

بررسی تأثیر پارامترهای محیطی در مورفولوژی کاسپ‌های ساحل بندر رودیک

Original Article

الهام ذاکری انارك (كارشناس ارشد)

امير جباري خامنه (دانشجوی دکتری)

هدهدی عجمی* (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود

احمد رضایی (دانشجوی دکتری)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس

کاسپ‌های ساحلی، پدیده‌های قوسی با فواصل منظم در ناحیه‌ی آب‌شستگی هستند که به‌صورت کوتاه‌مدت خط ساحلی را تغییر می‌دهند، اما گاهی موجب فرسایش یا رسوب‌گذاری خط ساحلی و مشکلات رسوبی برای سازه‌ها خواهند شد. بنابراین بررسی کاسپ‌ها می‌تواند برنامه‌ریزی برای پروژه‌ها و مدیریت سواحل را تکمیل کند. در پژوهش حاضر، هدف بررسی پارامترهای اثرگذار در کاسپ‌های بندر رودیک واقع در سواحل مکران ایران بوده و برای این منظور نرم‌افزار MIKE ماژول BW برای مدل‌سازی و یک مدل آزمایشگاهی معتبر برای کالیبراسیون مدل‌سازی عددی استفاده شده است. اطلاعات مربوط به ساحل مطالعاتی نیز وارد مدل نرم‌افزاری شد و نتایج آن تحلیل و ارائه شد. مطابق نتایج افزایش دوره‌ی تناوب، ارتفاع موج و کاهش شیب ساحل، موجب رشد کاسپ‌ها و افزایش فواصل بین آن‌ها می‌شود. تحت اثر طوفان‌های اقیانوسی، عملکرد جریان سواش در ساحل رودیک، فرسایشی و برای طوفان‌های مونسونی، رشد رسوبی است. در بررسی تئوری‌های موج لبه‌یی و خودتشکیل می‌توان گفت در سناریوی طوفان‌های اقیانوسی، تئوری موج لبه‌یی و در سناریوی طوفان‌های مونسونی، تئوری خودتشکیل حاکم است.

elham.zakeri.a@gmail.com
amir.jabarikh@gmail.com
adjami@shahroodut.ac.ir
rezaee_ahmad@yahoo.com

واژگان کلیدی: کاسپ‌های ساحلی، MIKE ۲۱ ماژول BW، تئوری موج لبه‌یی، تئوری خودتشکیل، بندر رودیک.

۱. مقدمه

در سواحل، عارضه‌های رسوبی زیادی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به سد ماسه‌یی^۱، سکو یا پشته، تپه ماسه‌یی^۲، صخره^۳ و کومه‌ی هلالی، یا کاسپ اشاره کرد. کاسپ‌های ساحلی^۴، پدیده‌های مورفولوژیک^۵ یا ریخت‌شناسی روی سطح ساحل هستند که شاخ‌هایی^۶ به سمت دریا با شیب تند و رسوب‌های درشت‌دانه و فوررفتگی‌هایی^۷ با شیب ملایم و رسوب‌های ریزدانه دارند. کاسپ‌ها در بیشتر مواقع با جریان‌های ناحیه‌ی آب‌شستگی یا سواش شکل می‌گیرند و به‌صورت همساز و منظم موازی ساحل مشاهده می‌شوند.^[۱]

کاسپ‌ها در برخی سواحل مشاهده می‌شوند و نحوه‌ی شکل‌گیری و به‌خصوص شکل‌های منظم آن‌ها همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است. کاسپ‌ها می‌توانند به‌صورت کوتاه‌مدت شکل خط ساحلی را تغییر دهند، اما اگر عمق و ارتفاع فوررفتگی آن زیاد شود، موجب فرسایش خط ساحلی می‌شود و اگر رسوب‌گذاری در قسمت

در برخی مطالعات، طیف وسیعی از تئوری‌های متناقض برای شکل‌گیری، پیکربندی و حفظ کاسپ‌های طبیعی ساحلی مطرح شده‌اند. در واقع، هر ایده درخصوص کاسپ‌ها که در مطالعاتی مطرح شده‌اند، ممکن است در پژوهش‌های دیگری نقض شده باشد. به‌عنوان نمونه، در مورد آثار رسوب‌گذاری و فرسایش گفته شده است که کاسپ‌ها ویژگی‌های باقی‌مانده از یک فرایند فرسایشی هستند،^[۲] و با ویژگی‌های پدیدار شده در اثر رشد رسوبی هستند،^[۳-۷] و با عوارض به وجود آمده در اثر فرایندهای فرسایشی و رشد رسوبی هستند.^[۸-۱۲] در مورد فواصل کاسپ‌ها نیز ذکر شده است که فواصل کاسپ‌ها منظم،^[۱۳] و یا غیرمنظم،^[۱۴] هستند. همچنین

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۶/۱۱، اصلاحیه ۱۳۹۶/۱۰/۱۰، پذیرش ۱۳۹۷/۲/۴.

DOI:10.24200/J30.2018.2261.2152



شکل ۲. موقعیت حدودی نقطه‌ی رودیک در سواحل دریای عمان (Google Earth).

تئوری خودتشکیل: مدل خودتشکیل توسط ورنر و فینک (۱۹۹۳) مطرح شد. نظریه‌ی مذکور، دو نکته‌ی اصلی دارد. بازخورد مثبت بین مورفولوژی ساحل و جریان آب، الگوهای پستی و بلندی در سطح ساحل ایجاد می‌کند. مناطق با الگوهای پست‌تر موجب سقوط ذرات آب و سرعت و انرژی بالاتر ذرات می‌شوند و این انرژی آب، سطح ساحل را فرسوده می‌کند که باعث به وجود آمدن قسمت فرورفتگی کاسپ‌ها می‌شود. بازخورد منفی، مقدار فرسایش و رسوب‌گذاری را کاهش می‌دهد. وقتی موج با شاخ برخورد می‌کند، انرژی از دست می‌دهد و رسوبات ته‌نشین می‌شوند. از دست دادن رسوب‌های ته‌نشین‌شده یک انرژی اضافی به آب می‌دهد که موجب برداشت رسوب‌ها از فرورفتگی کاسپ در بازگشت موج می‌شود. نتایج حاصل از مدل خودتشکیل رابطه‌ی ۳ را پیش‌بینی می‌کند:

$$\lambda_c = f S_e \quad (3)$$

که در آن، λ_c فواصل بین کاسپ‌ها، S_e گردش سواش (فاصله‌ی افقی بین بیشترین پیشروی و پسروی جریان سواش در سواحل یا حد فاصل عمودی بالاروی و بازگشت) و f یک پارامتر هندسی در محدوده‌ی ۱ تا ۳ است. [۲۹،۸] در طول مطالعات و بررسی‌ها، ارتباطی محکم بین فواصل کاسپ‌ها و طول گردش سواش مشاهده شد که از نظریه‌ی خودتشکیل حمایت می‌کرد. همچنین مشخص شد شکل‌گیری کاسپ‌ها با تئوری خودتشکیل تطابق بهتری دارد. [۳۰،۲۵،۲۵،۱۶،۱۴،۹،۷،۶] از طرف دیگر، در مطالعات دیگری نشان داده شده است که فواصل و شکل‌گیری کاسپ‌ها با تئوری موج لبه‌یی ارتباط دارند. [۳۲،۲۷،۱۵،۸،۱] اما سایر بررسی‌ها نشان داده است که هر دو نظریه در شکل‌گیری و فواصل کاسپ‌ها قابل قبول هستند. [۳۰،۱۰،۳] با توجه به مطالعات صورت گرفته در زمینه‌ی کاسپ‌ها مشاهده می‌شود که پایه‌ی اصلی مطالعات، بررسی عملکرد دو تئوری پذیرفته شده برای شکل‌گیری کاسپ‌هاست. به طور کلی پارامترهای دخیل در شکل‌گیری کاسپ‌ها، شیب ساحل، مقادیر بالاروی موج و نوع و مشخصات موج منطقه و پارامترهای اثرگذار در اندازه و فواصل کاسپ‌ها مطابق تئوری موج لبه‌یی، دوره‌ی تناوب موج و شیب ساحل و مطابق تئوری خودتشکیل، طول سواش است. [۳۳]

معرفی منطقه: منطقه‌ی رودیک در دهستان نگور از بخش دشتیاری، در ۴۰ کیلومتری شهرستان چابهار استان سیستان و بلوچستان واقع شده است و بندر بریس و بندرریمین نزدیک‌ترین بنادر معروف به بندررودیک هستند. تصویر مربوط به موقعیت منطقه‌ی رودیک در سواحل دریای عمان در شکل ۲ مشاهده می‌شود.



شکل ۱. کاسپ‌های ساحلی (سایت کالج hunter).

درباره‌ی نقش مورفودینامیک گفته شده است که گردش آب با مورفولوژی کاسپ توسط جریانی که از شاخ به فرورفتگی می‌رود، [۱۵،۱۴] و یا از فرورفتگی به شاخ کاسپ می‌رود، [۱۷،۱۶] در ارتباط است و وجود کاسپ‌های بزرگ به شکل‌گیری تپه‌های ماسه‌یی مربوط است. [۲۰-۱۸]

همچنین در کاسپ‌ها تفاوت بافت خاک بین شاخ و فرورفتگی وجود دارد، [۱۷،۱۳] و یا وجود ندارد. [۲۱،۱۴] در مورد شرایط امواج و جزر و مد نیز ذکر شده است که کاسپ‌ها در شرایط امواج با انرژی زیاد توسعه می‌یابند، [۲۰،۲۲،۲۳] و یا در شرایط آرام، بهتر شکل می‌گیرند، [۲۴] و کاسپ‌ها تحت تأثیر امواج ورودی موازی ساحل توسعه می‌یابند. [۲۵] همچنین رشد کاسپ‌ها با زاویه‌ی شکست موج ورودی نرمال مرتبط است، [۲۶،۲۲،۱۰] و یا با موج ورودی مورب مرتبط است. [۲۷،۲] همچنین بازخورد مورفودینامیکی نسبت به نیروهای هیدرودینامیکی نقش برجسته‌تری دارد، [۱۱] و یا برعکس، هیدرودینامیک نقش مهم‌تری دارد، [۲۷] و جزر و مد در شکل‌گیری کاسپ‌ها مؤثر است. [۱۸،۱۰،۷،۵] بسیاری از ایده‌های بیان شده اثبات یا سپس نقض شده‌اند، اما با وجود مجموعه‌ی آشکاری از دیدگاه‌های متضاد به نظر می‌رسد که بسیاری از سردرگمی‌ها در مطالعات، تا حد زیادی ناشی از ماهیت توصیفی و کیفی مطالعات و بررسی‌ها انجام شده است.

همان‌طور که ذکر شد، دیدگاه‌ها در مکانیزم‌های منجر به تولید کاسپ‌ها متفاوت بوده است اما به طور کلی دو نظریه‌ی: موج لبه‌یی [۹] ایستاده (گزا و اینمان ۱۹۷۵) و خودتشکیل [۱۰] یا خودسامان (ورنر و فینک ۱۹۹۳، [۲۸]) برای توصیف شکل‌گیری و رفتار کاسپ ساحلی پذیرفته شده‌اند.

تئوری موج لبه‌یی: امواج لبه‌یی، امواج پرویدیک با بسامد کم هستند، که موازی ساحل حرکت می‌کنند و نزدیک ساحل به دلیل انکسار به دام می‌افتند. وقتی دو موج لبه‌یی از دو جهت مخالف گرد هم می‌آیند، موج لبه‌یی ایستاده تشکیل می‌شود. هنگامی که یک موج لبه‌یی ایستاده بر روی یک موج ورودی انطباقی یابد، تغییرات سیستماتیک موازی ساحل در ارتفاع سواش ایجاد می‌شود و یک اختلال فرسایشی منظم منجر به تشکیل الگوی دندانیه‌یی کاسپ‌ها می‌شود. روابط ۱ و ۲، برای فواصل کاسپ‌ها ارائه شده‌اند که در آن‌ها، λ_c فواصل بین کاسپ‌ها، T دوره‌ی تناوب موج ورودی، $\tan \beta$ شیب ساحل و g شتاب گرانشی است.

$$\lambda_c = \frac{g}{\pi} T^2 \tan \beta \quad (1)$$

$$\lambda_c = \frac{g}{\pi} T^2 \tan \beta \quad (2)$$

رابطه‌ی ۱، برای امواج لبه‌یی هارمونیک [۱۲] (دوره‌ی تناوب موجی دو برابر موج ورودی) و رابطه‌ی ۲، برای امواج لبه‌یی همزمان [۱۳] (دوره‌ی تناوب موج ورودی مساوی دوره‌ی تناوب موج لبه‌یی)، هستند. [۲۸]

ماژول موج بوزینسک یک بعدی^{۱۶} که در پژوهش حاضر به کار رفته است، معادلاتی به این شرح دارد: دو نوع معادلات، معادلات بوزینسک کلاسیک و معادلات بوزینسک پیشرفته در ماژول BW وجود دارد. معادلات بوزینسک کلاسیک هنگامی استفاده می‌شود که نسبت بیشینه عمق آب به طول موج آب عمیق (h_{max}/L_0) کمتر از ۰/۲۲ باشد. معادلات بوزینسک پیشرفته که شامل مؤلفه‌های آب عمیق است، به مدل اجازه می‌دهد که تحت شرایط آب عمیق‌تر و دوره‌ی تناوب موج کوچک‌تر مثلاً برای نسبت $h_{max}/L_0 = 0/5$ توسعه یابد. تفاوت معادلات بوزینسک کلاسیک و پیشرفته در تعدادی مؤلفه‌ی تصحیح شده است که مؤلفه‌های آب عمیق گفته می‌شود. محدودیت عمده‌ی معادلات بوزینسک کلاسیک، محدودیت آب کم عمق (نسبت h_{max}/L_0) است. راهنمای نرم‌افزار تأکید می‌کند ماژول یک بعدی نیازمند در نظر گرفتن مؤلفه‌های آب عمیق است. با توجه به شرایط موج منطقه و مدل یک بعدی، شرایط آب عمیق حاکم است، که در مدل استفاده شده است.

یکی از مسائل مهم در هنگام حل معادلات از نوع بوزینسک با استفاده از روش اجزاء محدود، حضور مشتق‌ها با مراتب بالاست. این مسئله در پژوهش حاضر با استفاده از روشی که در آن معادلات از نوع بوزینسک با معرفی متغیر کمکی جدید w و یک معادله‌ی جبری کمکی در مرتبه‌ی پایین‌تر نوشته می‌شوند، کنترل شده است. معادلات حاکم به صورت معادلات ۴ الی ۶ هستند:^[۶]

$$n \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

$$w = \frac{\partial}{\partial x} \left(d \frac{\partial \xi}{\partial x} \right) \quad (5)$$

$$\begin{aligned} n \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P^2}{h} \right) + \frac{\partial R_{xx}}{\partial x} + n^2 gh \frac{\partial \xi}{\partial x} \\ - n \left(B + \frac{1}{3} \right) d^2 \frac{\partial^2 P}{\partial x \partial x \partial t} - \frac{1}{3} d \frac{\partial d}{\partial x} \frac{\partial^2 P}{\partial x \partial t} \\ - n^2 B g d^2 \frac{\partial w}{\partial x} + n^2 P \left[\alpha + \beta \frac{|P|}{h} \right] \\ + \frac{gP|P|}{h^2 C^2} = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

که در آن، R_{xx} از رابطه‌ی ۷ به دست می‌آید:

$$R_{xx} = \frac{\delta}{\sqrt{1 - \delta/d}} \left(c_x - \frac{P}{d} \right)^2 \quad (7)$$

در روابط اخیر، پارامترها عبارت‌اند از: p : چگالی انرژی در جهت x (m/sec)، B عامل پراکنندگی بوزینسک، x دستگاه مختصات دکارتی (m) ، t : زمان (sec)، d : عمق کلی آب ($h + \xi$) بر حسب (m) ، h : عمق ایستایی سطح آب (m) ، g : شتاب گرانشی ($9.81 m/s^2$)، n : ضریب تخلخل، C : عدد مقاومت شزی ($m^{2/3}/sec$)، α : ضریب مقاومت برای جریان نازک در لایه‌های متخلخل، β : ضریب مقاومت برای جریان متلاطم در لایه‌های متخلخل، ξ : میزان سطح آب بالای مبدأ (m) ، δ : ضخامت سطح استوانه و C_x : مؤلفه‌ی سرعت استوانه. تعدادی از پارامترها در شکل ۳ مشاهده می‌شوند.

معادلات شامل آثار شکست موج بر اساس مفهوم غلتک‌های سطحی هستند. مفهوم غلتک سطحی فرض می‌کند که اثر شکست موج می‌تواند با اعمال حجمی از آب (غلتک) در جلوی موج (از لحظه‌ی شکستن) با سرعت موج c مدل شود.^[۳۵] پارامترهای c_x و c_y اجزاء سرعت غلتک^{۱۷} یا موج هستند که متناسب با سرعت خطی آب کم عمق هستند؛ δ : ضخامت غلتک است که برابر ارتفاع آب از تراز سطح

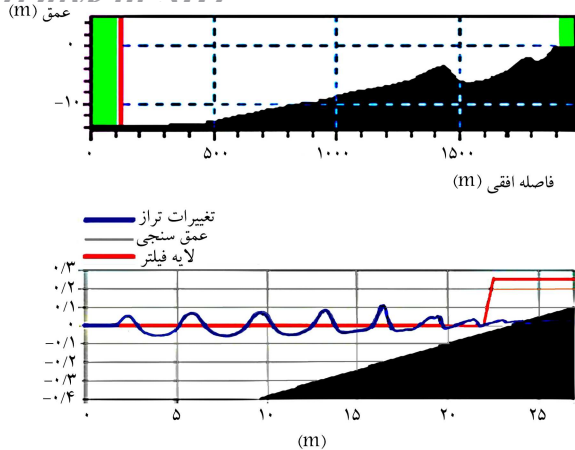
سواحل مورد مطالعه در منطقه‌ی رودیک، جزء سواحل مونسون^{۱۴} هستند که ویژگی‌های آنجا عبارت از: امواج مونسونی با ارتفاع کمتر از ۳ متر، عمق آب در نزدیکی ساحل ۳ تا ۴ متر، سطح ساحلی با ماسه‌ی متوسط خوب دانه‌بندی شده^{۱۵}، شیب بستر ملایم، رسوب در بنادر و بسته شدن دهانه‌ی رودخانه‌ها با توجه به الگوی فصلی امواج و شرایط بارش است.^[۳۴] اما به دلیل اینکه جمله‌ی «عمق آب در نزدیکی ساحل ۳ تا ۴ متر» جمله‌ی عمومی است، که برای رودیک با احتساب شیب در ناحیه‌ی ساحلی $1:6$ ، عمق ۳ تا ۴ متری آب در فاصله‌ی تقریباً ۱۸ تا ۲۴ متر خط ساحلی وجود دارد. در این منطقه دو نوع طوفان اصلی در طول سال رخ می‌دهد که به ترتیب طوفان‌های اقیانوسی و مونسونی هستند. طوفان‌های مونسونی جریان‌های بر خاسته در روی شبه قاره‌ی هند عمدتاً دارای ارتفاع امواجی بین $1/5$ تا $2/75$ متر و دوره‌ی تناوب در حدود 10 تا 13 ثانیه هستند. طوفان‌های اقیانوسی از قطب جنوب و در مسیر اقیانوس هند آغاز می‌شوند و با رسیدن به سواحل مکران، شرایط امواج بلند را پیدا می‌کنند، که دارای طول موج‌های بلند و دوره‌های تناوب بالا هستند. ارتفاع امواج طوفان‌های اقیانوسی از $0/25$ تا $1/0$ متر و دوره‌ی تناوب آن‌ها از 16 تا 18 ثانیه تغییر می‌کند. از اطلاعات موج منطقه نیز در جهت انتخاب سناریوهای مدل‌سازی استفاده شد. همچنین بررسی‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که ساحل رودیک زیرمجموعه‌ی سواحل امواج حاکم است و این منطقه در زمهره‌ی سواحل پرنرزی قرار دارد.

همان‌طور که ذکر شد، پژوهش‌های مختلفی در رابطه با کاسپ‌ها و عوامل مؤثر در شکل‌گیری و تغییر آن‌ها انجام شده است، اما عمده کارهای انجام شده‌ی آزمایشگاهی یا پژوهش‌ها و بررسی‌های میدانی بوده است که بررسی حساسیت شکل‌گیری کاسپ‌ها نسبت به پارامترهای مختلف در آن‌ها به‌درد انجام گرفته است. در ایران پژوهش‌های مذکور بسیار محدود است که آن موارد در حد معرفی کاسپ‌هاست. در مطالعه‌ی حاضر، ضمن بررسی و شناخت پارامترها و متغیرهای دخیل در شکل‌گیری، توسعه و تغییر کاسپ‌ها، پارامترهای تأثیرگذار در کاسپ‌ها مشخص خواهد شد.

سیس از یک مدل آزمایشگاهی معتبر برای کالیبراسیون مدل‌سازی استفاده و سناریوها و نتایج تحلیل حساسیت‌سنجی پارامترهای دخیل در تشکیل و تغییر کاسپ‌ها ارائه شده است. پس از آن مدل‌سازی بخشی از ساحل رودیک انجام و سناریوهای مدل واقعی به همراه بررسی نتایج آن بیان شده است. انتظار می‌رود الگوی تغییرات کاسپ‌ها در مدل واقعی با مدل آزمایشگاهی مطابقت داشته باشد.

۲. مدل‌سازی عددی MIKE۲۱-BW

پدیده‌های دریایی، پیچیدگی‌های بسیاری دارند، برای بررسی و پیش‌بینی عوامل مؤثر در الگوهای حاکم دریا در مقیاس بزرگ می‌توان با مطالعات میدانی درازمدت و با صرف هزینه‌های بسیار و یا استفاده از نرم‌افزارهای قدرتمند، مدل‌سازی انجام داد. در پژوهش حاضر، از نرم‌افزار MIKE جهت مدل‌سازی و تحلیل استفاده شده است، چرا که نرم‌افزار MIKE، یکی از قوی‌ترین نرم‌افزارهای صنعتی و پژوهشی در زمینه‌ی مدل‌سازی پدیده‌های دریایی است. ماژول استفاده شده در نرم‌افزار مذکور، MIKE۲۱-BW است، زیرا ماژول MIKE۲۱-BW، قابلیت مدل‌سازی تأثیر امواج در ناحیه‌ی شستگی را دارد.



شکل ۵. شرایط مرزی و ساختار مدل یک بعدی BW (راهنمای ماژول BW). (۲۰۱۲).

جدول ۱. سناریوها برای مدل آزمایشگاهی.

اسلات			عمق	عرض	هموارسازی	اصطکاک	موارد
عمق	عرض	هموارسازی					
۰	۱۰۰	۰/۰۰۱	-۱/۵				Case ۱+۱
۰	۱۰۰	۰/۱	-۱/۵				Case ۱+۲
۰	۱۰۰	۰/۰۰۱	-۲/۱۰				Case ۱+۳
۰	۱۰۰	۰/۰۰۱	-۲/۱۰				Case ۱+۴
۰	۱۰۰	۰/۰۰۱	-۲/۱۰				Case ۱+۵

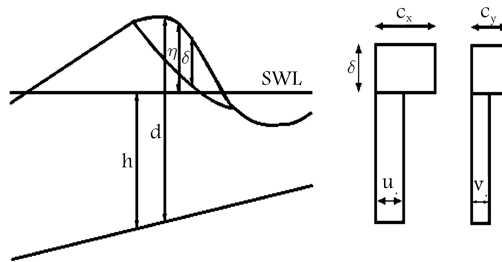
موارد	زاویه‌ی شکست		رولر		قطع رولر
	آخرین	نخستین	شکل	سرعت	
Case ۱+۴ (t _۱)	۱۰°	۲۲°	۱/۳	۱/۵	T/۵ = ۰/۲۱
Case ۱+۵ (t _r)	۱۰°	۲۲°	۱/۳	۱/۵	۰/۲۱

۲.۲. سناریوهای ساخت مدل آزمایشگاهی

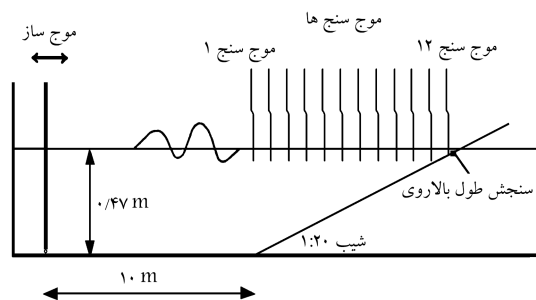
در نوشتار حاضر، نتایج کالیبراسیون $f_m = 1 \text{ Hz}$ و $\Delta = 5 \text{ cm}$ ذکر شده است که Δ فواصل بین قطعات نیمرخ بستر یا اندازه‌ی مش یک‌بعدی است. در جدول ۱، سناریوهای طرح شده برای مدل ارائه شده است. سناریوهای (Case ۱+۴) و (Case ۱+۵) در دو بخش تغییرات خط ساحلی^{۲۴} و شکست موج^{۲۵} تغییرات هم‌زمان اعمال شده‌اند. همچنین در تمامی اجراهای انجام شده، ۱۵۰۰ گام زمانی برای تعادل مدل^{۲۶} لحاظ شده است. تغییرات خط ساحلی و شکست موج دو پارامتری هستند، که با تغییر آن کالیبراسیون انجام شده است.

۳.۲. نتایج کالیبراسیون ماژول BW

با مقایسه‌ی همه‌ی سناریوها مشاهده شد که سناریوی Case ۱+۳ ویژگی‌های مدل کالیبره شده را دارد. در متن آزمون آزمایشگاهی اشاره شده است که نتایج مدل‌سازی در دو موج سنج WG ۱ و WG ۸ با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است، این نقاط به ترتیب کدهای ۳۳۸ و ۳۵۸ دارند (شکل‌های ۶ و ۷). با مقایسه‌ی شکل‌های ۶ (الف) و (ب) مشاهده می‌شود که مقادیر ارتفاعی در قعر، بیشینه‌ی ۰/۰۲- و در قله، بیشینه‌ی ۰/۲۹+ است، که در مدل‌سازی و آزمون آزمایشگاهی بسیار نزدیک به یکدیگر مشاهده می‌شوند.



شکل ۳. مفهوم سطح استوانه: برش عرضی از شکست موج و پروفیل عمودی فرضی از اجزاء افقی مؤلفه‌های سرعت.



شکل ۴. فلوم آزمایشگاهی میس (Mase, ۱۹۹۴).

آب تا خط مماس شیب موج است؛ و پارامترهای u و v توزیع سرعت ذرات در عمق در جهت x و y هستند.^[۳۵]

۱.۲. کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل

نوشتار مورد استفاده برای کالیبراسیون در پژوهش حاضر، نوشتار بررسی امواج دینامیک غیرخطی در محدوده‌ی شکست است، که توسط سورنسن^{۱۸}، مدسن^{۱۹} و جفر^{۲۰} در سال ۱۹۹۷ مطالعه شده است. نوشتار مذکور همچنین جهت کالیبراسیون ماژول BW MIKE استفاده شده و در قسمت راهنمای نرم‌افزار به آن ارجاع شده است.^[۳۶]

در نوشتار حاضر، فلوم آزمایشگاهی میس^{۲۱} (۱۹۹۴)، با طول ۱۰ متر به صورت مستقیم، عمق آب ۰/۴۷ متر و طول ۱۲ متر با شیب ۱/۲۰ به کار برده شده است (شکل ۴). موج‌سنج در عمق‌های ۰/۴۷، ۰/۳۵، ۰/۳۰، ۰/۲۵، ۰/۲۰، ۰/۱۷۵، ۰/۱۵، ۰/۱۲۷۵، ۰/۱۰، ۰/۷۵، ۰/۵ و ۰/۲۷۵ سانتی‌متر کار گذاشته شده و با نام‌های WG ۱ تا WG ۱۲ معرفی شده‌اند. برای کالیبراسیون، طبق آنچه در نوشتار حاضر انجام شده است، از داده‌های WG ۱ و WG ۱۰ استفاده شده است. همچنین بر روی دو بسامد $f_1 = 0/95 f_m$ و $f_2 = 1/05 f_m$ تمرکز شده است که در آن f_m بسامد میانگین است و اعداد $\alpha_1 = \alpha_2 = 0/025 \text{ m}$ هرگز با دامنه‌ی ۱/۲ و ۱/۰، ۰/۸، ۰/۶، ۰/۵، ۰/۴، ۰/۳ در نظر گرفته شده‌اند. البته در نوشتار حاضر، نمودارهای مربوط به بسامدهای ۰/۶ و ۱/۰ نشان داده شده است.^[۳۷،۳۸] در مرز ورودی مدل و در ساحل از لایه‌ی اسپانچ^{۲۲} استفاده شده است که وظیفه‌ی آن حذف ناپایداری‌هایی است که به سبب بازگشت موجی که رو به عقب به سمت مرز مدل حرکت کرده و همچنین پایان موجی که به ساحل رسیده است، ایجاد شده‌اند. لایه‌ی فیلتر^{۲۳} نیز که در سمت ساحل واقع شده است، وظیفه‌ی حذف بسامدهای بالا در مدل را که عامل ناپایداری هستند، بر عهده دارد و همچنین سبب جلوگیری از منفی شدن عمق در زمان رسیدن موج به ساحل می‌شود. مدل‌های استفاده شده در پژوهش حاضر، ساختاری به شکل ۵ دارند.

آزمایشگاهی و مدل بندر رودیک در بازه ۰/۱ تا ۰/۲۵ متر متغیر بوده و توسط نرم افزار محاسبه شده است. در انتها، در خصوص تأثیر فواصل مش انتخابی در همگرایی، نتایج در پژوهش حاضر بررسی شده است. نتایج در بخش مدل آزمایشگاهی مربوط به فلوم مدسن با ابعاد ۲/۵، ۵/۰ و ۱۰/۰ سانتی متر نشان می دهد که مقادیر بالای ۵ سانتی متر در تغییرات تراز ارتفاعی ناشی از امواج (مطابق با نمودارهای بخش صحت سنجی مدل عددی) به لحاظ مقداری، اختلاف زیادی پیدا خواهند کرد؛ ولی در خصوص مقادیر کمتر از ۵ سانتی متر، مقادیر ارتفاعی اختلاف بسیار ناچیزی دارند؛ از طرفی، در مقادیر کمتر از ۵ سانتی متر اختلاف فاز زمانی در نمودارها به وجود آمده است، لذا مقدار ۵ سانتی متر برای مش، بهترین مقدار است. همچنین این تذکر لازم است که در مازول در بخش Model Setup Planner با وارد کردن اطلاعات ساحل مورد بررسی و شرایط امواج، زمان مدل سازی و فواصل مش مورد استفاده متناسب و دقیق جهت مدل سازی مشخص می شود، که در بخش کنونی هم مقدار ۵/۲۵ سانتی متر پیشنهاد شده است که مقدار به دست آمده در بخش صحت سنجی را تأیید می کند. همچنین به کمک بخش مذکور از نرم افزار، بهینه ی مقدار فاصله ی مش ها در مدل واقعی بندر رودیک، که در ادامه ارائه شده است، محاسبه شده است.

۳. نتایج و بحث

۳.۱. تحلیل حساسیت مدل آزمایشگاهی

در بخش حاضر با استفاده از فلوم آزمایشگاهی مدسن و تغییر در پارامترها، تحلیل حساسیت انجام شده است. بدین صورت با مطالعه ی کارهای آزمایشگاهی پیشین، که در راستای آزمون آزمایشگاهی و مشخصات فلوم مدسن هستند، تغییرات پارامترها بررسی و با عنوان گراف های حساسیت سنجی بیان شده است. تغییر شیب فلوم، ارتفاع امواج، دوره ی تناوب امواج، نوع موج ورودی، و سایر عوامل تأثیرگذار و تأثیر تغییرات مذکور در مورفولوژی کاسپ ها بررسی شده است.

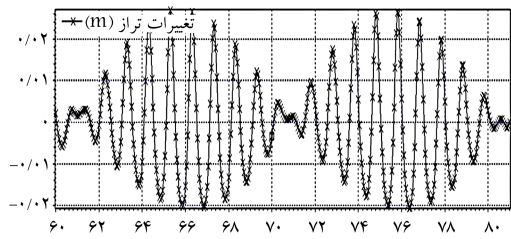
-- پارامترهای مورد بررسی:

(الف) سناریوهای تغییر شیب: هدف از انتخاب شیب در آنالیز حساسیت، مشاهده ی تأثیر تغییر شیب در ابعاد و اندازه ی کاسپ ها است. شیب فلوم آزمایشگاهی که براساس آن مدل کالیبره شده است، برابر با ۱:۲۰ است، پس می توان شیب های ۱:۱۰، ۱:۲۰، ۱:۳۵، ۱:۵۰، ۱:۶۰ را به مدل پیش فرض آزمایشگاهی اعمال و نتایج را بررسی کرد.

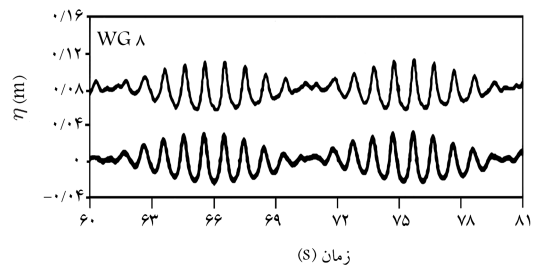
(ب) سناریوهای تغییر ارتفاع موج: مطابق آزمایشی که آنوکی^{۲۷} و سونامورا^{۲۸} (۲۰۰۰) انجام داده اند، تغییر ارتفاع موج در فواصل بین کاسپ ها و طول شاخ کاسپ اثرگذار است. بنابراین با تغییر دادن منطقی و اصولی H ، پارامتر H بررسی شده است. می توان مقادیر ۲/۵، ۷، ۸/۵ و ۱۰ سانتی متر را برای H در تحلیل حساسیت در نظر گرفت.^[۳۸]

(پ) سناریوهای تغییر دوره ی تناوب یا بسامد: مطابق آزمایش آنوکی و سونامورا (۲۰۰۰) و آزمایش سانچز و همکاران^{۲۹} (۲۰۰۸)، با افزایش دوره ی تناوب، اندازه ی کاسپ ها بزرگ تر می شود. مسئله ی فعلی با تغییر منطقی و اصولی بسامد که مطابق تغییر دوره ی تناوب است، تحلیل حساسیت با بسامدهای ۱/۲، ۱/۰، ۰/۸ و ۰/۶ هرگز بررسی شده است.^[۳۸،۲۴]

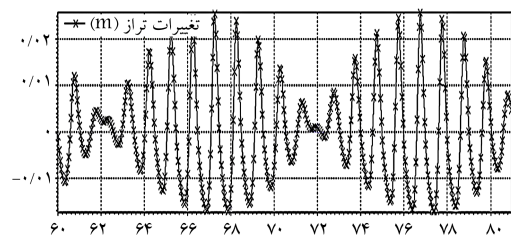
(ت) سناریوهای تغییر نوع امواج: مورد بعدی، مسئله ی نوع امواج، با یکروماتیک^{۳۰}، منظم^{۳۱} و نامنظم^{۳۲} است. مطابق آزمایشی که میس (۱۹۹۴) با امواج با یکروماتیک، کوکس و همکاران^{۳۳} (۱۹۹۲) با امواج نامنظم و مدسن (۱۹۹۷) با امواج منظم



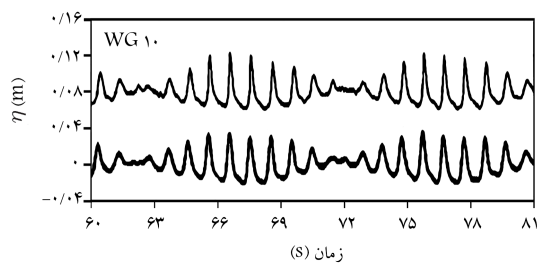
الف) خروجی تغییرات تراز سطح آب، مدل سازی در کد ۳۵۸



ب) خروجی تغییرات تراز سطح آب تست آزمایشگاهی در کد ۳۵۸. شکل ۶. مقایسه ی خروجی ها در موج سنج WG 8.



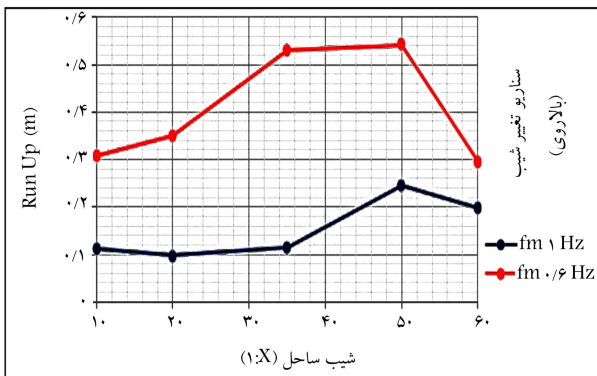
الف) خروجی تغییرات تراز سطح آب، مدل سازی در کد ۳۵۸



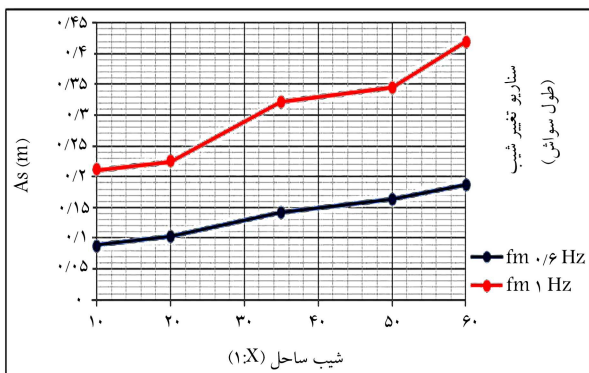
ب) خروجی تغییرات تراز سطح آب تست آزمایشگاهی در کد ۳۵۸. شکل ۷. مقایسه ی خروجی ها در موج سنج WG 10.

با مقایسه ی شکل های ۷ (الف و ب) نیز مشاهده می شود که مقادیر ارتفاعی در قعر، بیشینه ی ۰/۱۴- و در قله، بیشینه ی ۰/۳۰ سانتی متر است، که در مدل سازی و آزمون آزمایشگاهی بسیار نزدیک به یکدیگر مشاهده می شوند. با کاهش مقادیر عمق اسلات، مقادیر تغییرات تراز ارتفاعی نیز کاهش پیدا می کنند. همچنین پارامتر عرض اسلات در تغییرات فازی نتایج تأثیرگذار است، که با کاهش معادل ۰/۱ مقادیر پیش فرض MIKE، آزمون آزمایشگاهی و نتایج مدل سازی با تقریب بسیار خوبی هم فاز شدند. با توجه به موارد مطرح شده، مدل MIKE یک بعدی BW کالیبره است.

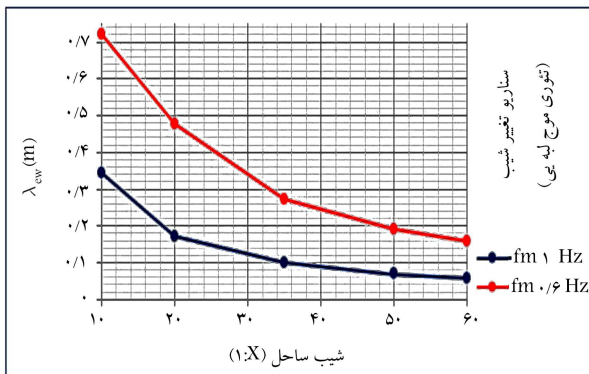
در خصوص همگرایی روش عددی نیز ذکر شده است که نرم افزار با توجه به فواصل مش ها و فاصله ی زمانی، عدد کورانت را محاسبه می کند که در مدل یک بعدی مطابق دستورالعمل نرم افزار MIKE باید عددی بین صفر تا ۰/۵ باشد که برای مدل



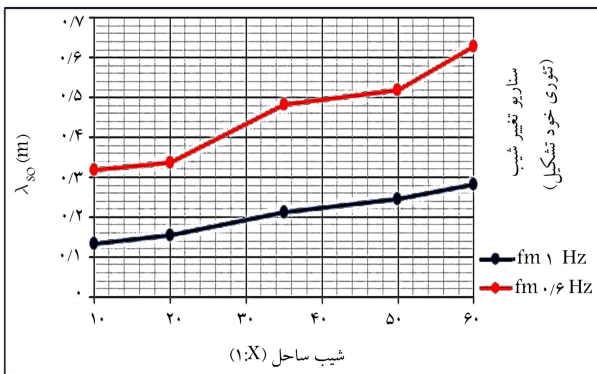
شکل ۸. نمودار بالاوری و شیب ساحل.



شکل ۹. نمودار طول سواش و شیب ساحل.



شکل ۱۰. نمودار فواصل کاسپها با تئوری موج لبه‌یی و شیب ساحل.



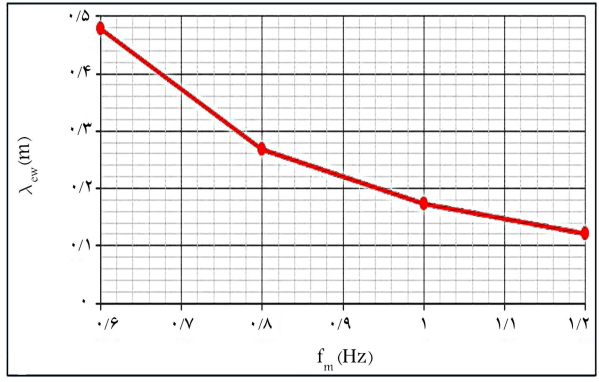
شکل ۱۱. نمودار فواصل کاسپها با تئوری خودتشکیل و شیب ساحل.

انجام داده‌اند، پارامترهای موردنظر در مرحله‌ی بعدی تغییر خواهند کرد و تأثیر آن در کاسپ‌ها مشاهده خواهد شد. در تمامی سناریوهای قبلی از موج بایکروماتیک استفاده شده است. استفاده از موج منظم و نامنظم به این صورت است که موج منظم مطابق نوشتار مدسن، بسامدهای ۰/۳، ۰/۶ و ۱ هرترتز و ارتفاع موج ۵ سانتی‌متر دارد که با استفاده از تئوری استوکس مرتبه‌ی ۳، ۴ و ۵ موج ورودی مدل ساخته می‌شود. برای موج نامنظم با توجه به اینکه فلوام استفاده شده در آزمایش میس همان فلوام کوکس است، از همان اطلاعات نوشتار میس، [۳۷] استفاده و با توجه به آن از طیف پیرسون موسکوویچ^{۳۵} با ارتفاع موج مشخصه‌ی ۶/۴۵ سانتی‌متر و بسامد ۱ هرترتز موج ورودی مدل ساخته شده است. [۳۹، ۳۷، ۳۶]

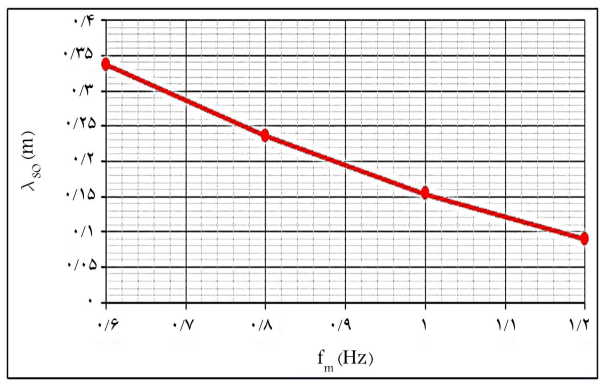
ث) سناریوی مباحث تکمیلی شناسایی کاسپ‌ها: پارامتر λ معرف فاصله‌ی شاخ تا شاخ دو کاسپ متوالی است. از آنجایی که با افزایش فواصل کاسپ‌ها، اندازه‌ی آن‌ها نیز بزرگ‌تر می‌شود، بنابراین می‌توان λ را به عنوان پارامتری در جدول تحلیل حساسیت در کنار بالاوری کلی لحاظ کرد. مطابق آزمایشی که پوایت و همکاران^{۳۶} (۲۰۱۴) و آزمایشی که لویز و همکاران^{۳۷} (۲۰۱۱) انجام داده‌اند، پارامتر H_0/L_0 به عنوان پارامتری که تغییرات کاسپ‌ها را با آن می‌توان ارزیابی کرد، بررسی شده است. [۳۷، ۳۸] برطبق آزمایش مسلینک و همکاران^{۳۸} (۱۹۹۷)، پارامتر $\xi = \frac{\tan \beta}{\sqrt{H_0/L_0}}$ ، پارامتری مفید برای روند تخریب و دوباره شکل‌گیری کاسپ‌ها معرفی شده است، لذا پارامتر در جدول تحلیل حساسیت بررسی شده است. [۳۹]

۲.۳. نتایج حساسیت‌سنجی مدل آزمایشگاهی

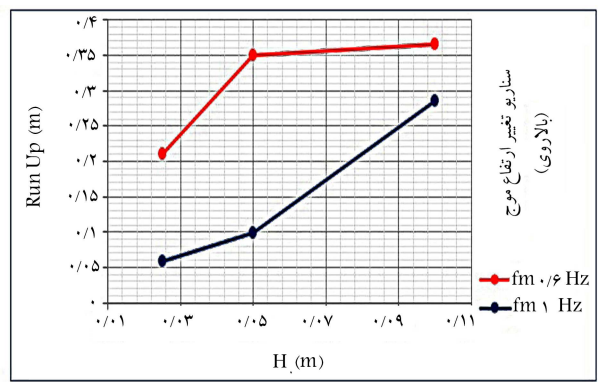
الف) سناریوهای تغییر شیب: سناریوهایی با دو بسامد ۱ و ۰/۶ هرترتز تعریف شده‌اند، که مطابق شکل‌های ۸ الی ۱۱، با کم شدن شیب ساحل، موج توانایی بالاوری بیشتر و پایین‌روی کمتری دارد. بنابراین طول سواش افزایش می‌یابد و میزان فرورفتگی کاسپ‌ها با بالاوری بیشینه مشخص می‌شود. با تغییر بسامد از ۱ به ۰/۶، مقادیر آورده شده در نمودارها بیشتر و در نتیجه اندازه‌ی کاسپ‌ها بزرگ‌تر می‌شود. دو پارامتر λ_{sw} و λ_{so} به عنوان فواصل کاسپ‌ها در نظر گرفته شده‌اند که به ترتیب فواصل با تئوری موج لبه‌یی و فواصل با تئوری موج خودتشکیل است. برای پارامتر λ_{sw} دوره‌های تناوب موج ورودی و شیب ساحل و برای پارامتر λ_{so} طول سواش تأثیرگذار بوده و پارامتر ثابت f مطابق کارهای مشابه برابر با ۱/۵ در نظر گرفته شده است؛ زیرا بیشینه‌ی انحنای بالاوری موج در فرورفتگی کاسپ با $f = 1/5$ به دست می‌آید. [۳۷، ۳۸] هر چه شیب تیزتر باشد، موجی که به ساحل می‌رسد در برخورد با شیب تیز، حالت انعکاسی پیدا می‌کند و امواج لبه‌یی با دوره‌ی تناوب بالاتری شکل می‌گیرند، پس با ملایم شدن شیب، اثر موج لبه‌یی کمتر و فواصل بین کاسپ‌ها نیز کمتر می‌شود، تا شاید به جایی برسد که موجب ناپدید شدن کاسپ‌ها شود. با استفاده از تئوری خودتشکیل، فواصل شاخ در کاسپ‌ها با توجه به طول ناحیه‌ی سواش، با افزایش طول مذکور افزایش می‌یابد. همچنین پارامترهای ξ و H_0/L_0 توسط برخی پژوهشگران برای شناسایی مشخصات کاسپ‌ها استفاده شده‌اند. مطابق آزمایش‌های مسلینک، برای $\xi < 1/2$ ، شکل‌های کاسپ‌ها صاف‌تر و برای $\xi > 1/2$ ، مورفولوژی کاسپ‌ها افزایش می‌یابد. در پژوهش حاضر، پارامتر ξ کمتر از ۱/۲ در نظر گرفته شده است؛ بنابراین کاسپ‌ها ارتفاع کمتری داشته و صاف‌تر بوده‌اند. مطابق آزمایش‌های پوایت، برای $H_0/L_0 < 0.003$ سواش فرسایشی است که موجب عمیق‌تر شدن فرورفتگی کاسپ‌ها می‌شود و در نتیجه کاسپ رشد بیشتری دارد. برای $0.01 < H_0/L_0 < 0.003$ سواش شرایط رشد رسوبی دارد و در



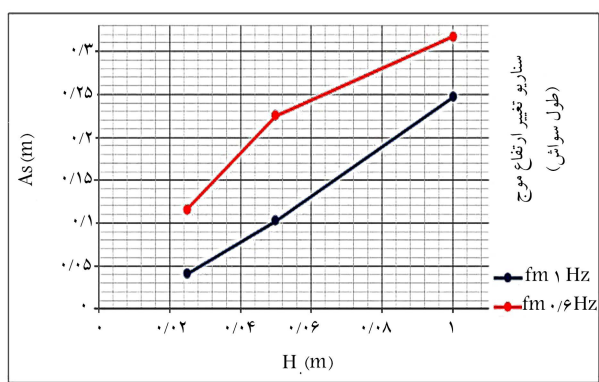
شکل ۱۴. نمودار فواصل بین کاسپ‌ها با تئوری موج لیه‌یی.



شکل ۱۵. نمودار فواصل بین کاسپ‌ها با تئوری خودتشکیل.



شکل ۱۶. نمودار بالاروی و تغییر ارتفاع موج.

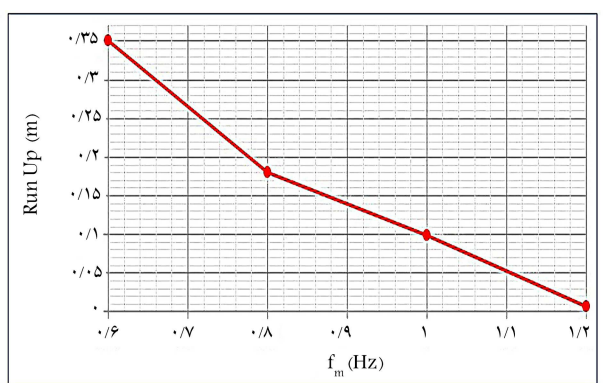


شکل ۱۷. نمودار طول سواش و ارتفاع موج.

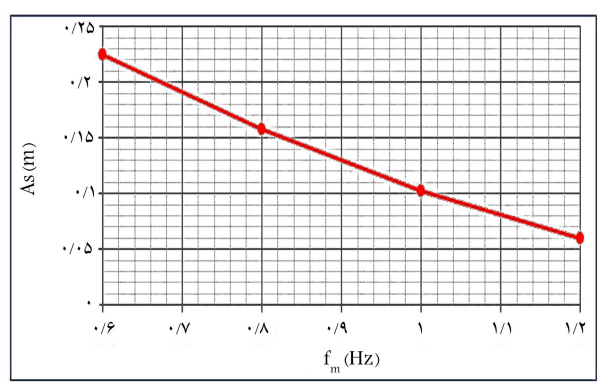
شاخ کاسپ رسوب‌گذاری بیشتر است و در نتیجه کاسپ رشد می‌کند. برای $0.03 < H_0/L_0 < 0.1$ شرایط صاف شدن کاسپ و از بین رفتن آن حاکم است و در انتها برای $H_0/L_0 > 0.03$ سواش فرسایشی است و شرایط دوباره تشکیل شدن کاسپ وجود دارد. طبق جدول ۲، پارامتر H_0/L_0 در بازه سوم، در شرایط صاف شدن و از بین رفتن کاسپ قرار دارد، که با موردی که توسط پارامتر ξ به دست آمده است، همخوانی دارد.

ب) سناریوهای تغییر بسامد: چهار سناریو با بسامدهای ۰٫۶، ۰٫۸، ۱، و ۱٫۲ هرتز تعریف شده است، که بر این اساس مطابق شکل‌های ۱۲ الی ۱۵ با کم شدن بسامد، دوره‌ی تناوب موج زیاد و بالاروی موج بیشتر و طول سواش زیادتر شده است. با کاهش بسامد موج، میزان بیشترین فرورفتگی، افزایش یافته و کاسپ‌ها بزرگ‌تر شده‌اند. با کم شدن بسامد از ۱٫۲ تا ۰٫۶ هرتز و زیاد شدن دوره‌ی تناوب امواج، فواصل بین کاسپ‌ها با تئوری موج لیه‌یی و اندازه‌ی آن‌ها افزایش یافته است. با توجه به افزایش بالاروی امواج و افزایش طول سواش، افزایش فواصل بین کاسپ‌ها با تئوری خودتشکیل و اندازه‌ی آن‌ها مشاهده می‌شود. مطابق جدول ۳، با کاهش بسامد، پارامتر ξ کمتر از ۱٫۲ است و در نتیجه کاسپ‌ها ارتفاع کمتری دارند و صاف‌تر هستند. برای بسامد ۱٫۲ هرتز، پارامتر H_0/L_0 در بازه‌ی چهارم قرار دارد و ناحیه‌ی سواش فرسایشی است و شرایط دوباره تشکیل شدن کاسپ وجود دارد. برای دیگر بسامدها، پارامتر در محدوده‌ی سوم قرار دارد و شرایط صاف شدن و از بین رفتن کاسپ وجود دارد که با موردی که توسط پارامتر ξ به دست آمده است، همخوانی دارد.

پ) سناریو تغییر ارتفاع موج: شش سناریو با بسامد ۱ و ۰٫۶ هرتز و ارتفاع‌های موج ۵، ۲٫۵، ۱۰ سانتی‌متر تعریف شده است. مطابق شکل‌های ۱۶ الی ۱۹،



شکل ۱۸. نمودار بالاروی و بسامد.



شکل ۱۹. نمودار طول سواش و بسامد.

جدول ۲. پارامترهای سناریو تغییر شیب، تأثیر در سایر پارامترهای شناسایی کاسپ‌ها.

H_0/L_0	ξ	طول موج (متر)	دوره‌ی تناوب		نوع موج	ارتفاع (متر)	شیب بستر	بسامد	اجرا
			۱ (ثانیه)	۲					
۰٫۰۲۹	۰٫۵۹	۱٫۷۳	۰٫۹۵	۱٫۰۵	بایکروماتیک	۰٫۰۵	۱:۱۰	۱٫۰	۱
۰٫۰۲۹	۰٫۲۹	۱٫۷۳	۰٫۹۵	۱٫۰۵	بایکروماتیک	۰٫۰۵	۱:۲۰	۱٫۰	۲
۰٫۰۲۹	۰٫۱۷	۱٫۷۳	۰٫۹۵	۱٫۰۵	بایکروماتیک	۰٫۰۵	۱:۳۵	۱٫۰	۳
۰٫۰۲۹	۰٫۱۲	۱٫۷۳	۰٫۹۵	۱٫۰۵	بایکروماتیک	۰٫۰۵	۱:۵۰	۱٫۰	۴
۰٫۰۲۹	۰٫۱۰	۱٫۷۳	۰٫۹۵	۱٫۰۵	بایکروماتیک	۰٫۰۵	۱:۶۰	۱٫۰	۵
۰٫۰۱۵	۰٫۸۲	۳٫۳۷	۱٫۵۹	۱٫۷۵	بایکروماتیک	۰٫۰۵	۱:۱۰	۰٫۶	۶
۰٫۰۱۵	۰٫۴۱	۳٫۳۷	۱٫۵۹	۱٫۷۵	بایکروماتیک	۰٫۰۵	۱:۲۰	۰٫۶	۷
۰٫۰۱۵	۰٫۲۳	۳٫۳۷	۱٫۵۹	۱٫۷۵	بایکروماتیک	۰٫۰۵	۱:۳۵	۰٫۶	۸
۰٫۰۱۵	۰٫۱۶	۳٫۳۷	۱٫۵۹	۱٫۷۵	بایکروماتیک	۰٫۰۵	۱:۵۰	۰٫۶	۹
۰٫۰۱۵	۰٫۱۴	۳٫۳۷	۱٫۵۹	۱٫۷۵	بایکروماتیک	۰٫۰۵	۱:۶۰	۰٫۶	۱۰

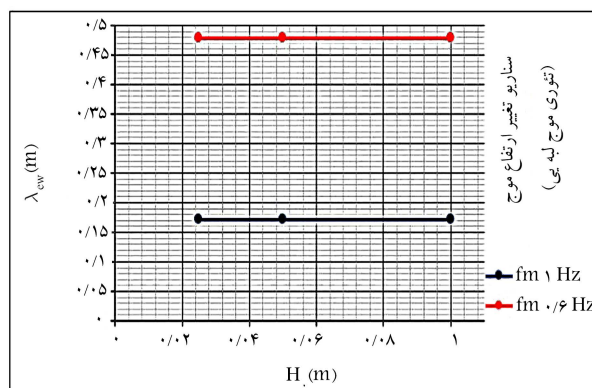
جدول ۳. پارامترهای سناریو تغییر بسامد، تأثیر در سایر پارامترهای شناسایی کاسپ‌ها.

H_0/L_0	ξ	طول موج (متر)	دوره‌ی تناوب		نوع موج	ارتفاع (متر)	شیب بستر	بسامد	اجرا
			۱	۲					
۰٫۰۴۲	۰٫۲۴۴	۱٫۱۹	۰٫۷۹	۰٫۸۸	بایکروماتیک	۰٫۰۵	۱:۲۰	۱٫۲	۱۱
۰٫۰۲۹	۰٫۲۹	۱٫۷۳	۰٫۹۵	۱٫۰۵	بایکروماتیک	۰٫۰۵	۱:۲۰	۱٫۰	۲
۰٫۰۲۲	۰٫۳۳۹	۲٫۳۰	۱٫۹۹	۱٫۳۱	بایکروماتیک	۰٫۰۵	۱:۲۰	۰٫۸	۱۲
۰٫۰۱۵	۰٫۴۱	۳٫۳۷	۱٫۵۹	۱٫۷۵	بایکروماتیک	۰٫۰۵	۱:۲۰	۰٫۶	۷

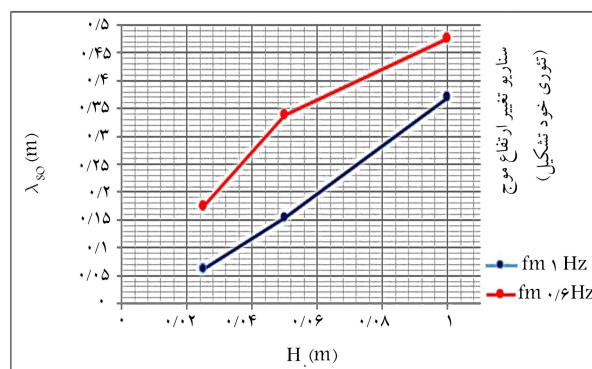
با افزایش ارتفاع و کاهش بسامد، مقدار بالاروی افزایش یافته و در نتیجه طول سواش نیز زیاد شده است. همچنین بیشینه‌ی نفوذ کاسپ با افزایش ارتفاع موج و کاهش بسامد افزایش یافته است. فواصل کاسپ‌ها براساس تئوری موج لیبی با توجه به ثابت ماندن شیب ساحل و دوره‌ی تناوب امواج برای دو بسامد ۱ و ۰٫۶ هرتز ثابت باقی مانده است، چرا که تغییر ارتفاع موج، اثری در فواصل بین کاسپ‌ها در تئوری موج لیبی ندارد. برای تئوری خودتشکیل با افزایش ارتفاع موج و کاهش بسامد، مقادیر فواصل بین کاسپ‌ها نیز افزایش یافته است، که دلیل آن افزایش بالاروی موج و افزایش طول سواش و در نتیجه افزایش فواصل بین کاسپ‌ها با تئوری خودتشکیل است، که با طول سواش ارتباط مستقیم دارد. با افزایش فواصل بین کاسپ‌ها، اندازه‌ی آن‌ها نیز بزرگ‌تر شده است. مطابق جدول ۴، با افزایش ارتفاع، پارامتر ξ کاهش یافته است. پارامتر ξ کمتر از ۱٫۲ است و در نتیجه کاسپ‌ها، ارتفاع کمتری دارند و صاف‌تر هستند. پارامتر H_0/L_0 با افزایش ارتفاع موج و بسامد افزایش یافته است. شرایط غالب این سناریوها نیز صاف شدن و از بین رفتن کاسپ است و گاهی رشد شاخ کاسپ‌ها و با دوباره تشکیل شدن آن‌ها مشاهده می‌شود.

ت) سناریوهای تغییر نوع موج (موج منظم): چهار سناریو برای موج منظم با دو بسامد ۱ و ۰٫۶ هرتز و دو شیب ۱:۲۰ و ۱:۶۰، تعریف شده است. مطابق جدول ۵، با مقایسه‌ی سناریوی شماره ۲، موج بایکروماتیک و شرایط مشابه در سناریوی شماره ۲۰ یعنی موج منظم می‌توان دریافت که با تغییر موج، طول ناحیه‌ی سواش کاهش یافته است که نشان می‌دهد در شرایط یکسان، موج منظم طول سواش کمتری نسبت به موج بایکروماتیک دارد.

با مقایسه‌ی سناریوهای شماره ۷، موج بایکروماتیک و شرایط مشابه در سناریوی



شکل ۱۸. نمودار فواصل بین کاسپ‌ها با تئوری موج لیبی و بسامد.



شکل ۱۹. نمودار فواصل بین کاسپ‌ها با تئوری خودتشکیل و بسامد.

جدول ۴. پارامترهای سناریو تغییر ارتفاع، تأثیر در سایر پارامترهای شناسایی کاسپ‌ها.

H_0/L_0	ξ	طول موج (متر)	دوره‌ی تناوب		نوع موج	ارتفاع (متر)	شیب بستر	بسامد	اجرا
			۱ (ثانیه)	۲					
۰٫۰۱۴	۰٫۴۱۳	۱٫۷۳	۰٫۹۵	۱٫۰۵	بایکروماتیک	۰٫۲۵	۱:۲۰	۱٫۰	۱۶
۰٫۰۲۹	۰٫۲۹۴	۱٫۷۳	۰٫۹۵	۱٫۰۵	بایکروماتیک	۰٫۰۵	۱:۲۰	۱٫۰	۲
۰٫۰۵۸	۰٫۲۰۸	۱٫۷۳	۰٫۹۵	۱٫۰۵	بایکروماتیک	۰٫۱۰	۱:۲۰	۱٫۰	۱۷
۰٫۰۰۷	۰٫۵۸۱	۳٫۳۷	۱٫۵۹	۱٫۷۵	بایکروماتیک	۰٫۲۵	۱:۲۰	۰٫۶	۱۸
۰٫۰۱۵	۰٫۴۱۰	۳٫۳۷	۱٫۵۹	۱٫۷۵	بایکروماتیک	۰٫۰۵	۱:۲۰	۰٫۶	۷
۰٫۰۳۰	۰٫۲۹۰	۳٫۳۷	۱٫۵۹	۱٫۷۵	بایکروماتیک	۰٫۱۰	۱:۲۰	۰٫۶	۱۹

جدول ۵. پارامترهای سناریو تغییر موج منظم، تأثیر در طول ناحیه‌ی سواش و بیشینه‌ی نفوذ کاسپ.

اجرا	بسامد	شیب بستر	ارتفاع (متر)	نوع موج	دوره‌ی تناوب (ثانیه)	بالاروی	پایین روی (متر)	طول سواش (متر)	طول نفوذ (متر)
۲۱	۰٫۶	۱:۲۰	۰٫۰۵	منظم	۱٫۶۷	۰٫۲۵۰	-۰٫۰۶۴	۰٫۱۵۷	۰٫۲۵۰
۲۲	۱٫۰	۱:۶۰	۰٫۰۵	منظم	۱٫۰۰	۰٫۱۴۵	-۰٫۰۰۲	۰٫۰۷۴	۰٫۱۴۵
۲۳	۰٫۶	۱:۶۰	۰٫۰۵	منظم	۱٫۶۷	۰٫۳۵۰	-۰٫۰۰۴	۰٫۱۷۷	۰٫۳۵۰

جدول ۶. پارامترهای سناریوهای تغییر موج منظم، تأثیر در فواصل بین کاسپ‌ها.

اجرا	بسامد	شیب بستر	ارتفاع (متر)	نوع موج	دوره‌ی تناوب		طول سواش (متر)	λ_{ew}	λ_{so}
					۱ (ثانیه)	۲			
۲۰	۱٫۰	۱:۲۰	۰٫۰۵	منظم	۱٫۰۰	-	۰٫۰۵۴	۰٫۱۵۶	۰٫۰۸۰
۲۱	۰٫۶	۱:۲۰	۰٫۰۵	منظم	۱٫۶۷	-	۰٫۱۵۷	۰٫۴۳۵	۰٫۲۳۶
۲۲	۱٫۰	۱:۶۰	۰٫۰۵	منظم	۱٫۰۰	-	۰٫۰۷۴	۰٫۰۵۲	۰٫۱۱۰
۲۳	۰٫۶	۱:۶۰	۰٫۰۵	منظم	۱٫۶۷	-	۰٫۱۷۷	۰٫۱۴۵	۰٫۲۶۶

جدول ۷. پارامترهای سناریوهای تغییر موج منظم، سایر پارامترهای شناسایی کاسپ‌ها.

H_0/L_0	ξ	طول موج (متر)	دوره‌ی تناوب		نوع موج	ارتفاع (متر)	شیب بستر	بسامد	اجرا
			۱ (ثانیه)	۲					
۰٫۰۳۳	۰٫۲۷۴	۱٫۵۰	-	۱٫۰۰	منظم	۰٫۰۵	۱:۲۰	۱٫۰	۲۰
۰٫۰۱۶	۰٫۳۹۹	۳٫۱۸	-	۱٫۶۷	منظم	۰٫۰۵	۱:۲۰	۰٫۶	۲۱
۰٫۰۳۳	۰٫۰۹۱	۱٫۵۰	-	۱٫۰۰	منظم	۰٫۰۵	۱:۶۰	۱٫۰	۲۲
۰٫۰۱۶	۰٫۱۳۳	۳٫۱۸	-	۱٫۶۷	منظم	۰٫۰۵	۱:۶۰	۰٫۶	۲۳

(مطابق جدول ۶)، در تئوری موج لبه‌ی مقادیر دوره‌ی تناوب در موج منظم نسبت به موج بایکروماتیک مقداری کاهش داشته است که این امر باعث کاهش فاصله‌ی کاسپ‌ها در تئوری موج لبه‌ی برای موج منظم شده است. همچنین درخصوص تأثیر شیب نیز کاهش شیب در تئوری موج لبه‌ی باعث کاهش فواصل بین کاسپ‌ها می‌شود، چرا که شیب زیاد به دلیل پدیده‌ی انعکاس باعث افزایش تأثیر تئوری موج لبه‌ی می‌شود. در تئوری موج خودتشکیل نیز (همان‌طور که در قسمت طول سواش و بیشینه‌ی نفوذ کاسپ بیان شد)، مقادیر طول سواش در تئوری موج منظم کاهش داشته‌اند که دلیل آن هم کاهش جزئی مقادیر دوره‌ی تناوب است. بر این اساس می‌توان گفت که با کاهش طول سواش، فواصل بین کاسپ‌ها نیز کاهش می‌یابد. مطابق جدول ۷، پارامتر ξ کمتر از ۱٫۲ است و در نتیجه، کاسپ‌ها ارتفاع کمتری دارند و صاف‌تر هستند. همچنین چون مقادیر

شماره‌ی ۲۱، یعنی موج منظم می‌توان دریافت که طول سواش همانند قسمت قبل تغییر کرده است؛ ولی درخصوص بیشینه‌ی نفوذ کاسپ در شرایط یکسان، موج منظم نفوذ کمتری داشته است که دلیل آن بالاروی کمتر در موج منظم است. با مقایسه‌ی سناریوهای شماره‌ی ۴ و ۲۲ در شرایط مشابه همانند قسمت قبل، موج منظم، طول سواش کمتری نسبت به موج بایکروماتیک دارد؛ اما با این تفاوت که مقادیر آن‌ها در شیب ۱:۶۰ نسبت به شیب ۱:۲۰ به دلیل ملایم‌تر شدن افزایش یافته است. درخصوص نفوذ بیشینه‌ی کاسپ هم نشان می‌دهد که موج منظم نفوذ کمتری دارد، ولی مقادیر نفوذ در مقایسه بین دو شیب به دلیل ملایم شدن، افزایش نشان می‌دهند. نهایتاً با مقایسه بین سناریوهای شماره‌ی ۹ و ۲۳ مشابه قسمت‌های قبل، موج منظم طول سواش کمتری دارد و کاهش شیب نیز باعث افزایش مقادیر طول سواش شده است. درخصوص فواصل بین کاسپ‌ها

جدول ۸. پارامترهای سناریوهای تغییر موج نامنظم، تأثیر در طول ناحیه‌ی سواش و بیشینه‌ی نفوذ کاسپ.

اجرا	بسامد	شیب بستر	ارتفاع (متر)	نوع موج	دوره‌ی تناوب	بالاوری (متر)	پایین‌روی	طول سواش (متر)	طول نفوذ
۲۴	۱/۰	۱:۲۰	۰/۰۶۴۵	نامنظم	۱/۰۰	۰/۳۲۵	-۰/۳۷۰	۰/۳۴۸	۰/۳۲۵
۲۵	۱/۰	۱:۶۰	۰/۰۶۴۵	نامنظم	۱/۰۰	۰/۹۳۳	-۰/۶۸۳	۰/۸۰۸	۰/۹۳۳

جدول ۹. پارامترهای سناریو تغییر موج نامنظم، تأثیر در فواصل بین کاسپ‌ها.

اجرا	بسامد	شیب بستر	ارتفاع (متر)	نوع موج	دوره‌ی تناوب ۱ (ثانیه) ۲	طول سواش (متر)	λ_{ew}	λ_{so}
۲۴	۱/۰	۱:۲۰	۰/۰۶۴۵	نامنظم	۱/۰۰	۰/۳۴۸	۰/۱۵۶	۰/۵۲۱
۲۵	۱/۰	۱:۶۰	۰/۰۶۴۵	نامنظم	۱/۰۰	۰/۸۰۸	۰/۰۵۲	۰/۸۰۸

جدول ۱۰. پارامترهای سناریو تغییر موج نامنظم، تأثیر در فواصل بین کاسپ‌ها.

اجرا	بسامد	شیب بستر	ارتفاع (متر)	نوع موج	دوره‌ی تناوب ۱ (ثانیه) ۲	طول موج (متر)	ϵ	H_o/L_o
۲۴	۱/۰	۱:۲۰	۰/۰۶۴۵	نامنظم	۱/۰۰	۱/۵۰	۰/۲۴۱	۰/۰۴۳
۲۵	۱/۰	۱:۶۰	۰/۰۶۴۵	نامنظم	۱/۰۰	۱/۵۰	۰/۰۸۱	۰/۰۴۳

اندک دوره‌ی تناوب موج بایکروماتیک و موج نامنظم است. همچنین با تغییر شیب از ۱:۲۰ به ۱:۶۰، مقادیر فواصل بین کاسپ‌ها باز هم کاهش داشته است که دلیل آن کاملاً مشخص است. چرا که فواصل کاسپ‌ها با استفاده از تئوری موج لبه‌یی با شیب ساحل ارتباط مستقیم دارد. برای فواصل بین کاسپ‌ها با استفاده از تئوری موج خودتشکیل، مطابق جدول ۹ ملاحظه می‌شود که با تغییر موج بایکروماتیک به موج نامنظم، مقادیر فواصل بین کاسپ‌ها افزایش پیدا کرده‌اند، که دلیل آن افزایش مقدار بالاوری و طول سواش در موج نامنظم است. مطابق جدول ۱۰، پارامتر ϵ کمتر از ۱/۲۰ است و در نتیجه کاسپ‌ها ارتفاع کمتری دارند و صاف‌تر هستند. همچنین از آنجایی که مقادیر دوره‌ی تناوب در موج نامنظم به مقدار ناچیزی کمتر از موج بایکروماتیک هستند، بنابراین پارامتر شکست مطابق با رابطه، به دلیل کاهش طول موج، کمتر شده است. درخصوص شیب بستر نیز با کاهش شیب، پارامتر شکست مطابق با رابطه‌ی ۱ کاهش یافته است. در سناریوهای ۲۴ و ۲۵، نیز پارامتر در بازه‌ی چهارم قرار گرفته، سواش فرسایشی است و شرایط دوباره تشکیل شدن کاسپ وجود دارد. همچنین در سناریوهای ۲ و ۴، پارامتر سواش در محدوده‌ی سوم قرار گرفته است، لذا شرایط صاف شدن کاسپ و از بین رفتن آن حاکم است.

دوره‌ی تناوب در موج منظم کمتر از بایکروماتیک است، بنابراین پارامتر شکست، به دلیل کاهش طول موج کمتر می‌شود. درخصوص شیب بستر نیز با کاهش شیب، پارامتر شکست کاهش می‌یابد. برای پارامتر H_o/L_o ملاحظه می‌شود که بین سناریوهای موج منظم و بایکروماتیک تفاوتی ناچیز وجود دارد که دلیل آن اختلاف جزئی در دوره‌های تناوب است، که در طول موج تأثیرگذار است. پس چون اختلافی بین دو حالت موج وجود ندارد، موج منظم به شکل مجزا بررسی شده است. در سناریوهای ۲۱ و ۲۳، پارامتر ϵ در بازه‌ی سوم قرار گرفته است، لذا شرایط صاف شدن کاسپ و از بین رفتن آن حاکم است. همچنین در سناریوهای ۲۲ و ۲۰، پارامتر ϵ در محدوده‌ی چهارم قرار گرفته است، در نتیجه، سواش فرسایشی است و شرایط دوباره‌ی تشکیل شدن کاسپ وجود دارد.

ث) سناریوی نوع موج (موج نامنظم): دو سناریو برای موج نامنظم با دو بسامد ۱ و ۰/۶ هرتز و دو شیب ۱:۲۰ و ۱:۶۰ تعریف شده است. مطابق جدول ۸، با ثابت ماندن بسامد ۱ هرتز و شیب ۱:۲۰، دو سناریوی شماره‌ی ۲ برای موج بایکروماتیک و سناریوی ۲۴ برای موج نامنظم و برای شیب ۱:۶۰، دو سناریوی شماره‌ی ۴ برای موج بایکروماتیک و سناریوی ۲۵ برای موج نامنظم با هم مقایسه شده‌اند. با توجه به اختلاف بسیار کم ارتفاع موج (در حدود ۱/۴ سانتی‌متر)، ارتفاع موج بین دو سناریوی اخیر ثابت در نظر گرفته شده است. مقدار طول ناحیه‌ی سواش در موج نامنظم نسبت به موج بایکروماتیک به مقدار زیادی افزایش یافته است، زیرا مقادیر بالاوری و پایین‌روی در موج نامنظم افزایش داشته است. همچنین در مورد بیشینه‌ی نفوذ کاسپ در موج نامنظم، به دلیل افزایش آن، میزان بالاوری افزایش یافته است.

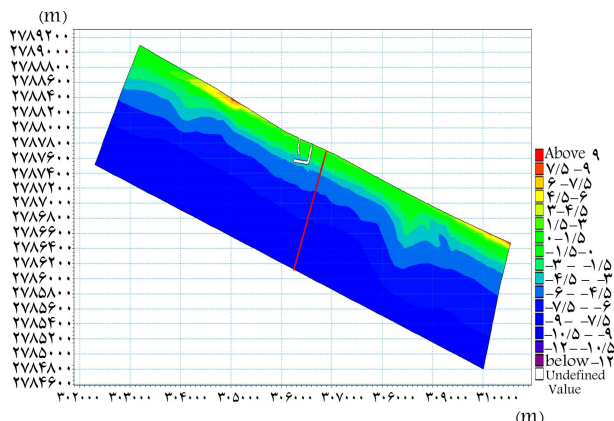
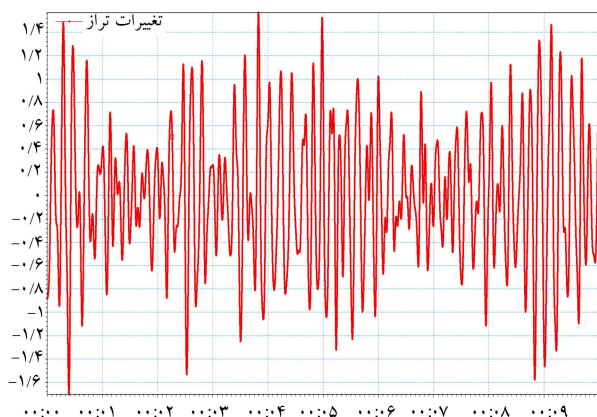
با ثابت ماندن ارتفاع موج و شیب ساحل و فقط با تغییر موج بایکروماتیک به موج نامنظم، با مقایسه‌ی سناریوی ۲ با ۲۴ و سناریوی ۴ با ۲۵، کاهش فواصل بین کاسپ‌ها با استفاده از تئوری موج لبه‌یی مشاهده می‌شود که علت آن تفاوت

۳.۳. ساخت مدل واقعی، تحلیل و بررسی (مطالعه‌ی موردی سواحل بندر رودیک)

در پژوهش حاضر، ۱۸ سناریو در دو بخش طوفان‌های اقیانوسی و مونسونی ذکر شده است. با توجه به اینکه سواحل مکران زیرمجموعه‌ی سواحل موج حاکم است و تأثیر جزر و مد در این مناطق ضعیف است، بر این اساس کاسپ‌های منطقه تحت تأثیر امواج شکل گرفته‌اند و عمده‌ترین پارامتر تأثیرگذار در شکل‌گیری کاسپ‌ها، بالاوری ناشی از امواج است. از طرفی سواحل مکران در طول یک‌سال نزدیک به ۴ ماه تحت تأثیر طوفان مونسون و عمده زمان باقی‌مانده نیز تحت تأثیر طوفان‌های

جدول ۱۱. سناریوهای اجرای مدل سازی.

دوره تناوب پیک (ثانیه)	نوع موج ورودی	ارتفاع میانگین (متر)	شیب بستر	سناریو	طوفان
۱۶	موج نامنظم طیف جان سوآپ	۰٫۵۰	۱:۶۰	۱	امواج اقیانوسی
۱۷	موج نامنظم طیف جان سوآپ	۰٫۵۰	۱:۶۰	۲	
۱۸	موج نامنظم طیف جان سوآپ	۰٫۵۰	۱:۶۰	۳	
۱۶	موج نامنظم طیف جان سوآپ	۰٫۷۵	۱:۶۰	۴	
۱۷	موج نامنظم طیف جان سوآپ	۰٫۷۵	۱:۶۰	۵	
۱۸	موج نامنظم طیف جان سوآپ	۰٫۷۵	۱:۶۰	۶	
۱۶	موج نامنظم طیف جان سوآپ	۱٫۰۰	۱:۶۰	۷	
۱۷	موج نامنظم طیف جان سوآپ	۱٫۰۰	۱:۶۰	۸	
۱۸	موج نامنظم طیف جان سوآپ	۱٫۰۰	۱:۶۰	۹	
۱۱	موج نامنظم طیف جان سوآپ	۱٫۵۰	۱:۶۰	۱۰	امواج مونسونی
۱۲	موج نامنظم طیف جان سوآپ	۱٫۵۰	۱:۶۰	۱۱	
۱۳	موج نامنظم طیف جان سوآپ	۱٫۵۰	۱:۶۰	۱۲	
۱۱	موج نامنظم طیف جان سوآپ	۲٫۰۰	۱:۶۰	۱۳	
۱۲	موج نامنظم طیف جان سوآپ	۲٫۰۰	۱:۶۰	۱۴	
۱۳	موج نامنظم طیف جان سوآپ	۲٫۰۰	۱:۶۰	۱۵	
۱۱	موج نامنظم طیف جان سوآپ	۲٫۵۰	۱:۶۰	۱۶	
۱۲	موج نامنظم طیف جان سوآپ	۲٫۵۰	۱:۶۰	۱۷	
۱۳	موج نامنظم طیف جان سوآپ	۲٫۵۰	۱:۶۰	۱۸	



شکل ۲۱. شرایط مرزی تغییرات ارتفاعی موج ورودی مدل ساحل رودیک در واحد زمان، سناریوی ۱۸ (به عنوان نمونه).

شکل ۲۰. هیدروگرافی دو بعدی بندر رودیک و محل قرارگیری نیمرخ انتخابی در مختصات.

امواج نامنظم بندر رودیک در محدوده‌ی دریای عمان و سواحل مکران واقع شده است که طیف جان سوآپ با کاربرد فراوان داشته و با شرایط منطقه متناسب بوده است. برای ساخت طیف به ارتفاع موج مشخصه (H_{m0}) و دوره تناوب (T_p) بیشینه نیاز است که با توجه به سناریوهای مدل سازی در ادامه، برای هر سناریوی یک موج ورودی ساخته شود، که به عنوان نمونه یکی از آن‌ها در شکل ۲۱ نشان داده شده است.

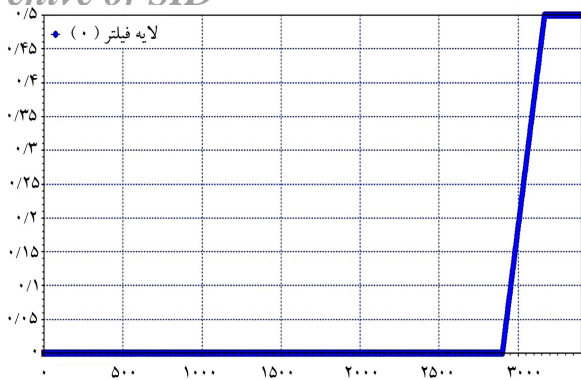
است که انتخاب طوفان‌های مذکور به عنوان شرایط حدی مؤثر، به لحاظ ارتفاع بالای امواج و دوره تناوب بالا کاملاً منطقی است. سناریوی طوفان‌ها در جدول ۱۱ مشاهده می‌شود.

الف) نیمرخ بستر (عمق سنجی): نیمرخ انتخابی در نزدیکی بندر رودیک واقع در ساحل رودیک، به طولی معادل ۱۷۰۰ متر، ابعاد مش ۰٫۵ متر و تعداد گره‌های نیمرخ برابر ۳۴۰۰ عدد (۳۴۰۰ کد نقطه با فواصل ۰٫۵ متری) بوده است. تغییرات عمق نیمرخ از ۸٫۱۲- در طرف آب عمیق و ۲٫۶۸+ متر در سمت ساحل بوده است که در شکل‌های ۲۰ و ۲۲ مشاهده می‌شود.

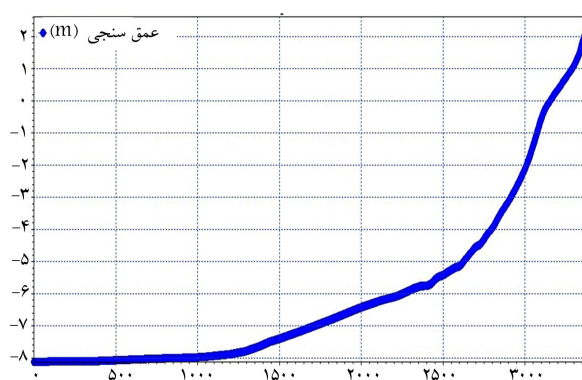
ب) لایه‌ی اسفنج: لایه‌ی اسفنج از اجزاء ساختاری مدل سازی است، که در مرز ورودی مدل و ناحیه‌ی سواش قرار می‌گیرد، و وظیفه دارد که موج بازگشتی به سمت مرز ورودی را از مدل حذف کند و همچنین موجی که به ساحل می‌رسد

ب) موج ورودی مدل رودیک: موج ورودی مدلی واقعی بندر رودیک، زیرمجموعه‌ی

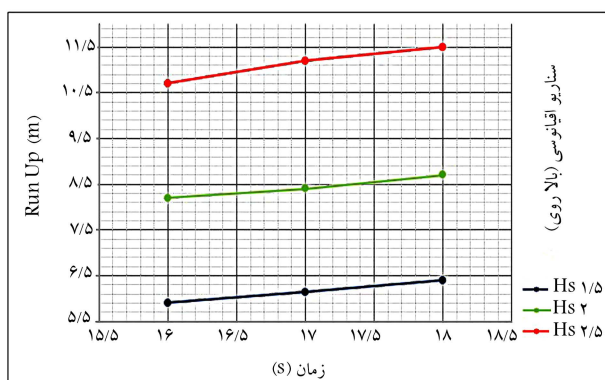
Archive of SID



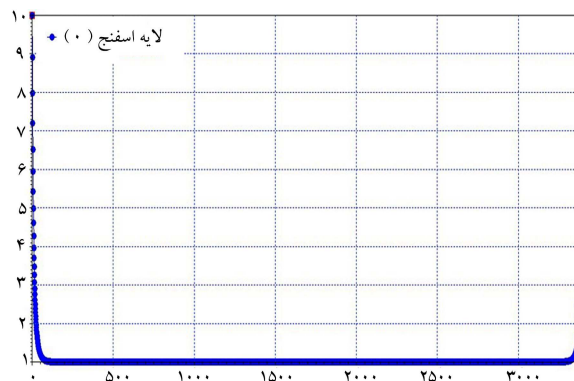
شکل ۲۴. لایه‌ی فیلتر ساحل رودیک در ماژول BW-۱D.



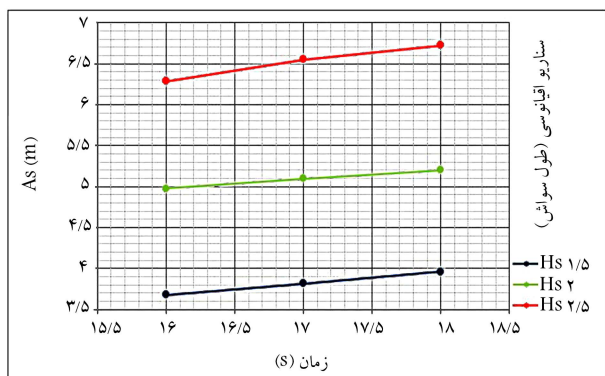
شکل ۲۲. نیمرخ ساحل رودیک در ماژول BW-۱D.



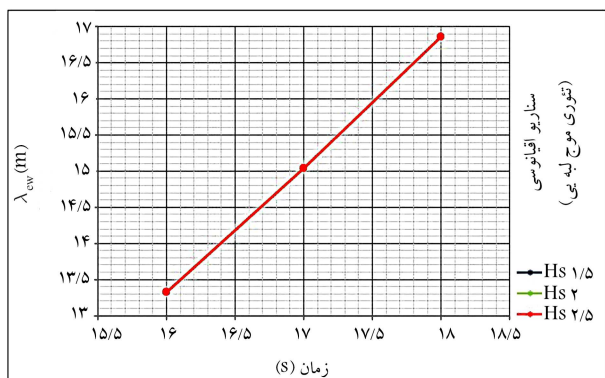
شکل ۲۵. نمودار بالاتروری سناریوهای اقیانوسی.



شکل ۲۳. لایه‌ی اسفنج ساحل رودیک در ماژول BW-۱D.



شکل ۲۶. نمودار طول سواش سناریوهای اقیانوسی.

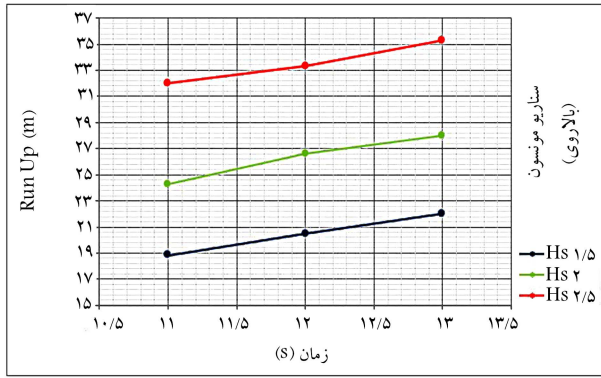


شکل ۲۷. نمودار تئوری موج لبه‌یی سناریوهای اقیانوسی.

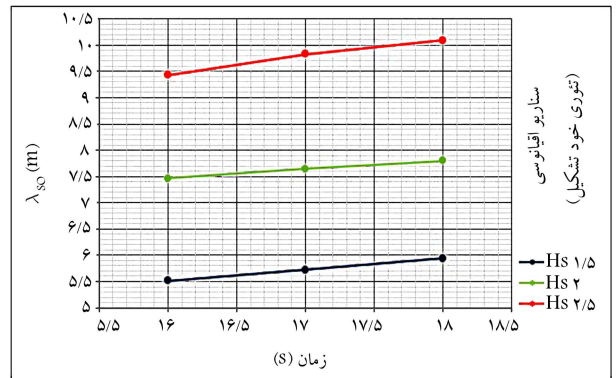
را سرانجام به پایان رساند، که به داخل مدل باز نگردد. با توجه به دستورالعمل Mike، لایه‌ی اسفنج به مشخصات طول موج آب عمیق (L) و فواصل گره‌های نیمرخ (Δ) وابسته است. با توجه به سناریوهای مدل رودیک که در ادامه مشاهده می‌شود، ابعاد مش مدل‌سازی‌های یکسان است و تفاوت در دوره‌های تناوب است، که در ساخت لایه‌ی اسفنج تأثیرگذار است. به همین دلیل یک لایه‌ی اسفنج به عنوان نمونه در شکل ۲۳ نشان داده شده است.

ت) لایه‌ی فیلتر: لایه‌ی فیلتر از اجزاء ساختاری مدل‌سازی است که در ناحیه‌ی سواش ساحل قرار می‌گیرد و وظیفه‌ی آن، حذف بسامدهای بالای مدل است که ناشی از هجوم موج به ساحل، بالاتروری، پایین‌روی و پخش موج می‌شود. عملکرد دیگر لایه‌ی فیلتر این است که اثر منفی شدن ناشی از بالاتروری موج در مدل را حذف می‌کند. با توجه به دستورالعمل Mike، لایه‌ی فیلتر فقط به ابعاد مش مدل‌سازی وابسته است و با توجه به سناریوهای مدل رودیک، که در ادامه مشاهده می‌شود، ابعاد مش مدل‌سازی‌ها (Δ) یکسان است؛ پس یک نوع لایه‌ی فیلتر استفاده شده است که در شکل ۲۴ مشاهده می‌شود.

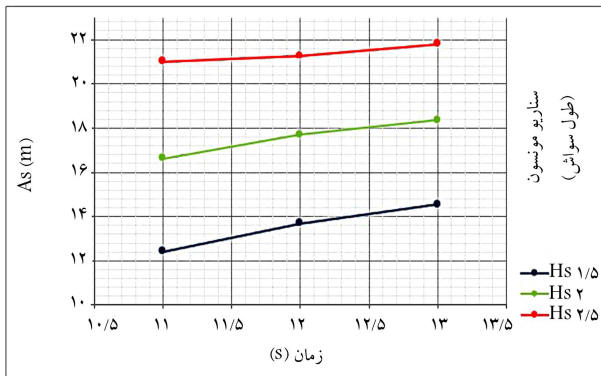
برای نحوه‌ی شکل‌گیری‌های کاسپ‌ها، ابعاد کاسپ‌های ساحل رودیک و ... تحلیل و بررسی شده‌اند که در ادامه، نمودارها و نتایج آن‌ها بیان شده است. مطابق شکل‌های ۲۵ الی ۲۸، سناریوی طوفان اقیانوسی با افزایش دوره‌ی تناوب موج و همچنین ارتفاع موج، طول سواش و طول نفوذ کاسپ افزایش یافته است که به دلیل افزایش طول بالاتروری امواج بوده و موجب تشکیل کاسپ‌هایی با نفوذ بیشتر و اندازه‌ی بزرگ‌تر شده است. مشاهده می‌شود پارامتر فاصله‌ی بین کاسپ‌ها با استفاده از نظریه‌ی موج لبه‌یی که با شیب ساحل و دوره‌ی تناوب موج ارتباط مستقیم دارد، با افزایش دوره‌ی تناوب موج افزایش یافته و نسبت به مقادیر بدست



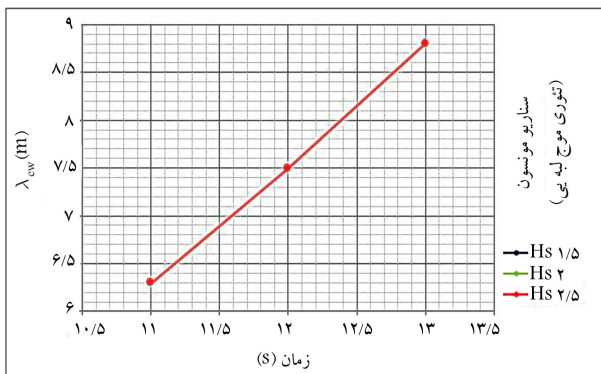
شکل ۲۹. نمودار بالاروی سناریوهای مونسونی.



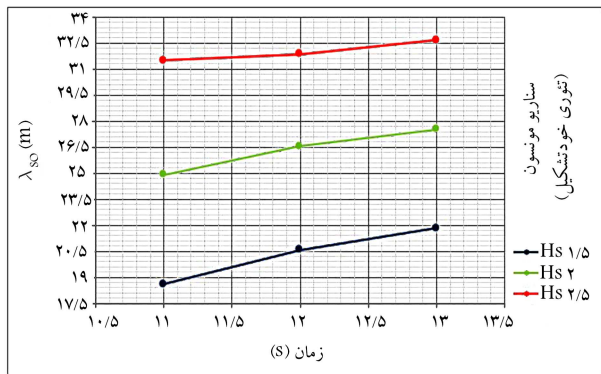
شکل ۲۸. نمودار تئوری خودتشکیل سناریوهای اقیانوسی.



شکل ۳۰. نمودار طول سواش سناریوهای مونسونی.



شکل ۳۱. نمودار تئوری موج لبه‌یی سناریوهای مونسونی.



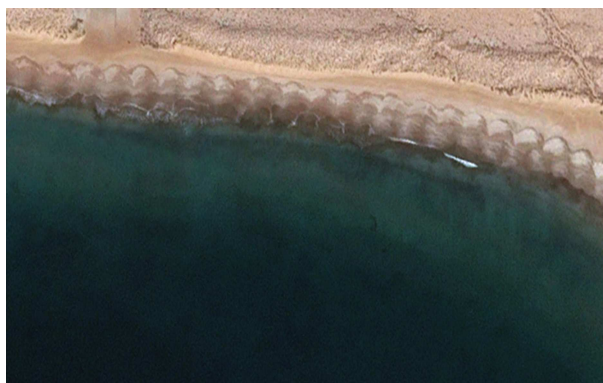
شکل ۳۲. نمودار تئوری خودتشکیل سناریوهای مونسونی.

آمده از نظریه‌ی خودتشکیل، اندازه‌های بیشتری داشته‌اند که دلیل آن می‌تواند تأثیر بیشتر تئوری موج لبه‌یی در تشکیل کاسپ‌ها با امواج لبه‌یی باشد. همچنین پارامتر فاصله‌ی بین کاسپ‌ها با استفاده از روش خودتشکیل، که در آن طول سواش، پارامتری تأثیرگذار بوده و پارامتر ثابت f مطابق کارهای مشابه برابر با $1/5$ در نظر گرفته شده است، با افزایش ارتفاع موج و در نتیجه افزایش طول سواش، زیاد شده است. مطابق شکل‌های ۲۹ الی ۳۲، سناریوی طوفان مونسونی، با افزایش دوره‌ی تناوب موج و همچنین ارتفاع موج، طول سواش و طول نفوذ کاسپ افزایش یافته است، که به دلیل افزایش طول بالاروی بوده و موجب تشکیل کاسپ‌هایی با نفوذ بیشتر و اندازه‌ی بزرگ‌تر شده است. همچنین مشاهده می‌شود پارامتر فاصله‌ی بین کاسپ‌ها با استفاده از نظریه‌ی موج لبه‌یی با افزایش دوره‌ی تناوب موج، افزایش یافته و نسبت به مقادیر به‌دست‌آمده از نظریه‌ی خودتشکیل، اندازه‌های کمتری داشته‌اند که می‌تواند به دلیل تأثیر بیشتر تئوری خودتشکیل در نحوه‌ی تشکیل کاسپ‌ها با امواج لبه‌یی باشد. پارامتر فاصله‌ی بین کاسپ‌ها با روش خودتشکیل با افزایش ارتفاع موج و در نتیجه افزایش طول سواش، زیاد می‌شود. با مقایسه بین دو سناریوی طوفان‌های اقیانوسی و مونسونی، در طوفان‌های اقیانوسی با توجه به اینکه ارتفاع امواج لبه‌یی از 0.75° تا 1.0° متر با افزایش دوره‌ی تناوب موج افزایش می‌یابد و نسبت به مقادیر به‌دست آمده از نظریه‌ی خودتشکیل، اندازه‌های کمتری دارند؛ می‌تواند به دلیل تأثیر بیشتر تئوری خودتشکیل در نحوه‌ی تشکیل کاسپ‌ها با امواج لبه‌یی باشد. پارامتر فاصله‌ی بین کاسپ‌ها با روش خودتشکیل با افزایش ارتفاع موج و در نتیجه افزایش طول سواش زیاد می‌شود. با مقایسه بین دو سناریوی طوفان‌های اقیانوسی و مونسونی، در طوفان‌های اقیانوسی با توجه به اینکه ارتفاع امواج از 0.75° تا 1.0° متر افزایش می‌یابد، به تبع آن بالاروی افزایش می‌یابد؛ البته در کنار ارتفاع امواج، دوره‌ی تناوب هم در افزایش بالاروی نقش دارد، که با افزایش دوره‌ی تناوب از ۱۶ تا ۱۸ ثانیه، افزایش بالاروی مشاهده می‌شود. همچنین در طوفان‌های مونسونی، با توجه به اینکه ارتفاع امواج از 1.75° تا 2.5° متر افزایش می‌یابد، به تبع آن بالاروی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش دوره‌ی تناوب امواج از ۱۱ تا ۱۳ ثانیه، افزایش بالاروی نیز به وجود می‌آید. با توجه به اینکه میزان بالاروی طوفان‌های اقیانوسی، 5.9° تا 11.5° متر است و بالاروی طوفان‌های مونسونی از 11.8° تا 35.3° متر تغییر می‌کند، واضح است به دلیل بالاروی‌های بیشتر در مونسون، کاسپ‌های شکل گرفته در سناریوهای اقیانوسی در پایین‌ترین قسمت سواش به سمت دریا و در سناریوهای مونسونی بالاتر از آن‌ها قرار می‌گیرند. شکل ۳۳، تصویری از کاسپ‌های تشکیل شده در ساحل رودیک را نشان می‌دهد.

Archive of SID

دارند و صاف تر هستند. در مورد پارامتر H_0/L_0 ، شرایط غالب در سناریوها، شرایط صاف شدن و از بین رفتن کاسپ‌ها و شرایط سواش فرسایشی و دوباره تشکیل شدن کاسپ‌هاست.

هنگامی که منطقه‌ی رودیک تحت اثر طوفان‌های اقیانوسی قرار دارد، عملکرد جریان سواش در ساحل آن به صورت فرسایشی است، یعنی با فرسایش فرورفتگی کاسپ‌ها و عمیق تر شدن آن‌ها، کاسپ‌ها بزرگ تر می‌شوند. به صورت کلی، کاسپ‌های منطقه‌ی رودیک، مورفولوژی صاف تری دارند، یعنی ارتفاع آن‌ها کم است و پهن تر هستند. با افزایش ارتفاع امواج و افزایش دوره‌ی تناوب آن‌ها، کاسپ‌ها نیز بزرگ تر می‌شوند و رشد آن‌ها افزایش می‌یابد. با توجه به پارامتر ارتفاع شکست موج و پارامتر امگا، ساحل رودیک جزء سواحل انعکاسی و بینابینی است، که احتمال تشکیل کاسپ در آن‌ها بسیار زیاد است و در ساحل واقعی رودیک نیز تشکیل کاسپ‌ها مشاهده می‌شود. نتایج به دست آمده برای طوفان‌های مونسونی نشان می‌دهد ساحل رودیک تحت تأثیر طوفان‌های مونسونی، عملکرد جریان سواش به صورت رشد رسوبی است. بدین معنا که با رسوب گذاری در شاخ‌های کاسپ‌ها، که رو به سمت دریا قرار دارند، اندازه‌ی کاسپ‌ها بزرگ تر می‌شود و رشد می‌کنند. اما گاهی با کم شدن دوره‌ی تناوب و بدون توجه به ارتفاع موج، شرایط صاف تر شدن تا از بین رفتن کاسپ‌ها بر ساحل حاکم می‌شود. با توجه به پارامتر ارتفاع شکست موج و پارامتر امگا، ساحل رودیک جزء سواحل بینابینی است که امکان تشکیل کاسپ در آن‌ها وجود دارد، که با توجه به برقرار بودن عواملی، مانند: دوره‌ی تناوب بلند امواج، شیب کم ساحل و ارتفاع مناسب و متوسط امواج در این ناحیه کاسپ‌ها تشکیل شده است. تحت اثر طوفان‌های مونسونی همانند طوفان‌های اقیانوسی، کاسپ‌ها مورفولوژی صاف تری دارند و پهن تر هستند. همچنین افزایش ارتفاع و دوره‌ی تناوب امواج موجب افزایش رشد کاسپ‌ها می‌شود. در مورد بررسی تئوری‌های موج لبه‌یی و خودتشکیل برای کاسپ‌های منطقه‌ی رودیک می‌توان گفت مقادیر فواصل شاخ کاسپ‌ها در دو طوفان مطابق با دو تئوری کاملاً متفاوت است. در سناریوی طوفان‌های اقیانوسی مقادیر فواصل با استفاده از تئوری خودتشکیل از فواصل با تئوری موج لبه‌یی کمتر است. البته مقادیر فواصل بیشتر با توجه به میزان بالاروی در ساحل رودیک، تئوری موج لبه‌یی را تأیید می‌کند. در سناریوی طوفان‌های مونسونی، دو پارامتر مذکور اختلاف بسیار زیادی دارند که با توجه به میزان بالاروی در ساحل رودیک به طور قطع می‌توان گفت تئوری خودتشکیل حاکم است.



شکل ۳۳. کاسپ‌های ساحل رودیک (Google Earth).

۴. نتیجه‌گیری

به صورت خلاصه، نتایج تحلیل حساسیت در مدل آزمایشگاهی نشان می‌دهد که با کاهش بسامد و افزایش دوره‌ی تناوب امواج، طول نفوذ کاسپ‌ها زیاد و فاصله‌ی بین کاسپ‌ها با استفاده از هر دو تئوری زیاد می‌شود و اندازه‌ی کاسپ‌ها نیز بزرگ تر می‌شود. با کاهش شیب ساحل، طول نفوذ کاسپ‌ها افزایش می‌یابد و فاصله‌ی بین کاسپ‌ها در تئوری خودتشکیل زیاد می‌شود و موجب بزرگ تر شدن اندازه‌ی کاسپ‌ها می‌شود. اما در تئوری موج لبه‌یی با توجه به رابطه‌ی ۱، کاهش فواصل بین کاسپ‌ها و کوچک تر شدن اندازه‌ی آن‌ها مشاهده می‌شود. با افزایش ارتفاع موج، افزایش فرورفتگی کاسپ‌ها و افزایش فاصله‌ی بین کاسپ‌ها در تئوری خودتشکیل و بزرگ تر شدن اندازه‌ی کاسپ‌ها مشاهده می‌شود، اما در تئوری موج لبه‌یی با توجه به رابطه‌ی ۱، تغییر خاصی در فاصله‌ی کاسپ‌ها مشاهده نمی‌شود. با تغییر موج بایکروماتیک به موج منظم، به دلیل کم شدن انرژی موج، طول نفوذ کاسپ‌ها کمتر شده است، همچنین فواصل بین کاسپ‌ها با هر دو تئوری کاهش یافته و اندازه‌ی کاسپ‌ها کوچک تر شده است. با تغییر موج بایکروماتیک به موج نامنظم، به دلیل افزایش انرژی موج، افزایش بالاروی و افزایش طول نفوذ کاسپ مشاهده می‌شود. همچنین افزایش طول سواش و بالاروی و در نتیجه افزایش فاصله‌ی بین کاسپ‌ها با تئوری خودتشکیل مشاهده می‌شود، اما در تئوری موج لبه‌یی، کاهش فاصله موجب کوچک تر شدن اندازه‌ی کاسپ‌ها می‌شود. با توجه به پارامتر ϵ ، کاسپ‌ها ارتفاع کمتری

پانویس‌ها

1. bar
2. dune
3. cliff
4. beach cusps
5. morphological
6. horn
7. bay or embayment
8. feedback
9. the standing edge wave model

10. the self-organisation model
11. Werner and Fink
12. sub-harmonic edge wave
13. synchronous edge wave
14. Monson
15. well-sorted medium sand
16. 1DH boussinesq wave module
17. roller celerity
18. Sorensen
19. Madsen
20. Schaffer

21. Mase
22. sponge layer
23. filter layer
24. moving shoreline
25. wave breaking
26. warm-up
27. Aoki
28. Sunamura
29. Sanchez et al
30. Bi chromatic
31. regular
32. irregular
33. Cox et al
34. stokes-order5
35. Pierson-Moskowitz spectrum
36. Poate et al
37. Lopez et al
38. Masselink et al

منابع (References)

1. Benavente, J., Harris, D.L. and Austin, T.P. "Medium term behavior and evolution of a beach cusps system in a low energy beach, Port Stephens, NSW, Australia", *J. of Coastal Research*, **S1**(64), pp. 170-174 (2011).
2. Evans, O.F. "Classification and origin of beach cusps", *Journal of Geology*, **46**(4), pp. 615-627 (1938).
3. Allen, J.R., Psuty, N.P., Bauer, B.O. and et al. "A field data assessment of contemporary models of beach cusp formation", *J. Coast. Res.*, **12**(3), pp. 622-629 (1996).
4. Hom-ma, M. and Sonu, C. "Rhythmic pattern of long-shore bars related to sediment characteristics", *Coast. Eng. Proc.*, **8**, pp. 248-278 (1962).
5. Sato, M., Kuroki, K. and Shinohara, T. "A field experiment on the formation of beach cusps", In *Coastal Engineering*, pp. 2205-2218 (1992).
6. Coco, G., Huntley, D.A. and O'Hare T.J. "Investigation of a self-organization model for beach cusp formation and development", *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **105**(C9), pp. 21991-22002 (2000).
7. Masselink, G., Russell, P., Coco, G. and Huntley, D. "Test of edge wave forcing during formation of rhythmic beach morphology", *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **109**(C6), pp.34-48 (2004).
8. Dodd, N., Stoker, A.M., Calvete, D. and Sriariyawat, A. *J. Fluid Mech.*, **597**, pp. 145-169 (2008).
9. Almar, R., Coco, G., Bryan, K.R. and et al. "Video observations of beach cusp morphodynamics", *On Beach Cusp Formation*, **254**(3-4), pp. 216-223 (2008).
10. Vousdoukas, M.I. "Erosion/accretion patterns and multiple beach cusp systems on a meso-tidal, steeply-sloping beach", *Geomorphology*, **141-142**, pp. 34-46 (2012).
11. Poate, T.G., Masselink, G., McCall, R.M. and et al. "Storm-driven cusp behaviour on a high energy gravel beach", *Journal of Coastal Research*, **70**(SP1), pp. 645-650 (2014).
12. Senechal, N., Laibi, R.A., Almar, R. and et al. "A field experiment on the formation of beach cusps", Kagoshim University, 1-21-40 Korimoto, Kagoshima-shi, 890 JAPAN (2014).
13. Komar, P.D. "Observations of beach cusps at Mono lake, California", *Geological Society of America Bulletin*, **84**(11), pp. 3593-3600 (1973).
14. Dean, R.G. and Maurmeier E.M. "Beach cusps at Point Reyes and Drakes Bay beaches, California", *Proceedings 17th International Conference on Coastal Engineering, ASCE*, pp. 863-884 (1980).
15. Inman, D.L. and Guza, R.T. "The origin of swash cusps on beaches", *Mar. Geol.*, **49**(1-2), pp. 133-148 (1982).
16. Masselink, G. and Pattiaratchi, C.B. "Morphological evolution of beach cusps and associated swash circulation", *Mar. Geol.*, **146**(1-4), pp. 93-113 (1998).
17. Williams, Z. "Localized generation of low frequency swash motion through", Randal Library (2010).
18. Pruszek, Z., Sea, B. and Szmytkiewicz, P. "Megascale rhythmic shoreline forms on a beach with multiple bars", **50**(2), pp. 183-203 (2008).
19. Garnier R., Ortega-Sanchez M. and Losada M. a. "Beach cusps and inner surf zone processes: growth or destruction? A case study of Trafalgar beach (Cadiz Spain)", *Sci Mar*, **74**(3), pp. 539-553 (2010).
20. Birrien, F., Castelle, B., Dailloux, D. and et al. "Video observation of megacusp evolution along a high-energy engineered sandy beach: Anglet , SW France", *J. of Coastal Research*, **65**, pp. 1727-1732 (2013).
21. Otvos, E.G. "Observations of beach cusps and beach ridge formation on Long Island sound", *Journal of Sedimentary Petrology*, **34**(3), pp. 554-560 (1964).
22. Holland, K.T. "Foreshore dynamics: Swash motions and topographic interactions on natural beaches", Oceanography, Graduate Thesis (1995).
23. Sanchez M., Fachin S., Sancho F. and et al. "Relation between beachface morphology and wave climate at Trafalgar beach Cadiz , Spain", *Journal of Coastal Research* **99**(1), pp. 171-185 (2008).
24. Antia, E.E. "Beach cusps and beach dynamics: A quantitative field appraisal", *Coast. Eng.*, **13**(3), pp. 263-272 (1989).
25. Longuet-Higgins, M.S. and Parkin, D.W. "Sea waves and beach cusps", *The Geographical Journal*, **128**(2), pp. 194-201 (1962).
26. Idier, D., Falques, A., Ruessink, B.G. and et al. Shoreline instability under low-angle wave incidence", *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, **116**(F4) (2011).
27. Ciriano, Y. "Field observations of swash zone infragravity motions and beach cusp evolution", *J. Geophys. Res.*, **110**(C2), pp. C02018 (2005).
28. Sriariyawat, A. "Formation and evolution of beach cusps", Doctoral dissertation, University of Nottingham (2010).

Archive of SID

29. Masselink, G., Hegge, B.J. and Pattiaratchi, C. "Beach cusp morphodynamics", *Earth Surface Processes and Landforms*, **22**(12), pp. 1139-1155 (1997).
30. Coco, G., O'Hare, T.J. and Huntley, D. "Beach cusps: A comparison of data and theories for their formation", *J. Coastal Res.*, **15**(3), pp. 741-749 (1999).
31. Van Gaalen, J.F. "Alternative statistical methods for analyzing geological phenomena: Bridging the gap between scientific disciplines", University of South Florida (2011).
32. Kaneko, A. "Formation of beach cusps in a wave tank", *Coastal Engineering*, **9**(1), pp. 81-98 (1985).
33. Zakeri Anarak, E., Adjami, M. and Rezaei, A. "Numerical and analytical modeling of beach cusps formation and evolution(case study; Roodick port)", Shahrood, Iran, MSc Thesis in Coasts Ports and Marine Structures (2017).
34. Mangor, K. "Shoreline management guidelines", Horsholm, Denmark, DHI Water & Environment (2004).
35. Module, B.W. "MIKE 21", A Training Course (2012).
36. Madsen, P.A., Sorensen, O.R. and Schaffer, H.A. "Surf zone dynamics simulated by a boussinesq type model", ICCH, Alle 5, 2970, Horsholm, Denmark (1997).
37. Mase, H. "Uprush-backrush interaction dominated and longwave dominated swash oscillations", Proc. Int.Symp.: Waves-Physical and Numerical Modelling, UBC Vancouver, August 21-24 1994, eds. M.Isaacson and M. Quirk, pp. 316-332 (1994).
38. Aoki, H. and Sunamura, T. "A laboratory experiment on the formation and morphology of beach cusps", *Transactions, Japanese Geomorphological Union*, **21**(3), pp. 291-306 (2000).
39. Lopes, V., Pais-Barbosa, J., Taveira-Pinto, F. and Veloso-Gomes, F. "Beach cusps: Using multivariate data analysis techniques for the identification of important variables and for predicting their spacing", *Journal of Coastal Research*, **64**, pp. 1106-1110 (2011).