پیش‌بینی عملکرد و پایداری ریخت‌شناسی دهانه خلیج گرگان

سعید رودباری شهمیری[۱]، مهدی عجمی[۲*]، همایون خوشروان[۳]

۱- کارشناسی ارشد مهندسی سواحل، بنادر و سازه‌های دریایی، دانشگاه صنعتی شاهرود، پست الکترونیکی: saeid_roodbari@yahoo.com

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، پست الکترونیکی: adjami@shahroodut.ac.ir

۳- دکتری زمین شناسی، مرکز ملی مطالعات و تحقیقات دریای خزر، موسسه تحقیقات آب، ساری، ایران، پست الکترونیکی: h_khoshravan@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۹۶/۱/۲۳ ** نویسنده مسوول* *تاریخ پذیرش: ۹۶/۹/۲۷*

چکیده

هدف از این مقاله، بررسی ساز و کار و عملکرد دهانه خلیج گرگان و ساحل میانکاله با مدل‌سازی عددی، به منظور پی بردن به مدل‌های مسدود شدن این دهانه در تراز فعلی (۲۶/۷-) است. این پژوهش با استفاده از مدل‌سازی با نرم افزار مایک، نسخه ۲۱ به همراه مطالعات میدانی انجام شد. بر اساس نتایج پژوهش در سواحل میانکاله، انرژی موج و سرعت جریان‌های ساحلی از غرب به شرق کاهش داشت. همچنین از غرب به شرق منطقه، دهانه آشوراده تحت اثر انرژی پایین امواج دریای قرار دارد. میانگین جهت جریان‌ها در یک سال در بیرون خلیج از غرب بـه شـرق بـوده و درون خلیج به صورت پادساعتگرد عمل می‌کند. نرخ کلی انتقال رسوب به دهانه خلیج گرگان ۰,۰۰۱ متر مکعب در ثانیه بر هر متر و تغییرات تراز بستر در دهانه کمتر از ۱ سانتی متر در روز مشاهده شد. نرخ کلی انتقـال رسـوب در زبانه میانکاله کمتر از ۰,۰۰۰۰۲ متر مکعب در ثانیه بر هر متر بود که نرخ پایین انتقال رسوب از بالا دسـت را نشـان می‌دهد. عملکرد دهانه آشوراده در طوفان‌های بزرگ یک ساله‌ی منطقه، تحت شرایط کنونی در حالـت پایـدار طبـق مدل اسکوفیر قرار دارد.

کلمات کلیدی: *پایداری دهانه‌ها، مایک ۲۱، مدل اسکوفیر، مدل هیدرودینامیک، دهانه خلیج گرگان، خلیج گرگان.*

۱. مقدمه

حفاظت بهینه از سواحل مبتنی به شناخت کامل و جامع خصوصیات هیدرودینامیکی و عوارض حاصل از آن‌ها در مناطق ساحلی است. سواحل در سراسر جهان با مکانیزم های متفاوتی از عملکرد طبیعت در تغییر و شکل‌دهی شان روبه‌رو هستند؛ یکی از این محیط‌های ساحلی پیچیده خلیج‌ها هستند که به‌وسیله زبانه‌ها و دهانه‌ها[۱] از دریا جداشده‌اند. مورفولوژی این محیط‌های پیچیده دائماً به وسیله‌ی اثر موج و جزر و مد (و گاها باد) در حال تغییر است. این عوامل موجب حرکت رسوبات و انتقال آن‌ها در راستای طولی و عرضی و موجب فرسایش یا رسوب‌گذاری در سواحل می‌شوند. هر خلیج خصوصیات و سازوکار مختص به خود را دارد و شناخت محیط اطراف و نیروهای اثرگذار در منطقه موجب درک بهتر از سازوکار و پیش‌بینی چگونگی تغییرات آن در آینده می‌شود.

[1] Inlets

برای شناخت نحوه تغییر شکل در آینده و چگونگی سازوکار این عوامل طبیعی از روش‌های تحلیلی و عددی در سراسر جهان استفاده می‌شود. از روش‌های تحلیلی که شامل برداشت داده‌ها، نمونه‌برداری، عکس‌برداری، مقایسه با محیط‌های مشابه و آنالیز شواهد موجود برای درک فرآیندها و پیش‌بینی چگونگی عملکرد محیط‌های ساحلی، می‌توان استفاده کرد. استفاده از روش‌های عددی نیز با توجه به قدرتمند شدن کامپیوترها در عرصه مدل‌سازی کاربردی محیط‌های ساحلی و دریایی، کاربرد فراوانی پیدا کرده است. در این پژوهش، سازوکار و عملکرد عوامل طبیعی در تغییر شکل زبانه میانکاله و خلیج گرگان در جنوب شرقی دریای خزر با استفاده از روش عددی مورد بررسی قرارگرفته و با شواهد میدانی صحت سنجی شده است.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱ مبانی مدل عددی ***MIKE 21***

۲-۱-۱ ماژول ***SW***

مبنای این مدل برای پیش‌بینی موج، حل معادلات انتقال انرژی همراه با ترم‌های چشمه و چاه است. به منظور لحاظ کردن طبیعت تصادفی امواج دریا، معادله انرژی در شکل طیفی آن در نظر گرفته می‌شود. شکل معادلات انتقال در حالت دو بعدی به صورت رابطه ۱ است.

رابطه ۱

$$\frac{\partial E}{\partial t}+\frac{\cos\theta}{c}\frac{\partial(E.C.C_g)}{\partial x}+\frac{\sin\theta}{c}\frac{\partial(E.C.C_g)}{\partial y}+\frac{C_g}{C}(\sin\theta\frac{\partial C}{\partial x}-\cos\theta\frac{\partial C}{\partial y})\frac{\partial E}{\partial\theta}=S$$

E طیف انرژی موج فرکانسی، t زمان، f فرکانس، θ جهت انتشار امواج، Cg سرعت گروهی موج، C سرعت موج، S عبارت چشمه و چاه. معادله ۱ خاطر نشان می‌کند که هر مولفه از یک طیف فرکانسی جهتی با سرعت گروهی موج حرکت می‌کند و در مسیر حرکت خود تحت اثر افزایش یا کاهش انرژی ناشی از توپوگرافی کف دریا، سرعت و جهت باد و نیز شکل طیف قرار می‌گیرد. آخرین عبارت در سمت چپ این معادله اثر انکسار و پشته کردن موج را در نظر می‌گیرد.

۲-۱-۲ ماژول *Flow Model FM*

Flow Model FM، ماژولی جامع برای مدل‌سازی‌های دو و سه‌بعدی است. این زیربرنامه جهت مدل‌سازی برای عملکردهای مختلط در اقیانوس‌ها، مناطق ساحلی و مناطق با اهمیت محیط زیستی همچون خلیج‌ها توسعه یافته است و شامل زیربرنامه‌های هیدرودینامیک، نقل و انتقالات دریایی، مدل‌سازی آزمایشگاهی، انتقال گل و لای و زیر برنامه انتقال ماسه است (DHI, 2012).

زیربرنامه هیدرودینامیکی، تغییرات سطح آب و جریان در واکنش به نیروهای مختلف در محیط‌های دریایی را نشان می‌دهد. معادلات این ماژول به صورت متداول در حالت سه بعدی بیان می‌شود ولی معادلات برای جریان دو بعدی، با انتگرال‌گیری معادلات بر اعماق بدست می‌آید (رابطه‌های ۲، ۳، ۴).

رابطه ۲

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial h}{\partial x}+\frac{\partial h}{\partial y}=0$$

رابطه ۳

$$\frac{\partial p}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}(\frac{p^2}{h})+\frac{\partial}{\partial y}(\frac{pq}{h})+gh\frac{\partial\varepsilon}{\partial x}+\frac{gp\sqrt{p^2+q^2}}{c^2h^2}-\gamma[\frac{\partial^2 p}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 q}{\partial y^2}]-\omega q-fvv_x+h\frac{\partial}{\partial x}[\frac{p_a}{p_w}]$$

رابطه ۴

$$\frac{\partial q}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial y}(\frac{q^2}{h})+\frac{\partial}{\partial x}(\frac{pq}{h})+gh\frac{\partial\xi}{\partial y}+\frac{gp\sqrt{p^2+q^2}}{c^2h^2}-[\frac{\partial^2 p}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 q}{\partial y^2}]-\omega q-fvv_y+h\frac{\partial}{\partial y}[\frac{p_a}{p_w}]$$

h عمق آب، f ضریب اصطکاک باد، C ضریب شزی، Pa فشار هوا، ρ_w چگالی آب، v,u سرعت متوسط، p,q دانسیته شار، ξ تغییرات تراز.

۲-۱-۳ ماژول ***Mike Coupled 21/3***

ماژول Mike Coupled 21/3 برای کاربردهای ساحلی و مصب‌های رودخانه‌ای است. مدل هیدرودینامیک یا جریان (HD)، جزر و مد رودخانه، باد، جریان‌های ناشی از امواج، برکشند طوفان و جریانات جزر و مدی را شامل می‌شود. با

بکارگیری این مدل می‌توان تغییرات سطح آب و جریانات را در هر مکان از منطقه مورد مطالعه بررسی نمود. لازم به ذکر است که این مدل، جریانات را در یک سیال تک لایه (به‌طور عمودی همگن) شبیه‌سازی می‌کند. جریان‌ها شامل جریان کشندی، جریان ناشی از موج یا ترکیبی از این دو هستند. در واقع این نرم‌افزار روشی برای تحلیل برهم کنش متقابل بین امواج و جریان‌ها با استفاده از یک رابطه دینامیکی بین مدل‌های HD و SW ارائه می‌دهد. همچنین از طریق ایجاد یک رابطه همزمان بین سه مدل HD، ST، SW قادر به مدل‌سازی نحوه بازخورد کامل بین تغییرات تراز بستر در اثر گردش‌های ناشی از موج و جریان خواهد بود.

در این مدل تنش‌های تشعشعی از مدل SW به مدل HD داده می‌شود و به‌صورت هم‌زمان اثر جریان روی اندازه امواج از ماژول HD به ماژول SW داده می‌شود که دقت بالاتر را در مدل‌سازی حاصل می‌کند. مدل‌سازی نرم افزاری در این پژوهش با استفاده از این ماژول صورت پذیرفته است (DHI, 2012).

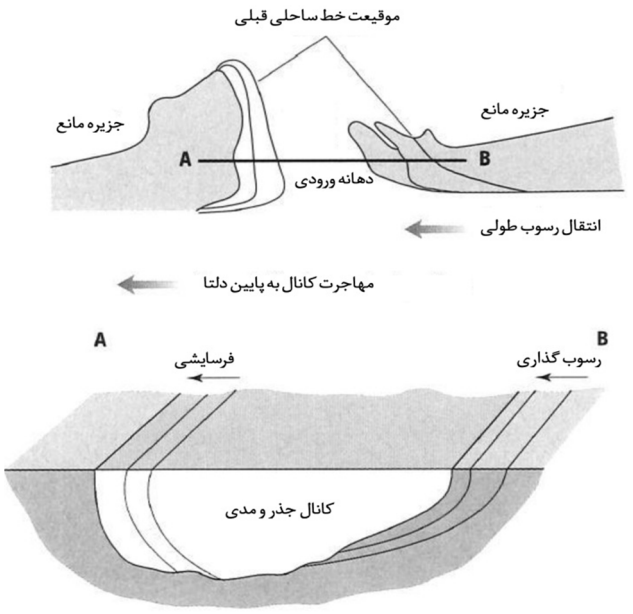
۲-۲ نظریه‌های دهانه‌ها

طبق نظر Bruun و همکاران (۱۹۷۸)، دهانه‌های ارتباطی عمدتا در سه گروه اصلی دسته بندی می‌شوند. دهانه‌هایی که منشاء زمین شناسی دارند، دهانه‌هایی که منشاء آبی دارند و دهانه‌هایی که حرکت رسوب ساحلی یا رانه ساحلی منشاء آنها است. دهانه‌ها با پیش زمینه زمین شناسی عمدتا به صورت فرم دادن صخره‌ها ایجاد می‌شوند. دهانه‌هایی که رودخانه در محل اتصال با دریا ایجاد می‌کنند، متعلق به دسته منشاء آبی[1] هستند و دهانه‌ها با منشاء حرکت رسوب ساحلی به وسیله انتقال رسوب در امتداد ساحل کنترل می‌شوند. در این دهانه‌ها فرآیندهای رسوبی ساحلی تعیین کننده‌ی پایداری و تعادل دهانه هستند. بیشتر دهانه‌ها در سواحل جهان از منشاء حرکت رسوب ساحلی هستند. بیشتر دهانه‌هایی که منشاء حرکت رسوب ساحلی دارند، سال‌های زیادی پایدار نمی‌مانند، که می‌تواند به علت تغییرات الگوی جریانات جزر و مدی و جهت امواج منطقه باشد.

بر اساس تحقیقات Bruun و همکاران (۱۹۷۸)، با نگاهی به تاریخچه دهانه‌های جزر و مدی، هندسه آنها دائما در حال تغییر است.

مهمترین قسمت‌هایی که بیشترین تغییرات را در دهانه‌ها دارند، طول کانال ورودی و پیکربندی آن و همچنین مقطع عرضی دهانه است. در بعضی از دهانه‌ها انتقال رسوب طولی یعنی انتقال مواد از یک سوی دهانه (بالا دست) به سوی دیگر (پایین دست) توسط عملکرد موج و جریان طولی ساحلی حاکم و قابل مشاهده است. در برخی دیگر، جریان‌های جزر و مدی نیز حضور موثر داشته و می‌توانند انتقال رسوب عرضی انجام دهند. جریان مد عمدتا مواد را درون دهانه‌ی کانال رسوب‌گذاری می‌کند و بعد از آن جریان جزر مواد رسوبی را می‌شوید و به سوی اقیانوس می‌برد.

در نهایت، دهانه‌ها همواره مهاجرت می‌کنند و زبانه ماسه‌ای گسترش پیدا می‌کند، این معمول ترین مشخصه در بیشتر سواحل جهان است. عموما در مناطقی که موج غالب باشد، رانه ساحلی در یک جهت غالب بوده (شکل ۱) و رشد زبانه مقطع عرضی کاهش می‌یابد و سرعت جریان در دهانه اضافه می‌شود. در این شرایط، فرسایش بیشتر در کانال قابل مشاهده است. همزمان در سمت پایین دست دهانه فرسایش غلبه یافته و کانال به پایین دست مهاجرت می‌کند (Bruun et al., 1978).



شکل ۱: مدل مهاجرت دهانه

[1] Hydrological

De Alteris و Byrne (۱۹۷۵)، ترکیب انباشت رسوبی کانال را پارامتر مهم و منحصر به فردی دانسته است. اگر ورودی کانال از جنس ماسه‌ی تحکیم شده باشد، در مقابل فرسایش بیشتر مقاومت کرده و از مهاجرت جلوگیری می‌کند. به نظر می‌رسد، اندازه عمق گلوی دهانه‌ها که توسط جریان‌ها فرسایش پیدا می‌کند، یکی از فاکتورهایی است که دهانه‌های مهاجرت پذیر را از دهانه‌های پایدار جدا می‌کند.

FitzGerald (1987) در تحلیل خود در گسترش تاریخچه‌ی دهانه‌های ارتباطی در جنوب ساحل کالیفرنیا به این نتیجه دست یافت که دهانه‌ها با عمق بیشتر از ۸ متر در طول گذشت حتی ۱۰۰ سال کماکان پایدار باقی مانده‌اند، این در حالی است که دهانه‌های با عمق کم‌تر از ۳-۴ متر، تاریخچه‌ی مهاجرت طولی و تجاوز زبانه ماسه‌ی را دارند.

FitzGerald (1987) اولین توصیف از مکانیزم طبیعی گذر رسوب[1] در دهانه را ارائه نمود. این ارزیابی به وسیله‌ی بررسی رفتار تبادل ماسه از بالا دست به پایین دست و نسبت فرسایش سواحلی در هلند، دانمارک و فلوریدا (آمریکا) صورت پذیرفت. بعضی دهانه‌ها دارای نوار یا پشته رسوبی[2] در ورودی خود هستند که مواد رسوبی را از بالا دست ساحل به سمت پایین دست هدایت می‌کنند. این دهانه‌ها به عنوان انتقال نواری دسته‌بندی می‌شوند. دیگر دهانه‌ها پشته یا نوار رسوبی کوچک‌تری دارند و به نظر می‌رسد که انتقال رسوب به وسیله جریان‌های پیچیده‌تری با عملکرد موج در طول جریان جزر صورت پذیرد (Bruun and Gerritsen, 1959).

۲-۲-۱ *انتقال رسوب تحت تاثیر پشته دور از ساحل*

این نوع از گذر رسوب فقط در محیطهایی که تحت سلطه فرآیند موج قرار دارند و رانه ساحلی قوی حاکم است، می‌تواند رخ دهد. رانه ساحلی مواد رسوبی را در امتداد زبانه عبور می‌دهند و در انتهای بالا دست، مواد رسوبی از سویی به سوی دیگر دهانه روی پشته رسوبی مغروق عبور می‌کند. اندازه مواد انتقال یافته، به خصوصیات رسوبی مواد و بزرگی موج و جریان وابسته است. با افزایش مقدار مواد که توسط رانه ساحلی حمل می‌شوند، سطح پشته افزایش یافته و عمق پشته‌ها کاهش پیدا خواهند کرد. عمق بالای پشته ساحلی عموما محدود به عمق شکست موج در شرایط طوفانی می‌شود. در بیشتر موارد مهاجرت دهانه کانال در جهت رانه ساحلی است. رسوبی که از روی پشته عبور می‌کند تحت اثر عملکرد موج در منبع رسوبی بالا دست رسوب‌گذاری شده و منجر به مهاجرت و تغییر شکل و جا به جایی دهانه می‌شود.

۲-۲-۲ *بسته شدن یا منشعب شدن دهانه*

بسته شدن دهانه‌های ارتباطی یا دهانه‌های رودخانه‌ای عموما در شرایط هیدرودینامیکی جزر و مد پایین۳، در محیطهایی که تحت سلطه موج قرار دارند و در شرایطی که تغییرات شدید فصلی در جریان رودخانه‌ای و موج وجود دارند، اتفاق می‌افتد. دهانه‌ها هر ساله برای چندین ماه به سبب ایجاد پشته رسوبی در امتداد ورودی دهانه یا به سبب رشد زبانه ماسه‌ای از بالا دست به سوی پایین دست بسته می‌شوند. بسته شدن فصلی دهانه‌ها و ورودی رودخانه‌ها در برخی از سواحل جهان مانند جنوب شرقی برزیل و جنوب غربی هندوستان قابل مشاهده هستند.

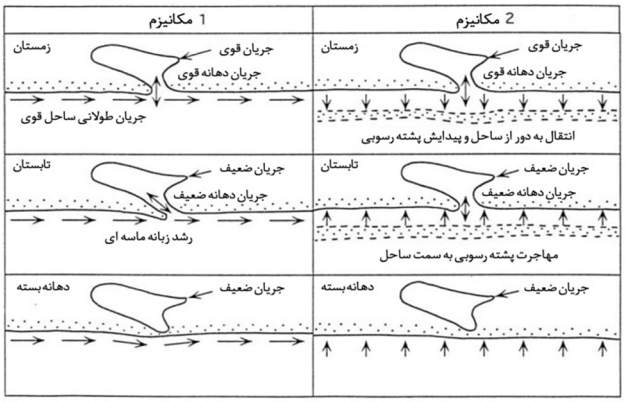
Bruun (1960) نشان داد که در نتیجه چندین طوفان که رسوب زیادی را از دریا به سوی دهانه حمل می‌کند، یک دهانه می‌تواند کم عمق یا بسته شود. عواملی که باعث کم عمق شدن دهانه می شوند عبارتند از طولانی شدن کانال دهانه تحت رشد کردن و بلند شدن زبانه ماسه‌ای به یک سمت؛ باز کردن دهانه جدید؛ منشعب شدن کانال اصلی به دو یا چند کانال یا ایجاد یک کانال یا بیشتر توسط طبیعت یا عوامل مصنوعی؛ تغییر در مساحت خلیج که به وسیله دهانه با دریا متصل است. (برای مثال به وسیله‌ی احداث یک سد یا احیای مساحت حوضچه کانال). واضح است که یک دهانه با جریان جزر و مدی کم تمایل به بسته شدن بیشتری دارد. مثلا در شرایط طوفان، انتقال به وسیله پشته یا توسط مکانیزم‌های جریان، توانایی حذف رسوب را از دهانه ندارند. کانال ممکن است مکررا توسط رسوب پر شود یا در بدترین حالت بسته شود. Ranasinghe (2003) دو مدل مفهومی از مکانیزم‌های بسته شدن دهانه‌ها را بر پایه مطالعات خود ارائه داد.

مکانیزم اول بر پایه تقابل بین دو جریان جزر و مد و جریان طولی ساحل ارائه شده است. در این مکانیزم از قطع جریان طولی در ورودی دهانه، یک پایاب[4] در بالا دست دهانه شکل می‌گیرد.

[1] Sediment bypass
[2] Bar
[3] Micro tidal
[4] Shoals

این پایاب در بالا دست دهانه ممکن است گسترش یابد. این عامل به بزرگی جریان طولی ساحل و مقدار جریان جزر و مد بستگی دارد. اگر جریان جزر و مدی دهانه به اندازه کافی قوی نباشد، نمی‌تواند مانع گسترش زبانه ماسه‌ای در مقطع دهانه شود. در این صورت نشست مواد رسوبی در رو به روی کانال ادامه پیدا می‌کند تا زمانی که این زبانه رسوبی به سمت پایین دست حرکت کند و در انتها موجب بسته شدن دهانه شود. این محقق متوجه شد که این مکانیزم از بسته شدن دهانه‌ها، عمدتا در سواحل مستقیم با رانه ساحلی قوی و زیاد اتفاق می‌افتد.

دومین مکانیزم از بسته شدن دهانه‌ها توسط تعامل جریان جزر و مد و انتقال رسوب رو به ساحل یا انتقال رسوب عرضی[1] حاصل می‌شود. این مکانیزم در مرحله‌ی اول در نواحی با رژیم مد پایین اتفاق می‌افتد، جایی که جریان جزر و مدی کوچک تر از *m/s* ۱ باشد. امکان بسته شدن دهانه تحت مکانیزم دوم به قدرت جزر و مد و اندازه انتقال رسوب از دریا وابسته است. زمانی که جریان جزر ضعیف باشد و در شرایطی که پشته‌های رسوبی انباشته شده در دور از ساحل به صورت مداوم به نزدیک ساحل انتقال یابند، موجب بسته شدن دهانه می‌شوند. شمایی از این دو مکانیزم در شکل ۲ نمایش داده شده است.



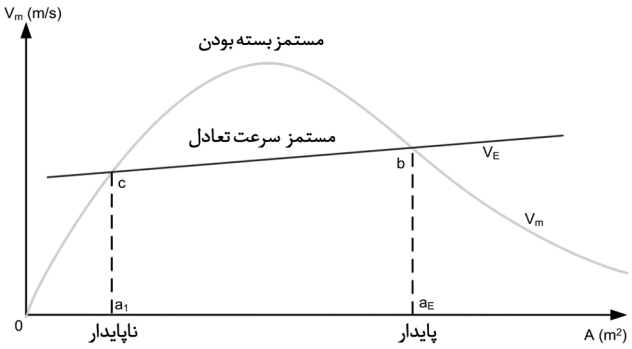
شکل ۲: نمایش طرحی از بسته شدن دهانه به وسیله‌ی فرآیندهای طولی و عرضی در ساحل تحت تحلیل پایداری دهانه

دهانه‌ها در اندازه و شرایط پایداری و مانایی گوناگونی قرار دارند. بعضی به حرکت و مهاجرت تمایل دارند و برخی نسبتا ثابت و دائمی هستند. یک طوفان شدید می‌تواند موجب باز شدن یک دهانه جدید درون مانع سدی شود یا حتی سبب بسته شدن دهانه موجود شود. هر دهانه در معرض چهار نیروی اصلی و متفاوت قرار دارند: ۱- موج و جریان‌های طولی و عرضی ناشی از آن، ۲- جریان‌های جزر و مدی، ۳- عملکرد باد و ۴- جریان ایجاد شده از رودخانه که هر کدام باعث حمل، گذر یا انتقال رسوب به داخل، بیرون یا طرفین کانال می‌شوند.

اندازه و پایداری دهانه‌ها توسط این چهار پدیده تعیین می‌شوند. این مفهوم برای اولین بار به صورت تحلیلی توسط (1940) Escoffier به صورت تحلیلی و در غالب دیاگرام اسکوفیر (منحنی بسته شدن و منحنی اندازه سرعت) بیان گردید. در دیاگرام اسکوفیر برای پایداری دهانه دو منحنی رسم شده است که در شکل ۳ نمایش داده شده است. با توجه به شکل، زمانی که مساحت مقطع دهانه به صفر نزدیک شود (برای دهانه‌ها با مساحت مقطع عرضی کم) سرعت جریان نیز در دهانه تحت اثر افزایش اصطکاک به صفر میل می‌کند. برای دهانه‌های با مساحت مقطع عرضی بزرگ، منشور جزر و مدی به حداکثر مقدار خود رسیده و سرعت با سطح مقطع نسبت عکس پیدا می‌کند. Escoffier (1940) یک سرعت بحرانی ثابت به اندازه‌ی *m/s* ۱ پیشنهاد داد که می‌توان آن‌را به صورت یک خط افقی رسم نمود. به بیان دیگر *m/s* ۱ ممکن است به عنوان اندازه سرعت یا بزرگی سرعت مورد نیاز برای متعادل نگه داشتن دهانه تفسیر شده باشد. هر چند عمل موج به عنوان یک منبع رسوبی تمایل به کم کردن سطح مقطع دارد، جریان جزر و مدی، رسوبات رسوب‌گذاری شده را که موجب کم شدن مساحت مقطع عرضی می‌شوند، می‌شوید و آن‌را به حالت تعادل باز می‌گرداند. منحنی اسکوفیر برای تحلیل پایداری دهانه‌ها به کار می‌رود (برای تعیین این‌که آیا دهانه موجود با توجه به موقعیت آن بر منحنی، تمایل به باز بودن یا بسته شدن را دارد). قسمت پایدار منحنی، نقطه b است. اگر مساحت کانال افزایش یابد (در منحنی از نقطه b به سمت راست)، سرعت جریان درون کانال کاهش می‌یابد تا اینکه به مساحت قبلی (حالت تعادل) خود برسد. اگر مساحت کانال کاهش یابد (در منحنی از نقطه b به سمت چپ) سرعت جریان درون کانال افزایش می‌یابد و باعث فرسایش رسوب در کانال می‌شود تا اینکه مساحت کانال افزایش یافته و به حالت تعادل بازگردد. نقطه c مکان ناپایدار کانال است. زمانی که مساحت کانال کاهش یابد، یعنی از نقطه c به سمت چپ حرکت کند، سرعت جریان کاهش یافته تا کانال بسته شود. زمانی که مساحت کانال افزایش یابد (از نقطه c به سمت راست) سرعت جریان افزایش می‌یابد، تا جایی که شروع به کاهش سرعت می‌کند تا به

[1] Onshore sediment transport

نقطه پایدار برسد. اگر منحنی پایداری مماس یا پایین‌تر از منحنی پایداری حدی قرار گیرد، کانال مسدود می‌گردد (شکل ۳).

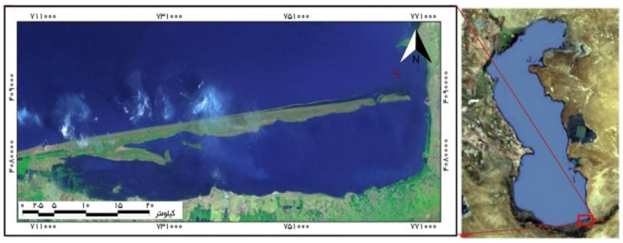


شکل ۳: منحنی اسکوفیر

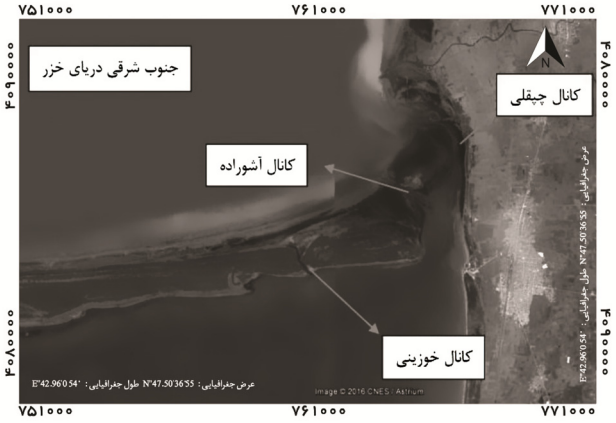
۲-۳ منطقه مورد مطالعه

خلیج گرگان با مساحتی حدود ۴۰۰ کیلومترمربع، بزرگ‌ترین خلیج دریای خزر است که بر اثر پیشروی زبانه ماسه میانکاله در جنوب شرقی دریای خزر تشکیل شده است. ۷۰ کیلومتر طول خلیج در جهت غربی شرقی و عرض آن بین ۱۳ تا ۱۴ کیلومتر است (شکل ۴). مساحت آبی آن بیش از ۳۰۰۰ کیلومترمربع است که دوسوم آن در استان مازندران واقع شده است. خلیج‌ها بریدگی حاصل از پیشروی دریا در خشکی هستند و از جنبه‌های مختلفی اهمیت دارند. مهم‌ترین جلوه زمین‌شناسی بخش جنوبی سواحل دریای خزر به شمار می‌رود. کشیدگی پوسته در کرانه دریای خزر یک فروافتادگی جوان ایجاد کرده و به دنبال آن پیشروی دریا باعث پدید آمدن عریض‌ترین پهنه رسوبی در جنوب شرقی دریای خزر شده است. وجود تالاب‌ها و مرداب‌های پراکنده در حد فاصل این خلیج تا نکارود و کاهش عمق به سمت غرب، نشان از وسعت بیشتر آن در زمان پیدایش دارد. رسوبات منتقل‌شده از شاخه‌های فرعی نکارود و چندین آبراهه در جنوب خلیج، رودخانه قره‌سو و رودخانه گرگانرود، از مهم‌ترین عوامل کاهش عمر مفید این خلیج به شمار می‌روند. عمق آن حداکثر ۴ تا ۵ متر بوده و از طریق دهانه منتهی‌الیه شرقی خود به دریای خزر اتصال دارد.

دهانه خلیج گرگان در جنوب شرقی دریای خزر و انتهای شرقی خلیج گرگان با دو کانال ارتباطی چپقلی در قسمت شرقی و آشوراده در قسمت غربی که به‌وسیله یک حجم رسوبی در مرکز آن از هم جدا شده‌اند (شکل ۵). کانال آشوراده با حداکثر عمق ۴ متر و حداقل ۶۰ سانتی متر، تنها کانال مورد استفاده منطقه است. این دهانه با منشأ حرکت رسوب ساحلی و از نوع پیشروی ناشی از افزایش سطح دریا و تشکیل زبانه است.



شکل ۴: موقعیت خلیج گرگان در جنوب شرقی دریای خزر

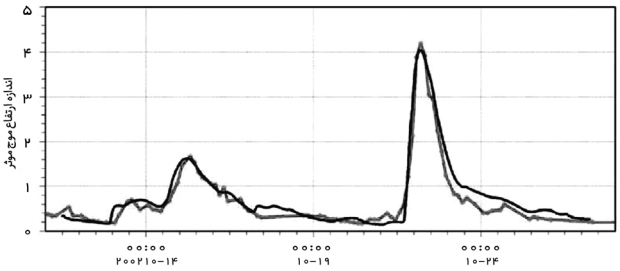


شکل ۵: بخش‌های اصلی دهانه خلیج گرگان

۲-۴ مروری بر تحقیقات گذشته

تحقیقات فراوانی (با تاکید بر مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم افزار مایک) در منطقه انجام شده است. رورده (۱۳۹۲) با استفاده از نرم‌افزار مایک منطقه مورد مطالعه را مدل‌سازی کرده و به این نتیجه رسیدند که حداکثر ارتفاع امواج با فاصله گرفتن از خط ساحلی در آب‌های با عمق ۱۵ متر، به بالای ۲ متر می‌رسد و با نزدیک شدن به دهانه ورودی خلیج گرگان، ارتفاع امواج به صورت چشمگیری کاهش می‌یابد و نهایتا در داخل خلیج، امواج قابل‌ملاحظه‌ای دیده نمی‌شود. جهت رانه ساحلی در سواحل میانکاله از سمت غرب به سمت شرق است. حداکثر سرعت جریانی که در منطقه رخ می‌دهد، در منطقه شکست موج و در ادامه به سمت خط ساحلی تا ۵ سانتی‌متر بر ثانیه ایجاد می‌شود و کمترین سرعت جریان در مناطق دورتر از خط ساحلی به سمت آب‌های نیمه عمیق و عمیق رخ می‌دهد (رورده، ۱۳۹۲).

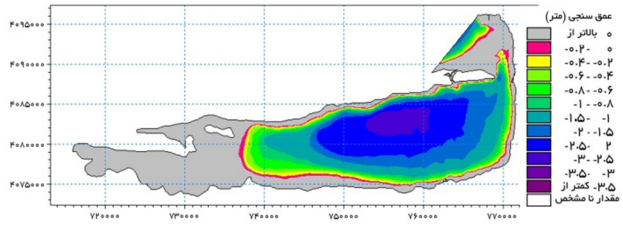
جامعی (۲۰۱۲)، مدل‌سازی امواج دریای خزر را توسط سازمان بنادر و دریانوردی و پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی با همکاری موسسه هیدرولیک دانمارک (DHI)، با استفاده از نرم‌افزار مایک ۲۱ انجام داد که طی این پژوهش از داده‌های سال ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۳ استفاده شد. نتیجه این پژوهش، مدلی جامع برای کل دریای خزر بوده و کارآمدی نرم‌افزار مایک را در مدل‌سازی ارتفاع امواج و پریود امواج در دریای خزر به‌خوبی نشان داده است (سازمان سواحل بنادر و دریانوردی و پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی، ۱۳۹۰) (شکل ۶).



شکل ۶: ارتفاع امواج (خاکستری مربوط به بویه و مشکی مربوط به مدل)

پژوهشی دیگر توسط Kiaei (2014) و با استفاده از نرم‌افزار مایک و ماژول couple model FM انجام شد. با استفاده از این ماژول اقدام به مدل‌سازی جریانات و انتقال رسوب در دهانه‌ها شد که نتایج مدل حاکی از کارآمدی این ماژول در مدل‌سازی نحوه انتقال رسوب و نحوه توزیع جریان در دهانه است.

شربتی (۱۳۹۵) با استفاده از نرم‌افزار مایک ۲۱ به این نتیجه رسید که خلیج گرگان در تراز منفی ۲۷/۶ متر، عملا هیچ‌گونه ارتباطی با دریای کاسپین نخواهد داشت (شکل ۷).



شکل ۷: وضعیت توپوگرافی خلیج گرگان در تراز منفی ۲۷/۶ متر

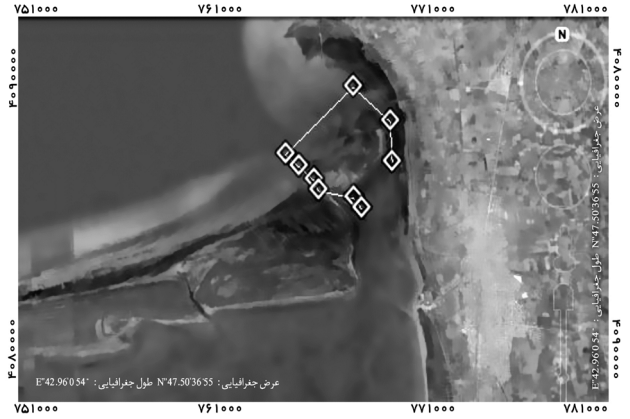
۲-۵ پایش و مدل‌سازی منطقه

هدف اصلی این پژوهش، شناخت عوامل و فرآیندهای تاثیرگذار در کانال اصلی دسترسی خلیج گرگان یعنی کانال آشوراده است. روش پژوهش شامل بررسی میدانی منطقه مورد مطالعه و جمع آوری داده‌های مورد نیاز و همچنین ساخت مدل عددی برای منطقه است که حداکثر تطابق را با شرایط محیط اصلی داشته باشد.

۲-۵-۱ داده‌های میدانی جمع‌آوری شده

موارد میدانی جمع‌آوری شده (با همراهی و کمک تیم مرکز ملی مطالعات و تحقیقات دریای خزر) جهت صحت سنجی مدل مایک، شامل: ۱- ارزیابی رسوبی منطقه، ۲- بررسی عوارض فیزیکی در ساحل و ۳- دسته بندی شهودی سواحل میانکاله بود.

موارد برداشت شده در ساحل میانکاله به سه بخش مرکزی، غربی و شرقی قابل تقسیم است. در نمونه برداری از ساحل میانکاله، ۱۲ نقطه موازی ساحل از غرب به شرق در نزدیکی دهانه خلیج انجام شد (شکل ۸).



شکل ۸: نقط و مسیرهای پیمایش و نمونه‌برداری در دهانه خلیج

۲-۵-۲ داده‌های مورد استفاده مدل‌سازی

برای سنجش عمق منطقه مورد پژوهش، از ۲ سری داده‌های عمق سنجی، مربوط به تراز ۲۶- شامل بیش از ۵۰۰۰ داده عمق سنجی استفاده شد. داده‌های عمق سنجی درون خلیج گرگان از اداره شیلات استان گلستان و داده‌های عمق سنجی سواحل میانکاله از مرکز ملی مطالعات دریای خزر دریافت شد.

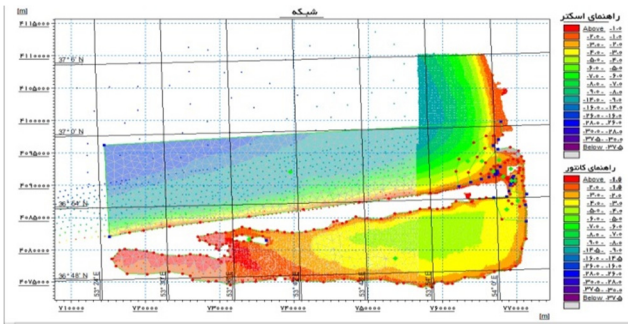
جهت داده‌های باد در این پژوهش از داده‌های ایستگاه سینوپتیک امیرآباد از سال ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۴ با گام زمانی ۱۰ دقیقه‌ای استفاده شد.

داده‌های موج و جریان از دستگاه ADCP که در عمق ۱۰ متری با مختصات ۵۳,۴۱۱۱ و ۳۶,۹۱۴۲ که در نزدیکی بندر امیرآباد واقع گردیده است، استفاده شد. داده‌های موج در فاصله زمانی ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۴ و با گام زمانی یک ساعت برداشت شد و داده‌های جریان نیز در همین فاصله زمانی و با گام ۱۰ دقیقه برداشت گردید.

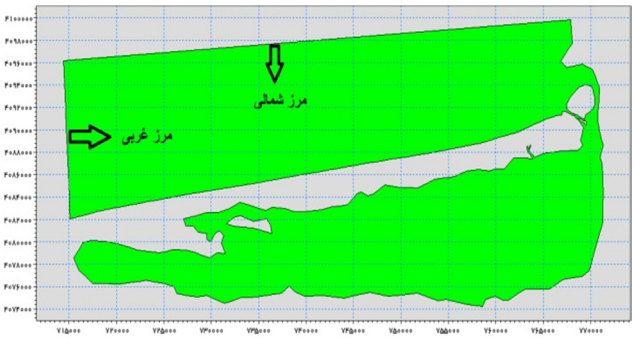
از داده‌های پایش خزر که شامل داده‌های باد، موج، جریان و تغییرات تراز برای یک سال از ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۴ است و در مختصات ۵۳,۸۵ و ۳۷,۰۰ در شرایط مرزی استفاده گردید.

داده‌های رسوبی مورد استفاده در مدل‌سازی، شامل نمونه‌های رسوبی برداشت شده در ساحل میانکاله و دهانه خلیج گرگان بود. با توجه به روش حل عددی در مدل، شبکه مورد نیاز جهت معرفی هندسه و هیدروگرافی مسئله غیرمنظم و شامل المان‌های مثلثی است. شبکه‌بندی نهایی مورد استفاده شامل ۳۷۲۵ المان و ۲۱۲۳ گره است. با توجه به اهمیت دهانه ورودی خلیج گرگان در جنوب شرقی منطقه مورد مطالعه، شبکه‌بندی به نسبت یک سوم ریزتر شد و در درون خلیج به همین نسبت دوباره به اندازه اصلی مش درست شد. برای تهیه نقشه عمق سنجی، از روش درون‌یابی همسایگی بین داده‌های عمق سنجی استفاده گردید (شکل ۹).

به دلیل وجود ۲ مرز آبی در سمت شمال و در غرب، داده‌های ورودی به مرزها مطابق جدول ۳ و شکل ۱۰ انتخاب شدند.



شکل ۹: نقشه فایل عمق سنجی خلیج گرگان



شکل ۱۰: مرزهای مدل

به علت اینکه مرز شمالی و غربی در آب عمیق است و اثر باد در تشکیل امواج دیده نمی‌شود از داده‌های خروجی پایش دریای خزر در دو مرز استفاده شد تا اثر باد در تشکیل موج و جریان در مرزهای مدل دیده شود.

جدول ۲: موارد برداشت شده در ساحل میانکاله

پوشش رسوبی	پدیده‌های مورفودینامیکی	شیب صورت ساحل	نوع شکست موج	تعداد شکست موج	ناحیه شکست موج	منطقه میانکاله
مواد ماسه‌ی دانه ریز تا دانه متوسط حاوی ذرات ریز دانه در محیط های تالابی	تراس‌های فرسایشی، تاجک‌های ماسه‌ی، تپه‌های ماسه‌ی	۰,۹	ریزشی – فروریز	کمتر از ۵ شکست، عموما بین ۲ تا ۵ شکست موج	کمتر از ۱۰۰ متر	بخش غربی
ماسه ریزدانه به همراه مواد رسی چسبنده حاوی مواد آلی	زبانه ماسه‌ای، تاجک های ماسه‌ای، موج نقش‌ها، تپه‌های ماسه‌ای، چاله‌های آبگیر	۰,۷	ریزشی	بیش از ۵ شکست موج	بین ۱۰۰ تا ۳۵۰ متر	بخش مرکزی
مواد رسی و گلی چسبنده حاوی مواد آلی رنگ تیره	چاله‌های آبگیر، تالاب، موج نقش‌ها، آبراهه‌های ناشی از جریان های ساحلی	۰,۴	ریزشی	بیش از ۵ شکست موج	بین ۳۰۰ تا ۶۰۰ متر	بخش شرقی

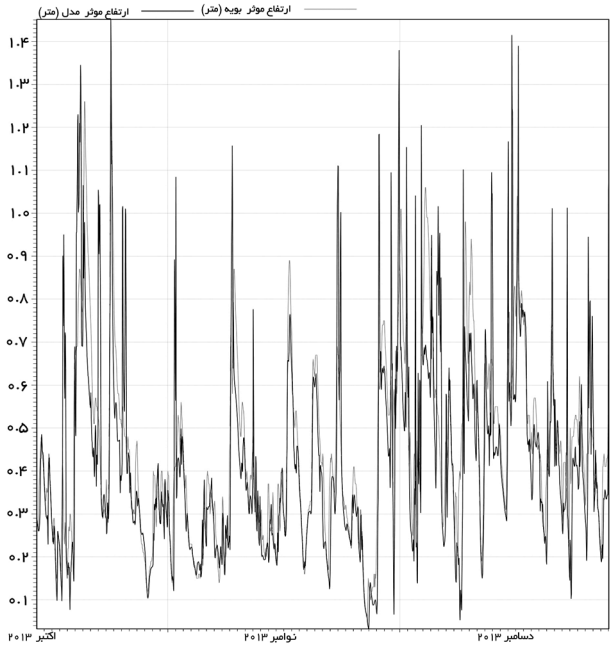
جدول ۳: مرزهای داده شده به مدل

مرز دریایی (مرز شمالی)	مرز دریایی (مرز غربی)	داده‌ها	ماژول
داده‌های باد خروجی پایش دریای خزر	داده‌های باد خروجی پایش دریای خزر	باد	SW
داده‌های موج خروجی پایش دریای خزر	داده‌های موج خروجی پایش دریای خزر	موج	SW
داده‌های جریان خروجی پایش دریای خزر	داده‌های جریان دستگاه ADCP	جریان	HD

برای کالیبره کردن مدل عددی، از مدل در مختصات دستگاه ADCP امیر آباد برای یک سال خروجی گرفته شد و ارتفاع شاخص امواج برای یک‌سال با خروجی مدل در همان مختصات مقایسه گردید (شکل ۱۱). اعداد جدول ۴ برای کالیبره شدن مدل بدست آمده است.

جدول ۴: ضرایب کالیبراسیون مدل

ضریب زبری (K_N)	۰،۰۰۱
شکست موج (γ)	۰،۸
سفیدک راس موج	۲
ضریب پراکنش	۰،۸

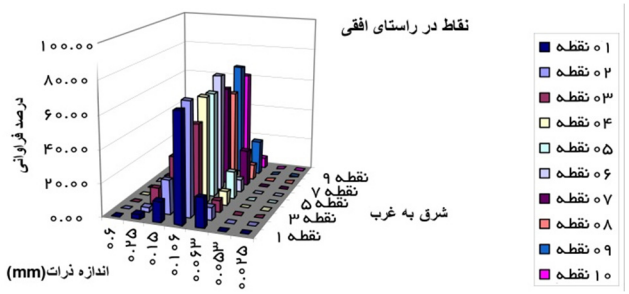


شکل ۱۱: اندازه ارتفاع موج بویه و مدل

۳. نتایج و بحث

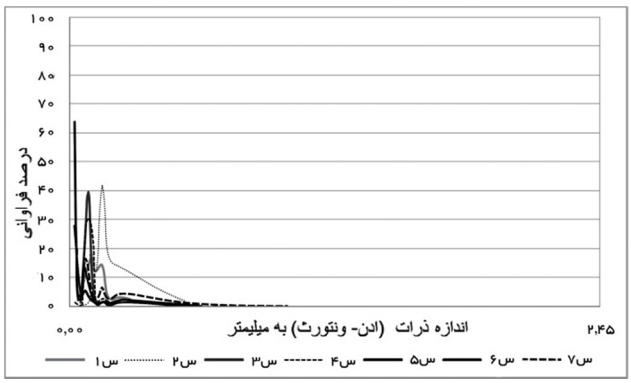
۳-۱ یافته‌های میدانی

برداشت‌های رسوبی انجام شده، بیانگر کاهش اندازه دانه‌بندی رسوبات از غرب به شرق میانکاله است (شکل ۱۲). ساحل میانکاله از نوع سواحل پراکنشی است. عوارض فیزیکی در ساحل میانکاله بیانگر کاهش هیدرودینامیک متداوم امواج از غرب به شرق است. وجود تراس‌های فرسایشی در سواحل غرب و وجود عارضه‌های موجی در ساحل و سواحل تالابی در شرق میانکاله و همچنین فاصله گرفتن خط شکست امواج از ساحل، بیشتر شدن تعداد شکست موج، کم شدن شیب صورت ساحل، کاهش اندازه دانه‌های رسوبی از غرب به شرق، موید کاهش قدرت جریان‌ها و انتقال رسوب در ساحل است.



شکل ۱۲: درصد فراوانی و اندازه ذرات نقاط موازی ساحل میانکاله

نمونه‌های برداشت شده از کانال آشوراده و چپقلی نشان‌دهنده این است که کانال آشوراده از نوع ماسه‌ای بسیار ریزدانه است و هر چه از مرکز کانال آشوراده به سمت حاشیه کانال پیش می‌رویم رسوبات به مواد آلی آغشته شده و هرچه از کانال به سمت دریا می‌رویم درصد مواد ماسه‌ای تحت تاثیر آورد دریا افزایش یافته و در کانال چپقلی درصد مواد آلی بسیار افزایش یافته است. اندازه ذرات رسوبی در کانال آشوراده از ۰،۱۶۵ میلی متر در دهانه از سمت خلیج، به اندازه ذرات ۰،۰۵۰۳ میلی متر در ابتدای دهانه در سمت دریا کاهش پیدا کرده است (شکل ۱۳).



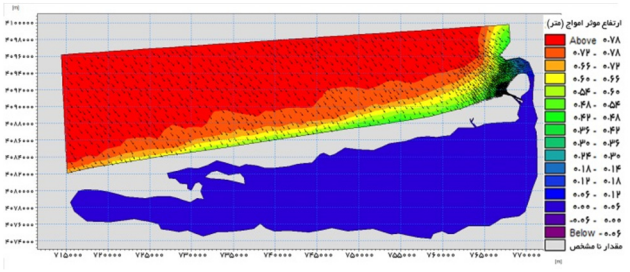
شکل ۱۳: فراوانی ذرات در دهانه خلیج گرگان، خط ۱ تا ۵، دهانه آشوراده از سمت خلیج به دریا است و خطوط ۶ و ۷، دهانه چپقلی از دریا به سمت خلیج است.

شواهد فیزیکی در دانه خلیج گرگان شامل ریپل مارک جریانی بوده و نشان‌دهنده این است که دهانه خلیج تحت هیدرودینامیک

پایین امواج قرار دارد. حجم رسوبی در دهانه به وسیله پوشش گیاهی تثبیت شده و رسوب‌گذاری فعالی در حاشیه کانال‌ها دیده نمی‌شود.

۳-۲ یافته‌های مدل‌سازی

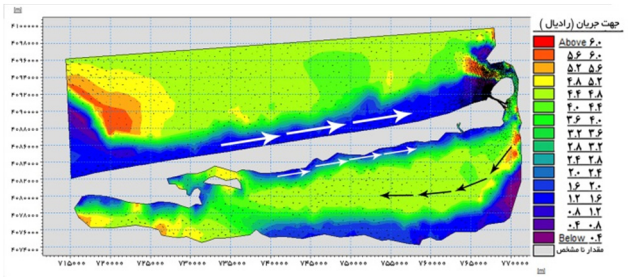
مدل‌سازی طیفی امواج میانگین، جهت امواج را از غرب به شرق نشان می‌دهند. ارتفاع موج در محدوده خلیج با نزدیک شدن به خط ساحلی یک‌باره کاهش می‌یابد. روند کاهش ارتفاع امواج بعد از شکست موج در دهانه آشوراده و چپقلی ادامه داشته و میانگین ارتفاع امواج به زیر ۰٫۳ متر می‌رسد (شکل ۱۴).



شکل ۱۴: ارتفاع و جهت امواج در محدود خلیج گرگان

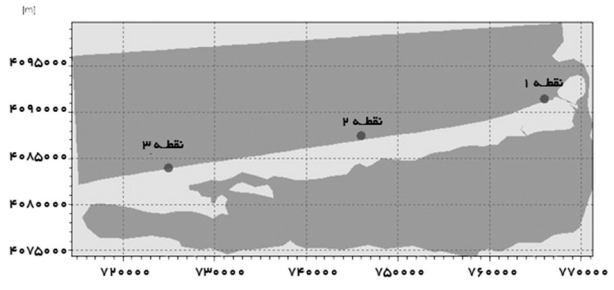
امواج منطقه تحت تاثیر جهت باد غالب بوده و در فصل زمستان بیشترین تغییر در جهت امواج تابیده شده به ساحل مشاهده می‌شود.

میانگین جهت جریان محدوده خلیج گرگان در بیرون خلیج و از سمت غرب به شرق بوده و با دور شدن از خط ساحلی جهت جریان نیز دچار تغییر جهت می‌شود. درون خلیج، میانگین جهت جریان از شرق به غرب و به صورت پادساعتگرد در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود.

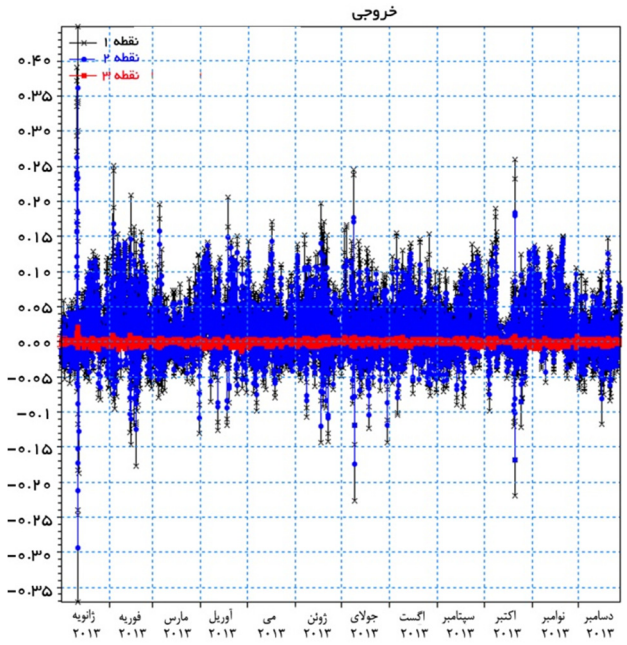


شکل ۱۵: جهت جریان آب در بیرون و درون خلیج

برای اندازه‌گیری میزان تغییرات تراز سطح آب، با توجه به شکل ۱۶، سه نقطه به عنوان نماینده خروجی گرفته شد. کمترین میزان تغییرات سطح آب مربوط به غرب زبانه میانکاله و بیشترین اندازه تغییرات مربوط به شرق زبانه است. حداکثر ارتفاع حاصل از مدطوفان مربوط به سرعت بادهای بین ۱۰ تا ۱۳ متر بر ثانیه بوده که موجب بالا آمدن آب بیش از ۳۰ تا ۴۰ سانتی متر در محدوده شرق زبانه و دهانه کانال آشوراده شده است و ارتفاع حاصل از این مدطوفان در ساحل مرکزی میانکاله، حدود ۱۵ سانتی متر و در ساحل غربی، این عدد به کمتر از ۱ سانتی متر کاهش می‌یابد. زمانی که در بیرون دهانه خلیج گرگان مد طوفانی به اندازه ۴۰ سانتی متر اتفاق می‌افتد، سطح آب خلیج گرگان را به اندازه ۱۵ تا ۲۰ سانتی متر بالا می‌آورد (شکل ۱۷).

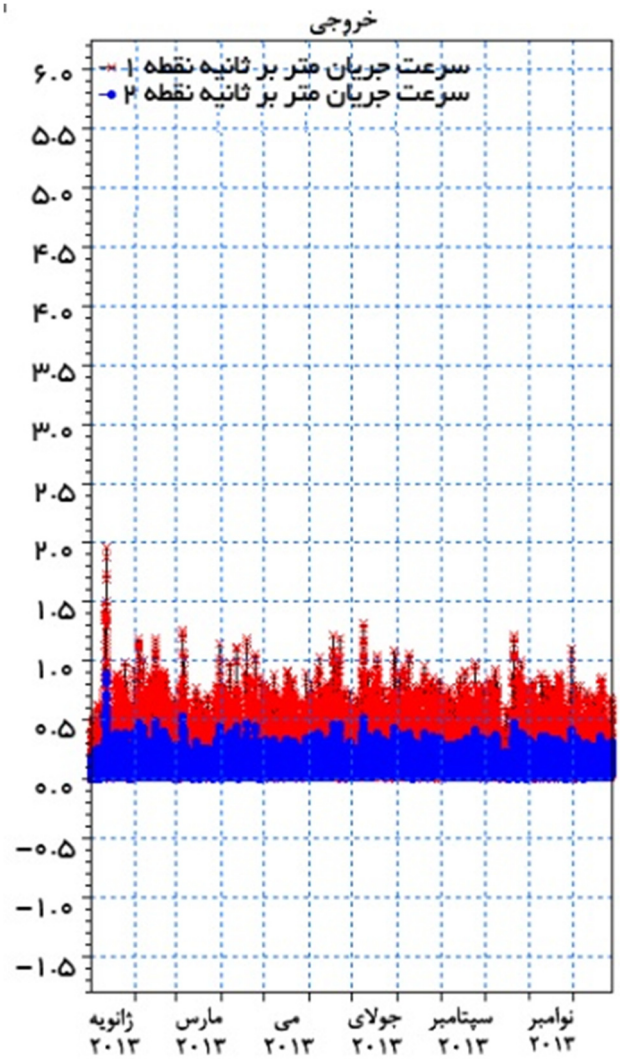


شکل ۱۶: نقاط انتخابی برای خروجی از تغییرات سطح آب



شکل ۱۷: خروجی اندازه تغییرات سطح آب

برای مقایسه سرعت جریان در دو کانال آشوراده و چپقلی از مدل خروجی سرعت جریان برای این دو کانال گرفته شد. شکل ۱۸ بیانگر آن است که سرعت جریان در کانال آشوراده تقریبا دو برابر کانال چپقلی بوده و علت آن را می‌توان عرض کمتر کانال و اصطکاک کمتر بستر کانال و این که کانال چپقلی در تماس مستقیم امواج دریا قرار ندارد، دانست.

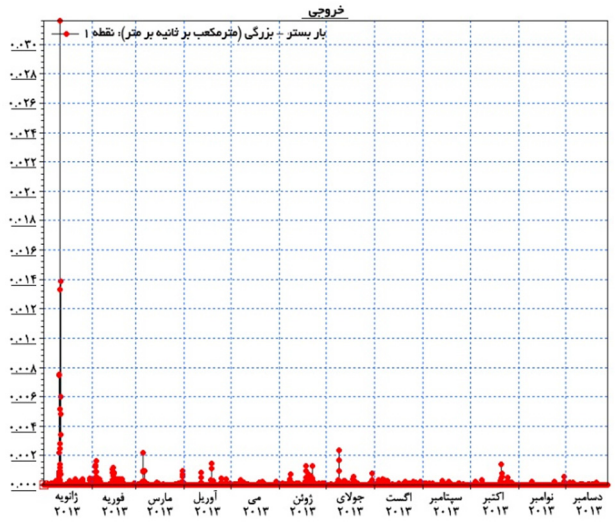


شکل ۱۸: خروجی سرعت جریان در کانال چپقلی (مشکی) و آشوراده (خاکستری)

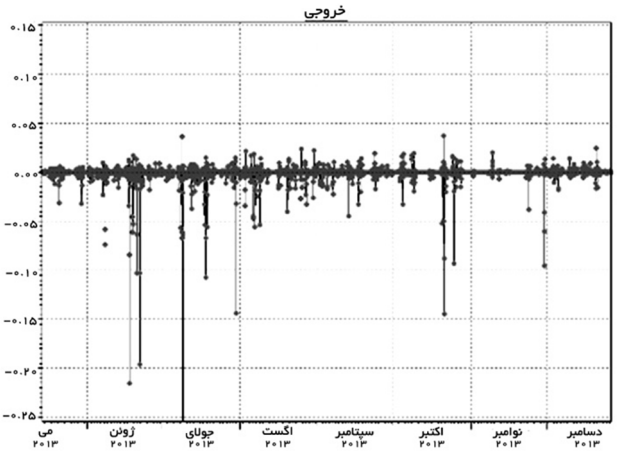
برای درک کاهش یا افزایش سرعت جریان و نرخ انتقال رسوب از نقاط شکل ۱۶ خروجی گرفته شد و نتایج حاکی از کاهش نرخ کل انتقال رسوب و کاهش سرعت جریان از غرب به شرق ساحل میانکاله است. میانگین نرخ کلی انتقال رسوب در ساحل میانکاله کمتر از ۰,۰۰۰۰۲ $m^3/s/m$ است و سرعت جریان از ۰ m/s – ۰,۶۵ در غرب به ۰ m/s – ۰,۳ در شرق رسید (شکل‌های ۱۹ و ۲۰)

جهت بدست آوردن نرخ کلی انتقال ماسه (متر مکعب در ثانیه بر هر متر) و نرخ تغییرات بار بستر (متر در روز) در دهانه خلیج گرگان از مدل در درون دهانه آشوراده خروجی گرفته شد که نتایج مطابق شکل‌های ۱۴ و ۱۵ است. نتایج حاکی از این است که میانگین نرخ کلی انتقال رسوب در دهانه خلیج گرگان کمتر از ۰,۰۰۱ متر مکعب در ثانیه بر هر متر بوده و رنج تغییرات بستر در طول یک‌سال تقریبا ثابت بوده و به اندازه کمتر از یک سانتی متر در روز بدست آمده است.

نتیجه گیری کلی از دهانه خلیج گرگان نشان‌دهنده این است که علی‌رقم انتقال رسوب ۰,۰۰۱ متر مکعب در ثانیه در دهانه، رسوب گذاری بسیار بالا و فعالی در دهانه خلیج گرگان وجود ندارد.

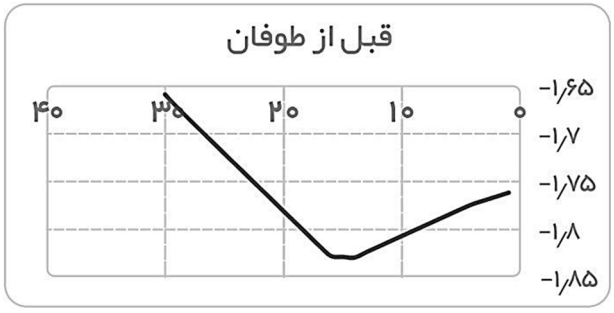


شکل ۱۹: نرخ کلی انتقال رسوب (متر مکعب در ثانیه بر هر متر)

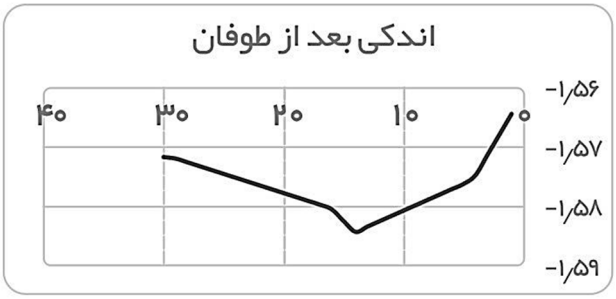


شکل ۲۰: نرخ تغییر بار بستر در دهانه خلیج گرگان

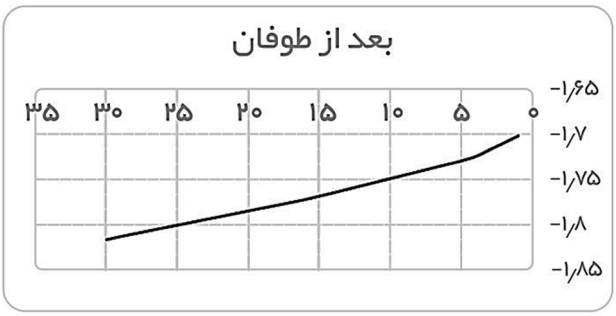
براساس نتایج ذکر شده، مشخص است که دهانه تحت رانه ساحلی ضعیفی از بالا دست بوده است. امواج دریا به علت شیب توپوگرافی کم منطقه، در فاصله دوری از ساحل شکسته شده و زمانی که به ساحل می‌رسند کاملا میرا می‌شوند. دهانه خلیج، نرخ انتقال رسوب ۰,۰۰۱ متر مکعب بر ثانیه در واحد طول را داشته ولی رسوب‌گذاری فعالی در درون دهانه دیده نمی‌شود. این موضوع بیانگر فرسایش رسوبات در دهانه خلیج است و همچنین بیشترین حساسیت را به مد حاصل از طوفان دارد. در این راستا از دهانه خلیج یک نیمرخ عرضی رسم شد و تغییرات نیمرخ عرضی برای حالت قبل از طوفان و بعد از طوفان بررسی گردید (شکل‌های ۲۱ الی ۲۳).



شکل ۲۱: نیمرخ دهانه قبل از طوفان



شکل ۲۲: نیمرخ دهانه اندکی بعد از طوفان



شکل ۲۳: نیمرخ دهانه بعد از طوفان

نتایج این بررسی نشان داد که دهانه خلیج گرگان مانند مدل اسکوفیر عمل کرده است. بطوری‌که در زمان طوفان رسوبات زیادی در دهانه خلیج گرگان نشست پیدا کرده‌اند. اما به علت کاهش سطح مقطع عرضی دهانه و تمایل دهانه در تبادل همان دبی سابق بین خلیج و دریا، سرعت جریان در دهانه افزایش یافته (تا زمانی‌که رسوبات ناشی از طوفان در دهانه شسته شوند، سرعت جریان در حدود ۰,۱ متر بر ثانیه افزایش داشته است) و رسوبات درون کانال را شسته تا دوباره به همان مساحت قبل از طوفان برسد (مساحت زیرنمودار در حالت قبل از طوفان و بعد از طوفان برابر است). با توجه به شواهد از آنجایی که دهانه تحت رانه ضعیفی از بالا دست بوده محتمل‌ترین حالت بسته شدن دهانه در این تراز، تحت اثر جریان عرضی ساحل و طوفان-های بزرگ است و دهانه تحت طوفان‌های با سرعتی به اندازه ۱۲ تا ۱۳ متر بر ثانیه پایداری خود را حفظ کرده و مانند مدل پایدار نمودار اسکوفیر واکنش نشان می‌دهد.

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش به منظور شناخت نحوه عملکرد دهانه خلیج، طی عملیات دقیق پایش میدانی منطقه و مدل‌سازی عددی مایک (SW و Flow Model و ST)، نتایج زیر حاصل گردید.

– در مدل‌سازی هیدرودینامیکی، جهت و سرعت جریان در خلیج گرگان مشخص شد که طبق نتایج، جهت جریان در خلیج گرگان پاد ساعتگرد و جهت جریان در ساحل میانکاله از سمت غرب به سمت شرق است که شکل ظاهری خلیج و تشکیل زبانه میانکاله نیز، این جهت را تایید می‌کند.

– بزرگترین مد طوفان در سرعت بادهای ۱۲ تا ۱۳ متر بر ثانیه بوده که تراز ساحل شرقی را ۴۰ سانتی‌متر بالا آورده و سطح آب خلیج را ۱۵–۲۰ سانتی‌متر بالا می‌آورد.

– با توجه به مدل‌سازی رسوبی منطقه، دهانه خلیج گرگان تحت اثر رانه ساحلی قوی از بالا دست نبوده و حجم رسوبی پشته شده در دهانه، تحت اثر نوسانات دریای خزر و جریانات عرضی حاصل از شکست امواج شکل گرفته است.

– با توجه به خروجی نیمرخ دهانه تحت اثر قبل و بعد از طوفان با تئوری‌های پایداری دهانه‌ها، نتیجه شد که دهانه فعلی

تحت این تراز سطح آب و طوفان‌هایی به بزرگی ۱۲ تا ۱۳ متر بر ثانیه، در حالت پایدار قرار دارد.

– موارد بدست آمده توسط مدل نرم‌افزاری مایک نیز بیانگر کاهش سرعت جریان و کاهش ظرفیت انتقال رسوب از سواحل غربی به سواحل شرقی است و نیز نشان‌دهنده نرخ رسوب‌گذاری پایین در دهانه خلیج است که با مطالعات میدانی تطابق داشته و صحت سنجی شده است.

منابع

رورده، ه.ا.، ۱۳۹۲. شبیه‌سازی دینامیک امواج و انتقال ماسه در سواحل دریای خزر(محدوده خلیج گرگان). پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، شماره ۲، صفحات ۱۸-۱.

سازمان سواحل بنادر و دریانوردی و پژوهشگاه ملی اقیانوس شناسی و علوم جوی، ۱۳۹۰. مدل سازی دریاهای ایران (دریای خزر). ۶ صفحه.

شربتی، س.، ۱۳۹۵. ضرورت بررسی اثرات کاهش سطح تراز آب دریای کاسپی بر وضعیت خلیج گرگان و ارائه راهکار جهت برون رفت از بحران در سال‌های آتی. بهره‌برداری و پرورش آبزیان، دوره ۵، شماره ۱، صفحات ۱۰۵-۸۳.

Bruun, P.; Gerritsen, F., 1959. Natural bypassing of sand at coastal inlets. Journal of Waterways and Harbors Division ASCE, 85(4): 75-107.

Bruun, P.A., 1960. Stability of coastal inlets. North Holland Publishing Company, 130PP.

Bruun, P.; Mehta, A.J.; Johnson, I.G., 1978. Stability of tidal inlets: Theory and engineering. Developments in Geotechnical Engineering. Elsevier Science, Amsterdam, 510P.

De Alteris, J.T.; Byrne, R.J., 1975. The recent history of Wachapreague Inlet, Virginia. Estuarine Research, 2: 167-181.

Denmark Hydraulic Institute (DHI), 2012. Manual of mike 21/3, coupled model FM, coastal hydraulic and oceanography hydrodynamic module, 70P.

Denmark Hydraulic Institute (DHI), 2012. Manual of mike 21 |& mike 3 flow model fm, coastal hydraulic and oceanography hydrodynamic module, 70P.

Escoffier, F.F., 1940. The stability of tidal inlets. Shore and Beach, 111-114PP.

FitzGerald, D.M., 1987. Back-barrier dynamics of the east frisian islands. Journal of Sedimentary Petrology, 57(4): 746-754.

kiaei, M.S., 2014. The survey of sedimentation and erosion of ideal tidal inlets effected by both tide and cross-shore wave by numerical modeling. Watershed Management Research, 104: 62-74.

Ranasinghe, R.A., 2003. The seasonal closure of tidal inlets: cause and effects. Coastal Engineering, 45(4): 601-627.

Tung, T.T., 2006. Seasonal closure of tidal inlets and estuaries at the Central Coast of Vietnam. International Conference on Estuaries and Coasts (ICEC-2006), 1: 1150-1157.