

مدل سازی عددی پاسخ خط ساحلی به موج شکن های مغروق چند منظوره V شکل

مجتبی تجزیه چینی^{۱*}، حامد حاجی نیا^۲

۱- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه هرمزگان، استان هرمزگان، پست الکترونیکی: m.tajziehchi@hormozgan.ac.ir
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه هرمزگان، استان هرمزگان، پست الکترونیکی: hamed.hadjinia@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۹۱/۱۲/۱۹

* نویسنده مسوول

تاریخ دریافت: ۹۱/۵/۲۲

© نشریه علمی - پژوهشی اقیانوس شناسی ۱۳۹۲، تمامی حقوق این اثر متعلق به نشریه اقیانوس شناسی است.

چکیده

موج شکن های مغروق در سال های اخیر به عنوان یکی از سازه های ساحلی موثر به منظور محافظت از ساحل در برابر فرسایش مورد استفاده قرار گرفته اند. این سازه ها با مستهلک کردن انرژی موج باعث کاهش میزان انرژی رسیده به ساحل می شوند. در مطالعه حاضر، پاسخ خط ساحلی به یک موج شکن مغروق چند منظوره V شکل و با رویکردی جدید (استفاده از مدل غلتشی) به صورت عددی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. نتایج حاصل از مجموعه ای از مدل سازی های عددی دوبعدی به صورت متوسط گیری شده در عمق، نشان می دهند که پاسخ خط ساحلی به موج شکن های مغروق چند منظوره V شکل، بسته به فاصله آن از خط ساحلی، بین حالت فرسایش یا احیا متغیر است. البته عامل دیگری همچون تراز تاج موج شکن نیز نقش مهمی در تغییرات نیمرخ ساحل دارد. اگرچه تغییر تراز تاج، موجب تغییر در میزان پاسخ خط ساحلی می شود، اما بر روی حالت پاسخ خط ساحلی (فرسایش یا احیا) بی تاثیر است.

کلمات کلیدی: موج شکن های مغروق چند منظوره V شکل، مدل سازی عددی، پاسخ خط ساحلی

۱. مقدمه

از سواحل، آثار منفی کمتری بر منطقه ای استقرار خود ایجاد می کند. این امر موجب گردیده است که مهندسين و مدیران سواحل، سازه های مغروق را به عنوان یکی از سامانه های موثر و قابل انطباق با محیط زیست به کار ببرند (Evans and Ranasinghe, 2001; Ranasinghe et al., 2001). از سوی دیگر با بهینه کردن هندسه ی سازه ی مغروق برای ایجاد شکست های شدید امواج، می توان شرایط مناسبی را برای ورزش موج سواری و جاذبه های گردشگری فراهم نمود.

استفاده از سازه های متعارف حفاظت از سواحل مانند آب شکن ها و موج شکن های نمایان، در سال های اخیر به طور چشمگیری کاهش یافته که این امر را می توان به آثار نامطلوب احداث این نوع سازه ها بر روی چشم انداز طبیعی ساحل و محیط زیست اطراف آن نسبت داد. یکی از روش های نوین حفاظت، استفاده از موج شکن های مغروق است که ضمن حفاظت

در جدیدترین مطالعه، Ranasinghe و همکاران (۲۰۰۶) با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی و عددی، پاسخ خط ساحلی به یک موج شکن مغروق چندمنظوره را به صورت کیفی بررسی کردند. در این مطالعه، مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار MIKE 21CAMS انجام شده است. استفاده از این نرم‌افزار برای بررسی پاسخ خط ساحلی دارای دو نقص عمده است. اولین مورد، عدم توانایی نرم‌افزار مذکور در مدل‌سازی فرسایش خط ساحل در مطالعات نشان داده است که عدم دخالت تغییرات خط ساحل در مدل‌سازی‌های عددی، منجر به نتایج غیر واقعی در شکل و حجم تغییرات ریخت‌شناختی ساحل می‌گردد (Roelvink et al., 2006). از سوی دیگر در فرآیند مدل‌سازی هیدرودینامیکی استهلاک موج، از رابطه‌ی Jansen و Batjess (۱۹۷۵) بهره‌گیری شده و جریان عبوری از روی موج شکن با استفاده از گرادیان تنش‌های تابشی محاسبه گردیده و اثر جریان ناشی از غلتش‌های به وجود آمده‌ی ناشی از شکست موج نادیده گرفته شده است. بنابراین در تحقیقات Ranasinghe و همکاران (۲۰۰۶)، پارامترهای تعیین کننده در فرآیند تغییرات خط ساحلی به طور کامل در نظر گرفته نشده و مدل‌سازی واقعی‌تر پاسخ خط ساحلی نیاز به مطالعات بیشتری دارد.

هدف اصلی این مطالعه تمرکز بر روی پاسخ خط ساحلی به یک موج شکن مغروق چندمنظوره با در نظر گرفتن پارامترهای موثر و تعیین کننده‌ی حالت پاسخ خط ساحلی (فرسایش یا احیا) است. در مدل‌سازی هیدرودینامیکی اثر جریان‌های غلتشی ناشی از شکست موج روی موج شکن در نظر گرفته شده (Roelvink, 1993) و تاثیر دو پارامتر فاصله‌ی موج شکن مغروق از ساحل و عمق استغرق تاج سازه بر تغییرات خط ساحلی مورد بررسی قرار گرفته است. در مدل‌سازی ریخت‌شناختی از تکنیک‌های نوین به منظور شبیه‌سازی دقیق‌تر فرسایش و احیا استفاده شده است.

۲. مدل‌سازی عددی

در مدل‌سازی عملکرد موج شکن مغروق چند منظوره از نسخه‌ی تحقیقاتی بسته‌ی نرم افزاری (Delft3D v.3.27.01) استفاده گردیده است. نرم افزار مذکور یک برنامه‌ی چند بعدی مبتنی بر فرآیندهای مرحله‌ای شبیه‌سازی هیدرودینامیکی و مورفودینامیکی بوده که توسط دانشگاه صنعتی دلفت کشور هلند توسعه پیدا کرده است.

به منظور ایجاد شکست‌های شدید بر روی موج شکن‌های مغروق چندمنظوره برای ورزش موج‌سواری، شکل کلی سازه در پلان باید به شکل حرف لاتین «V» بوده و نوک آن روبه ناحیه‌ی فراساحلی و در جهت امواج غالب در منطقه باشد. هندسه‌ی مذکور موجب می‌شود که در اثر پدیده‌ی چرخش موج^۱، امواج هر چه بیشتر بر روی سازه تمرکز یافته و در نتیجه، شکست‌ها تشدید شوند (Pattiaratchi, 1999; Black and Mead, 2001). در جدول ۱ تعدادی از موج شکن‌های مغروق چندمنظوره به همراه موقعیت مکانی، وضعیت احداث و کاربری اصلی آن‌ها ذکر شده است. اگرچه در سال‌های اخیر جنبه‌های کاربرد موج شکن‌های مغروق چندمنظوره برای ورزش موج سواری به طور گسترده‌ای مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است (Black and Mead, 2001; Mead and Black, 2001 a, b, c; Dally, 2001)، اما هنوز اطلاعات اندکی در مورد پاسخ خط ساحلی به این قبیل سازه‌ها وجود دارد.

مرور اجمالی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که نه تنها در مورد پاسخ خط ساحلی به موج شکن‌های مغروق چندمنظوره، بلکه به طور کلی در مورد پاسخ خط ساحلی به سازه‌های مغروق نیز مطالعات نسبتاً اندکی صورت گرفته است. در سال‌های اخیر به منظور بررسی پارامترهای محیطی و سازه‌ای تعیین کننده‌ی پاسخ خط ساحلی به موج شکن‌های مغروق، مطالعات نسبتاً گسترده‌ای به صورت گردآوری اطلاعات مربوط به مشاهدات میدانی، مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی‌های عددی انجام شده است. مشاهدات میدانی (Ranasinghe and Turner, 2006)، مربوط به ۱۰ مورد از سازه‌های مغروق، نشان داد که در ۷۰ درصد موارد، سازه‌ی مغروق موجب فرسایش ناحیه‌ی سایه‌ی خود شده است. نتایج حاصل از مدل‌سازی‌های عددی انجام شده توسط Nobuoka و همکاران (۱۹۹۶) و Loveless و MacLeod (۱۹۹۹) و همین‌طور مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی انجام شده توسط Loveless و MacLeod (۱۹۹۹) و Turner و همکاران (۲۰۰۱) بیانگر این مطلب است که احداث موج شکن مغروق در خطوط ساحلی با نرخ بالای انتقال رسوب امتداد ساحل، احتمالاً موجب احیای ساحل در قسمت سایه‌ی سازه خواهد شد. از سوی دیگر در سواحلی با رژیم امواج غالباً عمود بر ساحل، موجب فرسایش آن قسمت خواهد گردید (Ranasinghe and Turner, 2006).

¹ Refraction

جدول ۱- موج‌شکن‌های مغروق چندمنظوره (ASR, 2004)

Name	Location	Status	Primary Purpose
Cables Reef	Cables Station, Western Australia	Construction Completed 1999	Surfing Enhancement
Narrowneck Reef	Gold Coast, Australia	Construction Completed 2000	Coastal Protection
Pratte's Reef	El Segundo, California	Construction Completed 2001	Surfing Enhancement
Mount Reef	Mount Maunganui, New Zealand	Construction 70% Complete	Surfing Enhancement
Opunake Reef	Opunake, New Zealand	Construction 30% Complete	Surfing Enhancement
Boscombe Reef	Bournemouth, England	Construction to begin June 2008	Surfing Enhancement
Kovalam Reef	Kerala, India	Construction to begin Nov 2008	Surfing Enhancement
Wells Estate	Port Elizabeth, South Africa	Detailed Design Complete	Coastal Protection
Blue Water Bay	Port Elizabeth, South Africa	Detailed Design Complete	Coastal Protection
New Beach	Port Elizabeth, South Africa	Detailed Design Complete	Coastal Protection
Pollock Beach	Port Elizabeth, South Africa	Detailed Design Complete	Coastal Protection
Orewa	Orewa, New Zealand	Detailed Design Complete	Coastal Protection

شکل موج‌شکن شامل یک مثلث متساوی‌الساقین در تاج موازی با افق است که وجوه جانبی آن با شیب ملایم ۱:۲ در قسمت فراساحلی با هم تلاقی پیدا می‌کنند. قسمت رو به خشکی موج-شکن نیز دیواره‌ای عمودی است. طول سازه (طول تاج سازه در امتداد ساحل در لبه‌ی رو به ساحل آن) و عرض آن (عرض تاج سازه در جهت عمود بر خط ساحلی) برای تمامی شبیه‌سازی‌ها ثابت و به ترتیب برابر ۱۰۰ متر و ۵۰ متر است. تمامی ابعاد مذکور، بر اساس دستورالعمل پیشنهادی (Pattiaratchi, 1999) و Black and Mead (2001) برای طراحی موج‌شکن‌های مغروق چندمنظوره، انتخاب شده است. با افزایش فاصله‌ی موج‌شکن از خط ساحلی، یک دیواره‌ی عمودی پیرامون پایه‌ی موج‌شکن در نظر گرفته می‌شود تا سطح اشغال شده از بستر توسط پایه‌ی سازه، ثابت باقی بماند. دیواره‌ی عمودی مذکور در عمل با استفاده از سازه‌های صندوقه‌ای^۱ اجرا می‌گردد. در این مطالعه از ضرایب زبری‌های متفاوت برای بستر و بدنه‌ی موج‌شکن استفاده شده است. به منظور مقایسه‌ی نتایج مدل‌های عددی، این مطالعه با نتایج مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی انجام شده توسط Ranasinghe و همکاران (2006) مقایسه شده است. به علاوه، شرایط حاکم بر شبیه‌سازی‌های عددی مطابق با آزمایشات مذکور در نظر گرفته شده است. در مدل‌سازی امواج، از طیف موج «JONSWAP» با مشخصات ارتفاع موج مشخصه‌ی ۱/۵ متر و دوره‌ی تناوب اوج^۲ ۱۰ ثانیه استفاده گردید. جهت غالب امواج برای حالت برخورد عمودی، ۹۰ درجه نسبت به امتداد خط ساحلی در نظر گرفته شد. در تمامی شبیه‌سازی‌ها برای تولید جریان‌های امتداد ساحلی، مقدار پراکنش جهتی^۳ پیرامون جهت غالب امواج، ۴۵ درجه

نرم افزار مذکور دارای مدول‌های مختلفی است که در این مطالعه از مدول‌های Flow, Wave, Morph در حالت دو بعدی متوسط‌گیری شده در عمق استفاده گردیده است.

مدول Wave بر پایه‌ی مدل موج طیفی SWAN مبتنی بوده و شامل تولید و انتشار موج، تولید موج توسط باد، برهمکنش غیر خطی امواج، واپاشی انرژی امواج برای بستر موجود و جریان‌های تولید شده در اثر امواج است. در مدول FLOW، معادلات ناویه-استوکس به همراه فرضیات بوسینسک به کار گرفته شده است و حل می‌گردند. این مدول، مدول مرکزی نرم افزار بوده و پایه‌ی هیدرودینامیکی سایر مدول‌ها است. در این مدول فرآیندهای انتقال رسوب و تغییرات بستر به صورت همزمان با تغییرات هیدرودینامیکی محاسبه می‌گردند (Deltares, 2010). در مدول Morph با بهره‌گیری از نتایج دو مدول گذشته، نرخ انتقال رسوب و تغییرات بستر محاسبه می‌شود.

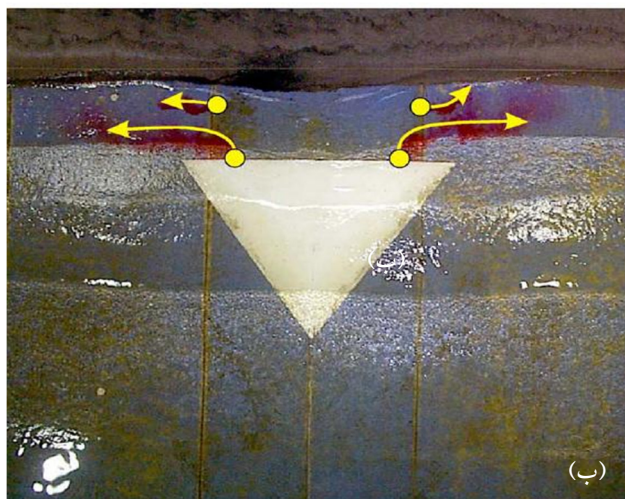
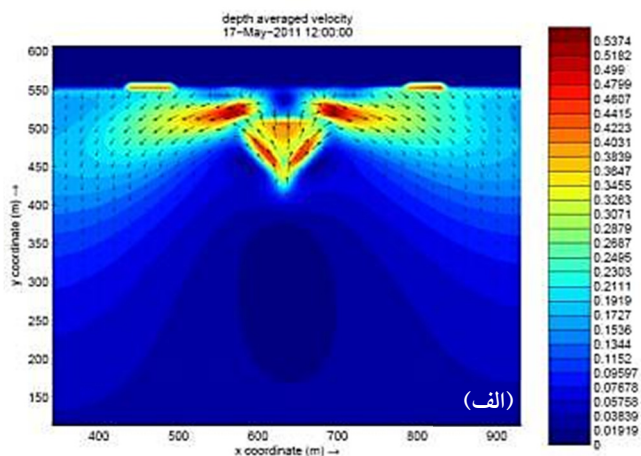
به منظور مقایسه‌ی نتایج مدل عددی با مدل‌سازی آزمایشگاهی انجام شده توسط Ranasinghe و همکاران (2006)، یک گستره‌ی مستطیل شکل به ابعاد ۱/۲۵ کیلومتر در ۰/۶ کیلومتر به عنوان دامنه‌ی مورد مطالعه در مدل عددی در نظر گرفته شده است (نسبت مدل فیزیکی به مدل عددی، ۱:۵۰ است). ابعاد سلول‌های استفاده شده در هر دو مدول در محل استقرار سازه برابر ۵ متر در ۵ متر بوده که به تدریج و با دور شدن از سازه در امتداد ساحل به ۵۰ متر (در جهت عمود بر ساحل) در ۲۵ متر (موازی ساحل) افزایش داده می‌شود. ابعاد سلول‌ها در جهت عمود بر خط ساحلی، ثابت و برابر ۵ متر است. برای دستیابی به نتایج هر چه دقیق‌تر، نیمرخ بستر به صورت یکنواخت در امتداد ساحل در نظر گرفته می‌شود. در جهت عمود بر ساحل نیز، نیمرخ ساحل منطبق بر نیمرخ تعادلی «Dean» در نظر گرفته می‌شود. موج‌شکن استفاده شده در این مطالعه، به شکل حرف لاتین «V» در پلان است.

¹ Caisson

² Peak period

³ Directional spreading

derBiezen و همکاران (۱۹۹۸) مدل‌سازی‌های عددی توسط Lesser و همکاران (۲۰۰۳) گزارش شده است.



شکل ۱- الگوی جریان در پشت موج‌شکن برای مدل SNCL1-100 الف- محاسبه شده توسط مدل عددی، ب- ردیابی شده برای مدل فیزیکی Ranasinghe و همکاران (۲۰۰۶)

الگوی جریان‌های ساحلی برای بستر اولیه در حالتی که فاصله‌ی نوک تاج سازه از خط ساحلی اولیه برابر ۲۵۰ متر باشد (مدل SNCL1-250) در شکل ۲ نمایش داده شده است. در این حالت نیز مشابه حالت قبلی، تاج موج‌شکن ۰/۵ متر پایین‌تر از تراز متوسط آب قرار دارد. نتایج نشانگر تمرکز امواج بر روی نوک فراساحل سازه و یک جریان قوی به سمت ساحل بر روی تاج آن است. در این حالت علاوه بر دو سلول چرخشی مشاهده شده در حالت قبل (فاصله‌ی ۱۰۰ متری سازه از ساحل)، دو سلول چرخشی دیگر نیز در مجاورت خط ساحلی مشاهده می‌گردد. سلول‌های چرخشی در دو وجه کناری موج‌شکن در

منظور شده است. در این مطالعه تاثیر جزر و مد و باد در نظر گرفته نشده است. به دلیل آنکه سازه‌های مذکور اغلب در سواحل تفریحی با بستر ماسه‌ای احداث می‌شوند، رسوبات بستر از نوع ماسه‌ای با قطر متوسط (D₅₀) برابر ۰/۲۵ میلی‌متر انتخاب شده است (Ranasinghe et al., 2006). برای اطمینان از دستیابی به تعادل هیدرودینامیکی قبل از شروع فرآیندهای مورفودینامیکی، تمامی شبیه‌سازی‌ها در هر دو مدول موج و جریان مورد استفاده، به مدت ۱۲ ساعت اجرا گردیدند. شرایط حاکم بر مدل‌سازی‌های عددی در جدول ۲ نشان داده شده است و تمامی مدل‌ها تا دستیابی به تعادل مورفودینامیکی اجرا گردیدند.

جدول ۲- شرایط هندسی موج‌شکن در شبیه‌سازی عددی

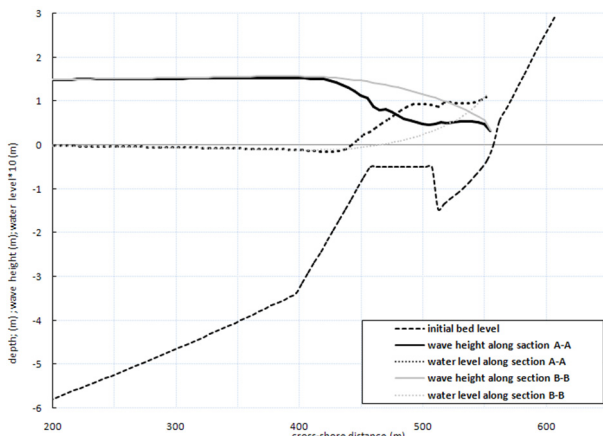
تراز تاج سازه (زیر سطح متوسط آب) برابر با ۱/۰ متر	تراز تاج سازه (زیر سطح متوسط آب) برابر با ۰/۵ متر	فاصله‌ی خط ساحلی اولیه از نوک تاج سازه (Sa متر)
SNCL2-100	SNCL1-100	۱۰۰
SNCL2-150	SNCL1-150	۱۵۰
SNCL2-250	SNCL1-250	۲۵۰
SNCL2-350	SNCL1-350	۳۵۰
SNCL2-450	SNCL1-450	۴۵۰

۳. بررسی الگوی جریان‌های ساحلی

الگوی جریان‌های ساحلی بعد از رسیدن به حالت تعادل هیدرودینامیکی برای بستر اولیه، در حالتی که فاصله‌ی نوک فراساحلی تاج موج‌شکن مغروق، در فاصله‌ی ۱۰۰ متری از خط ساحلی اولیه قرار دارد (مدل SNCL1-100)، در شکل ۱ نشان داده شده است. تاج سازه در این مدل ۰/۵ متر پایین‌تر از تراز متوسط سطح آب قرار دارد. نتایج مدل عددی نشان دهنده‌ی تمرکز نسبی امواج در نوک فراساحل موج شکن، جریان‌های شدید و واگرا بر روی تاج مسطح سازه و ایجاد دو سلول چرخشی در خلاف جهت یکدیگر در دو وجه کناری آن است. این الگوی چرخشی، ناشی از جریان شدید عبوری از روی تاج سازه بوده که در برخورد با خط ساحلی واگرا شده و دو جریان واگرا در امتداد ساحل ایجاد می‌نماید. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، الگوی جریان در پشت موج‌شکن با نتایج مدل-سازی فیزیکی کیفی Ranasinghe و همکاران (۲۰۰۶) همخوانی خوبی دارد. الگوهای مشابهی نیز پیرامون موج‌شکن‌های مغروق بر اساس مشاهدات میدانی توسط Funakoshi و همکاران (۱۹۹۴) و Dean و همکاران (۱۹۹۷)، در مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی توسط Nobuoka و همکاران (۱۹۹۸)، Van

چرخشی دو سلولی به یک سامانه‌ی متقارن چهار سلولی، طی افزایش فاصله‌ی سازه از خط ساحلی است.

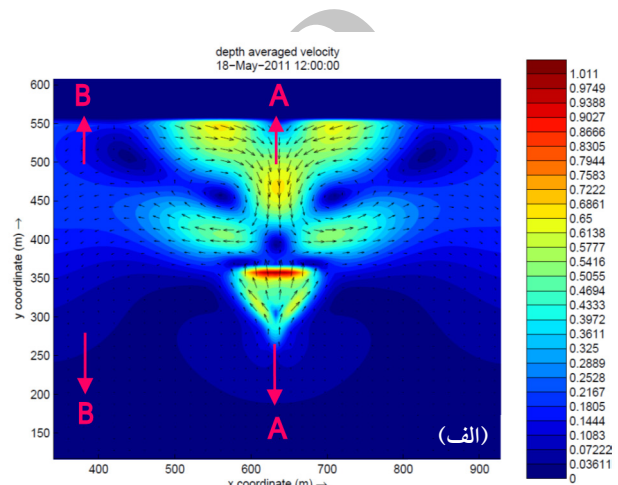
شکل ۳ نیمرخ ارتفاع موج و تراز اولیه‌ی بستر را در دو مقطع A-A (عبوری از روی موج شکن) و B-B (در فاصله‌ی ۲۵۰ متری از محور تقارن موج شکن و بر روی ساحل مسطح) در حالتی که نوک تاج موج شکن در فاصله‌ی ۱۰۰ متری از خط ساحلی اولیه قرار دارد (مدل SNCL1-100) را نشان می‌دهد. کاهش ارتفاع موج در داخل ناحیه‌ی شکست و بر روی تاج سازه در مقطع A-A موجب می‌شود که تراز سطح آب در این مقطع بالاتر از مقدار آن در مقطع B-B باشد. گرادیان مذکور در تراز سطح آب بین دو مقطع، موجب ایجاد جریان‌های واگرا در ناحیه‌ی سایه‌ی سازه در هر دو نیمه‌ی سمت راست و چپ و همچنین در امتداد خط ساحلی می‌گردد. فاصله‌ی اندک میان وجه رو به خشکی سازه و خط ساحلی، موجب محدود شدن جریان عمود بر ساحل گذرنده از روی تاج سازه می‌گردد.



شکل ۳- نیمرخ ارتفاع موج، تراز سطح آب و عمق بستر در مقطع A-A و B- در مدل SNCL1-100

بنابراین عامل اصلی ایجاد جریان‌های امتداد ساحلی در قسمت سایه‌ی سازه، ناشی از گرادیان تراز سطح آب در امتداد ساحل بوده که ناشی از خیز آب موج در این قسمت است. علاوه بر موارد ذکر شده در بالا، جریان‌های ناشی از شکست مورب امواج بر روی دو وجه کناری موج شکن چندمنظوره نیز در جریان‌های گذرنده از روی تاج سازه و جریان‌های مجاور خط ساحلی در قسمت سایه‌ی سازه، مشارکت می‌کند. مورد اخیر به دلیل شکل خاص این نوع سازه‌ها می‌باشد. در مجموع تمامی فرآیندهای توضیح داده شده منجر به یک الگوی متقارن شامل دو سلول

نتیجه‌ی جریان رو به ساحل بر روی تاج سازه ایجاد می‌گردد که در برخورد با سلول‌های مجاور خط ساحلی، واگرا شده و منجر به ایجاد دو جریان در امتداد خط ساحلی (در فاصله‌ی میان موج شکن و ساحل) می‌شود. در این حالت، جهت چرخش سلول‌های مجاور خط ساحلی به گونه‌ای است که منجر به ایجاد دو جریان همگرا در خط ساحلی می‌شود. در این حالت نیز، الگوی جریان توصیف شده ناشی از مدل‌سازی عددی، انطباق خوبی با نتایج مدل‌سازی‌های فیزیکی کیفی (Ranasinghe et al., 2006) دارد.



شکل ۲- الگوی جریان پشت موج شکن برای مدل SNCL1-250 الف- محاسبه شده توسط مدل عددی، ب- ردیابی شده برای مدل فیزیکی Ranasinghe و همکاران (۲۰۰۶)

با توجه به نتایج به دست آمده‌ی فوق، مشخصه‌ی بارز و قابل ذکر در مورد الگوی جریان‌های ساحلی حاصل از برخورد عمودی امواج، تغییر حالت این الگوها از یک سامانه‌ی متقارن

۳-۱. بررسی تاثیر تراز تاج سازه بر الگوی جریان

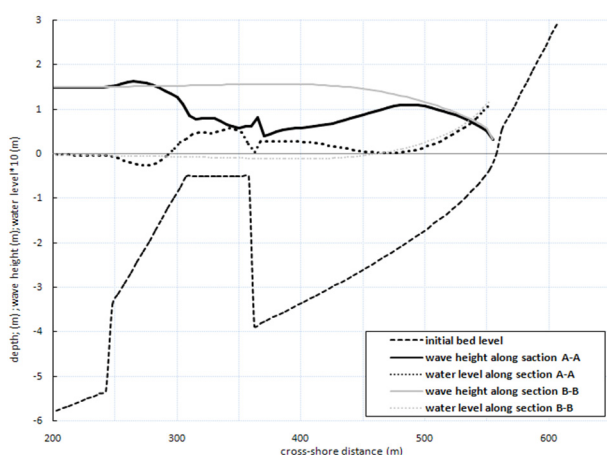
به منظور بررسی تاثیر تراز تاج موج شکن مغروق، مجموعه‌ای از مدل‌سازی‌های عددی شامل تعداد پنج مدل با در نظرگیری تراز تاج در عمق یک متری یا به عبارت دیگر با نسبت عمق استغراق تاج به ارتفاع موج در آب عمیق، برابر $0/33$

$$\left(\frac{S}{H_0}\right) = 0.33$$

انجام گردید (جدول ۱). نتایج نشان می‌دهند که در این حالت هیچ تغییری در الگوی جریان‌ها ایجاد نمی‌گردد. بدین معنی که الگوهای جریان‌های ایجاد شده در مدل‌های مربوطه با الگوهای متناظر آن در مدل‌هایی با عمق استغراق $0/5$ متری

$$\left(\frac{S}{H_0}\right) = 0.67$$

کاملاً یکسان است. تنها تاثیر قابل ملاحظه افزایش عمق استغراق، تضعیف کلی شدت جریان‌های ایجاد شده در مجاورت خط ساحلی است.



شکل ۴- نیمرخ ارتفاع موج، تراز سطح آب و عمق بستر در مقطع A-A و B-B در مدل SNCL1-250

۳-۲. پاسخ خط ساحلی

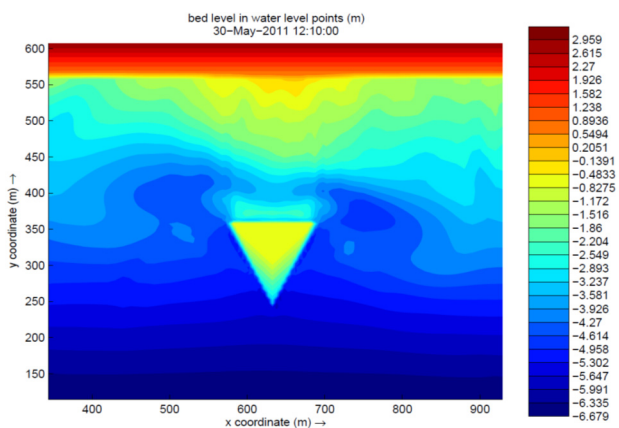
نرم افزار Delft3D قابلیت مدل‌سازی تغییرات خط ساحلی را با دقت مناسبی دارد. در این مطالعه از نیمرخ تعادلی «Dean» برای بستر اولیه استفاده گردیده که در آن، شیب بستر در مجاورت خط آب تند است. با توجه به عدم دخالت دادن جزر و مد در

چرخشی متقارن نسبت به مقطع A-A به همراه جریان‌های واگرا در قسمت سایه‌ی سازه در مجاورت خط ساحلی می‌گردد.

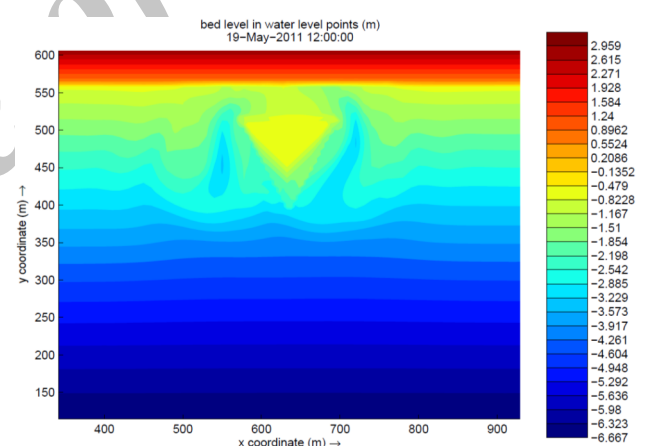
شکل ۴، نیمرخ سطح آب، ارتفاع موج و تراز اولیه‌ی بستر را در دو مقطع A-A و B-B در حالتی که نوک تاج موج شکن در فاصله‌ی ۲۵۰ متری از خط ساحلی اولیه قرار دارد (مدل SNCL1-250) نشان می‌دهد. در این مورد به دلیل فاصله‌ی زیاد بین سازه و خط ساحلی، جریان‌های گذرنده از روی تاج سازه محدود نمی‌گردد. همچنین بر خلاف مورد قبلی (مدل SNCL1-100)، در این مورد بیشینه مقدار خیزآب موج بر روی قسمت شیبدار رو به ناحیه‌ی فراساحلی ایجاد شده و در طول تاج سازه به تدریج کاهش یافته و به تراز متوسط دریا نزدیک می‌شود. بخشی از گرادیان ایجاد شده در تنش تابشی در داخل ناحیه‌ی شکست موجب رانش جریان در جهت عمود بر خط ساحلی از روی تاج سازه می‌گردد. در نقاطی که میزان خیزآب بسیار ناچیز می‌شود جریان عمود بر خط ساحلی نیز تقریباً برابر صفر است. با توجه به شکل ۴ مشاهده می‌شود که بخشی از واپاشی موج بر روی تاج سازه رخ می‌دهد که به همراه گرادیان فشار هیدرواستاتیکی ناشی از خیزآب، موجب حفظ جریان عمود بر خط ساحلی بر روی تاج سازه می‌شود. خیزآب مثبت کوچکی که در پشت موج شکن مشاهده می‌شود باعث ایجاد گرایان فشار هیدرواستاتیکی شده و باعث ایجاد جریان‌های واگرا در این بخش می‌گردد. در این مورد نیز مشابه با مدل قبل (SNCL1-100)، جریان‌های ناشی از شکست مورب امواج بر روی دو وجه کناری موج شکن در جریان‌های عبوری از روی تاج سازه و جریان‌های مجاور خط ساحلی مشارکت می‌کنند. فاصله‌ی نسبتاً زیاد وجه رو به خشکی موج شکن و خط ساحلی موجب شکل‌گیری و انتشار دوباره‌ی امواج در قسمت سایه سازه می‌شود. در اثر شکست این امواج و خیزآب حاصل از آن، گرادیان در این ناحیه و در مجاورت خط ساحلی ایجاد می‌گردد اما با توجه به این که ارتفاع امواج مذکور از ارتفاع امواج مجاور آن در مقطع B-B کمتر است، گرادیان حاصل موجب رانش جریان‌ها از هر دو طرف به داخل ناحیه‌ی سایه‌ی سازه می‌گردد. جریان‌های مذکور در مجاورت خط ساحلی همگرا شده و به منظور اکتانای شرط تعادل جرم، به سمت ناحیه‌ی فراساحلی تغییر جهت می‌دهد که این پدیده موجب ایجاد الگوی چرخشی می‌شود. الگوی نهایی، شامل چهار سلول چرخشی متقارن نسبت به مقطع A-A، به همراه جریان‌های همگرا در مجاورت خط ساحلی در ناحیه‌ی سایه سازه است.

با قرارگیری سازه در فاصله‌ی ۲۵۰ متری از خط ساحلی اولیه، یک پیش‌آمدگی رو به ناحیه‌ی فراساحل در خط ساحلی ایجاد می‌گردد. جابه‌جایی بیشینه‌ی کانطور با عمق ۰/۵ متر در این حالت برابر ۲۲ متر به سمت فراساحل است (شکل ۷). احیای ناحیه‌ی مجاور خط ساحلی (حدود ۱/۲ متر)، فرسایش موضعی (حدود ۰/۳ متر) در حد فاصل خط ساحلی و وجه رو به خشکی موج شکن و فرسایش (حدود ۰/۴ متر) در دو طرف ناحیه‌ی احیا شده در خط ساحلی در شکل ۸ نشان داده شده است. با توجه به مطالب فوق، اگرچه برخورد عمودی امواج در حالتی که موج شکن در فاصله‌ی نزدیک به ساحل قرار دارد، موجب فرسایش خط ساحلی می‌شود، اما با افزایش فاصله‌ی سازه از خط ساحلی، حالت احیا را در ساحل در بخش سایه‌ی سازه خواهیم داشت. نتایج مشابهی در مدل‌سازی فیزیکی Ranasinghe و همکاران (۲۰۰۶) و مدل‌سازی‌های عددی برای موج‌شکن‌های مغروق موازی خط ساحل در تحقیقات Lesser و همکاران (۲۰۰۳) و Ranasinghe و همکاران (۲۰۱۰) مشاهده شده است.

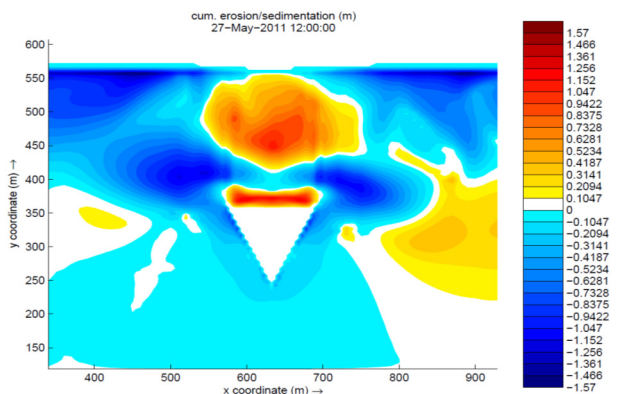
مدل‌سازی و همچنین عمق کم آب در مجاورت خط ساحلی، جابه‌جایی افقی کانطور با عمق ۰/۵ متر به عنوان پاسخ خط ساحلی در نظر گرفته می‌شود. لازم به ذکر است که از آنجایی که نتایج آزمایشگاهی تنها شامل الگوی جریان و شکل کلی (کیفی) تغییرات ساحلی است (Ranasinghe et al., 2006)، فقط به صحت‌سنجی کیفی اکتفا شده است. از سوی دیگر از آنجا که الگوی انتقال رسوب و رسوب‌گذاری تابع مستقیم شکل جریان می‌باشد، درستی الگوی جریان به درستی الگوی انتقال رسوب (به صورت کیفی) منجر می‌شود. در شرایطی که موج شکن در فاصله‌ی ۱۰۰ متری از خط ساحلی قرار گیرد، جریان‌های واگرای تولید شده در مجاورت خط ساحلی، جابه‌جایی بیشینه‌ی کانطور با عمق ۰/۵ متر برابر ۱۳ متر به سمت خشکی را به وجود می‌آورد (شکل ۵). همچنین فرسایش نسبتاً قابل توجهی (حدود ۱/۵ متر) در ناحیه‌ی سایه‌ی سازه ایجاد می‌شود. رسوبات فرسایش یافته از ناحیه‌ی سایه‌ی سازه، در دو وجه کناری در نزدیکی نوک آن، ته‌نشین شده و موجب احیای این ناحیه شده‌اند (شکل ۶).



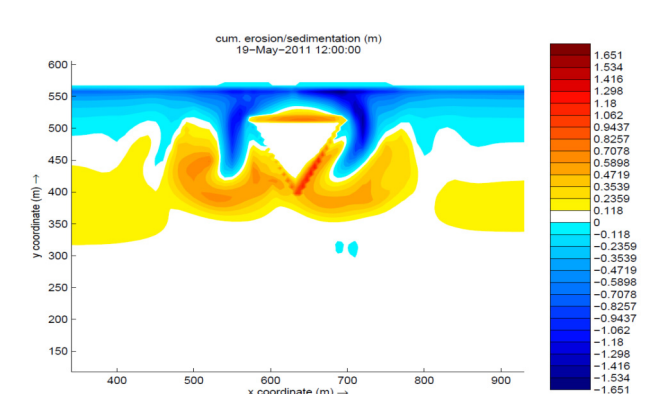
شکل ۷- نیمرخ تعادل بستر در مدل عددی برای مدل SNCL1-250



شکل ۵- نیمرخ تعادل بستر در مدل عددی برای مدل SNCL1-100



شکل ۸- فرسایش و احیای ایجاد شده در بستر در مدل عددی برای مدل SNCL1-250



شکل ۶- فرسایش و احیای ایجاد شده در بستر در مدل عددی برای مدل SNCL1-100

$$\left(\frac{S}{H_0} = 0.67\right)$$

میزان تغییرات خط ساحلی (حجم فرسایش یا احیا) است. بدین معنی که قرارگیری تاج موج شکن در عمق یک متری موجب کاهش مقدار تغییرات بستر اعم از فرسایش یا احیا می گردد که این امر را می توان به تضعیف کلی شدت جریان های ایجاد شده توسط سازه در اثر کاهش تراز تاج آن نسبت داد. لازم به ذکر است که حالت پاسخ خط ساحلی (فرسایش یا احیا) با کاهش تراز تاج سازه، بدون تغییر باقی می ماند. خلاصه ی نتایج در جدول ۳ نشان داده شده است. در این جدول، علامت منفی نشانگر جابجایی خط ساحل به سمت خشکی و بیانگر حالت فرسایش و اعداد مثبت نشانگر جابجایی خط ساحل به سمت منطقه ی فراساحلی و بیانگر حالت احیا است.

۳-۳. برآورد پاسخ خط ساحلی

با توجه به نتایج مدل سازی به وضوح می توان مشاهده نمود که پاسخ خط ساحلی به یک موج شکن مغروق چند منظوره V شکل، می تواند به هر دو حالت فرسایش یا احیا باشد. بنابراین ارائه ی هر روش تجربی که قادر به پیش بینی دقیق تر حالت و میزان پاسخ خط ساحلی به سازه های مذکور باشد، بسیار مطلوب خواهد بود.

به منظور درک بیشتر پاسخ خط ساحلی به موج شکن مغروق چند منظوره V شکل، تغییرات خط ساحل به ازای جابجایی موج شکن نسبت به ساحل و عمق استغراق در شکل ۹ مورد بررسی قرار می گیرد. در این نمودارها، Y جابه جایی خط ساحلی نسبت به شرایط اولیه، Sa فاصله ی نوک فراساحلی تاج سازه از خط اولیه ی ساحل، B طول تاج موج شکن در امتداد خط ساحلی و SZW عرض ناحیه ی شکست طبیعی موج (فاصله ی خط شکست طبیعی موج از ساحل اولیه) برای بستر تخت و بدون موج شکن است. نسبت S_a/SZW محور افقی در نمودار شکل ۹ نقش مهمی در تعیین الگوی جریان مجاور ساحل به شکل دو سلولی یا چهارسلولی دارد. با توجه به مطالب بخش ۳-۲ الگوی جریان، کنترل کننده ی همگرایی یا واگرایی جریان های مجاور ساحل بوده و در نتیجه تعیین کننده ی حالت پاسخ خط ساحل (فرسایش یا احیا) است. این نمودار برای برآورد حالت پاسخ خط ساحلی (فرسایش یا احیا) و میزان جابجایی خط ساحلی با

در حالتی که موج شکن در نزدیکی خط ساحلی قرار داشته باشد، فرسایش ایجاد شده در قسمت سایه ی سازه در اثر جریان رو به ساحل در روی تاج سازه و جریان های واگرای پشت سازه است. چرخش جریان های واگرای مذکور به سمت ناحیه ی فراساحل و کاهش سرعت آن ها در آب عمیق تر در دو وجه کناری سازه در نزدیکی نوک فراساحلی آن، موجب ته نشینی رسوبات در این ناحیه و احیای این بخش می شود. در حالتی که موج شکن در فاصله ی بیشتری از خط ساحلی قرار داشته باشد، یک پیش آمدگی در خط ساحلی در قسمت سایه ی سازه ایجاد می گردد. علت این پدیده، تجمع رسوبات در ناحیه ی مذکور در اثر همگرایی جریان های حاصل از الگوی چرخشی در این ناحیه از سایه ی سازه در مجاورت خط ساحلی است. فرسایش ناحیه ی حد فاصل وجه رو به خشکی موج شکن و خط ساحلی و همچنین فرسایش دو سمت ناحیه ی احیا شده در مجاورت خط ساحلی، در اثر الگوی چرخشی جریان ها در این ناحیه ایجاد می شود. مقدار جابه جایی خط ساحلی برای تمامی مدل سازی های عددی انجام گرفته در این مطالعه در جدول ۳ خلاصه شده است. با توجه به این نتایج مشاهده می شود که تحت شرایط برخورد عمودی امواج، با افزایش فاصله ی موج شکن مغروق از خط ساحلی اولیه، میزان فرسایش در خط ساحلی کاهش یافته و سپس به حالت احیا تبدیل می شود، تا جایی که بیشترین اندازه ی پیش آمدگی خط ساحلی، در حالت استقرار سازه در فاصله ی ۲۵۰ متری نوک فراساحلی تاج سازه از خط ساحلی اولیه ایجاد می گردد. با افزایش مجدد فاصله ی موج شکن از خط ساحلی، اندازه ی پیش آمدگی به تدریج کاهش می یابد. دلیل پدیده ی اخیر، کاهش تاثیر سازه بر روی فرآیندهای مورفودینامیکی ناحیه ی مجاور خط ساحلی است.

جدول ۳- مقادیر جابجایی خط ساحلی محاسبه شده توسط مدل عددی به ازای شرایط مختلف

فاصله ی خط ساحلی اولیه از نوک تاج موج شکن	تراز تاج سازه (زیر سطح آب) برابر ۰/۵- متر		تراز تاج سازه (زیر سطح آب) برابر ۱/۰- متر	
	نامگذاری ساحلی آزمایش	جابجایی خط ساحلی (متر)	نامگذاری ساحلی آزمایش	جابجایی خط ساحلی (متر)
۱۰۰	SNCL1-100	-۱۳	SNCL2-100	-۱۲
۱۵۰	SNCL1-150	-۱۰	SNCL2-150	-۱۱
۲۵۰	SNCL1-250	۲۲	SNCL2-250	۱۸
۳۵۰	SNCL1-350	۱۸	SNCL1-350	۱۷
۴۵۰	SNCL1-450	۱۳	SNCL2-450	۸

۳-۲-۱. بررسی تاثیر تراز تاج سازه بر پاسخ خط ساحلی

تنها تفاوت قابل ذکر در پاسخ خط ساحلی به موج شکن با تراز تاج در عمق ۱/۰ متری

ساحل (گذرنده از روی تاج سازه)، گرادیان تراز سطح آب در امتداد ساحل (در قسمت سایه‌ی سازه) و جریان‌های چرخشی ایجاد شده در طول دو وجه کناری سازه است.

در حالتی که سازه در نزدیکی خط ساحلی قرار دارد ($S_a/SZW < 1$)، یک الگوی چرخشی دو سلولی به همراه جریان‌های واگرا در امتداد خط ساحلی ایجاد می‌گردد که در نتیجه، خط ساحلی در قسمت سایه‌ی سازه، دچار فرسایش موضعی می‌شود. در حالتی که سازه در فاصله‌ی دورتری از خط ساحلی قرار گیرد ($S_a/SZW > 1.5$) یک الگوی چرخشی چهار سلولی به همراه جریان‌های همگرا در خط ساحلی در قسمت سایه‌ی سازه ایجاد می‌شود که موجب احیای موضعی خط ساحلی می‌گردد.

تغییر تراز تاج سازه، موجب تغییر میزان جابه‌جایی خط ساحلی شده و تاثیری بر حالت پاسخ خط ساحلی (فرسایش یا احیا) ندارد (نمودار نقطه چین را در شکل ۹ را ببینید).

در نهایت، نموداری برای برآورد حالت و میزان پاسخ خط ساحلی به یک موج‌شکن مغروق چند منظوره V شکل، ارائه می‌گردد. نمودار مذکور نشان می‌دهد در شرایطی که $S_a/SZW < 1$ باشد، خط ساحلی دچار فرسایش شده و در شرایطی که $S_a/SZW > 1.5$ باشد، پدیده‌ی احیای موضعی را در ساحل در قسمت سایه‌ی سازه خواهیم داشت.

بدیهی است که عوامل بسیاری همچون ابعاد و زاویه‌ی موج شکن، دانه‌بندی بستر و مشخصات امواج تابیده (ارتفاع، دوره‌ی تناوب و جهت تابش موج) در تغییرات خط ساحلی موثر بوده و در نتیجه‌ی تغییر پارامترهای مذکور، امکان حصول نتایج به غیر از آنچه در این مطالعه ارائه گردیده است، وجود دارد. لذا بررسی تاثیر تغییر این پارامترها بر روی پاسخ خط ساحلی، می‌تواند مورد تحقیقات بعدی قرار گیرد.

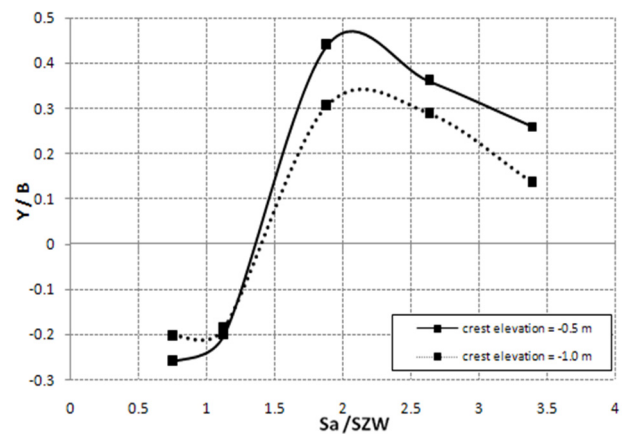
منابع

Apotsos, A.; Raubenheimer, B.; Elgar, S., 2007. Effects of wave rollers and bottom stress on wave setup. Journal of Geophysical research, Vol. 112.

ASR., 2004. Oil Piers Reef Phase II. Detailed Design of an Offshore Submerged Reef for Erosion Control at Oil Piers, Ventura County, California. Prepared for

وجود یک موج‌شکن مغروق چند منظوره V شکل پیشنهاد می‌گردد.

همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، در شرایطی که موج‌شکن مغروق در داخل ناحیه‌ی شکست طبیعی قرار گیرد ($S_a/SZW < 1$)، حالت پاسخ خط ساحلی برای برخورد عمودی امواج به‌صورت فرسایش خواهد بود. با افزایش فاصله‌ی سازه از خط ساحلی میزان فرسایش کاهش یافته و به حالت احیا تبدیل می‌شود.



شکل ۹. پاسخ خط ساحلی به موج‌شکن مغروق چندمنظوره در حالت برخورد عمودی امواج

در شرایطی که $S_a/SZW > 1.5$ باشد، یک پیش‌آمدگی در خط ساحلی به‌وجود خواهد آمد. اندازه‌ی پیش‌آمدگی در خط ساحلی، با افزایش فاصله‌ی سازه از خط ساحلی، افزایش یافته و در نسبت $S_a/SZW = 2$ به مقدار بیشینه‌ی خود می‌رسد. با افزایش مجدد فاصله‌ی سازه از خط ساحلی، اندازه‌ی پیش‌آمدگی خط ساحلی شروع به کاهش می‌نماید. دلیل این امر، کاهش تاثیر جریان‌های ایجاد شده توسط سازه بر روی الگوی جریان‌های مجاور ساحل است. تاثیر تراز تاج موج‌شکن مغروق چندمنظوره نیز در شکل ۹ نشان داده شده است (نمودار نقطه چین). کاهش تراز تاج سازه موجب کاهش میزان جابه‌جایی خط ساحلی بدون تغییر در حالت پاسخ خط ساحلی (فرسایش یا احیا) می‌گردد.

۴. نتیجه‌گیری

نتایج مدل‌سازی عددی نشان می‌دهند که پاسخ خط ساحلی به یک موج‌شکن مغروق چندمنظوره V شکل، توسط الگوی جریان‌های ساحلی کنترل می‌شود. این الگوها شامل جریان رو به

- Coastal Sediments '03. World Scientific Publishing Co., Florida, USA. CD-ROM.
- Loveless, J.H and MacLeod, B., 1999. Influence of sea level Set-up driven currents on sediment movement behind detached breakwaters. Coastal Sediments Conference, New York.
- Loveless, J.H.; and MacLeod, B., 1999. The design and performance of detached breakwaters. MAFF Conference, Keele University.
- Mead, S.; Black, K., 2001a. Field studies leading to the bathymetric classification of world class surfing breaks. Journal of Coastal Research, 29: 5–20.
- Mead, S.; Black, K., 2001b. Functional component combinations controlling surfing wave quality at world class surfing breaks. Journal of Coastal Research, 29: 21–32.
- Mead, S.; Black, K., 2001c. Predicting the breaking intensity of surfing waves. Journal of Coastal Research, 29: 51–65.
- Nobuoka, H.; Irie, I.; Kato, H.; Mimura, N., 1996. Regulation of nearshore circulation by submerged breakwater for shore protection. Proceedings of 25th International Conference on Coastal Engineering. ASCE, Orlando, USA. 2391–2403 pp.
- Pattiaratchi, C., 1999. Design studies for an artificial surfing reef: cable station, Western Australia. Proceedings of Coasts and Ports '99. IEAust, Perth, Australia. 485–489 pp.
- Physical model study of the gold coast artificial reef. Journal of Coastal Research, 29: 131–146.
- Ranasinghe, R.; Hacking, N.; Evans, P., 2001. Multi-functional artificial surfbreaks: a review, Report No. CNR 2001.015, NSW Dept. of Land and Water Conservation, Parramatta, Australia.
- Ranasinghe, R.; Turner, I.L. and Symonds, G., 2006. Shoreline response to multi-functional artificial surfing reefs: A numerical and physical modeling study. USACE by ASR Limited, Marine Consulting and Research, Raglan, New Zealand.
- Black, K.; Mead, S., 2001. Design of the gold coast reef for surfing, beachamenity and coastal protection: surfing aspects. Journal of Coastal Research, 29: 115–130.
- Calabrese, M.; Vicinanza, D.; Buccino, M., 2008. 2D Wave setup behind submerged breakwaters. Ocean Engineering, 35(10): 1015-1028.
- Dally, W., 2001. Improved stochastic models for surfing climate. Journal of Coastal Research, 29: 41–50.
- Dean, R.G.; Chen, R.; Browder, A.E., 1997. Full scale monitoring study of a Submerged breakwater, Palm Beach, Florida, USA. Coastal Engineering, 29: 291–315.
- Deltares., 2010. Delft3D-FLOW, Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments, user manual.
- Evans, P.; Ranasinghe, R., 2001. Artificial surfing reefs: a new paradigm incoastal protection. Proceedings of Coasts and Ports '01, Gold Coast. IEAust, Australia. 128–133 pp.
- Funakoshi, H.; Shiozawa, T.; Tadokoro, T.; Tsuda, S., 1994. Drifting characteristics of littoral sand around submerged breakwater. Proceedings of International Conference on Hydro-technical Engineering for Port and Harbor Construction. JSCE, Yokosuka, Japan. 1157–1178 pp.
- Haller, M.; Dalrymple, R.; Svendsen, I.A., 2002. Experimental study of nearshore dynamics on a barred beach with rip currents. Journal of Geophysical Research 107 (C6), doi: 10.1029/2001JC000955.
- Hutt, J.; Black, K.; Mead, S., 2001. Classification of surf breaks in relation to surfing skill. Journal of Coastal Research, 29: 66–81.
- Lesser, G.R.; Vroeg, J.H.; Roelvink, J.A.; de Gerloni, M.; Ardone, V., 2003. Modelling the morphological impact of submerged offshore breakwaters. Proceedings of

- Conference on HydroScience and Engineering. Philadelphia, USA. 1-7 p.
- Roelvink, J.A., 2006. Coastal morphodynamic evolution techniques. *Coastal Engineering*, 53(2-3): 277-287.
- Roelvink, J.A., 1993. Dissipation in random wave groups incident on a beach. *Coastal Engineering*, 19(1-2): 127-150.
- Symonds, G.; Black, K.; Young, I., 1995. Wave driven flow over shallow reefs. *Journal of Geophysical Research*, 100 (C2), 2639–2648.
- Van der Biezen, S.C.; Roelvink, J.A.; van de Graaff, J.; Schaap, J.; Torrini, L., 1998. 2DH morphological modelling of submerged breakwaters. *Proceedings of 26th International Conference on Coastal Engineering*, 2028–2041 pp.
- Coastal Engineering, 53(7): 589-611.
- Ranasinghe, R.; Larson, M.; Savioli, J., 2010. Shoreline response to a single shore-parallel submerged breakwater. *Coastal Engineering* 57(11-12):1006-1017.
- Ranasinghe, R.; Symonds, G.; Black, K.; Holman, R., 2004. Morphodynamics of intermediate beaches: a video imaging and numerical modelling study. *Coastal Engineering*, 51: 629–655.
- Ranasinghe, R.; Turner, I.L., 2006. Shoreline response to submerged structures: a review. *Coastal Engineering*, 53: 65–79.
- Roelvink, J.A.; Lesser, G.R.; Wegen, M., 2006. Morphological modeling of the wet-dry interface at various time scales. *Proceedings of the 7th International*