

تحلیل عدم قطعیت و همگرایی چندشاخصه تغییرات خط ساحلی مال خلیفه-چاهک

طی ۱۹۹۳-۲۰۲۳

مصطفی احمدی^۱، مرتضی بختیاری^{۲*}، آرزو سلیمانی^۳

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی سواحل، بنادر و سازه های دریایی، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر،

خرمشهر، ایران، Email:mos.ahmadi939@gmail.com

۲- دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر، ایران، Email:bakhtiari@kmsu.ac.ir

۳- دانش آموخته دکتری تخصصی آلودگی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران،

Email:a.soleimany@kmsu.ac.ir

چکیده

هدف این پژوهش، توصیف گرایش منطقه ای تغییر خط ساحلی و محدودیت های مکانی در بازه مال خلیفه-چاهک است. چهار خط ساحلی لندست مربوط به سال های ۱۹۹۳، ۲۰۰۲، ۲۰۱۳ و ۲۰۲۳ با شاخص های NSM، LRR، EPR و SCE در ۳۰۰ ترانسکت ۵۰ متری تحلیل شد. فراوانی عملیاتی فرسایش، سازگاری شاخص ها، حساسیت فاصله ترانسکت و انتشار مؤلفه پایه عدم قطعیت بررسی گردید. میانگین NSM، LRR، EPR و SCE به ترتیب ۰/۱۲۶- متر، ۸۷/۰- متر بر سال، ۴۸/۰- متر بر سال و ۶۲/۴۸ متر بود. بر پایه آستانه عملیاتی NSM-۵ متر، ۲۳۸ ترانسکت (۳/۷۹ درصد) فرسایشی بودند و فاصله اطمینان ۹۵ درصد بوت استرپ بلوکی این نسبت ۷/۶۷ تا ۰/۸۹ درصد بود. این آزمون فقط فراوانی منطقه ای کلاس را می سنجد، نه معناداری تغییر در ترانسکت منفرد. همبستگی پیرسون NSM و LRR برابر ۹۵۸/۰ و توافق علامت ۰/۷۹ درصد بود؛ اما به دلیل اشتراک موقعیت های انتهایی، این مقادیر شواهد مستقل روند یا فرایند نیستند. مؤلفه پایه ۸۵/۱۵ متر برای هر خط، که فقط نصف پیکسل و مکان یابی را پوشش می دهد، به ۴۲/۲۲ متر برای NSM و ۷۵/۰ متر بر سال برای EPR منتشر شد؛ خطای آستانه گذاری و جزر و مد در آن وارد نشده است. مقایسه لندست ۲۶ ژوئیه با Google Earth مورخ ۲۳ ژوئن ۲۰۲۳، با فاصله ۳۳ روزه، میانگین اختلاف علامت دار ۸۰/۱۱+ متر، MAE برابر ۶۸/۱۴ متر و RMSE برابر ۳۲/۱۷ متر نشان داد. به دلیل ناهم زمانی و جزر و مد نامعلوم، این مقادیر معیار مستقل دقت استخراج نیستند. نتایج برای غربال آماری-ژئوماتیکی منطقه ای مناسب اند؛ تفسیر موضعی و فرایندی به داده های هم زمان و میدانی نیاز دارد.

کلمات کلیدی

تغییرات خط ساحلی، مؤلفه مکانی عدم قطعیت، سازگاری شاخص ها، DSAS، خلیج فارس.

مناطق ساحلی از پویاترین واحدهای ژئومورفولوژیکی زمین به شمار می‌روند که همواره تحت تأثیر برهم‌کنش فرایندهای طبیعی و فعالیت‌های انسانی دچار تغییر می‌شوند. خط ساحلی به‌عنوان مرز تماس خشکی و دریا، شاخص حساس از این تغییرات است و نوسانات آن می‌تواند بیانگر روندهای فرسایشی یا پیشروی در مقیاس‌های زمانی مختلف باشد [۱]. در دهه‌های اخیر، تشدید فعالیت‌های انسانی در نواحی ساحلی، همراه با اثرات تغییر اقلیم و افزایش سطح آب دریا، موجب افزایش نرخ تغییرات خط ساحلی در بسیاری از مناطق جهان شده است [۲-۴]. پایش و تحلیل تغییرات خط ساحلی نقش مهمی در برنامه‌ریزی و مدیریت پایدار مناطق ساحلی ایفا می‌کند. فرسایش سواحل تهدیدی جدی برای زیرساخت‌های ساحلی، سکونتگاه‌های انسانی و فعالیت‌های گردشگری محسوب می‌شود، در حالی که پیشروی ساحل نیز می‌تواند الگوی بهره‌برداری از اراضی ساحلی را دستخوش تغییر کند [۵]. از این رو، تحلیل کمی تغییرات خط ساحلی به‌عنوان یکی از ابزارهای کلیدی در تصمیم‌سازی مدیریتی و برنامه‌ریزی فضایی مناطق ساحلی مورد توجه قرار گرفته است. در سال‌های اخیر، توسعه فناوری‌های سنجش از دور و سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) امکان پایش تغییرات خط ساحلی را با دقت و پوشش زمانی مناسب فراهم کرده است. تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه، به‌ویژه تصاویر لندست، به دلیل دسترسی آزاد و پوشش زمانی بلندمدت، به‌طور گسترده در مطالعات تغییرات خط ساحلی مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۶]. ترکیب این داده‌ها با ابزارهای تحلیلی در محیط GIS امکان استخراج خطوط ساحلی و بررسی روندهای تغییرات آن‌ها را در بازه‌های زمانی طولانی فراهم می‌سازد. در این میان، تحلیل کمی تغییرات خط ساحلی با استفاده از شاخص‌های آماری به‌عنوان رویکردی مؤثر برای ارزیابی میزان و نرخ جابه‌جایی خط ساحلی مطرح شده است. شاخص‌هایی نظیر جابه‌جایی خالص خط ساحلی (NSM)، نرخ نقطه پایانی (EPR) و نرخ رگرسیون خطی (LRR) به‌طور گسترده در مطالعات مختلف برای توصیف روند تغییرات خط ساحلی به کار رفته‌اند و نتایج قابل اتکایی در زمینه تشخیص الگوهای غالب فرسایش و پیشروی ارائه داده‌اند [۷]. این شاخص‌ها به‌ویژه در مطالعات مدیریتی، به دلیل سادگی تفسیر و قابلیت مقایسه مکانی، کاربرد فراوانی دارند.

در ایران نیز مطالعات متعددی به بررسی تغییرات خط ساحلی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و تحلیل‌های کمی پرداخته‌اند. نتایج این پژوهش‌ها نشان می‌دهد که سواحل کشور، به‌ویژه در نواحی جنوبی و نیز برخی سواحل شمالی، تحت تأثیر عوامل طبیعی و انسانی دچار تغییرات قابل توجهی شده‌اند [۸-۱۰]. با این حال، بخش قابل توجهی از این مطالعات تمرکز خود را بر تحلیل‌های موضعی یا بررسی یک یا چند بازه ساحلی محدود قرار داده‌اند و کمتر به ارائه یک تصویر تجمیعی و مدیریتی در مقیاس استانی پرداخته شده است. سواحل استان بوشهر به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مناطق ساحلی شمال خلیج فارس، نقش کلیدی در فعالیت‌های اقتصادی، صیادی، صنعتی و گردشگری کشور ایفا می‌کنند. توسعه بنادر، استقرار صنایع نفت و گاز و گسترش فعالیت‌های انسانی در این سواحل، ضرورت شناخت دقیق روند تغییرات خط ساحلی و پیامدهای آن برای مدیریت سواحل را دوچندان کرده است. در چنین شرایطی، تحلیل کمی و تجمیعی تغییرات خط ساحلی می‌تواند مبنای مناسبی برای ارزیابی ریسک‌های ساحلی و تدوین راهبردهای مدیریتی فراهم کند.

در ایران، تغییرات خط ساحلی در سواحل شمالی و جنوبی کشور با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای، سامانه اطلاعات جغرافیایی و ابزارهای تحلیل رقومی خط ساحلی نظیر DSAS به‌طور گسترده مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. در این میان، نگهبان و همکاران (۱۳۹۵) در سواحل دریای عمان نشان دادند که سنجش از دور و GIS ابزارهای مؤثری برای پایش جابه‌جایی خط ساحلی هستند [۱۱]. همچنین نگهبان و همکاران (۱۳۹۶) در منطقه جاسک تأکید کردند که پایش تغییرات خط ساحلی نقش مهمی در تبیین پاسخ محیط ساحلی به تغییرات اقلیمی و اثرات فعالیت‌های انسانی دارد [۱۲]. از سوی دیگر، امینی و عبداللهی کاکرودی (۱۳۹۷) با استفاده از تصاویر لندست و ابزار DSAS، تفاوت الگوی تغییرات خط ساحلی در دلتاهای گرگانرود و سفیدرود را آشکار کردند [۱۳]. رستمی سقز و همکاران (۱۴۰۰) با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-1، تغییرات خط ساحلی بازه چالوس تا تنکابن را ارزیابی کردند [۱۴]. علاوه بر این، خوشروان و همکاران (۱۴۰۲) نشان دادند که در سواحل دریای خزر، افزون بر عوامل طبیعی، سازه‌های بندری و مداخلات انسانی نیز نقش مؤثری در شدت تغییرات خط ساحلی ایفا می‌کنند [۱۵]. در ادامه، پژوهش‌های جدیدتر در سواحل مختلف ایران بر کارایی داده‌های سنجش از دور و شاخص‌های LRR، EPR، NSM و SCE در کمی‌سازی روندهای فرسایش و پیشروی خط ساحلی تأکید کرده‌اند.

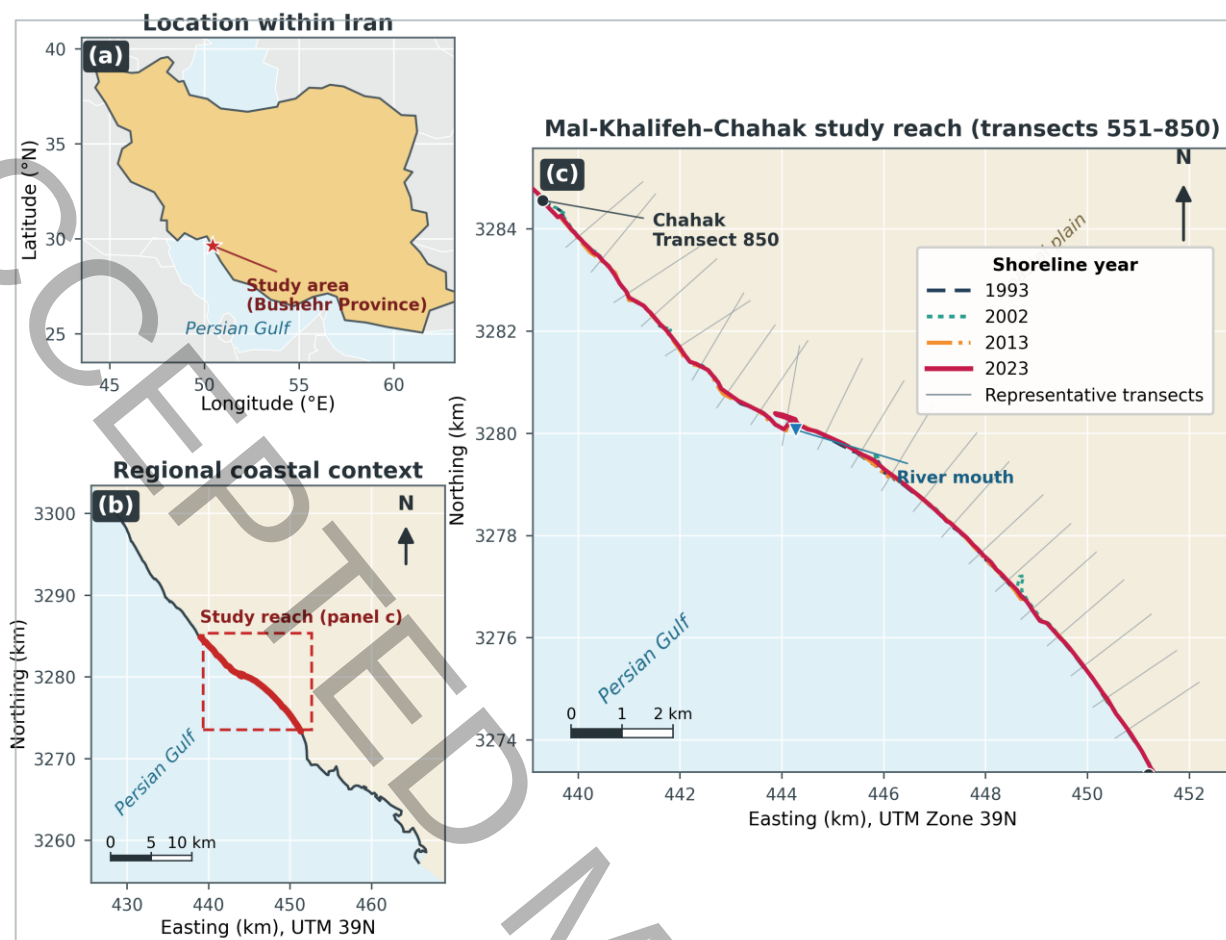
[۱۶-۱۹]. در سطح جهانی نیز مطالعات متعددی به بررسی الگوهای تغییرات خط ساحلی و پیامدهای ناشی از آن در مقیاس‌های مختلف پرداخته‌اند [۲۰]. لویی‌جندایک و همکاران (۲۰۱۸) با تحلیل داده‌های جهانی خطوط ساحلی در بازه‌ای چهاردهه نشان دادند که بیش از یک‌چهارم سواحل جهان با نرخ‌های معنی‌دار فرسایش مواجه‌اند [۲۱]، یافته‌ای که در مطالعات بعدی نیز تأیید شده است [۲۲]. همچنین، وس و همکاران (۲۰۱۹) با بهره‌گیری از روش‌های یادگیری ماشین و داده‌های لندست، روندهای بلندمدت تغییرات خط ساحلی را در مقیاس جهانی کمی‌سازی کردند [۲۳]. در پژوهشی دیگر، آتاناسیو و همکاران (۲۰۲۰) اثر افزایش سطح تراز دریا بر پایداری سکونتگاه‌های ساحلی را ارزیابی کرده و بر اهمیت مدل‌سازی فضایی تغییرات خط ساحلی تأکید نمودند [۲۴]. مطالعات اخیر مانند دادا و همکاران (۲۰۲۳) [۲۲] و چولاک و همکاران (۲۰۲۴) [۲۵] نیز بر یکپارچه‌سازی تصاویر چندزمانه سنجش از دور با شاخص‌های EPR، LRR و NSM برای پایش دینامیک خط ساحلی و تحلیل ریسک فرسایش در مناطق کم‌ارتفاع تأکید دارند. نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد که شتاب تغییرات مورفودینامیکی سواحل در سال‌های اخیر، به‌ویژه تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی و تغییرات اقلیمی افزایش یافته است؛ یافته‌هایی که ضرورت انجام مطالعه‌ای مشابه در سواحل جنوبی ایران را برجسته می‌سازد.

با وجود انجام این مطالعات، هنوز در بسیاری از بخش‌های سواحل استان بوشهر، به‌ویژه در محدوده ساحلی بین مال خلیفه تا چاهک، ارزیابی کمی و نظام‌مند از روندهای بلندمدت تغییرات خط ساحلی انجام نشده است. این در حالی است که پویایی بالای محیط ساحلی، همراه با گسترش فعالیت‌های انسانی و توسعه زیرساخت‌های ساحلی، می‌تواند الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری را به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار دهد. نبود اطلاعات دقیق درباره روندهای مکانی و زمانی تغییرات خط ساحلی، برنامه‌ریزی مؤثر برای مدیریت مناطق ساحلی و توسعه پایدار کاربری‌های ساحلی را با چالش مواجه می‌سازد.

بر این اساس، پرسش پژوهش حاضر صرفاً محاسبه هم‌زمان چهار شاخص متداول نیست، بلکه بررسی می‌کند که شاخص‌های مبتنی بر نقاط انتهایی (NSM) و (EPR) و شاخص مبتنی بر همه تاریخ‌ها (LRR) چه میزان سازگاری توصیفی دارند، در چه بازه‌هایی ناسازگاری رخ می‌دهد، و مؤلفه مکانی عدم قطعیت و فاصله ترانسکت تا چه اندازه نتیجه‌ی غریب منطقه‌ای را تغییر می‌دهد. این سازگاری به دلیل اشتراک داده‌های انتهایی، آزمون مستقل روند یا فرایند نیست. برای پاسخ، تغییرات خط ساحلی مال خلیفه تا چاهک در چهار مقطع زمانی ۱۹۹۳، ۲۰۰۲، ۲۰۱۳ و ۲۰۲۳ با DSAS تحلیل و سپس با آزمون فراوانی کلاس عملیاتی فرسایش، بوت‌استرپ بلوکی، تحلیل سازگاری/ناسازگاری و تحلیل حساسیت فاصله ترانسکت تکمیل شد. بنابراین سهم اصلی پژوهش، ارائه یک تحلیل آماری-ژئوماتیکی، عدم قطعیت‌محور و مقیاس‌آگاه از خروجی‌های DSAS برای تفکیک گرایش منطقه‌ای از قطعیت موضعی در یک ساحل کم‌داده است.

۲- محدوده مورد مطالعه

محدوده مطالعه بخشی از ساحل استان بوشهر در شمال خلیج فارس و میان مال خلیفه و چاهک است (شکل ۱). این بازه تقریباً ۱۵ کیلومتر طول دارد و در داده‌های DSAS با ترانسکت‌های ۵۵۱ تا ۸۵۰ پوشش داده می‌شود. ساحل دارای پهنه‌های کم‌شیب رسوبی و بخش‌های جزرومدی است؛ از این رو مرز آب-خشکی مشاهده‌شده در تصویر می‌تواند علاوه بر تغییر مورفولوژیک، به تراز لحظه‌ای آب و رطوبت رسوبات نیز حساس باشد. چون در این پژوهش داده مستقل موج، جریان، شیب، دانه‌بندی رسوب و تاریخ ساخت سازه‌ها موجود نبود، این ویژگی‌ها در ادامه به‌عنوان زمینه تفسیری و نه علت اثبات‌شده تغییرات به‌کار رفته‌اند.



شکل ۱: موقعیت محدوده مطالعه: (الف) جایگاه محدوده در جنوب غرب ایران، (ب) موقعیت بازه منتخب در امتداد ساحل استان بوشهر، و (ج) خطوط ساحلی استخراج شده در سال‌های ۱۹۹۳، ۲۰۰۲، ۲۰۱۳ و ۲۰۲۳ و ترانسکت‌های ۵۵۱-۸۵۰ در بازه مال‌خلیفه-چاهک.

Figure 1. Study-area location: (a) setting in southwestern Iran, (b) position of the selected reach along the Bushehr Province coast, and (c) shorelines extracted for 1993, 2002, 2013, and 2023 together with transects 551-850 along Mal-Khalifeh-Chahak.

۳- مواد و روش‌ها

۳-۱- داده‌های مورد استفاده

چهار تصویر لندست مسیر ۱۶۴ و ردیف ۰۳۹ از آرشیو USGS برای بازسازی موقعیت‌های تاریخی خط ساحلی انتخاب شد (جدول ۱). تصاویر در پنجره فصلی نسبتاً مشابه ژوئیه-اوت و با حداقل پوشش ابر روی نوار ساحلی انتخاب شدند. سه تصویر ۱۹۹۳، ۲۰۱۳ و ۲۰۲۳ از نوع TP و تصویر ۲۰۰۲ از نوع L۲SP بود. تحلیل بر باندهای چندطیفی ۳۰ متری انجام شد و از باند پانکروماتیک برای بارزسازی مصنوعی استفاده نشد. این مجموعه برای تحلیل چنددهه‌ای مناسب است، اما چهار مقطع با فاصله ۹ تا ۱۱ سال، رخداد‌های کوتاه‌مدت و چرخه‌های فرسایش-بازیابی را بازنمایی نمی‌کند.

جدول ۱: مشخصات تصاویر لندست مورد استفاده.

Table 1. Characteristics of the Landsat images used in this study.

تاریخ اخذ	ماهواره/سنجنده	شناسه محصول	سطح محصول	تفکیک مکانی
۱۹۹۳-۰۸-۲۴	TM/ Landsat ۵	LT05_L1TP_164039_19930824	L1TP	m۳۰
۲۰۰۲-۰۷-۲۴	+ETM/ Landsat ۷	LE07_L2SP_164039_20020724	L2SP	m۳۰
۲۰۱۳-۰۷-۳۰	OLI / Landsat ۸	LC08_L1TP_164039_20130730	L1TP	m۳۰
۲۰۲۳-۰۷-۲۶	OLI / Landsat ۸	LC08_L1TP_164039_20230726	L1TP	m۳۰

همه لایه‌ها در سامانه مختصات EPSG:۳۲۶۳۹ سازمان‌دهی شدند؛ این سامانه همان زون ۳۹ شمالی UTM بر مبنای WGS ۸۴ است. سپس لایه‌ها به محدوده مطالعه برش خوردند و از نظر هم‌پوشانی هندسی و پوشش ابر کنترل شدند. پردازش استاندارد محصول USGS حفظ شد و مقادیر طیفی میان سنجنده‌ها مستقیماً با یکدیگر مقایسه نشد. برای هر سنجنده، مؤلفه رطوبت تبدیل کلاهیک منگوله‌دار با باندها و ضرایب متناسب با TM، ETM، و OLI محاسبه شد [۲۶-۲۸]. سپس آستانه آب-خشکی برای هر صحنه به‌طور مستقل تعیین شد؛ بنابراین تفاوت پاسخ طیفی سنجنده‌ها عمدتاً در مرحله طبقه‌بندی صحنه‌ای کنترل شد و فقط هندسه مرز استخراج‌شده وارد DSAS گردید. رستر دودویی به پلیگون و سپس مرز آب-خشکی به خط تبدیل شد. خطوط از نظر قطعات کوچک، کانال‌های جزرومدی و خطاهای آشکار طبقه‌بندی بازبینی شدند و ویرایش دستی فقط برای حذف عوارض آشکار انجام گرفت. این بازبینی، کنترل کیفی استخراج است؛ ارزیابی کمی مستقل خط ۲۰۲۳ در بخش ۳-۵ تشریح می‌شود.

۳-۳- تحلیل کمی تغییرات خط ساحلی با استفاده از DSAS

تحلیل در DSAS نسخه ۱/۵ با یک خط مبنای فراساحلی انجام شد. ترانسکت‌ها با فاصله ثابت ۵۰ متر، طول/فاصله جست‌وجوی ۲۰۰۰ متر و در جهت خشکی ایجاد شدند. بخش حاضر شامل ۳۰۰ ترانسکت معتبر با شماره‌های ۵۵۱ تا ۸۵۰ است و هر ترانسکت هر چهار خط ساحلی را قطع می‌کند. فاصله ۵۰ متر برای حفظ تغییرپذیری طول ساحلی در مقیاس صدها متر و در عین حال جلوگیری از چگالی کاذب بسیار بیشتر از توان تفکیک ۳۰ متری انتخاب شد. برای ارزیابی وابستگی نتیجه به این انتخاب، شبکه موجود به‌صورت نظام‌مند به فواصل مؤثر ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ متر زیرنمونه‌گیری شد.

چهار شاخص محاسبه شد: SCE بیشترین فاصله میان هر دو خط ساحلی و بدون جهت است؛ NSM جابه‌جایی علامت‌دار میان ۱۹۹۳ و ۲۰۲۳ را نشان می‌دهد؛ EPR برابر NSM تقسیم بر ۹۲/۲۹ سال است؛ و LRR شیب خط حداقل مربعات بر چهار موقعیت زمانی است. علامت منفی NSM، EPR و LRR به معنی حرکت به سمت خشکی است. برای LRR، ضریب تعیین (R^2) و نیم‌عرض فاصله اطمینان ۹۰ درصد (DSAS LCI ۹۰) نیز گزارش شد. چون عدم قطعیت یکسان به چهار تاریخ داده شد، WLR با LRR یکسان بود و به‌عنوان شاخص مستقل گزارش نشد.

۳-۴- برآورد عدم قطعیت و اثر جزرومد

مؤلفه پایه عدم قطعیت مکانی هر خط ساحلی با ترکیب ریشه مجموع مربعات نصف پیکسل ۳۰ متری (۱۵ متر) و خطای مکان‌یابی محصول برآورد شد. مقادیر تاریخ‌ویژه ۶۶/۱۵، ۶۵/۱۵، ۴۹/۱۵ و ۸۵/۱۵ متر بود؛ برای یکنواختی محاسبات، بیشینه این چهار مقدار، یعنی ۸۵/۱۵ متر، برای همه تاریخ‌ها به‌کار رفت. با انتشار همین مؤلفه جزئی به روش ریشه مجموع مربعات، مقدار ۴۲/۲۲ متر برای NSM و ۷۵/۰ متر بر سال برای EPR به‌دست آمد. این مقادیر بودجه کامل عدم قطعیت نیستند و فقط تفکیک پیکسلی و مکان‌یابی محصول را پوشش می‌دهند؛ خطای استخراج و آستانه‌گذاری، ویرایش دستی و جابه‌جایی ناشی از جزرومد در آن‌ها وارد نشده است و

عدم قطعیت کل می تواند بیشتر باشد. زمان و مرحله جزرومد برای چهار تاریخ در داده های بایگانی شده موجود نبود و تصحیح جزرومدی اعمال نشد؛ بنابراین خط استخراج شده پروکسی لحظه ای مرز آب-خشکی است.

۵-۳- مقایسه نزدیک زمان خط ساحلی ۲۰۲۳

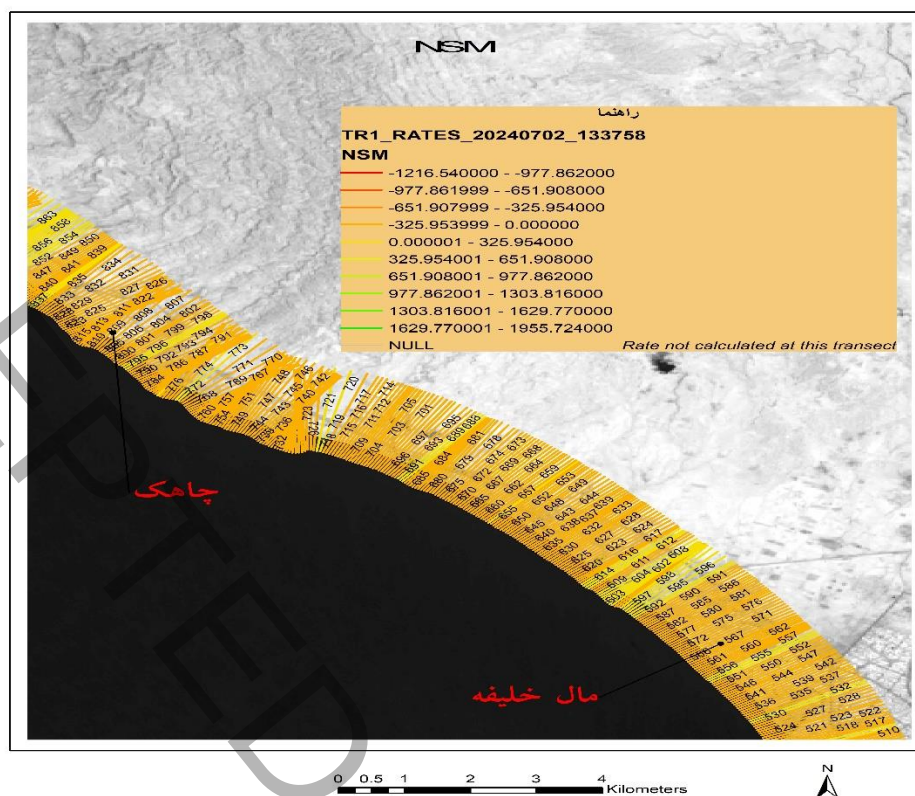
برای مقایسه مکانی نزدیک زمان و توصیف اندازه اختلاف میان دو منبع، و نه اعتبارسنجی مستقل دقت استخراج، خط ساحلی با تفکیک بالاتر از تصویر Google Earth مورخ ۲۳ ژوئن ۲۰۲۳ رقومی شد و با خط لندست مورخ ۲۶ ژوئیه ۲۰۲۳ مقایسه گردید؛ فاصله دو تاریخ ۳۳ روز است و وضعیت جزرومد آن ها معلوم نیست. خط Google Earth در دو قطعه، پیش و پس از دهانه باز رودخانه، ترسیم شد تا خط مصنوعی روی آب ایجاد نشود. هر دو خط به سامانه مختصات EPSG:32639 تبدیل شدند و محل تقاطع آن ها با ترانسکت های DSAS مقایسه شد. ترانسکت های ۷۲۲ تا ۷۴۱ پیش از محاسبه شاخص های اختلاف و صرفاً بر پایه هندسه دهانه رودخانه حذف شدند؛ بنابراین ۲۸۰ ترانسکت قابل مقایسه باقی ماند. اختلاف علامت دار از تفریق فاصله خط لندست از فاصله خط Google Earth محاسبه شد؛ علامت مثبت، قرارگیری خط Google Earth در سمت دریا را نشان می دهد. میانگین اختلاف علامت دار که برای پیوستگی گزارش با عنوان Bias نیز ارائه شده است، همراه با MAE، RMSE و ریشه میانگین مربعات اختلاف مرکززدایی شده محاسبه شد. برای سه شاخص نخست، فاصله اطمینان ۹۵ درصد با بوت استرپ بلوکی متحرک، ۲۰۰۰۰ بازنمونه و طول بلوک ۱۷ ترانسکت برآورد شد. این مقادیر اختلاف مرکب دو خط ناهم زمان اند و نمی توان آن ها را فقط به خطای استخراج نسبت داد؛ از این رو تصحیح Bias بر خط لندست اعمال نشد.

۶-۳- تحلیل آماری، سازگاری شاخص ها و حساسیت فاصله ترانسکت

برای حفظ قابلیت مقایسه با نسخه ارسالی، طبقه بندی عملیاتی NSM شامل فرسایش شدید (>20 متر)، فرسایش متوسط ($20-200$ متر) تا $5-$ متر، پایدار ($5-$ تا $5+$ متر)، پیشروی متوسط ($5+$ تا $20+$ متر) و پیشروی قوی (>20 متر) نگه داشته شد؛ این طبقه بندی با معنی داری آماری تغییر در یک ترانسکت معادل نیست. فراوانی کلاس عملیاتی فرسایش ($NSM=5-$ متر) در برابر نسبت مرجع ۵۰ درصد با آزمون دوجمله ای دقیق و فاصله اطمینان Wilson سنجیده شد [۲۹]. این آزمون فقط فراوانی کلاس را در مجموعه ترانسکت ها ارزیابی می کند و آزمون معنی داری تغییر در هیچ ترانسکت منفردی نیست. برای لحاظ وابستگی طول ساحلی، فاصله اطمینان ۹۵ درصد بوت استرپ بلوکی متحرک با ۲۰۰۰۰ بازنمونه و طول بلوک ۱۷ ترانسکت (۸۵۰ متر؛ نخستین تأخیر با خودهمبستگی غیرمثبت) محاسبه شد [۳۰]. سازگاری شاخص ها با همبستگی Pearson و Spearman و توافق علامت NSM و LRR توصیف شد. از آنجا که LRR با همه موقعیت ها، از جمله موقعیت های ابتدا و انتهای مورد استفاده در NSM، برازش می شود، این دو شاخص از نظر ریاضی مستقل نیستند؛ بنابراین همبستگی و توافق علامت فقط معیارهای توصیفی اند و شواهد مستقل آماری یا ژئومورفولوژیکی محسوب نمی شوند. حالت دامنه جابه جایی مشاهده شده زیاد بدون گرایش خطی پایدار زمانی تعریف شد که SCE مساوی یا بزرگ تر از چارک سوم و قدر مطلق LRR حداکثر ۲۵/۰ متر بر سال باشد. برای غربال مدیریتی، LRR همراه فاصله اطمینان شاخص گرایش چندتاریخه، SCE شاخص دامنه جابه جایی مشاهده شده و NSM و EPR شاخص تغییر نقطه انتهایی در نظر گرفته شد.

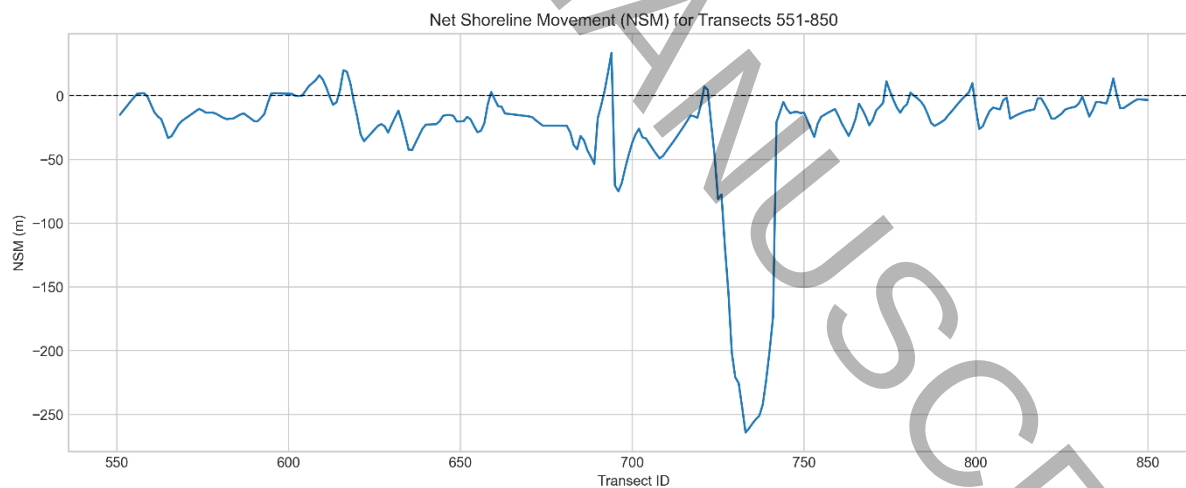
۴- نتایج و بحث

تحلیل ۳۰۰ ترانسکت نشان داد میانگین (میان) NSM برابر $0.1/26- (71/15)$ متر، EPR برابر $87/0- (53/0)$ متر بر سال و LRR برابر $48/0- (25/0)$ متر بر سال است. میانگین SCE برابر $62/48$ متر و میان آن $57/31$ متر بود. بنابراین نتیجه منطقه ای منفی است، اما پراکندگی زیاد و تفاوت میان میانه و میانگین نشان می دهد چند بازه با پسروی شدید بر میانگین اثر گذاشته اند. NSM از $37/264-$ تا $52/33+$ متر تغییر کرد (شکل های ۲ و ۳). برخلاف نسخه ارسالی که میانگین پسروی و پیشروی را جداگانه گزارش می کرد، جدول ۳ میانگین کل ۳۰۰ ترانسکت را ارائه می دهد تا جهت و اندازه روند منطقه ای بدون شرطی سازی بر علامت مشخص باشد.



شکل ۲: توزیع مکانی شاخص NSM در بازه مال خلیفه تا چاهک.

Figure 2. Spatial distribution of NSM along the Mal-Khalifeh-Chahak shoreline.



شکل ۳: تغییرات NSM در امتداد ترانسکت‌های ۵۵۱ تا ۸۵۰.

Figure 3. Alongshore variation in NSM across transects 551-850.

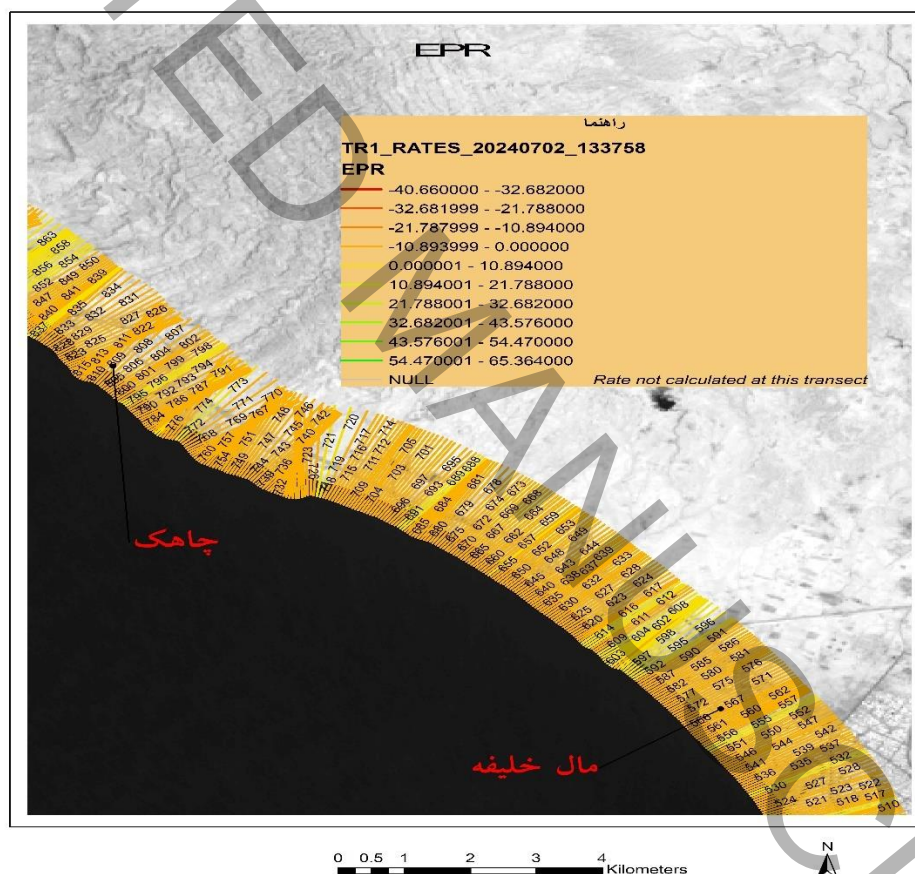
در طبقه‌بندی عملیاتی، ۱۰۶ ترانسکت در فرسایش شدید و ۱۳۲ ترانسکت در فرسایش متوسط قرار گرفت؛ بنابراین ۲۳۸ ترانسکت (۳/۷۹ درصد) $NSM \leq -5$ متر داشتند (جدول ۲). این عدد نباید با سهم همه مقادیر منفی NSM اشتباه شود: ۲۶۳ ترانسکت (۷/۸۷ درصد) $NSM \leq 0$ داشتند. همچنین ۴۷ ترانسکت در بازه ± 5 متر و ۱۵ ترانسکت در کلاس‌های پیشروی بودند.

جدول ۲: طبقه‌بندی عملیاتی ترانسکت‌ها بر اساس NSM

Table 2. Operational classification of transects based on NSM.

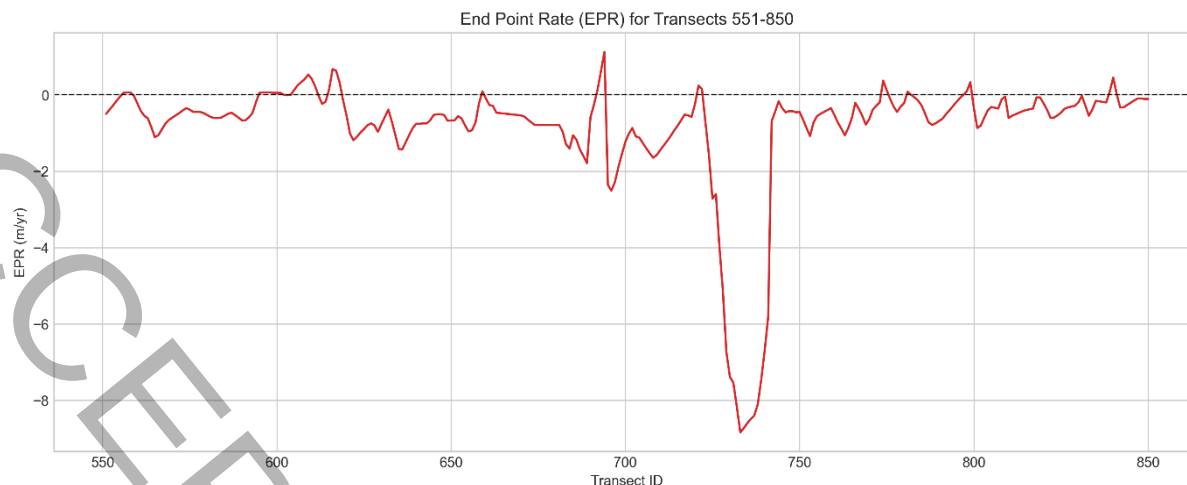
درصد	تعداد	دامنه NSM(m)	کلاس تغییر خط ساحلی
فرسایش شدید	کمتر از ۲۰-	۱۰۶	۳/۳۵
فرسایش متوسط	۲۰- تا ۵-	۱۳۲	۰/۴۴
پایدار عملیاتی	۵- تا ۵+	۴۷	۷/۱۵
پیشروی متوسط	۵+ تا ۲۰+	۱۴	۷/۴
پیشروی قوی	بیشتر از ۲۰+	۱	۳/۰
جمع	—	۳۰۰	۱۰۰

EPR از ۸۴/۸- تا ۱۲/۱ متر بر سال متغیر بود و میانگین کل آن ۸۷/۰- متر بر سال به‌دست آمد (شکل‌های ۴ و ۵). هم‌جهتی کامل NSM و EPR انتظار می‌رود، زیرا EPR صرفاً NSM تقسیم بر فاصله زمانی ثابت است و شواهد مستقل از NSM به شمار نمی‌رود.



شکل ۴: توزیع مکانی شاخص EPR در بازه مال خلیفه تا چاهک.

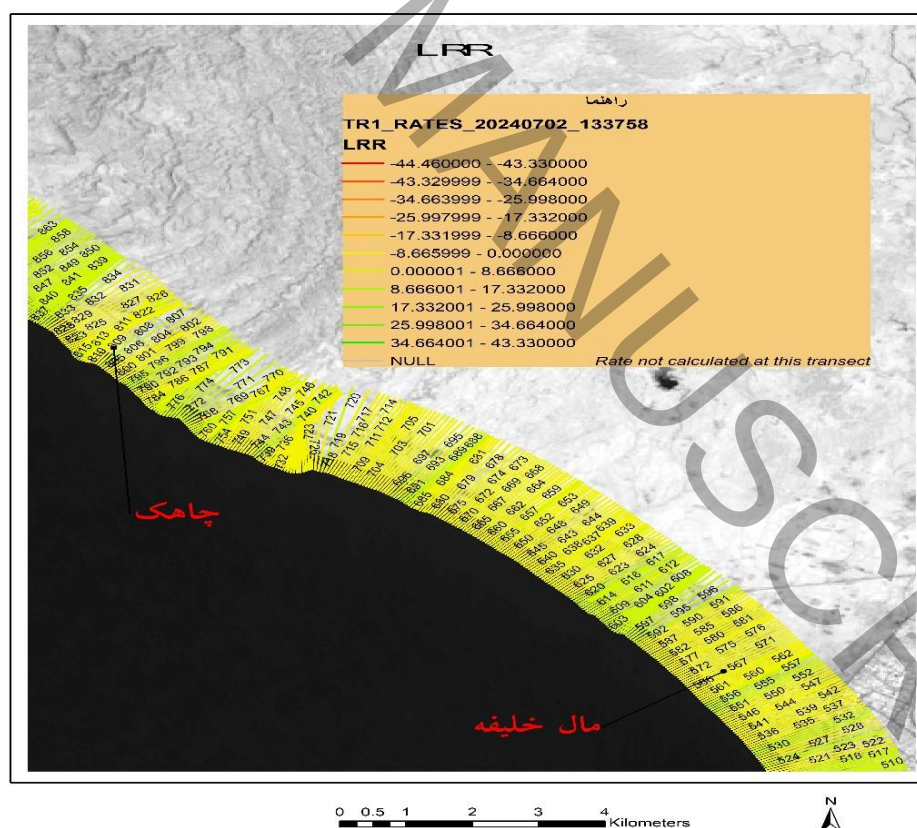
Figure 4. Spatial distribution of EPR along the Mal-Khalifeh-Chahak shoreline.



شکل ۵: تغییرات EPR در امتداد ترانسکت‌های ۵۵۱ تا ۸۵۰.

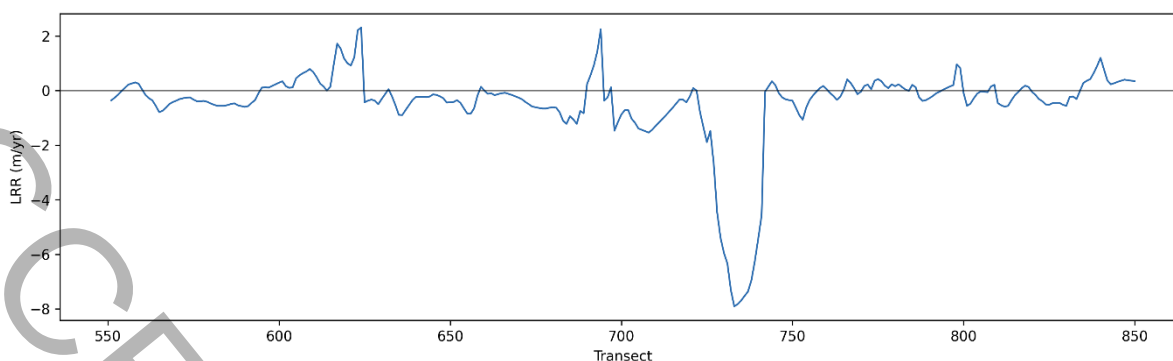
Figure 5. Alongshore variation in EPR across transects 551-850.

LRR بین $-۹۱/۷$ و $+۳۱/۲$ متر بر سال و میانگین آن $-۴۸/۰$ متر بر سال بود (شکل‌های ۶ و ۷). با این حال، میان R^2 فقط $۱۴/۰$ بود؛ ۷۰ ترانسکت $R^2 \leq ۵۰/۰$ و ۷ ترانسکت $R^2 \leq ۸۰/۰$ داشتند. بر پایه فاصله اطمینان ۹۰ درصد، فقط پنج LRR منفی و یک LRR مثبت به‌طور موضعی صفر را قطع نمی‌کردند و فاصله اطمینان ۲۹۴ ترانسکت شامل صفر بود. این نتیجه به معنی نبود روند منطقه‌ای نیست، بلکه محدودیت استنباط برای هر ترانسکت از تنها چهار تاریخ را نشان می‌دهد.



شکل ۶: توزیع مکانی شاخص LRR در بازه مال خلیفه تا چاهک.

Figure 6. Spatial distribution of LRR along the Mal-Khalifeh-Chahak shoreline.



شکل ۷: تغییرات LRR در امتداد ترانسکت‌های ۵۵۱ تا ۸۵۰.

Figure 7. Alongshore variation in LRR across transects 551-850.

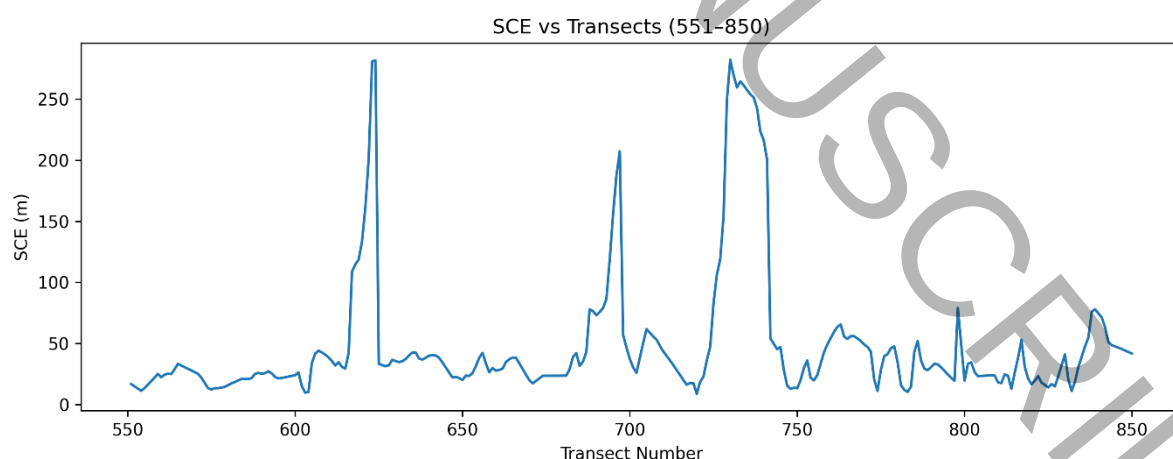
آمار توصیفی کل شاخص‌ها در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳: آمار توصیفی شاخص‌های تغییر خط ساحلی در ۳۰۰ ترانسکت.

Table 3. Descriptive statistics of shoreline-change metrics for 300 transects.

شاخص	کمینه	چارک اول	میانه	میانگین	چارک سوم	بیشینه	انحراف معیار
۹۳/۴۷	۵۲/۳۳+	۹۷/۶-	۰۱/۲۶-	۷۱/۱۵-	۸۱/۲۳-	۳۷/۲۶۴-	NSM(m)
۶۰/۱	۱۲/۱+	۲۳/۰-	۸۷/۰-	۵۳/۰-	۷۹/۰-	۸۴/۸-	(۱-EPR (myr
۴۹/۱	۳۱/۲+	۱۲/۰+	۴۸/۰-	۲۵/۰-	۵۶/۰-	۹۱/۷-	(۱-LRR (myr
۰۱/۵۵	۰۳/۲۸۲	۵۲/۴۶	۶۲/۴۸	۵۷/۳۱	۶۸/۲۲	۷۱/۸	SCE (m)

SCE از ۷۱/۸ تا ۰۳/۲۸۲ متر تغییر کرد. مقدار زیاد SCE لزوماً به معنی روند فرسایشی یا پیشروی پایدار نیست، زیرا این شاخص جهت و ترتیب زمانی را نادیده می‌گیرد. از ۷۵ ترانسکت بالاتر از چارک سوم SCE (۵۲/۴۶ متر)، ۲۰ ترانسکت هم‌زمان $|LRR| \geq ۲۵/۰$ متر بر سال داشتند؛ این ترکیب به حرکت رفت‌وبرگشتی یا تغییر غیرخطی میان تاریخ‌ها اشاره دارد.



شکل ۸: تغییرات SCE در امتداد ترانسکت‌های ۵۵۱ تا ۸۵۰.

Figure 8. Alongshore variation in SCE across transects 551-850.

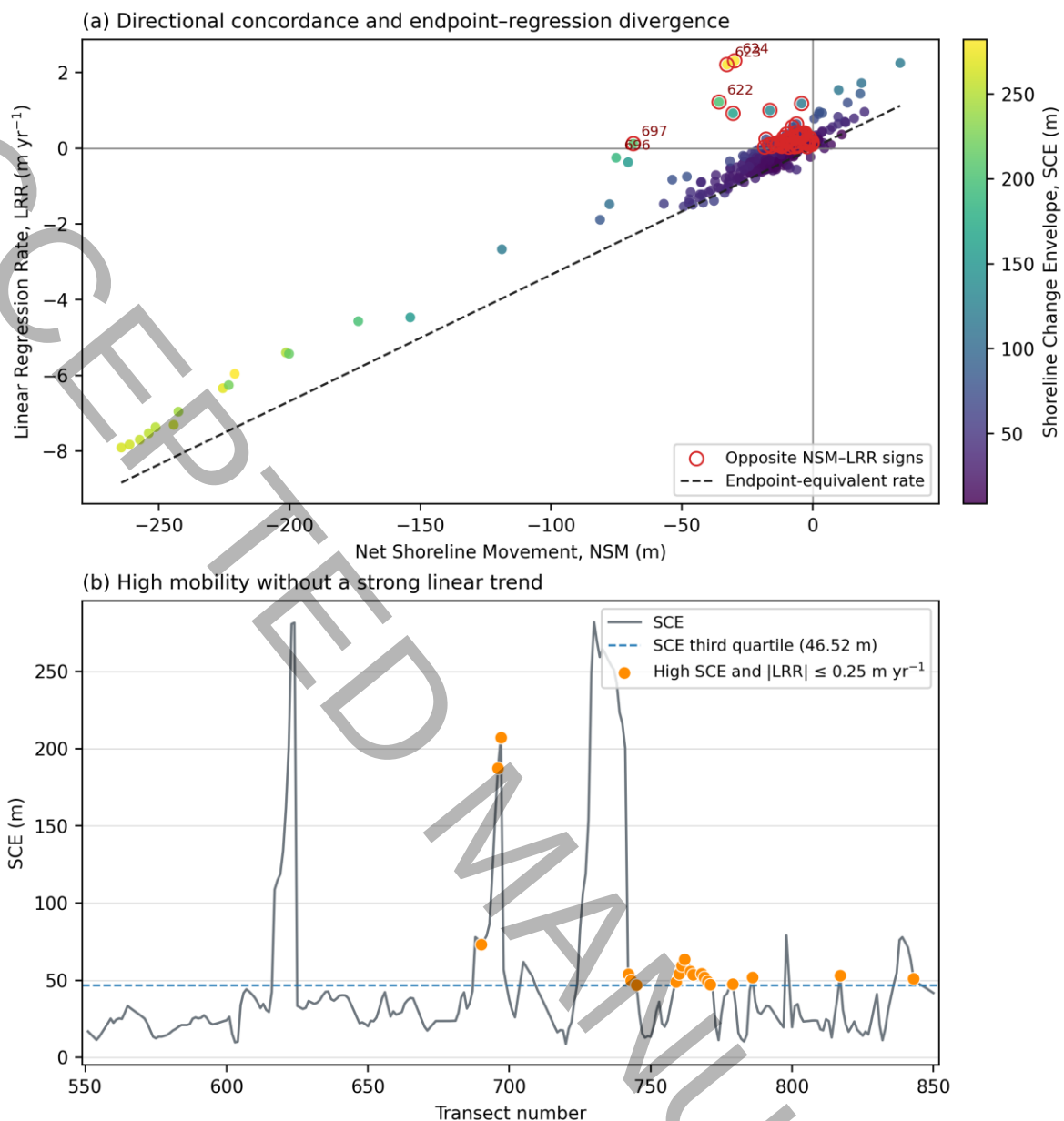
در آزمون دوجمله‌ای، فراوانی ۲۳۸ ترانسکت دارای NSM-۵ متر (۳/۷۹ درصد) از نسبت مرجع ۵۰ درصد بیشتر بود و سطح معنی‌داری کمتر از ۰/۰۱ به دست آمد؛ فاصله اطمینان Wilson نیز برابر ۴/۷۴ تا ۵/۸۳ درصد بود. این نتیجه فقط به فراوانی منطقه‌ای کلاس عملیاتی مربوط است و معنی‌داری آماری تغییر در هیچ ترانسکت منفردی را اثبات نمی‌کند. چون ترانسکت‌های مجاور مستقل نیستند، فاصله بوت‌استرپ بلوکی ۷/۶۷ تا ۰/۸۹ درصد معیار محافظه‌کارانه‌تری برای همین فراوانی منطقه‌ای است و همچنان از ۵۰ درصد بالاتر قرار دارد. فاصله‌های بلوکی برای میانگین NSM، EPR و LRR به ترتیب ۲۲/۴۶ تا ۹۲/۱۲ متر، ۵۵/۱ تا ۴۳/۰ و ۰/۹۱ تا ۰/۶۰ متر بر سال بود؛ بنابراین میانگین‌های منطقه‌ای منفی‌اند. در مقابل، با باند جزئی $\pm ۴۲/۲۲$ متر، که فقط از پیکسل و مکان‌یابی محصول مشتق شده است، ۹۰ ترانسکت پشروی فراتر از باند، ۲۰۹ ترانسکت داخل باند و یک ترانسکت پیشروی فراتر از باند داشت. این طبقه‌بندی یک تحلیل حساسیت بر پایه مؤلفه جزئی است و نباید به عنوان آزمون قطعیت تک‌تک ترانسکت‌ها یا بودجه کامل عدم قطعیت تفسیر شود (جدول ۴).

جدول ۴: نتایج استنباط آماری، عدم قطعیت و تشخیص LRR

Table 4. Statistical inference, partial uncertainty, and LRR diagnostic results.

تفسیر	نتیجه	کمیت
کلاس عملیاتی NSM-m5	$۳/۷۹ = ۳۰۰/۲۳۸$	آزمون فراوانی منطقه‌ای کلاس؛ نه معنی‌داری تغییر در ترانسکت منفرد
بوت‌استرپ بلوکی فراوانی کلاس فرسایش	$۰/۸۹ - ۷/۶۷$	فاصله فراوانی منطقه‌ای با لحاظ وابستگی طول ساحلی
NSM-۰	$۷/۸۷ = ۳۰۰/۲۶۳$	با $۳/۷۹$ آستانه‌ای متفاوت است
مؤلفه پایه خط، NSM و EPR	به ترتیب ۸۵/۱۵ متر، $۴۲/۲۲$ متر و ۷۵/۰ متر بر سال	برآورد جزئی؛ فقط نصف پیکسل و مکان‌یابی محصول
طبقه‌بندی بر پایه باند جزئی NSM	۹۰ پشروی / ۲۰۹ داخل باند / ۱ پیشروی	نسبت به $\pm ۴۲/۲۲$ متر؛ نه بودجه کامل عدم قطعیت
R^2 میانه LRR	۱۴/۰	۷۰ مورد $\leq ۵۰/۰$ ؛ ۷ مورد $\leq ۸۰/۰$
معنی‌داری موضعی LRR در ۹۰٪	۵ منفی / ۱ مثبت / ۲۹۴ نامعنی‌دار	محدودیت چهار تاریخ

همبستگی Pearson میان NSM و LRR برابر ۹۵۸/۰ و همبستگی رتبه‌ای Spearman برابر ۸۲۰/۰ بود. با این حال، چون LRR با چهار موقعیت شامل دو موقعیت انتهایی مورد استفاده در NSM برازش می‌شود، بزرگی این ضرایب تا حدی از وابستگی ریاضی دو شاخص ناشی می‌شود و شاهد مستقل گرایش خط ساحلی نیست. جهت دو شاخص در ۲۳۷ ترانسکت (۰/۷۹ درصد) یکسان، در ۶۰ ترانسکت (۰/۲۰ درصد) مخالف و در سه ترانسکت شامل صفر بود؛ توافق علامت نیز فقط سازگاری جهتی را توصیف می‌کند و شواهد ژئومورفولوژیکی محسوب نمی‌شود. ناسازگاری‌های برجسته در ترانسکت‌های ۶۱۹-۶۲۴ و ۶۹۵-۶۹۷ دیده شد؛ برای نمونه در ترانسکت‌های ۶۲۳ و ۶۲۴، NSM به ترتیب ۷۷/۳۲- و ۷۶/۲۹- متر، ولی LRR برابر ۲۱/۲+ و ۳۱/۲+ متر بر سال و SCE بیش از ۲۸۰ متر بود. این الگو فقط نشان می‌دهد چهار موقعیت زمانی با یک گرایش خطی ساده سازگار نیستند؛ بدون داده‌های پرتواتر و فرآیندی نمی‌توان سازوکار ژئومورفولوژیکی مشخصی به آن نسبت داد (شکل ۹).



شکل ۹: (الف) سازگاری و ناسازگاری جهت NSM و LRR؛ دایره‌های قرمز ترانسکت‌های با علامت مخالف و خط چین نرخ معادل نقطه‌انتهایی است. (ب) ترانسکت‌های دارای SCE بالا و LRR نزدیک صفر. این روابط توصیفی‌اند و شواهد مستقل فرآیندی محسوب نمی‌شوند.

Figure 9. (a) Agreement and disagreement between the signs of NSM and LRR; red circles identify transects with opposite signs, and the dashed line represents the endpoint-equivalent rate. (b) Transects with high SCE and near-zero LRR. These associations are descriptive and do not constitute independent evidence of coastal processes.

زیرنمونه‌گیری نظام‌مند نشان داد نتیجه به فاصله ترانسکت حساسیت اندکی دارد. در فواصل مؤثر ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ متر، نسبت کلاس فرسایشی به ترتیب ۳/۷۹، ۰/۷۸-۰/۸۱ و ۷/۸۲-۰/۷۶ درصد باقی ماند و میانگین LRR در همه آرایش‌ها منفی بود (جدول ۵). این تحلیل اثر درشت‌ترشدن شبکه موجود را می‌سجد و جایگزین اجرای مستقل DSAS با فاصله کمتر از ۵۰ متر نیست.

جدول ۵: تحلیل حساسیت نسبت به فاصله مؤثر ترانسکت.

Table 5. Sensitivity analysis for effective transect spacing.

فاصله مؤثر (m)	تعداد در هر زیرنمونه	فرسایش عملیاتی (%)	میانگین NSM(m)	میانگین (1-LRR (myr	میانگین SCE (m)
۵۰	۳۰۰	۳/۷۹	۰۱/۲۶-	۴۸/۰-	۶۲/۴۸
۱۰۰	۱۵۰	۳/۷۹	۳۱/۲۵- تا ۷۰/۲۶-	۴۶/۰- تا ۴۹/۰-	۸۹/۴۸ تا ۳۶/۴۸
۱۵۰	۱۰۰	۰/۸۱- تا ۰/۷۸	۰۴/۲۵- تا ۶۰/۲۶-	۴۴/۰- تا ۵۰/۰-	۰۲/۵۰ تا ۶۹/۴۷
۲۰۰	۷۵	۷/۸۲- تا ۰/۷۶	۲۸/۲۴- تا ۴۸/۲۷-	۴۳/۰- تا ۵۲/۰-	۷۷/۴۹ تا ۵۹/۴۷

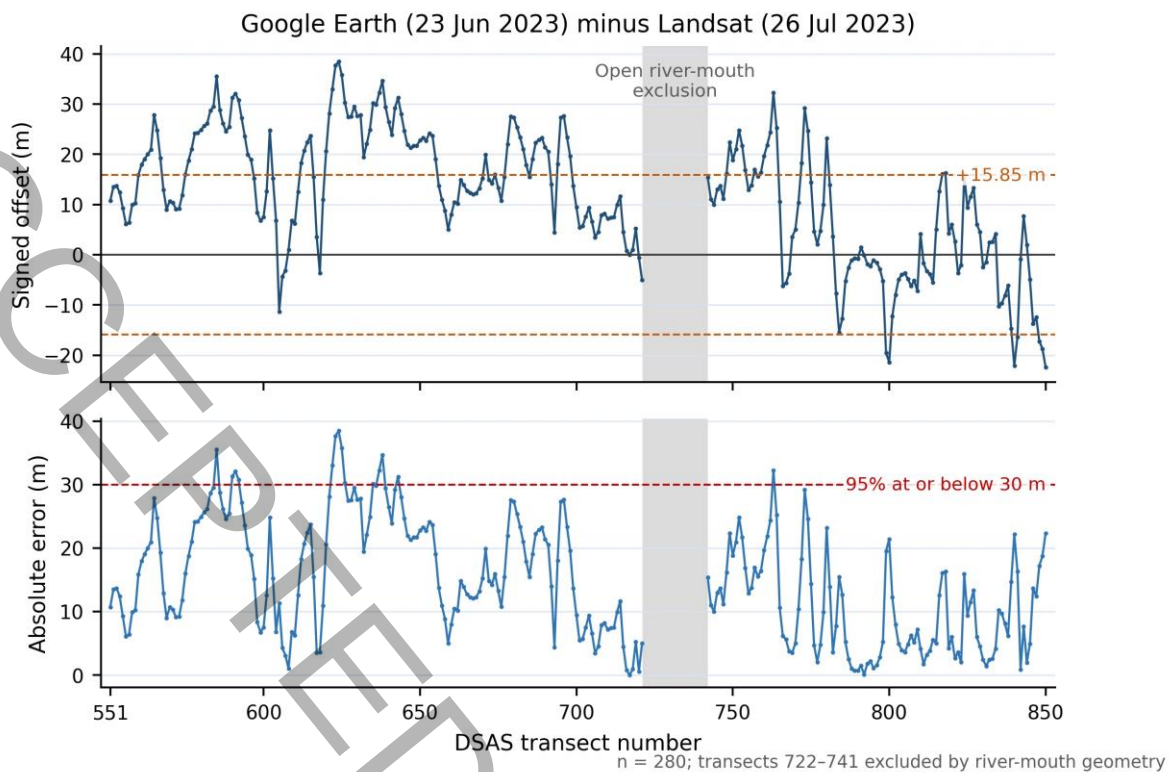
ط ساحلی ۲۰۲۳

پس از حذف پیشینی ترانسکت‌های ۷۲۲ تا ۷۴۱ در دهانه باز رودخانه، همه ۲۸۰ ترانسکت دیگر هر دو خط را قطع کردند. میانگین اختلاف علامت‌دار Google Earth منهای لندست، که در اینجا به صورت قراردادی Bias نامیده شده است، برابر ۸۰/۱۱+ متر و میانه آن ۶۶/۱۲+ متر بود؛ MAE برابر ۶۸/۱۴ متر و RMSE برابر ۳۲/۱۷ متر به دست آمد RMSE. پس از حذف میانگین اختلاف برابر ۶۸/۱۲ متر و صدک ۹۵ اختلاف مطلق ۸۷/۲۹ متر بود. در مجموع، ۲۱۴ ترانسکت (۴/۷۶ درصد) در باند جزئی ۴۲/۲۲± متر و ۲۶۶ ترانسکت (۰/۹۵ درصد) در فاصله مطلق حداکثر ۳۰ متر قرار گرفتند (جدول ۶ و شکل ۱۰). به دلیل فاصله ۳۳ روزه و نامعلوم بودن جزرومد، این شاخص‌ها اختلاف مرکب دو خط را توصیف می‌کنند و معیار مستقل دقت استخراج نیستند.

جدول ۶: شاخص‌های مقایسه نزدیک‌زمان خط ساحلی لندست ۲۶ ژوئیه ۲۰۲۳ و خط Google Earth مورخ ۲۳ ژوئن ۲۰۲۳؛ فاصله زمانی دو تصویر ۳۳ روز است.

Table 6. Near-date comparison metrics for the Landsat shoreline of 26 July 2023 and the Google Earth shoreline of 23 June 2023; the images are 33 days apart.

کمیت	نتیجه	تفسیر یا فاصله اطمینان ۹۵ درصد
۲۰ ترانسکت ۷۲۲-۷۴۱ در دهانه رودخانه حذف شد	۲۸۰	ترانسکت قابل مقایسه
۸۵/۷+ تا ۰۲/۱۷+ متر؛ نه سوگیری خالص استخراج	۸۰/۱۱+ متر	میانگین اختلاف علامت‌دار (Bias) قراردادی)
۶۱/۱۱ تا ۱۵/۱۸ متر	۶۸/۱۴ متر	میانگین قدر مطلق اختلاف (MAE)
۲۶/۱۴ تا ۵۲/۲۰ متر	۳۲/۱۷ متر	ریشه میانگین مربعات اختلاف (RMSE)
پس از حذف میانگین اختلاف	۶۸/۱۲ متر	ریشه میانگین مربعات اختلاف مرکز‌دایی شده
۲۶۶ از ۲۸۰ ترانسکت؛ ۰/۹۵ درصد در فاصله کمتر یا مساوی ۳۰ متر	۸۷/۲۹ متر	صدک ۹۵ اختلاف مطلق
تحلیل توصیفی؛ نه تأیید بودجه کامل عدم قطعیت	۴/۰/۷۶ = ۲۸۰/۲۱۴	داخل باند جزئی ۴۲/۲۲± متر



شکل ۱۰: اختلاف مکانی خط ساحلی Google Earth مورخ ۲۳ ژوئن ۲۰۲۳ و خط لندست مورخ ۲۶ ژوئیه ۲۰۲۳ در امتداد ترانسکت‌ها. ناحیه خاکستری ترانسکت‌های ۷۲۲ تا ۷۴۱ است که به دلیل هندسه دهانه باز رودخانه حذف شد؛ خط‌چین‌های نارنجی مؤلفه پایه و جزئی ± 15.85 متر برای هر خط و خط‌چین قرمز آستانه اختلاف مطلق ۳۰ متر را نشان می‌دهند. این مقایسه به دلیل فاصله ۳۳ روزه و جزرومد نامعلوم، اعتبارسنجی مستقل دقت استخراج نیست.

Figure 10. Spatial differences between the Google Earth shoreline of 23 June 2023 and the Landsat shoreline of 26 July 2023 along the transects. The grey band identifies transects 722-741, which were omitted because of the open river-mouth geometry; orange dashed lines show the partial baseline positional component of ± 15.85 m for each shoreline, and red dashed lines show the 30 m absolute-difference threshold. Because the images are 33 days apart and their tidal stages are unknown, this comparison is not an independent validation of extraction accuracy.

قرار گرفتن مقدار $85/15$ متر در محدوده فاصله اطمینان بلوکی $RMSE(26/14)$ تا $52/20$ متر (فقط هم‌مرتبه بودن عددی دو کمیت را نشان می‌دهد و بودجه عدم قطعیت یا دقت استخراج را تأیید نمی‌کند. مؤلفه $85/15$ متر خطای آستانه‌گذاری، ویرایش و جابه‌جایی جزرومدی را دربر نمی‌گیرد، درحالی‌که شاخص‌های اختلاف از دو تصویر با فاصله ۳۳ روزه و تراز جزرومد نامعلوم به دست آمده‌اند. میانگین اختلاف علامت‌دار مثبت می‌تواند ترکیبی از تغییر واقعی خط ساحل، اختلاف جزرومد، تفکیک و مکان‌یابی لندست و رقومی‌سازی Google Earth باشد؛ از داده حاضر نمی‌توان سهم این مؤلفه‌ها را جدا کرد.

همبستگی و توافق علامت NSM و LRR فقط سازگاری آماری دو خروجی وابسته را توصیف می‌کند؛ به دلیل اشتراک موقعیت‌های انتهایی، این سازگاری شاهد مستقل گرایش منطقه‌ای نیست. توافق علامت 0.79 درصد نیز به‌تنهایی شواهد ژئومورفولوژیکی فراهم نمی‌کند. در مقابل، ناسازگاری 0.20 درصدی و موارد SCE بالا با LRR نزدیک صفر، بازه‌هایی را مشخص می‌کند که در آن‌ها چهار مشاهده با مدل خطی ساده سازگاری کمتری دارند. تعیین اینکه این الگو ناشی از تغییر واقعی شکل ساحل، نوسان مرز آب-خشکی، جزرومد یا خطای استخراج است، با داده‌های حاضر ممکن نیست. بنابراین تفسیر مطالعه در سطح آماری-ژئوماتیکی باقی می‌ماند و هیچ سازوکار فرآیندی از این شاخص‌ها استنباط نمی‌شود.

در داده‌های حاضر سری زمانی موج و جریان، بودجه رسوب، دانه‌بندی یا باتیمتری وجود ندارد؛ بنابراین این پژوهش نقش موج، جریان، انتقال طولی رسوب یا رخداد‌های حدی را آزمون یا تأیید نمی‌کند. ناهمگنی طول ساحلی صرفاً به‌عنوان الگوی مکانی موقعیت خطوط استخراج‌شده گزارش می‌شود. اثبات جهت انتقال رسوب و پیوند آن با کانون‌های تغییر به مدل موج-جریان و پایش مستقیم

رسوب نیاز دارد. مقایسه با مطالعات منطقه‌ای [۱۲،۳۱] فقط زمینه‌ای برای مقایسه مقادیر گزارش شده فراهم می‌کند و جای داده فرآیندی محلی را نمی‌گیرد.

به همین ترتیب، پیشروی‌های موضعی به تغذیه طبیعی یا سازه‌های ساحلی نسبت داده نشد، زیرا نقشه زمان‌مند سازه‌ها، لایروبی، کاربری زمین و منابع رسوب در اختیار نبود. ارتباط کمی LRR با شیب، نوع رسوب یا مورفولوژی نیز آزمون نشد. این متغیرها می‌توانند به‌عنوان لایه‌های توضیحی در پژوهش بعدی وارد مدل شوند؛ در مطالعه حاضر، پیشروی به‌عنوان تغییر مشاهده‌شده گزارش می‌شود و منشأ طبیعی یا انسانی آن نامعین باقی می‌ماند.

برای مدیریت، هیچ‌یک از شاخص‌ها به‌تنهایی نقشه خطر یا تبیین فرآیندی ایجاد نمی‌کند LRR. همراه LCI90 برای غربال‌گرایی چندتاریخه مناسب‌تر است، SCE دامنه اختلاف میان خطوط مشاهده‌شده را خلاصه می‌کند و NSM و EPR اندازه تغییر نقطه‌انتهایی را نشان می‌دهند. بازه‌های دارای LRR منفی، SCE بالا یا جابه‌جایی فراتر از باند جزئی پیکسل-مکان‌یابی می‌توانند در اولویت پایش تکمیلی قرار گیرند، اما این معیارها به‌تنهایی مبنای مداخله مهندسی نیستند. تبدیل خروجی‌ها به تصمیم اجرایی مستلزم افزودن داده مواجهه زیرساخت، ارزش دارایی، اکوسیستم، توپوگرافی، فرایندهای ساحلی و هزینه مداخله است.

در توسعه بعدی می‌توان خروجی‌های DSAS را به‌صورت معیار یا قید در بهینه‌سازی چندهدفه برای انتخاب نوع، مکان و زمان اقدام حفاظتی وارد کرد؛ برای نمونه، الگوریتم‌های جست‌وجوی هوشمند در تصمیم‌های هزینه‌ای زیرساخت قابلیت مقایسه گزینه‌ها را نشان داده‌اند [۳۲]. این تلفیق در پژوهش حاضر اجرا نشده و به داده هزینه، اثربخشی و محدودیت‌های محیط‌زیستی نیاز دارد. اجرای برنامه حفاظت نیز ممکن است با محدودیت بودجه، اخذ مجوز، هماهنگی سازمانی، تملک، تأمین داده و ظرفیت پیمانکار روبه‌رو شود؛ عواملی از این نوع در مطالعات تأخیر پروژه‌های عمرانی نیز گزارش شده‌اند [۳۳]. بنابراین پیشنهاد می‌شود برنامه اجرایی مرحله‌بندی، مسئولیت نهادی، پایش شاخص عملکرد و ذخیره زمانی-مالی داشته باشد.

بازه ۱۹۹۳-۲۰۲۳ برای توصیف تغییر چنددهه‌ای و غربال منطقه‌ای مناسب است، اما فقط چهار مقطع زمانی دارد. تفکیک ۳۰ متری و نبود تصحیح جزرومدی، تفسیر موضعی را محدود می‌کند. مقایسه نزدیک‌زمان Google Earth کل محدوده قابل مقایسه را پوشش داد، اما خط ۲۳ ژوئن با خط لندست ۲۶ ژوئیه ۲۰۲۳ فاصله ۲۳ روزه داشت و تراز آب دو زمان معلوم نبود؛ بنابراین میانگین اختلاف علامت‌دار، MAE و RMSE ترکیبی از تغییر واقعی کوتاه‌مدت، اختلاف جزرومد و خطاهای دو منبع‌اند و نه معیار مستقل دقت استخراج. نبود داده موج، جریان، شیب، رسوب و تاریخ مداخله نیز هرگونه تفسیر علی یا فرآیندی را خارج از ظرفیت مطالعه قرار می‌دهد. تصاویر ۲-Sentinel یا تجاری هم‌زمان، پهپاد یا DGPS، تراز آب لحظه‌ای و پروفیل ساحلی برای تفکیک مؤلفه‌های خطا و بررسی فرایندها لازم است.

۵- نتیجه‌گیری

نتیجه اصلی مقاله در سطح یک تحلیل آماری-ژئوماتیکی و در دو مقیاس تفسیر می‌شود: فراوانی بالای کلاس عملیاتی فرسایش در مقیاس منطقه‌ای و محدودیت زیاد در استنباط موضعی. میانگین NSM، EPR و LRR منفی بود و فاصله اطمینان بلوکی هر سه میانگین صفر را دربر نگرفت، اما فاصله اطمینان LRR بسیاری از ترانسکت‌های منفرد به دلیل وجود فقط چهار تاریخ گسترده بود. مقایسه نزدیک‌زمان Google Earth و لندست فقط اندازه اختلاف مکانی مرکب دو خط ناهم‌زمان را توصیف کرد؛ فاصله ۳۳ روزه و تراز جزرومد نامعلوم اجازه نمی‌دهد این اختلاف‌ها به خطای استخراج نسبت داده شوند یا برای تأیید بودجه کامل عدم قطعیت به‌کار روند.

یافته‌های اصلی عبارت‌اند از:

- بر اساس آستانه عملیاتی NSM-۵ متر، ۲۳۸ ترانسکت (۳/۷۹ درصد) در کلاس فرسایشی قرار گرفتند و فاصله اطمینان بلوکی ۹۵ درصد این فراوانی ۷/۶۷ تا ۰/۸۹ درصد بود. مقایسه با نسبت مرجع ۵۰ درصد فقط فراوانی منطقه‌ای این کلاس را می‌آزماید و به معنای معنی‌دار بودن تغییر در هیچ ترانسکت منفردی نیست. همه مقادیر منفی NSM نیز ۲۶۳ ترانسکت (۷/۸۷ درصد) را شامل می‌شوند و این دو تعریف نباید یکسان گزارش شوند.

• NSM و LRR همبستگی Pearson برابر $0.958/0$ و توافق علامت $0.79/0$ درصد داشتند، اما این دو شاخص به دلیل اشتراک اطلاعات موقعیت‌های انتهایی مستقل نیستند. بنابراین ضریب همبستگی و توافق علامت فقط سازگاری توصیفی را نشان می‌دهند و شاهد مستقل آماری یا ژئومورفولوژیکی برای تأیید گرایش یا فرایند ساحلی نیستند.

• مؤلفه پایه $85/15$ متر برای هر خط، که فقط نصف پیکسل و مکان‌یابی محصول را دربر می‌گیرد، به $42/22$ متر برای NSM و $75/0$ متر بر سال برای EPR منتشر شد؛ 90 ترانسکت پسروری فراتر از این باند جزئی داشتند. چون خطای آستانه‌گذاری، ویرایش و جزرومد در این مقادیر وارد نشده است، آن‌ها بودجه کامل عدم قطعیت یا آزمون معنی‌داری موضعی محسوب نمی‌شوند.

• مقایسه نزدیک‌زمان در 280 ترانسکت، میانگین اختلاف علامت‌دار $80/11$ متر، MAE برابر $68/14$ متر و RMSE برابر $32/17$ متر نشان داد و 95 درصد اختلاف‌های مطلق کمتر از 30 متر بود. این مقادیر به دلیل فاصله 33 روزه و جزرومد نامعلوم، ترکیبی از تغییر واقعی و خطاهای دو منبع‌اند؛ از این‌رو اعتبارسنجی مستقل دقت استخراج نیستند و از بودجه کامل عدم قطعیت پشتیبانی یا برای تصحیح Bias استفاده نمی‌شوند.

• زیرنمونه‌گیری 100 تا 200 متر جهت و اندازه نتیجه کل را تغییر نداد؛ نسبت کلاس فرسایشی $0.76/0$ تا $7/82$ درصد و میانگین LRR در همه آرایش‌ها منفی باقی ماند.

• برای غربال مدیریتی، LRR همراه فاصله اطمینان، NSC، EPR و باید فقط به‌عنوان شاخص‌های آماری-ژئوماتیکی به کار روند؛ نسبت‌دادن تغییرات به موج، جریان، رسوب یا سازه و هرگونه نتیجه‌گیری فرآیندی بدون داده مستقل مجاز نیست.

پیشنهاد می‌شود پایش بعدی با تصاویر با تفکیک بالاتر و تاریخ‌های بیشتر، اندازه‌گیری جزرومد و شیب، برداشت پهپاد یا DGPS و داده موج-جریان-رسوب تلفیق شود. تا آن زمان، خروجی حاضر باید برای اولویت‌بندی پایش و غربال اولیه استفاده شود، نه برای طراحی سازه، تعیین حریم قطعی یا انتساب علی فرسایش.

۶- قدردانی

نویسندگان مقاله از دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر به جهت ایجاد شرایط لازم برای انجام تحقیق حاضر کمال تشکر و قدردانی را دارند.

منابع

- [1] E.C.F. Bird, Coastal Geomorphology: An Introduction, 2nd ed., Wiley-Blackwell, Chichester, 2016.
- [2] R.J. Nicholls, A. Cazenave, Sea-level rise and its impact on coastal zones, Science, 328(5985) (2010) 1517-1520.
- [3] S. Vitousek, P.L. Barnard, C.H. Fletcher, N. Frazer, L. Erikson, C.D. Storlazzi, Doubling of coastal flooding frequency within decades due to sea-level rise, Scientific Reports, 7 (2017) 1399.
- [4] M.I. Vousdoukas, R. Ranasinghe, L. Mentaschi, T.A. Plomaritis, P. Athanasiou, A. Luijendijk, L. Feyen, Sandy coastlines under threat of erosion, Nature Climate Change, 10 (2020) 260-263.
- [5] E. Pranzini, A.T. Williams (Eds.), Coastal Erosion and Protection in Europe, Routledge, London, 2013.
- [6] S. Maiti, A.K. Bhattacharya, Shoreline change analysis and its application to prediction: A remote sensing and statistics-based approach, Marine Geology, 257(1-4) (2009) 11-23.
- [7] E.A. Himmelstoss, R.E. Henderson, M.G. Kratzmann, A.S. Farris, Digital Shoreline Analysis System (DSAS) Version 5.0 User Guide, U.S. Geological Survey Open-File Report 2018-1179, 2018.
- [8] F. Parhizkar, M. Rajabi, M. Yamani, D. Mokhtari, Temporal analysis of shoreline changes along the northern Strait of Hormuz using Digital Shoreline Analysis tools, Environmental Erosion Research Journal, 9(2) (2019) 1-18 (in Persian).
- [9] S. Mahmoudi, D. Mokhtari, M.H. Rezaei-Moghaddam, A. Moradi, GIS and RS-based modeling of shoreline changes on the eastern and western coasts of Jask Port during 1989-2016, Geography and Planning, 24(71) (2020) 369-390 (in Persian).
- [10] F. Naseri, A. Salehipour Milani, Investigation of shoreline changes in the southwestern Caspian Sea during 1999-2020 using RS and GIS, in: Proceedings of the Eighth National Conference on Geomorphology: Functions and Necessities, Tehran, 2021 (in Persian).
- [11] S. Negahban, D. Rostami, H. Ganjian, Monitoring shoreline changes using remote sensing along the Oman Sea coasts from Chabahar to Tang Port, Quantitative Geomorphological Research (QGR), 5(1) (2016) 27-42 (in Persian).

- [12] S. Negahban, K. Bagheri, S. Heydari, L. Gorouhi, Investigation and monitoring of shoreline changes in the Oman Sea at Jask region, *Quantitative Geomorphological Research (QGR)*, 6(1) (2017) 119-136 (in Persian).
- [13] L. Amini, A. Abdollahi Kakroodi, Comparison of temporal shoreline changes in the Gorganrud and Sefidrud deltas using the Digital Shoreline Analysis System (DSAS), *Journal of Oceanography*, 9(35) (2018) 21-28 (in Persian).
- [14] A. Rostami Saghaz, M.A. Sharifi, M. Hasanlou, Investigation of shoreline changes between Chalous and Tonekabon using Sentinel-1 satellite imagery, *Nivar*, 45(114-115) (2021) 108-116 (in Persian).
- [15] H. Khoshnavan, P. Karimi, P. Alami Saf-Avali, P. Poursafari Yekrang, Comparison of shoreline change intensity and erosion susceptibility of major ports along the Caspian Sea coasts, *Iranian Journal of Remote Sensing and GIS*, 15(2) (2023) 73-86 (in Persian).
- [16] A. Raeisi, M. Torabi Azad, H. Mehrfar, T. Sadeghi, Study of shoreline changes in Hormozgan Province using radar satellite imagery analysis, in: *Proceedings of the First National Conference on Land Use Planning with Emphasis on Sea, Ports and Coasts*, Tehran, 2022 (in Persian).
- [17] M.S. Karimi, Investigation of shoreline dynamic changes in Miankaleh wetland using Landsat satellite imagery (1, 2, 5, 7 and 8), in: *Proceedings of the Second National Conference on Sustainable Development of the Persian Gulf: Environment of Coastal Areas*, Bushehr, 2022 (in Persian).
- [18] D. Ghaderi, M. Rahbani, Z. Salari, R. Shamsaei, Short-term shoreline change analysis of Tiab estuary using RS and GIS techniques, in: *Proceedings of the First International Conference on Marine Sciences with an Innovation Approach in Aquatic Ecosystems and Blue Economy*, 2022 (in Persian).
- [19] J. Karami, M. Habibi Nokhandan, M. Azadi, A. Rashidi, A. Hessari, Investigation of shoreline changes along the southern Caspian Sea using remote sensing data, *Journal of Water and Soil Science (JWSS)*, 29(3) (2025) 49-71 (in Persian).
- [20] C.J. Hapke, E.A. Himmelstoss, M.G. Kratzmann, J.H. List, E.R. Thieler, National assessment of shoreline change: Historical shoreline change along the New England and Mid-Atlantic coasts, *U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010-1118*, 2013.
- [21] A. Luijendijk, G. Hagenaars, R. Ranasinghe, F. Baart, G. Donchyts, S. Aarninkhof, The state of the world's beaches, *Scientific Reports*, 8 (2018) 6641.
- [22] O.A. Dada, R. Almar, E.W.J. Bergsma, B. Castelle, Satellite-based shoreline detection and monitoring: A review, *Remote Sensing*, 15 (2023) 1863.
- [23] K. Vos, K.D. Splinter, M.D. Harley, J.A. Simmons, I.L. Turner, CoastSat: A Google Earth Engine enabled tool to extract shorelines from satellite imagery, *Environmental Modelling & Software*, 122 (2019) 104528.
- [24] P. Athanasiou, A. Van Dongeren, A. Giardino, M. Voutsdoukas, S. Gaytan-Aguilar, R. Ranasinghe, Global distribution of nearshore slopes with implications for coastal retreat, *Earth System Science Data*, 12 (2020) 1515-1529.
- [25] A.T.I. Colak, Geospatial analysis of shoreline changes in the Oman coastal region (2000-2022) using GIS and remote sensing techniques, *Frontiers in Marine Science*, 11 (2024) 1305283. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1305283>.
- [26] E.P. Crist, A TM tasseled cap equivalent transformation for reflectance factor data, *Remote Sensing of Environment*, 17(3) (1985) 301-306. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(85\)90102-6](https://doi.org/10.1016/0034-4257(85)90102-6).
- [27] C. Huang, B. Wylie, L. Yang, C. Homer, G. Zylstra, Derivation of a tasselled cap transformation based on Landsat 7 at-satellite reflectance, *International Journal of Remote Sensing*, 23(8) (2002) 1741-1748. <https://doi.org/10.1080/01431160110106113>.
- [28] M.H.A. Baig, L. Zhang, T. Shuai, Q. Tong, Derivation of a tasselled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance, *Remote Sensing Letters*, 5(5) (2014) 423-431. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2014.915434>.

- [29] E.B. Wilson, Probable inference, the law of succession, and statistical inference, *Journal of the American Statistical Association*, 22(158) (1927) 209-212. <https://doi.org/10.1080/01621459.1927.10502953>.
- [30] H.R. Künsch, The jackknife and the bootstrap for general stationary observations, *The Annals of Statistics*, 17(3) (1989) 1217-1241. <https://doi.org/10.1214/aos/1176347265>.
- [31] M. Ahmadi, M.H. Ramash, H. Dervishi, Shoreline change trend analysis using remote sensing and GIS techniques: A case study of Deyr County shoreline, Persian Gulf, *Geography and Environmental Planning*, 5(2) (2014) 63-74 (in Persian).
- [32] M. Tohidi, N. Khayat, A. Telvari, Cost optimization of pavement thickness design using intelligent search versus linear programming algorithms, *Ain Shams Engineering Journal*, 14(12) (2023) 102256. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102256>.
- [33] S. Saeb, N. Khayat, A. Telvari, Causes of delay in Khuzestan Steel Company construction projects, *Industrial Engineering & Management Systems*, 15(4) (2016) 335-344. <https://doi.org/10.7232/iems.2016.15.4.335>.