

## بررسی تغییرات خط ساحلی با استفاده از روش پلی گون تغییرات محدوده مورد مطالعه: قاعده دلتای سفیدرود

قاسم لرستانی\* - استادیار گروه جغرافیا، دانشگاه مازندران

پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۵/۰۲ تأیید نهایی: ۱۳۹۴/۱۱/۱۰

### چکیده

مدیریت پایدار سواحل مستلزم آگاهی از روند تغییرات خط ساحلی است و آشکارسازی تغییرات خط ساحلی می‌تواند در شناسایی و تجزیه و تحلیل میزان جابجایی خطوط ساحلی کمک نماید. هدف از این تحقیق بررسی تغییرات خط ساحلی قاعده دلتای سفیدرود با استفاده از روش پلی گون تغییرات طی شش دهه گذشته می‌باشد. برای دستیابی به این هدف، اطلاعات دبی و رسوب سفیدرود، باد و نوسانات تراز آب به همراه عکس هوایی ۱۹۵۵ به مقیاس ۱/۵۵۰۰۰، تصاویر ماهواره‌ای TM سال ۱۹۸۹ ماهواره لندست و تصویر ۲۰۱۴ ماهواره اسپات از نرم‌افزار گوگل ارث به‌عنوان ابزار و داده‌های اصلی پژوهش بهره گرفته شده است. روش کار استفاده از پلی گون تغییرات در سنجش میزان تغییرات خطوط ساحلی در سه مقطع زمانی می‌باشد. در این تحقیق ابتدا عکس هوایی سال ۱۹۵۵ با روش تصویر به تصویر و با مشخص نمودن نقاط نظیر تصویر گوگل ارث سال ۲۰۱۴، در نرم‌افزار ENVI زمین مرجع شد. سپس با تفسیر بصری، خط ساحلی در عکس هوایی و تصویر سال ۲۰۱۴ ترسیم شدند. اما با توجه به ماهیت رقومی تصویر سال ۱۹۸۹، جهت بارز سازی تصویر مذکور با اجرای شاخص NDVI و محاسبه پیکسل‌های کوچک‌تر از صفر، منابع آبی محدوده مورد مطالعه مشخص شد و در محیط ArcGIS خط ساحلی فوق‌الذکر استخراج گردید تا در ادامه تصاویر به صورت زوجی تجزیه و تحلیل شوند. نتایج نشان می‌دهد که نوسان تراز آب دریای خزر، شدت و ضعف آورد رسوب از رودخانه سفیدرود در مقاطع زمانی مختلف و انجام عملیات شاس طی سال‌های ۱۹۹۸-۱۹۸۱ از عوامل اصلی ایجاد تغییر در قاعده دلتای سفیدرود می‌باشد. همچنین نرخ مثبت تغییرات طول خط ساحلی در روش پلی گون تغییرات، از ادامه روند دلتاسازی سفیدرود طی ۶۰ سال اخیر حکایت دارد.

واژگان کلیدی: دریای خزر، خط ساحلی، دلتای سفیدرود، پلی گون تغییرات.

## مقدمه

منطقه ساحلی، از بزرگ‌ترین دارایی‌های زیست‌محیطی و اقتصادی هر کشوری است (بخش مطالعات اقیانوس‌شناسی<sup>۱</sup> ایالات متحده، ۱۹۹۹) و به دلیل پیچیدگی فرایندهای ساحلی، شکنندگی اکوسیستم‌ها، تراکم بالای جمعیتی و اهمیت صنعت توریسم از محیط‌های بسیار آسیب‌پذیر محسوب می‌شود (آلبوکوئرکیو<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۳). در این منطقه، خط ساحلی عنصری ژئومورفولوژیکی است که به واسطه تداوم فرایندهای ساحلی با فراوانی و شدت متفاوت از تحرک فضایی بالایی برخوردار می‌باشد (مازر و دیلنبورگ<sup>۳</sup>، ۲۰۰۹). همین فرایندهای ساحلی در درازمدت می‌توانند هندسه خط ساحلی را تغییر داده و موجب افزایش یا کاهش در برداشت سطح و خط ساحلی شده و تبعات متفاوتی را بر مناطق ساحلی تحمیل نمایند. فرسایش پدیده‌ای دائمی در مناطق ساحلی به صورت حذف و برداشت ماسه در خطوط ساحلی می‌باشد که از تغییر در رژیم امواج، نوسان سطح آب دریا، مورفودینامیک رودخانه با تدارک رسوب و فعالیت انسانی ناشی می‌شود (وان ریجن<sup>۴</sup>، ۲۰۱۱).

به واسطه اهمیت موضوع و تأثیر این پدیده بر فعالیت‌های انسانی و اقتصادی، تحقیقات بی‌شماری صورت گرفته است. عمده مطالعات در زمینه تغییرات خط ساحلی در سواحل قاره‌ای شرق ایالات متحده صورت گرفت. این تحقیقات و دیگر مطالعات، روش‌های مختلفی برای درک تغییرات خط ساحلی را به ما نشان می‌دهد. قدیمی‌ترین روش مورد استفاده به منظور تعیین میزان تغییرات خط ساحلی توسط برد<sup>۵</sup> و همکاران (۱۹۸۹) با اندازه‌گیری فاصله نقاط ساحلی نسبت به نقاط کنترلی ثابت مورد بررسی قرار گرفته است. دولان<sup>۶</sup> و همکاران (۱۹۹۱) نرخ فرسایش بلندمدت و کوتاه‌مدت در تغییرات خط ساحلی را با استفاده از مدل‌های EPR و رگرسیون خطی و چند مدل آماری دیگر مورد بررسی قرار دادند. تایلر<sup>۷</sup> و همکاران (۱۹۹۵) تغییرات خط ساحلی با سیستم آنالیز رقومی در پورتوریکو را مطالعه نمودند. این محققین با تقسیم نمودن خط ساحلی به چهار بخش مجزا، مقدار تغییر متوسط هر بخش را مورد ارزیابی قرار دادند. ماکوتا<sup>۸</sup> و همکاران (۲۰۰۴) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سال‌های ۱۹۸۱ تا ۲۰۰۲ و سیستم اطلاعات جغرافیایی در منطقه کونداجی تانزانیا به بررسی تغییرات خط ساحلی پرداخته‌اند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که خط ساحلی مورد مطالعه تغییرات قابل توجهی داشته است و با استفاده از RS و GIS، نظارت بر تغییرات خطوط ساحلی می‌تواند نتایج خوبی را به همراه داشته باشد. ون و بینه<sup>۹</sup> (۲۰۰۸) در پژوهشی به شناسایی تغییرات خط ساحلی و مدیریت کارآمد منطقه ساحلی درخور زونین ویتنام با استفاده از RS و GIS پرداختند و با استفاده از روش نسبت بانندی که بر روی تصاویر استر و لندست اعمال شد، تغییرات خطوط ساحلی بین سال‌های ۱۹۸۹ تا ۲۰۰۴ را به صورت نقشه‌های رقومی تهیه نمودند. آلبوکوئرکیو و همکاران (۲۰۱۳) به ارزیابی دو روش سیستم آنالیز رقومی خط ساحلی<sup>۱۰</sup> و پلی گون تغییرات در سواحل جنوب برزیل پرداختند. نتایج این پژوهش از مزایای روش پلی گون تغییرات نسبت به سیستم آنالیز رقومی خط ساحلی در برآورد میزان تغییرات خط ساحلی حکایت دارد. اسمیت و کروملی<sup>۱۱</sup> (۲۰۱۲) در بررسی تغییرات خط ساحلی به ارزیابی دو روش

1- OCEAN STUDIES BOARD

2- Albuquerque

3- Mazzer and Dillenburg

4- van Rijn

5- Bride

6- Dolan

7- Thieler

8- Makota

9- Van &amp; Binh

10- Digital Shoreline Analysis System

11- Smith &amp; Cromley

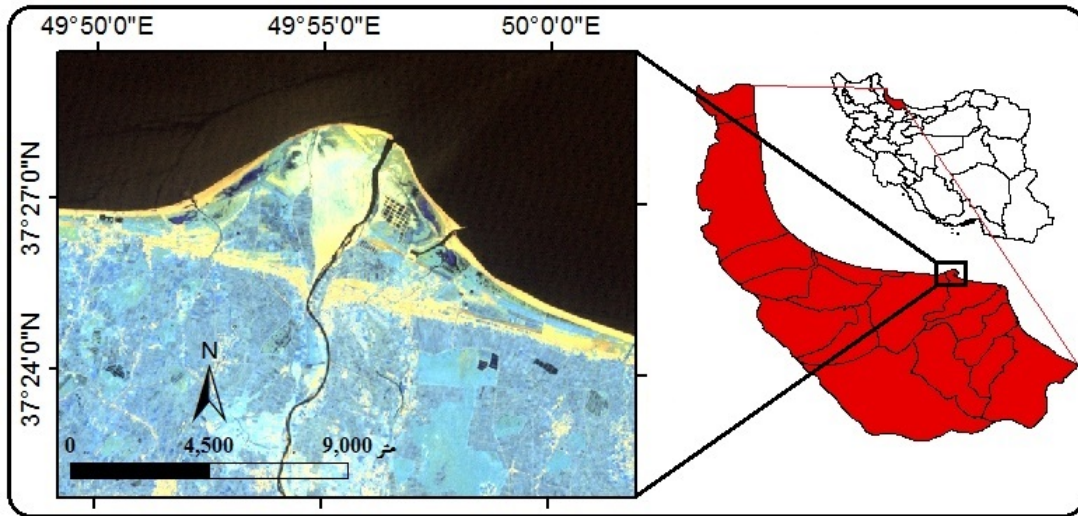
ترانسکت (نیمرخ‌های عرضی متساوی البعد) و پلی گون تغییرات در سواحل ایالات متحده پرداختند. نتایج این تحقیق از دقت بالای روش پلی گون تغییرات نسبت به روش ترانسکت در ارزیابی تغییرات خط ساحلی حکایت دارد.

در سال‌های اخیر مطالعات متعددی جهت بررسی تغییرات خط و پهنه ساحلی در آب‌های ساحلی ایران صورت گرفته است. براخاصی و همکاران (۱۳۸۵) تغییرات خطوط ساحلی دلتای رودخانه جگین را با استفاده از GIS مورد مطالعه قرار دادند. برزگر و مکبری (۱۳۶۷) در مقاله تکامل دلتای جدید سفیدرود، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست به بررسی نقش عملیات رسوب‌زدایی سد سفیدرود در روند تکامل دلتا پرداختند. کوثری (۱۳۶۵، ۱۳۷۲) با استفاده از نقشه‌ها و مقایسه عکس‌های هوایی سال‌های مختلف به بررسی تکامل دلتای سفیدرود پرداخته است و معتقد است که طی دوره ۳۳ ساله، ۱۳۲۹-۱۳۶۱، خط ساحلی دلتای سفیدرود سالانه حدود ۱۰ تا ۱۵ متر در دریای خزر پیشروی داشته است. امین سبحانی (۱۳۷۰) با استفاده از منابع تاریخی متعدد به‌ویژه نقشه‌های چاپ‌شده در ایران و سایر کشورها به بررسی تحولات سفیدرود در یک‌صد سال اخیر پرداخته، با ارائه شواهد تاریخی و کارتوگرافیک، بر جابجایی سفیدرود توجه داشته است. به نظر وی مسیر کهنه سفیدرود نمی‌تواند منطبق بر گسل باشد. رحیمی پور (۱۳۷۷) در تحلیلی بر روند تغییرات خط ساحلی دریای خزر در مجاورت سفیدرود به بررسی ساختمان انواع دلتاها پرداخته و با توجه به بررسی‌های میدانی (به‌ویژه ردگیری رسوبات دریای خزر) در نهایت نتیجه می‌گیرد که دلتای سفیدرود از نوع دلتاهای تحت تأثیر امواج است. یمانی و همکاران (۱۳۹۲) با استفاده از نیمرخ‌های عرضی متساوی البعد به بررسی تغییرات خط ساحلی قاعده دلتای سفیدرود در ۶۰ سال اخیر پرداخته و سهم بیشتری برای میزان بده رسوب از رودخانه، عملیات رسوب‌زدایی از سد سفیدرود و دینامیک دریا، در تغییر سریع خط ساحلی طی دوره‌های زمانی مختلف قائل شدند. لرستانی (۱۳۹۲) از برش‌های عرضی و طولی جهت بررسی تغییرات خط ساحلی قاعده دلتای گرگانرود استفاده نموده است. نتایج این پژوهش، بر نقش نوسان آب دریا به‌عنوان عامل اصلی ایجاد تغییرات تأکید دارد.

بررسی ادبیات تحقیق، شواهد میدانی و مشاهدات غیرمستقیم مقدماتی در خطوط ساحلی دریای خزر، بر بیشترین جابجایی در محدوده دلتای سفیدرود دلالت دارد. عمده‌ترین روش بررسی این تغییرات استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش‌ازدور بوده است و در سال ۱۳۹۲ تاکنون از روش نیمرخ‌های عرضی متساوی البعد جهت ارزیابی تغییرات بهره گرفته شده است. هدف اصلی این پژوهش، بررسی زمانی خطوط ساحلی در قاعده دلتای سفیدرود با روشی موسوم به پلی گون تغییرات می‌باشد تا ضمن بررسی میزان تغییرات، ارتباط آن را با هیدرودینامیک جریان سفیدرود و نوسان تراز آب دریا تبیین نماید.

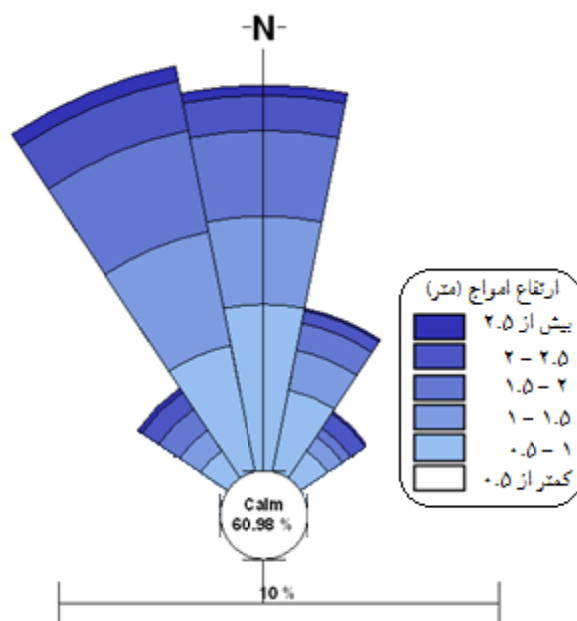
### محدوده مورد مطالعه

دلتای رودخانه‌ای سفیدرود، بزرگ‌ترین دلتای رودخانه‌ای در کرانه جنوبی دریای خزر، از دو دلتای قدیم و جدید تشکیل شده است. با تغییر مسیر رودخانه سفیدرود از دستک به بندر کیشهر، به تدریج دلتای قدیم در اثر عدم آورد رسوب رودخانه‌ای، دستخوش تغییرات زیادی تحت تأثیر دینامیک امواج و نوسانات آب دریا شده است و قسمت‌هایی از خط ساحلی دلتای قدیم بر اثر فرسایش امواج در ناحیه مذکور تخریب شده و از مساحت دلتا کاسته است. به‌واسطه جاری شدن رودخانه سفیدرود در مسیر فعلی، تغییر و تحول چشمگیری بر دلتای جدید حادث شده است. بعد از تثبیت خط ساحلی کنونی دلتای جدید سفیدرود و احداث خیابان اصلی شهر کیشهر، بر روی این پهنه ماسه‌ای به تدریج و باگذشت زمان بر اثر فعالیت هیدرودینامیک دریا، افت‌وخیز نوسانی آب دریا و آورد رسوب از رودخانه سفیدرود، باندهای ماسه‌ای متعددی را ایجاد نموده است. محدوده مورد مطالعه در مختصات طول جغرافیایی  $49^{\circ}50'$  تا  $50^{\circ}$  شرقی و عرض  $37^{\circ}26'$  تا  $37^{\circ}28'$  شمالی در قاعده دلتای جدید سفیدرود در استان گیلان قرار دارد. این منطقه از دلتای سفیدرود به شکل دماغه‌ای با تحدب به سمت دریا، شمال بندر کیشهر را به طول ۱۵ کیلومتر در برمی‌گیرد (شکل ۱).



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه

حداکثر سرعت بادهای غالب ماهیانه ایستگاه سینوپتیک بندر انزلی بر اساس داده‌های باد بین سال‌های ۲۰۰۹-۱۹۵۱ در آبان ماه با ۴/۷ متر بر ثانیه و حداقل آن در آذرماه ۲ متر بر ثانیه با میانگین سالیانه ۳/۲ متر بر ثانیه ثبت شده است. میانگین سالیانه جهت باد غالب در خط ساحلی منطقه مورد مطالعه شمالی می‌باشد. داده‌های در دسترس جهت بررسی امواج و فراوانی آن در محدوده بندر کیشهر، داده‌های ایستگاه هواشناسی ساحلی بندر انزلی به فاصله ۴۰ کیلومتری غرب بندر کیشهر با ویژگی‌های هیدرودینامیکی شبیه به محدوده مورد مطالعه می‌باشد که مشخصه‌های باد و امواج دریایی را از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۱ ثبت نموده است. آمار روزانه ایستگاه ساحلی انزلی در ساعت‌های ۰۶ و ۱۲ به وقت محلی هرروزه برداشت و در تارنمای سازمان هواشناسی ذخیره شده است که برای فهم و درک ویژگی‌های امواج در خط ساحلی داده‌های بالارزشی محسوب می‌شود. ایستگاه انزلی به دلیل قرارگیری در فاصله ۴۰ کیلومتری از بندر کیشهر و شباهت ویژگی‌های هیدرودینامیک دریا در دو منطقه، بر بیشینه ارتفاع امواج و جهت غالب از سمت شمال غرب و شمال به‌سوی بازه مطالعاتی دلالت دارد و میانگین داده‌های در دسترس جهت بررسی امواج نشان از درصد امواج آرام معادل ۶۰/۹۸ درصد دارد (شکل ۲).



شکل ۲: گل موج سالانه ایستگاه هواشناسی ساحلی انزلی (۲۰۱۱-۲۰۲۰)

### روش تحقیق

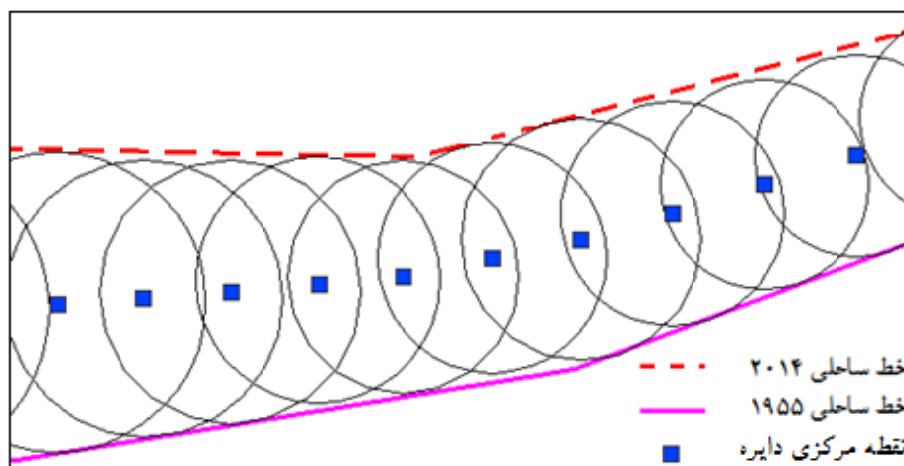
در پژوهش حاضر، از روش پلی گون تغییرات در ارزیابی تغییرات خط ساحلی استفاده شده است. این روش برخلاف روش نیمرخ‌های عرضی متساوی البعد<sup>۱</sup> جهت بررسی تغییرات یک مقطع زمانی خاص، برای سنجش میزان تغییرات خطوط ساحلی بین دو مقطع زمانی بکار می‌رود. با بهره‌گیری از این روش، می‌توان علاوه بر محاسبه مساحت پلی گون‌های پیشروی و پسروی، پارامترهایی از قبیل میانگین طول خطوط ساحلی بین دو سال مورد بررسی، طول خط مرکزی بین دو دوره زمانی و طول خط مرکزی به همراه خطوط فرعی در محل شکست‌های ساحلی را بررسی نمود. عکس هوایی و تصاویر ماهواره‌ای سه دوره زمانی ۱۹۸۹-۱۹۵۵، ۲۰۱۴-۱۹۸۹ و ۲۰۱۴-۱۹۵۵ به همراه نرم‌افزارهای ENVI و ArcGIS ابزارهای اصلی پژوهش را تشکیل داده‌اند. داده‌های دبی و رسوب حوضه‌های رودخانه‌ای به همراه داده‌های نوسانات تراز آب دریای خزر برای محاسبه میزان دبی و رسوب و تغییرات تراز آب دریا به ترتیب از شرکت مدیریت منابع آب ایران و مرکز ملی اقیانوس‌شناسی دریافت گردید. جهت بررسی باد و دینامیک امواج، داده‌های سرعت و جهت باد روزانه ایستگاه سینوپتیک انزلی (۲۰۰۹-۱۹۵۱) به‌عنوان عامل اصلی ایجاد امواج تهیه و با تصحیح و پردازش اطلاعات باد طی سال‌های مذکور گلبادهای منطقه ترسیم گردید. همچنین اطلاعات مربوط به موج نگار انزلی در عمق ۲۵ متری محتوی داده‌های امواج (۱۳۹۰-۱۳۸۵) برای مشخص نمودن ویژگی‌های موج شامل ارتفاع، دوره، طول و فراوانی موج نزدیک ساحل، از درگاه سازمان بنادر و کشتیرانی تهیه شد.

برای مشخص نمودن میزان تغییرات و بررسی زمانی خطوط ساحلی گذشته از روش پلی گون تغییرات<sup>۲</sup> استفاده شده است. عکس هوایی سال ۱۹۵۵ سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح با مقیاس ۱/۵۵۰۰۰، تصویر TM سال ۱۹۸۹ ماهواره لندست و تصویر ۲۰۱۴ ماهواره اسپات از نرم‌افزار گوگل ارث به‌عنوان مواد تحقیق تهیه شدند. به دلیل تنوع داده‌های سنجش‌ازدوری، نیاز به انجام تصحیحات مختلفی بر روی عکس و تصویر بوده است. لذا ابتدا عکس هوایی سال ۱۹۵۵ با روش تصویر به تصویر و با مبنای قرار دادن نقاط نظیر تصویر گوگل ارث سال ۲۰۱۴، در نرم‌افزار ENVI زمین مرجع

<sup>۱</sup>- Transect Method

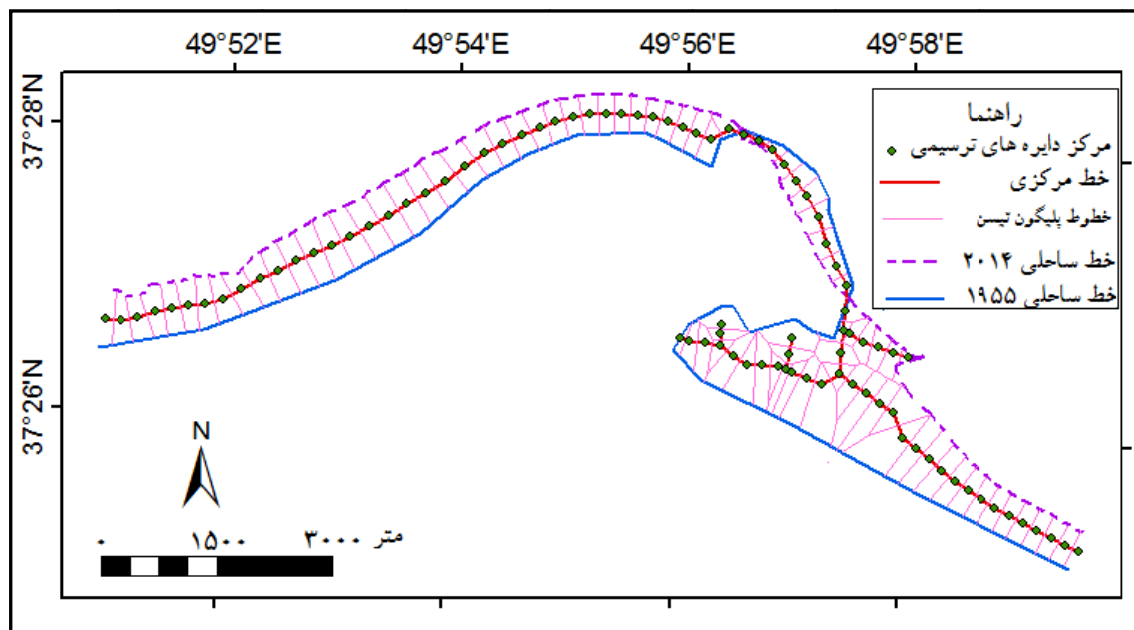
<sup>۲</sup>- Change Polygon

شد و با تفسیر چشمی، خط ساحلی مذکور به صورت دستی استخراج گردید. همچنین تصویر سال ۲۰۱۴ به صورت چشمی در نرم افزار گوگل ارث ترسیم و در محیط ArcGIS به صورت شیپ فایل ذخیره شد. اما برای تصویر سنجنده TM سال ۱۹۸۹ ماهواره لندست، به دلیل زمین مرجع بودن تصویر سال ۱۹۸۹ نیازی به انجام تصحیحات هندسی نبوده است. اما به واسطه ماهیت رقومی تصویر مذکور، جهت بارز سازی و جدا نمودن محیط آب از خشکی، ابتدا شاخص NDVI را بر روی تصویر اعمال نموده و در ادامه با استخراج پیکسل های کوچک تر از صفر و مشخص شدن منابع آبی محدوده مورد مطالعه، خط ساحلی سال ۱۹۸۹ به محیط ArcGIS منتقل گردید. سپس خطوط ساحلی در سه مقطع زمانی به صورت زوجی (دوبه دو) باهم مقایسه و تجزیه و تحلیل شدند. به دلیل تغییر در موقعیت خطوط ساحلی مذکور، چند سطح پلیگونی ایجاد شد. در ادامه در فواصل مساوی ۲۰۰ متری، بزرگ ترین دایره ی قابل رسم داخل پلی گون ها در محیط نرم افزاری AutoCAD ترسیم و نقاط مرکزی دوایر به دست آمدند (شکل ۳). در ادامه از به هم پیوستن نقاط مرکزی دوایر، خطی ترسیم شد و طول خط مرکزی در هر پلی گون محاسبه شده است.



شکل ۳: ترسیم دوایر و نقاط مرکزی بین خطوط ساحلی در محیط نرم افزاری اتوکد

همچنین با ذخیره نمودن نقاط مرکزی هر دایره به عنوان یک عارضه در لایه نقطه ای محیط نرم افزاری ArcMap، زمینه برای استفاده از روش تیسن جهت محاسبه طول خطوط فرعی در هر پلی گون مهیا می شود. در نهایت با در نظر گرفتن نرخ مثبت و منفی مساحت قاعده دلتای سفیدرود و طول خطوط ساحلی در روش پلی گون تغییرات به تجزیه و تحلیل داده های مذکور پرداخته شده است (شکل ۴).



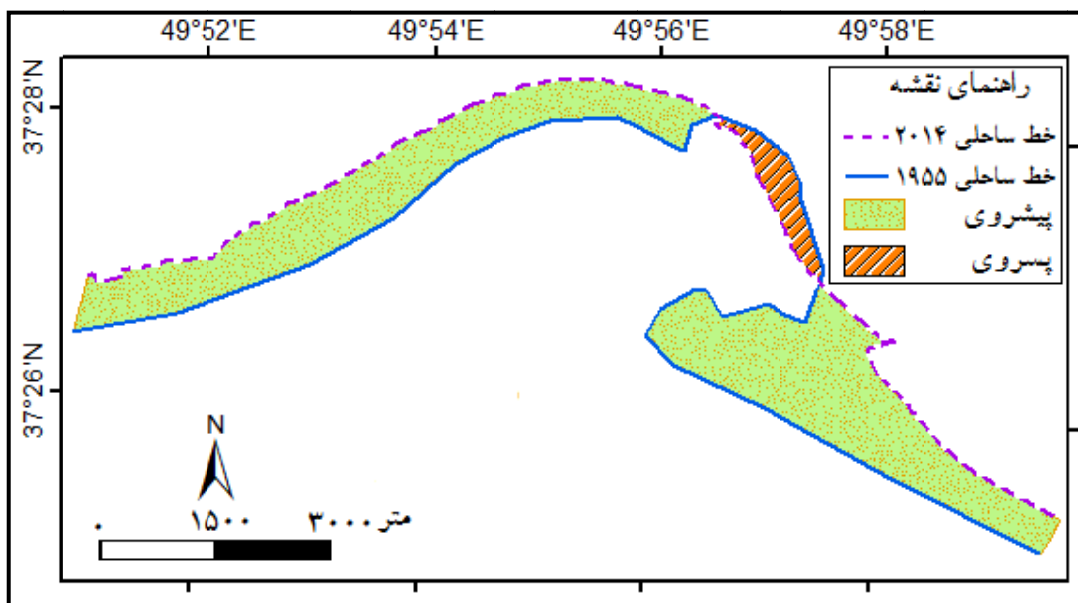
شکل ۴: نحوه ایجاد پلی گون‌های تیسن و بررسی تغییرات بین دو خط ساحلی ۱۹۵۵-۲۰۱۴

#### بحث و یافته‌ها

در اندازه‌گیری خطوط ساحلی گذشته با استفاده از روش پلی گون تغییرات پارامترهای مساحت و طول خط ساحلی قابل بررسی و تجزیه و تحلیل می‌باشند. اولین پارامتر مربوط به تغییر مساحت محدوده‌های تحت پیشروی و پسروی بین سال‌های ۱۹۵۵ تا ۲۰۱۴ می‌باشد. بیشترین افزایش مساحت با نرخ مثبت در دوره ۱۹۵۵-۱۹۸۹ به میزان ۱۳/۹۴ کیلومترمربع به ثبت رسیده است. نرخ خالص نیز به صورت دلتا سازی و افزایش نرخ مثبت خشکی‌زایی با کسر نمودن نرخ منفی، معادل ۱۲/۲۲ کیلومترمربع را نشان می‌دهد. دوره زمانی ۲۰۱۴-۱۹۸۹ با کاهش شدید نرخ خالص به میزان ۱/۷۶- کیلومترمربع برافزایش میزان فرسایش و کاهش مساحت قاعده دلتای سفیدرود دلالت دارد. در مجموع جدول ۱ بر نرخ خالص مثبت به میزان ۱۰/۴۶ کیلومترمربع طی دوره زمانی ۲۰۱۴-۱۹۵۵ حکایت دارد.

جدول ۱: برآورد مساحت پهنه تحت پیشروی و پسروی با استفاده از پلی گون تغییرات (به کیلومترمربع)

بازه زمانی	مساحت با نرخ مثبت (حرکت خشکی به سمت دریا)	مساحت با نرخ منفی (حرکت دریا به سمت خشکی)	نرخ خالص (مثبت یا منفی)
۱۹۵۵-۱۹۸۹	۱۳/۹۴	۱/۷۲	+ ۱۲/۲۲
۱۹۸۹-۲۰۱۴	۱/۷۵	۳/۵۱	- ۱/۷۶
۱۹۵۵-۲۰۱۴	۱۱/۲۴	۰/۷۸	+ ۱۰/۴۶



شکل ۵: پلی گون‌های پیشروی و پسروی خطوط ساحلی بین سال‌های ۱۹۵۵ - ۲۰۱۴

با استخراج زمانی خطوط ساحلی در روش پلی گون تغییرات علاوه بر تغییرات بسیار فاحش در مساحت پلی گون‌ها، تغییرات زیادی در طول خط ساحلی رخ داده است. میانگین طول خط ساحلی از سال ۱۹۵۵ تا ۲۰۱۴ عددی معادل ۱۹/۱ کیلومتر را نشان می‌دهد و دامنه تغییرات ۲/۲ کیلومتر بین دو بازه زمانی ۱۹۵۵-۱۹۸۹ و ۲۰۱۴-۱۹۸۹ بر وجود تغییرات زیاد در طول خط ساحلی حکایت دارد. طول خط مرکزی و طول خط فرعی نیز، وضعیت مشابهی را نشان می‌دهد که بیشینه تغییرات این دو پارامتر در بازه زمانی ۱۹۵۵-۱۹۸۹ و کمینه تغییرات به دوره زمانی ۲۰۱۴-۱۹۸۹ مربوط می‌باشد. همچنین مجموع طول خطوط مرکزی و فرعی در بازه‌های زمانی مورد مطالعه از ۱۷/۹ کیلومتر در دوره ۲۰۱۴-۱۹۸۹ تا ۲۲ کیلومتر در دوره ۱۹۵۵-۱۹۸۹ در نوسان می‌باشد و بر تغییر فاحش ۴/۱ کیلومتری در دوره آماری ۵۹ ساله دلالت دارد (جدول ۲).

جدول ۲: اندازه‌گیری پارامترهای مختلف در روش پلی گون تغییرات (به کیلومتر)

پارامتر اندازه‌گیری شده	۱۹۵۵-۱۹۸۹	۱۹۸۹-۲۰۱۴	۲۰۱۴-۱۹۵۵
میانگین طول خطوط ساحلی	۱۹/۶	۱۷/۴	۱۹/۱
طول خط مرکزی	۱۹/۲	۱۶/۴	۱۸/۸
طول خطوط فرعی	۲/۹	۱/۴	۱/۶
مجموع طول خطوط مرکزی و فرعی	۲۲	۱۷/۹	۲۰/۴

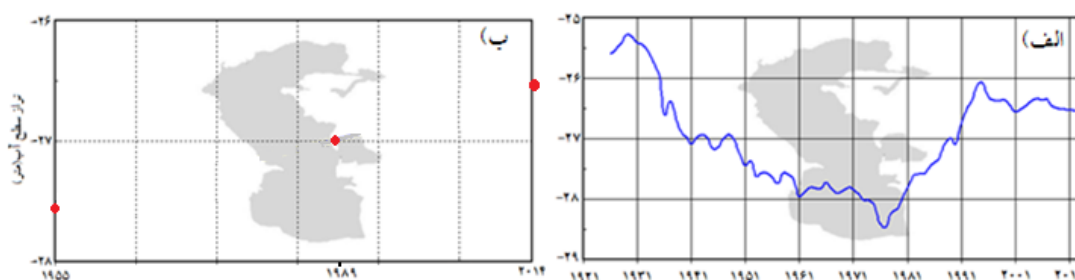
روش پلی گون تغییرات، بر وجود تغییرات زیاد در خط ساحلی دلالت دارد. برای بررسی دلایل این همه تغییر می‌بایست متغیرهایی که از جانب خشکی (میزان آورد رسوب) و دریا (نوسان سطح آب دریا) سبب تغییر در هندسه خط ساحلی می‌شوند، مورد بررسی قرار گیرد تا درک بهتری از چگونگی ایجاد تغییر در محدوده قاعده دلتای سفیدرود صورت پذیرد.

میزان دبی و تولید رسوب در مصب رودخانه سفیدرود می‌تواند نقش مهمی در ایجاد تغییرات خط ساحلی داشته باشد. برای شناخت چگونگی آب دهی و کمیّت رسوب خروجی از مصب رودخانه سفیدرود از آمار دبی و رسوب نزدیک‌ترین ایستگاه رسوب و دبی سنجی به مصب (پل آستانه طی سال‌های آبی ۲۰۰۸-۱۹۶۴) استفاده شده است.



میانگین بیشترین دبی ماهانه ثبت شده در ایستگاه پل با آب دهی ۱۶۷ مترمکعب بر ثانیه و میانگین رسوب دهی ۲۳۷۰۰ تن در روزهای با بارندگی برآورد شده که با احتساب متوسط ۱۴۶ روز بارندگی در سال میزان متوسط وزن مواد رسوبی در ایستگاه مذکور ۳۴۸۰۳۷ تن در سال می‌باشد. میانگین رسوب در سه مقطع عرضی اندازه‌گیری شده ۱۲۷۳۷ میلی‌گرم در لیتر اختصاص دارد.

سطح اساس دریاها در هر قرن ۲/۵ سانتیمتر افزایش می‌یابد (پتیک<sup>۱</sup>، ۱۹۹۱). این درحالی است که دریای خزر به واسطه نوسانات سریع و زیاد، معروفیت جهانی دارد (وسولینگ<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۰۲). طی صده اخیر نوسانات مداوم آب دریای خزر، افت و خیز سطح آب را تا ۳ متر نشان می‌دهد. با این مقدار نوسان در سطح آب، بدون شک نوسان سطح تراز آب دریا، بازیگر اصلی در تغییر خط ساحلی می‌باشد و نمی‌توان به‌سادگی از کنار آن گذشت. به‌واسطه اهمیت متغیر مذکور، تجزیه و تحلیل داده‌های زمانی می‌تواند بسیاری از تغییرات خطوط ساحلی گذشته را توجیه نماید. بر اساس آمار موجود تراز سنجی سطح آب دریای خزر در ایستگاه انزلی طی سال‌های ۲۰۱۴-۱۹۲۶، تجزیه و تحلیل بازه‌های زمانی صورت پذیرفته است (شکل ۶).



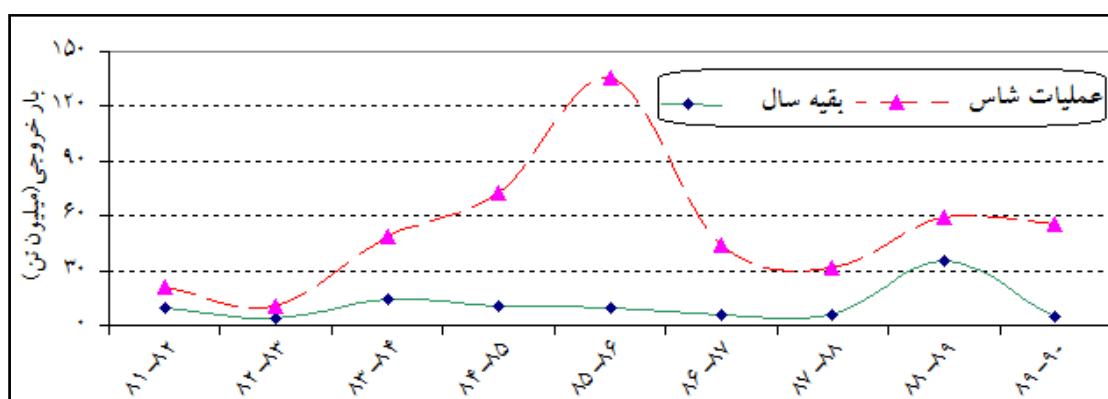
شکل ۶: داده‌های نوسان سطح آب ایستگاه تراز سنجی انزلی طی سال‌های ۱۹۲۶-۲۰۱۴  
الف) مجموع داده‌های در دسترس ب) داده‌های نقطه‌ای نوسان سطح آب

از سال ۱۹۲۶ تا ۲۰۱۴ افت و خیزهای متعدد سطح آب دریای خزر سبب بروز تحولات عظیمی در مورفولوژی خط ساحلی شده است. در شکل ۶ الف سه دوره عمده در کاهش و افزایش تراز آب دریا قابل تمایز می‌باشد. اولین نوسان عمده به سال‌های ۱۹۲۹ تا ۱۹۷۷ با روند نزولی برمی‌گردد که به‌طور متوسط سالانه ۱۶ سانتیمتر از سطح آب دریا کاسته شده است و به افت بی‌سابقه‌ای به میزان ۳ متر طی سده اخیر رسیده است. از این دوره تصاویر ماهواره‌ای موجود نمی‌باشد و تنها از عکس هوایی سال ۱۹۵۵ استفاده شده است. در سال ۱۹۵۵ سطح تراز آب دریا معادل ۲۷/۵۷- متر را نشان می‌دهد. این روند کاهش طی سال‌های بعد نیز ادامه می‌یابد و تا سال ۱۹۷۷ به عدد ۲۸/۶۴- متر کاهش می‌یابد. با کاهش سطح آب، روند دلتاسازی با نرخ مثبت نمایان می‌شود. البته این نرخ مثبت به دوره قبل از احداث سد سفیدرود در سال ۱۹۶۱ برمی‌گردد. در این دوره با احداث سد سفیدرود، میزان دبی و رسوب ثبت شده در ایستگاه‌های پائین دست تا حد زیادی کاهش یافته که در برهم زدن تعادل ژئومورفولوژیکی منطقه نقش بارزی داشته است. پس از بهره‌برداری سد و استفاده از شبکه آبیاری آن در سطح جلگه، دلتا سازی و پیشروی قاعده به سمت دریا با کاهش زیادی مواجه شده است. دومین دوره نوسانی سطح آب دریا به سال‌های ۱۹۷۸ تا ۱۹۹۵ با روند صعودی و افزایش در سطح آب نمایان می‌شود به نحوی که تراز آب دریا، طی این ۱۸ سال ۲/۳۰ متر افزایش ارتفاع در سطح آب دریا را نشان می‌دهد. استخراج خط ساحلی از تصویر TM سال ۱۹۸۹ مربوط به این دوره زمانی می‌باشد و سطح تراز آب دریا با روند صعودی نسبت

1- Pethick

2- Wesswling

به عکس هوایی سال ۱۹۵۵ معادل ۴۳ سانتیمتر افزایش را نشان می‌دهد. با توجه روندی افزایشی تراز آب دریا بایستی نرخ دلتاسازی منفی باشد اما بررسی خط ساحلی به روش پلی گون تغییرات از نرخ مثبت با افزایش مساحت زیر منحنی و پیشروی خشکی در دریا حکایت دارد. توجیه و تفسیر این افزایش در مساحت قاعده دلتا به عملیات فلاشینگ یا شاس<sup>۱</sup> در این مقطع زمانی مرتبط می‌باشد. تا سال ۱۹۸۹، طی ۹ بار اجرای عملیات رسوب‌زدایی از مخزن سد سفیدرود به‌طور میانگین سالانه ۵۳/۱ میلیون تن رسوب از سد خارج شده است (شکل ۷). این درحالی است که به‌طور عادی سالانه ۱۴ میلیون تن رسوب از سد خارج می‌شود (طلوعی<sup>۲</sup> ۱۹۸۹). این حجم زیاد بار رسوبی در زمان عملیات شاس، نقش بسزایی در انباشت رسوب سطح دلتا دارد به‌نحوی که با تغذیه مداوم رسوبات وارده به مصب طی عملیات شاس، از عملکرد فرسایشی امواج تا حد زیادی کاسته شده و در نتیجه افزایش مساحت قاعده دلتا را به دنبال داشته است.



شکل ۷: میزان بار خروجی طی عملیات شاس و بقیه سال (۱۹۸۱-۱۹۸۹)

سومین دوره نوسان در سطح آب دریای خزر به سال‌های ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۴ برمی‌گردد که با روند کاهش، ارتفاع متوسط سالانه ۱/۸ سانتیمتری، در سال ۲۰۱۴ به عدد ۲۶/۵۴- متر رسیده است. خط ساحلی مستخرج از سال ۲۰۱۴ مربوط به این دوره می‌باشد از سال ۱۹۸۹ تا ۲۰۱۴ تغییرات زیادی در سطح و خط ساحلی به‌صورت کاهش مشاهده می‌شود. از سال ۱۹۹۸ تاکنون به دلیل مشکل کم‌آبی و خشکسالی عملیات شاس به‌صورت جریان آزاد متوقف شده است. توقف این عملیات منجر به تدارک کم رسوب از جانب رودخانه سفیدرود شده است. همچنین با کاهش تراز آب دریا، رسوب انباشته‌شده در ساحل تحت تأثیر امواج برآمده از باد، فرسایش یافته است، در نتیجه شاهد کاهش طول خط ساحلی و مساحت قاعده دلتا طی سال‌های ۱۹۸۹-۲۰۱۴ بوده‌ایم.

نکته قابل توجه در ارزیابی تغییرات خط ساحلی به روش پلی گون تغییرات در کارایی این روش برای برآورد نرخ تغییر خطوط ساحلی به متر در سال می‌باشد. میانگین طول خط ساحلی طی سال‌های ۱۹۵۵-۱۹۸۹ با نرخ خالص مثبت ۳۹۰/۲ متر در سال و طی سال‌های ۱۹۸۹-۲۰۱۴ با نرخ خالص مثبت ۷۷/۵ متر در سال از تأثیر متغیرهای نوسان آب دریا و آورد رسوب از رودخانه بر میزان تغییرات دلالت دارد. به عبارتی با نوسان سطح آب دریا از سال ۱۹۵۵ تاکنون و همچنین اجرا و توقف عملیات شاس، تغییرات مورفولوژیکی زیادی بر خط ساحلی حادث شده است. در نهایت با وجود

۱- به عملیات رسوب‌زدایی مخزن سد در زمان غیر آبیاری توسط جریان آزاد و یا تحت فشار عملیات شاس گویند که در اینجا منظور ما، عملیات شاس توسط جریان آزاد برای تخلیه رسوبات ورودی به مخزن سد می‌باشد که از آبانماه سال ۱۳۵۹ تا دیماه ۱۳۷۶ همه ساله طی نیمه دوم سال در سد سفیدرود انجام شده است.

دخالت متغیرهای متعدد، نرخ خالص تغییرات سالانه طول خط ساحلی طی سال‌های ۲۰۱۴-۱۹۵۵ معادل ۲۲۹/۲ متر در سال را نشان می‌دهد (جدول ۳).

جدول ۳: برآورد نرخ تغییرات سالانه طول خط ساحلی با استفاده از روش پلی گون تغییرات (متر در سال)

نام پارامتر اندازه‌گیری شده	۱۹۵۵-۲۰۱۴			۱۹۸۹-۲۰۱۴			۱۹۵۵-۱۹۸۹		
	مثبت	منفی	خالص	مثبت	منفی	خالص	مثبت	منفی	خالص
میانگین طول خطوط ساحلی	۴۸۳/۲	- ۹۳	+ ۳۹۰/۲	۳۰۹/۹	- ۳۸۷/۴	+ ۷۷/۵	۲۷۶/۵	- ۴۷/۳	+ ۲۲۹/۲
طول خط مرکزی	۴۷۹/۳	- ۸۷/۴	+ ۳۹۱/۹	۲۸۵/۶	- ۳۷۰	- ۸۴/۴	۲۷۴/۱	- ۴۵/۱	+ ۲۲۹
طول خطوط فرعی	۸۷/۵	۰	+ ۸۷/۵	۲۰/۴	- ۳۹/۴	- ۱۹/۱	۲۷/۲	۰	+ ۲۷/۲
طول خطوط مرکزی و فرعی	۵۶۶/۸	- ۸۷/۴	+ ۴۷۹/۴	۳۰۶	- ۴۰۹/۵	- ۱۰۳/۵	۳۰۱/۳	- ۴۵/۱	+ ۲۵۶/۲

### نتیجه‌گیری

تغییرات خط ساحلی در ارتباط با فرایندهای متأثر از خشکی و در تعامل با فرایندهای دریایی شکل می‌گیرد. قاعده دلتای سفیدرود تغییرات بسیار زیادی در طی زمان متحمل شده است. جهت ارزیابی میزان و دلایل تغییرات خط ساحلی از عکس هوایی سال ۱۹۵۵ به همراه تصویر لندست ۱۹۸۹ و تصویر اسپات نرم‌افزار گوگل ارث بهره گرفته شده است. این پژوهش با استفاده از روش پلی گون تغییرات، درصد ارزیابی تغییرات خط و پهنا ساحلی در تصاویر دوزمانه بوده است. بررسی این تغییرات در طی سال‌های ۲۰۱۴-۱۹۵۵ حاکی از تأثیر متغیرهای متعدد از سمت خشکی و دریا به صورت مجزا یا اشتراکی بر روی پهنا و خط ساحلی می‌باشد. یک تفاوت اساسی بین روش مورد استفاده در این تحقیق و روش نیمرخ‌های عرضی متساوی‌البعده وجود دارد. برخلاف روش نیمرخ‌های عرضی که برای هر تصویر از یک محدوده می‌توان پارامترهای مختلفی را اندازه‌گیری نمود، در روش پلی گون تغییرات، اصولاً برای ایجاد پلی گون و اندازه‌گیری پارامترهای مساحت و طول خط ساحلی، نیاز به دو تصویر زمانی از یک محدوده می‌باشد.

بررسی خطوط مستخرج از رقوم سازی تصاویر نشان می‌دهد بیشترین تغییرات خط ساحلی در دوره ۱۹۵۵ تا ۱۹۸۹ رخ داده‌اند این در حالی است که قسمت اعظم این تغییرات باید قبل از احداث سد سفیدرود در سال ۱۹۶۲-۱۹۶۱ در خط ساحلی ایجاد شده باشد. دلیل عمده آن را می‌توان در میزان دبی و رسوب رودخانه قبل و بعد از احداث سد سفیدرود جستجو نمود. همچنین پس از گذشت ۹ سال از عملیات شاس تا سال ۱۹۸۹، موج دوم بیشینه تغییرات در مساحت و طول خط ساحلی رخ داده است. اما در طی سال‌های ۲۰۱۴-۱۹۸۹ به‌ویژه پس از سال ۱۹۹۵ تاکنون با افت سطح آب و همچنین توقف عملیات شاس به دلیل شرایط اقلیمی، قاعده دلتا تحت تأثیر فرایندهای دریایی، در فاز کاوشی قرار گرفته است. اما نکته مهم قابل ذکر در برآورد نرخ تغییرات سالانه طول خط ساحلی با استفاده از روش پلی گون تغییرات، نرخ خالص مثبت تغییرات طول خط ساحلی طی ۶۰ سال اخیر می‌باشد و دلیلی بر ادامه روند دلتاسازی سفیدرود می‌باشد. نرخ خالص مثبت ۱۰/۴۶ کیلومترمربع طی دوره زمانی ۲۰۱۴ - ۱۹۵۵، از روند افزایش ۱۷۴ مترمربعی سطح دلتا طی دوره ۶۰ ساله در محدوده مورد مطالعه حکایت دارد و با وجود افت شدید ۲/۱ متری سطح آب دریا، شاهد افزایش روند دلتاسازی در محدوده مورد مطالعه بوده‌ایم. جابجایی محسوس و فاحش خطوط ساحلی قاعده دلتای سفیدرود طی دوره آماری مذکور بر اهمیت پایش تغییرات خط ساحلی در جهت برنامه‌ریزی و مدیریت بهینه سواحل تأکید دارد. با توجه به اهمیت موضوع و تأیید تغییرات زیاد خطوط ساحلی در محدوده مورد مطالعه، بایستی مکانیابی و تقویت هرگونه سازه و تأسیسات دریایی در

سواحل مذکور (نظیر اسکله صیادی ۲۲ بهمن در فاصله ۳/۵ کیلومتری شرق مصب رودخانه سفیدرود) به دلیل تأثیرگذاری فرایندهای متنوع از جانب دریا و خشکی با احتیاط و تأمل بیشتری صورت گیرد.

### منابع

- امین سبحانی، ابراهیم، ۱۳۷۰. تحولات سفیدرود در یکصدسال اخیر، مجموعه مقالات هفتمین کنگره جغرافیایی ایران، جلد اول، به کوشش بهمن رضائی گورابی، انتشارات سازمان برنامه و بودجه استان گیلان.
- براخاصی، فخرالدین، فریدون وفايي و محمدرضاغریب، ۱۳۸۵، بررسی تغییرات خطوط ساحلی دلتای رودخانه جگین با استفاده از GIS، هفتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران.
- رحیمی پور انارکی، حمید، ۱۳۷۷. تحلیلی بر روند تغییرات خط ساحلی دریای خزر در مجاورت سفیدرود. مجموعه مقالات سومین کنفرانس بین‌المللی سواحل، بنادر و سازه‌های دریایی. جلد دوم ۲۴-۲۲ آذرماه ۱۳۷۷ تهران.
- کوثری، سلیمان، ۱۳۷۲. گسترش دلتای سفیدرود، خلاصه مقالات اولین سمینار بیلان و رژیم تغییرات سطح آب دریای خزر، رامسر ۱۷-۱۹ مهرماه.
- کوثری، سلیمان، ۱۳۶۵. تکامل دلتای سفیدرود و راهنمای بازدید از منطقه، رشد آموزش زمین‌شناسی، سال ۲، شماره ۷.
- لرستانی، قاسم، ۱۳۹۲. تأثیر فرایندهای هیدرودینامیک دریا و رودخانه بر تغییرات مورفولوژی خط ساحلی (قاعده دلتای گرگان رود) پژوهش‌های دانش زمین، سال چهارم، شماره ۱۵، پاییز ۱۳۹۲، صفحات ۶۶-۸۴.
- یمانی، مجتبی، ابراهیم مقیمی، احمد معتمد، منصور جعفری‌بگلو و قاسم لرستانی، ۱۳۹۲. بررسی تغییرات سریع خط ساحلی به روش تحلیل نیمرخ‌های متساوی البعد، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، سال ۵، شماره ۲، ص ۱-۲۰.
- Albuquerque, M., Espinoza, J., Teixeira, P., Oliveira, A., Corrêa, I and Calliari, L., 2013. Erosion or Coastal Variability: An Evaluation of the DSAS and the Change Polygon Methods for the Determination of Erosive Processes on Sandy Beaches, *Journal of Coastal Research, Special Issue No. 65*, 2013.
- Barzegar, F. Mokaberi, A., 1988. Recent development of the Sefid-Rud delta.
- McBride, R. A. Penland, S. Hiland, M. W. Williams, S. J. Westphal, K. A. Jaffe, B. E. and Sallenger. A. H., 1983. Analysis of barrier shoreline change in Louisiana from 1853 to 1989. *Atlas of shoreline changes in Louisiana from*, 36-97.
- Dolan, R.; Fenster, M.S., and Holme, S.J., 1991. Temporal analysis of shoreline recession and accretion. *Journal of Coastal Research*, 7(3), 723-744.
- Makota, V., Sallema, R. and Mahika, Ch., 2004. Monitoring Shoreline Change using Remote Sensing and GIS: A Case Study of Kunduchi Area, Tanzania, *Western Indian Ocean, Journal of Marine Science*, v. 3 (1), p. 1-10.
- Mazzer, A.M. and Dillenburg, S.R., 2009. Shoreline temporal variation of wave dominated sandy beaches of the southeast of Santa Catarina Island (Florianópolis, SC, Brazil). *Pesquisas em Geociências*, 36, 1, 117-135.
- Ocean Studies Board, 1999. Science for Decision-Making. Washington D.C.: Commission on Geosciences, Environment and Resources, 113p.
- Pethick, John., 1991. An introduction to coastal geomorphology, Routledge, Chapman and Hall, Inc, Fifth impression.
- Smith, M. J. and Cromley, R. G., 2012. Measuring Historical Coastal Change using GIS and the Change Polygon Approach. *Transactions in GIS*, 2012, 16(1): 3-15.
- Thieler, E.R.; Rodriguez, R.W., and Carlo, M., 1995. Beach erosion and coastal development at Rincon, Puerto Rico. *Shore and Beach*, 63(4), 18-28.
- Tolouei E., 1989, "Reservoir sedimentation and desiltation", M.Sc. Thesis, University of Birmingham, U.K.
- van Rijn, L.C., 2011. Coastal erosion and control. *Ocean and Coastal Management*, 54, 867-887.

- Van, T.T and Binh, T. T., 2008. *Shorline change detection to serve sustainable management of coastal zone in CUU long estuary, International Symposium on Geoinformatics for Spatial Infrastructure Development in Earth and Allied Sciences.*
- Wesswling, F. Svitoch, A. and Yanina, T., 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.*