



TMMOB  
İnşaat Mühendisleri Odası



## DALGA KAYNAKLI DENİZ TABANI SIVILAŞMASININ GÖMÜLÜ ALTYAPILAR ETRAFINDA SAYISAL MODELLEMESİ

**S. Utku YILMAZ<sup>1</sup>**

Ar. Gör.

[yilmazselaha@itu.edu.tr](mailto:yilmazselaha@itu.edu.tr)

İstanbul, Türkiye

**V. Ş. Özgür KIRCA<sup>2</sup>**

Prof. Dr.

[kircave@itu.edu.tr](mailto:kircave@itu.edu.tr)

İstanbul, Türkiye

**B. Mutlu SUMER<sup>3</sup>**

Prof. Dr.

[bms@bmsumer.com](mailto:bms@bmsumer.com)

İstanbul, Türkiye

### ÖZET

Enerji sektöründe yoğun olarak kullanılmakta olan deniz tabanına gömülü boru hatları ve enerji iletim kabloları gibi altyapıların tasarımı, kıyı ve geoteknik mühendisliği açısından zorlu problemler ortaya çıkarmaktadır. Bunlardan biri olan zemin sıvılaşması, boru hatları gibi gömülü yapıların zemine yerleştirilmesi sonucu örselenen zeminin, dalga veya deprem gibi etkilerle stabil yapısının bozulması olarak ortaya çıkmakta ve söz konusu yapılarda ciddi hasarlara neden olabilmektedir. Bu çalışmada, OpenFOAM platformunda geliştirilmekte olan bir sayısal model ile gömülü boru hattı ve enerji nakil kabloları gibi altyapılar etrafında dalga kaynaklı deniz tabanı sıvılaşması modellenmiştir. Geliştirilen model deneysel veriler ile doğrulanmış ve deniz tabanına gömülü altyapıların zeminin dalga kaynaklı sıvılaşma potansiyelini nasıl etkilediği incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Boşluk suyu basıncı, dalga kaynaklı zemin sıvılaşması, boru hattı, gömülü altyapılar, zemin efektif gerilmesi, OpenFOAM.

1 İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34467 Maslak/İstanbul

2 BM SUMER Mühendislik ve Araştırma, İTÜ Teknokent ARI1, 34467 Maslak/İstanbul  
İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul

3 BM SUMER Mühendislik ve Araştırma, İTÜ Teknokent ARI1, 34467 Maslak/İstanbul

## ABSTRACT

### *Numerical Modelling of Wave-Induced Seabed Liquefaction Around Buried Infrastructures*

Pipelines and power transmission cables buried in the seabed, which have been indispensable infrastructures for energy industry, pose many design challenges for coastal, marine, and geotechnical engineers. Seabed liquefaction, as one such problem, may cause significant damages for buried structures such as submarine pipelines when the loosened soil around the structure loses its integrity because of the cyclic loads due to earthquakes or waves. In this study, seabed liquefaction around buried structures are investigated by means of a numerical model that is being developed within the OpenFOAM CFD toolbox. The model is validated against available experimental data in the literature, and it is utilized to study how the presence of buried infrastructures affects wave-induced liquefaction.

**Keywords:** pore water pressure, wave-induced soil liquefaction, buried infrastructures, soil effective stress.

## AMAÇ

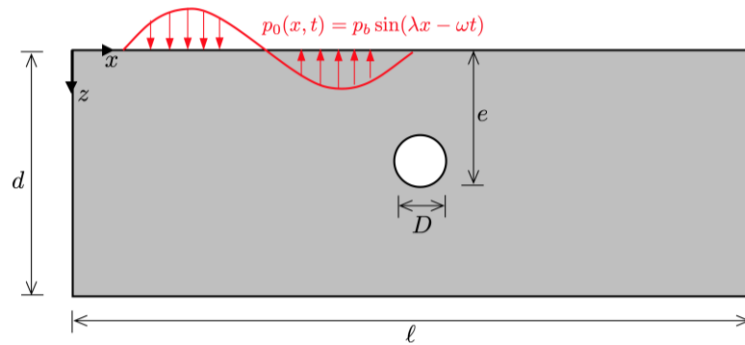
Denizaltı boru hatları, yaklaşık 50 yıldır petrol ve gaz endüstrisi için en önemli deniz altyapılarından biri olmuştur. Benzer şekilde, açık deniz rüzgâr enerjisi teknolojisinin gelişmesiyle birlikte, enerjinin gerek rüzgâr tarlası içinde gerek rüzgâr tarlasından şebekeye naklini sağlayan kablolarının sayısı ve uzunlukları sürekli artmakta ve açık deniz kabloları gitgide önem kazanmaktadır. Güç iletiminde kullanılan bir açık deniz kablosunun çapı genellikle 0,05-0,4 m arasında iken, petrol ve gaz boru hatlarının çapları 0,2 m ilâ 1,5 m'dir. Açık deniz kablolarının boyutları, denizaltı boru hatlarına nispeten küçük olmasına rağmen, iki yapının geometrik benzerliği göz önüne alındığında, denizaltı boru hatlarının stabilitesi için kullanılagelen genel tasarım yönergeleri açık deniz kabloları için de çoğu durumda aynen benimsenmiştir. Denizaltı boru hatları ve açık deniz kabloları gibi altyapılar, gevşek durumdaki silt veya ince kum gibi ince taneli zeminlere gömüldüklerinde dalga kaynaklı sıvılaşma riski bu yapıların stabilitesini tehdit etmektedir [1]. Şiddetli dalgaların neden olduğu bu tekrarlı kayma gerilmeleri ve deformasyonları, zemin tanelerini yeniden düzenleyerek boşluk hacmini azaltırlar. Sonuç olarak, boşluk suyu basıncı birikir ve sonunda deniz tabanı zeminin efektif gerilmesini aşar, bu da zeminin sıvılaşmasına neden olur [1].

Bu durumda zemin, taneler ve deniz suyu karışımından oluşan bir sıvı gibi davranır ve taşıma kapasitesini kaybeder. Deniz tabanının sıvılaşması durumunda, yoğunluğu sıvılaşmış zeminin yoğunluğundan daha büyük olan gömülü nesnelere daha derine batarken, daha az yoğunluğa sahip nesnelere yüzeye doğru çıkabilir. Bu batma veya çıkma, tamirati çok güç ve yüksek maliyetli hasarlara neden olmaktadır. Deniz tabanındaki gömülü boru hatlarının veya açık deniz kablolarının varlığı zeminin sıvılaşma davranışını değiştirir. Çok sayıda araştırma, boru hatlarının (veya kablolar gibi geometrik olarak benzer yapıların) varlığının, boşluk suyu basıncı oluşumunu ve sıvılaşma riskini önemli ölçüde artırabileceğini göstermektedir [2-6]. Bu nedenle, tasarımcılar ve uygulayıcılar için boru hatları veya kablolar etrafındaki sıvılaşma potansiyelini güvenilir yöntemlerle değerlendirebilmek önemlidir. Bu çalışmada, deniz tabanına gömülü bir boru hattı/kablo etrafındaki sıvılaşma potansiyelinin sayısal modelleme yöntemiyle benzeştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla, devam etmekte olan NuLIMAS (Numerical Modelling of Liquefaction Around Marine Structures / Deniz Yapıları Çevresinde Sıvılaşmanın Sayısal Modellenmesi) Projesi kapsamında deniz yapıları çevresinde dalga kaynaklı sıvılaşmanın modellenmesi için geliştirilmekte olan sayısal model kullanılmıştır. Dünya çapında en çok kullanılan hesaplamalı akışkanlar dinamiği platformlarından biri olan OpenFOAM platformunda geliştirilen bu sayısal modelde, ilk aşamada tekrarlı kayma gerilmeleri altında zemindeki boşluk suyu basıncının artışının modellenmesi kapsama alınmıştır. Projenin sonraki aşamalarında, sıvılaşmış zeminin davranışının ve sıvılaşma sonrasında ortaya çıkan zemin sıvılaşmasının da modellenmesi hedeflenmektedir. Mevcut çalışmada da kullanılan sayısal model, temel olarak iki bileşenden oluşmaktadır: (1), OpenFOAM'daki biotFoam çözücüsü aracılığıyla poro-elastik ortam için Biot denklemlerinin çözülmesi [7] ile tekrarlı kayma gerilmelerinin hesabı, (2). İlk bileşenden bulunan tekrarlı kayma gerilmeleri kullanılarak boşluk suyu basıncının hesabı [2, 8, 1 (bölüm 3)]. pressBuildupFoam [9] olarak adlandırılan bu yeni OpenFOAM çözücüsü, mevcut çalışmada boru hatlarının veya kabloların pürüzsüz yüzey (slip), pürüzlü yüzey (no-slip) veya kısmen pürüzlü yüzey (partially rough veya partially slip) gibi farklı sınır koşullarını da dikkate alacak şekilde ayrıca geliştirilmiştir. Bu da modele, pratik mühendislik uygulamalarında kullanılabilmesi ve sınır koşullarını daha gerçekçi ele alabilmesi konusunda avantaj sağlamaktadır.

## PROBLEMİN TANIMI VE SAYISAL MODELİN KURULUMU

Yukarıda bahsedildiği üzere, kullanılan sayısal modelin iki bileşeni bulunmaktadır. İlk bileşende, deniz tabanındaki zeminin ilerleyen dalgalar altında maruz kaldığı gerilmeler ve şekil değiştirmeler, poro-elastik bünye davranışı kabulünü esas alan Biot denklemleri ile çözülmektedir. Bu denklemler Sumer ([1], bölüm 2) tarafından ayrıntılı olarak verilmiş olup, buradaki sayfa sınırı dolayısı ile tekrar verilmeyecektir. Sayısal modelin Biot denklemlerini sonlu hacimler yöntemi ile çözen bu ilk bileşeni ile, zeminin şekil değiştirmesi, boşluk suyu basıncı ve normal gerilmeler yanında, modelin ikinci bileşeninin girdi parametresi olarak kullanacağı “tekrarlı kayma gerilmelerinin genliği” hesaplanmaktadır. Bu çalışma kapsamında, problemin kurgusu gereği iki boyutlu çözüm elde edilmiş olsa da sayısal model üç boyutlu problemlere uyarlanabilecek şekilde tasarlanmıştır.

İncelenen problemin şematik gösterimi Şekil 1'de sunulmaktadır.  $D$  çaplı bir silindir (boru veya kablo), deniz tabanında  $d$  derinliğindeki bir zemin tabakasına  $e$  kadar bir gömme derinliğinde gömülü bulunmaktadır. İlerleyen düzenli dalgaların sonucunda deniz tabanına  $p_0(x, t)$  kadar basınç salınımları etkimektedir. Bu basınç değişimleri Şekil 1'de gösterildiği üzere (hidrostatik basınç hariç tutulmak üzere) deniz tabanına zamana ve uzama göre sinüzoidal biçimde etkimektedir. Burada  $\lambda = 2\pi/L$  dalga sayısı ve  $\omega = 2\pi/T$  açısal frekans olup  $L$  ve  $T$  sırasıyla dalga boyu ve dalga periyodudur. Dalga boyu  $L$  ve basınç salınımlarının genliği  $p_b$  değerleri, lineer dalga teorisi kullanılarak hesaplanabilmektedir. Zemin tabakasına etkileyen basınç salınımı  $p_0(x, t)$  sebebiyle zemin dokusu kayma deformasyonlarına maruz kalmaktadır. (Çalışma kapsamında tarif edilen basınç parametrelerinin tamamında, hidrostatik basınç üzerindeki basınç kastedilmektedir.) Problemde özellikle incelenecek olan gömülü yapı etrafındaki boşluk suyu basıncı ve sıvılaşmanın başlangıcıdır. Zira yapı etrafındaki zemin sıvılaştığında, artık taşıyıcılığını kaybetmektedir.



Şekil 1: Problemin Şematik Gösterimi

OpenFOAM platformunda kodlanan pressureBuildupFoam adlı çözücü, Biot denklemleri ile zemin içindeki gerilmeleri çözdükten sonra aşağıdaki denklem ile zemin içinde biriken boşluk suyu basıncını çözer.

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial t} = c_v \left( \frac{\partial^2 \bar{p}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{p}}{\partial z^2} \right) + f \quad (1)$$

Bu denklemde  $\bar{p}$  periyot ortalama (biriken) boşluk suyu basıncı,  $c_v$  konsolidasyon katsayısı ve  $f$  aşağıdaki şekilde verilen boşluk suyu basıncı oluşumu kaynak terimidir.

$$f = \frac{\sigma_0'}{N_l T} \quad (2)$$

$$N_l = \left( \frac{1}{\alpha} \frac{\tau_{amp}}{\sigma_0'} \right)^{1/\beta} \quad (3)$$

Bu denklemlerde  $\sigma_0'$  zeminin başlangıçtaki ortalama normal efektif gerilmesidir.

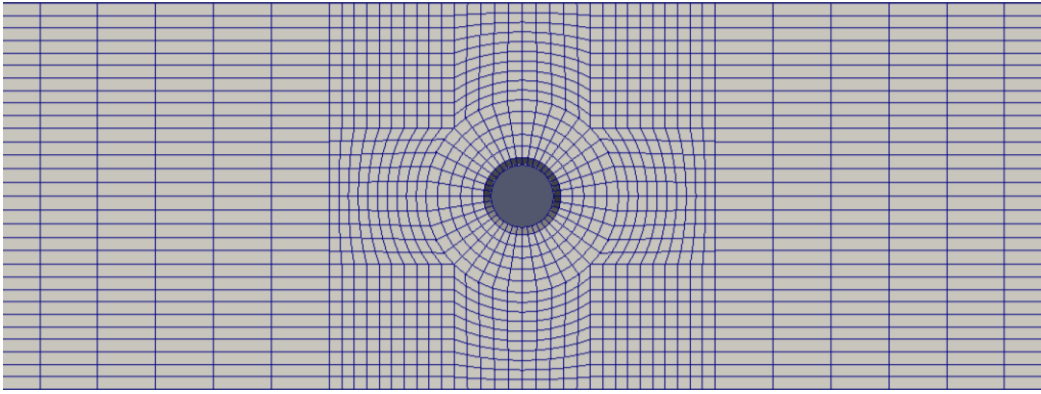
$$\sigma_0' = \gamma' z \frac{(2k_0 + 1)}{3} \quad (4)$$

Ayrıca burada  $\gamma'$  zeminin su altındaki özgül ağırlığı,  $k_0$  yanal toprak basıncı katsayısı,  $N_l$  sıvılaşmaya neden olan çevrim sayısı,  $\tau_{amp}$  dalga etkisi altında zemindeki tekrarlı kayma gerilmesinin genliğidir.  $\alpha$  ve  $\beta$  ise zeminin sıklık indisinin ( $D_r$ ) bir fonksiyonu olarak verilen model katsayılarıdır [1]. Denklem (1) ile gösterilen ifade Biot denklemlerinden türetilmiş olup, orijinal halinde yalnızca düşey yönde basınç difüzyonunu içermektedir [1]. Daha sonra Sumer ve Cheng [2], bu denklemi iki boyuta genişleterek uygulayan ilk araştırmacılar olmuşlardır. Bu çalışmada ele alınan problemin iki boyutlu yapısı itibarı ile, boşluk suyu basıncı artışına neden olan kayma gerilmesi tensörü de iki boyutludur ve yalnızca bir kayma gerilmesi terimi, bulunmaktadır. Dolayısıyla, bu çalışmadaki gibi iki boyutlu bir boru hattı/kablo problemi ele alındığında, Denklem (3) aynen kullanılabilir. Yukarıda anlatıldığı üzere ve Denklem (1)-(4)'ten görülebileceği gibi, biriken boşluk suyu basıncı dalgalar tarafından ortaya çıkardığı tekrarlı kayma gerilmesinin genliğine ( $\tau_{amp}$ ) bağlıdır. Bu terim, yukarıda açıklandığı gibi, modelin ilk bileşenindeki Biot denklemlerinin çözümünden elde edilmektedir. Daha sonra modelin ikinci bileşeni devreye

girerek, Denklem (1)'de verilen sınır koşulları için zemin tanım kümesi üzerinde biriken boşluk suyu basıncı  $\bar{p}$  zamanın da bir fonksiyonu olarak elde edilir. Biriken boşluk suyu basıncı değeri, zeminin başlangıçtaki ortalama normal efektif gerilmesi değerine ulaştığında zemin sıvılaşacaktır [8]:

$$\frac{\bar{p}}{\sigma_0'} \geq 1 \quad (5)$$

Problemin sayısal modelde çözümü için, Şekil 1'de gösterilen problem geometrisi, Gmsh yardımcı programında [9] yapılandırılmış bir ağ (mesh) oluşturularak dörtgen hesap elemanlarına bölünmüştür. Çalışma kapsamında çeşitli hesap ağı (mesh) yapısı alternatifleri denenmiş ve en uygun ağ yapısı kullanılmıştır [10]. Modelde kullanılan bir hesap ağı örneği Şekil 2'de gösterilmektedir.



**Şekil 2:** Sayısal Modelde Kullanılan Örnek Bir Hesap Ağı.

Modelin ilk bileşeni olan Biot denklemlerinin çözümü için tanımlanan sınır koşulları aşağıdaki gibidir:

- ✓ Zemin tabakasının tabanında ( $z = d$ ): Zeminin yer değiştirmesi sıfırdır ( $u, w = 0$ ), salınımlı boşluk suyu basıncının düşey gradyanı sıfırdır ( $\partial p / \partial z = 0$ ).
- ✓ Zemin tanım kümesinin yan cidarlarında ( $x = 0, x = \ell$ ): Yer değiştirmeler, gerilmeler ve salınımlı boşluk suyu basıncı her iki tarafta da eşit değerlere sahip olacak şekilde dikte edilir. Model alanının dalga uzunluğuna eşit ( $\ell = L$ ) seçilmesiyle bu sınır koşulu, model alanının yanal süreksizliği nedeniyle yerel kararsızlıkların oluşmamasını sağlamaktadır.

- ✓ Deniz tabanında ( $z = 0$ ): Zemindeki gerilmeler sıfırdır ve yer değiştirme serbesttir, salınımlı boşluk suyu basıncı deniz tabanındaki dalga basıncına eşittir ( $p = p_0$ ).
- ✓ Silindir yüzeyinde: Salınımlı boşluk suyu basıncı için normal gradyan sıfırdır ( $\partial p / \partial n = 0$ ). Zemin deformasyonları için üç farklı sınır koşulu denenmiştir: Pürüzsüz yüzey (yüzey sürtünmesizdir, yüzeye normal yer değiştirmeler sıfırdır), pürüzlü yüzey (yüzey tam sürtünmelidir ve tüm yer değiştirmeler sıfırdır) ve kısmen pürüzlü yüzey (yüzey kısmi sürtünmelidir). Üçüncü seçenek, valueFraction ( $vF$ ) parametresinin üzerinden ayarlanabilmektedir.  $0 \leq vF \leq 1$  olup,  $vF = 0$  pürüzsüz yüzey koşulu sınırı olurken  $vF = 1$  pürüzlü yüzey sınır koşulunu verir.

Modelin ikinci bileşeninde (Denklem (1)-(4)) periyot ortalama boşluk suyu basıncının ( $\bar{p}$ ) çözümü için tanımlanan sınır koşulları şöyledir:

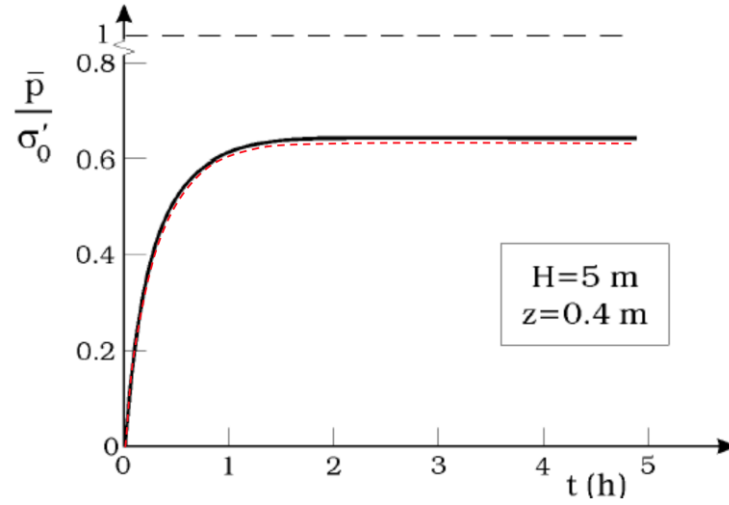
- ✓ Zemin tabakasının tabanında ( $z = d$ ): Periyot ortalama boşluk suyu basıncının düşey gradyanı sıfırdır ( $\partial \bar{p} / \partial z = 0$ ).
- ✓ Zemin tanım kümesinin yan cidarlarında ( $x = 0, x = \ell$ ): Periyot ortalama boşluk suyu basıncı her iki tarafta da eşit değerlere sahip olacak şekilde dikte edilir.
- ✓ Deniz tabanında ( $z = 0$ ): Periyot ortalama boşluk suyu basıncı sıfırdır ( $\bar{p} = 0$ ).
- ✓ Silindirin yüzeyinde: Periyot ortalama boşluk suyu basıncının normal gradyanı sıfırdır ( $\partial \bar{p} / \partial n = 0$ ).

Sayısal model yukarıda açıklandığı şekilde kurulup çalıştırılarak, deniz tabanına gömülü silindirik yapılar etrafındaki zeminde dalga kaynaklı boşluk suyu basıncı artışı ve sıvılaşma potansiyeli benzeştirilmiştir.

## BULGULAR

Geliştirilen sayısal model ile elde edilen bulgular bu bölümde sunulmaktadır. İlk olarak, sayısal modelin doğrulanması için, Sumer [1 (s. 87-88)] tarafından verilen matematik model ile bir karşılaştırma yapılmıştır. Bu karşılaştırmada, zemin ile ilgili parametreler şu şekilde verilmektedir: Zemin tabakası derinliği  $d = 1$  m, zeminin toplam özgül ağırlığı  $\gamma' = 10,8$  kN/m<sup>3</sup>, kayma elastisite modülü  $G = 926$  kN/m<sup>2</sup>, hidrolik iletkenlik  $k = 1 \times 10^{-6}$  m/s, boşluk oranı  $n = 0,333$ , doygunluk oranı  $S_r = 1$ , yanal toprak basıncı katsayısı  $k_0 = 0,4$ , Poisson oranı  $\nu = 0,35$ , model katsayıları  $\alpha = 0,246$  ve  $\beta = -0,165$ . Dalga ile ilgili

parametreler ise su derinliği  $h = 19$  m, dalga yüksekliği  $H = 5$  m ve dalga periyodu  $T = 13,7$  s şeklinde verilmektedir. Sayısal model bu girdi parametrelerine göre çalıştırılmış ve zemin içinde 0,4 m derinlikte biriken boşluk basıncı hesaplanarak Sumer [1] tarafından verilen çözüm ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma Şekil 3'te sunulmuştur. Görüldüğü gibi iki modelin sonuçları örtüşmektedir. Şekil 3'te zeminin başlangıçtaki ortalama efektif normal gerilmesi de gösterilmektedir. Görüldüğü üzere, bu örnekte biriken boşluk suyu basıncı zeminin efektif gerilmesine ulaşmadığından (Denklem (5)) zemin sıvılaşmaya uğramamıştır.



**Şekil 3:** Sonuçların Karşılaştırılması, Siyah Eğri: Sumer ([1], s. 89), Kırmızı Kesikli Eğri: Mevcut Model

Modelin bu ilk doğrulanması sonrası, deniz tabanına gömülü boru hatları/kablolar etrafında dalga kaynaklı sıvılaşmanın modellenmesine geçilmiştir. Bu amaçla, Sumer ve diğerleri [4] tarafından yapılmış olan boru etrafında dalga kaynaklı sıvılaşma fiziksel model deneyleri, sayısal model ile benzeştirilmiştir. Sumer ve diğerleri [4], bir dalga kanalının tabanına yerleştirdikleri  $d = 0,17$  m derinliğinde bir kutuya silt yerleştirmiş ve bu düzenek ile dalga kaynaklı sıvılaşma deneyleri yürütmüşlerdir. Deneylerinde öncelikle boru hattı olmadan kutuya yerleştirilen siltin dalga kaynaklı sıvılaşma davranışı incelenmiş, daha sonra kutuya  $D = 4$  cm ve 8 cm çapındaki borular farklı derinliklerde gömülmüş ve hem boruların etrafındaki hem de borulardan uzakta boşluk suyu basıncı ölçülmüştür. Deneylerde kullanılan zemin ve dalga özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

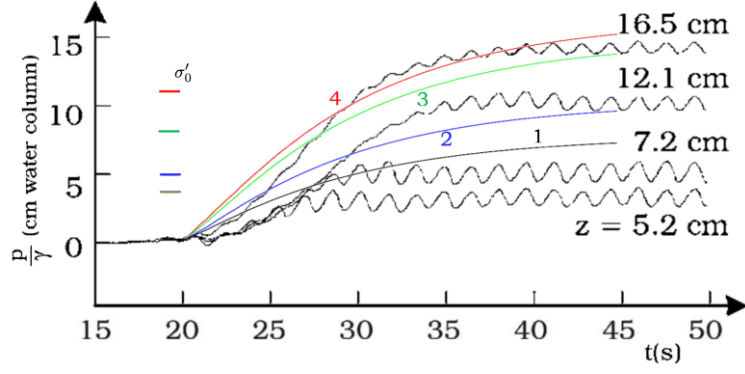


**Tablo 1: Zemin, Su ve Dalga Özellikleri**

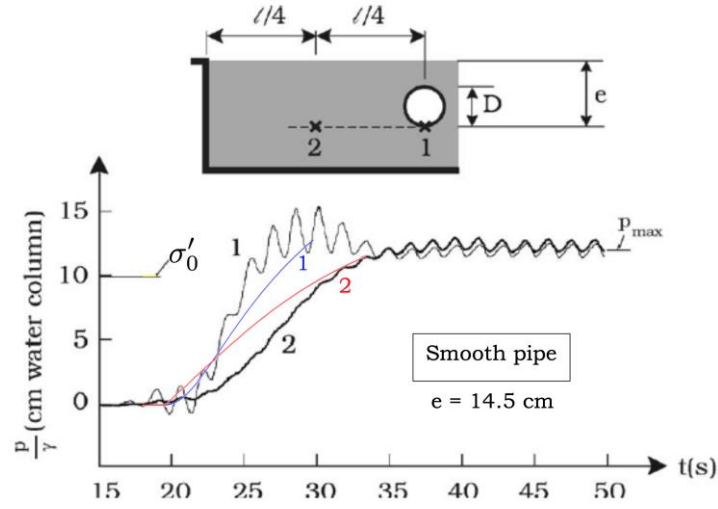
Bazı parametreler	Sembol	Değer
Zemin derinliği	$d$	17 cm
Toplam özgül ağırlık	$\gamma_t$	20,54 kN/m <sup>3</sup>
Kayma elastisite modülü	$G$	540 kN/m <sup>2</sup>
Poisson oranı	$\nu$	0,35
Doygunluk oranı	$S_r$	1
Boşluk oranı	$n$	0,46
Yanal toprak basıncı katsayısı	$k_0$	0,41
Model sabitleri	$\alpha, \beta$	0,2132 – 0,3194
Sıklık indisi	$D_r$	0,38
Hidrolik iletkenlik	$k$	$5,37 \times 10^{-6}$ m/s
Dalga yüksekliği	$H$	0,166 m
Dalga periyodu	$T$	1,6 s
Su derinliği	$h$	0,42 m
Boşluk suyunun hacimsel sıkışma modülü	$K$	$1,9 \times 10^6$ kN/m <sup>2</sup>

Sumer ve diğerleri [4] deneylerinde kullandıkları gömülü boruların cidarları için iki farklı sınır koşulu test etmişlerdir; pürüzsüz (sürtünmesiz) cidar ve pürüzlü (sürtünmeli) cidar. İlk koşulda boru ve zemin bağıl olarak hareket edebilmelerine rağmen, ikinci koşulda boru cidarları Velcro malzeme ile kaplanarak boru ve zeminin bağıl hareketi engellenmiştir.

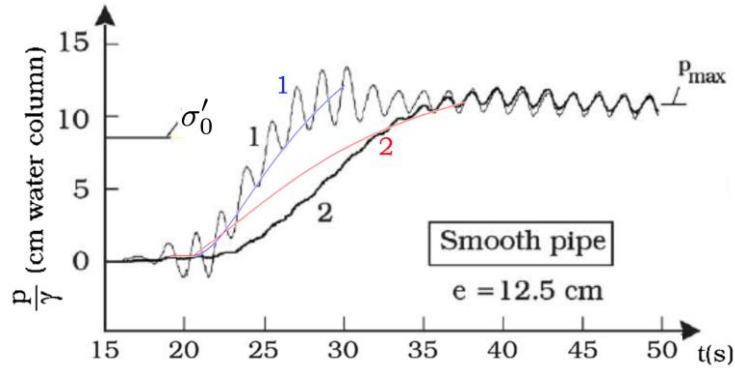
Şekil 4'te,  $D = 8$  cm ve  $e = 14,5$  cm olan pürüzsüz bir borunun uzak alanında düşey bir kesit boyunca çeşitli derinliklerde ölçülen periyot ortalama boşluk suyu basıncı ile Sumer ve diğerlerinin [4] deneylerinden elde edilen sonuçların karşılaştırması gösterilmektedir. Görüldüğü üzere, sayısal model zemindeki boşluk suyu basıncının dalga altında artış davranışını yakalayabilmektedir. Şekil 5 ve 6'da ise iki farklı derinliğe gömülü borunun üzerinde ve ötesinde ölçülen boşluk suyu basınçları, deneyler ve modelde karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Sayısal modelin, zemin içinde boru bulunması durumunda boşluk suyu basıncının birikme davranışını başarılı bir şekilde yakaladığı görülmektedir. Şekil 4, 5 ve 6'de, efektif gerilmenin ( $\sigma_0'$ ) farklı derinliklere tekabül eden değerleri de verilmiştir. Görüldüğü üzere, deniz tabanında gömülü pürüzsüz cidarlı bir borunun varlığı, zeminin dalga kaynaklı sıvılaşma potansiyelini arttırmaktadır. Geliştirilen sayısal modelin bu davranışı gerçekçi biçimde benzeştirebildiği sonuçlardan açıkça görülmektedir.



**Şekil 4:** Sayısal Model Sonuçlarının Deneyle Karşılaştırılması [4]. Gömülü Borunun Uzağında Boşluk Suyu Basıncı Artışı (1, 2, 3 ve 4 eğrileri, sırasıyla  $z = 5,2, 7,2, 12,1$  ve  $16,5$  cm için sayısal model sonuçlarıdır.)

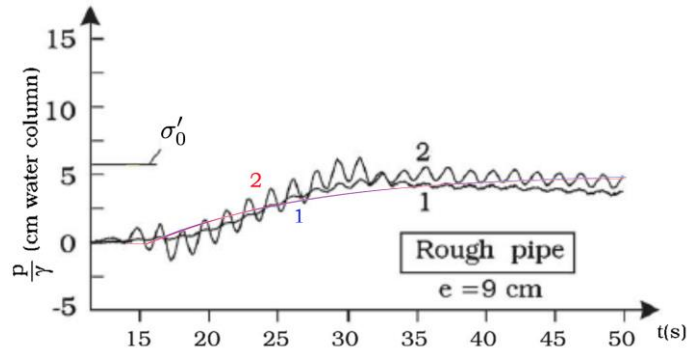


**Şekil 5:** Sayısal Model Sonuçlarının Deneyle Karşılaştırılması [4]. Pürüzsüz Borunun Altında (Eğri 1) ve Uzağında (Eğri 2) Boşluk Suyu Basıncı Artışı.  $D = 8$  cm,  $e = 14,5$  cm

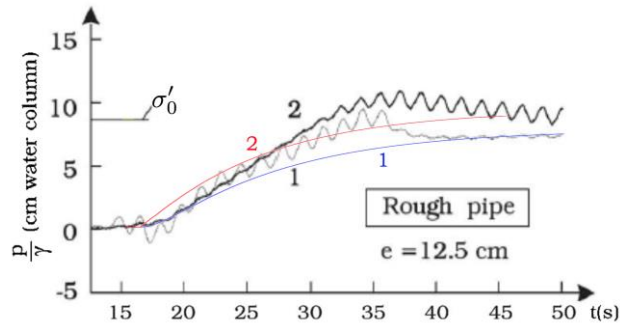


**Şekil 6:** Sayısal Model Sonuçlarının Deneyle Karşılaştırılması [4]. Pürüzsüz Borunun Altında (Eğri 1) ve Uzağında (Eğri 2) Boşluk Suyu Basıncı Artışı.  $D = 8$  cm,  $e = 12,5$  cm.

Pürüzlü boru için elde edilen model sonuçlarının deneyler ile karşılaştırılması ise sırasıyla Şekil 7 ve 8’de sunulmaktadır. Bu şekillerden görülebileceği üzere, pürüzlü yüzeye sahip bir boru deniz tabanına gömüldüğünde (pürüzsüz yüzeyli boru için elde edilen sonuçların aksine) dalga kaynaklı sıvılaşıma potansiyelini arttırmamakta, aksine boşluk suyu basıncı artışı uzak alana kıyasla boru yakınında bir miktar daha yavaş gerçekleşmektedir. Bu durum, boru yüzeyindeki kaymazlık koşulundan dolayı boru-zemin bağıl hareketinin sınırlanması ve bu bölgedeki zemin içinde kayma deformasyonlarının azalması dolayısıyla ortaya çıkmaktadır. Sayısal modelin pürüzlü boru durumu için de sıvılaşıma davranışını başarılı biçimde benzeştirebildiği görülmektedir.



**Şekil 7:** Sayısal Model Sonuçlarının Deneyler ile Karşılaştırılması [4]. Pürüzlü Borunun Altında (Eğri 1) ve Uzağında (Eğri 2) Boşluk Suyu Basıncı Artışı.  $D = 8$  cm,  $e = 9$  cm.



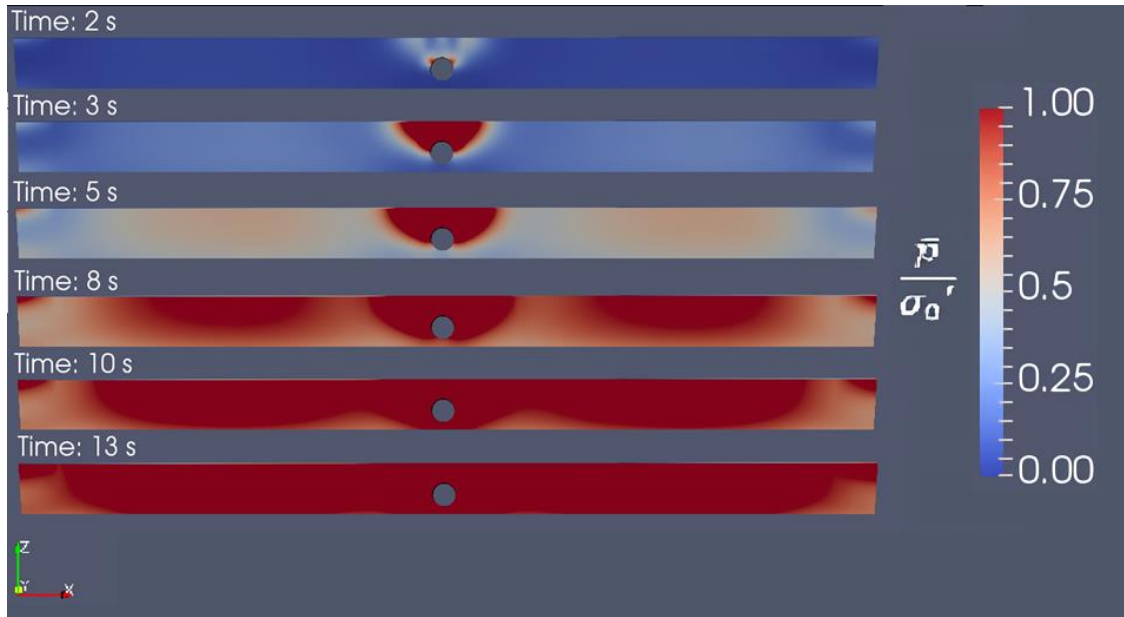
**Şekil 8:** Sayısal Model Sonuçlarının Deneyler ile Karşılaştırılması [4]. Pürüzlü Borunun Altında (Eğri 1) ve Uzağında (Eğri 2) Boşluk Suyu Basıncı Artışı.  $D = 8$  cm,  $e = 12,5$  cm.

Yukarıdaki şekillerde gösterilen model sonuçları, boru cidarında kısmi pürüzlü yüzey sınır koşulunun kalibrasyon parametresi seçilmesi ile elde edilmiştir. Buna göre sayısal modeldeki boru için yüzey sınır koşulunun, valueFraction parametresinin değeri  $\nu F = 0,045$  olacak şekilde “kısmen pürüzlü” olarak ayarlanması ile deneydeki pürüzlülük durumunu tam

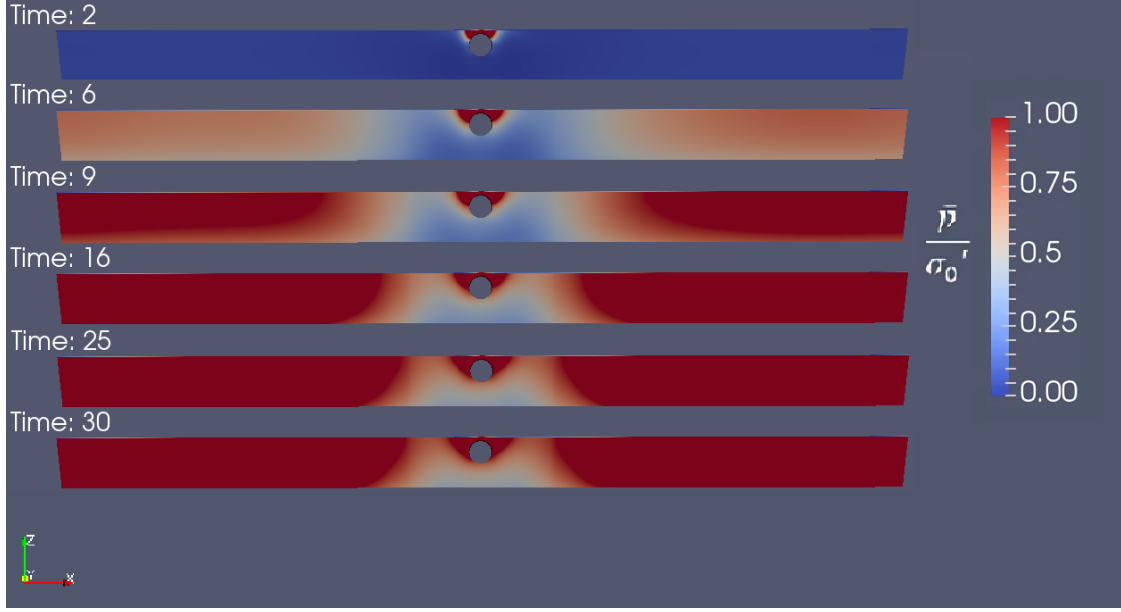
olarak yansıtılabildiği görülmüştür. Ayrıca  $vF$  parametresinin bir fonksiyonu olarak, sınır koşulunun doğrusal olmayan değişiminin anlaşılması için sayısal modelin duyarlılık analizi yapılmıştır ve buna göre 0,15'ten büyük bir  $vF =$  değeri ile yüzey sınır koşulunun pratik olarak tamamen pürüzlü hale geldiği sonucuna ulaşılmıştır.

Yukarıda verilen sonuçlar her ne kadar geliştirilen sayısal modelin borunun altında ölçülen boşluk suyu basıncı için dalga kaynaklı sıvılaşma davranışını başarılı biçimde benzeştirebildiğini gösteriyorsa da gömülü borunun yan ve üst taraflarında ölçülen boşluk suyu basıncı için aynı uyum yakalanamamıştır. Bu konu ile ilgili çalışmalar devam etmektedir. Bu uyumsuzluğun sebebi net olmamakla birlikte, muhtemel sebeplerinden birinin, pürüzsüz boru deneylerinde borunun üst ve yan tarafındaki basınç ölçümlerinin hatalı olması olabileceği düşünülmektedir.

Son olarak, sayısal model tanım kümesi içinde boyutsuz periyot ortalama boşluk suyu basıncının (sıvılaşmanın) zamana göre değişimi gösteren sayısal model sonuçları, pürüzsüz ve pürüzlü boru durumu için sırasıyla Şekil 9 ve 10'da sunulmaktadır.



**Şekil 9:**  $D = 8$  cm,  $e = 14,5$  cm ve Pürüzsüz Yüzeyleli Boru Durumu İçin Belirli Zaman Adımlarında Zemin Sıvılaşmasının Gelişimi Gösteren Sayısal Model Sonucu



**Şekil 10:**  $D = 8$  cm,  $e = 9$  cm ve Pürüzlü Yüzeyleli Boru Durumu İçin Belirli Zaman Adımlarında Zemin Sıvılaşmasının Gelişimi Gösteren Sayısal Model Sonucu.

## SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, dalga kaynaklı boşluk suyu basıncı birikimini benzeştirebilmesi için OpenFOAM platformunda geliştirilmekte olan bir sayısal model kullanılarak, deniz tabanına gömülü bir boru hattı (veya iletim kablosu) etrafında dalga kaynaklı zemin sıvılaşması benzeştirilmiştir. Yukarıda açıklandığı üzere iki bileşende oluşan bu sayısal modelin ilk bileşeni ile Biot denklemleri kullanılarak zemin içinde dalga kaynaklı kayma gerilmeleri belirlenmekte, ardından ikinci model bileşeni ile Sümer [1 (bölüm 3)]'te açıklanan yöntem kullanılarak zemin içinde periyot ortalama boşluk suyu basıncı birikimi modellenmektedir. Çalışma kapsamında geliştirilen sayısal model kullanılarak Sumer ve diğerleri [4] tarafından yapılan deneyler benzeştirilmiştir. Çalışmada özetle aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Borunun uzak alanındaki boşluk suyu basıncı artışı ve sıvılaşma davranışı açısından model ve deneyler sonuçları ile uyum içindedir.
- Sayısal model, gömülü boru cidarının pürüzlü veya pürüzsüz olması durumunu gerçekçi biçimde benzeştirebilmektedir. Hem pürüzsüz hem de pürüzlü borunun altında ölçülen boşluk suyu basıncı için model sonuçları deneyler ile çok iyi örtüşmektedir. Pürüzsüz cidarlı borunun deniz tabanındaki varlığı dalga kaynaklı

sıvılaşma riskini arttırırken, pürüzlü boru durumunda aynı etki gözlemlenmemektedir.

- Model ayrıca gömülü borunun çevresinde (altta ve üstte) oluşan boşluk suyu basıncını, pürüzlü yüzey sınır koşulu için başarılı bir şekilde benzeştirebilirken, pürüzsüz borunun üstünde ve yanında ölçülen boşluk suyu basıncı, deneylere nispetle model sonuçlarında daha yüksektir.

Sonuç olarak geliştirilmekte olan model, gömülü yapılar etrafında dalga kaynaklı deniz tabanı sıvılaşması riskinin belirlenebilmesi için pratik uygulamalarda fayda sağlayacaktır.

## SEMBOLLER

$c_v$	Konsolidasyon katsayısı
$D_r$	Zeminin bağıl (görelî) yoğunluğu
$d$	Zemin derinliği
$f$	Kaynak terimi
$G$	Zeminin kayma (shear) modülü
$H$	Dalga yüksekliği
$h$	Su derinliği
$k$	Zeminin permeabilite (geçirgenlik katsayısı)
$k_0$	Zeminin yanal toprak basıncı
$N$	Dalga sayısı
$N_l$	Sıvılaşmaya neden olan çevrim sayısı
$n$	Zeminin porozitesi
$p$	Salınımlı (faz çözümlü) boşluk suyu basıncı
$\bar{p}$	Kümülatif boşluk suyu basıncı
$p_b$	Çamur tabakasına (mudline) etkiyen dalga basıncı
$T$	Dalga periyodu
$\alpha$	Ampirik katsayı (model sabiti)
$\beta$	Ampirik katsayı (model sabiti)
$\gamma'$	Zeminin su altı özgül ağırlığı
$\nu$	Poisson oranı
$\sigma'_0$	Zeminin efektif gerilmesi
$\tau_{amp}$	Tekrarlı (cyclic) kayma gerilmesi genliği

## KAYNAKLAR

1. Sumer, B.M. *Liquefaction Around Marine Structures (With CD-ROM)*. World Scientific, Singapore (2014).
2. Sumer B.M. and Cheng, N.-S. "A random-walk model for pore pressure accumulation in marine soils." *Proceedings of the 9th International Offshore and*

*Polar Engineering Conference, ISOPE-99*. Vol. 1: pp. 521-528. Brest, France, May30-June 4, 1999.

3. Cheng, L., Sumer, B. M., Fredsøe, J., Hu, Y. “Wave-Induced Liquefaction Around A Buried Pipeline.” *The 9th Australia New Zealand Conference on Geomechanics (ISSMGE)*. pp. 577-583. Auckland, NZ, 2004.
4. Sumer, B. M., Truelsen, C., Fredsøe, J. “Liquefaction around pipelines under waves.” *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering* Vol. 132 No: 4 (2006): pp. 266-275.
5. Dunn, S. L., Vun, P. L., Chan, A., Damgaard, J. S. “Numerical modeling of wave-induced liquefaction around pipelines.” *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering* Vol: 132 No:4 (2006): pp. 276-288.
6. Zhao, H. Y., Jeng, D. S., Liao, C. C. “Parametric study of the wave-induced residual liquefaction around an embedded pipeline.” *Applied Ocean Research* Vol: 55 (2006): pp. 163-180.
7. Rønby, J. “Openfoam library for soil mechanics.” (2013)  
<https://github.com/roenby/soilFoam>.
8. Sumer, B. M., Kirca, V. S. O., Fredsøe, J. “Experimental validation of a mathematical model for seabed liquefaction under waves.” *International Journal of Offshore and Polar Engineering* Vol: 22 No: 2 (2012): pp. 133-141.
9. Shanmugasundaram, R. K., Rusche, H., Windt, C., Kirca, Ö., Sumer, M., & Goseberg, N. (2022). Towards the Numerical Modelling of Residual Seabed Liquefaction Using OpenFOAM. *OpenFOAM® Journal*, 2, 94-115.
10. Yılmaz, S. U. (2022). *Numerical modelling of wave induced soil liquefaction around buried pipelines and cables/ Gömülü borular ve kablolar etrafında dalga kaynaklı zemin sıvılaşmasının sayısal modellenmesi* (Tez No: 708782) [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi.  
<https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/>