



Evaluation of the HEC-RAS 2D Model's capability in two-dimensional simulation of tidal flow hydrodynamics (Case Study: Musa estuary)

Hossein Ardalan¹ | Javad Sarvarian² 

1. Water Research Institute, Tehran, Iran. E-mail: h.ardalan@wri.ac.ir

2. Corresponding Author, Department of Water Engineering, Faculty of agriculture, Ilam University, Ilam, Iran. E-mail: j.sarvarian@ilam.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 12 October 2025

Received in revised form

2 November 2025

Accepted 14 November 2025

Published online 17 March 2026

Keywords:

HEC-RAS2D model

Hydrodynamic

Tidal Flow

Musa estuary

ABSTRACT

The inherent complexity of tidal flows poses significant challenges for accurate analysis and prediction, necessitating the use of advanced analytical and numerical models. In this study, the capability of the two-dimensional hydraulic model HEC-RAS 2D was evaluated for simulating the hydrodynamics of tidal currents in the Musa Estuary, located in the northern Persian Gulf. The main objective was to assess the model's accuracy in reproducing the temporal and spatial patterns of flow velocity and water surface elevation in a highly complex estuarine system. For the simulation, water level and flow velocity data were collected from four hydrodynamic stations over a 44-day period, covering two complete tidal cycles. The model geometry was generated by integrating local hydrographic survey data with the 30 m Copernicus digital elevation model, and further processed in a GIS environment with a horizontal resolution of 20 m. To enhance numerical stability and ensure better conformity of the mesh, the topological mesh-generation system of the latest HEC-RAS 2025 version was used. After calibration, the model demonstrated high accuracy in reproducing tidal behavior, with performance indices within an acceptable range (NSE = 0.94, RMSE = 0.079, MAE = 0.61). The depth and velocity distribution maps also showed good agreement with the actual dynamics of the system. Overall, the findings indicate that HEC-RAS 2D, particularly when using the advanced features of its latest release, can serve as a reliable and efficient tool for simulating hydrodynamic processes in tidal environments such as the Musa Estuary. However, some limitations were identified in simulating flow velocity near the estuary entrance, which may be due to the incomplete representation of external forcing effects.

Cite this article: Ardalan, H., & Sarvarian, J. (2026). Evaluation of the HEC-RAS 2D Model's capability in two-dimensional simulation of tidal flow hydrodynamics (Case Study: Musa estuary). *Journal of Water and Irrigation Management*, 15 (4), 861-876. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2025.404101.1268>



© The Author(s).

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2025.404101.1268>

Publisher: University of Tehran Press.



ارزیابی قابلیت مدل هیدرولیکی HEC-RAS2D در شبیه‌سازی دویعدی هیدرودینامیک جریان جزرومدی (مطالعه موردی: خور موسی)

حسین اردلان^۱ | جواد سروریان^۲

۱. مؤسسه تحقیقات آب وزارت نیرو، تهران، ایران. رایانامه: h.ardalan@wri.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران. رایانامه: j.sarvarian@ilam.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

پیچیدگی جریان‌های جزرومدی موجب می‌شود که تحلیل و پیش‌بینی دقیق رفتار آن‌ها با چالش‌های ویژه‌ای همراه باشد و برای غلبه بر این چالش‌ها، استفاده از مدل‌های تحلیلی و عددی پیشرفته ضروری است. در این پژوهش، قابلیت مدل هیدرولیکی دویعدی HEC-RAS 2D در شبیه‌سازی هیدرودینامیک جریان‌های جزرومدی در خور موسی واقع در شمال خلیج فارس مورد ارزیابی قرار گرفت. هدف از انجام این مطالعه، بررسی دقت مدل در بازتولید الگوهای زمانی و مکانی سرعت جریان و تراز سطح آب در یک سیستم مصبی پیچیده بود. به‌منظور شبیه‌سازی، داده‌های تراز آب و سرعت جریان از چهار ایستگاه هیدرودینامیکی در بازه زمانی ۴۴ روزه شامل دو چرخه کامل جزرومدی جمع‌آوری شد. هندسه مدل براساس تلفیق داده‌های هیدروگرافی محلی و مدل ارتفاعی ۳۰ متری کوپرنیک تهیه و با دقت ۲۰ متری در محیط GIS پردازش گردید. برای افزایش پایداری عددی و انطباق مش با توپوگرافی واقعی، از سیستم مش‌بندی توپولوژیکی نسخه جدید HEC-RAS 2025 استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل پس از کالیبراسیون، دقت بالایی در بازنمایی الگوی جزرومدی دارد و شاخص‌های آماری عملکرد مدل در محدوده مطلوب قرار گرفتند ($MAE=0/61$ و $RMSE=0/079$ ، $NSE=0/94$). نقشه‌های پهنه‌بندی عمق و سرعت جریان تطابق قابل‌قبولی با رفتار واقعی سیستم نشان دادند. به‌طورکلی، نتایج پژوهش نشان داد که مدل HEC-RAS 2D با بهره‌گیری از قابلیت‌های نسخه جدید خود می‌تواند ابزاری دقیق و کارآمد برای شبیه‌سازی فرایندهای هیدرودینامیکی در محیط‌های جزرومدی نظیر خور موسی باشد. اگرچه در شبیه‌سازی سرعت جریان در ورودی خور، محدودیت‌هایی مشاهده شد که ممکن است ناشی از عدم در نظر گرفتن کامل تأثیر نیروهای خارجی باشد.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۲۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۲۳

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۲/۲۶

کلیدواژه‌ها:

مدل HEC-RAS2D

هیدرودینامیک

جریان جزرومدی

خور موسی

استناد: اردلان، حسین و سروریان، جواد (۱۴۰۴). ارزیابی قابلیت مدل هیدرولیکی HEC-RAS2D در شبیه‌سازی دویعدی هیدرودینامیک جریان جزرومدی (مطالعه موردی: خور موسی). نشریه مدیریت آب و آبیاری، ۱۵ (۴)، ۸۶۱-۸۷۶. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2025.404101.1268>



۱. مقدمه

بررسی دینامیک جریان جزرومدی خورها برای کاربردهای مختلف، از جمله حفاظت از محیط‌زیست، ناوبری و تولید انرژی، ضروری است. خورهای قیفی‌شکل مانند خور موسی، به دلیل توپوگرافی و شرایط جزرومدی خاص خود، ویژگی‌های هیدرودینامیکی متمایزی از خود نشان می‌دهند (Pritchard, 1967). پیچیدگی جریان‌های جزرومدی موجب می‌شود که تحلیل و پیش‌بینی دقیق رفتار آن‌ها با چالش‌های ویژه‌ای همراه باشد و برای غلبه بر این چالش‌ها، استفاده از مدل‌های تحلیلی و عددی پیشرفته ضروری است. این مدل‌ها به پژوهشگران و مهندسان این امکان را می‌دهند تا روابط پیچیده میان جریان‌های جزرومدی، ساختار بستر دریا و عوامل محیط‌زیستی را به صورت دقیق پیش‌بینی کنند و از این طریق امکان طراحی و اجرای مؤثرتر سازه‌های محافظتی از جمله دیوارهای ساحلی، خاک‌ریزها و سدهای جزرومدی فراهم می‌شود (Shennan et al., 2019; Chen et al., 2024).

در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های قابل‌توجهی در این حوزه صورت گرفته است. مدل‌های عددی مانند مدل اقیانوسی ساحلی حجم محدود (FVCOM)، TELEMAC-2D، MIKE 21 و Delft3D به ابزارهای قدرتمندی برای شبیه‌سازی دینامیک پیچیده سیستم‌های خور و ساحل تبدیل شده‌اند. این مدل‌ها قابلیت شبیه‌سازی دقیق جریان‌های ناپایدار، انتشار امواج و انتقال رسوبات در نواحی جزرومدی را دارا می‌باشند (Muste et al., 2017).

Han et al. (2024) با استفاده از مدل Delft3D-FLOW نشان دادند که تغییرات بلندمدت بستر رودخانه یانگ‌تسه منجر به افزایش دامنه جزرومد و کاهش حجم جریان جزر شده است. مدل TELEMAC-2D به‌عنوان یک ابزار قدرتمند در شبیه‌سازی جریان‌های هیدرودینامیکی جزرومدی در خورهای پیچیده به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. در بعد کاربردی، Questo and Rotor (2025) با استفاده از مدل TELEMAC 2D در خلیج آواسان، با دقت قابل‌قبول جریان را شبیه‌سازی کرده و پتانسیل تولید انرژی جزرومدی را تقریباً ۱۶۵ مگا وات ساعت ارزیابی نمودند. در مطالعه‌ای در خلیج فارس، مدل TELEMAC-2D برای شبیه‌سازی جریان‌های جزرومدی و تغییرات سطح آب در خور موسی توسط Talebpoor et al. (2021) به کار گرفته شده است. نتایج این مطالعه نشان‌دهنده دقت بالای TELEMAC-2D در شبیه‌سازی جریان‌های جزرومدی، به‌ویژه در نزدیکی بندر امام خمینی، بود. همبستگی بالای داده‌های مدل شده و مشاهده‌شده، توانایی این مدل در مدیریت پیچیدگی‌های هندسی و هیدرودینامیکی خورهای چندشاخه‌ای را تأیید کرد.

در حوزه دینامیک جریان، Yang et al. (2025) در مصب رودخانه مروارید و با استفاده از مدل MIKE 21، سهم تعامل جزرومد رودخانه را ۱۶ تا ۲۲ درصد از تغییرات تراز آب تخمین زدند. با این وجود، پژوهش‌های Barros et al. (2025) با مدل MIKE 21 FM و Okon et al. (2025) با مدل Delft3D-FM بر اهمیت و حساسیت نتایج مدل به پارامترهایی چون ضریب زبری (مانینگ) و عدم قطعیت‌های شرایط مرزی تأکید کرده‌اند. Campbell et al. (2023) برای شبیه‌سازی حرکات جزرومدی در خلیج سان‌فرانسیسکو در ایالت کالیفرنیا از مدل HEC-RAS استفاده کردند و نتایج شبیه‌سازی‌ها را با داده‌های مشاهده‌شده از پایگاه داده NOAA Ports مقایسه کردند. نتایج نشان داد که HEC-RAS می‌تواند در شبیه‌سازی شرایط جزرومدی در خلیج‌ها و خورها مفید باشد، اما نیاز به بررسی‌های بیشتر برای بهبود دقت مدل در این شرایط پیچیده وجود دارد.

مجموع این یافته‌ها، ضمن اثبات توانایی بالای مدل‌های عددی در بازتولید پدیده‌های طبیعی، ضرورت توجه به واسنجی دقیق پارامترها و انجام تحلیل‌های حساسیت را در هر مدل‌سازی جدید برجسته می‌سازد. انتخاب روش‌های عددی، رزولوشن شبکه، و پارامتری سازی فرایندهایی مانند توبولانس و انتقال رسوب به‌طور قابل‌توجهی بر عملکرد مدل تأثیر می‌گذارد (Veerapaga et al., 2019).

مرور این مطالعات نشان می‌دهد که اگرچه مدل‌های عددی تخصصی دریایی توان بالایی در بازسازی هیدرودینامیک دارند، اما بیش‌تر آن‌ها نیازمند لایسنس تجاری، داده‌های گسترده و تنظیمات پیچیده هستند. بر این اساس، اهمیت انتخاب و به‌کارگیری مدل‌های دقیق، قابل اعتماد، کاربردوست و تا حد ممکن رایگان جهت تحلیل دینامیک جزر و مدی در سامانه‌های آبی منطقه‌ای بیش از پیش نمایان است. در این مطالعه، از مدل دوبعدی HEC-RAS برای شبیه‌سازی هیدرودینامیک جزرومد خور موسی استفاده می‌شود و قابلیت و دقت این مدل در تعیین و پهنه‌بندی پارامترهای جریان مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. علت انتخاب این مدل، سهولت کاربرد، قابلیت‌های به‌روز، دسترسی رایگان و استفاده گسترده آن در شبیه‌سازی هیدرولیکی جریان می‌باشد. این مدل که توسط مرکز مهندسی هیدرولوژی ارتش ایالات متحده توسعه یافته، توانایی شبیه‌سازی جریان‌های ناپایدار دوبعدی بر پایه معادلات کامل سنت-ونانت را داراست و امکان مدل‌سازی دقیق پدیده‌های خشک و تر شدن بستر را فراهم می‌سازد. در مقایسه با سایر مدل‌های تجاری، HEC-RAS 2D ضمن حفظ دقت و پایداری محاسباتی، رایگان، در دسترس و کاربرپسند است و نیاز به ماژول‌های جانبی ندارد.

۲. روش‌شناسی پژوهش

۲.۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

خور موسی شمالی‌ترین مصب خلیج فارس است که در محدوده بندر امام خمینی (ره) از شهرستان ماهشهر در استان خوزستان قرار دارد. این خور بین طول‌های جغرافیایی ۴۸ درجه و ۵۱ دقیقه تا ۴۹ درجه و ۱۶ دقیقه و عرض‌های جغرافیایی ۳۰ درجه و ۱۲ دقیقه تا ۳۰ درجه و ۳۵ دقیقه واقع شده است. عمق خور موسی بین ۲۰ تا ۵۰ متر متغیر است و در برخی نقاط به ۷۳ متر نیز می‌رسد که این عمق امکان عبور آسان کشتی‌ها را فراهم می‌سازد. عرض دهانه خور بین ۳۷ تا ۴۰ کیلومتر و طول آن از دهانه تا بندر امام خمینی (ره) ۹۰ کیلومتر و تا بندر ماهشهر ۱۲۰ کیلومتر است. داده‌های سرعت جریان و تراز آب جریان جزرومدی مورد استفاده در این مطالعه از ایستگاه‌های سنجش هیدرودینامیکی مستقر در خور موسی تحت مدیریت سازمان بنادر و دریانوردی جمع‌آوری شده‌اند. موقعیت این ایستگاه‌ها بر روی شکل (۱) و مشخصات آن‌ها در جدول (۱) آورده شده است. در دو ایستگاه بندر ماهشهر و خور موسی هر دو مشخصه تراز آب دریا و سرعت جریان‌های دریایی اندازه‌گیری شده و در دو ایستگاه بندر امام خمینی (ره) و مریموس سرعت جریان‌های دریایی اندازه‌گیری شده است.

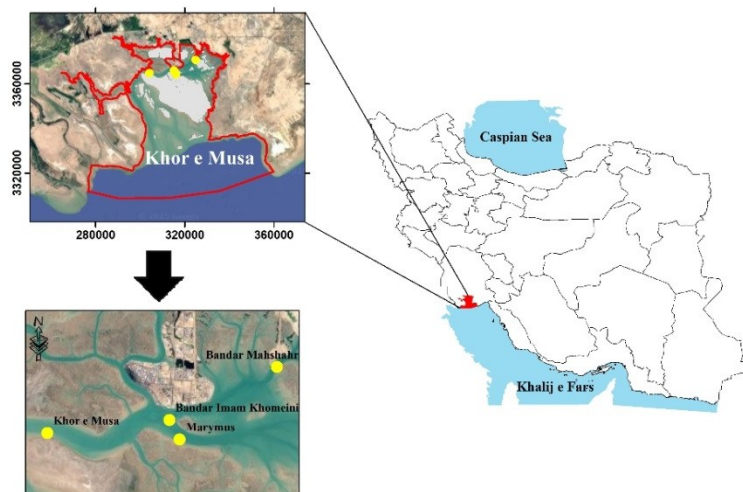


Figure 1. Location of Musa estuary and tidal stations

Table 1. Location and Parameters of Tidal Stations

Station	Coordinate (UTM)		Parameter
	X	Y	
Khor e Musa	304158	3364907	Velocity and WSE
Bandar Mahshahr	324908	3370870	Velocity and WSE
Bandar Imam Khomeini	315195	3366083	Velocity
Marymus	316113	3364332	Velocity

۲.۲. مدل HEC-RAS2D

مدل انتخابی باید قابلیت شبیه‌سازی شرایط پیچیده را داشته باشد و فرایند خشک و تر شدن خور را مدنظر قرار دهد. در این مطالعه برای اولین بار از مدل عددی HEC-RAS^۱ دویعدی برای شبیه‌سازی هیدرودینامیک جریان جزرومدی در خور موسی استفاده گردید. این مدل توسط مهندسان ارتش ایالات متحده (USACE)^۱ توسعه یافته و به‌طور گسترده در شبیه‌سازی جریان آب و رسوب در مجاری آبی به‌کار می‌رود. از مزایای این نرم‌افزار می‌توان به رابط کاربری ساده، سهولت در ورود و استخراج نتایج و دسترسی آسان اشاره کرد. در بسیاری از مدل‌های دویعدی یک سلول محاسباتی فقط می‌تواند خشک یا تر باشد، اما در مدل دویعدی جدید HEC-RAS، یک سلول محاسباتی می‌تواند به‌طور هم‌زمان هم خشک و هم تر باشد؛ به این معنی که جریان ممکن است فقط در بخشی از سلول جاری باشد، درحالی‌که بخش دیگر خشک باقی می‌ماند (HEC-RAS User's Manual, 2024).

مدل HEC-RAS2D برای شبیه‌سازی جریان از معادلات Saint-Venant دویعدی استفاده می‌کند و توانایی انجام مدل‌سازی جریان ناپایدار دویعدی با استفاده از معادلات آب کم‌عمق (SWE)^۲ یا معادلات موج نفوذی (DWE)^۳ را دارد. معادله پیوستگی، بیانگر قانون بقای جرم است و تضمین می‌کند که با احتساب هرگونه تغییر در ذخیره، مقدار آبی که وارد یک حجم کنترلی می‌شود با مقدار آبی که از آن خارج می‌شود برابر است.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad \text{(رابطه ۱)}$$

در این رابطه، معادله مومنتوم دو جهت x و y با در نظر گرفتن اثر نیروهای مانند گرانش، اصطکاک و ترم‌های اینرسی به‌صورت زیر می‌باشد (روابط ۲ و ۳):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_x}{\partial x} - \frac{g}{\rho} S_f \quad \text{(رابطه ۲)}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_y}{\partial y} - \frac{g}{\rho} S_f \quad \text{(رابطه ۳)}$$

در روابط فوق، h عمق جریان، t زمان، g شتاب ثقل، τ تنش برشی، S_f شیب اصطکاکی و ρ چگالی آب و u و v سرعت‌ها در جهت‌های x و y می‌باشد.

۲.۲.۱. آماده‌سازی مدل

پارامتر هندسه نقش به‌سزایی در مدل‌های هیدرودینامیکی دارد و هرچه دقت هندسه ورودی بیشتر باشد، نتایج به‌دست‌آمده انطباق بیشتری با واقعیت خواهد داشت. بخش اصلی DEM مورد استفاده در پژوهش حاضر از اطلاعات هیدروگرافی پروژه‌های محلی مانیتورینگ خوزستان و نقشه‌های ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری می‌باشد. علاوه بر این، از آنجایی که منطقه مورد مطالعه دارای نواحی تر و خشک‌شونده بوده و برای این محدوده وسیع، داده ارتفاعی نقشه‌برداری شده وجود ندارد، بنابراین از DEM ۳۰ متری کوپرنیک براساس خط ساحلی حداکثر مد و حداقل جزر استفاده شد. با تلفیق داده‌های ارتفاعی فوق در نهایت DEM مورد استفاده برای مدل‌سازی با دقت ۲۰ متری برای محدوده

مطالعاتی خور موسی در محیط نرم افزار Arc-GIS تهیه گردید. در شکل (۲)، DEM مذکور در محیط HEC-RAS به صورت داده زمینی (Terrain) نشان داده شده است.

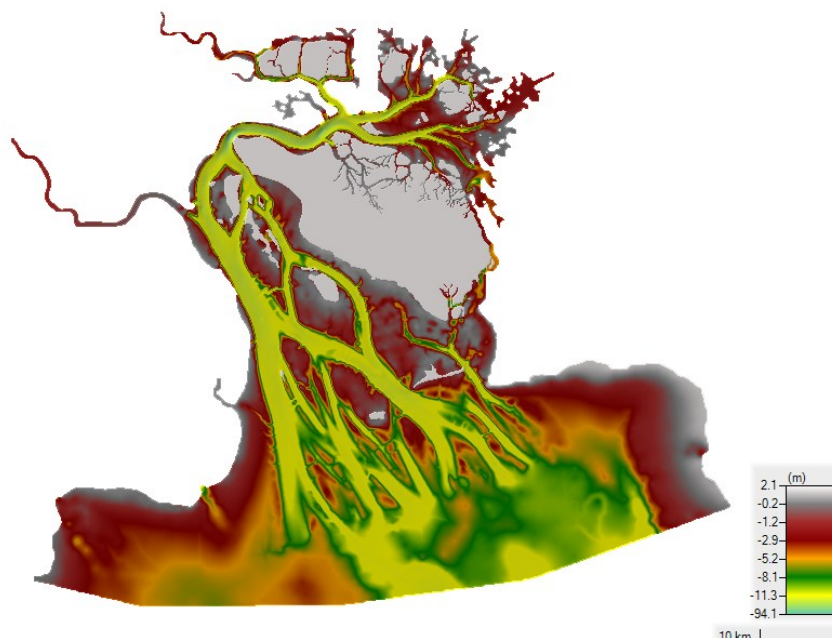


Figure 2. Digital Elevation Model (DEM) of Musa estuary in the HEC-RAS2D Model

در فاز اولیه مدل سازی دویعدی، از سیستم مش بندی RAS Mapper در نسخه ۶/۶ نرم افزار HEC-RAS 2D استفاده شد که مبتنی بر تولید مش های چندضلعی با ساختار یکنواخت است. به دلیل محدودیت های این روش در کنترل توپولوژی سلول ها و ناتوانی در انطباق دقیق با پیچیدگی های هندسی و مرزهای متغیر، مدل دچار ناپایداری های عددی گردید. در ادامه، با ارتقای مدل به نسخه جدید نرم افزار HEC-RAS 2D (2025)، از سیستم مش بندی مفهومی نوینی بهره گرفته شد.

یکی از نوآوری های پژوهش حاضر، استفاده از این نسخه جدید برای مش بندی محدوده مطالعاتی خور موسی می باشد. در این نسخه، از یک سیستم مش بندی نوآورانه مبتنی بر مدل توپولوژیک متمرکز بر سطوح^۵ استفاده شده که امکان تولید مش های چندضلعی نامنظم با انطباق بالا با عوارض سطح زمین را فراهم می سازد. در این روش، به جای تعریف سلول ها تنها بر اساس نقاط و اضلاع، هر سلول به عنوان یک سطح با ارتباطات مشخص به سلول های مجاور تعریف می شود. این ساختار امکان تولید مشی انعطاف پذیر و تطبیق یافته با توپوگرافی واقعی را فراهم می کند، به گونه ای که در نواحی حساس یا دارای تغییرات شدید ارتفاع، تراکم مش به صورت خودکار افزایش می یابد و در نواحی یکنواخت تراکم کاهش می یابد. مناطق (Regions) از قوس ها (Arcs) و گره ها (Nodes) شکل می گیرند. این ساختار امکان تعریف مناطق با ویژگی های مشخص مانند نوع سلول (مربعی، مثلثی، کارتزیی)، اندازه و جهت مش را فراهم می کند و موجب افزایش دقت، انعطاف پذیری و از همه مهم تر همگرایی و پایداری مدل سازی عددی می گردد. با استفاده از قابلیت مش بندی محیط RAS Mapper، سلول های محاسباتی با مقدار پایه ۱۰۰ متر برای محدوده مطالعاتی خور موسی تهیه گردید که در شکل (۳) نشان داده شده است.

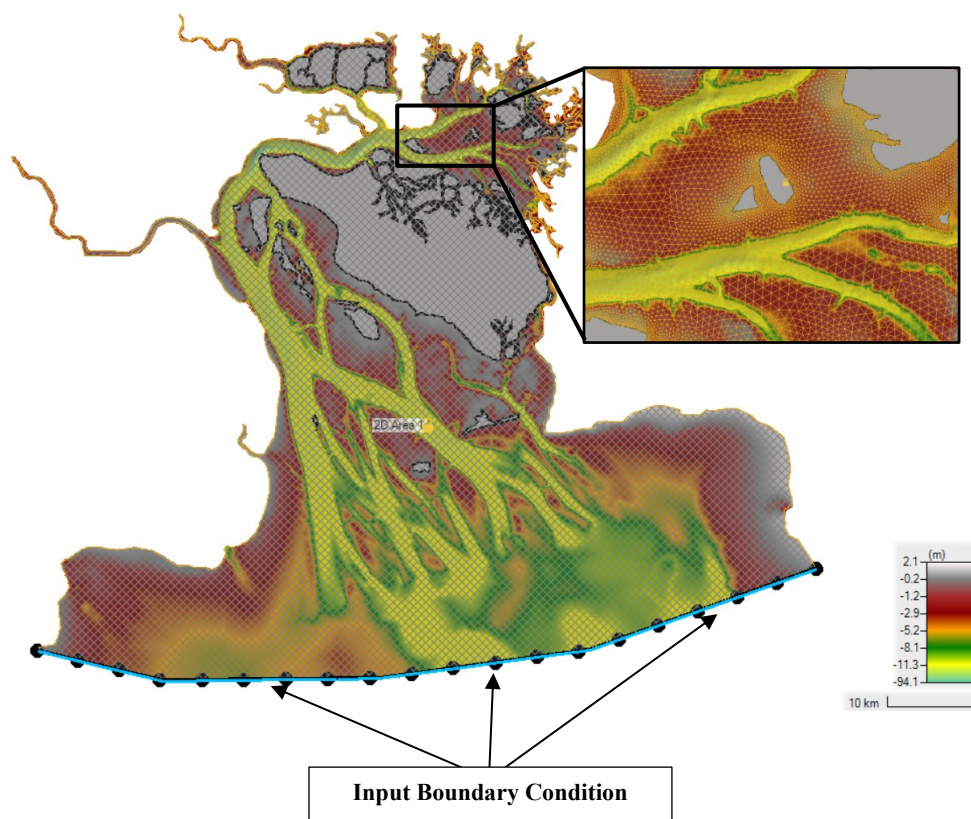


Figure 3. Mesh Generation of Musa Estuary in the HEC-RAS2D Model

در مدل‌سازی اولیه، مقدار ضریب زبری مانینگ برابر $0/01$ در نظر گرفته شد. این انتخاب با توجه به ویژگی‌های فیزیکی ناحیه دهانه خور موسی شامل عرض زیاد، عمق بالا، بستر صاف و عاری از پوشش گیاهی صورت گرفت. منابع مرجع کلاسیک مانند Chow (1959) با این مشخصات مقدار $0/01$ را مناسب دانسته‌اند. همچنین در مطالعات مشابه بر روی رودخانه‌های جزرومدی (Isma *et al.*, 2025)، در نواحی با نسبت عرض به عمق بالا، مقادیر $0/01$ تا $0/015$ برای ضریب مانینگ استفاده شده است. این مقدار در مراحل بعدی براساس داده‌های میدانی مورد بازبینی و کالیبراسیون قرار گرفت.

برای انجام محاسبات عددی در مدل HEC-RAS لازم است که اطلاعات جریان در مرزها مشخص باشد. در خور موسی از آنجایی که جریانی از بالادست وارد نمی‌شود، بنابراین شرط مرزی فقط در پایین‌دست و به صورت سری زمانی تغییرات تراز سطح آب^۶ به مدل معرفی می‌گردد. این داده‌ها برای ۲۰ نقطه بر روی مرز پایین‌دست به صورت سری زمانی به مدل معرفی گردید (شکل ۳).

در این مطالعه، بازه زمانی شبیه‌سازی ۴۴ روز انتخاب شد تا دو چرخه کامل جزرومدی از نوع اسپرینگ و نیپ (هرکدام با طول تقریبی ۱۴ روز) به طور کامل پوشش داده شود و رفتار هیدرودینامیکی خور موسی در شرایط دامنه حداکثر و حداقل جزر و مد بررسی گردد. همچنین داده‌های هیدرودینامیکی چهار ایستگاه مورد مطالعه دقیقاً در این بازه زمانی موجود بوده و کیفیت لازم برای کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل را داشته است. از سوی دیگر، انتخاب بازه بیش از ۴۴ روز، به دلیل افزایش چشم‌گیر حجم محاسبات و زمان پردازش مدل دوبعدی، با هدف مطالعه همخوانی نداشت. جهت حل معادلات جریان در مدل HEC-RAS از روش SWE-ELM استفاده شد که مبتنی بر حل کامل معادلات

سنت و نانت می‌باشد. این روش با لحاظ تمامی ترم‌های مؤثر از جمله شتاب‌های موضعی و انتقالی، شیب و مقاومت بستر، توانایی بالایی در شبیه‌سازی دقیق تغییرات زمانی جریان دارد. با توجه به ویژگی‌های هیدرودینامیکی پیچیده خور موسی، نظیر نوسانات شدید، منظم و دوره‌ای جزر و مد، استفاده از SWE-ELM به‌عنوان روشی مناسب برای بازنمایی دقیق رفتار جریان در این پهنه مدنظر قرار گرفت.

به‌منظور حل عددی با پایداری و دقت مناسب، گام زمانی محاسباتی باید به نحوی تعیین گردد که شرایط عدد کورانت^۲ را تأمین کند. اعداد کورانت قابل قبول برای تأمین دقت لازم در روش Diffusion Wave، کم‌تر از پنج و برای روش Full Momentum، کوچک‌تر از سه پیشنهاد شده است (HEC-RAS User's Manual, 2024). انتخاب یک گام زمانی خیلی کوچک موجب افزایش شیب پیشانی موج سیلاب و شروع نوسان در نتایج خروجی مدل خواهد شد. برای تنظیم بهتر گام زمانی از قابلیت "تنظیم گام زمانی براساس عدد کورانت" در مدل HEC-RAS استفاده می‌شود و اندازه‌های مناسب گام زمانی به‌طور خودکار و براساس عدد کورانت مناسب تنظیم می‌شود. برای ارزیابی دقت مدل HEC-RAS، از معیارهای آماری میانگین خطای مطلق (MAE)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و شاخص کارایی ناش-ساتکلیف (NSE) با روابط زیر استفاده شد.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |X_{obs,i} - X_{sim,i}| \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{sim,i})^2} \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - \bar{X}_{obs})^2} \quad \text{رابطه (۶)}$$

در روابط فوق، $X_{obs,i}$ نماینده مقادیر مشاهداتی پارامترهای جریان و $X_{sim,i}$ نماینده مقادیر شبیه‌سازی شده پارامترهای جریان می‌باشد.

۳. یافته‌های پژوهش و بحث

برای مش‌بندی محدوده مطالعاتی ابتدا از نسخه ۶/۶ نرم‌افزار HEC-RAS2D استفاده شد که در آن ترکیبی از سلول‌های سه تا هشت‌وجهی برای مش‌بندی استفاده می‌شود و برای مش‌های ریز نیاز به تنظیم دستی توسط Breaklines و Refinement Regions دارد. در فرایند مش‌بندی، چندین آزمون و خطا انجام شد تا پارامترهای بهینه برای تنظیم مدل تعیین گردد. این آزمون‌ها شامل تغییر در اندازه سلول‌ها، تنظیم مناطق پالایش و اصلاح ساختار مش در نزدیکی مرزها و نواحی با گرادیان بالا بود. با این‌حال، نتایج اولیه نشان داد که مدل یا به‌دلیل پیچیدگی هندسه و عدم تطابق ساختار مش با شرایط فیزیکی مسئله همگرا نمی‌شود، یا خروجی‌های آن با مقادیر واقعی و داده‌های تجربی اختلاف قابل توجهی دارد. نشانه‌های عدم همگرایی در نسخه ۶/۶ به‌صورت شکل‌گیری ناگهانی یک میدان سرعت بسیار بالا در پایین دست (محل مرز) و انتشار آن به سمت بالادست ظاهر گردید. این ناپایداری موضعی تنها در یک نقطه خاص از مرز ایجاد شد و در ادامه، تراز سطح آب را نیز تحت تأثیر قرار داد. این پدیده با پایان هر چرخه جزر و مد برطرف شده، اما با شروع چرخه بعدی دوباره تکرار می‌شد. این مشکلات به‌طور عمده به‌دلیل ناکافی بودن تراکم مش در نواحی حساس، عدم توزیع یکنواخت سلول‌ها، یا انتخاب نادرست نوع سلول‌ها در برخی مناطق بود.

برای رفع این نقص همان‌طور که پیش‌تر عنوان شد، از نسخه جدید از نسخه جدید این نرم‌افزار (۲۰۲۵) استفاده شد

که در آن سیستم مش‌بندی به‌طور کامل بازطراحی شده و بر پایه یک مدل توپولوژیک متمرکز بر سطوح^۸ بنا شده است. این سیستم که جایگزین سیستم مش‌بندی قدیمی شده، با استفاده از مش مفهومی^۹ امکان تولید مش محاسباتی نهایی با کنترل دقیق‌تر و انعطاف‌پذیری بالاتر را فراهم می‌کند. مطابق مستندات رسمی HEC-RAS 2025، این فرایند دومرحله‌ای باعث کاهش حساسیت نتایج مدل به اندازه سلول‌ها شده و توزیع مناسب سلول‌ها با توجه به توپولوژی به‌طور خودکار انجام می‌شود. زیرا سیستم به‌طور ذاتی چگالی مش و توزیع مناسب سلول‌ها را با توجه به توپولوژی تنظیم می‌کند. این تغییر ساختار مش‌بندی از نسخه ۶/۶ نرم‌افزار به نسخه ۲۰۲۵ باعث همگرایی مدل گردید.

پس از آماده‌سازی مدل HEC-RAS خور موسی، مدل مذکور برای یک دوره ۴۴ روزه اجرا شد. به‌منظور کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل علاوه بر تنظیم مش‌بندی، با تغییر ضریب زبری مانینگ سعی شد که نتایج شبیه‌سازی تا حد امکان به داده‌های میدانی نزدیک گردد. مقدار ضریب زبری نهایی بعد از انجام کالیبراسیون مدل ۰/۰۰۱ به‌دست آمد. در شکل (۴) تغییرات سرعت جریان جزرومدی برای ایستگاه امام‌خیمینی (ره) قبل و بعد از کالیبراسیون برای فاصله زمانی هفت روز نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با انجام کالیبراسیون، نتایج مدل تا حد زیادی با داده‌های مشاهداتی انطباق پیدا کرده است و علاوه بر رعایت الگوی کلی نوسانات سرعت جریان جزرومدی توسط مدل، این اختلاف‌ها به‌طور قابل‌توجهی کاهش یافته است.

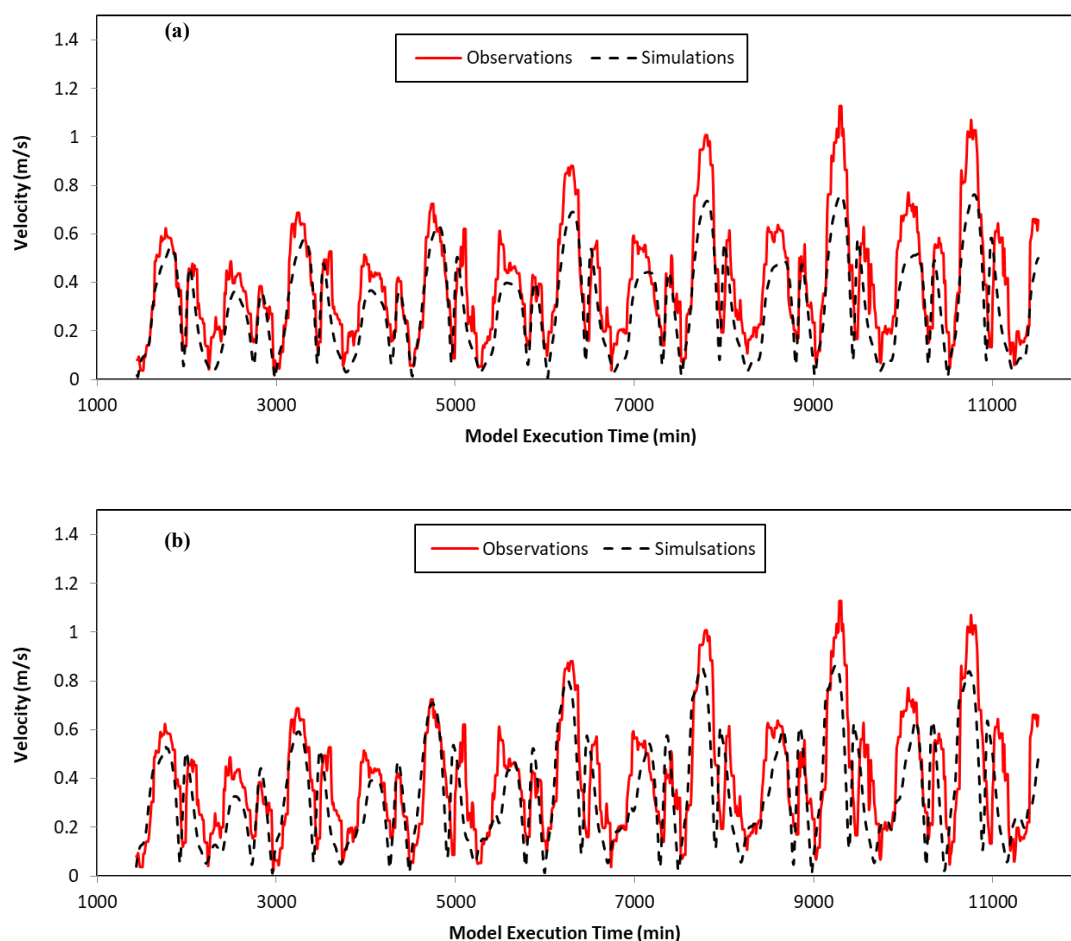


Figure 4. Velocity Variation Graph at Imam Khomeini Station (a) Before Calibration (b) After Calibration

در شکل (۵) همبستگی بین مقادیر اوج مد و اوج جزر داده‌های مدل‌سازی شده و داده‌های میدانی نشان داده شده است. اگرچه ضریب مانینگ پس از کالیبراسیون تغییر قابل‌ملاحظه‌ای داشته است، اما ضریب همبستگی (R) تغییر چندانی نکرده، زیرا R بیش از آنکه به دامنه مقادیر وابسته باشد، به هم‌زمانی و الگوی تغییرات حساس است. تغییر مانینگ، بیش‌تر موجب بهبود دامنه و کاهش خطای مطلق شده و فاز زمانی مد و جزر را تغییر نداده است. از آنجایی که در این مطالعه ارزیابی براساس مقادیر اوج مد و جزر انجام شد، شکل کلی پراکندگی نقاط قبل و بعد از کالیبراسیون مشابه باقی مانده است.

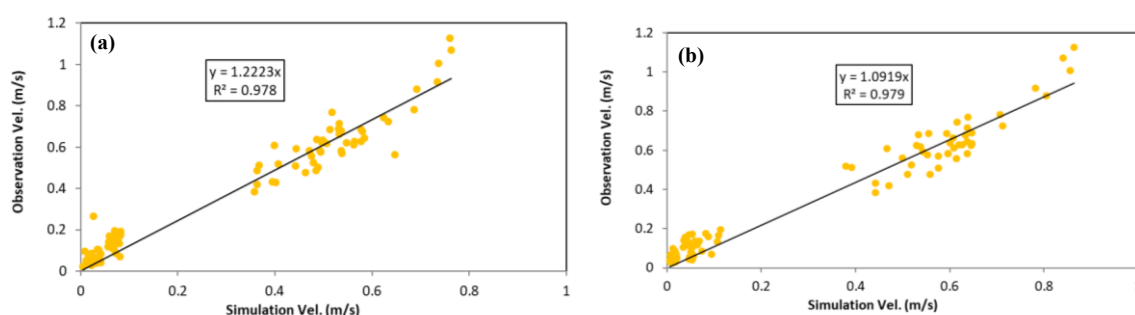


Figure 5. Correlation between Observed and Simulated Data at Imam Khomeini Station (a) Before Calibration (b) After Calibration

برای اطمینان از دقت مدل، صحت‌سنجی آن برای بازه زمانی مجزا به مدت پنج روز با همان مدل کالیبره‌شده انجام شد که نتیجه حاصله در شکل (۶) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در مرحله صحت‌سنجی نیز مدل از دقت بالایی برخوردار می‌باشد.

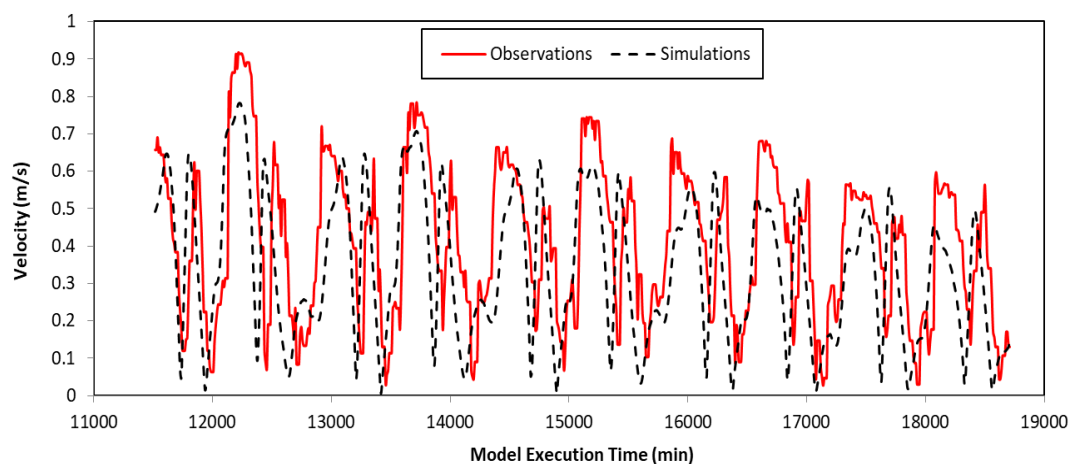


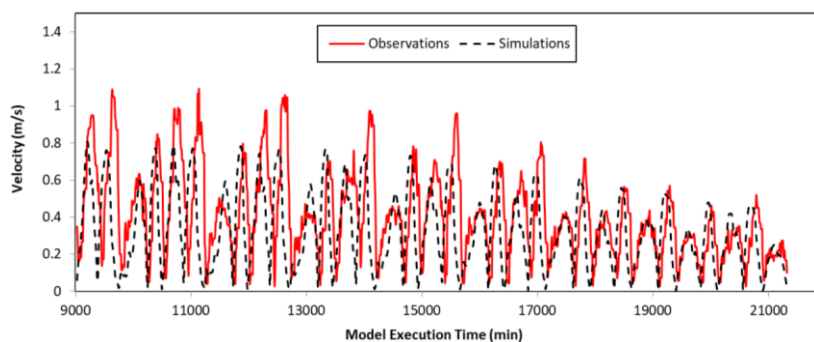
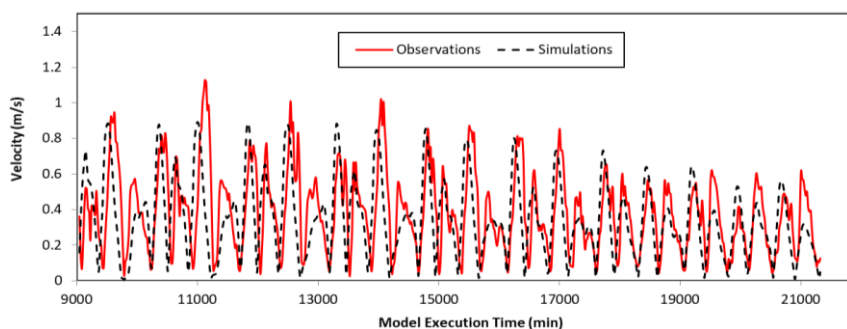
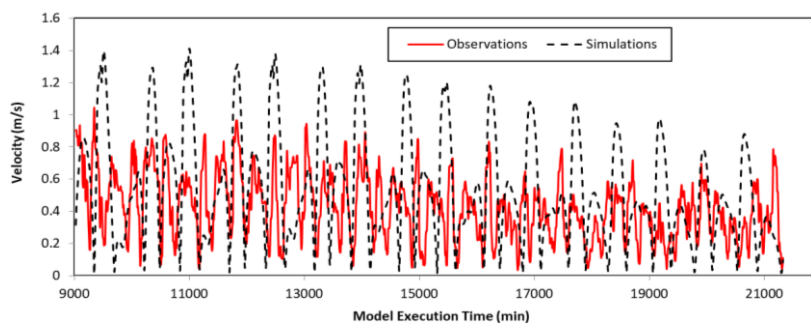
Figure 6. Graph of Flow Velocity Variations at Imam Khomeini Station over Different Time Intervals (Validation)

جدول (۲) مقادیر پارامترهای آماری MAE ، $RMSE$ و NSE را نشان می‌دهد. نتایج حاکی از کاهش مقادیر $RMSE$ و MAE پس از کالیبراسیون است که نشان‌دهنده بهبود دقت مدل به دلیل تنظیم ضریب زبری می‌باشد. همچنین، مقدار NSE پس از کالیبراسیون به یک نزدیک‌تر شده که خود گواهی افزایش دقت مدل است. علاوه بر این، مقادیر معیارها در مرحله صحت‌سنجی نیز بسیار نزدیک به مقادیر حاصل از کالیبراسیون است.

Table 2. Comparison of Statistical Metrics during Calibration and Validation Stages

Evaluation Phase	MAE	RMSE	NSE
Before Calibration	0.87	0.11	0.86
After Calibration	0.61	0.079	0.94
Verification	0.67	0.08	0.92

در شکل‌های (۷) تا (۹) تغییرات سرعت جریان در ایستگاه‌های بندر ماهشهر، مریموس و خور موسی نشان داده شده است. محدوده زمانی طوری انتخاب شده که حداقل بین یک اسپرینگ^{۱۰} تا یک نیپ^{۱۱} را پوشش دهد. باوجود انطباق مناسب نتایج مدل با داده‌های مشاهداتی در ایستگاه‌های بالادست خور، در ورودی دهانه خور موسی انطباق ضعیف‌تری در پارامتر سرعت جریان مشاهده شد (شکل ۹). از آنجایی که این ایستگاه در دهانه ورودی خور قرار گرفته است، این مسئله می‌تواند ناشی از ساده‌سازی اثرات جزر و مد، و یا در نظر نگرفتن نیروهای خارجی نظیر باد و امواج باشد. همچنین، امکان وجود خطا در داده‌های هندسی یا تفاوت‌های محلی در توپوگرافی و زبری بستر نیز می‌تواند مؤثر باشد.

**Figure 7.** Graph of Flow Velocity Variations at Bandar Mahshahr Station**Figure 8.** Graph of Flow Velocity Variations at Marymus Station**Figure 9.** Graph of Flow Velocity Variations at Khor e Musa Station

در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) تغییرات تراز سطح آب در ایستگاه‌های بندر ماهشهر و خور موسی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود انطباق بسیار خوبی بین داده‌های مشاهداتی و محاسباتی ایجاد گردیده است.

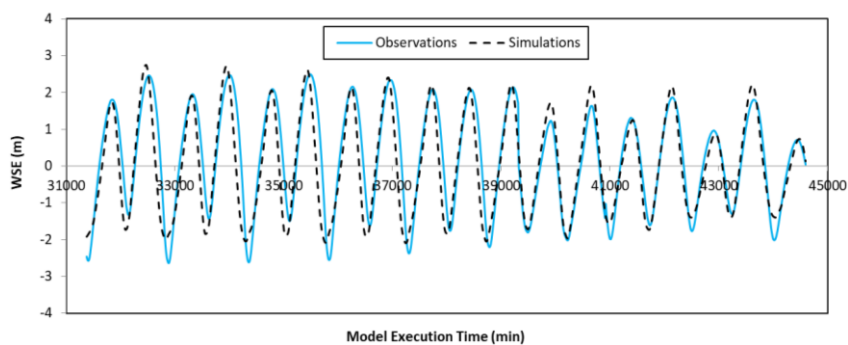


Figure 10. Graph of Water Surface Elevation at Bandar Mahshahr Station

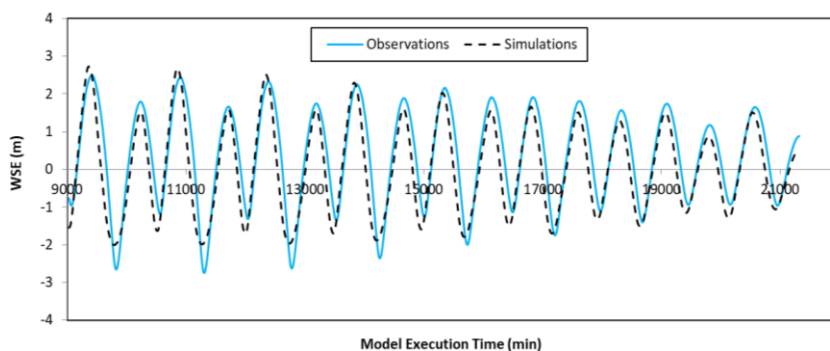


Figure 11. Graph of Water Surface Elevation at Khor e Musa Station

از جمله قابلیت‌های مدل HEC-RAS2D محاسبه و نمایش دبی جریان عبوری از هر مقطع مشخص می‌باشد. در شکل (۱۲) دبی جریان عبوری در یک مقطع عرضی در دهانه ورودی خور موسی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، در فاصله زمانی بین یک اسپرینگ تا یک نیپ، دبی بین ۱۹۰۰۰۰ تا ۸۰۰۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه تغییر می‌کند که بیانگر حجم بسیار زیاد آب عبوری از این مقطع بوده و پتانسیل بالای این منطقه به‌ویژه در بحث تولید انرژی را مطرح می‌کند. در این شکل مقادیر مثبت بیانگر ورود جریان (مد) و مقادیر منفی بیانگر خروج جریان (جزر) می‌باشند.

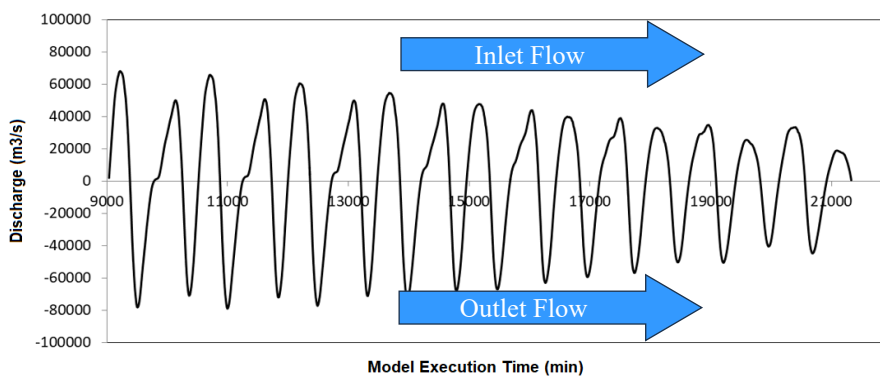


Figure 12. Flow hydrograph at the entrance of Musa estuary

نرم‌افزار HEC-RAS به دلیل قابلیت بالای خود در ترسیم نقشه‌های پارامترهای هیدرولیکی جریان از جمله عمق و سرعت، که از طریق افزونه RAS Mapper انجام می‌شود، ابزاری مؤثر برای تحلیل‌های هیدرولیکی است. در شکل (۱۳) نقشه تراز سطح آب در دو حالت جزر و مد کامل نشان داده شده است که براساس آن در حالت مد کامل تمامی ترازها مثبت و در حالت جزر کامل تمامی ترازها منفی می‌باشند. همچنین در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) نقشه‌های سرعت جریان در حالت‌های پر و خالی شدن خور نشان داده شده است که براساس آن سرعت جریان در حالت خالی شدن خور بیش‌تر از پر شدن آن می‌باشد. این امر در نمودار سرعت در شکل (۱۶) هم قابل مشاهده می‌باشد. نقشه‌های عمق و سرعت جریان با نمایش توزیع مکانی، امکان شناسایی نواحی با جریان‌های شدید، مناطق کم‌عمق یا مستعد رسوب‌گذاری و مسیرهای اصلی انتقال جریان را فراهم می‌سازند. همچنین در مطالعات مربوط به رسوب‌گذاری، انتقال آلودگی، مکان‌یابی سازه‌های ساحلی و ارزیابی زیستگاه‌های دریایی کاربرد دارند. از سوی دیگر، این نقشه‌ها ابزار مناسبی برای ارزیابی ایمنی کشتیرانی و مدیریت بهینه بهره‌برداری از خور محسوب می‌شوند.

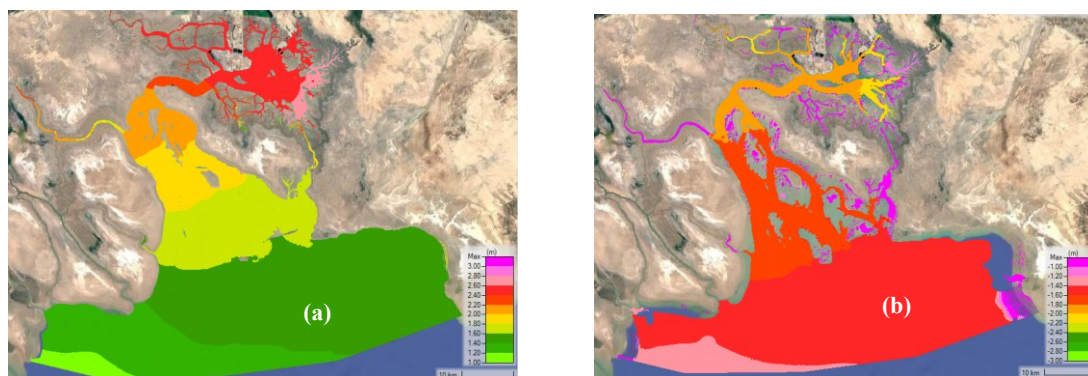


Figure 13. Water surface elevation map (a) high tide and (b) low tide

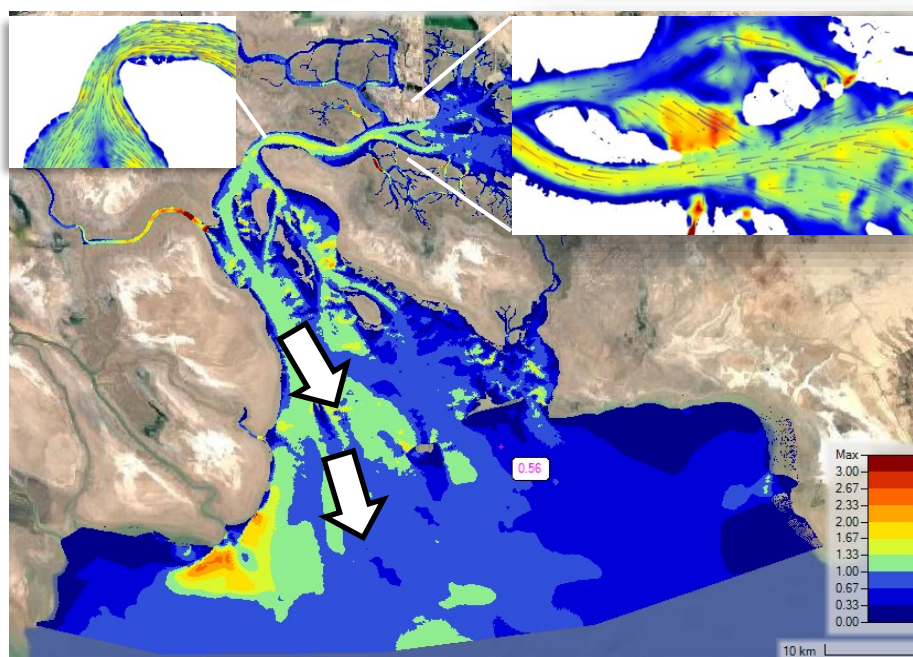


Figure 14. Flow velocity distribution map during the ebb phase in Musa estuary (m/s)

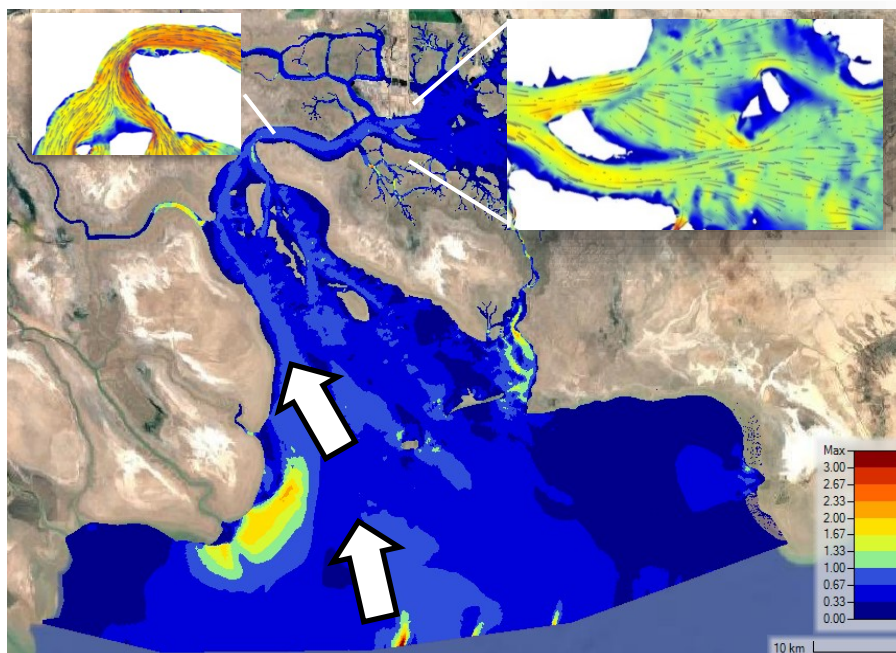


Figure 15. Flow velocity distribution map during the flood phase in Musa estuary (m/s)

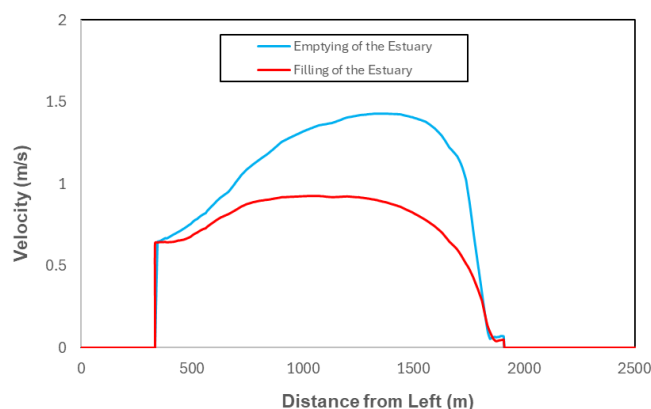


Figure 16. Flow velocity at the entrance of Musa estuary

۴. نتیجه گیری

این مطالعه باهدف ارزیابی مدل HEC-RAS2D در شبیه‌سازی هیدرودینامیک جریان جزرومدی در خور موسی انجام شد. نتایج حاصله بیانگر آن بود که مدل مذکور به‌خوبی و با دقت بالایی توانسته دینامیک جریان‌های جزرومدی در محیط‌های پیچیده‌ای همچون خور موسی را شبیه‌سازی کند. همچنین مدل تغییرات زمانی و مکانی تراز سطح آب و الگوهای سرعت را با همبستگی بالا نسبت به داده‌های میدانی بازتولید کرده و رفتار چرخه‌های جزرومدی را به‌خوبی نمایش می‌دهد.

کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل با استفاده از داده‌های میدانی ایستگاه‌های منتخب، حاکی از انطباق قابل قبول بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده تراز سطح آب و الگوهای جریان بود، به‌گونه‌ای که شاخص‌های آماری نظیر NSE، RMSE و MAE عملکرد مدل را در محدوده مطلوب تأیید کردند. این یافته‌ها با مطالعات مشابه، مانند Talebpour *et al.* (2021) در خوریات موسی با استفاده از مدل TELEMAC، همخوانی دارد که بر قابلیت مدل‌های عددی در شبیه‌سازی

دقیق جریان‌های مصبی تأکید کرده‌اند. باوجود موفقیت، مدل دارای محدودیت‌هایی از جمله همخوانی پایین داده‌های سرعت جریان در ورودی خور موسی بود که دلیل آن ساده‌سازی اثرات جزر و مد، و یا در نظر نگرفتن نیروهای خارجی نظیر باد و امواج است. همچنین، امکان وجود خطا در داده‌های میدانی یا تفاوت‌های محلی در توپوگرافی و زبری بستر نیز می‌تواند عامل وجود این عدم انطباق باشد. دامنه تغییرات دبی در دهانه خور موسی بیانگر انرژی بالای سیستم جزرومدی و نقش آن در شکل‌گیری الگوهای جریان، انتقال رسوب و فرایندهای فرسایشی-رسوب‌گذاری است. این نتایج می‌تواند مبنای تصمیم‌گیری در زمینه بهره‌برداری انرژی جزر و مد، طراحی سازه‌های دریایی و مدیریت مخاطرات ساحلی باشد.

نقشه‌های پهنه‌بندی عمق و سرعت جریان (مشابه آنچه در مطالعات قبلی مانند Campbell *et al.* (2023) ذکر شده است) اطلاعات ارزشمندی برای مدیریت ریسک سیل و برنامه‌ریزی زیرساخت‌های ساحلی فراهم می‌آورد. این نقشه‌ها همچنین امکان شناسایی مناطق با حداکثر و حداقل سرعت جریان و مناطقی که ممکن است در زمان اوج مد دچار غرقابی شوند، مانند مناطق نزدیک به بندر امام خمینی(ره) را فراهم کردند.

تحلیل نتایج شبیه‌سازی نشان داد که میانگین و بیشینه سرعت جریان در فاز جزر (خالی‌شدن خور) بیش‌تر از فاز مد (پرشدن خور) است. این پدیده که در ادبیات علمی با عنوان عدم تقارن جزرومدی (Tidal Asymmetry) شناخته می‌شود، در بسیاری از خورها و مصب‌ها گزارش شده و در این مطالعه نیز مشاهده گردید. علت اصلی این رفتار را می‌توان به شیب هیدرولیکی بیش‌تر در فاز جزر به دلیل اختلاف قابل‌توجه تراز سطح آب بین داخل خور و آب آزاد، تمرکز جریان در مجاری اصلی در هنگام تخلیه و ویژگی‌های هندسه و مورفولوژی خور موسی نسبت داد.

مقایسه با مطالعات مشابه در سایر خورها و مناطق جزرومدی جهان نشان داد که دقت مدل به‌شدت وابسته به کیفیت داده‌های هندسی و میزان جزئیات شبکه محاسباتی است. نقاط ضعف مدل بیش‌تر در نواحی تحت تأثیر باد، امواج و تغییرات موضعی زبری بستر مشاهده می‌شود که می‌توان با ادغام مدل در ماژول‌های موج و رسوب و نیز بهبود داده‌های بستر، این کاستی‌ها را کاهش داد.

به‌طور کلی، مدل HEC-RAS 2D در بازتولید الگوهای سرعت، تراز سطح آب و دبی جزرومدی عملکردی مشابه با مدل‌های پیچیده‌تری همچون MIKE21 و Delft3D دارد، اما در مقایسه با آن‌ها از نظر سهولت کاربرد، هزینه محاسباتی و همگرایی عددی برتری دارد و به‌عنوان ابزاری کارآمد برای شبیه‌سازی هیدرودینامیکی سیستم‌های پیچیده جزرومدی مانند خور موسی توصیه می‌شود. با توجه به اهمیت روزافزون مسائل زیست‌محیطی در منطقه حساس خور موسی، به‌ویژه در حضور صنایع نفت و گاز، می‌توان از قابلیت شبیه‌سازی جریان رسوب و پخش آلودگی در نرم‌افزار HEC-RAS به‌عنوان ابزاری کارآمد برای بررسی پویایی انتقال آلاینده‌ها، ارزیابی اثرات زیست‌محیطی فعالیت‌های صنعتی، و تدوین راه‌کارهای مدیریتی جهت کاهش مخاطرات و حفاظت از اکوسیستم‌های آبی منطقه در تحقیقات آتی استفاده کرد.

۵. پی‌نوشت‌ها

1. Hydrologic Engineering Center's River Analysis System
2. U.S. Army Corps of Engineers
3. Shallow Water Equations
4. Diffusion Wave Equations
5. Surface Topological Structure
6. Stage Hydrograph
7. Courant number
8. Face-Centric
9. Conceptual Mesh
10. Spring
11. Neap

۶. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷. منابع

- Barros, M. D. L. C., Goulart Pecly, J. O., S. Lima, L., Neu, V., Richey, J. E., & CC Rosman, P. (2025). Influence of boundary condition uncertainties on hydrodynamic simulations. *Modeling Earth Systems and Environment*, 11(5), 368.
- Campbell, W. H., Savant, G., Leon, A. S., & Bian, L. (2023). Applying HEC-RAS to Simulate the Complex Tidal Conditions for Estuaries and Bays: A Case Study of the San Francisco Bay. *In World Environmental and Water Resources Congress*, pp. 185-193.
- Chen, K., Lin, Y., Liu, J., He, Z., & Jia, L. (2024). Combined effects of massive reclamation and dredging on the variations in hydrodynamic and sediment transport in Lingdingyang Estuary, China. *Frontiers in Earth Science*, 18(1), 127-147. <https://doi.org/10.1007/s11707-022-1050-x>
- Chow, V. T. (1959). *Open-channel hydraulics*. New York: McGraw-Hill
- Han, Y., Dai, B., & Ding, H. (2024). Tidal dynamic response to riverbed evolution in the Yangtze River Estuary. *Anthropocene Coasts*, 7(1), 17.
- HEC-RAS User's Manual Version 6.6, (2024). *Hydrologic Engineering Center*, United States Army Corps of Engineers.
- Isma, F., Kusuma, M. S. B., Adityawan, M. B., & Nugroho, E. O. (2025). Spatiotemporal variations of Manning's roughness coefficient in the estuary of Langsa River based on field measurements and hydraulic modeling. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 61, 102632.
- Muste, M., et al. (2017). Modeling Coastal Flow Dynamics: Applications to Tidal Energy and Environmental Impact. *Environmental Modeling and Assessment*, 22(3), 453-466.
- Okon, L. U. E., Seelam, J. K., Hemanath, L., Thomas, J., & Narine, R. (2025). Hypothesis-driven sensitivity analysis of Delft3D flexible mesh hydrodynamic model: insights into coastal processes in the monsoonal tropical Goa Coast, India. *Ocean Dynamics*, 75(9), 1-14.
- Pritchard, D.W. (1967) What Is An Estuary: Physical Viewpoint. In: Lauff, G.H., Ed., *Estuaries*, American Association for the Advancement of Science, Washington DC, Vol. 1, 149-176.
- Questo, L. I., & Rotor, M. A. (2025). Numerical hydrodynamic model of Awasan Bay, Surigao Del Norte, Philippines for tidal energy resource characterization. *Discover Oceans*, 2(1), 1-21.
- Shennan, I., et al. (2019). Modeling the Impact of Sea-Level Rise on Tidal Flows and Coastal Ecosystems. *Nature Climate Change*, 9(6), 465-473.
- Talebpoor, N., Akbarinasab, M., Rasoolian, M., & Delbari, A. (2021). Simulation of Tidal in Khowr-e Musa by Using the TELEMAC Numerical Model. *International Journal Of Coastal, Offshore And Environmental Engineering (ijcoe)*, 6(3), 49-53.
- Veerapaga, N., Azhikodan, G., Shintani, T., Iwamoto, N., & Yokoyama, K. (2019). A three-dimensional environmental hydrodynamic model, Fantom-Refined: Validation and application for saltwater intrusion in a meso-macrotidal estuary. *Ocean Modelling*, 141, 101425.
- Yang, H., Li, B., Liu, F., Zhang, Y., Zhao, T., Lin, K., & Cai, H. (2025). Residual Water Level Dynamics in the Pearl River Estuary: Quantifying Riverine, Tidal, and Tide-river Contributions. *Estuaries and Coasts*, 48(6), 152.