

مدلسازی عددی فرآیندهای مورفولوژیکی ناحیه سواش در سواحل درشت‌دانه با مدل کد باز XBeach

سپهر ملکی تقی‌آباد، مهدی عجمی^۱، احمد احمدی^۲

- ۱- دانشجوی دکتری سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود
- ۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، گروه سواحل، بنادر و سازه‌های دریایی، دانشگاه صنعتی شاهرود
- ۳- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه صنعتی شاهرود

۱- sepehr.maleki@shahroodut.ac.ir

۲- adjami@shahroodut.ac.ir

۳- m.ahmadi@shahroodut.ac.ir

چکیده

در سواحل، ناحیه سواش، به دلیل اندرکنش جریانهای ساحلی، آب زیرزمینی و رسوبات از اهمیت زیادی برخوردار است. براین اساس مدلسازی عددی فرایندهای هیدرودینامیک-مورفودینامیک حائز اهمیت است. ارزیابی عملکرد مدل XBeach و دو ماژول SB و NH آن در شبیه‌سازی فرآیندهای سواش، مقایسه نتایج و حساسیت سنجی نتایج به عنوان خلا مطالعاتی، در این مطالعه مطرح بوده است. این پژوهش با بازسازی عددی سه مطالعه آزمایشگاهی متفاوت به ارزیابی عملکرد مدل XBeach در شبیه‌سازی سواحل درشت‌دانه پرداخته‌است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که مدل XBeach عملکرد قابل‌قبولی در مدلسازی فرایندهای هیدرودینامیک و مورفودینامیک در ناحیه سواش سواحل داشته و شبیه‌سازی با ماژول NH نسبت به ماژول SB دارای عملکرد بهتری است (با 5% خطای کمتر). خطای فازی در هنگام نفوذ/تراوش آب به آبخوان در XBeach منجر به گسترش خطای مدلسازی عددی در محاسبه تغییرات پروفیل بستر و تراز سطح آبخوان شده است.

واژه‌های کلیدی:

مورفودینامیک ساحل، مدلسازی عددی، ناحیه سواش، مدل XBeach، سواحل درشت‌دانه

^۱مهدی عجمی، استادیار دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شاهرود.

ایمیل: adjami@shahroodut.ac.ir (نویسنده مسئول مقاله)

Numerical Modeling of Swash Zone Morphological Processes in Coarse-Grained Beaches with XBeach Open-Source Model

Sepehr Maleki Taghiabad^۱, Mehdi Adjami^{۲*}, Ahmad Ahmadi^۳

۱. Ph.D. candidate of Hydraulic Structures Engineering, Shahrood University of Technology, Iran. sepehr.maleki@shahroodut.ac.ir
۲. Assistant Professor in Coasts, Ports and Marine Structures Engineering, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Iran. adjami@shahroodut.ac.ir
۳. Associated Professor in Hydraulic Structures Engineering, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Iran. a.ahmadi@shahroodut.ac.ir

The swash zone and its processes are very important in a beach system due to their significant effects on beach hydrodynamics, morphodynamics and ecosystems, including beach flows, aquifers, and sediment transport. It is important to develop efficient numerical models to evaluate hydrodynamic-morphodynamic processes, particularly in the swash zone. XBeach is a numerical model for beach simulations. In this regard, evaluating the performance of the XBeach model based on the SB and NH modules, comparing the results of morphological process simulations, and sensitivity analysis of the results under different coastal conditions have been considered as research gaps in this field. Based on this, this research is dedicated to modeling three different laboratory models with varying hydrodynamic-morphodynamic conditions to evaluate the performance of the XBeach model in simulating morphological processes of coarse-grained beaches. In the numerical modeling process, after calibrating and sensitivity testing the models, the results are extracted and compared with laboratory models. The results of this research indicate that the XBeach model has an acceptable performance in modeling hydrodynamic and morphodynamic processes in the Swash region, and simulation with the NH module performs better compared to the SB module (with a reduction in modeling error of over %5 in various models). Additionally, the results show that phase errors during water infiltration/percolation into the aquifer in XBeach lead to the expansion of numerical modeling errors in calculating changes in the seabed profile and aquifer water level.

Keywords: *Swash zone, Numerical modelling, Beach hydrodynamics, XBeach model, Gravel Beaches*

Mehdi Adjami, Assistant Professor in Coasts, Ports and Marine Structures Engineering, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Iran. adjami@shahroodut.ac.ir (corresponding author)

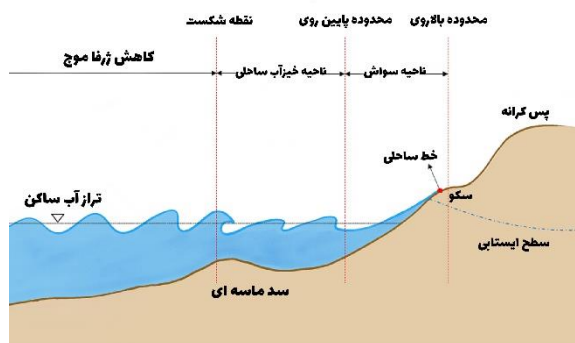
۱- مقدمه

سواحل هر کشور از جنبه‌های اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی و نظامی از اهمیت بالایی برخوردار هستند و بخش قابل توجهی از تاسیسات زیربنایی اغلب کشورها در مناطق ساحلی واقع است. در بین نواحی مختلف ساحلی، خط ساحلی و نواحی نزدیک به ساحل جایگاه ویژه‌ای دارند. پدیده‌هایی همچون فرسایش و انباشت رسوبات در سواحل طبیعی و خورها، افزایش تراز آب دریا و زیر آب رفتن اراضی و تاسیسات ساحلی و آلودگی‌های زیست‌محیطی نوار ساحلی از مسائل چالش برانگیز در این حوزه بوده است.

به محدوده‌ای از ساحل که در آن امواج ورودی تحت تاثیر اثرات بستر ساحلی قرار می‌گیرند اصطلاحاً ناحیه نزدیک ساحلی^۱ گفته می‌شود. بخشی از ناحیه نزدیک ساحل که در آن موج می‌شکند و معمولاً عمقی بین 5 تا 10 متر دارد، ناحیه زوال موج گفته می‌شود. امواج در ناحیه بیرونی زوال موج^۲ دچار شکست و تغییر شکل سریع می‌شوند و با تغییر شکل آن‌ها به شکل موجک و چرخش سطحی به تدریج در طول ناحیه داخلی شکست از بین می‌روند. ناحیه بالاروی امواج یا سواش^۳، بخش انتهایی این منطقه است که به واسطه عملکرد یورش آب^۴ و بازگشت آن^۵ به طور متناوب در معرض بالاروی و پایین‌روی امواج قرار می‌گیرد و مرطوب- خشک می‌شود.

به تعبیر دیگر ناحیه سواش بخشی از ساحل بین حداقل پایین‌روی و حداکثر بالاروی موج است که انرژی باقیمانده امواج در حال حرکت به سمت ساحل، در آن منعکس یا مستهلک می‌شود. برخی از محققین ناحیه سواش را به‌عنوان محدوده انتهایی ناحیه داخلی زوال موج تعریف می‌کنند که در مجموعه‌ای از جریان‌ها با مقیاس‌های متفاوت شامل امواج کوتاه و بلند، جریان‌های افقی گردابه‌ها و آشفتگی ظاهر می‌شوند [۱،۲]. از این رو هیدرودینامیک ناحیه سواش با

خصوصیات موج ورودی در مرز ناحیه شکست تعیین می‌گردد. شکل ۱ موقعیت‌های نسبی نواحی زوال موج و ناحیه سواش را نشان می‌دهد.



شکل ۱ - موقعیت نسبی نواحی زوال موج و ناحیه سواش در سواحل [۱]

در منطقه swash بستر رسوب به طور متناوب در معرض بالاروی/پایین‌روی امواج در مقیاس‌های زمانی گروه موج قرار می‌گیرد. این ناحیه باریک که دارای تغییرات دینامیکی برجسته‌ای می‌باشد در معرض جریان‌های ناپایدار، تلاطم زیاد، رشد و تغییرات سریع لایه مرزی، نرخ انتقال رسوب زیاد و تغییرات سریع مورفولوژی بستر قرار دارد [۴-۱]. بر این اساس ناحیه سواش نقش مهمی در تبادل رسوب بین دریا و خشکی دارد که به طور قابل توجهی بر تغییرات مورفولوژی ساحل تأثیر می‌گذارد [۵،۶]. علاوه بر فرآیندهای هیدرودینامیکی در این ناحیه، حمل و انتقال شن و ماسه در ساحل که در منطقه سواش رخ می‌دهد می‌تواند بخش بزرگی از کل رانش ساحلی (تغییرات خط ساحلی) را به خود اختصاص دهد [۸]. از این رو، پیش‌بینی انتقال و جابه‌جایی شن و ماسه در ناحیه سواش برای ارزیابی و تخمین تغییرات مورفودینامیک ساحلی ضروری است. درک فرآیندهای هیدرودینامیکی و مورفودینامیکی در منطقه سواش از اهمیت اساسی برخوردار است زیرا این ناحیه میزبان فرآیندهایی است که مورفولوژی ساحل را در طیف گسترده‌ای از شرایط شکل می‌دهد [۹].

۱ Near-shore zone

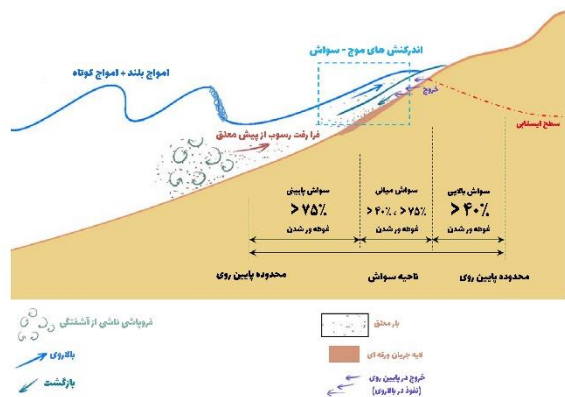
۲ Outer surf zone

۳ Swash or Run-up zone.

۴ Uprush or Run-up

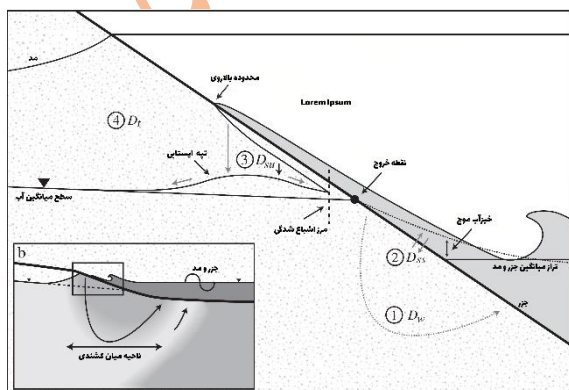
۵ Backwash or Rundown

پایین روی موج نمایش داده شده است. همانطور که در این شکل و توضیحات ذیل آن مشاهده می‌شود، در ناحیه سواش پدیده‌های متعددی شامل نفوذ/خروج آب، پرش هیدرولیکی، آشفتگی توده/ جبهه موجک‌ها، آشفتگی ناشی از لایه مرزی بستر، اندرکنش فاز بالاروی و بازگشت، انتقال رسوب عرضی و طولی، غلظت بالای رسوبات در لایه سواش و جریان ورقه‌ای اتفاق می‌افتد و این فرآیندها باعث پیچیدگی هیدروپنایمیکی این ناحیه می‌شود. فشار القایی ناشی از تناوب و شکست موج و فشار آب منفذی سفره ساحلی، بر ضخامت لایه مرزی و توزیع آشفتگی سواش اثر می‌گذارد و باعث تغییرات قابل ملاحظه تنش برشی در طول این ناحیه می‌گردد. سرعت بالای جریان در نزدیکی بستر و عمق کم ناحیه سواش منجر به انتقال رسوب با غلظت بالا به صورت جریان ورقه‌ای می‌شود.



شکل ۲ - شماتیک ناحیه سواش [۱۰]

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



الف) چهار فرآیند مرتبط با موج و جزر و مد که بر تبادل آب بین آبخوان ساحلی و آبهای ساحلی تأثیر دارند عبارتند از: (۱) ورود و گردش جریان در میدان اشباع زیر سطحی ساحل

تغییر در تراز آب دریا به علت نوسانات ناشی از جزر و مد، امواج دریا، تغییر در تراز آب زیرزمینی به دلیل برداشت بی‌رویه از سفره ساحلی یا نزولات جوی، می‌تواند منجر به تغییر مورفولوژی ساحلی از جمله محدوده سواش شود. در جدول ۱ اصلیت‌ترین دلایل اهمیت انجام مطالعات بر فرآیندهای مورفولوژیکی در ناحیه سواش طبقه‌بندی شده است.

جدول ۱- ضرورت انجام مطالعات در ناحیه سواش ساحل

1	برای بسیاری از کاربردها و طراحی‌های مهندسی سواحل، مطالعه امواج در حال شکست، بالاروی و پایین‌روی موج اهمیت قابل توجهی دارد
2	ناحیه سواش تقریباً در تمام فرآیندهای ساحل از جمله جریان‌های ساحلی و انتقال رسوب، نقش مهمی را ایفا می‌کند. اندرکنش سیال و ذرات رسوب در این ناحیه، وضعیت فرسایش یا رسوب گذاری ساحل و شرایط مرزی سمت ساحل را تعیین می‌کند
3	فرآیندهای ناحیه سواش عامل تولید حباب‌های هوا و قطره‌های آب دریا هستند و نقش مهمی در انتقال آلودگی دارند.
4	آشفتگی مربوط به موجک‌ها و اندرکنش‌های سواش-سواش، نرخ اختلاط را افزایش داده و اثر مهمی بر انتقال رسوب دارد.
5	فرآیندهای انتقال رسوب و جریان هر دو به طرز قابل توجهی تحت تأثیر آب زیرزمینی قرار می‌گیرند.
6	معمولاً غلظت رسوب ناحیه سواش بیشتر از ناحیه شکست موج است.
7	ناحیه سواش یک ناحیه کلیدی برای اکوسیستم ساحلی است.
8	فرآیندهای ناحیه بالاروی تأثیر مستقیم بر جنبه‌های مختلف زندگی روزمره ساکنین و گردشگران مناطق ساحلی دارد.

مرور تحقیقات انجام شده بر روی سواحل نشان می‌دهد که مشخصات هیدرولیکی موج عمود بر ساحل شامل ارتفاع و پرپود موج، و شیب وجه ساحلی بر مشخصات امواج ورودی به ناحیه سواش اثر می‌گذارد [۹-۷]. قطر متوسط رسوبات ساحل در مقدار نفوذپذیری ساحل و وزن ذرات تأثیرگذار است و از طرفی اختلاف تراز آب زیرزمینی با آب دریا و هدایت هیدرولیکی بستر ساحلی، بر میزان حجم آب عبوری از ساحل، فشار آب منفذی (وزن موثر رسوب) و تنش برشی لایه مرزی (نیرو دراگ) اثر می‌گذارد، بنابراین پارامترهای ارتفاع و پرپود موج، شیب ساحل، قطر متوسط رسوبات، تراز آب زیرزمینی و تراز آب دریا از جمله پارامترهای با اهمیت و موثر در هیدروپنایمیک و مورفولوژی ناحیه سواش هستند [۷-۲]. در شکل ۲ شماتیک از ناحیه سواش به همراه بالاروی و

مدل عددی XBeach یک مدل پرکاربرد است که بین مدل‌های میانگین‌گیری فاز و مدل‌های تفکیک فاز قرار دارد و تغییرات دامنه متغیرها را در مقیاس زمانی گروه موج حل می‌کند [۲۲]. این مدل دارای دو ماژول مدلسازی مستقل: surf-beat (SB) و non-hydrostatic (NH) بوده است. در ماژول surf-beat، حرکات موج فروگرانشی^۴ به طور کامل با استفاده از معادلات غیرخطی آب کم عمق حل می‌شوند، اما حرکات موج باند فرودی^۵ با استفاده از یک موازنه عمل موج کوتاه که تغییرات در مقیاس زمانی گروه موج را توصیف می‌کند، پارامتربندی می‌شوند [۲۳]. این پارامتربندی در سواحل استهلاکی^۶ معتبر در نظر گرفته می‌شود، جایی که حرکات باند فروگرانشی بر swash غالب است و swash باند تصادفی به دلیل شکستن موج اشباع می‌شود [۲۴]. در مطالعات (Stockdon et al, ۲۰۱۴) که با بهره‌گیری از مدل XBeach و ماژول surf-beat بر سواحل انعکاسی میانی^۷ انجام شد، مشخص گردید که مقادیر پارامترهای هیدرودینامیکی امواج همچون بالاروی موج، به طور قابل توجهی کمتر از شرایط واقعی محاسبه شده است [۲۵]. همچنین در مطالعات مشابهی (Palmsten and Splinter ۲۰۱۶) مشخص گردید که میزان فرسایش تپه‌های شنی در سواحل بر اساس مدل XB-SB نسبت به تست آزمایشگاهی بسیار ناچیز پیش‌بینی شده است [۲۶]. علاوه بر این مطالعات (Cohn and Ruggiero, 2016) نشان داد که در سواحل استهلاکی^۸ میزان تغییرات مورفولوژی بستر ساحل بر اساس مدل XB-SB به درستی پیش‌بینی نشده است [۲۷].

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

در مطالعات (Nicolae Lermaetal, 2017) مشخص گردید که پارامترهای هیدرودینامیکی همچون میزان بالاروی موج در

(2) (D_w) ، تبادل آب بین جریان بالاروی و آبخوان در زیرلایه اشباع ساحلی (D_{sw}) ، نفوذ جریان ناشی از بالاروی در منطقه غیراشباع زیرساحلی (D_{su}) ، و (4) شارش جریان ناشی از جزر و مد (D_t) ، فرآیندهای (3) و (4) کاملاً وابسته به یکدیگر می‌باشد. پیکان‌های خاکستری مسیرهای جریان و مسیرهای تبادل آب را نشان می‌دهند. (ب) مسیرهای جریان آب زیرزمینی و توزیع شوری (طیف سفید: آب شیرین، طیف خاکستری: شور) در یک آبخوان ساحلی شکل ۳ - اندرکنش ناحیه آب زیرزمینی ساحلی و جریان سواش [۱۱]

برهم کنش بین امواج در ناحیه سواش که به آن برهمکنش سواش-سواش گفته می‌شود [۱۲،۱۳] نقش مهمی در تعیین تکامل بستر در نواحی سواش و زوال موج دارد [۱۰-۱۳]. این فرآیندها عمدتاً در مطالعات آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند (به عنوان نمونه: [۱۳-۱۶]). با این حال، مطالعات عددی نسبتاً محدودی پیرامون هیدرودینامیک و مورفودینامیک ناحیه سواش در حضور برهمکنش swash-swash انجام شده است. علت وجود این امر را میتوان در عدم وجود مدل‌های عددی کارآمد در شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرودینامیکی و تغییرات مورفولوژیک سواحل بررسی نمود.

مدل‌های عددی مبتنی بر فیزیک^۱ یک ابزار مفید برای پیش‌بینی فرآیندهای هیدرودینامیکی-مورفودینامیکی در نواحی ساحلی هستند. عمدتاً مدل‌هایی که فرآیندهای هیدرودینامیکی را در مقیاس زمانی امواج منفرد شبیه‌سازی می‌کنند (مدلهای حل فازی^۲ [۱۷،۱۸]) دارای عملکرد مناسبی در مدلسازی آب‌های کم عمق می‌باشند، اما از نظر محاسباتی گران بوده و در حال حاضر محدود به شبیه‌سازی تنها هیدرودینامیک بدون شبیه‌سازی دقیق مورفودینامیک ساحل می‌باشند [۱۹]. در مقابل، مدل‌هایی که با میانگین‌گیری در طول دوره‌های موجی متعدد شبیه‌سازی می‌کنند (مدل‌های میانگین فازی^۳ [۲۰،۲۱]) از نظر محاسباتی به‌طور قابل توجهی نسبت به مدل‌های حل فازی ارزان‌تر هستند [۱۹]. با ارزیابی عملکرد این دو دسته از مدل‌های عددی مشخص می‌گردد که مدل‌های میانگین فازی در شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرودینامیکی-مورفودینامیکی سواحل همچون: انواع شکست امواج: خصوصیات هیدرودینامیکی موج، مکانیک انتقال رسوبات: تغییرات مورفولوژی بستر، کارآمدتر از مدل‌های حل فازی بوده، اگرچه دقت مدل‌های حل فازی به مراتب بیشتر از مدل‌های میانگین فازی بوده است [۱۷-۲۱].

^۰ incident-band wave

^۱ dissipative beaches

^۲ intermediate-reflective beach

^۳ high-energy dissipative

^۱ Physics-based

^۲ phase-resolving models

^۳ phase-averaged models

^۴ infragravity wave

قرار گرفته است [۳۶]. (Rafati et al., 2021) با استفاده از مدل XBeach به ارزیابی فرایندهای هیدرودینامیک و مورفودینامیک ناحیه سواش در سواحل و در مواجهه با رخداد تپه‌های ماسه‌ای^۱ پرداخت [۱۹]. (Lons et al., 2021) به ارزیابی رفتار سواحل شنی تحت شرایط حالت حدی با استفاده از مدل XBeach پرداخت، نتایج نشان داد مدل XBeach با دقت قابل‌قبولی تغییرات مورفولوژیک ساحل شنی و عارضه‌های ساحلی را شبیه‌سازی نموده است [۳۷].

(Chen et al., 2023) در مطالعاتی جامع به ارزیابی مدل‌های عددی در مدلسازی فرایندهای مورفودینامیکی و شبیه‌سازی پدیده انتقال رسوب در ناحیه سواش پرداخت [۳۸]. در این مطالعات مدل XBeach به عنوان یکی از مدل‌های کارآمد در مدلسازی فرایندهای هیدرودینامیکی مورد ارزیابی قرار گرفت و عملکرد مدل نسبت به مدل‌های عددی [۳۹-۴۲]: SBEACH (Larson and Kraus, 1989) و Delft3D (Lesser et al., 2004) و TC UNIBEST- (Ruessink et al., 2007) و CSHORE (Kobayashi, 2009) بررسی گردید. نتایج ارائه شده بر اساس این پژوهش بیانگر قابلیت بالای مدل XBeach در بهره‌گیری از مدل‌های تجربی-تحلیلی شبیه‌سازی فرایندهای مورفودینامیکی در منطقه سواش بوده است [۳۸].

با توجه به ارزیابی صورت گرفته بر عملکرد مدل XBeach براساس مطالعات پیشین مشخص می‌گردد که این مدل توانایی بالایی در مدلسازی فرایندهای هیدرودینامیک-مورفودینامیک در ناحیه سواش در سواحل را دارا بوده است. علاوه بر این مشخص می‌گردد که ارزیابی عملکرد مدل XBeach براساس دو ماژول SB و NH، مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی فرایندهای مورفولوژیک و همچنین حساسیت سنجی نتایج براساس شرایط مختلف حاکم بر سواحل درشت دانه به عنوان خلا مطالعاتی در این حیطة مطرح بوده است. براین اساس این پژوهش با مدلسازی سه مدل آزمایشگاهی مختلف که دارای شرایط متفاوت حاکم بر مورفودینامیک ساحل بوده، به ارزیابی عملکرد مدل XBeach براساس دو ماژول SB, NH در شبیه‌سازی فرایندهای مورفولوژیکی سواحل درشت دانه معطوف بوده است. در این مقاله در بخش ۱-۲ و ۲-۲ توضیحاتی جامع پیرامون مدل XBeach و فرایند مدلسازی

یک ساحل استهلاکی^۱ به خوبی توسط یک مدل غیر هیدرواستاتیک با حل موج باند تصادفی قابل شبیه‌سازی بوده است [۲۸]. این رویکرد در مدل عددی SWASH (Zijlema et al., 2011) به کارگیری شده است [۱۸]. این نتایج نشان داد که بهبود در شبیه‌سازی و محاسبات هیدرودینامیکی-مورفودینامیکی در مدل XBeach با حل صریح^۲ حرکات swash باند تصادفی امواج حاصل می‌شود که منجر به پیش‌بینی پارامترهای هیدرودینامیک بلاخص در ناحیه سواش از طریق توصیف بهتر طیف موج و شبیه‌سازی صریح برهمکنش‌های swash swash می‌گردد. براین اساس ماژول (NH) non-hydrostatic در مدل XBeach جهت مدلسازی دقیق هیدرودینامیک و مورفودینامیک سواحل که حرکت موج باند فرودی را در اعماق آب میانی و کم عمق حل می‌کند (روشی مشابه مدل SWASH)، توسعه یافته است.

تا به امروز مطالعات نسبتاً جامعی با بهره‌گیری از مدل XBeach (ماژول non-hydrostatic) برای شبیه‌سازی فرایندهای هیدرودینامیک و مورفودینامیک در ناحیه سواش انجام شده است. مدلسازی موج (بالاروی موج) در سواحل شنی انعکاسی^۳ توسط (McCall et al., 2014) [۲۹] و (Poate et al., 2016) [۳۰]، مدلسازی اندرکنش امواج با سازه‌های ساحلی و ارزیابی هیدرودینامیک ناحیه سواش توسط (Roelvink et al., 2018) [۳۱]، مدلسازی سواحل صخره‌ای مرجانی^۴ توسط (Pearson et al., 2017) [۳۲] و (Lashley et al., 2018) [۳۳] و (Klaver et al., 2019) [۳۴] مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفته‌اند.

(Ruffini et al., 2020) مطالعاتی پیرامون مدلسازی جریان‌های ساحلی و تغییرات مورفولوژی بستر بر اساس گروه امواج در سواحل میانی^۵ با بهره‌گیری از ماژول NH مدل XBeach انجام داد، نتایج بیانگر عملکرد قابل‌قبول ماژول NH در مدلسازی فرایندهای هیدرودینامیکی و مورفودینامیکی در سواحل بوده است [۳۵]. (Beer et al., 2021) در پژوهشی به ارزیابی و مدلسازی بالاروی موج با بهره‌گیری از دو ماژول surf-beat و non-hydrostatic در مدل XBeach پرداخت، در این مطالعات عملکرد مدل XBeach بر اساس دو رویکرد حل فازی موج^۶ و میانگین‌گیری موج^۷ در فرایند مدلسازی هیدرودینامیکی امواج در ناحیه سواش مورد ارزیابی و بررسی

^۱ Intermediate Beach

^۲ wave-resolving

^۳ wave-averaged

^۴ sandbar

^۱ dissipative beach

^۲ explicit

^۳ reflective gravel beaches

^۴ coral reef-lined coasts

سواحل با تمرکز بر فرایند شبیه‌سازی هیدرودینامیک و مورفودینامیک ساحل ارائه شده است، در بخش ۲-۳ مدل های آزمایشگاهی به همراه کلیه جزییات و شرایط مدل‌سازی ارائه شده، در بخش ۳ نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی که شامل کالیبراسیون مدل و عملکرد مدل XBeach در شبیه سازی مدل‌های آزمایشگاهی بوده ارائه و مورد بحث و بررسی قرار گرفته است، در بخش چهارم جمع‌بندی و نتایج اصلی حاصل از پژوهش ارائه شده است.

۲- مواد و روش انجام تحقیق

۲-۱ مدل XBeach

XBeach یک مدل عددی 2 بعدی 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 شبیه سازی فرآیندهای هیدرودینامیکی - مورفودینامیکی و اثرات آن در سواحل ماسه ای با دامنه ای در حد چند کیلومتر و در مقیاس زمانی طوفان‌ها طراحی شده بود. از آن زمان، مدل برای سایر انواع سواحل و اهداف دیگر، مورد استفاده قرار گرفته است. این مدل قادر به شبیه‌سازی هیدرودینامیک ناحیه نزدیک ساحل و همچنین اندرکنش جریان‌های مختلف با بستر و رسوبات می‌باشد. توالی بخش‌های مختلف این مدل در شکل ۴ نشان داده شده است که تا پایان زمان شبیه‌سازی تکرار می‌شود.



شکل ۴ - چرخه کلی فرآیند مدل‌سازی XBeach

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 مینماید. بعد از دریافت ورودی‌ها و شرایط مرزی، XBeach تعادل اثر موج^۲ را در اولین گام زمانی حل می‌کند و با تعادل اثر موج، انتشار امواج کوتاه را حل می‌کند. روابطی که حرکات و جریان‌های امواج بلند را حل می‌کنند، معادلات اندازه‌حرکت غیرخطی آب کم-عمق (NLSWE) هستند. تعادل اثر موج کوتاه، ورودی‌های مورد نیاز برای NLSWE را در قالب نیروهای ناشی از موج به دو صورت ارائه می‌دهد: 1. با استفاده از تنش‌های تشعشعی حاصل از تعادل اثر موج، 2. با استفاده از تنش‌های تشعشعی حاصل از تعادل انرژی غلشی. بنابراین روابط NLSWE حل شده و در نتیجه آن، سرعت‌های جریان (u^L, v^L) و تغییرات تراز آب (h) برای رابطه انتقال رسوب که یک رابطه انتقال انتشار^۴ است، فراهم می‌شوند. سرعت‌های لاگرانژی جریان (u^L, v^L) و تغییرات تراز آب (h) پارامترهای ورودی روابط انتقال رسوب معلق می‌باشند. انتقال رسوبی که به کمک این روابط 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 رابطه تعادل جرمی به-روزرسانی می‌شود. در نهایت مدل چک می‌کند که آیا بستر به شیب تر و خشک بحرانی رسیده است یا خیر، در صورت تجاوز از این مقادیر، اصلاحی را روی شیب بستر انجام می‌دهد تا به شرایط مورد نیاز برسد. در مدل XBeach انتشار و زوال امواج کوتاه به وسیله تعادل اثر موج کوتاه حل می‌شود. این تابع بر اساس تعادل انرژی که در مکان (x, y) و زمان (t) تغییر می-کند نوشته شده است و تابعی از فرکانس (ω) و زاویه انتشار موج ورودی (θ) می‌باشد (رابطه 1).

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

در رابطه ۱ اثر موج A بصورت زیر محاسبه می‌شود:

^۱ Non-Linear Shallow Water Momentum

^۴ Advection-diffusion

^۱ surge

^۲ Wave action balance

در روابط (5 تا 8) پارامتر D_w اتلاف حرکت موج تشکیل یافته به دلیل شکست و D_r اتلاف ناشی از غلتش، انرژی جنبشی E_r غلتش در هر قفسه ی جهت ی و C سرعت فاز موج می باشد.

۲-۱-۲ تنش های تشعشعی

تنش های تشعشعی ارتباط بین تعادل اثر موج کوتاه و روابط آب کم عمق را تشکیل می دهند. در مدل XBeach تنش های تشعشعی ابتدا از تعادل اثر موج و توسط تبدیل اثر موج (A) به چگالی انرژی در هر سلول با ضرب آن در فرکانس ذاتی بدست می آید.

$$S_w(x,y,t,\theta) = A(x,y,t,\theta) * \sigma(x,y,t) \quad (9)$$

در رابطه 9 پارامتر σ براساس رابطه 10 محاسبه میشود:

$$\sigma = \sqrt{gh \tanh(kh)} \quad (10)$$

تنش های تشعشعی که بطور مستقیم از انرژی تعادل اثر موج به دست می آیند به صورت زیر تعریف می شوند:

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

$$S_{xx,w}(x,y,t) = \int \left(\frac{C_g}{C} (1 + \cos^2 \theta) - \frac{1}{2} \right) S_w d\theta \quad (11)$$

انرژی غلتشی نیز یکی دیگر از عوامل تشکیل تنش های تشعشعی است. انرژی غلتشی E_r ابتدا توسط مشتق جزئی زیر به انرژی موج در هر سلول تبدیل می شود:

$$S_r(x,y,t,\theta) = \frac{\partial E_2(x,y,t)}{\partial \theta} \quad (12)$$

دوباره انرژی موج در سلول های جهت ی به تنش های تشعشعی در جهت های xx, xy, yx, yy تقسیم می شود:

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

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

$$S_{yy,r}(x,y,t) = \int (\sin^2 \theta) S_r d\theta \quad (13)$$

۳-۱-۲ نیروهای ناشی از موج^۴

تنش های تشعشعی باعث شکل گیری نیروهای ناشی از موج می شوند. نیروهای ناشی از موج (F_x, F_y) عبارات محرکه روابط غیرخطی آب کم عمق (NLSWE) هستند.

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

در رابطه 2، پارامتر θ نمایانگر زاویه ی برخورد نسبت به محور S_w, x چگالی انرژی موج در هر سلول^۱ و σ فرکانس ذاتی موج^۲ می باشد. فرکانس ذاتی موج σ و سرعت گروه C_g از رابطه ی استهلاک خطی^۳ به دست آمده است. D_w, D_f, D_v مولفه های استهلاک برای به ترتیب موج، اصطکاک بستر و پوشش گیاهی هستند. فرکانس ذاتی و سرعت انتشار موج در جهت x و y و θ براساس رابطه 3 محاسبه می شود.

$$c_{gx}(x,y,t,\theta) = c_g \cos(\theta)$$

$$c_{gy}(x,y,t,\theta) = c_g \sin(\theta) \quad (3)$$

$$c_\theta(x,y,t,\theta) = \frac{\sigma}{\sinh 2kh} \left(\frac{\partial h}{\partial x} \sin \theta - \frac{\partial h}{\partial y} \cos \theta \right)$$

۲-۱-۱ رابطه ی تعادل انرژی غلتشی

وقتی موج می شکند، انرژی موج به تدریج در غلتابه های سطحی ذخیره می شود. در جایی که موج شروع به شکستن می کند، به دلیل خیز آب و جریان های موازی ساحل، قوی ترین گرادیان های تنش تشعشعی انتظار می رود. در عمل، یک وقفه به دلیل ذخیره تدریجی انرژی شکست موج در غلتابه های سطحی وجود دارد. پراکندگی ناشی از شکست موج (D_w) یک گزاره استهلاکی در تعادل اثر موج کوتاه، و یک گزاره منبع در تعادل انرژی غلتشی است. تعادل انرژی غلتشی بصورت زیر بیان می شود:

$$\frac{\partial E_r}{\partial t} + \frac{\partial E_r \cos \theta}{\partial x} + \frac{\partial E_r \sin \theta}{\partial y} = D_w - D_r \quad (4)$$

که در آن:

$$D_r = \frac{2g\beta_r E_r}{C} \quad (5)$$

$$D_w = \frac{1}{4} \alpha Q_b \rho g f_{rep} (H_b^2 + H_{rms}^2) \quad (6)$$

$$Q_b = \exp \left[- \left(\frac{H_b^2}{H_{rms}^2} \right) \right] \quad (7)$$

$$H_b = \frac{0.88}{k} \tanh \left[\frac{\gamma kh}{0.88} \right] \quad (8)$$

^۱ Linear dispersion relation

^۴ Wave-induced forces

^۱ bin

^۲ Intrinsic wave frequency

$F_{v,y}$ تنش‌های ناشی از پوشش گیاهی، v_h لزجت افقی و f ضریب کوریولیس^۴ می‌باشد.

$$F_x = -\left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y}\right) \quad (14)$$

$$F_y = -\left(\frac{\partial S_{yy}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yx}}{\partial y}\right) \quad (15)$$

۲-۱-۵ انتقال رسوب: رابطه 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 رابطه انتقال-انتشار بیان می‌شود:

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

در رابطه 19، T_s زمان سازگاری است، که بیانگر زمان عکس-العمل رسوب می‌باشد:

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

در روابط 19 و 20 پارامتر D_h ضریب انتشار رسوب، h عمق آب در محل، w_s سرعت سقوط رسوب و u^E و v^E مولفه‌های سرعت اویلری^۵ و f_{Ts} یک ضریب اصلاحی برای در نظر گرفتن این حقیقت که w_s با اطلاعات عمق میانگین تعیین می‌شود، بوده‌است.

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 آب کم‌عمق می‌رسند، شکل و حرکت مداری آن‌ها غیرخطی تر می‌شود. اثرات غیرخطی بودن (چولگی و عدم تقارن) در رابطه انتقال-انتشار (رابطه 19) در نظر گرفته شده‌است. عدم تقارن و چولگی در این رابطه به شکل u^a نمایان می‌شود:

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

در رابطه ۲۱، پارامتر S_k و A_s به ترتیب پارامترهای چولگی و عدم تقارن، و f_{sk} و f_{As} ضرایب واسنجی می‌باشند ($facSk$ و $facAs$ نیز خوانده می‌شوند). در مدل XBeach دو انتخاب

۲-۱-۴ روابط آب کم‌عمق

امواج با فرکانس پایین، جریان‌های میانی^۱ و سرعت‌های مداری، در روابط آب کم‌عمق نمایان می‌شوند. برای در نظر گرفتن شار جرمی ناشی از امواج و جریان بازگشتی، معادله تعمیم‌یافته لاگرانژ میانگین (GLM^۲) در عمق متوسط استفاده شده‌است. در این ساختار، معادلات اندازه‌حرکت و پیوستگی بر حسب سرعت لاگرانژ (u^L) نوشته می‌شود. سرعت لاگرانژ به صورت فاصله طی شده توسط ذره آب در یک پرپود موج، تقسیم بر پرپود موج تعریف می‌شود. معادلات GLM که به دست می‌آید، به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u^L}{\partial t} + u^L \frac{\partial u^L}{\partial x} + v^L \frac{\partial u^L}{\partial y} - fv^L - v_h \left(\frac{\partial^2 u^L}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u^L}{\partial y^2} \right) \\ = \frac{\tau_{sx}}{\rho h} - \frac{\tau_{bx}^E}{\rho h} - g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{F_x}{\rho h} - \frac{F_{v,x}}{\rho h} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v^L}{\partial t} + u^L \frac{\partial v^L}{\partial x} + v^L \frac{\partial v^L}{\partial y} - fu^L - v_h \left(\frac{\partial^2 v^L}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v^L}{\partial y^2} \right) \\ = \frac{\tau_{sy}}{\rho h} - \frac{\tau_{by}^E}{\rho h} - g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{F_y}{\rho h} - \frac{F_{v,y}}{\rho h} \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial hu^L}{\partial x} + \frac{\partial hv^L}{\partial y} = 0 \quad (16)$$

$$\begin{aligned} u^L &= u^E + u^s \\ v^L &= v^E + v^s \end{aligned} \quad (17)$$

انحراف استوکس^۳ بوسیله انرژی موج کوتاه (E_w) و جهت (θ) از اثر موج با ارتفاع h در دو جهت بدست می‌آید:

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

τ_{sx} و τ_{sy} تنش‌های برشی باد، τ_{bx} و τ_{by} تنش‌های برشی بستر، η سطح آب، F_x و F_y تنش‌های ناشی از موج، $F_{v,x}$ و

^۴ Coriolis

^۵ Eulerian velocity

^۱ Mean flows

^۲ Generalized Lagrangian Mean formulation

^۳ Stokes drift

مدل XBeach، برای به‌روزرسانی بستر از یک رابطه تعادل حجمی استفاده می‌شود. در این تعادل، ورودی و خروجی خالص رسوب در دو راستای x و y ، کاهش و یا افزایش سطح بستر را تعیین می‌کند:

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

در این رابطه، P تخلخل، q_x و q_y نرخ انتقال رسوب در دو جهت x و y است. f_{mor} ضریب شتاب مورفولوژیکی می‌باشد؛ این مدل دو روش برای شتاب دادن به تغییرات مورفولوژیکی دارد:

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

مورد دیگر "morfacopt = 0" است؛ در این گزینه، بخشی کوچک از شرایط هیدرودینامیکی، به عنوان نماینده کل شرایط در نظر گرفته می‌شوند. در این روش فاصله گام‌های زمانی تغییر نمی‌کند اما شتاب تغییرات بستر ضرب در f_{mor} می‌شود. این گزینه برای مواردی مناسب است که می‌توان یک بازه زمانی طولانی را با یک بازه 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 پدیده 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 زیر برای فروریزش در XBeach مورد استفاده قرار می‌گیرد:

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

که در آن، m_{cr} شیب بحرانی بستر می‌باشد. در این مدل، به صورت پیش‌فرض 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 زیر تغییرات سطح بستر را در هر گام زمانی و با در نظر گرفتن فروریزش نشان می‌دهند:

برای در نظر گرفتن شکل موج وجود دارد: ۱- بهره‌گیری از فرمول Ruessink و همکاران (2012) و ۲- فرمول Van Thiel De Vries (2009). فرمول Ruessink و همکاران بر اساس یک سری اطلاعاتی متشکل از بیش از 30000 بررسی میدانی پدیده چولگی و عدم تقارن تحت امواج شکننا و ناشکنا تهیه شده است. چولگی و عدم تقارن بوسیله روابط 22 تا 24 محاسبه می‌شود.

$$B = p_1 + \frac{p_2 - p_1}{1 + \exp \frac{p_3 - \log U_r}{p_4}} \quad (22)$$

$$\psi = -90 + 90 \tanh \left(\frac{p_5}{U_r^{p_6}} \right) \quad (23)$$

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

در روابط 22 تا 24، پارامتر B تابع Boltzmann Sigmoid می‌باشد که بوسیله ضرایب p_1 تا p_6 بر روی داده‌های میدانی برازش داده می‌شود. این تابع به صورت S - شکل بوده و مجانب بالایی و پایینی آن به ترتیب با p_2 و p_1 تعریف می‌شود. نقطه عطف تابع در بین این دو عدد یعنی $(p_1 + p_2) / 2$ قرار دارد و U عدد اورسل می‌باشد.

۲-۱-۶ اثر شیب بستر

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

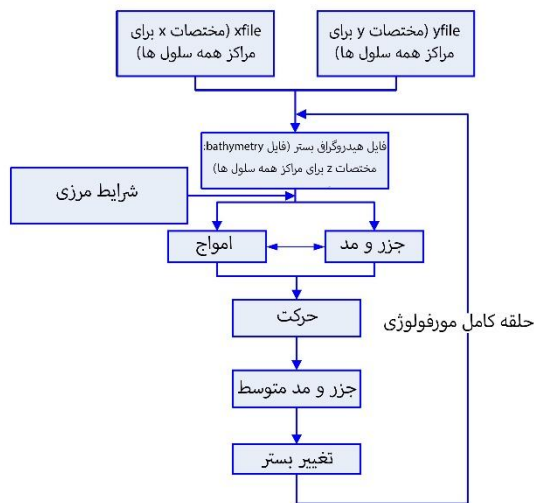
1. تاثیرگذاری روی سرعت جریانات نزدیک بستر
 2. تغییر دادن شرایط آستانه حرکت رسوب
 3. تغییر نرخ انتقال رسوب و/یا جهت حرکت رسوب
- از روابط زیر برای در نظر گرفتن اثر شیب بستر در انتقال رسوب در XBeach استفاده می‌شود:

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

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

رابطه 25 به صورت پیش‌فرض در مدل به کار برده می‌شود. روش دیگر، استفاده از فرمول Soulsby است که برای مطالعه بیشتر می‌توان به (Roelvink et al., 2015) مراجعه کرد. در

منطقه نزدیک ساحل است. در این راستا مدل XBeach انتقال رسوب را پس از هر مرحله اجرای مدل در مرکز هر سلول در شبکه مدل محاسبه می‌گردد. فلوجارت شکل ۵ توالی محاسبات درون XBeach را نشان می‌دهد.



شکل ۵ - فرایند شبیه‌سازی تغییرات مورفولوژی در XBeach [۳]

بنابراین با توجه به توضیحات ارائه شده رویه شبیه‌سازی فرآیندهای مورفودینامیک سواحل در مدل XBeach شامل 4 بخش اصلی بوده که در فلوجارت شکل ۶ نمایش داده شده است.

در فلوجارت شکل ۶ گام‌های شبیه‌سازی فرآیندهای مورفولوژیکی ساحل براساس مدل XBeach نمایش داده شده است، برای برپاسازی مدل و تعریف شرایط هیدرودینامیک دارای سه ماژول: 1. Stationary، 2. Surfbeat، 3. Non-hydrostatic بوده است.



شکل ۶ - شبیه‌سازی فرآیندهای مورفولوژیکی در XBeach

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

به عبارتی دیگر به طور خلاصه می‌توان گفت جریان با استفاده از حل روابط مربوط به آب‌های کم عمق محاسبه می‌گردد. XBeach امواج طولانی را دوباره حل می‌کند در حالی که امواج کوتاه با استفاده از طیف انرژی امواج محاسبه می‌گردند. اتلاف انرژی امواج با استفاده از رابطه Roelvink بدست می‌آید.

XBeach روابط مختلفی را برای انتقال رسوب حل می‌کند که این روابط به غلظت رسوبات عمق متوسط C غلظت تعادل رسوبات C_{eq} بستگی دارد. غلظت رسوبات یا با استفاده از روش van Rijn- Soulsby-van Rijn (SVR) و یا با استفاده از روش Thiel de Vries (VRVT) van بدست می‌آید [۴۳].

در دهه‌های اخیر، قابلیت‌های مهمی به این نرم‌افزار افزوده شد که شامل در نظر گرفتن تاثیرات چولگی و عدم تقارن، جریان 3 بعدی آب زیر دریا، رابطه تحلیل موج بود که به ما این امکان را می‌داد تا پروفیل‌های 1 بعدی یا 2 بعدی را شبیه‌سازی کنیم. در این قسمت لازم است به ذکر دو قابلیت مهم این مدلسازی بپردازیم:

اولین قابلیت که در تنها در مورد پروفیل قابل اجراست، روابط بستر را بروز کرده تا گرادین انتقال در کناره ساحل نیز در نظر گرفته شود:

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

در این رابطه S_s نرخ انتقال کناره ساحل و ϕ ضریبی با بعد 1 بر طول می‌باشد. بسته به علامت انتقال و ϕ ، این فرمول 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 (روئلوینگ، 2019).

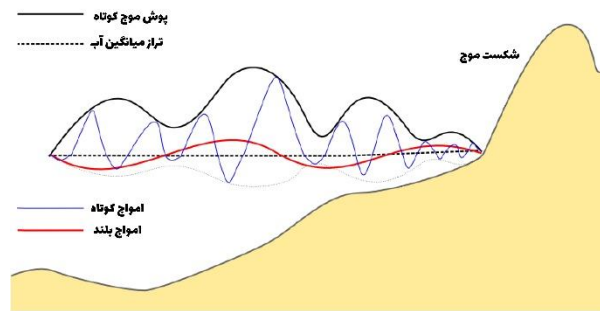
۲-۲ مدلسازی انتقال رسوب در مدل XBeach

انتقال رسوب به عنوان یکی از پدیده‌های مهم در مناطق ساحلی به شمار می‌آید و در مدلسازی‌های این پژوهش مورد توجه بوده است، همانطور که قبلاً نیز مورد بحث قرار گرفت، XBeach مدلی برای شبیه‌سازی مورفولوژیکی در ساحل و

آگوست-سپتامبر 2006 به طور مشترک توسط برنامه (SWIMS^۲) و برنامه تحقیقاتی مطالعات سواحل (CIRP^۳) انجام شد. اهداف اصلی مطالعه، تعیین کمیت اثرات باد بر جریان موج بر صخره های حاشیه ای جزیره گوم در اقیانوس آرام و به دست آوردن داده های آزمایشگاهی برای اعتبارسنجی مدل های عددی موج بوده است.

آزمایشات انجام شده در فلومی به طول 35 متر، عرض 0.7 متر و ارتفاع 1.6 متر که مجهز به دستگاه موج ساز و همچنین سیستم تولید جریان هوا برای اعمال باد بر سطح آب بوده، انجام شده است. مشخصات هندسی و ژئومتری فلوم در شکل ۸ نمایش داده شده است. در این پژوهش بیش از 80 مدل آزمایشگاهی تعریف و مورد مطالعه قرار گرفته است که آزمایش های انجام شده در 3 بخش اصلی: 1- آزمایشات تحت شرایط اعمال موج به تنهایی^۴، 2- آزمایشات تحت شرایط اعمال باد به تنهایی^۵،

3- آزمایشات تحت شرایط بارگذاری تواما موج-باد^۶ طبقه بندی شده است. در این مدل آزمایشگاهی برای اعمال شرایط موج از امواج نامنظم با طیف (JONSWAP) با ارتفاع موج مشخصه بین 3 تا 8.5 سانتی متر و پریود پیک بین 1 تا 2.5 ثانیه استفاده شده است، همچنین عمق آب معادل 50 سانتی متر بوده است که البته با توجه به آزمایشات مختلف بین 50 تا 55 سانتی متر متغیر میباشد. مدت زمان انجام آزمایشات 15 دقیقه بوده است.



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

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 آنها را فراهم می کرد. با توجه به شکل ۷ عملکرد هریک از سه ماژول XBeach در برپاسازی شرایط هیدرودینامیکی عبارت است از: ماژول Stationary، در این شرایط معادلات حاکم بر اساس میانگین گیری امواج به صورت موثر حل می گردد اما از امواج فروگرانشی به طور کامل نظر شده است.

ماژول Surfbeat (SB) در این شرایط تغییرات موج کوتاه در مقیاس گروه موج (مجموعه امواج کوتاه^۱) و امواج بلند مرتبط با آنها حل می شود. ماژول Non-hydrostatic (NH) در این شرایط ترکیبی از معادلات 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 این مطالعه 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.

۲-۳ مشخصات مدل های آزمایشگاهی

۲-۳-۱ مدل آزمایشگاهی Demirbilek, 2007

در مطالعات انجام شده توسط دمیربلیک و همکاران در سال 2007 اثرات موج و باد بر بالاروی امواج در ساحل و تغییرات تراز سطح آب به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفت [۴۴].

در این پژوهش جزئیات طراحی آزمایش موج - باد و داده های به دست آمده برای ارزیابی عملکرد و مدلسازی امواج در سواحل و همچنین سیل جزایر را شرح می دهد. این آزمایش در

^۴ wave-only test conditions

^۵ wind-only test conditions

^۶ combined wind-wave conditions

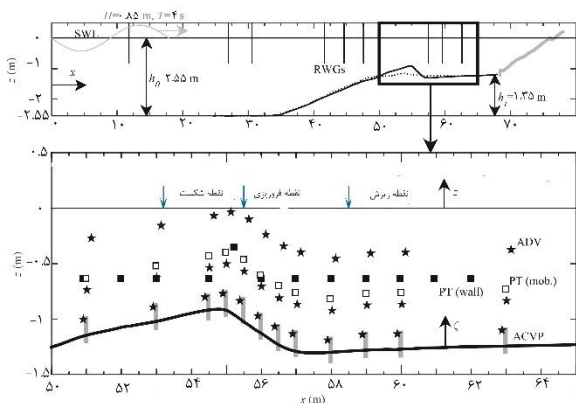
^۱ short wave envelope

^۲ Surge and Wave Island Modeling Studies

^۳ Coastal Inlets Research Program

شکل ۹ مشخصات هندسی مدل و پروفیل بستر در آزمایشات زانندن نمایش داده شده است. بستر ایجاد شده تا طول 67.5 متر از مصالح با خصوصیت متحرک (فرسایش پذیر) و برای طول های بیش از 67.5 متر غیرقابل فرسایش بوده است.

داده های آزمایش در دو سری جمع آوری شده است که یک سری مربوط به ناحیه زوال موج و دیگری مربوط به ناحیه سواش هست. هر دو این موارد بر فرآیند هیدرودینامیک و انتقال رسوب تمرکز دارد. داده های موجود در این تحقیق با استفاده از دو ابزار جدید جمع آوری شده است: سرعت سنج متمرکز آکوستیک (ACVP) و سیستم اندازه گیری رسانایی غلظت به روز شده (CCM). شکل ۱۰، تصویری از کانال و ابزارهای اندازه گیری در این آزمایشات را نشان می دهد.

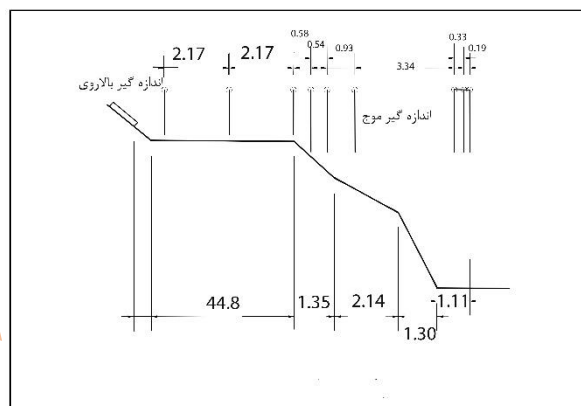
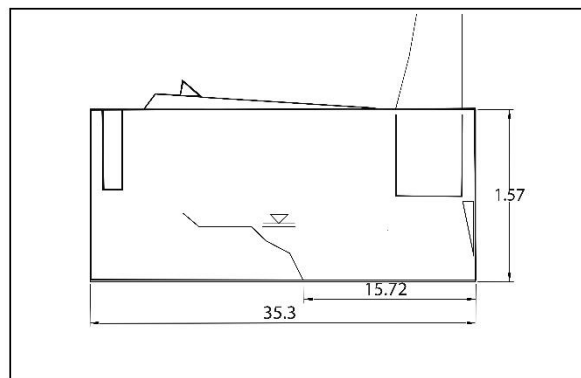


الف) نمای کلی فلوام شامل مقطع آزمایش افقی اولیه (خط چین) و پروفیل بستر مرجع (خطوط پررنگ)، خط ساحل ثابت (خط کم رنگ) و محل قرار گیری موج سنج ها (خطوط عمودی)؛ ب) نمای نزدیک از مقطع آزمایش، شامل: فشارسنج های متحرک (مربع های سفید)، فشارسنج های ثابت دیواری (مربع های سیاه)، سرعت سنج ها (ADV) های متحرک (ستاره ها) و پروفایلر سرعت و غلظت (ACVP) به صورت مستطیل های خاکستری

شکل ۹ - فلوام و مشخصات آزمایشگاهی زانندن [۴۵] 2016

با توجه به شکل ۱۱ و بر اساس نتایج حاصله از آزمایشات، موقعیت مناطق پراهمیت عبارت است از:

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: $X > 58.5m$.



مشخصات هندسی و ژئومتری فلوام

شکل ۸ - فلوام و مشخصات آزمایشگاهی دمیرلیک [۴۴] 2007

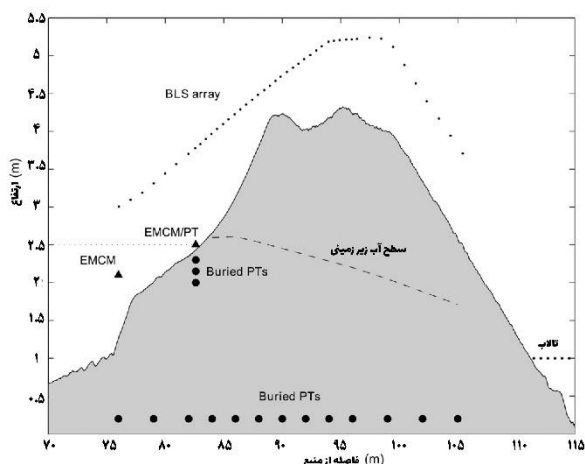
تجزیه و تحلیل نشان داد که اثر باد بر روی فرآیند بالاروی بسیار موثر است. نتایج نشان داد که افزایش ارتفاع بالاروی در درجه اول به دلیل خیزآب ناشی از باد در خط ساحلی و سپس اثر نوسان امواج بلند در بستر صخره های مرجانی است. دمیرلیک پیشنهاد داد می توان در سطوح مختلف آب تاثیر پارامترهای موثر بر بالاروی در صخره های مرجانی را مورد بررسی قرار داد. همچنین دمیرلیک پیشنهاد داد از داده های آزمایشگاهی ارائه شده در این گزارش برای مطالعات و اعتبارسنجی مدل های عددی برای صخره های مرجانی و برآورد بالاروی می توان استفاده نمود.

۲-۳-۲ مدل آزمایشگاهی Zanden, 2016

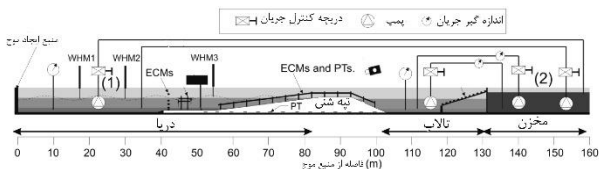
در این پژوهش به سبب ارزیابی پدیده انتقال رسوب در سواحل در منطقه (Surf zone, swash zone) تست های آزمایشگاهی مختلفی تعریف و پیاده سازی شده است. آزمایشات در یک فلوام به ابعاد 100 متر طول، 3 متر عرض و 4.5 متر ارتفاع پیاده سازی شده است. در کلیه آزمایشات شرایط دریایی با موج منظم به ارتفاع 0.85 متر و پرپود 4 ثانیه در نظر گرفته شده است. در این پژوهش عمق آب معادل 2.55 متر بوده است [۴۵].

به سبب ارزیابی پدیده انتقال رسوب خصوصیات ذرات رسوب تشکیل دهنده پروفیل طولی مدل دارای اهمیت بوده است. در

به طول 250 متر، عرض 5 متر و عمق 7 متر انجام شده است، تپه در وسط فلوم و از تراز طولی 65 متر شروع و به طول 50 متر تا تراز طولی 115 متر به اتمام رسیده است. طرف چپ تپه دریا و شرایط دریای (موج و جزرمد) 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 تصویر شکل ۱۱ نمایی به صورت شماتیک از هندسه مدل آزمایشگاهی و در شکل ۱۲ مشخصات فلوم آزمایشات ارائه شده است.



شکل ۶ - شماتیک مدل آزمایشگاهی ماسلینک، [۴۶] 2012



شکل ۷ - فلوم آزمایشگاهی مدل ماسلینک، [۴۷] 2012

در این پژوهش مدل‌های آزمایشگاهی متنوعی برای ارزیابی تاثیر شرایط مختلف دریایی و عمق آب در تالاب تعریف شده است. مدلسازی موج در آزمایشات صورت گرفته بر اساس امواج نامنظم با طیف موج JONSWAP که دارای ارتفاع مشخص H_s و پرپود پیک T_p میباشد در نظر گرفته شده است. شرایط جزرمد متغییر در مدلها لحاظ شده است، همچنین میزان عمق آب در دریا و تالاب جهت ارزیابی شرایط مختلف لحاظ شده است. برای بررسی انتقال رسوب از ذرات با مشخصه $D_{50} = 11mm, D_{90} = 17mm$ با تخلخل 0.32 استفاده شده است. آزمایش های انجام شده بر اساس مدل ماسلینک دارای شرایط مختلف بر اساس پارامترهای



الف) شکست شیرجه ای امواج در فلوم، ب) قاب متحرک حامل ابزارهای اندازه گیری، ج) نمای بستر ماسه‌ای به همراه ابزارهای ACCV و CCM+

شکل ۵ - تصویری از فلوم آزمایشگاهی، پروفیل بستر ماسه‌ای و ابزارهای

اندازه‌گیری زانندن، [۴۵] 2016

در تحقیق انجام گرفته هیدرودینامیک نزدیک بستر، شامل سرعت‌ها آشفتگی با استفاده از ابزار ACVP در 12 موقعیت تحت امواج شکست مورد بررسی قرار گرفت. در نواحی سواش، توسعه و ایجاد بیشتر مدل‌ها بر اساس روابط موجود توصیه شده است. نتایج بدست آمده در مطالعه حاضر میزان اهمیت اندرکنش سواش و امواج را نشان می دهد. میزان اندرکنش امواج و سواش را می توان بر اساس مدت زمان اتفاق افتادن سواش بررسی کرد.

۲-۳-۲ مدل آزمایشگاهی Masselink, 2012

در این پژوهش آزمایشاتی گسترده‌ای برای ارزیابی فرایندهای ساحلی و تاثیر آن بر تغییرات سفره های آب زیرزمینی و همچنین تغییرات مورفولوژی ساحل تحت شرایط جریان آب زیرزمینی پیاده سازی شده است. به این منظور یک تپه^۱ فرسایش پذیر بین دریا و تالاب^۲ مدلسازی فیزیکی گردیده و تحت شرایط مختلف امواج دریایی و جزر مد در یک طرف و سطح آب متغییر در تالاب در طرف دیگر مورد آزمایشات متعدد قرار گرفته است. آزمایش های انجام شده در یک فلوم

^۲ Lagoon

^۱ barrier

- مدلسازی عددی آزمایش Demirbilek, 2007 از امواج نامنظم با طیف (JONSWAP) با ارتفاع موج مشخصه (H_s) بین 3 تا 8.5 سانتی‌متر و پریود پیک (T_p) بین 1 تا 2.5 ثانیه استفاده شده است. براین اساس شرط مرزی از نوع موج طیفی با خصوصیات طیف موج جانسواپ (H_s, T_p) اعمال شده است.

- مدلسازی عددی آزمایش Zanden, 2016 به ارزیابی تغییرات موفقولوژیک بر بستر فرسایش پذیر تحت شرایط اعمال موج منظم با ارتفاع 0.85 متر و پریود 4 ثانیه بر ساحل معطوف بوده است. در این مدل شرط مرزی از نوع موج غیرطیفی (موج منظم با ارتفاع و پریود مشخص براساس مدل آزمایشگاهی) تعیین شده است.

- مدلسازی عددی آزمایش Masselink, 2012 از امواج نامنظم با طیف موج JONSWAP که دارای ارتفاع مشخص H_s و پریود پیک T_p میباشند (مطابق با مدل آزمایشگاهی) برپاسازی شده است. براین اساس شرایط مرزی موج برای این مدل از نوع موج طیفی با خصوصیات طیف موج جانسواپ (H_s, T_p) اعمال شده است.

۲. شرایط مرزی معادلات آب کم عمق

بخش دوم شرایط مرزی مدل XBEACH به سه بخش اصلی:

1. شرایط مرزی دریایی (Offshore boundary): عمدتاً برای تعیین وضعیت محدوده دریایی از نقطه نظر جذب/بازتاب و شرایط حاکم بر امواج در مرزهای ناحیه دریایی استفاده میشود.
2. تغییرات جزرومدی (Tide and surge): برای تعیین مقادیر سطح آب در شرایط وجود مددریایی و همچنین ثابت نگه داشتن عمق آب در مرزهای منطقه دریایی استفاده میشود.
3. کنترل ورود و خروج آب از طریق رودخانه یا ناحیه تخلیه آب به دریا (River and point discharge): برای تعیین و کنترل نقاط ورود توده آب به منطقه دریایی استفاده میشود.

به طور کلی شرط مرزی دریایی براساس شرایط مدلسازی و شرایط امواج دریایی حاکم بر مدل تعیین میگردد. در این پژوهش سه مدل آزمایشگاهی با بهره‌گیری از مدل XBEACH مدلسازی عددی شده است که براساس شرایط مدل آزمایشگاهی شرط مرزی دریایی در مدل XBEACH برای هر سه تست آزمایشگاهی شرط مرزی غیر هیدرواستاتیک در مرز منطقه دریایی سمت ساحل فعال بوده است، این شرط مرزی برای شبیه سازی های غیر هیدرواستاتیکی لازم است.

همچنین شرط مرزی تغییرات جزرمدی تنها در مدلسازی آزمایش Masselink, 2012 که سطح آب مشخص در تالاب

مشخصات موج، جزرمد، عمق آب دریا، عمق آب تالاب بوده است که به همراه جزئیات در جدول ذیل ارائه شده است. لازم به ذکر است که مدت زمان انجام آزمایشات 90 دقیقه تحت شرایط امواج نامنظم بوده است، در انتهای هر آزمایش 15 دقیقه بارگذاری موج منظم با پریود و ارتفاعی معادل H_s ، T_p موج نامنظم اعمال شده است. در جدول ۲ مشخصات مدل‌های آزمایشگاهی ماسلینک ارائه شده است.

جدول 2 - جزئیات مدل‌های آزمایشگاهی ماسلینک، 2012

تست	H_s (m)	T_p (s)	تراز دریا (m)	تالاب (m)
BB1	0.8	4.5	2.5	2.5
B2	0.8	3	2.5	2.5
B3	0.8	6	2.5	2.5
C1	0.8	4.5	2.5	1
C2	0.8	4.5	2.5	3.5
C3	0.8	3	2.5	1.5
C4	0.8	3	2.5	3.5
C5	0.8	6	2.5	1.5
C6	0.8	6	2.5	3.5
DD1	0.8	4.5	1.75-3.25	2.5
D1	0.8	4.5	1.75-3.25	1.5
D2	0.8	4.5	1.75-3.25	3.5

۲-۴ شرایط مرزی مدل سازی با مدل XBEACH

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

۱. شرایط مرزی موج - wave boundary conditions

در مدل XBEACH اولین شرط مرزی تعیین شرط مرزی امواج بوده است که به دو صورت: ۱. شرط مرزی طیفی موج (Spectral conditions) و ۲. شرط مرزی غیرطیفی (Non-spectral conditions) تعیین میگردد.

به طور کلی شرط مرزی امواج دریایی براساس شرایط مدلسازی و شرایط امواج دریایی حاکم بر مدل تعیین میگردد. در این پژوهش 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.

اندازه گیر 4	2.75	0.33
اندازه گیر 5	3.68	0.39
اندازه گیر 6	4.22	0.45
اندازه گیر 7	4.8	0.5
اندازه گیر 8	6.97	0.5
اندازه گیر 9	9.14	0.5

در این پژوهش سه آزمایش مختلف از مطالعات Demirbilek, 2007 که دارای شرایط مختلف اعمال باد، اعمال موج و اعمال تواما موج و باد بر ساحل بوده، در بستر XBeach مدلسازی عددی شده است. مشخصات و جزئیات هریک از سه مدل آزمایشگاهی در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول 4- مشخصات آزمایشات Demirbilek, 2007 برای مدلسازی عددی

تست	موج		سرعت باد (m/s)	WL (cm)	توصیف شرایط
	Hs (cm)	Tp (s)			
Model_D1	-	-	4	53.1	اثر باد
Model_D2	6.8	1.5	-	50	اثر موج اثر همزمان
Model_D3	6	1.25	4.8	53.1	ن موج-باد

بر اساس توضیحات ارائه شده سه مدل عددی با شرایط مذکور در جدول ۴ در مدل XBeach برپاسازی شده است، در شکل ۱۳ نمایی از هندسه فلولم و پروفیل بستر آزمایشات Demirbilek, 2007 که در مدل XBeach برپاسازی شده، نمایش داده شده است. به جهت کالیبراسیون مدل عددی، حساسیت سنجی نسبت به اندازه مش (گام مکانی) با سه اندازه مختلف: 2.5، 5 و 10 سانتی متر انجام و آزمایش سوم (Model_D3) در بستر مدل XBeach مدلسازی عددی شده است، نتایج حاصل که بیانگر تغییرات سطح آب در موقعیت 9 گیج (جدول ۳) بوده نسبت به نتایج حاصل از مدل آزمایشگاهی مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته است. نتایج حاصل از کالیبراسیون مدل عددی در جدول ۵ ارائه شده است.

(Lagoon) براساس تراز آب در تالاب فعال بوده است. از آنجایی که در هیچیک از تست های آزمایشگاهی ورود آب از رودخانه به دریا یا منطقه تخلیه آب به دریا موجود نبوده شرط مرزی کنترل ورود و خروج آب در هر سه مدل آزمایشگاهی غیرفعال بوده است.

3. شرایط مرزی انتقال رسوب

شرایط مرزی برای انتقال رسوب، شرط مرزی (Neumann boundaries) در همه بخش های مدل بوده است. این شرط مرزی بیانگر این موضوع بوده که گرادیان های مرزی در معادله فرافت-انتشار (advection-diffusion equation) روی صفر تنظیم شده و همچنین گرادیان های بار بستر در جهت انتقال رسوبات محاسبه میگردد. با این شرط مرزی شرایط انتقال رسوبات عمود بر ساحل و انتقال رسوبات عرضی در مدل میسر بوده است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱-۳ مدلسازی عددی آزمایش Demirbilek, 2007

آزمایشات Demirbilek, 2007 به ارزیابی اثرات موج و باد بر بالاروی امواج در ساحل و تغییرات تراز سطح آب معطوف بوده است. براین اساس 80 تست آزمایشگاهی تحت شرایط مختلف (اعمال موج، اعمال باد و شرایط اعمال تواما موج و باد) تعریف شده است. در مطالعات از امواج نامنظم با طیف (JONSWAP) با ارتفاع موج مشخصه (H_s) بین 3 تا 8.5 سانتی متر و پریود پیک (T_p) بین 1 تا 2.5 ثانیه استفاده شده است. در این پژوهش به هدف ارزیابی عملکرد مدل XBeach در شبیه سازی هیدرودینامیک سواحل بلاخص بالاروی امواج و تغییرات تراز سطح آب، مدل آزمایشگاهی Demirbilek, 2007 با بهره گیری از دو ماژول SB و NH شبیه سازی شده و نتایج حاصل از مدلسازی عددی با نتایج آزمایشات مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته است. در مدل آزمایشگاهی برای ثبت تغییرات تراز سطح آب از 9 گیج^۱ اندازه گیری استفاده شده که موقعیت آن ها به صورت شماتیک در شکل ۱۲ و جدول ۳ ارائه شده است.

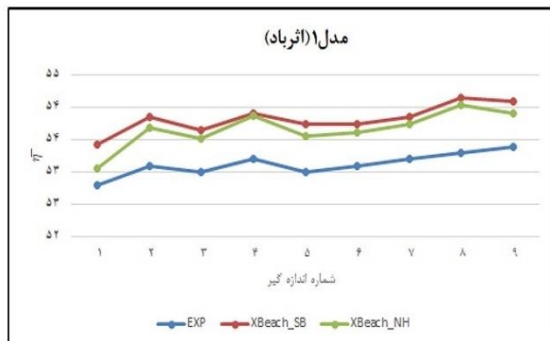
جدول 3- موقعیت گیج های اندازه گیری در آزمایش

Demirbilek, 2007

شماره اندازه گیر	X(m)	Z(m)
اندازه گیر 1	-1.11	0
اندازه گیر 2	-0.92	0
اندازه گیر 3	-0.59	0

^۱ Gauge

۱۴ تا ۱۶ تغییرات تراز سطح آب براساس شبیه‌سازی با دو ماژول مدل XBeach به همراه نتایج حاصل از تست‌های آزمایشگاهی برای سه مدل Model_D1، Model_D2، Model_D3 به ترتیب ارائه شده است.



شکل ۱۴ - تغییرات تراز سطح آب در مدل Model_D1

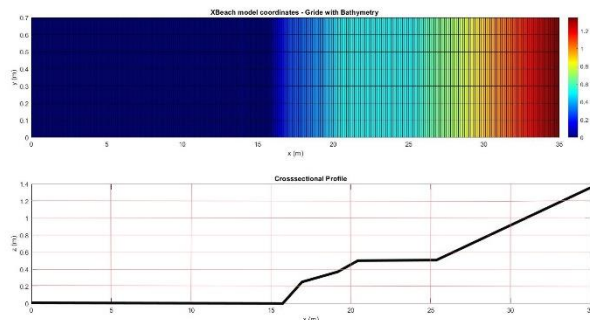
در شکل ۱۴ نتایج حاصل از تغییرات تراز سطح آب در مدل Model_D1 براساس مدل آزمایشگاهی (Demirbilek, 2007). شبیه‌سازی با مدل XBeach ارائه شده است. براساس نتایج حاصل مشخص می‌گردد که دو ماژول SB و NH دارای عملکرد نسبتاً مشابهی در شبیه‌سازی Model_D1 نسبت به نتایج تست آزمایشگاهی بوده‌اند. در جدول ۶ میزان خطای مدل‌سازی برای مدل Model_D1 نسبت به نتایج تست آزمایشگاهی ارائه شده است، براساس نتایج مشخص می‌گردد که میزان میانگین خطای مدل XBeach براساس مدل‌سازی با هر دو ماژول حدوداً ۱٪ بوده که بیانگر دقت قابل قبول مدل عددی در شبیه‌سازی تغییرات تراز سطح آب در شرایط اعمال باد در ساحل بوده است.

جدول ۶ - ارزیابی عملکرد XBeach در شبیه‌سازی Model_D1

Model_D1 (اثر باد)			
	MSE	RMSE	Mean Error%
XBeach SB	0.50	0.71	1.32
XBeach NH	0.32	0.56	1.03

جدول ۷ - ارزیابی عملکرد XBeach در شبیه‌سازی Model_D2

Model_D2 (اثر موج)			
	MSE	RMSE	Mean Error%
XBeach SB	6.31	2.51	4.89
XBeach NH	0.48	0.69	1.35



شکل ۸ - پلان و پروفیل بستر در مدل XBeach (Demirbilek, 2007)

جدول ۵ - کالیبراسیون مدل عددی آزمایش

Demirbilek, 2007

درصد خطای پارامتر η (تراز سطح آب) نسبت به مدل آزمایشگاهی

Model_D3

اندازه مش : x	اندازه مش :		
	2.5cm	5cm	10cm
$X = P(\text{Gauge}1)$	2.65	3.89	6.98
$X = P(\text{Gauge}2)$	3.18	3.19	7.88
$X = P(\text{Gauge}3)$	3.77	5.18	8.47
$X = P(\text{Gauge}4)$	3.05	4.15	8.46
$X = P(\text{Gauge}5)$	4.12	4.57	8.79
$X = P(\text{Gauge}6)$	3.75	4.08	9.11
$X = P(\text{Gauge}7)$	2.68	3.12	8.17
$X = P(\text{Gauge}8)$	4.08	4.78	9.15
$X = P(\text{Gauge}9)$	3.84	3.98	8.95
Mean Err%	3.46%	4.11%	8.44%

در جدول ۵ نتایج حاصل از حساسیت سنجی عملکرد مدل عددی نسبت به اندازه مش‌بندی ارائه شده است، براساس نتایج حاصل مشخص می‌گردد که میزان خطای مدل‌سازی برای مش بندی با اندازه ۱۰ سانتی‌متر معادل با ۸.۴۴٪ بوده که با کاهش اندازه مش به ۵ سانتی‌متر میانگین خطای مدل‌سازی ۴.۱۱٪ شده است. همچنین براساس نتایج مشخص می‌گردد که با کاهش اندازه مش از ۵ به ۲.۵ سانتی‌متر میزان کاهش خطا جزیی و کمتر از ۰.۶۵٪ بوده است. با توجه به نتایج حاصل در این پژوهش مدل‌سازی عددی با اندازه مش ۵ سانتی‌متر پیاده‌سازی شده است.

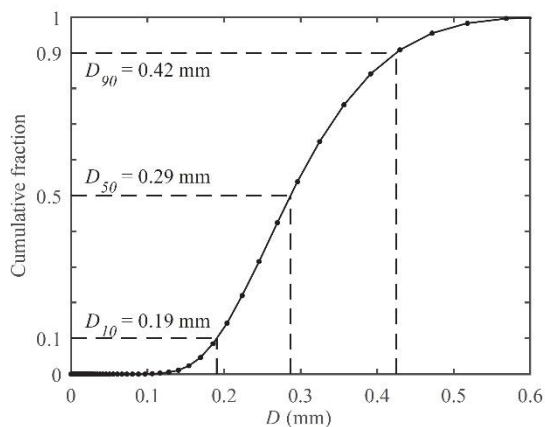
نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی سه مدل آزمایشگاهی (جدول ۴) در بستر XBeach و با بهره‌گیری از دو ماژول SB و NH بیانگر میزان تغییرات تراز سطح آب در موقعیت کارگذاری گنج‌های اندازه‌گیری در تست آزمایشگاهی بوده که در اشکال

جدول ۸ - ارزیابی عملکرد XBeach در شبیه‌سازی Model_D3

Model_D3 (اثر موج-باد)			
	MSE	RMSE	MeanError%
XBeach_SB	11.67	3.42	6.21
XBeach_NH	2.00	1.41	2.44

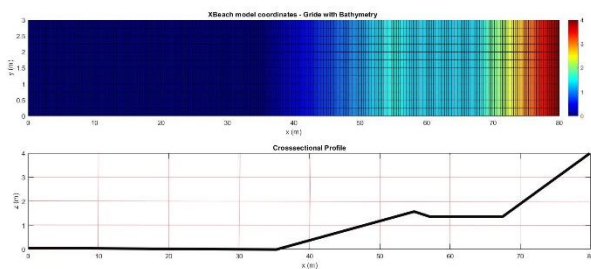
۲-۳ مدل‌سازی عددی آزمایش Zanden, ۲۰۱۶

مدل آزمایشگاهی زانندن به ارزیابی تغییرات موفولوژیک بر بستر فرسایش پذیر تحت شرایط اعمال موج منظم با ارتفاع 0.85 متر و پریود 4 ثانیه بر ساحل معطوف بوده‌است. مدت زمان انجام آزمایشات معادل با 90 دقیقه بوده است. برای ارزیابی پدیده انتقال رسوب و همچنین بررسی ذرات معلق رسوب در این پژوهش خصوصیات ذرات رسوب به شرح منحنی دانه بندی ارائه شده در شکل ۱۷ مدنظر بوده است.

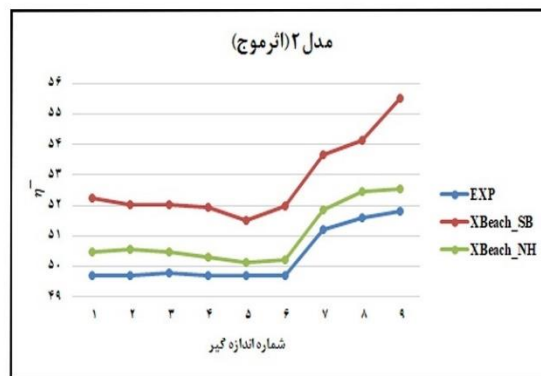


شکل ۹ - منحنی دانه‌بندی ذرات رسوب در آزمایش Zanden, 2016

براساس خصوصیات مشخصات ارائه شده از مدل آزمایشگاهی زانندن، مدل عددی در بستر XBeach و با بهره‌گیری از دو ماژول SB و NH مدل‌سازی عددی شده است. در شکل ۱۸ نمایی از هندسه فلووم و پروفیل بستر در مدل XBeach نمایش داده شده‌است.

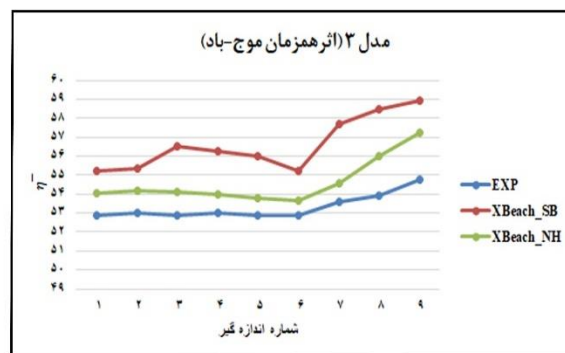


شکل ۱۸ - پلان و پروفیل بستر در مدل XBeach (Zanden, ۲۰۱۶)



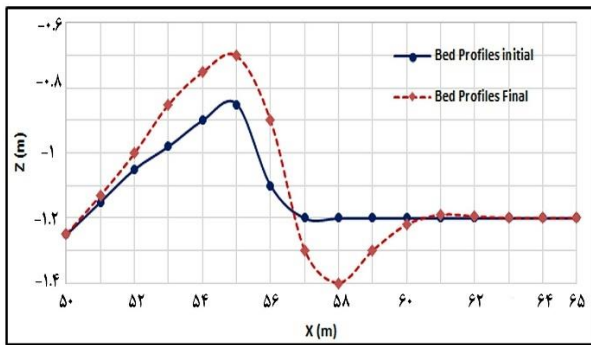
شکل ۱۵ - تغییرات تراز سطح آب در مدل Model_D2

در شکل ۱۵ و جدول ۷ نتایج حاصل از ارزیابی عملکرد مدل در شبیه‌سازی Model_D2 نسبت به تست آزمایشگاهی و براساس پارامتر تغییرات تراز سطح آب ارائه شده است. براساس نتایج حاصل مشخص می‌گردد که تحت شرایط اعمال موج در ساحل ماژول NH دارای عملکرد بهتری نسبت به ماژول SB بوده به گونه‌ای که میزان میانگین خطای مدل‌سازی عددی با ماژول NH معادل با 1.35% و با ماژول SB معادل با 4.89% بوده است.



شکل ۱۶ - تغییرات تراز سطح آب در مدل Model_D3

نتایج حاصل از شبیه‌سازی اعمال تواما باد و موج بر ساحل (Model_D3) در شکل ۱۶ ارائه شده است، همچنین میزان خطای مدل‌سازی عددی براساس میانگین خطا و آزمون‌های آماری MSE, RMSE در جدول ۸ ارائه شده است. براساس نتایج حاصل مشخص می‌گردد که میزان خطای مدل‌سازی با ماژول NH معادل با 2.44% و با ماژول SB معادل با 6.21% بوده است. به بیان دیگر نتایج حاصل از مدل‌سازی با مدل XBeach نشان داد که ماژول NH عملکرد بهتری نسبت به ماژول SB در شبیه‌سازی شرایط اعمال تواما باد و موج در مدل‌سازی میزان تغییرات تراز آب در سواحل داشته است.



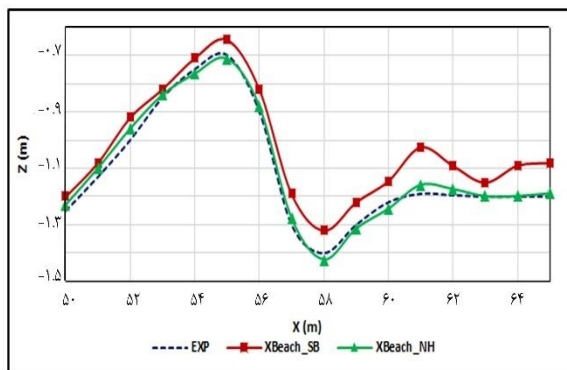
شکل ۱۹ - تغییرات پروفیل بستر در آزمایش Zanden, 2016

با توجه به توضیحات ارائه شده، مدل عددی با بهره‌گیری از دو ماژول SB و NH برپاسازی و نتایج حاصل از مدلسازی که بیانگر تغییرات مورفولوژی ساحل براساس شرایط آزمایش بوده استخراج شد است. در شکل ۲۰ تغییرات پروفیل بستر براساس نتایج آزمایش Zanden, 2016 و مدلسازی با دو ماژول SB و NH نمایش داده شده است.

جدول ۱۰ - ارزیابی عملکرد XBeach در شبیه‌سازی آزمایش

Zanden, 2016

	MSE	RMSE	Mean Error %
XBeach _ SB	0.007569	0.086999	7.16
XBeach _ NH	0.000446	0.021107	169



شکل ۲۰ - نتایج حاصل از مدلسازی عددی، آزمایش Zanden, 2016

در شکل ۲۰ تغییرات پروفیل بستر براساس مدلسازی با مدل XBeach و نتایج حاصل از آزمایش زانندن ارائه شده است. براساس نتایج حاصل مشخص می‌گردد که تطابق بهتری بین تغییرات پروفیل بستر در مدلسازی انجام شده با ماژول NH نسبت به مدل آزمایشگاهی برقرار بوده است. جهت ارزیابی کمی نتایج حاصل از مدلسازی عددی مقایسه‌ای بین پروفیل بستر

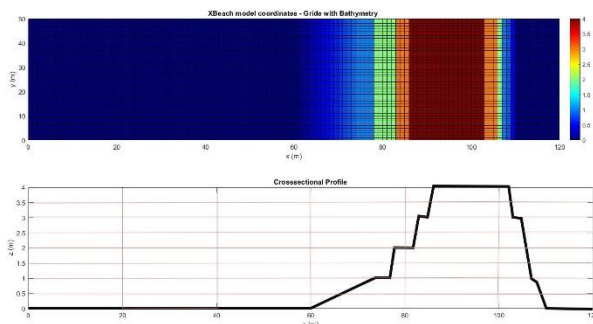
به جهت کالیبراسیون مدل عددی، حساسیت‌سنجی نسبت به اندازه مش (گام مکانی) با سه اندازه مختلف: 5، 10 و 20 سانتی‌متر در بستر مدل XBeach انجام شده است. نتایج حاصل که بیانگر تغییرات سطح آب و تغییرات پروفیل بستر در موقعیت بستر فرسایش پذیر (تراز طولی $X = 50$ تا $X = 65$ ، شکل ۹ را ببینید) بوده نسبت به نتایج حاصل از مدل آزمایشگاهی مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته است. نتایج حاصل از کالیبراسیون مدل عددی در جدول ۹ ارائه شده است.

جدول ۹ - کالیبراسیون مدل عددی آزمایش Zanden, 2016

خطای مدل عددی %	پروفیل بستر	سطح آب
6.85%	5cm: سایز مش	5.98%
7.11%	10cm: سایز مش	6.28%
20.45%	10cm: سایز مش	14.76%

براساس نتایج حاصل از حساسیت‌سنجی مدل عددی نسبت به اندازه مش‌بندی (جدول ۹) مشخص می‌گردد که میزان خطای مدلسازی با اندازه مش 20 سانتی‌متر برای دو پارامتر تراز سطح آب و تغییرات پروفیل بستر به ترتیب معادل با 14.76% و 20.45% بوده که با کاهش اندازه مش به 10 سانتی‌متر مقادیر خطای مدلسازی عددی به 6.28% برای تراز سطح آب و 7.11% برای تغییرات پروفیل بستر کاهش یافته است. همچنین براساس نتایج حاصل مشخص می‌گردد که با کاهش اندازه مش از 10 به 5 سانتی‌متر مقادیر خطای مدلسازی عددی تغییرات جزئی (کمتر از 1%) داشته است. براین اساس در این مطالعات برای مدلسازی عددی آزمایش زانندن از اندازه مش 10 سانتی‌متر استفاده شده است.

نتایج حاصل از آزمایشات زانندن بیانگر تغییرات تراز بستر رسوبات در محدوده فرسایش پذیر یعنی تراز طولی 50 تا 65 متر بوده که با بهره‌گیری از ابزار اندازه‌گیری ثبت و ارائه شده است. در نمودارهای شکل ۱۹ پروفیل بستر در شروع آزمایش و در انتهای آزمایش برای تراز طولی 50 تا 65 متر نمایش داده شده است.



شکل ۲۱ - پلان و پروفیل بستر در مدل XBeach (Masselink, ۲۰۱۲)

جدول ۱۱ - پارامترهای مدل عددی XBeach در راستای شبیه سازی مدل آزمایشگاهی ماسلینک

توصیف پارامتر	گزینه انتخابی	پارامتر مدل
فعال سازی جریان آب زیرزمینی	1	<i>gwflow</i>
شرایط جریان آب زیرزمینی: جریان آشفته	<i>turbulent</i>	<i>gwscheme</i>
رویکرد مدلسازی آب زیرزمینی: غیرهیدرواستاتیکی	1	<i>gwnonh</i>
تابع شکل تغییرات پروفیل تراز آب: سهمی	<i>parabolic</i>	<i>gwheadmodel</i>
هدایت هیدرولیکی خاک	0.15	<i>Kx</i>
محاسبه تغییرات مورفولوژی بستر در هر گام زمانی شرط کورانت: با توجه به هندسه	1	<i>morfac</i>
مدل، سرعت پیشینه موج و طول گام مکانی (مش بندی)	0.7	<i>CFL</i>
متوسط دانه بندی ذرات بستر	11	<i>D50</i>
مشخصه دانه بندی بستر	17	<i>D90</i>

در تست های آزمایشگاهی و به تبع آن در مدلسازی عددی، میزان تغییرات مورفولوژی بستر به عنوان یکی از اصلیترین خروجی های مدنظر مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج حاصل از میزان تغییرات مورفولوژی در دو تست *C5* و *C6* به ترتیب در اشکال ۲۲ و ۲۳ ارائه شده است. همچنین در جداول ۱۲ و ۱۳ ارزیابی بر میزان خطای مدلسازی عددی براساس دو ماژول *NH*, *SB* نسبت به تست آزمایشگاهی صورت گرفته است.

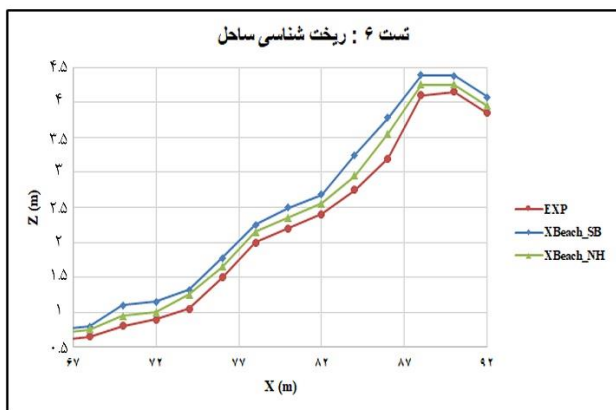
حاصل از آزمایش زاندن و مدلسازی عددی در جدول ۱۰ ارائه شده است.

در جدول ۱۰ مقایسه ای بین نتایج حاصل از مدلسازی عددی و تست آزمایشگاهی، Zanden, 2016 براساس آزمون های آماری *MSE*, *RMSE* و میانگین خطای مدلسازی عددی برای پارامتر تغییرات پروفیل بستر ارائه شده است. براساس نتایج حاصل مشخص میگردد که مدلسازی در بستر مدل XBeach با بهره گیری از ماژول *NH* عملکرد بهتری نسبت به ماژول *SB* داشته به گونه ای که میانگین خطای مدلسازی عددی با ماژول *NH* معادل با 1.69% و با ماژول *SB* معادل با 7.16% بوده است.

۳-۳ مدلسازی عددی آزمایش Masselink, 2012

با توجه به مدل آزمایشگاهی ماسلینک، مدلسازی عددی بر اساس شرایط و خصوصیات مدل آزمایشگاهی در بستر مدل XBeach تعریف و پیاده سازی شده است. در این مطالعات 2 مدل آزمایشگاهی *C5*, *C6* (جدول ۲ را ببینید) که به بررسی و ارزیابی مورفولوژی بستر و تعیین سطح آب زیرزمینی بین دریا و تالاب میپردازد، مدلسازی عددی شده است. 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 بر اساس مدل آزمایشگاهی تعریف شده است، بر این اساس امواج نامنظم با طیف موج *JONSWAP* که دارای ارتفاع مشخص H_s و پرپود پیک T_p میباشد (مطابق با مدل آزمایشگاهی) در نظر گرفته شده است. همچنین میزان عمق آب در دریا و تالاب جهت ارزیابی شرایط مختلف لحاظ شده است. پارامترهای اصلی در مدل عددی XBeach به شرح جدول ۱۱ تعریف شده است.

با توجه به پارامترهای ارائه شده برای بکارگیری مدل XBeach که در راستای کالیبراسیون مدل تعریف شده است، هریک از تست های *C5* و *C6* در بستر XBeach شبیه سازی و نتایج حاصله براساس عملکرد دو ماژول *NH*, *SB* اخذ گردیده است. لازم به ذکر است که مدت زمان مدلسازی عددی بر اساس مدل آزمایشگاهی معادل با 90 دقیقه (5400s) بوده است.



شکل ۲۳- نتایج حاصل از مدلسازی تست C6

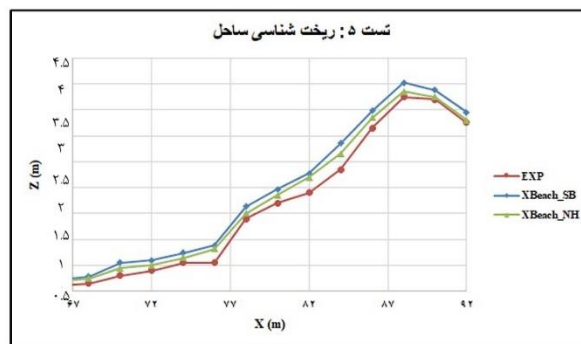
جدول ۱۳ - آزمون‌های آماری و میانگین خطای مدلسازی_تست A)

Test C6	MSE	RMSE	Mean Error%
XBeach - SB	0.09	0.30	19.30
XBeach - NH	0.03	0.16	11.45

جهت ارزیابی عملکرد مدل XBeach در این پژوهش، علاوه بر بررسی تغییرات مورفولوژی بستر، سطح تراز آب زیرزمینی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. یکی از نقص‌های مدل XBeach که به صراحت در راهنمای کاربری (راهنمای مدل XBeach) و مطالعات انجام شده توسط محققین مختلف اشاره شده است [۴۷-۵۰]، خطای فازی در هنگام نفوذ / تراوش آب به آبخوان بوده است. بر این اساس میزان تغییرات تراز آب زیرزمینی در دو مدل C5 و C6 مورد ارزیابی قرار گرفته است. در دو مدل C5 و C6 کلیه مشخصات مدلسازی کاملاً یکسان بوده و تنها پارامتر متغییر عمق آب در تالاب میباشد، به گونه ای که در مدل C5 تالاب دارای عمقی معادل با 1.5 متر بوده که نسبت به عمق آب دریا که معادل با 2.5 متر میباشد سطح پایینتری داشته است و در مدل C6 عمق آب در تالاب 3.5 متر بوده است. در اشکال 26 و 27 میزان تغییرات سطح آبخوان در دو مدل C5 و C6 به ترتیب ارائه شده است، همچنین میزان خطای مدلسازی در جداول 14 و 15 ارائه شده است.

جدول ۱۴ - ارزیابی خطای مدلسازی بر اساس تراز آب زیرزمینی_تست C5

Test C5	MSE	RMSE	Mean Error%
---------	-----	------	-------------



شکل ۱۰- نتایج حاصل از مدلسازی تست C5

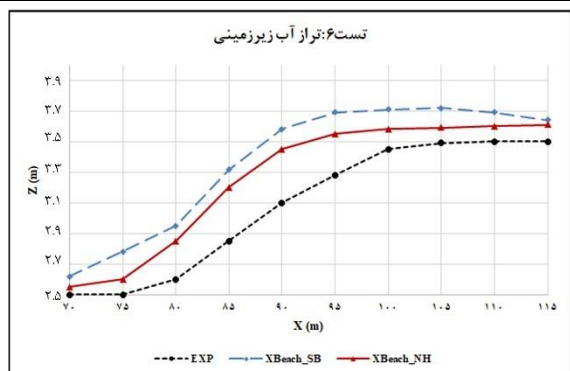
جدول ۱۲ - آزمون‌های آماری و میانگین خطای مدلسازی_تست C5

Test C5	MSE	RMSE	Mean Error%
XBeach - SB	0.07	0.27	18.45
XBeach - NH	0.03	0.17	11.73

در شکل های ۲۲ و ۲۳ تغییرات پروفیل بستر براساس نتایج تست آزمایشگاهی و مدلسازی عددی با دو ماژول SB, NH مدل XBeach به ترتیب برای تست های C5 و C6 ارائه شده است. همچنین به جهت ارزیابی کمی و بررسی عملکرد مدلسازی عددی، نتایج حاصل از مقایسات برپایه آزمون‌های آماری، MSE، RMSE و میانگین خطای مدلسازی در جداول ۱۲ و ۱۳ ارائه شده است. با ارزیابی نتایج حاصل از مدلسازی دو تست C5 و C6 (جداول ۱۲ و ۱۳) مشخص میگردد که میزان خطای مدلسازی با بهره‌گیری از مدل XBeach ماژول SB معادل با 18.45% برای تست C5 و 19.30% برای تست C6 بوده است، در حالیکه میزان خطا با بهره‌گیری از ماژول NH معادل با 11.73% و 11.45% به ترتیب برای تست های C5 و C6 بوده است. براساس نتایج حاصل مشخص میگردد که ماژول NH عملکرد بهتری در مدلسازی مدل آزمایشگاهی Masselink, 2012 نسبت به ماژول SB داشته است، اگرچه میزان خطای مدلسازی با هر دو ماژول خطای بزرگ و قابل توجهی (بیشتر از 10%) بوده است که علت این مورد را باید در شرایط مدلسازی، حضور تالاب و وجود جریان آب زیرزمینی در مدل بررسی نمود.

جدول 15 - ارزیابی خطای مدلسازی بر اساس تراز آب زیرزمینی_ تست C6

سطح آب زیرزمینی			
Test C ⁶	MSE	RMSE	Mean Error%
XBeach _ SB	0.122	0.349	10.28
XBeach _ NH	0.053	0.231	6.45C

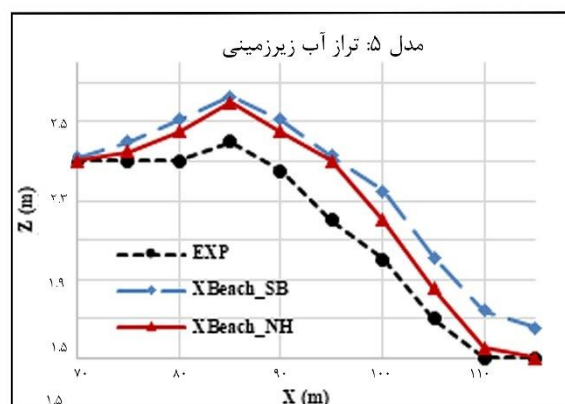


شکل ۱۲- ارزیابی تغییرات سطح آب زیرزمینی_ تست C6

۴- جمع بندی

در این پژوهش به جهت ارزیابی عملکرد مدل XBeach در مدلسازی فرایندهای هیدرودینامیک و مورفودینامیک سواحل مطالعات جامعی با بهره گیری از سه مدل آزمایشگاهی انجام شده است. در هر مدل عددی پس از کالیبراسیون و حساسیت سنجی مدل، عملکرد XBeach براساس نتایج حاصل از مدلسازی با دو ماژول SB و NH نسبت به نتایج حاصل از تست‌های آزمایشگاهی مورد مقایسه و بررسی قرار گرفته است. با ارزیابی نتایج حاصل از مدلسازی عددی آزمایش Demirbilek, 2007 مشخص گردید که در شرایط اعمال باد بر ساحل میزان تغییرات تراز سطح آب در شبیه‌سازی با هر دو ماژول SB, NH دارای دقت قابل قبولی بوده به گونه‌ای که میانگین خطای مدلسازی با هر دو ماژول حدوداً 1% بوده است. همچنین نتایج حاصل نشان داد که در مدلسازی تحت شرایط اعمال موج و اعمال تواما موج و باد ماژول NH دارای عملکرد بهتری نسبت به ماژول SB بوده است. در شرایط اعمال موج خطای مدلسازی با ماژول SB معادل با 4.89% و با ماژول NH معادل با 1.35% بوده است. در شرایط اعمال تواما موج و باد میزان میانگین خطای مدلسازی نسبت به تغییرات تراز سطح آب با ماژول SB معادل با 6.21% و با ماژول NH معادل با 2.44% بوده است.

XBeach _ SB	XBeach _ SB	0.265	12.32
XBeach _ NH	XBeach _ NH	0.180	7.46



شکل ۱۱- ارزیابی تغییرات سطح آب زیرزمینی_ تست C5

در نمودارهای شکل ۲۴ میزان تغییرات تراز آب زیرزمین در تست C5 ارائه شده است. در این شکل گراف مشکی رنگ بیانگر سطح آب زیرزمینی در مدل آزمایشگاهی ماسلینک، گراف آبی رنگ نتیجه حاصل از مدلسازی با ماژول SB و گراف قرمز رنگ بیانگر تراز آب زیرزمینی بر اساس مدلسازی با ماژول NH بوده است. بر اساس نتایج حاصل از شبیه سازی تست C5 (جدول ۱۴) مشخص میگردد که میزان خطای مدلسازی (محاسبه تراز آب زیرزمینی) بر اساس ماژول SB معادل با 7.46% بوده است. در شکل ۲۵ نتایج حاصل از مدلسازی تست C6 بر اساس میزان تغییرات تراز آب زیرزمینی ارائه شده است.

با توجه به نتایج حاصل از مدلسازی تست C6 (جدول ۱۵) مشخص میگردد که میزان خطای مدلسازی تراز آب زیرزمینی بر اساس ماژول SB معادل با 10.28% و بر اساس مدلسازی با ماژول NH معادل با 6.54% بوده است. با ارزیابی نتایج حاصل از مدلسازی دو تست C5 و C6 و بررسی تغییرات تراز آب زیرزمینی مشخص میگردد که ماژول NH دارای دقت بالاتری در محاسبه تراز آب زیرزمینی نسبت به ماژول SB بوده است، نتایج حاصل تایید کننده نقص مدل (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 آزمایشی Masselink, 2012).

با ارزیابی نتایج حاصل از این پژوهش مشخص می‌گردد که مدل کدباز XBeach عملکرد قابل قبولی در مدلسازی فرایندهای هدیدرودینامیک و مورفودینامیک در ناحیه سواش ساحل داشته است، همچنین شبیه‌سازی با ماژول NH نسبت به ماژول SB دارای عملکرد بهتری با توجه به تئوری محاسبات در تجزیه تحلیل امواج بلند و کوتاه بوده است. علاوه بر این مشخص گردید که نقص موجود در مدل XBeach (خطای فازی در هنگام نفوذ /تراوش آب به آبخوان) منجر به گسترش خطای مدلسازی عددی در محاسبه تغییرات پروفیل بستر و تراز سطح آبخوان شده است، این مهم به عنوان یکی از زمینه های تحقیقاتی در راستای توسعه مدل و رفع خطای فازی برای مطالعات آبی پیشنهاد می‌گردد.

۵-۵- فهرست منابع

- [۱] Abdelaal, S., Oumeraci H. (۲۰۱۶). Modelling Strategies with XBeach (XBeach Manual): Breaching of Coastal Barriers under Extreme Storm Surges and Implications for Groundwater Contamination. PhD dissertation, Internal Report No ۱۰۵۸. Leichtweiß-Institute for Hydraulic Engineering and Water Resources. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4199.0644>.
- [۲] Masselink, G., & Russell, P. (۲۰۰۶). Flow velocities, sediment transport and morphological change in the swash zone of two contrasting beaches. *Marine Geology*, ۲۲۷(۳-۴), ۲۲۷-۲۴۰. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2005.11.005>
- [۳] Abdelaal, S., Oumeraci H. (۲۰۱۷). Improvement and Extension of the XBeach Model to Account for New Physical Processes: Breaching of Coastal Barriers under Extreme Storm Surges and Implications for Groundwater Contamination. PhD dissertation, Internal Report No ۱۰۷۳ Leichtweiß-Institute for Hydraulic Engineering and Water Resources.
- [۴] Sungwon Shin, Daniel Cox (۲۰۰۶). Laboratory observations of inner surf and swash-zone hydrodynamics on a steep slope. *Continental Shelf Research* ۲۶ (۲۰۰۶) ۵۶۱-۵۷۳. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2005.10.005>
- [۵] Brocchini, M., & Baldock, T. E. (۲۰۰۸). Recent advances in modeling swash zone dynamics: Influence of surf-swash interaction on nearshore hydrodynamics and morphodynamics. *Reviews of Geophysics*, ۴۶(۳). <https://doi.org/10.1029/2006RG000215>

نتایج حاصل از مدلسازی عددی آزمایشی Zanden, 2016 نشان داد که ماژول NH مدل XBeach دارای عملکرد بهتری نسبت به ماژول SB در مدلسازی تغییرات پروفیل بستر فرسایش پذیر دارا بوده است، به گونه‌ای 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 آزمایشی زاندن با ماژول NH نشان داد که مدل XBeach دارای توانایی بالایی در مدلسازی فرایندهای مورفولوژیک ساحل دارا بوده است.

در این پژوهش مدل سوم آزمایشگاهی که با بهره‌گیری از XBeach مدلسازی عددی گردید، آزمایشی Masselink, 2012 بوده است. این آزمایشات به سبب شرایط خاص مدلسازی (وجود تالاب در پشت ساحل، جریان آب زیرزمینی، تغییرات تراز سطح آبخوان) از اهمیت ویژه‌ای در ارزیابی عملکرد مدل XBeach برخوردار بوده است. در این پژوهش دو مدل آزمایشگاهی (C5, C6) که دارای شرایط خاص مدلسازی میباشد با بهره‌گیری از دو ماژول NH, SB در بستر XBeach مدلسازی عددی شده است. نتایج نشان داد که در هر دو مدل ماژول NH دارای عملکرد بهتری نسبت به ماژول SB در شبیه‌سازی تغییرات پروفیل بستر بوده است به گونه‌ای که میزان خطای مدلسازی با بهره‌گیری از مدل XBeach ماژول SB معادل با ۱۸.۴۵% برای تست C5 و ۱۹.۳۰% برای تست C6 بوده است، در حالیکه میزان خطا با بهره‌گیری از ماژول NH معادل با ۱۱.۷۳% و ۱۱.۴۵% به ترتیب برای تست های C5 و C6 بوده است. براساس نتایج حاصل مشخص میگردد که ماژول NH عملکرد بهتری در مدلسازی مدل آزمایشگاهی Masselink, 2012 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 این پژوهش سطح تراز آب زیرزمینی در دو مدل C5, C6 مورد ارزیابی قرار گرفته و میزان خطای مدلسازی (محاسبه 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 بر اساس ماژول SB معادل با ۱۰.۲۸% و بر اساس مدلسازی با ماژول NH معادل با ۶.۵۴% بوده است.

از اصلیترین نتایج حاصل در این پژوهش تایید نقص مدل XBeach (خطای فازی در هنگام نفوذ /تراوش آب به آبخوان) در شبیه‌سازی فعل-انفعالات بین آب دریا و آبخوان بوده است

- morphological conditions. *Coastal Engineering*, 68, 31-43. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2012.04.008>
- [16] Chen, B. T., Kikkert, G. A., Pokrajac, D., & Dai, H. J. (2016). Experimental study of bore-driven swash-swash interactions on an impermeable rough slope. *Coastal Engineering*, 108, 10-24. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2015.10.010>
- [17] Alsina, J. M., Padilla, E. M., & Cáceres, I. (2016). Sediment transport and beach profile evolution induced by bi-chromatic wave groups with different group periods. *Coastal Engineering*, 114, 325-340. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2016.04.020>
- [18] Shi, F., Kirby, J. T., Harris, J. C., Geiman, J. D., & Grilli, S. T. (2012). A high-order adaptive time-stepping TVD solver for Boussinesq modeling of breaking waves and coastal inundation. *Ocean Modelling*, 43, 36-51. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2011.12.004>
- [19] Zijlema, M., Stelling, G., & Smit, P. (2011). SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters. *Coastal Engineering*, 58(10), 992-1012. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.05.015>
- [20] Rafati, Y., Hsu, T. J., Elgar, S., Raubenheimer, B., Quataert, E., & van Dongeren, A. (2021). Modeling the hydrodynamics and morphodynamics of sandbar migration events. *Coastal Engineering*, 166, 103885. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2021.103885>
- [21] Lesser, G. R., Roelvink, J. V., van Kester, J. T. M., & Stelling, G. S. (2004). Development and validation of a three-dimensional morphological model. *Coastal engineering*, 51(8-9), 883-915. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2004.07.014>
- [22] Warner, J. C., Armstrong, B., He, R., & Zambon, J. B. (2010). Development of a coupled ocean-atmosphere-wave-sediment transport (COAWST) modeling system. *Ocean modelling*, 32(3), 230-244. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2010.07.010>
- [23] Roelvink, D., Reniers, A., Van Dongeren, A. P., De Vries, J. V. T., McCall, R., & Lescinski, J. (2009). Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal engineering*, 56(11-12), 1133-1152. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.08.006>
- [24] Roelvink, D., McCall, R., Mehvar, S., Nederhoff, K., & Dastgheib, A. (2018). Improving predictions of swash dynamics in XBeach: The role of groupiness and
- [6] Chardón-Maldonado, P., Pintado-Patiño, J. C., & Puleo, J. A. (2016). Advances in swash-zone research: Small-scale hydrodynamic and sediment transport processes. *Coastal Engineering*, 114, 8-25. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2015.10.008>
- [7] Larson, M., Kubota, S., & Erikson, L. (2004). Swash-zone sediment transport and foreshore evolution: field experiments and mathematical modeling. *Marine geology*, 212(1-4), 61-79. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2004.08.004>
- [8] Puleo, J. A., Krafft, D., Pintado-Patiño, J. C., & Bruder, B. (2017). Video-derived near bed and sheet flow sediment particle velocities in dam-break-driven swash. *Coastal Engineering*, 126, 27-36. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.04.008>
- [9] Puleo, J. A., Cristaudo, D., Torres-Freyermuth, A., Masselink, G., & Shi, F. (2020). The role of alongshore flows on inner surf and swash zone hydrodynamics on a dissipative beach. *Continental Shelf Research*, 201, 104134. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2020.104134>
- [10] Puleo, J. A., Lanckriet, T. K., & Blenkinsopp, C. (2014). Bed level fluctuations in the inner surf and swash zone of a dissipative beach. *Marine geology*, 349, 99-112. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2014.01.006>
- [11] Van der Zanden, J. et al. (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, p. 47-65. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2015.08.009>
- [12] Heiss j. W., Ulman W.j & Michael H. A., (2014). swash zone moisture dynamics and unsaturated infiltration in two sandy beach aquifers, Estuarine, Coastal and Shelf science. 143(0); p.20-31. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2014.03.015>
- [13] Hughes, M. G., & Moseley, A. S. (2007). Hydrokinematic regions within the swash zone. *Continental Shelf Research*, 27(15), 2000-2013. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2007.04.005>
- [14] Hoecker-Martínez, M. S., & Smyth, W. D. (2012). Trapping of gyrotactic organisms in an unstable shear layer. *Continental Shelf Research*, 32, 8-18. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2012.01.003>
- [15] Alsina, J. M., Cáceres, I., Brocchini, M., & Baldock, T. E. (2012). An experimental study on sediment transport and bed evolution under different swash zone

- Geophysical Research: Oceans*, 122(12), 10099-10117. <https://doi.org/10.1029/2017JC.13274>
- [34] Lashley, C. H., Roelvink, D., van Dongeren, A., Buckley, M. L., & Lowe, R. J. (2018). Nonhydrostatic and surfbeat model predictions of extreme wave run-up in fringing reef environments. *Coastal Engineering*, 137, 11-27. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2018.03.007>
- [35] Klaver, S., Nederhoff, C. M., Giardino, A., Tissier, M. F. S., Van Dongeren, A. R., & 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), 2824-2841. <https://doi.org/10.1029/2018JC.14165>
- [36] Ruffini, G., Briganti, R., Alsina, J. M., Brocchini, M., Dodd, N., & 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), 04019034. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WW.1943-5460.0000532](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000532)
- [37] De Beer, A. F., McCall, R. T., Long, J. W., Tissier, M. F. S., & 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, 103788. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2020.103788>
- [38] Ions, K., Karunarathna, H., Reeve, D. E., & Pender, D. (2021). Gravel barrier beach morphodynamic response to extreme conditions. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(2), 135. <https://doi.org/10.3390/jmse9020135>
- [39] Chen, W., van der Werf, J. J., & Hulscher, S. J. M. H. (2023). A review of practical models of sand transport in the swash zone. *Earth-Science Reviews*, 143555. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104355>
- [40] Larson, M., & Kraus, N. C. (1989). *SBEACH: numerical model for simulating storm-induced beach change. Report 1. Empirical foundation and model development*. Coastal Engineering Research Center Vicksburg Ms.
- [41] Lesser, G. R., Roelvink, J. V., van Kester, J. T. M., & Stelling, G. S. (2004). Development and validation of a three-dimensional morphological model. *Coastal Engineering*, 134, 103-123. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2004.07.004>
- [42] Ruessink, B. G., Kleinhans, M. G., & Van den Beukel, P. G. L. (1998). Observations of swash under highly dissipative conditions. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 103(C2), 3111-3118. <https://doi.org/10.1029/97JC.22911>
- [43] Stockdon, H. F., Thompson, D. M., Plant, N. G., & Long, J. W. (2014). Evaluation of wave runup predictions from numerical and parametric models. *Coastal Engineering*, 92, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2014.06.004>
- [44] Palmsten, M. L., & Splinter, K. D. (2016). Observations and simulations of wave runup during a laboratory dune erosion experiment. *Coastal Engineering*, 115, 58-66. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2016.01.007>
- [45] Cohn, N., & 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, 79-92. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2016.01.006>
- [46] Lerma, A. N., Pedreros, R., Robinet, A., & Sénéchal, N. (2017). Simulating wave setup and runup during storm conditions on a complex barred beach. *Coastal Engineering*, 123, 29-41. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.01.011>
- [47] McCall, R. T., Masselink, G., Poate, T. G., Roelvink, J. A., Almeida, L. P., Davidson, M., & Russell, P. E. (2014). Modelling storm hydrodynamics on gravel beaches with XBeach-G. *Coastal Engineering*, 91, 231-250. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2014.06.007>
- [48] Poate, T. G., McCall, R. T., & Masselink, G. (2016). A new parameterisation for runup on gravel beaches. *Coastal Engineering*, 117, 176-190. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2016.08.002>
- [49] Roelvink, D., McCall, R., Mehvar, S., Nederhoff, K., & Dastgheib, A. (2018). Improving predictions of swash dynamics in XBeach: The role of groupiness and incident-band runup. *Coastal Engineering*, 134, 103-123. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2004.07.004>
- [50] Pearson, S. G., Storlazzi, C. D., Van Dongeren, A. R., Tissier, M. F. S., & Reniers, A. J. H. M. (2017). A Bayesian-based system to assess wave-driven flooding hazards on coral reef-lined coasts. *Journal of*

- [۴۷] Masselink, G., & Turner, I. L. (۲۰۱۲). 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*, ۶۳, ۲۳-۳۸.
<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.12.007>
- [۴۸] Roelvink, D., Reniers, A. J. H. M., Van Dongeren, A., Van Thiel de Vries, J., Lescinski, J., & McCall, R. (۲۰۱۰). XBeach model description and manual. Unesco-IHE Institute for Water Education, Deltares and Delft University of Technology. Report June, ۲۱, ۲۰۱۰.
- [۴۹] McCall, R. T., Masselink, G., Poate, T. G., Roelvink, J. A., Almeida, L. P., Davidson, M., & Russell, P. E. (۲۰۱۴). Modelling storm hydrodynamics on gravel beaches with XBeach-G. *Coastal Engineering*, ۹۱, ۲۳۱-۲۵۰. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2014.06.007>
- [۵۰] Pinault, J., Morichon, D., Delpy, M., & Roeber, V. (۲۰۲۲). Field observations and numerical modeling of swash motions at an engineered embayed beach under moderate to energetic conditions. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, ۲۷۹, ۱۰۸۱۴۳.
<https://doi.org/10.1016/j.ecss.2022.108143>
- [۵۱] Clément, J. B., Sous, D., Bouchette, F., Golay, F., & Ersoy, M. (۲۰۲۳). A Richards' equation-based model for wave-resolving simulation of variably-saturated beach groundwater flow dynamics. *Journal of Hydrology*, ۱۲۹۳۴۴.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129344>
- engineering*, ۵۱(۸-۹), ۸۸۳-۹۱۵.
<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2004.07.014>
- [۴۲] Ruessink, B. G., Kuriyama, Y., Reniers, A. J. H. M., Roelvink, J. A., & Walstra, D. J. R. (۲۰۰۷). Modeling cross-shore sandbar behavior on the timescale of weeks. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 112(F۳).
<https://doi.org/10.1029/2006JF000730>
- [۴۳] Kobayashi, N. (۲۰۰۹). Documentation of cross-shore numerical model CSHORE ۲۰۰۹. Res. Rep. No. CACR-۰۹-۰۶, Center for Applied Coastal Research, Univ. of Delaware, Newark, DE.
- [۴۴] Berard, N. A., Mulligan, R. P., da Silva, A. M. F., & Dibajnia, M. (۲۰۱۷). Evaluation of XBeach performance for the erosion of a laboratory sand dune. *Coastal Engineering*, ۱۲۵; p.۷۰-۸۰.
<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.04.002>
- [۴۵] Demirbilek, Z., Nwogu, O. G., & Ward, D. L. (۲۰۰۷). Laboratory study of wind effect on runup over fringing reefs, Report ۱: data report.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)733-95-X\(1983\)109:4\(380\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)733-95-X(1983)109:4(380))
- [۴۶] van der Zanden, J. (۲۰۱۶). *Sand transport processes in the surf and swash zones*. Enschede, The Netherlands: University of Twente.
<https://doi.org/10.3990/1.97789.36542456>

فهرستهای نشانه