



مدیریت آب و آبیاری

دوره ۱۲ ■ شماره ۳ ■ پاییز ۱۴۰۱

صفحه‌های ۵۶۰-۵۴۱

DOI: 10.22059/jwim.2022.339544.973

مقاله پژوهشی:

بررسی تغییرات ریخت‌شناسی مصب‌ها (شبیه‌سازی عددی رودخانه شلمانرود با نرم‌افزار MIKE21)

سارا غفاری^۱، سید حسین قریشی نجف‌آبادی^{۲*}، محمدرضا مجدزاده طباطبایی^۲

۱. کارشناس ارشد، گروه مهندسی منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۲. استادیار، گروه مهندسی منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۲/۰۳ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۴/۲۸

چکیده

ویژگی‌های هندسی و ریخت‌شناسی هر رودخانه از مشخصه‌های اصلی آن به‌شمار می‌آید که به‌وسیله آن برنامه‌ریزی مدیریتی حوضه و حفظ منابع طبیعی پیرامون آن انجام می‌پذیرد. مصب‌ها در دهانه رودخانه‌ها در یک منطقه مرزی بین دریا و خشکی تشکیل می‌شوند. تغییر شکل مصب‌ها بر اثر رسوب‌گذاری و فرسایش، باعث تغییر الگوی جریان رودخانه می‌شود. در این پژوهش از مدل هیدرودینامیک (HD) برای محاسبه مقادیر دبی و سرعت و از مدل انتقال رسوب (ST) برای محاسبه بار معلق و تراز بستر استفاده شده است. نتایج حاصل از مدل هیدرودینامیک نشان داد که حداکثر سرعت در ۱۷ کیلومتری ایستگاه شلمان (ابتدای بازه سوم) تقریباً ۴/۷ متر بر ثانیه است. این مقدار با نزدیک شدن به انتهای مصب تا حدود ۱/۵ متر بر ثانیه کاهش می‌یابد. به‌دلیل اهمیت نقش سیلاب‌ها در تغییرات بستر، مدل با استفاده از دبی سیلاب ۲۵ ساله رودخانه شلمانرود (۳۵۵ مترمکعب بر ثانیه) برای بازه یک ساله اجرا شد. پس از آن مسیر رودخانه به سه قسمت تقسیم شد و رفتار رودخانه شلمانرود با توجه به تغییر شکل ایجادشده در مقاطع هر قسمت بررسی شد. بیش‌ترین مقدار رسوب‌گذاری در قسمت اول در حالت غیرسیلابی ۰/۴۱ متر و در حالت سیلابی ۱/۱ متر است. در قسمت دوم رسوب‌گذاری افزایش می‌یابد و در حالت غیرسیلابی به ۰/۸ متر و در حالت سیلابی به ۲ متر می‌رسد. در قسمت سوم مقدار رسوب‌گذاری بیش‌تر از قسمت‌های اول و دوم خواهد بود. بیش‌ترین مقدار رسوب‌گذاری در این قسمت در حالت غیرسیلابی ۰/۵۳ متر و در حالت سیلابی ۱/۴ متر می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: تغییرات بستر، شبیه‌سازی عددی، مدل انتقال رسوب، مدل هیدرودینامیک، مصب، مورفولوژی، نرم‌افزار MIKE21.

Investigation of morphological changes of estuaries (Numerical simulation of Shalmanrood river with MIKE21 software)

Sara Ghaffari¹, Seyed Hossein Ghoreishi Najaf Abadi^{2*}, Mohamad Reza Majdzadeh Tatatabaei²

1. M. Sc., Department of Water Resources Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

2. Assistant Professor, Department of Water Resources Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

Received: February 22, 2022

Accepted: July 19, 2022

Abstract

Geometric and morphological characteristics of each river are its main characteristics by which the management planning of the basin and the conservation of natural resources around it is done. Estuaries are formed at the mouth of rivers in a border area between sea and land. Deformation of estuaries due to sedimentation and erosion changes the pattern of river flow. In this research, the hydrodynamic model (HD) is used to calculate the flow rates and velocity and the sediment transport model (ST) is used to calculate the suspended load and bed level. The results of the hydrodynamic model showed that the maximum speed at 17 km of Shalmaneh station (beginning of the third interval) is approximately 4.7 m/s. This value decreases to about 1.5 meters per second as we approach the end of the estuary. Due to the importance of the role of floods in bed changes, the model was implemented using the 25-year flood discharge of Shalmanrood River (355 cubic meters per second) for a period of one year. After that, the river route was divided into three parts and the behavior of Shalmanrud river was studied according to the deformation created in the sections of each part. The maximum amount of sediment in the first part is 0.41 m in non-flood condition and 1.1 m in flood condition. In the second part, sedimentation increases and in non-flood state reaches 0.8 meters and in flood state reaches 2 meters. In the third part, the amount of sediment will be more than the first and second parts. The maximum amount of sediment in this part is 0.53 m in non-flood condition and 1.4 m in flood condition.

Keywords: Bed changes, estuary, hydrodynamic model, MIKE21 software, morphology, numerical simulation, sediment transport model.

مقدمه

شناسایی عوامل مؤثر بر هیدرودینامیک مصب‌ها که به‌عنوان فرایندهای انتقال می‌باشند، از عوامل مهم و تأثیرگذار در تعیین هندسه و شکل مصب‌ها محسوب می‌شود. الگوی جریان در رودخانه‌های طبیعی و به‌ویژه رودخانه‌های مئاندری، به‌عنوان یکی از رایج‌ترین انواع رودخانه‌ها در طبیعت، بسیار پیچیده است. الگوی غالب برای شکل رودخانه در پلان، پیچانرودی می‌باشد. به‌خاطر حرکت پیچانرودها به پایین‌دست و ناپایداری آن خاک‌های بارززش کناره‌ها شسته شده و از بین می‌روند؛ علت اصلی این ناپایداری توزیع نامتقارن سرعت در عرض و طول رودخانه می‌باشد (Naji Abhari, 2008).

وجود جریان‌های سیلابی سبب حمل رسوب و بار معلق از بالادست به پایین‌دست و رسوب‌گذاری خواهد شد. مطالعاتی که در سال‌های اخیر انجام شده است، نشان‌گر تغییرات محسوس در بسیاری از رودخانه‌ها بر اثر رسوب‌گذاری و فرسایش می‌باشد. آگاهی از روند این تغییرات و کنترل آن، یکی از نیازهای مدیریتی بوده و بسیار دارای اهمیت می‌باشد.

Amirkiyai *et al.* (2011) با استفاده از اطلاعات

هیدرولیکی منطقه طرح و به‌کمک نرم‌افزار MIKE21 به بررسی روند تغییرات خط ساحل در مصب رودخانه سفیدرود پرداختند. آن‌ها نوسانات و تغییرات دبی رسوبات ورودی به دریا از طرف رودخانه را به‌عنوان مهم‌ترین عامل در تغییر شکل و جابه‌جایی مصب سفیدرود معرفی نمودند و با بررسی تایچ حاصل از مدل ST به این نتیجه رسیدند که رودخانه سفیدرود در ناحیه مصب دارای فعالیت شدید رسوب‌گذاری است، به‌طوربه‌طوری‌که بیش‌ترین تغییرات بستر در ناحیه ساحلی، نزدیک به ورودی مصب و به‌صورت کم‌عمق‌شدگی (حدود ۵۰ سانتی‌متر) اتفاق می‌افتد و بنابراین اقدامات حفاظتی در

منطقه ضروری است. Ismaili Varki *et al.* (2011) در رودخانه شلمانرود به‌کمک مدل عددی CCHE2D به شبیه‌سازی حذف مئاندر و بررسی رفتار رودخانه پرداختند. اثرات گزینه‌های مختلف اصلاح مسیر در بازه پیچانرودی از رودخانه شبیه‌سازی شد. ارزیابی‌های صورت‌گرفته بر روی تغییرات، تنش برشی را به‌عنوان یک شاخص مناسب جهت پیش‌بینی تغییرات هندسی و هیدرودینامیکی نشان داد که در میان گزینه‌های مختلف اصلاح مسیر، بیش‌ترین تغییرات در پیکره رودخانه ناشی از گزینه اصلاح مسیر با حذف دو قوس می‌باشد که در اثر ایجاد آن طول رودخانه ۶۸۶ متر کاهش یافته و به مقدار ۳۰۲۹ متر می‌رسد. هم‌چنین مناسب‌ترین گزینه برای اصلاح مسیر، میانبری است که با حذف بخشی از دو قوس ایجاد می‌شود و طول رودخانه از ۷۷۳۵ متر به ۶۵۴۸ متر کاهش می‌یابد. Karimi *et al.* (2016) به بررسی الگوی جریان و رسوب و تغییرات مورفولوژی مصب رودخانه سفیدرود با استفاده از مدل عددی MIKE21 و داده‌های سنجش از راه دور پرداختند. ایشان به این نتیجه رسیدند که عواملی چون دبی و بار رسوب رودخانه و تراز سطح دریا و الگوی امواج و باد، از جمله مهم‌ترین عوامل مؤثر در این تغییرات هستند و این مطالعه می‌تواند زمینه‌ای مناسب برای مدیریت صحیح جهت توسعه پایدار منطقه و در نظر گرفتن تمهیدات لازم جهت جلوگیری از خسارات ناشی از نوسانات بلندمدت دریای خزر و هم‌چنین آگاهی کافی از وضعیت هیدرولیکی و رسوب رودخانه سفید رود را در منطقه دلتای سفیدرود فراهم آورد. Zanganeh & Haj Momeni (2016) به بررسی فرایند رسوب‌گذاری در خور بوشهر و مدل‌سازی منطقه با استفاده از نرم‌افزار MIKE21 پرداختند. نتایج نشان داد که در هر سال میزان رسوب‌گذاری در داخل خور بوشهر از حدود ۷ سانتی‌متر در جلو اسکله شرکت

مدل Delf3D مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که افزایش تراز آب باعث افزایش انتقال رسوب در حوضچه خواهد شد. هم‌چنین، بعد از دو پیوند، دلتای جزری به تعادل رسید و درحالی که تراز آب ثابت باشد، ارتفاع جزری بیش‌ترین مقدار را خواهد داشت.

توسعه فناوری‌های رایانه‌ای، مدل‌های عددی را به‌عنوان یک ابزار پر قدرت در تحلیل‌های مهندسی رودخانه در اختیار مهندسی قرار داده است. امکان گزارش‌دهی مناسب و مطلوب، امکان تبادل اطلاعات با سایر نرم‌افزارها به‌ویژه سامانه اطلاعات جغرافیایی، انعطاف‌پذیری مدل جهت شبیه‌سازی مسائل مورد نظر و وجود حل‌گرهای قوی و هوشمند از معیارهای انتخاب نرم‌افزار برای شبیه‌سازی می‌باشند (Razaghi, 2010).

در این پژوهش مدل دو بعدی مایک ۲۱ با هدف شبیه‌سازی جریان‌های غیرسیلابی و سیلابی رودخانه شلمانرود به‌صورت دوبعدی در پلان و شناسایی مناطق کم‌عمق حاصل از رسوب‌گذاری مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به بررسی‌های انجام‌شده در مقاله‌های ذکر شده عواملی مانند امواج و ارتفاع آن‌ها، افزایش تراز آب، وقوع سیلاب‌ها و ... در تغییر مورفولوژی مصب‌ها مؤثر است و ریخت‌شناسی مصب‌ها برای بررسی تغییرات احتمالی در محل مصب نیازمند مطالعات، پژوهش‌ها و تحلیل‌های گسترده‌تر می‌باشد.

مواد و روش‌ها

الگوی جریان در مصب‌ها به‌دلیل وقوع تحولات طبیعی و مصنوعی، همواره دستخوش تغییر می‌باشد. به‌علاوه، الگوی جریان رسوب در مصب، کاملاً حالت سه‌بعدی دارد و مدل‌های سه‌بعدی، دقیق‌تر می‌توانند الگوی جریان آشفته و طبیعت تأثیرگذار آن بر فرایند فرسایش، حمل

بازرگانی و خدمات بندری ایران (CPS) تا ۲۲ سانتی‌متر در محل اسکله کوثر خواهد بود. Taheri & Jafarzadeh (2020) به مدل‌سازی جریان دوبعدی و رسوب وارده به بندسارها بر روی مخروط افکنه توسط نرم‌افزار MIKE21 پرداختند و الگوهای غالب جریان و رسوب را در حضور و بدون حضور بندسارها بر مخروط‌افکنه‌ای واقع در خراسان جنوبی با اقلیم گرم و خشک شبیه‌سازی کردند. ایشان دریافتند که بندسارها در نقاط عمیق به‌دلیل تنش برشی و فشار منفذی زیاد مستعد شکست هستند و مقدار قابل توجهی از بار رسوبی خشکه‌رود اصلی وارد بندسارها می‌شود و به تبع آن تراز بستر پشت بندسار افزایش پیدا می‌کند. رسوبات جمع شده که حاوی خاک ریزدانه و مغذی هستند محیط مناسبی برای کشت و زرع فراهم می‌کند. Fateminejad & Ghiasi (2021) به بررسی نرخ انتقال رسوب در حوضچه مجتمع بندری شهید رجایی با استفاده از مطالعات هیدرودینامیک موج و جریان مدل عددی MIKE21 پرداختند. ایشان دریافتند که تأثیر جریان‌های جزرومدی در این منطقه بیش‌تر از تأثیر امواج می‌باشد. از دیگر عوامل مؤثر در مطالعات رسوب و تعیین الگوی رسوب‌گذاری بعد از شرایط هیدرودینامیکی، نوع، اندازه و جنس رسوبات بستر و ساحل در این منطقه می‌باشد. Huntley & Davidson (2002) با به‌دست‌آوردن توپوگرافی سطح آب و مدل‌کردن آن به‌وسیله MIKE21 مدول هیدرودینامیک و موج- باد طیفی نزدیک ساحل به بررسی مورفولوژی ساحلی در خلیج تیگنموث انگلستان پرداختند. هم‌چنین در این پژوهش با استفاده از تغییرات سطح آب ناشی از جزر و مد (۱/۷-۴/۲ متر)، انتقال رسوب ناشی از این تغییرات مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. Dissinayak et al. (2008) اثر تراز آب بر روی ریخت‌شناسی مصب Ameland واقع در دریای Dutch را در دو حالت تراز ثابت و تراز متغیر به‌وسیله

MIKE21 به‌عنوان داده‌های ورودی و تعیین ضریب زبری، تغییرات تراز آب و تغییرات سرعت جریان در محدوده پروژه تعیین خواهد شد. پس از آن با استفاده از مقادیر ذرات معلق بالادست منطقه مطالعاتی، تغییرات مقدار رسوب در محدوده پروژه تعیین می‌شود. در ادامه به نحوه مدل‌سازی و معادلات مربوطه پرداخته خواهد شد.

الف) مدل‌سازی هیدرودینامیک (HD) و معادلات حاکم

معادلات آب کم‌عمق: با انتگرال‌گیری از معادلات تکانه دوبعدی و معادله پیوستگی، معادلات دوبعدی آب کم‌عمق عبارتند از (روابط ۱، ۲، ۳ و ۴):

$$h = \eta + d \quad (1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hS \quad (2)$$

$$\frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial y} = \quad (3)$$

$$f\bar{v}h - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + hu_s S$$

$$\frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial x} = \quad (4)$$

$$f\bar{u}h - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{yy}) + hv_s S$$

که در این روابط، t زمان، x, y مؤلفه‌های مختصات کارترین، η ارتفاع سطح، d عمق آب ساکن، h عمق کل آب، u و v مؤلفه‌های سرعت در جهت x و y ، $f = 2\Omega \sin \phi$ پارامتر کوریولیس (Ω سرعت چرخشی زمین و ϕ عرض جغرافیایی)، g گشتاب گرانشی، ρ چگالی آب، S_{xx} ، S_{yy} ، S_{xy} و S_{yx} مؤلفه‌های تانسور تنش‌های تابشی، p_a فشار اتمسفر، ρ_0 چگالی منبع آب، S شدت تخلیه نقاط منبع‌ها و v_s و u_s سرعت آب تخلیه‌شده در آب محدود،

رسوب و تغییرات مورفولوژیک مصب‌ها را شبیه‌سازی کنند، اما استفاده از مدل‌های سه‌بعدی شبیه‌ساز الگوی جریان به‌دلیل حجم محاسبات بالا و محدودیت‌های موجود در ابزارهای محاسباتی تا حدودی غیراقتصادی و ناممکن می‌باشد، به‌علاوه بیش‌تر مدل‌های یک‌بعدی از تغییرات رخ داده‌شده در عرض رودخانه صرف‌نظر می‌کنند. لذا در این پژوهش از میان مدل‌های عددی دوبعدی موجود، مدل دوبعدی MIKE21، به‌واسطه قابلیت‌های منحصربه‌فرد این مدل (نظیر شبیه‌سازی جریان، انتقال رسوب، کیفیت آب و پخش و انتقال در رودخانه‌ها، مصب‌ها و دریاها با محدودیت‌های کم‌تر و ظرفیت‌های بیش‌تر) برای شبیه‌سازی الگوی جریان انتخاب شد. نرم‌افزار MIKE21 توسط انستیتوی هیدرولیک دانمارک ۱ طراحی شده و برنامه پیشرفته‌ای برای شبیه‌سازی جریان کم‌عمق با سطح آزاد، پارامترهای کیفیت آب، جابه‌جایی رسوب و روند رسوب‌گذاری و فرسایش می‌باشد. تراز آب و سرعت جریان در هر مکان از منطقه مورد مطالعه با اجرای مدول HD قابل بررسی است. این مدل، جریان را در یک سیال تک‌لایه (به‌طور عمودی همگن) شبیه‌سازی می‌کند. مدول ST مدل ریاضی MIKE21، ابزاری است جهت دستیابی به نرخ انتقال رسوبات ماسه‌ای و تغییرات تراز بستر وابسته به آن، در محدوده‌ای که تحت تأثیر جریان‌ها قرار دارد. در این مدول ظرفیت انتقال رسوب در هر گره از شبکه متعامد پوششی منطقه مدل نیز با استفاده از اطلاعات ژرفاسنجی، عمق آب، اندازه و دانه‌بندی دانه‌های رسوبی و مشخصات جریان به‌عنوان داده‌های ورودی، تعیین می‌شود. نرخ فرسایش نیز در محدوده مدل با استفاده از مقادیر محاسبه شده‌ی نرخ انتقال رسوبات ماسه‌ای، تخمین زده می‌شود (Kiaei, 2012).

با معرفی توپوگرافی بستر و تراز سطح آب به نرم‌افزار

شده است. مدل ویسکوزیته گردابی افقی می‌تواند در سه حالت متفاوت بدون گردابی^۱، فرمول گردابی ثابت^۲، فرمول اسماگارینسکی^۳ مشخص شود. با انتخاب فرمول گردابی ثابت باید ضریب گردابی $(\frac{m^2}{s})$ و با انتخاب فرمول اسماگارینسکی باید ضریب اسماگارینسکی مشخص شود. فرمت این ضرایب می‌تواند ثابت یا متغیر در محدوده مدل باشد. Smagarinsky (1963) پیشنهاد کرد مقیاس زیرشبکه انتقالات توسط تأثیر ویسکوزیته گردابی بیان شود که با مقیاس طول مشخصه رابطه دارد. مقیاس زیرشبکه ویسکوزیته گردابی عبارت است از (رابطه ۵):

$$A = c_s^2 l^2 \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (5)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (i, j = 1, 2)$$

که در آن، c_s یک ثابت، l طول مشخصه و S_{ij} نرخ تغییر شکل می‌باشد. ضریب اسماگارینسکی c_s باید ۰/۲۵-۱ باشد. براساس راهنمای مایک مقدار ۰,۲۸ برای این ضریب انتخاب شد (MIKE 21 Flow Model FM, 2017)

شرایط اولیه

معلوم‌بودن شرایط اولیه از جمله موارد موردنیاز در حل معادلات دیفرانسیل مشتق جزئی تابع زمان می‌باشد. شرایط اولیه همان تراز سطح آب و سرعت‌ها در سطح مدل می‌باشد. مقادیر اولیه برای متغیرهای هیدرودینامیک می‌تواند به سه صورت ثابت، متغیر مکانی ارتفاع سطح و متغیر مکانی عمق آب و سرعت‌ها اعمال شود. این شرایط در مدل به صورت صفر برای تراز آب و سرعت جریان در راستای u و v در نظر گرفته شد.

شرایط مرزی

پس از تعریف عمق‌سنجی مدل، توصیف سطح آب و جریان در مرزهای باز یا به عبارت دیگر توصیف شرایط مرزی مهم‌ترین کار در فرایند مدل‌سازی محسوب

τ_{sx} , τ_{sy} , τ_{bx} , τ_{by} ، مؤلفه‌های x, y تنش‌های باد و بستر است. \bar{u} و \bar{v} سرعت‌های میانگین عمقی و T_{ij} تنش‌های جانبی شامل اصطکاک چسبندگی و اصطکاک آشفتگی و همرفت دیفرانسیلی هستند.

مقاومت و یا زبری بستر توسط عدد مانینگ به مدل معرفی می‌شود. این ضریب بیانگر تأثیر اصطکاک کف بر الگوی جریان در مدل می‌باشد. در مدل مقاومت بستر می‌تواند به سه طریق بدون مقاومت بستر، عدد شزی و عدد مانینگ مشخص شود. فرمت این ضرایب می‌تواند ثابت یا متغیر در محدوده مدل باشد. در این پژوهش با توجه به کالیبراسیون مدل، عکس عدد مانینگ ۴۲ انتخاب شد.

نیروی کوریولیس

در این قسمت مدل عددی می‌تواند سه حالت متفاوت بدون نیروی کوریولیس، ثابت در محدوده مدل و متغیر در محدوده مدل را شامل شود. اگر گزینه ثابت در محدوده انتخاب شود نیروی کوریولیس با استفاده از یک مرجع عرض جغرافیایی (درجه) مشخصه ثابت محاسبه خواهد شد. اگر گزینه متغیر در محدوده انتخاب شود، نیروی کوریولیس براساس اطلاعات جغرافیایی داده معین در فایل شبکه‌بندی محاسبه خواهد شد. در این مطالعه به صورت متغیر در محدوده انتخاب شد.

ویسکوزیته گردابی

ویسکوزیته گردابی عاملی است که به منظور در نظر گرفتن اثرات پدیده‌های گوناگون بر میزان اتلاف انرژی جریان هم‌چون اتلاف انرژی ناشی از آشفتگی جریان در محیط دریا، در معادلات وارد می‌شود. لحاظ کردن پدیده‌های فوق در شبیه‌سازی به دلیل عدم شناخت دقیق از آن‌ها، با دشواری همراه است. لذا پارامتر ویسکوزیته گردابی به عنوان عامل جایگزین آن‌ها در محاسبات به کار گرفته

که در آن g شتاب گرانشی، u و v سرعت در راستای x و y و Δt فاصله گام زمانی و Δx وضوح مکانی و یک مقیاس طولی مشخصه در جهت x و Δy یک مقیاس طولی مشخصه در جهت y و h عمق کل آب است. Δx و Δy به وسیله طول حداقل لبه برای هر المان و عمق آب و مؤلفه سرعت معین شده در مرکز المان تقریب زده می‌شود.

برای معادلات انتقال در مختصات کارتیزین عدد کورانت CFL مشخص شده است که ماکزیمم عدد کورانت باید کم‌تر از یک باشد (رابطه ۸).

$$CFL = |u| \frac{\Delta t}{\Delta x} + |v| \frac{\Delta t}{\Delta y} \quad (8)$$

مقدار زمان شبیه‌سازی علاوه بر تعداد گره در عمق، به مقدار عدد کورانت نیز بستگی دارد.

فایل عمق‌سنجی و شبکه‌بندی

فایل عمق‌سنجی یکی از داده‌های ورودی مدل است. عمق هر نقطه را بر اساس اطلاعات درون‌یابی شده از نقشه‌های هیدروگرافی در هر منطقه با مقیاس ۱:۱۲۵۰۰۰ که از سازمان نقشه‌برداری تهیه شده بود، خارج شد و به صورت فایل x ، y و z آماده ورود به مدل MIKE ZERO جهت ساخت فایل شبکه‌بندی شد. بعد از ورود اطلاعات و تعریف مرزهای مدل به منظور در نظرگیری هرچه بهتر پدیده کاهش عمق در این مدل‌سازی، ریزکردن ابعاد المان‌ها در نزدیکی ساحل دقت مدل را در برآورد پارامترهای موردنیاز در نزدیکی ساحل افزایش می‌دهد. در این مطالعه با تحلیل‌های انجام شده و فرایندهای سعی و خطا برای بهینه‌کردن شبکه‌بندی مدل و تعداد گره‌ها و المان‌ها، ابعاد بزرگ‌ترین المان در محدوده ۱۰۰ مترمربع در نظر گرفته شد.

روش حل معادلات

روش حل معادلات در مدل به دو صورت است. مدت زمان شبیه‌سازی و دقت در حل معادلات دو پارامتر

می‌شود. تعیین و اعمال مناسب و صحیح شرایط مرزی ضروری است.

مرزها می‌توانند به صورت باز یا بسته تعریف شوند. در طول مرزهای بسته (مرزهای خشکی) دبی‌های نرمال برای همه متغیرها صفر اعمال می‌شود. در مرز بسته شرایط مرزی به دو صورت تعریف می‌شود که در حالت اول سرعت نرمال صفر^۵ است (بدین معنی که مؤلفه سرعت قائم صفر است) و در حالت دوم سرعت صفر^۶ است (بدین معنی که مؤلفه‌های سرعت قائم و مماسی صفر هستند).

شرایط مرز باز می‌تواند در شکل یک واحد ورودی (تخلیه) یا به عنوان تراز سطح برای معادلات هیدرودینامیک مشخص شود. برای معادلات انتقال یک مقدار مشخص یا یک گرادیان مشخص می‌تواند معین شود. در مرز باز شرط مرزی به چهار صورت سرعت معین^۷، دبی معین^۸، تراز معین^۹ و ورودی معین^{۱۰} تعریف می‌شود. در این مطالعه مرزها به صورت ورودی آب معین (m^3/s) در نظر گرفته شد.

پایداری مدل

در تمامی مدل‌هایی که با روش‌های عددی کار می‌کنند، پایداری و همگرایی مدل به مشخصات پارامترهای خاصی هم‌چون گام زمانی و گام مکانی مدل بستگی دارد. در مدل هیدرودینامیک جهت تعیین شرایط پایداری مدل، عدد کورانت تعیین شده است. به منظور دستیابی به پایداری غیرمشروط، عدد کورانت حداکثر یک است. برای معادلات آب‌های کم‌عمق در مختصات کارتیزین عدد کورانت CFL مشخص شده است (رابطه ۶):

$$CFL = C \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (6)$$

که در آن، C تندی موج است. Δt گام زمانی و Δx وضوح مکانی است. برای مدل‌سازی جریان، عدد CFL به عمق آب بستگی دارد (رابطه ۷):

$$CFL_{HD} = (\sqrt{gh} + |u|) \frac{\Delta t}{\Delta x} + (\sqrt{gh} + |v|) \frac{\Delta t}{\Delta y} \quad (7)$$

تراز بستر در مرز بالادست می‌باشد (روابط ۱۰ و ۱۱). معادله بار بستر (معادله میرپیتتر و مولر)^{۱۰}:

$$q_b = 8 \left(\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) g \right)^{0/5} d_{50}^{1/5} (\mu\theta - 0/047)^{1/5} \quad (10)$$

$$\theta = \frac{\gamma RS}{(\rho_s - \rho) g d_{50}} \quad (11)$$

$$\mu = \left(\frac{C}{C'} \right)^{1/5} = \left(\frac{18 \log \left(\frac{12h}{k_s} \right)}{18 \log \left(\frac{12h}{d_{90}} \right)} \right)^{1/5}$$

$$G_s = \frac{\rho_s}{\rho} \quad \text{و} \quad \tau_0 = \gamma RS$$

که در این روابط، q_b بار بستر در واحد عرض، θ پارامتر تنش برشی بی‌بعد، τ_0 تنش برشی بستر، G_s چگالی مخصوص ذرات بستر، μ فاکتور فرم بستر، C ضریب شزی، C' ضریب شزی مربوط به ذرات، k_s زبری مؤثر بستر، d_{50} و d_{90} قطر مؤثر ذرات و h عمق است.

معادله بار معلق (معادله وان راین)^{۱۱}: با کاربرد معادلات غلظت و سرعت متوسط، بار معلق به صورت زیر تعریف می‌شود (روابط ۱۲ تا ۲۴):

$$q_s = \frac{u_* c_a}{k} \left(\frac{a}{h-a} \right)^{z'} \left(\int_a^{0/5h} \left(\frac{h-z}{z} \right)^{z'} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) + \int_{0/5h}^h e^{-4z' \left(\frac{z}{h} - 0/5 \right)} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) dz \right) \quad (12)$$

$$q_s = F \cdot \bar{u} \cdot h \cdot c_a \quad (13)$$

$$F = \frac{\left(\frac{a}{h} \right)^{z'} - \left(\frac{a}{h} \right)^{1/2}}{\left(1 - \frac{a}{h} \right)^{z'} (1/2 z')} \quad (14)$$

$$z' = z + \Psi = \frac{w}{\beta k u_*} + 2/5 \left(\frac{w}{u_*} \right)^{0/8} \left(\frac{C_a}{C_o} \right)^{0/4} \quad (15)$$

$$w = \frac{10v}{d_s} \left(\left(1 + \frac{0.01 \left(\frac{Y_s - 1 \right) g d_s^3}{v^2} \right)^{0/5} - 1 \right) \quad (16)$$

$$d_s = \left(1 + \frac{0}{0.11(\delta_s - 1)(T - 25)} \right) d_{50} \quad (17)$$

(if $25 \leq T$, $d_s = d_{50}$)

$$a = \frac{1}{2\Delta} \quad \text{یا} \quad a = k_s \quad \text{و} \quad a_{\min} = \frac{0}{0.1h} \quad (18)$$

$$\beta = 1 + 2 \left(\frac{w}{u_*} \right)^2 \quad (\beta_{\max} = 2) \quad (19)$$

$$\delta_s = \frac{1}{2} \left(\frac{d_{84}}{d_{50}} + \frac{d_{50}}{d_{16}} \right) \quad (20)$$

$$D_* = d_{50} \left[\frac{\left(\frac{Y_s - 1}{\gamma} \right) g}{v^2} \right]^{1/3} \quad (21)$$

تعیین‌کننده شیوه حل معادلات می‌باشند. در روش اول^{۱۱} مدل‌سازی عددی حل معادلات با انتخاب مرتبه پایین معادله (مرتبه اول) سرعت حل معادلات بالا رفته و زمان کم‌تری برای اجرای مدل نیاز می‌باشد اما دقت در اجرای مدل پایین است. این روش براساس اولین مرتبه صریح روش اولر است. روش دوم^{۱۲} حل معادلات در زمان بیش‌تر اما با دقت بالاتر انجام می‌گیرد. این روش براساس دومین مرتبه روش رونگ کوتاه است.

تعیین گام زمانی حل معادلات

این مرحله یکی از مراحل مهم در برپایی مدل است و مقدار آن بستگی به ابعاد شبکه‌بندی و عدد کورانت دارد. افزایش گام زمانی باعث کاهش مدت اجرای مدل و افزایش امکان ناپایداری مدل می‌شود. در این مدل گام زمانی را می‌توان در یک بازه تعریف نمود. با توجه به معیار پایداری مدل، بازه انتخاب‌شده برای گام زمانی بین اعداد ۰/۰۱ و ۳۰ ثانیه انتخاب شد.

ب) مدل‌سازی انتقال رسوب (ST) و معادلات حاکم

معادلات پیوستگی رسوب

معادله پیوستگی رسوب، امکان پیش‌بینی تغییرات تراز بستر را به‌عنوان تابع نرخ انتقال رسوب فراهم می‌کند. الگوی مورد استفاده برای حل معادله پیوستگی رسوب الگوی پرایزمن می‌باشد (رابطه ۹).

$$\frac{\partial S}{\partial X} + (1 - \varepsilon) W * \frac{\partial Z}{\partial t} = 0 \quad (9)$$

که در آن، S انتقال رسوب (m^3/s)، X مختصات طولی، ε تخلخل، Z تراز بستر، T زمان، W عرض کانال می‌باشد.

برای حل معادله پیوستگی رسوب به شرایط مرزی بالادست نیاز است، که می‌تواند انتقال رسوب در مرز بالادست^{۱۳} یا تراز بستر در مرز بالادست^{۱۴} باشد. یک گزینه برای تعیین تغییرات تراز بستر در هر زمان، استفاده از

ج) منطقه مورد مطالعه و اجرای مدل

محدوده مطالعاتی در این مقاله بازه ۲۰ کیلومتری از حوضه آبریز رودخانه شلمانرود در شرق شهرستان لنگرود از توابع استان گیلان است که از شهر املش شروع می‌شود. این حوضه از شمال به دریای خزر، از جنوب و جنوب شرق به حوضه آبریز رودخانه شلمانرود، از شرق به حوضه آبریز رودخانه رودسر و از غرب و شمال غرب به ترتیب به حوضه‌های آبریز رودخانه‌های شمرد و لنگرود محدود می‌شود. حوضه آبریز رودخانه شلمانرود بین عرض جغرافیایی "۳۶° ۵۴' ۵۵" تا "۳۷° ۹' ۵۷" شمالی و طول جغرافیایی "۴۹° ۵۵' ۱۶" تا "۵۰° ۱۴' ۰۰" شرقی واقع شده است. مساحت این حوضه ۱۶۴ کیلومترمربع است که در ناحیه مصبی واقع شده است. طول کل رودخانه شلمانرود حدود ۳۱ کیلومتر می‌باشد که در این مطالعه از محل ایستگاه سلمان تا محل احداث سد پهلوان بست مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در شکل‌های (۱) و (۲) تصویر موقعیت منطقه مورد مطالعه در کشور قابل مشاهده است. با استفاده از نقشه برداری انجام شده توسط سازمان آب منطقه‌ای استان گیلان، اطلاعات نقاط مختلف رودخانه و حریم آن در بازه مورد مطالعه برداشت شد.

$$T = \frac{\tau'_0 - \tau_c}{\tau_c}, \quad \tau_c = (\rho_s - \rho)gd_{50}\theta_{cr} \quad (22)$$

$$1 < D_* \leq 4 \quad \theta_{cr} = 0/24(D_*)^{-1} \quad (23)$$

$$4 < D_* \leq 10 \quad \theta_{cr} = 0/14D_* - 0/64$$

$$10 < D_* \leq 20 \quad \theta_{cr} = 0/04(D_*)^{-0/01}$$

$$20 < D_* \leq 150 \quad \theta_{cr} = 0/013(D_*)^{0/29}$$

$$D_* > 150 \quad \theta_{cr} = 0/055$$

$$\tau'_0 = \rho g \left(\frac{\bar{u}}{C'}\right)^2 \quad \text{و} \quad u_* = \left(\frac{g^2}{c}\right)^{1/3} \bar{u} \quad \text{و} \quad (24)$$

$$C' = 18 \log\left(\frac{12h}{3d_{90}}\right) \quad \text{و} \quad C = 18 \log\left(\frac{12h}{k_s}\right) \quad \text{و}$$

$$C_a = 0/015 \left(\frac{d_{50}}{a}\right) \left(\frac{T^{1/5}}{D_*^{0/3}}\right)$$

که در این روابط، q_s بار معلق، F فاکتور شکل، z' و z عدد تعلیق، w سرعت سقوط ذرات، d_s نماینده ذرات رسوب معلق، D_* پارامتر ذرات، T پارامتر تنش برشی بستر، G_s چگالی مخصوص ذرات بستر، v ویسکوزیته سینماتیک، d_{16} ، d_{50} ، d_{84} و d_{90} قطر ذرات مواد بستر، τ_c تنش برشی بحرانی بستر، τ'_0 تنش برشی مؤثر بستر، u_* سرعت برشی بستر، C' ضریب شزی مربوط ذرات، C ضریب شزی، k_s زبری نیکورادسه، \bar{u} سرعت متوسط عمقی، $C_0 = 0.65$ غلظت حداکثر، $k=0.4$ ثابت وان کارمن، C_a غلظت در سطح مبنای a ، h عمق آب، a سطح مبنا و Δ ارتفاع فرم بستر می‌باشد.

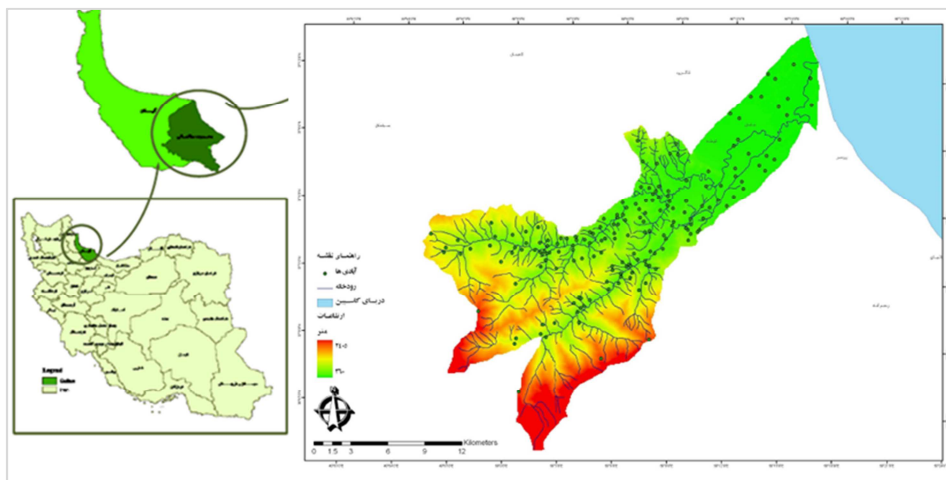


Figure 1. Picture of the location of the study area in the country (Report of the Regional Water Organization of Gilan Province)

بررسی تغییرات ریخت‌شناسی مصب‌ها (شبیه‌سازی عددی رودخانه شلمانرود با نرم‌افزار MIKE21)



Figure 2. Picture of Shalmanrud river after crossing Shalmaneh city to the entrance to the Caspian Sea in Chamkhaleh (Google Earth)

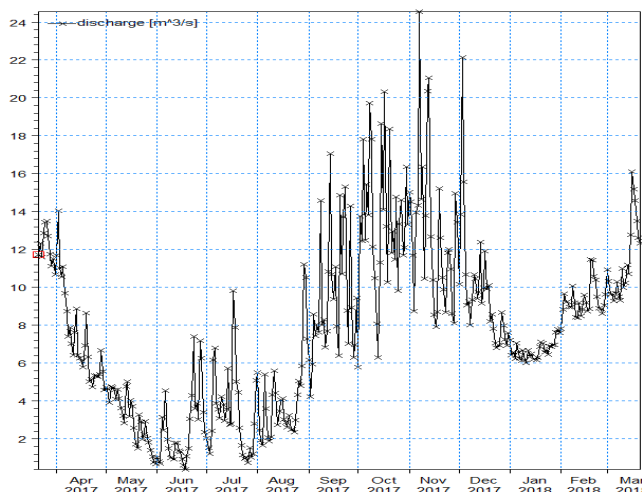


Figure 3. Picture of the discharge time curve at Shalman station, used as input to the model at the upstream border (daily average over 45 years from 1352 to 1396)

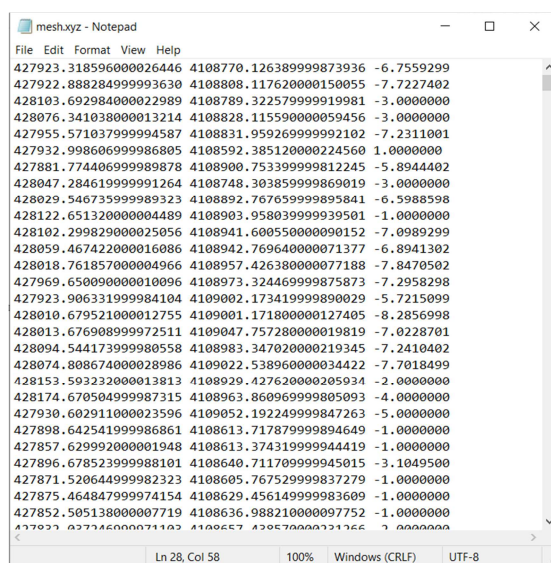


Figure 4. Image of hydrographic chart of Shalmanrud river estuary using existing data and constructed data

با توجه به معیار پایداری مدل، بازه انتخاب شده برای گام زمانی بین اعداد ۰/۱ و ۳۰ ثانیه انتخاب شد. کالیبراسیون مدل هیدرودینامیک براساس تغییرات تراز آب ایستگاه پایین دست به دو روش روزانه (فروردین ماه) و ماهانه (ماه‌های اول هر فصل) انجام شد (شکل‌های ۷ و ۸). میانگین خطای نسبی عمق آب کم‌تر از ۱۰ درصد در هر دو روش حاصل شد. پارامتر مورد استفاده جهت تغییر مقادیر تراز آب در مدل برای دستیابی به حداقل اختلاف با مقادیر مشاهداتی تراز آب، ضریب زبری بستر خواهد بود. با توجه به میزان انطباق نتایج مدل با پیش‌بینی‌های انجام شده به‌ازای مقادیر مختلف ضریب زبری بستر، مقدار ۴۲ برای عکس عدد مانینگ انتخاب شد. نحوه محاسبه خطای نسبی به‌صورت رابطه (۲۵) است:

$$E_{rel} = \frac{E_{abs}}{|x|} = \frac{|\text{مقدار واقعی} - \text{مقدار بدست آمده}|}{|\text{مقدار واقعی}|} \times 100 \quad (25)$$

اتوکد با پسوند (.dxf) ذخیره و با استفاده از نرم‌افزار Dxf2xyz به پسوند (.xyz) برای استفاده در MIKE تبدیل شد. داده‌های ورودی جریان به‌صورت سری زمانی یک ساله (میانگین روزانه در بازه زمانی ۴۵ ساله) به مدل معرفی شد. (شکل‌های ۳ و ۴).

به‌دلیل نیاز به تعیین مشخصات جریان در طول مسیر رودخانه و شیب بسیار ملایم منطقه‌ی مورد مطالعه نیاز است تا مش‌بندی مدل ریاضی در محدوده طرح با دقت و ابعاد کوچکی انجام شود. استقلال از مش با در نظر گرفتن اندازه مش‌های مختلف از ۲۰ مترمربع تا ۱۰۰۰ مترمربع در محدوده کوچکی از منطقه مورد مطالعه و به‌دست آوردن کم‌ترین خطای نسبی عمق آب در مش‌بندی ۱۰۰ مترمربع اثبات شد. بر این اساس برای افزایش دقت محاسبات ابعاد بزرگ‌ترین المان در محدوده ۱۰۰ مترمربع در نظر گرفته شده است (شکل ۵). در شکل (۶) شبکه‌بندی مدل قابل مشاهده است.

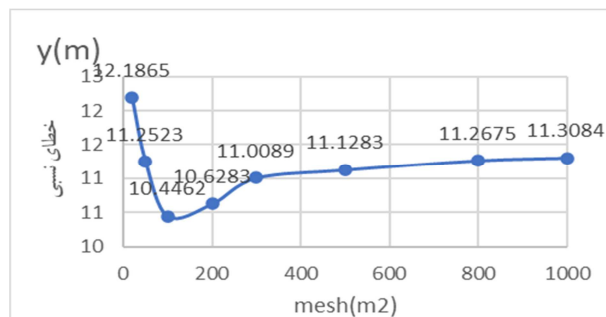


Figure 5. Picture of relative error of water depth in different meshes from 20 to 1000 m²

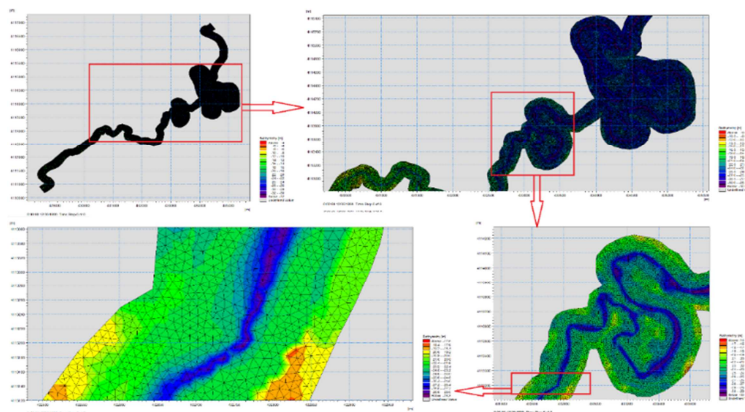


Figure 6. Picture of the Model Grid

بررسی تغییرات ریخت‌شناسی مصب‌ها (شبیه‌سازی عددی رودخانه شلمانرود با نرم‌افزار MIKE21)

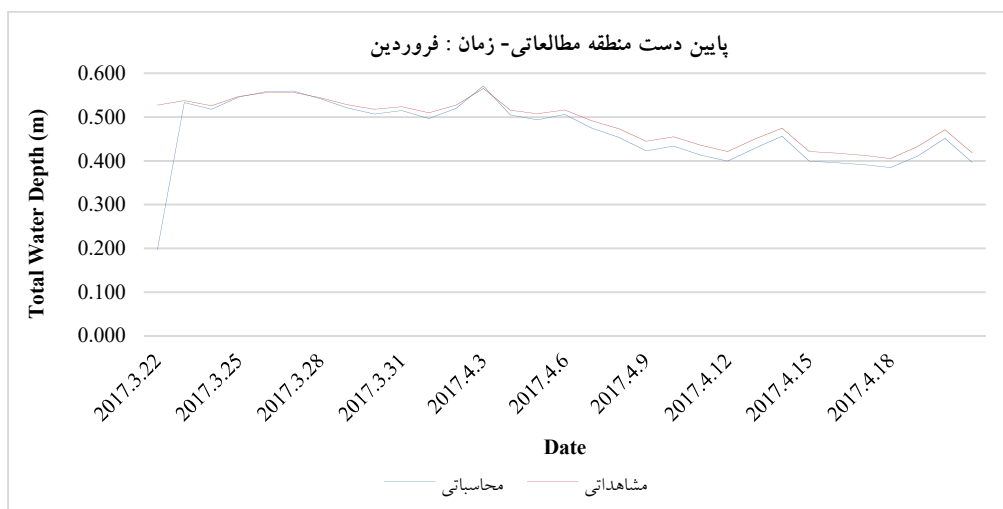


Figure 7. Comparison curve of model results and water depth prediction in a period of one month (first method)

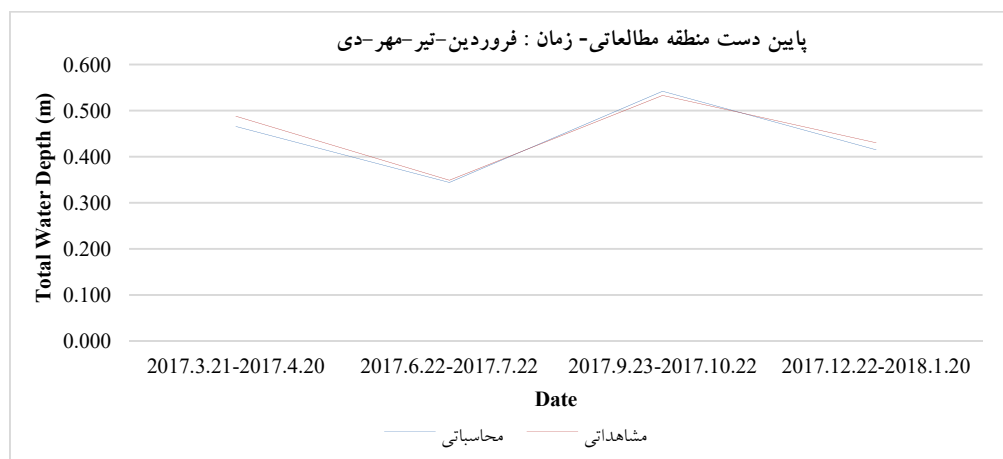


Figure 8. Comparison of model results and water depth forecast in the first months of each season (second method)

درصدی ضریب زبری مانینگ انجام و میانگین خطای نسبی محاسبه شد (شکل‌های ۱۱، ۱۲، ۱۳ و ۱۴). میانگین خطای نسبی عمق آب در تمامی محاسبات کم‌تر از ۱۰ درصد به‌دست آمد که نشان‌دهنده اطمینان از صحت ضریب زبری مانینگ استفاده‌شده در بخش کالیبراسیون مدل می‌باشد.

براساس نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی جریان، تغییرات تراز آب در پایین‌دست منطقه مطالعاتی حداقل ۰/۲ و حداکثر ۰/۸ متر می‌باشد. سرعت متناظر در این نقاط به‌ترتیب ۱/۵ و ۴/۷ متر بر ثانیه می‌باشد.

صحت‌سنجی مدل با عمق جریان به دو روش روزانه (بازه زمانی یک ساله) و ماهانه (ماه‌های دوم هر فصل) انجام شد (شکل‌های ۹ و ۱۰). میانگین خطای نسبی عمق آب کم‌تر از ۱۰ درصد در هر دو روش حاصل شد.

با توجه نتایج استخراج‌شده تا این مرحله و حصول میانگین خطای نسبی کم‌تر از ۱۰ درصد در روش‌های اول و دوم کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل، حساسیت‌سنجی فقط برای کم‌ترین و بیش‌ترین شدت جریان که به‌ترتیب در ماه‌های خرداد و آبان اتفاق می‌افتند، به‌صورت روزانه و با کاهش و افزایش ۱۰

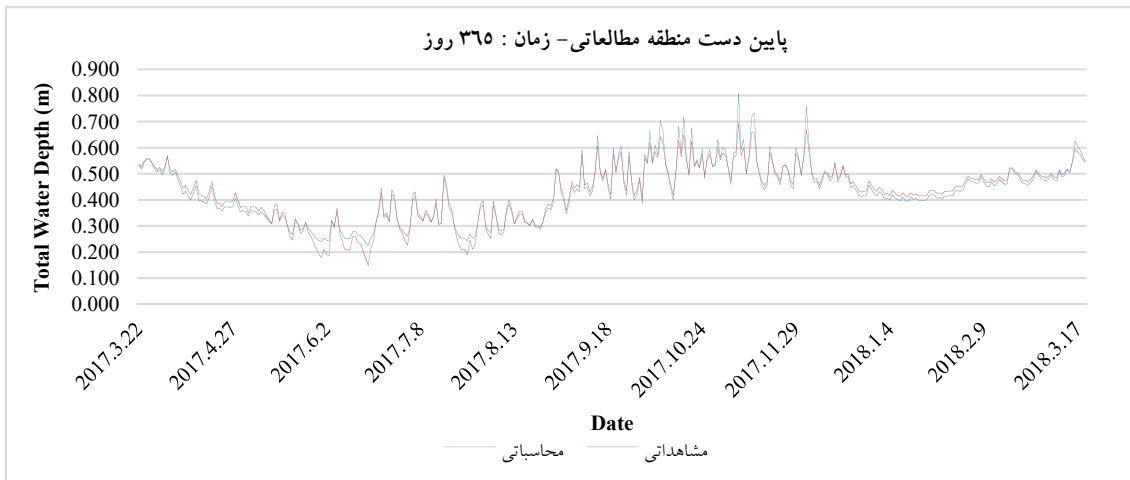


Figure 9. Comparison of flow depth changes along the estuary path over a period of one year (first method)

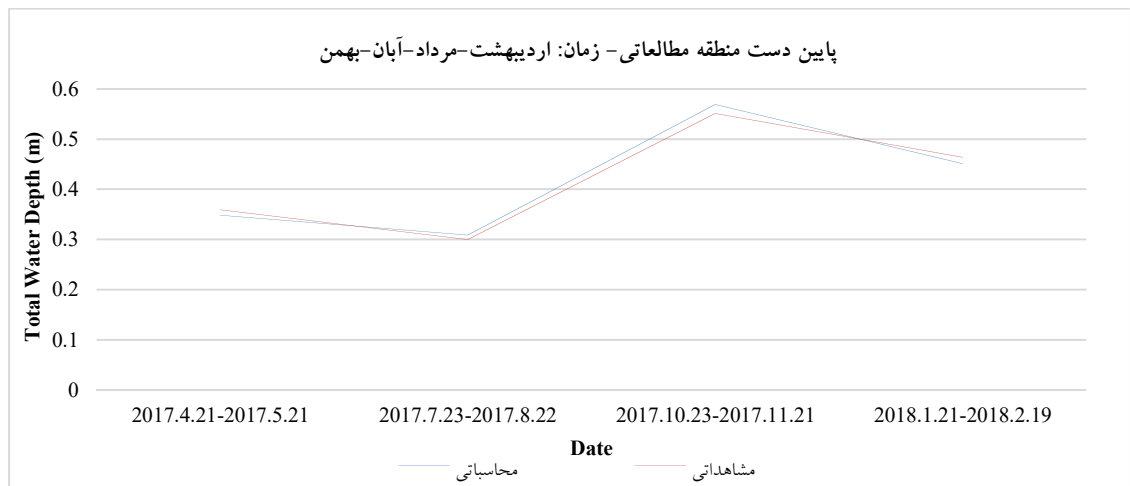


Figure 10. Comparison of model results and water depth forecast in the first months of each season (second method)

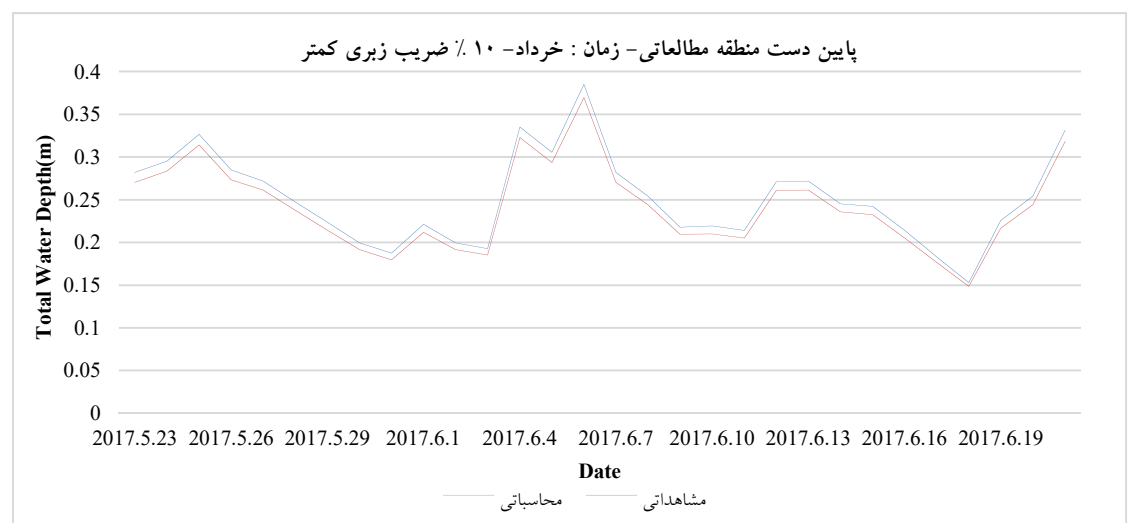


Figure 11. Comparison curve of model results and water depth forecast in June with a roughness coefficient of 37.8

بررسی تغییرات ریخت‌شناسی مصب‌ها (شبیه‌سازی عددی رودخانه شلمانرود با نرم‌افزار MIKE21)

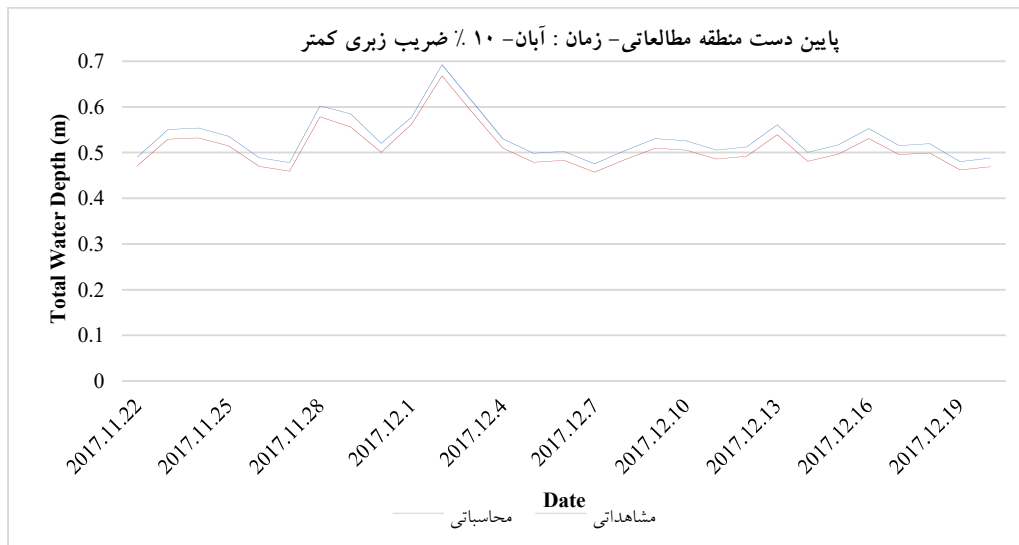


Figure 12. Comparison curve of model results and water depth forecast in November with a roughness coefficient of 37.8

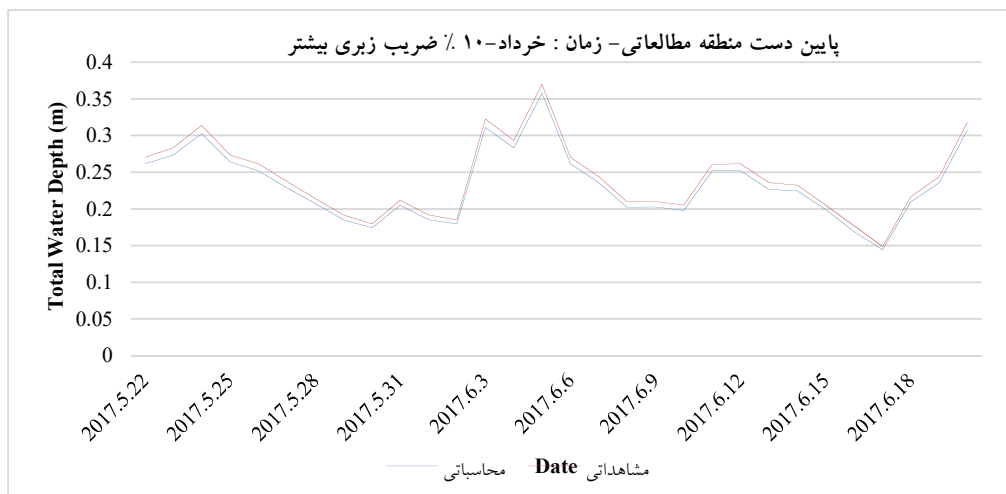


Figure 13. Comparison curve of model results and water depth forecast in June with a roughness coefficient of 46.2

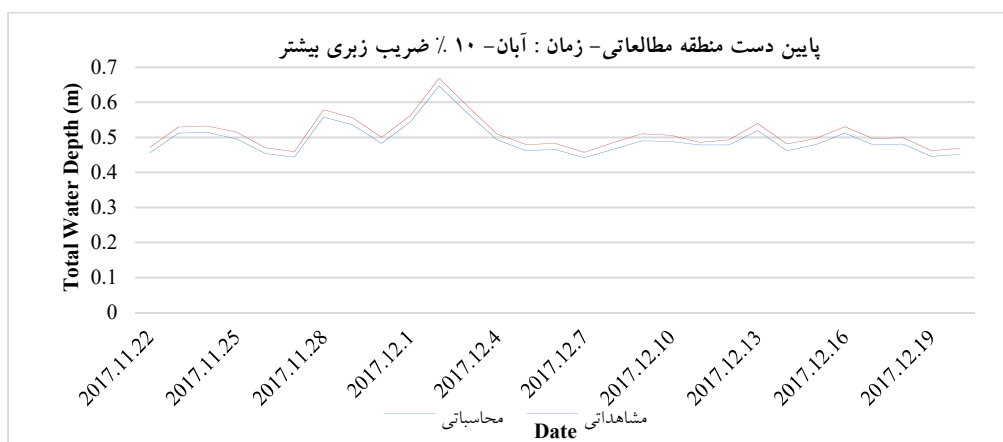


Figure 14. Comparison curve of model results and water depth forecast in November with a roughness coefficient of 46.2

مدیریت آب و آبیاری

دوره ۱۲ ■ شماره ۳ ■ پاییز ۱۴۰۱

براساس نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی تغییرات رسوب در محدوده پروژه، میزان تغییرات رسوب از رودخانه به سمت دریا در ماه‌های مختلف متفاوت است. بیش‌ترین مقدار رسوب بار معلق در آبان‌ماه (شکل ۱۷) و کم‌ترین مقدار در ماه مرداد (شکل ۱۸) می‌باشد.

پس از اجرای مدل جریان و انتقال رسوب با استفاده از داده‌های روزانه، به‌دلیل اهمیت نقش سیلاب‌ها در تغییرات بستر، مدل با استفاده از دبی سیلاب ۲۵ ساله برای بازه یک ساله اجرا شد و نتایج آن برای ماه‌های اول هر فصل استخراج شد. مقدار حداکثر سیلاب لحظه‌ای با دوره بازگشت ۲۵ ساله در رودخانه شلمانرود، ۳۵۵ مترمکعب بر ثانیه است (Consulting Engineers of Sefidroud, Gilan, 2010). این مقدار به‌عنوان ورودی در قسمت بالادست منطقه مطالعاتی (شرایط مرزی بالادست) در نظر گرفته شد.

پس از کالیبراسیون، صحت‌سنجی و حساسیت‌سنجی مدل هیدرودینامیک، مدل رسوب برای بازه یک‌ساله با استفاده از میزان غلظت ذرات رسوبی بالادست (شکل ۱۵) و مقداری ثابت برای غلظت ذرات رسوبی در پایین‌دست، چگالی، اندازه ذرات رسوبی، ضریب دانه‌بندی (رابطه ۲۶)، انحراف معیار دانه‌بندی کف (رابطه ۲۷)، معادله میر-پیترومولر برای محاسبه بار بستر و معادله وان‌راین برای محاسبه بار معلق اجرا شد. مقادیر بار معلق محاسبه‌شده با مقادیر بار معلق مشاهده‌شده در پایین‌دست مقایسه شد و خطای نسبی ۸/۱۴ درصد حاصل شد (شکل ۱۶).

$$\text{ضریب دانه‌بندی} = \frac{\frac{0}{5} * \left(\left(\frac{d_{84}}{d_{50}} \right) + \left(\frac{d_{50}}{d_{16}} \right) \right)}{1000} \quad (26)$$

$$\text{انحراف معیار دانه‌بندی کف} = \frac{\left(\frac{d_{84}}{d_{16}} \right)^{0.5}}{1000} \quad (27)$$

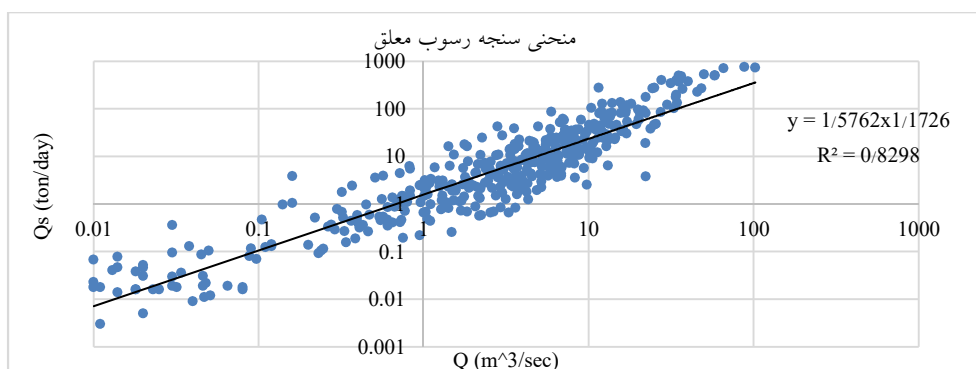


Figure 15. Sediment rating curve Suspended load Shalmanrood river

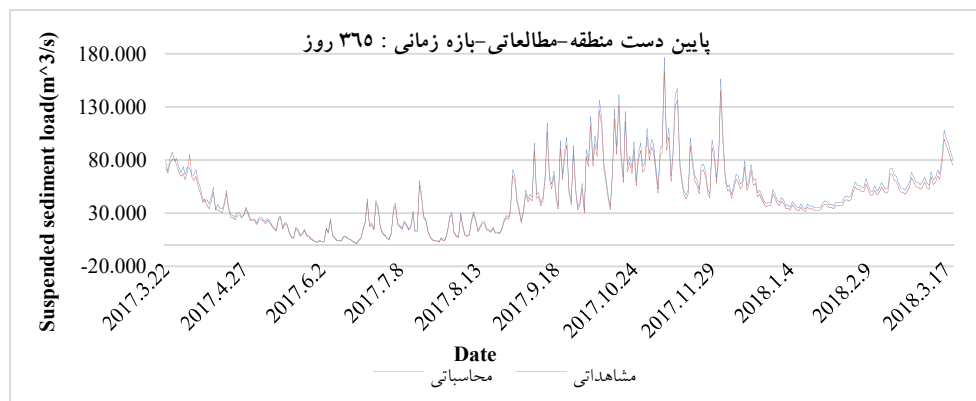


Figure 16. Image of the curve of observational and computational values of suspended load downstream of the study area

بررسی تغییرات ریخت‌شناسی مصب‌ها (شبیه‌سازی عددی رودخانه شلمانرود با نرم‌افزار MIKE21)

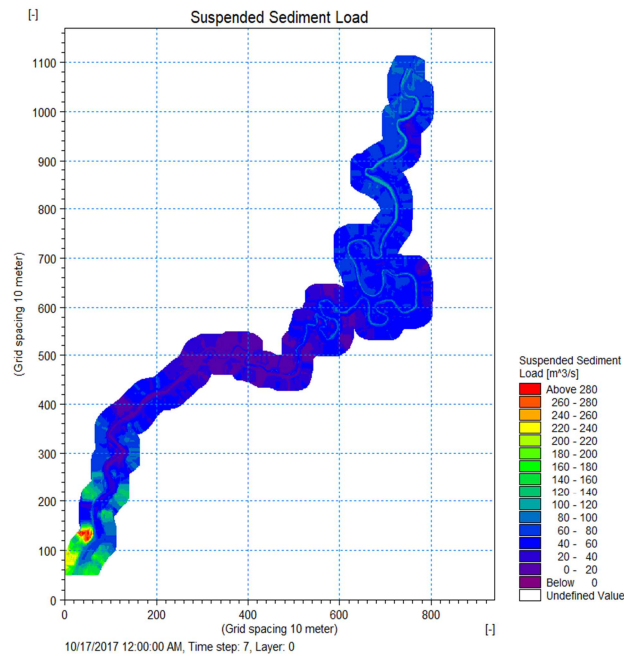


Figure 17. Picture of the distribution of suspended load from the river to the sea in two dimensions in the plan in November

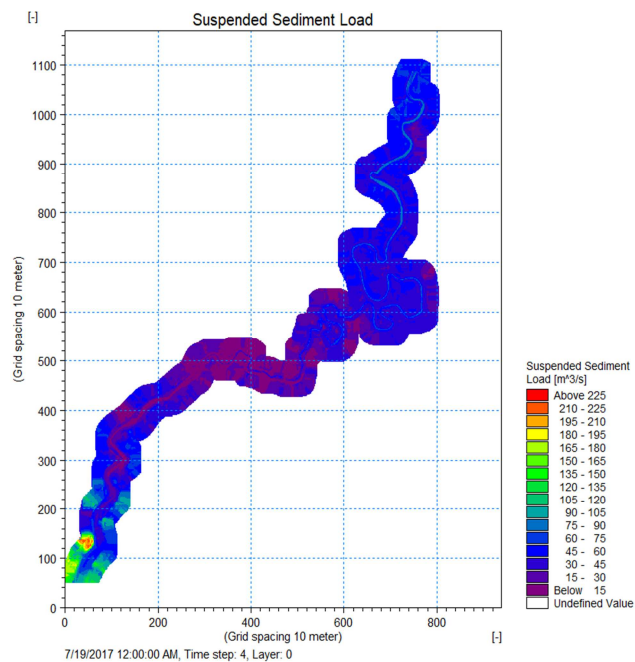


Figure 18. Picture of the distribution of suspended load from the river to the sea in two dimensions in the plan in August

غیرسیلابی و سیلابی، با توجه به تغییر شکل ایجاد شده در مقاطع هر قسمت، به بررسی رفتار رودخانه شلمانرود و مقایسه تراز بستر پرداخته شد.

بحث و نتایج

مسیر رودخانه در شکل (۱۹) به سه قسمت تقسیم شده است. پس از اجرای مدل انتقال رسوب در حالت

مدیریت آب و آبیاری

دوره ۱۲ ■ شماره ۳ ■ پاییز ۱۴۰۱

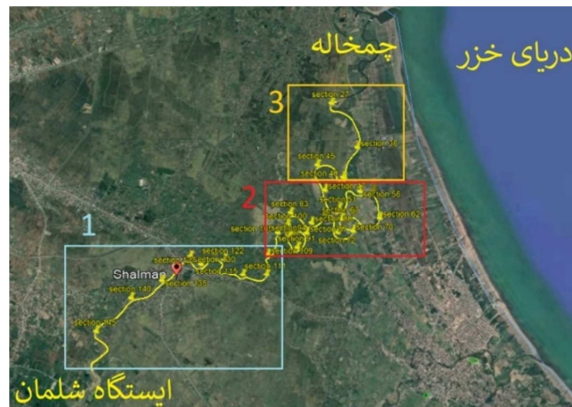


Figure 19. Picture of the location of the studied sections

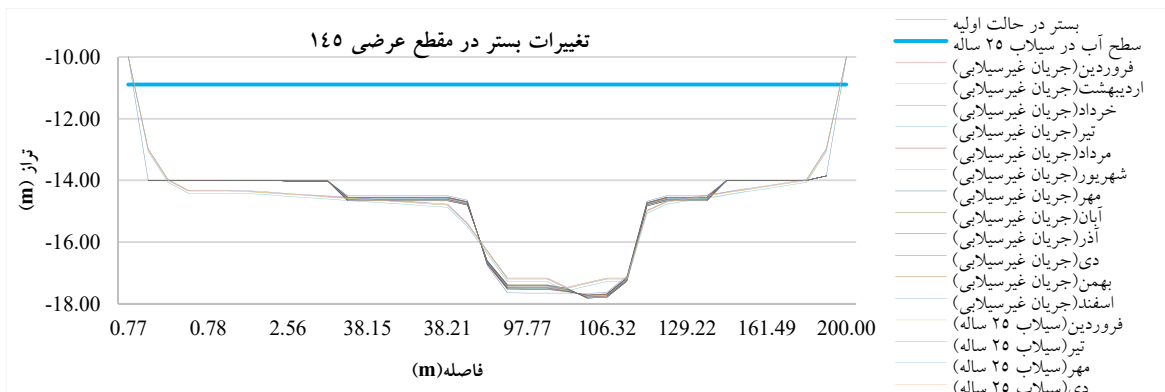


Figure 20. Picture of predicting bed level changes in section 145 in different months (part 1)

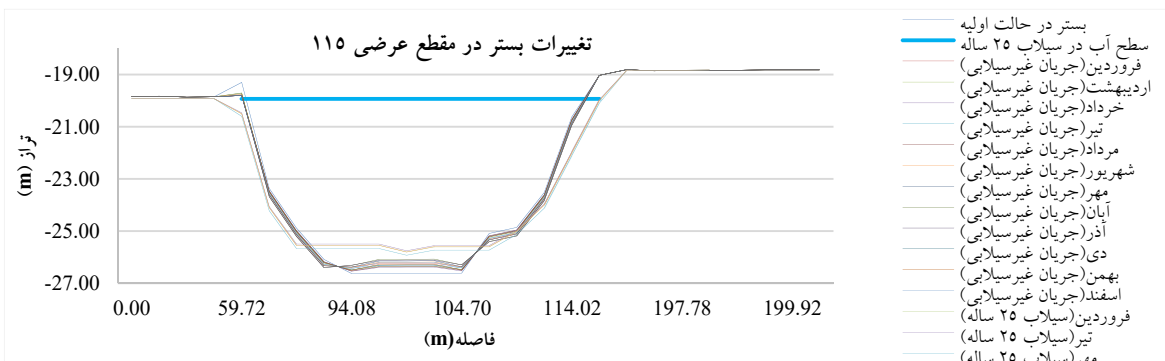


Figure 21. Picture of predicting bed level changes in section 115 in different months (part 1)

در قسمت ۲ (شکل‌های ۲۲ و ۲۳) و در ادامه مسیر به علت وجود قوس‌ها، مقادیر سرعت جریان، تنش برشی و مقادیر بار معلق کاهش می‌یابد. به علت کاهش سرعت جریان در این قسمت، رسوب‌گذاری افزایش می‌یابد و در حالت غیر سیلابی به ۰/۸ متر و در حالت سیلابی به ۲ متر می‌رسد.

در قسمت ۱ (شکل‌های ۲۰ و ۲۱) به طور عمومی در تمام ماه‌ها به دلیل مستقیم‌بودن مسیر رودخانه سرعت جریان، تنش برشی و مقادیر بار معلق افزایش می‌یابد. بیش‌ترین مقدار رسوب‌گذاری در این قسمت در حالت غیر سیلابی ۰/۴۱ متر و در حالت سیلابی ۱/۱ متر است.

بررسی تغییرات ریخت‌شناسی مصب‌ها (شبیه‌سازی عددی رودخانه شلمانرود با نرم‌افزار MIKE21)

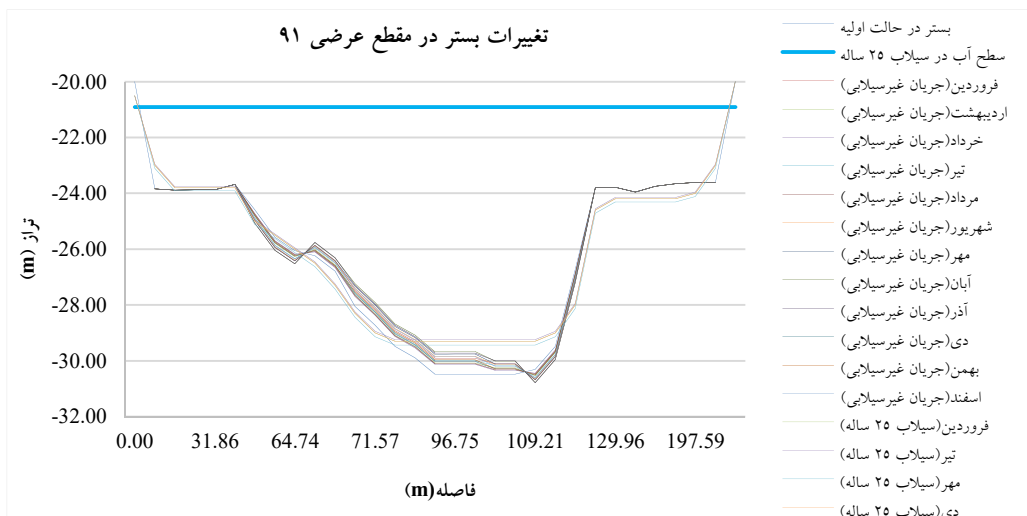


Figure 22. Picture of predicting bed level changes in section 91 in different months (part 2)

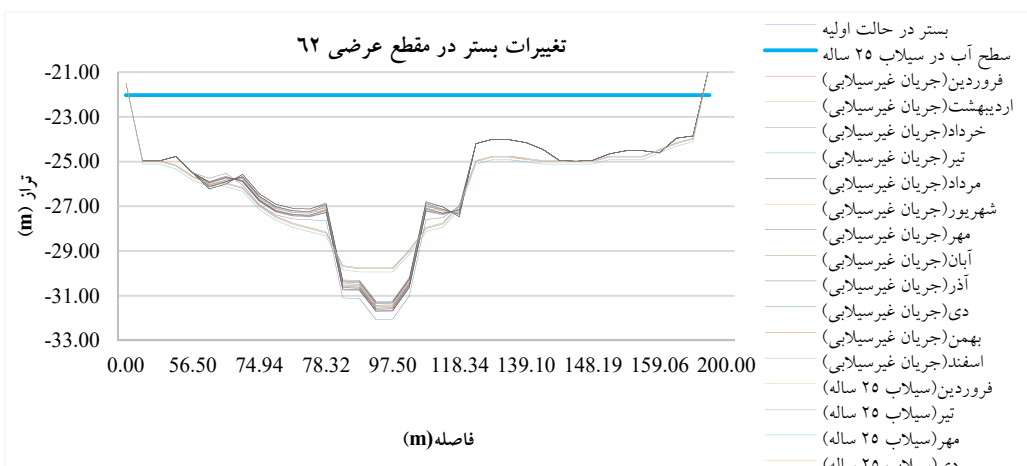


Figure 23. Picture of predicting bed level changes in section 62 in different months (part 2)

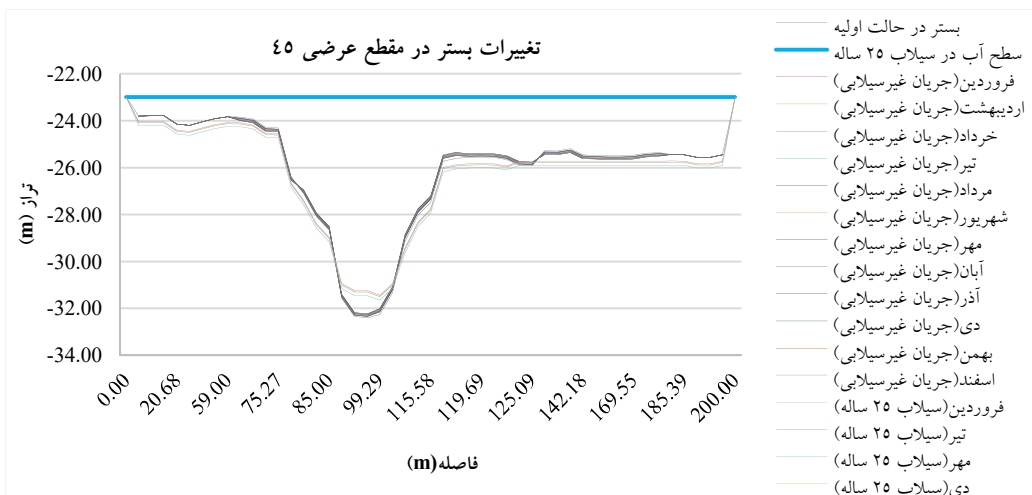


Figure 24. Picture of predicting bed level changes in section 45 in different months (part 3)

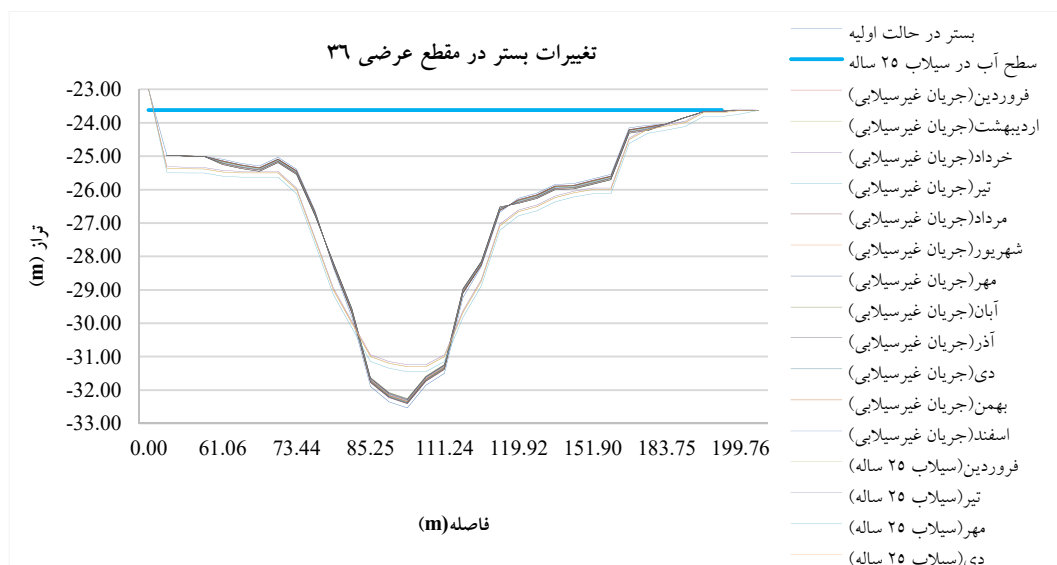


Figure 25. Picture of predicting bed level changes in section 36 in different months (part 3)

مدل برای دستیابی به حداقل اختلاف با نتایج مشاهداتی و نتایج حاصل از تکمیل و تطویل داده‌های تراز آب، ضریب زبری بستر خواهد بود. حساسیت‌سنجی مدل با کاهش و افزایش ۱۰ درصدی ضریب زبری بستر برای کم‌ترین و بیش‌ترین شدت جریان که به ترتیب در ماه‌های خرداد و آبان اتفاق می‌افتند، انجام شد. حداکثر سرعت در ۱۷ کیلومتری ایستگاه شلمان (ابتدای بازه سوم) تقریباً $4/7$ متر بر ثانیه محاسبه شده است. البته این سرعت در همه نقاط ایجاد نخواهد شد و در مقاطع مختلف بسته به عمق و عرض متغیر می‌باشد. سرعت جریان با نزدیک شدن به دریا کاهش یافته و به حدود $1/5$ متر بر ثانیه می‌رسد که از سرعت‌های محاسبه شده در نقاط قبلی کم‌تر می‌باشد.

پس از مدل جریان، مدل رسوب با استفاده از میزان غلظت ذرات رسوبی بالادست، چگالی، اندازه ذرات رسوبی، ضریب دانه‌بندی و انحراف معیار دانه‌بندی کف، معادله‌ی میر-پیتر و مولر برای محاسبه بار بستر و معادله وان‌راین برای محاسبه بار معلق اجرا شد. با استفاده از دبی‌های مشاهداتی پایین‌دست و منحنی سنج رسوب، مقادیر رسوب در قسمت پایین‌دست محاسبه و با مقادیر

در قسمت ۳ (شکل‌های ۲۴ و ۲۵) و با حرکت به سمت پایین‌دست رودخانه، به دلیل این‌که جریان به صورت هم‌زمان تحت تأثیر دریا و بالادست قرار می‌گیرد، دوباره افزایش مقادیر تنش برشی و بار معلق ملاحظه می‌شود. بیش‌ترین مقدار رسوب‌گذاری در در این قسمت در حالت غیرسیلابی $0/53$ متر و در حالت سیلابی $1/4$ متر می‌باشد.

نتیجه‌گیری

هدف اصلی این پژوهش بررسی تغییرات بستر در رودخانه شلمانرود واقع در استان گیلان است. در این راستا در ابتدا مدل جریان با استفاده از داده‌های دبی مشاهداتی در طول ۴۵ سال با نرم‌افزار MIKE21 اجرا و مقادیر دبی و سرعت در پایین‌دست منطقه مطالعاتی محاسبه شده است. با توجه به معیار پایداری مدل (عدد کورانت کم‌تر از یک)، بازه انتخاب شده برای گام زمانی بین اعداد $0/1$ و 30 ثانیه انتخاب شده است. از داده‌های مربوط به تراز آب در پایین‌دست رودخانه جهت کنترل یا واسنجی نتایج مدل، استفاده شده است. پارامتر مورد استفاده جهت تغییر مقادیر سرعت و تراز آب در

بار معلق، رسوب‌گذاری و در کناره‌ها شاهد فرسایش و کاهش تنش برشی ملاحظه خواهد شد. همچنین در قوس‌های خارجی فرسایش و در قوس‌های داخلی رسوب‌گذاری اتفاق می‌افتد.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، رودخانه شلمانرود در ناحیه مصب دارای فعالیت شدید رسوب‌گذاری است و بیش‌ترین تغییرات بستر در قسمت دوم و به‌صورت کم‌عمق‌شدگی اتفاق می‌افتد و بنابراین انجام اقدامات حفاظتی در منطقه ضروری است.

پی‌نوشت‌ها

1. Danish Hydraulic Institute
2. No eddy
3. Constant eddy formulation
4. Smagorinsky formulation
5. Land (zero normal velocity)
6. Land (zero velocity)
7. Specified velocities
8. Specified fluxes
9. Specified level
10. Specified discharge
11. Lower order fast algorithm
12. Higher order
13. Sup stream
14. Zup stream
15. Meyer Peter and Muller
16. Van Rijn

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

مراجع

1. Amirkiai, R., Mehrdad, A., & Ghobraei, A. (2011). Predicting the trend of shoreline changes at the mouth of Sefidrood River (using MIKE21 software), *10th Iran Hydraulic Conference*, Rasht, <https://civilica.com/doc/140784>. (In Persian).
2. Dissanayake, D.M.P.K., Roel vink, J.A., & Vander Wegen, M. (2008). Effect of sea level rise on inlet morphology. *Copedec V11*. Dubai, UAE.

به‌دست‌آمده از مدل رسوبی مقایسه شد و پس از حصول خطای نسبی کم‌تر از ۱۰ درصد صحت نتایج تأیید شد. به‌دلیل اهمیت نقش سیلاب‌ها در تغییرات بستر، مدل با استفاده از دبی سیلاب ۲۵ ساله رودخانه شلمانرود (۳۵۵ مترمکعب بر ثانیه) برای بازه یک ساله اجرا شد. پس از آن مسیر رودخانه به سه قسمت تقسیم شد و رفتار رودخانه شلمانرود با توجه به تغییر شکل ایجادشده در مقاطع هر قسمت و مقایسه تراز بستر در حالت اولیه و پس از ورود جریان رسوب به رودخانه پرداخته شد.

در قسمت اول به‌دلیل مستقیم‌بودن مسیر رودخانه سرعت جریان، تنش برشی و مقادیر بار معلق افزایش می‌یابند. بیش‌ترین مقدار رسوب‌گذاری در این قسمت در حالت غیرسیلابی ۰/۴۱ متر و در حالت سیلابی ۱/۱ متر است. در قسمت دوم و در ادامه مسیر به‌علت وجود قوس‌ها، مقادیر تنش برشی و مقادیر بار معلق کاهش می‌یابند. به‌علت کاهش سرعت جریان در این قسمت، رسوب‌گذاری افزایش می‌یابد و در حالت غیرسیلابی به ۰/۸ متر و در حالت سیلابی به ۲ متر می‌رسد. در قسمت سوم و پایین‌دست رودخانه مقادیر تنش برشی و مقادیر بار معلق افزایش می‌یابد و مقدار رسوب‌گذاری در این قسمت بیش‌تر از قسمت‌های اول و دوم خواهد بود. بیش‌ترین مقدار رسوب‌گذاری در این قسمت در حالت غیرسیلابی ۰/۵۳ متر و در حالت سیلابی ۱/۴ متر می‌باشد.

با بررسی این شکل‌های فرسایش بیش‌تر در مقاطع بالادست و رسوب‌گذاری بیش‌تر در مقاطع پایین‌دست قابل‌ملاحظه است. افزایش رسوب‌گذاری در پایین‌دست به‌دلیل کاهش شیب و سرعت جریان می‌باشد. در ماه‌هایی که دبی عبوری رودخانه بیش‌تر است، جریان تمایل بیش‌تری به فرسایش داشته و در کل فرسایش این مقاطع نسبت به رسوب‌گذاری بیش‌تر است. به‌طورکلی در قسمت خط‌القعر رودخانه، با افزایش تنش برشی و مقادیر

3. Fatemi Nejad, M., & Ghiasi, R. (2021). Investigation of sediment transfer rate in the pond of Shahid Rajaei Port Complex, *7th International Conference on Mechanics, Construction, Industries and Civil Engineering*, Tehran, <https://civilica.com/doc/1230866>. (In Persian).
4. Ismaili Varki, M., Zamani, A., & Kazemi Rad, M. (2012). Numerical simulation of different route modification options in Pichanrudi rivers (Case study: Shalmanrud river of Guilan province), *11th Iran Hydraulic Conference*, Urmia, <https://civilica.com/doc/186259>. (In Persian).
5. Kiaei, M. (2012). Physical Modeling of Sediment Transfer Processes in Reservoirs, Ph.D., Islamic Azad University. (In Persian).
6. MIKE 21 Flow Model FM. Hydrodynamic Module User Guide. MIKE Powered by DHI.
7. MIKE 21 Flow Model FM. Sand Transport Module, incl. Shoreline Morphology User Guide. MIKE Powered by DHI.
8. MIKE 21 Flow Model FM. Sand Transport Module, Step-by-step training guide: River application. MIKE Powered by DHI.
9. MIKE 21 Flow Model FM. Transport Module User Guide. MIKE Powered by DHI.
10. Naji Abhari, M., Vafghi, M., & Ghodsian, M. (2008). Laboratory and numerical study of scouring in the 9 degree arc, *3rd Water Resources Management Conference*, Tabriz, <https://civilica.com/doc/50044>. (In Persian).
11. Razzaqi Naini, A. (2010). Presenting the criteria and selecting the appropriate model for dam failure analysis, *the second national conference on civil engineering*, Islamic Azad University, Khomeini Shahr branch. (In Persian).
12. Sefidrood Guilan Consulting Engineers. (2010). Land use report, engineering services plan and bed and space studies and the first stage of organizing Chabaksar, Polrud and Shalmanrud rivers, Ministry of Energy, Iran Water Resources Management Company, Gilan Regional Water Joint Stock Company. (In Persian).
13. Siegle, E., Huntley, D. A., & Davidson, M. A. (2002). Modelling water surface topography at a complex inlet system—Teignmouth, UK. *Journal of Coastal Research*, (36 (10036)), 675-685.
14. Taheri, Y., & Jafarzadeh, M. (2020). Modeling of two-dimensional flow and sediment applied to dams on alluvial fans by MIKE21 software, *19th Iranian Hydraulic Conference*, Mashhad, <https://civilica.com/doc/1168060>. (In Persian).
15. Zanganeh, M., & Haj Momeni, A. (2016). Sediment modeling in Bushehr estuary using MIKE software 21. *Marine Engineering*, 12 (23), 25-35. <https://civilica.com/doc/1144433>. (In Persian).