

## DENİZ DİBİ BORULARININ ALTINDA DALGA NEDENİYLE MEYDANA GELEN OYULMA

Samet SAĞLAM\* ve Deniz BAYRAKTAR BURAL\*  
*saglamsa@itu.edu.tr, bayraktard@itu.edu.tr*

### ÖZET

Deniz dibine kurulan boru hattı sistemleri ihtiyaç duyulan pek çok materyalin taşınmasını sağladığı için mutlak öneme sahiptir. Bu boru hatlarının uzun yıllar sorunsuz bir şekilde hizmet edebilmeleri gerekmektedir. Çünkü buldukları ortam koşulları ağır olduğundan mümkün olabildiğince az sorun çıkarmaları istenmektedir. Deniz dibindeki boru hatlarında meydana gelen ve boru hattının stabilitesini tehdit eden temel unsur oyulmadır. Bu çalışmada deniz tabanında dalga nedeniyle meydana gelen oyulma incelenmiştir. Farklı dalga yükseklikleri ve dalga periyodları göz önüne alınarak iki farklı boru çapı için oyulma derinliği ve oyulma zaman ölçeği değişimlerine bakılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Deniz dibi boruları, Oyulma, Dalga, Zaman ölçeği

### 1. Giriş

Denizaltı boru hatları, kıyı ve deniz mühendisliği konusundaki önemlerinden dolayı yoğun şekilde çalışılmaktadır. Bilindiği üzere boru hatları, deniz ortamlarında su, atık su, yağ, doğal gaz ve diğer hidrokarbonları taşımak için yaygın olarak kullanılırlar. Genellikle taşıdıkları tehlikeli içerikler göz önüne alındığında, bir denizaltı boru hattının arızası, çevre üzerinde yıkıcı etkilere neden olabilir. Bu nedenle, denizaltı boru hatlarının bütünlüğü oldukça önemlidir. Bir denizaltı boru hattı doğrudan akış etkisine maruz kaldığından, boru çevresinde oyulma meydana gelebilir. Bu durum, boru hattının askıda kalmasına sebep olup, altında serbest açıklıkların ortaya çıkmasına yol açar. Dolayısıyla, stres ve yapısal yorgunluk artar. Oyulma oluşumundaki temel etkenler sırasıyla, dalga iklimindeki değişim, borunun boyutları, yerleştirildiği alandaki su derinliği olarak sıralanabilir.

Akıntı ve/veya dalgalar nedeniyle meydana gelen oyulmayı fiziksel olarak anlayabilmek için, genellikle laboratuvar deneyleri yapılmıştır (örn. Fredsøe ve diğerleri, 1992; Sumer ve Fredsøe, 1990; Zhang ve diğerleri, 2016). Kapsamlı olarak oyulmanın incelendiği bu laboratuvar deneylerine ek olarak, boru hatlarının altında meydana gelen oyulmanın akıntı nedeniyle olduğu durumları sayısal olarak inceleyen birkaç model (örneğin, Brørs, 1999; Larsen ve diğerleri, 2016; Zanganeh ve diğerleri, 2012) mevcuttur. Oyulmanın dalgalar nedeniyle olduğu durumları sayısal olarak inceleyen modeller (Fuhrman ve diğerleri, 2014; Kazeminezhad ve diğerleri, 2012; Liang ve Cheng, 2005) olduğu gibi hem akıntının gemi de dalganın aynı anda olduğu durumların incelendiği sayısal modeller de (Larsen ve diğerleri, 2016) geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Bunların yanı sıra akıntı nedeniyle meydana gelen oyulmanın hemen arkasından sadece dalgaların etkisiyle geri dolma olayını (Bayraktar ve diğerleri, 2016) hem deneysel, hem de sayısal olarak modellemiştir.



$$P = \frac{\partial p}{\partial x} \Delta x \quad (1)$$

Denklem (1)'de  $p$ , basıncı,  $x$  ise borunun çevre uzunluğu mesafesini ifade eder.  $\delta p/\delta x$  oranı ise sızıntı akışına neden olan basınç gradyanıdır.  $P$  ise boyutu  $\Delta x \times 1 \times 1$  olan bir kum elemanın üzerine etki eder ve kum-su karışımı ile suyun kırıldığı noktada oluşur. Ek olarak batık kumun ağırlığı  $W$  olarak ifade edilir ve sızıntı kuvvetinin batık kumun ağırlığını aşması durumunda kritik bir durum meydana gelmektedir.

Sumer ve diğerleri (2001a) tarafından yapılan deneyde, dalga yüksekliği kritik noktaya ulaşıncaya dek kademeli olarak artırılarak basınç gradyanının zaman serisi ölçülmüştür. Bu aşamada oyulma genel olarak dalga tepesinin meydana geldiği periyodun yarısında meydana gelmiştir. Dalga çukurunun yarı periyodundaki basınç gradyanı ise borulanmaya sebep olacak kadar büyük olmadığı gözlemlenmiştir. Oyulma başlangıcındaki basınç gradyanının değeri akıntı senaryosuna göre oldukça farklılık göstermiştir. Bu farklılığın nedeni kumun kritik basınç-gradyan kuvvetine maruz kaldığı zamandır. Akıntı senaryosunda bu periyodun oldukça uzun olduğu gözlenmiştir. Bunun aksine dalga senaryosunda basınç gradyanının oyulmanın başlangıcı için çok kısa bir süre boyunca etki etmesi yeterli gelmektedir.

## 2.1 Dalga Kökenli Oyulma Başlangıcı İçin Kriterler

Oyulmanın başlangıcı için kriter şu şekilde yazılabilir:

$$\left[ \frac{U_m^2}{gD(1-n)(s-1)} \right]_{cr} \geq f\left(\frac{e}{D}, KC\right) \quad (2)$$

Denklem (2)'de  $U_m$ , sakin deniz tabanındaki maksimum orbital hızı,  $g$  yer çekimi ivmesini,  $D$  boru çapını,  $n$  poroziteyi,  $s$  sedimen taneciklerinin spesifik gravitesini ve  $e$  ise deniz tabanı ile boru hattı arasındaki açıklığın mesafesini gösterir. Bu çalışmada  $s$  değeri 2.65 olarak kabul edilmiştir ve borunun deniz tabanına sıfır mesafede konumlandığı farzedildiğinden,  $e=0$  alınmıştır.  $KC$  ise Keulegan-Carpenter sayısını ifade eder ve Denklem (3)'teki şekliyle ifade edilir.

$$KC = \frac{U_m T_w}{D} \quad (3)$$

Denklem (3)'te  $T_w$  dalga periyodunu ifade eder. Denklemde orbital hızın sinusoidal olarak değiştiği farzedilirse  $KC$  sayısı Denklem (4) ile gösterilir.

$$KC = \frac{2\pi a}{D} \quad (4)$$

Denklem (4)'te gösterilen  $a$ , deniz tabanındaki su parçacıklarının orbital hareketlerinin genliği olup,  $a=U_m T_w/2\pi$  şeklinde ifade edilir. Deniz tabanındaki maksimum hız  $U_m$  ise lineer dalga teorisine göre Denklem (5)'e göre hesaplanır.

$$U_m = \frac{\pi H \cosh(k(z+h))}{T_w \sinh(kh)} \quad (5)$$

Denklem (5)'te  $H$ , dalga yüksekliği,  $h$ , su derinliğidir. Burada  $z$  ise su derinliği olarak düşünülüp  $z=-h$  olarak hesaplara katılır.  $k$  ise dalga sayısı olup  $k=2\pi/L$  bağıntısı ile hesaplanır. Burada  $L$ , dalga boyudur.

## 2.2 Dalga Nedeniyle Meydana Gelen Oyulmanın Derinliği (S/D)

Oyulma derinliği kararlı denge durumuna ulaşana kadar geçen sürede oluşur. Denge aşamasına karşılık gelen oyulma derinliğine kararlı oyulma derinliği,  $S$ , adı verilir. Boru çapı,  $D$  göz önüne alınarak oyulma derinliği boyutsuz olarak  $S/D$  şeklinde ifade edilir. Sumer ve Fredsøe (1990) çalışmalarında, en küçük kareler yöntemine göre regresyon analizi yapılmış bir ifade olan Denklem (6) ile  $KC$  sayısının oyulma derinliği  $S/D$  ile olan ilişkisini ifade etmiştir.

$$\frac{S}{D} = 0.1\sqrt{KC} \quad (6)$$

Dalga durumunda borunun her iki tarafında da akış yönünde iz sistemi gözlemlenir. Salınım hareketinde izin oluşumu ve örüntüsü Keulegan-Carpenter ( $KC$ ) sayısı sayesinde olmaktadır. Küçük  $KC$  sayıları su parçacıklarının orbital hareketinin borunun genişliğine kıyasla küçük olduğunu göstermektedir. Eğer  $KC$  sayısı çok küçükse boru ile taban arasındaki ayrılma bile gerçekleşmeyebilir.  $KC$  sayısının büyük olması ise, su parçacıklarının borunun genişliğine kıyasla daha büyük mesafeler kat ettiğini gösterir ve bunun bir sonucu olarak boru ile taban arasında bir ayrılma ve girdap meydana gelecektir.

$KC$  sayısındaki artış oyulma derinliğinde de önemli ölçüde bir artışa neden olmaktadır. Çok büyük  $KC$  sayıları için kararlı durumdaki oyulma derinliğinin sabit bir değere doğru giderek zamanla ulaşabileceği maksimum noktaya ulaşması beklenir.

## 2.3 Dalga Nedeniyle Meydana Gelen Oyulmanın Zaman Ölçeği (T)

Oyulma derinliği, kararlı denge durumuna olan geçiş sürecinde meydana gelir. Oyulma derinliğinin zamanla olan değişimi ise aşağıdaki Denklem (7) ile ifade edilir.

$$S_t = S \left( 1 - \exp\left(-\frac{t}{T}\right) \right) \quad (7)$$

Bu denklemde  $S$ , kararlı denge durumundaki oyulma derinliğidir.  $T$  ise oyulmanın zaman ölçeğidir.  $T$  iki şekilde hesaplanabilir. Birincisi,  $t=0$  anından başlayarak, oyulma derinliğinin kararlı denge durumuna ulaşmasına kadar olan sürede Denklem (7)'de ifade edilen  $S_t(t)$  eğrisine teğet olacak bir doğrunun eğiminin hesaplanmasıdır. İkinci yol ise, Denklem (7)'nin zamana göre integre edilmesidir.

Zaman ölçeğini boyutsuz olarak ifade etmek gerekirse,

$$T^* = f(\theta, KC) \quad (8)$$

şeklinde yazılır ve normalize edilmiş boyutsuz zaman ölçeği  $T^*$ , Denklem (9) ile elde edilmiştir.

$$T^* = \frac{(g(s-1)d^3)^{\frac{1}{2}}}{D^2} T \quad (9)$$

Bu denklemde  $d$ , tanecik çapını gösterir.

Denklem (8)'de  $T^*$  değerinin bir fonksiyonu olarak gösterilen  $\theta$  değeri Shields parametresidir ve Denklem (10) ile hesaplanır.

$$\theta = \frac{U_{fm}^2}{g(s-1)d} \quad (10)$$

Denklem (10)'daki  $U_{fm}$  maksimum taban kayma hızı olup, Denklem (9) ile hesaplanır.

$$U_{fm} = \sqrt{\frac{f_w}{2}} U_m \quad (11)$$

Denklem (11)'de bahsi geçen  $f_w$ , dalga sürtünme katsayısını ifade eder. Dalga sınır tabakası için hesaplanması gereken  $f_w$  değeri, Fredsøe ve Deigaard (1992)'ın belirttiği üzere teorik olarak iki şekilde hesaplanabilir.

Tabanın hidrolik olarak pürüzlü davrandığı durumda, yani bir başka deyişle  $\frac{a}{k_s} > 50$  ise dalga sınır tabakası sürtünme faktörü Denklem (12) ile hesaplanır.

$$f_w = 0.04 \left( \frac{a}{k_s} \right)^{-1/4} \quad (12)$$

Denklem (12)'de verilen  $k_s$  değeri, yüzey pürüzlülüğünü ifade eder. Tabanın pürüzlü davranıp davranmadığını kontrol etmek içinse  $dU_f/\nu > 10$  olup olmadığına bakılabilir.

Hidrolik olarak pürüzsüz duvarda ise, dalga sınır tabakası sürtünme katsayısı Denklem (13) ile

$$f_w = 0.035 Re^{-0.16} \quad (13)$$

şeklinde hesaplanır. Bu durumda  $dU_f/\nu \leq 10$  olmalıdır. Denklem (13)'de bahsi geçen  $Re$ , dalga sınır tabakasına ait Reynolds sayısını ifade eder ve Denklem (14) ile gösterilir.

$$Re = \frac{aU_m}{\nu} \quad (14)$$

Denklem (14)'de gösterilen  $\nu$ , kinematik viskozitedir.

Dalga sürtünme katsayısı  $f_w$  değerinin tespiti ile hesaplanacak olan  $U_{fm}$  değeri, Denklem (10)'da verilen Shields parametresinin hesabında kullanılır. Denklem (8)'de gösterilen fonksiyonda belirtildiği üzere, dalga nedeniyle meydana gelen oyulmanın boyutsuz zaman ölçeği, hem Shields parametresi,  $\theta$ 'ya hem de  $KC$  sayısına bağlıdır. Yapılan deneyler neticesinde, Fredsøe ve diğ. (1992) Denklem (15)'de verilen ampirik formülü elde etmişlerdir.

$$T^* = \frac{1}{50} \theta^{-5/3} \quad (15)$$

Denklem (15) ile farklı aralıklardaki KC sayıları, mesela  $5 < KC \leq 15$ ,  $15 < KC \leq 30$ ,  $30 < KC \leq 60$  kullanılarak, her birinin Shields parametresi  $\theta$ 'ya bağlı olarak boyutsuz zaman ölçeği  $T^*$  değerleri tespit edilebilir.

### 3. Dalga Nedeniyle Meydana Gelen Oyulmaya Ait Sayısal Bir Uygulama

Su derinliğinin 10 m olduğu bir suda, çapları sırasıyla  $D_1=0.3$  m ve  $D_2=0.1$  m olan iki boruyu göz önüne alalım. Dalga periyotları  $T_w=5-7$  s, dalga yükseklikleri ise  $H=1.25-2.5$  m arasında değişmektedir. Lineer dalga kabulü yaparak, dalga nedeniyle herhangi bir oyulma olup olmayacağını öngörüp, eğer oyulma olacağı öngörülüyorsa oyulma derinliği ve bunun zaman ölçeğine dair hesaplamaları yapabiliriz. Bu çalışmada, tanecik çapı  $d=0.0005$  m olarak alınmıştır. Kinematik viskozite değeri  $\nu=0.000001$  m<sup>2</sup>/s dir.

Sumer ve Fredsøe (2002) hareketli deniz tabanı denilen durumda, yani Shields parametresinin ( $\theta$ ), kritik Shields parametresi değeri olan 0.05'ten büyük olduğu durumlarda oyulmadan bahsedileceğini söyler. Tablo 1'den görüleceği üzere, deniz tabanının hareketli olduğu yani oyulmanın meydana gelebileceği durumlar üzerinden hesaplamalar yapılmıştır.

Deniz tabanındaki su parçacıklarının orbital hareketlerinin genliğini ( $a$ ), küçük genlikli sinüsoidal dalga teorisinin uygulanabilir olduğu varsayımı ile hesaplayabiliriz. Buna göre  $a$ ,

$$a = \frac{H \cosh(k(z+h))}{2 \sinh(kh)} \quad (16)$$

olarak hesaplanır.

Sinüsoidal teorisinin uygulanabilirliği Ursell parametresinin hesabı ile mümkündür. Buna göre

Ursell parametresi,  $U = \frac{HL^2}{h^3} < 15$  ise sinüsoidal teori uygulanabilir.

Tablo 1'de verilen değerlerin hepsi  $U < 15$  koşulunu sağlamaktadır.

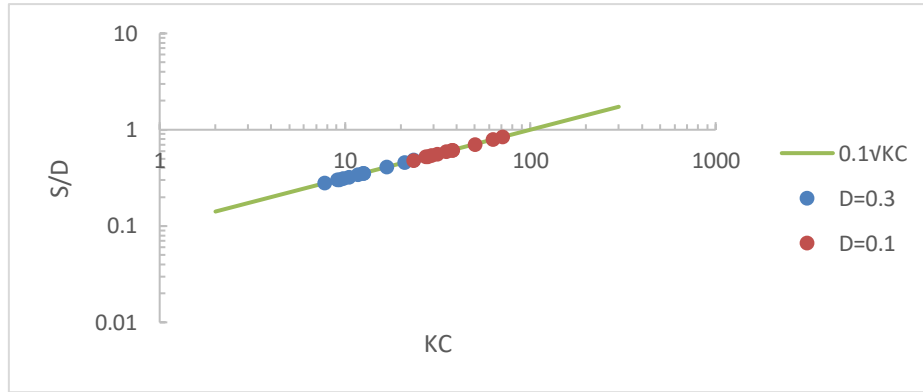
**Tablo 1.** İki farklı çaptaki boruya ait sayısal hesaplamalar.

H (m)	T <sub>w</sub> (s)	a (m)	U <sub>m</sub> (m/s)	(KC) <sub>1</sub>	S/D <sub>1</sub>	(KC) <sub>2</sub>	S/D <sub>2</sub>	f <sub>w</sub>	U <sub>fm</sub> (m/s)	θ	T*	T <sub>1</sub> (dk)	T <sub>2</sub> (dk)
2	5	0.371	0.466	7.8	0.279	23.3	0.483	0.010	0.032	0.068	1.7	58.5	6.5
2.5	5	0.464	0.583	9.7	0.312	29.2	0.540	0.009	0.039	0.099	0.9	31.3	3.5
2.5	5.5	0.602	0.688	12.6	0.355	37.8	0.615	0.009	0.045	0.129	0.6	20.2	2.2
2	7	0.797	0.716	16.7	0.409	50.1	0.708	0.008	0.045	0.133	0.6	19.3	2.1
2.5	7	0.997	0.894	20.9	0.457	62.6	0.791	0.008	0.055	0.193	0.3	10.3	1.1

2.5	7.5	1.120	0.939	23.5	0.484	70.4	0.839	0.007	0.057	0.207	0.3	9.2	1.0
1.25	6.5	0.435	0.420	9.1	0.302	27.3	0.523	0.009	0.029	0.055	2.5	84.1	9.3
1.5	6	0.443	0.464	9.3	0.304	27.8	0.527	0.009	0.031	0.066	1.9	62.5	6.9
1.25	7	0.498	0.447	10.4	0.323	31.3	0.560	0.009	0.030	0.060	2.2	71.9	8.0
1.25	7.5	0.560	0.469	11.7	0.343	35.2	0.593	0.009	0.031	0.065	1.9	64.0	7.1
1.5	7	0.598	0.537	12.5	0.354	37.6	0.613	0.009	0.035	0.082	1.3	43.2	4.8

Tablo 1’de görüldüğü üzere boru çaplarının farklı olması,  $KC$  sayısı üzerinde etkilidir. Denklem (6) kullanılarak hesaplanan  $KC$  sayıları, kararlı oyulma derinliğinin,  $S/D$ , tespiti için önem taşır. Şekil 2 logaritmik eksen takımında verilmiştir. Burada görüleceği üzere, yeşil çizgi Denklem (6)’yı, mavi noktalar,  $D=0.3$  m, kırmızı noktalar ise  $D=0.1$  m çapındaki boruya ait kararlı denge oyulma derinliklerini gösterir.

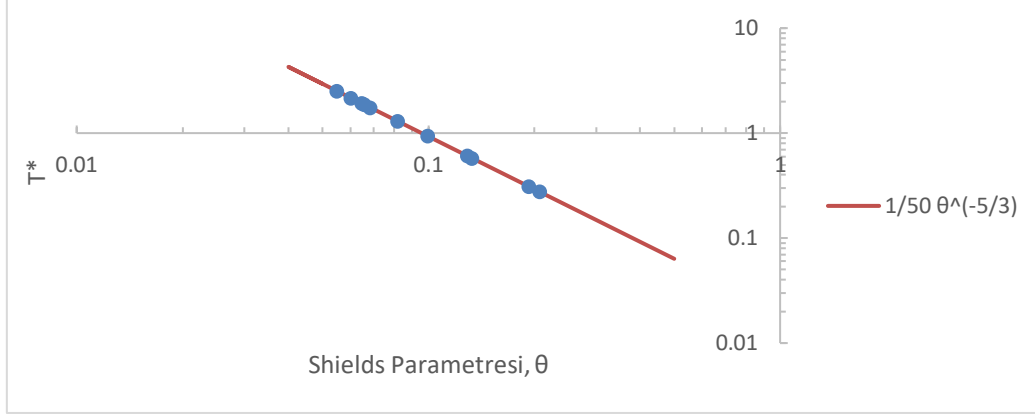
Dalga sınır tabakası sürtünme faktörünün,  $f_w$ , hesabında, tabanının hidrolik olarak pürüzlü olacağı durumu varsaymak doğru bir yaklaşım olacaktır. Bunun kontrolü için, tanecik Reynolds sayısı olan  $dU_f/\nu$  değerinin  $10^3$ ’den büyük olup olmadığına bakılmıştır. Tablo 1’deki tüm koşullar, bu durumu sağlamaktadır. Bu nedenle, dalga sınır tabakası sürtünme katsayısının hesabı için Denklem (12) kullanılmıştır.



**Şekil 2.** Kararlı oyulma derinliğinin ( $S/D$ ) farklı boru çapları için  $KC$  sayısı ile olan değişimi.

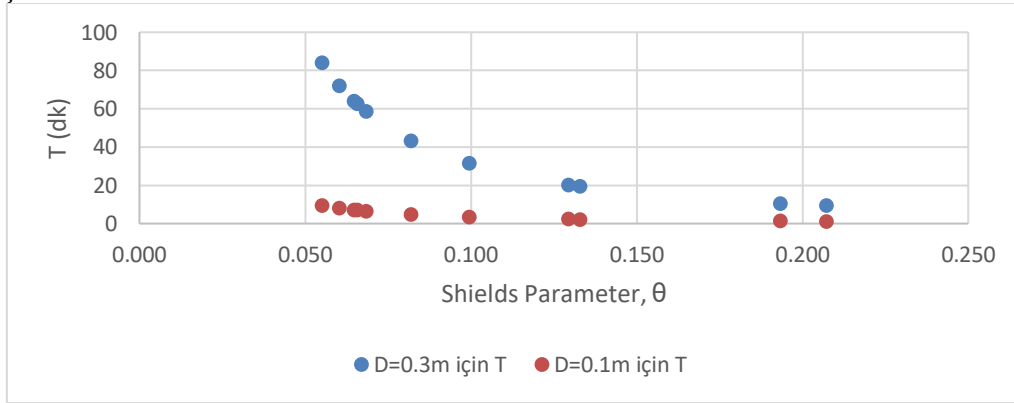
Shields parametresi,  $\theta$  içinse, deniz koşulları ve tanecik çapı,  $d$  önemlidir. Normalize edilmiş boyutsuz zaman ölçeği değeri ( $T^*$ ), Denklem (9)’a göre hesaplanmıştır. Bu nedenle Şekil 3, boru çapından bağımsız olarak, sadece Shields parametresine bağlı olan normalize edilmiş boyutsuz zaman ölçeği değerlerini logaritmik eksen takımında göstermektedir. Bir ampirik formül olan Denklem (15)’te görüleceği üzere, oyulmanın normalize edilmiş zaman ölçeğinde ( $T^*$ ), tek değişken Shields parametresidir. Şekil 2’de kırmızı çizgi Denklem (15)’i ifade eder, mavi noktalar ise bu denkleme göre elde edilen değerleri göstermektedir. Sedimen taşınımında önemli rol

oynayan Shields parametresinin artmasıyla birlikte, Şekil 3’de görüleceği üzere normalize edilmiş boyutsuz zaman ölçeği  $T^*$  değerleri azalmaktadır.



Şekil 3. Oyulmaya ait normalize edilmiş boyutsuz zaman ölçeği değerleri

Öte yandan, Denklem (9)’da  $T$  ‘nin hesabında boru çapı,  $D$ , önem teşkil eder. Bu sebeple, daha küçük çapa sahip boru, Tablo 1’den görüleceği üzere daha çabuk oyulur. Şekil 4, aynı Shields parametresi değerlerine sahip iki borunun zaman ölçeği değerlerini dakika cinsinden göstermektedir. Şekil 2 ile ilintili olarak görüleceği üzere, boru çapının artması, oyulmayı yavaşlatmaktadır.



Şekil 4. İki farklı çaptaki boruya ait Shields parametresi değerlerine ait oyulma zaman ölçeği değerleri.

#### 4. Sonuç

Deniz dibindeki boru hatlarında meydana gelen ve boru hattının stabilitesini tehdit eden temel unsurlardan biri oyulmadır. Boru hatlarının altında meydana gelen oyulma temel olarak bölgedeki sedimen taşınımına neden olan deniz tabanı hızından meydana gelmektedir. Belli bir hıza sahip akıntı, boru hattının altında bulunduğu açıklıkları yarararak oyulma oluşumuna neden olur. Bu noktada oyulmanın oluşumunu ve şiddetini belirleyen önemli faktörler vardır. Borunun çapı ne kadar büyükse akışın boru altını yarararak geçmesi o kadar zor olacaktır.



Bu çalışmada ampirik bağıntılardan faydalanarak ve lineer dalga kabulü yaparak, farklı dalga yükseklikleri ve dalga periyotlarında oyulma ile ilgili temel parametrelerin değişimi hakkında bilgi verilmiştir. Görüldüğü üzere, boru çapının KC sayısı üzerinde etkisi büyüktür. KC sayısı arttıkça oyulma derinliğinin (S/D) artacağı aşikardır. Boru çapları açısından oyulma derinlikleri karşılaştırıldığında, oyulma küçük boru çaplarında daha fazla olacaktır.

Shields parametresi, sedimen taşınım hızı ile doğru orantılı olduğundan, oyulmayı hızlandırıcı bir etkidir. Yine boru çapı açısından incelendiğinde, normalize edilmiş boyutsuz zaman ölçeği (T\*) mertebesinde boru çapı bir etken değilken, oyulmanın zaman ölçeğine baktığımızda (T), boru çapı küçüldükçe, zaman ölçeğinin de, yani kararlı denge oyulma sürecine girme sürecinin kısaldığını görmekteyiz.

#### **Kaynaklar:**

Bayraktar, D., Ahmad, J., Larsen, B.E., Carstensen, S. ve Fuhrman, D.R., 2016. Experimental and numerical study of wave-induced backfilling beneath submarine pipelines. *Coast. Eng.* 118, 63-75.

Brørs, B., 1999. Numerical modeling of flow and scour at pipelines. *J. Hydraul. Eng. ASCE* 125, 511-523.

Fredsøe, J., Deigaard, R., 1992. *Mechanics of Coastal Sediment Transport*. World Scientific, Singapore.

Fredsøe, J., Sumer, B.M., Arnskov, M.M., 1992. Time scale for wave/current scour below pipelines. *Int. J. Offshore Polar Eng.* 2, 13-17.

Fuhrman, D.R., Baykal, C., Sumer, B.M., Jacobsen, N.G., Fredsøe, J., 2014. Numerical simulation of wave-induced scour and backfilling processes beneath submarine pipelines. *Coast. Eng.* 94, 10-22.

Kazeminezhad, M.H., Yeganeh-Bakhtiary, A., Etemad-Shahidi, A., Baas, J.H., 2012. Two-phase simulation of wave-induced tunnel scour beneath marine pipelines. *J. Hydraul. Eng. ASCE* 138, 517-529.

Larsen, B.E., Fuhrman, D.R., Sumer, B.M., 2016. Simulation of wave-plus-current induced scour beneath submarine pipelines. *J. Waterw. Port Coast. Ocean Eng.-ASCE*, article no. 04016003.

Liang, D., Cheng, L., 2005. Numerical modeling of flow and scour below a pipeline in currents Part I. Flow simulation. *Coast. Eng.* 52, 25-42.

Sumer, B.M., Fredsøe, J., 1990. Scour below pipelines in waves. *J. Waterw. Port Coast. Ocean Eng.-ASCE* 116, 307-323.

Sumer, B.M., Fredsøe, J., 2002. *The Mechanics of Scour in the Marine Environment*. World Scientific, Singapore.

Zanganeh, M., Yeganeh-Bakhtiary, A., Wahab, A.K.A., 2012. Lagrangian coupling two-phase flow model to simulate current-induced scour beneath marine pipelines. *Appl. Ocean Res.* 38, 64–73.

Zhang, Q., Draper, S., Cheng, L., An, H., 2016. Scour below a subsea pipeline in time varying flow conditions. *Appl. Ocean Res.* 55, 151–162.