



**PhD Research Article / Doktora Çalışması Araştırma Makalesi**  
**LOCAL SCOUR BELOW SUBMARINE PIPELINES EXPOSED TO**  
**IRREGULAR WAVE ATTACK**

**Burak KIZILÖZ<sup>\*1</sup>, Esin ÖZKAN ÇEVİK<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Müh. Anabilim Dalı Bölümü, Yıldız-İSTANBUL*

<sup>2</sup>*Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Esenler-İSTANBUL*

**Received/Geliş: 28.03.2013 Accepted/Kabul: 13.05.2013**

---

**ABSTRACT**

Submarine pipelines are widely used coastal structures, and scour around them can influence their stability. In this study, scour around rigid submarine pipelines in shoaling region under normal-incidence irregular wave attack on horizontal and (1/10) sloping beaches is studied. This paper presents experimental results concerning scour under irregular wave attack. Multiple regression analysis is used to develop models to predict the scour depth under pipelines under the influence of irregular wave attack. Any one of the models with different representative wave parameters could be used for the calculation of the scour depth below submarine pipelines exposed to irregular wave attack in practical engineering situations.

**Keywords:** Pipeline, scour depth, irregular wave.

**DÜZENSİZ DALGA ETKİSİNDE DENİZALTI BORU HATLARI ALTINDAKİ YEREL OYULMA**

**ÖZET**

Denizaltı boru hatları son derece yaygın olarak kullanılmakta olan deniz yapılarından olup bunların altında meydana gelebilecek oyulma stabiliteelerini etkileyebilmektedir. Bu nedenle sığlaşma bölgesinde düzlem taban ve 1/10 kıyı eğimi üzerinde normal yaklaşan düzensiz dalga etkisindeki sabit ve rijit denizaltı boru hattı altındaki yerel oyulma derinliği deneysel olarak araştırılmıştır. Düzensiz dalga etkisindeki boru hatları altında meydana gelebilecek oyulma derinliğini belirlemek için deneylerden elde edilen veriler kullanılarak çoklu regresyon analizi ile ifadeler geliştirilmiştir. Düzensiz dalga etkilerine maruz boru hatları altındaki oyulma derinliği için farklı karakteristik dalga parametreleri ile elde edilen bu ifadelerin pratik mühendislik uygulamalarında kullanılabilmesi mümkündür.

**Anahtar Sözcükler:** Boru hattı, yerel oyulma, düzensiz dalga.

---

**1. GİRİŞ**

Kıyı mühendisliğinin uygulama ve araştırma konularından biri olan deniz altı boru hatları günümüzde petrol, doğal gaz, endüstriyel ürünler, su ve arıtılmış suların taşınması için yaygın olarak kullanılmakta olan deniz yapılarındandır. Bu yapılar denizel ortamda dalga, akıntı ve dalga-akıntı etkilerine maruzdurlar. Deniz tabanına oturan ya da tabana belirli açıklıklarda

---

\*Corresponding Author/Sorumlu Yazar: e-mail/e-ileti: burak.kiziloz@gmail.com.tr, tel: (262) 644 86 40  
Kocaeli Büyükşehir Belediyesi, Gebze İSU Şube Müdürlüğü, Gebze-KOCAELİ

yerleştirilen bu yapılar geometrilerinden dolayı etrafındaki akım yapısını değiştirmektedirler. Dalga-boru hattı ve taban etkileşimi ile değişen akım yapıları boru hatları altında oyulmaya neden olmaktadır. Bu oyulma ile boru hattı etrafındaki akım yapısı yine değişebilmekte, boru hattı titreşimlerle kırılabilenkte veya oyulma çukuruna sarkarak kırılmak suretiyle hasar görebilmektedir. Ancak tasarımları ve uygulamaları son derece güç olan bu yapılar proje ömürleri boyunca stabilitelelerini koruyarak hizmetlerini sürdürmelidirler.

Oyulma boru hattının menba ve mansabında oluşan basınç farklılığı nedeniyle boru hattı altında sızma akımı ile başlamakta bu akımın kritik değeri aşması durumunda ise borulanma ile su ve katı madde borunun mansabına doğru püskürtülmektedir. Bunu tünel erozyonu izlemektedir. Bu safhada büyük miktarda su kütlesi bu açıklığa doğru hareket etmekte olduğunda burada hız ve taban kayma gerilmelerinin büyük miktarda artışına neden olmaktadır. Bu artan taban kayma gerilmesi büyük oranlarda katı maddenin taşınması ile sonuçlanmaktadır. Dolayısıyla oyulmanın en önemli nedeni olan akım yapısının anlaşılması oyulmanın ifade edilmesi için son derece önemlidir.

Kararlı akım ve dalga etkisinde boru hatları çevresindeki akım yapısı ve oyulma ile ilgili çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Bu çalışmalardan bazıları; Chao ve Hennesy (1972), Kjeldsen et.al., (1973), Littlejons (1977), Herbich (1981), Bijker ve Leeuweistein (1984), Lucassen (1984), Leeuweistein et.al., (1985), Herbich ve diğerleri, (1984), Bijker (1986), İbrahim ve Nalluri (1986), Mao (1986), Kristiansen (1988), Kristiansen ve Torum (1989), Lucassen (1984), Sümer ve Fredsøe (1990), Sümer ve Fredsøe, (1996), Klomp ve diğ.( 1996) Çevik ve Yüksel (1999), Mousaviet et.al., (2009).

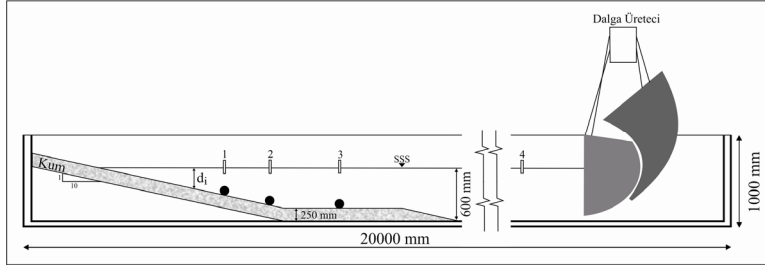
Yasa (2011), Liang ve Cheng (2005a), Liang ve Cheng (2005b), Kambekar ve Deo (2003), Bateni ve diğ. (2007a), Bateni ve diğ. (2007b) tarafından deniz altı boru hatları çevresindeki oyulma derinliği sayısal olarak araştırılmıştır.

Myrhaug et.al., (2008) sığlaşma koşullarında düzensiz dalga etkisindeki kırılan ve kırılmayan dalgalar nedeniyle boru hatları altındaki oyulma derinliği için; Mendez et.al., tarafından verilen sığlaşma ve kırılan dalgaları içeren dalga yüksekliği dağılımı ile Çevik ve Yüksel (1999)'in düzenli dalgalar için önerdikleri oyulma derinliği denklemini birleştirerek düzensiz dalga etkisindeki oyulma derinliğinin belirlenmesi için yeni bir yaklaşım önermişlerdir.

Bu çalışmanın amacı, düzensiz fırtına dalgalarına maruz ve sığlaşma bölgesinde hareketli deniz tabanında dalgaların ilerleme doğrultularına dik yerleştirilmiş denizaltı boru hatları etrafındaki denge oyulma derinliğinin belirlenmesidir. Bu nedenle deneysel olarak gerçekleştirilmiş bu çalışmada düzensiz dalgayı temsil eden karakteristik dalga yükseklik parametreleri  $H_{1/10}$ ,  $H_s$ ,  $H_{rms}$ , ve dalga periyot parametrelerinin  $T_m$ ,  $T_p$  kullanıldığı oyulma derinliği ifadeleri elde edilmiştir.

## **2. DENEYSEL ÇALIŞMA**

Deneysel çalışma Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hidrolik Anabilim Dalı, Hidrolik ve Kıyı-Liman Mühendisliği Laboratuvarı'nda mevcut düzensiz dalga kanalında gerçekleştirilmiştir. İki boyutlu oyulma deneyleri 1 m genişliğinde, 1 m yüksekliğinde ve 20 m uzunluğundaki dalga kanalında yapılmıştır (Şekil 1). Kanalın 14 m uzunluğu boyunca her iki kenarı 19 mm kalınlığında camdan olup, 6 m uzunluk ise 4 mm kalınlığında sacdan yapılmıştır. Düzlem tabana ve 1/10 eğime sahip çelik rampadan oluşturulmuş şev üzerine 25 cm yüksekliğinde kum serilmiştir. Deneylerde hareketli taban malzemesi olarak kullanılan bu kum yıkanmış ve özel elek analizine tabi tutulmuş kuvars kumudur. Dalga kanalı içindeki dalga üreticisinden, 8 m mesafede olan düzlem taban başlangıcına kadar su derinliği 60 cm, 10 metre mesafede olan 1/10 kıyı eğimi başlangıcına kadar su derinliği 35 cm'dir.



Şekil 1. Dalga kanalının şematik gösterimi

Dalgalar 1/10 eğimli tabanın bitiminden 8 m daha açıkta olan 60 cm su derinliğinde piston tipi dalga üreticisi ile üretilmiştir. Dalga üreticisi yansıyan dalgaları ölçmek suretiyle pedal hareketini düzelterek dalga yansımalarını absorbe etmektedir. Deneylerde düzensiz dalgalar Bretschneider spektrum modeli kullanılarak üretilmiştir.

$$S(f) = \frac{5m_0}{f_p} \left( \frac{f_p}{f} \right)^5 e^{-1.25(f_p/f)^4} \quad (1)$$

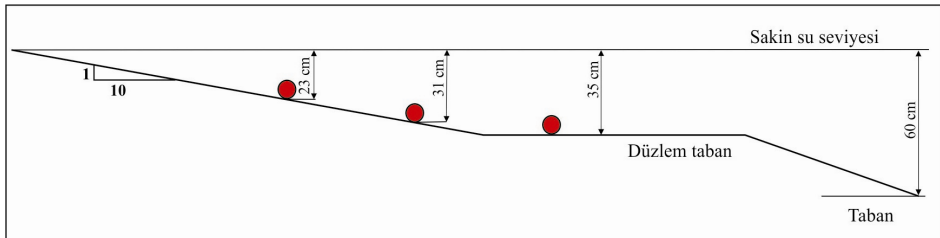
Burada  $m_0$  serbest su yüzeyinin toplam varyansı,  $f_p$  ise pik spektral frekanstır.

Üretilen dalgalar; dalga üreticisinin önünde 4 nolu prob kullanılarak, oyulma deneylerinin yapıldığı konumlarda düzlem tabanda 35 cm su derinliğinde ve 1/10 eğimli tabanda 31 ve 23 cm su derinliklerinde 3, 2 ve 1 nolu problar kullanılarak ölçülmüşlerdir. Dalga ölçümlerinin yapıldığı prob konumları Şekil 1’de gösterilmektedir.

Ocean ve Wave programları kullanılarak üretilen düzensiz dalgaların ölçülmesiyle elde edilen dalgaların değerlendirilmesi ile düzensiz dalga fırtınalarına ait dalga karakteristikleri  $H_{1/10}$ ,  $H_s$ ,  $H_{rms}$ ,  $H_{maks}$ ,  $T_m$ ,  $T_p$  elde edilmiştir.

Düzlem tabanda ve 1/10 şev eğiminde farklı konumlardaki boru hattı altında meydana gelen yerel oyulmayı belirlemek için dört farklı çaptaki  $D=3.23$ ,  $4.90$ ,  $7.70$ ,  $11.40$  cm, rijit silindirler düzensiz dalgaların geliş doğrultusuna dik ve tabana oturacak bir şekilde yerleştirilerek oyulma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Düzlem tabanda 35 cm, 1/10 şev eğimi üzerinde  $d=23$  cm ve  $d=31$  cm su derinliklerinde oyulma derinliği deneyleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 2). Düzensiz fırtına dalgaları etkisinde boru hattı altındaki oyulma derinliğini belirlemek için 8 farklı dalga şartında, 3 farklı konumda ve 4 farklı boru çapında olmak üzere toplam 96 adet deney gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan derin su dalga parametreleri Çizelge 1’de gösterilmiştir.

Sığlaşma bölgesinde oyulma deneylerine geçilmeden önce seçilen dalga şartlarının neden olacağı profiller belirlenmeye çalışılmıştır. Bu profillerin, boru hatları çevresindeki oyulma çukurları üzerine olan etkilerinin anlaşılması açısından önemlidir. Burada gelişen profillerin tamamının kıyı çizgisinde yığılma ile normal profil olduğu gözlenmiştir.



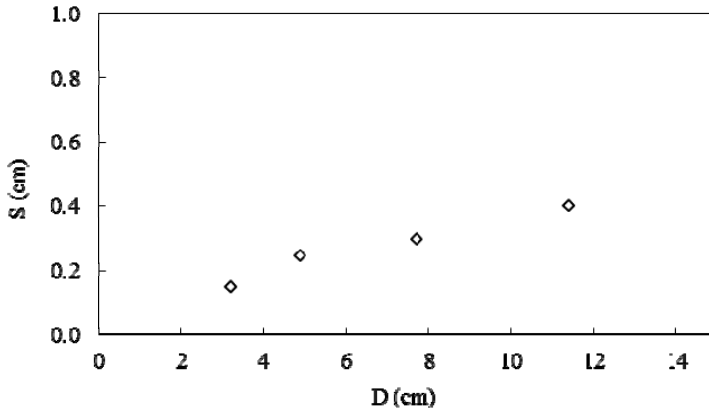
Şekil 2. Ölçüm konumlarının şematik resmi

Çizelge 1. Deneylerde kullanılan dalga parametreleri

Eğim, (m)	Dalga No	Derin Su Belirgin Dalga Yüksekliği $H_{s0}$ (cm)	Ortalama Dalga Periyodu $T_{m0}$ (s)	Derin Deniz Dalga Boyu $L_{m0}$ (m)
Düzlem ve 1/10	1	5.22	0.98	1.49
	2	7.26	0.97	1.47
	3	7.75	1.20	2.26
	4	12.07	1.19	2.20
	5	7.47	1.42	3.14
	6	9.63	1.41	3.11
	7	11.75	1.41	3.11
	8	8.61	1.72	4.61

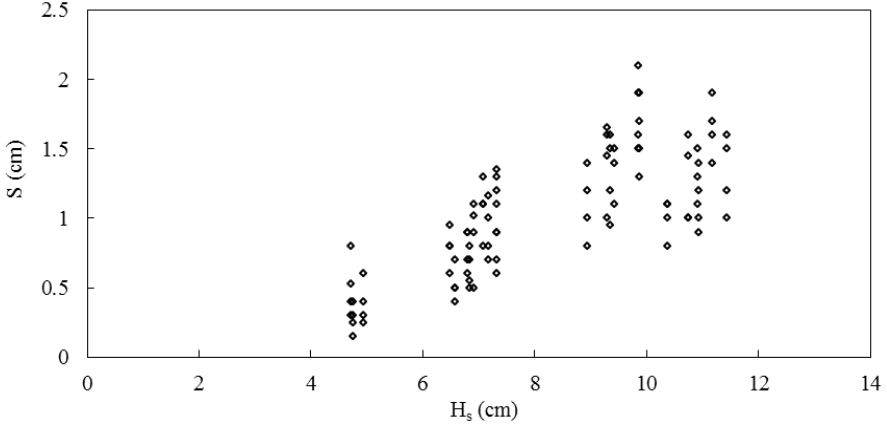
### 3. DÜZENSİZ DALGA ETKİSİNDE OYULMA DERİNLİĞİNİN TAHMİNİ

Burada oyulma derinliği üzerine etkili olabilecek her parametrenin etkisi öncelikle incelenecektir. Boru hattının deniz tabanına yerleştirilmesi buradaki akım yapısını değiştireceğinden öncelikle sabit bir akım şartında farklı çaplardaki boruların oyulma derinliği üzerindeki etkisini belirlemek için boru çapına karşılık oyulma derinliği değişimi Şekil 3'de gösterilmektedir. Şekilden artan boru çapı ile oyulma derinliğinin arttığı görülmektedir.



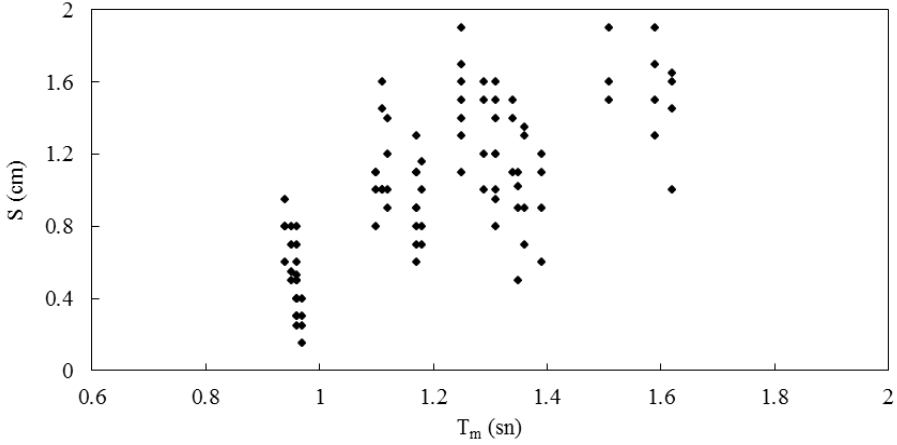
Şekil 3. Boru çapı ile oyulma derinliği ilişkisi

Akım şartlarını ifade eden dalga yüksekliği ve dalga periyodu parametrelerinin etkileri belirlenirken çalışma düzensiz rüzgar fırtınaları etkisinde gerçekleştirildiğinden her bir karakteristik dalga parametresi oyulma derinliği ile ayrı ayrı irdelenmiştir. Şekil 4'de belirgin dalga yüksekliğine ( $H_s$ ) karşı oyulma derinliğinin saçılım diyagramı görülmektedir. Şekilden oyulma derinliği artan dalga yüksekliği ile artmakla birlikte saçılımın fazla olduğu görülmektedir. Bunun nedeni dalga yüksekliğinin artması ile tabandaki anlık kayma gerilmesi ile yörüngesel hızların artmasıdır. Düzensiz fırtınaların şiddeti belirgin dalga yüksekliğinden başka  $H_{1/10}$  ve  $H_{rms}$  dalga yükseklikleri ile de temsil edilebildiğinden  $H_{1/10}$  ve  $H_{rms}$  dalga parametreleri ile oyulma derinliğinin değişimi incelendiğinde belirgin dalga yüksekliği ile aynı değişim görülmüş ve ayrıca korelasyon katsayıları (R) 0.76 olarak aynı elde edilmiştir. Bu nedenle düzensiz fırtına dalgasını temsilen dalga yüksekliği parametresi olarak belirgin dalga yüksekliği dikkate alınacaktır.

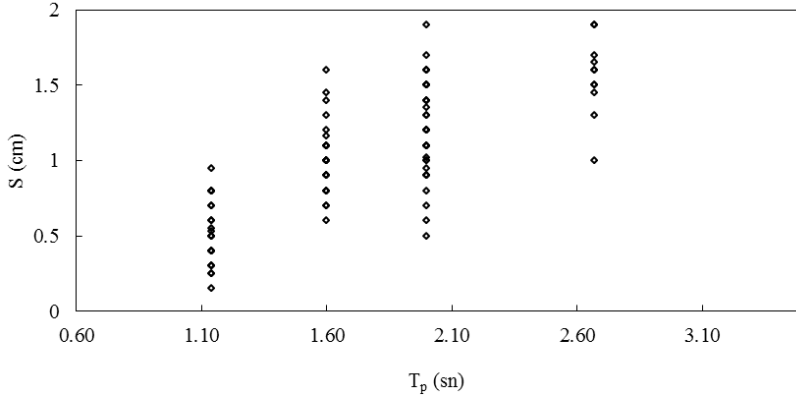


Şekil 4. Oylulma derinliğinin belirgin dalga yüksekliği ile değişimi

Akım şartlarını kontrol eden diğer bir parametre ise dalga periyodudur. Düzensiz fırtına dalgaları için dalga periyot parametreleri ortalama dalga periyodu  $T_m$  ve pik dalga periyodu  $T_p$ 'dir.  $T_m$  dalga enerji spektrumunun altında kalan alanın momentlerinden elde edilen periyot parametresi pik dalga periyodu ise dalga enerji spektrumunda maksimum enerji seviyesine gelen dalga periyot parametresidir. Her iki dalga periyodunun oylulma derinliği ile değişimi ayrı ayrı Şekil 5 ve 6'da gösterilmektedir. Şekillerden yine oylulma derinliğinin dalga periyodu ile ilişkili olduğu ve dalga periyodunun artması ile oylulma derinliğinin artış gösterdiği görülmektedir. Çünkü periyodun süresi boru hattı etrafındaki vortekslerin şekillenmesindeki en önemli etkenlerdendir. Ancak her iki periyot parametresinden  $T_p$   $T_m$ 'ye göre az da olsa daha yüksek bir korelasyon göstermiştir.

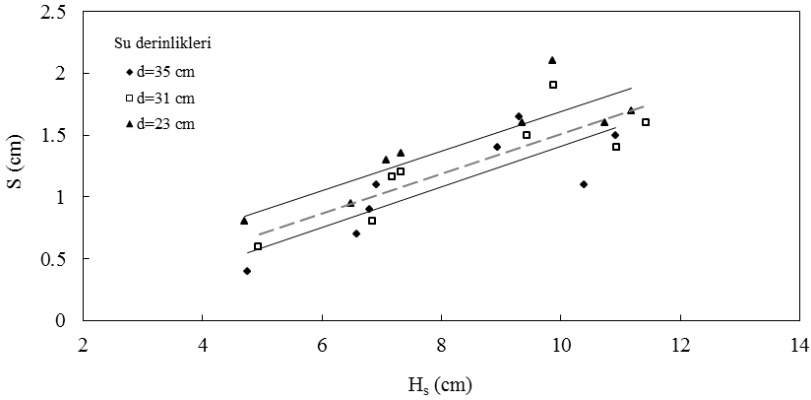


Şekil 5. Oylulma derinliğinin ortalama dalga periyodu ile değişimi



Şekil 6. Oyulma derinliğinin pik dalga periyodu ile değişimi

Oyulma derinliği üzerine etkili olabilecek diğer bir parametre ise su derinliğidir. Bu etkinin araştırılması için yine farklı su derinliklerinde belirgin dalga yüksekliği ile oyulma derinliği değişimi Şekil 7’de gösterilmektedir. Şekilden azalan su derinliği ile oyulma derinliğinin arttığı görülmektedir.



Şekil 7. Oyulma derinliğinin belirgin dalga yüksekliği ve su derinliği ile değişimi

Boyutlu parametrelerin incelenmesi sonucunda her birinin oyulma derinliği üzerine etkili oldukları görülmekle birlikte tek başlarına saçılımların fazla olduğu görülmüştür. Bu nedenle boyut analizi ile elde edilen etkili boyutsuzlar incelenecektir. Çevik ve Yüksel (1999)’in rölatif oyulma derinliği için elde ettikleri etkili parametreler aşağıda verilmiştir:

$$S/D = f(KC, Re, \theta, \tan \alpha, d/H, d/D, H/L) \quad (2)$$

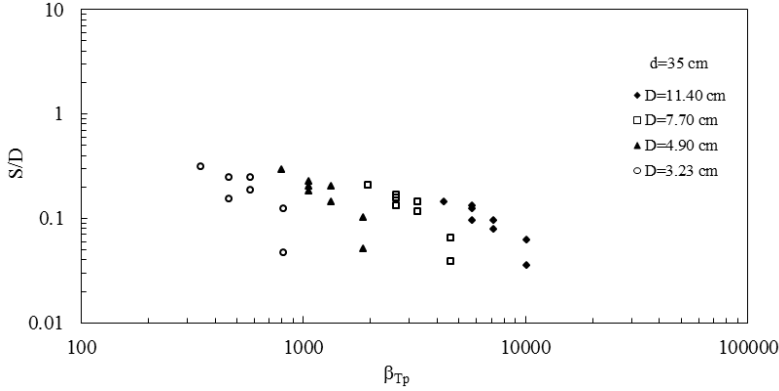
Periyodik akım alanında boru hatları çevresinde şekillenen akım yapısında meydana gelen değişimler ve bu değişimlerin sonucunda oluşan yerel oyulma çukuruna KC ve Re sayılarının birlikte olan etkisini araştırmak amacıyla, rölatif oyulma derinliğinin frekans parametresiyle olan değişimi incelenmiştir.

KC ve Re sayılarının birbirine oranıyla frekans parametresi,  $\beta$ , elde edilmektedir.

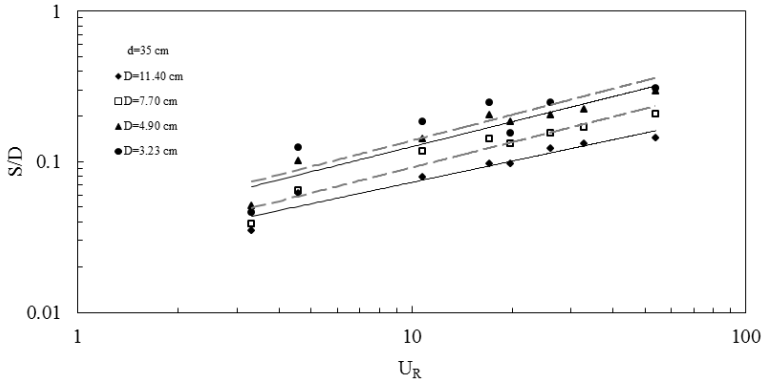
$$\beta_p = D^2 / \nu T_p \quad (3)$$

Frekans parametresi boru çapı,  $D$ , kinematik viskozite,  $\nu$  ve pik dalga periyodu,  $T_p$ 'yi içerirken oyulma üzerinde etkili olan dalga yüksekliğini içermemektedir. Düzensiz dalga etkisindeki fırtına şartlarında pik dalga periyodu kullanılarak düzlem tabanda rölatif oyulma derinliği,  $S/D$ , ile frekans parametresinin değişimi Şekil 8'de irdelenmiştir. Frekans parametresinin artmasıyla oyulma derinliğinde azalma eğilimi görülmekle birlikte saçılımlar fazladır. Bu nedenle frekans parametresi boru hattı altındaki oyulma derinliğini tek başına ifade etmede yeterli değildir.

Ursell sayısı dalgaların lineerliğinin bir ölçüsüdür ve genellikle dalga teorilerini seçmekte kullanılmaktadır. Ayrıca dalganın sahip olduğu enerjiyi ve tabana iletilen enerjinin büyüklüğünü tanımlamaktadır (İbrahim ve Nalluri, 1986). Dolayısıyla sığlaşma bölgesinde gerçekleştirilen bu çalışma için Ursell parametresi tabanda etkili olacak akım yapısını da karakterize edebilmektedir.  $U_R$  sayısı ( $=HL^2/d^3$ ) dalga yüksekliğinin kendisi dalga boyunun karesi (dolaylı olarak dalga periyodu) ile doğru orantılı ve derinliğin küpü ile ters orantılıdır. Düzlem tabanda düzensiz dalga etkisindeki fırtına şartlarında belirgin dalga yüksekliği,  $H_s$ , ve pik dalga periyodu,  $T_p$ , kullanılarak hesaplanan rölatif oyulma derinliğinin farklı boru çapları için Ursell sayısına karşı değişimi Şekil 9'da gösterilmektedir. Ursell sayısının artmasıyla rölatif oyulma derinliğindeki artma eğilimi görülmektedir. Ancak saçılımlar oldukça fazladır ve boru çapının etkisi açıkça görülmektedir. Bu nedenle Ursell sayısının da tek başına oyulma derinliğini ifade etmede yeterli olmadığı anlaşılmaktadır.



Şekil 8. Düzlem tabanda frekans parametresinin rölatif oyulma derinliği ile değişimi



Şekil 9. Rölatif oyulma derinliğinin Ursell sayısı ile değişimi

Su derinliğinin (sığlaşma) etkisini oldukça iyi bir şekilde ifade eden bu parametre oyulma derinliği üzerinde etkili olan boru çapını içermemektedir. Çevik ve Yüksel (1999) düzenli dalgalarla yapmış oldukları çalışmada boru etkisini de içeren ve daha yüksek bir korelasyona sahip olan Boru Ursell Sayısını,  $U_{RB}$ , önermişlerdir. Boru Ursell sayısı;

$$U_{RB} = U_R \left( \frac{H}{D} \right)^2 = \left( \frac{HL^2}{d^3} \right) \left( \frac{H}{D} \right)^2 = \frac{H^3 L^2}{d^3 D^2} \quad (4)$$

Gerek geçiş derinliği gerekse sığ su şartları bir arada düşünülerek Boru Ursell sayısının rölatif oyulma derinliği üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla düzlem taban ve 1/10 kıyı eğimindeki deneysel veriler birlikte değerlendirilmiştir (Şekil 10). Şekilden görüldüğü gibi karakteristik dalga parametrelerinden  $H_{rms}-T_p$  çiftinin kullanılması ile elde edilen boru Ursell sayısına karşılık rölatif oyulma derinliğinin değişimi incelendiğinde bu parametrenin rölatif oyulma derinliğini son derece iyi ifade ettiği görülmektedir. Rölatif oyulma derinliği boru Ursell sayısı cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir.

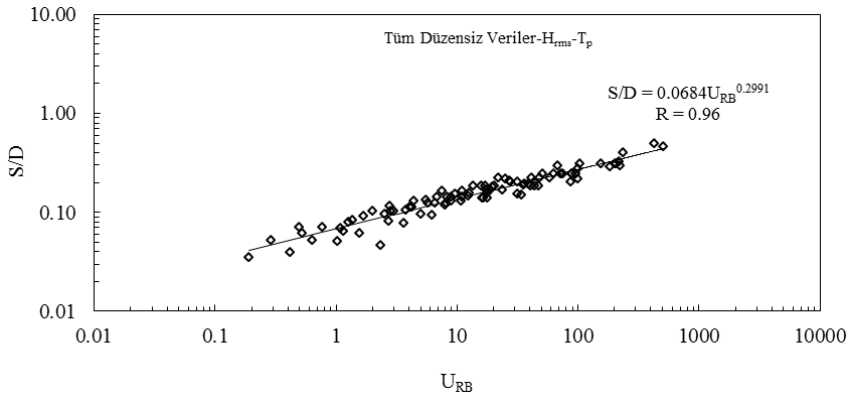
$$\frac{S}{D} = 0.0684 U_{RB}^{0.299} \quad (5)$$

Farklı karakteristik dalga parametreleri kombinasyonu kullanılarak boru Ursell sayıları ile hesaplanan rölatif oyulma derinlikleri için denklem (5)'dekine benzer ancak farklı katsayı ve üstel değerleri olan ifadeler olarak elde edilmiştir. Rölatif oyulma derinliği için genelleştirilmiş ifade aşağıda denklem (6)'da görülmektedir;

$$\frac{S}{D} = a U_{RB}^b \quad (6)$$

burada a katsayı ve b ise üstel değerdir.

Düzlem taban ve 1/10 kıyı eğiminde düzensiz dalga şartlarında rölatif oyulma derinliğinin farklı karakteristik dalga parametrelerinin kullanılmasıyla elde edilen ifadeler (7, 8, 9, 10, 11, 12) ve bunların korelasyon katsayıları (R), ortalama kare hataları (OKH), saçılım indeksi (SI) ve denklem katsayıları Çizelge 2'de görülmektedir. Çizelgede düzensiz dalga etkisindeki rölatif oyulma derinliğinin, farklı karakteristik dalga parametreleri kombinasyonu kullanılarak elde edilen boru Ursell sayıları ile bulunan ifadelerin her birinde korelasyon faktörlerin kayda değer bir şekilde yüksek ortalama kare hataların ise düşük olduğu görülmektedir. Sadece ifadelerdeki katsayı ve üstel değerler farklıdır. Bu nedenle düzensiz dalga etkisinde oyulma derinliği hesabında bu ifadelerin herhangi birinin kullanılması önerilebilmektedir.



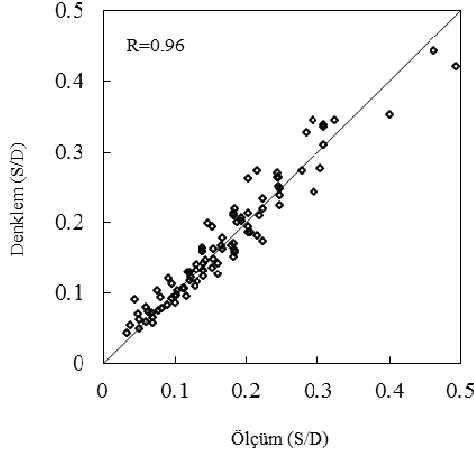
Şekil 10. Düzlem ve 1/10 eğimli tabanda  $S/D$ 'nin  $U_{RB}$  ile değişimi ( $H_{rms}-T_p$ )



**Çizelge 2.** Düzlem ve 1/10 eğimli tabanda farklı karakteristik dalga parametrelerinin kombinasyonu ile elde edilen  $U_{RB}$  sayıları ile rölatif oyulma derinliği değişiminin (R), SI ve OKH değerleri

Sıra No	Denklem	S/D		R	OKH	SI	Denklem No
		a	b				
1	$H_{1/10}-T_p$	0.041	0.289	0.96	0.001	0.1440	(7)
2	$H_s-T_p$	0.049	0.302	0.96	0.001	0.1381	(8)
3	$H_{rms}-T_p$	0.069	0.299	0.96	0.001	0.1392	(9)
4	$H_{1/10}-T_m$	0.047	0.327	0.95	0.001	0.1595	(10)
5	$H_s-T_m$	0.058	0.341	0.95	0.001	0.1492	(11)
6	$H_{rms}-T_m$	0.083	0.336	0.95	0.001	0.1506	(12)

Şekil 11’de ise ölçümlerden elde edilen (S/D)’nin (9) nolu denklem kullanılarak tahmin edilen (S/D) ile değişimi verilmiştir. Grafikten ölçülen ve tahmin edilen rölatif oyulma derinliklerinin oldukça uyumlu oldukları ve korelasyon katsayısının da son derece yüksek olduğu görülmektedir.



**Şekil 11.** Düzlem ve 1/10 eğimli tabanda ölçülen (S/D) ile tahmin edilen (S/D) değişimi

#### 4. SONUÇLAR

1. Düzensiz dalga etkisinde dikkate alınan dalga şartlarında yapılan deneysel çalışmada 1/10 şev eğiminde oluşan tüm kıyı profillerinin yaz profili olduğu görülmüştür.
2. Oyulma derinliği artan boru çapı ile artış göstermiştir. Çünkü boru çapının artması ile şekillenen vorteks ile daha büyük bir türbülanslı akım alanı yaratılmaktadır.
3. Artan dalga yüksekliği ile oyulma derinliğinin arttığı ancak farklı karakteristik dalga yüksekliklerinin bir fark yaratmadığı ve korelasyon katsayılarının aynı olduğu görülmüştür.
4. Dalga periyodunun artması ile oyulma derinliği artış göstermiştir. Pik dalga periyodu ortalama dalga periyoduna göre biraz daha büyük bir korelasyon katsayısı vermiştir.
5. Frekans parametresinin artmasıyla oyulma derinliğinde azalma eğilimi görülmekle birlikte saçılımlar fazladır. Bu nedenle frekans parametresi boru hattı altındaki oyulma derinliğini tek başına ifade etmede yeterli değildir.

6. Ursell sayısının artmasıyla rölatif oyulma derinliğindeki artma eğilimi görülmektedir. Ancak saçılımlar oldukça fazladır ve boru çapının etkisi açıkça görülmektedir. Bu nedenle Ursel sayısının da tek başına oyulma derinliğini ifade etmede yeterli olmadığı anlaşılmaktadır.

7. Boru Ursel sayısına karşılık rölatif oyulma derinliğinin değişimi incelendiğinde bu parametrenin rölatif oyulma derinliğini son derece iyi ifade ettiği görülmektedir

8. Her bir karakteristik dalga parametresinin ayrı ayrı kullanılması ile elde edilen farklı katsayılarla sahip oyulma derinliği ifadelerinde denklemlerin tamamının rölatif oyulma derinliğini ifade edebileceği belirlenmiştir. Artan  $U_{RB}$  değerlerinde S/D artmaktadır. Ayrıca farklı karakteristik dalga yükseklik parametrelerinin bir fark yaratmadığı ancak dalga periyodunun korelasyon katsayısını az da olsa değiştirdiği gözlenmiştir.

9. Boru hatları altındaki oyulmanın tahmin edilmesinde kullanılan yöntemde ölçülmesi ya da tahmin edilmesi zor olmayan dalga şartlarının ve diğer parametrelerin doğrudan kullanılması ile kolay ve pratik bir çözüm yöntemi elde edilmiştir.

## REFERENCES / KAYNAKLAR

- [1] Bijker, E. W. ve Leeuweistein, W., "Interaction between Pipelines and the Seabed under the Influence of Waves and Currents, Seabed Mechanics", B. Denness, ed., Graham and Trotman, Gettysburg, Md., 1984, 235-242.
- [2] Bijker, E. W., "Scour around Structures", Proc., 20<sup>th</sup> Coastal Engineering Conf., ASCE, Reston, Va, 1986, 1754-1768.
- [3] Bateni, S. M., Borghesi, S. M. ve Jeng, D. S., "Neural Network and Neuro-Fuzzy Assessments for Scour Depth around Bridge Piers", Engineering Applications of Artificial Intelligence, 20, 2007a, 401-414.
- [4] Bateni, S. M., Jeng, D.S. ve Melville, B. W., "Bayesian Neural Networks for Prediction of Equilibrium and Time-Dependent Scour Depth Around Bridge Piers", Advances in Engineering Software, 2007b, 102-111.
- [5] Chao, L. ve Hennesy, D. V., "Local Scour under Ocean Outfall Pipelines", Journal Poll. Contr. Federation, 1972, 1443-1447.
- [6] Herbich, J.B., "Scour Around Pipelines and Other Objects, Off-shore Pipeline Design Elements, Marcell Dekker", Inc., New York, N.Y., 1981.
- [7] İbrahim, A. ve Nalluri, C., "Scour Prediction around Marine Pipelines", Proc. 5<sup>th</sup> Int Symp. On Offshore Mech. and Arctic Engrg., ASME, New York, 1986, 670-684.
- [8] Kjeldsen, S. P., Gjorsvik, C., Bringaker, K. G., "Local Scour Around Submarine Pipelines", Proc., 6<sup>th</sup> Int. Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions Conf., 1980, 201-217.
- [9] Kristiansen, Ø., "Current induced vibrations and scour of pipelines on a sand bottom", PhD Thesis, University of Trondheim, Trondheim, Norway, 1988.
- [10] Kristiansen, Ø. ve V Torum, A., "Interaction Between Current Induced Vibrations and Scour of Pipelines on a Sandy Bottom", Proc. 8<sup>th</sup> Int. Conf. on Offshore Mech. and Arctic Engrg., ASME, New York, 1989, 167-174.
- [11] Kambekar ve Deo, "Estimation of Pile Group Scour Using Neural Networks", Applied Ocean Research, 2003, 225-234.
- [12] Littlejones, P. S. G., "A study of Scour around Submarine Pipelines", Hydraulic Research Station, Wallingford, U.K, 1977.
- [13] Lucassen, R. J., "Scour underneath Submarine Pipelines", MATs Rep. PL-4 2A, Marine Tech. Res., The Netherlands, 1984.
- [14] Leeuweistein, W., Bijker, E.W., Peerbolte, E. B., "The Natural Self-Burial of Submarine Pipelines", Conf. Behaviour of Offshore Struct., 1985, 717-728.
- [15] Liang ve Cheng, "A numerical Model for Wave-Induced Scour below a Submarine Pipeline", J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., ASCE, 2005a, 131.

- [16] Liang ve Cheng, “Numerical Study of The Reynolds-Number Dependence of Two-Dimensional scour beneath offshore pipelines in steady currents”, *Ocean Eng.*, 2005b, 1590-1607.
- [17] Mao, Y., “Seabed Scour Under Pipelines”, *Proc. 7<sup>th</sup> Int. Conf. on Offshore Mech. and Arctic Engrg.*, ASME, Houston, Texas, 1988, 33-38.
- [18] Mendez, F. J., Losada, I. J. ve Medina, R., “Transformation Model of Wave Height Distribution on Planar Beaches”, *Elsevier, Coastal Engineering*, 2004, 97-115.
- [19] Myrhaug, D. Ong, M. O. ve Gjengedal, C., “Scour Below Marine Pipelines in Shoaling Conditions for Random Waves”, *Elsevier, Coastal Engineering*, 2008, 1219-1223.
- [20] Mousaviat, M.E. Bakhtiary, A.Y. ve Enshaei, N., “The Equivalent Depth of Wave-Induced Scour Around Offshore Pipelines”, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering–Transaction of the ASME*, 2009,131.
- [21] Yasa, R., “Prediction of the Scour Depth under Submarine Pipelines- in Wave Condition”, *Journal of Coastal Research, Special Issue*, 2011, 627-630.