

ارزیابی قابلیت مدل هیدرولیکی HEC-RAS2D در شبیه‌سازی دوبعدی هیدرودینامیک جریان جزر و مدی (مطالعه موردی: خور موسی)

حسین اردلان^۱، جواد سروریان^{۲*}

۱- استادیار، موسسه تحقیقات آب وزارت نیرو، تهران، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

چکیده

پیچیدگی جریان‌های جزر و مدی 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 دوبعدی HEC-RAS 2D در شبیه‌سازی هیدرودینامیک جریان‌های جزر و مدی 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 جزر و مدی جمع‌آوری شد. هندسه مدل بر اساس 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 جزر و مدی 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 قابل قبولی با رفتار واقعی سیستم نشان دادند. به‌طور کلی، نتایج تحقیق نشان داد که مدل HEC-RAS 2D با بهره‌گیری از قابلیت‌های نسخه جدید خود می‌تواند ابزاری دقیق و کارآمد برای شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرودینامیکی در محیط‌های جزر و مدی 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.

کلیدواژه‌ها: جریان جزر و مدی، خور موسی، مدل HEC-RAS2D، هیدرودینامیک

۱. مقدمه

بررسی دینامیک جریان جزر و مدی خورها برای کاربردهای مختلف، از جمله حفاظت از محیط زیست، ناوبری و تولید انرژی، ضروری است. خورهای کیفی شکل مانند خور موسی، به دلیل توپوگرافی و شرایط جزر و مدی خاص خود، ویژگی های هیدرودینامیکی متمایزی از خود نشان می دهند (Pritchard, 1967). پیچیدگی جریان های جزر و مدی موجب می شود که تحلیل و پیش بینی دقیق رفتار آنها با چالش های ویژه ای همراه باشد و برای غلبه بر این چالش ها، استفاده از مدل های تحلیلی و عددی پیشرفته ضروری است. این مدل ها به پژوهشگران و مهندسان این امکان را می دهند تا روابط پیچیده میان جریان های جزر و مدی، ساختار بستر دریا و عوامل محیط زیستی را به صورت دقیق پیش بینی کنند و از این طریق امکان طراحی و اجرای مؤثرتر سازه های محافظتی از جمله دیوارهای ساحلی، خاکریزها و سدهای جزر و مدی فراهم می شود (Shennan et al., 2019; Chen et al., 2024).

در سال های اخیر، پیشرفت های قابل توجهی در این حوزه صورت گرفته است. مدل های عددی مانند مدل اقیانوسی ساحلی حجم محدود (FVCOM)، TELEMAC-2D، MIKE 21 و Delft3D به ابزارهای قدرتمندی برای شبیه سازی دینامیک پیچیده سیستم های خور و ساحل تبدیل شده اند. این مدل ها قابلیت شبیه سازی دقیق جریان های ناپایدار، انتشار امواج، و انتقال رسوبات در نواحی جزر و مدی را دارا می باشند (Muste et al., 2017).

Han et al. (2024) با استفاده از مدل Delft3D-FLOW نشان دادند که تغییرات بلندمدت بستر رودخانه بانگ تسه منجر به افزایش دامنه جزر و مد و کاهش حجم جریان جزر شده است. مدل TELEMAC-2D به عنوان یک ابزار قدرتمند در شبیه سازی جریان های هیدرودینامیکی جزر و مدی در خورهای پیچیده به طور گسترده ای مورد استفاده قرار گرفته است. در بعد کاربردی، Questo & Rotor (2025) با استفاده از مدل TELEMAC 2D در خلیج آواسان، با دقت قابل قبول جریان را شبیه سازی کرده و پتانسیل تولید انرژی جزر و مدی را تقریباً ۱۶۵ مگاوات ساعت ارزیابی نمودند. در مطالعه ای در خلیج فارس، مدل TELEMAC-2D برای شبیه سازی جریان های جزر و مدی و تغییرات سطح آب در خور موسی توسط Talebpour et al. (2021) به کار گرفته شده است. نتایج این مطالعه نشان دهنده دقت بالای TELEMAC-2D در شبیه سازی جریان های جزر و مدی، به ویژه در نزدیکی بندر امام خمینی، بود. همبستگی بالای داده های مدل شده و مشاهده شده، توانایی این مدل در مدیریت پیچیدگی های هندسی و هیدرودینامیکی خورهای چندشاخه ای را تأیید کرد.

در حوزه دینامیک جریان، Yang et al. (2025) در مصب رودخانه مروارید و با استفاده از مدل MIKE 21، سهم تعامل جزر و رودخانه را ۱۶ تا ۲۲ درصد از تغییرات تراز آب تخمین زدند. با این وجود، تحقیقات 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 قطعیت های شرایط مرزی تأکید کرده اند. Campbell et al. (2023) برای شبیه سازی حرکات جزر و مدی در خلیج سان فرانسیسکو در ایالت کالیفرنیا از مدل HEC-RAS استفاده کردند و نتایج شبیه سازی ها را با داده های مشاهده شده از پایگاه داده NOAA Ports مقایسه کردند. نتایج نشان داد که HEC-RAS می تواند در شبیه سازی شرایط جزر و مدی در خلیج ها و خورها مفید باشد، اما نیاز به بررسی های بیشتر برای بهبود دقت مدل در این شرایط پیچیده وجود دارد.

مجموع این یافته ها، ضمن اثبات توانایی بالای مدل های عددی در بازتولید پدیده های طبیعی، ضرورت توجه به واسنجی دقیق پارامترها و انجام تحلیل های حساسیت را در هر مدل سازی جدید برجسته می سازد. انتخاب روش های عددی، رزولوشن شبکه، و پارامتری سازی فرآیندهایی مانند توبولانس و انتقال رسوب به طور قابل توجهی بر عملکرد مدل تأثیر می گذارد (Veerapaga et al., 2019).

مرور این مطالعات نشان می دهد که اگرچه مدل های عددی تخصصی دریایی توان بالایی در بازسازی هیدرودینامیک دارند، اما بیشتر آن ها نیازمند لایسنس تجاری، داده های گسترده و تنظیمات پیچیده هستند. بر این اساس، اهمیت انتخاب و به کارگیری مدل های دقیق، قابل اعتماد، کاربردوست و تا حد ممکن رایگان جهت تحلیل دینامیک جزر و مدی در سامانه های آبی منطقه ای بیش از پیش نمایان است. در این مطالعه، از مدل دوبعدی HEC-RAS برای شبیه سازی هیدرودینامیک جزر و مد خور موسی استفاده می شود و قابلیت و دقت این مدل در تعیین و پهنه بندی پارامترهای جریان مورد ارزیابی قرار می گیرد. علت انتخاب این مدل، سهولت کاربرد، قابلیت های

بهروز، دسترسی رایگان و استفاده گسترده آن در شبیه سازی هیدرولیکی جریان می باشد. این مدل که توسط مرکز مهندسی هیدرولوژی ارتش ایالات متحده توسعه یافته، توانایی شبیه سازی جریان های ناپایدار دوبعدی بر پایه معادلات کامل سنت - ونانت را داراست و امکان مدل سازی دقیق پدیده های خشک و تر شدن بستر را فراهم می سازد. در مقایسه با سایر مدل های تجاری، HEC-RAS 2D ضمن حفظ دقت و پایداری محاسباتی، رایگان، در دسترس و کاربرپسند است و نیاز به مازول های جانبی ندارد.

۲. مطالعه موردی

خور موسی شمالی ترین مصب خلیج فارس است که در محدوده بندر امام خمینی (ره) از شهرستان ماهشهر در استان خوزستان قرار دارد. این خور بین طول های جغرافیایی $48^{\circ} 51'$ تا $49^{\circ} 16'$ و عرض های جغرافیایی $30^{\circ} 12'$ تا $30^{\circ} 35'$ واقع شده است. عمق خور موسی بین ۲۰ تا ۵۰ متر متغیر است و در برخی نقاط به ۷۳ متر نیز می رسد که این عمق امکان عبور آسان کشتی ها را فراهم می سازد. 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. داده های سرعت جریان و تراز آب جریان جزر و مدی مورداستفاده در این مطالعه از ایستگاه های سنجش هیدرودینامیکی مستقر در خور موسی تحت مدیریت سازمان بنادر و دریانوردی جمع آوری شده اند. موقعیت این ایستگاه ها بر روی شکل (۱) و مشخصات آن ها در جدول (۱) آورده شده است. در دو ایستگاه بندر ماهشهر و خور موسی هردو مشخصه تراز آب دریا و سرعت جریان های دریایی اندازه گیری شده و در دو ایستگاه بندر امام خمینی (ره) و مریموس سرعت جریان های دریایی اندازه گیری شده است.

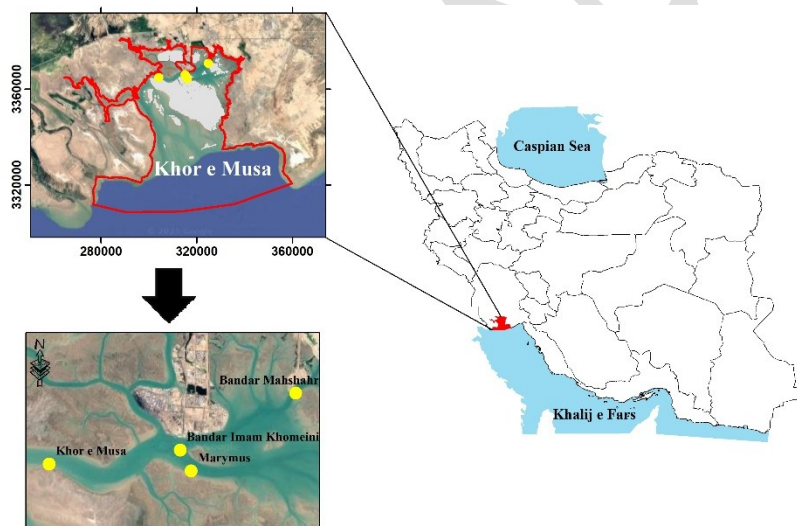


Figure 1. Location of Musa estuary and tidal stations

Table 1. Location and Parameters of Tidal Stations

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

۳. مدل HEC-RAS2D

مدل انتخابی باید قابلیت شبیه سازی شرایط پیچیده را داشته باشد و فرآیند خشک و تر شدن خور را مدنظر قرار دهد. در این مطالعه برای اولین بار از مدل عددی HEC-RAS¹ دوبعدی برای شبیه سازی هیدرودینامیک جریان جزر و مدی در خور موسی استفاده گردید. این مدل توسط مهندسان ارتش ایالات متحده (USACE²) توسعه یافته و به طور گسترده در شبیه سازی جریان آب و رسوب در مجاری آبی به کار می رود. از مزایای این نرم افزار می توان به رابط کاربری ساده، سهولت در ورود و استخراج نتایج و دسترسی آسان اشاره کرد. در بسیاری از مدل های دوبعدی یک سلول محاسباتی فقط می تواند خشک یا تر باشد؛ اما در مدل دوبعدی 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 دوبعدی استفاده می‌کند و توانایی انجام مدل‌سازی جریان ناپایدار دوبعدی با استفاده از معادلات آب کم‌عمق (SWE³) یا معادلات موج نفوذی (DWE⁴) 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 کنترل می‌شود با مقدار آبی که از آن خارج می‌شود برابر است.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

معادله مومنتوم دو جهت x و y با در نظر گرفتن اثر نیروهایی مانند گرانش، اصطکاک و ترم‌های اینرسی به‌صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_x}{\partial x} - \frac{g}{\rho} S_f \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_y}{\partial y} - \frac{g}{\rho} S_f \quad (3)$$

در معادلات 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.

۱.۳. آماده‌سازی مدل

پارامتر هندسه نقش بسزایی 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 تحقیق حاضر از اطلاعات هیدروگرافی پروژه‌های محلی مانیتورینگ خوزستان و نقشه‌های ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری می‌باشد. علاوه بر این از آنجاکه 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 بر اساس 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 نرم‌افزار Arc-GIS تهیه گردید. در شکل (۲)، DEM مذکور در محیط HEC-RAS به‌صورت داده زمینی (Terrain) نشان داده شده است.

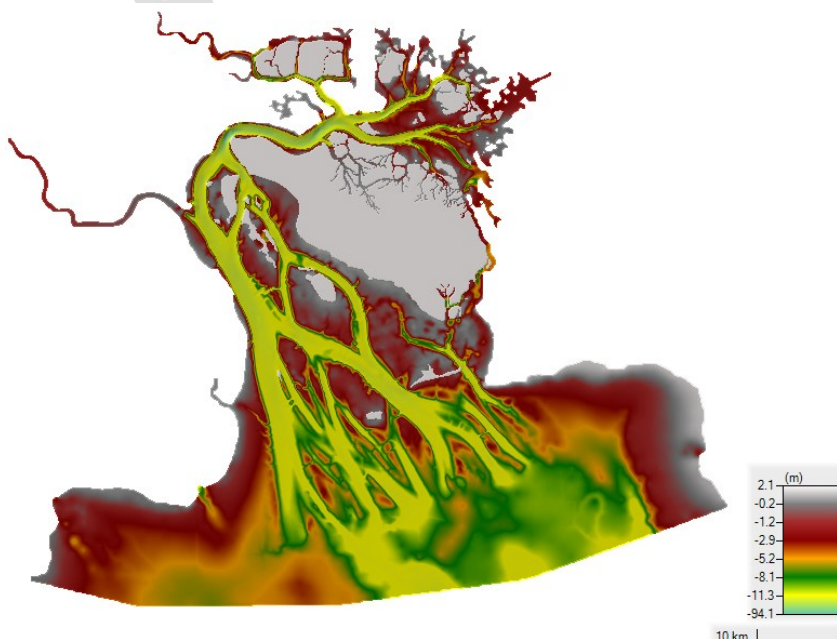


Figure 2. Digital Elevation Model (DEM) of Musa estuary in the HEC-RAS2D Model

در فاز اولیه مدل‌سازی دویبعدی، از سیستم مش‌بندی RAS Mapper در نسخه ۶/۶ نرم‌افزار HEC-RAS 2D استفاده شد که مبتنی بر تولید مش‌های چندضلعی با ساختار یکنواخت است. به دلیل محدودیت‌های این روش در کنترل توپولوژی سلول‌ها و ناتوانی در انطباق دقیق با پیچیدگی‌های هندسی و مرزهای متغیر، مدل دچار ناپایداری‌های عددی گردید. در ادامه، با ارتقاء مدل به نسخه جدید نرم‌افزار HEC-RAS 2D (2025)، از سیستم مش‌بندی مفهومی نوینی بهره گرفته شد.

یکی از نوآوری‌های تحقیق حاضر، استفاده از این نسخه جدید برای مش‌بندی محدوده مطالعاتی خور موسی می‌باشد. در این نسخه، از یک سیستم مش‌بندی نوآورانه مبتنی بر مدل توپولوژیک متمرکز بر سطوح^۵ استفاده شده که امکان تولید مش‌های چندضلعی نامنظم با انطباق بالا با عوارض سطح زمین را فراهم می‌سازد. در این روش، به جای تعریف سلول‌ها صرفاً بر اساس نقاط و اضلاع، هر سلول به‌عنوان یک سطح با ارتباطات مشخص به سلول‌های مجاور تعریف می‌شود. این ساختار امکان تولید مشی انعطاف‌پذیر و تطبیق‌یافته با توپوگرافی واقعی را فراهم می‌کند، به گونه‌ای که در نواحی حساس یا دارای تغییرات شدید ارتفاع، تراکم مش به‌صورت خودکار افزایش می‌یابد و در نواحی یکنواخت تراکم کاهش می‌یابد. مناطق (Regions) از قوس‌ها (Arcs) و گره‌ها (Nodes) شکل می‌گیرند. این ساختار امکان تعریف مناطق با ویژگی‌های مشخص مانند نوع سلول (مربعی، مثلثی، کارتیزی)، اندازه و جهت مش را فراهم می‌کند و موجب افزایش دقت، انعطاف‌پذیری و از همه مهم‌تر همگرایی و پایداری مدل‌سازی عددی می‌گردد. با استفاده از قابلیت مش‌بندی محیط RAS Mapper، سلول‌های محاسباتی با مقدار پایه ۱۰۰ متر برای محدوده مطالعاتی خور موسی تهیه گردید که در شکل (۳) نشان داده شده است.

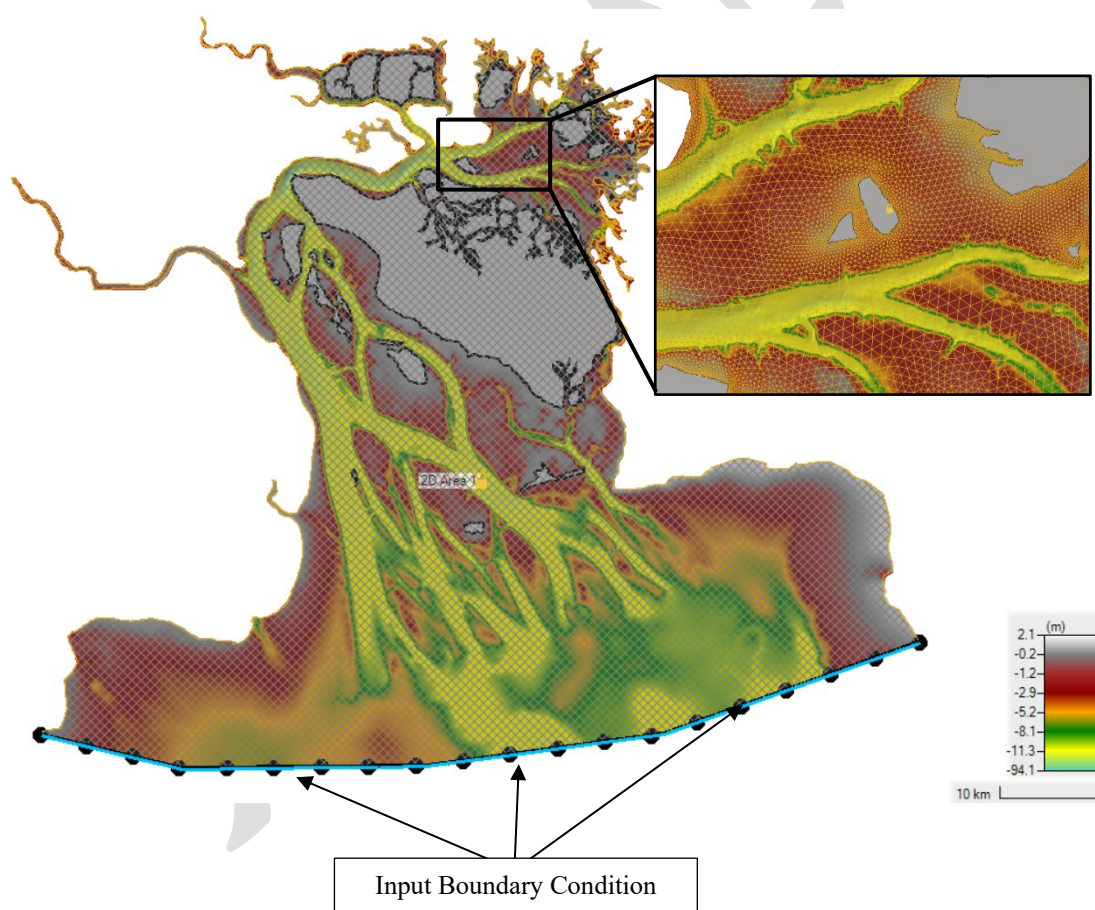


Figure 3. Mesh Generation of Musa Estuary in the HEC-RAS2D Model

در مدل‌سازی اولیه، مقدار ضریب زبری مانینگ برابر ۰/۰۱ 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 ۰/۰۱ را مناسب دانسته‌اند. همچنین در مطالعات مشابه بر روی رودخانه‌های جزر و مدی (Isma et al., 2025)، در نواحی با نسبت عرض به عمق بالا، مقادیر ۰/۰۱ تا ۰/۰۱۵ برای ضریب مانینگ استفاده شده است. این مقدار

در مراحل بعدی بر اساس 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 آنجاکه جریانی از بالادست وارد نمی‌شود، بنابراین شرط مرزی فقط در پایین دست و به صورت سری زمانی تغییرات تراز سطح آب^۶ به مدل معرفی می‌گردد. این داده‌ها برای ۲۰ نقطه بر روی مرز پایین دست به صورت سری زمانی به مدل معرفی گردید (شکل ۳).

در این مطالعه، بازه زمانی شبیه‌سازی ۴۴ روز انتخاب شد تا دو چرخه کامل جزر و مدی از نوع اسپرینگ و نیپ (هر کدام 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 به عنوان روشی مناسب برای بازنمایی دقیق رفتار جریان در این پهنه مد نظر قرار گرفت.

به منظور حل عددی با پایداری و دقت مناسب، گام زمانی محاسباتی باید به نحوی تعیین گردد که شرایط عدد کورانت^۷ 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 بر اساس عدد کورانت" در مدل HEC-RAS استفاده می‌شود و اندازه‌های مناسب گام زمانی به طور خودکار و بر اساس 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.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |X_{obs,i} - X_{sim,i}| \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{sim,i})^2} \quad (5)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - \bar{X}_{obs})^2} \quad (6)$$

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

۴. نتایج و بحث

برای مش‌بندی محدوده مطالعاتی ابتدا از نسخه ۶/۶ نرم‌افزار HEC-RAS2D استفاده شد که در آن ترکیبی از سلول‌های سه تا هشت وجهی برای مش‌بندی استفاده می‌شود و برای مش‌های ریز نیاز به تنظیم دستی توسط Breaklines و Refinement Regions دارد. در فرآیند 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 این حال، نتایج اولیه نشان داد که مدل یا به دلیل 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 به صورت 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، ولی با شروع چرخه بعدی دوباره تکرار می‌شد. این مشکلات عمدتاً به دلیل 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 فرآیند 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 به دست آمد. در شکل (۴) تغییرات سرعت جریان جزر و مدی 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 جزر و مدی توسط مدل، این اختلاف‌ها به‌طور قابل‌توجهی کاهش یافته است.

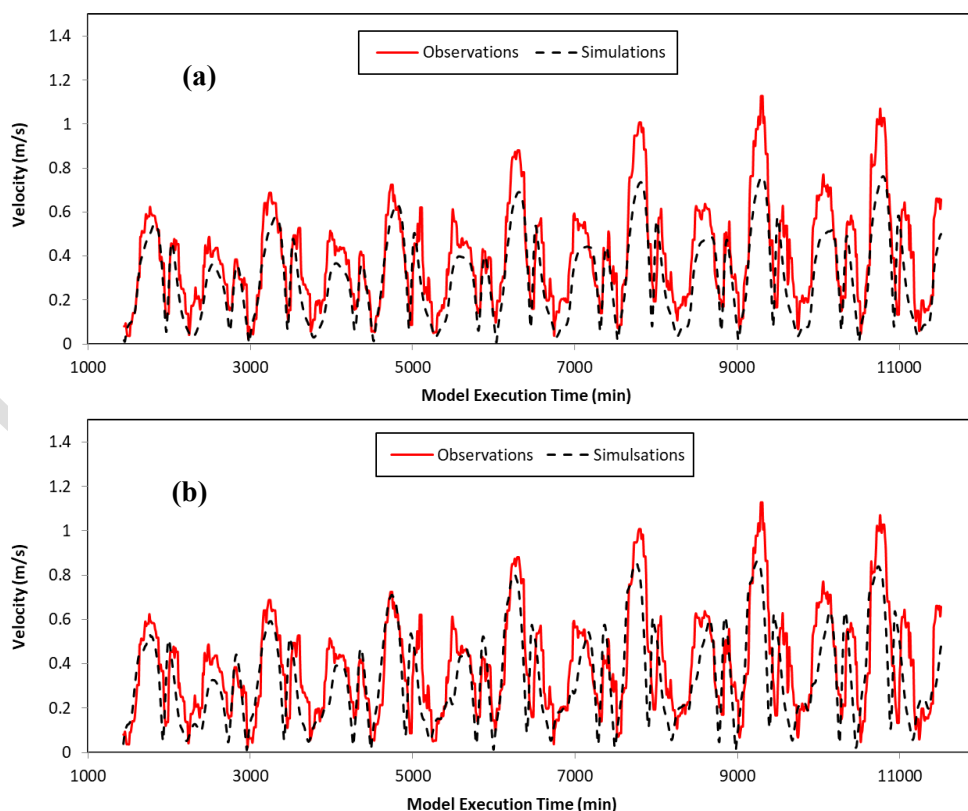


Figure 4. Velocity Variation Graph at Imam Khomeini Station (a) Before Calibration (b) After Calibration

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 عمدتاً موجب بهبود دامنه و کاهش خطای مطلق شده و فاز زمانی مد و جزر را تغییر نداده است. از آنجا که در این مطالعه ارزیابی بر اساس مقادیر اوج مد و جزر انجام شد، شکل کلی پراکندگی نقاط قبل و بعد از کالیبراسیون مشابه باقی مانده است.

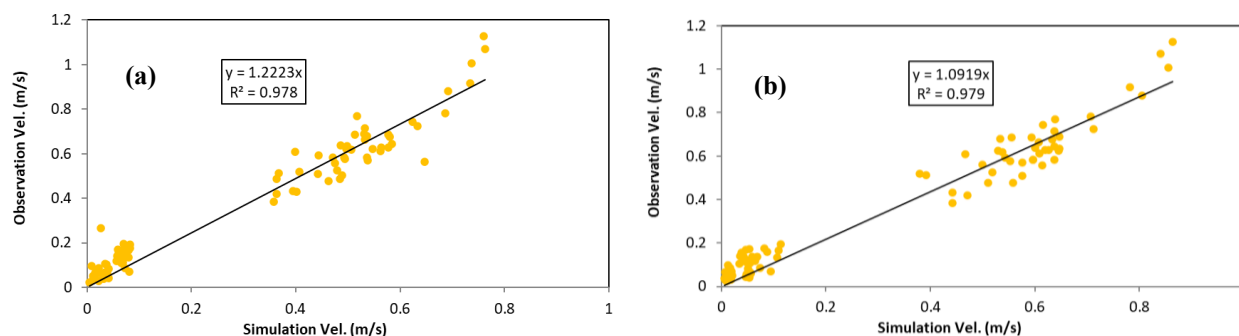


Figure 5. Correlation between Observed and Simulated Data at Imam Khomeini Station (a) Before Calibration (b) After Calibration

برای اطمینان از دقت مدل، صحت‌سنجی آن برای بازه زمانی مجزا به مدت پنج روز با همان مدل کالیبره شده 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.

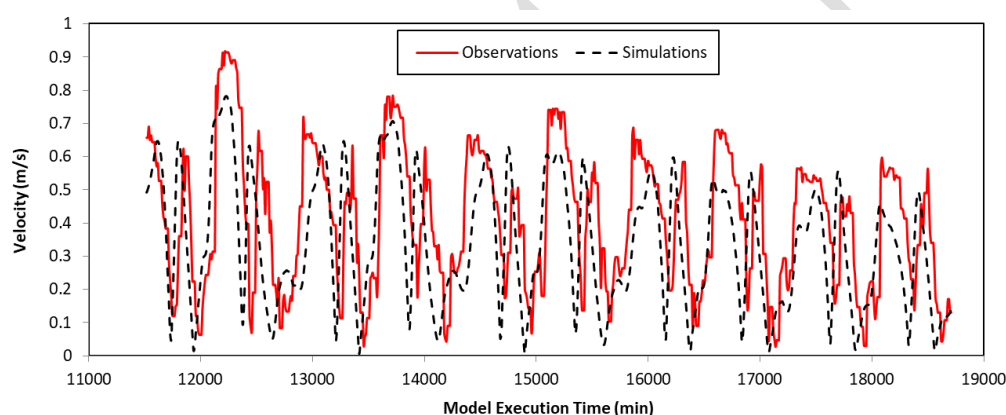


Figure 6. Graph of Flow Velocity Variations at Imam Khomeini Station over Different Time Intervals (Validation)

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 گواه 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

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

در اشکال (۷) تا (۹) تغییرات سرعت جریان در ایستگاه‌های بندر ماهشهر، مریموس و خور موسی نشان داده شده است. محدوده زمانی طوری انتخاب گردیده که حداثی بین یک اسپرینگ^{۱۰} تا یک نیپ^{۱۱} را پوشش دهد. علی‌رغم 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 آنجا 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.

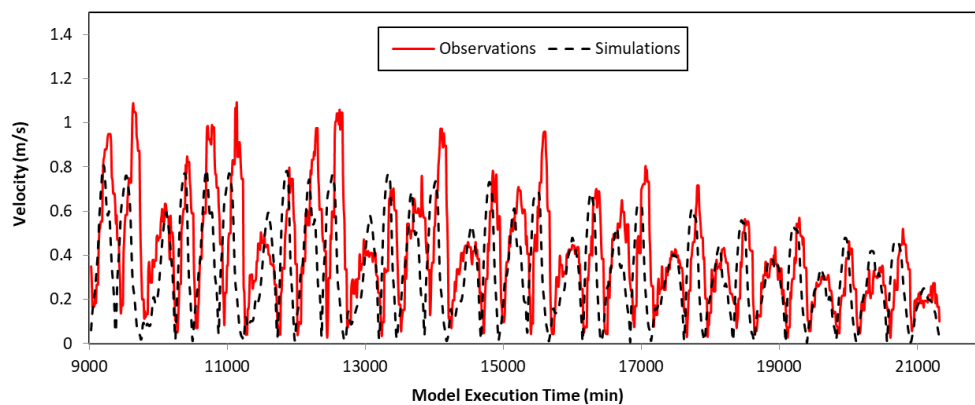


Figure 7. Graph of Flow Velocity Variations at Bandar Mahshahr Station

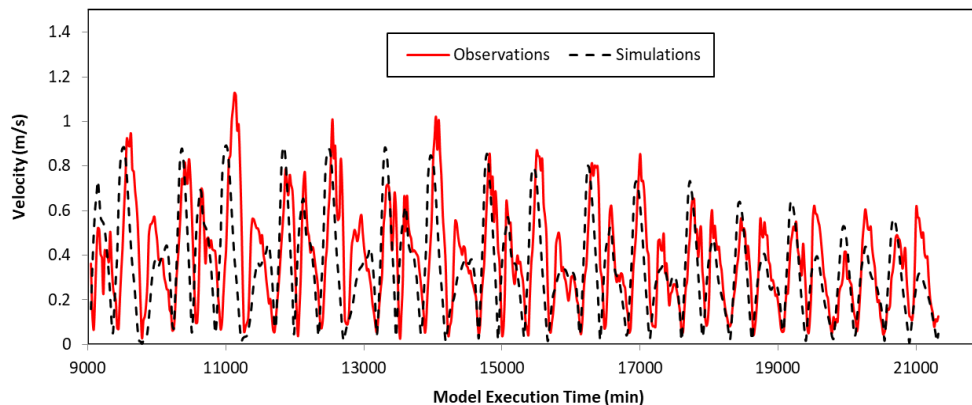


Figure 8. Graph of Flow Velocity Variations at Marymus Station

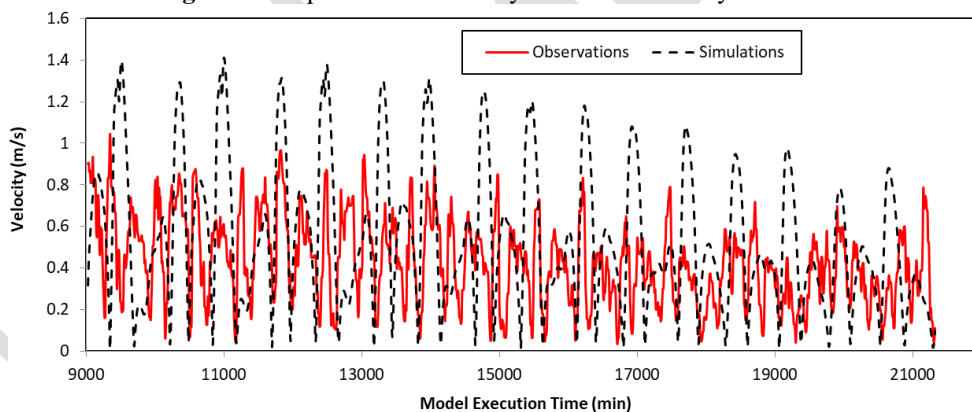


Figure 9. Graph of Flow Velocity Variations at Khor e Musa Station

در اشکال (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.

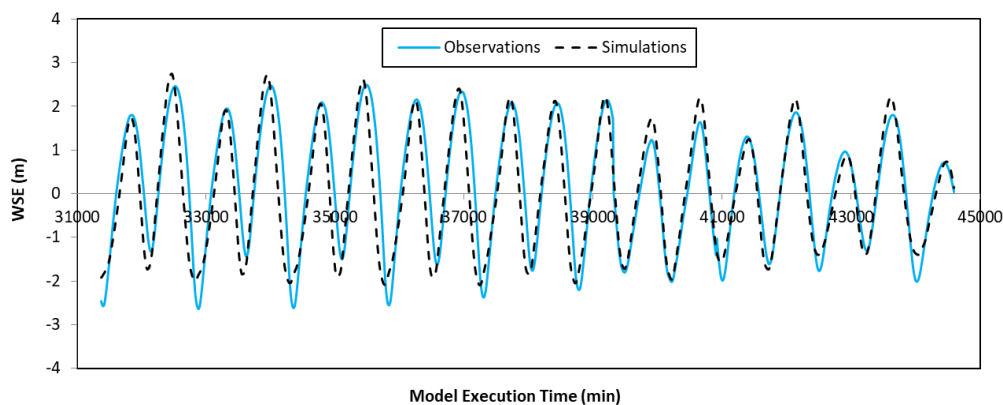


Figure 10. Graph of Water Surface Elevation at Bandar Mahshahr Station

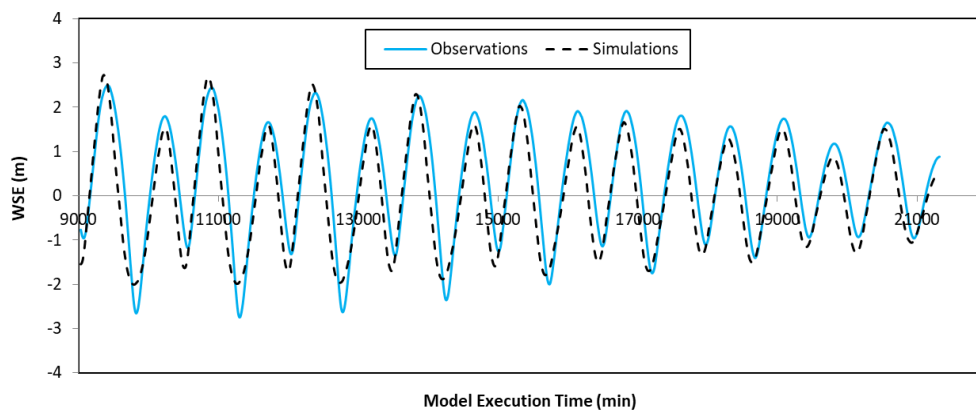


Figure 11. Graph of Water Surface Elevation at Khor e Musa Station

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 ۱۹,۰۰۰ تا ۸۰,۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه تغییر می‌کند که بیانگر حجم بسیار زیاد آب عبوری از این مقطع بوده و پتانسیل بالای این منطقه بخصوص در بحث تولید انرژی را مطرح می‌کند. در این شکل مقادیر مثبت بیانگر ورود جریان (مد) و مقادیر منفی بیانگر خروج جریان (جزر) می‌باشند.

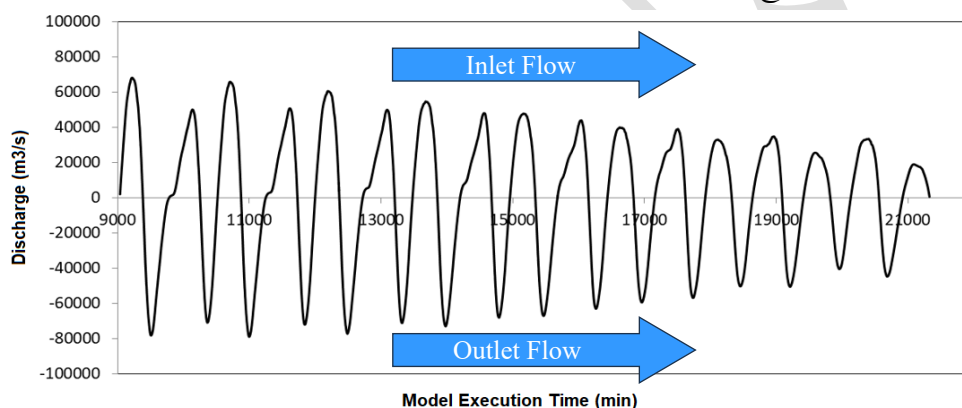


Figure 12. Flow hydrograph at the entrance of Musa estuary

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 مد و جزر کامل نشان داده شده است که بر اساس آن در حالت مد کامل تمامی ترازها مثبت و در حالت جزر کامل تمامی ترازها منفی می‌باشند. همچنین در اشکال (۱۴) و (۱۵) نقشه‌های سرعت جریان در حالت‌های پر و خالی شدن خور نشان داده شده است که بر اساس 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.

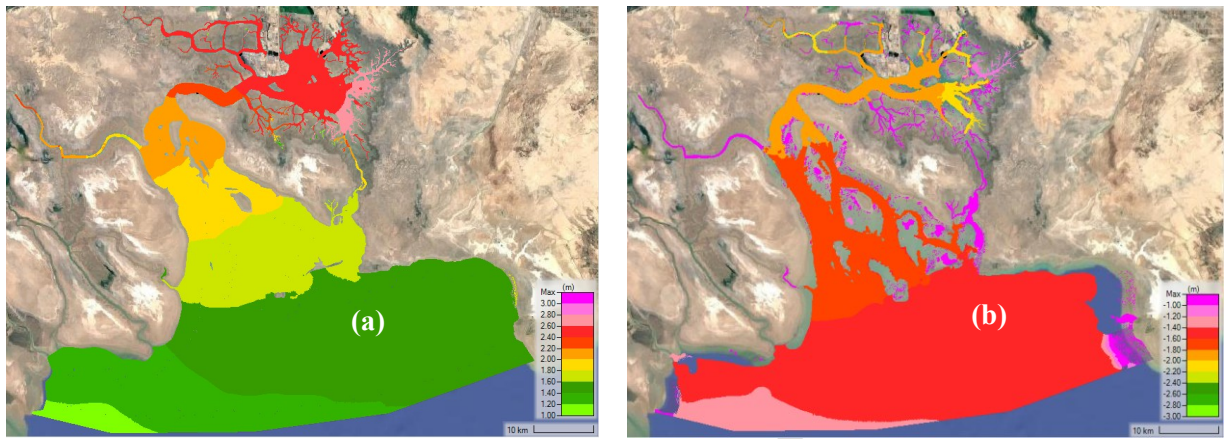


Figure 13. Water surface elevation map (a) high tide and (b) low tide

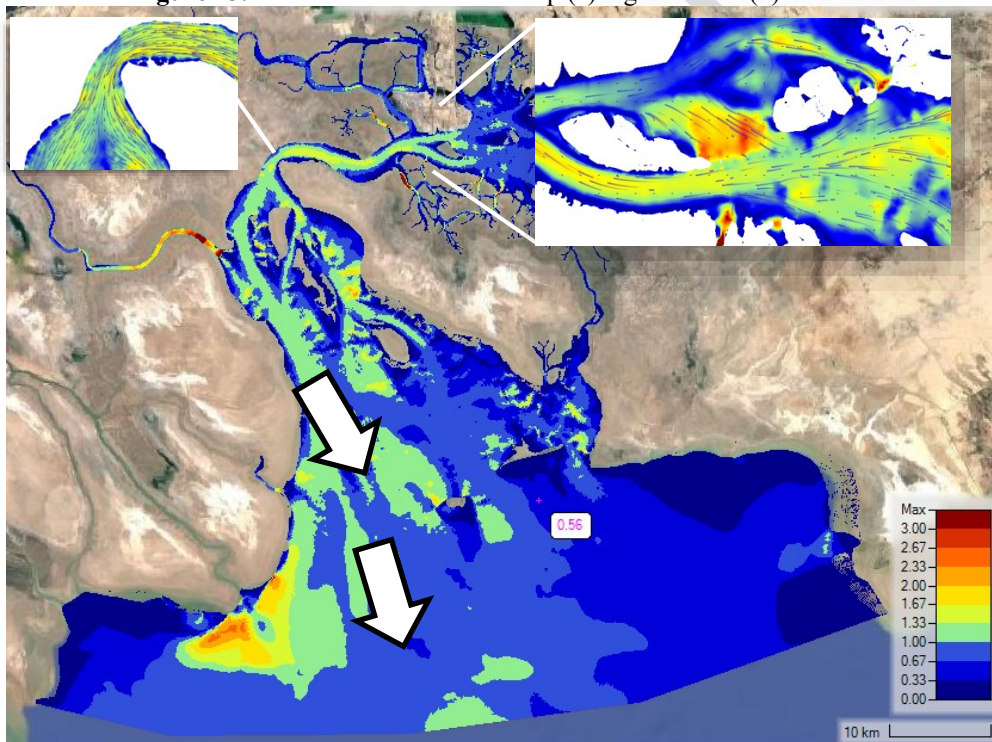


Figure 14. Flow velocity distribution map during the ebb phase in Musa estuary (m/s)

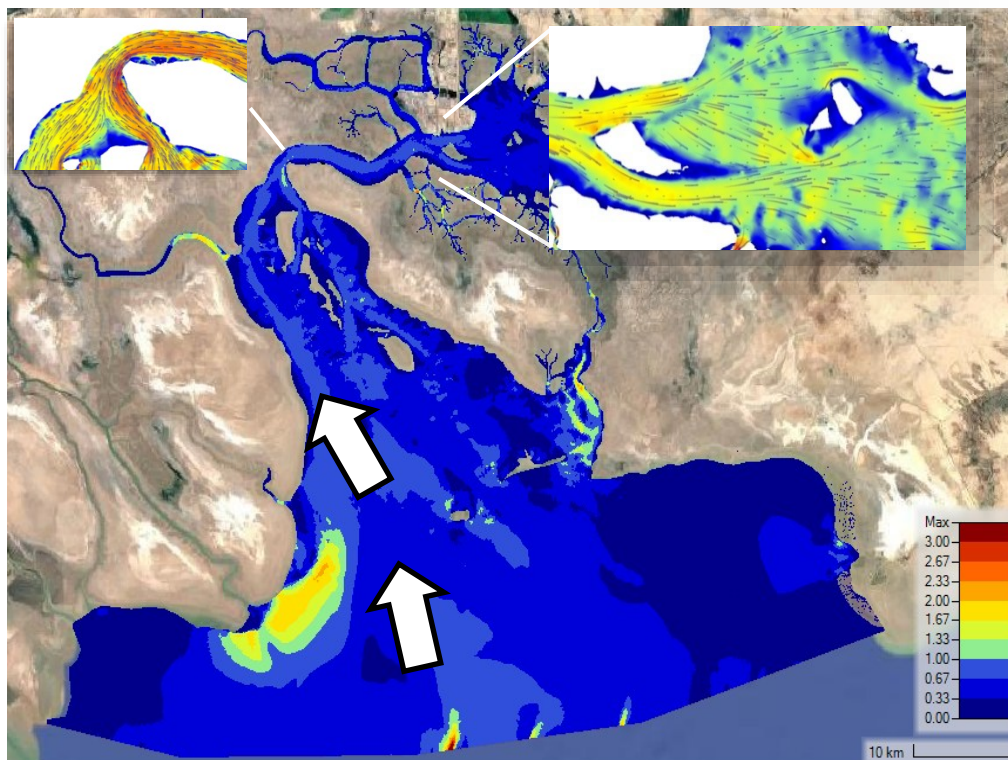


Figure 15. Flow velocity distribution map during the flood phase in Musa estuary (m/s)

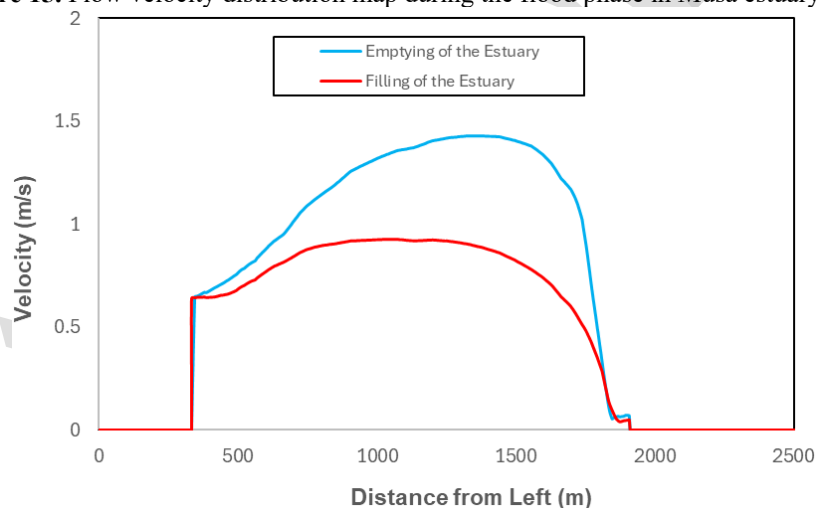


Figure 16. Flow velocity at the entrance of Musa estuary

۵. نتیجه گیری

این مطالعه باهدف ارزیابی مدل HEC-RAS2D در شبیه سازی هیدرودینامیک جریان جزر و مدی در خور موسی انجام شد. نتایج حاصله بیانگر آن بود که مدل مذکور بخوبی و با دقت بالایی توانسته دینامیک جریان های جزر و مدی در محیط های پیچیده ای همچون خور موسی را شبیه سازی کند. همچنین مدل تغییرات زمانی و مکانی تراز سطح آب و الگوهای سرعت را با همبستگی بالا نسبت به داده های میدانی بازتولید کرده و رفتار چرخه های جزر و مدی را به خوبی نمایش می دهد.

کالیبراسیون و صحت سنجی مدل با استفاده از داده های میدانی ایستگاه های منتخب، حاکی از انطباق قابل قبول بین مقادیر مشاهده ای و شبیه سازی شده تراز سطح آب و الگوهای جریان بود؛ به گونه ای که شاخص های آماری نظیر NSE، RMSE و MAE عملکرد مدل را در محدوده مطلوب تأیید کردند. این یافته ها با مطالعات مشابه، مانند Talebpour et al. (2021) در خوریات موسی با استفاده از مدل TELEMAC، همخوانی دارد که بر قابلیت مدل های عددی در شبیه سازی دقیق جریان های مصبی تأکید کرده اند. باوجود موفقیت، مدل دارای محدودیت هایی از جمله همخوانی پایین داده های سرعت جریان در ورودی خور موسی بود که دلیل آن ساده سازی اثرات جزر و مد، و یا در نظر نگرفتن نیروهای خارجی نظیر باد و امواج است. همچنین، امکان وجود خطا در داده های میدانی یا تفاوت های 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 جزر و مدی و نقش آن در شکل‌گیری الگوهای جریان، انتقال رسوب و فرآیندهای 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 (خالی شدن خور) بیشتر از فاز مد (پر شدن خور) است. این پدیده که در ادبیات علمی با عنوان عدم تقارن جزر و مدی (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 قابل توجه 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 جزر و مدی جهان نشان داد که دقت مدل به شدت وابسته به کیفیت داده‌های هندسی و میزان جزئیات شبکه محاسباتی است. نقاط ضعف مدل عمدتاً 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 جزر و مدی 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 جزر و مدی 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.

۶. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷. 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

- 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.
- Talebpour, 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.

Evaluation of the HEC-RAS 2D Model's Capability in Two-Dimensional Simulation of Tidal Flow Hydrodynamics (Case Study: Musa estuary)

Hossein Ardalan¹ and Javad Sarvarian^{2*}

1. Associate Professor, Water Research Institute, Tehran, Iran

2. Associate Professor, Department of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran

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.

Keywords: HEC-RAS2D model, Hydrodynamic, Musa estuary, Tidal Flow

* Corresponding author

Email: j.sarvarian@ilam.ac.ir