تاثیر اسکله برگشتی بندر انزلی بر الگوی جریان‌های سیلابی و عبور رسوبات با منشا تالاب از بندر

سیده معصومه صداقی [۱*] ، عقیل حاج مومنی[۲]، محمدحسین نعمتی[۳]

[۱] استادیار، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، s.sadaghi@bhrc.ac.ir
[۲] پژوهشگر مستقل، hajmomeni@gmail.com
[۲] رئیس اداره مهندسی سواحل، سازمان بنادر و دریانوردی، mhn1982@gmail.com

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۶/۱۲
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۲۰
تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۲۶

کلمات کلیدی:
هیدرودینامیک و رسوب
اسکله برگشتی
بندر انزلی

چکیده

بندر انزلی یکی از سه بندر اصلی سواحل شمالی کشور است که با داشتن اسکله‌های متعدد، عمق آبخور مناسب و پسکرانه وسیع، دارای امکانات مناسبی برای سرویس‌دهی به انواع شناورها می‌باشد. این بندر از ابتدا بر روی مصب روگاهای متصل به تالاب انزلی ساخته شده بود و از این رو، همواره در معرض رسوبات ورودی از سمت تالاب قرار داشته و عملیات لایروبی به طور پیوسته در آن انجام شده است. در سال‌های اخیر، با توجه به کاهش قابل‌توجه سطح آب دریای خزر و افزایش حجم رسوبات تالاب ناشی از شرایط بالادست، حجم رسوبات با منشا تالاب در بندر افزایش یافته و پیشنهاداتی در خصوص حذف اسکله برگشتی (شماره ۱۰) با هدف تسهیل عبور رسوبات از کانال بندر و جلوگیری از نشست آنها در حوضچه مطرح شده است. در این مقاله، تاثیر اسکله برگشتی بر عبور رسوبات از بندر و الگوی رسوبگذاری با استفاده از شبیه‌سازی ریاضی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داده که حذف اسکله برگشتی، تنها تاثیرات موضعی بر سرعت جریان و نشست رسوبات در بندر داشته و الگوی کلی جریانات و رسوبگذاری در بندر را تغییر نمی‌دهد. حجم رسوبات ورودی و خروجی از بندر با حذف اسکله برگشتی تغییر محسوسی نخواهد داشت.

The impact of Anzali transverse jetty on the pattern of flood flows and passage of lagoon originated sediments through the port

Seyede Masoome Sadaghi[1*], Aghil Hajmomeni[2], Mohammad Hossein Nemati[3]

[1] Assistant Professor, Road, Housing and urban development research center; s.sadaghi@bhrc.ac.ir
[2] Independent researcher, hajmomeni@gmail.com
[3] Head of Coastal Engineering Office, Ports and Maritime Organization, mhn1982@gmail.com

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 03 Sep 2023
Accepted: 10 Jan 2024
Available online: 16 Jan 2024

Keywords:
Hydrodynamics and Sedimentation
Transverse Jetty
Anzali Port

ABSTRACT

Anzali port is one of the three major ports on the northern coasts of the country, equipped with multiple berths, suitable water depth, and spacious yard, providing adequate facilities for serving various vessels. The port was originally built at the mouth of rivers connected to the Anzali wetland, and as a result, it has always been exposed to incoming sediments from the wetland, necessitating continuous dredging operations. In recent years, due to a significant decrease in the Caspian Sea water level and an increase in the volume of sediment originating from upstream conditions, the amount of lagoon-originated sediments in the port has increased. Suggestions have been made to remove the transverse jetty (No. 10) in order to facilitate the passage of sediments through the port channel and prevent their deposition in the basin. In this article, the impact of the transverse jetty on sediment passage through the port and the sedimentation pattern is investigated using mathematical simulations. The results indicate that the removal of the transverse jetty only has local effects on flow velocity and sediment deposition within the port, without altering the overall patterns in the port. The volume of sediment entering and exiting the port will not undergo a significant change with the removal of the transverse jetty.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.3.3]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.26]

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

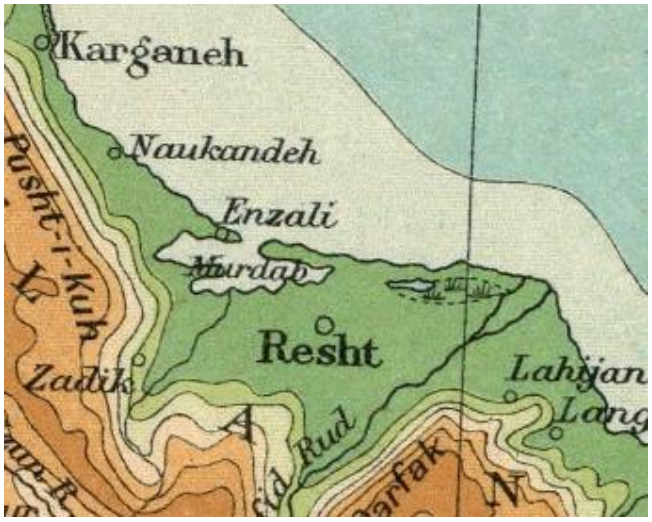
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.3.3]

[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.26]

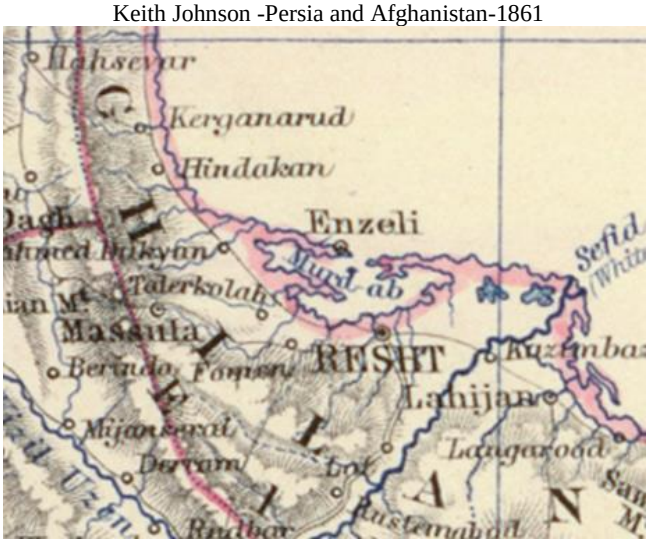
۱ - مقدمه

بندر انزلی از مهم‌ترین بنادر تجاری کشور در سواحل دریای خزر است که در سال‌های اخیر با شکوفایی و توسعه چشمگیری مواجه بوده است. این بندر دارای موقعیت منحصر به فردی است که از سویی مرتبط با بزرگ‌ترین تالاب کشور (تالاب انزلی) بوده و از سوی دیگر در مقابل عمیق‌ترین آب های دریای خزر قرار دارد. نقشه‌های تاریخی موجود از محدوده سواحل جنوبی دریای خزر، نشان از آن دارد که تالاب انزلی در گذشته دارای وسعت بیشتری بوده و با دهانه‌ای بسیار بزرگتر به دریای خزر متصل شده بود به طوریکه بیشتر از تالاب به یک خلیج شبیه بوده که تا نزدیکی شهر رشت گسترش داشته است (شکل ۱). این خلیج به تدریج با گسترش دو زبانه رسوبی از طرفین محدود شده و بندر انزلی در میانه این دو زبانه، تنها راه ارتباطی دریا با تالاب کنونی را حفظ نموده است. با تخلیه رسوباتی که از حوضه آبریز بالادست به محدوده تالاب تخلیه می‌شوند، به تدریج از وسعت تالاب کاسته شده است.

Persia-1922



Keith Johnson -Persia and Afghanistan-1861



شکل ۱- محدوده وسیع تالاب انزلی بر اساس نقشه‌های تاریخی

در سال‌های اخیر، کاهش تراز آب دریای خزر نیز بر افزایش میزان رسوبات و کاهش عمق و وسعت تالاب تاثیر قابل‌توجهی داشته است. بخشی از رسوبات بالادست، در زمان وقوع سیلابهای فصلی از طریق کانال و حوضچه بندر به دریا تخلیه می‌شوند. با توجه به امتداد اسکله شماره ۱۰ بندر که عمود بر مسیر کانال بندر است (شکل ۲)، این سوال مطرح شده است که آیا حذف این اسکله می‌تواند در تسهیل عبور رسوبات از بندر و تخلیه آن به دریا با رویکرد در حرکت نگاه داشتن رسوبات (رویکرد KSM[1]) موثر باشد. در این تحقیق، تاثیر وجود یا حذف اسکله برگشتی بر الگوی جریان و روند رسوبگذاری در کانال و حوضچه بندر با استفاده از شبیه‌سازی ریاضی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مرور ادبیات فنی

با توجه به اهمیت بندر انزلی از نظر استراتژیک و نیاز به تبادل کالا در سطح محلی و منطقه‌ای از طریق این بندر، تاکنون مطالعات متنوعی بر روی این بندر و همچنین تالاب انزلی در بالادست آن انجام شده است. با توجه به تعدد مطالعات انجام شده، در ادامه به برخی از مهمترین موارد اشاره می‌شود. یکی از مطالعات جامعی که بر روی این بندر انجام شده است، پروژه اندازه‌گیری‌های دریایی رسوب و مدلسازی ریاضی بندر انزلی است که توسط مرکز تحقیقات آب وزارت نیرو برای سازمان بنادر و دریانوردی کشور انجام شد [۱]. این پروژه با هدف بررسی و مطالعه هیدرودینامیک جریان و انتقال رسوب با تمرکز بر پدیده نفوذ موج به داخل حوضچه بندر و همچنین روند رسوب‌گذاری در داخل حوضچه مشتمل بر دو بخش کلی اندازه‌گیری‌های میدانی و مدلسازی عددی به انجام رسید. این پروژه، تنها عملیات اندازه‌گیری جامع پارامترهای دریایی در حوضچه و کانال بندر انزلی است که نتایج آن در مطالعات مختلف مربوط به بندر انزلی مورد استناد قرار گرفته است.

پروژه مهم دیگری که با هدف پایش پارامترهای اقیانوس‌شناسی و هواشناسی دریای خزر بین سال‌های ۱۳۹۲ تا ۱۳۹۴ انجام شده است، پایش و مطالعات شبیه‌سازی سواحل شمالی کشور است. در این پروژه اندازه‌گیری‌های مختلفی در محدوده بنادر شمالی انجام شد ولی با توجه به مقیاس پروژه، اندازه‌گیری‌های مذکور بر داخل حوضچه بنادر از جمله بندر انزلی تمرکز نداشتند. در این پروژه علاوه بر اندازه‌گیری‌های میدانی، شبیه‌سازی عددی میدان باد، موج و جریان دریای خزر نیز به انجام رسید. [۲]



شکل ۲- موقعیت اسکله برگشتی (شماره ۱۰) در کانال بندر انزلی

از دیگر مطالعات جامع انجام شده در محدوده تالاب و بندر انزلی، مطالعات مدیریت اکولوژیک تالاب انزلی است که توسط آژانس همکاری‌های بین‌المللی کشور ژاپن (جایکا) در دو مرحله در سال‌های ۲۰۰۳ الی ۲۰۰۵ و ۲۰۱۰ الی ۲۰۱۲ به انجام رسید. تمرکز این مطالعات ارائه طرح جامع برای حفاظت و احیای تالاب انزلی بود. در مطالعات مذکور، پایش کاملی از وضعیت تالاب شامل نمونه‌برداری‌ها و اندازه‌گیری‌های میدانی مختلف به انجام رسید. [۳] بندر انزلی در مطالعات به‌روزرسانی طرح جامع بنادر بازرگانی ایران نیز به صورت جامع مورد مطالعه قرار گرفته است. وضعیت اجزای مختلف دریایی بندر همچون عمق پای اسکله‌ها و مشخصات ابعادی بخش‌های مختلف بندر که می‌توانند متاثر از شرایط هیدرودینامیک و رسوبگذاری در بندر باشند، در این مطالعات ارائه شده است. [۴] با توجه به افزایش رسوبات ورودی از سمت تالاب به حوضچه و کانال بندر انزلی پس از اجرای طرح توسعه بندر و ابهامات ایجاد شده در خصوص تاثیر ساخت موج‌شکن‌های جدید بر روند انتقال رسوبات از بندر انزلی، پروژه "مطالعات تاثیر طرح توسعه بندر انزلی بر رژیم هیدرودینامیک و رسوب" توسط مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی به انجام رسید. [۵] نتایج مطالعه مذکور به طور کلی حاکی از عدم تاثیر طرح توسعه بر رژیم هیدرودینامیک و رسوب در حوضچه و کانال بندر انزلی بوده است. بر اساس نتایج به دست آمده، تنها بخشی از رسوبات که پیش از اجرای طرح توسعه از دهانه قدیم بندر به دریا تخلیه می‌شدند، پس از ساخت موج‌شکن‌های جدید، وارد حوضچه آرامش جدید بندر می‌شوند و داخل حوضچه رسوب می‌کنند. در ادامه مطالعه مذکور، مطالعه دیگری نیز برای بررسی تاثیر اسکله برگشتی بندر انزلی بر عبور رسوبات تالاب از بندر توسط مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی به انجام رسید. [۶]

در مطالعات تدقیق وضعیت رسوبگذاری در بنادر کشور نیز مدلسازی هیدرودینامیک و رسوب بندر انزلی در محدوده وسیع‌تری که از بالادست رودخانه‌های ورودی به تالاب را نیز شامل می‌شود به انجام رسید. بر اساس نتایج به دست آمده از مدلسازی در مطالعات مذکور، حدود ۶۰ تا ۸۰ درصد رسوبات ورودی از سمت رودخانه‌های بالادست در تالاب به تله افتاده و ته‌نشین می‌شوند. ۲ تا ۶ درصد رسوبات با گذر از دهانه پل غازیان در کانال و حوضچه بندر به تله می‌افتند و مابقی با کمک جریان وارد دریا می‌شوند. [۷]

علاوه بر مطالعاتی که در قالب پروژه‌های پژوهشی در خصوص شرایط هیدردینامیک و رسوب بندر انزلی به انجام رسیده است، مقالاتی نیز در این زمینه ارائه شده است. به عنوان یک نمونه، خسروپسند و همکاران در سال ۱۴۰۰ مطالعه‌ای در خصوص بررسی اثرات احداث موج‌شکن جدید انزلی بر شرایط رسوب‌گذاری در رودخانه‌های ارتباطی تالاب و بندرانزلی انجام دادند که طبق نتایج آن، احداث موج‌شکن‌های جدید بندر انزلی تغییر شرایط هیدرولیکی تالاب انزلی در سال‌های اخیر را توجیه نمی‌کند. [۸]

۳- روش مطالعه و معادلات حاکم

برای شبیه‌سازی ریاضی از نرم‌افزار DHI-MIKE استفاده شده است [۹]. در ابتدا، مدلسازی دو بعدی جریان سیلابی با استفاده از بسته نرم‌افزاری MIKE21-Flow model FM انجام شده است. مدل دوبعدی مبتنی بر حل عددی معادلات دوبعدی آب کم‌عمق یعنی معادلات ناویراستوکس میانگین‌گیری شده در عمق برای سیالات تراکم ناپذیر[۲] است که شامل معادلات پیوستگی و ممنتوم می‌شود. در بخش دیگر، با توجه به تاثیر لایه‌بندی جریان و اختلاف دما و شوری در جریان ورودی از تالاب با محیط دریا بر سرعت سقوط و روند رسوب‌گذاری، مدلسازی سه‌بعدی جریان و انتقال رسوب با استفاده از مدول HD[۳] و MT[۴] از بسته MIKE3-Flow model FM بررسی شده است. انتخاب مدول MT بر اساس جنس رسوبات انتقال یافته از تالاب بوده که عمدتاً ریزدانه و چسبنده گزارش شده‌اند. مدل سه‌بعدی جریان بر مبنای حل عددی معادلات سه‌بعدی ناویراستوکس میانگین‌گیری شده در عمق برای سیالات تراکم ناپذیر اجرا شده است. این معادلات در سیستم مختصات سیگما (σ) یا ترکیبی از مختصات سیگما و کارتزین حل می‌شوند. سیستم مختصات سیگما که در فیزیک سیالات و علوم جوی کاربرد دارد، عمق سیال را به عنوان مجموعه‌ای از لایه‌ها در نظر می‌گیرد. با استفاده از این سیستم می‌توان تغییرات سرعت و فشار در سطوح مختلف عمق سیال را توصیف کرد و جزئیات دقیق‌تری از جریان در نواحی مختلف را مشاهده کرد. خصوصاً در نواحی مانند مجاورت

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.3.3]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.26]

بستر که پیچیدگی‌های بیشتری وجود دارد، نتایج بهتری از حل معادلات در این سیستم مختصات حاصل می‌شود. در این مختصات، حل معادلات بر مبنای تبدیل عمودی سیگما طبق رابطه (۱) انجام می‌شود.

$$t' = t, \qquad x' = x, \qquad y' = y, \qquad \sigma = \frac{z+d}{h} \tag{۱}$$

در رابطه (۱)، t زمان، x, y, z ابعاد در مختصات کارتزین، d عمق آب ساکن و $h = \eta + d$ عمق آب با احتساب تراز سطح آب (η) است. σ بین صفر (در بستر) و یک (در سطح آب) متغیر است. در مختصات سیگما، معادلات ناویراستوکس به صورت روابط (۲) تا (۵) تعریف می‌شوند:

$$\frac{\partial h}{\partial t'} + \frac{\partial hu}{\partial x'} + \frac{\partial hv}{\partial y'} + \frac{\partial hw}{\partial \sigma} = 0 \tag{۲}$$

$$\frac{\partial hu}{\partial t'} + \frac{\partial hu^2}{\partial x'} + \frac{\partial huv}{\partial y'} + \frac{\partial h\omega u}{\partial \sigma} = f\,hv - gh\frac{\partial \eta}{\partial x'} - \frac{h}{\rho_0}\left(\frac{\partial q}{\partial x'} + \frac{\partial q}{\partial \sigma}\frac{\partial \sigma}{\partial x}\right) + hF_u - hF_{vx} + \frac{\partial}{\partial \sigma}\left(\frac{\nu_t^v}{h}\frac{\partial u}{\partial \sigma}\right) \tag{۳}$$

$$\frac{\partial hv}{\partial t'} + \frac{\partial hvu}{\partial x'} + \frac{\partial hv^2}{\partial y'} + \frac{\partial h\omega v}{\partial \sigma} = -f\,hu - gh\frac{\partial \eta}{\partial y'} - \frac{h}{\rho_0}\left(\frac{\partial q}{\partial y'} + \frac{\partial q}{\partial \sigma}\frac{\partial \sigma}{\partial y}\right) + hF_v - hF_{vy} + \frac{\partial}{\partial \sigma}\left(\frac{\nu_t^v}{h}\frac{\partial v}{\partial \sigma}\right) \tag{۴}$$

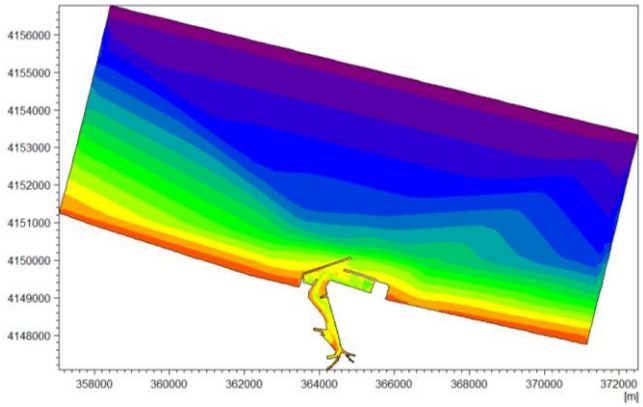
$$\frac{\partial hw}{\partial t'} + \frac{\partial huw}{\partial x'} + \frac{\partial hvw}{\partial y'} + \frac{\partial h\omega w}{\partial \sigma} = -\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial q}{\partial \sigma} + hF_w - hF_{vz} + \frac{\partial}{\partial \sigma}\left(\frac{\nu_t^v}{h}\frac{\partial w}{\partial \sigma}\right) \tag{۵}$$

در روابط ارائه شده، u,v,w مولفه‌های سرعت در امتداد x,y,z، q فشار غیرهیدروستاتیک، $f = 2\Omega\,Sin\phi$ پارامتر کریولیس (Ω: نرخ زاویه‌ای چرخش و ϕ: عرض جغرافیایی)، ν_t^v ویسکوزیته گردابی در راستای قائم[۵]، g شتاب گرانش، ρ_0 چگالی آب و $F_v = (F_{vx}, F_{vy}, F_{vz})$ نیروی درگ ناشی از پوشش گیاهی است. ω، سرعت عمودی اصلاح شده در مختصات سیگما و hF_u، hF_v و hF_w مولفه‌های افقی پخش هستند. انتقال دما و شوری نیز از معادلات کلی انتقال-پخش[۶] پیروی می‌کنند. فرمول‌بندی انتقال رسوبات ریزدانه نیز بر مبنای محاسبات پخش و انتقال در مدول هیدرودینامیک است. برای اطلاعات بیشتر در خصوص معادلات حاکم و نحوه حل آن‌ها می‌توان به مبانی علمی ارائه شده در راهنمای نرم‌افزار مراجعه کرد. [۹]

۴- تاثیر اسکله برگشتی در رژیم جریانات و رسوبگذاری

۴-۱- محدوده شبیه‌سازی

محدوده شبیه‌سازی با توجه به سوابق مطالعات و مدل‌های کالیبره شده موجود [۵] و [۶]، اطلاعات در دسترس و ملزومات فنی مدل عددی مطابق شکل ۳ انتخاب شده است. این محدوده در پایین دست (سمت دریا) به حدود ۷ کیلومتر از شمال، شرق و غرب حوضچه بندر محدود شده است. فاصله مرزهای دریایی تا محدوده مورد توجه در مدل به گونه‌ای انتخاب شده است که تاثیری بر رژیم غالب جریانات در محدوده حوضچه بندر ایجاد نشود.



شکل ۳- محدوده شبیه‌سازی

با توجه به تاثیر غالب جریانهای بالادستی روگاها بر رژیم جریان و انتقال رسوبات با منشا تالاب در حوضچه داخلی بندر، محدوده شبیه‌سازی در بالادست از سمت پنج روگای مهم ورودی به بندر تا طول ۳۰۰ الی ۵۰۰ متر گسترش یافته است. طول روگاها در مدل عددی به اندازه‌ای ادامه پیدا کرده است که اولاً اطلاعات هیدروگرافی متناسب در دسترس باشد و نیز اثرات شرایط مرزی ناچیز شود. نام و موقعیت هر یک از روگاها در شکل ۴ نشان داده شده است.

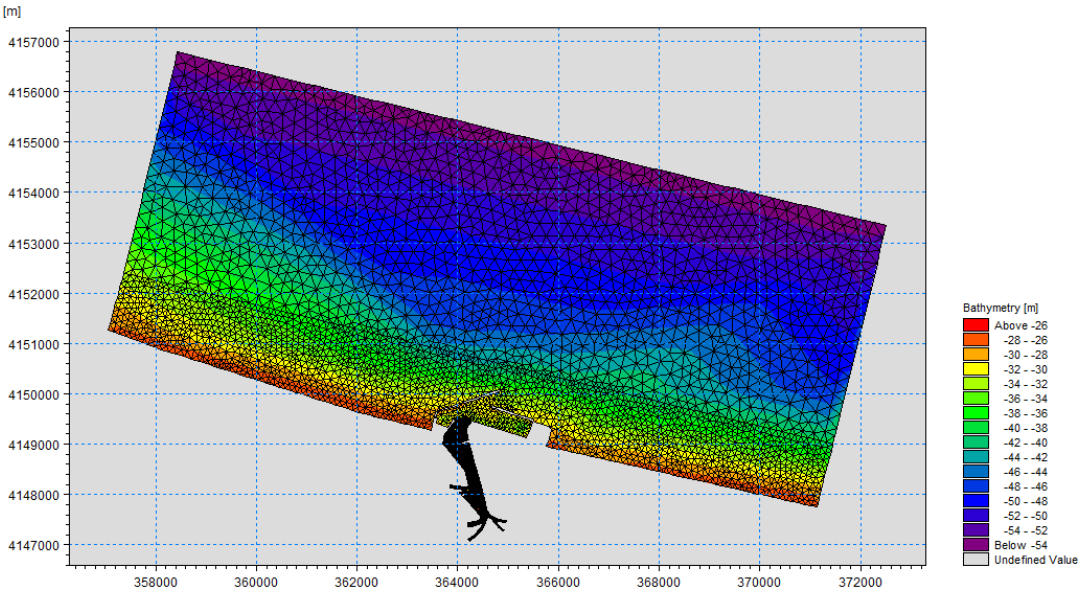


شکل ۴- موقعیت روگاهای ورودی به کانال بندر انزلی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.3.3]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.26]

۲-۴- شبکه حل

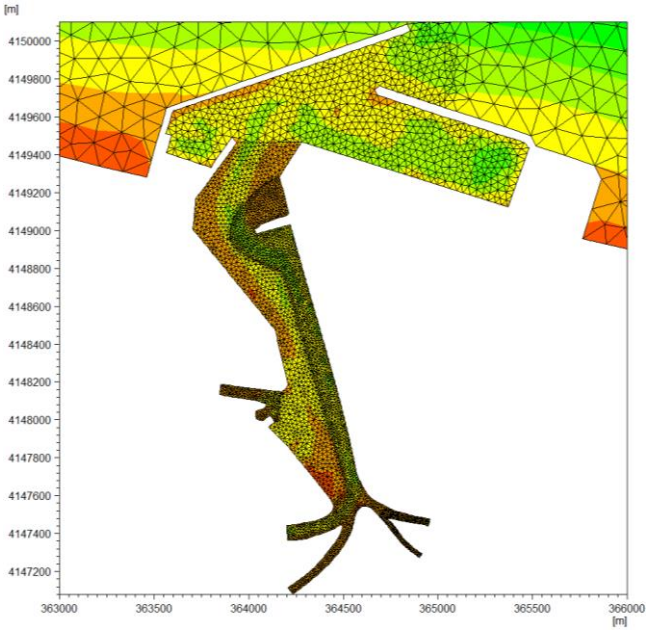
مدل مورد استفاده بر اساس شبکه نامنظم عمل می‌کند تا انعطاف‌پذیری کافی در تنظیم تراکم شبکه در نقاط مختلف فراهم باشد. فاصله گره‌ها در محیط حوضچه‌ها و دهانه بندر به اندازه‌ای انتخاب شده است که بتواند گرادیان‌های سرعت در نقاط مختلف، پیچیدگی جریان در محل تلاقی روگاها، چرخابه‌های شکل‌گیرنده در داخل حوضچه و دهانه و تغییرات مورفولوژیک قابل مشاهده در نقشه‌های هیدروگرافی را شبیه‌سازی کند. در محدوده اسکله برگشتی، ابعاد المان‌ها در حدود ۱۰ متر انتخاب شده است تا امکان بررسی دقیق تاثیر کاهش طول در سناریوهای مورد نظر فراهم گردد. شبکه طراحی شده برای مدلسازی جریان در شرایط فعلی جانمایی اسکله برگشتی در شکل ۵ نشان داده شده است. در شکل ۶ مشاهده می‌شود که ابعاد شبکه در قسمت‌های مختلف به منظور افزایش دقت در نواحی مورد نظر متغیر است. حداقل مساحت المان‌های مثلثی محاسباتی در شبکه مذکور ۵۰ متر مربع در نظر گرفته شده است. تعداد گره‌ها و المان‌های محاسباتی در مدل مبنا (شرایط فعلی) به ترتیب ۷۱۱۵ و ۱۳۱۵۶ عدد است. در مدل‌های سه‌بعدی، تعداد لایه‌ها در عمق با توجه به حساسیت‌سنجی‌های انجام شده ۱۴ عدد انتخاب شده است.



شکل ۳- هیدروگرافی و شبکه طراحی شده برای مدلسازی جریان

۳-۴- کالیبراسیون مدل

با توجه به اینکه تنها عملیات اندازه‌گیری جامع پارامترهای دریایی در حوضچه و کانال بندر انزلی مربوط به سال ۱۳۸۴ است، برای کالیبراسیون مدل از داده‌های مربوطه استفاده شده است [۱ و ۵]. در مرحله کالیبراسیون، هندسه بستر بر اساس شرایط هیدروگرافی قبل از اجرای طرح توسعه‌ی بندر و نزدیک‌ترین زمان به دوره اندازه‌گیری انتخاب شده است. شرط مرزی بالادست در روگاهای منتهی به کانال به صورت سری زمانی در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه اندازه‌گیری دبی جریان در روگاهای منتهی به پل غازیان نه در دوره اندازه‌گیری و نه بجز آن انجام نشده است، مجموع دبی روگاها به گونه‌ای تنظیم شده که مطابق با جریان اندازه‌گیری شده در زیر پل غازیان باشد. پس از شبیه‌سازی‌های اولیه، رابطه سرعت جریان نقطه‌ای اندازه‌گیری شده در نزدیک پل غازیان و دبی عبور کننده از مقطع آن محل بدست آمده است. سپس با توجه به نسبت مقطع روگاها در زمان اندازه‌گیری و شیب طولی تقریباً مشابه آنها، سهم دبی هر روگا از دبی کل برآورد شده است. زبری بستر در



شکل ۶- ابعاد و تراکم متغیر شبکه‌بندی در محدوده شبیه‌سازی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.3.3]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.26]

مدل سه بعدی معادل ۰/۰۲ متر فرض شده است. حساسیت‌سنجی مدل نشان داده است که پارامتر زبری بستر به علت کوتاه بودن مسیر و کم بودن سرعت جریان در حوضچه بندر تاثیر قابل‌توجهی بر میدان جریان ندارد. سرعت‌های جریان در حوضچه بیش از هر چیز تابع تاثیر دینامیک شیب سطح آب (ناشی از دبی ورودی از روگاها و بعد از آن نوسانات تراز آب دریا) است و زبری بستر تاثیر چندانی بر آن ندارد. لزجت آشفتگی برای صفحه افقی از رابطه اسماگورینسکی محاسبه شده است و ضریب پیش‌فرض ۰/۲۸ برای آن مناسب تشخیص داده شد. لزجت آشفتگی در راستای قائم نیز از طریق حل معادله k-ε محاسبه می‌شود. یکی از مهم‌ترین پارامترها برای کالیبره‌کردن مدل رسوب، پارامترهای تنش بحرانی فرسایش و نشست رسوب است. در این مطالعه، با توجه به تمرکز بر نحوه انتقال رسوبات وارد شده به بندر از سمت تالاب، پارامتر تنش برشی آستانه فرسایش ۰/۹ نیوتن بر مترمربع در نظر گرفته شده است. این عدد به اندازه‌ای بالا بوده که جریان در روگاها نتواند بستر را بلند کند با فرض اینکه بستر به حالت تعادلی خود رسیده و همچنین انتقال رسوبات وارده به حوضچه از طرف بالادست روگاها مورد توجه است. از طرفی با بررسی نقشه‌های هیدروگرافی، انتظار نمی‌رود که فرسایش در حوضچه بندر رخ دهد. تنش برشی برای نشستن رسوبات ۰/۰۵ نیوتن بر متر مربع و سرعت سقوط ذرات با توجه به جنس غالب لای، یک میلی‌متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است.

۴-۴-شرایط مرزی

در پایین‌دست مدل (سمت دریا) که محل خروج جریان از محدوده مدل است، به طور معمول از شرایط مرزی خروج آزاد جریان (Free outflow) استفاده می‌شود. با تعریف این شرایط مرزی در پایین دست، جریان تنها به بیرون از مرز هدایت شده و امکان ورود مجدد به داخل مدل را ندارد [۹]. به دلیل فاصله زیاد مرزهای دریا از حوضچه، اثرگذاری این مرز در درون حوضچه ناچیز خواهد بود. از طرفی عمق زیاد نمی‌تواند اثر قابل ملاحظه‌ای در حمل رسوب داشته باشد. به منظور حفظ پایداری مدل، افزایش مقاومت بستر با ضرایب مانینگ حدود $5\ m^{1/3}/S$ طبق توصیه نرم‌افزار در نوار باریکی مقابل مرزهای دریایی اعمال شده است [۹]. بدین ترتیب نوسانات تراز سطح آب در نزدیکی مرزهای دریایی باعث ناپایداری مدل نمی‌شود. در بالادست مدل، تغییرات دبی در روگاها و حمل رسوبات ریزدانه نقش کلیدی در رسوبگذاری بندر دارند. به همین دلیل سری زمانی دبی روگاها مهمترین شرط مرزی مدل جریان محسوب می‌شود. اندازه‌گیری دبی جریان در روگاهای منتهی به پل غازیان تا کنون انجام نشده است. ایستگاه آبسنجی در مسیر روگاها به حوضچه بندر وجود ندارد که بتواند نماینده سری زمانی دبی ورودی به حوضچه باشد. ایستگاه‌های آبسنجی موجود یا خیلی دور هستند و یا تالاب انزلی در بین آنها و حوضچه واقع شده و رفتار سری زمانی جریان را تغییر می‌دهد. ضمنا اطلاعات در دسترس از آنها هم در زمان سیل تراکم زمانی کافی ندارد. مطالعات انجام شده در محدوده طرح نشان داده‌اند که جریان‌های سیلابی نقش اصلی در انتقال رسوبات با منشا تالاب در بندر را دارند. بنابراین دبی ورودی از سمت روگاها خصوصاً در زمان سیلاب، در شبیه‌سازی جریان نقشی کلیدی دارد. مجموع دبی ورودی به کانال بندر با توجه به نتایج بررسی داده‌های هیدرولوژیکی ایستگاه‌های آب‌سنجی طبق مطالعات تدقیق رسوبگذاری بنادر برای بندر انزلی [۷]، برای سه حالت (الف) غیر سیلابی (مجموع دبی رودخانه‌ها کمتر از ۲۰۰ مترمکعب بر ثانیه)، (ب) سیلاب متوسط (مجموع دبی رودخانه‌ها بین ۲۰۰ تا ۵۰۰ مترمکعب بر ثانیه) و (ج) سیلاب شدید (مجموع دبی رودخانه‌ها بیش از ۵۰۰ مترمکعب بر ثانیه) در نظر گرفته شده است. با توجه به نزدیک بودن شیب طولی روگاها در بالادست پل غازیان، سرعت جریان در روگاها نسبتا یکسان فرض شده است و بنابراین نسبت بین دبی روگاها تقریباً مشابه نسبت بین سطح مقطع آنها در نظر گرفته شده است. عمق روگاها از هیدروگرافی‌ها و عرض آنها از تصاویر ماهواره‌ای استخراج شده است. بر این اساس سهم دبی هر روگا از دبی کل بر اساس نسبت سطح مقطع آن‌ها محاسبه شده است. عرض تعدادی از روگاها (بخصوص سوسر و سفید روگا) در طول زمان کاهش یافته است. برای کالیبراسیون مدل، عرض روگاها از تصاویر ماهواره‌ای نزدیک به زمان کالیبراسیون مدل استخراج شده است. سپس عرض روگاها برای زمان مدلسازی اصلی تدقیق شده است. مدلسازی جریان برای شرایط مختلف سیلابی و سناریوهای مختلف وجود یا حذف اسکله برگشتی انجام شده است. در اولین گام، مدلسازی دوبعدی جریان با دبی ثابت در شرایط سیلابی مختلف طبق جدول ۱ انجام شده است.

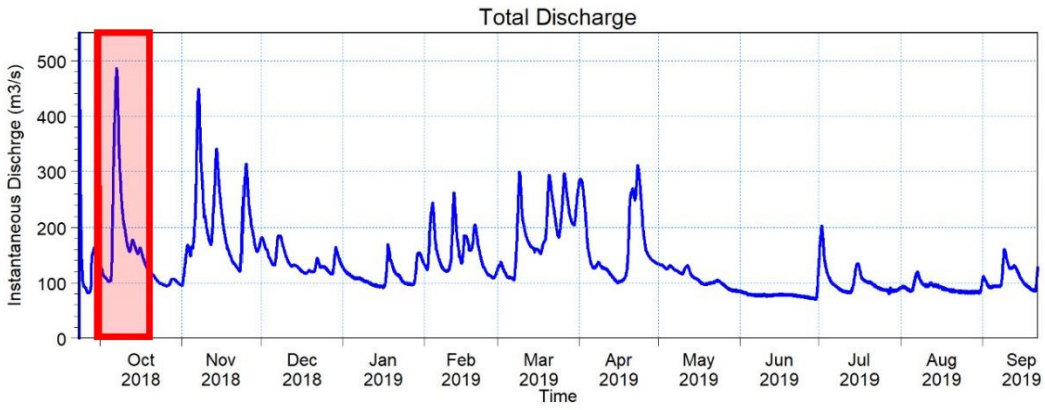
جدول ۱- مقدار دبی ثابت ورودی از روگاهای منتهی به بندر در شرایط مختلف سیلابی

نام روگا	غیر سیلابی (m^3/s)	سیلاب متوسط (m^3/s)	سیلاب شدید (m^3/s)
نهنگ روگا	۶۵	۱۳۰	۳۲۵
سفید روگا	۱۵	۳۰	۷۵
سوسر روگا	۵	۱۰	۲۵
پیر بازار روگا	۱۵	۳۰	۷۵
شنبه بازار روگا	۱۵	۳۰	۷۵
مجموع دبی ورودی به بندر (m^3/s)	۱۱۵	۲۳۰	۵۷۵

پس از مدلسازی جریان با شرایط مرزی دبی ثابت، جریان با دبی متغیر (بر اساس سری زمانی مستخرج از مطالعات تدقیق

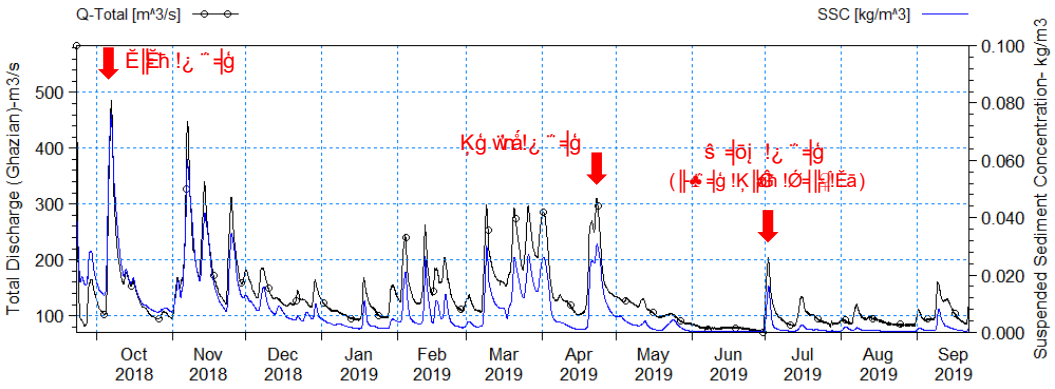
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.3.3]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.26]

رسوبگذاری بنادر برای بندر انزلی [۷]) در شرایط سیلاب شدید نیز مورد بررسی قرار گرفته است. اطلاعات مذکور شامل سری زمانی دبی ورودی به کانال بندر در محدوده پل غازیان است که از سپتامبر ۲۰۱۸ به مدت حدود یک سال و با فواصل زمانی دو ساعت در دسترس بوده است. تغییرات دبی در این دوره زمانی در شکل ۷ نشان داده شده است. محدوده زمانی یک سیلاب نسبتاً شدید برای یک دوره زمانی بیست روزه از ۲۰۱۸/۱۰/۱ تا ۲۰۱۸/۱۰/۲۰ انتخاب شده است که دبی لحظه‌ای در این دوره به حدود ۵۰۰ متر مکعب بر ثانیه می‌رسد.



شکل ۴-دبی لحظه‌ای زیر پل غازیان حاصل از مدلسازی مطالعات "تدقیق رسوبگذاری بنادر –بندر انزلی" [۷]

برای مدل رسوب، در غیاب داده‌های اندازه‌گیری، سری زمانی دبی و غلظت رسوبات معلق زیر پل غازیان از نتایج مطالعات تدقیق رسوبگذاری بنادر برای بندر انزلی [۷] طبق شکل ۸ استخراج شده است.



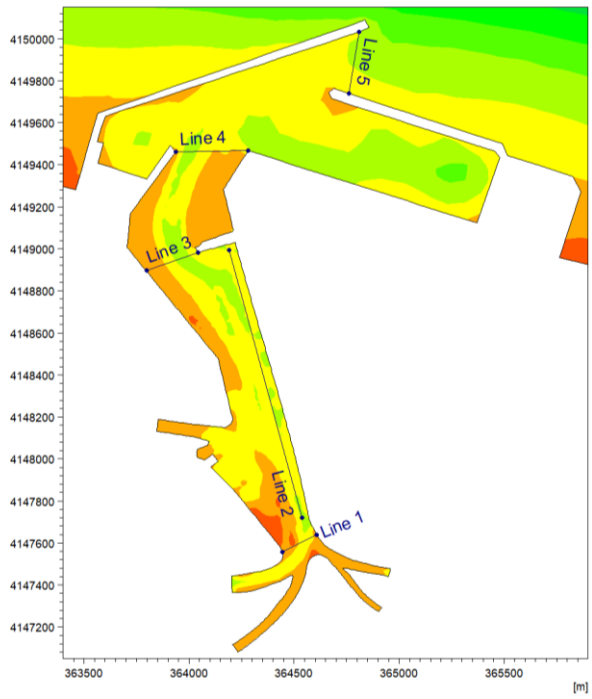
شکل ۸-دبی و غلظت رسوبات معلق لحظه‌ای زیر پل غازیان، نتایج مدلسازی "تدقیق رسوبگذاری بنادر –بندر انزلی" [۷]

در نبود اطلاعات کافی از میزان غلظت رسوبات در روگاهای مختلف، نقش همه روگاها در شرایط مرزی مدل سه‌بعدی رسوب ریزدانه یکسان در نظر گرفته شده است. غلظت رسوب معلق در روگای شنبه‌بازار – که از تالاب غربی به حوضچه وارد می‌شود صفر در نظر گرفته شده است. دلیل این انتخاب توصیف‌های دریافت شده از کارشناسان محلی و همچنین نقش تالاب غربی در ته‌نشین کردن رسوب بوده است. در تصاویر ماهواره‌ای کنترل شده هم آورد آب کدر از این روگا به حوضچه بندر دیده نشده است. با استناد به فرضیات مدلسازی‌های انجام شده در مطالعات "تاثیر طرح توسعه بندر انزلی بر رژیم هیدرودینامیک و رسوب [۵]" که بر اساس اندازه‌گیری‌های میدانی استنتاج شده است، دمای آب در مرز بالادست (روگاها) ۲۶ درجه سانتیگراد و در مرز پایین‌دست (دریا) ۱۸ درجه سانتیگراد فرض شده است. همچنین میزان شوری در مرز بالادست (روگاها) PSU ۱ و در مرز پایین‌دست (دریا) PSU ۱۰ در نظر گرفته شده است.

۴-۵- بررسی و تفسیر یافته‌های مربوط به شرایط جریان

پروفیل سرعت جریان در امتداد پنج خط کنترلی که در شکل ۹ مشخص شده‌اند با یکدیگر مقایسه شده‌اند. مقایسه سرعت جریان در امتداد خطوط کنترلی در شرایط دبی ثابت و سیلاب متوسط در شکل ۱۰ و برای سیلاب شدید در شکل ۱۱ نشان داده شده‌اند.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.3.3]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.26]

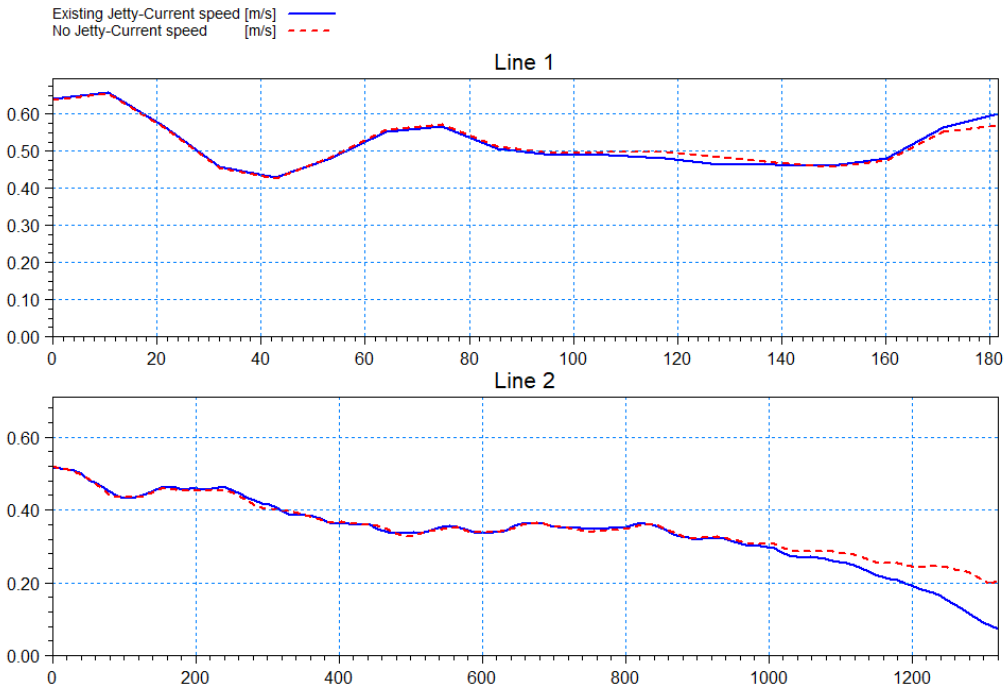


شکل ۹- موقعیت خطوط کنترلی در محدوده کانال و حوضچه بندر

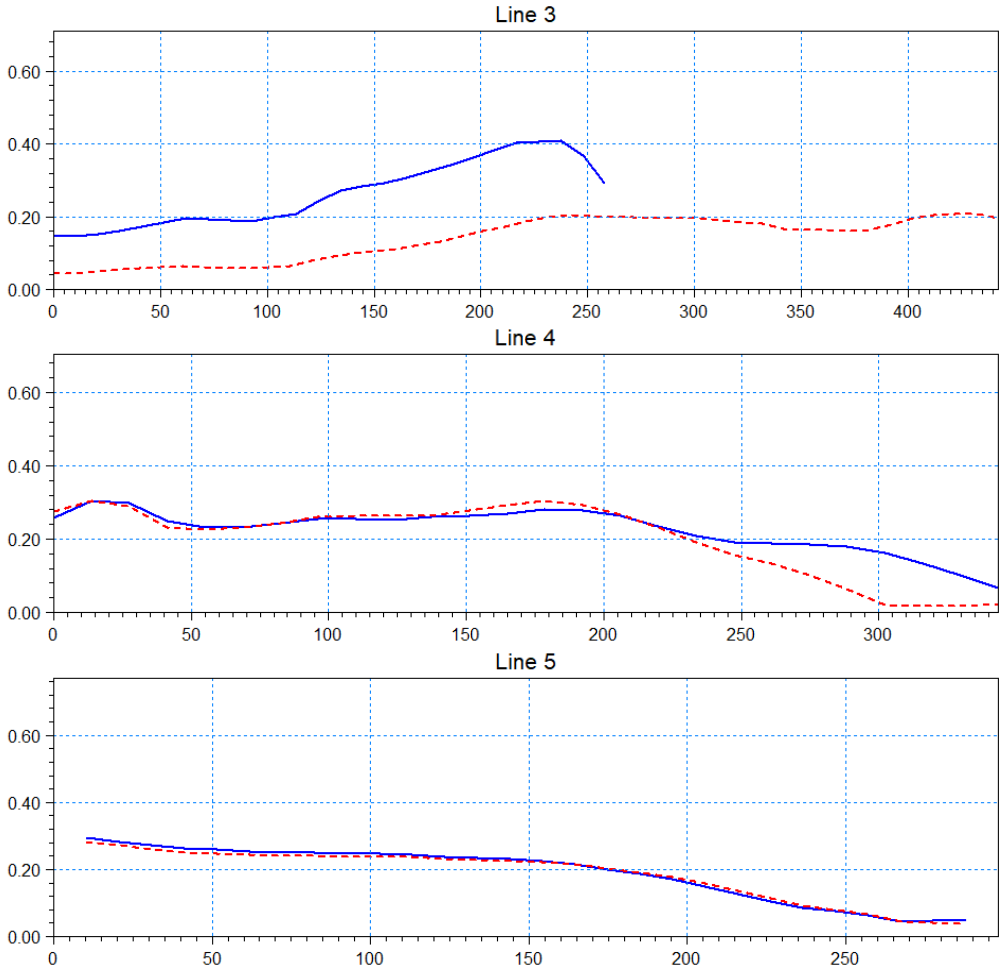
بررسی نتایج حاکی از آن است که در تمامی حالات مدل‌سازی، بیشترین سرعت جریان در ابتدای کانال و محدوده اسکله‌های اول تا سوم رخ می‌دهد و با پیشروی به سمت اسکله شماره ده (اسکله برگشتی)، از سرعت جریان کاسته می‌شود. بیشترین سرعت جریان در محدوده پل غازیان در شرایط سیلاب متوسط و شدید، به ترتیب به حدود ۰/۶ و ۱/۶ متر بر ثانیه می‌رسد. حذف اسکله برگشتی تاثیر چندانی بر سرعت جریان در بخش‌های ابتدایی کانال ندارد و تنها سرعت جریان در مقطع روبروی اسکله برگشتی را کاهش می‌دهد که با توجه به افزایش عرض مقطع قابل پیش‌بینی بوده است. اختلاف سرعت در مقطع مذکور در شرایط سیلاب متوسط حدود ۰/۲ متر بر ثانیه و در سیلاب شدید حدود ۰/۵ متر بر ثانیه است. در مقطع دهانه کانال به حوضچه جدید، حذف اسکله برگشتی، سرعت جریان در بخش شرقی دهانه را (به علت انتقال نقطه جدایش جریان از راس اسکله برگشتی به نقطه تغییر امتداد اسکله‌های کانال) کاهش می‌دهد. در مقطع خروجی از بندر جدید، تغییر محسوسی در سرعت جریان ناشی از حذف اسکله برگشتی مشاهده نمی‌شود.

مدلسازی جریان با دبی متغیر در شرایط سیلاب شدید نیز مورد بررسی قرار گرفته که تفاوت محسوسی با شرایط دبی ثابت نشان نداده است.

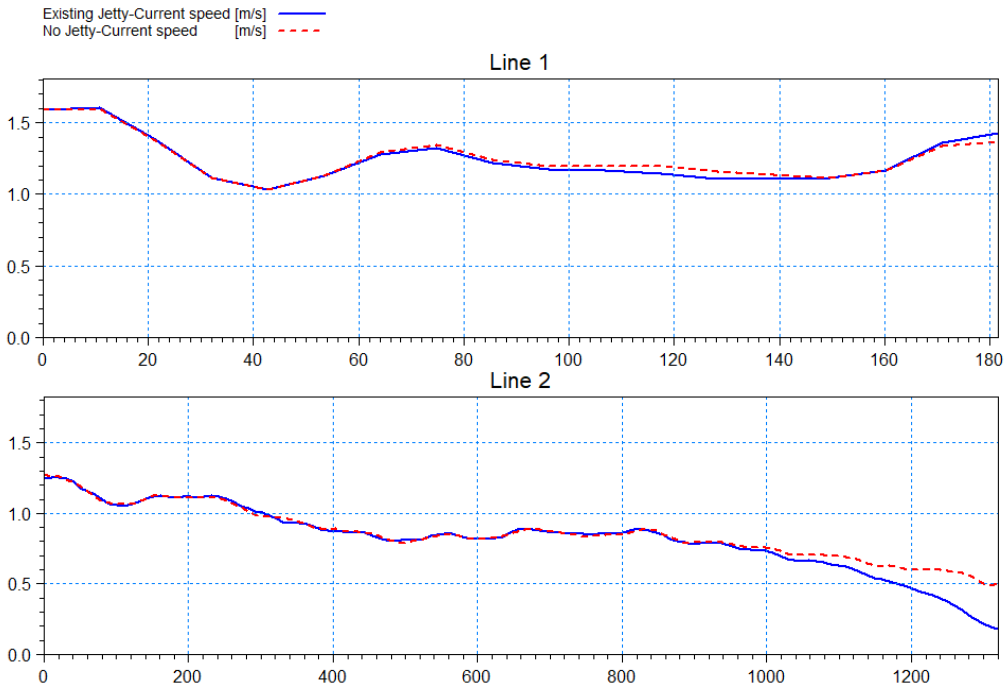
در بخش دیگر، با توجه به تاثیر لایه‌بندی جریان و اختلاف دما و شوری در جریان ورودی از تالاب با محیط دریا بر سرعت سقوط و روند رسوب‌گذاری، مدلسازی سه‌بعدی جریان با دبی ثابت بررسی شده است. نتایج این بررسی حاکی از آن است که الگوهای کلی تغییرات سرعت در طول خطوط کنترلی در مدلهای دوبعدی و سه‌بعدی مشابه است. البته سرعت‌های جریان سطحی حاصل از مدل سه‌بعدی اندکی (حدود ۰/۱ الی ۰/۲ متر بر ثانیه) بیش از سرعت‌های به دست آمده از مدل دوبعدی است. بنابراین، اگرچه برای اجرای مدل رسوب به علت تاثیر لایه‌بندی جریان بر سرعت سقوط ذرات و نرخ نشست رسوبات، از مدل سه‌بعدی جریان استفاده می‌شود، لیکن برای بررسی الگوهای کلی جریان، نتایج مدل دوبعدی کفایت لازم را داشته است.



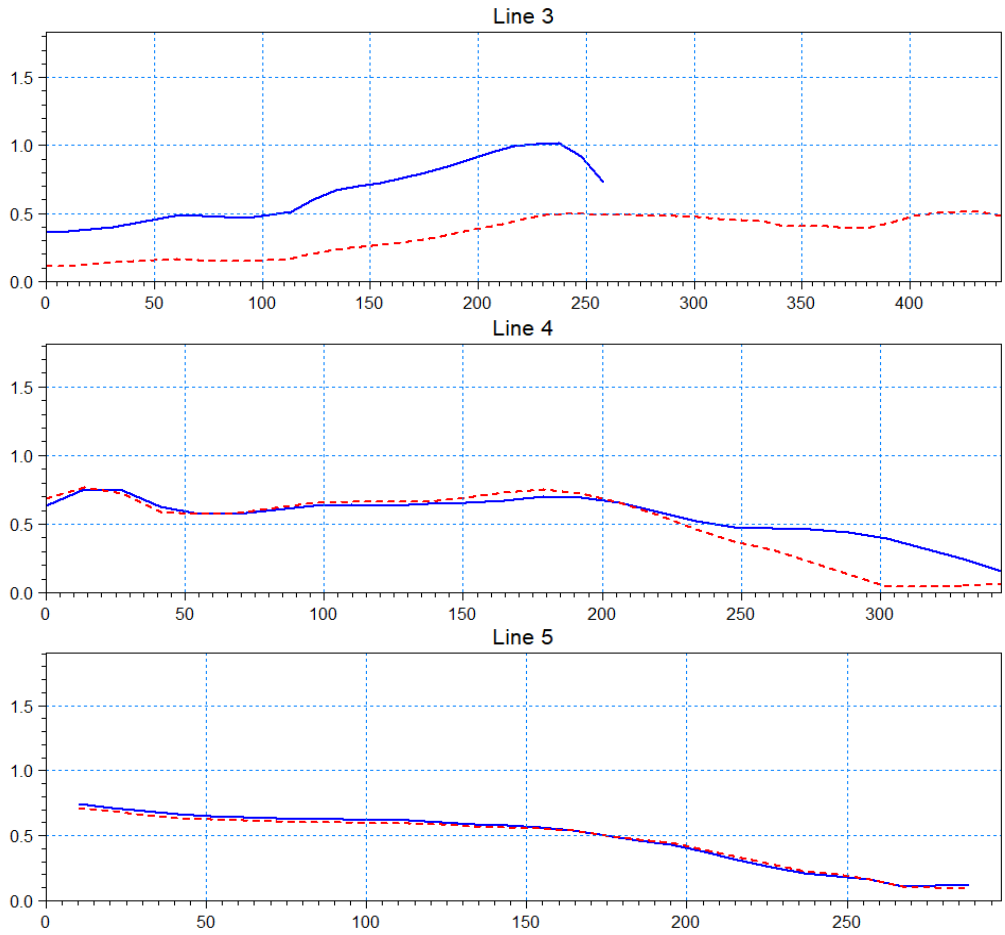
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.3.3]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.26]



شکل ۱۰- سرعت جریان در امتداد خطوط کنترلی- شرایط دبی ثابت- سیلاب متوسط



[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.3.3]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.26]

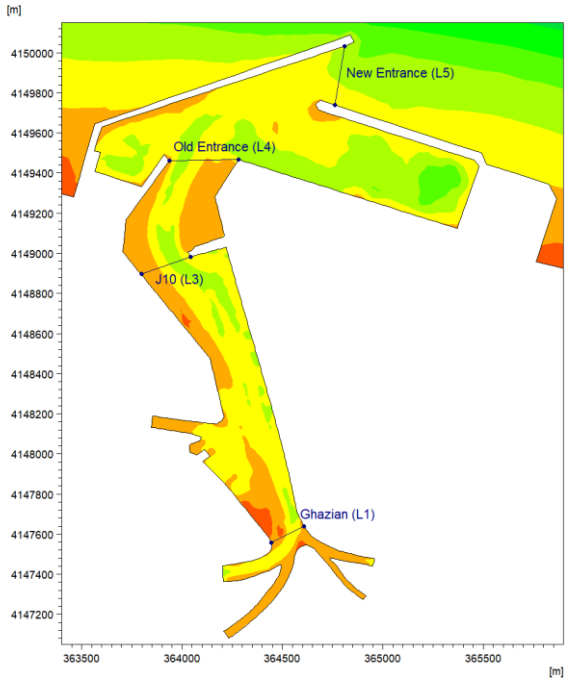


شکل ۱۱- سرعت جریان در امتداد خطوط کنترلی- شرایط دبی ثابت- سیلاب شدید

۶-۴- بررسی و تفسیر یافته‌های مربوط به رسوبگذاری

مدل کالیبره‌شده جریان مبنای شبیه‌سازی انتقال رسوبات چسبنده از سمت تالاب است. در بالادست مدل، تغییرات دبی در روگاها و حمل رسوبات ریزدانه نقش کلیدی در رسوبگذاری بندر دارند. جریان‌های با بیشترین تاثیر بر انتقال رسوبات به بندر انزلی، عمدتاً در زمان سیلاب‌های متوسط تا شدید رخ می‌دهند. بر اساس مطالعات تدقیق رسوبگذاری بنادر برای بندر انزلی [۷]، داده‌های هیدرولوژیکی در ایستگاه‌های آب‌سنجی محدوده طرح، نشان از وقوع سالانه حدود دو "سیلاب شدید" با مجموع دبی رودخانه‌ها بیش از ۵۰۰ مترمکعب در ثانیه و حدود هشت "سیلاب متوسط" با مجموع دبی رودخانه‌ها بیش از ۲۰۰ مترمکعب در ثانیه دارد.

مدلسازی حد پایین شرایط سیلابی که در آن مجموع دبی روگاهای منتهی به کانال بندر حدود ۲۰۰ متر مکعب بر ثانیه در نظر گرفته شده است، نشان داد که جریان‌های معمولی (غیر سیلابی) بر انتقال رسوبات در بندر تاثیر قابل ملاحظه‌ای ندارند. عمده رسوبات ورودی به کانال، با توجه به سرعت‌های کم جریان غیرسیلابی در همان قسمت‌های ابتدایی کانال (قبل از اسکله برگشتی) رسوب می‌کنند و به حوضچه جدید نمی‌رسند. بنابراین تغییر در اسکله برگشتی که باعث افزایش عرض و کاهش سرعت جریان در آن مقطع می‌شود تاثیر چندانی بر عبور رسوبات نخواهد داشت. برای بررسی دقیق‌تر میزان نشست رسوبات در کانال و حوضچه بندر، خطوط کنترلی در مقاطع مختلف مطابق شکل ۱۲ در نظر گرفته شده‌اند.

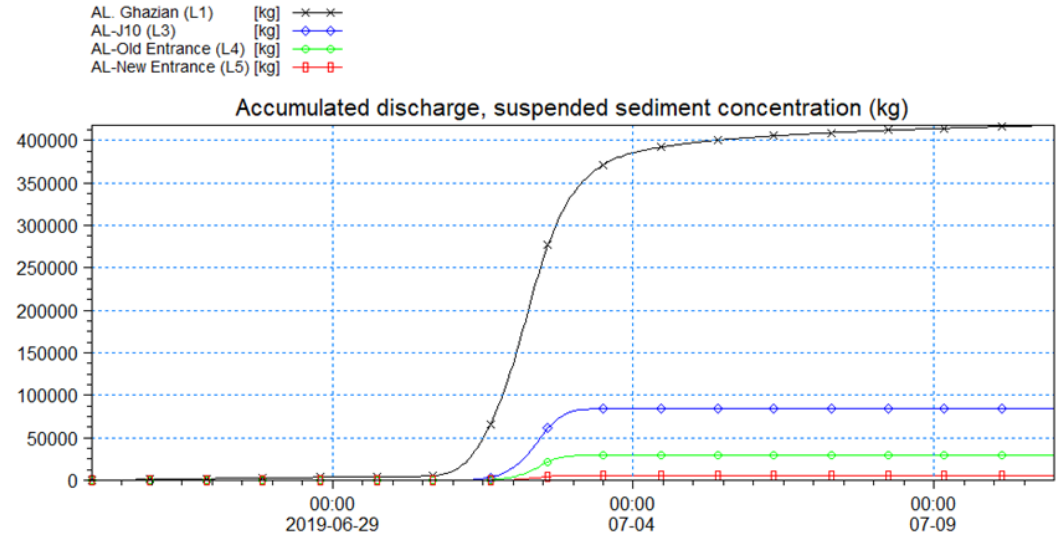


شکل ۱۲-موقعیت خطوط کنترلی برای بررسی بیلان رسوب

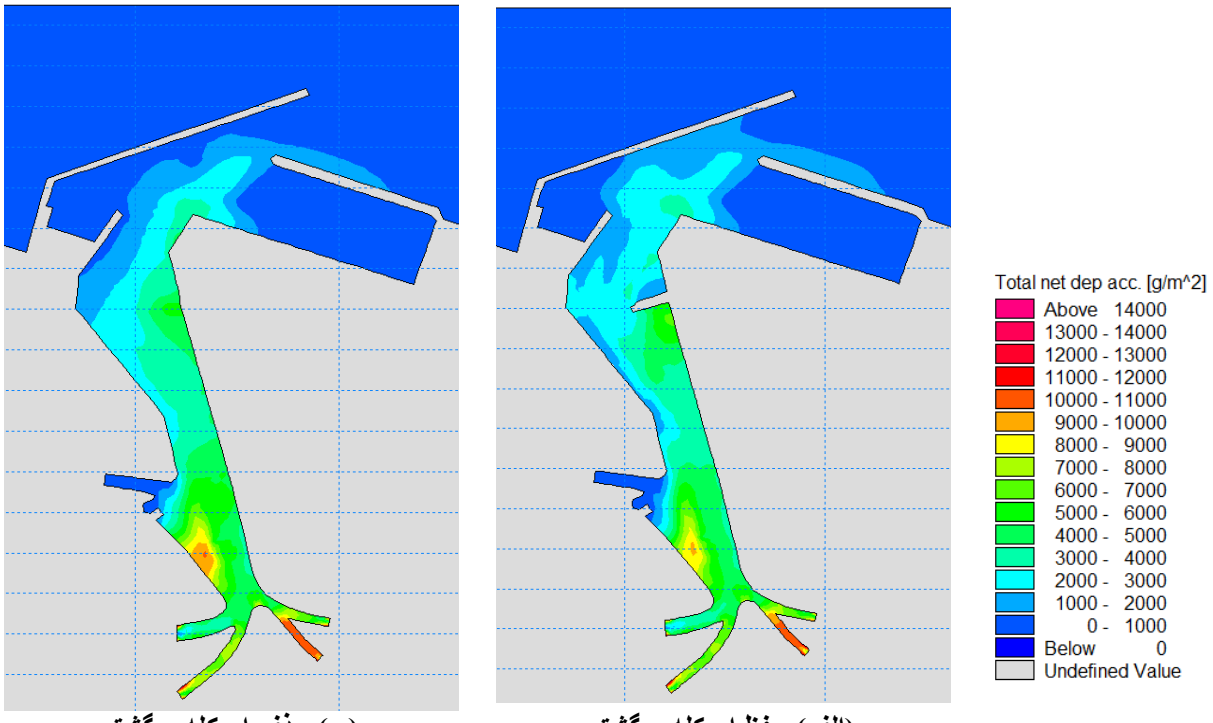
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.3.3]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.26]

با توجه به ناچیز بودن فرسایش در حوضچه‌های قدیم و جدید بندر، اختلاف عبور رسوب از بین هر دو مقطع متوالی مقدار رسوبگذاری در آن ناحیه را نشان می‌دهد. در یک نمونه از شرایط سیلاب ضعیف در یک دوره حدود بیست روز، طبق شکل ۱۳، در مجموع حدود ۴۱۸,۰۰۰ کیلوگرم معادل حدود ۳,۸۰۰ متر مکعب رسوب از مقطع غازیان وارد کانال بندر شده که حدود ۴۱۲,۰۰۰ کیلوگرم معادل حدود ۳,۷۵۰ متر مکعب آن در کانال و حوضچه بندر نشست می‌کند. با فرض وقوع ۸ سیلاب ضعیف در سال، حجم رسوبات ترسیب شده در بندر ناشی از چنین سیلاب‌هایی حدود ۳۰,۰۰۰ مترمکعب در سال برآورد می‌شود که در مقابل رسوباتی که سالانه از بندر لایروبی می‌شود قابل‌توجه نیست.

در سیلاب‌های متوسط با مجموع دبی ورودی به بندر در حدود ۳۰۰ مترمکعب بر ثانیه، حدود ۸۵ درصد رسوبات در کانال و حوضچه بندر نشست می‌کند و حدود ۱۵ درصد از دهانه جدید بندر به دریا تخلیه می‌شود. با حذف اسکله برگشتی، جریان در عرض بیشتری از کانال توزیع می‌شود و محدوده نشست رسوبات به ساحل مقابل اسکله‌ها گسترش می‌یابد (شکل ۱۴). مقادیر تجمعی عبور رسوبات از مقاطع کنترل در سیلاب متوسط برای شرایط فعلی اسکله برگشتی و حذف آن به ترتیب در شکل ۱۵ و شکل ۱۶ نشان داده شده است.



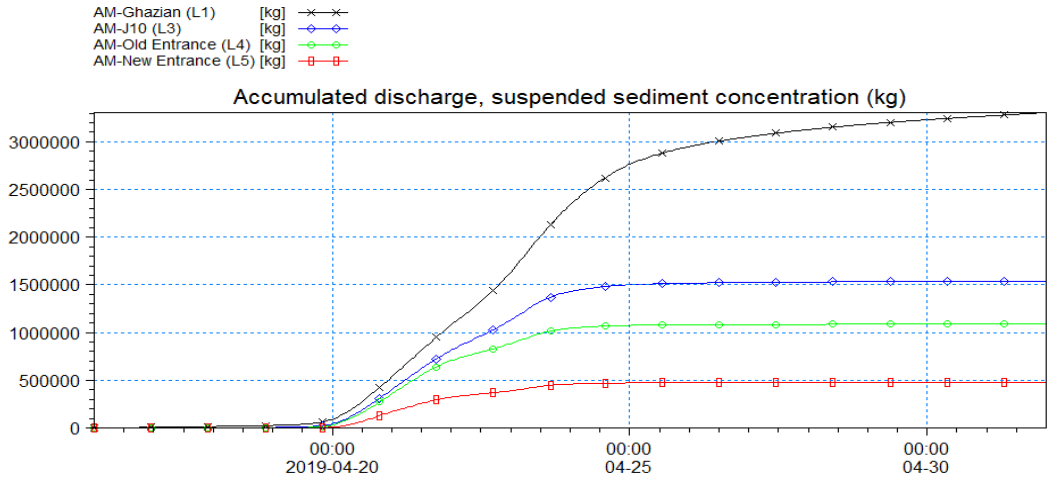
شکل ۱۳-مقادیر تجمعی عبور رسوبات از مقاطع کنترل در سیلاب ضعیف



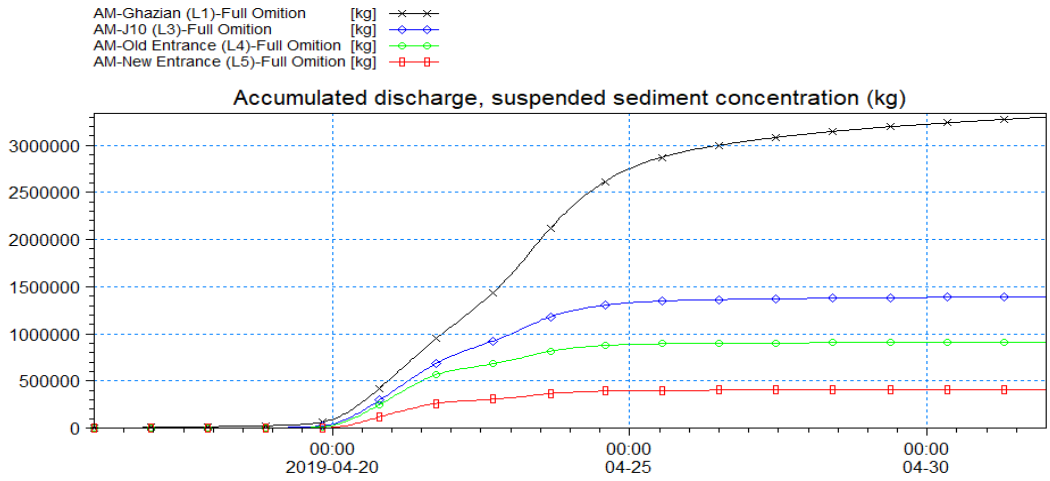
(ب) حذف اسکله برگشتی **(الف) حفظ اسکله برگشتی**

شکل ۱۴- الگوی نشست رسوبات در محدوده بندر در طول سیلاب متوسط

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.3.3]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.26]



شکل ۱۵-مقادیر تجمعی عبور رسوبات از مقاطع کنترل در سیلاب متوسط- شرایط فعلی اسکله برگشتی



شکل ۱۶-مقادیر تجمعی عبور رسوبات از مقاطع کنترل در سیلاب متوسط- حذف اسکله برگشتی

به منظور بررسی دقیق‌تر موضوع، مقادیر کمی عبور رسوبات از مقاطع مختلف و درصد نشست رسوبات در بخش‌های مختلف در جدول ۲، جدول ۳ و شکل ۱۷ ارائه شده است. بر اساس مقادیر ارائه شده در جدول ۲، در دوره مدلسازی سیلاب متوسط حدود ۳,۳۰۰,۰۰۰ کیلوگرم معادل حدود ۳۰,۰۰۰ متر مکعب رسوب از مقطع غازیان وارد کانال بندر می‌شود. از این مقدار، حدود ۷۰ درصد در کانال قدیم بندر و حدود ۱۵ درصد در حوضچه جدید ترسیب می‌شود و تنها حدود ۱۵ درصد رسوبات از دهانه جدید خارج می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که حذف اسکله برگشتی تنها محل نشست رسوبات را به صورت موضعی جابجا می‌کند و تاثیر معناداری بر میزان خروج رسوبات از دهانه جدید بندر به دریا ندارد (اختلاف کمتر از ۳ درصد است).

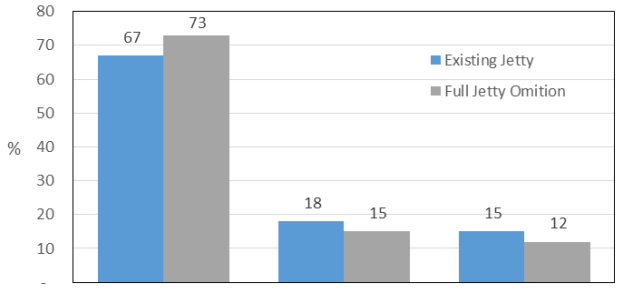
جدول ۲- مقادیر تجمعی عبور رسوبات از مقاطع کنترل در سیلاب متوسط

مقطع	مقدار تجمعی عبور رسوبات (kg)	
	شرایط فعلی	حذف اسکله برگشتی
پل غازیان (L1)	۳,۳۰۵,۳۹۰	۳,۳۰۰,۶۵۰
مقابل اسکله برگشتی (L3)	۱,۵۴۱,۳۰۰	۱,۳۹۳,۳۱۰
دهانه قدیم بندر (L4)	۱,۰۸۹,۸۳۰	۹۱۱,۲۲۳
دهانه جدید بندر (L5)	۴۷۶,۵۳۱	۴۰۵,۳۳۴

جدول ۳- درصد نشست رسوبات در بخش های مختلف بندر- سیلاب متوسط

مقطع	میزان نشست رسوبات در بندر و عبور از دهانه (٪)	
	شرایط فعلی	حذف اسکله برگشتی
نشست در کانال قدیم	٪ ۶۷	٪۷۳
نشست در حوضچه جدید	٪۱۸	٪۱۵
خروج از دهانه جدید بندر	٪۱۵	٪۱۲

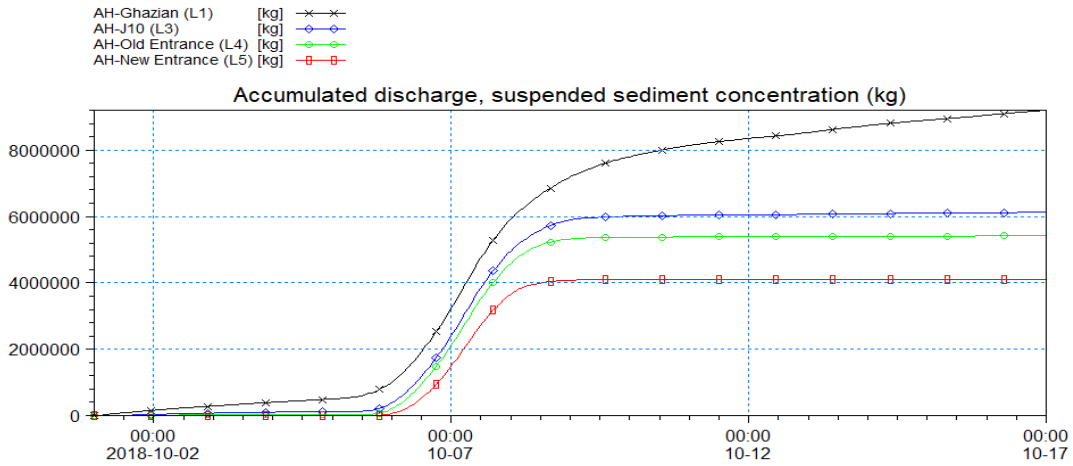
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.3.3]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.26]



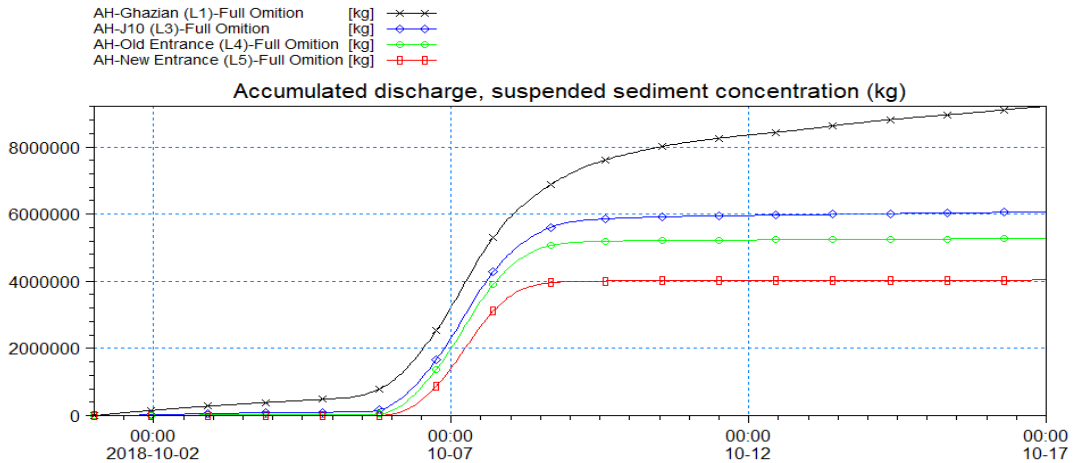
شکل ۱۷-درصد نشست رسوبات در بخش های مختلف بندر در حالت‌های مختلف اسکله برگشتی- سیلاب متوسط

نکته جالب توجه این است که حذف اسکله برگشتی نه تنها منجر به تخلیه حجم بیشتری از رسوبات به دریا نمی‌شود، بلکه احتمالاً به دلیل افزایش عرض مقطع عبور جریان، منجر به نشست بخش بیشتری از رسوبات در کانال بندر می‌شود؛ گرچه این اختلاف نیز ناچیز است. در واقع حذف اسکله برگشتی، تنها محل نشست رسوبات را اندکی جابجا کرده و در عبور رسوبات به دریا نقش قابل‌توجهی ندارد. در این سیلاب متوسط، مجموع نشست رسوبات در حوضچه قدیم و جدید بندر حداکثر در حدود ۲۶,۵۰۰ مترمکعب برآورد شده است. با فرض اینکه در حدود ۸ سیلاب متوسط در سال رخ دهد، حجم رسوبات ترسیب شده در بندر ناشی از سیلاب‌های متوسط در حدود ۲۱۲,۰۰۰ مترمکعب در سال برآورد می‌شود.

در سیلاب‌های شدید با مجموع دبی ورودی به بندر در حدود ۵۰۰ مترمکعب بر ثانیه، حجم بیشتری از رسوبات امکان تخلیه به دریا را دارند و درصد خروج رسوبات از بندر به حدود ۴۵ درصد می‌رسد. در سیلاب شدید نیز، حذف اسکله برگشتی، منجر به پخش جریان در عرض بیشتری از کانال می‌شود و محدوده نشست رسوبات به ساحل مقابل اسکله‌ها گسترش می‌یابد. تاثیر وجود یا عدم وجود اسکله برگشتی در خروج رسوبات از بندر برای شرایط سیلاب شدید، ناچیز و کمتر از ۱ درصد برآورد شده است.



شکل ۱۸- مقادیر تجمعی عبور رسوبات از مقاطع کنترل در سیلاب شدید- شرایط فعلی اسکله برگشتی



شکل ۱۹-مقادیر تجمعی عبور رسوبات از مقاطع کنترل در سیلاب شدید - حذف اسکله برگشتی

به منظور بررسی دقیق‌تر موضوع، مقادیر کمی عبور رسوبات از مقاطع مختلف و درصد نشست رسوبات در بخش‌های مختلف در جدول ۴، جدول ۵ و شکل ۲۰ ارائه شده است. بر اساس مقادیر ارائه شده، در دوره مدلسازی سیلاب شدید حدود ۹,۲۰۰,۰۰۰ کیلوگرم معادل حدود ۸۴,۰۰۰ متر مکعب رسوب از مقطع غازیان وارد کانال بندر می‌شود. از این مقدار، حدود ۴۰ درصد در کانال قدیم بندر و

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.3.3]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.26]

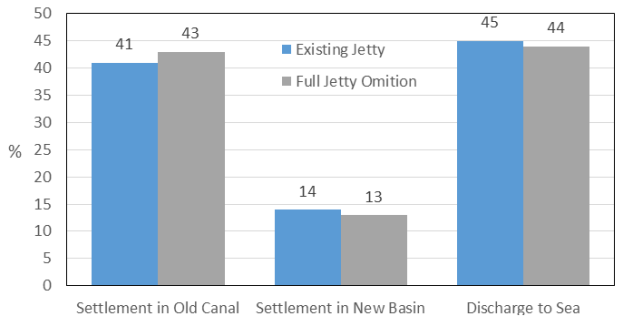
حدود ۱۵ درصد در حوضچه جدید ترسیب می‌شود و مابقی رسوبات (حدود ۴۵ درصد) از دهانه جدید خارج می‌شود.

جدول ۴- مقادیر تجمعی عبور رسوبات از مقاطع کنترل در سیلاب شدید

مقطع	مقدار تجمعی عبور رسوبات (kg)	
	شرایط فعلی	حذف اسکله برگشتی
پل غازیان (L1)	۹,۲۰۲,۳۴۰	۹,۲۱۰,۳۶۰
مقابل اسکله برگشتی (L3)	۶,۱۲۷,۱۲۰	۶,۰۶۶,۱۱۰
دهانه قدیم بندر (L4)	۵,۴۲۰,۱۱۰	۵,۲۷۵,۰۳۰
دهانه جدید بندر (L5)	۴,۱۱۳,۱۱۰	۴,۰۳۷,۶۴۰

جدول ۵- درصد نشست رسوبات در بخش های مختلف بندر- سیلاب شدید

مقطع	میزان نشست رسوبات در بندر و عبور از دهانه (٪)	
	شرایط فعلی	حذف اسکله برگشتی
نشست در کانال قدیم	٪۴۱	٪۴۳
نشست در حوضچه جدید	٪۱۴	٪۱۳
خروج از دهانه جدید بندر	٪۴۵	٪۴۴



شکل ۲۰- درصد نشست رسوبات در بخش های مختلف بندر در حالت‌های مختلف اسکله برگشتی- سیلاب شدید

در سیلاب شدید، با توجه به سرعت بالای جریان، حجم بیشتری از رسوبات امکان تخلیه به دریا را دارند اما مشابه سیلاب متوسط، حذف اسکله برگشتی نه تنها تخلیه رسوبات به دریا را تسهیل نمی‌کند، بلکه به صورت جزئی میزان نشست رسوبات در بندر را افزایش می‌دهد. با حذف اسکله برگشتی و افزایش عرض مقطع، سرعت جریان در کانال کاهش یافته و نشست رسوبات تسریع می‌شود. با این وجود، تغییر در حجم رسوبات تخلیه شده در دریا ناشی از حذف اسکله برگشتی ناچیز است. اعمال چنین تغییراتی موضعی در بندر، تنها محل نشست رسوبات را اندکی جابجا کرده و در عبور رسوبات به دریا نقش قابل‌توجهی ندارد.

در این سیلاب شدید، مجموع نشست رسوبات در بندر حداکثر در حدود ۴۶,۰۰۰ مترمکعب برآورد شده است. با فرض وقوع ۲ سیلاب شدید در سال، حجم رسوبات ترسیب شده در بندر ناشی از سیلاب‌های شدید در حدود ۹۲,۰۰۰ مترمکعب برآورد می‌شود. بر این اساس، حجم رسوبات با منشاء تالاب که طی دو سیلاب شدید و هشت سیلاب متوسط در طول یک سال در بندر رسوب می‌کنند در حدود ۳۱۴,۰۰۰ مترمکعب برآورد شده است.

نتیجه‌گیری

بندر انزلی یکی از سه بندر اصلی سواحل شمالی کشور محسوب می‌شود. این بندر از ابتدا بر روی مصب روگاهای متصل به تالاب انزلی ساخته شده بود و از این رو، همواره در معرض رسوبات ورودی از سمت تالاب قرار داشته و عملیات لایروبی به طور پیوسته در آن انجام شده است. در سال‌های اخیر، با توجه به کاهش قابل‌توجه سطح آب دریای خزر و افزایش حجم رسوبات تالاب ناشی از شرایط بالادست، حجم رسوبات با منشا تالاب در بندر افزایش یافته است. روند افزایش رسوباتی که از تالاب به کانال و حوضچه بندر وارد می‌شوند متاثر از عوامل متعددی در بالادست بندر است که از آن جمله می‌توان به تخلیه فاضلابهای شهری و صنعتی در تالاب، جنگل‌زدایی‌ها، فرسایش خاک، ساخت و سازهای بی‌رویه در حاشیه رودخانه‌های ورودی به تالاب و خود تالاب، جاده‌سازی و احداث پل‌های موقت روی رودخانه‌های منتهی به تالاب و مواردی از این دست اشاره کرد. با افزایش حجم رسوباتی که با منشا تالاب به بندر وارد می‌شوند و منجر به افزایش شدید حجم لایروبی مورد نیاز در بندر در سال‌های اخیر شده‌اند، پیشنهاداتی در خصوص حذف اسکله برگشتی (اسکله شماره ۱۰ بندر) با هدف تسهیل عبور رسوبات از کانال بندر و جلوگیری از نشست آنها در حوضچه مطرح شده است. این راهکار، با این تصور پیشنهاد شده است که اسکله برگشتی به علت راستای عمود بر جریان، مانند سدی در برابر رسوبات عمل می‌کند و در تجمع رسوبات در تالاب تاثیر گذاشته‌اند. برای بررسی صحت این ادعا، در این مقاله، تاثیر اسکله برگشتی بر الگوی جریانات و رسوبگذاری در بندر با استفاده از شبیه‌سازی ریاضی مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس مطالعات انجام شده در محدوده طرح، جریان‌های سیلابی نقش اصلی در انتقال رسوبات با منشا تالاب در بندر را دارند. بر این اساس، مدلسازی جریان و رسوب برای شرایط سیلابی مختلف انجام شده است. مقایسه سرعت جریان در مقاطع مختلف نشان از آن دارد که وجود یا عدم وجود اسکله برگشتی، تاثیر چندانی بر سرعت جریان در بخش‌های ابتدایی و انتهایی محدوده بندر ندارد. حذف اسکله برگشتی، تنها سرعت جریان در مقطع روبروی اسکله برگشتی را به صورت موضعی کاهش می‌دهد که با توجه به افزایش عرض مقطع قابل پیش‌بینی بوده است.

مدل‌سازی انتقال رسوبات نشان داد که در جریان‌های معمولی (غیر سیلابی) عمده رسوبات ورودی به کانال، با توجه به سرعت‌های کم

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.3.3]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.26]

جریان غیرسیلابی در همان قسمت‌های ابتدایی کانال (قبل از اسکله برگشتی) رسوب می‌کنند و به حوضچه جدید نمی‌رسند. بنابراین تغییر در اسکله برگشتی که باعث افزایش عرض و کاهش سرعت جریان در آن مقطع می‌شود تاثیر چندانی بر عبور رسوبات نخواهد داشت. در سیلاب‌های متوسط تا شدید، حذف اسکله برگشتی باعث می‌شود جریان در عرض بیشتری از کانال توزیع شود و محدوده نشست رسوبات به ساحل مقابل اسکله‌ها گسترش یابد. بیلان عبور رسوب از مقاطع مختلف کانال و حوضچه بندر نیز نشان داد که در یک سیلاب متوسط با مجموع دبی ورودی به بندر در حدود ۳۰۰ مترمکعب بر ثانیه، حدود ۸۵ درصد رسوبات در کانال و حوضچه بندر رسوب می‌کند و حدود ۱۵ درصد رسوبات از دهانه جدید بندر به دریا تخلیه می‌شود. حذف اسکله برگشتی، تنها محل نشست رسوبات در بندر را به صورت موضعی جابجا می‌کند و در تسهیل تخلیه رسوبات به دریا نقش موثری ندارد. در یک سیلاب شدید با مجموع دبی ورودی به بندر در حدود ۵۰۰ مترمکعب بر ثانیه، حجم بیشتری از رسوبات امکان تخلیه به دریا را دارند و درصد خروج رسوبات از بندر به حدود ۴۵ درصد می‌رسد. در سیلاب شدید نیز، حذف اسکله برگشتی، منجر به پخش جریان در عرض بیشتری از کانال می‌شود و محدوده نشست رسوبات به صورت موضعی تغییر می‌کند ولی میزان خروج رسوبات از بندر با حذف اسکله برگشتی تغییر محسوسی نخواهد داشت. اگرچه سرعت جریان پشت اسکله برگشتی به علت امتداد عمود بر کانال، به صورت موضعی کاهش می‌یابد و منجر به تجمع رسوبات در پشت آن می‌شود، اما حذف اسکله برگشتی تنها باعث می‌شود این رسوبات در بخش بزرگتری از عرض کانال و در یک محدوده بزرگتر پخش شوند. بنابراین حذف اسکله برگشتی، تنها تاثیرات موضعی بر سرعت جریان و نشست رسوبات در بندر داشته و الگوی کلی جریانات و عبور رسوبات از بندر را تغییر نمی‌دهد. لذا تصور این که اسکله برگشتی در مقیاس بزرگ بر تخلیه رسوبات تالاب به دریا موثر باشد، پایه علمی نداشته و صحیح نیست.

کلید واژگان

1- Keep Sediment Moving
2- Depth-Integrated Incompressible Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations
3- Hydrodynamic
4- Mud Transport
5- Vertical Eddy Viscosity
6- Advection-Diffusion

۶ – مراجع

1- Ministry of Energy Water Research Institute (2005), *Marine measurements, sediment and mathematical modeling of Anzali Port.* Ports and Maritime Organization. (In Persian)
2- Pouya Tarh Pars Consultant Engineers (2015), *Monitoring and modeling studies of northern coasts*, Ports and Maritime Organization. (In Persian)
3-Japan International Cooperation Agency (2012), *Anzali Wetland Ecological Management Project reports.*
4-Sazeh Pardazi Iran (2015), *Update and review of Iranian commercial ports master plan.* Ports and Maritime Organization. (In Persian)
5-Road, Housing and Urban Development Research Center (2020), *Studies of the impact of Anzali port development on hydrodynamic and sedimentation regime*. Ports and Maritime Organization. (In Persian)
6- Road, Housing and Urban Development Research Center (2023), *Investigation of the effect of changing the length of Jetty No.10 of Anzali port on hydrodynamics and sediments originating from the lagoon*, Ports and Maritime Organization. (In Persian)
7-Khakbaft Consultant Engineers (2021), *Reviewing studies on sedimentation in the country's ports.* Ports and Maritime Organization. (In Persian)
8- Khosropasand, M., Nassiraei, H., & Lashteh Neshaei, S. A. (2022). *Investigation of the effects of the construction of the new breakwater on Rivers connecting Anzali lagoon and port*. Journal of Iranian Water Engineering Research, Vol.1, p.45-56. doi: 10.22034/ijwer.2022.310767.1008 (In Persian)
9-DHI-MIKE user manuals,(2022).

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.3.3]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.26]