

GÖMÜLÜ KUTU MENFEZLERDE GEOFOAM BLOK UYGULAMALARI

Emre AKINAY¹

Emrah TÜRER²

A. Tolga ÖZER³

ABSTRACT

The effects of using geof foam block as compressible inclusion on the behavior of box culverts constructed under high earthen embankments is investigated by performing two-dimensional numerical analysis models. First of all, geof foam block model parameters were obtained from calibration numerical modeling effort by mimicking the results of a well instrumented laboratory model study. Then, a parametric study was conducted using geof foam blocks as a “compressible inclusion” for a typical 4 m x 4 m single span reinforced concrete box culvert with 6 m high embankment loading over the slab of the culvert presented by General Directorate of Highways (KGM). Parametric study has shown that the thickness of both slab and walls of the reinforced concrete box culvert can be reduced by 30% by using 50 cm thick geof foam blocks with 15 kg/m³ density as a compressible inclusion.

Keywords: Geof foam block, Box culvert, Compressible inclusion, Finite element technique

ÖZET

Bu çalışmada, geof foam blok sıkışabilir içerik uygulamasının kalın dolgular altında yer alan betonarme kutu menfezlerin davranışı üzerindeki etkisi iki boyutlu sayısal analizler ile incelenmiştir. İlk olarak, ölçüm aletleri yerleştirilmiş laboratuvar model deneyinden elde edilen veriler kullanılarak geof foam blok model parametreleri kalibre edilmiştir. Sonrasında ise, Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından sunulan standart kutu menfez tiplerinden biri seçilerek geof foam blok sıkışabilir içerik uygulaması ile bir parametrik çalışma yapılmıştır. Parametrik çalışmanın sonucunda, döşeme plağının üzerinde 6 m geleneksel dolgu yükü altındaki 4 m x 4 m göz açıklı tek gözlü bir kutu menfezin üst plağı ve duvarları üzerine 50 cm kalınlığında ve 15 kg/m³ yoğunlukta geof foam blok sıkışabilir içerik yerleştirilmesi durumunda plak ve duvar kesitlerinin %30 oranında küçültülebileceği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Geof foam blok, kutu menfez, sıkışabilir içerik, sonlu eleman yöntemi

1. GİRİŞ

¹ İnşaat Müh. Uyg. Dep. Yöneticisi (Dr.), AKINAY, E., Austrotherm Türkiye, emre.akinay@astrotherm.com.tr

² İnşaat Müh. Uyg. Dep. Sorumlusu (İnş. Yük. Müh.), TÜRER, E., Austrotherm Türkiye, emrah.turer@astrotherm.com.tr

³ İnşaat Mühendisliği Bölüm Başkanı (Doç. Dr.), ÖZER, A. T., İstanbul Okan Üniversitesi, tolga.ozer@okan.edu.tr

Genleştirilmiş polistiren (EPS) blok (gefoam blok) 11.2 kg/m³ (EPS12) ilâ 45.7 kg/m³ (EPS46) arasında değişen yoğunluklarda üretilebilen (ASTM D6817), geoteknik mühendisliği uygulamalarında kullanılan, kapalı gözenekli, hafif bir malzemedir (ASTM D4439). Fabrikasyon bir ürün olması nedeni ile gefoam blok mühendislik özellikleri için asgarî gereklilikler ilgili standartlar tarafından (ASTM D6817, TS EN 14933) belirlenmiştir. Gefoam blokların geoteknik mühendisliği projelerinde pek çok farklı uygulama alanları bulunmaktadır (Aabøe vd., 2019).

Gefoam bloklar ilk defa 1972 yılında Norveç Karayolları İdaresi tarafından otoyol dolgusu inşasında kullanılmış olup (Aabøe, 2011), günümüzde de dünyanın çeşitli ülkelerinde taşıma gücü düşük, oturma potansiyeli yüksek killi zeminler üzerine otoyol, demiryolu ve köprü yaklaşım dolgularının inşasında kullanılmaktadır (Aabøe vd., 2019). Dünyadaki yaygın kullanımına karşın, gefoam bloklar ülkemizde ilk defa Mart-Nisan 2017’de bir yol dolgusunun inşaatında kullanılmıştır (Özer vd., 2017; Özer ve Akınay, 2017; Özer ve Akınay, 2019). Söz konusu projede İstanbul Çevre Yolu’nun Uzunçayır çıkışından Harem yönüne doğru trafiğin bir kısmının Acıbadem Mahallesiine yönlendirilmesi amaçlanmış olup, gefoam bloklar yol dolgusu temel seviyesinin altından geçen iki adet ana isale su hattına dolgu inşası nedeni ile uygulanacak ilave gerilmeleri azaltmak amacı ile kullanılmıştır. Otoyol ve köprü yaklaşım dolgularının yanı sıra, gefoam bloklar ayrıca istinat duvarlarının geri dolgularının inşaatında da kullanılmaktadır. İstinat duvarı geri dolgu imalatında gefoam bloklar, uygulama tipine göre, “hafif dolgu” veya “sıkışabilir içerik” olarak (sırası ile “sıfır toprak basıncı (ZEP)” ve “azaltılmış toprak basıncı (REP)” konseptleri, Horvath, 2004; 2010) kullanılmakta, istinat duvarına etkiyen yanal gerilmelerin azalmasını ve hatta dolgunun istinat duvarına gerek duyulmaksızın imal edilmesini sağlamaktadır. Türkiye’de bilinen ilk ZEP konsepti uygulaması Ekim-Kasım 2017’de hayata geçirilmiştir (Özer vd., 2018). İstanbul İli, Başakşehir İlçesi, Kayaşehir Semt’inde, HRT 2 Yolu KM:0+430.00 ile HRT 4 Yolu KM:0+117.00 arası bağlantı yolları üzerinde sürdürülen viyadük ve alt geçit çalışmaları kapsamında, Ø165 fore kazıklar ile imal edilen bir iksa yapısının başlık kirişi üzerine gefoam bloklar ile bir rampa dolgusunun inşa edilmiştir. Dolgu inşası öncesinde, ZEP konsepti uyarınca gerekli olmamasına karşın, inşa edilen istinat duvarına etkiyen yanal gerilmelerin imalatın tamamlandığı günden günümüze kadar geçen süreçte göz ardı edilebilir düzeyde olduğu görülmüştür (Özer vd., 2018).

Gefoam bloklar kutu menfez üzeri dolgu inşaatlarında da kullanılmakta ve menfez üst döşemesine ve perdelerine etkiyen zemin gerilmelerinin azalmasını sağlamaktadır. Gefoam bloklar kutu menfez üzeri dolgu inşaatlarında, tıpkı istinat duvarı geri dolgu inşaatlarında olduğu gibi, iki farklı teknik ile uygulanabilmektedir. Bunlardan birincisi; menfez üst dolgusunun bütünü ile gefoam bloklar kullanılarak imal edildiği ve gefoam blokların “hafif dolgu” özelliğinden yararlanılan tekniktir. İkinci teknik ise; menfez üzerine belirli bir kalınlıkta gefoam blok dolgunun yerleştirildiği, devamında dolgunun (otoyol üst yapısına kadar) geleneksel sıkıştırılmış toprak ile yapıldığı ve gefoam blokların “sıkışabilir içerik” özelliğinden yararlanılan tekniktir. Gefoam blok sıkışabilir içerik uygulaması ile menfez üzerinde yer alan zemin dolgusu içerisinde pozitif zemin kemerlenmesi mekanizmasının gelişmesi ve menfez üst döşemesine daha küçük düşey gerilmelerin etkimesi sağlanabilmektedir. Sun vd. (2009, 2011) 16.46 m kalınlığında toprak dolgu altında yer alan, iç genişliği 2.74 m ve yüksekliği 2.44 m olan yerinde dökme (cast-in-place) bir betonarme kutu menfez üst döşemesi üzerine 21.6 kg/m³ yoğunluğunda ve 60 cm kalınlığında gefoam bloklar uygulamışlardır. Bu sıkışabilir içerik uygulamasının menfez üzerine etkiyen düşey gerilmeleri (gefoam blok uygulanmayan kesitte ölçülen değerlere oranla) %90 düzeyinde azalttığını rapor etmişlerdir. Vaslestad (2011, 2019) benzer bir çalışmada 10.8 m

kalınlığında siltli kil dolgu altında yer alan iç genişliği 2 m ve yüksekliği 1.85 m olan yerinde dökme bir betonarme kutu menfezin bir kesitinde menfez üst döşemesi üzerine 20 kg/m³ yoğunluğunda ve 50 cm kalınlığında geofoam bloklar uygulanmış ve bu uygulamanın menfez üzerine etkileyen düşey gerilmeyi (geofoam blok uygulanmayan kesitte ölçülen değerlere oranla) kısa vadede %50, uzun vadede ise %60 düzeyinde azalttığını rapor etmişlerdir. Geofoam blok sıkışabilir içeriğin ayrıca menfez perdeleri üzerine yerleştirilmesi ile perdeye etkileyen yanal zemin gerilmelerinin de azalması sağlanabilmektedir. Meguid vd. (2017) menfez-geofoam-zemin etkileşimini laboratuvar model deneyleri ile incelemiş ve deney çıktıları ile kalibre ettiği bir sayısal modeli kullanarak parametrik çalışmalar yapmışlardır. Meguid vd. (2017) menfez üst ve yan yüzeylerine menfez yüksekliğinin %25'i kalınlıkta olan 15 kg/m³ yoğunluklu geofoam bloklar yerleştirilmesi sonucunda, yaklaşık 7 metre kalınlığında bir toprak dolgunun neden olacağı örtü yükü gerilmesi (140 kPa) altında menfez üzerine etkileyen ortalama düşey gerilmede %64, menfez yan yüzeyine etkileyen ortalama yanal gerilmede ise %81 oranında azalma sağlandığını rapor etmişlerdir.

Bu çalışmada, kalın dolgular altında yer alan betonarme kutu menfezlerin davranışı sonlu eleman yöntemi ile çalışılan PLAXIS 2D yazılımı kullanılarak yapılan sayısal analizler ile incelenmiştir. İlk olarak, Meguid vd. (2017) tarafından gerçekleştirilen laboratuvar model deneylerinden elde edilen gerilme ölçümleri kullanılarak geofoam blok model parametreleri kalibre edilmiştir. Çalışmanın devamında ise, Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) tarafından sunulan standart kutu menfez tip kesitlerinden birisi seçilerek geofoam blok sıkışabilir içerik uygulaması ile bir dizi parametrik çalışma yapılmıştır.

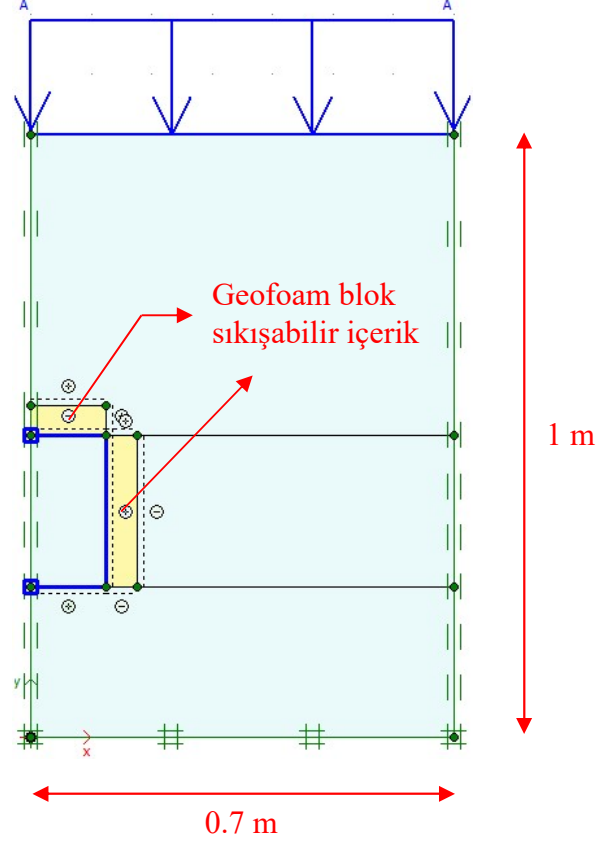
2. SAYISAL ANALİZLER

Sayısal analiz çalışması üç aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada Meguid vd. (2017) tarafından gerçekleştirilen laboratuvar model deneylerinden elde edilen gerilme ölçümleri kullanılarak geofoam blok model parametreleri kalibre edilmiştir. İkinci aşamada 6 m kalınlığında (KGM kutu menfezleri için en büyük dolgu yüksekliği) toprak dolgu altında yer alan 4 m x 4 m tek gözlü bir betonarme kutu menfez döşemesi üzerine 0.25, 0.5, 0.75 ve 1 m kalınlıklarda geofoam blok sıkışabilir içerik yerleştirilerek sıkışabilir içerik kalınlığının menfeze etkileyen zemin gerilmeleri ve menfez davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Üçüncü aşamada ise ikinci aşamada yapılan analizlerin çıktılarına dayanılarak bir sıkışabilir içerik kalınlığı seçilmiş ve bu kalınlıkta sıkışabilir içerik hem menfez döşemesi hem de menfez perdesi üzerlerine atanmıştır. Üçüncü aşamada ayrıca, sıkışabilir içerik atanmayan koşuldaki menfez tepkileri göz önünde bulundurularak, menfez döşeme ve perde kesitlerinin optimizasyonu için de bir analiz yapılmıştır.

2.1. Kalibrasyon Analizleri

Meguid vd. (2017) tarafından gerçekleştirilen laboratuvar model deneylerinde kullanılan zemin kutusunun eni 0.45 m, boyu 1.4 m ve yüksekliği 1.2 m'dir. Kutu tabanında 0.25 m kalınlığında iyi sıkıştırılmış zeminden bir yatak katmanı oluşturulmuştur. Yatak katmanının üzerine 0.25 m x 0.25 m göz açıklıklı, duvar et kalınlığı 1 cm ve uzunluğu 0.435 m olan bir çelik kutu menfez, menfezin 0.5 m üzerine kadar da sıkıştırılmış zemin dolgu yerleştirilmiştir. Menfez yüzeylerine yerleştirilen gerilme sensörlerinin deney zemininden zarar görmesini engellemek amacı ile kutu menfez ince bir PVC film ile kaplanmıştır. İki boyutlu analizler için, düşey simetri özelliğinden yararlanılarak, 0.7 m eninde ve 1 m yüksekliğinde bir model geometrisi oluşturulmuştur (Şekil 1). Kalibrasyon analiz çalışması

kapsamında iki adet laboratuvar model deneyi için sayısal analizler yapılmıştır. Birinci deney geofoam blok sıkışabilir içeriğin uygulanmadığı referans deneydir. İkinci deneyde ise menfez üst ve yan yüzeyleri üzerine 15 kg/m^3 yoğunluğunda ve 5 cm kalınlığında geofoam blok sıkışabilir içerik yerleştirilmiştir. İki deneyin analizinde de aynı sonlu eleman ağı ile çalışılması için bir genel model geometrisi oluşturulmuştur.



Şekil 1. Kalibrasyon analizleri için genel model geometrisi

Geofoam blok sıkışabilir içerik ve deney zemini için kullanılan model parametreleri Tablo 1’de verilmiştir. Stark vd. (2004) EPS yoğunluğu ile EPS başlangıç tanjant modülü arasında doğrusal bir ilişkinin bulunduğunu ve bu ilişkinin ampirik Eşitlik (1) ile ifade edilebileceğini belirtmiştir:

$$E_{ti} = 450 \times \rho - 3000 \quad (1)$$

Eşitlik (1)’de verilenler: E_{ti} = EPS başlangıç tanjant modülü (kPa) ve ρ = EPS yoğunluğudur (kg/m^3). Bu çalışma özelinde geofoam blok sıkışabilir içerik gerilme-şekil değiştirme davranışının doğrusal elastik olduğu varsayılmış ve buna dayanılarak elastisite modülü Eşitlik (1) ile verilen bağıntı kullanılarak belirlenmiştir. Tablo 1’de verilen diğer parametrelerin (geofoam blok sıkışabilir içerik Poisson Oranı, deney zemini model parametreleri ve arayüzey dayanım açıları) belirlenmesinde Meguid vd. (2017) tarafından yapılan sayısal analizlerin parametre girdisinden yararlanılmıştır.

Çelik kutu menfez plak elemanlar (plate elements) kullanılarak modellenmiş olup, kullanılan model parametreleri Tablo 2’de verilmiştir.

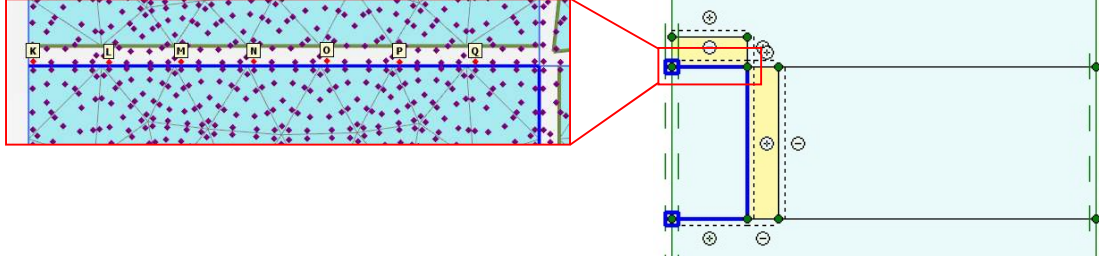
Tablo 1. Kalibrasyon analizlerinde geofoam blok sıkışabilir içerik, deney zemini ve arayüzeyler için kullanılan malzeme modelleri ve model parametreleri

Parametre	EPS	Deney zemini	EPS-zemin arayüzeyi	EPS-PVC arayüzeyi	Zemin-PVC	Birim
Malzeme modeli	Doğrusal Elastik	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	
Birim hacim ağırlık, γ_{unsat}	0.15	16.28	16.28	0.15	16.28	kN/m ³
Elastisite modülü, E	3750	150000	150000	3750	150000	kPa
Poisson Oranı, ν	0.1	0.3	0.3	0.1	0.3	
Kohezyon, c'		1	1	1	1	kPa
Kayma dayanımı açısı, ϕ'		47	31	17	24	°
Genleşme açısı, ψ		15	0	0	0	°

Tablo 2. Kalibrasyon analizlerinde çelik kutu menfez için kullanılan model parametreleri

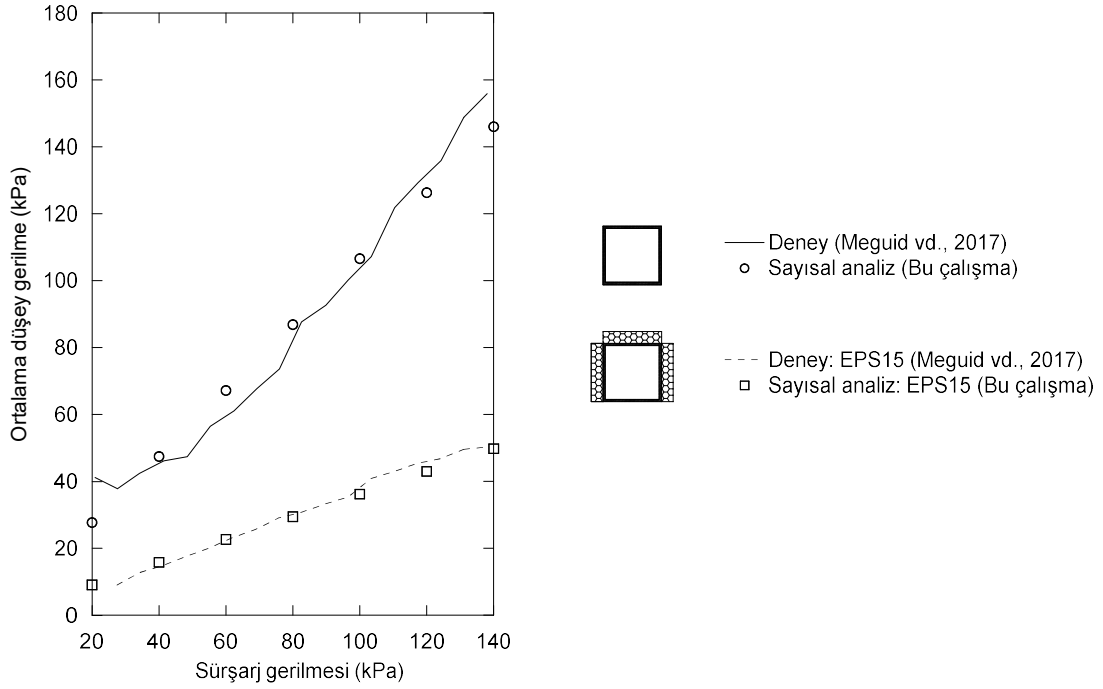
Parametre		Birim
Normal rijitlik, EA (kN/m)	2000000	kN/m
Eğilme rijitliği, EI (kNm ² /m)	16.67	kNm ² /m
Ağırlık, w (kN/m/m)	0.77	kN/m/m
Poisson Oranı, ν (-)	0.3	

Menfez, geofoam blok sıkışabilir içerik ve deney zemini aşamalı olarak yerleştirilmiştir. Zemin yüzeyinden uygulanan sürşarj gerilmesi model geometrisi üst sınırına düzgün yayılı çizgisel yük atanarak modellenmiştir. Düzgün yayılı çizgisel yükün uygulandığı adımlarda yükleme tipi “toplam çarpanlar (total multipliers)” olarak seçilmiş, yükün büyüklüğü her adımda 20 kPa artırılarak nihaî değer olan 140 kPa’ya ulaşılmıştır. Çelik kutu menfez üst yüzeyinde seçilen gerilme noktaları Şekil 2’de verilmiştir. Gerilme noktaları hemen hemen eşit aralıklar ile seçilmiş olup, farklı oturmalar nedeni ile gerilme yoğunlaşmasının en fazla olacağı köşe üzerindeki nokta seçilmemiştir.



Şekil 2. Kalibrasyon analizlerinde çelik kutu menfez üst yüzeyinde seçilen gerilme noktaları

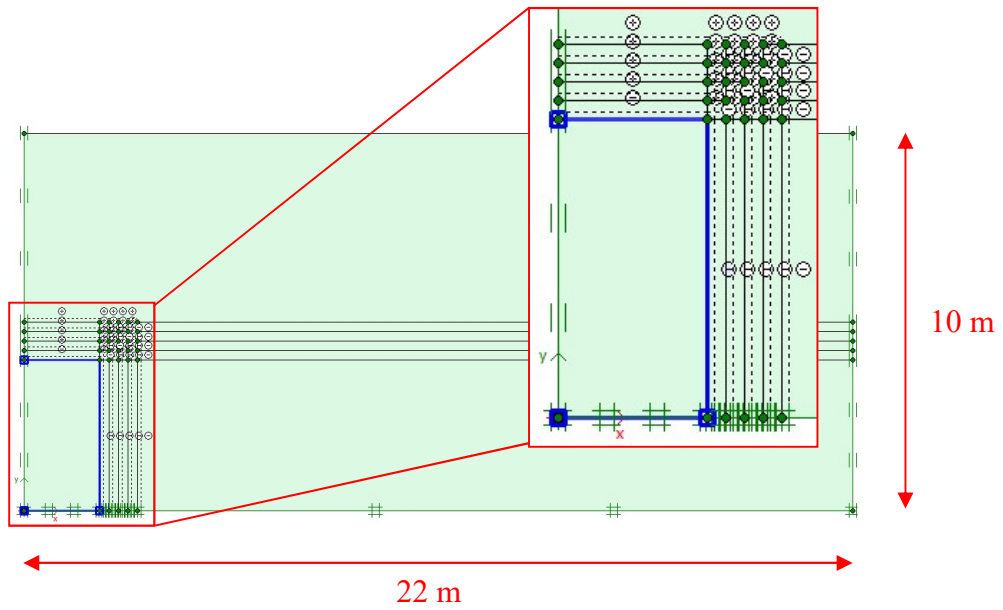
Düzgün yayılı çizgisel yük artışına karşılık menfez üst yüzeyinde hesaplanan düşey gerilmelerin ortalamaları, deneylerde ölçülen değerler ile birlikte, Şekil 3'te verilmiştir. Her iki koşul için de menfez üst yüzeyi üzerinde hesaplanan düşey gerilmelerin deneylerde ölçülen değerler ile uyumlu olduğu görülmüştür. Bir karayolu toprak dolgusunun neden olacağı düşey sürşarjlar altında geofoam blok sıkışabilir içerik davranışının doğrusal elastik olarak modellenebileceği ve elastisite modülü için Eşitlik (1) ile verilen bağıntının kullanılabilirliği sonucuna varılmıştır.



Şekil 3. Kalibrasyon analizlerinde menfez üst yüzeyinde hesaplanan ortalama düşey gerilmeler ve deneylerde ölçülen değerler

2.1. Parametrik Çalışma

Sayısal analizlerin ikinci aşaması olarak gerçekleştirilen parametrik çalışma için oluşturulan genel model geometrisi Şekil 4'te verilmiştir. İlk olarak kutu menfez üst döşemesi üzerine dört farklı kalınlıkta (0.25, 0.5, 0.75 ve 1 m) geofom blok sıkışabilir içeriğin yer aldığı koşullar için, sonrasında ise hem menfez döşemesi hem de menfez duvarı üzerinde seçilen kalınlıkta geofom blok sıkışabilir içeriğin yer aldığı koşul için analizler yapılmıştır. Bu neden ile (bütün analizlerde aynı sonlu eleman ağı ile çalışılması için) bir genel model geometrisi oluşturulmuştur. Düşey simetri özelliğinden yararlanılarak yarım geometri ile çalışılmıştır. Menfez taban düzeyinde düşey ve yatay hareketin olmadığı varsayılmıştır. Menfez etrafındaki gerilme dağılımının ve menfez davranışının model geometrisinin sağ sınırından etkilenmemesini sağlamak amacı ile bu sınır menfezin 20 metre açığında konumlandırılmıştır.



Şekil 4. Parametrik çalışma için genel model geometrisi: Geofom blok sıkışabilir içeriğin uygulanmadığı koşul

Geofom blok sıkışabilir içerik, sıkıştırılmış toprak dolgu ve EPS-zemin arayüzeyleri için kullanılan model parametreleri kalibrasyon analizleri için Tablo 1'de verilenler ile aynıdır. EPS-beton ve zemin-beton arayüzey dayanım açılarının belirlenmesinde literatürden yararlanılmıştır. Stark vd. (2004) EPS-priz almış beton arayüzeyi için dayanım açısının 29° olarak alınmasını önermektedir. Rinne (1989) iki farklı kum örneği ile gerçekleştirdiği deneylerde kum-beton arayüzey dayanımının kum kayma dayanımına yakın olduğunu belirtmiştir. Sayısal analizde kullanılan zeminin kayma dayanımı parametreleri ($\phi' = 47^\circ$, $\psi = 15^\circ$) direkt kesme deneyleri ile belirlenmiştir (Tablo 1; Meguid vd., 2017). Pik kayma dayanımı açısının çok büyük olması nedeni ile sayısal analizlerde zemin-beton arayüzeyi için rezidüel kayma dayanımı dikkate alınmış ve arayüzey dayanım açısı 32° olarak girilmiştir. EPS-beton ve zemin-beton arayüzeyleri için kullanılan model parametreleri Tablo 3'te verilmiştir.

KGM Sanat Yapıları Daire Başkanlığı tarafından verilen menfez tiplerinden 4 m x 4 m tek gözlü betonarme kutu menfezin döşemeleri 45 cm, duvarları ise 40 cm kalınlıktadır (KGM, 2012). Kutu menfez için beton sınıfı C25 olup, ACI 318-08 Standardı'na göre elastisite modülü $E_c = 23.5$ GPa olarak hesaplanmıştır (ACI 318-08, 2007). Betonarme kutu menfez plak elemanlar (plate elements) kullanılarak modellenmiş olup, kullanılan model parametreleri Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 3. Parametrik çalışmada EPS-beton ve zemin-beton arayüzeyleri için kullanılan malzeme modelleri ve model parametreleri

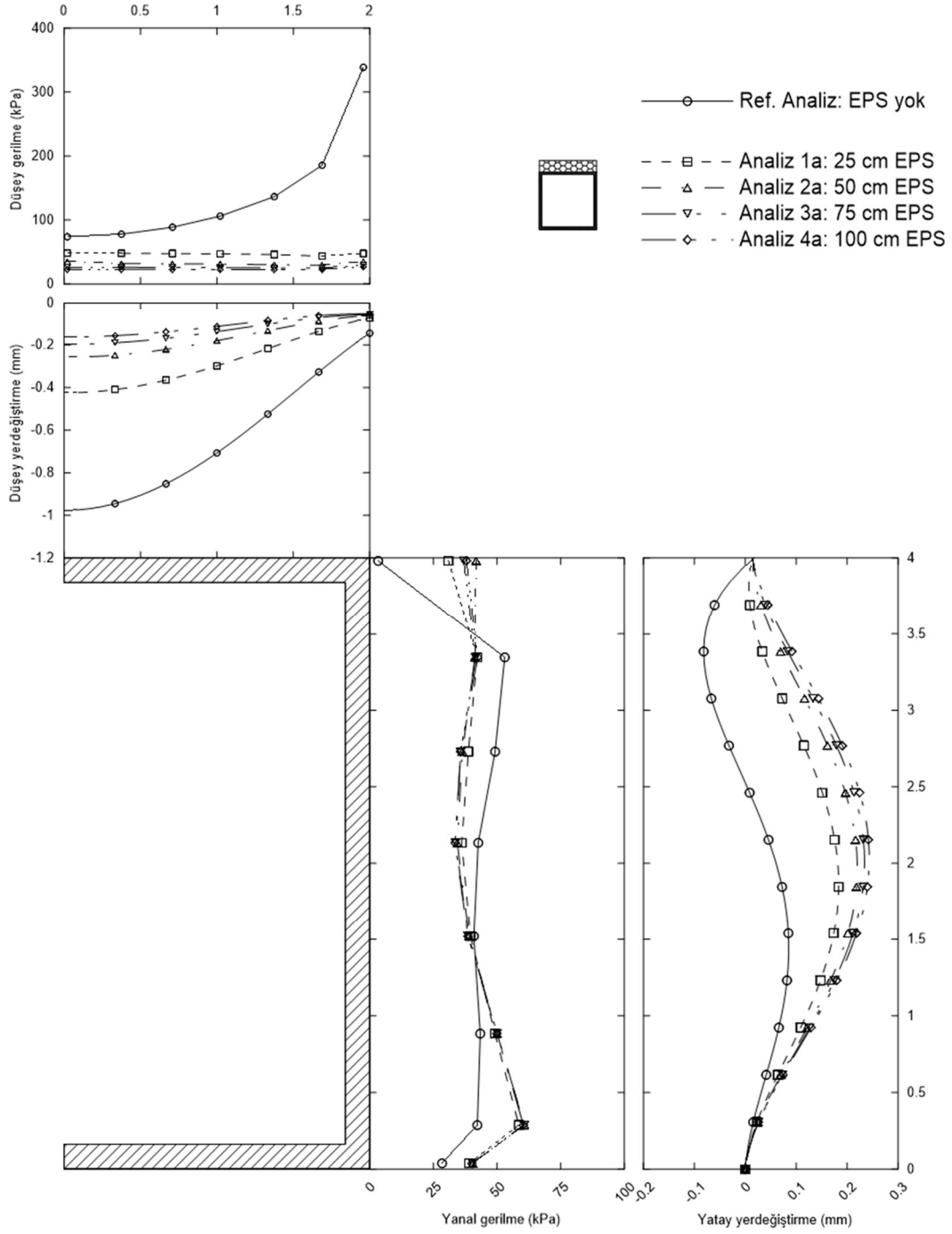
Parametre	EPS-beton arayüzeyi	Zemin-beton	Birim
Malzeme modeli	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	
Birim hacim ağırlık, γ_{unsat}	0.15	16.28	kN/m ³
Elastisite modülü, E	3750	150000	kPa
Poisson Oranı, ν	0.1	0.3	
Kohezyon, c'	1	1	kPa
Kayma dayanımı açısı, ϕ'	29	32	°
Genleşme açısı, ψ	0	0	°

Tablo 2. Parametrik çalışmada betonarme kutu menfez için kullanılan model parametreleri

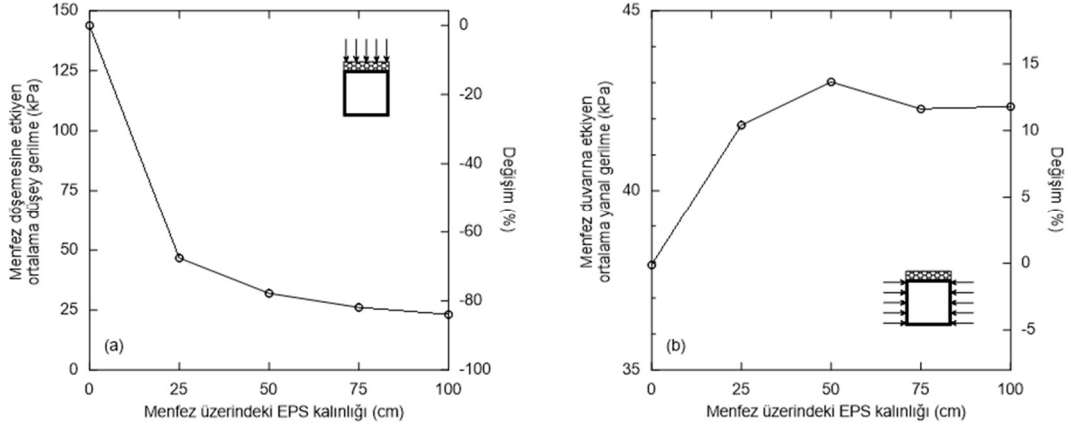
Parametre	Döşeme	Duvar	Birim
Normal rijitlik, EA (kN/m)	10580000	9400000	kN/m
Eğilme rijitliği, EI (kNm ² /m)	178500	125300	kNm ² /m
Ağırlık, w (kN/m/m)	10.8	9.6	kN/m/m
Poisson Oranı, ν (-)	0.2	0.2	

Menfez, geofoam blok sıkışabilir içerik ve sıkıştırılmış toprak dolgu aşamalı olarak yerleştirilmiştir.

Toplam 6 m kalınlığında dolgu altında yer alan betonarme kutu menfezin üst döşemesi üzerinde hesaplanan düşey gerilmeler ile düşey yer değiştirmeler ve duvarı üzerinde hesaplanan yanıl gerilmeler ile yatay yer değiştirmeler Şekil 5'te, kutu menfezin üst döşemesi üzerindeki ortalama düşey gerilmeler ve duvarı üzerindeki ortalama yanıl gerilmeler Şekil 6'da verilmiştir. Kutu menfezin üst döşemesi ve duvarındaki kesit tesirleri ise Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 5. Betonarme kutu menfez üst döşemesi üzerinde hesaplanan düşey gerilmeler ile düşey yer değiştirmeler ve duvarı üzerinde hesaplanan yanal gerilmeler ile yatay yer değiştirmeler

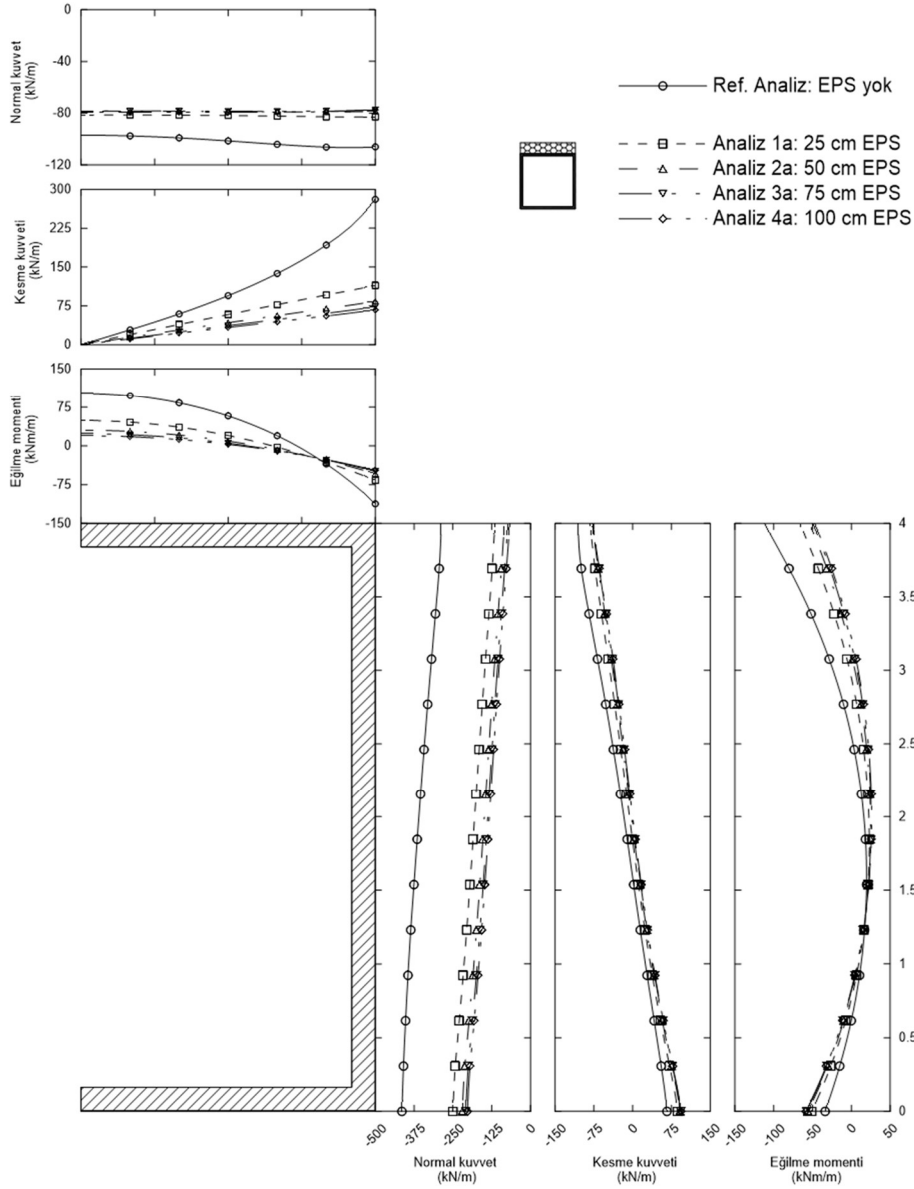


Şekil 6. (a) Döşeme üzerindeki ortalama düşey gerilmeler ve (b) Duvar üzerindeki ortalama yanal gerilmeler

Geofoam blok sıkışabilir içeriğin yalnızca betonarme kutu menfez üst döşemesi üzerinde yer aldığı koşulda menfez üzerine etkileyen düşey gerilmelerin önemli ölçüde azaldığı görülmüştür (Şekil 5 ve Şekil 6a). Referans analizde hesaplanan değere göre (144 kPa); menfez üst döşemesine etkileyen ortalama düşey gerilme geofoam blok sıkışabilir içerik kalınlığının 25, 50, 75 ve 100 cm olduğu koşullarda sırası ile %68, 78, 82 ve 84 oranlarında azalmıştır. Örtü yükü gerilmeleri ($\gamma \times H$) ile karşılaştırıldığında, menfez üzerine etkileyen ortalama düşey gerilme geofoam blok sıkışabilir içerik uygulanmayan koşulda %47 oranında artmış; geofoam blok sıkışabilir içerik kalınlığının 25, 50, 75 ve 100 cm olduğu koşullarda ise sırası ile %50, 65, 70 ve 72 oranlarında azalmıştır. Geofoam blok sıkışabilir içerik uygulanmayan koşulda döşeme üzerindeki düşey gerilmelerin örtü yükü gerilmesinden daha büyük olması, zemin ortamında negatif zemin kemerlenmesinin geliştiğini göstermektedir. Menfezin her iki yanında yer alan zeminlerde (menfez oturmalarına oranla) daha büyük oturmalar meydana gelmiş ve farklı oturmalar nedeni ile menfez üzerinde yer alan zemin ortamında negatif zemin kemerlenmesi gelişmiştir. Menfez üst döşemesi üzerinde en büyük düşey yer değiştirmeler, beklenildiği üzere, menfez orta noktasında meydana gelmiştir (Şekil 5). Referans analizde hesaplanan değere göre (-0.98 mm); menfez üst döşemesi orta noktasında düşey yer değiştirme geofoam blok sıkışabilir içerik kalınlığının 25, 50, 75 ve 100 cm olduğu koşullarda sırası ile %56, 74, 80 ve 83 oranlarında azalmıştır.

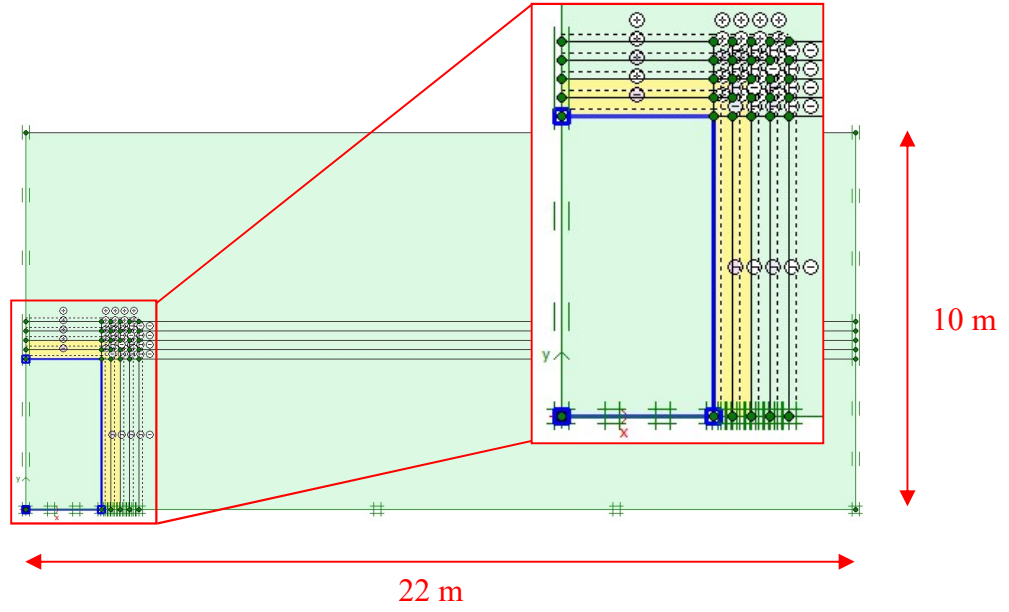
Geofoam blok sıkışabilir içeriğin yalnızca betonarme kutu menfez üst döşemesi üzerinde yer aldığı koşulda menfez duvarına etkileyen yanal gerilmelerdeki değişim görece çok küçüktür (Şekil 5 ve Şekil 6b). Referans analizde hesaplanan değere göre (38 kPa), menfez duvarına etkileyen ortalama yanal gerilme %10 ilâ 12 oranlarında artmıştır. Geofoam blok sıkışabilir içerik uygulanan koşullarda menfez duvarına etkileyen ortalama yanal gerilmenin artması, menfez döşemesi üzerinde gelişen pozitif zemin kemerlenmesi nedeni ile menfez yanlarında gerilmelerin yoğunlaşması ile ilişkilendirilmiştir. Pozitif zemin kemerlenmesi nedeni ile menfezin üzerinden yanlarına doğru gerilme aktarımı meydana gelmiş ve bu bölgelerde düşey gerilmeler artmıştır. Düşey gerilmelerde meydana gelen artışlar ise duvara etkileyen yanal gerilmelerin bazı düzeylerde artmasına neden olmuştur. Referans analizde menfez duvarında hesaplanan yatay yer değiştirmeler menfez üst döşemesinde hesaplanan değerlere oranla çok küçük olup, ± 0.08 mm arasında değişmektedir (Şekil 5). Duvarda en büyük yatay yer değiştirme geofoam blok sıkışabilir içerik kalınlığının 25, 50, 75 ve 100 cm olduğu koşullarda sırası ile 0.18, 0.22, 0.23 ve 0.24 mm olarak hesaplanmıştır. Duvar yatay

yer değiştirmelerinde küçük miktarda meydana gelen artışlar duvara etkiyen ortalama yanal gerilmelerde meydana gelen artış ile ilişkilendirilmiştir.



Şekil 7. Betonarme kutu menfez üst döşemesinde ve duvarında hesaplanan kesit tesirleri

Çalışmanın ikinci bölümünde, verilen koşullar için, geofoam blok sıkışabilir içerik kalınlığının 50 cm'den daha büyük olduğu koşullarda zemin ve yapı tepkisindeki değişimin görece çok küçük düzeylerde olduğu görülmüştür. Çalışmanın üçüncü bölümünde geofoam blok sıkışabilir içerik hem menfez üst döşemesi hem de menfez duvarı üzerine atanmış ve içerik kalınlığı 50 cm olarak seçilmiştir (Şekil 8). Bu koşul için betonarme kutu menfezin üst döşemesi üzerinde hesaplanan düşey gerilmeler ile düşey yer değiştirmeler ve duvarı üzerinde hesaplanan yanal gerilmeler ile yatay yer değiştirmeler Şekil 9'da ve kutu menfezin üst döşemesi ve duvarındaki kesit tesirleri ise Şekil 10'da verilmiştir.

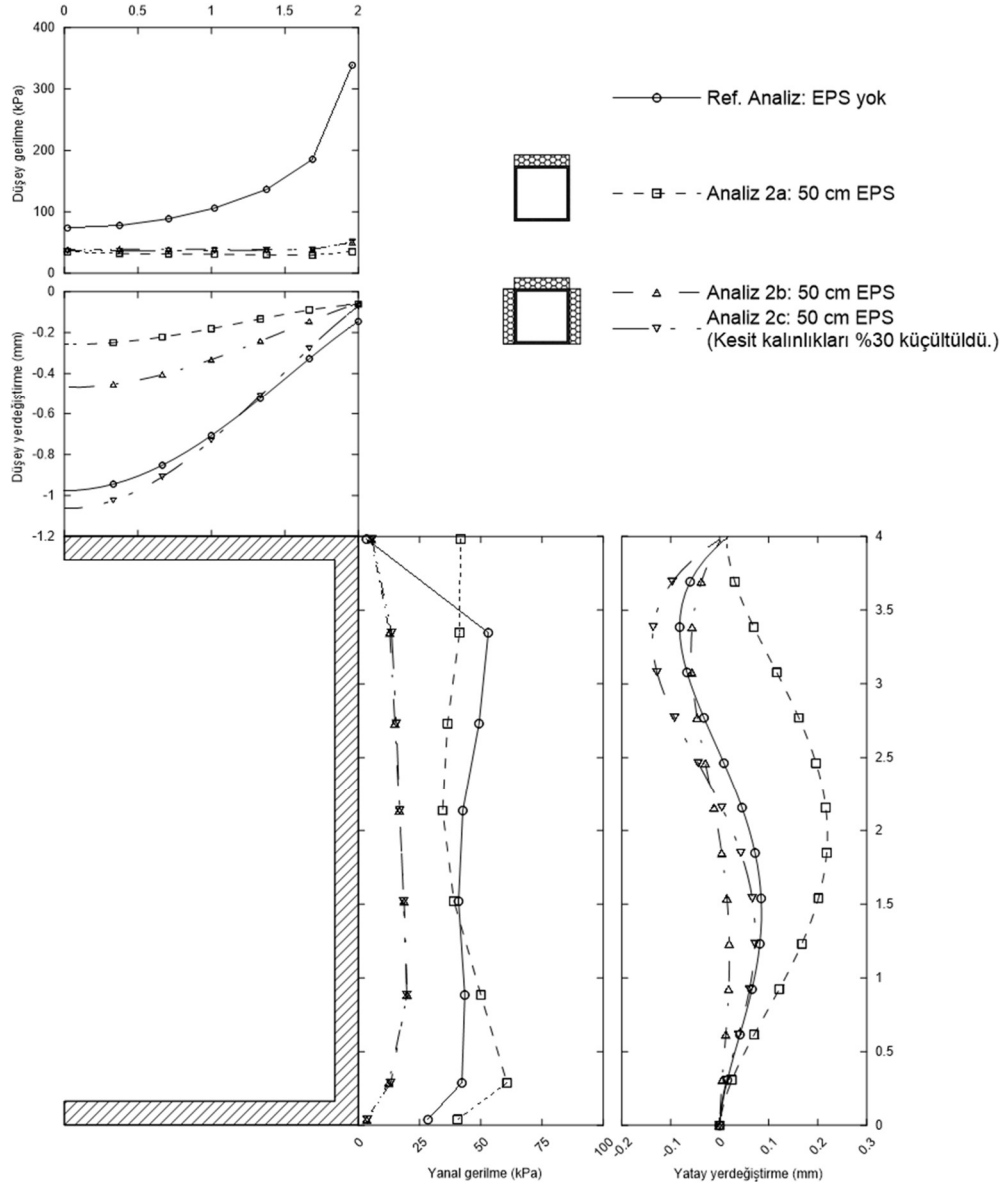


Şekil 8. Parametrik çalışma için genel model geometrisi: 50 cm kalınlığında geofom blok sıkışabilir içeriğin hem menfez üst döşemesi hem de menfez duvarı üzerinde yer aldığı koşul

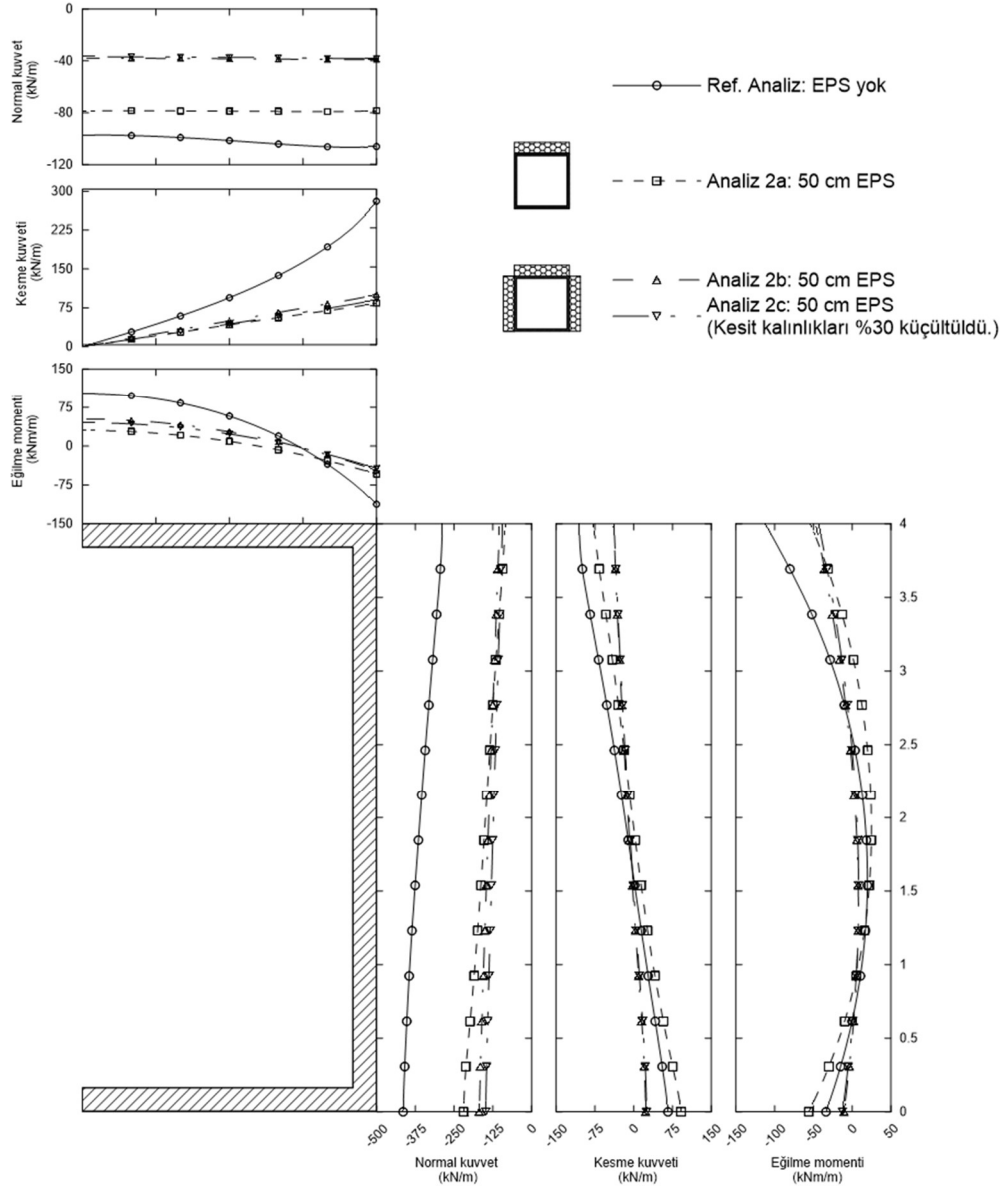
Geofom blok sıkışabilir içeriğin betonarme kutu menfezin hem üst döşemesi hem de duvarı üzerinde yer aldığı koşulda üst döşeme üzerine etkiyen düşey gerilmelerin yanı sıra duvara etkiyen yanıl gerilmelerin de önemli ölçüde azaldığı görülmüştür (Şekil 9). Menfez üst döşemesine etkiyen ortalama düşey gerilme referans analizde hesaplanan değere göre (144 kPa) %72, örtü yükü gerilmesine göre (90 kPa) ise %55 oranında azalmıştır. Bununla birlikte, döşeme üzerine etkiyen ortalama düşey gerilme geofom blok sıkışabilir içeriğin yalnızca döşeme üzerinde yer aldığı koşulda hesaplanan değere göre (32 kPa) %27 oranında artmıştır. Bu artışın gerekçelendirilmesinden önce zemin kemerlenmesi mekanizmasının gelişimine yönelik kısa bir açıklamanın yapılması gerekli görülmüştür: Menfez üst döşemesi üzerinde yer alan sıkışabilir içerik zemin ortamında farklı oturmalarla neden olmaktadır. Farklı oturmalardan dolayı sıkışabilir içerik üzerinde yer alan zemin kütlesi içinde kayma yüzeyleri oluşmakta ve bu yüzeyler üzerinde yukarı yönlü kayma kuvvetleri mobilize olmaktadır. Mobilize olan kayma kuvvetleri asal gerilme doğrultularında meydana gelen rotasyonun sonucu olup, büyüklükleri zeminin kayma dayanımına ve farklı oturmalardan dolayı büyüklüğüne bağlıdır. Mobilize olan kayma kuvvetleri nedeni ile görece hareket eden zemin kütlesinden görece durağan kalan komşu zemin kütlelerine gerilme aktarımı gerçekleşmektedir. Bunun sonucunda, görece hareket eden zemin kütlesi yükünün görece küçük bir bölümünü yapıya aktarılmaktadır. Sıkışabilir içeriğin hem menfezin üst döşemesi hem de duvarı üzerinde yer aldığı koşulda döşeme kotu üzerinde geofom blok sıkışabilir içerik genişliği 1.5 kat daha büyüktür (3 m). Dolayısıyla ile, sıkışabilir içeriğin yalnızca üst döşeme üzerinde yer aldığı koşuldakine göre, daha geniş bir zemin kütlesinde görece hareket meydana gelmiştir. Buna ek olarak, menfez duvarı üzerinde yer alan sıkışabilir içerikte meydana gelen yanıl deformasyonlar da görece hareket eden zemin kütlesinin genişliğini artırmaktadır. Menfez döşemesi üzerinde pozitif zemin kemerlenmesinin görece daha küçük bir düzeyde gelişmesi bu mekanizma ile açıklanmıştır. Menfez döşemesi üzerindeki düşey gerilmelerin görece büyük olmasına bağlı olarak, döşemedeki düşey yer değiştirmeler geofom blok sıkışabilir içeriğin yalnızca döşeme üzerinde yer aldığı koşula göre bir miktar artmıştır (Şekil 9). Buna karşın, bu koşulda döşeme orta noktasındaki düşey yer değiştirme referans analizde hesaplanan değerden yarıya düşürülmüştür.

Geofoam blok sıkışabilir içeriğin betonarme kutu menfezin hem üst döşemesi hem de duvarı üzerinde yer aldığı koşulda duvara etkileyen yanal gerilmelerin de önemli ölçüde azaldığı görülmüştür (Şekil 9). Menfez duvarına etkileyen ortalama yanal gerilme referans analizde hesaplanan değere göre %66, geofoam blok sıkışabilir içeriğin yalnızca menfez üst döşemesi üzerinde yer aldığı koşulda hesaplanan değere göre ise %70 oranında azalmıştır. Bu azalmaya bağlı olarak, duvardaki yatay yer değiştirmeler geofoam blok sıkışabilir içeriğin yalnızca döşeme üzerinde yer aldığı koşula göre azalmış ve referans analiz koşulunda hesaplanan değerler düzeyine inmiştir (Şekil 9).

Geofoam blok sıkışabilir içerik çözümü bir betonarme kutu menfez üzerine etkileyen zemin gerilmelerinin önemli ölçüde azalmasını ve buna bağlı olarak yapı tepkisinin iyileşmesini sağlayabileceği gibi menfez kesitlerinin küçültülmesine de olanak sağlayabilmektedir. Çalışmanın son bölümünde menfez üst döşemesindeki ve duvarındaki yer değiştirmeler göz önünde bulundurularak basit optimizasyon analizleri yapılmıştır. Menfez döşemesi ve duvarı üzerinde 50 cm kalınlığında geofoam blok sıkışabilir içeriğin yer aldığı bu analizlerde döşeme ve duvar kalınlıkları, referans analizde hesaplanan yer değiştirme değerlerine ulaşıncaya kadar, aynı oranlarda küçültülmüştür. Döşeme ve duvar kalınlıklarının %30 oranında küçültüldüğü koşulda döşemedeki düşey yer değiştirmelerin ve duvardaki yatay yer değiştirmelerin referans analizinde hesaplanan değerlere ulaştığı görülmüştür. Menfez üzerine etkileyen zemin gerilmelerindeki değişim, kesit küçültülmesinin yapılmadığı koşula göre, göz ardı edilebilir düzeydedir.



Şekil 9. Betonarme kutu menfez üst döşemesi üzerinde hesaplanan düşey gerilmeler ile düşey yer değıştirmeler ve duvarı üzerinde hesaplanan yanal gerilmeler ile yatay yer değıştirmeler



Şekil 10. Betonarme kutu menfez üst döşemesinde ve duvarında hesaplanan kesit tesirleri

3. SONUÇLAR

Bu çalışmada, geofom blok sıkışabilir içerik uygulamasının kalın dolgular altında yer alan betonarme kutu menfezlerin davranışı üzerindeki etkisi iki boyutlu sayısal analizler ile incelenmiştir. Meguid vd. (2017) tarafından gerçekleştirilen ölçüm aletleri yerleştirilmiş laboratuvar model deneyinden elde edilen veriler kullanılarak geofom blok model parametreleri kalibre edilmiş; karayolu toprak dolgusunun neden olacağı düşey sürşarjlar altında geofom blok sıkışabilir içerik davranışının doğrusal elastik olarak modellenebileceği ve elastisite modülü hesabı için Stark vd. (2004) tarafından sunulan ampirik doğrusal bağıntının kullanılabilmesi sonucuna varılmıştır.

Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından sunulan standart kutu menfez tiplerinden olan 4 m x 4 m tek gözlü betonarme kutu menfezin 6 m kalınlığında geleneksel sıkıştırılmış toprak dolgu altında yer aldığı koşul parametrik sayısal analiz çalışması için referans koşul olarak belirlenmiştir. 15 kg/m³ yoğunluğunda geofom blok sıkışabilir içeriğin (a) yalnızca menfez üst döşemesi üzerinde yer aldığı ve (b) hem menfez üst döşemesi hem de duvarı üzerinde yer aldığı koşullar için yapılan sayısal analizler ile menfez üzerine etkileyen zemin gerilmelerinde ve yapı tepkisinde meydana gelen değişimler incelenmiştir. Geofom blok sıkışabilir içeriğin yalnızca menfez üst döşemesi üzerinde yer aldığı koşulda, içerik kalınlığına bağlı olarak, döşeme üzerine etkileyen ortalama düşey gerilmenin %68 ilâ 84 oranında azaldığı, duvar üzerine etkileyen ortalama yanal gerilmenin ise %10 ilâ 12 oranında arttığı görülmüştür. 50 cm kalınlığında geofom blok sıkışabilir içeriğin hem menfez üst döşemesi hem de menfez duvarı üzerinde yer aldığı koşulda ise döşeme üzerine etkileyen ortalama düşey gerilmenin %72, duvar üzerine etkileyen yanal gerilme ise %66 oranında azaldığı görülmüştür.

Çalışmanın son bölümünde betonarme kutu menfez için basit bir kesit optimizasyon analizi yapılmıştır. Menfez döşemesi ve duvarı üzerinde 50 cm kalınlığında geofom blok sıkışabilir içeriğin yer aldığı koşulda döşeme ve duvar kalınlıklarının %30 oranında küçültülmesi ile döşemedeki düşey yer değiştirmeler ile duvardaki yatay yer değiştirmelerin referans analizinde hesaplanan değerlere ulaştığı görülmüştür. Bu basit kesit optimizasyon analizi Geoteknik Mühendisliği bakış açısı ile ve yalnızca menfez üzerindeki zemin gerilmeleri ile üst döşeme ve duvardaki yer değiştirmeler göz önünde bulundurularak yapılmıştır. Bu analizden elde edilen sonuçların Yapı Mühendisliği bakış açısı ile değerlendirilmesi gerekmektedir.

Geofom blok sıkışabilir içerik uygulamasının kutu menfezler üzerine etkileyen zemin gerilmeleri ve menfez davranışı üzerindeki etkilerinin birebir ölçekli, ölçüm aletleri yerleştirilmiş arazi deneyleri ile incelenmesi önerilmektedir. Farklı sıkışabilir içerik yerleşim konfigürasyonları ile yapılacak arazi ölçeğindeki deneyler uygulamanın anlaşılması ve geliştirilmesinde mühendislere ışık tutacaktır.

KAYNAKLAR

- ACI 318-08 (2007). "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary", United States.
- Aabøe, R., Bartlett, S. F., Duškov, M., Frydenlund, T. E., Mandal, J. N., Negusse, D., Özer, A. T., Tsukamoto, H., Vaslestad, J. (2019), Geofom Blocks in Civil Engineering Applications. In: Arellano D., Özer A., Bartlett S., Vaslestad J. (eds) Proceedings of 5th

- International Conference on Geofam Blocks in Construction Applications (EPS2018), Kyrenia, May 9-11, 2018, 3-38. Doi: 10.1007/978-3-319-78981-1_1
- Aab e, R. (2011), "40 Years of Experience with the Use of EPS Geofam Blocks in Road Construction", Proceedings of 4th International Conference on Geofam Blocks in Construction Applications, EPS 2011, June 6-8, 2011, Lillestr m, Norway.
- ASTM Standard D4439. (2018), "Standard Terminology for Geosynthetics", American Society for Testing and Materials, Pennsylvania, USA.
- ASTM Standard D6817/D6817M. (2017), "Standard Specification for Rigid Cellular Polystyrene Geofam", American Society for Testing and Materials, Pennsylvania, USA.
- Horvath, J. S. (2004), "Geofam Compressible Inclusion: The New Frontier in Earth Retaining Structures," Geotechnical Engineering for Transportation Projects, GeoTrans 2004, ASCE, 1925-1934.
- Horvath, J. S. (2010), "Lateral Pressure Reduction on Earth-Retaining Structures Using Geofams: Correcting Some Misunderstandings", Proc., ER2010: Earth Retention Conference 3, ASCE, Reston, VA.
- Karayolları Genel M d rl g  (KGM) (2012), "Standart Kutu Menfez Tipleri (Box-Culvert)", Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleřme Bakanlığı, Karayolları Genel M d rl g , Sanat Yapıları Dairesi Başkanlığı, Ankara.
- Meguid, M. A., Ahmed, M. R., Hussein, M. G. and Omeman, Z. (2017), "Earth Pressure Distribution on a Rigid Box Covered With U-Shaped Geofam Wrap", International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, (3)11, <https://doi.org/10.1007/s40891-017-0088-4>
-  zer, A. T., Akınay, E. (2019), "First Geofam Roadway Embankment Application in Turkey", In: Arellano D.,  zer A., Bartlett S., Vaslestad J. (eds) Proceedings of 5th International Conference on Geofam Blocks in Construction Applications (EPS2018), Kyrenia, May 9-11, 2018, 71-80. Doi: 10.1007/978-3-319-78981-1_5
- Özer, A. T., Akınay, E. ve T rer, E. (2018), "Geofam Blokların İstinat Duvarı Uygulamalarında Kullanılması", Zemin Mekaniđi ve Geoteknik Mühendisliği 17. Ulusal Konferansı, 26-28 Eylül 2018, İstanbul Üniversitesi, İstanbul
- Özer, A. T., Akınay, E. (2017), "Geofam Blok Yol Dolgusunun Kısa Vade Performansının Aletsel Gözlemler Işığında Değerlendirilmesi", 7. Geoteknik Sempozyumu, 22-24 Kasım 2017, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Özer, A. T., Danyıldız, E., Akınay, E., Laçın, L., Aliođlu,  . K., İnallı, D., Vanlı, S., Dönmez,  .,  zaydın, İ. K.,  elik, A., İreç, U., Tuđral, M. A., Marangoz, D. ve Marangoz, K. (2017), "Geofam blokların gömülü boru hatları üzerine inşa edilecek yol dolgularının inşasında kullanılması: Bir vaka analizi", Yedinci Ulusal Geosentetikler Konferansı, G7 2017, 11-12 Mayıs 2017, Bođaziçi Üniversitesi, İstanbul, 137-152.
- Rinne, N. F. (1989), "Evaluation of Interface Friction between Cohesionless Soil and Common Construction Materials", M.Sc. Thesis, The University of British Columbia.
- Stark, T.D., Arellano, D., Horvath, J.S. & Leshchinsky, D. (2004), "Guideline and Recommended Standard for Geofam Applications in Highway Embankments", NCHRP Report 529, Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Sun, L., Hopkins, T.C. and Beckham, T.L., (2009), "Reduction of Stresses on Buried Rigid Highway Structures Using the Imperfect Ditch Method and Expanded Polystyrene (Geofam)", Research Report KTC-07-14/SPR-228-01-1F, Kentucky Transportation Center, University of Kentucky, Lexington Kentucky.
- Sun, L., Hopkins, T.C. and Beckham, T.L., (2011), "Long-Term Monitoring of Culvert Load Reduction Using an Imperfect Ditch Backfilled with Geofam", Transportation Research Record, 2212: 56-64.

- TS EN 14933 (2007), “Isı Yalıtım Mamulleri ve Hafif Dolgular- İnşaat Mühendisliği Uygulamaları İçin - Genleştirilmiş Polistirenden (EPS) Fabrikasyon Mamuller – Özellikler”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye
- Vaslestad, J. and Sayd, M. S. (2019), “Load Reduction on Buried Rigid Culverts, Instrumented Case Histories and Numerical Modeling”, In: Arellano D., Özer A., Bartlett S., Vaslestad J. (eds) Proceedings of 5th International Conference on Geofoam Blocks in Construction Applications (EPS2018), Kyrenia, May 9-11, 2018, 115-128
- Vaslestad, J., Sayd, M. S., Johansen, T. H. and Wiman, L. (2011), “Load Reduction and Arching on Buried Rigid Culverts using EPS Geofoam. Design Method and Instrumented Field Tests”, Paper presented at the 4th international conference on geofoam blocks in construction applications, Lillestrøm, Norway, 6–8 June 2011