

## مطالعه الگوی جابه‌جایی جریان برگشتی کانالیزه

آزاده ولی‌پور<sup>۱</sup>

a.valipour@yahoo.com

<sup>۱</sup> استادیار، گروه علوم و فنون دریایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد جویبار، جویبار

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۲۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۸/۲۴

### چکیده

جریان‌های برگشتی از مشهودترین عوارض در منطقه خیزاب ساحلی محسوب می‌شوند. این عوارض از خط ساحل به سمت دریا امتداد دارند و دسته‌بندی آن‌ها طبق مکانیزم نیروهای کنترل‌کننده حاکم بر منطقه خیزاب ساحلی است. در این پژوهش، نخست الگویی برای چگونگی نقل مکان کرانه راستای جریان‌های برگشتی کانالیزه با استفاده از نرم‌افزار مایک ۲۱/۳ ارائه شده است. در مرحله بعدی الگوی ارائه‌شده از طریق رابطه سرک (CERC) مورد صحت‌سنجی و تأیید قرار گرفته، سپس نتایج مدل با مشاهدات میدانی سایر محققین از طریق بررسی میانگین نرخ جابه‌جایی جریان برگشتی (V) و سرعت جریان کرانه‌راستا (VI) مورد مقایسه قرار گرفتند که تطابق بسیار خوبی بین آن‌ها وجود داشته است. نتایج اصلی این تحقیق نشان می‌دهد که نقل مکان کرانه راستای جریان‌های برگشتی کانالیزه به شیب بستر و عمق کانال‌های جریان برگشتی وابسته است. نتایج دیگر این تحقیق نیز علت مساعد بودن سواحل با حالت میانه را برای تشکیل این نوع خاص از جریان‌های برگشتی تشریح می‌کند.

**کلمات کلیدی:** جریان برگشتی کانالیزه، منطقه خیزاب ساحلی، جریان کرانه‌راستا، ساحل میانه

### ۱. مقدمه

جریان‌های برگشتی، جریان‌هایی قوی و قارچی شکل در سواحل موج‌چیره هستند که از لحاظ زمانی و مکانی دارای رفتاری متغیرند [۱]. از طرفی این جریان‌ها نقش مهمی را در ایجاد الگوی کلی جریان‌های ساحلی، انتقال رسوب و به‌طور کلی تغییرات حالت ساحل با گذشت زمان ایفا می‌کنند [۲].

این جریان‌ها همچنین عامل اصلی مرگ‌ومیر شناگران و تلفات ناشی از غرق شدن افراد در مناطق ساحلی محسوب می‌شوند [۳-۶]. بنابراین آگاهی و شناخت کامل از انواع مختلف آن‌ها، سیستم شکل‌گیری، تغییرات و نحوه نقل مکان کانال‌ها به منظور کنترل خطرات احتمالی و مدیریت سواحل ضروری به نظر می‌رسد [۷، ۸].

در سال‌های گذشته میزان تحرک و جابه‌جایی این جریان‌ها در سواحل مختلف جهان از سوی محققان در مطالعات

قرار دادند. نتایج مشاهدات این محققان نشان می‌دهد جابه‌جایی جریان‌های برگشتی کانالیزه به تدریج صورت می‌گیرد به طوری که گاهی چندین روز در یک موقعیت ساکن هستند [۱۴]. ولی پور و بیدختی در سال ۲۰۱۷ با توجه به دسته‌بندی کستل ضمن ارائه یک مدل تحلیلی دریافتند ویژگی‌های مورفودینامیکی جریان‌های برگشتی کانالیزه متناسب با شرایط هیدرودینامیکی حاکم بر ساحل متغیر است [۱۵].

ارتباط متقابل میزان جابه‌جایی جریان‌های برگشتی در امتداد ساحل با نوع این جریان‌ها در سایر مطالعات نیز به وضوح قابل رؤیت است. از جمله این پژوهش‌ها می‌توان به تحقیق انجام شده توسط ساندر و همکاران در سال ۲۰۱۸ اشاره کرد که با استفاده از تحلیل داده‌های تصویری و مشاهدات میدانی در یک بازه زمانی مشخص برای تعیین نوع جریان‌های برگشتی در این سواحل انجام گرفت. نتایج نشان داد جریان‌های برگشتی منطقه مورد مطالعه از نوع جریان‌های برگشتی نهشتی و توپوگرافیک هستند و در تمام طول سال و به صورت روزانه در حال شکل‌گیری هستند [۱۶]. پژوهش حاضر روی تعیین پارامترهای مؤثر بر نحوه نقل مکان نوع خاصی از این جریان‌ها به نام جریان‌های برگشتی کانالیزه متمرکز شده است که اغلب در سواحل با حالت میانه<sup>۸</sup> شکل می‌گیرند. نقل مکان این نوع خاص از جریان‌های برگشتی به صورت روزانه، هفتگی و گاهی ماهانه در امتداد ساحل است (شکل ۱).

سواحل میانه سواحل هستند که در حد وسط بین سواحل پراکنا<sup>۹</sup> با انرژی بالا و سواحل بازتابان<sup>۱۰</sup> با انرژی پایین تر قرار دارند. این مطلب باعث ایجاد شرایط گسترده‌ای از لحاظ ویژگی مورفودینامیکی با حضور امواج متوسط تا بلند (۰/۵ تا ۲/۵ متر) و رسوباتی از ماسه ریز تا متوسط در این سواحل می‌شوند. از ویژگی‌های برجسته سواحل میانه، منطقه خیزاب ساحلی<sup>۱۱</sup> تکه تکه، با سدهای رسوبی<sup>۱۲</sup> و جریان‌های برگشتی است و به دلیل شیب نسبتاً تند منطقه نزدیک به ساحل، امواج روی پشته‌های بستر در این نوع سواحل اغلب به صورت امواج شکنای چرخان<sup>۱۳</sup> می‌شکنند [۱۷].

میدانی به طور آماری از طریق اندازه‌گیری جریان و مطالعه طیف امواج مورد بررسی قرار گرفته است [۹، ۱۰].

از جمله این محققان وودس است که از داده‌های تصویری در خلیج مونتروی برای مطالعه تغییر مکان جریان‌های برگشتی و از داده‌های موج برای محاسبه نرخ انتقال رسوب کرانه‌راستا<sup>۱</sup> استفاده کرد، سپس به مطالعه برهمکنش بین کانال‌های جریان و کومه‌های هلالی خط ساحل در یک دوره یک‌ساله پرداخت. نتایج مطالعات وی حاکی از آن است که میزان جابه‌جایی کانال‌های جریان در شرایطی که نرخ انتقال رسوب کرانه راستا نزدیک به صفر است، بسیار اندک و کانال‌های جریان هیچ تحرکی ندارند [۱۱].

در همین راستا آرزج و همکاران در سال ۲۰۱۰ رابطه بین جابه‌جایی کرانه‌راستای کانال‌ها و انتقال رسوب را در سیستم جریان‌های برگشتی با استفاده از تصاویر ویدیویی در یک دوره سه ساله در خلیج مونتروی کالیفرنیا مورد بررسی قرار دادند و ضمن محاسبه نرخ انتقال رسوب کرانه‌راستا به نتایج تقریباً مشابهی دست یافتند [۱۲].

سرانجام کستل و همکاران در سال ۲۰۱۶ انواع سیستم‌های جریان برگشتی را با توجه به مکانیزم نیروهای کنترل‌کننده حاکم بر این جریان‌ها به شش گروه اصلی دسته‌بندی کردند [۱۳] که عبارت‌اند از: جریان‌های برگشتی ناپایدار برشی<sup>۲</sup>، جریان‌های برگشتی سریع<sup>۳</sup> یا گذرا، جریان‌های برگشتی کانالیزه<sup>۴</sup>، جریان‌های برگشتی متمرکز<sup>۵</sup>، جریان‌های برگشتی انحرافی<sup>۶</sup>، جریان‌های برگشتی سایه‌ای<sup>۷</sup>.

با توجه به مکانیزم‌های متفاوت حاکم بر هر کدام از انواع این جریان‌ها در شرایط هیدرودینامیکی و مورفودینامیکی مختلف حاکم بر ساحل، مطالعه رفتار هر کدام از انواع مختلف این جریان‌ها به طور جداگانه ضروری به نظر می‌رسد. چنانچه بناسیا و همکاران در سال ۲۰۱۷ با استفاده از تحلیل داده‌های آزمایشگاهی و مطالعات عددی، همچنین از طریق مقایسه تصاویر گوگل ارس، رفتار جریان‌های برگشتی کانالیزه و میزان جابه‌جایی آن‌ها را در سواحل ایتالیا برای تعیین و پیش‌بینی مناطق خطر ساز برای شناگران مورد پایش

نهایت نتایج به‌صورت الگوی جابه‌جایی کانال‌های جریان برگشتی ارائه شده است.

## ۲. مواد و روش کار

### ۲-۱. معرفی نرم‌افزار و شرایط اولیه و مرزی

برای دستیابی به اهداف پژوهش از نرم‌افزار مدل‌سازی Mike ۲۱ که توسط انستیتو هیدرولیک دانمارک با همکاری انستیتوی کیفیت آب<sup>۱۵</sup> پایه‌ریزی و توسعه یافته است، استفاده شده است. این نرم‌افزار قابلیت‌های محاسباتی و گرافیکی بالایی در زمینه مدل کردن فرایندهای پیچیده ساحلی در نواحی کم‌عمق، خلیج‌ها و دریاها دارد. مدول مورد استفاده در این تحقیق، مدول Coupled از بسته نرم‌افزاری Mike ۲۱/۳ است که یک سیستم مدل‌سازی دینامیکی برای کاربردهای ساحلی در مصب‌ها و محیط‌های رودخانه‌ای است. از میان مدول‌های مختلف موجود برای شبیه‌سازی پدیده جریان برگشتی از زیرمدول‌های هیدرودینامیکی (HD)، انتقال ماسه (ST) و مدول طیفی موج (SW) استفاده شده است. در واقع این نرم‌افزار روشی برای تحلیل برهمکنش متقابل بین امواج و جریان‌ها با استفاده از یک جفت‌شدگی دینامیکی بین مدول HD و SW ارائه می‌دهد. همچنین از طریق ایجاد یک جفت‌شدگی بین مدول‌های ST، HD و SW قادر به مدل‌سازی نحوه بازخورد کامل بین تغییرات تراز بستر در اثر گردش‌های ناشی از موج است [۱۹].

برای اعمال شرایط اولیه و مرزی در مدل، نخست منطقه مستطیل شکلی در نظر گرفته شد، سپس در این منطقه مرز سمت راست (سمت ساحل)، مرز باز و سمت دور از ساحل (سمت چپ)، بالا و پایین حوضچه، مرز بسته لحاظ شده است.

در مدول HD شرایط اولیه به‌صورت ثابت در نظر گرفته شده است و سرعت‌های موازی و عمود بر ساحل در شرایط اولیه صفر لحاظ شده است. توصیف ترازهای آب در مرزهای باز یا شرایط مرزی از اهمیت خاصی برای حصول نتایج بهتر برخوردار است. در این مدول از شرط مرزی Land(Zero normal velocity) استفاده شده که مطابق این شرط مرزی

در این نوع از سواحل پارامتر بی‌بعد سرعت ته‌نشینی در محدوده خاصی به‌صورت  $\Omega = \frac{H_b}{W_s T} < 1$  تعریف می‌شود [۱۸]. در این رابطه  $H_b$  ارتفاع موج شکنا و  $W_s$  سرعت ته‌نشینی رسوبات و  $T$  پررود موج غالب است.



شکل ۱. نمایی از جریان‌های برگشتی کانالیزه در سواحل میانه

به‌منظور دستیابی به اهداف تحقیق ضمن مدل‌سازی سیستم بستر در سواحل میانه با استفاده از نرم‌افزار Mike ۲۱/۳، الگوی نقل مکان جریان‌های برگشتی کانالیزه در هجوم امواج عمود بر ساحل مورد بررسی قرار گرفته و دلایل مستعد بودن سواحل میانه با شیبی ملایم برای تشکیل این جریان‌ها مورد مطالعه واقع شده است، سپس با استفاده از یک روش تحلیلی که بر اساس روابط سرک<sup>۱۴</sup> بنا شده، نتایج مدل عددی مورد بررسی قرار گرفته است.

این تحقیق شامل بخش‌های مختلف است. در بخش اول ضمن معرفی جریان‌های برگشتی کانالیزه و سواحل میانه، تحقیقات مرتبط گذشته مورد بحث و بررسی واقع شده است. در بخش دوم به معرفی نرم‌افزار مورد استفاده پرداخته شده و شرایط اولیه و مرزی حاکم بر مدل تحلیل شده است، سپس نحوه اجرای مدل عددی و تحلیلی با توجه به نوع ساحل مورد بحث واقع شده است. در بخش سوم نتایج همانندسازی عددی و مدل تحلیلی در قالب ارائه نمودارهای تراز بستر و سرعت جریان برگشتی ضمن مطالعه تغییرات شیب لبه کانال‌های جریان مورد ارزیابی قرار گرفته، سپس ضمن مقایسه نتایج با مطالعات میدانی، الگوی ارائه‌شده از طریق رابطه سرک مورد صحت‌سنجی و تأیید قرار گرفته و در

مقاومت بستر (عدد مانینگ) و ویسکوزیته گردابه‌ای هستند. ضمن اینکه انتخاب مقدار مناسب برای عدد کورانت به عنوان معیار پایداری مدل ضروری است. طبق جدول ۱ هر کدام از پارامترها محدوده پیشنهادی خاصی از طرف مدل دارند.

جدول ۱. نتایج تحلیل حساسیت پارامترهای مدل

عدد انتخابی	حدود تغییرات مدل	پارامتر تحلیل حساسیت مدل
$۳۲ \frac{m^{1/3}}{s}$	$۲۰ \frac{m^{1/3}}{s} - ۴۰ \frac{m^{1/3}}{s}$	عدد مانینگ
$۰/۲۸ m^2/s$	$-۱ m^2/s - ۰/۲۵ m^2/s$	ضریب ویسکوزیته گردابه‌ای
$۰/۸$	حداکثر ۱	عدد کورانت

عدد کورانت در حل عددی برای معادله‌های آب کم عمق در مختصات دکارتی به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$CFL = (\sqrt{gh} + |u|) \frac{\Delta t}{\Delta x} + (\sqrt{gh} + |v|) \frac{\Delta t}{\Delta y}$$

در این رابطه  $h$  عمق،  $u$  و  $v$  مؤلفه‌های سرعت در جهت  $\Delta x$  و  $\Delta y$ ،  $g$  شتاب گرانشی،  $\Delta x$  و  $\Delta y$  مشخصه‌های مقیاس طول در جهت  $x$  و  $y$  و  $\Delta t$  گام زمانی است. مشخصه‌های مقیاس طول  $\Delta x$  و  $\Delta y$  بر اساس حداقل طول ضلع هر المان و عمق آب و مؤلفه‌های سرعت در مرکز المان‌ها برآورد می‌شود.

حل عددی زمانی پایدار است که عدد کورانت کمتر از ۱ باشد؛ بنابراین به منظور به حداقل رساندن مشکلات ناپایداری مدل بهتر است که در مدل‌سازی مقدار بحرانی عدد کورانت به عدد کمتر از یک کاهش یابد. راهنمای نرم‌افزار مقدار بحرانی عدد کورانت را  $۰/۸$  پیشنهاد می‌دهد [۱۹]. بر اساس نتایج تحقیقات گذشته انجام شده توسط محقق در مورد جریان‌های برگشتی در مناطق کم عمق ساحلی می‌توان اذعان داشت که مدل نسبت به اعداد کورانت کمتر از یک حساسیت ندارد [۱۵]. بنابراین مقدار پیشنهادی با راهنمای نرم‌افزار، مبنای محاسبات در مدل‌سازی قرار گرفت. البته لازم به یادآوری است در صورتی که مقدار عدد کورانت در هنگام اجرای مدل از حد معقول تجاوز کند، نتیجه به صورت خطا در اجرای مدل گوشزد خواهد شد.

غزشی، مؤلفه عمودی سرعت در این سه مرز صفر در نظر گرفته شده است.

در مدل ST تأثیر امواج بعد از محاسبات در مدل SW روی این مدل اعمال می‌شود و در هر کدام از مرزها تغییرات شار رسوب صفر است و شرط مرزی Zero sediment flux به کار برده شده است. در مدل SW شرایط اولیه به صورت Zero spectra است. در این شرایط در حالت اولیه اجرای مدل رفتار موج در همه نقاط گره صفر در نظر گرفته شده است.

در این مدل در مرز سمت دریا (سمت چپ)، امواج فرودی متناسب با هر اجرا در مدل در نظر گرفته شده و مرزهای جانبی (بالا و پایین) از نوع Lateral boundary در نظر گرفته شده‌اند که استفاده از این نوع شرط مرزی برای حالتی که خط مرزی تقریباً مستقیم است و خطوط هم عمق تقریباً عمود بر این خط مرزی هستند، مناسب است.

## ۲-۲. تحلیل حساسیت و پایداری مدل

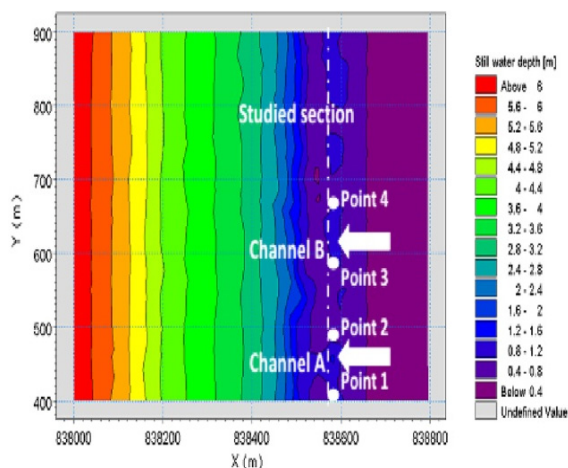
تحلیل حساسیت در مدل‌سازی اغلب به منظور سنجش میزان حساسیت مدل نسبت به تغییر مقادیر ضرایب ورودی و در واقع به منظور اجرای مدل با دقت بیشتر انجام می‌گیرد. این کار به طور کلی نشان می‌دهد که کدام یک از ضرایب ورودی بیشترین تأثیر را بر تغییرات نتایج خروجی دارد. اغلب برای صحت‌سنجی مدل‌های عددی، مدل مورد مطالعه با توجه به اطلاعات موجود برای حالتی خاص تهیه و اجرا می‌شود و پس از تحلیل حساسیت پارامترهای گوناگون آن و نزدیک شدن نتایج به واقعیت، مدل برای شرایط دیگری اجرا و نتایج حاصل با اطلاعات میدانی موجود در این حالت مقایسه و دقت یا کمبود دقت مدل تعیین می‌شود. در این پژوهش به دلیل کمبود اطلاعات میدانی منطبق با شرایط مدل، به منظور تحلیل حساسیت مدل به پارامترهای مؤثر، صحت‌سنجی انجام شده از طریق مقایسه با سایر مطالعات مرتبط انجام شده توسط محقق، سایر محققان، همچنین بررسی مقادیر پیشنهادی از طرف مدل است. طبق تحقیقات گذشته پارامترهایی که بیشترین تأثیر را در نتایج مدل‌سازی دارد

### ۲-۳. نحوه اجرای مدل عددی و روش تحلیلی

طولی ساحل با استفاده از همانندسازی عددی در محیط نرم افزار Mike ۲۱/۳ بررسی شد.

درواقع از طریق بررسی نمودار تغییرات تراز بستر در مقطع طولی و سرعت جریان در کانال‌ها به‌طور هم‌زمان می‌توان میزان نقل مکان کانال‌ها را با گذشت زمان زیر نظر گرفت.

برای دستیابی به اهداف تحقیق پس از بررسی نمودارهای کرانه‌راستی تراز بستر و سرعت جریان عمود بر ساحل به‌طور مداوم شیب لبه کانال‌های جریان محاسبه شد. سپس میزان و زمان شروع و پایان فرسایش و رسوب‌گذاری در لبه کانال‌ها از طریق رسم نمودارهای مرتبط با هر اجرا مورد ارزیابی قرار گرفت.



شکل ۲. موقعیت کانال‌ها و نقاط مورد بررسی در مدل

از سوی دیگر یک روش تحلیلی در قالب رابطه سرک طبق شرایط حاکم بر منطقه خیزاب ساحلی مورد بررسی واقع شد و میزان شیب بحرانی برای رسیدن لبه کانال‌ها به رسوب‌گذاری و توقف آن با روش تحلیلی برآورد شد، سپس با نتایج همانندسازی عددی مورد مقایسه قرار گرفت. به این ترتیب نتایج همانندسازی عددی در مورد شرط لازم برای نقل مکان کانال‌های ایجادشده مورد تأیید قرار گرفت.

در انتها نتایج کلی با نتایج میدانی به دست آمده توسط وودس، هولمن، آرزچ از طریق مقایسه میانگین نرخ نقل مکان کانال‌ها با سرعت جریان کرانه‌راستا مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت [۱۲، ۱۱، ۹] (شکل ۳).

مطالعات مربوط به همانندسازی عددی در این پژوهش در دو مرحله انجام گرفته است. در مرحله نخست ساحلی مسطح (حالت پراکنا) با ابعاد  $1500m \times 700m$  به مدت ۲ ماه در معرض هجوم امواج  $1/5$  متری قرار گرفت. با گذشت زمان پس از تغییر حالت ساحل به حالت دریاکنار و سد رسوبی موزون<sup>۱۶</sup>، کانال‌های جریان برگشتی پدیدار شدند. در این مرحله پس از شناسایی دقیق موقعیت کانال‌ها، یک مقطع طولی مناسب ( $x=838550m$ ) طوری انتخاب شد که از قله سد رسوبی و از میان کانال‌های جریان عبور کند (شکل ۲).

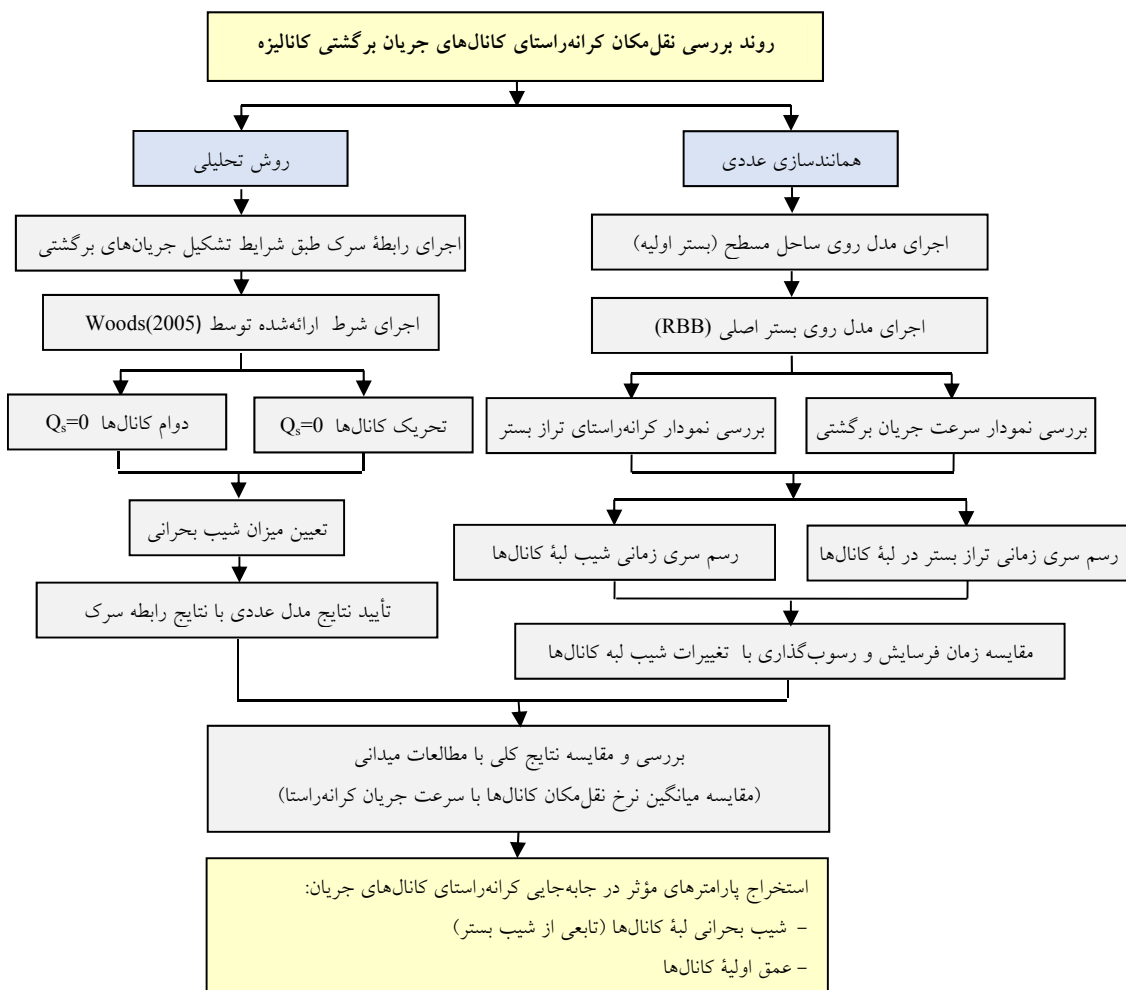
از آن جا که لازمه شکل‌گیری سواحل میانه برقراری شرایط خاصی در ساحل از لحاظ دینامیک امواج و مورفولوژی بستر است، بنابراین در مرحله بعدی بستر ایجادشده به عنوان بستر اولیه به مدت یک ماه در معرض هجوم امواجی با ویژگی‌های مختلف، متناسب با شرایط لازم برای شکل‌گیری این سواحل قرار گرفت. به طوری که انتخاب اعداد و مقادیر اعمال‌شده در جدول ۲ بر اساس نتایج و بررسی‌های میدانی ثبت‌شده توسط محققان در مورد ویژگی‌های سواحل میانه است [۱۷].

لازم به ذکر است اطلاعات موجود در جدول ۱ به دو دسته اطلاعات مربوط به امواج (شامل ارتفاع  $H(m)$  و پریود موج  $T(s)$ ) و اطلاعات مربوط به بستر (شامل قطر ذرات رسوبی  $d_{50}(mm)$ ، ضریب اصطکاک بستر  $Cf(m)$  و شیب ساحل  $\tan\theta$ ) تقسیم می‌شود.

به منظور دستیابی به اهداف تحقیق در هر یک از حالت‌های اعمال‌شده به مدل شامل ( $B5$  و  $B4$ ،  $B3$ ،  $W2$ ،  $W1$ ) یکی از پارامترها به صورت متغیر در نظر گرفته شده است تا از این طریق تأثیر تغییر این پارامتر بر نحوه جابه‌جایی کانال‌های جریان برگشتی مورد ارزیابی قرار گیرد. به‌طور مثال در حالت  $W1$  پارامتر متغیر ارتفاع موج است؛ بنابراین مدل در این حالت برای سه ارتفاع متغیر  $1m$ ،  $1/5m$  و  $2/2m$  اجرا شد و نتایج مورد بررسی قرار گرفت. در گام بعدی الگوی نقل مکان کانال‌های جریان برگشتی از طریق مقایسه نمودارهای سری زمانی تراز بستر و سرعت جریان در مقطع

جدول ۲. مقادیر پارامترهای مختلف موج و بستر در مدل

حالت	شرایط متغیر	H(m)	T(s)	d <sub>50</sub> (mm)	Cf(m)	tanθ
<b>شرایط امواج</b>						
W1	ارتفاع موج	۲/۲m، ۱/۵m، ۱m	Δs	۰/۲mm	۰/۰۴	۰/۰۰۷۵
W2	پریود موج	۱/۵m	۹s، ۷s، Δs	۰/۲mm	۰/۰۴	۰/۰۰۷۵
<b>شرایط بستر</b>						
B3	اندازه رسوبات بستر	۱/۵m	Δs	۰/۱mm، ۰/۲mm	۰/۰۴	۰/۰۰۷۵
B4	ضریب اصطکاک بستر	۱/۵m	Δs	۰/۲mm	۰/۰۴، ۰/۰۲	۰/۰۰۷۵
B5	شیب بستر	۱/۵m	Δs	۰/۲mm	۰/۰۴	۰/۰۱، ۰/۰۰۷۵



شکل ۳. دیاگرام مربوط به روش کار در ارزیابی نحوه نقل مکان کرانه راستای جریان برگشتی کانالیزه

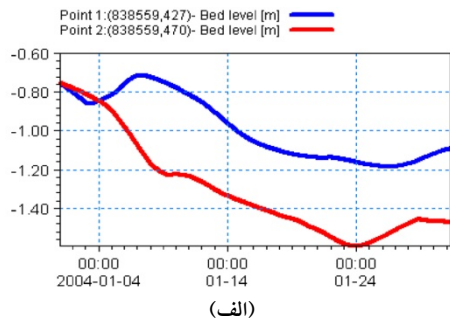
### ۳. نتایج و بحث

#### ۳-۱. همانندسازی عددی

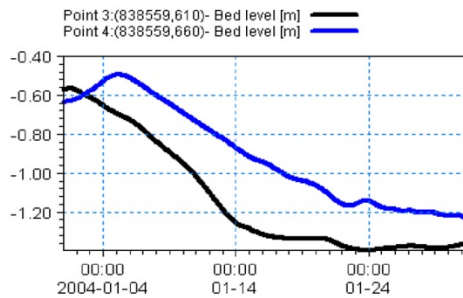
آشکار است با عبور امواج از کانال به سمت ساحل و بازگشت آن‌ها در قالب جریان‌های برگشتی به سمت دریا بر اثر فرسایش رسوبات و گاهی رسوب گذاری در لبه کانال‌ها با گذشت زمان شیب لبه کانال‌ها مدام در حال تغییر است.

نتایج همانندسازی عددی به صورت الگوی جریان و تراز بستر، برای همه اجراهای جدول ۱، تغییرات زمانی مورفولوژیکی کانال‌های جریان برگشتی کانالیزه را با گذشت زمان نشان می‌دهد (شکل ۴ و ۵). همان‌طور که در نتایج مدل

رسوب گذاری افزایش می‌یابد میزان تحرک پذیری کانال در جهت مقابل نیز افزایش می‌یابد. بنابراین جابه‌جایی در یک جهت خاص منوط به دوام لبه کانال در شرایط رسوب گذاری است. لازم به ذکر است نتیجه اجرای مدل برای کلیه حالت‌های بیان شده در جدول (۲) دقیقه الگوی مشابهی از نقل مکان کانال‌ها ارائه داده است.



(الف)

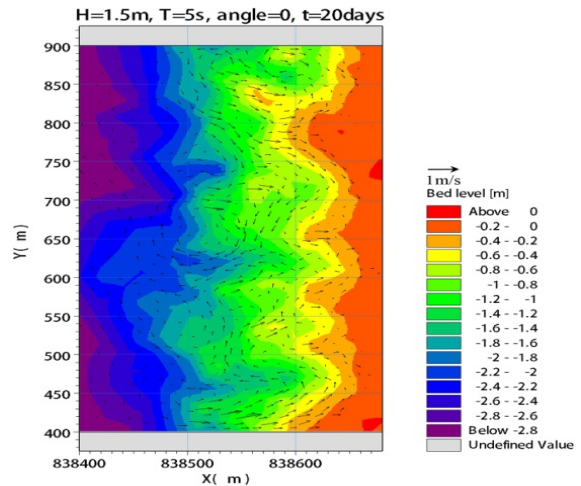


(ب)

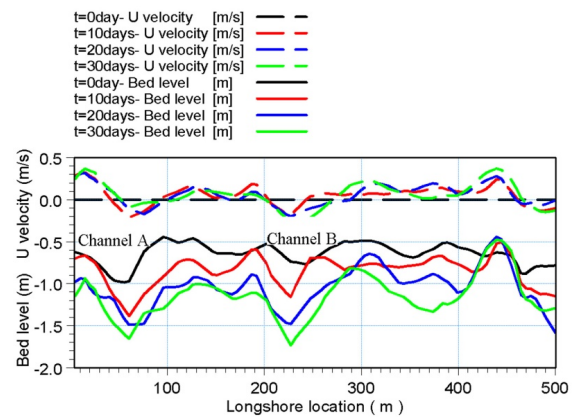
شکل ۶. (الف) سری زمانی تراز بستر در حالت W1 پس از گذشت یک ماه در لبه کانال‌ها (الف) کانال A (ب) کانال B ( $\tan\theta=0/0.075$ )

مقایسه شیب لبه کانال‌های A و B طبق شکل (۷) همچنین گویای آن است که لبه‌های کانال A به مدت طولانی تری در شرایط رسوب گذاری به سر برده‌اند؛ بنابراین همان‌طور که شکل مربوط به تراز بستر و سرعت جریان برگشتی در شکل (۵) نشان می‌دهد کانال A با عمق بیشتر در مدت یک ماه جابه‌جایی بیشتری نسبت به کانال B با عمق کمتر دارد.

در مرحله بعدی به منظور مطالعه نقش شیب بستر در میزان نقل مکان کانال‌های جریان برگشتی، مقایسه‌ها در دو شیب مختلف  $0/0.12$  و  $0/0.075$  مطابق حالت B5 انجام شد. همان‌طور که شکل (۸) نشان می‌دهد در حالتی که شیب بستر افزایش می‌یابد (شیب  $0/0.12$ ) کانال B که از ابتدا کانالی با عمق کمتر نسبت به کانال A بوده بعد از گذشت یک ماه به‌طور کلی با رسوبات پر شده و حذف می‌شود به عبارت دیگر



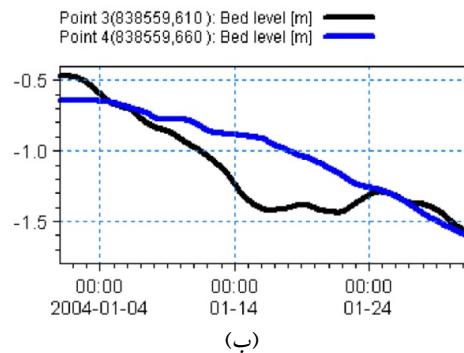
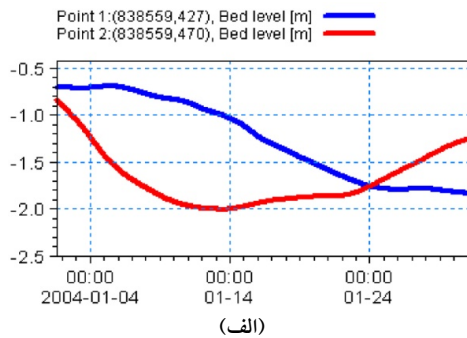
شکل ۴. الگوی جریان و تراز بستر بعد از گذشت ۲۰ روز



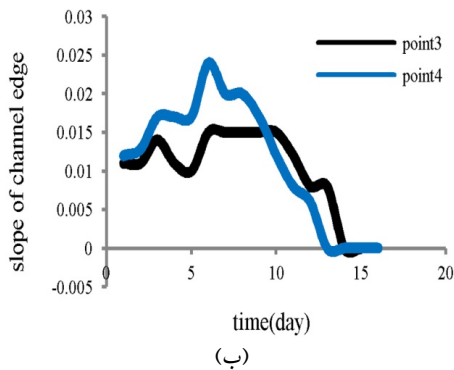
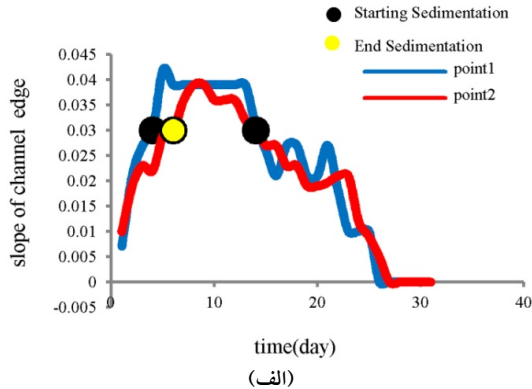
شکل ۵. تغییرات سرعت جریان عمود بر ساحل و تراز بستر در حالت W1 در مقطع مورد مطالعه ( $\tan\theta=0/0.075, x=838550m$ ) در زمان‌های مختلف

سری زمانی تراز بستر در اجرای W1 برای امواجی به ارتفاع یک‌ونیم متر در لبه کانال‌ها، زمان دقیق فرسایش و رسوب گذاری لبه کانال‌ها را نشان می‌دهد (شکل ۶). بررسی و مقایسه سری زمانی تراز بستر و تغییرات شیب لبه کانال‌های A و B با گذشت زمان مطابق شکل‌های ۶ و ۷ نشان می‌دهد که هنگامی که شیب هر یک از لبه‌های کانال جریان برگشتی به شیب بحرانی ساحل معادل  $0/0.18$  که دو و نیم برابر شیب عمومی بستر است برسد، رسوب گذاری در آن لبه کانال آغاز (کانال A روز سوم) و تا رسیدن لبه مقابل به شیب بحرانی ادامه می‌یابد (روز هشتم) و شکل (۵) نشان می‌دهد هم‌زمان با آغاز رسوب گذاری، کانال A در جهت مقابل و در واقع در جهت انتقال رسوب کرانه‌راستا حرکت می‌کند. همچنین بررسی و مقایسه قسمت‌های مختلف شکل (۶) با شکل (۵) گویای آن است که هرچه بازه زمانی بین شروع و پایان

که مقایسه نمودار تراز بستر در دو شیب مختلف مطابق شکل (۸) صحت این مطلب را تأیید می‌کند.

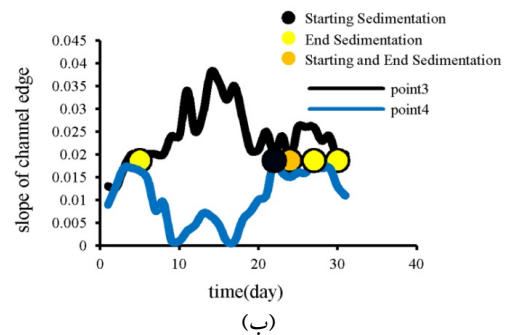
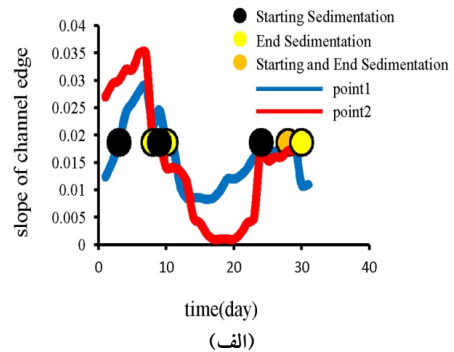


شکل ۹. الف) سری زمانی تراز بستر در حالت B5 پس از گذشت یک ماه در لبه کانال‌ها الف) کانال A ب) کانال B ( $\tan\theta=0/075$ )

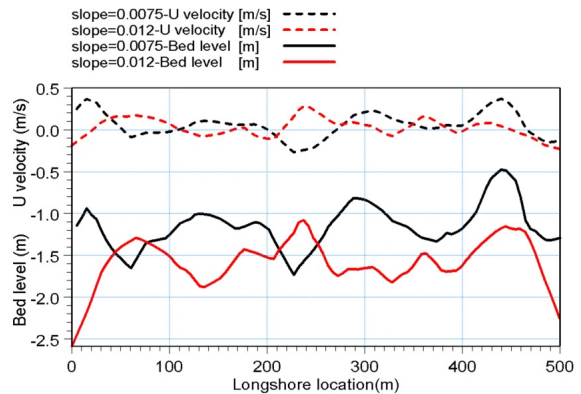


شکل ۱۰. الف) تغییرات زمانی شیب بستر در حالت B5 مؤید زمان آغاز و پایان رسوب گذاری در لبه کانال‌ها الف) کانال A ب) کانال B ( $\tan\theta=0/012$ )

قبل از اینکه لبه‌های کانال جریان فرصت تغییر شیب بر اثر فرسایش و رسوب گذاری ناشی از عبور جریان را بیابند کانال B با رسوبات مسدود و حذف می‌شود.



شکل ۷. الف) تغییرات زمانی شیب بستر در حالت W1 مؤید زمان آغاز و پایان رسوب گذاری در لبه کانال‌ها الف) کانال A ب) کانال B ( $\tan\theta=0/075$ ) نقاط نارنجی زمان شروع و پایان رسوب گذاری را به طور هم‌زمان نشان می‌دهند.



شکل ۸. نمودار سرعت جریان عمود بر ساحل و تراز بستر در حالت B5 در مقطع مورد مطالعه ( $x=838550m$ ) در شیب‌های مختلف بستر پس از گذشت یک ماه

مقایسه شکل‌های (۹) و (۱۰) نشان می‌دهد که بازه زمانی رسوب گذاری در کانال A در شیب بیشتر یعنی هنگامی که شیب بستر ۰/۰۱۲ است به مراتب کاهش می‌یابد؛ بنابراین انتظار می‌رود میزان تحرک کانال به همان نسبت کاهش یابد



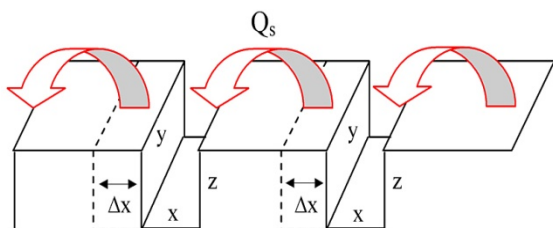
## ۳-۲. مدل تحلیلی

$$\frac{\partial z}{\partial x} = 2\beta \frac{k_1}{k_2} \sin \phi_b$$

حال در صورت هجوم امواج عمود بر ساحل که یکی از فاکتورهای اصلی برای وقوع جریان‌های برگشتی در ساحل است، تغییرات عمق کانال در امتداد ساحل به صورت

$$\frac{\partial z}{\partial x} = 2\beta \frac{k_1}{k_2}$$

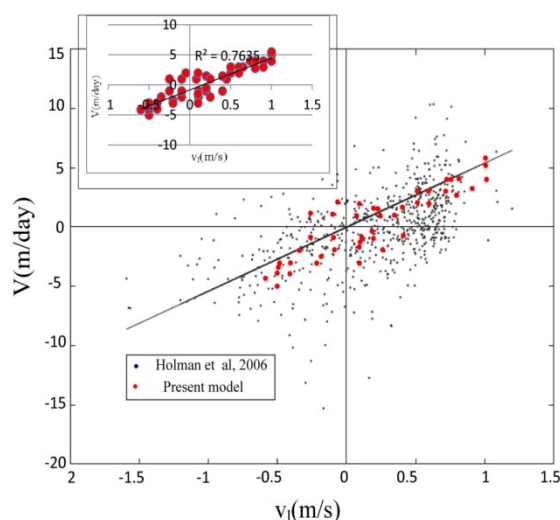
تعریف می‌شود.



شکل ۱۱. نمایش چگونگی انتقال رسوب کرانه‌راستا

از طرفی با توجه به مقادیر تجربی  $k_1$  و  $k_2$  می‌توان این‌طور نتیجه گرفت که  $\partial z / \partial x \cong 2.5\beta$  است. بنابراین با استفاده از روابط سرک با توجه به شرط نقل مکان ارائه شده توسط وودس که از مطالعات میدانی حاصل شده است، نتایج مدل عددی مورد صحت‌سنجی و تأیید قرار گرفت [۱۱].

از طرف دیگر تطابق قابل توجه نتایج مدل با مطالعات میدانی هولمن و همکاران از طریق مقایسه میانگین نرخ تحرک پذیری کانال‌های جریان ( $V$ ) و سرعت جریان کرانه‌راستا ( $V_1$ ) در شکل (۱۲) کاملاً مشهود است [۹].



شکل ۱۲. مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از مشاهدات میدانی هولمن [۹] و همکاران با نتایج همانندسازی عددی

بر اساس نتایج تحقیقات میدانی وودس و آرزچ تحرک کانال‌های جریان برگشتی بر اثر انتقال رسوب کرانه‌راستا [۱۱-۱۲]. از طرفی دیگر طبق رابطه تجربی سرک که توسط ارتش آمریکا<sup>۱۴</sup> ارائه شد، انتقال رسوب کرانه‌راستا ( $Q_s$ ) با رابطه  $Q_s = Q_1 + Q_2$  تعریف می‌شود. که در این رابطه  $Q_1$  به صورت زیر بیان می‌شود:

$$Q_1 = K_1 a_1 H_b^{\frac{5}{2}} \sin(2\phi_b) \quad (1)$$

در این رابطه  $k_1$  یک ثابت تجربی،  $H_b$  جزر میانگین مربع ارتفاع موج ( $H_{rms}$ ) در نقطه شکست،  $\phi_b$  زاویه نسبی بین خط ساحل و قله موج در نقطه شکست است و ثابت  $a_1$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$a_1 = \frac{1}{16 \left( \frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) (1 - \rho)} \quad (2)$$

در این رابطه  $\rho_s$  چگالی ماسه،  $\rho$  چگالی آب است.

هنگامی که ارتفاع موج تغییرات شدیدی در امتداد ساحل داشته باشد، در این صورت جمله دوم  $Q_2$  به معادله شماره (۱) اضافه می‌شود:

$$Q_2 = -\frac{K_2 a_2 H_b^{\frac{5}{2}} \cos(\phi_b)}{\beta} \frac{\partial H_b}{\partial x} \quad (3)$$

در این رابطه  $k_2$  یک ثابت تجربی،  $\beta$  شیب ساحل،  $x$  نشان‌دهنده جهت کرانه‌راستا [۲۳-۲۰].

حال طبق نتایج وودس (۲۰۰۵) تا زمانی که انتقال رسوب کرانه‌راستا مخالف صفر است ( $Q_s \neq 0$ ) تحرک کانال‌های جریان ادامه خواهد داشت و زمانی که برابر با صفر می‌شود ( $Q_s = 0$ ) جابه‌جایی متوقف خواهد شد که در این شرایط اگر  $Q_s$  به‌دست آمده از معادله سرک را طبق رابطه‌های بالا برابر صفر قرار دهیم آنگاه  $Q_1 = -Q_2$  و با توجه به این مطلب که  $a_2 = 2a_1$ ، بنابراین خواهیم داشت:

$$\frac{\partial H_b}{\partial x} = 2\beta \frac{k_1}{k_2} \sin \phi_b \quad (4)$$

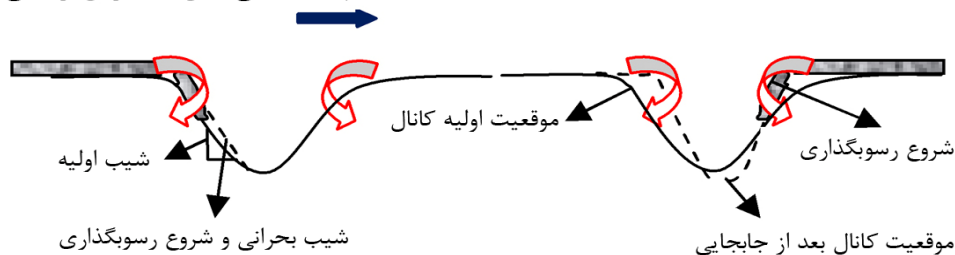
از آنجا که در نقطه شکست به عبارت دیگر روی سد رسوبی ارتفاع شکست معادل  $H_b = \gamma d_b \cong z$  است، با توجه به شکل ۱۱ خواهیم داشت.

## ۴. نتیجه گیری

نتایج همانندسازی عددی به دست آمده از این پژوهش که در دو مرحله انجام شده تغییرات حالت ساحل را از حالت پراکنا به حالت دریا کنار و سد رسوبی موزون که یکی از زیر بخش های سواحل میانه است، نشان می دهد. به این ترتیب چگونگی جابه جایی جریان های برگشتی کانالیزه در امتداد ساحل، در سواحل میانه از طریق بررسی روند فرسایش و رسوب گذاری در لبه کانال های جریان مورد ارزیابی قرار می گیرد. در مرحله نخست که ساحل به صورت مسطح با شیب ملایم (حالت پراکنا) در نظر گرفته شده به تدریج با نزدیک شدن امواج فرودی به ساحل با کاهش عمق در منطقه نزدیک ساحل، امواج انرژی خود را از دست می دهند. در این هنگام طبق نتایج مدل عددی، جریان های تند برگشتی بستر در بازگشت، عامل انتقال رسوب صورت ساحل به سمت دریا و تشکیل سد رسوبی موازی با ساحل خواهند بود. در این مرحله با دوام شرایط هیدرودینامیکی، پس از اینکه ساحل به مدت ۲ ماه در معرض هجوم امواج ۱/۵ متری قرار گرفت، به تدریج وارد حالت دریا کنار و سد رسوبی موزون می شود در این هنگام امواج شکنای چرخان در سرتاسر بخش های کم عمق سد رسوبی می شکنند و به سرعت در مواجهه با سد رسوبی به بخش های عمیق تر حرکت می کنند و در بازگشت به سمت دریا جریان های برگشتی کانالیزه را شکل می دهند. نتایج مدل عددی از طریق بررسی نمودار تغییرات تراز بستر و سرعت جریان در مقطع طولی مناسب در امتداد ساحل، مکان دقیق کانال های جریان را نشان می دهد. در این شرایط با عبور جریان آب از طریق کانال های جریان با گذشت زمان شرایط مورفولوژیکی کانال های جریان

برگشتی مدام در حال تغییر است. بررسی نمودار تغییرات تراز بستر، همچنین گویای تغییرات مورفولوژیکی کانال های جریان از جمله تغییرات شیب لبه کانال ها با گذشت زمان است؛ بنابراین این تغییرات از طریق پایش نمودار تراز بستر با گذشت زمان و ترسیم نمودار شیب با زمان قابل بررسی و مقایسه است. بررسی نمودار تغییرات شیب لبه کانال ها حاکی از آن است که در صورت هجوم امواج عمود بر ساحل، سپس بازگشت امواج به سمت دریا از طریق کانال های جریان هنگامی که شیب یکی از لبه های کانال بر اثر عبور جریان برگشتی از کانال به شیب بحرانی (معادل دو و نیم برابر شیب عمومی ساحل) برسد در این صورت بر اثر ریزش رسوبات قسمت بالایی لبه کانال، رسوب گذاری در لبه کانال آغاز می شود و تا هنگامی که لبه مقابل به شیب بحرانی برسد، ادامه خواهد داشت. همچنین در این بازه زمانی کانال جریان برگشتی در راستای انتقال رسوب کرانه راستا جابه جا خواهد شد. در نتایج دیگر این تحقیق آشکار شد با افزایش زمان بین شروع و پایان رسوب گذاری میزان جابه جایی کانال در جهت مقابل بیشتر است؛ بنابراین جابه جایی در یک جهت خاص منوط به دوام لبه ها در شرایط رسوب گذاری است. به طوری که افزایش دفعات و سرعت رسیدن لبه ها به شیب بحرانی موجب افزایش احتمال تحرک کانال های جریان می شود. نتایج همچنین نشان می دهد که افزایش عمق کانال موجب افزایش دوام کانال های جریان برگشتی می شود. از طرفی افزایش شیب عمومی ساحل موجب کاهش جابه جایی و دوام کانال های جریان برگشتی می شود، بنابراین سواحل با شیب ملایم تر، اغلب جهت وقوع جریان های برگشتی توپوگرافیک مستعدتر هستند.

جهت جابجایی کانال های جریان برگشتی



شکل ۱۳. نمایش الگوی نقل مکان کانال های جریان برگشتی در هجوم امواج عمود بر ساحل

- Hazard. Earth-Science Reviews. 2016; 163: 1–21.
- [14] Benassai G, Aucelli P, Budillon G, De Stefano M, Di Luccio D, Di Paola G, Montella R, Mucerino L, Sica M, Pennetta M. Rip current evidence by hydrodynamic simulations, bathymetric surveys and UAV observation. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2017;17(9);1493-503.
- [15] Valipour A, Bidokhti AA. An analytical model for the prediction of rip spacing in intermediate beaches. *Journal of Earth system Science*. 2018; 127:108.
- [16] Sandro R, Purba NP, Faizal I, Yuliadi LPS. Rip Current at Pangandaran and Palabuhan Ratu. *Global Scientific Journal*. 2018;6(6): 202-11.
- [17] Short AD. *Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics*. Wiley, Chichester; 1999. p. 379
- [18] Wright LD, short AD. Morphodynamic variability of surf zones and beaches. *Marine Geology*. 1984;56(1-4):93-118.
- [19] DHI Software. MIKE 21 User Guide Manual; 2007.
- [20] Bender CJ, Dean RG. Wave field modification by bathymetric anomalies and resulting shoreline changes: a review with recent results. *Coastal Engineering*. 2003;49:125-53.
- [21] Bender CJ, Dean RG. Potential shoreline changes induced by three-dimensional bathymetric anomalies with gradual transitions in depth. *Coastal Engineering*. 2004;51:1143-161.
- [22] Hanson H. GENESIS - a generalized shoreline change numerical model. *Journal of Coastal Research*. 1989;5:1-27.
- [23] Ozasa H, Brampton AH. Mathematical modeling of beaches backed by seawalls. *Coastal Engineering*. 1980;4: 47-63.
- ۵. منابع**
- [1] MacMahan JH, Thornton EB, Stanton TP, Reniers AJHM. RIPEX: Observations of a rip current system. *Marine Geology*. 2005; 218(1-4): 113-34.
- [2] Wright LD, Short AD, Green MO. Short term changes in the morphodynamic states of beaches and surf zones: An empirical predictive model. *Marine Geology*. 1985; 62(3-4):339–364.
- [3] Engle J, MacMahan J, Thieke RJ, Hanes DM, Dean RG. Formulation of a rip current predictive index using rescue data. *National Conf. on Beach Preservation Technology*. FSBPA; 2002. p.1-14.
- [4] Lascody RL. East central Florida rip current program. *National Weather Digest*. 1998;22(2): 25–30.
- [5] Luschine JB. A study of rip current drownings and weather related factors. *National Weather Digest*. 1991;191:11-19.
- [6] Short AD, Hogan CL. Rip currents and beach hazards, their impact on public safety and implications for coastal management. *Journal of Coastal Research*. 1994;12(12):197–209.
- [7] Castelle B, Ruessink BG. Modeling formation and subsequent nonlinear evolution of rip channels: Time-varying versus time invariant wave forcing. *Journal of Geophysical Research*. 2011; 116 (F04008). doi: 10.1029/2011 JF001997.
- [8] Coco G, Murray AB. Patterns in the sand: From forcing templates to self-organization. *Geomorphology*. 2007;91(3):271-90.
- [9] Holman RA, Symonds G, Thornton EB, Ranasinghe R. Rip spacing and persistence on an embayed beach. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2006;111:1-17.
- [10] Turner IL, Whyte D, Ruessink BG, Ranasinghe R. Observations of rip spacing, persistence and mobility at a long, straight coastline. *Marine Geology*. 2007;236(3-4): 209-21.
- [11] Woods JE. Rip current/cuspate shoreline interactions in southern Monterey Bay [Master's Thesis]. Naval Postgraduate School; 2005.
- [12] Orzech MD, Thornton EB, MacMahan JH, O'Reilly WC, Stanton TP. Alongshore rip channel migration and sediment transport. *Marine Geology*. 2010; 271(3-4): 278–91.
- [13] Castelle B, Scott T, Brander RW, McCarroll RJ. Rip Current Types, Circulation and

**پی‌نوشت**

1. Alongshore sediment transport
2. Shear instability rips
3. Flash rips
4. Channel rips
5. Focused rips
6. Deflection rips
7. Shadow rips
8. Intermediate beach
9. Dissipative beach
10. Reflective beach
11. surf zone
12. sand bar
13. plunging breaker

14. CERC equation
15. Danish Hydraulic Institute & Water Quality Institute
16. Rhythmic bar and beach (RBB)
17. Army Corps of Engineers