

مدل سازی عددی فرآیندهای مورفولوژیکی ناحیهی سواش در سواحل درشت‌دانه با مدل کد باز XBeach

سپهر ملکی تقی‌آباد (دانشجوی دکتری)

مهدی عجمی* (استادیار)

احمد احمدی (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود.

مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۴۰۳)
دوره‌ی ۴۰، شماره‌ی ۳، صص. ۱۱۷-۱۳۷، (پژوهشی)

در سواحل ناحیهی سواش، به دلیل اندرکنش جریان‌های ساحلی، آب زیرزمینی و رسوب‌ها بسیار مهم هستند. بر این اساس، مدل‌سازی عددی فرآیندهای هیدرودینامیک-مورفودینامیک نیز اهمیت دارد. ارزیابی عملکرد مدل XBeach و دو ماژول SB و NH آن در شبیه‌سازی فرآیندهای سواش، مقایسه و حساسیت‌سنجی نتایج به‌عنوان خلأ مطالعاتی، در مطالعه‌ی حاضر مطرح بوده است. پژوهش حاضر با بازسازی عددی سه مطالعه‌ی آزمایشگاهی متفاوت به ارزیابی عملکرد مدل XBeach در شبیه‌سازی سواحل درشت‌دانه پرداخته و دریافته است که مدل XBeach عملکرد قابل‌قبولی در مدل‌سازی فرآیندهای هیدرودینامیک و مورفودینامیک در ناحیهی سواش داشته است. همچنین شبیه‌سازی با ماژول NH نسبت به ماژول SB عملکرد بهتری داشته است (با ۵٪ خطای کمتر). خطای فازی در هنگام نفوذ/ تراوش آب به آبخوان در XBeach منجر به گسترش خطای مدل‌سازی عددی در محاسبات تغییرات پروفیل بستر و تراز سطح آبخوان شده است.

sepehr.maleki@shahroodut.ac.ir

adjami@shahroodut.ac.ir

m.ahmadi@shahroodut.ac.ir

واژگان کلیدی: مورفودینامیک ساحل، مدل‌سازی عددی، ناحیهی سواش، مدل XBeach.

سواحل درشت‌دانه.

۱. مقدمه

ناحیهی زوال موج گفته می‌شود. امواج در ناحیهی بیرونی زوال موج^۱، دچار شکست و تغییر شکل سریع می‌شوند و با تغییر شکل آن‌ها به شکل موجک و چرخش سطحی به تدریج در طول ناحیهی داخلی شکست از بین می‌روند. ناحیهی بالاروی امواج یا سواش^۲، بخش انتهایی منطقه‌ی اخیر است، که به واسطه‌ی عملکرد یورش آب^۳ و بازگشت آن^۴، متناوباً در معرض بالاروی و پایین‌روی امواج قرار می‌گیرد و مرطوب- خشک می‌شود.

به تعبیر دیگر، ناحیهی سواش بخشی از ساحل بین کمینه‌ی پایین‌روی و بیشینه‌ی بالاروی موج است، که انرژی باقیمانده‌ی امواج در حال حرکت به سمت ساحل در آن منعکس یا مستهلک می‌شود. برخی از پژوهشگران، ناحیهی سواش را به‌عنوان محدوده‌ی انتهایی ناحیهی داخلی زوال موج تعریف می‌کنند، که در مجموعه‌ی از جریان‌ها با مقیاس‌های متفاوت شامل امواج کوتاه و بلند، جریان‌های افقی گردابه‌ها، و آشفتگی ظاهر می‌شوند.^{[۱] و [۲]}

سواحل هر کشور از جنبه‌های اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی، و نظامی اهمیت بالایی دارند و بخش قابل توجهی از تأسیسات زیربنایی اغلب کشورها در مناطق ساحلی واقع است. در بین نواحی مختلف ساحلی، خط ساحلی و نواحی نزدیک به ساحل جایگاه ویژه‌ی دارند. پدیده‌هایی همچون: فرسایش و انباشت رسوب‌ها در سواحل طبیعی و خورها، افزایش تراز آب دریا و زیر آب‌رفتن اراضی و تأسیسات ساحلی و آلودگی‌های زیست‌محیطی نوار ساحلی از مسائل چالش‌برانگیز در حوزه‌ی اخیر بوده است.

به محدوده‌ی از ساحل، که در آن امواج ورودی تحت تأثیر آثار بستر ساحلی قرار می‌گیرند، اصطلاحاً ناحیهی نزدیک ساحلی^۱ گفته می‌شود. بخشی از ناحیهی نزدیک ساحل، که در آن موج می‌شکند و معمولاً عمقی بین ۵ تا ۱۰ متر دارد،

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۲۷، تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۲/۰۹/۲۲، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۱۶.

استناد به این مقاله:

ملکی تقی‌آباد، سپهر، عجمی، مهدی، و احمدی، احمد، ۱۴۰۳. مدل‌سازی عددی فرآیندهای مورفولوژیکی ناحیهی سواش در سواحل درشت‌دانه با مدل کد باز XBeach، مهندسی عمران شریف، ۴۰(۳)، صص. ۱۱۷-۱۳۷. DOI: 10.24200/j30.2024.63280.3266

^۱ Near-shore zone

^۲ Outer surf zone

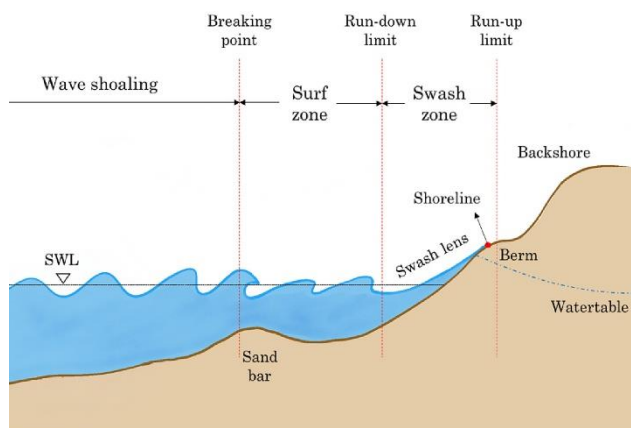
^۳ Swash or Run-up zone.

^۴ Uprush or Run-up

^۵ Backwash or Rundown

جدول ۱. ضرورت انجام مطالعات در ناحیهی سواش ساحل.

۱	برای بسیاری از کاربردها و طراحی‌های مهندسی سواحل، مطالعه‌ی امواج در حال شکست، بالاروی و پایین‌روی موج اهمیت قابل توجهی دارد.
۲	ناحیهی سواش تقریباً در تمام فرآیندهای ساحل از جمله جریان‌های ساحلی و انتقال رسوب، نقش مهمی را ایفا می‌کند. اندرکنش سیال و ذره‌های رسوب در ناحیهی سواش، وضعیت فرسایش یا رسوب‌گذاری ساحل و شرایط مرزی سمت ساحل را تعیین می‌کند.
۳	فرآیندهای ناحیهی سواش عامل تولید حباب‌های هوا و قطره‌های آب دریا هستند و نقش مهمی در انتقال آلودگی دارند.
۴	آشفستگی مربوط به موج‌ها و اندرکنش‌های سواش-سواش، نرخ اختلاط را افزایش می‌دهد و اثر مهمی در انتقال رسوب دارد.
۵	فرآیندهای انتقال رسوب و جریان هر دو به طرز قابل توجهی تحت تأثیر آب زیرزمینی قرار می‌گیرند.
۶	معمولاً غلظت رسوب ناحیهی سواش بیشتر از ناحیهی شکست موج است.
۷	ناحیهی سواش، یک ناحیهی کلیدی برای اکوسیستم ساحلی است.
۸	فرآیندهای ناحیهی بالاروی تأثیر مستقیم در جنبه‌های مختلف زندگی روزمره‌ی ساکنان و گردشگران مناطق ساحلی دارد.

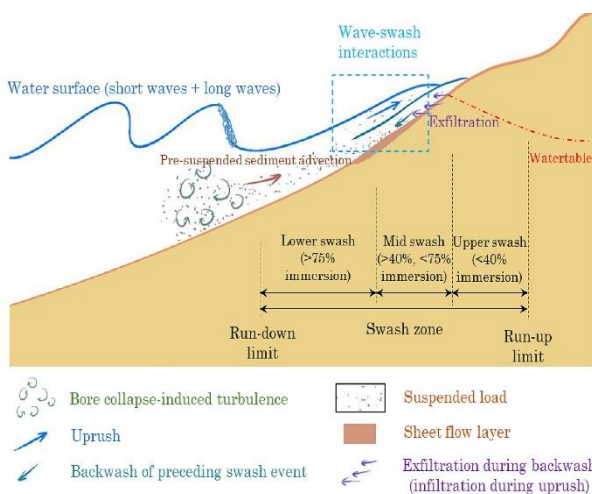
شکل ۱. موقعیت نسبی نواحی زوال موج و ناحیهی سواش در ساحل.^[۱]

لذا، هیدرودینامیک ناحیهی سواش با خصوصیات موج ورودی در مرز ناحیهی شکست تعیین می‌شود. در شکل ۱، موقعیت‌های نسبی نواحی زوال موج و ناحیهی سواش مشاهده می‌شود.

در منطقهی سواش، بستر رسوب متناوباً در معرض بالاروی/ پایین‌روی امواج در مقیاس‌های زمانی گروه موج قرار می‌گیرد. این ناحیهی باریک، که تغییرات دینامیکی برجسته‌ی دارد، در معرض جریان‌های ناپایدار، تلاطم زیاد، رشد و تغییرات سریع لایه‌ی مرزی، نرخ انتقال رسوب زیاد، و تغییرات سریع مورفولوژی بستر قرار دارد.^[۴-۱] بر این اساس، ناحیهی سواش نقش مهمی در تبادل رسوب بین دریا و خشکی دارد، که به‌طور قابل توجهی در تغییرات مورفولوژی ساحل تأثیر می‌گذارد.^{[۵] و [۶]} علاوه بر فرآیندهای هیدرودینامیکی در ناحیهی سواش، حمل و انتقال شن و ماسه در ساحل، که در منطقهی سواش رخ می‌دهد، می‌تواند بخش بزرگی از کل رانش ساحلی (تغییرات خط ساحلی) را به خود اختصاص دهد.^[۸] لذا، پیش‌بینی انتقال و جابجایی شن و ماسه در ناحیهی سواش برای ارزیابی و تخمین تغییرات مورفودینامیک ساحلی ضروری است. درک فرآیندهای هیدرودینامیکی و مورفودینامیکی در منطقهی سواش، اهمیت اساسی دارد؛ زیرا ناحیهی سواش میزبان فرآیندهایی است که مورفولوژی ساحل را در طیف گسترده‌ی از شرایط شکل می‌دهد.^[۹]

تغییر در تراز آب دریا به‌علت نوسان‌های ناشی از جزر و مد، امواج دریا، تغییر در تراز آب زیرزمینی به دلیل برداشت بی‌رویه از سفره‌ی ساحلی یا نزول‌های جوی می‌تواند منجر به تغییر مورفولوژی ساحلی از جمله محدوده‌ی سواش شود. در جدول ۱، اصلی‌ترین دلایل اهمیت انجام مطالعات بر فرآیندهای مورفولوژیکی در ناحیهی سواش طبقه‌بندی شده است.

مرور مطالعات انجام‌شده بر روی سواحل نشان می‌دهد که مشخصات هیدرولیکی موج عمود بر ساحل، شامل: ارتفاع و دوره‌ی تناوب موج، و شیب وجه ساحلی در مشخصات امواج ورودی به ناحیهی سواش اثر می‌گذارد.^[۷-۹] قطر متوسط رسوب‌های ساحل در مقدار نفوذپذیری ساحل و وزن ذرات مؤثر است و از طرفی، اختلاف تراز آب زیرزمینی با آب دریا و هدایت هیدرولیکی بستر ساحلی، در میزان حجم آب عبوری از ساحل، فشار آب منفذی (وزن مؤثر رسوب)، و تنش برشی لایه‌ی مرزی (نیرو دراگ) اثر می‌گذارد؛ بنابراین، پارامترهای ارتفاع و دوره‌ی تناوب موج، شیب ساحل، قطر متوسط رسوب‌ها، تراز آب زیرزمینی، و تراز آب دریا از جمله پارامترهای مهم و مؤثر در هیدرودینامیک و مورفولوژی ناحیهی سواش هستند.^[۲-۷] در شکل ۲،

شکل ۲. شماتیک ناحیهی سواش.^[۱۰]

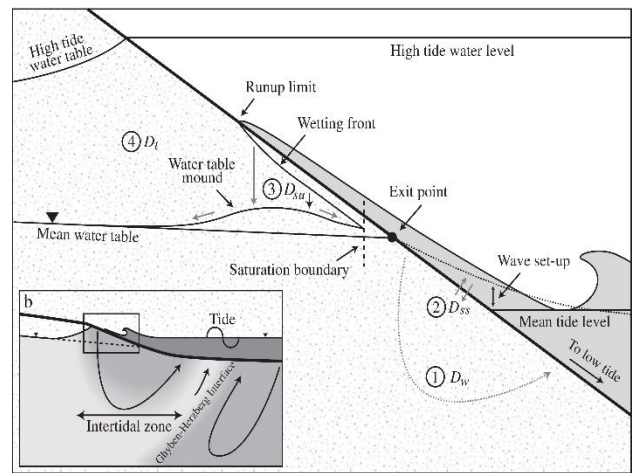
شماتیکی از ناحیهی سواش به همراه ناحیهی بالاروی و پایین‌روی موج مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، در ناحیهی سواش پدیده‌های متعددی شامل: نفوذ/ خروج آب، پرش هیدرولیکی، آشفستگی توده/ جبهه‌ی موج‌ها، آشفستگی ناشی از لایه‌ی مرزی بستر، اندرکنش فاز بالاروی و بازگشت، انتقال رسوب عرضی و طولی، غلظت بالای رسوب‌ها در لایه‌ی سواش، و جریان ورقه‌ی اتفاق می‌افتند؛ که باعث پیچیدگی هیدرودینامیکی ناحیهی سواش می‌شوند. فشار القایی ناشی از تناوب و شکست موج و فشار آب منفذی سفره‌ی ساحلی، در ضخامت لایه‌ی مرزی و توزیع آشفستگی سواش اثر می‌گذارد و باعث تغییرات قابل ملاحظه‌ی تنش برشی در طول ناحیهی سواش می‌شود. سرعت بالای جریان در نزدیکی بستر و عمق کم ناحیهی سواش منجر به انتقال رسوب با غلظت بالا به صورت جریان ورقه‌ی می‌شود.

می‌کنند (مدل‌های حل فازی)^[۱۷ و ۱۸]؛ عملکرد مناسبی در مدل‌سازی آب‌های کم‌عمق دارند، اما از نظر محاسباتی گران هستند و در حال حاضر، محدود به شبیه‌سازی فقط هیدرودینامیک بدون شبیه‌سازی دقیق مورفودینامیک ساحل هستند.^[۱۹] در مقابل، مدل‌هایی که با میانگین‌گیری در طول دوره‌های موجی متعدد شبیه‌سازی می‌کنند (مدل‌های میانگین فازی)^[۲۰ و ۲۱]؛ از نظر محاسباتی به‌طور قابل‌توجهی نسبت به مدل‌های حل فازی ارزان‌تر هستند.^[۱۹] با ارزیابی عملکرد دو دسته‌ی اخیر مدل‌های عددی مشخص می‌شود که مدل‌های میانگین فازی در شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرودینامیکی-مورفودینامیکی سواحل، همچون: انواع شکست امواج، خصوصیات هیدرودینامیکی موج، مکانیک انتقال رسوب‌ها، تغییرات مورفولوژی بستر، کارآمدتر از مدل‌های حل فازی هستند، اگرچه دقت مدل‌های حل فازی به مراتب بیشتر از مدل‌های میانگین فازی بوده است.^[۱۷-۲۱]

مدل عددی XBeach، یک مدل پرکاربرد است، که بین مدل‌های میانگین‌گیری فاز و مدل‌های تفکیک فاز قرار دارد و تغییرات دامنه‌ی متغیرها را در مقیاس زمانی گروه موج حل می‌کند.^[۲۲] مدل XBeach، دو ماژول Non-Hydrostatic (NH) و Surf-Beat (SB) مستقل: SB، حرکات موج فروگرانشی^۴ با استفاده از معادله‌های غیرخطی آب کم‌عمق کاملاً حل می‌شوند، اما حرکت‌های موج باند فرودی^۵ با استفاده از یک موازنه‌ی عمل موج کوتاه، که تغییرات در مقیاس زمانی گروه موج را توصیف می‌کند، پارامتربندی می‌شوند.^[۲۳] پارامتربندی اخیر در سواحل استهلاکی^۶ معتبر در نظر گرفته می‌شود، جایی که حرکت‌های باند فروگرانشی بر سواش غالب است و سواش باند تصادفی به‌دلیل شکستن موج اشباع می‌شود.^[۲۴] در مطالعات استوک‌دان^۷ و همکاران (۲۰۱۴)، که با بهره‌گیری از مدل XBeach و ماژول SB بر سواحل انعکاسی میانی^۸ انجام شده است، مشخص شد که مقادیر پارامترهای هیدرودینامیکی امواج، همچون بالاروی موج، به‌طور قابل‌توجهی کمتر از شرایط واقعی محاسبه شده‌اند.^[۲۶] همچنین در مطالعات مشابه پالمستن و اسپلینتر^۹ (۲۰۱۶) مشخص شد که میزان فرسایش تپه‌های شنی در سواحل براساس مدل XB-SB نسبت به آزمون آزمایشگاهی بسیار ناچیز پیش‌بینی شده است.^[۲۷] علاوه بر این، مطالعات کهن و روجیرو^{۱۰} (۲۰۱۶)، نشان داد که در سواحل استهلاکی^{۱۱}، میزان تغییرات مورفولوژی بستر ساحل براساس مدل XB-SB به درستی پیش‌بینی نشده است.^[۲۸]

با توجه به نتایج حاصل و رویکرد مدل‌سازی، میانگین‌گیری موج در ماژول SB منجر به تخمین و پیش‌بینی کمتری نسبت به واقعیت پارامترهای هیدرودینامیکی و مورفودینامیکی ساحل می‌شود؛ علاوه بر این در ماژول SB ممکن است فرآیندهای فیزیکی، که در مقیاس زمانی امواج فروگرانشی اتفاق می‌افتند، نیز نادیده گرفته شوند.^[۱۹]

در مطالعات نیکلا لرها^{۱۲} و همکاران (۲۰۱۷)، مشخص شد که پارامترهای



شکل ۳. اندرکنش ناحیه‌ی آب زیرزمینی ساحلی و جریان سواش.^[۱۱]

در شکل ۳، جریان بالاروی امواج در ساحل نشان می‌دهد که آب در حین حرکت به سمت بالای سواش به داخل ساحل غیر اشباع نفوذ می‌کند و این جرم مبادله‌شده در سیکل‌های بعدی در پایین سواش خارج می‌شود و در دینامیک رسوب، وزن مؤثر، و تنش برشی جریان اثر می‌گذارد.

(الف) چهار فرآیند مرتبط با موج و جزر و مد، که در تبادل آب بین آبخوان ساحلی و آب‌های ساحلی تأثیر دارند عبارتند از: (۱) ورود و گردش جریان در میدان اشباع زیرسطحی ساحل (D_w)؛ (۲) تبادل آب بین جریان بالاروی و آبخوان در زیرلایه‌ی اشباع ساحلی (D_{ss})؛ (۳) نفوذ جریان ناشی از بالاروی در منطقه‌ی غیراشباع زیرساحلی (D_{su})؛ و (۴) شارش جریان ناشی از جزر و مد (D_t). فرآیندهای ۳ و ۴، کاملاً وابسته به یکدیگر هستند. پیکان‌های خاکستری، مسیرهای جریان و مسیرهای تبادل آب را نشان می‌دهند. (ب) مسیرهای جریان آب زیرزمینی و توزیع شوری (طیف سفید: آب شیرین و طیف خاکستری: شور) در یک آبخوان ساحلی برهمکنش بین امواج در ناحیه‌ی سواش، که به آن برهمکنش سواش-سواش گفته می‌شود،^[۱۲ و ۱۳] نقش مهمی در تعیین تکامل بستر در نواحی سواش و زوال موج دارد.^[۱۰-۱۳]

فرآیندهای مذکور عمدتاً در برخی مطالعات آزمایشگاهی،^[۱۳-۱۶] ارزیابی شده‌اند. با این حال، مطالعات عددی نسبتاً محدودی پیرامون هیدرودینامیک و مورفودینامیک ناحیه‌ی سواش در حضور برهمکنش سواش-سواش انجام شده است. علت وجود این امر را می‌توان در نبود مدل‌های عددی کارآمد در شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرودینامیکی و تغییرات مورفولوژیک سواحل بررسی کرد.

مدل‌های عددی مبتنی بر فیزیک^۱، ابزاری مفید برای پیش‌بینی فرآیندهای هیدرودینامیکی-مورفودینامیکی در نواحی ساحلی هستند. عمدتاً مدل‌هایی که فرآیندهای هیدرودینامیکی را در مقیاس زمانی امواج منفرد شبیه‌سازی

^۷ Stockdon

^۸ intermediate-reflective beach

^۹ Palmsten & Splinter

^{۱۰} Cohn and Ruggiero

^{۱۱} high-energy dissipative

^{۱۲} Lerma, N.

^۱ Physics-based

^۲ phase-resolving models

^۳ phase-averaged models

^۴ infragravity wave

^۵ incident-band wave

^۶ dissipative beaches

XBeach پرداختند و دریافتند که مدل XBeach با دقت قابل‌قبولی تغییرات مورفولوژیک ساحل شنی و عارضه‌های ساحلی را شبیه‌سازی می‌کند.^[۳۸]

چن^{۱۹} و همکاران (۲۰۲۳)، در مطالعاتی جامع به ارزیابی مدل‌های عددی در مدل‌سازی فرایندهای مورفودینامیکی و شبیه‌سازی پدیده‌ی انتقال رسوب در ناحیه‌ی سواش پرداختند و مدل XBeach را به عنوان یکی از مدل‌های کارآمد در مدل‌سازی فرایندهای هیدرودینامیکی ارزیابی و عملکرد مدل مذکور را نسبت به مدل‌های عددی: SBeach (لارسن و کروس^{۲۰} (۱۹۸۹))،^[۴۰] Delft۳D (لیسر^{۲۱} و همکاران (۲۰۰۴))،^[۴۱] TC UNIBEST (رویسینک^{۲۲} و همکاران (۲۰۰۷))،^[۴۲] و CShore (کوبایاشی^{۲۳} (۲۰۰۹))؛^[۴۳] بررسی کردند. نتایج ارائه‌شده براساس پژوهش ایشان، بیانگر قابلیت بالای مدل XBeach در بهره‌گیری از مدل‌های تجربی-تحلیلی شبیه‌سازی فرایندهای مورفودینامیکی در منطقه‌ی سواش بوده است.^[۴۹]

با توجه به ارزیابی صورت‌گرفته بر عملکرد مدل XBeach براساس مطالعات پیشین مشخص می‌شود که مدل XBeach، توانایی بالایی در مدل‌سازی فرایندهای هیدرودینامیک-مورفودینامیک در ناحیه‌ی سواش در سواحل دارد. علاوه بر این مشخص شده است که ارزیابی عملکرد مدل XBeach براساس دو ماژول SB و NH، مقایسه‌ی نتایج حاصل از شبیه‌سازی فرایندهای مورفولوژیک و همچنین حساسیت‌سنجی نتایج براساس شرایط مختلف حاکم بر سواحل درشت‌دانه به عنوان خلأ مطالعاتی در این حیطه مطرح بوده است. بر این اساس، پژوهش حاضر با مدل‌سازی سه مدل آزمایشگاهی مختلف، که شرایط متفاوت حاکم بر مورفودینامیک ساحل را داشته‌اند، به ارزیابی عملکرد مدل XBeach براساس دو ماژول NH و SB در شبیه‌سازی فرایندهای مورفولوژیکی سواحل درشت‌دانه معطوف بوده است. در نوشتار حاضر، در بخش‌های ۱.۲ و ۲.۲، توضیحاتی جامع پیرامون مدل XBeach و فرایند مدل‌سازی سواحل با تمرکز بر فرایند شبیه‌سازی هیدرودینامیک و مورفودینامیک ساحل ارائه شده است. در بخش ۳.۲، مدل‌های آزمایشگاهی به همراه کلیه‌ی جزئیات و شرایط مدل‌سازی ارائه شده‌اند. همچنین در بخش ۳، نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی، که شامل کالیبراسیون مدل و عملکرد مدل XBeach در شبیه‌سازی مدل‌های آزمایشگاهی بوده است، ارائه و بررسی شده است. در بخش ۴، نیز جمع‌بندی و نتایج اصلی به‌دست‌آمده در پژوهش حاضر ارائه شده‌اند.

هیدرودینامیکی همچون میزان بالاروی موج در یک ساحل استهلاکی^۱ به‌خوبی توسط یک مدل غیرهیدرواستاتیک با حل موج باند تصادفی قابل شبیه‌سازی است.^[۲۹] رویکرد اخیر، در مدل عددی سواش در مطالعات زیجلم^۲ و همکاران (۲۰۱۱)، استفاده شده است.^[۱۹] نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که بهبود در شبیه‌سازی و محاسبات هیدرودینامیکی-مورفودینامیکی در مدل XBeach با حل صریح^۳ حرکات سواش، باند تصادفی امواج حاصل می‌شود، که منجر به پیش‌بینی پارامترهای هیدرودینامیک بلاخص در ناحیه‌ی سواش از طریق توصیف بهتر طیف موج و شبیه‌سازی صریح برهمکنش‌های سواش-سواش می‌شود. بر این اساس، ماژول NH در مدل XBeach جهت مدل‌سازی دقیق هیدرودینامیک و مورفودینامیک سواش، که حرکت موج باند فرودی را در اعماق آب میانی و کم عمق حل می‌کند (روشی مشابه مدل سواش)، توسعه یافته است.

تا به امروز مطالعات نسبتاً جامعی با استفاده از مدل XBeach (ماژول NH) برای شبیه‌سازی فرایندهای هیدرودینامیک و مورفودینامیک در ناحیه‌ی سواش انجام شده است: مدل‌سازی موج (بالاروی موج) در سواحل شنی انعکاسی^۴ توسط مک‌کال^۵ و همکاران (۲۰۱۴)،^[۳۰] و پوات^۶ و همکاران (۲۰۱۶)،^[۳۱] مدل‌سازی اندرکنش امواج با سازه‌های ساحلی و ارزیابی هیدرودینامیک ناحیه‌ی سواش توسط رولونک^۷ و همکاران (۲۰۱۸)،^[۳۲] مدل‌سازی سواحل صخره‌یی مرجانی^۸ توسط پیرسون^۹ و همکاران (۲۰۱۷)،^[۳۳] لشلی^{۱۰} و همکاران (۲۰۱۸)،^[۳۴] و کلاور^{۱۱} و همکاران (۲۰۱۹)،^[۳۵] مطالعه و ارزیابی شده‌اند. روفینی^{۱۲} و همکاران (۲۰۲۰)،^[۳۶] مطالعاتی پیرامون مدل‌سازی جریان‌های ساحلی و تغییرات مورفولوژی بستر براساس گروه امواج در سواحل میانی^{۱۳} با بهره‌گیری از ماژول NH مدل XBeach انجام دادند و دریافتند که عملکرد ماژول NH در مدل‌سازی فرایندهای هیدرودینامیکی و مورفودینامیکی در سواحل قابل‌قبول بوده است. بیر^{۱۴} و همکاران (۲۰۲۱)،^[۳۷] در پژوهشی به ارزیابی و مدل‌سازی بالاروی موج با بهره‌گیری از دو ماژول SB و NH در مدل XBeach پرداخته و عملکرد مدل XBeach را براساس دو رویکرد حل فازی موج^{۱۵} و میانگین‌گیری موج^{۱۶} در فرایند مدل‌سازی هیدرودینامیکی امواج در ناحیه‌ی سواش ارزیابی و بررسی کرده‌اند.^[۳۷] رفعتی و همکاران (۲۰۲۱)، با استفاده از مدل XBeach به ارزیابی فرایندهای هیدرودینامیک و مورفودینامیک ناحیه‌ی سواش در سواحل و در مواجهه با رخداد تپه‌های ماسه‌یی^{۱۷} پرداخته‌اند.^[۲۰] آیونس^{۱۸} و همکاران (۲۰۲۱)، به ارزیابی رفتار سواحل شنی تحت شرایط حالت حدی با استفاده از مدل

^{۱۳} Intermediate Beach^{۱۴} Beer^{۱۵} wave-resolving^{۱۶} wave-averaged^{۱۷} sandbar^{۱۸} Ions^{۱۹} Chen^{۲۰} Larson and Kraus^{۲۱} Lesser^{۲۲} Ruessink^{۲۳} Kobayashi^۱ dissipative beach^۲ Zijlema^۳ explicit^۴ reflective gravel beaches^۵ McCall^۶ Poate^۷ Roelvink^۸ coral reef-lined coasts^۹ Pearson^{۱۰} Lashley^{۱۱} Klaver^{۱۲} Ruffini

۲. مواد و روش انجام پژوهش

۱.۱.۲ مدل XBeach

اثر موج^۲ را در اولین گام زمانی حل می‌کند و با تعادل اثر موج، انتشار امواج کوتاه را حل می‌کند. روابطی که حرکت‌ها و جریان‌های امواج بلند را حل می‌کنند، معادلات اندازه‌ی حرکت غیرخطی آب کم‌عمق^۳ (NLSWE) هستند. تعادل اثر موج کوتاه، ورودی‌های موردنیاز برای NLSWE را در قالب نیروهای ناشی از موج به دو صورت ارائه می‌دهد: (۱) با استفاده از تنش‌های تشعشعی حاصل از تعادل اثر موج؛ (۲) با استفاده از تنش‌های تشعشعی حاصل از تعادل انرژی غلتشی.

بنابراین روابط NLSWE حل می‌شوند و در نتیجه‌ی آن، سرعت‌های جریان (u^L, v^L) و تغییرات تراز آب (h) برای رابطه‌ی انتقال رسوب، که یک رابطه‌ی انتقال-انتشار^۴ است، فراهم می‌شوند. سرعت‌های لاگرانژی جریان (u^L, v^L) و تغییرات تراز آب (h) ، پارامترهای ورودی روابط انتقال رسوب معلق هستند. انتقال رسوبی که به کمک روابط مذکور به دست آمده است (q_x, q_y) ، برای تعیین اثر شیب بستر اصلاح می‌شود. با استفاده از حجم ورودی و خروجی رسوب در هر سلول، بستر ساحل به کمک یک رابطه‌ی تعادل جرمی به‌روزرسانی می‌شود. در نهایت مدل چک می‌کند که آیا بستر به شیب تر و خشک بحرانی رسیده است یا خیر. در صورت تجاوز از مقادیر اخیر، اصلاحی را روی شیب بستر انجام می‌دهد تا به شرایط موردنیاز برسد. در مدل XBeach، انتشار و زوال امواج کوتاه به وسیله‌ی تعادل اثر موج کوتاه حل می‌شود. این تابع براساس تعادل انرژی، که در مکان (x, y) و زمان (t) تغییر می‌کند، و تابعی از بسامد (ω) و زاویه‌ی انتشار موج ورودی (θ) است (رابطه‌ی ۱).

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial c_{gx} A}{\partial x} + \frac{\partial c_{gy} A}{\partial y} + \frac{\partial c_{\theta} A}{\partial \theta} = -\frac{D_w + D_f + D_v}{\sigma} \quad (1)$$

که در آن، اثر موج A به‌صورت رابطه‌ی ۲ محاسبه می‌شود:

$$A(x, y, t, \theta) = \frac{S_w(x, y, t, \theta)}{\sigma(x, y, t)} \quad (2)$$

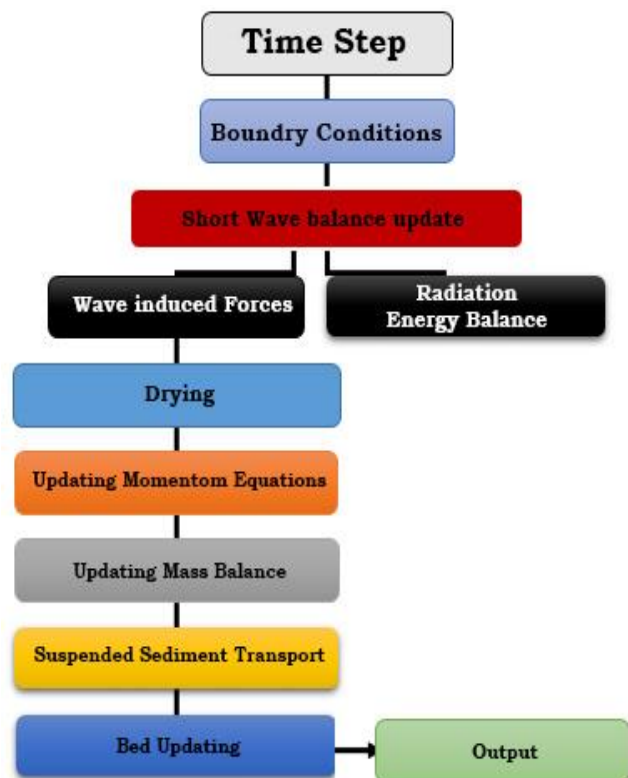
که در آن، پارامتر θ نمایانگر برخورد نسبت به محور x چگالی انرژی موج در هر سلول^۵، و σ بسامد ذاتی موج^۶ هستند. بسامد ذاتی موج (σ) و سرعت گروه (c_g) از رابطه‌ی استهلاک خطی^۷ به دست می‌آیند. پارامترهای D_w, D_f, D_v و مؤلفه‌های استهلاک برای به‌ترتیب: موج، اصطکاک بستر، و پوشش گیاهی هستند. بسامد ذاتی و سرعت انتشار موج در جهت‌های x, y ، و θ براساس رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌شوند.

$$\begin{aligned} c_{gx}(x, y, t, \theta) &= c_g \cos(\theta) \\ c_{gy}(x, y, t, \theta) &= c_g \sin(\theta) \\ c_{\theta}(x, y, t, \theta) &= \frac{\sigma}{\sinh \gamma kh} \left(\frac{\partial h}{\partial x} \sin \theta - \frac{\partial h}{\partial y} \cos \theta \right) \end{aligned} \quad (3)$$

XBeach، یک مدل عددی دو بُعدی هیدرودینامیکی و مورفولوژیکی است، که روابط مربوط به جریان، امواج سطحی، انتقال رسوب، و تراز بستر را حل می‌کند. XBeach، یک مدل عددی منبع-باز است، که در ابتدا فقط برای شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرودینامیکی-مورفودینامیکی و آثار آن در سواحل ماسه‌یی با دامنه‌یی در حد چند کیلومتر و در مقیاس زمانی طوفان‌ها طراحی شده بود. از آن زمان، مدل XBeach برای سایر انواع سواحل و اهداف دیگر نیز استفاده شده است.

مدل XBeach، قادر به شبیه‌سازی هیدرودینامیک ناحیه‌ی نزدیک ساحل و همچنین اندرکنش جریان‌های مختلف با بستر و رسوب‌هاست. توالی بخش‌های مختلف مدل XBeach در شکل ۴ مشاهده می‌شود، که تا پایان زمان شبیه‌سازی تکرار می‌شود.

مدل XBeach با دریافت خصوصیات مرزها و مقادیر ورودی مدل، شامل: شرایط مرزی موج، شرایط مرزی جریان، جزر و مد و امواج دورا^۱، ورودی باد، ورودی رسوب، داده‌های عمق‌سنجی، ورودی دبی فرایند مدل‌سازی را برپاسازی می‌کند. بعد از دریافت ورودی‌ها و شرایط مرزی، XBeach تعادل



شکل ۴. چرخه‌ی کلی فرآیند مدل‌سازی XBeach.

^۵ bin

^۶ Intrinsic wave frequency

^۷ Linear dispersion relation

^۱ surge

^۲ Wave action balance

^۳ Non-Linear Shallow Water Momentum

^۴ Advection-diffusion

۱.۱.۲. رابطه‌ی تعادل انرژی غلتشی

وقتی موج می‌شکند، انرژی موج به تدریج در غلتابه‌های سطحی ذخیره می‌شود. در جایی که موج شروع به شکستن می‌کند، به دلیل خیز آب و جریان‌های موازی ساحل، قوی‌ترین گرادیان‌های تنش تشعشی انتظار می‌رود. در عمل، یک وقفه به دلیل ذخیره‌ی تدریجی انرژی شکست موج در غلتابه‌های سطحی وجود دارد. پراکندگی ناشی از شکست موج (D_w)، یک گزاره‌ی استهلاکی در تعادل اثر موج کوتاه، و یک گزاره‌ی منبع در تعادل انرژی غلتشی است. تعادل انرژی غلتشی به صورت رابطه‌ی ۴ بیان می‌شود:

$$\frac{\partial E_r}{\partial t} + \frac{\partial E_r \cos \theta}{\partial x} + \frac{\partial E_r \sin \theta}{\partial y} = D_w - D_r \quad (۴)$$

که در آن، D_r ، D_w ، Q_b و H_b مطابق روابط ۵ الی ۸ محاسبه می‌شوند:

$$D_r = \frac{2g\beta_r E_r}{C} \quad (۵)$$

$$D_w = \frac{1}{4} \alpha Q_b \rho g f_{rep} (H_b^2 + H_{ms}^2) \quad (۶)$$

$$Q_b = \exp \left[- \left(\frac{H_b^2}{H_{ms}^2} \right) \right] \quad (۷)$$

$$H_b = \frac{0.1 \lambda \lambda}{k} \tanh \left[\frac{\gamma kh}{0.1 \lambda \lambda} \right] \quad (۸)$$

که در آن‌ها، پارامتر D_w اتلاف حرکت موج تشکیل یافته به دلیل شکست و D_r اتلاف ناشی از غلتش، E_r انرژی جنبشی غلتش در هر قفسه‌ی جهت‌ی و C سرعت فاز موج هستند.

۲.۱.۲. تنش‌های تشعشی

تنش‌های تشعشی ارتباط بین تعادل اثر موج کوتاه و روابط آب کم‌عمق را تشکیل می‌دهند. در مدل XBeach، تنش‌های تشعشی ابتدا از تعادل اثر موج و توسط تبدیل اثر موج (A) به چگالی انرژی در هر سلول با ضرب آن در بسامد ذاتی مطابق رابطه‌ی ۹ به دست می‌آید.

$$S_w(x, y, t, \theta) = A(x, y, t, \theta) * \sigma(x, y, t) \quad (۹)$$

که در آن، پارامتر σ براساس رابطه‌ی ۱۰ محاسبه می‌شود:

$$\sigma = \sqrt{gh \tanh(kh)} \quad (۱۰)$$

تنش‌های تشعشی که مستقیماً از انرژی تعادل اثر موج به دست می‌آیند، به صورت رابطه‌ی ۱۱ تعریف می‌شوند:

$$S_{xy,w}(x, y, t) = \int \sin \theta \cos \theta \frac{C_g}{C} S_w d\theta \quad (۱۱)$$

$$S_{xx,w}(x, y, t) = \int \left(\frac{C_g}{C} (1 + \cos \theta^2) - \frac{1}{2} \right) S_w d\theta$$

انرژی غلتشی نیز یکی دیگر از عوامل تشکیل تنش‌های تشعشی است. انرژی غلتشی (E_r)، ابتدا توسط مشتق جزئی (مطابق رابطه‌ی ۱۲) به انرژی موج در هر سلول تبدیل می‌شود:

$$S_r(x, y, t, \theta) = \frac{\partial E_2(x, y, t)}{\partial \theta} \quad (۱۲)$$

دوباره انرژی موج در سلول‌های جهت‌ی به تنش‌های تشعشی در جهت‌های x ، y ، xy ، yx و xx مطابق روابط ۱۳ تقسیم می‌شود:

$$S_{xx,r}(x, y, t) = \int (\cos^2 \theta) S_r d\theta$$

$$S_{xy,r}(x, y, t) = S_{yx,r}(x, y, t) = \int \sin \theta \cos \theta S_r d\theta \quad (۱۳)$$

$$S_{yy,r}(x, y, t) = \int (\sin^2 \theta) S_r d\theta$$

۳.۱.۲. نیروهای ناشی از موج^۱

تنش‌های تشعشی باعث شکل‌گیری نیروهای ناشی از موج می‌شوند. نیروهای ناشی از موج (F_x ، F_y) عبارت‌های محرکه روابط غیرخطی آب کم-عمق (NLSWE) هستند (روابط ۱۴ و ۱۵):

$$F_x = - \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) \quad (۱۴)$$

$$F_y = - \left(\frac{\partial S_{yy}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yx}}{\partial y} \right) \quad (۱۵)$$

۴.۱.۲. روابط آب کم‌عمق

امواج با بسامد پایین، جریان‌های میانی^۲ و سرعت‌های مداری، در روابط آب کم‌عمق نمایان می‌شوند. برای در نظر گرفتن شار جرمی ناشی از امواج و جریان بازگشتی، معادله‌ی تعمیم‌یافته‌ی لاگرانژ میانگین (GLM³) در عمق متوسط استفاده شده است (روابط ۱۶)؛ که در آن، معادلات اندازه‌ی حرکت و پیوستگی بر حسب سرعت لاگرانژ (u^L) نوشته می‌شود (روابط ۱۷). سرعت لاگرانژ به صورت فاصله‌ی طی شده توسط ذره‌ی آب در یک دوره‌ی تناوب موج، تقسیم بر دوره‌ی تناوب موج تعریف می‌شود.

$$\frac{\partial u^L}{\partial t} + u^L \frac{\partial u^L}{\partial x} + v^L \frac{\partial u^L}{\partial y} - f v^L - v_h \left(\frac{\partial^2 u^L}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u^L}{\partial y^2} \right)$$

$$\frac{\tau_{xx}}{\rho h} - \frac{\tau_{bx}^E}{\rho h} - g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{F_x}{\rho h} - \frac{F_{v,x}}{\rho h}$$

$$\frac{\partial v^L}{\partial t} + u^L \frac{\partial v^L}{\partial x} + v^L \frac{\partial v^L}{\partial y} - f u^L - v_h \left(\frac{\partial^2 v^L}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v^L}{\partial y^2} \right) =$$

$$\frac{\tau_{xy}}{\rho h} - \frac{\tau_{by}^E}{\rho h} - g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{F_y}{\rho h} - \frac{F_{v,y}}{\rho h}$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial hu^L}{\partial x} + \frac{\partial hv^L}{\partial y} = \dots \quad (۱۶)$$

^۱ Generalized Lagrangian Mean formulation

^۲ Wave-induced forces

^۳ Mean flows

دارد: (۱) بهره‌گیری از فرمول رویسینک^۴ و همکاران (۲۰۱۲)؛ و (۲) فرمول وان تیل دُوریز^۵ (۲۰۰۹).

فرمول رویسینک و همکاران (۲۰۱۲)، براساس یک سری اطلاعات شامل بیش از ۳۰۰۰۰ بررسی میدانی پدیده‌ی چولگی و عدم تقارن تحت امواج شکنا و ناشکنا تهیه شده است. چولگی و عدم تقارن از طریق روابط ۲۲ الی ۲۴ محاسبه می‌شوند:

$$B = p_1 + \frac{p_2 - p_1}{1 + \exp\left(\frac{p_2 - \log U_r}{p_2}\right)} \quad (22)$$

$$\psi = -90 + 90 \cdot \tanh\left(\frac{p_3 - p_r}{U_r p_r}\right) \quad (23)$$

$$S_k = B \cos \psi, \quad A_s = B \sin \psi \quad (24)$$

که در آن‌ها، پارامتر B تابع Boltzmann Sigmoid است، که توسط ضرایب p_1 تا p_3 بر روی داده‌های میدانی برازش داده می‌شود. تابع Boltzmann Sigmoid به صورت $-S$ شکل است و مجانب‌های بالایی و پایینی آن به ترتیب با p_1 و p_3 تعریف می‌شود. نقطه‌ی عطف تابع در بین دو عدد اخیر یعنی $(p_1 + p_3)/2$ قرار دارد و U عدد اورسل است.

۶.۱.۲. اثر شیب بستر

بیشتر فرمول‌های انتقال براساس فرض افقی بودن (تقریبی) بستر نوشته شده‌اند. شیب بستر در نواحی نزدیک ساحل، در انتقال رسوب‌ها تأثیر می‌گذارد، که به آن اثر شیب بستر می‌گویند. شیب بستر از راه‌های مختلفی در انتقال رسوب تأثیرگذار است:

۱. تأثیرگذاری در سرعت جریان‌های نزدیک بستر،
۲. تغییر دادن شرایط آستانه‌ی حرکت رسوب،
۳. تغییر نرخ انتقال رسوب و/یا جهت حرکت رسوب.

از روابط ۲۵ برای در نظر گرفتن اثر شیب بستر در انتقال رسوب در XBeach استفاده می‌شود:

$$q_{x,slope} = q_x - ahC \sqrt{(u^L)^2 + (v^L)^2} \frac{\partial z_b}{\partial x}$$

$$q_{y,slope} = q_y - ahC \sqrt{(u^L)^2 + (v^L)^2} \frac{\partial z_b}{\partial x} \quad (25)$$

رابطه‌ی ۲۵ به صورت پیش فرض در مدل به کار برده می‌شود. روش دیگر، استفاده از فرمول Soulsby است، که برای مطالعه‌ی بیشتر می‌توان به نوشتار

$$u^L = u^E + u^S$$

$$v^L = v^E + v^S \quad (17)$$

انحراف استوکس^۱ به وسیله‌ی انرژی موج کوتاه (E_w) (E_w) و جهت (θ) از اثر موج با ارتفاع h در دو جهت مطابق رابطه‌ی ۱۸ محاسبه می‌شود:

$$u^s = \frac{E_w \cos \theta}{\rho h c}, \quad v^s = \frac{E_w \sin \theta}{\rho h c} \quad (18)$$

که در آن، τ_{sx} و τ_{sy} تنش‌های برشی باد، τ_{bx} و τ_{by} تنش‌های برشی بستر، F_x و F_y تنش‌های ناشی از موج، $F_{v,x}$ و $F_{v,y}$ تنش‌های ناشی از پوشش گیاهی، v_h لزجت افقی، و f ضریب کوریولیس^۲ هستند.

۵.۱.۲. انتقال رسوب: رابطه‌ی انتقال - انتشار

وقتی تراکم رسوب عمق میانگین (C) بیشتر از تراکم تعادلی (C_{eq}) باشد، ته‌نشینی رسوب اتفاق می‌افتد و بالعکس. این موضوع با استفاده از عبارت سمت راست رابطه‌ی انتقال - انتشار مطابق رابطه‌ی ۱۹ بیان می‌شود:

$$\frac{\partial hc}{\partial t} + \frac{\partial hc(u^E - u^a \sin(\theta))}{\partial x} + \frac{\partial hc(v^E - u^a \cos(\theta))}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[D_{kub} h \frac{\partial C}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_k h \frac{\partial C}{\partial y} \right] = \frac{hC_{eq} - hC}{T_s} \quad (19)$$

که در آن، T_s زمان سازگاری است (مطابق رابطه‌ی ۲۰)، که بیانگر زمان عکس‌العمل رسوب است:

$$T_s = \max\left(f_{Ts} \frac{h}{w_s}, T_{s,min}\right) \quad (20)$$

که در روابط ۱۹ و ۲۰، پارامتر D_h ضریب انتشار رسوب، h عمق آب در محل، w_s سرعت سقوط رسوب، u^E و v^E مؤلفه‌های سرعت اولبری^۳، و f_{Ts} یک ضریب اصلاحی برای در نظر گرفتن این حقیقت است که w_s با اطلاعات عمق میانگین تعیین می‌شود.

به دلیل اینکه XBeach انرژی امواج کوتاه را در سراسر طول موجشان میانگین می‌گیرد، شکل موج در نظر گرفته نمی‌شود. با این حال، وقتی امواج به قسمت آب کم عمق می‌رسند، شکل و حرکت مداری آن‌ها غیرخطی تر می‌شود. آثار غیرخطی بودن (چولگی و عدم تقارن) در رابطه‌ی انتقال - انتشار (رابطه‌ی ۱۹) در نظر گرفته شده است. عدم تقارن و چولگی در رابطه‌ی ۲۱ به شکل u^a نمایان می‌شود:

$$u^a = (f_{sk} S_k - f_{AS} A_s) u_{ms} \quad (21)$$

که در آن، پارامتر S_k و A_s به ترتیب پارامترهای چولگی و عدم تقارن، و f_{sk} و f_{AS} ضرایب واسنجی هستند ($facSk$ و $facAs$ نیز خوانده می‌شوند). در مدل XBeach، دو انتخاب برای در نظر گرفتن شکل موج وجود

^۴ Ruessink

^۵ Van Thiel De Vries

^۱ Stokes drift

^۲ Coriolis

^۳ Eulerian velocity

محاسبه می‌شوند. اتلاف انرژی امواج با استفاده از رابطه‌ی Roelvink به دست می‌آید. مدل XBeach روابط مختلفی را برای انتقال رسوب حل می‌کند، که آن‌ها به غلظت رسوب‌های عمق متوسط C غلظت تعادل رسوب‌های C_{eq} Soulsby-Van Rijn بستگی دارد. غلظت رسوب‌ها یا با استفاده از روش Van Rijn-Van Thiel de Vries (SVR) و یا با استفاده از روش (VRVT) به دست می‌آید.^[۴۳]

در دهه‌های اخیر، قابلیت‌های مهمی به نرم‌افزار اخیر افزوده شد که شامل در نظر گرفتن آثار چولگی و عدم تقارن جریان سه‌بعدی آب زیر دریا، یعنی رابطه‌ی تحلیل موج بود، که این امکان را می‌داد تا پروفیل‌های یک‌بعدی یا دوبعدی را شبیه‌سازی کرد. در این قسمت لازم است به ذکر دو قابلیت مهم مدل‌سازی مذکور پرداخته شود:

اولین قابلیت که فقط در مورد پروفیل قابل اجراست، روابط بستر را به روز می‌کند، تا گردادیان انتقال در کناره‌ی ساحل نیز در نظر گرفته شود:

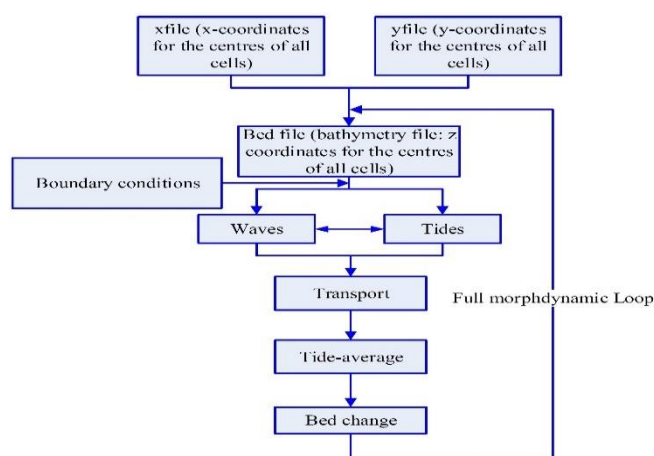
$$\frac{\partial S_s}{\partial y} = \phi S_s \quad (29)$$

که در آن، S_s نرخ انتقال کناره‌ی ساحل و ϕ ضریبی با بُعد یک بر طول است. بسته به علامت انتقال و ϕ ، فرمول اخیر فرسایش خالص را ارائه می‌دهد.

مورد دوم که "bermslope" نام دارد، این واقعیت را بیان می‌کند که XBeach تمایل دارد تا فرسایش در خط آب را رو به بالا پیش‌بینی کند (Roelvink^۱، ۲۰۱۹).^[۴۸]

۲.۲. مدل‌سازی انتقال رسوب در مدل XBeach

انتقال رسوب به‌عنوان یکی از پدیده‌های مهم در مناطق ساحلی به‌شمار می‌آید و در مدل‌سازی‌های پژوهش حاضر به آن توجه شده است. همان‌طور که قبلاً نیز بحث شده است، XBeach مدلی برای شبیه‌سازی مورفولوژیکی در ساحل و منطقه‌ی نزدیک ساحل است. در این راستا، مدل XBeach انتقال رسوب را پس از هر مرحله اجرای مدل در مرکز هر سلول در شبکه‌ی مدل محاسبه می‌کند. در شکل ۵، فلوچارت توالی محاسبات درون XBeach مشاهده می‌شود:



شکل ۵. فرایند شبیه‌سازی تغییرات مورفولوژی در مدل XBeach.^[۴۱]

روئولینک^۱ و همکاران (۲۰۱۵) مراجعه کرد. در مدل XBeach، برای به-روزرسانی بستر از یک رابطه‌ی تعادل حجمی استفاده می‌شود؛ که در آن، ورودی و خروجی خالص رسوب در دو راستای x و y ، کاهش و یا افزایش سطح بستر را مطابق رابطه‌ی ۲۶ تعیین می‌کند:

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{f_{mor}}{(1-p)} \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) = 0 \quad (26)$$

که در آن، P تخلخل، و q_x و q_y نرخ انتقال رسوب در دو جهت x و y هستند. f_{mor} ضریب شتاب مورفولوژیکی است؛ مدل مذکور دو روش برای شتاب‌دادن به تغییرات مورفولوژیکی دارد:

در مورد اول، تمام زمان‌های ورودی تقسیم بر f_{mor} می‌شوند. این بدین معناست که هر حالت موج با ضریب $1/f_{mor}$ کم و در اثناء آن شتاب تغییرات f_{mor} برابر می‌شود. برای فعال کردن این گزینه باید $f_{mor} = 1$ قرار داده شود، این روش برای شرایط حدی موج نیز مناسب است.

مورد دیگر $f_{mor} = 0$ است؛ که در آن، بخش کوچکی از شرایط هیدرودینامیکی، به عنوان نماینده‌ی کل شرایط در نظر گرفته می‌شوند. در روش مذکور، فاصله‌ی گام‌های زمانی تغییر نمی‌کند، اما شتاب تغییرات بستر ضرب در f_{mor} می‌شود. این گزینه برای مواردی مناسب است که می‌توان یک بازه‌ی زمانی طولانی را با یک بازه‌ی کوچک‌تر نشان داد؛ یعنی این گزینه برای دوره‌های زمانی شامل شرایط حدی موج مناسب نیست.

از دیگر پدیده‌های قابل توجه در شبیه‌سازی فرایندهای مورفولوژیکی در سواحل، پدیده‌ی فروریزش بوده است. فروریزش زمانی اتفاق می‌افتد که شیب بستر از شیب بحرانی بیشتر شود؛ در این صورت، یک انتقال رسوب در راستای تغییر شیب به شیب بحرانی انجام می‌گیرد. معیار ۲۷، برای فروریزش در مدل XBeach استفاده می‌شود:

$$\left| \frac{\partial z_b}{\partial x} \right| > m_{cr} \quad (27)$$

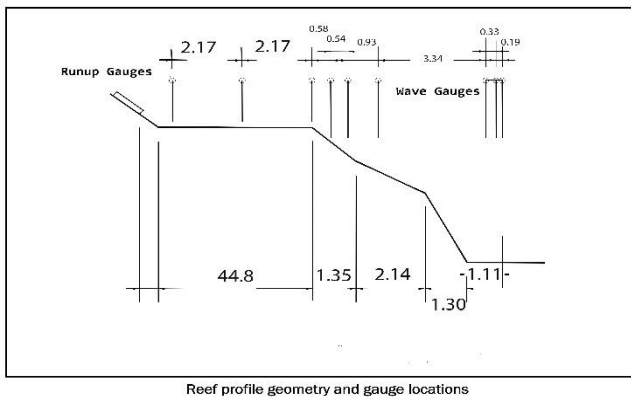
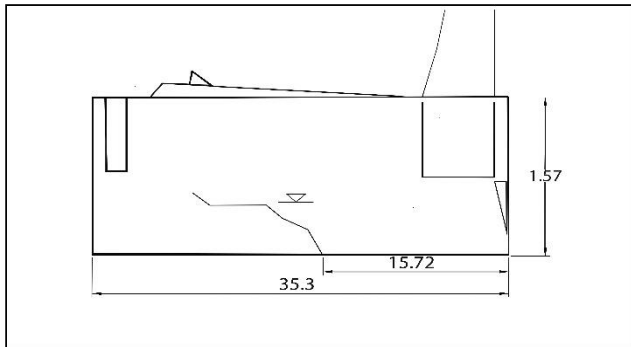
که در آن، m_{cr} شیب بحرانی بستر است. در مدل XBeach، به‌صورت پیش-فرض شیب بحرانی خشک، $1/0$ و شیب بحرانی تر، $0/3$ در نظر گرفته می‌شود. همچنین، یک سرعت فروریزش بیشینه ($v_{av,max}$) برای جلوگیری از تغییرات ناگهانی سطح بستر در نظر گرفته شده است. روابط ۲۸، تغییرات سطح بستر را در هر گام زمانی و با در نظر گرفتن فروریزش نشان می‌دهند:

$$\begin{cases} \Delta z_b = \min \left(\left(\left| \frac{\partial z_b}{\partial x} \right| - m_{cr} \right) \Delta x, v_{av,max} \Delta t \right), \frac{\partial z_b}{\partial x} > 0 \\ \Delta z_b = \max \left(- \left(\left| \frac{\partial z_b}{\partial x} \right| - m_{cr} \right) \Delta x, v_{av,max} \Delta t \right), \frac{\partial z_b}{\partial x} < 0 \end{cases} \quad (28)$$

به‌عبارتی دیگر، به‌طور خلاصه می‌توان گفت جریان با استفاده از حل روابط مربوط به آب‌های کم‌عمق محاسبه می‌شود. مدل XBeach امواج طولانی را دوباره حل می‌کند، در حالی که امواج کوتاه با استفاده از طیف انرژی امواج

^۲ Roelvink

^۱ Roelvink



شکل ۸. فلوم و مشخصات آزمایشگاهی دمیربیلک (۲۰۰۷).^[۴۴]

غیرخطی آب کم عمق با تصحیح فشار به درستی اعمال می شود و امکان مدل سازی انتشار و فروپاشی امواج منفرد را فراهم می کند.

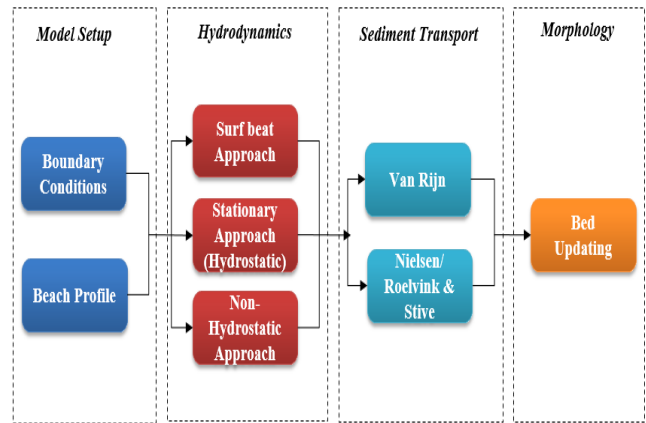
در مطالعه‌ی حاضر، یکی از اهداف اصلی ارزیابی عملکرد مدل XBeach در شبیه سازی فرایندهای مورفولوژیکی در سواحل درشت دانه براساس دو ماژول SB و NH بوده است.

۳.۲. مشخصات مدل های آزمایشگاهی

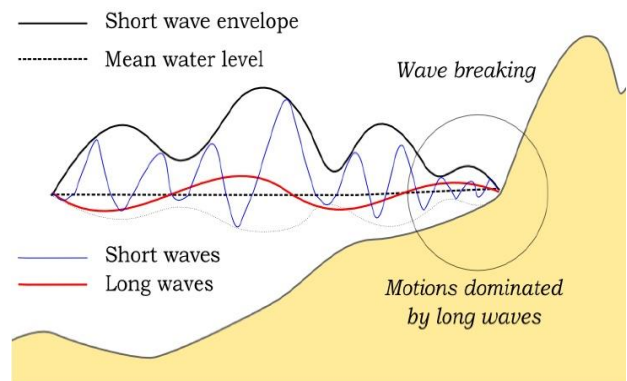
۳.۲.۱. مدل آزمایشگاهی دمیربیلک^۲

در مطالعات انجام شده‌ی دمیربیلک و همکاران (۲۰۰۷).^[۴۴] آثار موج و باد در بالاروی امواج در ساحل و تغییرات تراز سطح آب به صورت آزمایشگاهی مطالعه و جزئیات طراحی آزمایش موج- باد و داده های به دست آمده برای ارزیابی عملکرد و مدل سازی امواج در سواحل و همچنین سیل جزایر شرح داده شده است. آزمایش اخیر در آگوست- سپتامبر سال ۲۰۰۶، مشترکاً توسط برنامه‌ی (SWIMS^۳) و برنامه‌ی پژوهشی مطالعات سواحل (CIRP^۴) انجام شده است. اهداف اصلی مطالعه‌ی مذکور، تعیین کمیت آثار باد در جریان موج در صخره‌های حاشیه‌ی جزیره‌ی گوام در اقیانوس آرام و به دست آوردن داده‌های آزمایشگاهی برای اعتبارسنجی مدل های عددی موج بوده است.

آزمایش ها در فلومی به طول ۳۵ متر، عرض ۰/۷ متر، و ارتفاع ۱/۶ متر، که مجهز به دستگاه موج ساز و همچنین سیستم تولید جریان هوا برای اعمال باد بر سطح آب بوده است، انجام شده است (مطابق شکل ۸). در پژوهش اخیر، بیش از ۸۰ مدل آزمایشگاهی در ۳ بخش اصلی تعریف و مطالعه شده است:



شکل ۶. شبیه سازی فرایندهای مورفولوژیکی در XBeach.



شکل ۷. رویکرد شبیه سازی هیدرودینامیک امواج در مدل XBeach.^[۱]

بنابراین با توجه به توضیحات ارائه شده، رویه‌ی شبیه سازی فرایندهای مورفودینامیک سواحل در مدل XBeach شامل ۴ بخش اصلی است، که فلوجارت آن و گام های شبیه سازی فرایندهای مورفولوژیکی ساحل براساس مدل XBeach در شکل ۶ مشاهده می شود.

مدل XBeach برای برپاسازی مدل و تعریف شرایط هیدرودینامیک سه ماژول: (۱) Stationary، (۲) Surfbeat، و (۳) Non-hydrostatic دارد. مدل XBeach، در ابتدا به عنوان یک مدل با میانگین موج کوتاه اما با تفکیک گروه موج توسعه داده شد، که امکان حل تغییرات موج کوتاه در مقیاس گروه موج و امواج بلند مرتبط با آن ها را فراهم می کرد. با توجه به شکل ۷، عملکرد هر یک از سه ماژول XBeach در برپاسازی شرایط هیدرودینامیکی عبارت است از:

ماژول Stationary: در این شرایط معادلات حاکم براساس میانگین گیری امواج به صورت مؤثر حل می شود، اما از امواج فروگرانشی کاملاً صرف نظر می شود.

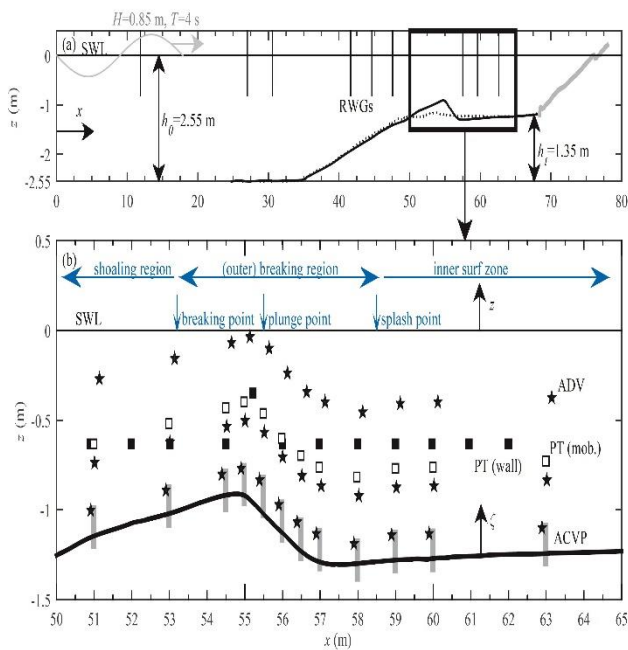
ماژول Surf Beat (SB): در این شرایط تغییرات موج کوتاه در مقیاس گروه موج (مجموعه‌ی امواج کوتاه) و امواج بلند مرتبط با آن ها حل می شود. ماژول Non-Hydrostatic (NH): در این شرایط ترکیبی از معادله های

^۲ Surge and Wave Island Modeling Studies

^۴ Coastal Inlets Research Program

^۱ short wave envelope

^۲ Demirbilek



شکل ۹. فلوم و مشخصات آزمایشگاهی زانندن (۲۰۱۶).^[۴۶]



(الف) شکست شیرجه‌یی امواج در فلوم؛ (ب) قاب متحرک حامل ابزارهای اندازه‌گیری؛ (ج) نمای بستر ماسه‌یی به همراه ابزارهای ACCV و CCM+.

شکل ۱۰. تصویری از فلوم آزمایشگاهی، پروفیل بستر ماسه‌یی، و ابزارهای اندازه‌گیری زانندن (۲۰۱۶).^[۴۶]

(CCM). در شکل ۱۰، تصویری از کانال و ابزارهای اندازه‌گیری در آزمایش‌های انجام‌شده مشاهده می‌شود.

با توجه به شکل ۱۱ و براساس نتایج حاصل از آزمایش‌ها، موقعیت مناطق پراهمیت عبارت است از:

(۱) آزمایش‌های تحت شرایط اعمال موج به تنهایی^۱، (۲) آزمایش‌های تحت شرایط اعمال باد به تنهایی^۲، (۳) آزمایش‌های تحت شرایط بارگذاری توأم موج-باد^۳ طبقه‌بندی شده است. در مدل آزمایشگاهی مذکور برای اعمال شرایط موج از امواج نامنظم با طیف (JONSWAP) با ارتفاع موج مشخص بین ۳ تا ۸/۵ سانتی‌متر و دوره‌ی تناوب پیک بین ۱ تا ۲/۵ ثانیه استفاده شده است. همچنین عمق آب معادل ۵۰ سانتی‌متر بوده است، که البته با توجه به آزمایش‌های مختلف بین ۵۰ تا ۵۵ سانتی‌متر متغیر بوده است. مدت زمان انجام آزمایش‌ها نیز ۱۵ دقیقه بوده است.

تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد که اثر باد در فرآیند بالاروی بسیار مؤثر بوده است. همچنین نتایج نشان دادند که افزایش ارتفاع بالاروی در درجه‌ی اول به دلیل خیزآب ناشی از باد در خط ساحلی و سپس اثر نوسان امواج بلند در بستر صخره‌های مرجانی بوده است. دمیربیلک پیشنهاد داد که می‌توان در سطوح مختلف آب، تأثیر پارامترهای مؤثر در بالاروی در صخره‌های مرجانی را بررسی کرد. همچنین می‌توان از داده‌های آزمایشگاهی ارائه‌شده در گزارش ایشان برای مطالعات و اعتبارسنجی مدل‌های عددی برای صخره‌های مرجانی و برآورد بالاروی استفاده کرد.

۲.۳.۲. مدل آزمایشگاهی زانندن^۴ (۲۰۱۶)

در پژوهش زانندن، به سبب ارزیابی پدیده‌ی انتقال رسوب در سواحل در منطقه‌ی سواش (Surf zone, Swash zone)، آزمون‌های آزمایشگاهی مختلفی تعریف و پیاده‌سازی شده است. آزمایش‌ها در یک فلوم به ابعاد ۱۰۰ متر طول، ۳ متر عرض، و ۴/۵ متر ارتفاع پیاده‌سازی شده است. در کلیه‌ی آزمایش‌ها، شرایط دریایی با موج منظم به ارتفاع ۰/۸۵ متر و دوره‌ی تناوب ۴ ثانیه در نظر گرفته شده است. در پژوهش اخیر، عمق آب معادل ۲/۵۵ متر بوده است.^[۴۶]

به سبب ارزیابی پدیده‌ی انتقال رسوب، خصوصیات ذرات رسوب تشکیل‌دهنده‌ی پروفیل طولی مدل اهمیت بسیاری داشته است. در شکل ۹، مشخصات هندسی مدل و پروفیل بستر در آزمایش‌های زانندن مشاهده می‌شود. بستر ایجادشده تا طول ۶۷/۵ متر از مصالح با خصوصیت متحرک (فرسایش‌پذیر) و برای طول‌های بیش از ۶۷/۵ متر غیرقابل فرسایش بوده است.

(الف) نمای کلی فلوم شامل مقطع آزمایش افقی اولیه (خط‌چین) و پروفیل بستر مرجع (خطوط پرنرنگ)، خط ساحل ثابت (خط کم‌رنگ)، و محل قرارگیری موج‌سنج‌ها (خطوط عمودی)؛ (ب) نمای نزدیک از مقطع آزمایش، شامل: فشارسنج‌های متحرک (مربع‌های سفید)، فشارسنج‌های ثابت دیواری (مربع‌های سیاه)، سرعت‌سنج‌های (ADV) متحرک (ستاره‌ها)، و پروفایلر سرعت و غلظت (ACVP) به صورت متسطیل‌های خاکستری.

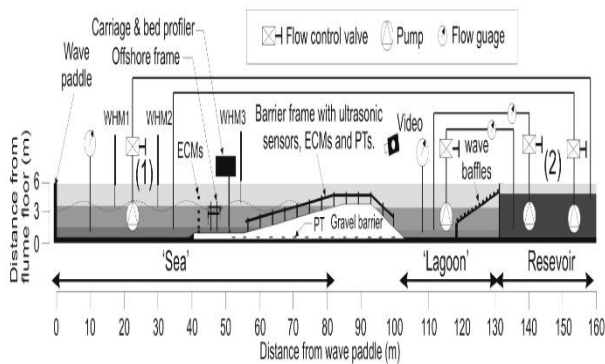
داده‌های آزمایش در دو سری جمع‌آوری شده است، که یک سری مربوط به ناحیه‌ی زوال موج و دیگری مربوط به ناحیه‌ی سواش بوده است. هر دو مورد اخیر بر فرآیند هیدرودینامیک و انتقال رسوب تمرکز دارند. داده‌های موجود در پژوهش حاضر با استفاده از دو ابزار جدید جمع‌آوری شده است: سرعت‌سنج متمرکز آکوستیک (ACVP) و سیستم اندازه‌گیری رسانایی غلظت به روزشده

^۳ combined wind-wave conditions

^۴ Zanden

^۱ wave-only test conditions

^۲ wind-only test conditions



شکل ۱۲. فلوم آزمایشگاهی مدل ماسلینک (۲۰۱۲). [۴۷]

جدول ۲. جزئیات مدل های آزمایشگاهی ماسلینک (۲۰۱۲). [۴۷]

آزمون	H_s	T_p (s)	تراز دریا (m)	تالاب
BB۱	۰/۸	۴/۵	۲/۵	۲/۵
B۲	۰/۸	۳	۲/۵	۲/۵
B۳	۰/۸	۶	۲/۵	۲/۵
C۱	۰/۸	۴/۵	۲/۵	۱
C۲	۰/۸	۴/۵	۲/۵	۳/۵
C۳	۰/۸	۳	۲/۵	۱/۵
C۴	۰/۸	۳	۲/۵	۳/۵
C۵	۰/۸	۶	۲/۵	۱/۵
C۶	۰/۸	۶	۲/۵	۳/۵
DD۱	۰/۸	۴/۵	۱/۷۵-۳/۲۵	۲/۵
D۱	۰/۸	۴/۵	۱/۷۵-۳/۲۵	۱/۵
D۲	۰/۸	۴/۵	۱/۷۵-۳/۲۵	۳/۵

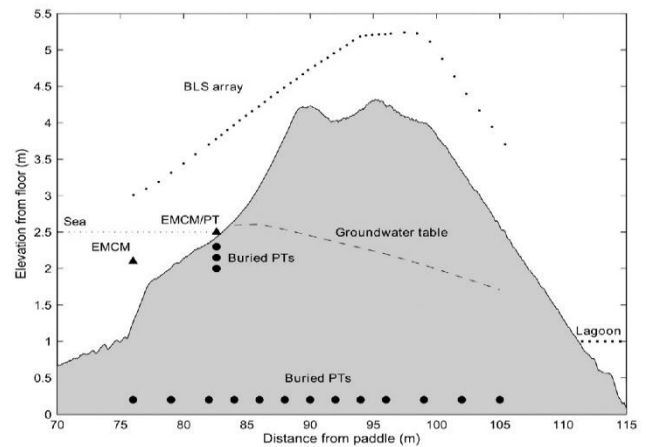
شرایط جزر و مد متغیر در مدل ها و نیز میزان عمق آب در دریا و تالاب جهت ارزیابی شرایط مختلف لحاظ شده اند. برای بررسی انتقال رسوب از ذرات با مشخصات $D_{90} = 17 \text{ mm}$ و $D_{50} = 11 \text{ mm}$ با تخلخل $0.32/0.10$ استفاده شده است. آزمایش های انجام شده براساس مدل ماسلینک، شرایط مختلفی براساس پارامترهای مشخصات موج، جزر و مد، عمق آب دریا، و عمق آب تالاب داشته است، که به همراه جزئیات در جدول ۲ ارائه شده است. این تذکر لازم است که مدت زمان انجام آزمایش ها ۹۰ دقیقه تحت شرایط امواج نامنظم بوده است. در انتهای هر آزمایش، ۱۵ دقیقه بارگذاری موج منظم با دوره تناوب T_p و ارتفاعی معادل H_s موج نامنظم اعمال شده است. در جدول ۲، مشخصات مدل های آزمایشگاهی ماسلینک ارائه شده است.

۴.۲. شرایط مرزی مدل سازی با مدل XBEACH

به طور کلی در مدل XBEACH شرایط مرزی برای برپاسازی مدل های عددی مشتمل بر سه بخش اصلی به این شرح بوده است:

۱. شرایط مرزی موج (Wave Boundary Conditions)

در مدل XBEACH، اولین شرط مرزی تعیین شرط مرزی امواج است، که به دو صورت:



شکل ۱۱. شماتیک مدل آزمایشگاهی ماسلینک (۲۰۱۲). [۴۷]

Breaking point : $X = 53m$, Plunging point : $X = 55/5m$, Splash point : $X = 58/5m$, Shoaling Region : $X < 53m$, Breaking Region: $53 < X < 58/5$, Surf zone: $X > 58/5m$.

در پژوهش اخیر، هیدرودینامیک نزدیک بستر، شامل سرعت های آشفتگی با استفاده از ابزار ACVP در ۱۲ موقعیت تحت امواج شکست بررسی شده است. در نواحی سواش، توسعه و ایجاد بیشتر مدل ها براساس روابط موجود توصیه شده است. نتایج به دست آمده در مطالعه ی زانندن، میزان اهمیت اندرکنش سواش و امواج مشاهده می شود. میزان اندرکنش امواج و سواش را می توان براساس مدت زمان اتفاق افتادن سواش بررسی کرد.

۲.۳.۲. مدل آزمایشگاهی ماسلینک^۱ (۲۰۱۲)

در پژوهش ماسلینک، آزمایش های گسترده یی برای ارزیابی فرایندهای ساحلی و تأثیر آن در تغییرات سفره های آب زیرزمینی و همچنین تغییرات مورفولوژی ساحل تحت شرایط جریان آب زیرزمینی پیاده سازی شده است. به این منظور، یک تپه^۲ فرسایش پذیر بین دریا و تالاب^۳ مدل سازی فیزیکی شده و تحت شرایط مختلف امواج دریایی و جزر مد در یک طرف و سطح آب متغیر در تالاب در طرف دیگر، آزمایش های متعددی صورت گرفته است. آزمایش های انجام شده در یک فلوم به طول ۲۵۰ متر، عرض ۵ متر، و عمق ۷ متر انجام شده است. تپه در وسط فلوم و از تراز طولی ۶۵ متر شروع و به طول ۵۰ متر تا تراز طولی ۱۱۵ متر به اتمام رسیده است. طرف چپ تپه، دریا و شرایط دریایی (موج و جزر و مد) حاکم بوده است. در طرف راست تپه، تالاب با عمق آب مشخص موجود بوده است. همچنین تراز آب زیرزمینی و جریان آب زیرزمینی در تپه برقرار بوده است.

در شکل ۱۱، نمایی به صورت شماتیک از هندسه ی مدل آزمایشگاهی و در شکل ۱۲، مشخصات فلوم آزمایش ها ارائه شده است.

در پژوهش اخیر، مدل های آزمایشگاهی متنوعی برای ارزیابی تأثیر شرایط مختلف دریایی و عمق آب در تالاب تعریف شده است. مدل سازی موج در آزمایش های صورت گرفته براساس امواج نامنظم با طیف موج JONSWAP و با ارتفاع مشخص H_p و دوره ی تناوب پیک (T_p) در نظر گرفته شده است.

^۳ Lagoon

^۱ Masselink

^۲ barrier

همچنین شرط مرزی تغییرات جزر و مدی فقط در مدل‌سازی آزمایش ماسلینک (۲۰۱۲) برقرار بوده است، که سطح آب مشخص در تالاب (Lagoon) براساس تراز آب در تالاب فعال بوده است. از آنجایی که در هیچیک از آزمون‌های آزمایشگاهی، ورود آب از رودخانه به دریا یا منطقه‌ی تخلیه آب به دریا موجود نبوده است، شرط مرزی کنترل ورود و خروج آب در هر سه مدل آزمایشگاهی غیرفعال بوده است.

۳. شرایط مرزی انتقال رسوب

شرایط مرزی برای انتقال رسوب، شرط مرزی (Neumann Boundaries) در همه‌ی بخش‌های مدل بوده است. این شرط مرزی بیانگر این موضوع است که گرادیان‌های مرزی در معادله‌ی فرارفت-انتشار (advection-diffusion equation) روی صفر تنظیم و همچنین گرادیان‌های بار بستر در جهت انتقال رسوب‌ها محاسبه می‌شود. با شرط مرزی مذکور، شرایط انتقال رسوب‌های عمود بر ساحل و انتقال رسوب‌های عرضی در مدل میسر بوده است.

۳. نتایج و بحث

۱.۳. مدل‌سازی عددی آزمایش دمیربیلک و همکاران (۲۰۰۷)

آزمایش‌های دمیربیلک و همکاران (۲۰۰۷)، به ارزیابی آثار موج و باد بر بالاروی امواج در ساحل و تغییرات تراز سطح آب معطوف بوده است. بر این اساس، ۸۰ آزمون آزمایشگاهی تحت شرایط مختلف (اعمال موج، اعمال باد، و شرایط اعمال توأم موج و باد) تعریف شده است. در مطالعات از امواج نامنظم با طیف (JONSWAP) با ارتفاع موج مشخص (H_s) بین ۳ تا ۸/۵ سانتی‌متر و دوره‌ی تناوب پیک (T_p) بین ۱ تا ۲/۵ ثانیه استفاده شده است. در پژوهش حاضر، با هدف ارزیابی عملکرد مدل XBeach در شبیه‌سازی هیدرودینامیک سواحل بلاخص بالاروی امواج و تغییرات تراز سطح آب، مدل آزمایشگاهی دمیربیلک (۲۰۰۷)، با بهره‌گیری از دو ماژول SB و NH شبیه‌سازی و نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی با نتایج آزمایش‌ها مقایسه و ارزیابی شده است. در مدل آزمایشگاهی، برای ثبت تغییرات تراز سطح آب از ۹ گیج^۱ اندازه‌گیر استفاده شده است، که موقعیت آن‌ها به صورت شماتیک در شکل ۱۲ و جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳. موقعیت گیج‌های اندازه‌گیری در آزمایش دمیربیلک (۲۰۰۷).

شماره‌ی اندازه‌گیر (گیج)	X(m)	Z(m)
۱	-۱/۱۱	۰
۲	-۰/۹۲	۰
۳	-۰/۵۹	۰
۴	۲/۷۵	۰/۳۳
۵	۳/۶۸	۰/۳۹
۶	۴/۲۲	۰/۴۵
۷	۴/۸	۰/۵
۸	۶/۹۷	۰/۵
۹	۹/۱۴	۰/۵

۱) شرط مرزی طیفی موج (Special conditions)، و ۲) شرط مرزی غیرطیفی (Non-spectral conditions) تعیین می‌شود.

به‌طور کلی، شرط مرزی امواج دریایی براساس شرایط مدل‌سازی و شرایط امواج دریایی حاکم بر مدل تعیین می‌شود. در پژوهش حاضر، سه مدل آزمایشگاهی با بهره‌گیری از مدل XBEACH مدل‌سازی عددی شده است، که براساس شرایط مدل آزمایشگاهی شرط مرزی موج در مدل XBEACH تعریف شده است.

• مدل‌سازی عددی آزمایش دمیربیلک و همکاران (۲۰۰۷)، از امواج نامنظم با طیف (JONSWAP) با ارتفاع موج مشخص (H_s) بین ۳ تا ۸/۵ سانتی‌متر و دوره‌ی تناوب پیک (T_p) بین ۱ تا ۲/۵ ثانیه استفاده شده است. براین اساس، شرط مرزی از نوع موج طیفی با خصوصیات طیف موج جانسواپ (H_s و T_p) اعمال شده است.

• مدل‌سازی عددی آزمایش زانندن (۲۰۱۶)، به ارزیابی تغییرات مورفولوژیک بر بستر فرسایش‌پذیر تحت شرایط اعمال موج نامنظم با ارتفاع ۰/۸۵ متر و دوره‌ی تناوب ۴ ثانیه بر ساحل معطوف بوده است. در مدل زانندن، شرط مرزی از نوع موج غیرطیفی (موج نامنظم با ارتفاع و دوره‌ی تناوب مشخص براساس مدل آزمایشگاهی) تعیین شده است.

• مدل‌سازی عددی آزمایش ماسلینک (۲۰۱۲)، از امواج نامنظم با طیف موج JONSWAP، که دارای ارتفاع مشخص H_s و دوره‌ی تناوب پیک T_p هستند (مطابق با مدل آزمایشگاهی) برپاسازی شده است. بر این اساس، شرایط مرزی موج برای این مدل از نوع موج طیفی با خصوصیات طیف موج جانسواپ (H_s و T_p) اعمال شده است.

۲. شرایط مرزی معادلات آب کم‌عمق

بخش دوم، شرایط مرزی مدل XBEACH در سه بخش اصلی است:

۱) شرایط مرزی دریایی (Offshore boundary): عمدتاً برای تعیین وضعیت محدوده‌ی دریایی از نقطه‌نظر جذب/بازتاب و شرایط حاکم بر امواج در مرزهای ناحیه‌ی دریایی استفاده می‌شود.

۲) تغییرات جزرومدی (Tide and surge): برای تعیین مقادیر سطح آب در شرایط وجود مد دریایی و همچنین ثابت نگه‌داشتن عمق آب در مرزهای منطقه‌ی دریایی استفاده می‌شود.

۳) کنترل ورود و خروج آب از طریق رودخانه یا ناحیه‌ی تخلیه‌ی آب به دریا (River and point discharge): برای تعیین و کنترل نقاط ورود توده‌ی آب به منطقه‌ی دریایی استفاده می‌شود.

به‌طور کلی شرط مرزی دریایی براساس شرایط مدل‌سازی و شرایط امواج دریایی حاکم بر مدل تعیین می‌شود. در پژوهش حاضر، سه مدل آزمایشگاهی با استفاده از مدل XBEACH مدل‌سازی عددی شده است، که براساس شرایط مدل آزمایشگاهی، شرط مرزی دریایی در مدل XBEACH برای هر سه آزمون آزمایشگاهی شرط مرزی غیرهیدرواستاتیک در مرز منطقه‌ی دریایی سمت ساحل فعال بوده است، این شرط مرزی برای شبیه‌سازی‌های غیرهیدرواستاتیکی لازم است.

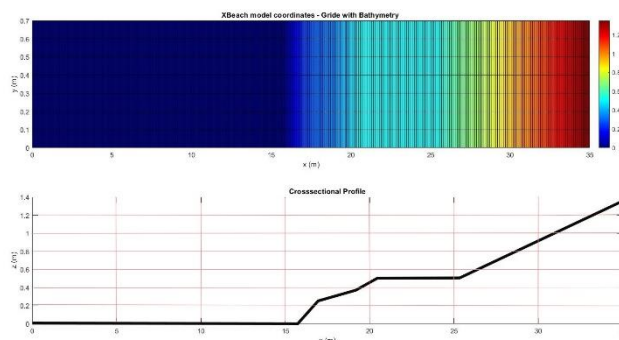
^۱ Gauge

جدول ۴. مشخصات آزمایش‌های دمیربیلک (۲۰۰۷)، برای مدل‌سازی عددی.

توصیف شرایط	WL (cm)	سرعت باد (m/s)	موج		آزمون
			T _P (s)	H _s (cm)	
اثر باد	۵۳/۱	۴	—	—	مدل D _۱
اثر موج	۵۰	—	۱/۵	۶/۸	مدل D _۲
اثر توأم موج - باد	۵۳/۱	۴/۸	۱/۲۵	۶	مدل D _۳

جدول ۵. کالیبراسیون مدل عددی آزمایش دمیربیلک (۲۰۰۷).

درصد خطای پارامتر η (تراز سطح آب) نسبت به مدل آزمایشگاهی مدل D _۳			
اندازه‌ی مش	اندازه‌ی مش	اندازه‌ی مش	X
۶/۹۸	۳/۸۹	۲/۶۵	X= P (۱ گیج)
۷/۸۸	۳/۱۹	۳/۱۸	X= P (۲ گیج)
۸/۴۷	۵/۱۸	۳/۷۷	X= P (۳ گیج)
۸/۴۶	۴/۱۵	۳/۰۵	X= P (۴ گیج)
۸/۷۹	۴/۵۷	۴/۱۲	X= P (۵ گیج)
۹/۱۱	۴/۰۸	۳/۷۵	X= P (۶ گیج)
۸/۱۷	۳/۱۲	۲/۶۸	X= P (۷ گیج)
۹/۱۵	۴/۷۸	۴/۰۸	X= P (۸ گیج)
۸/۹۵	۳/۹۸	۳/۸۴	X= P (۹ گیج)
٪۸/۴۴	٪۴/۱۱	٪۳/۴۶	Mean Err. (%)



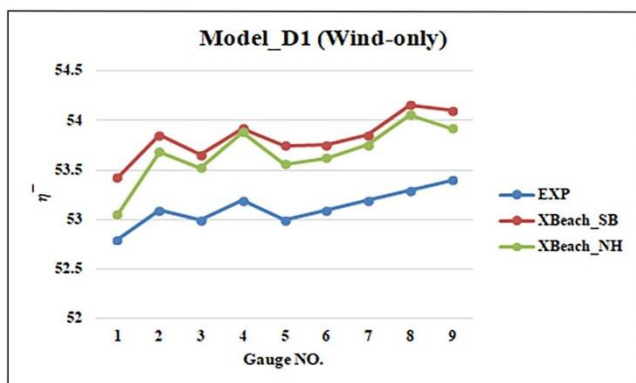
شکل ۱۳. پلان و پروفیل بستر در مدل XBeach (دمیربیلک (۲۰۰۷))

در پژوهش حاضر، سه آزمایش مختلف از مطالعات دمیربیلک و همکاران (۲۰۰۷)، که دارای شرایط مختلف اعمال باد، اعمال موج، و اعمال توأم موج و باد بر ساحل بوده‌اند، در بستر XBeach مدل‌سازی عددی شده‌اند. مشخصات و جزئیات هر یک از سه مدل آزمایشگاهی در جدول ۴ ارائه شده است.

براساس توضیحات ارائه‌شده، سه مدل عددی مطابق شرایط ذکر شده در جدول ۴، در مدل XBeach برپاسازی شده‌اند. در شکل ۱۳، نمایی از پلان و پروفیل بستر در مدل XBeach، که مطابق آزمایش‌های دمیربیلک (۲۰۰۷) برپاسازی شده‌اند، مشاهده می‌شود. به جهت کالیبراسیون مدل عددی، حساسیت‌سنجی نسبت به اندازه‌ی مش (گام مکانی) با سه اندازه‌ی مختلف: ۵، ۲/۵، و ۱۰ سانتی‌متر انجام و آزمایش سوم (مدل D_۳) در بستر مدل XBeach مدل‌سازی عددی شده است. نتایج به‌دست‌آمده، که بیانگر تغییرات سطح آب در موقعیت ۹ گیج (جدول ۳) بوده است، نسبت به نتایج حاصل از مدل آزمایشگاهی ارزیابی و مقایسه شده‌اند. نتایج حاصل از کالیبراسیون مدل عددی در جدول ۵ ارائه شده است.

در جدول ۵، نتایج حاصل از حساسیت‌سنجی عملکرد مدل عددی نسبت به اندازه‌ی مش‌بندی ارائه شده است، براساس نتایج حاصل مشخص می‌شود که میزان خطای مدل‌سازی برای مش‌بندی با اندازه‌ی ۱۰ سانتی‌متر معادل با ۸/۴۴٪ بوده است، که با کاهش اندازه‌ی مش به ۵ سانتی‌متر، میانگین خطای مدل‌سازی ۴/۱۱٪ شده است. همچنین براساس نتایج مشخص می‌شود که با کاهش اندازه‌ی مش از ۵ به ۲/۵ سانتی‌متر، میزان کاهش خطا، جزئی و کمتر از ۰/۱۶٪ بوده است. لذا، در پژوهش حاضر با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، مدل‌سازی عددی با اندازه‌ی مش ۵ سانتی‌متر پیاده‌سازی شده است.

نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی سه مدل آزمایشگاهی (جدول ۴) در بستر



شکل ۱۴. تغییرات تراز سطح آب در مدل D_۱

XBeach و با بهره‌گیری از دو ماژول SB و NH، بیانگر میزان تغییرات تراز سطح آب در موقعیت کارگذاری گیج‌های اندازه‌گیری در آزمون آزمایشگاهی بوده است، که در شکل‌های ۱۴ الی ۱۶ تغییرات تراز سطح آب براساس شبیه‌سازی با دو ماژول SB و NH در مدل XBeach به همراه نتایج حاصل از آزمون‌های آزمایشگاهی برای سه مدل D_۱، D_۲، و D_۳ به ترتیب ارائه شده‌اند.

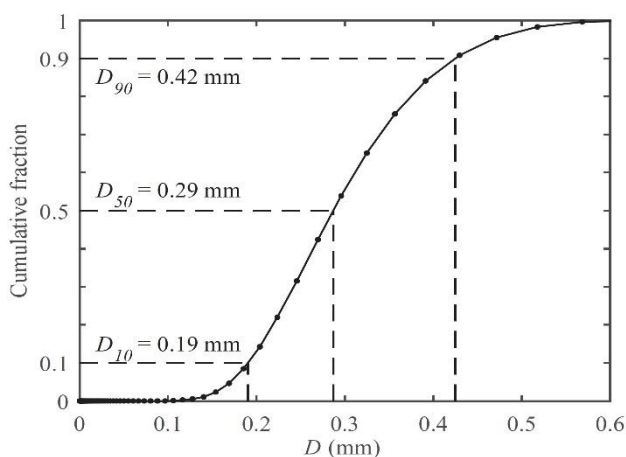
در شکل ۱۴، نتایج حاصل از تغییرات تراز سطح آب در مدل D_۱ ارائه شده است. براساس نتایج حاصل مشخص است که دو ماژول SB و NH دارای عملکرد نسبتاً مشابهی در شبیه‌سازی مدل D_۱ نسبت به نتایج آزمون

جدول ۷. ارزیابی عملکرد XBeach در شبیه‌سازی مدل D2.

مدل D2 (اثر موج)			
ماژول	MSE	RMSE	Mean Err. (%)
XBeach- SB	۶/۳۱	۲/۵۱	۴/۸۹
XBeach- NH	۰/۴۸	۰/۶۹	۱/۳۵

جدول ۸. ارزیابی عملکرد XBeach در شبیه‌سازی مدل D3.

مدل D3 (اثر توأم موج - باد)			
ماژول	MSE	RMSE	Mean Err. (%)
XBeach- SB	۱۱/۶۷	۳/۴۲	۶/۲۱
XBeach- NH	۲/۰۰	۱/۴۱	۲/۴۴



شکل ۱۷. منحنی دانه‌بندی ذرات رسوب در آزمایش زاندن (۲۰۱۶).

شکل ۱۷. منحنی دانه‌بندی ذرات رسوب در آزمایش زاندن (۲۰۱۶).
 NH معادل با ۲/۴۴٪ و با ماژول SB معادل با ۶/۲۱٪ بوده است. به بیان دیگر، نتایج حاصل از مدل سازی با مدل XBeach نشان می‌دهد که ماژول NH عملکرد بهتری نسبت به ماژول SB در شبیه‌سازی شرایط اعمال توأم باد و موج در مدل سازی میزان تغییرات تراز آب در سواحل داشته است.

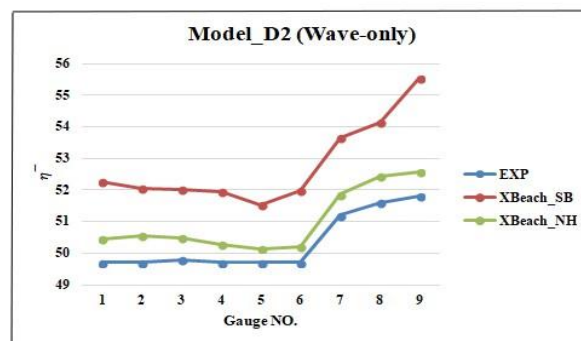
۲.۳. مدل سازی عددی آزمایش زاندن (۲۰۱۶)

مدل آزمایشگاهی زاندن به ارزیابی تغییرات مورفولوژیک بر بستر فرسایش‌پذیر تحت شرایط اعمال موج منظم با ارتفاع ۰/۸۵ متر و دوره‌ی تناوب ۴ ثانیه بر ساحل معطوف بوده است. مدت زمان انجام آزمایش‌ها معادل با ۹۰ دقیقه بوده است. برای ارزیابی پدیده‌ی انتقال رسوب و همچنین بررسی ذرات معلق رسوب در پژوهش حاضر، خصوصیات ذرات رسوب به شرح منحنی دانه‌بندی ارائه شده در شکل ۱۷ مدنظر بوده است.

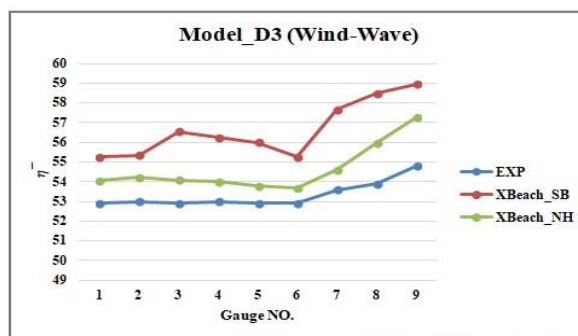
براساس خصوصیات مشخصات ارائه شده از مدل آزمایشگاهی زاندن، مدل عددی در بستر XBeach و با بهره‌گیری از دو ماژول SB و NH مدل سازی

جدول ۶. ارزیابی عملکرد XBeach در شبیه‌سازی مدل D1.

مدل D1 (اثر باد)			
ماژول	MSE	RMSE	Mean Err. (%)
XBeach- SB	۰/۵۰	۰/۷۱	۱/۳۲
XBeach- NH	۰/۳۲	۰/۵۶	۱/۰۳



شکل ۱۵. تغییرات تراز سطح آب در مدل D2.



شکل ۱۶. تغییرات تراز سطح آب در مدل D3.

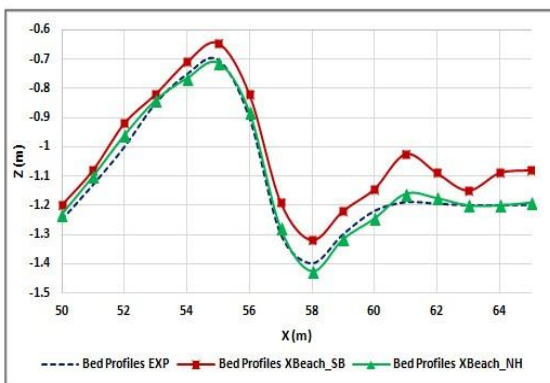
آزمایشگاهی بوده‌اند. در جدول ۶، میزان خطای مدل سازی برای مدل D1 نسبت به نتایج آزمون آزمایشگاهی ارائه شده است، براساس نتایج مشخص می‌شود که میزان میانگین خطای مدل XBeach براساس مدل سازی با هر دو ماژول حدوداً ۱٪ بوده است، که بیانگر دقت قابل قبول مدل عددی در شبیه‌سازی تغییرات تراز سطح آب در شرایط اعمال باد در ساحل است.

در شکل ۱۵ و جدول ۷، نتایج حاصل از ارزیابی عملکرد مدل XBeach در شبیه‌سازی مدل D2 نسبت به آزمون آزمایشگاهی و براساس پارامتر تغییرات تراز سطح آب ارائه شده است. براساس نتایج حاصل مشخص است که تحت شرایط اعمال موج در ساحل، ماژول NH عملکرد بهتری نسبت به ماژول SB داشته است، به گونه‌ی که میزان میانگین خطای مدل سازی عددی با ماژول NH معادل با ۱/۳۵٪ و با ماژول SB معادل با ۴/۸۹٪ بوده است.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی اعمال توأم باد و موج بر ساحل (مدل D3) در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود. همچنین میزان خطای مدل سازی عددی براساس میانگین خطا و آزمون‌های آماری MSE و RMSE در جدول ۸ ارائه شده است. براساس نتایج حاصل مشخص است که میزان خطای مدل سازی با ماژول

جدول ۹. کالیبراسیون مدل عددی آزمایش زاندن (۲۰۱۶).

خطای مدل عددی (%)		
سایز مش	سطح آب	پروفیل بستر
۵ (cm)	۵/۹۸٪	۶/۸۵٪
۱۰ (cm)	۶/۲۸٪	۷/۱۱٪
۲۰ (cm)	۱۴/۷۶٪	۲۰/۴۵٪



شکل ۲۰. نتایج حاصل از مدل سازی عددی آزمایش زاندن (۲۰۱۶).

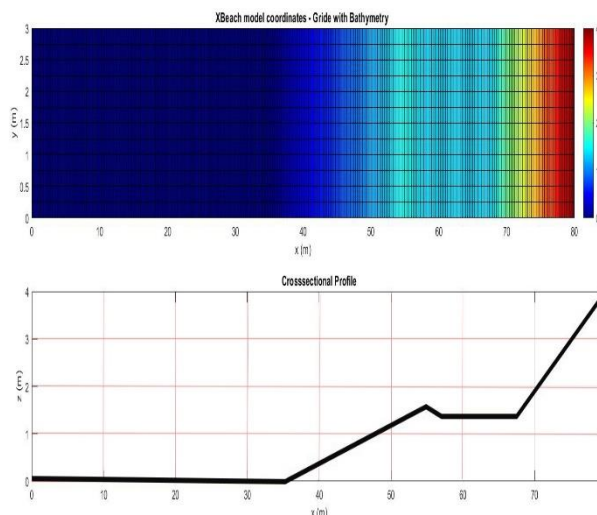
جدول ۱۰. ارزیابی عملکرد XBeach در شبیه سازی آزمایش زاندن (۲۰۱۶).

ماژول	MSE	RMSE	Mean Err. (%)
XBeach- SB	۰/۰۰۷۵۶۹	۰/۰۸۶۹۹۹	۷/۱۶
XBeach- NH	۰/۰۰۰۴۴۶	۰/۰۲۱۱۰۷	۱۶۹

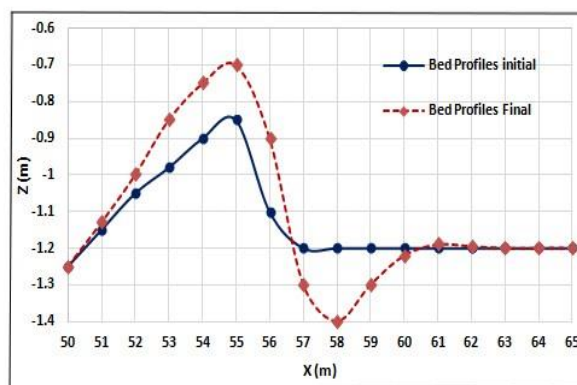
۷/۱۱٪ برای تغییرات پروفیل بستر کاهش یافته است. همچنین براساس نتایج حاصل مشخص می شود که با کاهش اندازه ی مش از ۱۰ به ۵ سانتی متر، مقادیر خطای مدل سازی عددی تغییرات جزئی (کمتر از ۱٪) داشته است. براین اساس در مطالعه ی حاضر، برای مدل سازی عددی آزمایش زاندن از مش ۱۰ سانتی متر استفاده شده است.

با توجه به توضیحات ارائه شده، مدل عددی با بهره گیری از دو ماژول SB و NH برپاسازی و نتایج حاصل از مدل سازی که بیانگر تغییرات مورفولوژی ساحل براساس شرایط آزمایش بوده است، استخراج شده است. در شکل ۲۰، تغییرات پروفیل بستر براساس نتایج آزمایش زاندن (۲۰۱۶) و مدل سازی با دو ماژول SB و NH مشاهده می شود؛ که مطابق آن، تطابق بهتری بین تغییرات پروفیل بستر در مدل سازی انجام شده با ماژول NH نسبت به مدل آزمایشگاهی برقرار بوده است.

جهت ارزیابی کمی نتایج حاصل از مدل سازی عددی در پژوهش حاضر، مقایسه یی با نتایج حاصل از آزمایش زاندن (۲۰۱۶) براساس آزمون های آماری MSE و RMSE و میانگین خطای مدل سازی عددی برای پارامتر تغییرات پروفیل بستر مطابق جدول ۱۰ انجام شده است؛ که مطابق آن، مدل سازی در بستر مدل XBeach با استفاده از ماژول NH عملکرد بهتری نسبت به ماژول SB داشته است، به گونه یی که میانگین خطای مدل سازی عددی با ماژول NH معادل ۱/۶۹٪ و با ماژول SB معادل ۷/۱۶٪ بوده است.



شکل ۱۸. پلان و پروفیل بستر در مدل XBeach (زاندن، ۲۰۱۶).



شکل ۱۹. تغییرات پروفیل بستر در آزمایش زاندن (۲۰۱۶).

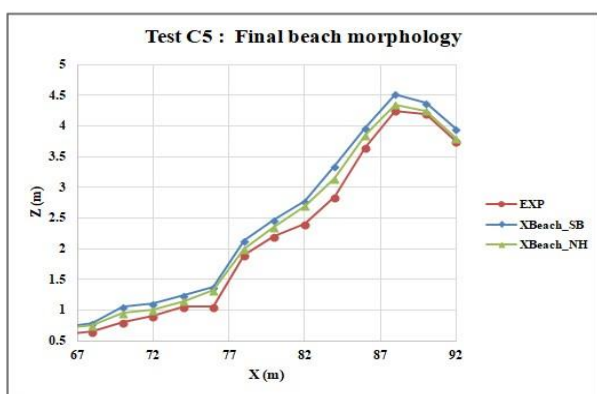
عددی شده است. در شکل ۱۸، نمایی از هندسه ی فوم و پروفیل بستر در مدل XBeach مشاهده می شود.

به جهت کالیبراسیون مدل عددی، حساسیت سنجی نسبت به اندازه ی مش (گام مکانی) با سه اندازه ی مختلف: ۵، ۱۰، و ۲۰ (cm) در بستر مدل XBeach انجام شده است. نتایج حاصل که بیانگر تغییرات سطح آب و تغییرات پروفیل بستر در موقعیت بستر فرسایش پذیر (تراز طولی $X=50$ تا $X=65$) بوده است (مطابق شکل ۱۹)، نسبت به نتایج حاصل از مدل آزمایشگاهی ارزیابی و مقایسه شده است. نتایج حاصل از آزمایش های زاندن بیانگر تغییرات تراز بستر رسوب ها در محدوده ی فرسایش پذیر، یعنی تراز طولی ۵۰ تا ۶۵ متر بوده است، که با بهره گیری از ابزار اندازه گیری ثبت و ارائه شده است..

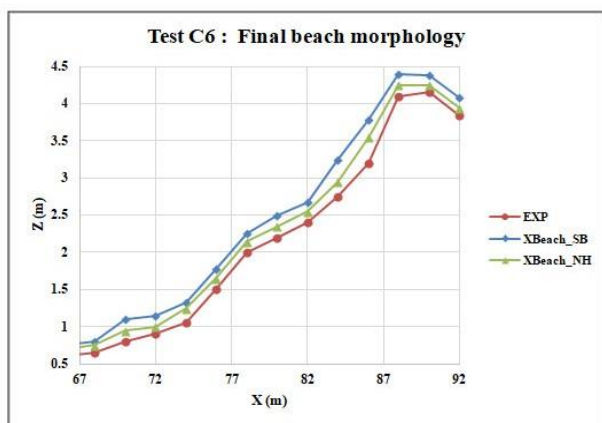
نتایج حاصل از کالیبراسیون مدل عددی در جدول ۹ ارائه شده است؛ که مطابق آن، براساس نتایج حاصل از حساسیت سنجی مدل عددی نسبت به اندازه ی مش بندی مشخص است که میزان خطای مدل سازی با اندازه ی مش ۲۰ سانتی متر برای دو پارامتر تراز سطح آب و تغییرات پروفیل بستر به ترتیب معادل ۶/۲۸٪ و ۲۰/۴۵٪ بوده است، که با کاهش اندازه ی مش به ۱۰ سانتی متر، مقادیر خطای مدل سازی عددی به ۶/۲۸٪ برای تراز سطح آب و

جدول ۱۱. پارامترهای مدل عددی XBeach در راستای شبیه‌سازی مدل آزمایشگاهی ماسلینک.

پارامتر مدل	گزینه‌ی انتخابی	توصیف پارامتر
gwflow	۱	فعال‌سازی جریان آب زیرزمینی
gwscheme	turbulent	شرایط جریان آب زیرزمینی: جریان آشفته
gwnonh	۱	رویکرد مدل‌سازی آب زیرزمینی: غیرهیدرواستاتیکی
gwheadmodal	parabolic	سه‌موی: تابع شکل تغییرات پروفیل تراز آب:
Kx	۰/۱۵	هدایت هیدرولیکی خاک
morfac	۱	محاسبه‌ی تغییرات مورفولوژی بستر در هر گام زمانی
CFL	۰/۷	شرط کورانت: با توجه به هندسه‌ی مدل، سرعت بیشینه‌ی موج و طول گام مکانی (مش‌بندی)
۵۰D	۱۱	متوسط دانه‌بندی ذرات بستر
۹۰D	۱۷	مشخصه‌ی دانه‌بندی بستر



شکل ۲۲. نتایج حاصل از مدل‌سازی آزمون C۵.

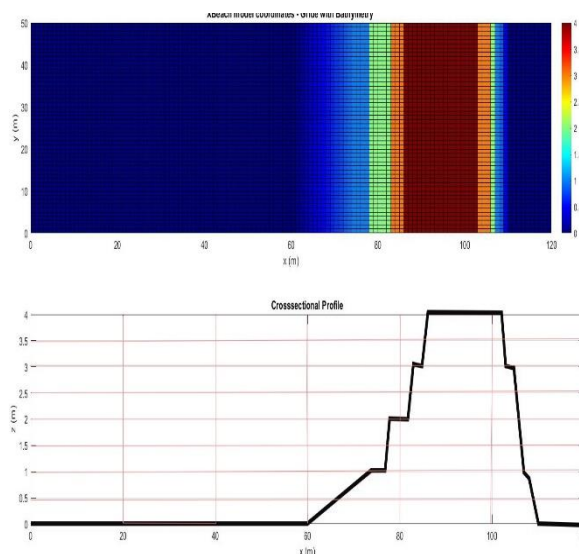


شکل ۲۳. نتایج حاصل از مدل‌سازی آزمون C۶.

SB, NH اخذ شده است. این تذکر لازم است که مدت زمان مدل‌سازی عددی براساس مدل آزمایشگاهی معادل با ۹۰ دقیقه (۵۴۰۰ S) بوده است.

در آزمون‌های آزمایشگاهی و به تبع آن در مدل‌سازی عددی، میزان تغییرات مورفولوژی بستر به عنوان یکی از اصلی‌ترین خروجی‌های مدنظر ارزیابی شده است

نتایج حاصل از میزان تغییرات مورفولوژی در دو آزمون C۵ و C۶ به ترتیب در شکل‌های ۲۲ و ۲۳ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن‌ها، تغییرات پروفیل بستر براساس نتایج آزمون آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی با دو ماژول SB



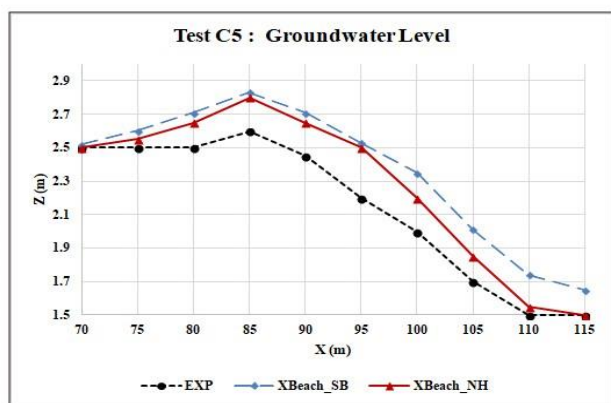
شکل ۲۱. پلان و پروفیل بستر در مدل XBeach (ماسلینک، ۲۰۱۲).

۳.۳. مدل‌سازی عددی آزمایش ماسلینک (۲۰۱۲)

با توجه به مدل آزمایشگاهی ماسلینک، مدل‌سازی عددی براساس شرایط و خصوصیات مدل آزمایشگاهی در بستر مدل XBeach تعریف و پیاده‌سازی شده است. در مطالعه‌ی حاضر، ۲ مدل آزمایشگاهی C۵ و C۶ (مطابق جدول ۲) که به بررسی و ارزیابی مورفولوژی بستر و تعیین سطح آب زیرزمینی بین دریا و تالاب پرداخته است، مدل‌سازی عددی شده‌اند. مشخصات هندسی مدل عددی دقیقاً منطبق بر مدل آزمایشگاهی ماسلینک در مدل XBeach تعریف شده است. در شکل ۲۱، نمایی از پلان و پروفیل طولی مدل عددی ارائه شده است. در مدل عددی، شرایط ایجاد امواج براساس مدل آزمایشگاهی تعریف شده است، لذا امواج نامنظم با طیف موج JONSWAP، که دارای ارتفاع مشخص H_s و دوره‌ی تناوب پیک T_p بودند (مطابق با مدل آزمایشگاهی) در نظر گرفته شده‌اند. همچنین میزان عمق آب در دریا و تالاب جهت ارزیابی شرایط مختلف لحاظ شده است. پارامترهای اصلی در مدل عددی XBeach در جدول ۱۱ ارائه شده است.

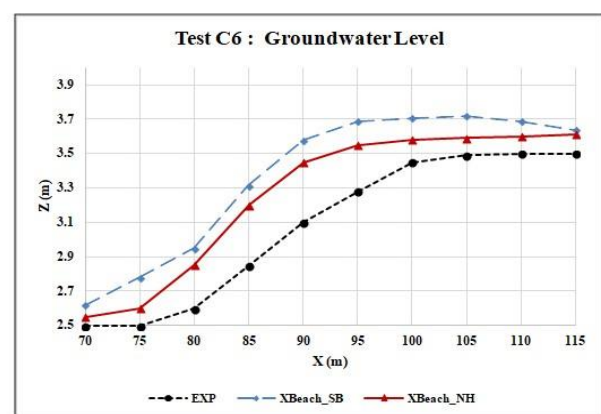
با توجه به پارامترهای ارائه‌شده برای به‌کارگیری مدل XBeach، که در راستای کالیبراسیون مدل تعریف شده است، هر یک از آزمون‌های C۵ و C۶ در بستر XBeach شبیه‌سازی و نتایج حاصل براساس عملکرد دو ماژول

جدول ۱۲. آزمون‌های آماری و میانگین خطای مدل‌سازی- آزمون C۵.



شکل ۲۴. ارزیابی تغییرات سطح آب زیرزمینی- آزمون C۵.

جدول ۱۳. آزمون‌های آماری و میانگین خطای مدل‌سازی- آزمون C۶.



شکل ۲۵. ارزیابی تغییرات سطح آب زیرزمینی- آزمون C۶.

جدول ۱۴. ارزیابی خطای مدل‌سازی براساس تراز آب زیرزمینی- آزمون C۵.

سطح آب زیرزمینی			
Mean Err. (%)	RMSE	MSE	آزمون C۵
۱۲/۳۲	۰/۲۶۵	XBeach- SB	XBeach- SB
۷/۴۶	۰/۱۸۰	XBeach- NH	XBeach- NH

تالاب معادل با ۱/۵ متر بوده است، که نسبت به عمق آب دریا که معادل با ۲/۵ متر بوده است، سطح پایین‌تری داشته و در مدل C۶ عمق آب در تالاب ۳/۵ متر بوده است. در شکل‌های ۲۴ و ۲۵، میزان تغییرات سطح آبخوان در دو مدل C۶ و C۵ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن‌ها، گراف مشکی، بیانگر سطح آب زیرزمینی در مدل آزمایشگاهی ماسلینک، گراف آبی، نتایج حاصل از مدل‌سازی با ماژول SB، و گراف قرمز، بیانگر تراز آب زیرزمینی براساس مدل‌سازی با ماژول NH بوده است.

براساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی آزمون C۵ (مطابق جدول ۱۴) مشخص می‌شود که میزان خطای مدل‌سازی (محاسبه‌ی تراز آب زیرزمینی) براساس ماژول SB معادل با ۱۲/۳۲٪ و براساس ماژول NH معادل با ۷/۴۶٪ بوده است.

Mean Err. (%)	RMSE	MSE	ماژول
۱۸/۴۵	۰/۲۷	۰/۰۷	XBeach- SB
۱۱/۷۳	۰/۱۷	۰/۰۳	XBeach- NH

Mean Err. (%)	RMSE	MSE	ماژول
۱۹/۳۰	۰/۳۰	۰/۰۹	XBeach- SB
۱۱/۴۵	۰/۱۶	۰/۰۳	XBeach- NH

و NH در مدل XBeach به ترتیب برای آزمون‌های C۵ و C۶ ارائه شده است.

همچنین به جهت ارزیابی کمی و بررسی عملکرد مدل‌سازی عددی، نتایج حاصل از مقایسه‌ها بر پایه‌ی آزمون‌های آماری RMSE، MSE، و میانگین خطای مدل‌سازی عددی براساس دو ماژول SB و NH نسبت به آزمون‌های آزمایشگاهی C۵ و C۶ و ارزیابی میزان خطای مدل‌سازی عددی در جدول‌های ۱۲ و ۱۳ ارائه شده است.

با ارزیابی نتایج حاصل از مدل‌سازی دو آزمون C۵ و C۶ (مطابق جدول‌های ۱۲ و ۱۳) مشخص می‌شود که میزان خطای مدل‌سازی با بهره‌گیری از مدل XBeach ماژول SB معادل با ۱۸/۴۵٪ برای آزمون C۵ و ۱۹/۳۰٪ برای آزمون C۶ بوده است، در حالی که میزان خطا با استفاده از ماژول NH معادل با ۱۱/۷۳٪ و ۱۱/۴۵٪ به ترتیب برای آزمون‌های C۵ و C۶ بوده است. براساس نتایج به‌دست‌آمده مشخص می‌شود که ماژول NH عملکرد بهتری در مدل‌سازی مدل آزمایشگاهی ماسلینک (۲۰۱۲) نسبت به ماژول SB داشته است، اگرچه میزان خطای مدل‌سازی با هر دو ماژول خطای بزرگ و قابل توجهی (بیشتر از ۱۰٪) بوده است، که علت این مورد را باید در شرایط مدل‌سازی، حضور تالاب، و وجود جریان آب زیرزمینی در مدل بررسی کرد.

جهت ارزیابی عملکرد مدل XBeach در پژوهش حاضر، علاوه بر بررسی تغییرات مورفولوژی بستر، سطح تراز آب زیرزمینی بحث و بررسی شده است. یکی از نقص‌های مدل XBeach که به صراحت در راهنمای کاربری (راهنمای مدل XBeach) و مطالعات انجام‌شده توسط پژوهشگران مختلف،^[۴۷-۵۰] اشاره شده است،

خطای فازی در هنگام نفوذ/ تراوش آب به آبخوان بوده است. بر این اساس، میزان تغییرات تراز آب زیرزمینی در دو مدل C۵ و C۶ ارزیابی شده است.

در دو مدل C۵ و C۶، همه‌ی مشخصات مدل‌سازی کاملاً یکسان بوده و فقط پارامتر عمق آب در تالاب متغیر بوده است، به گونه‌یی که در مدل C۵، عمق

NH نشان داد که مدل XBeach، توانایی بالایی در مدل‌سازی فرآیندهای مورفولوژیک ساحل داشته است.

مدل سوم آزمایشگاهی نیز که با بهره‌گیری از XBeach مدل‌سازی عددی شده است، آزمایش ماسلینک (۲۰۱۲) بوده است؛ که به سبب شرایط خاص مدل‌سازی (وجود تالاب در پشت ساحل، جریان آب زیرزمینی، تغییرات تراز سطح آبخوان)، اهمیت ویژه‌ی در ارزیابی عملکرد مدل XBeach داشته است. در پژوهش حاضر دو مدل آزمایشگاهی (C5 و C6)، که شرایط خاص مدل‌سازی داشته‌اند، با استفاده از دو ماژول NH و SB در بستر XBeach مدل‌سازی عددی شده‌اند. نتایج نشان داد که در هر دو مدل، ماژول NH عملکرد بهتری نسبت به ماژول SB در شبیه‌سازی تغییرات پروفیل بستر داشته است؛ به گونه‌ی که میزان خطای مدل‌سازی با استفاده از ماژول SB معادل با ۱۸/۴۵٪ برای آزمون C5 و ۱۹/۳۰٪ برای آزمون C6 در بستر XBeach بوده است، در حالی که میزان خطا با بهره‌گیری از ماژول NH معادل با ۱۱/۷۳٪ و ۱۱/۴۵٪ به ترتیب برای آزمون‌های C5 و C6 بوده است. براساس نتایج حاصل مشخص می‌شود که ماژول NH عملکرد بهتری در مدل‌سازی مدل آزمایشگاهی ماسلینک (۲۰۱۲)، نسبت به ماژول SB داشته است، اگرچه میزان خطای مدل‌سازی با هر دو ماژول خطای بزرگ و قابل توجهی (بیشتر از ۱۰٪) بوده است. همچنین در پژوهش حاضر سطح تراز آب زیرزمینی در دو مدل C5 و C6 ارزیابی شده و میزان خطای مدل‌سازی (محاسبه‌ی تراز آب زیرزمینی) در مدل C5 براساس ماژول SB معادل با ۱۲/۳۲٪ و براساس ماژول NH معادل با ۷/۴۶٪ بوده است، همچنین میزان خطای مدل‌سازی تراز آب زیرزمینی در مدل C6 براساس ماژول SB معادل با ۱۰/۲۸٪ و براساس مدل‌سازی با ماژول NH معادل با ۶/۵۴٪ بوده است.

از اصلی‌ترین نتایج حاصل در پژوهش حاضر، تأیید نقص مدل XBeach (خطای فازی در هنگام نفوذ/ تراوش آب به آبخوان) در شبیه‌سازی فعل-انفعالات بین آب دریا و آبخوان بوده است (با توجه به نتایج حاصل از مدل‌سازی آزمایش ماسلینک (۲۰۱۲)).

با ارزیابی نتایج حاصل از پژوهش حاضر مشخص شده است که مدل کد باز XBeach عملکرد قابل‌قبولی در مدل‌سازی فرآیندهای هیدرودینامیک و مورفودینامیک در ناحیه‌ی سواش سواحل داشته است، همچنین شبیه‌سازی با ماژول NH نسبت به ماژول SB، عملکرد بهتری با توجه به تئوری محاسبات در تجزیه و تحلیل امواج بلند و کوتاه داشته است. علاوه بر این مشخص شد که نقص موجود در مدل XBeach (خطای فازی در هنگام نفوذ/ تراوش آب به آبخوان) منجر به گسترش خطای مدل‌سازی عددی در محاسبه‌ی تغییرات پروفیل بستر و تراز سطح آبخوان شده است، این مهم به عنوان یکی از زمینه‌های پژوهشی در راستای توسعه‌ی مدل و رفع خطای فازی برای مطالعات آتی پیشنهاد می‌شود.

جدول ۱۵. ارزیابی خطای مدل‌سازی براساس تراز آب زیرزمینی-آزمون C6.

سطح آب زیرزمینی			
آزمون C6	RMSE	MSE	Mean Err. (%)
XBeach- SB	۰/۱۲۲	۰/۳۴۹	۱۰/۲۸
XBeach- NH	۰/۰۵۳	۰/۲۳۱	۶/۴۵

با توجه به نتایج حاصل از مدل‌سازی آزمون C6 (جدول ۱۵) مشخص می‌شود که میزان خطای مدل‌سازی تراز آب زیرزمینی براساس ماژول SB معادل با ۱۰/۲۸٪ و براساس مدل‌سازی با ماژول NH معادل با ۶/۵۴٪ بوده است. با ارزیابی نتایج حاصل از مدل‌سازی دو آزمون C5 و C6 و بررسی تغییرات تراز آب زیرزمینی مشخص می‌شود که ماژول NH، دقت بالاتری در محاسبه‌ی تراز آب زیرزمینی نسبت به ماژول SB داشته است. شبیه‌سازی فعل-انفعالات نیز بین آب دریا و آبخوان بوده است.

۴. جمع‌بندی

در پژوهش حاضر، به جهت ارزیابی عملکرد مدل XBeach در مدل‌سازی فرآیندهای هیدرودینامیک و مورفودینامیک سواحل، مطالعات جامعی با استفاده از ۳ مدل آزمایشگاهی انجام شده است. در هر مدل عددی پس از کالیبراسیون و حساسیت‌سنجی آن، عملکرد XBeach براساس نتایج حاصل از مدل‌سازی با دو ماژول SB و NH نسبت به نتایج به‌دست‌آمده از آزمون‌های آزمایشگاهی مقایسه و بررسی شده است.

با ارزیابی نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی آزمایش دمیربیلک (۲۰۰۷)، مشخص شد که در شرایط اعمال باد بر ساحل، میزان تغییرات تراز سطح آب در شبیه‌سازی با هر دو ماژول SB، NH، دقت قابل‌قبولی داشته است، به گونه‌ی که میانگین خطای مدل‌سازی با هر دو ماژول حدوداً ۱٪ بوده است. همچنین نتایج حاصل نشان داد که در مدل‌سازی تحت شرایط اعمال موج و اعمال توأم موج و باد، ماژول NH عملکرد بهتری نسبت به ماژول SB داشته است. در شرایط اعمال موج، خطای مدل‌سازی با ماژول SB معادل با ۴/۸۹٪ و با ماژول NH معادل با ۱/۳۵٪ بوده است. در شرایط اعمال توأم موج و باد، میزان میانگین خطای مدل‌سازی نسبت به تغییرات تراز سطح آب با ماژول SB معادل با ۶/۲۱٪ و با ماژول NH معادل با ۲/۴۴٪ بوده است.

نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی آزمایش زانندن (۲۰۱۶) نشان داد که ماژول NH مدل XBeach، عملکرد بهتری نسبت به ماژول SB در مدل‌سازی تغییرات پروفیل بستر فرسایش‌پذیر داشته است، به گونه‌ی که میزان میانگین خطای مدل‌سازی با ماژول SB معادل با ۷/۱۶٪ و با ماژول NH معادل با ۱/۶۹٪ بوده است. همچنین نتایج حاصل از مدل‌سازی آزمایش زانندن با ماژول

Refernces- منابع

- Elsayed Abdelaal, S.M., 2017. Breaching of Coastal Barriers under Extreme Storm Surges and Implications for Groundwater Contamination. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4199.0644>.
- Masselink, G. and Russell, P., 2006. Flow velocities, sediment transport and morphological change in the swash zone of two contrasting beaches. *Marine Geology*, 227(3-4), pp.227-240. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2005.11.005>
- Elsayed, S.M. and Oumeraci, H., 2015. Breaching of coastal barriers under extreme storm surges and implications for groundwater contamination: Improvement and Extension of the XBeach Model to Account for New Physical Processes (No. 1073). *Internal Report*.
- Shin, S. and Cox, D., 2006. Laboratory observations of inner surf and swash-zone hydrodynamics on a steep slope. *Continental Shelf Research*, 26(5), pp.561-573. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2005.10.005>
- Brocchini, M., & Baldock, T. E. (2008). Recent advances in modeling swash zone dynamics: Influence of surf-swash interaction on nearshore hydrodynamics and morphodynamics. *Reviews of Geophysics*, 46(3). <https://doi.org/10.1029/2006RG000215>
- Chardón-Maldonado, P., Pintado-Patiño, J.C. and Puleo, J.A., 2016. Advances in swash-zone research: Small-scale hydrodynamic and sediment transport processes. *Coastal Engineering*, 115, pp.8-25. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2015.10.008>
- Larson, M., Kubota, S. and Erikson, L., 2004. Swash-zone sediment transport and foreshore evolution: field experiments and mathematical modeling. *Marine geology*, 212(1-4), pp.61-79. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2004.08.004>
- Puleo, J.A., Krafft, D., Pintado-Patiño, J.C. and Bruder, B., 2017. Video-derived near bed and sheet flow sediment particle velocities in dam-break-driven swash. *Coastal Engineering*, 126, pp.27-36.
- Puleo, J.A., Cristaudo, D., Torres-Freyermuth, A., Masselink, G. and Shi, F., 2020. The role of alongshore flows on inner surf and swash zone hydrodynamics on a dissipative beach. *Continental Shelf Research*, 201, p.104134.. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2020.104134>
- Puleo, J.A., Lanckriet, T.K. and Blenkinsopp, C., 2014. Bed level fluctuations in the inner surf and swash zone of a dissipative beach. *Marine geology*, 349, pp.99-112. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2014.01.006>
- van der Zanden, J., Alsina, J.M., Cáceres, I., Buijsrogge, R.H. and Ribberink, J.S., 2015. Bed level motions and sheet flow processes in the swash zone: Observations with a new conductivity-based concentration measuring technique (CCM+). *Coastal Engineering*, 105, pp.47-65. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2015.08.009>
- Heiss, J.W., Ullman, W.J. and Michael, H.A., 2014. Swash zone moisture dynamics and unsaturated infiltration in two sandy beach aquifers. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 143, pp.20-31. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2014.03.015>
- Hughes, M.G. and Moseley, A.S., 2007. Hydrokinematic regions within the swash zone. *Continental Shelf Research*, 27(15), pp.2000-2013. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2007.04.005>
- Hughes, M.G. and Moseley, A.S., 2007. Hydrokinematic regions within the swash zone. *Continental Shelf Research*, 27(15), pp.2000-2013. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2007.04.005>
- Hoecker-Martínez, M.S. and Smyth, W.D., 2012. Trapping of gyrotactic organisms in an unstable shear layer. *Continental Shelf Research*, 36, pp.8-18. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2012.01.003>
- Alsina, J.M., Cáceres, I., Brocchini, M. and Baldock, T.E., 2012. An experimental study on sediment transport and bed evolution under different swash zone morphological conditions. *Coastal Engineering*, 68, pp.31-43. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2012.04.008>
- Chen, B.T., Kikkert, G.A., Pokrajac, D. and Dai, H.J., 2016. Experimental study of bore-driven swash-swash interactions on an impermeable rough slope. *Coastal Engineering*, 108, pp.10-24. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2015.10.010>
- Alsina, J.M., Padilla, E.M. and Cáceres, I., 2016. Sediment transport and beach profile evolution induced by bi-chromatic wave groups with different group periods. *Coastal Engineering*, 114, pp.325-340. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2016.04.020>
- Shi, F., Kirby, J.T., Harris, J.C., Geiman, J.D. and Grilli, S.T., 2012. A high-order adaptive time-stepping TVD solver for Boussinesq modeling of breaking waves and coastal inundation. *Ocean Modelling*, 43, pp.36-51. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2011.12.004>
- Zijlema, M., Stelling, G. and Smit, P., 2011. SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters. *Coastal Engineering*, 58(10), pp.992-1012. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.05.015>
- Rafati, Y., Hsu, T.J., Elgar, S., Raubenheimer, B., Quataert, E. and van Dongeren, A., 2021. Modeling the hydrodynamics and morphodynamics of sandbar migration events. *Coastal Engineering*, 166, p.103885.

- <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2021.103885>
22. Lesser, G.R., Roelvink, J.V., van Kester, J.T.M. and Stelling, G.S., 2004. Development and validation of a three-dimensional morphological model. *Coastal engineering*, 51(8-9), pp.883-915.
<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2004.07.014>
 23. Warner, J.C., Armstrong, B., He, R. and Zambon, J.B., 2010. Development of a coupled ocean-atmosphere-wave-sediment transport (COAWST) modeling system. *Ocean modelling*, 35(3), pp.230-244.
<https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2010.07.010>
 24. Roelvink, D., Reniers, A., Van Dongeren, A.P., De Vries, J.V.T., McCall, R. and Lescinski, J., 2009. Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal engineering*, 56(11-12), pp.1133-1152.
<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.08.006>
 25. Roelvink, D., McCall, R., Mehvar, S., Nederhoff, K. and Dastgheib, A., 2018. Improving predictions of swash dynamics in XBeach: The role of groupiness and incident-band runup. *Coastal Engineering*, 134, pp.103-123.
<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.07.004>
 26. Ruessink, B.G., Kleinbans, M.G. and Van den Beukel, P.G.L., 1998. Observations of swash under highly dissipative conditions. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 103(C2), pp.3111-3118.
<https://doi.org/10.1029/97JC02791>
 27. Stockdon, H.F., Thompson, D.M., Plant, N.G. and Long, J.W., 2014. Evaluation of wave runup predictions from numerical and parametric models. *Coastal Engineering*, 92, pp.1-11.
<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2014.06.004>
 28. Palmsten, M.L. and Splinter, K.D., 2016. Observations and simulations of wave runup during a laboratory dune erosion experiment. *Coastal Engineering*, 115, pp.58-66.
<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2016.01.007>
 29. Cohn, N. and Ruggiero, P., 2016. The influence of seasonal to interannual nearshore profile variability on extreme water levels: Modeling wave runup on dissipative beaches. *Coastal Engineering*, 115, pp.79-92.
<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2016.01.006>
 30. Lerma, A.N., Pedreros, R., Robinet, A. and Sénéchal, N., 2017. Simulating wave setup and runup during storm conditions on a complex barred beach. *Coastal Engineering*, 123, pp.29-41.
<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.01.011>
 31. McCall, R.T., Masselink, G., Poate, T.G., Roelvink, J.A., Almeida, L.P., Davidson, M. and Russell, P.E., 2014. Modelling storm hydrodynamics on gravel beaches with XBeach-G. *Coastal Engineering*, 91, pp.231-250.
<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2014.06.007>
 32. Poate, T.G., McCall, R.T. and Masselink, G., 2016. A new parameterisation for runup on gravel beaches. *Coastal Engineering*, 117, pp.176-190.
<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2016.08.003>
 33. Roelvink, D., McCall, R., Mehvar, S., Nederhoff, K. and Dastgheib, A., 2018. Improving predictions of swash dynamics in XBeach: The role of groupiness and incident-band runup. *Coastal Engineering*, 134, pp.103-123.
<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.07.004>
 34. Pearson, S.G., Storlazzi, C.D., Van Dongeren, A.R., Tissier, M.F.S. and Reniers, A.J.H.M., 2017. A Bayesian-based system to assess wave-driven flooding hazards on coral reef-lined coasts. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122(12), pp.10099-10117.
<https://doi.org/10.1002/2017JC013204>
 35. Lashley, C.H., Roelvink, D., van Dongeren, A., Buckley, M.L. and Lowe, R.J., 2018. Nonhydrostatic and surfbeat model predictions of extreme wave runup in fringing reef environments. *Coastal Engineering*, 137, pp.11-27.
<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2018.03.007>
 36. Klaver, S., Nederhoff, C.M., Giardino, A., Tissier, M.F.S., Van Dongeren, A.R. and Van Der Spek, A.J.F., 2019. Impact of coral reef mining pits on nearshore hydrodynamics and wave runup during extreme wave events. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(4), pp.2824-2841.
<https://doi.org/10.1029/2018JC014165>
 37. Ruffini, G., Briganti, R., Alsina, J.M., Brocchini, M., Dodd, N. and McCall, R., 2020. Numerical modeling of flow and bed evolution of bichromatic wave groups on an intermediate beach using nonhydrostatic XBeach. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 146(1), p.04019034.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WW.1943-5460.0000530](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000530)
 38. De Beer, A.F., McCall, R.T., Long, J.W., Tissier, M.F.S. and Reniers, A.J.H.M., 2021. Simulating wave runup on an intermediate-reflective beach using a wave-resolving and a wave-averaged version of XBeach. *Coastal Engineering*, 163, p.103788.
<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2020.103788>
 39. Ions, K., Karunarathna, H., Reeve, D.E. and Pender, D., 2021. Gravel barrier beach morphodynamic response to extreme conditions. *Journal of Marine*

- Science and Engineering*, 9(2), p.135.
<https://doi.org/10.3390/jmse9020135>
40. Chen, W., Van Der Werf, J.J. and Hulscher, S.J.M.H., 2023. A review of practical models of sand transport in the swash zone. *Earth-Science Reviews*, 238, p.104355.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104355>
41. Larson, M. and Kraus, N.C., 1989. SBEACH: numerical model for simulating storm-induced beach change. Report 1, Emperical foundation and model development.
42. Lesser, G.R., Roelvink, J.V., van Kester, J.T.M. and Stelling, G.S., 2004. Development and validation of a three-dimensional morphological model. *Coastal engineering*, 51(8-9), pp.883-915.
<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2004.07.014>
43. Ruessink, B.G., Kuriyama, Y., Reniers, A.J.H.M., Roelvink, J.A. and Walstra, D.J.R., 2007. Modeling cross-shore sandbar behavior on the timescale of weeks. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 112(F3).
<https://doi.org/10.1029/2006JF000730>
44. Kobayashi, N., 2009. Documentation of cross-shore numerical model CSHORE 2009. Res. Rep. No. CACR-09, 6.
45. Berard, N.A., Mulligan, R.P., da Silva, A.M.F. and Dibajnia, M., 2017. Evaluation of XBeach performance for the erosion of a laboratory sand dune. *Coastal Engineering*, 125, pp.70-80.
<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.04.002>
46. Demirbilek, Z., Nwogu, O.G. and Ward, D.L., 2007. Laboratory study of wind effect on runup over fringing reefs, Report 1: data report.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1983\)109:4\(380\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1983)109:4(380))
47. van der Zanden, J., 2016. Sand transport processes in the surf and swash zones.
<https://doi.org/10.3990/1.9789036542456>
48. Masselink, G. and Turner, I.L., 2012. Large-scale laboratory investigation into the effect of varying back-barrier lagoon water levels on gravel beach morphology and swash zone sediment transport. *Coastal Engineering*, 63, pp.23-38.
<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.12.007>
49. Roelvink, D., Reniers, A.J.H.M., Van Dongeren, A.P., Van Thiel de Vries, J., Lescinski, J. and McCall, R., 2010. XBeach model description and manual. *Unesco-IHE Institute for Water Education, Deltares and Delft University of Tecnology. Report June, 21*, p.2010.
50. McCall, R.T., Masselink, G., Poate, T.G., Roelvink, J.A., Almeida, L.P., Davidson, M. and Russell, P.E., 2014. Modelling storm hydrodynamics on gravel beaches with XBeach-G. *Coastal Engineering*, 91, pp.231-250.
<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2014.06.007>
51. Pinault, J., Morichon, D., Delpy, M. and Roeber, V., 2022. Field observations and numerical modeling of swash motions at an engineered embayed beach under moderate to energetic conditions. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 279, p.108143.
<https://doi.org/10.1016/j.ecss.2022.108143>
52. Clément, J.B., Sous, D., Bouchette, F., Golay, F. and Ersoy, M., 2023. A Richards' equation-based model for wave-resolving simulation of variably-saturated beach groundwater flow dynamics. *Journal of Hydrology*, 619, p.129344.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129344>