

ارزیابی هیدرودینامیک و مورفولوژی دلتای رودخانه سفیدرود با استفاده از شبیه‌سازی دوبعدی و داده‌های سنجش از دور

مرتضی کریمی^۱، جمال محمد ولی سامانی^۲، مهدی مظاهری^{۳*}

۱- کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه تربیت مدرس تهران، پست الکترونیکی: morteza.karimi.91@gmail.com

۲- استاده، گروه مهندسی سازه‌های آبی، دانشگاه تربیت مدرس تهران، پست الکترونیکی: samani_j@modares.ac.ir

۳- استادیار، گروه مهندسی سازه‌های آبی، دانشگاه تربیت مدرس تهران، پست الکترونیکی: m.mazaheri@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۷/۲/۱۷

* نویسنده مسوول

تاریخ دریافت: ۹۶/۹/۲۷

چکیده

هدف از این پژوهش ارزیابی دینامیک امواج، جریان و روند تغییرات مورفولوژی و خط ساحلی دلتای سفیدرود است. در بخش اول با استفاده از مدل MIKE21 مشخصات موج، جریان و انتقال رسوب شبیه‌سازی شد و در بخش دوم با پردازش تصاویر ماهواره‌ای Landsat، نرخ تغییرات خطوط ساحلی دلتا در دهه‌ی اخیر به دست آمد. نتایج این تحقیق نشان داد که مدل قابلیت ارائه الگوی واقعی امواج، جریان‌ها (با شاخص nRMSE ۱۲/۰۷ تا ۱۷/۰۲ درصد) و انتقال رسوب در مناطق ساحلی را دارا است و روند انتقال رسوب تطابق خوبی با نتایج حاصل از پردازش تصاویر ماهواره‌ای داشت. مقایسه‌ی نتایج حاکی از پیش‌روی خط ساحلی غربی و شرقی دلتا به سمت ساحل و پس‌روی ساحل شمالی به سمت خشکی تحت تأثیر توأم کاهش تراز سطح آب دریا و انتقال رسوب است. بنابراین با شناخت رفتار مورفولوژیک سواحل دلتا و روند تغییرات تراز سطح آب دریا می‌توان برای مدیریت و حفاظت از سواحل دلتای سفیدرود تمهیدات لازم به عمل آورد.

کلمات کلیدی: موج، جریان، انتقال رسوب، MIKE21، سنجش از دور، دلتای سفیدرود.

۱. مقدمه

سواحل پرداخت. از طرفی تغییرات تراز سطح آب دریا نیز بر دینامیک امواج و جریان و جابه‌جایی خط ساحلی تأثیر به‌سزایی دارد. تغییر شکل ساحل توسط جریانات ناشی از شکست امواج و از طریق آشفتگی ایجاد شده از آن‌ها به وجود می‌آید (عطایی و همکاران، ۱۳۹۵).

تغییر در بیلان آب دریای خزر یکی از مهم‌ترین دلایل نوسان تراز آب خزر به شمار می‌آید. بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام‌شده، در ۱۰ سال اخیر تراز آب دریای خزر تحت تأثیر عوامل طبیعی (مانند خشک‌سالی، تغییر اقلیم، افزایش دما و تبخیر) و فعالیت‌های انسانی (مانند سدسازی در مسیر رودخانه‌ها)

حفاظت و ساماندهی مصب رودخانه‌ها و جلوگیری از تخریب و فرسایش و توسعه آشفتگی‌های محیطی در این نواحی، نیازمند شناخت کافی از ماهیت طبیعی نیروهای محیطی همچون نوسانات تراز سطح آب دریا، امواج، جریان‌های کرانه‌ای و جریان رودخانه و ارزیابی تغییر رفتار پهنه ساحلی و مصب رودخانه‌ها در مقابل نیروی‌های مذکور است (Lichter and Viely, 2010).
با تعیین الگوی امواج و جریان کرانه‌ای و اثر متقابل آن‌ها بر پدیده انتقال رسوب، می‌توان به بررسی تغییرات مورفولوژی

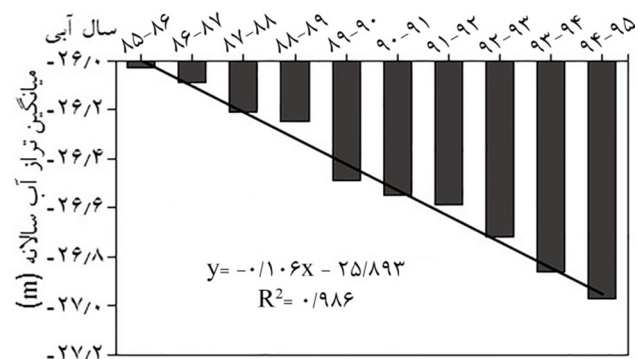
تمهیدات لازم جهت جلوگیری از خسارات در نظر گرفته شود (Thiruvenkatasamy and Girija, 2014; Hendriyono et al., 2015; Sravanthi et al., 2015).

همچنین برای شبیه‌سازی الگوی جریان‌های چرخشی و انتقال رسوب ناشی از آن تحت شرایط امواج بلند در سواحل جنوبی آیتیکا در یونان از مدل MIKE21 استفاده شد. نتایج نشان داد که در بخش غربی این سواحل انتقال رسوب ناشی از الگوی چرخشی پادساعت‌گرد جریان و نفوذ امواج و جریان از سمت شرق است که مشابه با اندازه‌گیری‌های میدانی است (Belibassakis and Karathanasi, 2017).

در زمینه‌ی فن سنجش‌ازدور با استفاده از پردازش تصاویر ماهواره‌ای LandSat TM/ETM ویژگی‌های مکانی و زمانی تغییرات خط ساحلی مناطق دلتایی رودخانه‌های Yangtze و Yellow پایش شد. بر اساس روش آستانه‌گذاری هیستوگرام و پوشش گیاهی خطوط ساحلی استخراج شد و با استفاده از نیمرخ‌های عرضی متعامد نرخ تغییرات خط ساحلی به دست آمد. همچنین با انجام آنالیز رگرسیون خطی، روابطی برای نشان دادن تأثیر دبی و بار رسوب سالانه رودخانه بر تغییرات خط ساحلی دلتای آن ارائه و سهم تأثیر عوامل مختلف بررسی شد (Cui and Li, 2011; Li et al., 2014). در سواحل شمالی گاجارات در هند با استفاده از تصاویر سنجنده‌های ETM، TM، MSS و IRS-P6 و همچنین نرم‌افزار DASA، نسخه ۴ و روش رگرسیون خطی، نرخ تغییرات خط ساحلی محاسبه گردید (Mahapatra et al., 2013).

در محدوده قاعده دلتای سفیدرود نیز بررسی متغیرهای مؤثر بر تغییرات سریع خط ساحلی طی شصت سال گذشته، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و عکس‌های هوایی و محاسبه تغییرات خط ساحلی روی برش‌های عرضی نشان داد که عملیات رسوب‌شویی سد منجیل، بیشترین تأثیر را در تغییر سریع خط ساحلی قاعده‌ی دلتا با نرخ ۲۶ متر در سال داشت. نرخ تغییرات خط ساحلی دلتا قبل و بعد از دوره رسوب‌شویی، به ترتیب ۱۹ و ۹ متر در سال محاسبه شد. بررسی فرآیند تکامل دلتای سفیدرود حاکی از جابجایی دهانه سفیدرود به میزان ۳۲۰۰ متر به سمت شرق در سال ۱۳۸۱ نسبت به سال ۱۳۴۵ است (یمانی و همکاران، ۱۳۹۲؛ عیوضی و همکاران، ۱۳۸۴). تغییرات دوره‌ای خط ساحلی شرق تنگه هرمز با استفاده از تصاویر سنجنده‌ی TM با استفاده از روش طبقه‌بندی نظارت‌شده مورد بررسی قرار گرفت (یمانی و همکاران، ۱۳۹۰).

حدود ۱ متر کاهش داشته است که دارای شیب نزولی متوسط ۰/۱ متری در سال است (شکل ۱).



شکل ۱: تغییرات تراز سطح آب دریای خزر در ۱۰ سال اخیر، ایستگاه ترازسنجی بندرانزلی (سازمان بنادر و دریانوردی کشور)

شناخت رفتار مورفولوژیک سواحل و روند تغییرات یاد شده ابزار مفیدی برای سامان‌دهی فنون مدیریت سواحل در منطقه دلتای این رودخانه با نگرشی بر محدوده‌ی حریم سواحل در پی توسعه کانون‌های شهری است. لذا تحقیق و مطالعه در این زمینه امری ضروری است.

با گسترش مدل‌های عددی از جمله MIKE21 تحقیقات بسیاری جهت بررسی دینامیک موج و جریان و انتقال رسوب چسبنده و غیرچسبنده در طول سواحل و ورودی رودخانه‌ها و در نهایت تغییرات مورفولوژیک سواحل بر اثر احداث سازه‌های دریایی و یا به صورت طبیعی، با استفاده از این مدل صورت گرفته است. بر اساس نتایج شبیه‌سازی‌ها، این مدل توانسته است مشخصات امواج و جریان ناشی از شکست امواج و جزر و مد را با دقت خوبی شبیه‌سازی کند به طوری که الگوها شباهت نزدیکی با نمونه اصلی داشتند (کریمی خانیکی و همکاران، ۱۳۸۴؛ اسماعیلی، ۱۳۸۶؛ جعفر زاده و همکاران، ۱۳۹۳؛ رودباری شه‌میری و همکاران، ۱۳۹۶).

مطالعه مورفولوژی سواحل و شبیه‌سازی امواج و جریان‌ها با استفاده از مدل MIKE21 نشان داد که با توجه به جهت و بزرگی موج و جریان، الگوی انتقال رسوب سواحل و رسوب ورودی از رودخانه تغییر می‌کند و عدم تعادل در ظرفیت انتقال رسوب، مورفولوژی سواحل اطراف سازه‌های دریایی و ورودی رودخانه‌ها را مشابه با نمونه اصلی تحت تأثیر قرار می‌دهد. الگوی انتقال رسوب تحت تأثیر جریان کرانه‌ای و رودخانه‌ای و یا جریان جزر و مدی است که با توجه به اهمیت هر یک از عوامل نیاز است

در معادله‌های بالا، h عمق آب (m)، ρ تراز سطح آب (m)، q به ترتیب دانسیته شار در جهت‌های x و y ($m^3/m/s$)، C ضریب شزی ($m^{1/2}/s$)، g شتاب جاذبه (m/s^2)، $f(V)$ ضریب اصطکاک باد (بدون بعد)، V_x, V_y, V_z سرعت باد و مؤلفه‌های آن در جهت‌های x, y (m/s)، Ω ضریب کریولیس وابسته به عرض جغرافیایی (s^{-1})، P_a شار هوا ($kg/m/s^2$)، ρ_w جرم حجمی آب (kg/m^3)، x, y مختصات صفحه‌ای (m)، t زمان (s)، $\tau_{xx}, \tau_{yy}, \tau_{xy}$ مؤلفه‌های تنش برشی موثر هستند (DHI, 2012).

در مدول انتقال ماسه ST^4 ، به دلیل در نظر گرفتن تأثیر توأم موج و جریان بر انتقال رسوب، از فرمول‌بندی شبه سه‌بعدی $STPQ3D^5$ استفاده شد که در آن الگوریتم انتقال بار کل توسط شرایط هیدرودینامیکی حل شده و جهت سرعت بخشیدن در محاسبات نرخ انتقال رسوب، از درون‌یابی خطی در یک جدول محاسباتی استفاده می‌شود. تحولات لایه مرزی در این فرمول-بندی بر پایه‌ی روش مومنتوم انتگرال‌گیری شده‌ی فردسو (Fredsoe, 1984) است.

۲-۲ منطقه مورد مطالعه

دلتای رودخانه سفیدرود در استان گیلان در غرب بندر کیشهر با موقعیت جغرافیایی $49^{\circ}30'$ طول شرقی و $37^{\circ}45'$ عرض شمالی با میانگین آبدهی سالانه 5200 میلیون مترمکعب به‌عنوان بزرگترین و مهم‌ترین رودخانه در پهنه جنوبی دریای خزر واقع شده است (شکل ۲).



شکل ۲: موقعیت جغرافیایی منطقه طرح (تصویر Google earth)

در این تحقیق با توجه به مطالعات انجام شده و ضرورت شناخت رفتار مورفولوژیک سواحل، با استفاده از تلفیق فن سنجش‌زدور و شبیه‌سازی عددی، تغییرات مورفولوژی دلتای سفیدرود ارزیابی شد. بر اساس این نتایج می‌توان تغییرات آبی را پیش‌بینی نمود.

۲. مبانی و روش‌ها

در این بخش مبانی مدل عددی، منطقه مورد مطالعه، داده‌های مورد نیاز، اجرای مدل و پردازش تصاویر ماهواره‌ای شرح داده شده است.

۱-۲ مدل عددی

برنامه کامپیوتری MIKE21 توسط انستیتو هیدرولیک دانمارک DHI^۱ پایه‌ریزی و به مرور زمان تکمیل و توسعه یافته است و دارای قابلیت‌های محاسباتی و گرافیکی بالایی در زمینه‌ی شبیه‌سازی پدیده‌های مربوط به خورها، دریاچه‌ها، نواحی کم‌عمق ساحلی، خلیج‌ها و دریاها است. مدول موج طیفی SW^2 MIKE21 برای محاسبه الگوی موج بر اساس حل معادله انرژی در شکل طیفی آن عمل می‌کند. مدول هیدرودینامیکی $FlowModelFM-HD^3$ نیز با حل معادلات بقای جرم و مومنتوم (معادله‌های ۱-۳) مشخصات جریان را محاسبه می‌کند.

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0 \quad \text{معادله ۱}$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{gp\sqrt{p^2 + g^2}}{c^2 h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega q - fVV_x + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} (P_a) = 0 \quad \text{معادله ۲}$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \xi}{\partial y} + \frac{gp\sqrt{p^2 + g^2}}{c^2 h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega p - fVV_y + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} (P_a) = 0 \quad \text{معادله ۳}$$

⁴ Sand Transport Module

⁵ Quasi Three-Dimensional Sediment Transport Module

¹ Danish Hydraulic Institute

² Spectral Wave Module

³ Hydrodynamic Module

۳-۲ اطلاعات و داده‌های موردنیاز در شبیه‌سازی

داده‌های عمق‌سنجی شامل داده‌های ارائه‌شده در برنامه زیست‌محیطی دریای خزر (CEP^۱) و اطلاعات عمق‌سنجی موجود در پایگاه داده‌های C-MAP^۲ نروژ به همراه داده‌های مربوط به شیت منطقه‌ی کپاشهر با دقت ۱:۲۵۰۰۰۰ از سازمان نقشه‌برداری کشور است. همچنین داده‌های روزانه ایستگاه آب‌سنجی آستانه بر رودخانه سفیدرود از شرکت آب منطقه‌ای استان گیلان تهیه شد.

جهت واسنجی و صحت‌سنجی مدل، داده‌های اندازه‌گیری شده‌ی ارتفاع و جهت و دوره تناوب موج و همچنین سرعت و جهت جریان در بویه موج‌نگار و دستگاه ADCP^۳ بندرانزلی به همراه مشخصات دانه‌بندی رسوب در منطقه (جدول ۱) از سازمان بندر و دریانوردی دریافت شد.

جدول ۱: مشخصات دانه‌بندی رسوب در منطقه دلتای سفیدرود (سازمان بندر و دریانوردی کشور)

تخلخل	ضریب دانه‌بندی	d ₅₀ (mm)
۰/۳	۱/۸	۰/۲

در شبیه‌سازی جریان و امواج از داده‌های باد مدل هواشناسی مرکز اروپایی پیش‌بینی‌های میان‌مدت آب و هوایی ECMWF^۳ استفاده شد. این مرکز به کمک داده‌های ماهواره‌ای و اطلاعات ایستگاه‌های سینوپتیک، مدل‌های هواشناسی جهانی یا منطقه‌ای را در فواصل زمانی منظم اجرا کرده و نتایج آن را در پایگاه داده‌های خود مانند ERA^۴-Interim ذخیره می‌کنند.

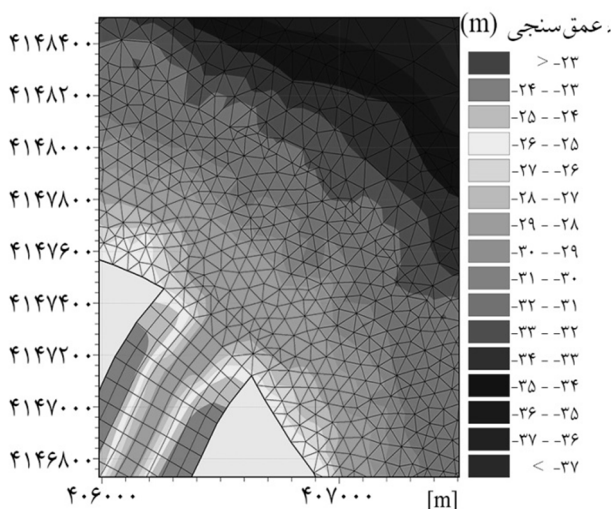
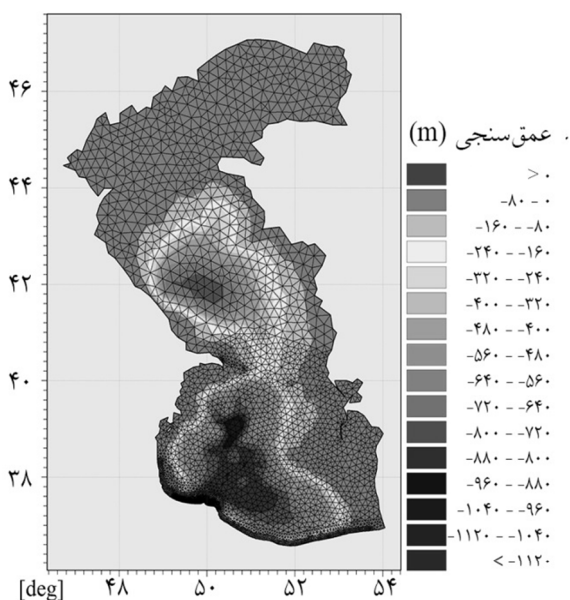
۴-۲ اجرای مدل

به دلیل عدم وجود بویه و ایستگاه‌های آب‌نگاری در محدوده دلتای سفیدرود، دو نوع شبیه‌سازی در نظر گرفته شد. مدل اول، مدل بزرگ‌مقیاس بوده که شامل کل دریای خزر با شرط مرزی بسته (خشکی) است.

این مدل دینامیک موج و جریان را به صورت کلی ارائه می‌دهد و از نتایج آن برای شرایط مرزی مدل ریزمقیاس استفاده می‌شود. مدل دوم نیز مربوط به مدل محلی یا ریزمقیاس شامل ۳۰ کیلومتر

از مسیر رودخانه سفیدرود به همراه محدوده ساحلی دلتای آن بوده که در آن پس از استخراج شرایط مرزی باز (پهنه آبی) از مدل بزرگ‌مقیاس، مشخصات موج و جریان و انتقال رسوب در منطقه طرح شبیه‌سازی می‌شود. مش‌بندی دامنه‌های موردنظر با توجه به استقلال نتایج از سایز و ابعاد مش‌بندی و حصول بهترین برآورد، به صورت شبکه مثلثی نامنظم در دریا و شبکه چهارضلعی نامنظم در رودخانه با کوچک‌ترین فاصله گره ۵۰ متر انجام شد (شکل ۳).

گام زمانی در مدل موج برابر با ۶۰۰ ثانیه و در مدل هیدرودینامیک و انتقال رسوب برابر با ۳۰ ثانیه و شرایط اولیه و شرایط مرزی مدل نیز طبق جدول ۲ تعیین شد.



¹ Caspian Environment Program

² Acoustic Doppler Current Profiler

³ European Centre for Medium Range Weather Forecasting

⁴ European Reanalysis

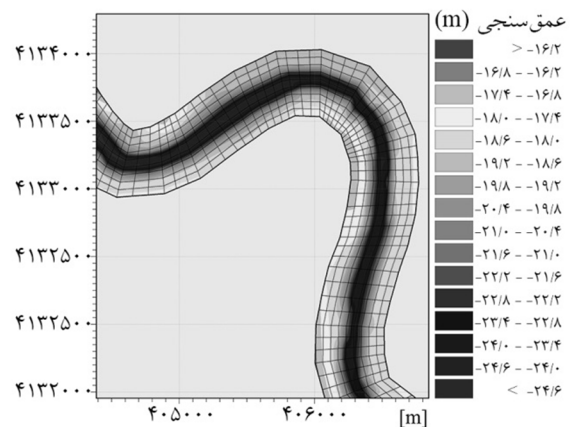
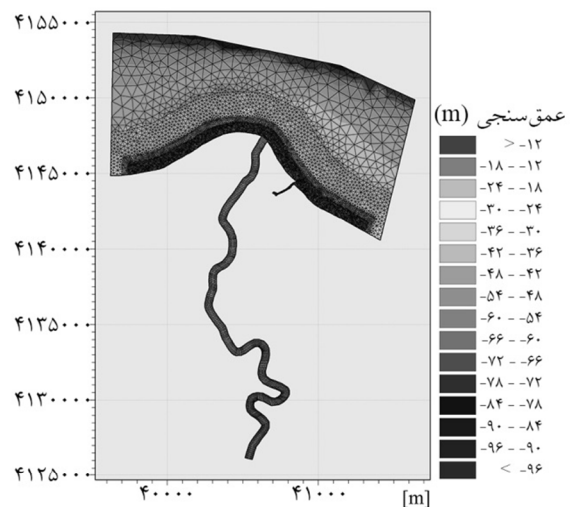
جدول ۲: شرایط اولیه و مرزی مدل موج و جریان در دو مقیاس کلی و محلی

شرایط مرزی	شرایط اولیه		نوع شبیه سازی
	مدل موج SW	مدل جریان HD	
مدل جریان HD	مدل موج SW	مدل جریان HD	مدل موج SW
مرز بسته	مرز بسته	سرعت صفر تراز سطح آب متر -۲۶/۵	Zero spectra
مرز شرقی و غربی: شار جریان P و q	ارتفاع مشخصه موج Hs	سرعت جریان u	ریزمقیاس (محلی)
مرز شمالی: سرعت جریان u و v و تراز سطح آب (متغیر در مرز و زمان)	دوره تناوب موج پیک Tp میانگین جهت موج Dir انحراف استاندارد جهت DSD (متغیر در مرز و زمان)	و v و عمق آب h (متغیر در دامنه)	Zero spectra

۲-۵- سنجش از دور

سنجش از دور نمونه‌ای از مشاهدات است که با استفاده از برهم‌کنش امواج الکترومغناطیس در باندهای طیفی مختلف انجام می‌شود. هر پدیده‌ی طبیعی در طول موج‌های مختلف طیف الکترومغناطیس، برهم‌کنش متفاوتی خواهد داشت. بنابراین سنجش از دور به‌عنوان یک ابزار کارآمد در تشخیص پدیده‌های گوناگون و بررسی وضعیت آن‌ها در طول زمان شناخته شود (مباشری، ۱۳۹۳). در تحقیق حاضر تصاویر سنجنده‌های MSS و OLI از ماهواره‌های LandSat5 و LandSat8 با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر متناظر با انتهای سه سال آبی به تاریخ‌های ۲۰۰۶/۰۹/۲۰، ۲۰۱۱/۱۰/۰۱ و ۲۰۱۶/۰۹/۲۲ انتخاب شدند. هدف از پردازش تصاویر محاسبه‌ی نرخ تغییرات خط ساحلی و روند تغییرات آن است. پس از اعمال تصحیح رادیومتریک روی تصاویر به‌عنوان پیش‌پردازش، مقادیر مربوط به هر پیکسل از حالت خام خارج شده و به مقدار انرژی بازتابیده شده از هر پدیده تبدیل می‌شود که برای مقایسه تصاویر در زمان‌های مختلف، معیار مناسب‌تری است.

برای پس‌پردازش تصاویر، با توجه به دقت بالا و کارآمد بودن و گستردگی استفاده در تحقیقات مشابه، از طبقه‌بندی نظارت شده به روش حداکثر احتمال^۴ استفاده شد. طبقه‌بندی نظارت شده یکی از روش‌های طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای است که در آن با تعیین نمونه‌هایی از پدیده‌های موجود در منطقه، تصویر موردنظر طبقه‌بندی می‌شود. سپس با استفاده از نمونه‌هایی که دقت بالاتری دارند و معرف پدیده موردنظرند، طبقه‌بندی تکرار می‌شود تا دقت



شکل ۳: شبکه‌بندی و فایل عمق‌نگاشت مدل در دو مقیاس کلی و محلی

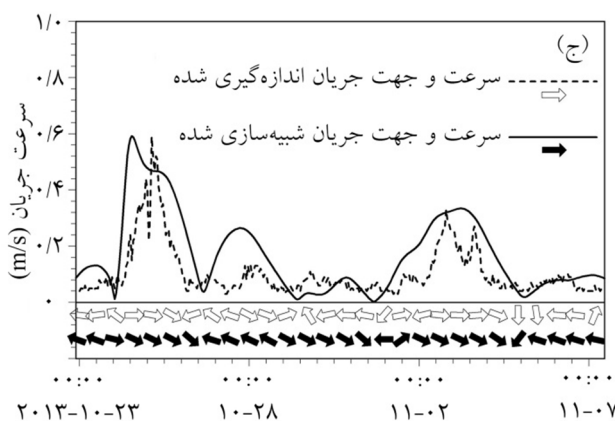
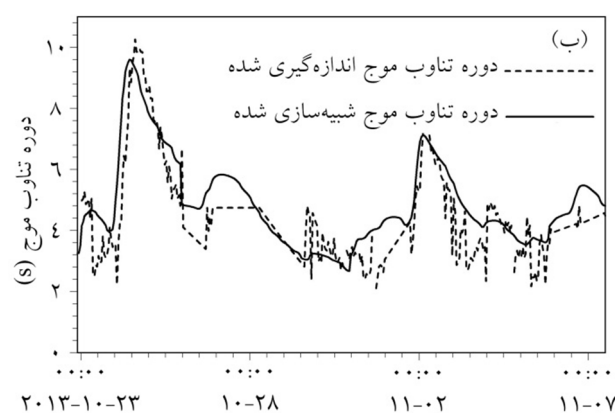
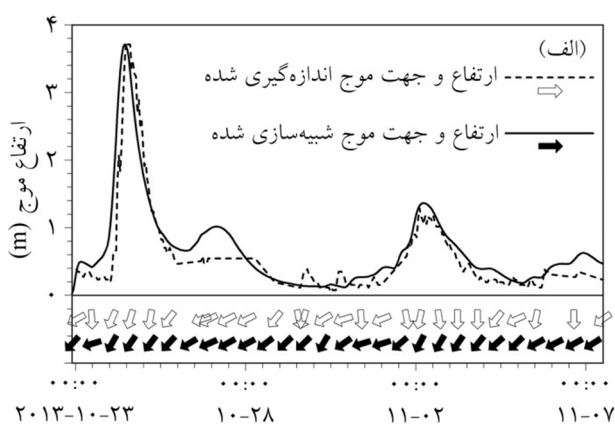
ضرایب سفیدک رأس موج^۱، ضریب شکست موج و اصطکاک کف (زبری نیکورادزه) و عکس ضریب زبری مانینگ به‌عنوان ضرایب واسنجی انتخاب شدند. ضریب اسموگرونسکی^۲ برای محاسبه لزجت گردابه‌های^۳ طبق پیشنهاد مدل ۰/۲۸ در نظر گرفته شد، زیرا در منطقه‌ی بندرانزلی به دلیل نوع مورفولوژی سواحل و شرایط آرام جریان، داده‌های اندازه‌گیری شده نمی‌توانند تأثیر گردابه‌ها را نشان دهند و تغییر این ضریب در مدل تأثیری بر نتایج آن ندارد، بنابراین با شرایط موجود نمی‌توان آن را به‌عنوان یکی از ضرایب واسنجی در نظر گرفت. در هر مرحله از شبیه‌سازی، از نتایج مدول موج طیفی، تنش تشعشعی و مشخصات امواج به‌عنوان ورودی مدول جریان و انتقال رسوب استفاده شد.

¹ White capping

² Smagorinsky

³ Eddy viscosity

⁴ Maximum Likelihood



شکل ۴: نتایج واسنجی مدل در بویه موج‌نگار و ADCP بندرانزلی (الف) ارتفاع موج، (ب) دوره تناوب موج، (ج) سرعت و جهت جریان

جدول ۳: مقادیر ضرایب و پارامترهای واسنجی شده در مدل

عکس ضریب	عکس ضریب	عکس ضریب	عکس ضریب	عکس ضریب	عکس ضریب
زبری مانینگ	زبری مانینگ	شکست	اصطکاک	زبری مانینگ	زبری مانینگ
دریا	رودخانه	کف	رودخانه	کف	رودخانه
$M (m^{1/3}/s)$	$M (m^{1/3}/s)$	$K_N(m)$	$M (m^{1/3}/s)$	$M (m^{1/3}/s)$	$M (m^{1/3}/s)$
۷۰	۳۳	۰/۰۰۲	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۱۸

طبقه‌بندی اولیه مشخص گردد. همچنین مناسب بودن نمونه‌ها با ایجاد نشانه‌های طیفی بررسی می‌شود.

پس از پردازش تصاویر، خطوط ساحلی که در واقع مرز بین پهنه آبی و خشکی است استخراج شدند. نرخ تغییرات سالانه خطوط ساحلی در محیط نرم‌افزار ArcGIS، نسخه ۱۰٫۱ توسط افزونه DSAS^۱ نسبت به یک خط مبنا، بر اساس تفاوت بین موقعیت مکانی شناسایی شده خط ساحلی در طول زمان روی ۹۰ برش عرضی با فاصله ۲۵۰ متر از هم، محاسبه شدند به نحوی که با اعمال رگرسیون خطی، مربعات باقیمانده حداقل شود.

۳. نتایج و بحث

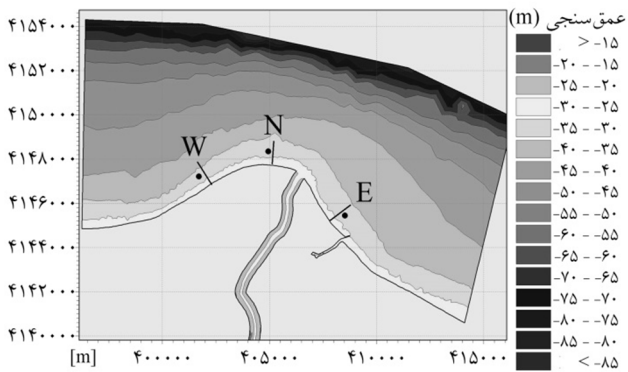
در این بخش نتایج حاصل از واسنجی و صحت‌سنجی مدل و شبیه‌سازی الگوی امواج، جریان و رسوب و همچنین نتایج بررسی تغییرات خط ساحلی ارائه و شرح داده شده است.

۳-۱ نتایج واسنجی و صحت‌سنجی

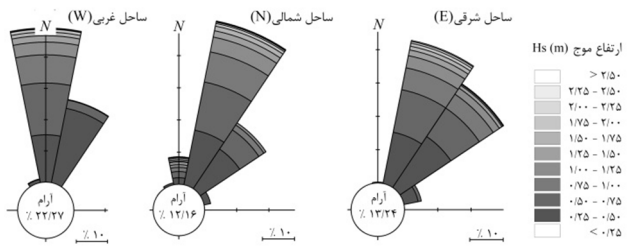
به دلیل عدم وجود تجهیزات اندازه‌گیری در منطقه دلتای سفیدرود، از داده‌های ایستگاه بندرانزلی به عنوان نزدیکترین تجهیزات نسبت به دلتا استفاده شد که در دامنه‌ی مدل کوچک مقیاس قرار ندارد و نمی‌توان به طور مستقیم با استفاده از این داده‌ها، مدل کوچک‌مقیاس را واسنجی و صحت‌سنجی نمود. بنابراین در شبیه‌سازی‌ها ابتدا مدل بزرگ مقیاس واسنجی و صحت‌سنجی شد، سپس مدل کوچک مقیاس نسبت به مدل بزرگ مقیاس مورد واسنجی و صحت‌سنجی قرار گرفت و مقادیر ضرایب و پارامترهای واسنجی تعیین شدند (جدول ۳). ضرایب مربوط به مدل موج منطبق بر ضرایب در نظر گرفته‌شده در پروژه مدل‌سازی امواج دریای خزر هستند (سازمان بنادر و دریانوردی، ۱۳۸۷). مقادیر درصد خطای شبیه‌سازی (nRMSE) حاکی از دقت مناسب مدل در شبیه‌سازی پارامترهای موج و جریان است (جدول ۴). همان‌طور که مشاهده می‌شود در بازه‌هایی که مقادیر سرعت جریان کم هستند، جهت جریان نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی به دلیل کم بودن ارتفاع موج متفاوت بوده و جهت جریان مستقل از شکست امواج است (شکل‌های ۴ و ۵).

^۱ Digital Shoreline Analysis system

نتایج دوبعدی مدل موج طیفی نشان داد که جهت غالب امواج از سمت شمال شرقی و مستقیماً تحت تأثیر جهت باد است. نتایج شبیه‌سازی جریان منطبق بر نتایج پروژه‌ی شبیه‌سازی امواج دریای خزر (سازمان بنادر و دریانوردی، ۱۳۸۷) در این منطقه بود و با مقایسه آن‌ها نتیجه می‌شود که الگوی امواج پایدار است. درصد فراوانی امواج با ارتفاع مختلف در هر سه بخش دلتا تقریباً مشابه هم بودند. تمامی امواج با نزدیک شدن به ساحل، در راستای عمود بر خط ساحلی تغییر جهت می‌دهند (شکل ۷).



شکل ۶: توپوگرافی و موقعیت نقاط و نیم‌رخ سواحل برای ارائه نتایج شبیه‌سازی



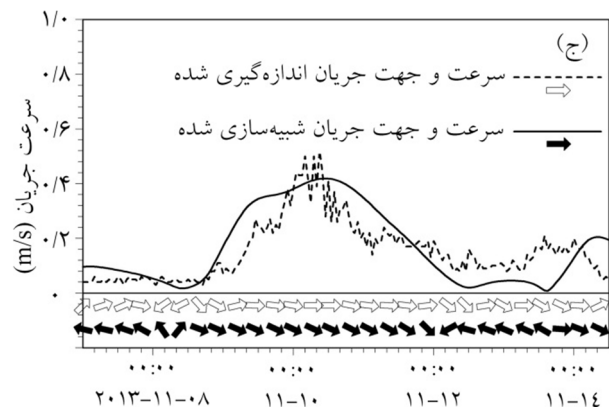
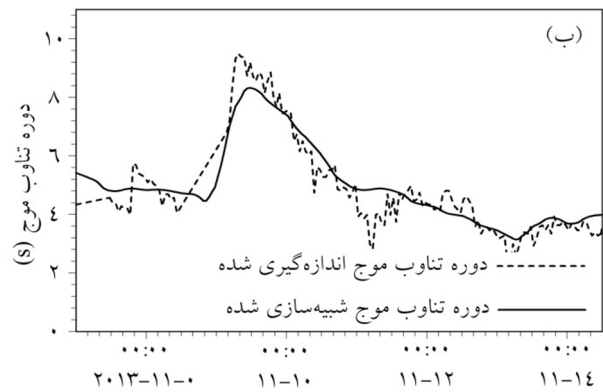
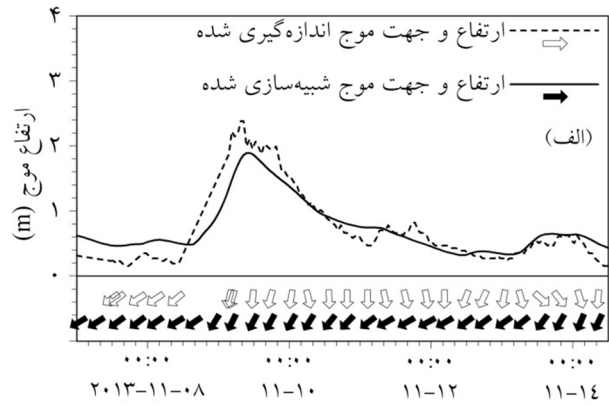
شکل ۷: گل‌موج در محدوده دلتای سفیدرود در سواحل دلتای سفیدرود در عمق ۵ متری

۳-۳ نتایج شبیه‌سازی دینامیک جریان

الگوی جریان نیز با توجه به شکل ۸ موازی ساحل و جهت غالب آن غرب به شرق و همانند الگوی امواج پایدار است. این نتیجه توسط نورانیان و همکاران (۱۳۹۶) نیز بیان شده است. درصد وقوع سرعت جریان بالای ۰/۱ متر بر ثانیه در ساحل شمالی نسبت به سواحل دیگر دلتا بیشتر بوده و الگوی جریان ناآرام است. ساحل شرقی دلتا بیش‌تر مواقع در طول سال، الگوی جریان آرام‌تری نسبت به سواحل دیگر دارد. اما با این حال حداکثر سرعت جریان در ساحل شرقی رخ داده است، زیرا

جدول ۴: مقادیر درصد خطای شبیه‌سازی (nRMSE) پارامترهای موج و جریان

ارتفاع موج	جهت موج	دوره تناوب موج	سرعت جریان	جهت جریان
Hs	Dir	Tp	C.S	Dir
۱۶	۱۴/۲۲	۱۲/۰۷	۱۷/۰۲	۱۲/۸۸

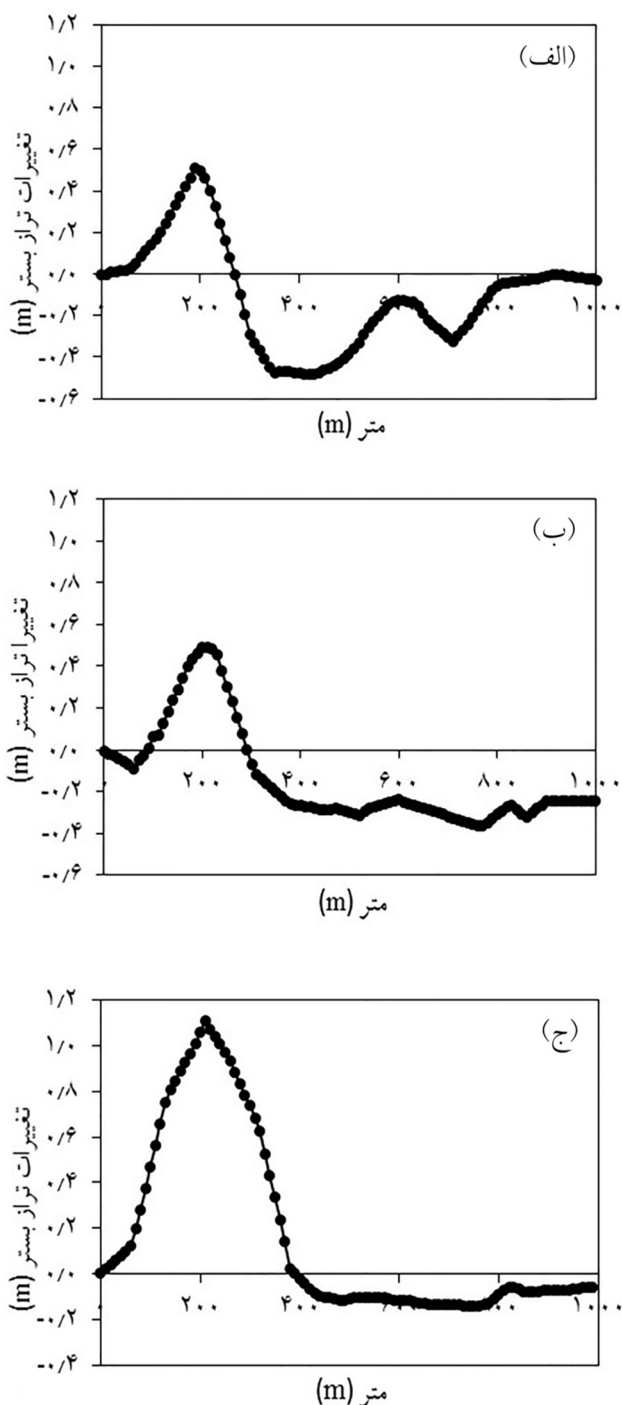


شکل ۵: نتایج صحت‌سنجی مدل در بویه موج‌نگار و ADCP بندرانزلی (الف) ارتفاع موج، (ب) دوره تناوب موج، (ج) سرعت و جهت جریان

۲-۳ نتایج شبیه‌سازی امواج

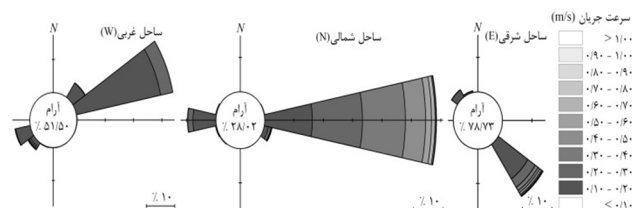
نتایج شبیه‌سازی در سه قسمت ساحل شرقی (E)، شمالی (N) و غربی (W) دلتای سفیدرود مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۶).

انتقال رسوب در مصب آن می‌شود و در مواردی که سرعت جریانات کرانه‌ای کم است، جریانات در منطقه تحت تأثیر جریان خروجی رودخانه بوده و در صورت غالب بودن جریان کرانه‌ای، انتقال رسوب موازی ساحل به سمت شرق و یا غرب دلتای سفیدرود صورت می‌گیرد.



شکل ۹: تغییرات تراز بستر در سواحل دلتا (سال آبی ۹۰-۸۹) (الف) نیمرخ ساحل غربی، (ب) نیمرخ ساحل شمالی، (ج) نیمرخ ساحل شرقی

سرعت جریان در ساحل شرقی دلتا بیشتر تحت تأثیر جریان رودخانه بوده و در مواقع سیلابی سرعت جریان به حداکثر می‌رسد.



شکل ۸: گل جریان در محدوده دلتای سفیدرود در سواحل دلتای سفیدرود در عمق ۵ متری

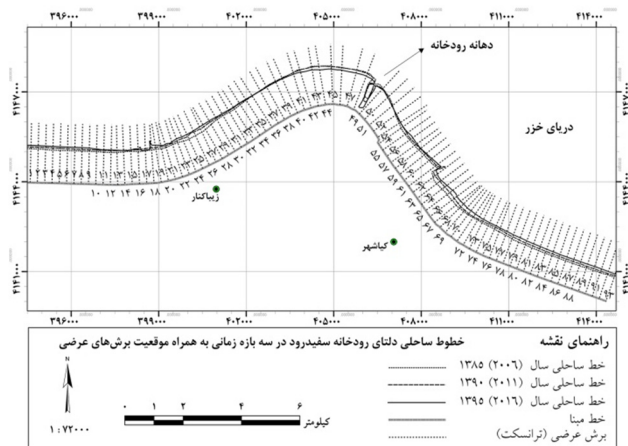
۳-۴ نتایج شبیه‌سازی انتقال رسوب

رسوب بستر دریا طبق الگوی جریان کرانه‌ای، از سواحل غربی و شمالی به سمت ساحل شرقی منتقل شده و در این بخش به دلیل الگوی جریان آرام‌تر، رسوب‌گذاری اتفاق می‌افتد. حداکثر نرخ انتقال رسوب در فاصله ۲۰۰ متری از ساحل مشاهده شد. همچنین در محدوده خط ساحلی سواحل شرقی و غربی تغییرات تراز بستر مثبت (رسوب‌گذاری) و در ساحل شمالی منفی (فرسایش) است (شکل‌های ۸ و ۹).

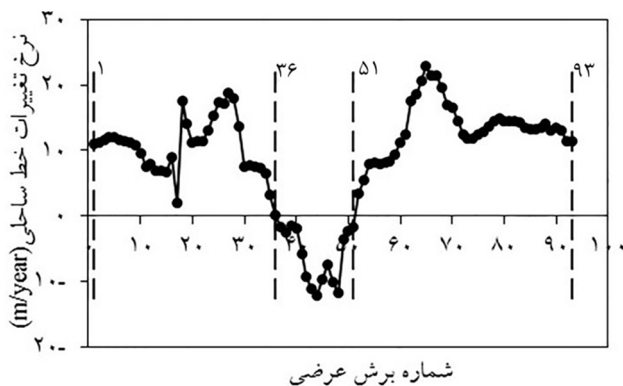
مقدار رسوب انتقال یافته در نیمرخ ساحل شمالی تقریباً ۲/۷۵ برابر ساحل غربی است و به دلیل الگوی جریان ناآرام در این بخش سهم بیشتری از این مقدار به سمت آب‌عمیق و ساحل شرقی منتقل و مابقی ته‌نشین می‌شوند. با وجود اینکه سرعت جریان در ساحل شرقی کمتر است، حجم رسوب انتقال یافته متناظر با نرخ انتقال رسوب در نیمرخ این ساحل نسبت به ساحل غربی کمی بیشتر است که دلیل آن هدایت رسوب خروجی از دهانه رودخانه به همراه سهمی از رسوب ساحل شمالی توسط جریان کرانه‌ای به این بخش است. بنابراین سهم بیشتر انتقال رسوب در ساحل شرقی ناشی از ورودی رودخانه بوده و به دلیل کم بودن سرعت جریان رسوب‌گذاری بیشتری مشاهده می‌شود (جدول ۵ و شکل‌های ۹ و ۱۰). شیب ملایم در ساحل شرقی ناشی از رسوب‌گذاری بیش‌تر نسبت به بخش‌های دیگر دلتا است (شکل ۶).

نتایج پژوهش اسماعیلی (۱۳۸۶) به منظور انتقال رسوبات چسبنده در بندر کیشهر با استفاده از مدل MIKE21 نشان داد که اندرکنش امواج و جریان خروجی از رودخانه سفیدرود موجب

در ساحل غربی بین برش عرضی ۱ تا ۳۶ دارای نرخ تغییرات مثبت، بخش دوم در ساحل شمالی دلتا بین برش عرضی ۳۶ تا ۵۱ دارای نرخ تغییرات منفی و بخش سوم نیز در ساحل شرقی دلتا بین برش عرضی ۵۱ تا ۹۳ دارای نرخ تغییرات مثبت است. در بخش غربی و شرقی دلتا از برش عرضی ۱ تا ۹ و ۷۳ تا ۹۳ خط ساحلی با نرخ تغییرات تقریباً یکنواخت به سمت دریا پیش‌روی کرده است و در پی احداث سازه‌های دریایی، نرخ تغییرات افزایش یافته است. در بخش شمالی نیز پیچیدگی فرآیند انتقال رسوب ناشی از رودخانه و جریان کرانه‌ای و تغییرات ناگهانی در طی سال‌های مختلف باعث افزایش خطای استاندارد در تخمین نرخ تغییرات خط ساحلی شده است (شکل‌های ۱۱ الی ۱۳).



شکل ۱۱: خطوط ساحلی دلتای سفیدرود در سه بازه زمانی به همراه موقعیت خطوط برش‌های عرضی

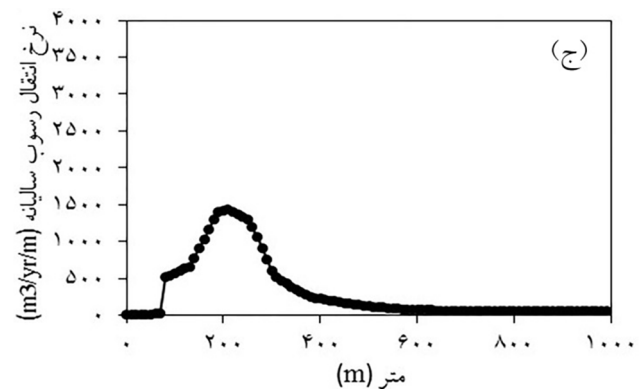
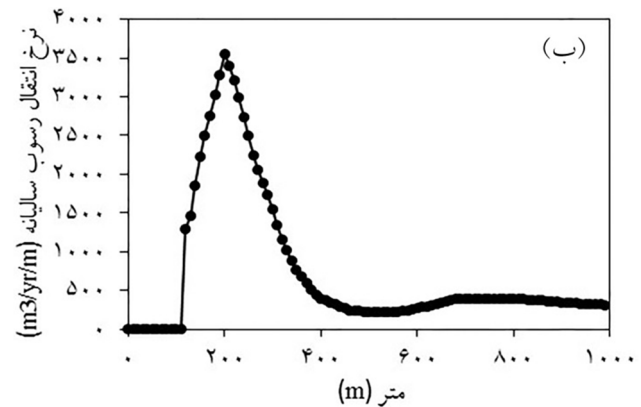
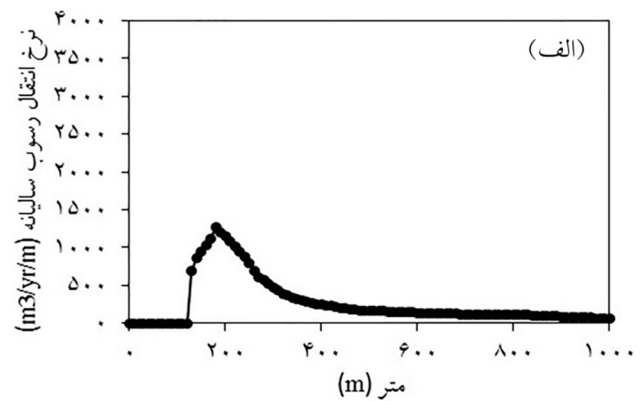


شکل ۱۲: نرخ تغییرات خط ساحلی دلتای سفیدرود در راستای برش‌های عرضی

متوسط نرخ تغییرات خط ساحلی حاصل از نتایج سنجش-ازدور (مقادیر با خطای زیر ۱۰ درصد) بر اساس شیب سواحل و

جدول ۵: حجم رسوب (ماسه) انتقال یافته از نیمرخ سواحل دلتای سفیدرود در طول سال آبی ۹۰-۸۹

حجم رسوب انتقال یافته (ton)			
نیمرخ (E)	ورودی رودخانه	نیمرخ (N)	نیمرخ (W)
۳۱۲/۱۲	۲۲۵/۹۸	۷۲۵/۲۰	۲۶۷/۱۳



شکل ۱۰: نرخ انتقال رسوب (ماسه) سالیانه در سواحل دلتا (سال آبی ۹۰-۸۹) (الف) نیمرخ ساحل غربی، (ب) نیمرخ ساحل شمالی، (ج) نیمرخ ساحل شرقی

۳-۵ نتایج سنجش‌ازدور

بر اساس نتایج سنجش‌ازدور، رفتار مورفولوژی دلتای سفیدرود در دهه‌ی اخیر به سه بخش تقسیم می‌شود. بخش اول

با توجه به این که در مدل عددی MIKE21، شبیه‌سازی انتقال رسوب غیرچسبنده بر اساس شرایط جریان حاصل از مدل هیدرودینامیک است، می‌توان گفت پیش‌بینی‌های این مدل قابل قبول و نتایج آن نشان‌دهنده دقت این مدل در پیش‌بینی انتقال رسوب در سواحل است. با وجود محدودیت در برداشت داده‌های عمق‌نگاری دقیق و پیاپی در منطقه، نمی‌توان تغییرات خط ساحلی حاصل از شبیه‌سازی را به‌طور مستقیم با نتایج حاصل از سنجش‌ازدور مقایسه کرد و تنها روند و الگوی تغییرات مقایسه شد.

اگر تغییرات تراز سطح آب دریا همانند ده سال اخیر با روند کاهشی ادامه یابد، روند تغییرات مورفولوژی دلتای سفیدرود ثابت خواهد ماند. در حالت دیگر اگر تغییرات تراز سطح آب دریای خزر روند افزایشی داشته باشد، با توجه به ثابت بودن الگوی جریان در منطقه، خط ساحلی در بخش شمالی دلتا با نرخ بیشتری به سمت خشکی پس‌روی خواهد کرد و ممکن است بخش زیادی از عرصه‌های زیستی پارک ملی بوجاق از بین برود. بنابراین برای مدیریت و حفاظت از اراضی با کاربری‌های مختلف در منطقه دلتای سفیدرود بایستی با در نظر گرفتن بیلان آب دریای خزر و عوامل مؤثر بر آن و پیش‌بینی روند تغییرات تراز آب دریای خزر در آینده تمهیدات لازم به عمل آورد.

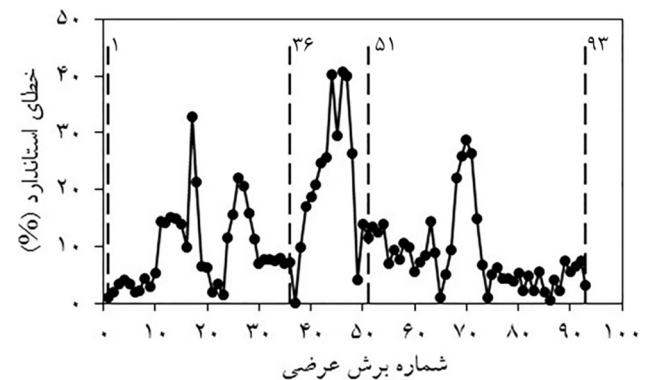
۵. سپاسگزاری

بدین‌وسیله از همکاران تحقیقاتی، اداره کل مهندسی سواحل و بنادر و سازمان نقشه‌برداری کشور به دلیل در اختیار قرار دادن اطلاعات موردنیاز، سپاسگزاری به عمل می‌آید.

منابع

- اسماعیلی، م.، ۱۳۸۶. تجزیه و تحلیل انتقال رسوبات چسبنده در بندر کیشهر با استفاده از مدل عددی MIKE21. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه تربیت مدرس تهران. ۱۳۶ صفحه.
- جداری عیوضی، ج.؛ یمانی، م.؛ خوش‌رفتار، ر.، ۱۳۸۴. تکامل ژئومورفولوژی دلتای سفیدرود در کواترنر. مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، سال سی و هشتم، شماره ۱، صفحات ۱۲۰-۹۹.

همچنین کاهش ۰/۱ متری تراز سطح آب دریای خزر در هر سال، بررسی و تحت تأثیر دو عامل انتقال رسوب و کاهش تراز دریا تقسیم‌بندی شد. در سواحل شرقی و غربی دلتا، کاهش تراز سطح آب دریا در مقایسه با انتقال رسوب سهم بیشتری در تغییرات خط ساحلی دلتا دارد (جدول ۶).



شکل ۱۳: خطای استاندارد رگرسیون خطی در هر برش عرضی

جدول ۶: متوسط نرخ تغییرات خط ساحلی و سهم عوامل آن بر اساس نتایج سنجش‌ازدور

عوامل	متوسط نرخ تغییرات خط ساحلی (m/year)		
	ساحل غربی	ساحل شمالی	ساحل شرقی
کل تغییرات	۱۰/۳۳	-۲/۲۱	۱۳/۶
سهم کاهش تراز آب	۷/۱۴ (۶۹٪)	۷/۶۹ (۴۴٪)	۹/۰۹ (۶۷٪)
سهم انتقال رسوب	۳/۱۹ (۳۱٪)	-۹/۹ (۵۶٪)	۴/۵۱ (۳۳٪)

۴. نتیجه‌گیری

در منطقه دلتای سفیدرود الگوی امواج و جریانات کرانه‌ای پایدار است و جهت غالب و اصلی آن‌ها به ترتیب از سمت شمال شرقی و از سمت غرب به شرق است. جریان ورودی از رودخانه سفیدرود نیز بسته به سرعت جریان کرانه‌ای و سرعت جریان رودخانه، یا در دریا نفوذ می‌کند و یا موازی ساحل به سمت شرق یا غرب هدایت می‌شود. تغییرات خط ساحلی و مورفولوژی دلتا به سه بخش شرقی، شمالی و غربی تقسیم می‌شود. ساحل شرقی و غربی به دلیل الگوی جریان آرام‌تر دارای نرخ انتقال رسوب کمتر هستند و خط ساحلی در این بخش‌ها به دلیل رسوب‌گذاری، به سمت دریا در حال پیش‌روی است. افزایش سرعت جریان در ساحل شمالی باعث افزایش نرخ انتقال رسوب در این بخش شده است و با وجود کاهش تراز سطح آب دریا، خط ساحلی در حال پس‌روی است.

- Cui, B.L.; Li, X.Y., 2011. Coastline change of the Yellow River estuary and its response to the sediment and runoff (1976-2005). *Journal of Geomorphology*, 127(1-2): 32-40.
- DHI, 2012. MIKE21 and MIKE3 Flow Model FM, Hydrodynamic Module, Scientific documentation.
- DHI, 2012. MIKE21 and MIKE3 Flow Model FM, Sand Transport Modules, Scientific documentation.
- DHI, 2012. MIKE21 Spectral Wave Module, Scientific documentation.
- Fredsoe, J., 1984. Turbulent boundary layer in wave-current motion. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(8): 1103-1120.
- Hendriyono, W.; Wibowo, M.; Al Hakim, B.; Istiyanto, D., 2015. Modeling of sediment transport affecting the coastline changes due to infrastructures in Batang – Central Java. *Procedia Earth and Planetary Science*, 14: 166-178.
- Li, X.; Zhou, Y.; Zhang, L.; Kuang, R., 2014. Shoreline change of Chongming Dongtan and response to river sediment load: A remote sensing assessment. *Journal of Hydrology*, 511: 432-442.
- Lichter, M.; Viely, D., 2010. Morphological pattern of southeastern Mediterranean river mouths. *Journal of Geomorphology*, 123(1-2): 1-12.
- Mahapatra, M.; Ratheesh, R.; Rajawat., 2013. Shoreline change monitoring along the south Gujarat coast using remote sensing and GIS techniques. *International Journal of Geology, Earth and Environmental Sciences*, 3(2): 115-120.
- Sravanthi, N.; Ramakrishnan, R.; Rajawat, A.S.; Narayana, A.C., 2015. Application of numerical model in suspended sediment transport studies along the Central Kerala, west-coast of India. *Aquatic Procedia*, 4: 109-116.
- Thiruvankatasamy, K.; Baby Girija, D.K., 2014. Shoreline evolution due to construction of rubble جعفر زاده، ا؛ ایوب زاده، س.ع؛ منتظری نمین، م؛ بهلولی، ا، ۱۳۹۳. شبیه‌سازی انتقال رسوب پشت موج‌شکن بندرانزلی با هدف مقایسه نرم‌افزار ایرانی PMO Dynamics و MIKE21. نشریه مهندسی دریا، سال دهم، شماره ۲۰، صفحات ۳۹-۴۹.
- رودباری شه‌میری، س؛ عجمی، م؛ خوشروان، ه، ۱۳۹۶. پیش‌بینی عملکرد و پایداریریخت‌شناسی دهانه خلیج گرگان. نشریه اقیانوس‌شناسی، سال هشتم، شماره ۳۱، صفحات ۵۳-۶۵.
- سازمان بنادر و دریانوردی ایران، ۱۳۸۷. کتاب مدل‌سازی امواج دریا‌های ایران. جلد اول. چاپ اول. انتشارات سازمان بنادر و دریانوردی. صفحات ۱-۲۴۱.
- عطایی، س؛ عجمی، م؛ لشته نشایی، م؛ یعصوبی، ح، ۱۳۹۵. تأثیر نوسانات تراز آب دریا بر تغییرات خطوط ساحلی دریای خزر. نشریه مهندسی دریا، سال دوازدهم، شماره ۲۴، صفحات ۱۱۳-۱۰۳.
- کرمی خانیکی، ع؛ چایچی طهرانی، ن، ۱۳۸۴. بررسی الگوی ترسیب و فرسایش رسوبات چسبنده در دلتای هندجیان. ششمین همایش علوم و فنون دریایی. صفحات ۱۷-۱.
- مباشری، م. ر، ۱۳۹۳. مبانی فیزیک در سنجش‌ازدور و فناوری ماهواره. جلد اول. چاپ اول. انتشارات دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی. صفحات ۱-۵۹۲.
- نورانیان اصفهانی، م؛ اکبرپورجنت، م؛ بنی‌جمالی، ب، ۱۳۹۶. ارزیابی مدل تلفیقی ROMS-SWAN در مدل‌سازی جریان‌های حوزه جنوبی دریای خزر. نشریه اقیانوس‌شناسی، سال هشتم، شماره ۳۲، صفحات ۳۱-۴۲.
- یمانی، م؛ رحیمی، س؛ گودرزی مهر، س، ۱۳۹۰. بررسی تغییرات دوره‌ای خط ساحلی شرق تنگه هرمز با استفاده از تکنیک سنجش‌ازدور. مجله پژوهش‌های فرسایش محیطی، سال اول، شماره ۴، صفحات ۷-۲۱.
- یمانی، م؛ مقیمی، ا؛ معتمد، ا؛ جعفر بیگلر، م، ۱۳۹۲. بررسی تغییرات سریع خط ساحلی قاعده دلتای سفیدرود به روش تحلیل نیمرخ‌های متساوی‌البعد. مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، سال چهل و پنجم، شماره ۲، صفحات ۱-۲۰.
- Belibassakis, K.A.; Karathanasi, F.E., 2017. Modeling nearshore hydrodynamics and circulation under the impact of high waves at the coast of Varkiza in Saronic-Athens Gulf. *Journal of Oceanologia*, 59(3): 350-364.

Indian peninsula. Journal of Ocean and Coastal
Management, 102: 234-247.

mound jetties at Munambam inlet in
ErnakulamTrichur district of the state of Kerala in the