

Laboratory study of the impact of changing sea wave behavior on scour depth at coastal protection structures

Mohammad Rostami^{1*}, Akbar Kiasalari² and Mohammad Reza Gharibreza³

¹ Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

² Ph.D. in Hydraulic Structures, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

³ Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

Received: 09 April 2025

Accepted: 22 June 2025

Extended abstract

Introduction

The construction of various structures for coastal protection is one of the strategies for dissipating wave energy in coastal areas. Permeable and floating protective structures are among the new coastal protection designs proposed to address the shortcomings of previous structures. In the design and construction of such structures, piles and pipes are used as their foundations. Evaluating the pattern and extent of erosion around piles caused by wave interaction is essential for designing such structures. Therefore, in addition to structural design, hydrodynamic loading on the coastal protection structure and its foundation due to wave impact must be considered as a key criterion for foundation design in shallow waters. In coastal areas, waves undergo various processes such as wave refraction, wave shoaling, and wave breaking, which result from nonlinear interactions with the seabed. Moreover, energy transfer between different wave frequency components during the breaking process is highly nonlinear. Understanding the hydrodynamics involved is considerably more complex compared to breaking waves in deep waters. This complexity becomes particularly significant when wave breaking occurs exactly at the pile foundation, as the stability of permeable coastal structures depends on the stability of their foundations against erosion caused by marine currents.

Materials and methods

To evaluate the scour depth around cylindrical piles of coastal protection structures under impact pressure caused by wave breaking, an experimental study was designed. The experiment aimed to analyze how variations in wave characteristics such as wave height and period affect the research objectives. It is important to note that this study focused on breaking waves impacting the structure. The experiments were conducted in a two-dimensional wave channel at the Coastal Engineering Laboratory of the Soil Conservation and Watershed Management Research Institute. To create shallow water conditions and ensure wave breaking at the pile location, as well as to assess the resulting scour depth, a sloped surface and sediment reservoir were constructed in the central part of the main channel. The sediment reservoir, with a depth of 0.35 meters, was installed upstream of the sloped surface and filled with sand sediments. A cylindrical pile was placed at the center of the sediment reservoir. The wave channel was filled with water to a depth of 0.4 to 0.5 meters, and waves with varying heights and periods were generated using a wave paddle system. Trial and error was used to determine the exact location of wave breaking in relation to the pile. A total of 34 experiments were conducted under initial water depths ranging from 0.4 to 0.5 meters. Wave heights ranged from 0.05 to 0.14 meters, with wave periods between 2 to 7 seconds. After each experiment, the scour depth at the pile location was measured.

Results and discussion

In this study, wave characteristics, including wave height, breaking wave velocity, wavelength at the breaking point, breaker crest distance from the structure, and water depth at the breaking zone, as well as the maximum scour depth (S), were measured. Based on the measured values, the Keulegan–Carpenter number (KC) and the S/D ratio were determined. The results showed that as the KC number increases, the S/D ratio and scour depth also increase. Specifically, with increasing KC , the length of lateral vortices along the sides and behind the base of the cylindrical structure extends, exposing a larger portion of the seabed to

* Corresponding author: m_rostami@areeo.ac.ir

scour and erosion. A regression analysis was established between these parameters, and the findings were compared with previous studies. A comparison of 34 experiments in the present study with the results of Sumer et al. (1992) indicated that the scour depth under wave-breaking conditions near the coastal protection structure was approximately 1.14 to 8.46 times greater than the scour depth caused by regular waves passing through the structure's vicinity. On average, the scour depth due to wave breaking at the pile location was 2.4 times greater than that under normal wave conditions (Sumer et al., 1992). Additionally, comparing the results of this study with Dogan (2021) revealed that the scour depth under wave-breaking conditions near the coastal protection structure was approximately 1.31 to 2.85 times greater than the scour depth caused by regular waves. On average, the scour depth due to wave breaking at the pile location was 2.03 times greater than under normal wave conditions (Dogan, 2021).

Conclusions

In general, when coastal currents interact with waves, if the waves do not break, the depth of scour decreases. However, if the wave in question propagates in the direction of the coastal current and breaks, the increased turbulence and resulting shear stress near the seabed at the breaking zone lead to an increase in scour depth. If wave breaking occurs at the site of the coastal structure, the extent of erosion and scour will exceed the values reported in previous studies. The results of the present study indicate that wave breaking causes approximately a 2.4-fold increase in scour depth compared to the passage of regular, non-breaking sea waves around a cylindrical pile structure. Therefore, marine structure designers must carefully consider this issue. An inaccurate estimation of the scour depth at the foundation of coastal protection structures based solely on the theory of regular wave passage near a cylindrical pile may lead to incorrect foundation depth calculations, affecting the overall stability of the structure. If the findings of this study are not taken into account, instability conditions could arise for the marine structure, especially when wave breaking occurs near the foundation.

Keywords: Cylindrical pile, Keulegan–Carpenter number, Pile, Scour depth, Wave break

Cite this article: Rostami, M., Kiasalari, A., Gharibreza, M.R., 2026. Laboratory study of the impact of changing sea wave behavior on scour depth at coastal protection structures. *Watershed. Water. Eng. Manag.* 18(2), 170-184.

© 2026, The Author(s). Published by Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)



مطالعه آزمایشگاهی تأثیر تغییر رفتار موج دریا بر عمق فرسایش در محل سازه‌های حفاظت سواحل

محمد رستمی^{۱*}، اکبر کیاسالاری^۲ و محمدرضا غریب‌رضا^۳

^۱ استادیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

^۲ دکتری سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

^۳ دانشیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۰۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۰

چکیده مبسوط

مقدمه

احداث سازه‌های متنوع به منظور حفاظت از سواحل یکی از راهکارهای ائتلاف انرژی موج در ناحیه ساحلی است. سازه‌های حفاظتی نفوذپذیر و شناور از جمله سازه‌های جدید حفاظت سواحل محسوب می‌شوند که در راستای کاهش مشکلات سازه‌های پیشین پیشنهاد شده است. در طراحی و احداث این گونه سازه‌ها در سواحل از لوله‌ها و شمع‌ها به عنوان شالوده اصلی استفاده می‌شود. ارزیابی الگو و میزان فرسایش در اطراف شمع‌ها ناشی از برخورد امواج از ملزومات طراحی این سازه‌ها محسوب می‌شود. بنابراین، در کنار طراحی سازه‌های می‌بایست مطالعه بارگذاری ناشی از برخورد امواج در آب کم‌عمق به سازه حفاظت ساحل به عنوان معیاری کلیدی برای طراحی شالوده آنها انجام شود. در سواحل، امواج دستخوش فرایندهای گوناگون همچون پیچش موج، پشته کردن موج و شکست می‌شوند که ناشی از برهم‌کنش غیرخطی آنها با بستر دریا است. علاوه بر این، انتقال انرژی بین مؤلفه‌های مختلف فرکانس موج حین فرایند شکست بسیار غیرخطی است. بنابراین، فهم هیدرودینامیک مربوطه در مقایسه با امواج‌شکنا در آب عمیق بسیار پیچیده است. پیچیدگی این پدیده زمانی حایز اهمیت خواهد بود که شکست امواج دقیقاً در موقعیت شالوده شمع‌ها صورت گیرد. چراکه پایداری سازه‌های حفاظتی نفوذپذیر منوط به پایداری شالوده آنها در مقابل فرسایش ناشی از عبور جریان‌های دریایی است.

مواد و روش‌ها

به منظور ارزیابی میزان عمق فرسایش پیرامون شمع‌های استوانه‌ای سازه‌های حفاظت سواحل در برابر فشار ضربه‌ای ناشی از شکست موج در ساحل یک مطالعه آزمایشگاهی طراحی و در نظر گرفته شده است تا بر اساس تغییر در مشخصه‌های موج شامل ارتفاع و تناوب موج به اهداف تحقیق دست یافت. لازم به توضیح است که پژوهش حاضر متمرکز بر موج در حال شکست است که در حین شکست به سازه برخورد می‌کند. در این پژوهش از کانال دو بعدی موج آزمایشگاه بخش مهندسی سواحل پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری استفاده شد. به منظور ایجاد شرایط آب کم‌عمق و رخداد شکست در محل شمع و همچنین ارزیابی میزان عمق فرسایش ناشی از آن، یک سطح شیب‌دار و مخزن رسوب در بخش میانی کانال اصلی ساخته شد. مخزن رسوب به عمق ۰/۳۵ متر در بالادست سطح شیب‌دار فلزی نصب و با رسوبات ماسه پر شد. یک شمع استوانه‌ای پلی‌کربناتی در وسط مخزن رسوب قرار داده شد. کانال آزمایشگاهی تا عمق ۰/۴ تا ۰/۵ متر

آبگیری شد و امواجی با ارتفاع و دوره تناوب متفاوت توسط دستگاه مولد موج تولید شد. سپس با سعی و خطا محل دقیق شکست موج و موقعیت شمع نسبت به آن مشخص شد. پس از آن ۳۴ آزمایش در کانال موج در شرایط عمق آب اولیه ۰/۴ تا ۰/۵ متر انجام شد. با استفاده از دستگاه مولد موج، امواجی با ارتفاع ۰/۰۵ تا ۰/۱۴ متر و دوره تناوب (پریود) دو تا هفت ثانیه تولید شد. پس از پایان هر آزمایش، میزان عمق فرسایش در محل شمع تصویربرداری و اندازه گیری شد.

نتایج و بحث

در این پژوهش، مشخصات موج (شامل ارتفاع و سرعت موج در حال شکست، طول موج در ناحیه شکست، فاصله تاج شکست تا سازه، عمق آب در ناحیه شکست) و همچنین حداکثر عمق فرسایش (S) اندازه گیری شد. بر اساس مقادیر اندازه گیری شده پارامترهای مورد نظر و قطر شمع استوانه‌ای (D)، عدد موج (KC) و نسبت S/D تعیین شد. نتایج نشان داد با افزایش عدد موج، نسبت S/D و در نتیجه فرسایش افزایش یافته است. به عبارتی، با افزایش KC طول گردابه‌های جانبی در کناره و پشت پایه سازه استوانه‌ای افزایش می‌یابد و طول بیشتری از بستر در معرض آبشستگی و فرسایش قرار می‌گیرد. رابطه رگرسیونی بین پارامترهای مذکور برقرار بود و نتایج نشان داد که عمق فرسایش در شرایط شکست امواج در محدوده سازه حفاظت ساحل حدود ۱/۱۴ تا ۸/۴۶ برابر عمق فرسایش حاصل از عبور موج عادی از محدوده سازه است. به‌طور متوسط میزان فرسایش ناشی از شکست موج در محل استقرار پایه استوانه‌ای نسبت به شرایط عبور موج عادی حدود ۲/۴ برابر است. نتایج نشان داد که عمق فرسایش در شرایط شکست امواج در محدوده سازه حفاظت ساحل حدود ۱/۳۱ تا ۲/۸۵ برابر عمق فرسایش حاصل از عبور موج عادی از محدوده سازه است. به‌طور متوسط، میزان فرسایش ناشی از شکست موج در محل استقرار پایه استوانه‌ای نسبت به شرایط عبور موج عادی حدود ۲/۰۳ برابر است.

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی در ترکیب جریان ساحلی با امواج، چنانچه امواج شکسته نشوند، عمق آبشستگی کاهش خواهد یافت. این در حالی است که چنانچه موج مورد نظر در راستای جریان ساحلی بوده و شکسته شود، به علت افزایش اغتشاش و تنش برشی حاصله در نزدیکی بستر منطقه شکست، عمق آبشستگی افزایش می‌یابد. در صورتی که شکست امواج در محل سازه ساحلی رخ دهد، میزان فرسایش و آبشستگی بیش از مقدار تعیین شده توسط تحقیقات قبلی خواهد بود. جمع‌بندی نتایج پژوهش حاضر نشان داد که شکست موج موجب افزایش حدود ۲/۴ برابری میزان عمق فرسایش و آبشستگی نسبت به عبور موج عادی و ناشکنای دریایی از اطراف یک سازه شمع استوانه‌ای می‌شود. بنابراین طراحان سازه‌های دریایی می‌بایست به این مسأله توجه نمایند که برآورد ناصحیح میزان عمق آبشستگی پایه سازه‌های حفاظت ساحل بر اساس تئوری عبور موج عادی ناشکنا از اطراف شمع استوانه‌ای، منجر به تعیین نادرست عمق پی و شالوده سازه خواهد شد. در صورت عدم توجه به نتایج این پژوهش، شرایط ناپایداری برای سازه دریایی در مواجهه با امواج شکسته شده در نزدیکی سازه به‌وجود خواهد آمد.

واژه‌های کلیدی: شکست موج، شمع، شمع استوانه‌ای، عدد موج، عمق آبشستگی

مقدمه

شکن‌های صندوقه‌ای، موج شکن های مرکب و موج شکن های نفوذپذیر اشاره نمود.

با توجه به امتداد طولی موج شکن‌ها، حجم مصالح به‌کار رفته در آنها بسیار زیاد بوده و در نتیجه در سال‌های اخیر روش‌های ابداعی جدیدی برای کاهش هزینه و کم‌کردن اثرات زیست محیطی و اکوسیستمی محیط دریا به‌کار گرفته شده است. سازه‌های حفاظتی نفوذپذیر و شناور از جمله سازه‌های جدید حفاظت

احداث سازه‌های متنوع به‌منظور حفاظت از سواحل، یکی از راهکارهای اتلاف انرژی موج در ناحیه ساحلی می‌باشد. تنوع سازه‌های حفاظتی بسیار گسترده بوده و شامل سازه‌هایی نظیر دایک‌های ساحلی، پوشش‌های حفاظتی، سدهای ساحلی، آبشکن‌ها، تیغه‌های ساحلی و موج شکن‌ها می‌باشد. موج شکن‌ها نیز خود انواع متنوعی دارند که می‌توان به موج شکن‌های سنگی، موج

توسط دیگر محققین به منظور اصلاح فرمول موریسون برای شرایط مختلف شکست امواج در آب‌های ساحلی به صورت تحلیلی، عددی و آزمایشگاهی صورت گرفته است. Swift (1989) به روش تحلیلی به برآورد نیروهای موج‌شکنای آشفته وارد بر استوانه‌های واقع در سواحل شیب‌دار پرداخت. غلبه نیروهای اینرسی بر نیروی درگ، ناشی از شتاب‌های انتقالی زیاد در بدنه موج، از نتایج تحقیقات ایشان بوده و تنها برای تعیین نیروهای وارد بر استوانه‌های با قطر کوچک معتبر است.

Wienke et al., (2001) فرمول تئوری برای بارهای ضربه‌ای موج وارد بر استوانه‌های دایره‌ای لاغر و کاربرد آن برای سازه‌های نگهبان توربین‌های بادی را ارائه نمودند. Irschik et al., (2005) بارگذاری امواج شکننا در شمع‌های لاغر در آب‌های کم‌عمق را به صورت آزمایشگاهی پژوهش نمودند. در این پژوهش ضریب خزش λ برای شرایط آب‌های کم‌عمق برآورد شد. به کمک مولفه دینامیکی می‌توان نیروی ضربه و واکنش استوانه به برخورد توده آب را برآورد نمود.

Wienke and Oumaraci, (2005) به روش تئوری و آزمایشگاهی بزرگ مقیاس، نیروی ضربه امواج شکننا وارد بر یک شمع استوانه‌ای لاغر را به دست آوردند. ایشان فشار ضربه به کمک پخش‌شدگی شعاعی اطراف اولین نقطه برخورد را تعیین نمودند. نتایج این پژوهش نشان داد که نیروی ضربه به شدت به فاصله بین موقعیت شکست و استوانه وابسته است. ضریب خزش λ به زاویه انحراف سیلندر و زاویه انحراف پیشانی موج بستگی دارد. ضربه وارد بر استوانه با هوای محبوس شده فروکش می‌کند. Mayilvahanan et al., (2012) نیروهای ضربه‌ای موج وارد بر سازه‌های توربین بادی فراساحل را بررسی نمودند. نتایج آنها نشان داد که به دلیل پیچیدگی و طبیعت ناپایدار نیروهای ضربه، نیاز به پژوهش بیشتری در مورد ویژگی‌های فیزیکی امواج شکننا و واکنش سازه وجود دارد.

Manjula et al., (2015) رفتار استوانه عمودی لاغر تحت امواج شکننا را به صورت آزمایشگاهی بررسی نمودند. آنها برای طبقه‌بندی امواج، دو عامل فاصله نقطه شکست از پیشانی شمع و نوع شکست را مطرح نمودند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که شتاب و خمش برای شکست‌های چرخان متوسط و شدید بیشینه بود.

سواحل محسوب می‌شوند که در راستای کاهش مشکلات سازه‌های پیشین پیشنهاد شده‌اند. در طراحی واحداث این گونه سازه‌ها در سواحل از لوله‌ها و شمع‌ها به عنوان شالوده آنها استفاده می‌شود. شمع‌های استوانه‌ای کاربرد وسیعی در اجرای موج شکن‌های مشبک و پایه اسکله‌ها، توربین‌های بادی، سکوها نفتی و دکل‌های نفتی دارند (Morison et al., 1950). ارزیابی الگو و میزان فرسایش در اطراف شمع‌ها ناشی از برخورد امواج، از ملزومات طراحی این گونه سازه‌ها به شمار می‌آید. بنابراین، در کنار طراحی سازه‌ای، می‌بایست پژوهش بارگذاری ناشی از برخورد امواج در آب کم‌عمق به سازه حفاظت ساحل، به عنوان معیاری کلیدی برای طراحی شالوده آنها انجام شود (Sumer et al., 1992).

در سواحل، امواج دستخوش فرایندهای گوناگون همچون پیچش موج، پشته‌کردن موج و شکست که ناشی از برهم‌کنش غیرخطی آنها با بستر دریا است. علاوه بر این، انتقال انرژی بین مؤلفه‌های مختلف فرکانس موج در حین فرایند شکست، بسیار غیرخطی است. بنابراین، فهم هیدرودینامیک مربوطه در مقایسه با امواج شکننا در آب عمیق بسیار پیچیده‌تر است. پیچیدگی این پدیده زمانی حایز اهمیت خواهد بود که در موقعیت شالوده شمع‌های سازه حفاظت ساحل صورت گیرد. چراکه پایداری سازه‌های حفاظتی نفوذپذیر، وابسته به پایداری شالوده آنها در برابر فرسایش ناشی از عبور جریان‌های دریایی است.

در عمل، بارهای ضربه‌ای ناشی از شکست موج، عموماً بسیار بیشتر از نیروهای شبه‌استاتیکی هستند. نیروی برخورد، توسط یک نیروی ضربه‌ای کوتاه مدت مشخص می‌شود که ویژگی‌های آن وابسته به ویژگی‌های موج، نوع شکست، شیب بستر دریا و شکل سازه است. از آنجایی که بستر دریا نیز ثابت نبوده و رسوبات دائماً در کف در حال حرکت و جابجایی هستند، لذا الگوی تشکیل رسوبات پیرامون شمع‌ها نیز می‌تواند بر پیچیدگی فرایند شکست، به خصوص در آب کم‌عمق اثرگذار باشد (Morison et al., 1950).

معادله مشهور موریسون برای برآورد نیروهای وارد بر شمع در حالت بدون شکست تعیین شده است (Morison et al., 1950). تا به امروز تحقیقات وسیعی

بزرگ باشد، نیروهای درگ تأثیر بیشتری دارند و باعث شکل‌گیری گردابه‌های نعل‌اسبی و گردابه‌های پس‌گرد می‌شوند که آب‌شستگی را در اطراف سازه‌ها تشدید می‌کند. مطالعات نشان داده‌اند که با افزایش KC، عمق آب‌شستگی افزایش می‌یابد، به‌ویژه زمانی که KC از یک آستانه بحرانی عبور کند که در آن جداسازی گردابه‌ها آغاز می‌شود.

Dogan (2021) نیز رابطه اصلاحی (۳) را برای تعیین عمق فرسایش پیرامون شمع‌های باریک با سطح مقطع دایره‌ای شکل در شرایط عبور امواج عادی پیشنهاد نمود.

$$\frac{S}{D} = 1.3 (1 - e^{-0.022(KC-4)}) \quad KC \geq 4 \quad (3)$$

همچنین رابطه دیگری برای شمع‌های باریک و بزرگ با افزودن نسبت L/D (که L طول موج و D قطر شمع) به شکل زیر ارائه نمود که محدودیت روابط قبلی را نداشت.

$$\frac{S}{D} = 0.0037 \frac{KC^{(2/3)}}{\left(\frac{L}{D}\right)^{0.5}} \quad (4)$$

علی‌رغم مطالعات اخیر انجام شده در خصوص آب‌شستگی پیرامون شمع‌های استوانه‌ای در نتیجه عبور امواج، تاکنون بررسی‌های جامعی درباره فرسایش و عمق آب‌شستگی بستر در شرایط امواج شکننا صورت نگرفته است. پژوهش حاضر از جنبه آزمایشگاهی، نوآوری قابل‌توجهی در تعیین عمق آب‌شستگی حاصل از شکست امواج در اطراف شمع‌های استوانه‌ای سازه‌های حفاظت سواحل به‌شمار می‌آید.

مواد و روش‌ها

معرفی مدل آزمایشگاهی: در این پژوهش از کانال موج آزمایشگاه سواحل پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری که دارای طول ۳۳ متر، عرض ۵/۵ متر و ارتفاع ۱/۵ متر است، استفاده شده است. عرض پنج متری کانال در فاصله ۴/۳ متری از پاروی مولد موج به‌وسیله دیواره‌هایی به سه کانال مجزا به عرض دو، یک و دو متر تقسیم شده است.

در انتهای هر کانال و برای به‌حداقل رساندن اثر امواج برگشتی از جاذب‌های موج طبیعی با شیب کمتر از ۱:۸ (۸ افقی به ۱ عمودی) استفاده شده است. در این

Chella (2016) خصوصیات و نیروهای موج‌شکنای وارد بر استوانه‌های لاغر به کمک روش CFD را بررسی نمودند. نتایج این پژوهش نشان داد نیروی موج بیشینه هنگامی رخ می‌دهد که ضربات پیشانی موج‌شکنا درست زیر تاج موج به وقوع به‌پیوندد و نیروی موج کمینه به‌طور کلی هنگامی رخ می‌دهد که شکست موج پشت استوانه اتفاق افتد.

Mayilvahanan et al., (2016) طی یک پژوهش عددی و آزمایشگاهی، برهم‌کنش موج‌شکنا با استوانه عمودی لاغر را توسط مدل عددی REEF3D بررسی کردند. نتایج عددی آنها نشان داد که نیروهای موج‌شکنا و نیم‌رخ‌های سطح آزاد حین برهم‌کنش امواج شکنای چرخان با استوانه عمودی، تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد.

بیشتر تحقیقات پیشین به‌طور جداگانه به‌مطالعه خصوصیات، هندسه و جنبه‌های هیدرودینامیکی شکست موج در آب کم‌عمق به‌صورت تحلیلی، عددی و آزمایشگاهی پرداخته‌اند و کمتر به‌مبحث آب‌شستگی توجه شده است. نخستین روابط توسعه‌یافته در زمینه برآورد عمق آب‌شستگی بستر پیرامون شمع‌ها در نتیجه عبور امواج مربوط به تحقیقات انجام شده توسط Sumer et al., (1992) است. Sumer et al., (1992) رابطه‌های (۱) و (۲) را برای تعیین در اطراف شمع‌های عمودی باریک با سطح مقطع دایره‌ای شکل، در شرایط عبور امواج عادی و منظم ناشکنا ارائه نمودند.

$$\frac{S}{D} = 1.3 (1 - e^{-0.03(KC-6)}) \quad KC \geq 6 \quad (1)$$

$$\frac{S}{D} = 0 \quad KC < 6 \quad (2)$$

در رابطه‌های معرفی شده از عدد KC یا عدد کولگان-کارپنتر^۱ استفاده نمودند. عدد KC یک پارامتر بدون بعد در دینامیک سیالات است که اهمیت نسبی نیروهای اینرسی در مقابل نیروهای درگ را در شرایط جریان نوسانی مشخص می‌کند. این عدد به‌طور خاص در مطالعات آب‌شستگی ناشی از امواج در اطراف شمع‌های عمودی و خطوط لوله کاربرد دارد.

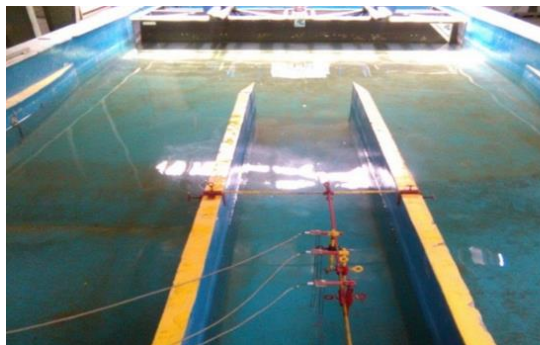
وقتی KC کوچک باشد، نیروهای اینرسی غالب هستند، به این معنی که جریان رفتار تقریباً پتانسیلی دارد و گردابه‌های زیادی تولید نمی‌شوند. وقتی KC

¹ Keulegan-Carpenter

متر و یک بخش افقی به طول $0/5$ متر است (شکل ۲). عرض سازه نیز برابر عرض کانال به میزان یک متر است. ارتفاع سازه در بخش افقی $0/4$ متر است. بر روی این سازه یک صفحه در بخش شیب‌دار و یک صفحه در بخش افقی در نظر گرفته شده است که توسط یک لولا به هم متصل شده‌اند. توسط مصالح بنایی یک مخزن رسوب به طول دو متر پس از سازه شیب‌دار ساخته شد و در داخل آن از مصالح رسوبی به مشخصات ارائه شده در شکل ۳ پر شد. رسوبات مورد استفاده دارای چگالی نسبی ذرات رسوبی برابر $2/6$ و قطر d_{50} برابر $0/2$ میلی‌متر هستند. عمق مخزن رسوب برابر ارتفاع نهایی سازه فلزی شیب‌دار در نظر گرفته شد.

پژوهش، آزمایش‌ها در کانال میانی که دارای عرض یک متر است، انجام شده است. در شکل ۱، جزئیات کانال موج نشان داده شده است. برای تولید موج از دستگاه مولد موج ساخت موسسه هیدرولیک دانمارک (DHI) استفاده شده است.

به منظور ایجاد شرایط آب کم عمق و رخداد شکست در محل شمع و همچنین ارزیابی میزان آب‌شستگی ناشی از آن نیاز به ساخت یک فلوم با سطح شیب‌دار و مخزن رسوب در کانال یک متری است. برای این منظور، سازه فلزی شیب‌دار با شیب متغیر (به منظور تسهیل شرایط رخداد شکست در محل شمع) طراحی و ساخته شد. این سازه دارای یک بخش شیب‌دار به طول $3/5$



الف- کانال آزمایش و تقسیم آن به سه بخش در فاصله $3/4$ متری از پاروی مولد موج



ب- کانال یک متری انجام آزمایش و سازه مستهلک کننده انرژی در انتهای آن

a. Experimental canal and its division into three sections at a distance of $3/4$ m from the wave generator paddle

b. A one-meter canal performing tests and an energy-dissipating structure at its end

شکل ۱- نمایی از کانال، پاروی مولد موج و جذب کننده موج موجود در آزمایشگاه سواحل پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری

Fig. 1. A view of the channel, wave generator paddle, and wave absorber present in the laboratory of the Soil and Water Conservation Research Institute



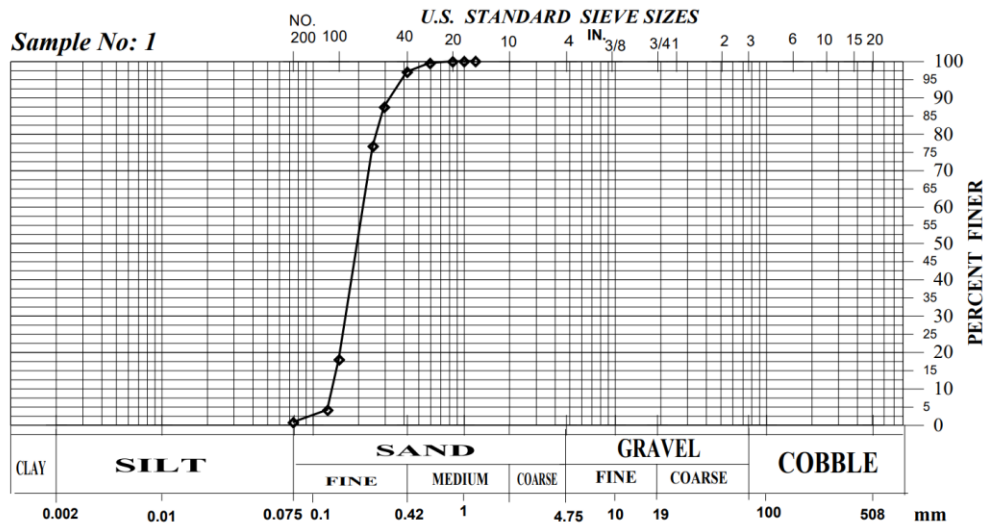
الف- سازه فلزی شیب‌دار
a. Inclined metal structure



ب- مخزن رسوب ایجاد شده در بالادست سطح شیب‌دار فلزی
b. Sediment box located upstream of the inclined metal structure

شکل ۲- نمایی از سازه فلزی ساخته شده برای ایجاد ساحل شیب‌دار در بخش میانی کانال و مخزن رسوب ایجاد شده در بالادست آن

Fig. 2. A view of the constructed inclined metal structure and the sediment box formed upstream



شکل ۳- منحنی دانه‌بندی رسوبات استفاده شده برای انجام آزمایش‌ها
 Fig. 3. The grain size distribution curve of the sediments used in experiments

کاهش یافته است. با انجام آزمایش‌های مجدد، محل دقیق قرارگیری شمع به‌طور تقریبی تعیین شد. سپس، برای جلوگیری از جابجایی شمع در اثر برخورد نیروی امواج، از ابزاری برای مهار و تثبیت آن استفاده شد (شکل ۴). قطر شمع برابر ۱۱/۰ متر بوده و فاصله‌ی آن از سازه فلزی شیب‌دار معادل ۸/۰ متر است.

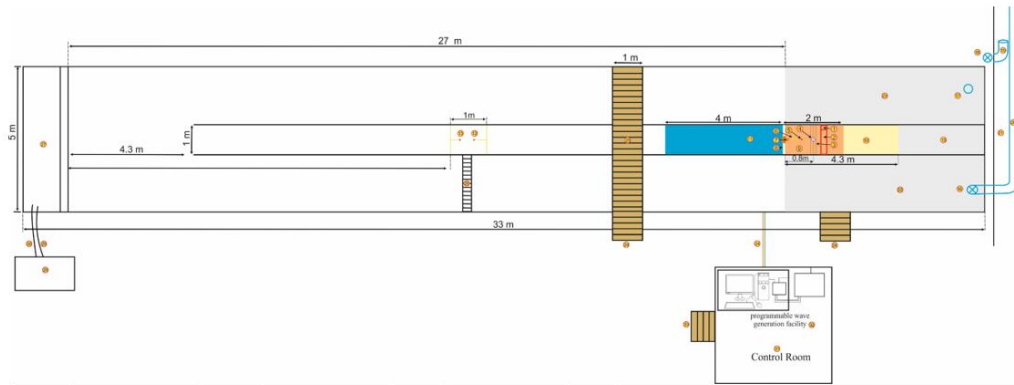
روش انجام آزمایش: به‌منظور تعیین محل تقریبی شکست موج جهت استقرار شمع استوانه‌ای پلی‌کربناتی در مخزن رسوب، ابتدا سطح شیب‌دار کارگذاشته شد. سپس آزمایش‌های مختلف موج با ارتفاع و پریودهای مختلف مورد آزمون قرار گرفت. در مرحله نخست به‌دلیل عدم مشاهده شکست در محل استقرار شمع، ارتفاع سازه فلزی شیب‌دار از ۴۰ به ۳۵ سانتی‌متر



شکل ۴- نصب شمع در داخل مخزن رسوب پس از تعیین محل دقیق شکست موج
 Fig. 4. Installation of the pile inside the sediment tank after determining the exact location of the wave break

شمع و دو سطح‌سنج دیگر در ابتدای کانال نصب شدند. پیش از بهره‌برداری از سطح‌سنج‌ها و نصب آنها در محل، فرایند واسنجی بر روی آنها انجام و سپس مطابق شکل ۵ در مکان‌های تعیین‌شده نصب شدند.

به‌منظور ثبت تغییرات سطح آب و سرعت آب در محل‌های مورد نظر از سه سطح‌سنج و یک سرعت‌سنج اکوستیک دوبعدی استفاده شد. در این پژوهش از سه عدد سطح‌سنج استفاده شد؛ یکی از آنها در مجاورت



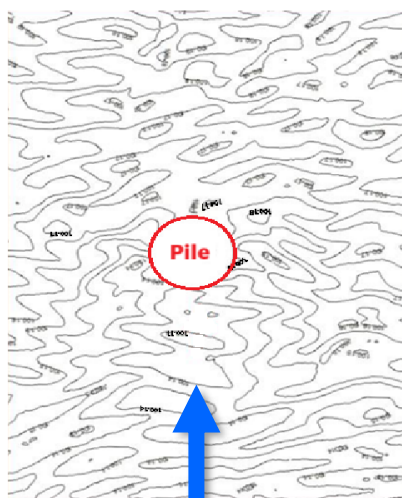
Number	Discription	Number	Discription	Number	Discription	Number	Discription
1	Cammera Pan	8	Support velocity meter	15	Middle wave absorber	22	Right wave absorber
2	Raill box	9	Sediment reservoir	16	Inlet way	23	Left wave absorber
3	Support timber	10	Plaxi glass part	17	outlet way	24	access stairs
4	Pile	11	Incliend part	18	discharge valve	25	access stairs
5	Water level sensor 3	12	Water level sensor 2	19	outlet pipe	26	access ladder to sensor 1 & 2
6	Support Water level sensor 1	13	Water level sensor 1	20	Inlet pipe	27	wave maker
7	Velocity meter	14	Carriage	21	discharge channel	28	power pack
						29	Penumatic device
						30	discharge hose
						31	Control Room
						32	programabel wave generation facility
						33	access stairs
						34	data and power cables
						35	

شکل ۵- پلان کانال آزمایشگاهی و نمایش موقعیت تجهیزات اندازه‌گیری رقوم سطح و سرعت

Fig. 5. Laboratory channel plan and display of the position of level and velocity measuring equipment

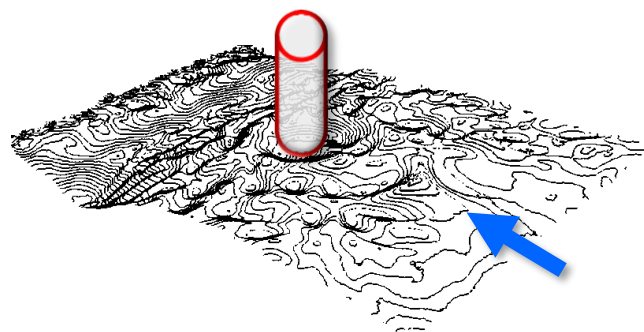
موج شامل عمق آب (h)، زمان تناوب (T) و ارتفاع موج (H) تولید شده توسط پارو، عمق آب (h_b) در محل شکست موج، طول موج (L_b)، سرعت (U_b) و ارتفاع موج (H_b) در حال شکست، فاصله تاج شکست (X_b) تا سازه شمع، و حداکثر عمق فرسایش (S) برای ۳۴ آزمایش اندازه‌گیری شد. آزمایش‌ها در کانال موج در شرایط عمق آب اولیه $0/4$ تا $0/5$ متر انجام شد. با استفاده از دستگاه مولد موج، امواجی با ارتفاع $0/05$ تا $0/14$ متر و دوره تناوب دو تا سه ثانیه تولید شد.

در این پژوهش، یک دستگاه سرعت‌سنج در نزدیکی محل شکست موج به کار گرفته شد. این دستگاه، همانند سطح‌سنج‌ها، پیش از نصب در آب ساکن مورد واسنجی قرار گرفت و سپس طبق شکل ۵ در مکان تعیین‌شده نصب شد. پس از اتمام هر آزمایش و تخلیه آب کانال موج، از بستر تصویربرداری شد و تغییرات بستر رسوبی مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه، نقشه توپوگرافی بستر بر اساس نتایج حاصل ترسیم شد (شکل ۶). در این پژوهش، مشخصات



الف- نقشه توپوگرافی دوبعدی

a. Two-dimensional topography map



ب- نقشه توپوگرافی سه‌بعدی

b. Three-dimensional topography map

شکل ۶- نمای دوبعدی و سه بعدی توپوگرافی بستر رسوبی در محدوده نصب شمع استوانه‌ای

Fig. 6. Two-dimensional and three-dimensional view of the topography of the sedimentary bed around the cylindrical pile

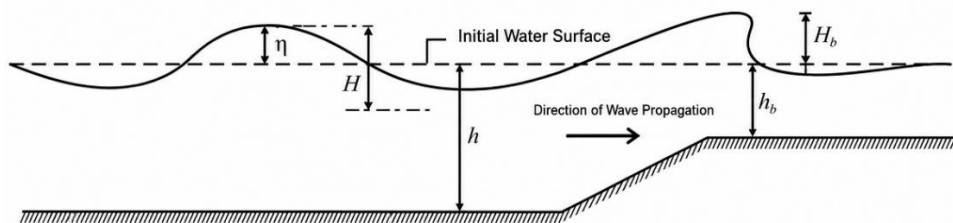
ثابت شد. هرچند پریود موج توسط دستگاه موج ساز نیز قابل تعیین است، اما پریود واقعی از این طریق محاسبه می‌شود. بررسی‌ها نشان داد که اختلاف چندان محسوسی بین این دو عدد وجود ندارد.

تحلیل ابعادی: برای تغییر تعداد متغیرهای ابعادی به تعداد کمتری از گروه‌های بی بعد، چند روش وجود دارد که یکی از آنها قضیه پی باکینگهام (Conejo, 2021) است. استفاده از تئوری باکینگهام، هنگامی که تعداد کمیت‌های فیزیکی چهار مورد یا بیشتر باشد، به دلیل کاهش تعداد متغیرهای مستقل، بسیار مفید و مؤثر خواهد بود. در این روش تشکیل گروه‌های پی یا بی بعد پیگیری می‌شود. برای یافتن گروه‌های بی بعدی به روش باکینگهام، نخست باید تمامی متغیرهای تأثیرگذار بر پدیده یا جسم مورد بررسی به طور کامل شناسایی و ابعاد فیزیکی هر یک تعیین شود؛ زیرا عدم لحاظ هر یک از این متغیرها می‌تواند منجر به نتایج نادرست و تحلیل ناقص شود.

در این پژوهش، پارامتر عمق فرسایش (S) به پارامترهایی مطابق جدول ۲ و رابطه (۵) وابسته است. برخی مشخصات موج در شکل ۷ نشان داده شده است.

$$F(S, Lb, T, Hb, hb, Um, \rho, \mu, Xb, D, d50) = 0 \quad (5)$$

$$S = F(Lb, T, Hb, hb, Um, \rho, \mu, Xb, D, d50)$$



شکل ۷- مشخصات موج در حال انتشار و شکست

Fig. 7. Characteristics of the propagating and breaking wave

لذا ترکیب این گروه‌ها نیز می‌تواند گروه‌های بی‌بعد مطابق رابطه (۶) ایجاد نماید.

$$\Pi_1 = f(\Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_n) \quad (6)$$

با توجه به اینکه پارامترهای مستقل در این پژوهش شامل عمق جریان، ارتفاع موج و تناوب موج می‌باشند، پس از آماده‌سازی اولیه و فراهم‌سازی شرایط آزمایشگاهی، آزمایش‌ها در شرایط امواج منظم و برای

به منظور تعیین دقیق محل شکست موج نسبت به محل قرارگیری شمع (X_b) از نرم‌افزار Aoa Video to Picture Converter استفاده شد. با استفاده از این نرم‌افزار و تصاویر مختلف تهیه شده توسط دوربین، ابتدا محل شکست موج مشخص و سپس به کمک نرم‌افزار Digimizer، فاصله کمی محل شکست موج تا شمع تعیین گردید. ارتفاع موج به کمک قرائت دو سنسور مجاور هم که به فاصله ۷۰ سانتی‌متر از همدیگر و درون کانال قبل از سطح شیب‌دار نصب شده بود، تعیین شد. با توجه به وجود پدیده انعکاس موج در کانال، ارتفاع قرائت شده دو سنسور مجاور با یکدیگر متفاوت می‌باشد. برای در نظر گرفتن این پدیده و با توجه به وجود دو سنسور ثابت، از روش (Goda and Suzuki, 1976) برای تعیین اثر انعکاس استفاده شد. ارتفاع موج در نقطه شکست به کمک سطح‌سنج نصب شده در محل اندازه‌گیری شد. بدین صورت که تفاوت بین دو نقطه بیشینه و کمینه متوالی برابر ارتفاع موج در نقطه شکست در نظر گرفته می‌شود.

به منظور تعیین پریود هر آزمایش از نمودار تغییرات سطح آب که بر حسب زمان ترسیم می‌گردد، استفاده شده است. برای این منظور، اختلاف زمانی بین دو تاج یا قعر موج محاسبه و به عنوان پریود واقعی هر آزمایش

اعداد بی‌بعد نهایی را "ترم‌های پی" و تئوری مذکور را "تئوری پی باکینگهام" می‌نامند. ادگار باکینگهام از علامت π برای نمایش متغیرهای بی‌بعد استفاده کرد. در این پژوهش متغیرهای بی‌بعد نهایی مطابق جدول ۲ تعیین و ارائه شده است. از آنجایی که شش پارامتر $d50$, D , Xb , Hb , hb و Lb دارای بعد یکسان [L] می‌باشد

شکست موج در داخل مخزن رسوب صورت گیرد. برای تجزیه و تحلیل نتایج از دو گروه بی بعد شماره ۱ (S/D) و ۳ (TU_m/D) استفاده شد. گروه بی بعد شماره ۳ به نام عدد موج (KC) شناخته شده است.

مقادیر مختلف دوره تناوب (بین دو تا هفت ثانیه)، ارتفاع موج (بین ۰.۰۵ تا ۰.۱۴ متر) و عمق آب (بین ۰.۰۴ تا ۰.۰۵ متر) و در شرایط امواج منظم انجام شد. لازم به توضیح است در هر مرحله از آزمایش، پارامترهای مذکور به گونه‌ای انتخاب شدند که حتماً

جدول ۱- مشخصات پارامترهای مورد نیاز در آنالیز ابعادی

Table 1. The most important technical, legal, social and environmental factors evaluated in the research

Row	Parameter	Parameter name	Dimension
1	ρ	Density	M/L ³ or ML ⁻³
2	μ	Viscosity	ML ⁻¹ T ⁻¹
3	U_m	Speed at the wave breaking point	L/T or LT ⁻¹
4	T	period	T
5	L _b	Wave length at the wave breaking point	L
6	D	Pile diameter	L
7	H _b	Wave height at the wave breaking point	L
8	h _b	Water depth at the wave breaking point	L
9	X _b	Wave breaking distance from pile	L
10	d ₅₀	Mean sediment particle diameter	L

جدول ۲- گروه‌ها یا متغیرهای بی بعد

Table 2. Dimensionless groups or variables

Dimensionless Group No.1	Dimensionless Group No.2	Dimensionless Group No.3	Dimensionless Group No.4	Dimensionless Group No.5	Dimensionless Group No.6	Dimensionless Group No.7
$\left[\frac{S}{D}\right] = \pi_1$	$\left[\frac{\mu}{D\rho U_m}\right] = \pi_2$	$\left[\frac{TU_m}{D}\right] = \pi_3$	$\left[\frac{S}{d_{50}}\right] = \pi_4$	$\left[\frac{H_b}{h_b}\right] = \pi_5$	$\left[\frac{X_b}{L_b}\right] = \pi_6$	$\left[\frac{L}{D}\right] = \pi_7$

افزایش یافته است. به عبارت دیگر، با افزایش عدد KC ، طول گردابه‌های جانبی در اطراف و پشت پایه استوانه‌ای افزایش می‌یابد و به تبع آن، بخش بیشتری از بستر در معرض آب‌شستگی و فرسایش قرار می‌گیرد. به همین ترتیب، افزایش این پارامتر منجر به بزرگ‌تر شدن گردابه‌های نعل‌اسبی شده و در نتیجه، عمق آب‌شستگی در ناحیه اطراف پایه افزایش می‌یابد.

رابطه رگرسیونی استخراج شده در این پژوهش برای تغییرات نسبی عمق فرسایش (S/D) در برابر عدد موج (KC)، یک رابطه توانی به شکل رابطه (۷) است که ضریب همبستگی (r) آن حدود ۰/۹۳ می‌باشد؛ این مقدار نشان‌دهنده وجود همبستگی قابل توجهی بین دو پارامتر مذکور است.

$$\frac{S}{D} = 0.047 (KC)^{0.7873} \quad KC \geq 3.5 \quad (7)$$

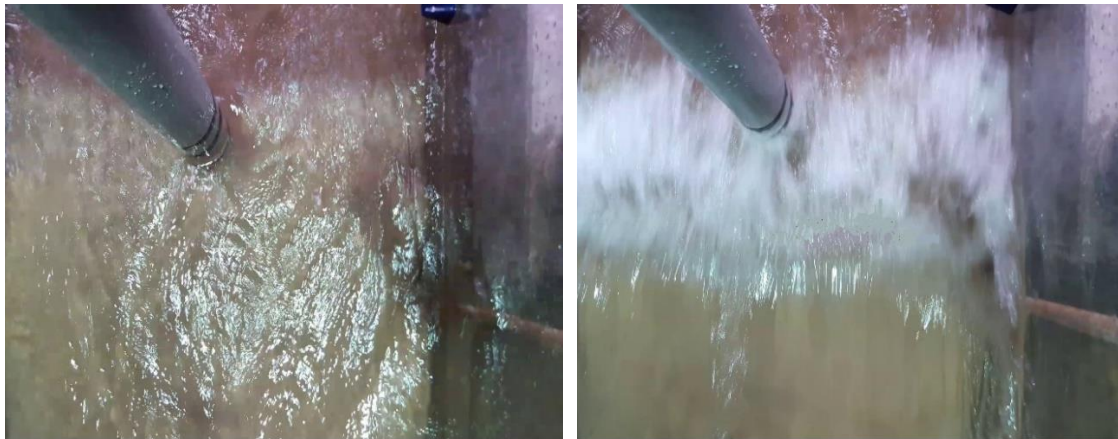
در ادامه، نتایج حاصل از پژوهش حاضر که تحت شرایط وقوع شکست موج در اطراف شمع استوانه‌ای انجام شده است با نتایج مطالعات پیشین در خصوص تأثیر امواج عادی و منظم ناشکنا بر عمق آب‌شستگی، از جمله تحقیقات (Sumer et al., 1992) (رابطه‌های ۱ و ۲) و (Dogan (2021) (رابطه‌های ۳ و ۴)، مقایسه شد.

نتایج و بحث

شکل ۸ نمونه‌ای از تصاویر آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش در شرایط قبل و بعد از شکست موج را در محدوده سازه شمع استوانه‌ای شکل نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، موج در نزدیکی پایه استوانه‌ای شکسته شده است.

مقادیر اندازه‌گیری شده پارامترهای h_b ، H ، T ، h ، L_b ، U_b ، H_b ، X_b و S در جدول ۳ ارائه شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد، حداقل و حداکثر عمق فرسایش (S) در پژوهش حاضر به ترتیب دو و هفت سانتی‌متر است. به عبارتی، حداکثر عمق فرسایش در محل سازه شمع استوانه‌ای حدود ۱۸ تا ۶۴ درصد قطر (D) است. در این پژوهش، عدد موج (KC) نیز بین ۳/۵ تا ۲۹/۵ تغییر نموده است. بر اساس مقادیر اندازه‌گیری شده پارامترهای مذکور، عدد موج (KC) و نسبت S/D تعیین شد.

شکل ۹، تغییرات نسبت حداکثر عمق فرسایش به قطر پایه استوانه‌ای (S/D) را در مقابل عدد موج (KC) نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج از روندی مشخص پیروی می‌کنند؛ به طوری که با افزایش عدد موج، نسبت S/D و در نتیجه میزان فرسایش



الف- قبل از شکست موج

a. Before wave break

ب- بعد از شکست موج

b. After wave break

شکل ۸- تصویر قبل و بعد از شکست موج در نزدیک محل سازه شمع استوانه‌ای

Fig. 8. Before and after images of wave breaking near the cylindrical pile location

جدول ۳- مقادیر پارامترهای اصلی اندازه‌گیری شده در آزمایش‌ها

Table 8. The values of the main parameters measured in the experiments

Test No.	h(m)	T(sec)	H(m)	h _b (m)	L _b (m)	U _b (m)	H _b (m)	X _b (m)	S(m)
1	0.45	7.04	0.09	0.1	0.113	0.266	0.105	0.67	0.05
2	0.42	5.00	0.13	0.07	0.085	0.649	0.15	0.6	0.07
3	0.45	5.00	0.1	0.099	0.087	0.339	0.12	0.61	0.047
4	0.43	5.00	0.08	0.08	0.086	0.46	0.09	0.54	0.053
5	0.46	1.00	0.08	0.106	0.019	0.39	0.098	0.65	0.015
6	0.41	2.04	0.05	0.063	0.037	0.457	0.06	0.42	0.023
7	0.49	2.00	0.11	0.135	0.040	1.024	0.13	0.7	0.05
8	0.45	2.54	0.13	0.095	0.046	0.387	0.15	0.665	0.026
9	0.45	2.52	0.12	0.104	0.048	0.446	0.145	0.458	0.04
10	0.44	2.99	0.085	0.092	0.054	0.252	0.087	0.75	0.02
11	0.46	2.48	0.13	0.105	0.044	0.55	0.142	0.6	0.045
12	0.46	1.47	0.075	0.105	0.028	0.35	0.09	0.55	0.02
13	0.45	2.23	0.08	0.097	0.043	0.382	0.093	0.37	0.021
14	0.46	2.15	0.11	0.113	0.041	0.464	0.127	0.415	0.03
15	0.45	2.41	0.087	0.095	0.044	0.303	0.105	0.725	0.02
16	0.40	2.79	0.045	0.045	0.047	0.712	0.06	0.8	0.048
17	0.46	2.40	0.083	0.114	0.046	0.862	0.095	0.65	0.05
18	0.49	2.40	0.086	0.135	0.045	0.542	0.099	0.6	0.045
19	0.51	2.82	0.12	0.163	0.055	0.432	0.145	0.55	0.042
20	0.45	2.00	0.128	0.1	0.038	0.43	0.145	0.38	0.025
21	0.46	2.04	0.08	0.105	0.038	0.449	0.09	0.35	0.03
22	0.45	2.00	0.076	0.103	0.038	0.484	0.086	0.55	0.03
23	0.45	1.80	0.08	0.1	0.034	0.465	0.092	0.506	0.03
24	0.45	1.83	0.103	0.103	0.035	0.517	0.115	0.67	0.035
25	0.46	2.21	0.104	0.112	0.042	0.495	0.11	0.63	0.035
26	0.47	2.39	0.113	0.115	0.045	0.513	0.132	0.52	0.04
27	0.46	2.20	0.115	0.114	0.043	0.458	0.148	0.21	0.025
28	0.48	2.24	0.11	0.132	0.044	0.415	0.145	0.11	0.024
29	0.48	2.23	0.106	0.125	0.042	0.487	0.12	0.508	0.025
30	0.50	2.20	0.131	0.152	0.043	0.475	0.177	0.61	0.028
31	0.51	2.20	0.145	0.155	0.048	0.456	0.205	0.575	0.026
32	0.51	2.40	0.138	0.157	0.048	0.471	0.16	0.63	0.03
33	0.50	2.40	0.14	0.153	0.048	0.486	0.17	0.606	0.04
34	0.42	2.20	0.06	0.067	0.040	0.463	0.07	0.53	0.025

تعیین و با نتایج حاصل از آزمایش‌های حاضر مقایسه شد. نتایج این مرحله در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

با جای‌گذاری مشخصات آزمایش‌های این پژوهش در رابطه‌های ۱ تا ۴، نسبت عمق فرسایش به قطر شمع

محدوده سازه است. به طور متوسط میزان فرسایش ناشی از شکست موج در محل استقرار پایه استوانه‌ای نسبت به شرایط عبور موج عادی و منظم ناشکنا (پژوهش Dogan, 2021) حدود ۲/۰۳ برابر است.

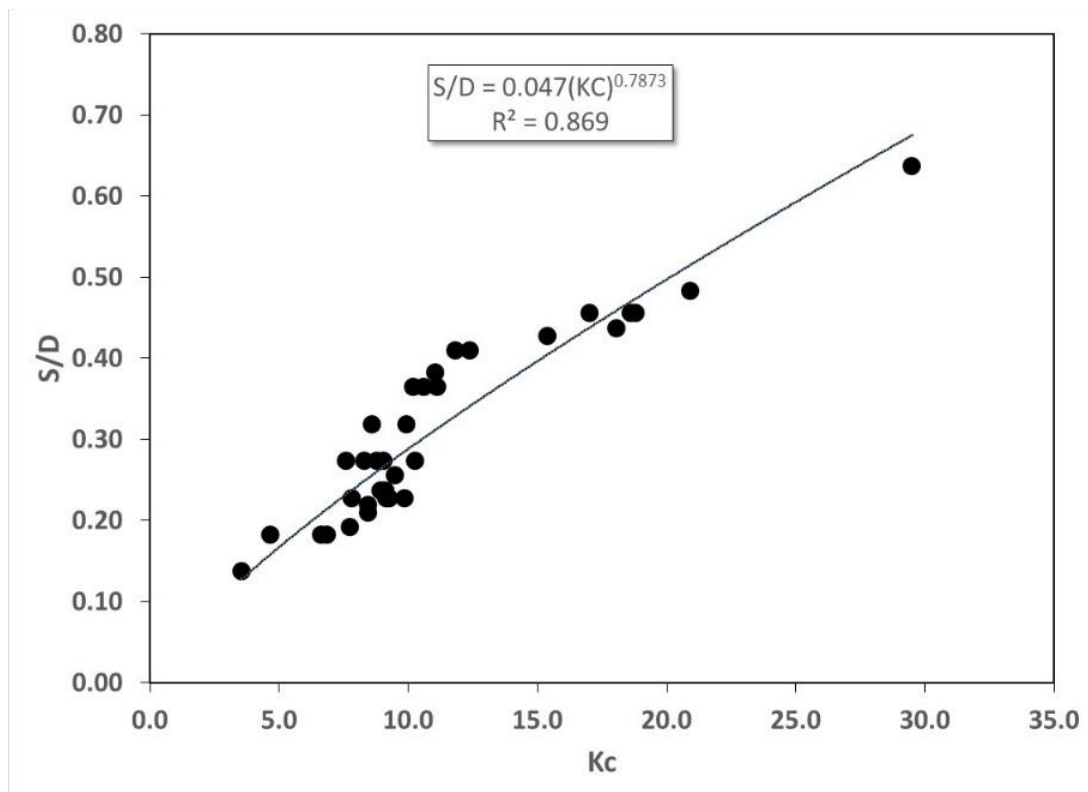
مقایسه نتایج پژوهش حاضر با نتایج رابطه ۴ به دست آمده توسط Dogan (2021) نیز نشان می‌دهد که عمق فرسایش در شرایط شکست امواج در محدوده سازه حفاظت ساحل حدود ۲/۴ تا ۲/۹۳ برابر عمق فرسایش حاصل از عبور موج عادی و منظم ناشکنا از محدوده سازه است. به طور متوسط میزان فرسایش ناشی از شکست موج در محل استقرار پایه استوانه‌ای نسبت به شرایط عبور موج عادی (پژوهش Dogan, 2021) حدود ۲/۶۴ برابر است.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، نسبت S/D اندازه‌گیری شده در تمامی ۳۴ آزمایش این پژوهش، اختلاف قابل ملاحظه‌ای با نتایج دو پژوهش مورد نظر در شرایط عبور امواج عادی و منظم ناشکنا از اطراف سازه شمع استوانه‌ای دارد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، رخداد شکست موج در نزدیک پایه استوانه‌ای موجب افزایش میزان فرسایش نسبت به شرایط عبور موج عادی و منظم ناشکنا از محدوده استقرار سازه شمع استوانه‌ای شده است.

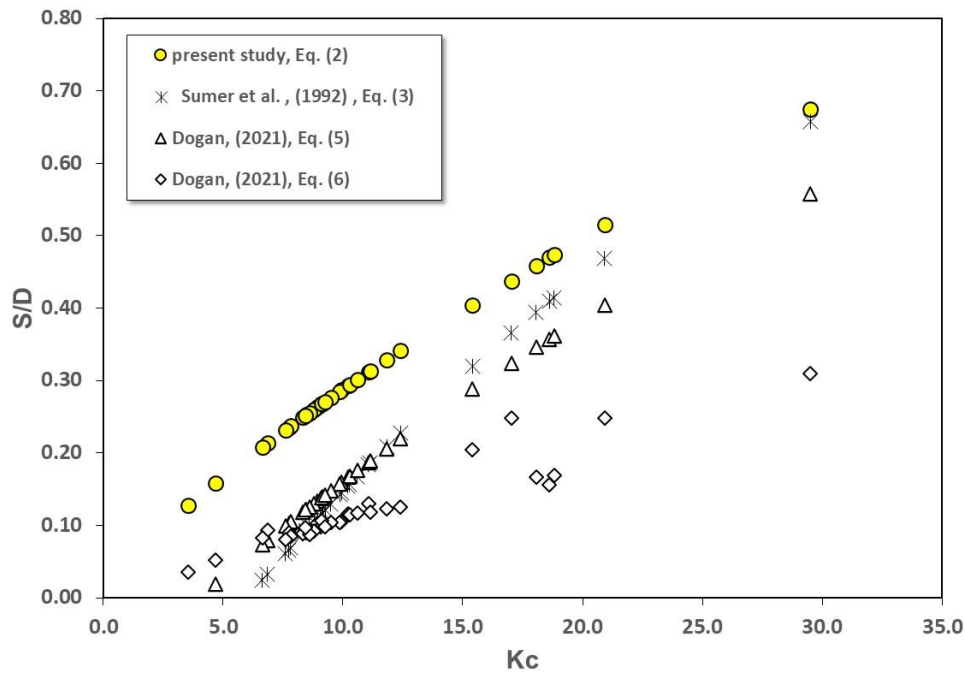
میزان اختلاف بین نتایج پژوهش حاضر با نتایج دو محقق دیگر در جدول ۴ ارائه شده است. مقایسه نتایج پژوهش حاضر با نتایج Sumer et al., (1992) نشان می‌دهد که عمق فرسایش در شرایط شکست امواج در اطراف سازه حفاظت ساحل حدود ۱/۱۴ تا ۸/۴۶ برابر عمق فرسایش حاصل از عبور موج عادی و منظم ناشکنا از اطراف سازه است. به طور متوسط میزان فرسایش ناشی از شکست موج در محل استقرار پایه استوانه‌ای نسبت به شرایط عبور موج عادی و منظم ناشکنا (پژوهش Sumer et al., 1992) حدود ۲/۴ برابر است.

مقایسه نتایج پژوهش حاضر با نتایج رابطه ۳ به دست آمده توسط Dogan (2021) نیز نشان می‌دهد که عمق فرسایش در شرایط شکست امواج در محدوده سازه حفاظت ساحل حدود ۱/۳۱ تا ۲/۸۵ برابر عمق فرسایش حاصل از عبور موج عادی و منظم ناشکنا از



شکل ۹- تغییرات S/D نسبت به عدد موج (Kc) برای ۳۴ آزمایش انجام شده در این پژوهش

Fig. 9. S/D vs. Wave number (Kc) for 34 experiments conducted in this research



شکل ۱۰- مقایسه حداکثر عمق آبشستگی نسبی به دست آمده از ۳۴ آزمایش پژوهش حاضر با نتایج دیگر محققین

Fig. 10. Comparison (S/D) obtained from 34 experiments of the present study with the results of other researchers

جدول ۴- مقادیر حداقل، متوسط و حداکثر نسبت عمق فرسایش پژوهش حاضر با پژوهش دیگر محققین

Table 4. The minimum, average, and maximum values of the erosion depth ratio in the present study compared to other researchers' studies

Statistic	S _{Present Study} / S _{Other Researchers}		
	Eq. (2) / Eq.(3)	Eq. (2) / Eq.(5)	Eq. (2) / Eq.(6)
Minimum (Min.)	1.14	1.31	2.40
Average (Ave.)	2.40	2.03	2.64
Maximum (Max.)	8.46	2.85	2.93

نتیجه گیری

در مقایسه آبشستگی در سواحل با آبشستگی در رودخانه‌ها، می‌توان به این نکته اشاره نمود که علاوه بر جریان، امواج نیز دخالت دارند. به‌طور کلی در ترکیب جریان ساحلی با امواج، چنانچه امواج شکسته نشوند، عمق آبشستگی کاهش خواهد یافت. این در حالی است که چنانچه موج مورد نظر در راستای جریان ساحلی بوده و شکسته شود، به‌علت افزایش اغتشاش و تنش برشی حاصله در نزدیکی بستر منطقه شکست، عمق آبشستگی افزایش می‌یابد. در صورتی که شکست امواج در محل سازه ساحلی رخ دهد، میزان فرسایش و آبشستگی بیش از تعیین شده توسط تحقیقات قبلی خواهد بود.

نتایج حاصل از پژوهش حاضر موید این مطلب است. نتایج به‌دست آمده در این پژوهش نشان داد که متوسط میزان عمق آبشستگی در شرایط رخداد شکست موج در نزدیک محل استقرار پایه استوانه‌ای بیش از ۲/۴ برابر عمق تعیین شده توسط رابطه Sumer et al., (1992) برای حالت عبور موج عادی از کنار سازه است. مقایسه نتایج به‌دست آمده در این پژوهش با نتایج Dogan (1992) نیز نشان داد که در صورت استفاده از رابطه اصلاح شده Sumer et al., (1992) (رابطه ۵)، میزان عمق آبشستگی حاصل از شکست موج به‌طور متوسط حدود ۲/۰۳ برابر عمق آبشستگی محاسبه شده توسط رابطه Sumer et al., (1992) در شرایط عبور موج عادی است.

منجر به تعیین نادرست عمق پی و شالوده سازه خواهد شد. در صورت عدم توجه به نتایج این پژوهش، شرایط ناپایداری برای سازه دریایی در مواجهه با امواج شکسته شده در نزدیکی سازه به وجود خواهد آمد.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله، نویسندگان از تمامی همکاران بخش فنی آزمایشگاه پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری که در انجام این پژوهش همکاری کردند، قدردانی و تشکر صمیمانه خود را اعلام می‌دارند.

تعارض منافع

در این مقاله تضاد منافی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است.

در نهایت، مقایسه نتایج به دست آمده در این پژوهش با نتایج Dogan (1992) نشان داد که در صورت استفاده از رابطه نهایی و بدون محدودیت این محقق (رابطه ۶)، میزان عمق آبشستگی در شرایط شکست موج به طور متوسط حدود $2/64$ برابر عمق آبشستگی محاسبه شده توسط رابطه ایشان در شرایط عبور موج عادی است. جمع بندی نتایج پژوهش حاضر نشان داد که شکست موج موجب افزایش حدود $2/4$ برابری میزان عمق فرسایش و آبشستگی نسبت به عبور موج عادی و ناشکنای دریایی از اطراف یک سازه شمع استوانه‌ای می‌شود.

بنابراین، طراحان سازه‌های دریایی می‌بایست به این مسأله توجه نمایند که برآورد ناصحیح میزان عمق آبشستگی پایه سازه‌های حفاظت ساحل بر اساس تئوری عبور موج عادی ناشکنا از اطراف شمع استوانه‌ای،

منابع مورد استفاده

- Chella, M.A., 2016. Breaking wave characteristics and breaking wave forces on slender cylinders. In Department of Civil and Transport Engineering, Norwegian University of Science and Technology.
- Conejo, A.N., 2021. Fundamentals of dimensional analysis-theory and applications in metallurgy. Springer.
- Dogan, M., 2021. The equilibrium depth of wave scours around both slender and large piles. Ocean Engin. 236, 109474.
- Goda, Y., Suzuki, T., 1976. Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments. Coastal Engin. Proceedings 1(15), 47.
- Irschik, K., Sparboom, U., Oumeraci, H., 2005. Breaking wave loads on a slender pile in shallow water. Coastal Engin. World Scientific. 4, 568-580.
- Manjula, R., Sannasiraj, S., Saravanan, S., 2015. Experimental investigation of response of vertical slender cylinder under breaking wave impact. Aqu. Procedia 4, 227-233.
- Mayilvahanan, A.C., Bihs, H., Myrhaug, D., Muskulus, M., 2016. Hydrodynamic characteristics and geometric properties of plunging and spilling breakers over impermeable slopes. Ocean Model. J. 103, 53-72.
- Mayilvahanan, A.C., Tørum, A., Myrhaug, D., 2012. An overview of wave impact forces on offshore wind turbine substructures. Energy Procedia 20, 217-226.
- Morison, J.R., O'Brien, M.P., Johnson, J.W., Schaaf, S.A., 1950. The force exerted by surface waves on piles. Petro. Trans. 189(5), American Institute of Mining Engineers. 149-154.
- Sumer, B.M., Fredsøe, J., Christiansen, N., 1992. Scour around vertical pile in waves. J. Waterway Port Coastal Ocean Engin. 118, 15-31.
- Swift, R., 1989. Prediction of breaking wave forces on vertical cylinders. Coastal Engin. 13(2), 97-116.
- Wienke, J., Oumeraci, H., 2005. Breaking wave impact force on a vertical and inclined slender pile— theoretical and large-scale model investigations. Coastal Engin. 52(5), 435-462.
- Wienke, J., Sparboom, U., Oumeraci, H., 2001. Breaking wave impact on a slender cylinder. In Coastal Engin. 1787-1798.