lik bir azalma oranını olduğu bulunmuştur.



Şekil 6. 1999 Kocaeli Deprem hareketi altında, duvar boyunca olan relatif yer değiştirmelerin "yastıksız" ve "yastıklı durumlar" için karşılaştırılması.

4. SONUÇ VE TARTIŞMA

Analiz sonuçları, EPS geofoam yastık tabakası şeklinin istinat duvarının ivme ve yer değiştirme tepkileri üzerinde önemli etkilerinin olduğunu göstermiştir. Dörtgen şeklindeki yastık tabakasının üçgen şekilli yastıktan daha iyi performans gösterdiği belirlenmiştir.

EPS Geofoam; hafif, sıkışabilir ve titreşim sönümleyici özellikleri ile, deprem sırasında oluşan dinamik etkilerin azaltılmasına ve enerjinin sönümlenmesine katkı sağlayarak istinat duvarının sismik performansını iyileştirmiştir. Athanasopoulos vd. (2007) ve Athanasopoulos-Zekkos vd. (2012) çalışmalarında bu malzemenin yapım kolaylığı ve saha uygulamalarındaki pratikliği nedeniyle, istinat duvarı yüksekliği boyunca sabit kalınlığa sahip EPS geofoam yastık tabakalarının kullanılmasını önermiştir. Bu çalışmada da hem uygulamadaki pratikliği hem de duvarın sismik performansının iyileştirilmesindeki etkisi ile dörtgen şeklindeki EPS geofoam yastık tercih edilmesi sonucuna varılmıştır.

Elde edilen sonuçlar, modellenen istinat duvarı, kullanılan dolgu malzemesi ve EPS Geofoam özellikleri ve seçilen deprem hareketi için geçerli olabilir. Farklı özelliklere ve şekle sahip yastık tabakasının ve farklı karakteristiklerde deprem hareketlerinin dikkate alınarak daha kapsamlı parametrik analizlerin gerçekleştirilmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

Athanasopoulos, G.A., Nikolopoulou, C.P., Xenaki, V.C., Stathopoulou, V.D. (2007), "Reducing the Seismic Earth Pressure on Retaining Walls by EPS Geofoam Buffers—Numerical Parametric Study", Proceedings of 2007 Geosynthetics Conference, 15 pp.

Athanasopoulos-Zekkos, A., Lamote, K., Athanasopoulos, G.A. (2012), "Use of EPS Geofoam Compressible Inclusions for Reducing the Earthquake Effects on Yielding Earth Retaining Structures", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol 41, 59-71.

Bathurst, R.J., Zarnani, S., Gaskin, A. (2007), "Shaking Table Testing of Geofoam Seismic Buffers", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol 27, 324-332.

Demirtaş, B.S. (2023), "Effects of Site Improvement Technique on Seismic Performance of Geotechnical Stuctures". M.Sc. Thesis, Boğaziçi University.

Edinçliler, A., Demirtaş, B.S. (2026a). "Numerical Studies to Investigate the Effects of Cushion Density on Seismic Performance of the Retaining Wall". In: Ilki, A., Goksu, C., Cinar, T., Erdik, M. (eds) Proceedings of the 10th Turkish Conference on Earthquake Engineering. TCEE 2025. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 843. Springer, Cham.

Edinçliler, A., Demirtaş B.S. (2026b), "Improving Seismic Performance of Retaining Structures Using a Sustainable Geomaterial", 21st International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ICSMGE), June 14-19, Viyana.

Ertuğrul, O.L., Özkan, M.Y. (2012), "Influence of EPS Geofoam Buffers on the Static Behavior of Cantilever Earth-Retaining Walls", Pamukkale University Journal of Engineering Sciences, Vol 18, 173-181.

Ertuğrul, O.L., Trandafir, A.C. (2011), "Reduction of Lateral Earth Forces Acting on Rigid Nonyielding Retaining Walls by EPS Geofoam Inclusions", Journal of Materials in Civil Engineering, Vol 23, 1711-1718.

Ertuğrul, O.L., Trandafir, A.C. (2013), "Lateral Earth Pressures on Flexible Cantilever Retaining Walls with Deformable Geofoam Inclusions", Engineering Geology, Vol 158, 23-33.

Ertuğrul, O.L., Trandafir, A.C. (2014), "Seismic Earth Pressures on Flexible Cantilever Retaining Walls with Deformable Inclusions", Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol 6, 417-427.

Ertuğrul, O.L., Trandafir, A.C., Özkan, M.Y. (2012), "Yanal Zemin Basınçlarının EPS Köpük Kullanımı Vasıtasıyla Azaltılması", Teknik Dergi, Cilt 23, 5885-5901.

Horvath, J.S. (1994), "Expanded Polystyrene (EPS) Geofoam: An Introduction to Material Behavior", Geotextiles and Geomembranes, Vol 13, 263-280.

Horvath, J.S. (1997), "The Compressible Inclusion Function of EPS Geofoam", Geotextiles and Geomembranes, Vol 15, 77-120.

PLAXIS 2D (2025), "Tutorial Manual", Version 2024.3, Bentley Systems, Inc.

Zarnani, S., Bathurst, R.K. (2007), "Experimental Investigation of EPS Geofoam Seismic Buffers Using Shaking Table Tests", Geosynthetics International, Vol 14, 165-177.

Zarnani, S., Bathurst, R.K. (2011), "EPS Seismic Buffers for Earthquake Load Attenuation Against Rigid Retaining Walls", Geo-Frontiers Congress 2011: Advances in Geotechnical Engineering, Texas, USA.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
γ	**Özgül ağırlık**	**w**	**Birim ağırlık**
c	**Kohezyon**	**EA**	**Eksenel rijitlik**
Ø	**Sürtünme açısı**	**EI**	**Eğilme rijitliği**
E	**Elastisite modülü**	**d**	**Duvar gövde kalınlığı**