

Laboratory Investigation of the Effect of Wavelength on Sediment Transport and Bed Profile Evolution in Sandy Beaches

Maysa Delfi¹, Mohammad Ali Lotfollahi Yaghin^{2*}, Alireza Mojtahedi², Alireza Masjedi³

¹Ph.D. Candidate, Department of Coasts, Ports and Marine Structures, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

²Professor, Department of Coasts, Ports and Marine Structures, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

³Professor, Faculty of Agriculture, Islamic Azad University, Ahvaz Branch, Ahvaz, Iran.

Corresponding Author's E-mail: Lotfollahi@tabrizu.ac.ir

Received: 23 Feb. 2026
Revised: 07 July 2026

Accepted: 25 July 2026
Published: 21 Dec. 2024



Homepage: ijwer.uoz.ac.ir

Abstract: This study experimentally investigates the effects of wavelength and wave duration on beach profile evolution. Experiments were conducted in a 15-m-long, 0.5-m-wide, and 0.6-m-high wave flume with a piston-type wavemaker. A 1:10 scale physical model was built on a sandy bed (median grain size 0.43 mm). Twenty scenarios comprising five wavelengths (220, 280, 325, 345, 365 cm) and four durations (20, 40, 60, 90 min) were simulated. Results show that wavelength is the primary factor governing the hydrodynamic regime. At the shortest wavelength (220 cm), the beach exhibited purely erosive behaviour (winter profile) with no berm formation. As wavelength increased, the transport shifted to an accretive state, forming sedimentary berms characteristic of a summer profile. Temporal analysis revealed that prolonged wave action consistently increased both berm height and erosion trough extent. These findings confirm that wavelength determines the erosion–accretion transition, while duration controls the magnitude of morphological changes.

Keywords: Cross-shore sediment transport, Physical modeling, Bed profile evolution, Wavelength, Equilibrium profile.

Introduction: Coastal zones are dynamic environments where the interaction between hydrodynamic forces and sedimentary beds leads to continuous morphological changes. The prediction of bed profile evolution and cross-shore sediment transport is a fundamental challenge in coastal engineering, directly influencing the design of marine structures and shoreline management. The concept of the equilibrium beach profile, as proposed by Dean (1991), suggests that beaches tend toward a stable shape described by power-law equations (Eq. 1), where the dissipation of wave energy per unit volume is uniform across the surf zone. However, recent studies, such as Anthony (2015), have emphasized that the hydrodynamic regime—specifically the wave characteristics—determines whether a beach experiences erosion or accretion. Furthermore, Wallwork and colleagues (2022) highlighted the complexity of sediment transport under the combined action of waves and currents, noting gaps in understanding the precise transition between erosive and accretive states. Despite extensive research, there is a need to experimentally quantify the specific effects of wavelength and wave duration on the transition between winter (erosive) and summer (accretive) profiles in sandy beaches. This study aims to address this gap by using physical modeling to investigate how variations in wavelength, independent of wave height, dictate the direction of sediment transport and the resulting bed topography. The study relies on dimensional analysis (Eq. 2), Kamphuis (1991) to simulate these complex interactions in a laboratory setting.

Methodology: The experimental program was conducted in a wave flume measuring 15 m in length, 0.5 m in width, and 0.6 m in height at the Hydraulic Laboratory of Islamic Azad University, Ahvaz Branch, Iran. To ensure dynamic similarity and avoid scale effects associated with cohesive behaviour in fine particles, the sediment scaling was based on the fall velocity similarity criterion rather than strict geometric similarity. As suggested by

Short (1999), the fall velocity in the model was scaled according to the square root of the length scale (Eq. 3). Consequently, quartz sand with a median diameter of 0.43 mm was selected to represent the prototype sediment conditions (Table 2 and Fig. 2). The physical model of the beach was constructed with an initial slope of 1:10 (Fig. 1). The experiments comprised 20 distinct scenarios involving five different wavelengths ($L = 220, 270, 325, 345$, and 365 cm) and four wave durations ($t = 20, 40, 60$, and 90 minutes) (Table 3). A constant wave height (H) of 11 cm and a water depth (h) of 18 cm were maintained throughout the tests. A piston-type wave maker generated regular waves, and a digital profiler was used to record the bed elevation changes along the longitudinal axis of the flume after each test run.

Results and Discussion: The analysis of the experimental data revealed a distinct hydrodynamic control over the beach profile evolution. As illustrated in Fig. 4 and detailed in Table 3, the wavelength acted as the primary determinant for the direction of cross-shore sediment transport. In scenarios with the shortest wavelength ($L = 220$ cm), the beach exhibited a purely erosive behaviour. The strong return currents (undertow) generated by these steep waves transported sediment offshore, preventing the formation of any beach berm and creating a significant erosion trough in the surf zone. This behaviour aligns with the characteristics of the winter profile described by Dean (1991) and confirms the destructive potential of short-period waves noted by Anthony (2015). Conversely, for wavelengths greater than 270 cm, the transport direction shifted onshore. The longer waves facilitated sediment deposition on the beach face, leading to the development of distinct berms characteristic of the summer profile (Table 3). A key contribution of this study is the quantification of the time-dependency of these morphological features. The results showed that while the type of profile (erosive vs. accretive) is dictated by the wavelength, the dimensions of the features are a function of wave duration. For instance, in the accretive regime, the berm height increased progressively with time, reaching a maximum of 9.3 cm at $L = 325$ cm after 90 minutes. Similarly, the elongation length of the erosion trough extended further offshore as the duration increased (from 136 cm to 206 cm), indicating a seaward migration of the breaker zone (Table 3). Compared to previous numerical studies (e.g., Hieu et al. 2020), these physical model results provide tangible evidence that the transition from erosion to accretion is not merely a function of wave energy but is critically dependent on the ratio of wavelength to water depth, which modulates the nearshore current structure.

Conclusion: This study provides experimental evidence confirming that wavelength is the critical parameter governing the transition between erosive and accretive beach profiles. The results demonstrated that short wavelengths (220 cm) generate erosive winter profiles with significant offshore sediment transport, whereas longer wavelengths (> 270 cm) promote onshore transport and berm formation (summer profiles). Furthermore, the study established a direct correlation between wave duration and the magnitude of morphological changes; specifically, increased duration leads to higher berms in accretive regimes and longer erosion troughs in both regimes. These findings underscore the necessity of incorporating both wavelength and storm duration into coastal evolution models to accurately predict shoreline stability.

© 2026 University of Tabriz, Tabriz, Iran.



This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

بررسی آزمایشگاهی اثر طول موج بر انتقال رسوب و تحول نیمرخ بستر در سواحل ماسه‌ای

میسا دلفی^۱، محمدعلی لطف الهی یقین^{۲*}، علیرضا مجتهدی^۲، علیرضا مسجدی^۳

^۱ دانشجوی دکتری، گروه سواحل، بنادر و سازه‌های دریایی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

^۲ استاد، گروه سواحل، بنادر و سازه‌های دریایی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

^۳ استاد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اهواز، اهواز، ایران

پست الکترونیکی نگارنده مسئول: Lotfollahi@tabrizu.ac.ir

وبگاه نشریه: ijwer.uoz.ac.ir



تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۰۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۰۳

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۵/۰۴/۱۶ تاریخ چاپ: ۱۴۰۳/۱۰/۰۱

چکیده: پیشبینی دقیق تغییرات بستر در نواحی ساحلی و درک مکانیزم انتقال رسوب عمود بر ساحل، نقش کلیدی در طراحی بهینه سازه‌های دریایی و مدیریت سواحل دارد. با توجه به پیچیدگی اندرکنش امواج و بستر ماسه‌ای، این پژوهش با هدف بررسی آزمایشگاهی اثر پارامترهای طول موج و تداوم زمانی تابش بر تکامل نیمرخ ساحلی انجام شد. بدین منظور، آزمایش‌ها در یک فلوم موج به طول ۱۵ متر، عرض ۰/۵ متر و ارتفاع ۰/۶ متر، مجهز به موج‌ساز پیستونی و با استفاده از مدل فیزیکی با مقیاس هندسی ۱:۱۰ بر روی بستر ماسه‌ای با قطر متوسط ۰/۴۳ میلی‌متر صورت گرفت. درمجموع ۲۰ سناریوی آزمایشی شامل پنج طول موج ۲۲۰، ۲۸۰، ۳۲۵، ۳۴۵ و ۳۶۵ سانتیمتر و چهار بازه زمانی ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۹۰ دقیقه شبیه‌سازی گردید. نتایج نشان داد که طول موج، عامل اصلی در تعیین شرایط هیدرودینامیکی ساحل است؛ به‌طوری که در طول موج ۲۲۰ سانتیمتر، ساحل رفتار کاملاً فرسایشی (نیمرخ زمستانه) از خود نشان داد و پشته ساحلی تشکیل نشد. اما با افزایش طول موج، جریان به حالت رسوب‌گذار تغییر یافته و منجر به تشکیل پشته‌های رسوبی (نیمرخ تابستانه) گردید. همچنین تحلیل زمانی داده‌ها نشان داد که با تداوم برخورد امواج، ارتفاع پشته‌های ساحلی در شرایط رسوب‌گذار و طول ناحیه فرسایش‌یافته در هر دو نوع نیمرخ افزایش می‌یابد.

کلیدواژه‌ها: انتقال رسوب عمود بر ساحل، مدل فیزیکی، تغییرات نیمرخ بستر، طول موج، نیمرخ تعادلی.

۱- مقدمه

سدسازی و برداشت از بستر رودخانه‌ها، زمینه‌ساز تشدید فرسایش و عقب‌نشینی خطوط ساحلی شده است. این پدیده خسارت‌های گسترده اقتصادی و اجتماعی در پی داشته است (Vousdoukas et al. 2018). براساس برآوردها، حدود ۲۴ درصد از سواحل ماسه‌ای جهان با نرخ فرسایش

مناطق ساحلی علاوه بر برخورداری از ارزش‌های اکولوژیک، نقش محوری در اقتصاد و تامین انرژی ایفا می‌کنند (McLachlan and Defeo 2023). با این حال، افزایش سطح آب دریاها ناشی از تغییرات اقلیمی (Hamlington et al. 2024) و کاهش منابع رسوبی در پی مداخلات انسانی نظیر

این چارچوب اگرچه در توصیف بسیاری از سواحل ماسه‌ای کارایی داشته، اما محدودیت‌هایی ازجمله شیب بی‌نهایت در خط ساحلی و ناتوانی در پیش‌بینی پشته‌های شنی را نیز به همراه داشته است (Dean 1995; Jara et al. 2015).

تغییرات فصلی نیمرخ سواحل ماسه‌ای، شاخص تغییرپذیری زمانی این محیط‌هاست که در مطالعات متعددی تایید شده است (Dean 1991; Hoque et al. 2002; Lashte Neshaei 1998). در فصل زمستان، با وقوع طوفان‌ها و امواج بلند، جریان‌های برگشتی بستر تقویت شده و رسوبات از ساحل به دریا منتقل می‌شوند. در نتیجه، پشته‌های زیرآبی در محدوده منطقه شکست شکل می‌گیرند. اما در تابستان با امواج ملایم‌تر، جهت انتقال رسوب به سمت ساحل معکوس شده و نیمرخ ساحل با تشکیل پشته‌های ساحلی و افزایش شیب در مجاورت خط آب بازآرایی می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نیز حاکی از تغییرات مورفولوژیکی در زمستان نسبت به تابستان است (Shim et al. 2020). همچنین، شواهد آزمایشگاهی نشان داد که گذار از نیمرخ زمستانه به تابستانه با جابه‌جایی نقطه شکست موج و تغییر در توزیع عرضی انتقال رسوب ناشی از عدم تقارن موج همراه است (Grossmann et al. 2024). نمونه‌هایی از این نیمرخ در **شکل ۱** نشان داده شده است.

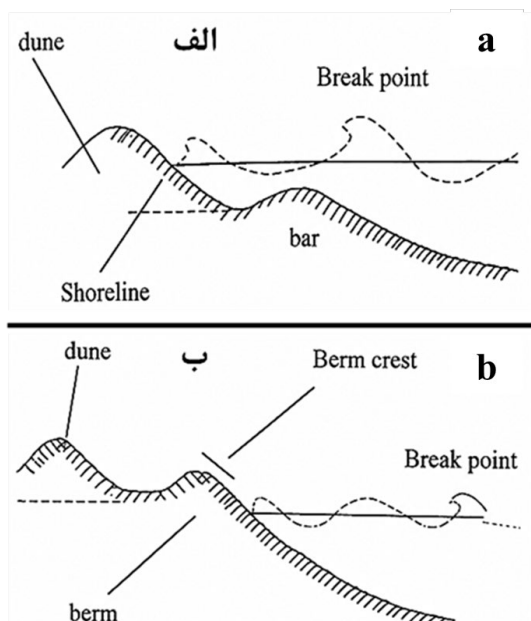


Fig. 1 A View of a) Winter profile, b) Summer profile
شکل ۱ نمایشی از: الف) نیمرخ زمستانه و ب) نیمرخ تابستانه

بیش از ۰/۵ متر در سال در حال عقب‌نشینی هستند (Luijendijk et al. 2018) و پیش‌بینی‌ها حاکی از آن است که تا ۲۶ درصد از سواحل ماسه‌ای جهان در معرض فرسایش قرار خواهند گرفت (Tierolf et al. 2023).

امواج دریا با وقوع شکست در ناحیه کم‌عمق ساحلی، انرژی قابل‌توجهی به بستر منتقل کرده و زمینه‌ساز جابه‌جایی رسوبات و تغییر شکل نیمرخ ساحلی می‌گردد (Dean and Dalrymple 1991). در این میان، جریان برگشتی بستر رسوبات را به سمت دریا می‌راند (Masselink and Black 1995)، درحالی‌که عدم تقارن موج رسوبات را به ساحل بازمی‌گرداند (Grasso et al. 2011; Ruessink et al. 2012). برآیند متقابل این دو جریان، الگوی انتقال به ساحل در پاشنه، به دریا در منطقه شکست و مجدداً به ساحل در خارج از آن را شکل می‌دهد. شکست موج با اعمال نیرویی معادل $1/2$ برابر وزن موثر دانه‌ها و افزایش $1/3$ برابری تنش برشی بستر، گویای نقش تعیین‌کننده این فرایند در جهت‌دهی انتقال رسوب است (Güner 2024).

مفهوم نیمرخ تعادلی سواحل ماسه‌ای، نخستین‌بار توسط دین (۱۹۹۱) با رویکردی مبتنی بر توزیع یکنواخت اتلاف انرژی موج در واحد حجم آب در ناحیه ساحلی، به‌صورت رابطه سهموی $h = Ax^{\frac{2}{3}}$ فرمول‌بندی شد. در این رابطه، h عمق آب در هر نقطه به فاصله x از خط ساحلی و $A = 2.25 \left(\frac{W^2}{g} \right)^{\frac{1}{3}}$ پارامتر مقیاس نیمرخ است که به‌سرعت سقوط ذرات بستر (W) بستگی دارد که تابعی از قطر متوسط ذرات D_{50} است (Dean 1991). این نیمرخ با این‌که بیانگر وضعیت میانگین رفتار بستر در بلندمدت است، اما چارچوبی برای درک نوسانات مورفودینامیکی پیرامون یک حالت تعادلی فراهم می‌آورد. دین در استخراج رابطه فوق، سه پیش‌فرض بنیادین را به‌کار گرفت:

۱. مصالح ساحل از نوع ماسه با سرعت سقوط ذرات در دامنه ۱ تا ۱۰ سانتی‌متر بر ثانیه باشد؛
۲. شکل‌گیری نیمرخ تعادلی تابع مستقیم نرخ استهلاک انرژی ناشی از شکست امواج در ناحیه ساحلی باشد؛
۳. در ناحیه نزدیک ساحل، ارتفاع موج همواره ضریبی ثابت از عمق آب محسوب شود (Dean 1991).

۲- روش‌شناسی

۱-۲- مبانی نظر و تحلیل ابعادی

طراحی مدل‌های فیزیکی پدیده‌های ساحلی همواره با چالش‌هایی نظیر اثرات مقیاس و دشواری در بازتولید دقیق شرایط محیطی همراه است (Heller 2011). در چنین شرایطی، تحلیل ابعادی و تشابه دینامیکی، ابزارهای کلیدی برای تعمیم‌پذیری نتایج آزمایشگاهی به شرایط طبیعی محسوب می‌شوند (Chanson and Pfister 2013). در پژوهش حاضر، با توجه به حاکمیت نیروی گرانش بر جریان‌های ساحلی، معیار تشابه فرود به‌عنوان مبنای مقیاس‌گذاری هیدرولیکی انتخاب شد. با این حال، به دلیل پیچیدگی ذاتی انتقال رسوب، صرفاً تأمین تشابه فرود کافی نبوده و شناسایی سایر گروه‌های بی‌بعد مرتبط با حرکت ذرات ضروری است.

براساس رویکرد تحلیل ابعادی کامفویس (۱۹۹۱)، متغیرهای موثر در چهار دسته سیال، جریان، هندسه و رسوب دسته‌بندی شدند (جدول ۱). بر این اساس، تابع بی‌بعد حاکم بر مسئله به صورت زیر فرموله می‌گردد (Kamphuis 1991):

$$\Pi_H = f\left(\frac{H}{L}, \frac{h}{L}, \frac{x}{L}, \frac{y}{L}, \frac{z}{L}, \frac{n}{L}, t\sqrt{\frac{g}{L}}, \frac{v}{L\sqrt{gL}}\right) \quad (1)$$

که در آن H ارتفاع موج، L طول موج، h عمق آب، x و y و z مختصات مکانی، n زبری سطح بستر، t زمان، g شتاب ثقل و U لزجت سینماتیکی آب می‌باشند. در این رابطه، هر گروه بی‌بعد نقشی فیزیکی در تعیین رفتار سیستم دارد. برای نمونه، عدد رینولدز موج $v/(L\sqrt{gL})$ نشان‌دهنده اهمیت نیروهای لزجت در مقایسه با نیروی گرانش بوده و زمان بی‌بعد $t\sqrt{g/L}$ تکامل زمانی فرایندها را نشان می‌دهد. حفظ این گروه‌های بی‌بعد در مدل و طبیعت، شرط لازم برای تعمیم‌پذیری نتایج آزمایشگاهی به شرایط واقعی است. به این اساس، مدل فیزیکی این تحقیق با مقیاس هندسی مستقیم ۱:۱۰ و براساس تشابه فرود طراحی شده است.

براساس مطالعات مرتبط با تاثیر پارامترهای موج بر انتقال رسوب عمود بر ساحل، امواج کوتاه اغلب با فرسایش و امواج بلند با تثبیت ساحل همراهاند (Anthony 2015) و الگوی انتقال رسوب، علاوه بر مشخصات موج، تحت تاثیر توپوگرافی بستر نیز قرار دارد (Hieu et al. 2020; Ruessink et al. 2012). همچنین شیب تند ساحل، تغییرات سریع تر و نرخ انتقال بیشتری دارد. الگوی انتقال در منطقه شکست مستقل از شیب است، اما در ناحیه پاشنه، شیب تند در شرایط فرسایشی انتقال به دریا و شیب ملایم انتقال به ساحل را نشان می‌دهد (Dionísio António et al. 2023).

باوجود پیشرفت‌هایی در مدل‌سازی و درک فرایندهای ساحلی، همچنان شکاف تحقیقاتی در زمینه تاثیر پارامترهای موج، به‌ویژه طول موج بر الگوی انتقال رسوب عمود بر ساحل وجود دارد. پژوهش‌های پیشین عمدتاً بر تاثیر ارتفاع موج، دوره و شیب ساحل متمرکز بوده‌اند، درحالی‌که طول موج به‌عنوان پارامتری که به‌طور مستقیم بر تیزابی موج (H/L)، نحوه شکست و پراکندگی انرژی در منطقه ساحلی تاثیر می‌گذارد، کمتر در شرایط آزمایشگاهی بررسی شده است. از آنجاکه طول موج تعیین‌کننده عمق نفوذ موج، میزان غیرخطی بودن و الگوی توزیع تنش برشی بستر است، درک تاثیر آن بر انتقال رسوب عمود بر ساحل و ویژه‌ای در پیش‌بینی تغییرات نیمرخ و مدیریت پایدار سواحل دارای اهمیت است.

علاوه بر این، با توجه به گسترده‌ی خطوط ساحلی ایران در مرزهای شمالی و جنوبی، شناخت جامع رفتار هیدرودینامیکی سواحل و تغییرات فصلی آن‌ها از اهمیتی راهبردی برخوردار است. طراحی ایمن و پایدار سازه‌های دریایی نظیر اسکله‌ها، دیوارهای ساحلی و موج‌شکن‌ها، وابستگی مستقیمی به درک صحیح اندرکنش میان امواج و این سازه‌ها دارد. پژوهش حاضر با طراحی یک برنامه آزمایشگاهی، به دنبال بررسی اثر مستقل طول موج بر الگوی انتقال رسوب عمود بر ساحل و تحول نیمرخ بستر است تا ضمن توسعه مبانی نظری مهندسی سواحل، رهیافت‌های عملی برای پیش‌بینی تغییرات فصلی و مدیریت بهینه سواحل فراهم آورد.

جدول ۱ متغیرهای فیزیکی و گروه‌های بدون بعد مربوطه

Table 1 Physical variables and corresponding dimensionless groups

Category	Variable	Symbol	Dimensionless Group
Fluid	Density	ρ	-
	Kinematic viscosity	ν	$\nu/(L\sqrt{gL})$
	Wave height	H	H/L
Flow	Wave length	L	-
	Wave period	T	$t\sqrt{g/L}$
	Water depth	h	h/L
	Gravity	g	-
Geometry	Bed slope	m	$\tan^{-1}(m)$
	Linear scale	λ	-
	Surface roughness	n	n/L
	Coordinates	x, y, z	-
Sediment	Grain diameter	D_{50}	D_{50}/L
	Particle density	ρ_s	ρ_s/ρ
	Fall velocity	W_s	$W_s/\sqrt{gL}$
	Bed shear stress	τ_b	$\tau_b/(pgh)$

دامنه و دوره‌های مختلف را فراهم می‌کند. حداکثر شعاع جابجایی پارو ۰/۳۵ متر و ظرفیت تولید امواج تا ارتفاع ۰/۳۰ متر در عمق آب حداکثر ۰/۴۵ متر بود. بسامد امواج تولیدی از طریق یک موتور الکتریکی فرعی تعبیه شده بر روی الکتروموتور اصلی قابل تنظیم بود. ارتفاع موج نیز با استفاده از یک ارتفاع‌نگار شناور در طول فلوم اندازه‌گیری و بر روی مقدار ثابت ۱۱ سانتی‌متر تنظیم شد. برای برداشت نیمرخ طولی بستر در امتداد محور فلوم، از یک نیمرخ‌یاب دیجیتال با دقت میلی‌متری استفاده گردید. مدت زمان تابش امواج در هر آزمایش نیز با استفاده از یک زمان‌سنج دیجیتال اندازه‌گیری و کنترل شد. مشخصات فنی تجهیزات مورد استفاده در [جدول ۲](#) خلاصه شده است.

۳-۲- طراحی مدل فیزیکی و مقیاس‌گذاری رسوب

هندسه بستر مدل به‌صورت ترکیبی از دو بخش ثابت و شکل‌پذیر طراحی شد. بخش ثابت در ابتدای شیب قرار داشت تا حجم مصالح مصرفی کاهش یافته و پایداری شیب ورودی تضمین شود. بخش شکل‌پذیر با مصالح دانه‌ای پر شد تا امکان تغییرات مورفولوژیکی فراهم گردد ([شکل ۲](#)). شیب اولیه ساحل به‌دلیل محدودیت طول قسمت قابل رویت فلوم و همچنین تعدیل حجم عملیات ساحل‌سازی، ۱: ۱۰ انتخاب گردید ([شکل ۱](#)) و در تمامی آزمایش‌ها ثابت نگه‌داشته شد.

لازم به ذکر است که زبری سطح بستر (n) در این پژوهش به‌دلیل استفاده از بستر ماسه‌ای با دانه‌بندی یکنواخت و صاف، صفر فرض شده است. باین‌حال، این پارامتر در رابطه تحلیل ابعادی به‌عنوان متغیر مستقل حفظ شد تا قابلیت تعمیم نتایج به شرایط دیگر فراهم آید.

۲-۲- تجهیزات و امکانات آزمایشگاهی

آزمایش‌های پژوهش حاضر در آزمایشگاه هیدرولیک و سواحل دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز انجام گرفت. تجهیزات اصلی مورد استفاده به‌شرح زیر بود:

فلوم موج مورد استفاده، یک کانال مستطیلی با دیواره‌های شفاف از جنس پلکسی‌گلس به طول ۱۵ متر، عرض ۵۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر بود. شفافیت دیواره‌ها امکان مشاهده مستقیم پدیده‌های هیدرولیکی و ثبت تغییرات بستر را در طول آزمایش فراهم می‌ساخت.

آب مورد نیاز از طریق یک مخزن زیرزمینی و توسط یک پمپ ۶ اینچی با حداکثر دبی ۵۰ لیتر بر ثانیه به داخل فلوم پمپاژ می‌شد. عمق آب در تمامی آزمایش‌ها بر روی مقدار ثابت ۱۸ سانتی‌متر تنظیم گردید.

سیستم موج‌ساز مورد استفاده از نوع پیستونی با قابلیت تغییر کورس و دور موتور است که امکان تولید امواج منظم با

$$(w_s)_r = \sqrt{\lambda_r} \quad (2)$$

که در آن $(w_s)_r$ نسبت سرعت سقوط در مدل و λ_r نسبت طول در مدل است. براساس محاسبات سرعت سقوط (جدول ۳) و منحنی دانه‌بندی (شکل ۳)، ماسه‌ای با قطر متوسط برابر با ۰/۴۳ میلی‌متر انتخاب شد که معادل رسوبات طبیعی با رفتار هیدرودینامیکی مشابه است. همچنین توزیع دانه‌بندی پیوسته برای شبیه‌سازی دقیق‌تر تعامل ذرات لحاظ گردید (Zhang et al. 2024).

با توجه به ریزدانه بودن مصالح در سواحل طبیعی، اعمال مستقیم مقیاس هندسی بر روی قطر ذرات، منجر به تولید ذراتی در ابعاد بسیار ریز در حد سیلت یا رس خواهد شد. این امر موجب تشدید خطای مقیاس ناشی از غلبه نیروهای لزجت و تغییر رفتار رسوب از حالت دانه‌ای به چسبنده می‌گردد که با رفتار واقعی سواحل ماسه‌ای مغایرت دارد (Lashte Neshaei 2001). به‌منظور اجتناب از این خطا، ابعاد ذرات مدل به‌جای مقیاس هندسی، براساس معیار تشابه سرعت سقوط تعیین گردید. در این روش سرعت سقوط در مدل، تابعی از مقیاس طول در نظر گرفته می‌شود (Short 1999):

جدول ۲ مشخصات فنی تجهیزات آزمایشگاهی

Table 2 Technical specifications of laboratory equipment

Equipment	Specifications
Wave flume	Length: 15 m, Width: 0.5 m, Height: 0.6 m, Material: Plexiglas
Wave maker	Piston-type, Maximum stroke: 0.35 m
Water depth	0.18 m (constant)
Wave height	0.11 m (constant)
Water supply pump	6-inch, Maximum discharge: 50 L/s
Wave gauge	Float-type
Digital profiler	Accuracy: 1 mm

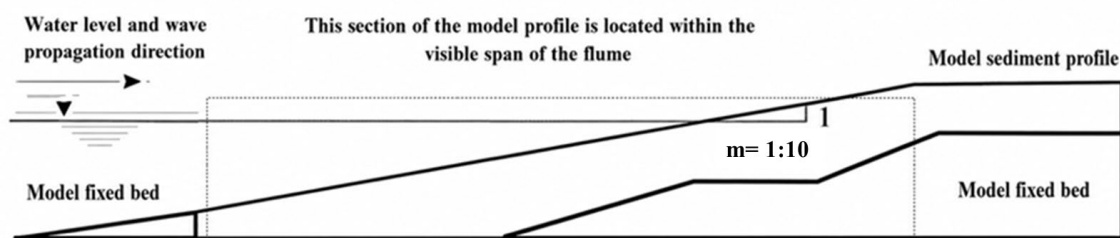


Fig. 2 A view of the geometry of the physical model built in the laboratory

شکل ۲ نمایی از هندسه مدل فیزیکی ساخته‌شده در آزمایشگاه

جدول ۳ قطر متوسط مصالح استفاده‌شده در آزمایشگاه

Table 3 Average diameter of materials used in the laboratory

Average diameter of sedimentary materials in the laboratory (mm)	Average equivalent particle velocity based on the model scale (mm/s)	Value of the velocity of falling sediment grains in nature (m/s)	Average diameter of sedimentary materials in nature (mm)
0.15	1.8×10^{-2}	5.69×10^{-2}	0.47
0.35	4.2×10^{-2}	1.33×10^{-1}	1.41
0.43	7.8×10^{-2}	2.75×10^{-1}	5.50

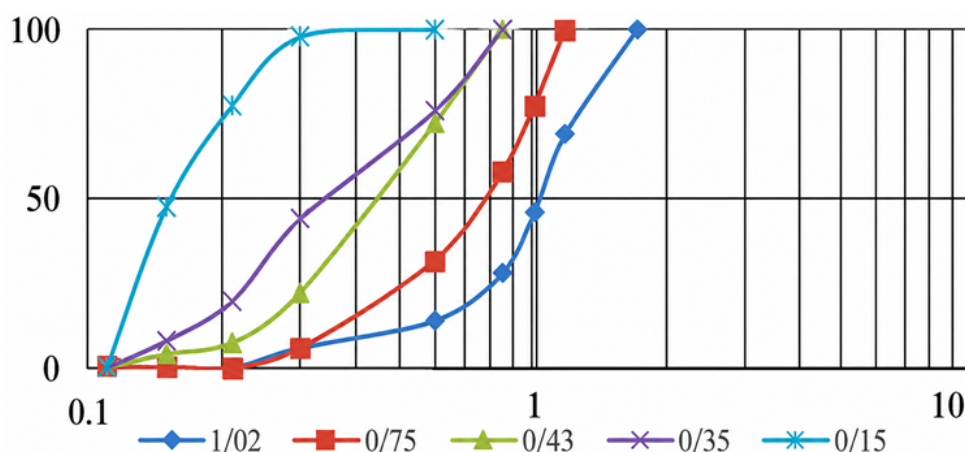


Fig. 3 Sedimentary material grading curve used in the laboratory.

شکل ۳ منحنی دانه‌بندی مصالح رسوبی استفاده‌شده در آزمایشگاه

انجام شد. دوره‌های محاسبه‌شده برای هر طول موج در [جدول ۴](#) درج شده است. سپس با تنظیم دور موتور الکتریکی موج‌ساز، تعداد دور موردنظر در ۶۰ ثانیه براساس دوره محاسبه‌شده اعمال گردید تا امواج با طول موج‌های مذکور به‌طور دقیق بازتولید شوند. ارتفاع موج نیز با استفاده از ارتفاع‌نگار شناور در طول فلوم اندازه‌گیری و بر روی مقدار ثابت ۱۱ سانتی‌متر تنظیم شد.

۲-۵- آرایش آزمایش‌ها و برداشت داده‌ها

پیش از آغاز هر آزمایش، فلوم تا عمق ۱۸ سانتی‌متر آب‌گیری شد و شیب اولیه ساحل بازسازی گردید. موج‌ساز با تنظیم دور موتور متناظر با دوره محاسبه‌شده راه‌اندازی شد و امواج در مدت‌زمان تعیین‌شده به ساحل تابانده شدند. پس از پایان هر آزمایش، جریان ورودی قطع و آب فلوم به‌آرامی تخلیه گردید تا از ایجاد اغتشاش در بستر جلوگیری شود. سپس عملیات برداشت داده‌ها در سه مرحله انجام گرفت:

۱. برداشت نیم‌رخ طولی بستر: با استفاده از نیم‌رخ‌یاب دیجیتالی با دقت میلی‌متری، مختصات ارتفاعی بستر در امتداد محور مرکزی فلوم برداشت شد. فواصل اندازه‌گیری در ناحیه ساحلی ۲ سانتی‌متر و در نواحی دورتر از ساحل ۵ سانتی‌متر درنظر گرفته شد تا تغییرات مورفولوژیکی با جزئیات کافی ثبت شوند.

۲. استخراج کمیت‌های مورفولوژیکی: از نیم‌رخ‌های برداشت‌شده، سه کمیت بیشینه ارتفاع پشته ساحلی

داده‌های [جدول ۳](#) نشان‌دهنده فرآیند تبدیل سرعت سقوط ذرات در طبیعت به قطر معادل در مدل است. به‌عنوان مثال، برای رسوب طبیعی با قطر ۱/۴۱ میلی‌متر، سرعت سقوط در طبیعت معادل 1.33×10^{-1} متر بر ثانیه محاسبه‌شده است. با اعمال مقیاس هندسی و استفاده از معیار تشابه سرعت سقوط (معادله (۲))، سرعت معادل در مدل به 4.20×10^{-2} میلی‌متر بر ثانیه کاهش‌یافته و درنهایت قطر ذرات در مدل برابر با ۰/۳۵ میلی‌متر تعیین شد. این فرآیند برای سه نمونه در [جدول ۳](#) نمایش داده‌شده است.

۲-۴- شبیه‌سازی حالت امواج

برای بازتولید آزمایشگاهی امواج پیش‌رونده دوبعدی در محیطی با عمق ثابت، مجموعه‌ای از پارامترها شامل ارتفاع موج، دوره تناوب، طول موج، عدد موج، شتاب گرانش و سرعت موج موردنیاز است (Sorensen 1993). در این پژوهش، برای تولید طول موج‌های ۲۲۰، ۲۸۰، ۳۲۵، ۳۴۵ و ۳۶۵ سانتی‌متر و عمق آب ثابت، دوره متناظر با هر طول موج از رابطه پراکندگی امواج در آب‌های با عمق محدود محاسبه گردید:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) \quad (3)$$

که در آن L طول موج، T دوره تناوب، h عمق آب و g شتاب ثقل می‌باشند. به‌دلیل وابستگی متقابل L و T در [این رابطه](#)، حل آن به‌صورت عددی و با استفاده از روش‌های تکراری

نسبت به تراز اولیه، طول کشیدگی چاله فرسایشی در بستر و موقعیت مکانی پشته و چاله نسبت به خط ساحل اولیه تعیین گردید.

۳. محاسبه حجم عوارض بستر: حجم پشته ساحلی و حجم چاله فرسایشی با استفاده از روش انتگرال‌گیری عددی دوزنقه‌ای و با مقایسه نیمرخ نهایی با نیمرخ اولیه محاسبه شدند.

تمامی داده‌های خام در نرم‌افزار Excel ثبت و پردازش شدند. همچنین برای نمایش سه‌بعدی تغییرات توپوگرافی بستر و تحلیل کیفی الگوهای مورفولوژیکی، از نرم‌افزار Surfer برای درون‌یابی فضایی داده‌ها استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مشاهدات کلی و مکانیزم انتقال رسوب

در تمامی آزمایش‌ها، به محض آغاز تابش امواج، ناپایداری در ذرات بستر مشاهده شد که در [شکل ۴](#) نیز نمای مقطع اولیه ساحل پیش از شروع آزمایش نشان داده شده است. انرژی ناشی از شکست امواج موجب تعلیق و غلتیدن ذرات رسوبی گردید که بسته به مشخصات موج، جهت‌گیری

متفاوتی داشتند. در [شکل ۵](#) نحوه اندرکنش موج با بستر و الگوی شکست را در حین آزمایش نشان می‌دهد. در برخی سناریوها، برآیند نیروها موجب انتقال رسوب به سمت ساحل و انباشت آن‌ها روی شیب شد، درحالی‌که در شرایط دیگر، جریان‌های برگشتی رسوبات را به سمت دریا منتقل کردند. باگذشت زمان، این فرآیند منجر به تغییر تراز بستر و شکل‌گیری عوارض مورفولوژیکی نظیر پشته‌های ساحلی و چاله‌های فرسایشی گردید. [شکل ۶](#) نمونه‌ای از این تغییر شکل یافته ساحل را پس از پایان دوره آزمایشی نشان می‌دهد. این مشاهدات با یافته‌های ماسلینک و به لک (۱۹۹۵) هم‌خوانی دارد که نشان دادند جریان برگشتی بستر، نقش اصلی را در انتقال رسوبات به خارج از منطقه شکست ایفا می‌کند (Masselink and Black 1995). همچنین، پژوهش‌های گراسو و همکاران (۲۰۱۱) نشان داد که شکل موج تاثیر مستقیمی بر انتقال رسوب و تغییرات نیمرخ ساحلی دارد (Grasso et al. 2011). بالداک و همکاران (۲۰۱۱) نیز با انجام آزمایش‌های بزرگ‌مقیاس در فلوم CIEM نشان دادند که امواج تک‌رنگ در مقایسه با امواج گروهی، انتقال رسوب به‌سمت ساحل را افزایش می‌دهند و حضور امواج بلند آزاد می‌تواند انتقال رسوب به‌سوی ساحل را تقویت کند (Baldock et al. 2011).

جدول ۴ مشخصات سناریوهای آزمایشی انجام‌شده

Table 4 Specifications of the test scenarios performed

Test number	Test duration	Wavelength	Period	NO. passing waves	Inverter number
	T (min)	L (cm)	(S)		
L1T1	20	220	1.7	34	22
L1T2	40	220	1.7	34	22
L1T3	60	220	1.7	34	22
L1T4	90	220	1.7	34	22
L2T1	20	280	2.1	28	21
L2T2	40	280	2.1	28	21
L2T3	60	280	2.1	28	21
L2T4	90	280	2.1	28	21
L3T1	20	325	2.4	25	20
L3T2	40	325	2.4	25	20
L3T3	60	325	2.4	25	20
L3T4	90	325	2.4	25	20
L4T1	20	345	2.7	22	19
L4T2	40	345	2.7	22	19
L4T3	60	345	2.7	22	19
L4T4	90	345	2.7	22	19
L5T1	20	365	2.8	21	18
L5T2	40	365	2.8	21	18
L5T3	60	365	2.8	21	18
L5T4	90	365	2.8	21	18



Fig. 4 Experimental beach section before exposure to waves

شکل ۴ مقطع ساحل آزمایشی قبل از قرارگیری در معرض امواج



Fig. 5 The mode of wave interaction with the bed and the type of wave breaking on the shore slope during the experiment.

شکل ۵ حالت اندر کنش موج با بستر و نوع شکست موج روی شیب ساحل در جریان آزمایش.



Fig. 6 Deformed state of the simulated beach after the end of the test period.

شکل ۶ حالت تغییر شکل یافته ساحل شبیه سازی شده پس از پایان مدت آزمایش.

۳-۲- تاثیر طول موج بر نوع نیمرخ تعادلی

تحلیل نیمرخ‌های طولی بستر در محور مرکزی فلوم برای پنج طول موج مختلف و در چهار بازه زمانی، دو الگوی رفتاری متمایزی نشان داد (جدول ۵ و شکل ۷).

در آزمایش‌های با طول موج کوتاه (۲۲۰ سانتی‌متر)، در هیچ‌یک از بازه‌های زمانی، پشته‌ای بر روی قسمت خشک ساحل تشکیل نشد. در این حالت، غلبه جریان‌های برگشتی موجب شسته شدن رسوبات از ساحل و انتقال آن‌ها به نواحی عمیق‌تر شد که منجر به ایجاد نیمرخ زمستانه گردید. این یافته با نظریه دین (۱۹۹۱) در مورد نیمرخ‌های تعادلی سواحل ماسه‌ای هم‌خوانی دارد؛ دین نشان داد که در شرایط امواج پرانرژی، نیمرخ ساحل به سمت یک حالت فرسایشی با شیب ملایم‌تر تغییر می‌کند (Dean 1991).

در چهار طول موج دیگر (۲۷۰ تا ۳۶۵ سانتی‌متر)، جهت غالب انتقال رسوب به سمت خشکی بود. این امر موجب نهشته‌گذاری مصالح بر روی شیب ساحلی و تشکیل پشته‌های رسوبی گردید که مشخصه بارز نیمرخ تابستانه است. آنتونی (۲۰۱۵) نیز در مطالعات خود نشان داد که

امواج کوتاه اغلب با افزایش فرسایش و کاهش ارتفاع پشته‌های ساحلی همراه‌اند، در حالی که امواج بلندتر می‌توانند به پایداری ساحل کمک کنند (Anthony 2015). نتایج حاضر این یافته را تایید کرده و نشان داد که طول موج ۲۲۰ سانتی‌متر، نقطه آستانه‌ای برای گذار از حالت رسوب‌گذار به فرسایشی در شرایط آزمایشگاهی می‌باشد.

یافته‌های پژوهش حاضر با نتایج دیونیسو آنتونیو و همکاران (۲۰۲۳) نیز مطابقت دارد. آن‌ها در آزمایش‌های فلوم بزرگ‌مقیاس با دو شیب متفاوت (۱:۱۵ و ۱:۲۵۲۵) نشان دادند که برای هر دو شیب، انتقال خالص رسوب در منطقه شکست برای امواج فرسایشی به سمت دریا و برای امواج رسوب‌گذار به سمت ساحل جهت‌گیری می‌کند (Dionísio António et al. 2023). همچنین، ژانگ و همکاران (۲۰۲۴) در سواحل پیش‌صخره‌ای نشان داد که هم امواج کوتاه‌دوره و هم امواج فروکشندی در شکل‌گیری نیمرخ ساحل نقش مهمی ایفا می‌کنند (Zhang et al. 2024)، که این موضوع با نقش طول موج در تعیین نوع شکست و الگوی انتقال رسوب در پژوهش حاضر هم‌سو است.

جدول ۵ نتایج حاصل از آزمایش انتقال رسوب ساحلی در جهت عمود بر ساحل در دریا در مدت زمانهای مختلف برخورد امواج

Table 5 Results from experiments on coastal sediment transport in the direction perpendicular to the shore at sea during different wave impact times

Test number	Test duration	Wave length	Stack height	Elongation length	Stack volume	Erosion volume	Profile type
	T(min)	L(cm)	h(cm)	(cm)	V1(cm3)	V2(cm3)	Win/Summ
L1T1	20	220	0	184	0	6.18348	Winter
L1T2	40	220	0	196	0	8.19599	Winter
L1T3	60	220	0	200	0	5.20130	Winter
L1T4	90	220	0	206	0	3.22730	Winter
L2T1	20	270	3.2	140	2.2803	6.18692	Summer
L2T2	40	270	4.2	148	9.2670	5.19830	Summer
L2T3	60	270	8.3	152	6.3327	4.21919	Summer
L2T4	90	270	8.4	162	1.4823	8.25524	Summer
L3T1	20	325	7.1	150	5.6273	4.22160	Summer
L3T2	40	325	1.2	162	2.6481	1.23182	Summer
L3T3	60	325	3	173	3.7828	1.25124	Summer
L3T4	90	325	9.3	186	2.9407	2.28307	Summer
L4T1	20	345	1.1	138	6.2378	2.17204	Summer
L4T2	40	345	3.1	156	1.2556	1.18169	Summer
L4T3	60	345	1.2	164	6.3019	3.18774	Summer
L4T4	90	345	3	168	2.3894	2.21839	Summer
L5T1	20	365	5.0	136	4.1846	3.9528	Summer
L5T2	40	365	9.0	156	9.1851	6.10262	Summer
L5T3	60	365	6.1	164	6.2246	5.10905	Summer
L5T4	90	365	3.2	174	9.2979	5.16445	Summer

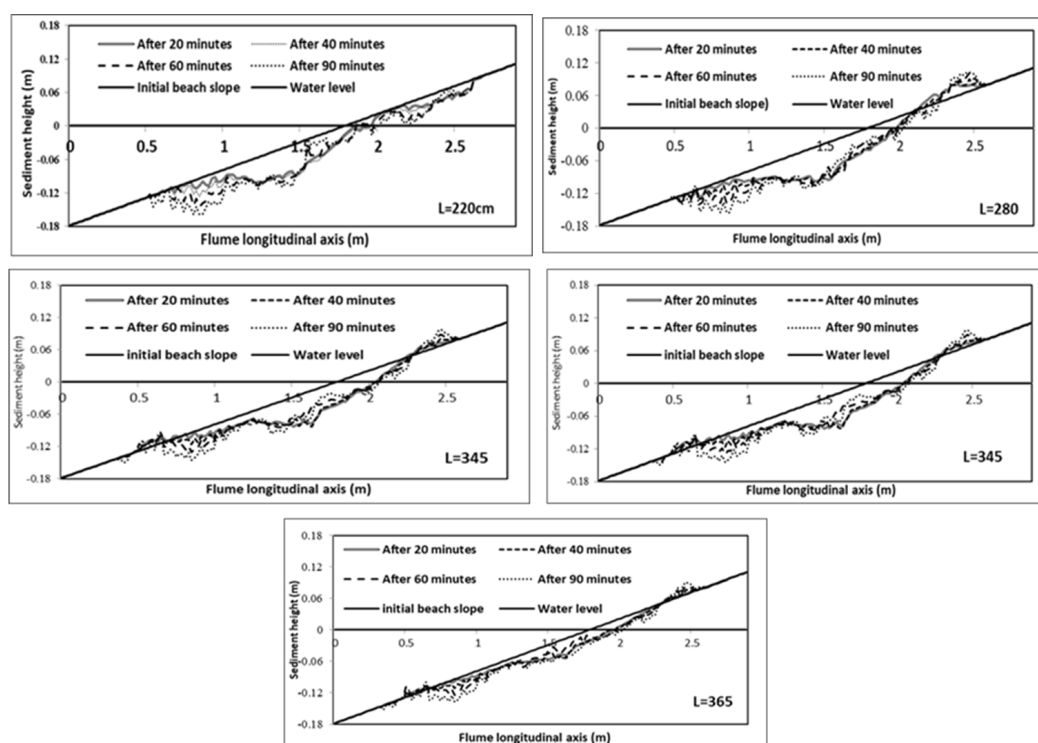


Fig. 7 The effect of continuous waves hitting the shore at different wavelengths

شکل ۷ تاثیر تداوم برخورد امواج بر ساحل در طول موج‌های مختلف تاثیر طول موج در پدیده انتقال رسوب عمود بر ساحل

با نتایج گراسمان و همکاران (۲۰۲۴) هم‌خوانی دارد که نشان دادند گذار از نیم‌رخ زمستانه به تابستانه با جابه‌جایی نقطه شکست موج و تغییر در توزیع عرضی انتقال رسوب همراه است (Grossmann et al. 2024).

در مطالعه‌ای، وانگ و همکاران (۲۰۲۳) با شبیه‌سازی امواج طوفانی در فلوم ۳۰ متری با شیب ۱:۱۰، نشان دادند که تغییرات شدید پارامترهای موج، به‌ویژه در مرحله صعودی طوفان، عامل اصلی فرسایش ساحل و افزایش اندازه پشته‌های شنی است (Wang et al. 2023).

۳-۴- تحلیل مقایسه‌ای طول موج‌ها

تاثیر همزمان طول موج‌های مختلف و زمان‌های متفاوت بر نیم‌رخ نهایی ساحل در شکل ۸ نشان داده شده است. مقایسه نتایج آشکار ساخت که طول موج پارامتر تعیین‌کننده در پایداری ساحل است، به‌گونه‌ای که با کاهش طول موج از ۳۶۵ به ۲۲۰ سانتی‌متر، پارامتر بی‌بعد تیزابی موج (H/L) افزایش یافته و در نتیجه، آشفته‌گی ناشی از شکست موج تشدید گردید. این افزایش تیزابی موج سبب

۳-۳- تاثیر تداوم زمانی بر ابعاد عوارض بستر

تغییرات توپوگرافی بستر برای طول موج ۳۲۵ سانتیمتر در چهار بازه زمانی مختلف در شکل ۹ نشان داده شده است. بررسی تغییرات زمانی نشان داد اگرچه شکل کلی توپوگرافی در یک طول موج ثابت حفظ می‌شود، اما ابعاد عوارض با افزایش زمان تابش موج تغییر می‌کند. در طول موج‌هایی که منجر به تشکیل نیم‌رخ تابستانه شدند، تداوم برخورد امواج باعث رشد تدریجی پشته‌ها گردید. براساس جدول ۵، با افزایش زمان آزمایش از ۲۰ به ۹۰ دقیقه، ارتفاع پشته‌ها افزایش یافت؛ به‌طوری‌که بیشترین ارتفاع پشته برابر با ۹/۳ سانتی‌متر در طول موج ۳۲۵ سانتی‌متر و زمان ۹۰ دقیقه ثبت گردید.

همچنین طول کشیدگی چاله با افزایش زمان آزمایش افزایش یافت. داده‌ها نشان دادند که دامنه تغییرات این پارامتر بین ۱۳۶ تا ۲۰۶ سانتی‌متر متغیر بود. این موضوع بیانگر آن است که با تداوم امواج، ناحیه شکست و برداشت رسوب به سمت آب‌های عمیق‌تر پیشروی می‌کند. این یافته

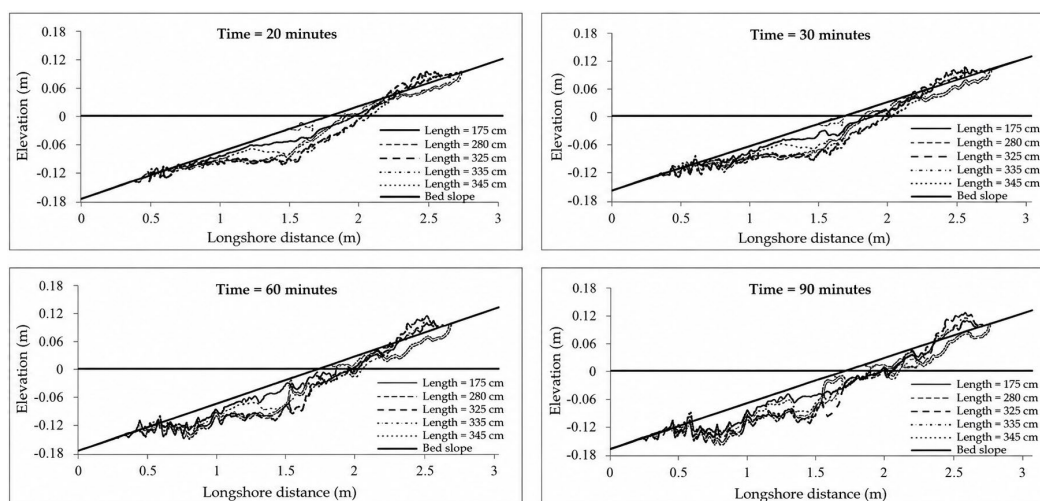


Fig. 8 The impact of different wavelengths on the coast at different times

شکل ۸ تاثیر طول موج‌های مختلف بر ساحل در زمان‌های متفاوت

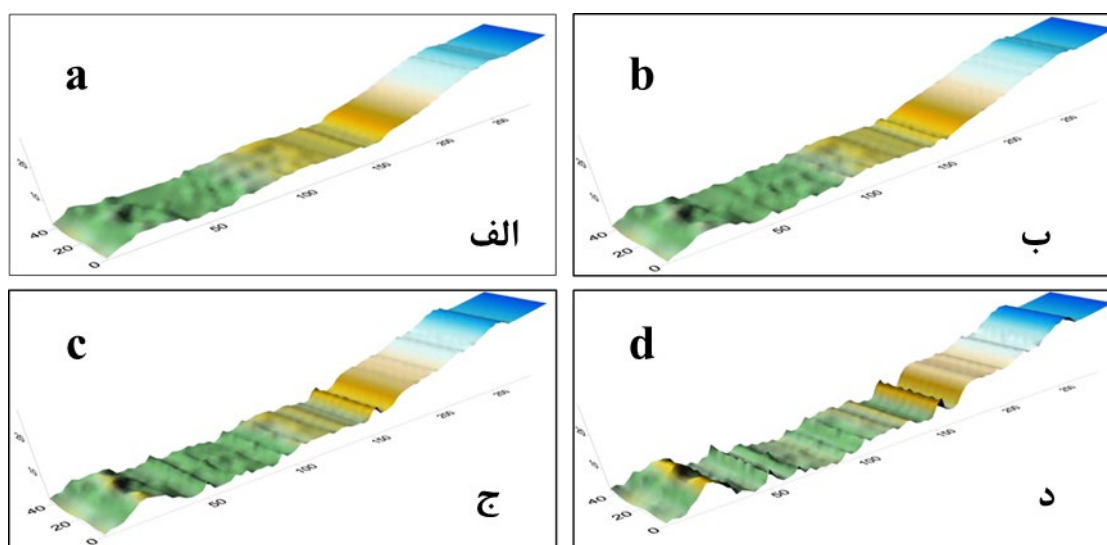


Fig. 9 Topography at wavelength 325 and times: a) 20 min, b) 40 min, c) 60 min and d) 90 min.

شکل ۹ توپوگرافی شکل بستر در طول موج ۳۲۵ و زمان‌های: الف) ۲۰ دقیقه، ب) ۴۰ دقیقه، ج) ۶۰ دقیقه و د) ۹۰ دقیقه

آشفته‌گی بیشتر، مانع از تثبیت رسوب در ناحیه خشک ساحلی می‌شوند.

۴- نتیجه‌گیری

پژوهش آزمایشگاهی حاضر با هدف بررسی اثر طول موج و تداوم زمانی آن بر تغییرات نیمرخ بستر در سواحل ماسه‌ای انجام شد. نتایج حاصل از مدل‌سازی فیزیکی در ۲۰ سناریوی آزمایشگاهی نشان داد که طول موج، پارامتر

افزایش انتقال رسوب به سمت دریا و تغییر رفتار ساحل از حالت رسوب‌گذار به تخریب‌گر می‌شود. نتایج نشان داد که کاهش طول موج، شدت تخریب ساحل را افزایش می‌دهد. در طول موج ۲۲۰ سانتی‌متر، پشته‌های ساحلی به‌طور کامل حذف شدند و محل انباشت رسوب به سمت دریا عقب‌نشینی کرد. همچنین ارتفاع پشته‌های تشکیل‌شده در سایر طول موج‌ها کاهش یافت. به عبارت دیگر، امواج بلندتر با انرژی کمتر در واحد سطح، فرصت ته‌نشینی رسوب در ساحل را فراهم می‌کنند، در حالی که امواج کوتاه‌تر با ایجاد

مدت زمان تداوم امواج در مدل‌سازی‌های تکامل نیمرخ ساحلی و مدیریت پایدار سواحل تاکید دارد. در سواحل جنوبی و شمالی ایران که همواره در معرض امواج با مشخصات متفاوت هستند، در نظر گرفتن این دو پارامتر می‌تواند به پیش‌بینی دقیق‌تر تغییرات فصلی، طراحی بهینه سازه‌های حفاظتی و کاهش خسارت‌های ناشی از فرسایش کمک کند. در مناطقی که امواج کوتاه‌دوره حاکم هستند، آگاهی از طول موج بحرانی می‌تواند مبنایی برای تعیین نوع و موقعیت سازه‌های مقابله‌کننده با فرسایش قرار گیرد.

همچنین پیشنهاد می‌شود که در مطالعات آتی، تاثیر تغییرات تراز آب بر موقعیت پشته‌ها و چاله‌های فرسایشی به‌صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گیرد؛ چراکه در شرایط طبیعی، نوسانات جزر و مدی و تغییرات سطح آب دریا می‌توانند نقطه شکست و الگوی انتقال رسوب را دستخوش تغییر کنند. همچنین شبیه‌سازی عددی سناریوهای این پژوهش با استفاده از مدل‌های مورفودینامیکی پیشرفته و مقایسه نتایج با داده‌های آزمایشگاهی، می‌تواند به کالیبراسیون و اعتبارسنجی این مدل‌ها کمک شایانی نماید.

تعیین‌کننده در تغییر وضعیت ساحل از حالت فرسایشی به رسوب‌گذار است. در طول موج‌های کوتاه، غلبه جریان‌های برگشتی ناشی از شکست موج، باعث انتقال رسوبات به سمت دریا، حذف کامل پشته‌های ساحلی و شکل‌گیری نیمرخ زمستانه گردید. در مقابل، با افزایش طول موج، جهت انتقال رسوب به سمت خشکی تغییر یافته و با تشکیل پشته‌های رسوبی مشخص، نیمرخ تابستانه حاصل شد. این یافته‌ها با نظریه نیمرخ تعادلی و مشاهدات پژوهشگران در مورد نقش امواج بلند در تثبیت سواحل هم‌خوانی داشت و نشان داد که طول موج ۲۲۰ سانتی‌متر، در شرایط آزمایشگاهی این پژوهش، به‌عنوان آستانه گذار از شرایط رسوب‌گذار به فرسایشی عمل می‌کند.

گرچه نوع نیمرخ عمدتاً تابع طول موج است، اما ابعاد عوارض بستر به مدت‌زمان تابش امواج وابسته است. تحلیل زمانی داده‌ها نشان داد که با افزایش تداوم برخورد امواج از ۲۰ به ۹۰ دقیقه، ارتفاع پشته‌های ساحلی در شرایط رسوب‌گذار و طول چاله‌های فرسایشی در هر دو شرایط، به‌طور مداوم افزایش یافت.

نتایج این پژوهش بر ضرورت توجه هم‌زمان به طول موج و

5- List of Symbols

A ($m^{1/3}$)	Balance profile scale
d (mm)	Sediment particle diameter
D_{50} (mm)	Average diameter of sediment particles
F (N)	Force acting on a wave or structure
F_r	Froude number
g (m/s^2)	Gravity acceleration
h (m)	Water depth
H (m)	Wave height
m	Bed slope
ρ_s (kg/m^3)	Sediment particle density
h_b (m)	Coastal ridge height
W_s (cm/s)	Falling velocity of sediment particles
x (m)	Horizontal distance from the shoreline
ν (m^2/s)	Kinematic viscosity of water
π_b	Bed shear stress
x,y,z (m)	Location coordinates
Ω	Dyne number
λ (m)	Linear length characteristic
t (min)	Wave duration

Acknowledgments

This research was completed with the valuable support and assistance of the officials and technicians of the laboratory of the Faculty of Civil

Engineering, Islamic Azad University, Ahvaz Branch. We would like to express our gratitude to all those who have contributed in any way to the advancement of this research.

Credit Authorship Contribution Statement

Conceptualization, M. A. L. Y., A. M., and A. M.; Methodology, M. D., M. A. L. Y., and A. M.; Software, M. D. and A. M.; Formal Analysis, M. D. and A. M.; Investigation, M. D.; Resources, M. A. L. Y. and A. M.; Data Curation, M. D.; Writing-Original Draft Preparation, M. D.; Writing-Review & Editing, M. A. L. Y., A. M., and A. M.; Visualization, M. D.; Supervision, M. A. L. Y. and A. M.; Project Administration, M. A. L. Y.

All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding

This research received no external funding. All expenses related to the experimental work were covered by the first author (M. Delfi) personally.

Data Availability Statement

The data used in this study are available upon request from the corresponding author.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Anthony EJ (2015) Wave influence in the construction, shaping and destruction of river deltas: A review Marine Geology 361:53–78. [doi:10.1016/j.margeo.2014.12.004](https://doi.org/10.1016/j.margeo.2014.12.004).
- Baldock TE, Alsina J, Cáceres I, Vicinanza D, Contestabile P, Power H, Sanchez-Arcilla A (2011) Large-scale experiments on beach profile evolution and surf and swash zone sediment transport induced by long waves, wave groups and random waves Coastal Engineering 58:214–227. [doi:10.1016/j.coastaleng.2010.10.006](https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2010.10.006).
- Chanson H, Pfister M Scale effects in modelling two-phase air-water flows. In: Proceedings of the 35th IAHR World Congress, 2013. vol A10253. TPU, pp 1–10. [doi:10.1201/9781003029694](https://doi.org/10.1201/9781003029694).
- Dean RG (1991) Equilibrium beach profiles: characteristics and applications Journal of coastal research:53–84.
- Dean RG (1995) Cross-shore sediment transport processes. In: Advances In Coastal And Ocean Engineering: (Volume 1). World Scientific, pp 159–220. [doi:10.1142/9789812797582_0004](https://doi.org/10.1142/9789812797582_0004).
- Dean RG, Dalrymple RA (1991) Water wave mechanics for engineers and scientists vol 2. world scientific publishing company. [doi:10.1142/1232](https://doi.org/10.1142/1232).
- Dionísio António S, van der Werf J, Horstman E, Cáceres I, Alsina J, van der Zanden J, Hulscher S (2023) Influence of beach slope on morphological changes and sediment transport under irregular waves Journal of marine science and engineering 11:2244. [doi:10.3390/jmse11122244](https://doi.org/10.3390/jmse11122244).
- Grasso F, Michallet H, Barthélemy E (2011) Sediment transport associated with morphological beach changes forced by irregular asymmetric, skewed waves Journal of Geophysical Research: Oceans 116. [doi:10.1029/2010JC006550](https://doi.org/10.1029/2010JC006550).
- Grossmann F, Hurther D, Sánchez-Arcilla A, Padilla EM, Alsina JM (2024) Bar and berm dynamics during transition from dissipative to reflective beach profile Coastal Engineering 192:104561. [doi:10.1016/j.coastaleng.2024.104561](https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2024.104561).
- Güner HAA (2024) Experimental investigation of flow and sediment transport on an equilibrium beach formed by surging breaker Applied Ocean Research 151:104180. [doi:10.1016/j.apor.2024.104180](https://doi.org/10.1016/j.apor.2024.104180).
- Hamlington B et al. (2024) The rate of global sea level rise doubled during the past three decades Communications Earth & Environment 5:601. [doi:10.1038/s43247-024-01748-w](https://doi.org/10.1038/s43247-024-01748-w).
- Heller V (2011) Scale effects in physical hydraulic engineering models Journal of Hydraulic Research 49:293–306. [doi:10.1080/006862011.588444](https://doi.org/10.1080/006862011.588444).
- Hieu PD, Phan VN, Nguyen VT, Nguyen TV, Tanaka H (2020) Numerical study of nearshore hydrodynamics and morphology changes behind offshore breakwaters under actions of waves using a sediment transport model coupled with the SWASH model Coastal Engineering Journal 62:553–565. [doi:10.1080/21664250.2020.1808444](https://doi.org/10.1080/21664250.2020.1808444).
- Hoque MA, Asano T, Neshaei MAL (2002) Effect of reflective structures on undertow distribution. In: Ocean Wave Measurement and Analysis (2001). pp 1042–1051. [doi:10.1061/40604105](https://doi.org/10.1061/40604105).
- Jara M, González M, Medina R (2015) Shoreline evolution model from a dynamic equilibrium beach profile Coastal Engineering 99:1–14. [doi:10.1016/j.coastaleng.2015.02.006](https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2015.02.006).
- Kamphuis JW (1991) Alongshore sediment transport rate Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering 117:624–640. [doi:10.1061/0733950X\(1991\)117:6\(624\)](https://doi.org/10.1061/0733950X(1991)117:6(624)).
- Lashte Neshaei MAaP, Ali. (2001) Investigation of the potential of scouring water on the shores of the Caspian Sea Proceedings of the International Conference on Hydraulic Structures Shahid Bahonar University, Kerman, Iran 560 to 570.
- Lashteh Neshaei MA (1998) Beach profile evolution in front of a partially reflective structure. Imperial College London (University of London)
- Luijendijk A, Hagenaars G, Ranasinghe R, Baart F, Donchyts G, Aarninkhof S (2018) The state of the world's beaches Scientific reports 8:6641. [doi:10.1038/s41598-018-24630-6](https://doi.org/10.1038/s41598-018-24630-6).
- Masselink G, Black KP (1995) Magnitude and cross-shore distribution of bed return flow measured on natural beaches Coastal Engineering 25:165–190. [doi:10.1016/0378-3839\(95\)00002-L](https://doi.org/10.1016/0378-3839(95)00002-L).
- McLachlan A, Defeo O (2023) Where will the children play? A personal perspective on sandy beaches Estuarine, Coastal and Shelf Science 280:108186. [doi:10.1016/j.ecss.2022.108186](https://doi.org/10.1016/j.ecss.2022.108186).
- Ruessink B, Ramaekers G, Van Rijn L (2012) On the parameterization of the free-stream non-linear wave orbital motion in nearshore morphodynamic models Coastal engineering 65:56–63. [doi:10.1016/j.coastaleng.2012.03.001](https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2012.03.001).
- Shim K-T, Kim K-H, Kim H-D, Kwak K-S (2020) Analysis on sediment transport system in the east coast of Korea Journal of Coastal Research 95:643–648. [doi:10.2112/SI95-125.1](https://doi.org/10.2112/SI95-125.1).

- Short AD (1999) Handbook of beach and shoreface morphodynamics. Great Britain: John Wiley; ISBN 0-471-96570-7,
- Sorensen RM (1993) Basic wave mechanics: for coastal and ocean engineers. John Wiley & Sons,
- Tierolf L, Haer T, Botzen W, Aerts J Coastal adaptation dynamics under future shoreline changes. In: EGU General Assembly Conference Abstracts, 2023. pp EGU-16808. [doi:10.5194/egusphere-egu23-16808](https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-16808).
- Vousdoukas MI, Mentaschi L, Voukouvalas E, Verlaan M, Jevrejeva S, Jackson LP, Feyen L (2018) Global probabilistic projections of extreme sea levels show intensification of coastal flood hazard Nature communications 9:2360. [doi:10.1038/s41467-018-04692-6](https://doi.org/10.1038/s41467-018-04692-6).
- Wang J, You Z-J, Liang B, Wang Z, Yang B (2023) The physical processes of sandy beach evolution under storm and non-storm wave conditions simulated in wave flume Marine Geology 462:107065. [doi:10.1016/j.margeo.2023.107065](https://doi.org/10.1016/j.margeo.2023.107065).
- Zhang Z, Liang B, Wang Z, Shi L, Borsje B (2024) Effects of wave forces on sediment transport patterns in micro-tidal estuaries Physics of Fluids 36. doi.org/10.1063/5.018788436.