

## پیش‌بینی مقدار تغییرات سالانه خط ساحلی دریای خزر (محدوده دلتای رودخانه‌ای گرگان‌رود)

قاسم لورستانی\* - استادیار دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه مازندران

پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۱۱/۰۳ تأیید نهایی: ۱۳۹۳/۰۹/۱۲

### چکیده

امواج، جریان‌های دریایی و باد تحت تأثیر نوسان‌های سطح آب دریا، تغییرات زیادی بر مناطق ساحلی تحمیل می‌کند. در این پژوهش، پیش‌آمدگی دلتای رودخانه‌ای گرگان‌رود در مصب بررسی شده است. هدف این تحقیق، بررسی مقدار تغییرات خط ساحلی با استفاده از دو روش مختلف و پیش‌بینی موقعیت آینده این خط است. با تهیه و پردازش تصاویر ماهواره‌ای در نرم‌افزار ENVI و رقوم‌سازی آنها در نرم‌افزار ARCGIS9.3، بررسی مقدار تغییرات و پیش‌بینی آینده موقعیت خط ساحلی با استفاده از روش برش‌های عرضی ارزیابی شد. با توجه به طول پیش‌آمدگی دلتا در داخل دریای خزر و مقدار تغییر متوسط سالانه ۴۰/۲ متر به روش مقدار نقطه پایانی، پیش‌آمدگی قاعده دلتای گرگان‌رود به داخل دریا طی ۱۱۲ سال اخیر شکل گرفته است. نتایج نشان می‌دهد مقدار متوسط تغییرات سالانه در محدوده بررسی شده با روش نقطه پایانی و مقدار میانگین، به ترتیب معادل ۴۰/۲ و ۶۱/۱ متر در سال است. در بین دو روش استفاده شده، روش مقدار نقطه پایانی برای پیش‌بینی تغییرات دوره‌های کوتاه مدت و روش مقدار میانگین برای پیش‌بینی تغییرات دوره‌های بلندمدت کارایی بهتری دارد.

کلیدواژه‌ها: برش عرضی، پیش‌بینی، خط ساحلی، گرگان‌رود، مقدار تغییرات.

### مقدمه

هرگونه برنامه‌ریزی برای استقرار فعالیت‌های انسانی و بهره‌برداری از ظرفیت‌های مناطق ساحلی، مستلزم شناخت ویژگی‌های مناطق ساحلی و پایداری آنهاست؛ زیرا شناخت شرایط ژئومورفولوژیکی سواحل، پایه و اساس هر پژوهشی را در زمینه مناطق ساحلی تشکیل می‌دهد (یمانی و همکاران، ۱۳۹۲: ۲). از مهم‌ترین جنبه‌های مدیریت و برنامه‌ریزی ساحلی، تحقیق درباره دینامیک و علل ایجاد تغییرات در راستای خط ساحلی است. به دلیل اهمیت موضوع و تأثیر این پدیده بر فعالیت‌های انسانی و اقتصادی، تحقیقات زیادی در سطح جهان و منطقه صورت گرفته است. اولین پژوهش‌ها در زمینه تغییرات خط ساحلی، در سواحل قاره‌ای شرق ایالات متحده صورت گرفت. این تحقیقات روش‌های متعددی برای درک تغییرات خط ساحلی را به ما نشان می‌دهد. قدیمی‌ترین روش استفاده شده به منظور تعیین نحوه و مقدار تغییرات خط ساحلی، اندازه‌گیری فاصله نقاط ساحلی نسبت به نقاط کنترلی ثابت است. داده‌های خط ساحلی لوئیزیانا از

\* E- mail: gh.lorestani@umz.ac.ir

سال ۱۸۵۳ به بعد، با این روش به دست آمده است (مک‌براید<sup>۱</sup> و همکاران، ۱۹۸۹). دولان<sup>۲</sup> و همکاران (۱۹۹۱) مقدار فرسایش بلندمدت و کوتاه‌مدت تغییرات خط ساحلی را با استفاده از روش مقدار نقطه پایانی<sup>۳</sup> و رگرسیون خطی و چند مدل آماری دیگر بررسی کردند. دوکاکیس<sup>۴</sup> (۲۰۰۷) با اعتقاد به دشواری پیش‌بینی تغییرات فیزیکی خط ساحلی، از روش‌های مختلف آماری شامل رگرسیون خطی، مقدار میانگین، مقدار نقطه پایانی، مقدار تاشو، عامل تعمیم و عامل اعوجاج، برای محاسبه مقدار تغییر خط ساحلی استفاده کرده، در نهایت، به تجزیه و تحلیل تغییرات و پیش‌بینی خط ساحلی پرداخت. گنز<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۰۷) با مقایسه روش‌های مختلف بررسی مقدار تغییرات خط ساحلی در مناطق مختلف جهان دریافتند که بین روش‌های آماری، سه روش وزن‌دهی WLS، RWLS، و WLAD ارجحیت بیشتری دارد. اپنینگ‌آدو<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۰۸) با استفاده از روش عددی متکی بر ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی و زمین‌شناسی، شواهد تاریخی و نوسان‌های تراز آب دریا در محدوده خط ساحلی آکرا در خلیج گینه، مقدار تغییرات خط ساحلی را به مقدار ۱/۱۳ متر در سال پیش‌بینی کردند. موکوپادهای<sup>۷</sup> و همکاران (۲۰۱۲) در سواحل پوری در خلیج بنگال با استفاده از روش مقدار نقطه پایانی و مشاهدات میدانی، مقدار تغییرات خط ساحلی را برای سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۲۵ پیش‌بینی کردند. باماسود و لوئیزبرن<sup>۸</sup> (۲۰۱۳) با استفاده از روش‌های مقدار نقطه پایانی و رگرسیون خطی، در پیش‌بینی تغییرات خط ساحلی در شمال دریاچه ایری کانادا، به این نتیجه رسیدند که فعالیت‌های انسانی ممکن است نتایج پیش‌بینی را دستخوش تغییرات زیادی کند.

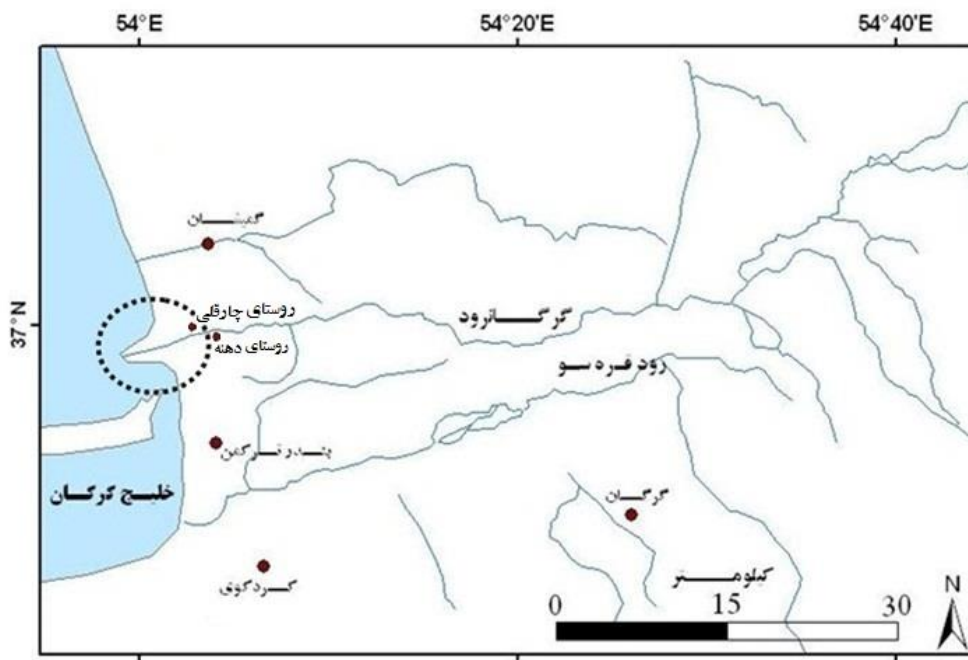
در ایران، فقدان پژوهش در زمینه پیش‌بینی تغییرات خط ساحلی بسیار مشهود است. دو پژوهش جداگانه را آزرم‌سا و رزمخواه (۱۳۸۵ و ۱۳۸۹) در زمینه پیش‌بینی مقدار تغییرات خط ساحلی در منطقه چابهار و خلیج پزم، در بررسی موقعیت خط ساحلی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای انجام دادند. این محققان با بهره‌گیری از روش‌های مقدار نقطه پایانی، کمترین مربعات و روش ترکیبی، موقعیت آینده خط ساحلی را پیش‌بینی کرده، معتقدند که استفاده از روش ترکیبی نتایج بهتری نسبت به روش‌های دیگر آماری داشته است. در محدوده خط ساحلی گرگان‌رود، عمده پژوهش‌ها به بررسی عوامل تأثیرگذار بر قاعده دلتا از سمت خشکی یا تأثیر نوسان تراز آب دریا متمرکز شده و کمتر به بررسی تغییرات خط ساحلی توجه شده است؛ از جمله آنها می‌توان به پژوهش‌های جعفری‌گلو و همکاران (۱۳۹۱) در بررسی شواهد ژئومورفولوژیک تغییرات سطح اساس دریای خزر طی کواترن پستین در محدوده رودخانه گرگان‌رود، لاهیجانی و همکاران (۲۰۰۹) در بررسی شواهدی از سطوح تراز بالای آب دریای خزر در بخش مرکزی گیلان و شرق مازندران و کاکرودی و همکاران (۲۰۱۲) در بررسی تغییرات سریع سطح آب دریای خزر در طول هولوسن در محدوده جنوب شرق دریای خزر با تأکید بر نوسان آب دریا اشاره کرد.

1. McBride
2. Dolan
3. End point rate
4. Doukakis
5. Genz
6. Appeaningaddo
7. Mukhopadhyay
8. Bamasoud and Louisbyrne

در این پژوهش، به دلیل اهمیت موضوع تغییرات و پیش‌بینی مقدار تغییرات خط ساحلی دریای خزر، سعی شد با بررسی مقدار تغییرات خط ساحلی در تصاویر چندزمانه، اندازه این تغییرات در محدوده دلتای رودخانه‌ای گرگان‌رود محاسبه و در نهایت، با استناد به شواهد میدانی و سنجش سطح کارایی روش‌های استفاده‌شده، به پیش‌بینی مقدار تغییرات آتی این خط پرداخته شود.

### منطقه پژوهش

در بخش جنوب شرقی دریای خزر، قاعده دلتای رودخانه‌ای گرگان‌رود با مختصات طول جغرافیایی  $53^{\circ}57'$  تا  $54^{\circ}11'$  شرقی و  $36^{\circ}56'$  تا  $37^{\circ}$  شمالی قرار دارد. در این پژوهش، پیش‌آمدگی دلتای رودخانه‌ای گرگان‌رود در مصب بررسی شد (شکل ۱).



شکل ۱. موقعیت قاعده دلتای رودخانه‌ای گرگان‌رود در دریای خزر

گرگان‌رود از منتهی‌الیه کوه‌های خراسان سرچشمه می‌گیرد و پس از عبور از مسیرهای پریپچ‌وخم کوهستانی، وارد منطقه کلاله شده، با عبور از دشت ساحلی همواری در منطقه خواجه نفس، به دریای خزر می‌ریزد. مساحت حوضه آبریز گرگان‌رود ۱۲ هزار و ۶۰۰ کیلومترمربع و طول رود اصلی ۳۵۰ کیلومتر با دبی سالانه  $0.5$  کیلومتر مکعب است (لاهیجانی و همکاران، ۱۳۸۶). محدوده این پژوهش از نظر اقلیمی با تابستان‌های گرم و خشک تا مرطوب و زمستان‌های سرد مشخص می‌شود (جعفریگلو و همکاران، ۱۳۹۱: ۳۴). گرگان‌رود در تحول و تکامل خلیج گرگان تأثیر بسزایی دارد؛ به نحوی که خلیج گرگان بیشتر تحت تأثیر فرایندهای داخل حوضه ناشی از گرگان‌رود و رود قره‌سوسست که در این میان، گرگان‌رود در نزدیکی دهانه خلیج گرگان با توجه به دبی و آورد رسوب، بسیار مؤثرتر است (لاهیجانی و همکاران، ۱۳۸۹:

۴۶). دانه‌بندی رسوب خلیج گرگان و محدوده خط ساحلی در مصب گرگان‌رود از نوع سیلت و سیلت ماسه‌دار و از نظر کانی‌شناسی این رسوبات حاوی ایلیت، کوارتز، کلسیت، فلدسپات، هماتیت، دولومیت و آراگونیتاست (مرکز ملی اقیانوس‌شناسی ایران<sup>۱</sup>). محاسبه شیب منطقه ساحلی از روی تصاویر ماهواره‌ای اسپات در نرم‌افزار گوگل‌ارث<sup>۲</sup>، شیب متوسط ساحلی را به مقدار کمتر از ۰/۱ درصد نشان می‌دهد که بر شیب بسیار کم این محدوده دلالت می‌کند.

## مواد و روش‌ها

این پژوهش عمدتاً بر پایه روشی تحلیلی با استفاده از روش‌های ریاضی و آماری استوار است که طی آن ابتدا با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰۰ گرگان و ۱:۵۰۰۰۰ گمیشان و بندر ترکمن، حدود کلی منطقه پژوهش تعیین شد. در ادامه، باندهای مرئی و مادون قرمز نزدیک سنجنده‌های TM، MMS و ETM ماهواره لندست بین سال‌های ۱۹۷۵ تا ۲۰۰۱ و تصاویر خط ساحلی سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۱۳ از نرم‌افزار گوگل‌ارث تهیه شد. سپس با پردازش تصاویر در نرم‌افزار ENVI و رقومی‌سازی آنها در نرم‌افزار ARCGIS9.3، خطوط ساحلی مذکور استخراج و تبدیل به فایل‌های خطی چندزمانه شد. روش‌های استفاده‌شده برای بررسی مقدار تغییرات سالانه خط ساحلی و به تبع آن، پیش‌بینی مقدار تغییرات در سال‌های آتی، مبتنی بر استفاده از برش‌های عرضی بود. در این پژوهش، با توجه به انحنای بسیار زیاد خط ساحلی، برش‌هایی عمود بر خط ساحلی در فواصل مساوی پانصدمتری ترسیم شد تا به تحلیل و بررسی مقدار تغییرات در محدوده مصب رودخانه‌ای دلتای گرگان‌رود پرداخته شود. دلیل انتخاب این خط ساحلی، مقدار تغییر دوره‌ای بسیار زیاد این محدوده طی دوره‌های زمانی مختلف است. برای این منظور، سعی شد روش‌های استفاده‌شده در محدوده منتخب، آزمون شود و در نهایت، بهترین روش برای پیش‌بینی آهنگ تغییرات سالانه خط ساحلی به دست آید. برای برآورد مقدار تغییرات سالانه خط ساحلی، از دو روش آماری استفاده شد:

۱. روش مقدار نقطه پایانی: این روش با محاسبه مقدار تغییر خط ساحلی بین اولین و آخرین خط ساحلی رقومی‌شده در دسترس، نسبت به خط مبنا صورت می‌گیرد؛ به این شکل که اختلاف مسافت بین دو تصویر با استفاده از روش برش عرضی به متر مشخص می‌شود و رقم به دست آمده بر اختلاف زمانی آنها بر حسب سال تقسیم می‌شود و به این ترتیب، مقدار تغییرات سالانه خط ساحلی برای محدوده مورد نظر به دست می‌آید (کراول<sup>۳</sup> و همکاران، ۱۹۹۷ و ۱۹۹۹؛ دولان و همکاران، ۱۹۹۱). در ادامه، از مقدار به دست آمده برای سال‌های بعدی به منظور پیش‌بینی آهنگ تغییرات خط ساحلی بهره گرفته می‌شود.

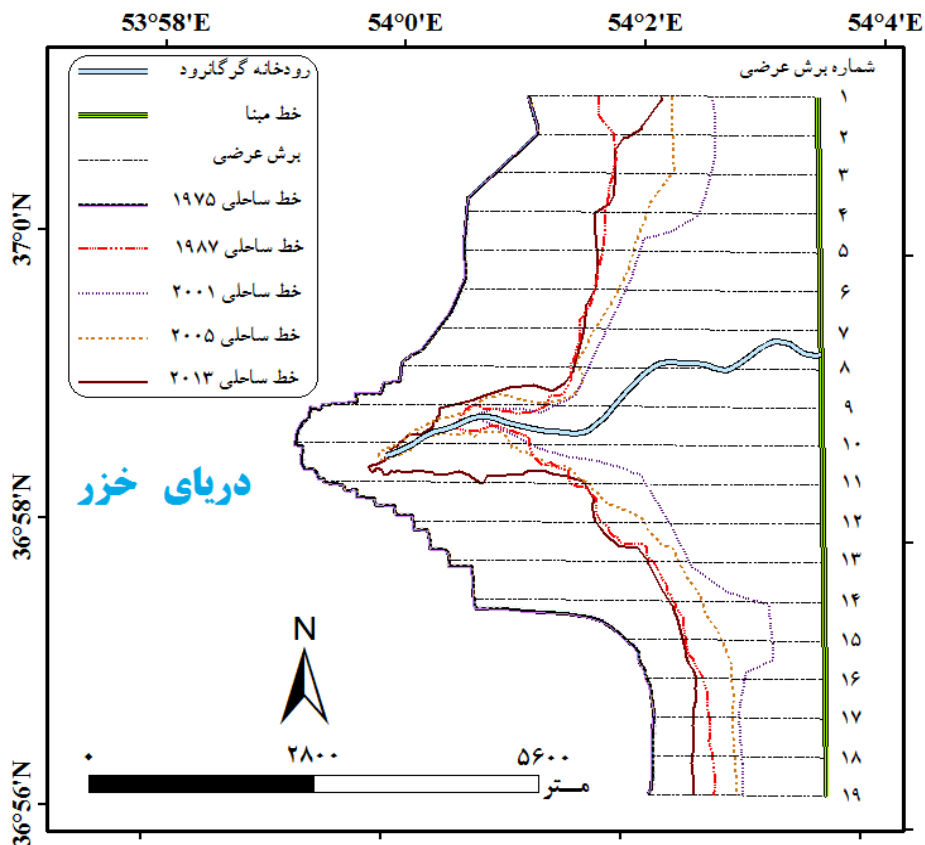
۲. روش مقدار میانگین<sup>۴</sup>: در این روش، دو تصویر با اختلاف زمانی متوالی انتخاب می‌شود و با روشی مشابه روش مقدار نقطه پایانی، مقدار تغییر خط ساحلی برای زوج‌های تصاویری متوالی محاسبه می‌شود. با محاسبه مقدار

1. Iranian National Center for Oceanography (INCO)  
2. Google Earth  
3. Crowell  
4. Average Of Rate (AOR)

تغییرات سالانه با استفاده از این روش، قادر به پیش‌بینی آهنگ تغییرات برای دوره‌های زمانی آینده خواهیم بود (دولان و همکاران، ۱۹۹۱؛ فوستر<sup>۱</sup> و سوج<sup>۲</sup>، ۱۹۸۹؛ فنستر<sup>۳</sup> و همکاران، ۱۹۹۳).

### یافته‌های پژوهش

تراز آب دریای خزر به دلیل نوسان در مقدار ورودی رودخانه‌های منتهی به دریا، تأثیر تکتونیک و عوامل انسانی دستخوش افت‌وخیزهای زیادی می‌شود. با توجه به شیب بسیار کم محدوده مصب دلتای رودخانه‌های گرگان‌رود، این نوسان‌ها سبب تغییرات بسیار زیاد خط ساحلی شده و مکانی مناسب برای بررسی مقدار تغییرات و پیش‌بینی خط ساحلی در سال‌های آتی را فراهم کرده است. با رقوم‌سازی تصاویر چندزمانه و استخراج خطوط ساحلی، ترسیم برش‌های عرضی به فاصله‌های مساوی پانصدمتری انجام گرفت و مقدار تغییرات خط ساحلی با استفاده از دو روش ذکرشده محاسبه و استخراج شد (شکل ۲).



شکل ۲. برش‌های عرضی و خطوط ساحلی چندزمانه

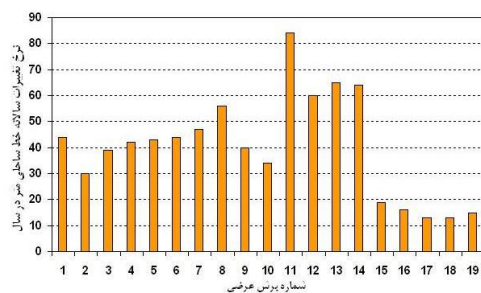
1. Foster
2. Savage
3. Fenster

## مقدار نقطه پایانی

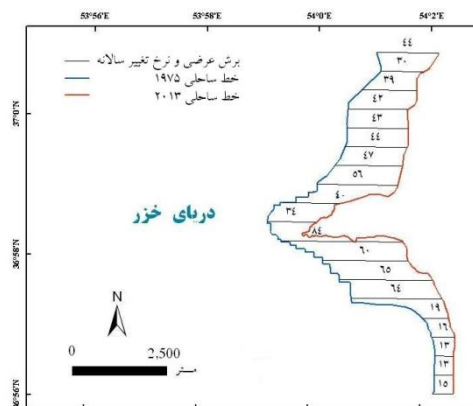
نتایج بررسی تغییرات خط ساحلی به روش نقطه پایانی نشان می‌دهد که بیشترین تغییر در خط ساحلی، در قسمت میانی دلتای رودخانه‌ای گرگان‌رود، در اطراف مسیر رودخانه اصلی با دامنه تغییرات  $۶۳/۷-۸۴/۲$  متر در سال است و پس از آن، قسمت شمالی خط ساحلی، بین  $۳۰/۱-۵۶/۱$  متر در سال حایز اهمیت است. گسترش محیط تالابی در قسمت شمالی، سبب حساس‌تر شدن این قسمت نسبت به تغییرات تراز آب دریا در مقایسه با بخش جنوبی شده است (شکل ۳). کمترین مقدار تغییرات، در قسمت جنوبی محدوده این پژوهش، بین  $۱۲/۹-۱۸/۶$  متر در سال، ثبات زیاد خط ساحلی نسبت به مناطق شمالی را طی سال‌های آماری نشان می‌دهد و مقدار متوسط تغییرات سالانه در کل این محدوده با روش نقطه پایانی به مقدار  $۴۰/۲$  متر در سال است (شکل‌های ۴ و ۵).



شکل ۳. وجود محیط‌های تالابی در شمال رودخانه گرگان‌رود



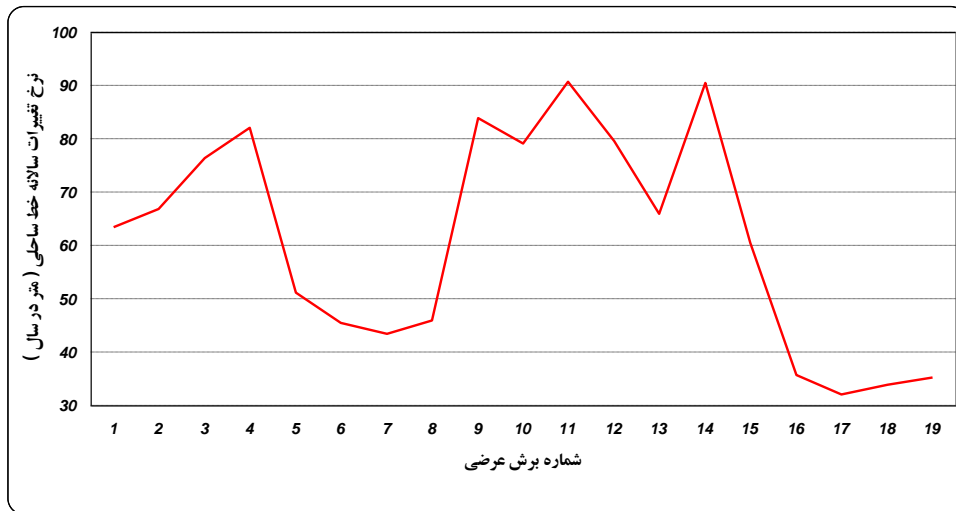
شکل ۵. نمودار ستونی مقدار تغییرات سالانه خط ساحلی به روش EPR در ۱۹ پایش بررسی شده



شکل ۴. مقدار تغییرات سالانه به متر در روش EPR

## مقدار میانگین

محاسبه مقدار تغییرات سالانه به متر در روش میانگین، گویای این حقیقت است که دامنه تغییرات سالانه در محدوده خط ساحلی بررسی شده بین  $۳۲-۹۰/۸$  متر در سال متغیر است. بیشترین تغییر خط ساحلی به دست آمده همانند روش نقطه پایانی در مناطق مرکزی خط ساحلی، بین  $۶۰/۴-۹۰/۸$  متر در سال نوسان دارد و پس از آن، مناطق شمالی خط ساحلی گرگان‌رود با دامنه تغییرات  $۴۳/۱-۸۲/۱$  متر در سال، دارای اهمیت زیادی است. کمترین مقدار تغییر در خط ساحلی در قسمت جنوبی بین  $۳۲-۳۵/۷$  متر در سال را نشان می‌دهد و مقدار متوسط تغییرات سالانه در کل این محدوده با روش مقدار میانگین،  $۶۱/۱$  متر در سال است (شکل ۶).

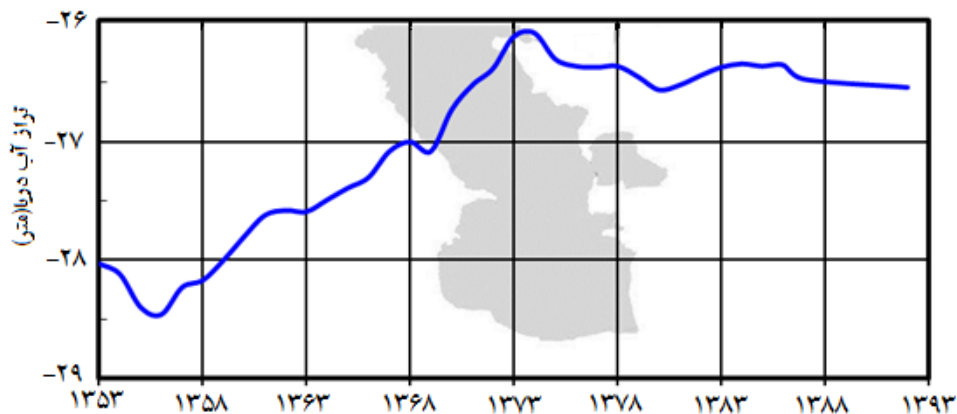


شکل ۶. نمودار خطی مقدار تغییرات سالانه خط ساحلی به روش AOR در ۱۹ برش بررسی شده

بررسی تغییرات خط ساحلی به روش نقطه پایانی و میانگین، مقدار تغییرات را به متر در سال نشان می‌دهد که می‌توان از همین قابلیت برای پیش‌بینی خط ساحلی و مقدار تغییرات آینده خط ساحلی استفاده کرد.

### پیش‌بینی تغییرات خط ساحلی

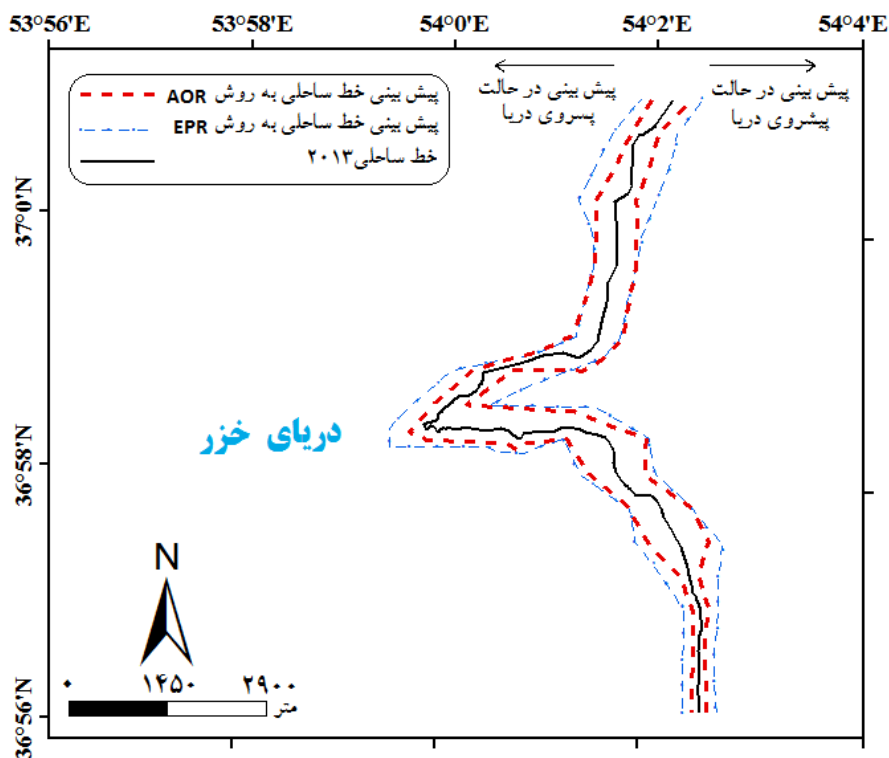
در هر قرن، سطح اساس دریا‌های آزاد ۲/۵ سانتیمتر افزایش می‌یابد (پتیک<sup>۱</sup>، ۱۹۹۱: ۱)؛ این در حالی است که نوسان‌های دوره‌ای سطح آب دریای خزر، در سده اخیر با ۳ متر افت‌وخیز (خوش‌رفتار، ۱۳۸۴: ۱۷۴) از تفاوت اساسی در نحوه تأثیرگذاری نوسان سطح آب دریا بر خط ساحلی و تکامل دلتاهای رودخانه حکایت دارد (شکل ۷). از طرفی، دریای خزر به دلیل داشتن نوسان‌های سریع و زیاد، شهرت جهانی دارد (وسولینگ<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۰۰: ۱) که این مسئله خود بر اهمیت پیش‌بینی تغییرات خط ساحلی افزوده، نحوه محاسبه آن را نسبت به دریا‌های آزاد و اقیانوس‌ها متفاوت می‌سازد.



شکل ۷. نوسان‌های سطح آب دریای خزر (ایستگاه ترازسنجی انزلی) طی سال‌های ۱۳۵۳-۱۳۹۲

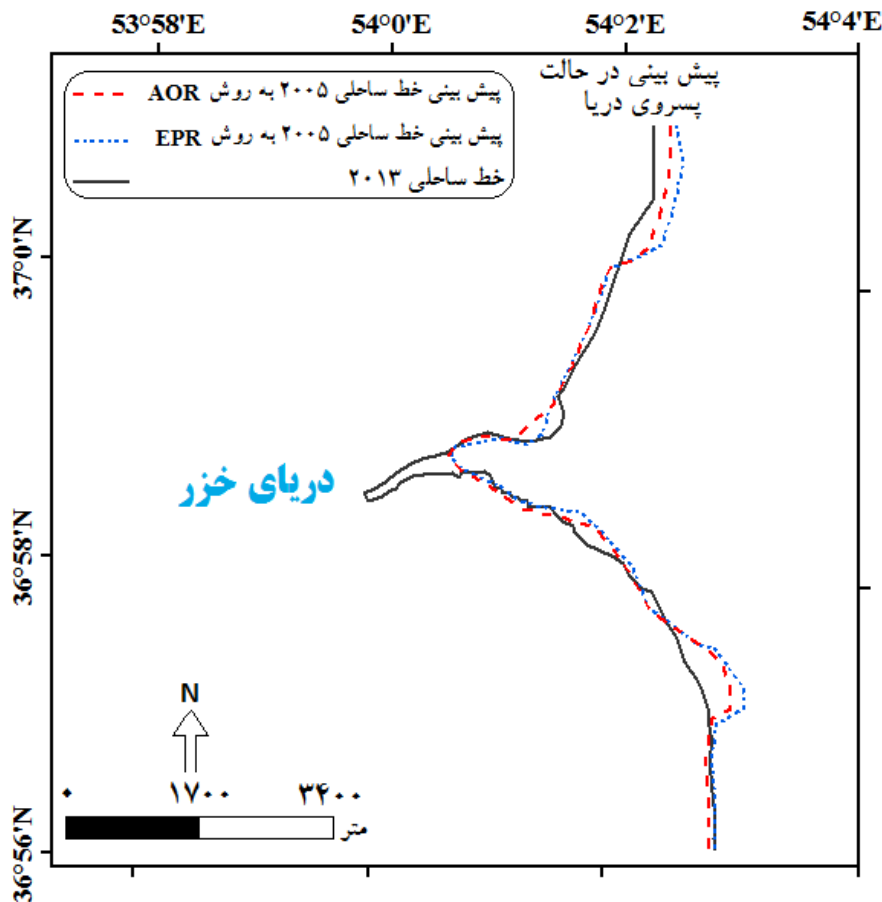
بنابراین، به دلیل اثربخشی بسیار زیاد نوسان‌های سطح آب دریای خزر بر پیش‌بینی موقعیت خط ساحلی، سه حالت در دریای خزر قابل تأمل و بررسی است: حالت اول، ثابت بودن تراز آب دریا؛ حالت دوم، پیش‌روی آب دریای خزر و کاهش وسعت دلتای گرگان‌رود؛ حالت سوم، پس‌روی و افت سطح آب دریا. حالت اول با ثابت بودن تراز آب دریا و تثبیت خط ساحلی، بین دو حالت پیش‌روی و پس‌روی قرار دارد؛ بنابراین پیش‌بینی آن به دلیل محدودیت داده‌ها دشوار و غیرواقعی خواهد بود. در حالت‌های دوم و سوم، برای پیش‌بینی تغییرات خط ساحلی آینده دریای خزر، دو خط ساحلی احتمالی در دو طرف خط ساحلی استخراج‌شده از تصاویر ماهواره‌ای ترسیم می‌شود که این دو خط فرضی، پیش‌بینی محدوده افت و خیز سطح آب دریای خزر برای دوره‌های کوتاه‌مدت تا بلندمدت را نشان می‌دهد؛ به عبارت دیگر، خط ترسیمی بر محدوده‌ای تأکید دارد که با نوسان دوره‌ای تراز آب دریا، خط ساحلی فراتر از این پیش‌بینی قرار نمی‌گیرد. در شکل ۸، پیش‌بینی تغییرات خط ساحلی به روش‌های مقدار نقطه پایانی و مقدار میانگین با دو حالت پس‌روی دریا (خشکی‌زایی) و پیش‌روی دریا (آب‌گرفتگی سواحل) برای سال ۲۰۲۰ صورت گرفته است.

برای ارزیابی مقدار خطای دو روش AOR و EPR در پیش‌بینی مقدار تغییرات خط ساحلی، از خطوط ساحلی گذشته به همراه شواهد میدانی استفاده شد تا صحت این روش‌ها ارزیابی شود و در نهایت، بهترین روش برای پیش‌بینی مقدار تغییرات ساحلی شناسایی و استفاده شود. با مبنای قرار دادن خط ساحلی ۲۰۰۱، پیش‌بینی خط ساحلی ۲۰۰۵ انجام گرفت (شکل ۹). به دلیل اینکه در دوره ۲۰۰۱-۲۰۰۵، خط ساحلی در حالت پس‌روی بود و بر وسعت خشکی افزوده می‌شد، حالت دوم (پیش‌روی دریا) از روی تصویر به همراه خط ساحلی ۲۰۰۱ که مبنای محاسبه تغییرات برای این دوره چهارساله بود، حذف و حالت سوم (پس‌روی دریا) ارزیابی شد.



شکل ۸. پیش‌بینی خط ساحلی با روش‌های AOR و EPR برای سال ۲۰۲۰





شکل ۹. پیش‌بینی خط ساحلی با روش‌های EPR و AO برای سال ۲۰۰۵

پیمایش میدانی در محدوده شمالی قاعده دلتای گرگان‌رود که با ثبت نقاط در سامانه موقعیت‌یاب جهانی (GPS) و انتقال نقاط به محیط ArcMap همراه بود، بر تطابق نقاط ثبت‌شده با خط ساحلی ۲۰۰۵ در بین برش‌های عرضی ۸ و ۹ دلالت دارد (شکل ۱۰). اندازه‌گیری میدانی، فاصله بین این خط ساحلی با خط ساحلی ۲۰۱۴ را ۴۱۰ متر نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن ۹ سال زمان سپری‌شده بین دو تصویر ۲۰۰۵-۲۰۱۳، مقدار پیش‌بینی تغییرات سالانه به روش EPR، آهنگ تغییرات ۴۵ متر در سال را نشان می‌دهد. با نگاهی به شکل ۶ مقدار تغییرات سالانه در بین برش‌های عرضی ۸ و ۹، به‌طور متوسط ۴۸ متر در سال محاسبه شد که با شواهد میدانی به‌دست‌آمده (۴۵ متر در سال) نیز همخوانی قابل قبولی دارد.

مشاهدات میدانی در بین برش‌های عرضی ۹ و ۱۰ نشان می‌دهد که فاصله خط ساحلی ۲۰۱۲ تا خط ساحلی ۲۰۱۴ با توجه به بریدگی‌های زیاد خط ساحلی، به‌طور میانگین ۷۰ متر با مقدار تغییر متوسط سالانه ۳۵ متر در سال است و با مقدار تغییر متوسط سالانه ۳۴ متر به روش مقدار نقطه پایانی در این محدوده برش عرضی تطابق خوبی نشان می‌دهد (شکل ۱۱). در ادامه، با تفکیک خطوط ساحلی ۲۰۰۵-۲۰۱۲ و ۲۰۱۲-۲۰۱۴ به‌وسیله نقاط ثبت‌شده با استفاده از GPS و شواهد میدانی، با روش مقدار میانگین به برآورد مقدار تغییرات سالانه پرداخته شد تا بتوان مقایسه‌ای بین دو روش مقدار نقطه پایانی (EPR) و مقدار میانگین (AOR) در پیش‌بینی آهنگ تغییرات خط ساحلی انجام داد. با در دسترس بودن

داده‌های رقومی سال‌های ۲۰۱۴-۲۰۰۵، ۲۰۱۲-۲۰۰۵ و ۲۰۱۴-۲۰۱۲ و اندازه‌گیری فاصله خط ساحلی این سال‌ها در بین برش‌های عرضی ۸ و ۹، مقدار تغییرات سالانه برای این دوره‌ها، به ترتیب ۴۵، ۴۶ و ۳۴ متر برآورد شد که آهنگ تغییرات در این سه دوره با روش مقدار میانگین  $41/6$  متر در سال مشخص شد.



شکل ۱۰. الف) موقعیت روستای چارقلی و خط ساحلی ۲۰۰۵؛ ب) نمایی نزدیک از این خط ساحلی



شکل ۱۱. موقعیت روستای چارقلی در مسیر گرگان‌رود و خطوط ساحلی بین سال‌های ۲۰۱۴-۲۰۰۵

## نتیجه‌گیری

نگاهی به تغییرات خط ساحلی طی دوره‌های آماری مشخص می‌کند که بیشترین تغییر در خط ساحلی در بین سال‌های ۱۹۷۵-۲۰۰۱ رخ داده است (شکل ۲). ایستگاه ترازسنجی انزلی طی همین فاصله زمانی، نوسان شدید تراز آب را تا حداکثر ۳ متر نشان می‌دهد (یمانی و همکاران، ۱۳۹۲) و دلالت بر آن دارد که عامل اصلی این همه تغییر در نیمرخ خط ساحلی، نوسان زیاد آب دریاست.

مقدار متوسط تغییرات سالانه در کل برش‌های بررسی‌شده، با روش‌های مقدار نقطه پایانی و مقدار میانگین، به ترتیب ۴۰/۲ و ۶۱/۱ متر در سال محاسبه شد. هر دو روش، بیشترین مقدار تغییر سالانه را در قسمت میانی دلتای رودخانه‌ای گرگان‌رود، در اطراف مسیر رودخانه اصلی نشان می‌دهد. شواهد میدانی حاصل از بررسی برش‌های عرضی ۸ و ۹، از آهنگ تغییرات ۴۵ متر در سال در روش مقدار نقطه پایانی و ۴۱/۶ متر در سال در روش مقدار میانگین حکایت دارد. مقدار نقطه پایانی روش ساده‌ای برای به دست آوردن مقدار تغییرات سالانه خط ساحلی است و به دلیل استفاده از دو نقطه در برش عرضی برای تعیین مقدار تغییرات، بی‌اشکال نیست. با استخراج خطوط ساحلی سال‌های ۲۰۱۲-۲۰۱۴، مقدار تغییرات خط ساحلی به روش نقطه پایانی برای این دو سال، ۳۴ متر در سال بین برش‌های ۸ و ۹ محاسبه شد. با توجه به بررسی‌های میدانی و اندازه‌گیری بین خطوط ساحلی ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۴ برای مجموع برش‌های عرضی، فاصله متوسط هفتادمتری بین این دو خط ساحلی، مقدار تغییرات را برای یک دوره یکساله، ۳۵ متر در سال نشان می‌دهد که با مقدار ۳۴ متر در سال در بین برش‌های ۸ و ۹ تطابق دارد. محاسبه مقدار تغییرات خط ساحلی بین سال‌های ۲۰۰۵-۲۰۱۴ به روش مقدار میانگین در برش عرضی ۸ و ۹، معادل ۴۱/۶ متر در سال را نشان می‌دهد. با توجه به مقدارهای به دست آمده، مقدار نقطه پایانی ممکن است برای پیش‌بینی تغییرات خط ساحلی در فاصله‌های زمانی کوتاه‌مدت، کارایی بهتری داشته باشد؛ اما برای دوره‌های طولانی‌مدت، به دلیل تأثیرگذاری متغیرهای مستقل بر تغییرات خط ساحلی، استفاده از این روش باید با احتیاط بیشتری باشد. به نظر می‌رسد روش مقدار میانگین به دلیل استفاده از تمامی دوره‌های زمانی در دسترس و با عرضه میانگینی از مقدارهای تغییرات به دست آمده، بسیار مطمئن‌تر نسبت به روش مقدار نقطه پایانی باشد. البته خطای زیاد پیش‌بینی در منطقه میانی در محل کانال رودخانه، به دلیل تغییر مسیر زیاد و مقدار آورد زیاد رسوب، به طور متوسط ۲/۵ میلیون تن در سال (لاهیجانی و همکاران، ۱۳۸۶) طی دوره‌های زمانی مختلف است که در نتیجه پیش‌بینی تأثیر بسزایی دارد.

با توجه به مقدارهای به دست آمده از تغییرات سالانه خط ساحلی، می‌توان سن تقریبی پیش‌آمدگی دلتای گرگان‌رود به سمت داخل دریای خزر را نیز محاسبه کرد؛ طول پیش‌آمدگی دلتا در داخل دریای خزر از خط ساحلی قدیمی ۱۸۹۰ میلادی (کاکرودی و همکاران، ۲۰۱۲) نسبت به خط ساحلی ۲۰۱۳ با فاصله زمانی ۱۲۳ سال، به طور متوسط ۴ هزار و ۵۰۰ متر است که با توجه به مقدار تغییر متوسط سالانه ۴۰/۲ متر به روش مقدار نقطه پایانی، روند دلتاسازی و پیش‌آمدگی گرگان‌رود در مصب، در ۱۱۲ سال اخیر انجام گرفته است که اختلاف زمانی یازده ساله نسبت به خط ساحلی سال ۱۸۹۰ را نشان می‌دهد؛ به عبارتی دیگر، مقدار تغییرات سالانه به روش نقطه پایانی به ما خاطر نشان می‌سازد که با آهنگ تغییر خط ساحلی به مقدار ۴۰/۲ متر در سال، خط ساحلی قدیمی، از سال ۱۹۰۱ تا کنون، طی ۱۱۲ سال گذشته

به تدریج با رسوبگذاری و افزایش مساحت قاعده دلتای رودخانه‌ای گرگان‌رود شکل گرفته است و دلالت بر اعتبار زیاد روش‌های پیش‌بینی تغییرات در بررسی موقعیت آینده خطوط ساحلی دارد. این موضوع با نوشته‌های رایینیو (۱۳۸۹) مبنی بر اینکه در سال ۱۸۸۶ شاخه شمالی گرگان‌رود خشک شده و رودخانه از محل فعلی به دریا می‌ریخته و ۱۲۷ سال از آن زمان گذشته است، تطابق زمانی خوبی دارد.



شکل ۱۲. خط ساحلی ۱۸۹۰ دریای خزر در کنار روستای دهنه از توابع شهرستان گمیشان (کاکرودی و همکاران، ۲۰۱۲)

## منابع

- آزرم‌سا، ع. و رزمخواه، ف. (۱۳۸۵). «بررسی موقعیت خط ساحلی در خلیج چابهار با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای». علوم زمین. س ۱۵. ش ۶۰ ص ۲۵-۳۲.
- \_\_\_\_\_ و رزمخواه، ف. (۱۳۸۹). «پیش‌بینی موقعیت و نحوه تغییرات خط ساحلی در خلیج پزم تا سال ۲۰۱۰». فیزیک زمین و دریا. دوره ۳۶. ش ۴. ص ۸۹-۹۸.
- افشین، ی. (۱۳۷۳). *رودخانه‌های ایران*. ج ۲. تهران: وزارت نیرو. شرکت مهندسی مشاور جاماب.
- خوش‌رفتار، ر. (۱۳۸۴). «تکامل ژئومورفولوژیکی دلتای سفیدرود». رساله دکتری ژئومورفولوژی. به‌راهنمایی جمشید جداری عیوضی. تهران: دانشگاه تهران. دانشکده جغرافیا.
- جعفری‌گلو، م.، زمان‌زاده، م.، یمانی، م. و عمادالدین، س. (۱۳۹۱). «شواهد ژئومورفولوژیک تغییرات سطح اساس دریای خزر طی کوتاه‌ترین پسین در محدوده رودخانه گرگان‌رود». پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، س ۴۴. ش ۲. ص ۳۳-۵۰.
- رایینو، ی. (۱۳۸۹). *مازندران و استرآباد*. ترجمه غلامعلی وحید مازندرانی. ج ۵. تهران: انتشارات علمی فرهنگی.
- لاهیجانی، ح. توکلی، و. و امینی، ع. (۱۳۸۶). «مورفولوژی دهانه رودخانه‌های جنوب خزر در شرایط اثر عوامل انسانی و تراز آب». علوم محیطی، س ۵. ش ۲. زمستان ۱۳۸۶. ص ۴۵-۵۵.

- لاهیجانی، ح.، حایری اردکانی، ا.، شریفی، ا. و نادری‌بنی، ع. (۱۳۸۹). «شاخص‌های رسوب‌شناختی و ژئوشیمیایی رسوبات خلیج گرگان». اقیانوس‌شناسی، س ۱. ش ۱. بهار ۱۳۸۹. ص ۶۵-۸۶.
- یمانی، م.، مقیمی، ا.، معتمد، ا.، جعفری‌گلو، م. و لرستانی، ق. (۱۳۹۲). «بررسی تغییرات سریع خط ساحلی به روش تحلیل نیمرخ‌های متساوی‌البعده». پژوهش‌های جغرافیای طبیعی. س ۴۵. ش ۲. ص ۱-۲۰.
- برد، ا. (۱۳۹۲). ژئومورفولوژی ساحلی. ترجمه مجتبی یمانی و وحید محمدنژاد. تهران: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
- Appeaningaddo, K., Walkden, M. and Millsa, J.P. (2008). "Detection, measurement and prediction of shoreline recession in Accra, Ghana". *Photogrammetry & Remote Sensing* 63 (2008). pp. 543-558.
- Afshin, Y. (1994). *Rivers of Iran*. Vol. 2. Tehran: Ministry of Energy. JAMAB. (In Persian).
- AzarmSa, A. And Razmkhah, F. (2006). "Study of Coastline Position in Chabahar Bay Using Satellite Data, Earth Sciences". Fifteenth year. No. 60. pp. 32-25. (In Persian).
- AzarmSa, A. And Razmkhah, F. (2010). "Determination of Shoreline Position in Pozm Bay Using Landsat Satellite Data". *Physics of the earth and sea*. Vol. 36. No. 4. pp. 98-89. (In Persian).
- Bamasoud, A. and Louisebyrne. L. (2013). "The predictive accuracy of shoreline change rate methods in Point Pelee, Canada". *Journal of Great Lakes Research* 39 (2013). pp. 173-181.
- Bird, E. (2013). *Coastal geomorphology*. Translate by Mojtaba Yamani and Vahid Mohammad-nejad. Tehran: University of Tehran Press. (In Persian).
- Crowell, M., Douglas, B.C. and Leatherman, S.P. (1997). "On forecasting future U.S. shoreline positions: a test of algorithms". *Journal of Coastal Research*. 13(4). pp. 1245-1255.
- Crowell, M., Honeycutt, M. and Hatheway, D. (1999). "Coastal erosion hazards study: phase one mapping". *Journal of Coastal Research*. Special Issue No. 28. pp. 10-20.
- Dolan, R., Fenster, M.S., and Holme, S.J. (1991). "Temporal analysis of shoreline recession and accretion". *Journal of Coastal Research*. 7(3). pp. 723-744.
- Doukakis, E. (2007). "Using Quality Metrics to Choose Shoreline Change Estimation Methodology". Abstracts of EcoSummit 2007 Ecological Complexity and Sustainability Challenges & Opportunities for 21st Century's Ecology.
- Fenster, M.S., Dolan, R. and Elder, J.F. (1993). "A new method for predicting shoreline positions from historical data". *Journal of Coastal Research*. (1). pp. 147-171.
- Foster, E.R. and Savage, R.J. (1989). *Methods of historical shoreline analysis*. In: *Coastal Zone '89*. New York: American Society of Civil Engineers. pp. 4434-4448.
- Genz, A.S., Fletcher, C.H., Dun., R.A., Neilfrazier, L. and Rooney, J.J. (2007). "The Predictive Accuracy of Shoreline Change Rate Methods and Alongshore Beach Variation on Maui, Hawaii". *Journal of Coastal Research*. January 2007. pp. 87-105.
- Iranian National Center for Oceanography (INCO) (1998). "TSS-1 Technical Report. Iranian National Center for Oceanography". IR Iran.
- Jafar-Beglou, M., Zaman-zadeh, M.H. Yamani, M. and Emad-al-din, S. (2012). "The Geomorphological Evidence of the Caspian Sea Base Level Changes during the Late Quaternary in the Confine of Gorgan-roud River". *Research in Geography*, Year 44. No. 2. pp. 33-50. (In Persian).
- Kakroodi, A.A., Kroonenberg, S.B., Mohamah-Khani, H., Yamani, M., Hgasemi, M.R and Lahijani, H.A.K. (2012). "Rapid Holocene Sea-level Changes along the Iranian Caspian Coast". *Quaternary International*. Vol. 263. pp. 93-103.
- Khosh-raftar, R. (2005). "Geomorphological evolution Sefidrud Delta". *Geomorphology* Ph.D. Dissertation. Supervisor of Jamshid Jedari-ayvazi. Tehran: University of Tehran. Department of Geography. (In Persian).
- Lahijani, H.A.K., Tavakoli, V. and Amini, A. (2008). "South Caspian River Mouth Configuration Under Human Impact and Sea level Fluctuations". *Environmental Sciences*. Vol. 5. No. 2. Winter 2008. pp. 65-86. (In Persian).
- Lahijani, H.A.K., Rahim-pour-Bonab, H., Tavakoli, V. and Hosseindoost, M. (2009). "Evidence for Late Holocene High Stands in Central Guilan-East Mazanderan, South Caspian Coast, Iran". *Quaternary International*. No. 197. pp. 55-71.

- Lahijani, H., Haeri-Ardekani, O., Sharifi, A. and Naderi-Bani, A. (2010). "Gorgan Bay sediment deposition and geochemical indicators of cognitive". *Oceanography*. year 1. No. 1. Spring 2010. pp. 45-55.
- McBride, R.A., Penland, S., Hiland, M.W., Williams, S.J., Weasphal, K.A., Jaffe, B.E. and Sallenger, A.H. (1989). "Analysis of Barrier Shoreline Change in Louisiana from 1853 to 1989". *Louisiana Barrier Island Erosion Study. Atlas of Shoreline Changes I- 2150- A*.
- Mukhopadhyay, A., Mukherjee, S., Mukherjee, S., Ghosh, S., Hazra, S. and Mitra, D. (2012). "Automatic shoreline detection and future prediction: A case study on Puri Coast, Bay of Bengal, India". *European Journal of Remote Sensing- 2012*. 45. pp. 201-213.
- Pethick, J. (1991). *An introduction to coastal geomorphology*. Routledge. Chapman and Hall. Inc. Fifth impression.
- Rabinio, Y.L. (2010). *Mazandaran and Astarabad*. Translated by Gholam-ali. Vahid-mazandarani. Fifth Edition. Tehran: Scientific and Cultural Publications. (In Persian).
- Wesswling, F and et al. (2002). "Establishing Holocene sea level in the Caspian Sea using combined molluscan bathymetry and isotope geochemistry". *Now Workshop Holocene Caspian Sea Level Change*. 21-22 october.
- Yamani, M., Moghimi, E., Motamed, A., Jafarbeglo, M. and Lorestani, Gh. (2013). "Fast Shoreline Changes in Sefidrud Delta Using Transects Analyses Method". *Research in Geography*. Year 45. No. 2. pp. 1-20. (In Persian).