Archive of SID

پژوهش و فناوری محیط زیست، دوره سوم، شماره پنج، پاییز و زمستان ۹۷، صفحه‌ی ۲۱-۳۱

ارزیابی هیدرودینامیک و تغییرات مورفولوژی مصب رودخانه سفیدرود

مرتضی کریمی[۱*]
Morteza.karimi.91@gmail.com

جمال محمد ولی سامانی[۲]

چکیده

تغییرات ژئومورفیک مناطق ساحلی کم‌عمق، همچون تالاب‌ها و مصب‌ها و سواحل، به‌شدت به توازن میان رسوب ورودی از آب‌های داخلی یا دریا و رسوب خروجی با سرمنشأ فرسایش ناشی از موج‌های بادی و جریان‌های جزرومدی وابسته است. در این تحقیق با استفاده از مدل MIKE21 الگوی جریان و رسوب در مصب رودخانه سفیدرود مورد بررسی قرار گرفته و با بررسی تصاویر ماهواره‌ای LandSat به چگونگی تأثیرگذاری الگوی جریان، توزیع و انتقال رسوب و تغییرات تراز سطح آب دریای خزر بر روند تکامل دلتا و خط ساحلی پرداخته شده است. عواملی چون دبی و بار رسوب رودخانه و تراز سطح دریا، الگوی امواج و باد از جمله مهم‌ترین عوامل مؤثر در این تغییرات هستند. این مطالعه می‌تواند زمینه‌ای مناسب برای مدیریت صحیح جهت توسعه پایدار در این منطقه، در نظر گرفتن تمهیدات لازم جهت جلوگیری از خسارات ناشی از نوسانات بلندمدت دریای خزر و همچنین آگاهی کافی از وضعیت هیدرودینامیکی و رسوب رودخانه سفیدرود را در منطقه دلتای سفیدرود فراهم آورد.

واژگان کلیدی: مصب رودخانه سفیدرود، MIKE21، هیدرودینامیک، تغییرات مورفولوژی.

Evaluation the hydrodynamic and morphology changes in Sefidrood river estuary

Morteza Karimi[1], Jamal Mohammad Vali Samani[2]

1- M.Sc. student of Hydraulic Structures Engineering, University of Tarbiat Modares, Tehran, Iran
2- Professor, College of Water Science Engineering, University of Tarbiat Modares, Tehran, Iran

Abstract

Geomorphic changes of low-coastal areas, such as wetlands, estuaries and beaches depend heavily on the balance between input sediment from the basin or the sea and the outflow sediment with erosion source arising from wind waves and tidal flows. In this research, the flow and sediment pattern were investigated using MIKE21 model in the Sefidrud River and how the influence of flow pattern, sediment transport and sea water level changes on evolution of the delta and coastline were studied by landsat. The factors such as flow and sediment load of the river, sea level, wind and wave pattern are the most important factors which affect these changes. This study can provide a properly field for a right management in order to the region's sustainable development, adequate knowledge of the Sefid-Roud hydrodynamic and sediment situation in estuary area, as well as taking the necessary measures to prevent damages caused by the Caspian Sea's long-term fluctuations in the Sefid-Roud's deltaic region.

Keywords: Sefidrood river estuary, MIKE21, Hydrodynamic, morphology changes.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی سازه‌های آبی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
۲- استاد، گروه مهندسی سازه‌های آبی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

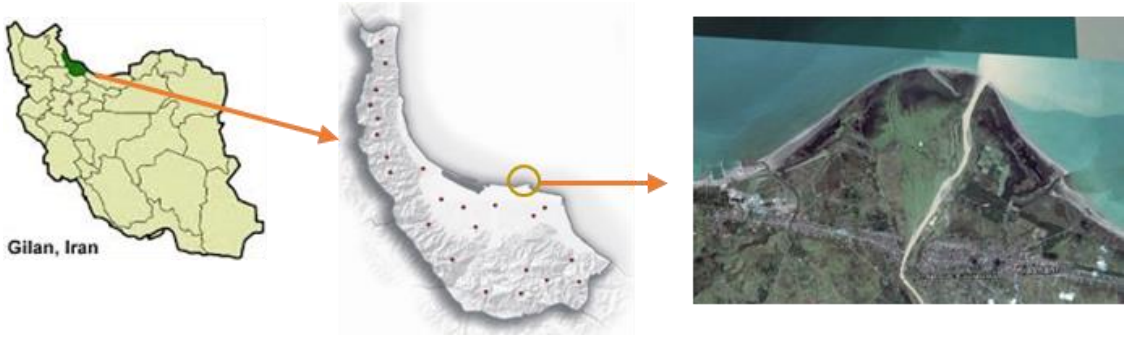
www.SID.ir

Arch

۱- مقدمه

به‌طورکلی دلتا عبارت است از زمین پست متشکل از رسوبات رودخانه‌ای که در محل دهانه ورودی رودخانه به دریا (مصب) و یا دریاچه سد تشکیل می‌شود. مورفولوژی و چینه‌شناسی دلتاهای عهد حاضر تحت تأثیر دو عامل یعنی میزان رسوبات وارده به حوضه توسط رودخانه و میزان انرژی موجود در حوضه رسوب‌گذاری، که باعث حرکت مجدد و انتقال رسوبات درون حوضه می‌گردد، تعیین می‌شود. این دو عامل به‌طور هم‌زمان و همراه با یکدیگر در حوضه رسوب‌گذاری عمل می‌کنند. بزرگی دلتا بستگی به بزرگی امواج و جریان‌ها دارد که می‌توانند مواد را متفرق سازند و میزان رسوبات وارده به حوضه باید بیشتر از میزان حرکت و جابجایی آن‌ها توسط فرایندهای درون حوضه باشد تا این‌که دلتا تشکیل گردد. بنابراین دلتاها در اثر فرایندهای سازنده و مخرب یا جابجایی رسوبات درون حوضه تشکیل می‌گردند. بررسی هیدرودینامیک جریان در مصب رودخانه و عوامل مؤثر بر آن همچون طوفان‌های دریایی، نوسانات تراز دریا، سیلاب رودخانه و دیگر عوامل، یک موضوع تحقیقی مهم به‌شمار می‌آید، زیرا هرگونه تغییرات در هیدرودینامیک جریان باعث تغییر روند انتقال رسوب و در نهایت تغییر موفولژی دلتای رودخانه خواهد شد.

دلتای رودخانه سفیدرود در استان گیلان و در سمت غربی بندر کیاشهر در ۵۱ کیلومتری شمال شرق شهرستان رشت واقع شده است. موقعیت جغرافیایی آن ۴۹/۹۳ درجه طول شرقی و ۳۷/۴۵ درجه عرض شمالی است، (شکل ۱). رودخانه سفیدرود بزرگ‌ترین و مهم‌ترین رودخانه در پهنه جنوبی دریای خزر می‌باشد. این رودخانه با داشتن حوضه آبریز وسیع در پرباران‌ترین منطقه ایران، از چندین شهر و منطقه شهری گذشته و حدود ۳۰ درصد آب ورودی دریای خزر از مناطق جنوبی را تأمین می‌کند. طول این رودخانه ۷۸۰ کیلومتر بوده که از ارتفاعات کردستان، همدان، البرز و زنجان سرچشمه می‌گیرد و در مصب آن دلتای وسیعی تشکیل شده است. وسعت حوضه آبریز آن بالغ بر ۶۵۰۰۰ کیلومتر مربع و میانگین آبدهی سالانه آن ۵۲۰۰ میلیون مترمکعب گزارش شده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه طرح

اسراونتی و همکاران (Sravanthi, Ramakrishnan et al. 2015) در تحقیق خود به‌منظور بررسی انتقال رسوب در طول سواحل کرالا[1]ی مرکزی، از مدل MIKE 21 جهت مدل‌سازی جریان و انتقال رسوب معلق در بازه زمانی ۱۸ الی ۲۴ ژانویه ۲۰۱۱ استفاده نموده‌اند. در ارتباط با جریان‌های جزرومدی شبیه‌سازی شده، الگوهای پراکندگی رسوب نشان داده است که این الگوها تحت تأثیر حرکت جنوبی جریان ساحلی هستند و نسبت به جهت و بزرگی این جریان‌ها تغییر می‌کنند. طبق مشاهدات، باد و جریانات ساحلی فاکتورهای فیزیکی مهم در کنترل الگوی پراکندگی هستند. نتایج نشان می‌دهد که دینامیک رسوبات در درجه اول توسط جریانات جزرومدی و ورودی رودخانه کنترل می‌شود و نیروی باد نیز در پراکندگی رسوبات مؤثر است [1]. هندریونو و همکاران (Hendriyono, Wibowo et al. 2014) به‌منظور مطالعه رفتار انتقال رسوب در امتداد سواحل Batang در اندونزی با توجه به احداث سازه‌های دریایی، با استفاده از مدل MIKE 21 تغییرات مورفولوژی و خط ساحلی ناشی از این ساخت‌وسازها را بررسی نموده‌اند. نتایج مدل‌سازی نشان داده است که رانش رسوب به موازات خط ساحلی تا فاصله ۳۰۰ متری از ساحل رخ می‌دهد.

1-Kerala

www.SID.ir

Archive of SID

از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۳ روند کلی رسوبات در منطقه به‌گونه‌ای است که در ماه‌های اولیه سال انتقال خالص رسوب از غرب به سمت شرق و به دنبال آن در یک دوره کوتاه‌تر به مدت چند ماه انتقال رسوب در جهت مخالف (شرق به غرب) صورت می‌گیرد که انتقال رسوب در مرحله اول بیشتر از مرحله دوم بوده و این عدم تعادل در ظرفیت انتقال رسوب باعث ایجاد تغییرات در خط ساحلی و مورفولوژی اطراف سازه‌های دریایی احداث شده می‌گردد [2]. لی‌کویی و یانلی (Li Cui and Yan Li 2010) با استفاده از تصاویر سنجنده‌های MSS , TM , ETM+ و همچنین داده‌های دبی روزانه و دبی رسوب روزانه ایستگاه هیدرومتری بالادست، در یک بازه زمانی مشخص به بررسی تغییرات خط ساحلی دلتای رودخانه زرد در چین پرداختند. در این پژوهش پس از استخراج خط ساحلی دلتای رودخانه، با آنالیز رگرسیون خطی میان تغییرات مساحت دلتا و هر یک از پارامترهای دبی و دبی رسوب رودخانه، روابطی برای نشان دادن تأثیر دبی و بار رسوب سالانه رودخانه بر تغییرات خط ساحلی دلتای آن ارائه کردند [3]. پتروپولاس و همکاران (Petropoulos, Kalivas et al. 2014) طی تحقیقی به بررسی تغییرات زمانی و مکانی فرسایش و رسوب‌گذاری دلتای دو رودخانه مدیترانه‌ای آکسیوس و آلیکموناس در یک دوره ۲۵ ساله پرداختند. در این مطالعه چهار تصویر از ماهواره Landsat در طول دوره به‌صورت مستقیم و به دو روش تفسیر شده است [4]. سیروونکاتاسامی و گیریجا (Thiruvenkatasamy and Girija 2014) در سواحل نزدیک کوچی در هند، تحولات خط ساحلی را در اثر ساخت جتی‌ها (اسکله بندر) در دهانه رودخانه پریار مورد مطالعه قرار دادند. این تحقیق با بررسی جزئیات تحولات خط ساحلی این منطقه را از سال ۱۹۷۵ تا ۲۰۱۲ که برگرفته از داده‌های میدانی و مدل‌سازی توسط MIKE 21 ، نشان داده است که پس از احداث جتی‌ها نوار شنی در دهانه رودخانه پراکنده شده و قابلیت ناوبری بهبود یافته است. همچنین در قسمتی دیگر از ساحل رسوب‌گذاری اتفاق افتاده و خط ساحلی تغییر کرده است. نتایج حاصل شباهت نزدیکی با نمونه اصلی در واقعیت داشته است [5].

سپهوند و همکاران در سال ۱۳۹۱ طی تحقیقی سواحل کوه مبارک را از نقطه نظر وضعیت جریان و رژیم رسوب‌گذاری و فرسایش مورد ارزیابی قرار دادند. جهت مدل‌سازی جریان از نرم‌افزار MIKE 21 و استفاده از اطلاعات آب‌نگاری در این منطقه بهره گرفته‌اند. همچنین تصاویر هوایی و ماهواره‌ای سواحل کوه مبارک در طی سال‌های گذشته جهت ارزیابی خطوط ساحلی مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به شواهد کلی، تصاویر هوایی و ماهواره‌ای و همچنین بازدیدهای محلی تغییرات خط ساحلی در پشت هر دو موج‌شکن شمالی و جنوبی قابل تشخیص است. همچنین آن‌ها نشان دادند که با توجه به تأمین رسوبات توسط خور- مصب مبارک در جنوب بندر کوه مبارک و عدم تأمین کامل منبع رسوبی در سواحل شمالی بندر، رسوب‌گذاری در سواحل شمالی و جنوبی بندر صورت گرفته است. در کل رسوب‌گذاری در ساحل جنوبی بیشتر از ساحل شمالی رخ داده است. براساس تصاویر ماهواره‌ای رسوب‌گذاری در ساحل شمالی ۱۷ هزار مترمکعب و در ساحل جنوبی ۲۸ هزار مترمکعب برآورد شده است [۶]. در مطالعه اسماعیلی و همکاران در سال ۱۳۸۷، الگوی انتقال رسوبات معلق به کمک مدل MIKE 21 برای حالات قبل و بعد از احداث جتی‌ها در منطقه کیاشهر شبیه‌سازی شده است. نتایج این بررسی نشان داد که با احداث جتی‌ها، سرعت جریانات در اطراف ورودی مرداب کمتر شده و نفوذ رسوبات معلق به داخل بندر کاهش یافته است. بار رسوبی کل، در محدوده دهانه سفیدرود تا ورودی مرداب ۹/۸ میلیون تن در سال برآورد شده است. این مقدار رسوب باعث پیشروی ۱/۳۵ متری خط ساحلی در سال می‌گردد. در مصب سفیدرود اندرکنش امواج و جریان خروجی رودخانه باعث ایجاد تلی از رسوب در جلوی دهانه خروجی سفیدرود می‌گردد. در مواردی که سرعت جریانات کرانه‌ای کم است (۰/۰۵ متر بر ثانیه)، جریانات در منطقه تحت تأثیر جریان خروجی رودخانه بوده و درنتیجه رسوبات معلق در جلوی دهانه تا فاصله ۲ کیلومتری پخش شده و رسوب می‌کنند. بعد از احداث جتی‌ها الگوی توزیع رسوبات معلق در منطقه تغییر می‌کند که این تغییرات در حوالی جتی‌ها محسوس است [۷].

مدرس طباطبایی در سال ۱۳۸۷ طی تحقیقی با استفاده از عکس‌های هوایی با مقیاس‌های ۱:۵۰۰۰، ۱:۲۰۰۰۰ و ۱:۴۰۰۰۰ مربوط به سال‌های ۱۳۳۴، ۱۳۴۴ و ۱۳۷۳، تصاویر ماهواره‌ای سنجنده ETM+ ماهواره Landsat 7 (۲۰۰۲) و سنجنده PAN ماهواره IRS-ID (۲۰۰۴)، نقشه‌های توپوگرافی و زمین‌شناسی، به‌منظور ارزیابی وضعیت تغییرات مورفولوژی مصب سفیدرود در طی ۴ دهه، در محدوده پایاب رودخانه سفیدرود پرداخت. بررسی‌های انجام شده، گواه بر تغییرات شدید محل مصب این

www.SID.ir

Archive of SID

رودخانه در تماس با آب‌های دریای خزر است [۸]. عیوضی و همکاران در سال ۱۳۸۳ به بررسی تکامل ژئومورفولوژی دلتای رود سفیدرود در کواترنر پرداختند. در این مطالعه با استفاده از منابع تاریخی، نقشه‌های توپوگرافی و زمین‌شناسی، عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای Landsat و درنهایت بررسی‌های میدانی، فرایند تکامل دلتای سپیدرود مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق اندازه‌گیری‌ها نشان داده است که دهانه سپیدرود در سال ۱۳۸۱ نسبت به سال ۱۳۴۵ به میزان ۳۲۰۰ متر بـه سمت شرق کشیده شده است [۹].

۲- مواد و روش کار

جمع‌آوری اطلاعات، هرچند ممکن است زمان زیادی را به خود اختصاص دهد ولی از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. درواقع در منطقه موردنظر، تمامی اطلاعاتی که به نحوی با پدیده‌های لحاظ شده در حل مسئله مربوط‌اند باید جمع‌آوری گردند. در این تحقیق جهت بررسی و تحلیل، اطلاعات و داده‌های مربوط به آبدهی و رسوب رودخانه سفیدرود [۱۰]، تراز دریای خزر و نوسانات آن [۱۱]، سرعت و جهت باد در منطقه [۱۲] و تصاویر ماهواره‌ای LandSat4, 5 , 6 , 7 , 8 [۱۳] جمع‌آوری و مورد استفاده قرار گرفته است. به‌منظور بررسی هیدرودینامیک جریان از مدل MIKE21 استفاده گردید و در نهایت با بررسی نتایج شبیه‌سازی و تصاویر ماهواره‌ای و همچنین مطالعات انجام شده در منطقه، چگونگی اثرگذاری هیدرودینامیک جریان بر تکامل دلتای رودخانه سفیدرود مورد مطالعه قرار گرفت.

۲-۱- مدل MIKE21

برنامه کامپیوتری مشهور به MIKE 21 که توسط انستیتو هیدرولیک دانمارک DHI[1] پایه‌ریزی و به‌مرور زمان تکمیل و توسعه یافته است، دارای قابلیت‌های محاسباتی و گرافیکی بالایی در زمینه مدل کردن پدیده‌های مربوط به خورها، دریاچه‌ها، نواحی کم‌عمق ساحلی، خلیج‌ها و دریاها است. این مدل عددی در حال حاضر بیش از ۲۰ ماژول تخصصی را داراست که هرکدام قابلیت‌های ویژه و کاربردی خاص را دارند. مدول هیدرودینامیکی MIKE21 Flow FM برای محاسبه حرکات آب و مدول امواج MIKE21 SW جهت مدل‌سازی انتقال امواج از آب عمیق به آب‌های کم‌عمق می‌باشند که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این نرم‌افزار برمبنای حل عددی دوبعدی معادلات ناویر-استوکس حاصل از میانگین زمانی رینولدز برای حالت سیال تراکم‌ناپذیر و با در نظر گرفتن فرضیات بوسینسک و فشار هیدرواستاتیک بنا شده است. که معادلات پیوستگی، مومنتم، دما، شوری و دانسیته نیز لحاظ گردیده است. مدل MIKE21 به‌منظور گسسته سازی معادلات حاکم بر فرایندها نظیر معادلات پیوسـتگی، مومنتم و انتقال - انتشار از روش حجم محدود میان سلولی استفاده می‌کند. گسسته‌سازی معادلات بـه روش مش‌های منعطف مثلثی که از نـوع بی‌ساختار است و بیشترین تناسب تراکم‌پذیری با دامنه حل را دارند صورت می‌گیرد.

معادله پیوستگی: $\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}=0$

معادله مومنتوم:

$$u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}+v\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) \text{ و } u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y}+v\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right)$$

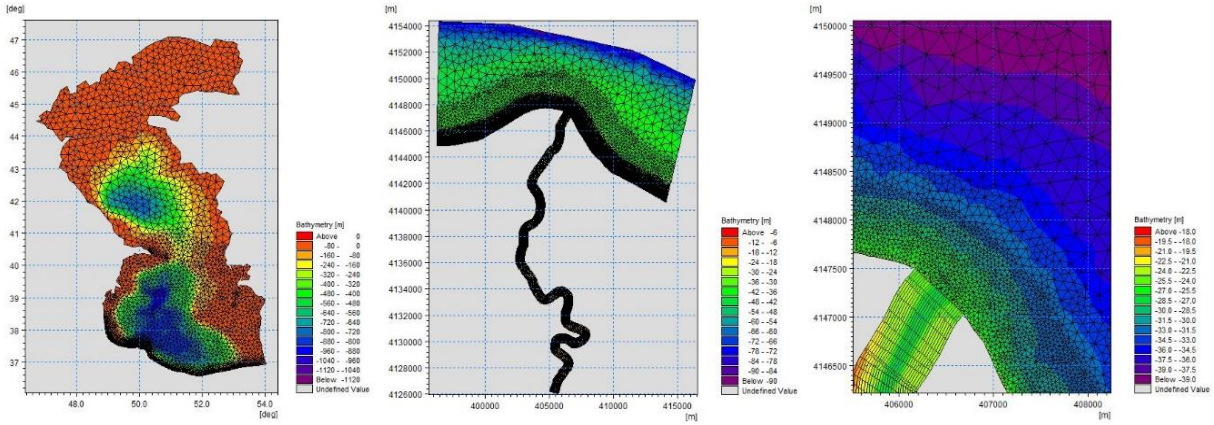
۲-۲- برپایی و اجرای مدل

جهت برپایی و اجرای مدل از داده‌های باد و بسیمتری دریای خزر استفاده شده است. در ناحیه دریا مش بندی نامنظم مثلثی در سه اندازه ریز، متوسط و درشت انجام شده، به طوری که با دور شدن از ساحل مساحت مش‌ها افزایش می‌یابد حداقل ابعاد مش مثلثی ۵۰×۵۰ متر می‌باشد، در مسیر رودخانه نیز از مش‌های چهارضلعی با ابعاد ۵۰×۱۰۰ متر استفاده شده است. (شکل ۲). شبیه‌سازی در منطقه مورد مطالعه در سال آبی ۹۱-۹۰ در دو مقیاس پهنه آبی دریای خزر و ناحیه دلتای سفیدرود صورت گرفت به‌طوری که در ابتدا با استفاده از مدول SW تنش تشعشعی و مشخصات امواج در کل پهنه آبی دریای خزر شبیه‌سازی شده و پس از صحت‌سنجی، هیدرودینامیک جریان با استفاده از مدول HD شبیه‌سازی و مورد صحت‌سنجی قرار گرفت و از نتایج آن پارامترهای امواج ، فلاکس، سرعت جریان و تراز آب دریا برای شرایط مرزی مدل در مقیاس محلی (دلتای رودخانه سفیدرود) در مدول‌های SW و HD استفاده گردید و مجددا صحت‌سنجی صورت گرفت. دلیل استفاده از مدل‌سازی در مقیاس پهنه آبی دریای خزر، عدم اندازه‌گیری مشخصات موج و جریان در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. در مدل‌سازی جریان و امواج از مدل جهانی باد ECMWF-ERA-Inteim استفاده شده است.

1 -Danish Hydraulic Institute

www.SID.ir

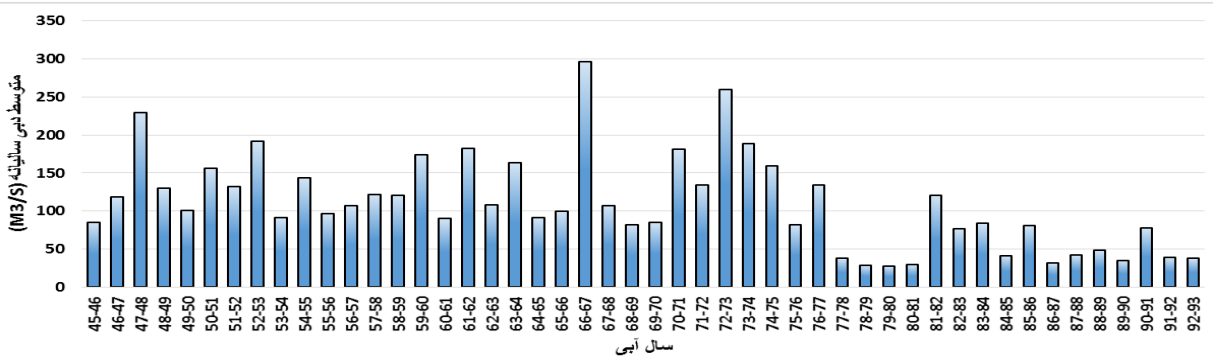
Archive of SID



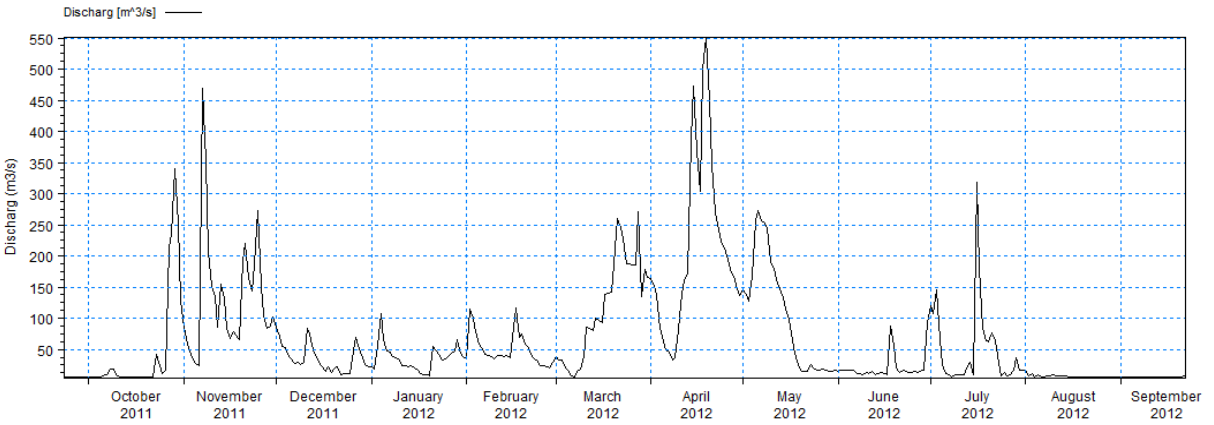
شکل ۲- بسیمتری و مش بندی مدل در دو مقیاس پهنه آبی دریای خزر و محل دلتای رودخانه سفیدرود

۲-۳- آبدهی رودخانه سفیدرود

چون آستانه اشرفیه نزدیک‌ترین مکان بخش انتهائی دلتا و مصب سفیدرود می‌باشد، بدین لحاظ از داده‌های ایستگاه هیدرومتری، این ایستگاه برای محاسبه دبی و میزان رسوب سفیدرود استفاده شده است. گرچه طی ۴۰ سال گذشته دبی سفیدرود در حال نوسان بوده است، اما سال‌های ۶۷-۶۶ بالاترین دبی را داشته (سال پرآبی) و سال‌های ۸۰-۷۹ کمترین دبی را نشان می‌دهد که سال کم‌آبی محسوب می‌شود، (شکل ۳). همچنین حداکثر میزان دبی و حجم جریان سفیدرود به فروردین‌ماه و حداقل آن به تیرماه تعلق دارد.



شکل ۳- دبی متوسط سالیانه رودخانه سفیدرود ایستگاه آبسنجی آستانه[۱۰]



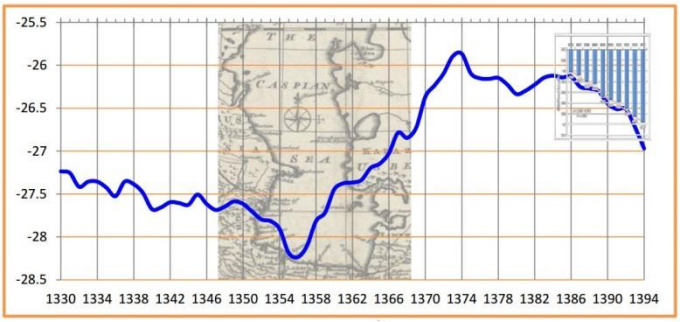
شکل ۴- دبی روزانه رودخانه سفیدرود در ایستگاه آب‌سنجی آستانه سال آبی ۹۱-۹۰ [۱۰]

www.SID.ir

Archive of SID

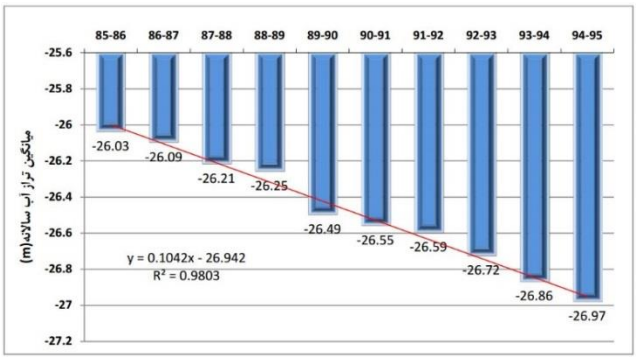
۲-۴- تراز آب دریای خزر

دریای خزر علی‌رغم این‌که به دریاهای آزاد متصل نیست و به‌دلیل مقیاس کوچک آن تحت تأثیر اجرام آسمانی قرار نمی‌گیرد و نوسانات روزانه و نیم روزانه جزرومدی ندارد. عوامل اصلی نوسان تراز دریا، دبی رودخانه‌های مشرف به دریای خزر (شار ورودی) و میزان تبخیر در فصل‌های تابستان و بهار می‌باشد. بزرگ‌ترین رودخانه‌ای که به این دریا می‌ریزد رود ولگا است که هر سال به‌طور میانگین ۲۴۱ کیلومتر مکعب آب را وارد دریای خزر می‌کند.



شکل ۵- نوسانات تراز دریای خزر از سال ۱۳۳۰ تا سال ۱۳۹۴، ایستگاه ترازسنجی بندرانزلی [۱۱]

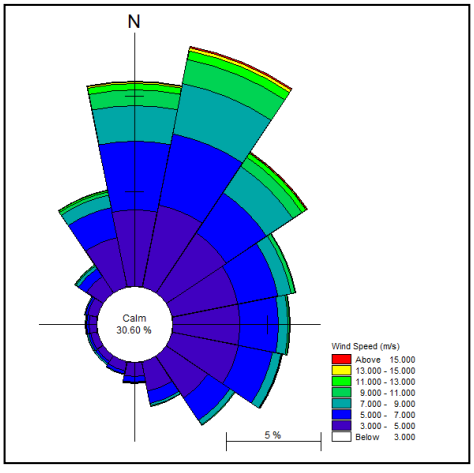
در یک دهه اخیر سطح تراز خزر همواره با روند کاهشی ۰/۱ متری در سال همراه بوده است و نواحی ساحلی و ابنیه‌ی ساحلی را تحت تأثیر قرار داده است. ازجمله دلایل کاهش تراز آب ادامه روند خشک‌سالی و کاهش میزان بارش و آبدهی رودخانه‌ها در حوضه آبریز دریای خزر و افزایش تبخیر سطح دریای خزر بوده به‌طوری‌که در بهار ۲۰۱۲، آبدهی رودخانه ولگا ۱۳درصد پایین‌تر از حد نرمال بوده است. [۱۱]، (شکل ۶).



شکل ۶- تغییرات تراز سطح آب دریای خزر در ۱۰ سال گذشته

۲-۵- سرعت و جهت باد

از جمله عوامل مهم هواشناسی که در مطالعات هیدرودینامیک و رسوب در منطقه به‌طور وسیعی کاربرد دارد، باد می‌باشد. با توجه به یک دوره آماری ۳۰ ساله می‌توان وضعیت باد سالانه منطقه طرح را مورد مطالعه قرار داد. در این رابطه با توجه به نزدیک بودن ایستگاه سینوپتیک بندرانزلی آمار ۳۰ ساله سرعت و جهت باد این ایستگاه از سازمان هواشناسی کشور تهیه شده [۱۲] و گلباد سالانه منطقه به دست آمده است، (شکل ۷). با توجه به نتایج این بررسی جهت غالب باد در جهت شمال شرقی می‌باشد.



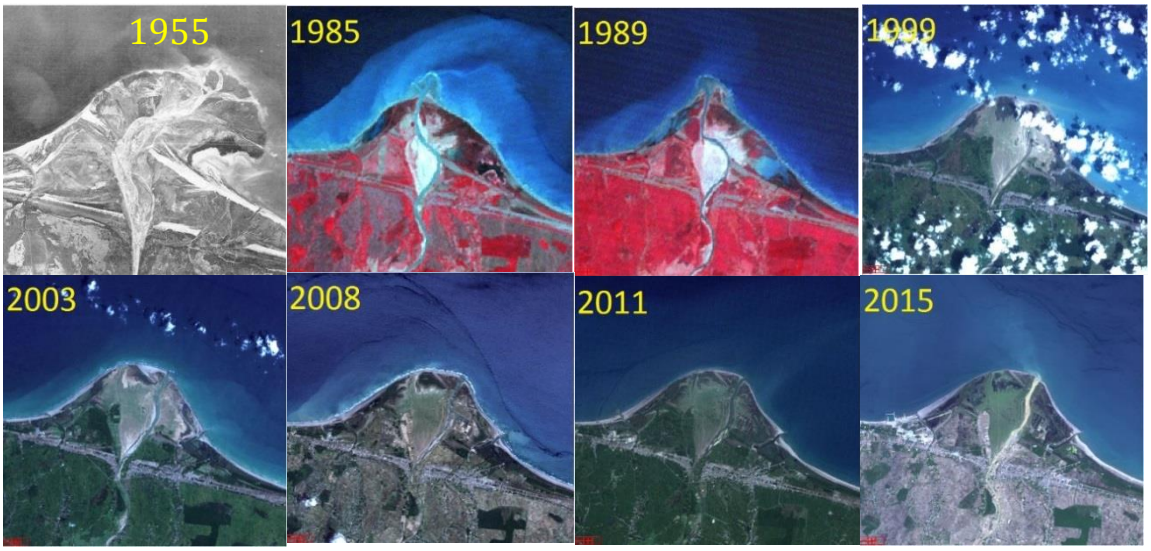
شکل ۷- گلباد ایستگاه سینوپتیک بندرانزلی

www.SID.ir

Archive

۲-۶- تصاویر ماهواره‌ای

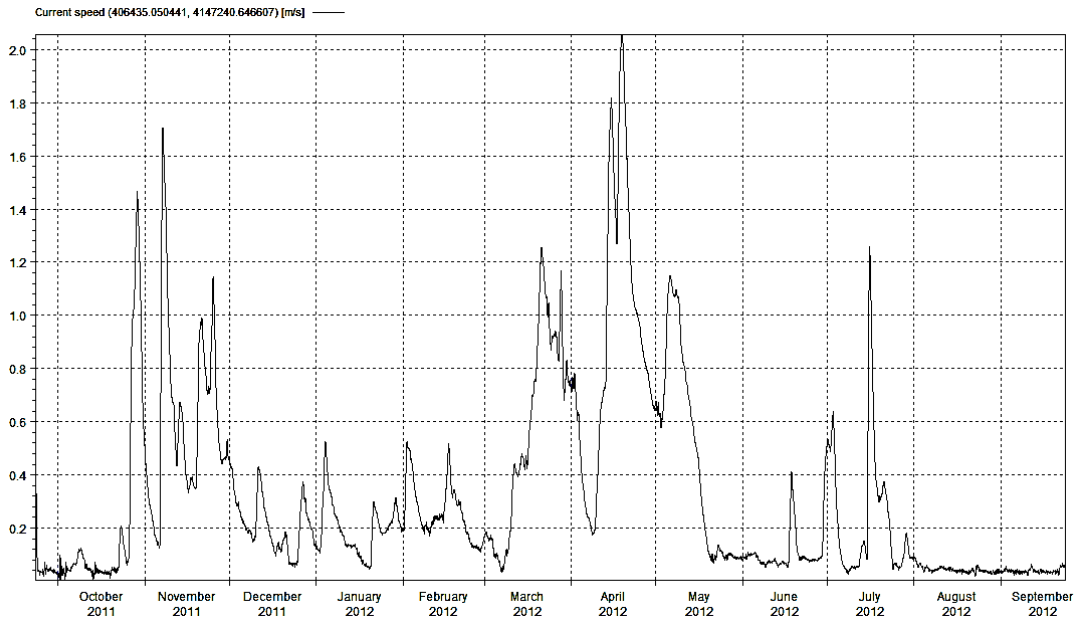
فرآیند سنجش‌ازدور توسط سنجنده‌ها صورت می‌گیرد. این ابزار می‌توانند اطلاعات بسیار مهمی درباره‌ی پدیده‌های گسترده در سطح زمین به دست دهند. با توجه به بررسی‌های انجام شده در تحقیقات قبلی و بارز بودن قابلیت استفاده از تصاویر ماهواره لندست در بررسی تغییرات خطوط ساحلی، در تحقیق حاضر از ۷ تصویر از تصاویر سنجنده‌های MSS، TM و ETM و همچنین تصاویر Landsat 8 که به ترتیب از تصاویر سنجنده‌ی MSS ماهواره‌های LandSat 4 ,5 در سال‌های ۱۹۸۵ و ۱۹۸۹، تصاویر سنجنده ETM ماهواره LandSat 7 در سال‌های ۱۹۹۹ و ۲۰۰۳ و ۲۰۱۱، تصویر سنجنده TM ماهواره LandSat 5 در سال ۲۰۰۸ و ماهواره LandSat 8 در سال ۲۰۱۵ و همچنین عکس هوایی در سال ۱۹۵۵ استفاده شد تا روند تغییرات دلتای رودخانه سفیدرود و تکامل آن در طول زمان مورد بررسی قرار گیرد، (شکل ۸).



شکل ۸- سری زمانی تصاویر ماهواره‌ای LandSat (عکس هوایی سال ۱۹۹۵) از دلتای رودخانه سفیدرود [۱۲]

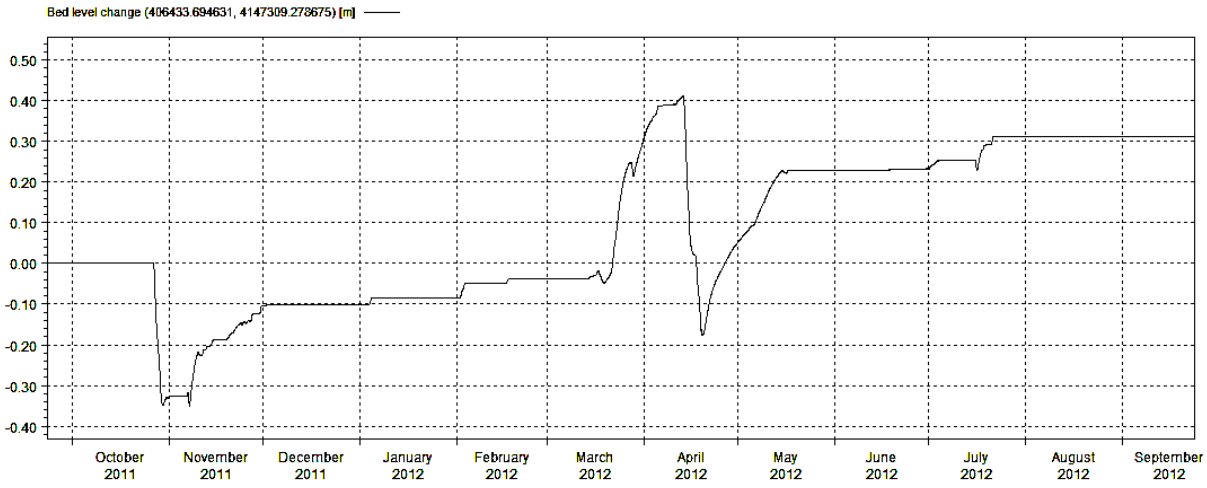
۳- یافته‌ها

نتایج شبیه‌سازی امواج دریا، هیدرودینامیک جریان و انتقال رسوب در محل دلتای رودخانه سفیدرود در (شکل‌های ۹ تا ۱۲) آورده شده است.

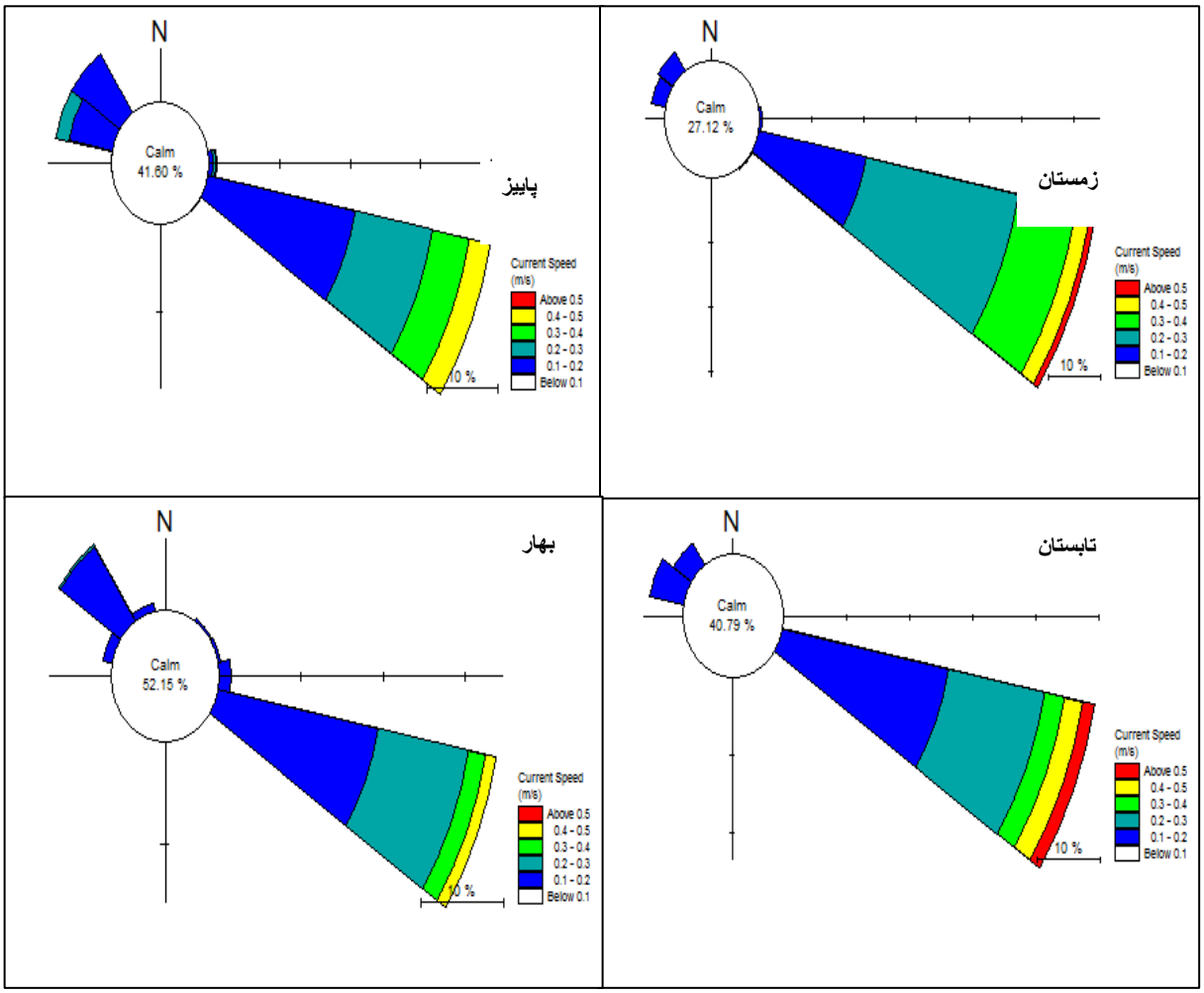


شکل ۹- تغییرات سرعت جریان در دهانه رودخانه سفیدرود سال آبی ۹۱-۹۰

www.SID.ir



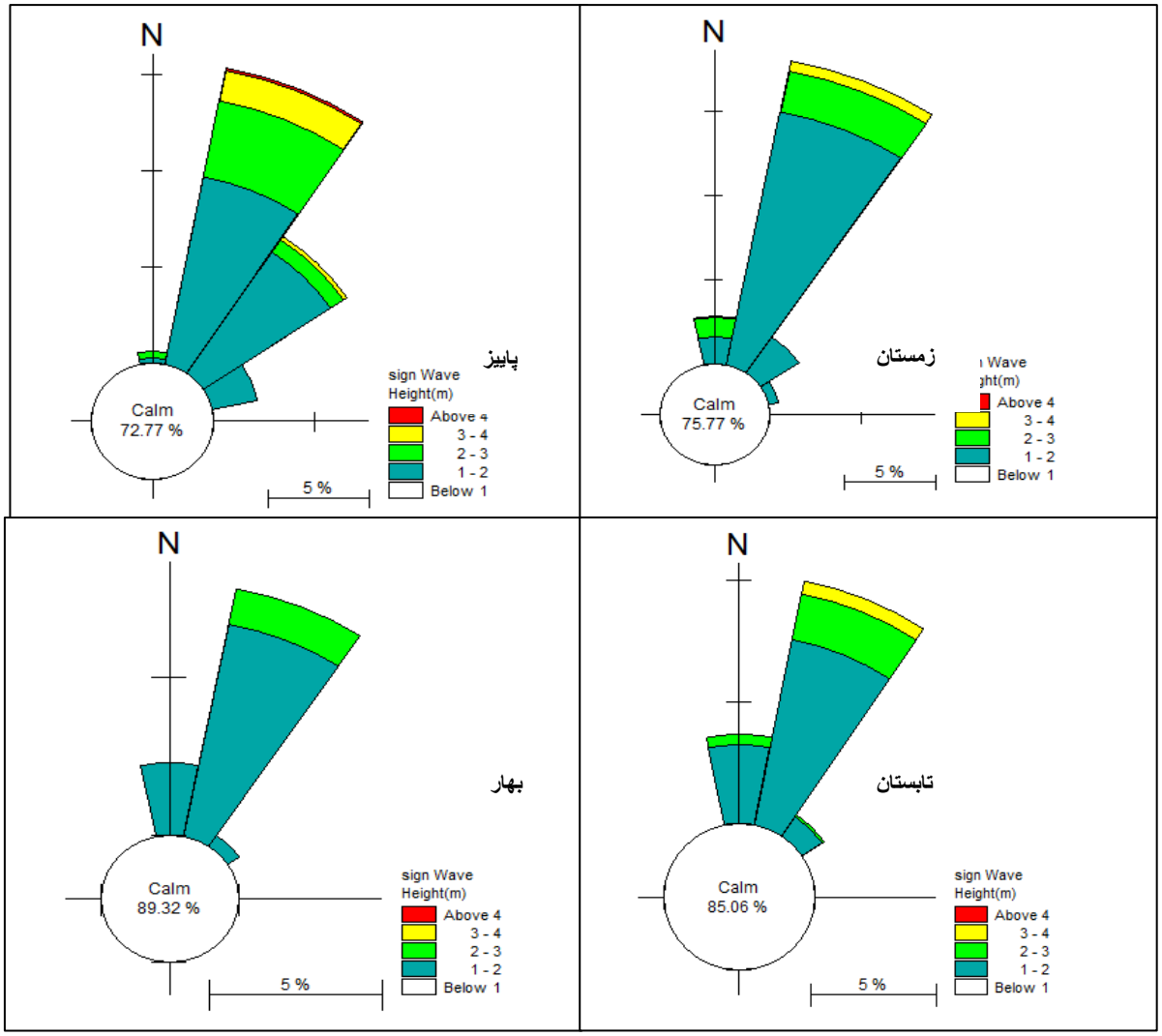
شکل ۱۰- تغییرات تراز بستر در دهانه رودخانه سفیدرود سال آبی ۹۱-۹۰



شکل ۱۱- گل جریان (سرعت و جهت جریان) در مصب رودخانه سفیدرود سال آبی ۹۱-۹۰

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱۲- گل موج (ارتفاع مشخصه و جهت موج) در مصب رودخانه سفیدرود سال آبی ۹۱-۹۰

۴- بحث و نتیجه‌گیری

رودخانه سفیدرود در فروردین و اردیبهشت شرایط سیلابی دارد و در سال آبی ۹۱-۹۰ دبی رودخانه به ۵۵۰ مترمکعب در ثانیه رسیده است از این‌رو رسوب‌های انتقال‌یافته به دریا، توسط رودخانه سفیدرود جلوی دهانه را سد کرده و یا حجم زیادی از رسوب را در نزدیک دهانه در دریا بجای می‌گذارد. پس از این مرحله میزان آبدهی رودخانه سفیدرود در ماه‌های تیر و مرداد به کمترین حد خود به مقدار ۵ مترمکعب در ثانیه و تراز سطح آب دریا به بالاترین مقدار رسیده است که با افزایش سطح آب و جابجایی منطقه شکست موج، قدرت امواج افزایش می‌یابد. با توجه به زاویه رسیدن امواج به ساحل، رسوب‌ها در سمت چپ، راست و یا جلوی دهانه تجمع می‌یابند از تجمع رسوب‌ها در دهانه، سده‌های دهانه‌ای و در طرفین جزایر سدی و یا زبانه‌های ماسه‌ای تشکیل می‌شود.

با توجه به (شکل‌های ۹ و ۱۰)، کم شدن سرعت رودخانه در مصب، رسوب‌گذاری مواد حمل شده را سبب می‌شود. ماسه‌ها و رس‌هایی که به حالت تعلیق در آب حمل می‌شوند در برخورد با دریا دو صورت پیدا می‌نماید، یا حرکات شدید دریا و امواج، آن‌ها را داخل دریا می‌کشاند که در این حال دریا در خشکی پیشروی کرده و خلیج دهانه‌ای (Estuaire) را ایجاد می‌کند و یا ذرات ماسه و مواد تعلیقی در برخورد با دریای آرام و بخصوص تحت تأثیر نوسان تراز سطح آب، ته‌نشین شده و به‌تدریج در دریا پیشروی نموده و سبب تشکیل دلتا می‌شود. در فصل پاییز به‌دلیل افزایش بارندگی‌ها دبی رودخانه به حدود ۴۶۰ مترمکعب در ثانیه رسیده است که باعث فرسایش در مصب شده است و بعد از با کاهش دبی و سرعت جریان به تدریج رسوبات رودخانه در مصب ته‌نشین شده‌اند. در فروردین و اردیبهشت ماه نیز با افزایش دبی رودخانه رسوبات بیشتری به

www.SID.ir

Archive of SID

دهانه و مصب رودخانه انتقال یافته است به طوری که با وقوع جریان با دبی ۵۵۰ مترمکعب در ثانیه، سرعت جریان رودخانه در مصب به حدود ۲ متر بر ثانیه افزایش پیدا کرده و رسوباتی که در دهانه رودخانه تجمع یافته‌اند شسته شده و توسط جریان کرانه‌ای و امواج در دریا منتقل شده‌اند.

یکی از مهمترین دلایل انتقال رسوب نزدیک شدن موج به ساحل و همچنین جهت جریان کرانه‌ای می‌باشد. همان طور که در (شکل ۱۱) مشاهده می‌شود جریانات کرانه‌ای از سمت غرب به شرق و موازی ساحل می‌باشد. همچنین با توجه به (شکل ۱۲) جهت غالب موج در مصب رودخانه سفیدرود از سمت شمال شرقی است که مستقیما تحت تأثیر سرعت و جهت وزش باد قرار دارد که هر دو عامل موج و جریانات کرانه‌ای بر روی انتقال رسوب تأثیر بسزایی دارند. نوسانات تراز آب دریای خزر و تغییرات دبی و انباشت رسوبات و طغیان‌های رودخانه‌ای موجب انسداد مسیر شعبات سفیدرود و نهایتاً تغییر مسیرهای متعدد آن شده است.

براساس روند تغییرات تراز سطح آب دریای خزر که در (شکل ۵) ارائه شده است همان‌طور که مشاهده می‌شود تغییرات تراز سطح آب از سال ۱۳۳۰ تا اکنون شامل سه مرحله می‌باشد. در مرحله اول از سال ۱۳۳۰ تا سال ۱۳۵۵ تراز سطح آب کاهش یافته است. در این بازه زمانی رودخانه سفیدرود پر آب بوده و با وقوع سیل‌های مختلف رسوب زیادی به مصب آن منتقل شده است. بنابراین با توجه به تصاویر ماهواره‌ای سال ۱۹۵۵ و ۱۹۸۵ گسترش و تغییر شکل دلتا کاملا مشهود است. عدم تقارن شکل دلتا در تصویر مربوط به سال ۱۹۵۵ به‌دلیل موقعیت دهانه سفیدرود در مدت طولانی با گرایش شرقی است که دریا نیز در حال پسروی بوده است. جابجایی دهانه سفیدرود علاوه‌بر آن که مانع تجمع رسوب و در نتیجه پیشرفتگی موضعی دلتا در محل خاصی شود، تا حد زیادی نقش جریان‌های دریایی را در مورفولوژی دلتا کاهش می‌دهد. در مرحله دوم از سال ۱۳۵۵ تا سال ۱۳۷۳ تراز سطح آب دریا تا ۳ متر افزایش یافته است و حتی با وقوع سیلاب‌های شدید و همچنین رهاسازی حدود ۵۵۱/۴ میلیون تن از رسوبات مخزن سد سفیدرود برای عملیات احیای این سد (۱۳۵۹ تا ۱۳۷۰)، قسمت شرقی دلتا به زیر آب رفته است (تصویر ماهواره‌ای سال ۱۹۸۹). بنابراین در این مرحله نقش جریان‌های دریایی و امواج کاملا مشخص است. در مرحله سوم از سال ۱۳۷۳ تا اکنون تغییرات تراز سطح آب دریا و آبدهی رودخانه روند کاهشی داشته است به‌طوری که در دهه اخیر به دلیل وقوع خشکسالی تراز سطح آب دریای خزر سالیانه ۰/۱ متر کاهش پیدا کرده است آبدهی رودخانه سفیدرود نیز کاهش چشمگیری داشته است. براساس تصاویر ماهواره‌ای در مرحله سوم می‌توان گفت دلتای سفیدرود با روند کندی در حال گسترش می‌باشد که بیشتر تحت تأثیر کاهش تراز دریا است تا آبدهی و رسوب رودخانه سفیدرود.

۵- منابع

1. Sravanthi, N., Ramakrishnan, R., Rajawat, A.S. and Narayana, A.C. (2015). "Application of numerical model in suspended sediment transport studies along the Central Kerala, west-coast of India", International conference on water resources, costal and ocean engineering (ICWRCOE 2015).
2. Hendriyono, W., Wibowo, M., Al Hakim, B. and Istiyanto, D. (2014). " Modeling of sediment transport affecting the coastline changes due to infrastructures in Batang – Central Java", 2nd International Seminar on Ocean and Costal Engineering, Enviroment and Natural Disaster Management (ISOCEEN 2014).
3. Li Cui, B. and Yan Li, X. (2011). "Coastline change of the Yellow River estuary and its response to the sediment and runoff (1976–2005)" Journal of Geomorphology 127, 32-40.
4. Petropoulos, G., Kalivas, D., Griffiths, H. and Dimou, P. (2015). "Remote sensing and GIS analysis for mapping spatio-temporal changes of erosion and deposition of two Mediterranean river deltas: The case of the Axios and Aliakmonas rivers, Greece". International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 35, 217-228.
5. Thiruvenkatasamy, K. and D. K. Baby Girija. (2014). "Shoreline evolution due to construction of rubble mound jetties at Munambam inlet in ErnakulameTrichur district of the state of Kerala in the Indian peninsula", Journal of Ocean & Coastal Management 102, 234-247.

۶. سپهوند، خ.، صدری نسب، م.، اکبری، م. و کریمی، م. (۱۳۹۱). "بررسی وضعیت رژیم جریان، رسوب‌گذاری و تغییرات خطوط ساحلی در راستای توسعه سواحل کوه

www.SID.ir

Arch

مبارک". اولین همایش ملی توسعه سواحل مکران و اقتدار دریایی جمهوری اسلامی ایران.

۷. اسماعیلی، م.، آزرم سا، ع. و کرمی خانیکی، ع. (۱۳۷۸). "بررسی رسوبات رودخانه سفیدرود در پیشروی خط ساحلی منطقه کیاشهر". هشتمین همایش بین المللی سواحل، بنادر و سازه‌های دریایی.

۸. مدرس طباطبایی، ص. (۱۳۸۷). "بررسی روند تغییرات مرفولوژی مصب سفیدرود در طی چهار دهه گذشته". هشتمین همایش بین‌المللی سواحل، بنادر و سازه‌های دریایی.

۹. جداری عیوضی، ج.، یمانی، م. و خوش‌رفتار، ر. (۱۳۹۱). "تکامل ژئومورفولوژی دلتای سپیدرود در کواترنر "مجله علمی پژوهشی پژوهش‌های جغرافیای طبیعی" . ش ۵۳، ص ۱۲۰-۹۹.

۱۰. شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان گیلان. داده‌های دبی و رسوب رودخانه سفیدرود ایستگاه آبسنجی آستانه.

۱۱. اداره کل مهندسی سواحل سازمان بنادر و کشتیرانی کشور. داده‌های تراز دریای خزر ایستگاه ترازسنجی بندرانزلی.

۱۲. سازمان هواشناسی کشور. داده‌های سرعت و جهت باد ایستگاه سینوپتیک بندرانزلی و بندرکیاشهر

۱۳. داده‌های ماهواره‌ای LANDSAT، سایت http://glovis.usgs.gov

www.SID.ir