

EPS GEOFOAM MALZEME DAVRANIŞININ DENEYSEL ve SAYISAL ANALİZLERLE İNCELENMESİ

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF THE MATERIAL BEHAVIOR OF EPS GEOFOAM

Murat GÜLEN¹, Havvanur KILIÇ², Tayfun Can GÜR³

ÖZET

Mühendislik yapılarının stabilitesini korumak, yapıdan beklenen performansı arttırmak ve kullanım süresi boyunca hizmet verilebilirliğini sağlamak için farklı yapısal elemanlarla desteklenmektedir. Güncel teknolojik gelişmelerden faydalanarak üretilen bu malzemelerin başında geosentetik malzemeler gelmektedir. Düşük yoğunluklu ve yüksek sıkışabilirlik özelliklerine sahip genleştirilmiş polistren (EPS) malzemeler bu geosentetiklerden biridir. Mühendislik yapılarında farklı amaçlar için kullanılan geofoam malzemelerinin tasarım parametrelerinin ve malzeme davranışının doğru belirlenmesi, doğru bir tasarımın ilk koşuludur. Bu çalışma kapsamında, farklı boyutlarda ve farklı yoğunluklardaki dikdörtgen ve silindirik EPS malzemelerin gerilme-şekil değiştirme ilişkileri serbest basınç deneyleri ile belirlenmiştir. Bu gerilme-şekil değiştirme ilişkisinden ve literatür çalışmalarından faydalanarak EPS malzemelere ait malzeme parametreleri (E, c, v) hesaplanmıştır. Bu malzeme parametreleri kullanılarak EPS malzeme Plaxis 2D (2022)'de farklı malzeme modelleri için modellenerek deneysel çalışmalar ve sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak benzer ve farklılıklar yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Plaxis 2D, EPS, gerilme-şekil değiştirme ilişkisi, serbest basınç deneyi

ABSTRACT

It is supported by different structural elements to the stability of engineering structures, increases the expected performance of the structure, and ensures serviceability throughout the life cycle. Geosynthetic materials are at the forefront of these materials, which are produced by utilizing current technological developments. Expanded polystyrene (EPS) materials with low density and high compressibility are one of these geosynthetics. The correct determination of the design parameters and material behavior of geofoam materials used for different purposes in engineering structures is the first condition for an

¹ Araştırma Görevlisi, Yıldız Teknik Üniversitesi, mgulen@yildiz.edu.tr (Sorumlu yazar)

² Doç. Dr., Yıldız Teknik Üniversitesi, kilic@yildiz.edu.tr

³ İnşaat Mühendisi, Yıldız Teknik Üniversitesi, tayfuncgur@gmail.com

accurate design. In this study, stress-strain relations of rectangular and cylindrical EPS materials of different sizes and densities were determined by unconfined pressure experiments. Using this stress-strain relationship and literature studies, the material parameters (E , c , v) of EPS materials were calculated. By using these material parameters, EPS material was modeled in Plaxis 2D (2022) for different material models and obtained from experimental studies and numerical analysis. The results were compared and similarities and differences were interpreted.

Keywords: *Sonlu elemanlar, EPS, stress-displacement relationship, uniaxial compression test*

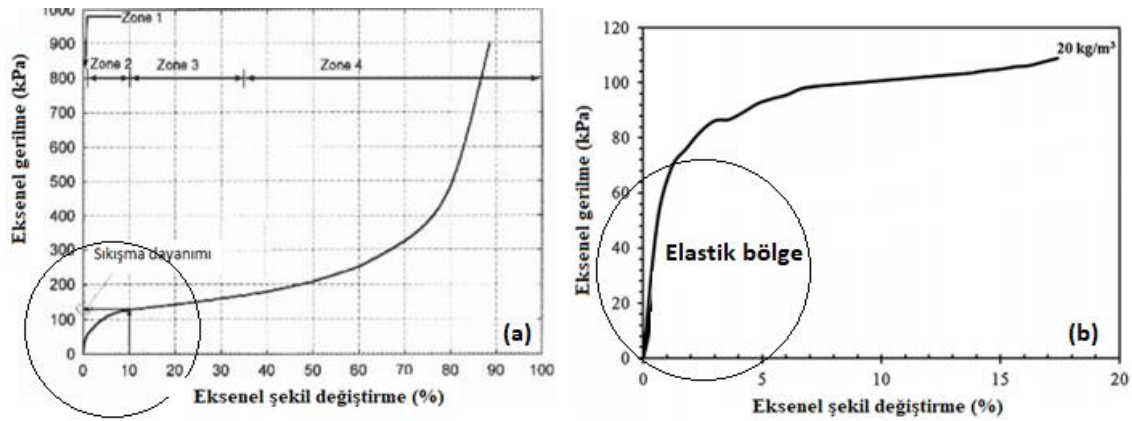
1. GİRİŞ

Mühendislik yapılarında farklı amaçlar için kullanılan EPS (Geofoam) malzemesinin en önemli özellikleri; diğer yapısal malzemelere göre 200 kat daha hafif, kullanım amacına göre yüksek sıkışabilirlik ve mukavemet özelliklerinin ayarlanabilir olmasıdır. Hafif dolgu malzemesi olarak taşıma gücü düşük ve oturma potansiyeli olan zeminler üzerine yol alt dolgusunda, gömülü boru istemlerinde boruya etkiyen gerilme ve deformasyonların azaltılmasında, istinat duvarlarında duvara etkiyen yanıl toprak basınçlarını azaltarak stabilitenin korunmasında, kayma potansiyeli olan şevlerde kayan zemin kütlesinin azaltılarak şev stabiliteilerinin korunmasında, farklı mühendislik yapılarında ani dinamik yüklere bariyer olmasında, şişen zeminlerde şişme basıncının yapıya etkisini engellenmek için vb. uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır (Zarnani, 2008; Yaghoobzadeh, 2021; Ertuğrul ve Trandafir, Khan ve Meguid 2021; 2012; Akınay, 2017; Kılıç ve Akınay, 2019; Kang vd., 2008; Kang, 2019). Şekil 1’de farklı mühendislik yapılarında EPS geofoam malzemesinin kullanımını gösteren uygulama örnekleri sunulmuştur.



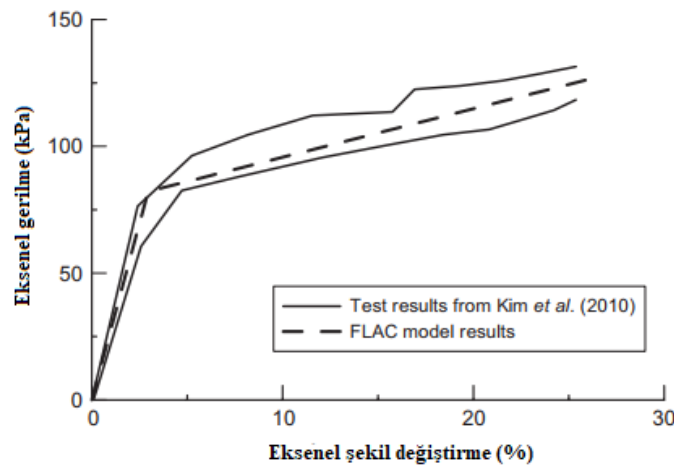
Şekil 1. EPS malzemesinin farklı geoteknik uygulamalarında kullanım durumları a) gömülü boru sistemlerinde, b) dayanma yapılarında, c) şev stabilitesinde, d) yol alt yapı dolgusunda

Şekil 1’de görüldüğü gibi EPS malzemesinin farklı kullanım durumları dikkate alındığında, yapılacak tasarımlarda EPS malzeme parametrelerinin ve gerilme-şekil değiştirme ilişkilerinin doğru bir şekilde belirlenmesi oldukça önemlidir. Literatür çalışmaları incelendiğinde EPS geofoama ait gerilme-şekil değiştirme ilişkileri serbest basınç ve ya üç eksenli deneylerle belirlenmektedir (Şekil 2). Belirlenen bu gerilme-şekil değiştirme ilişkisi diğer yapısal elemanlar (beton, zemin, çelik, ahşap vb.) için belirlenen gerilme-şekil değiştirme ilişkilerinden oldukça farklıdır.



Şekil 2. EPS 20 için farklı deney aletleri ile elde edilen gerilme-şekil değiştirme ilişkisi a) üç eksenli (UU) (Tafere vd., 2011) b) serbest basınç (Mandal, 2012)

Mühendislik yapılarında, izin verilebilir deformasyonlar ve gerilme seviyeleri dikkate alınarak EPS malzeme modeli tahmin edilmektedir. Yapılacak tasarımlarda, yapıya etkiyen dış yüklemeler altında meydana gelecek gerilmeler elastik bölgedeki gerilme seviyelerinde ise linear elastik malzeme modeli; bu gerilmeler daha büyük şekil değiştirmelere neden olacak ise Hardening Soil malzeme modelinin kullanılması tavsiye edilmektedir (Tafere vd., 2011). Ayrıca bazı sayısal analiz programları (FLAC vb.), tasarımlarda kullanılan malzemelerin malzeme modelini programa tanımlamamıza izin vermektedir. Bu durumda deneysel çalışmalardan elde edilen gerilme-şekil değiştirme ilişkisi kod yazılarak programa tanımlanabilir (Şekil 3).



Şekil 3. Serbest basınç deneylerinin elde edilen FLAC’ten elde edilenlerle karşılaştırılması (Kim ve Kim, 2010)

EPS malzemenin farklı kullanım alanlarını dikkate alan literatür çalışmaları incelendiğinde farklı araştırmacıların farklı malzeme parametreleri ve malzeme modelleri kullanıldığı görülmektedir (Tablo 1).

Tablo 1. Literatür çalışmalarından derlenen EPS tasarım parametreleri

Çalışma	Yapı Türü	SIKIŞABİLİR TASARIM PARAMETRELERİ					
		Malzeme Modeli	Malzeme Türü	c (kPa)	ϕ (°)	E (kPa)	ν
Al-Naddaf vd. (2021)	Kutu Menfez	Lineer elastik Mohr-Coulomb	EPS15	33.75	1.5=2-0.5	2400	0.1
Kang vd. (2008)	Beton Menfez	Elastik	Yumuşak zone	-	-	345-2756	0.1
Mandal (2012)	-	Mohr-Coloumb elasto-plastik	EPS15	33.75	1.5	$E_i=2481$	0.1
			EPS20	38.75	2	$E_i=4071$	0.12
			EPS22	41.88	2	$E_i=7550$	0.125
			EPS30	62	2.5		0.17
Lal vd. (2014)	İstinat Duvarı	Linear elastik Mohr-Coulomb	EPS15	33.75	1.5	$E_i=2480$	0.1
			EPS20	38.75	2	$E_i=4070$	0.12
			EPS30	62	2.5	$E_i=7550$	0.17
Khan ve Meguid (2021)	İstinat Duvarı	Lineer elastik	EPS15			1500	0.1
			EPS22	-	-	6910	0.12
			EPS29			10000	0.13
			EPS39			17800	0.15
AbdelSalam ve Azzam (2016)	İstinat Duvarı	Hardening Soil	EPS15	-	-	$E_i=E_{50}=2358$	0.1
Ertugrul ve Trandafir (2012)	İstinat Duvarı	Lineer elastik	EPS15	-	-	$E_{young}=1500$	-

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, bu çalışma kapsamında kullanılan malzemeler, yapılan deneysel çalışmalar ve deney sonuçları sunulacaktır.

2.1. Malzemeler

Literatür kapsamında yapılan çalışmalar incelendiğinde EPS Geofoama ait gerilme-şekil değiştirme ilişkisini belirlemek için yapılan serbest basınç ve üç eksenli (UU) deneylerinde farklı numune boyutları kullanıldığı görülmüştür. Atmatzidis vd. (2001) ve Chun vd. (2004) EPS numuneleri üzerinde yaptıkları üç eksenli (UU) basınç deneylerinde yüksekliği 10 cm ve çapı 5 cm olan numuneler; Mandal (2012) yüksekliği 15 cm ve çapı 7.5 cm olan numuneler; Beju ve Mandal (2016) 5 cm, 10 cm ve 15 cm boyutlarındaki kübik numuneler; Wong ve Leo (2006) yükseklik/çap oranının 2 olduğu durumda numunelerde burkulma meydana

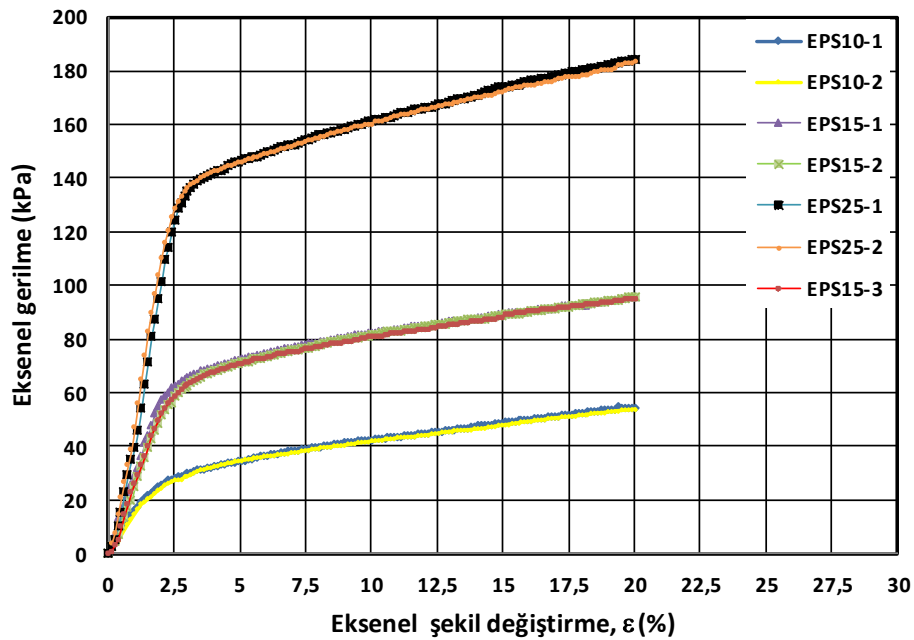
gelebileceğini belirtmiş ve yaptığı deneylerde yüksekliği ve çapı 5 cm olan numuneler kullanmışlardır. Bundan dolayı bu çalışmada boy/çap oranı 0.4-2 ve yoğunluğu 12 kg/m³-35 kg/m³ aralığında değişen silindirik ve dikdörtgen numuneler kullanılmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. Çalışma kapsamında kullanılan farklı boyutlarda ve yoğunlukta silindirik ve dikdörtgen numuneler

2.2. Yapılan Deneyler

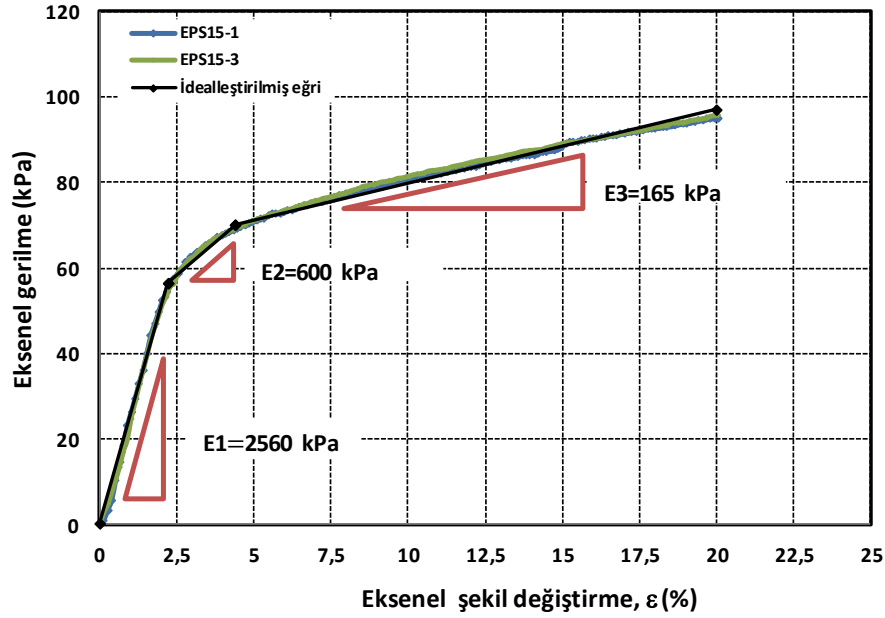
EPS malzemelerin en önemli özelliklerinden biri Poisson oranı (ν) değerinin çok düşük (<0.1) olmasıdır. Yapılan serbest basınç deneyleri sırasında ve deney sonucunda numunelerin yanal olarak deforme olmadığı ve ya çok az olduğu görülmüştür. Bundan dolayı yapılan hesaplamalarda alan düzeltmesi yapılmamıştır. Tüm serbest basınç deneyleri en az iki numune için yapılmış ve değerlerin çok uyumlu olduğu görülmüştür.



Şekil 5. Boyu 79 mm, çapı 39 mm plan dikdörtgen numunelere ait serbest basınç deney sonuçları

Şekil 5'te farklı yoğunlukta EPS numuneleri için elde edilen gerilme şekil değiştirme ilişkisi incelendiğinde Şekil 2a'da sunulan Zone_1; Zone_2 ve Zone_3 ile gösterilen bölge ile

oldukça uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Bu üç farklı bölgeye ait E değerleri, boyu 7.9 cm ve çapı 3.9 cm olan dikdörtgen EPS15 numunesi için Şekil 6'da belirtilen hesaplamalar sonucunda belirlenmiştir.



Şekil 6. EPS15 için serbest basınç deneylerinden E değerlerinin hesaplanması

Serbest basınç deneyine tabi tutulan tüm EPS numuneler için Şekil 6'da gösterilen hesaplama adımları kullanılarak sonuçlar hesaplanmış ve Tablo 2'de özetlenmiştir.

Tablo 2. Serbest basınç deneylerine tabi tutulan EPS numunelerine ait özellikler

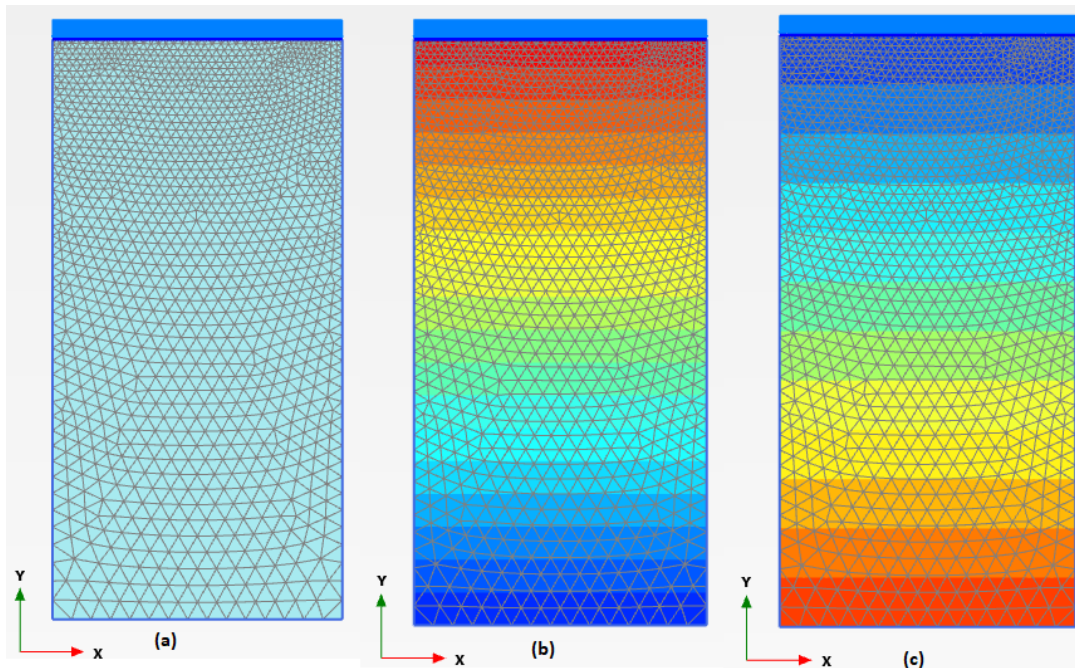
Numune	Geometri	H (mm)	D=B (mm)	ρ (kg/m ³)	Zone_1 ϵ (%)	Zone_1 E (kPa)	Zone_2 ϵ (%)	Zone_2 E (kPa)	Zone_3 ϵ (%)	Zone_3 E (kPa)
EPS12	Dikdörtgen	79	39	11.67 11.75	0-1.7	1410	1.7-4.3	370	4.3-20	140
EPS15	Dikdörtgen	79	39	16.5 25.8 26.2	0-2.2	2700	2.2-4.4	600	4.4-20	165
EPS25	Dikdörtgen	79	39	25.8 26.2	0-2.4	5300	2.4-4	970	4-20	270
EPS35	Silindirik	70	70	35.2 35.05	0-1.6	10700	1.6-3	3000	3-20	840
EPS22	Silindirik	70	70	21.3	0-1.4	8300	37712	1440	3-20	370
EPS20	Silindirik	70	70	20.5	0-1.65	6900	1.65-3	2070	3-20	310
EPS20	Silindirik	70	70	19.2	0-1.35	6600	1.35-2.5	1560	2.5-20	320
EPS15	Silindirik	72	18	15	0-1.95	2150	1.95-3	820	3-20	230
EPS15	Silindirik	80	180	13.8	0-1.4	3870	1.4-2.6	1125	2.6-20	290
EPS12	Silindirik	80	180	13.2	0-1.35	3780	1.35-3	545	3-20	192

3. SAYISAL ANALİZLER

Literatür çalışmaları incelendiğinde, Şekil 3'te sunulan ve sayısal analiz programına kodlama ile gerilme-şekil değiştirme ilişkisi tanımlanmayacak ise EPS geofoam için düşük şekil değiştirme seviyelerinde (elastik) linear elastik; büyük şekil değiştirme seviyelerinde ise Hardening Soil malzeme modelinin kullanılması önerilmektedir. Bu önerilere alternatif olarak Şekil 6'da gösterilen ve her bölge için farklı E değerinin kullanılmasını öngören bir yaklaşımın da kullanılabileceği düşünülmektedir. Bu amaç doğrultusunda EPS15 için Şekil 6'dan elde edilen E ve Tablo 3'teki ν değerleri kullanılarak serbest basınç deneyleri Plaxis 2D'de modellenmeye çalışılmıştır (Şekil 7).

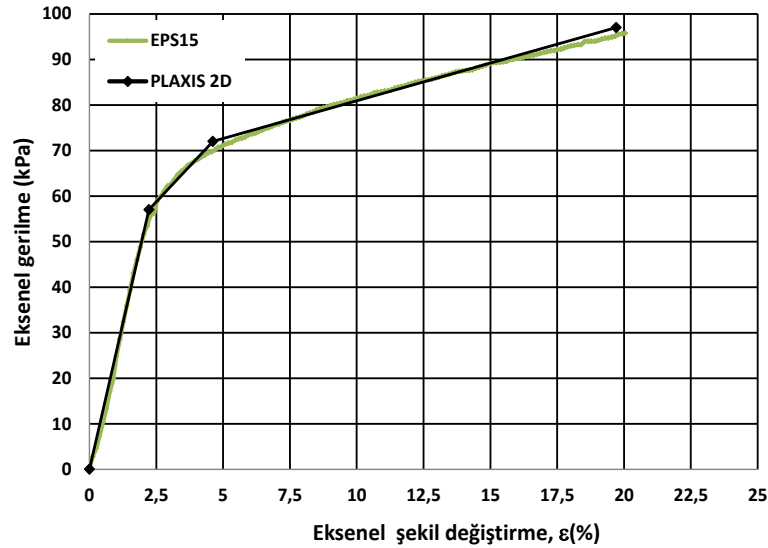
Tablo 3. Farklı araştırmacılar tarafından önerilen ampirik eşitlikler

Çalışma	Önerilen Eşitlikler	
	Poisson oranı, ν	Elastisite modülü, E (MPa)
EDO (1992)	$\nu=0.0056*r_f+0.0024$	-
Horvath (1995)	$\nu=0.0056*r_f+0.0024$	$E_f=0.45*r_f-3$
Hazarika (2006)	-	$E_f=0.41*r_f-2.8$
Kim ve diğ. (2018)	$\nu=0.0056*r_f+0.0024$	$E_f=0.43*r_f-2.6$



Şekil 7. Plaxis 2D için analizlere ait görseller a) sonlu elemanlar ağı, b) deformasyon dağılımı, c) gerilme dağılımı

Belirtilen malzeme parametreleri ve linear elastik malzeme modeli kullanılarak 3 aşamada yapılan analizler için model üst noktasında meydana gelen oturmaların deneysel verilerle uyumlu olduğu görülmüştür (Şekil 8).



Şekil 8. Plaxis 2D ile elde edilen gerilme-şekil değiştirme ilişkisinin deneysel verilerle karşılaştırılması

Tafere vd. (2011), büyük şekil değiştirme seviyeleri için Hardening Soil (HS) zemin modeli için Tablo 4'te önerilen değerlerin kullanılmasını önermektedirler.

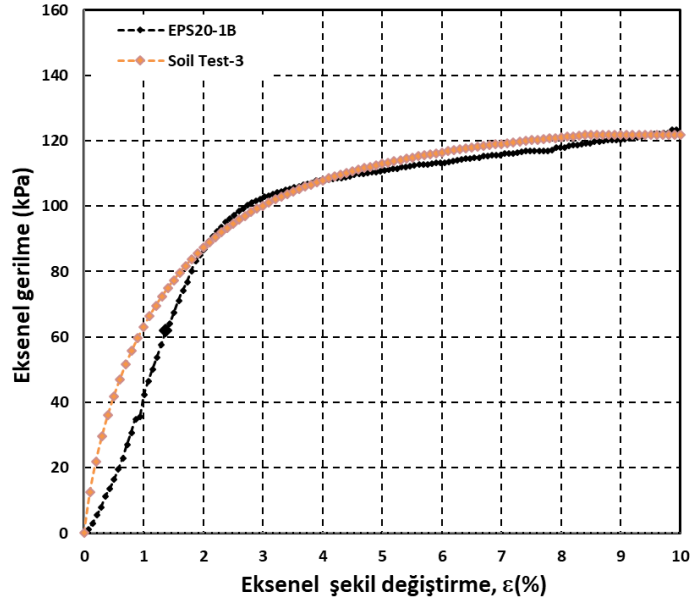
Tablo 4. Hardening Soil malzeme parametreleri (Tafere vd., 2011)

Hardening Soil Malzeme Parametreleri	EPS Türü		
	EPS20	EPS30	EPS40
Birim Hacim Ağırlık (kg/m^3)	20	30	40
Kohezyon, c (kPa)	35	60	75
İçsel Sürtünme Açısı, ϕ (°)	30	42	40
Dilatasyon Açısı, ψ (°)	0	0	0
Sekant Elastisite modülü, E_{50}^{ref} (kPa)	6000	9000	15000
Power, m	0.5	0.5	0.5
Poisson oranı, ν	0.1	0.1	0.1
Referans gerilme, p^{ref} (kPa)	100	100	100

Tablo 4'te önerilen değerler Plaxis 2D'de yer alan "soil test" sekmesine girildiğinde serbest basınç deneyleri ile uyumlu sonuçların elde edilemediği görülmüştür. Bundan dolayı yapılan parametrik çalışmalar sonucunda Tablo 5'te sunulan değer kullanılarak deneysel verilerle uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 5. Soil test için deneysel verilerle uyumlu gerilme-şekil değiştirme ilişkisini veren EPS parametreleri

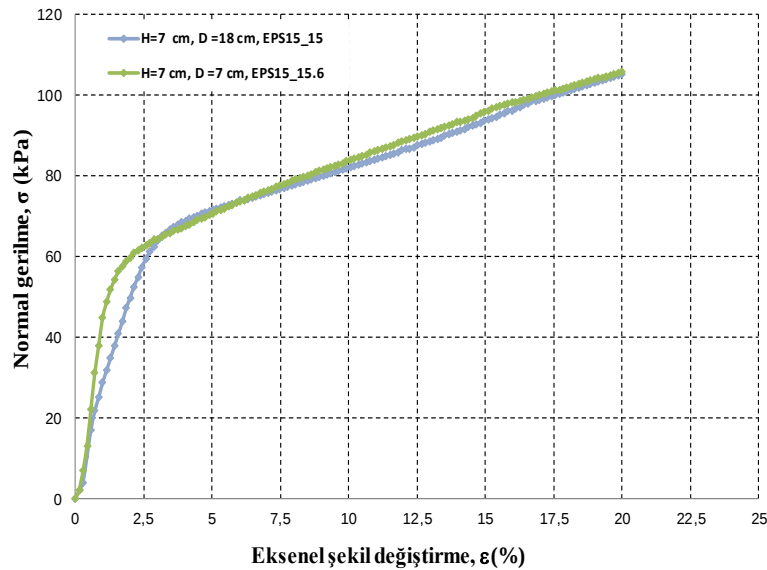
Malzeme Modeli	m	ϕ (°)	c (kPa)	p^{ref} (kPa)	s_3 (kPa)
Hardening Soil	1	28	10	25	50



Şekil 8. Soil test ile gerilme şekil değiştirme ilişkileri

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

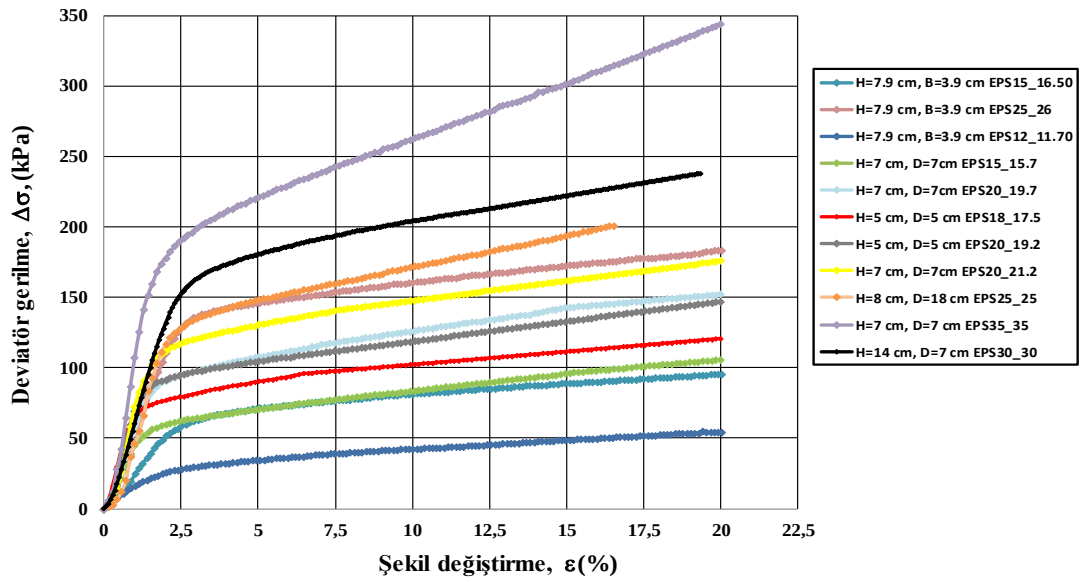
Literatür çalışmaları incelendiğinde, yapılan serbest basınç ve üç eksenli (UU) deneylerinde farklı boyutlardaki numunelerin kullanıldığı ve numunelerin boy/çap oranının değişiminin gerilme-şekil değiştirme ilişkisini etkilediği ifade edilmiştir (Wong ve Leo, 2006). Şekil 9'da aynı yoğunlukta ve farklı boy/çap oranında olan 2 numuneye ait gerilme-şekil değiştirme ilişkisi incelendiğinde, numunelerin Zone_1 ve Zone_2 olarak tanımlanan bölgelerde farklılıklar olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 9. Farklı boyutlardaki EPS malzemesi için gerilme-şekil değiştirme ilişkilerinden karşılaştırılması

Tablo 4'te Tafere vd. (2011) tarafından önerilen ve Tablo 5'te Plaxis 2D'nin soil test sekmesinden parametrik çalışma sonucunda elde edilen HS malzeme parametrelerinin, EPS malzemenin serbest basınç deneyinden elde edilen malzeme parametrelerini temsil etmemektedir. Ayrıca bu malzeme parametrelerinin Tablo 1'de sunulan malzeme parametrelerinden oldukça farklı olduğu görülmektedir.

Yapılan tüm serbest basınç basınç deneyleri değerlendirildiğinde, gerilme-şekil değiştirme ilişkilerinin benzer davranış gösterdiği ve EPS yoğunluğunun artışıyla birlikte gerilme değerlerinin de arttığı görülmüştür.



Şekil 10: Serbest basınç deneylerinden EPS malzemesi için elde edilen gerilme-şekil değiştirme ilişkileri

5. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında farklı yoğunluk ve boy/çap oranlarına sahip dikdörtgen ve silindirik EPS numunelerin gerilme-şekil değiştirme ilişkileri serbest basınç deneyleri ile belirlenmiştir. Bu gerilme-şekil değiştirme ilişkisinden faydalanarak EPS için malzeme parametreleri hesaplanmıştır. Ayrıca bu malzeme parametreleri kullanılarak EPS numunesinin eksenel yük altındaki davranışı Plaxis 2D (2022) ile modellenmiştir. Deneysel çalışmalar ve sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur:

1. Serbest basınç deneyleri için kullanılan EPS numunelerinin sıkışabilirlik ve mukavemet özellikleri göz önüne alındığında kullanılan deney numunelerinin boy/çap oranının gerilme-şekil değiştirme ilişkisini etkilediği tespit edilmiştir.
2. Farklı yoğunluklardaki numuneler için elde edilen gerilme-şekil değiştirme ilişkileri incelendiğinde Zone_1, Zone_2 ve Zone_3 olarak ifade edilen bölgelerindeki şekil değiştirme miktarlarının her EPS yoğunluğu için farklılık gösterdiği belirlenmiştir.

3. EPS malzemenin farklı mühendislik yapılarında kullanımı sonucu maruz kalacağı gerilmelerden dolayı oluşacak şekil değiştirmeler Zone_1 (elastik) bölgesinden daha büyük ise; Tablo 2’de ifade edilen sonuçların kullanılabileceği görülmüştür.
4. EPS geofoam için büyük şekil değiştirme seviyelerinde kullanılması önerilen HS malzeme modeli parametrelerinin, serbest basınç ve üç eksenli (UU) deneylerinden belirlenen parametrelerden tamamen farklılık gösterdiğini tespit edilmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma kapsamında kullanılan EPS numunelerinin teminini sağlayan BASAŞ AMBALAJ VE YALITIM SANAYİ A.Ş.‘ye ve EPS SANAYİ DERNEĞİ’ne (EPSDER) teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- Abdelsalam, S.S. ve Azzam, S.A. (2016). “EPS Resistance Factors and Applications on Flexible Walls”, Geo-China (2016) GSP 261, 131-138, ASCE.
- Akınay, E. (2017). “Sıkışabilir Yatak Malzemesi Kullanımının Gömülü Esnek Boru Davranışı Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi”, Doktora Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- Al-Naddaf, M., Rasheed, S.E., Rahmaninezhad, S.M. and Han, J. (2021). “Effects of Geofoam Geometry and Location on Vertical Stresses on Buried Culverts during Construction and under Surface Loading”, Geosynthetics Conference 2021-Industrial Fabrics International Association
- Atmatzidis, D.K., Missirlis, E.G. ve Chrysikos, D.A., (2001). “An Investigation of EPS Geofoam Behavior in Compression”, Proc. “EPS 2001”, 3rd Int. Conf., Salt Lake City, USA.
- Beju, Y.Z ve Mandal, J.N (2016). “Compression Creep Test on Expanded Polystyrene (EPS) Geofoam”, International Journal of Geotechnical Engineering, 10(4), 401-408.
- Chun, B.S., Lim, H., Sagong, M. ve Kim, K., (2004). “Development of a Hyperbolic Constitutive Model for Expanded Polystyrene (EPS) Geofoam under Triaxial Compression Tests.” Geotextiles and Geomembranes, 22(4), 223-237.
- EDO, (1992) “Expanded Polystyrene Construction Method,” Riko Tosho Publishers, Tokyo, Japan (in Japanese).
- Ertuğrul, O.L. ve Trandafir, A.C.(2012). “Reduction of Lateral Earth Forces on Yielding Flexible Retaining Walls by EPS Geofoam Inclusions”, GeoCongress 2012(ASCE)-2068-2077.
- Hazarika, H. (2006) “Stress-strain modeling of EPS Geofoam for large strain application large-strain”, Geotextiles and Geomembranes, 24, 79-90.
- Horvath, J. S. (1995). “Geofoam geosynthetic”, Horvath Engineering, Scarsdale, NY 15, Issues 1-3, pp.77-120.
- Kang, J., Parker, F., Kang, Y. J., ve Yoo, C. H. (2008). "Effects of Frictional Forces Acting on Sidewalls of Buried Box Culverts", International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 32(3), 289-306.
- Kang, J., (2019). "Finite Element Analysis For Deeply Buried Concrete Pipe Proposed Imperfect Trench Installations with Expanded Polystyrene (EPS) Foams," Engineering Structures, 286–295.

- Khan, M.I. ve Meguid, M.A. (2021). "Evaluating the Role of Geofoam Properties in Reducing Lateral Loads on Retaining Walls: A Numerical Study", *Sustainability*, 13(9), 4754.
- Kılıç, H. ve Akınay, E. (2019). "Gömülü HDPE Borularda Esneme Davranışının İncelenmesi", *Teknik Dergi*, 9373-9398, Yazı 548.
- Kim, H., Choi, B. ve Kim, J. (2010). "Reduction of earth pressure on buried pipes by EPS geofoam inclusions", *Geotechnical Testing Journal*, 33, No. 4, 1–10.
- Kim, H., Witthoeft, A. F., ve Kim, D. (2018). "Numerical Study of Earth Pressure Reduction on Rigid Walls using EPS Geofoam Compressible Inclusions", *Geosynthetics International*, 25(2), 180- 99.
- Lal, B.R.R., Padade, A.H. ve Mandal, J.N. (2014). "Numerical Simulation of EPS Geofoam as Compressible Inclusion in Fly Ash Backfill Retaining", *Ground Improvement and Geosynthetics*, 526-535.
- Mandal, J.N. (2012). "Behavior of Expanded Polystyrene (EPS) Geofoam Under Triaxial Loading Conditions", *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 17, 2543-2553.
- Tefera, T. H., Aaboe, R., Bruum, H., and Aunaas, K. (2011). "FEM simulation of full scale and laboratory model tests of EPS." The Norwegian Public Roads Administration, Norway.
- Yaghoobzadeh, S., Azizkandi, A.S., Salehzadeh, H., & Hasanaklou, S.H. (2021). "Effect of EPS Beads on the Behavior of Sand–EPS and Slope Stability Using Triaxial and Centrifuge Tests". *International Journal of Civil Engineering*.
- Zarnani, S., & Bathurst, R. J. (2008). "Numerical modeling of EPS seismic buffer shaking table tests". *Geotextiles and Geomembranes*, 26(5), 371-383.
- Wong, L. ve Leo, C. J., (2006). "A Simple Elastoplastic Hardening Constitutive Model for EPS Geofoam", *Geotextiles and Geomembranes*, 24, 299–310.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
ϵ	Birim şekil değiştirme	B	Numune genişliği
ψ	Dilatasyon açısı	H	Numune boyu
E	Elastisite modülü	ν	Poisson oranı
E_{50}	Sekant Elastisite modülü	m	Power
E_i	Başlangıç Elastisite modülü	p^{ref}	Referans gerilme
E_{young}	Young Elastisite modülü	E_{50}^{ref}	Ref. Sekant elastisite modülü
ϕ	İçsel sürtünme açısı	ρ	Yoğunluk
c	Kohezyon		
D	Numune çapı		