



Research Article

Experimental Study of Unconfined Twin Propeller Jet Scour

Amina Suljevic¹ , Erdal Kesgin¹ 

¹ Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Istanbul Technical University, 34000, Maslak, İstanbul, Türkiye

* Correspondence: suljevic22@itu.edu.tr

Received: 7 May 2024; Accepted: 15 May 2024; Published: 30 June 2024

Abstract: The propeller jet flow caused to significant erosion and sedimentation near port structures, in front of quay walls, and around pile structures. Additionally, shallow water depths increase the amount of erosion caused by the propeller jet. If these problems are not considered during the design phase, serious erosion at the foundation of port structures and consequent significant stability issues may occur. In this study, the effect of erosion under twin propeller jet influence was investigated by examining the distance between propellers and the seabed, propeller propeller speed, and the distance between propellers, and the results were compared. It was found that as the propeller speed increases, the maximum erosion increases, as the distance between propellers increases, the maximum erosion decreases, and as the distance between the propeller and the seabed increases, the maximum erosion decreases. The obtained maximum erosion results were found to be consistent with the literature.

Keywords: Twin propeller, scour, sediment transport.

Araştırma Makalesi

Yapı ile Sınırlandırılmamış Çift Pervane Jet Etkisinde Oyulmanın Deneysel Olarak Araştırılması

Öz: Pervane jet akımı, liman yapılarının yakınlarında, rıhtım duvarları önünde ve kazıklı yapıların etrafında ciddi oyulma ve birikmelere neden olmaktadır. Ayrıca sığ su derinlikleri de pervane jeti oyulma miktarını artırmaktadır. Bu problemler projelendirme sırasında dikkate alınmadığı takdirde liman yapılarının temelinde ciddi oyulmalar ve buna bağlı önemli stabilite sorunları meydana getirmektedir. Bu çalışmada çift pervane jet etkisindeki oyulmaya, pervaneler ile taban arasındaki mesafe, pervane dönüş hızı ve pervaneler arası mesafenin etkisi incelenmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen verilerden yola çıkarak dönüş hızı arttığında maksimum oyulmanın arttığı, pervaneler arası mesafe arttığında maksimum oyulmanın azaldığı ve pervane ile taban arasındaki mesafe arttığında maksimum oyulmanın azaldığı tespit edilmiştir. Elde edilen maksimum oyulma sonuçlarının literatür ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çift pervane, oyulma, katı madde taşınımı.

Citation: A. Suljevic and E. Kesgin, "Experimental Study of Unconfined Twin Propeller Jet Scour", *Journal of Studies in Advanced Technologies*, vol. 2, no. 1, pp. 33-41, Jun 2024, doi: 10.63063/jsat.1480029

1. Giriş

Gemilerde bulunan pervanelerin ileri-geri hareketleri, yanaşma ve ayrılma sırasında deniz tabanında önemli ölçüde oyulma ve yığılma meydana getirmektedir. Bu oyulma ve yığılmalar yapıların stabilitelelerinin bozulmasına neden olduğundan projelendirme esnasında yapıların etrafında korunma önlemleri alınmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca, deniz yapıları tasarlanırken veya mevcut yapıların performansı değerlendirilirken pervane kaynaklı oyulmanın dikkate alınması gerekmektedir. Özellikle kazıklı platformlar, palpları perdeleri, yer çekimi tipi yapılar ve rip-rap korumalı şevlere sahip açık platform tipi yapılar gibi yatay ve dikey yüklere karşı tasarlanmış bir taban seviyesi ile desteklenenler olmak üzere her tür deniz yapısının pervane kaynaklı oyulmadan zarar görebileceğini belirtmiştir [1].

Pervane jeti etkisinde oluşan oyulma ve yığılma, kazıklı yapıların etrafında, rıhtım duvarları önünde, liman yapılarında ciddi sorunlara sebep olmaktadır. Pervane jeti etkisinin neden olduğu oyulma ve yığılmayı belirlemek amacıyla literatürde yapılmış deneysel ve sayısal birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalardan bazılarında [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11] herhangi bir yapı kullanmadan tekil pervane jetinin tabana etkisi incelenmiş, bazılarında [8], [9], [10], [12], [13], [14] tekil pervane jet akımının önüne kazık veya rıhtım duvarı gibi yapılar yerleştirilmiş ve pervane jet akımının tabana etkisi incelenmiş, bazılarında ise [15], [16], [17], [18], [19] çift pervane jet akımının tabana etkisi incelenmiştir.

Diğer taraftan, pervane jeti kaynaklı oyulmaya etki eden parametreler birçok çalışmada benzerlik gösterirken, çalışmanın mahiyetine göre de birtakım farklılıklar gösterebilmektedir. Özellikle çift pervane çalışmalarında tekil pervaneye ek olarak pervaneler arası mesafe ve pervanelerin dönüş yönleri de oyulmaya etki eden önemli parametreler olarak öne çıkmaktadır. Çalışma kapsamındaki oyulmaya etki eden boyutlu parametrelerin birim ve boyutları Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Oyulmaya Etki Eden Parametreler

	Sembol	Birim	Boyut
Akışkanın özgül kütlesi	ρ	kg/m ³	ML ⁻³
Akışkanın dinamik viskozitesi	μ	Ns/m ²	ML ⁻¹ T ⁻¹
Dışarı akış hızı	U_0	m/s	LT ⁻¹
Pervane çapı	D_p	m	L
Su derinliği	h	m	L
Taban malzemesinin boyutu	d_{50}	m	L
Taban malzemesinin özgül kütlesi	ρ_s	kg/m ³	ML ⁻³
Pervane merkezi ile taban arasındaki mesafe	G	m	L
Yer çekimi ivmesi	g	m/s ²	LT ⁻²
Pervane eksenleri arasındaki mesafe	a_p	m	L
Dönüş hızı	n	r/s	T ⁻¹
Pervane uzunluğu	L_m	m	L

Densimetrik Froude sayısı (Fr_d) ve boşluk oranı (G/D_p), oyulma oluşumunu etkileyen boyutsuz parametrelerdir. Bu parametreler oyulma başlangıcının belirlenebilmesi için kullanılmaktadır. Tan [10], maksimum oyulma derinliği için şu denklemi önermiştir:

$$Fr_{dc} = 2.1 \frac{G}{D_p}$$

$$\frac{S_{max}}{D_p} = 0.57(Fr_d - Fr_{dc})^{0.33} \left(\frac{G}{D_p}\right)^{-1.1} ; 2.82 \leq Fr_d \leq 15.01$$

Fr_{dc} kritik yoğunluk densimetrik sayısını, S_{max} denge durumundaki maksimum oyulma derinliğini, G pervane eksenleri ile taban malzemesi arasındaki mesafesini ve D_p pervane çapını temsil etmektedir.

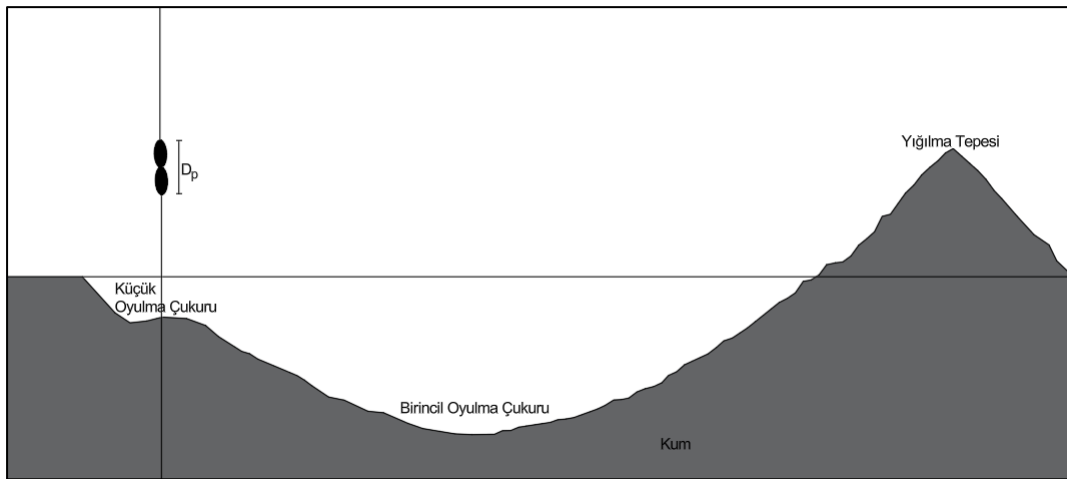
Aynı zamanda, pervane jet akışı için taban malzemesinin boyutunu (d_{50}) dikkate alarak $\frac{S_{max}}{D_p}$ ve $\frac{G}{D_p}$ arasındaki ilişkiye de dikkat edilmiştir.

Pervane, zeminle etkileşime girecek mesafede olduğunda tabanda jet akımından kaynaklanan oyulma ve birikmeler gözlemlenir. Bu oyulma ve birikmelerden meydana gelen taban profili üç farklı bölümden oluşmaktadır. Bunlar; pervanenin altındaki küçük oyulma çukuru, küçük oyulma çukurunun mansabındaki

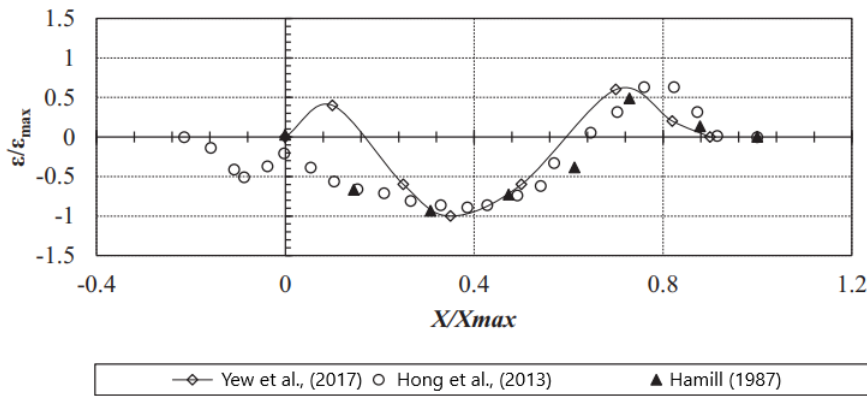
birincil oyulma çukuru ve birincil oyulma çukurunun mansabındaki yığılma tepesidir [9], [20]. Ayrıca, deneysel gözlemlere dayanarak, serbest pervane jeti tarafından oluşan oyulma formunun jet merkez çizgisi boyunca neredeyse simetrik olduğu, ancak yan yığılmaların hafif bir asimetri sergilediği anlaşılmıştır [9], [10].

Pervane jet etkisi altındaki tipik bir oyulma profili Şekil 1’de verilmiştir.

Yapılan çift pervaneli deney çalışmasında, oyulma profilinin zamanla geliştiği görülmüş ve çift pervanenin neden olduğu oyulma dört farklı aşama ile ifade edilmiştir [15]. Çift pervane jeti etkisinin incelendiği bu çalışmanın sonuçlarına bakıldığında, tek pervaneli çalışmalardan elde edilen sonuçlarla büyük oranda benzerlik taşıdığı görülmüştür. Şekil 2’de de verildiği gibi çift pervane çalışmasından elde edilen oyulma profillerinin, tek pervane çalışmasından elde edilen oyulma profilleriyle benzer olduğu saptanmıştır [9].



Şekil 1. Pervanenin Tabanda Oluşturduğu Oyulma ve Birikme Bölgeleri

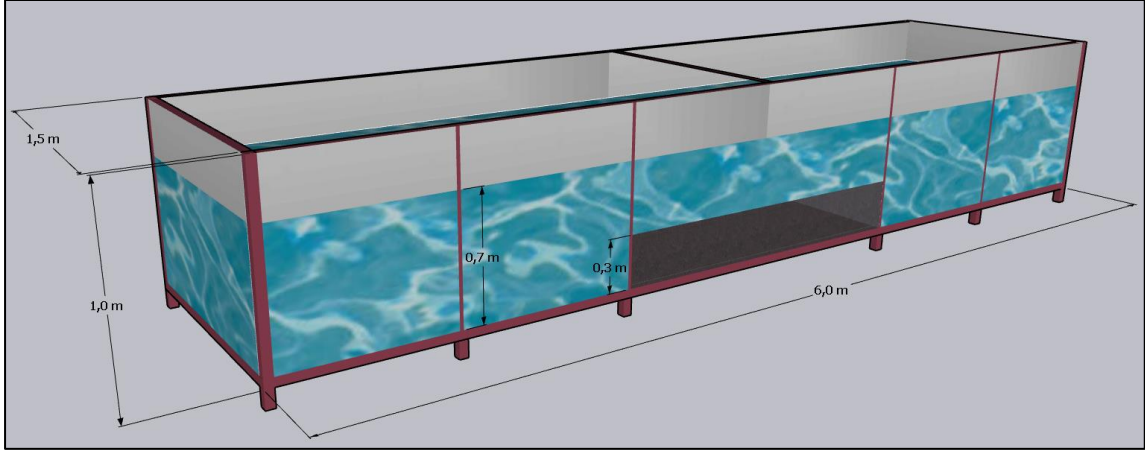


Şekil 2. Yew Oyulma Modelinin Hong vd. ve Hamill Modelleri ile Karşılaştırılması [15].

2. Materyal ve Metot

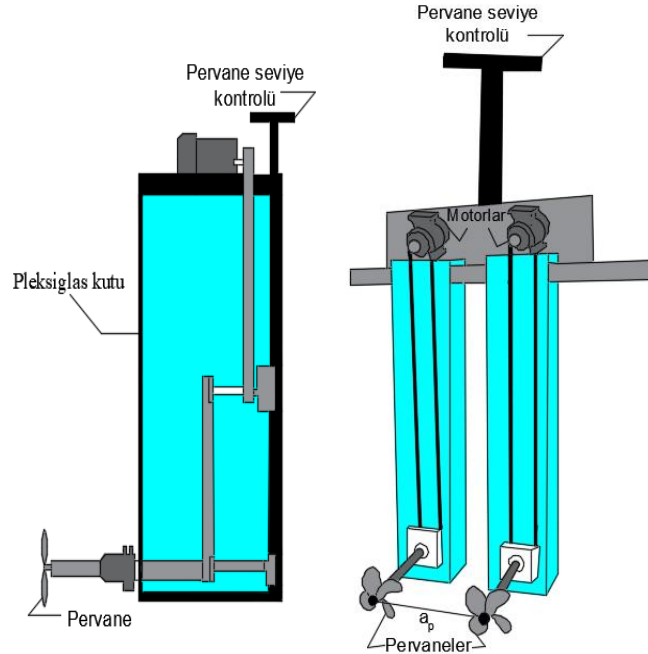
Literatürde tek pervane jeti etkisinde meydana gelen oyulmayı kazıklı yapı etrafında, rıhtım duvarı önünde ve yapı olmayan durumda inceleyen birçok çalışma bulunurken, çift pervane jeti etkisinde oluşan oyulmayı inceleyen çalışma oldukça azdır. Çalışmanın amacı, literatürdeki çift pervane jeti etkisinde oluşan oyulmanın incelenmesi ve özellikle pervaneler arası mesafenin (a_p) oyulmaya etkisine dair eksikliği gidermektir.

Çalışma kapsamında kullanılan deney sistemi 6 m uzunluğunda, 1,5 m genişliğinde ve 1 m yüksekliğindedir (Şekil 3). Su seviyesi 0,7 m ve taban malzemesinin kalınlığı 0,3 m olarak belirlenmiştir. Bu kanal sonunda ve başında kapalı bir sistem olup içerisindeki pompalar sayesinde deneyler başlamadan su doldurulmakta ve her deneyin sonunda boşaltılmaktadır.



Şekil 3. Deney Düzeneği

Pervane sistemi, bu çalışmaya özgü geliştirilmiş çift pervaneli motor sistemini içermektedir. Pleksiglas kutu sisteminin üst kısımlarına motor takılarak pervaneler kayış sistemi ile çalışır hale getirilmiştir. Pervaneler, ayarlanabilir bir sistem (kontrol kutusu) yardımıyla yukarıya ve aşağıya kolayca hareket ettirilerek pervane merkezinden tabana olan mesafe (G) ayarlanabilmektedir. Ayrıca, benzer bir ayarlanabilir sistem, pervanelerin sağa ve sola doğru hareket ettirilebilmesinde de mevcut olup, pervaneler arasındaki mesafe (a_p) bu şekilde ayarlanabilmektedir. Ayrıca sistem alt tarafından bağlı bir mil yardımıyla dönmekte olup, milin ucundaki bağlantı parçalarını değiştirmek suretiyle farklı pervanelerin sistemde kullanılmasına olanak sağlamaktadır (Şekil 4).



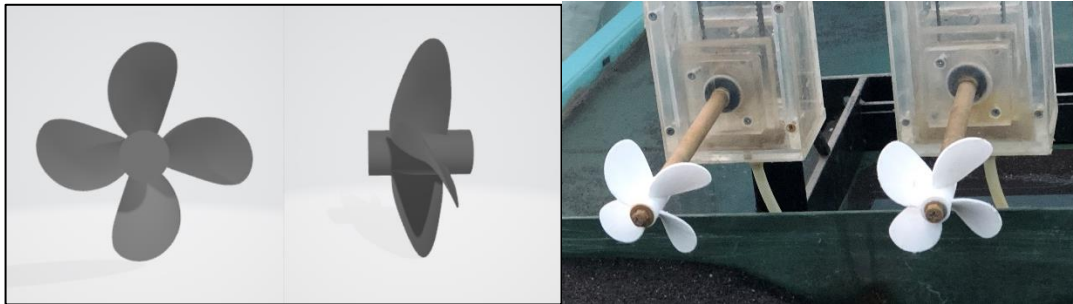
Şekil 4. Çift Pervane Sistemi

Deney çalışmalarında PLA (Polilaktik asit) malzemesi kullanılarak üç boyutlu yazıcı ile üretilen 10 cm çapa sahip pervaneler kullanılmıştır (Şekil 5).

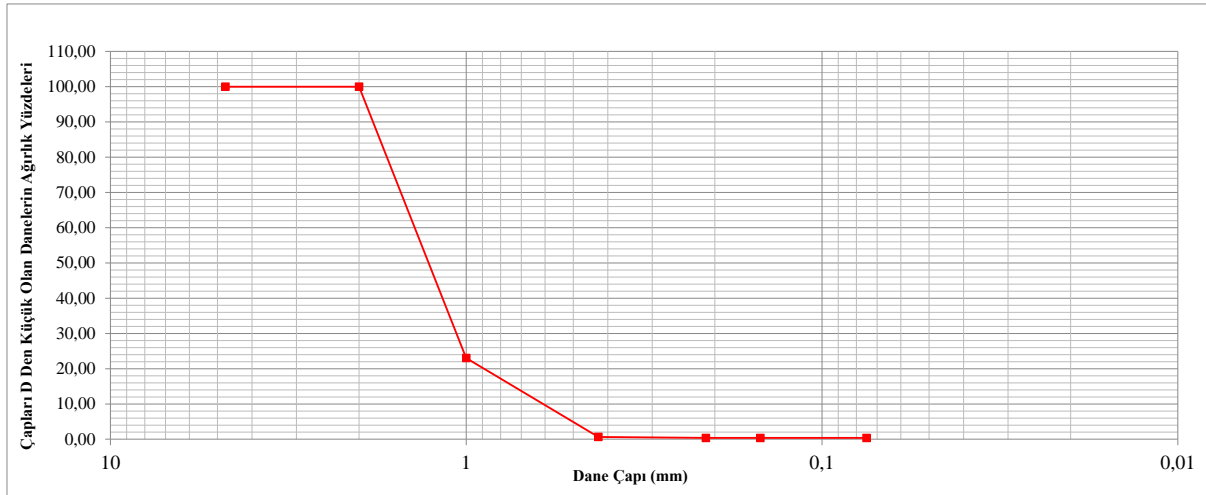
Pervanelerin çalışma hızı 30 Hertz ve 40 Hertz olarak ayarlanarak, yaklaşık 355 rpm ve 470 rpm dönüş hızları elde edilmiştir. Pervane özellikleri ise Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Pervane Özellikleri

Pervane çapı	10 cm
Pervane tipi	Wageningen B serisi
Kanat sayısı (N)	4
Hatve (P)	140 mm
Hatve/çap oranı	1,4
Pervanelerin taradığı alan (A_E)	52 cm ²
Pervane disk alanı (A_0)	78,54 cm ²
Kanat alanı oranı (BAR)	0,7
C_T (Pervane itme katsayısı)	0,61

**Şekil 5.** Çalışmada Kullanılan 4 Kanatlı Pervane Modeli

Deneylerde kullanılan malzemeye ait granülometri eğrisini belirlemek için İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Geoteknik Laboratuvarı'nda elek analizi yapılmıştır (Şekil 6). Elek sonucunda malzemenin %50'sinin geçtiği elek çapının (d_{50}) 1,2 mm, uniformluk katsısının (σ_g) 1,5 mm, malzemenin %16'sının geçtiği elek çapının (d_{16}) 0,8 mm ve malzemenin %84'ünün geçtiği elek çapının (d_{84}) 1,8 mm olduğu tespit edilmiştir (Tablo 3).

**Şekil 6.** Granülometri Eğrisi**Tablo 3.** Malzeme Dane Büyüklüğüne Uniformluk Katsayısı

d_{16} (mm)	d_{50} (mm)	d_{84} (mm)	$\sigma_g = (d_{84}/d_{16})^{1/2}$
0,8	1,2	1,8	1,5

2.1. Deney Metodolojisi

Literatürde çift pervane kullanarak pervaneler arasındaki mesafeye odaklanan çalışma yok denecek kadar azdır. Bu yüzden çalışma kapsamında pervaneler arası mesafenin oyulmaya etkisi detaylı olarak ele alınmıştır. Çift pervane jetin oyulmaya etkisini anlamak amacıyla toplamda 16 adet deney gerçekleştirilmiştir. Bu

deneylerde su seviyesi 70 cm, pervane çapı $D_p=10$ cm, pervane ile taban arasındaki mesafe (G) 10 cm ve 15 cm, pervaneler arası mesafe (a_p) $2D_p$ ve $3D_p$, dönüş hızı 30 hertz (~ 355 rpm) ve 40 hertz (~ 470 rpm) olarak belirlenmiştir.

Tabanda meydana gelen değişimlerin ölçülmesi için deney kanalının üzerinde kanal boyunca hareket eden raylı sistem yer almaktadır. Raylı sistemin üzerindeki limnometre ile pervanelerin ortasından (pervanelerin merkezinden) ölçüm yapılabilmektedir. Her deneyin sonunda oyulma profil oluşumları denge aşamasına geldiklerinde 1 cm ara ile yaklaşık 120-130 noktada limnometre kullanılarak ölçüm yapılmıştır. Pervaneler dönmeye başladıktan sonra oyulma profilleri belli bir süre içerisinde dengeye ulaşmaktadır (Şekil 7).



Şekil 7. Pervaneler Dönmeye Başladıktan Sonra Oyulma ve Yığılma Bölgelerinin Oluşumu

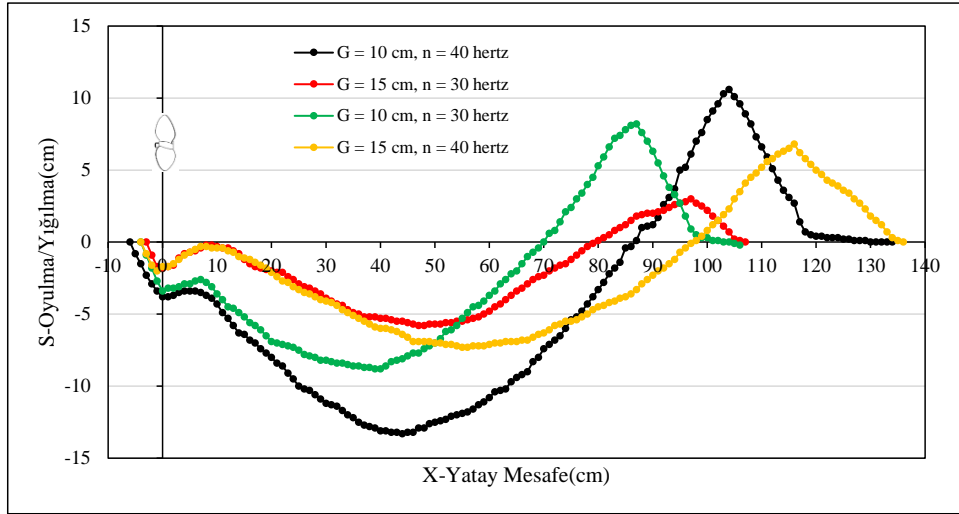
3. Bulgular ve Tartışma

Deneyler için öncelikle kum taban düzeltilerek her noktanın aynı seviyede olması sağlanmıştır. Oyulma öncesi ve sonrası ölçümler limnometre ile alınmış, deney koşullarına göre deneylerden önce pervanenin tabandan yüksekliği (G), pervaneler arası mesafe (a_p) ve dönüş hızı (n) ayarlanmıştır.

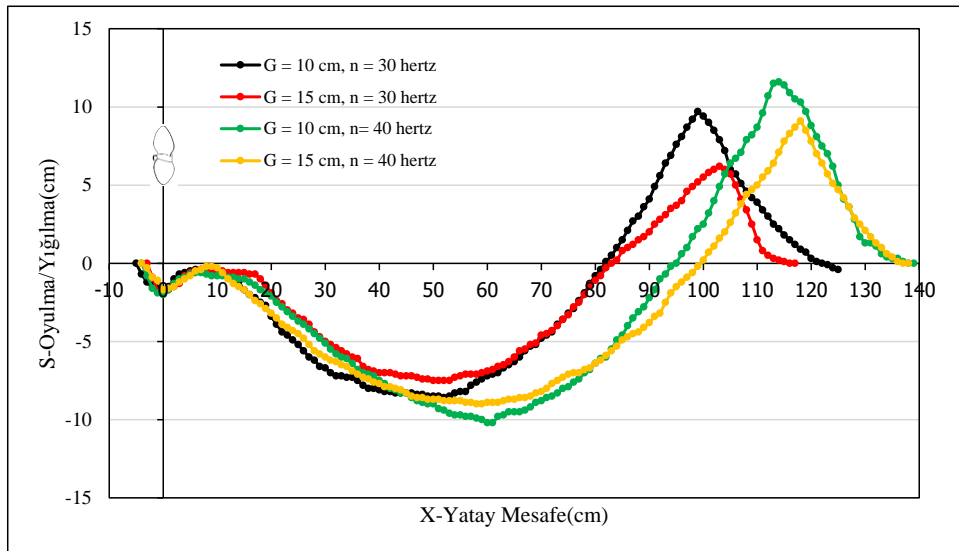
Pervane ile taban arasındaki mesafe (G) 10 cm ve 15 cm, dönüş hızı (n) 30 hertz (~ 355 rpm) ve 40 hertz (~ 470 rpm), pervaneler arası mesafe (a_p) $2D_p$ ve $3D_p$ olarak ayarlanmıştır. Bu koşullarda gerçekleştirilen deney sonuçlarında maksimum oyulmaya (S_{max}), maksimum yığılmaya (h_r), maksimum oyulmanın pervaneden uzaklığına (X_{max}), maksimum yığılmanın pervaneden uzaklığına (X_c), oyulma çukurunun genişliğine ve uzunluğuna dikkat edilmiştir (Tablo 4). Ayrıca deneylerden elde edilen oyulma profillerinin karşılaştırması yapılmıştır (Şekil 8, Şekil 9, Şekil 10).

Tablo 4. Deney Sonuçları

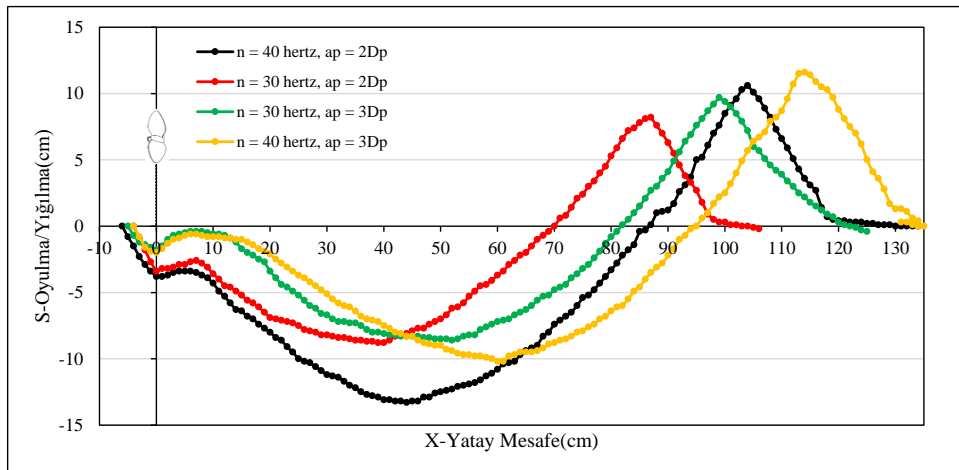
G (cm)	n (hertz)	a_p	S_{max} (cm)	h_r (cm)	X_{max} (cm)	X_c (cm)	B_{smax} (cm)	L_{smax} (cm)
10	40	$2D_p$	13,3	10,6	40	100	96	95
15	30	$2D_p$	5,8	3	40	90	70	90
10	30	$2D_p$	8,8	8,2	33	81	83	90
15	40	$2D_p$	7,3	6,8	49	110	92	109
10	30	$3D_p$	8,6	9,7	47	94	70	91
15	30	$3D_p$	7,5	6,2	43	96	70,5	94
10	40	$3D_p$	10,2	11,6	54	108	81,5	104
15	40	$3D_p$	9	9,1	40	110	83	105
10	40	$2D_p$	13,3	10,6	40	100	96	95
10	30	$2D_p$	8,8	8,2	33	81	83	90
10	30	$3D_p$	8,6	9,7	47	94	70	91
10	40	$3D_p$	10,2	9,1	50	110	81,5	104



Şekil 8. Pervaneler Arası Mesafenin (a_p) $2D_p$ Olduğu Durumlarda Oluşan Oyulma Profilleri



Şekil 9. Pervaneler Arası Mesafenin (a_p) $3D_p$ Olduğu Durumlarda Oluşan Oyulma Profilleri

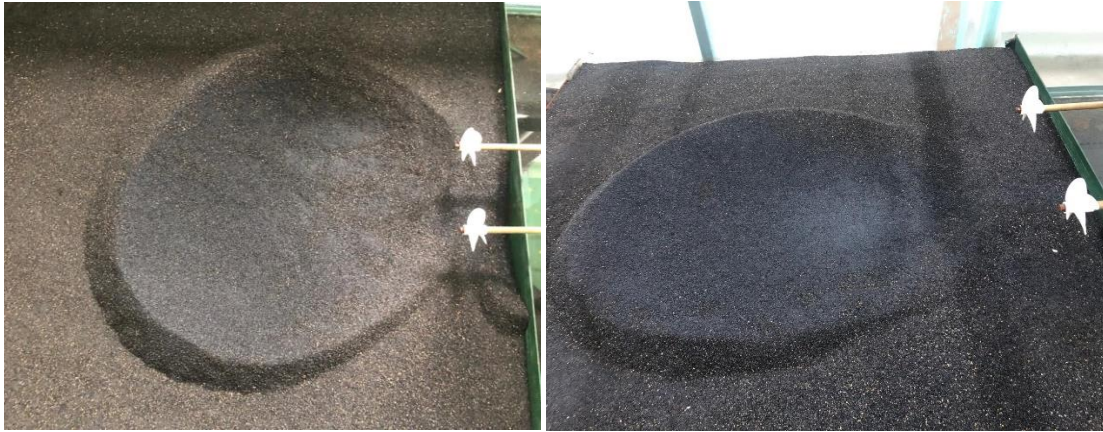


Şekil 10. Pervane ile Taban Arasındaki Mesafenin (G) 10 Cm Olduğu Durumlarda Oluşan Oyulma Profilleri

Pervaneler arası mesafenin oyulmaya etkisini anlamak amacıyla aynı koşullar altında gerçekleştirilen deneylerin oyulma çukurları Şekil 11’de verilmiştir. Görüldüğü üzere pervanelerin altında küçük oyulma çukuru, küçük oyulma çukurunun mansabında birincil oyulma çukuru ve birincil oyulma çukurunun mansabında yığılma tepesi oluşmuştur.

Çift pervane ile yapılan çalışmada dönüş hızının (n) artmasıyla maksimum oyulmanın da arttığı anlaşılmıştır [15]. Mevcut çalışmada yapılan deneylerde dönüş hızının oyulmaya etkisine bakıldığında, dönüş hızının artmasıyla maksimum oyulmanın arttığı sonucuna varılmıştır.

Dairesel jet etrafındaki oyulmanın incelenmesi için yapılan çalışmada pervane ile taban arasındaki mesafenin artmasıyla (G) maksimum oyulmanın azaldığı belirtilmiştir [6]. Pervane ile taban arasındaki mesafenin oyulmaya etkisine bakıldığında, pervane ile taban arasındaki mesafenin artmasıyla maksimum oyulmanın azaldığı görülmüştür.



Şekil 11. Aynı Koşullar Altında Pervaneler Arası Mesafenin (a_p) $2D_p$ ve $3D_p$ Olduğu Durumlarda Oluşan Oyulma Çukurları

4. Sonuçlar

Çift pervane etkisinin oyulmaya ve yığılmaya etkisinin incelenmesi maksadıyla farklı koşullar ile deneyler gerçekleştirilmiş ve farklılıkların ortaya çıkartılması hedeflenmiştir. Mevcut çalışmada dönüş hızının (n) maksimum oyulma ile doğru orantılı, pervane ile taban arasındaki mesafenin (G) ise maksimum oyulma ile ters orantılı olduğu sonucuna varılmış ve sonuçların literatür ile uyumlu olduğu anlaşılmıştır.

Gerçekleştirilen çalışmada pervaneler arası mesafe (a_p) hariç aynı koşullarda gerçekleştirilen iki deneyin oyulma profili karşılaştırıldığında, pervaneler arası mesafenin artmasıyla maksimum oyulmanın azaldığı görülmüştür. Pervaneler arası mesafe (a_p) $2D_p$ ve $3D_p$ seçilerek gerçekleştirilen deneylerin sonuçlarında oyulma çukurlarının tek çukur şeklinde olduğu ve simetrik olduğu tespit edilmiştir. Aynı zamanda, pervaneler arası açıklığın oyulma çukurunun geometrisi üzerinde de etkili olduğu anlaşılmıştır. Dikkate alınan pervaneler arası açıklıklar için geometrik olarak farklılar olsa da oyulma çukurlarının genel hatlarıyla tek pervane oyulma çukurlarıyla benzerlik taşıdığı gözlenmiştir. Bu durumdan dolayı, daha büyük pervaneler arası açıklık için oyulma çukurlarının nasıl olacağı ile ilgili çalışmaların yapılması önerilmektedir. Ayrıca, çift pervane jet etkisinde oyulmanın daha iyi anlaşılabilmesi için farklı pervane çaplarının kullanımı ve yapı ile sınırlandırılmış durumlar için de deneysel ve numerik çalışmaların yapılması tavsiye edilmektedir.

Kaynakça

- [1] G. P. Tsinker, *Marine Structures Engineering: Specialized Applications*, Chapman and Hallan International Thomson Publishing Company, New York, 1995.
- [2] B. Westrich and H. Kobus, "Erosion of a uniform sand bed by continuous and pulsating jets," 1973.

- [3] H. Kobus, P. Leister, and B. Westrich, "Flow field and scouring effects of steady and pulsating jets impinging on a movable bed," *Journal of Hydraulic Research*, vol. 17, no. 3, pp. 175-192, 1979.
- [4] D. P. J. Stewart, "Characteristics of a ships screw wash and the influence of Quay wall proximity," Ph.D. dissertation, Queen's University of Belfast, 1992.
- [5] G. A. Hamill and J. A. McGarvey, "Designing for propeller action in harbours," in *Coastal Engineering 1996*, pp. 4451-4463.
- [6] Y. M. Chiew and S. Y. Lim, "Local scour by a deeply submerged horizontal circular jet," *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 122, no. 9, pp. 529-532, 1996.
- [7] A. Yüksel, Y. Çelikoğlu, E. Çevik, and Y. Yüksel, "Jet scour around vertical piles and pile groups," *Ocean Engineering*, vol. 32, no. 3-4, pp. 349-362, 2005.
- [8] A. Yüksel, "Batık duvar jeti etkisinde kazık ve taban etkileşiminin modellenmesi," Ph.D. dissertation, Yıldız Technical University, 2007.
- [9] J. H. Hong, Y. M. Chiew, and N. S. Cheng, "Scour caused by a propeller jet," *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 139, no. 9, pp. 1003-1012, 2013.
- [10] R. İ. Tan, "Propeller jet induced erosion around pile supported berth structures," Ph.D. dissertation, Istanbul Technical University, 2019.
- [11] N. Penna, F. D'Alessandro, R. Gaudio, and G. R. Tomasicchio, "Three dimensional analysis of local scouring induced by a rotating ship propeller," *Ocean Engineering*, vol. 188, p. 106294, 2019.
- [12] R. Qurraïn, "Influence of the sea bed geometry and berth geometry on the hydrodynamics of the wash from a ship propeller," Ph.D. dissertation, Queen's University of Belfast, 1994.
- [13] G. A. Hamill, H. T. Johnston, and D. P. Stewart, "Propeller wash scour near quay walls," *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, vol. 125, no. 4, pp. 170-175, 1999.
- [14] M. Wei and Y. M. Chiew, "Influence of toe clearance on propeller scour around an open-type quay," *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 143, no. 7, p. 04017012, 2017.
- [15] Yew, W. T., Hashim, R., Ng, K. C., (2017). "Experimental Investigation of Scour Induced by Twin-Propeller Wash", *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 143 (4): 04017006.
- [16] A. Mujal-Colilles, X. Gironella, A. J. C. Crespo, and A. Sanchez-Arcilla, "Study of the bed velocity induced by twin propellers," *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, vol. 143, no. 5, p. 04017013, 2017.
- [17] Y. Cui, W. H. Lam, Z. C. Ong, L. Ling, C. L. Siow, D. Robinson, and G. Hamill, "Experimental scours by impinging twin-propeller jets at quay wall," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 8, no. 11, p. 872, 2020.
- [18] T. Llull, A. Mujal-Colilles, and X. Gironella, "Twin propeller time-dependent scouring processes. Physical experiments," *Ocean Engineering*, vol. 236, p. 109461, 2021.
- [19] G. Curulli, T. Llull, N. Penna, A. Mujal-Colilles, X. Gironella, A. Sanchez-Arcilla, and R. Gaudio, "Relationship between eroded volume and main scour hole dimensions near quay walls caused by internal counter-rotating twin-propellers," *Ocean Engineering*, vol. 259, p. 111744, 2022.
- [20] G. A. Hamill, "Characteristics of the Screw Wash of Manoeuvring Ship and the Resulting Bed Scour," Ph.D. dissertation, Queen's University of Belfast, Northern Ireland, UK, 1987.
- [21] R. İ. Tan and Y. Yüksel, "Seabed scour induced by a propeller jet," *Ocean Engineering*, vol. 160, pp. 132-142, 2018.