



برآورد آبدهی رودخانه مبتنی بر الگوریتم دورسنجی geoBAM و مدل سازی هیدرولیکی؛ مطالعه موردی رودخانه کارون

ندا صلاح نژاد<sup>۱</sup>، سعید هدایتی آرام<sup>۲</sup>، حسین علیزاده<sup>۳</sup>، برات مجردی<sup>۴</sup>، میثم فاضلی<sup>۵</sup>

## چکیده

روش‌های نوین مبتنی بر سنجش از دور به عنوان راهکاری مؤثر برای جبران کمبود داده در سال‌های اخیر توسعه یافته‌اند. این پژوهش با هدف تخمین دبی رودخانه از طریق الگوریتم مبتنی بر سنجش از دور geoBAM در دو حالت دسته‌بندی خیره و بدون نظارت انجام شده‌است. این الگوریتم مبتنی بر رویکرد McFLI و ویژگی‌های ریخت‌شناسی رودخانه عمل می‌کند. به منظور تأمین داده‌های اولیه، عرض آبراهه از تصاویر ماهواره‌ای و سایر داده‌های مورد نیاز از نتایج مدل هیدرولیکی HEC-RAS به دست آمد. در این مطالعه، ۱۷ تصویر Landsat 8 و ۷۸ تصویر Sentinel-2 ثبت شده در سال آبی ۱۸-۲۰۱۷ برای تحلیل بخش فاقد انشعاب و پیچان رود از رودخانه کارون (بین ایستگاه‌های ملاثانی و اهواز) مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج حاصل از اعتبارسنجی سری زمانی دبی رودخانه با داده‌های ایستگاه هیدرومتری ملاثانی نشان داد که الگوریتم مورد استفاده در هر دو حالت دسته‌بندی، هنگام به کارگیری عرض‌های استخراج شده از تصاویر Sentinel-2، دقت بالاتری نسبت به استفاده از تصاویر Landsat 8 دارد (ضریب نش-ساتکلیف ۰.۵۳ در مقابل ۰.۲ و ۰.۷۴ در مقابل ۰.۱۴ به ترتیب در حالت خیره و بدون نظارت). نتایج نشان داد که قدرت تفکیک بالاتر مکانی و زمانی Sentinel-2، منجر به دقت بیشتر و کاهش خطای تخمین دبی نسبت به Landsat 8 شده‌است. عملکرد بهتر حالت بدون نظارت در حالت استفاده از داده‌های Sentinel-2 می‌تواند ناشی از عدم تطابق برخی پیش‌فرض‌های خیره با شرایط محلی منطقه مورد مطالعه باشد. با توجه به نتایج این تحقیق، بطور کلی می‌توان گفت بکارگیری داده‌های ماهواره‌ای برای برآورد آبدهی رودخانه‌های کشور می‌تواند به عنوان یک روش مکمل اندازه‌گیری‌های زمینی توصیه شود و در آینده با پیشرفت بیشتر در این زمینه جایگزینی با داده‌های زمینی میسر خواهد شد؛ امری که امکان کاهش هزینه برداشتهای زمینی داده‌ها و افزایش سرعت برآوردهای آبدهی را در پی خواهد داشت.

**کلمات کلیدی:** سنجش از دور، تخمین دبی رودخانه، ریخت شناسی، McFLI، رودخانه کارون.

## ۱- مقدمه

مدیریت بهینه منابع آب و مقابله با چالش‌هایی نظیر خشکسالی، سیلاب و تغییرات اقلیمی مستلزم دسترسی به داده‌های دقیق و به‌هنگام از دبی رودخانه‌ها می‌باشد. از گذشته تا امروز، داده‌های اندازه‌گیری‌شده دبی از ایستگاه‌های زمینی، منابعی معتبر و دقیق برای پژوهش‌های هیدرولوژیکی در سطح جهانی به‌شمار می‌روند. با این حال این نوع سنجش در هر دو بعد مکانی و زمانی با چالش‌های متعدد دسترسی به داده به دلایل جغرافیایی، اقتصادی یا سیاسی روبروست. مدل‌های عددی که برای تخمین جریان رودخانه استفاده می‌شوند هم به لحاظ پیچیدگی، عدم قطعیت

<sup>۱</sup> دانش آموخته کارشناسی ارشد مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران. ایمیل: [salahnezhad\\_neda@alumni.iust.ac.ir](mailto:salahnezhad_neda@alumni.iust.ac.ir)

<sup>۲</sup> دانشجوی دکترای مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران. ایمیل: [s\\_hedayati@civileng.iust.ac.ir](mailto:s_hedayati@civileng.iust.ac.ir)

<sup>۳</sup> دانشیار گروه آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران. ایمیل: [alizadeh@iust.ac.ir](mailto:alizadeh@iust.ac.ir)

<sup>۴</sup> دانشیار گروه آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران. ایمیل: [mojaradi@iust.ac.ir](mailto:mojaradi@iust.ac.ir)

<sup>۵</sup> استادیار دانشکده عمران، معماری و هنر، واحد علوم تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. ایمیل: [m.fazeli@srbiau.ac.ir](mailto:m.fazeli@srbiau.ac.ir)



داده و مقیاس‌بندی‌های مختلف رودخانه‌ها با مشکلاتی مواجه بوده و هم به منظور دستیابی به دقت بالا برای واسنجی و اعتبارسنجی به داده‌های ایستگاهی متکی اند (Gleason and Hamdan, 2017; Beven and Cloke, 2012).

رویکردهای تخمین دبی رودخانه با تکیه بر متغیرهای هیدرولیکی بدست آمده از ماهواره‌ها در دهه‌های اخیر مورد توجه متخصصان و مدیران منابع آب قرار گرفته‌است. مطالعات گذشته، روش‌های دقیقی را برای بهره‌گیری از داده‌های سنجش از دور به‌منظور برآورد دبی رودخانه در مقیاس‌های محلی یا کوچک توسعه داده‌اند. ایجاد روابط تجربی بین دبی مشاهداتی و متغیرهای دورسنجی مبتنی بر ریخت‌شناسی کانال رودخانه (مانند عرض، شیب، ارتفاع یا مساحت سطح آب؛ Bjerklie, 2007; Bjerklie et al., 2003, 2005; Brakenridge et al., 2007; Durand et al., 2010, 2016, 2010; Pavelsky, 2014; Smith et al., 1996; Smith and Pavelsky, 2008; Tarpanelli et al., 2013) پارامترهای سنجش از دور در مدل‌های هیدرولیکی یا هیدرولوژیکی (Neal et al., 2012; Nathanson et al., 2012; Brakenridge et al., 2012; Yoon et al., 2012) از جمله این روش‌ها می‌باشد.

یکی از رویکردهای مهم قابل استفاده در سراسر جهان، حتی در مناطقی که دسترسی به داده‌های مشاهداتی محدود است، McFLI<sup>۱</sup> می‌باشد. پژوهش‌ها در این حوزه نشان داده‌اند که چارچوب McFLI قادر است دبی رودخانه را با دقت بالایی برآورد کند، به‌ویژه زمانی که از داده‌های سنجش از دور با کیفیت بالا و مدل‌های پیشرفته هیدرولیکی بهره گرفته شود. این رویکرد بر اساس بقای جرم است. اصل بقای جرم که در کانال‌های رودخانه اعمال می‌شود، بیان می‌کند که مقدار آبی که وارد یک بخش از کانال می‌شود و از آن خارج می‌شود یکسان است. اگرچه واضح است که این فرضیه در هنگام بررسی کل سیستم رودخانه نادرست است، اما در هنگام بررسی بخش‌های کوتاه رودخانه که هیچ شاخه فرعی، سد، آبراهه، تبادل قابل توجه آب زیرزمینی و نیز نفوذ و تبخیر وجود ندارد، تقریباً درست است (Gleason et al., 2017). رویکردهای McFLI تحت قوانین جریان نظیر معادله مانینگ<sup>۲</sup> (Andreadis et al., 2020; Bjerklie et al., 2018; Durand et al., 2014; Garambois and Monnier, 2018; Hagemann et al., 2017; Sichangi et al., 2018; Gleason et al., 2015) یا هندسه هیدرولیکی در ایستگاه‌های متعدد<sup>۳</sup> (AMHG; Gleason et al., 2019; Hagemann et al., 2017; Feng et al., 2019) ارائه گشته‌اند. مفهوم هندسه هیدرولیکی در یک ایستگاه (AHG; Maddoc and Leopold, 1953) مبنای توسعه رویکرد هندسه هیدرولیکی در ایستگاه‌های متعدد قرار گرفت. مطابق AHG، متغیرهای هیدرولیکی (عرض، عمق و سرعت جریان) تحت دبی ثابت در امتداد یک قسمت از رودخانه تغییر می‌یابند و در هر قسمت از رودخانه، میان هر یک از این متغیرها با دبی رابطه‌ای وجود دارد. شناسایی روابط نیمه لگاریتمی بین پارامترهای AHG در چندین مقطع عرضی در امتداد رودخانه منجر به توسعه AMHG (Gleason and Smith, 2014) گردید. در AMHG یک رابطه کلی از برازش چندین رگرسیون (که هر یک از این رگرسیون‌ها مربوط به یک مقطع عرضی است)، برای قسمتی از رودخانه بدست می‌آید و روابط بین متغیرهای هیدرولیکی (عرض، عمق و سرعت) و دبی به شکل جامع‌تری توصیف می‌شود. همین امر AMHG را به رویکردی کارآمد برای تخمین دبی رودخانه تنها با استفاده از مشاهدات ماهواره‌ای تبدیل می‌کند. ارتقای AMHG به یک الگوریتم محاسبه دبی مبتنی بر McFLI به روش بیزی، منجر به پیدایش الگوریتم BAM<sup>۵</sup> گردید (Hagemann et al., 2017). BAM دبی رودخانه را به روش احتمالاتی با استفاده از AMHG و یا معادله مانینگ تخمین می‌زند. در

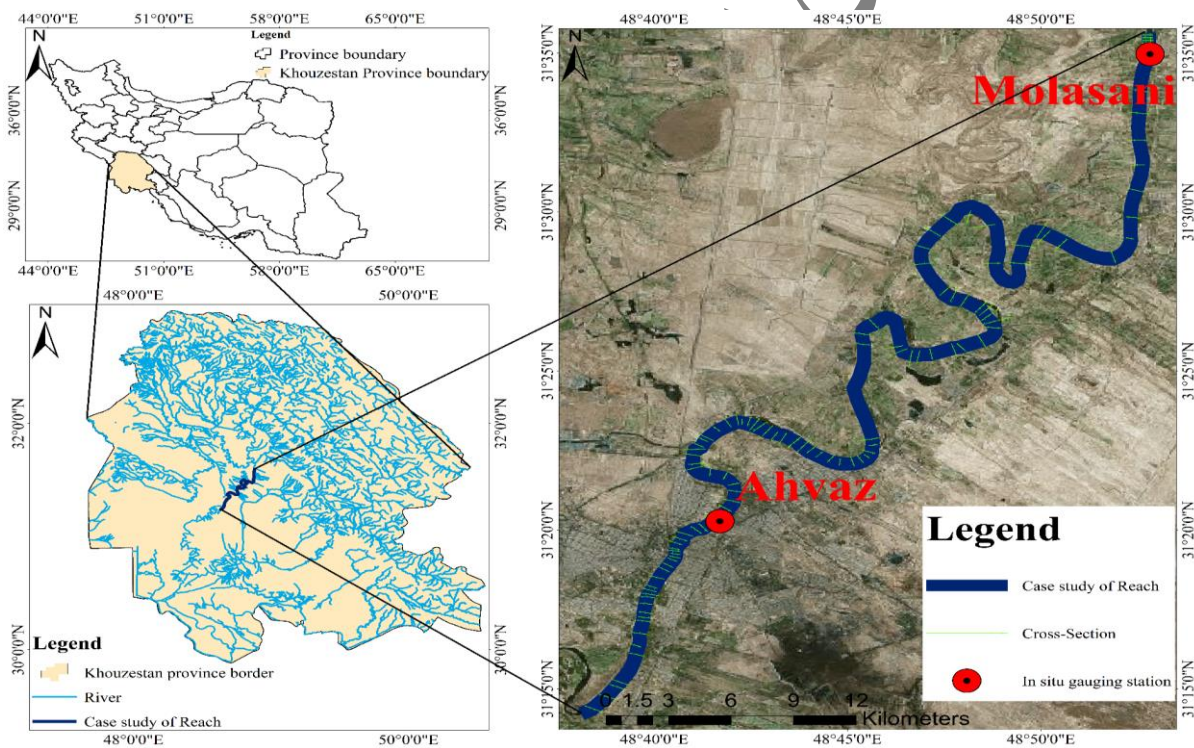


پژوهش (Brinkerhoff et al. (2020) نسخه بهبود یافته الگوریتم BAM به نام geoBAM<sup>6</sup> معرفی شد که با به کارگیری پیش فرض‌های هیدرولیکی مبتنی بر ویژگی‌های زمین ریخت‌شناسی هر رودخانه، دقت برآورد دبی از تصاویر ماهواره‌ای را به طرز قابل توجهی افزایش می‌دهد. پژوهشگران در این مطالعه از داده‌های میدانی هیدرولیکی به دست آمده در کنار روش‌های طبقه‌بندی بدون نظارت<sup>7</sup> و خبره<sup>8</sup> بهره بردند تا ویژگی‌های منحصر به فرد هر رودخانه را استخراج کرده و به عنوان ورودی برای مدل‌سازی استفاده کنند. آزمایش‌های انجام شده بر روی بیش از ۷۵۰۰ بخش رودخانه‌ای در حوزه مکنزی در شمال کانادا و همچنین داده‌های شبیه‌سازی شده SWOT نشان داد که این رویکرد موجب بهبود قابل ملاحظه‌ای در شاخص‌های عملکرد مدل (مانند NSE) شده است و قابلیت کاربرد جهانی آن، حتی در حوزه‌های فاقد ایستگاه‌های سنجش میدانی، به اثبات رسیده است. در مطالعه (Mohsen et al. (2022) استفاده از روش AMHG در ترکیب با الگوریتم‌های یادگیری ماشین و تصاویر Sentinel-2 توانست دقت تخمین دبی را به طور چشم‌گیری افزایش دهد، به طوری که همبستگی بالایی بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی مشاهده شد و میزان خطا در مقایسه با روش‌های سنتی به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافت. به‌طور خاص، مطالعه‌ای جامع توسط Lin et al. (2023) عملکرد geoBAM را در بیش از ۳۰۰۰ ایستگاه هیدرومتری در سطح جهانی مورد ارزیابی قرار داده است. نتایج این تحقیق نشان داد که geoBAM نسبت به نسخه اولیه خود (BAM) از دقت بالاتری برخوردار است و توانسته در مناطق متنوع اقلیمی، به‌ویژه در نواحی با پوشش گیاهی و رطوبت بالا، دقت قابل توجهی در تخمین دبی ارائه دهد (۳۹٪ KGE مثبت در مقابل ۲۷٪). (Durand et al. (2023) در اثری با محوریت مأموریت SWOT چهارچوبی جهانی بر پایه McFLI و AMHG ارائه دادند که شامل ترکیب داده‌های ارتفاع، عرض و شیب رودخانه از تصاویر ماهواره‌ای برای تخمین قابل اعتماد دبی در شرایط اقلیمی گوناگون است. این چهارچوب، ساختار فکری مشابهی با geoBAM دارد و نشان‌دهنده گسترش و تکمیل روش‌هایی مانند geoBAM در مقیاس جهانی است. به‌روزرسانی‌های انجام شده در الگوریتم geoBAM، از جمله در نظر گرفتن ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی در مقیاس حوضه‌ای، زمینه را برای تعمیم‌پذیری بیشتر آن در مناطق کمتر مطالعه‌شده از جمله ایران فراهم می‌سازد. تاکنون عملکرد الگوریتم geoBAM در شرایط هیدرولوژیکی خاص ایران مورد بررسی قرار نگرفته است، در حالی که صحت و کارایی این الگوریتم می‌تواند به‌طور مستقیم تحت تأثیر ویژگی‌های بومی و اقلیمی هر منطقه قرار گیرد. از این‌رو، ارزیابی آن در مقیاس محلی ضرورتی اجتناب‌ناپذیر به نظر می‌رسد. در این پژوهش، برای نخستین بار، عملکرد الگوریتم geoBAM در قالب یک مطالعه موردی برای McFLI در رودخانه کارون مورد بررسی قرار گرفته است. هدف اصلی، ارتقای دقت McFLI از طریق به‌کارگیری پارامترهای ژئومورفیکی و هیدرولیکی دقیق‌تر از بستر رودخانه بوده است. برای این منظور، مجموعه داده‌ای ترکیبی از مدل‌سازی هیدرولیکی در محیط HEC-RAS و اطلاعات سنجش از دور حاصل از دو ماهواره با قدرت تفکیک متفاوت تولید گردید. در حالت کلی، روش‌های مبتنی بر سنجش از دور، با اتکای کمتر به داده‌های مشاهداتی زمینی، امکان برآورد دبی در مناطق فاقد ایستگاه اندازه‌گیری را فراهم می‌کنند و دستیابی به داده‌های به‌روز و گسترده را در بازه‌های زمانی کوتاه‌تر ممکن می‌سازند. نوآوری این پژوهش نه تنها در به‌کارگیری الگوریتم geoBAM در چارچوب شرایط خاص اقلیمی ایران است، بلکه در طراحی یک چارچوب تلفیقی برای ترکیب داده‌های دورسنجی و مدل‌سازی هیدرولیکی برای بهبود تخمین مکانی و زمانی دبی رودخانه نیز نمود می‌یابد. همچنین، قابلیت تعمیم این روش به سایر حوضه‌های آبریز کشور، بهره‌برداری از آن در سیاست‌گذاری کلان در

مدیریت حوضه‌های آبریز، پایش بر خط و هشدارهای پیشگیرانه سیلاب چشم‌اندازی کاربردی و ارزشمند را پیش روی پژوهش‌های آتی قرار می‌دهد. در نتیجه، این مطالعه گامی نوین در بهره‌گیری از فناوری‌های سنجش از دور در مطالعات منابع آب کشور به شمار می‌رود.

## ۲- مورد مطالعاتی: رودخانه کارون

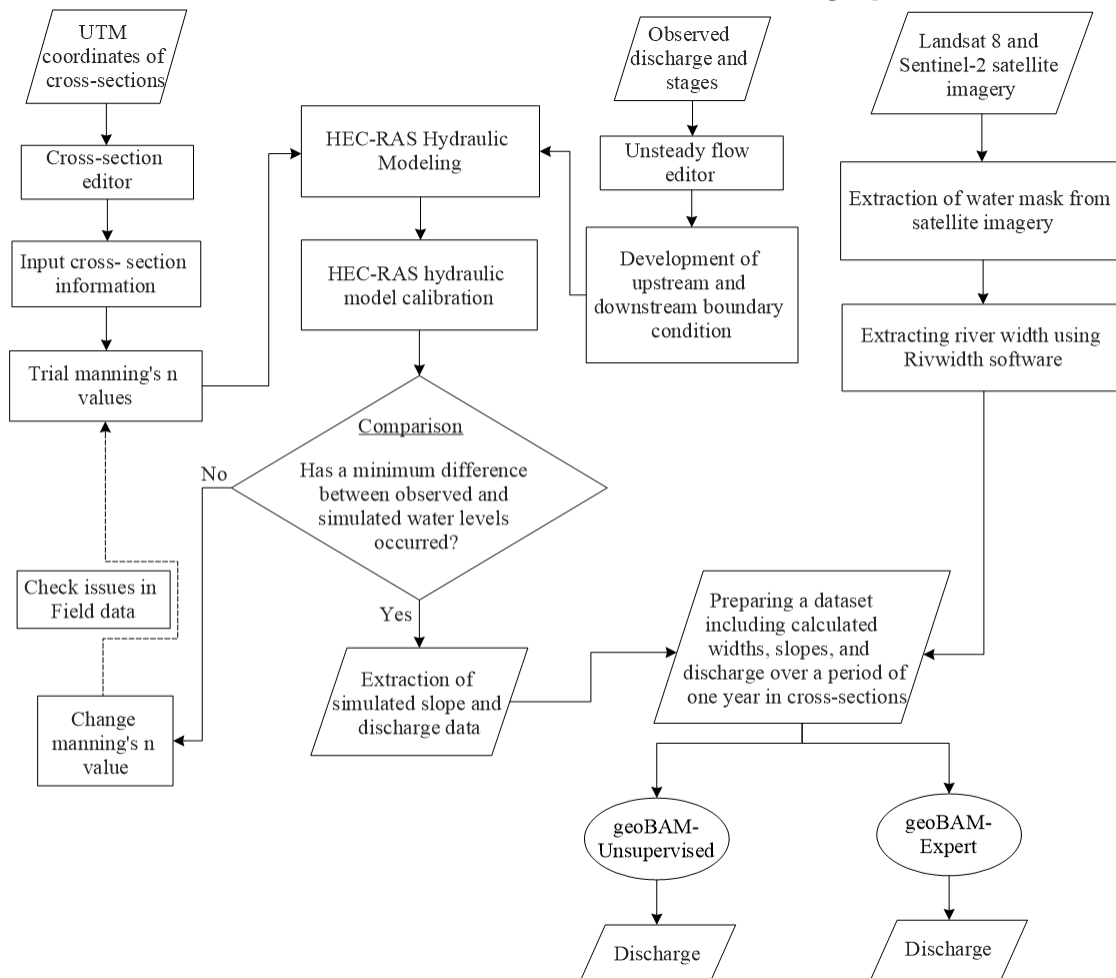
منطقه مورد مطالعه در استان خوزستان، ۷۶ کیلومتر از مسیر رودخانه کارون، بازه بین ۱ کیلومتر بالاتر از ایستگاه هیدرومتری ملاثانی تا ۱۳ کیلومتر پایین‌تر از ایستگاه هیدرومتری اهواز واقع در محدوده ۳۹ شمالی را شامل می‌شود. این بازه به دلیل لزوم بکارگیری اطلاعات دبی و تراز آب دو ایستگاه هیدرومتری برای مدل‌سازی و واسنجی در نظر گرفته شده‌است. موقعیت محدوده مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده‌است. لازم به ذکر است به منظور برآورد دبی توسط الگوریتم geoBAM، ۱۲ کیلومتر ابتدایی محدوده در نظر گرفته شده‌است. علت گزینش این بازه از رودخانه برای برآورد دبی این است که محدوده منتخب فاقد انشعاب و پیچان رود بوده و مطابق نتایج مطالعات پیشین در این زمینه (مانند Gleason et al., 2014; Feng et al., 2019; Brinkerhoff et al., 2020) خطای محاسباتی کمتر می‌شود.



**Figure 1-Location of the study area along the Karun River in Khuzestan Province; between Mollasani and Ahvaz hydrometric stations**

شکل ۱- موقعیت محدوده مورد مطالعه از رودخانه کارون در استان خوزستان؛ حدفاصل ایستگاه‌های هیدرومتری ملاثانی تا اهواز

در این بخش نحوه برآورد دبی با الگوریتم دورسنجی geoBAM تحت دو دسته‌بندی مبتنی بر ریخت‌شناسی رودخانه با عناوین خبره و بدون نظارت ارائه می‌گردد. دستیابی به این هدف شامل دو بخش مدل‌سازی هیدرولیکی (برای استخراج اطلاعات ریخت‌شناسی مختص به رودخانه مورد مطالعه) و استخراج اطلاعات از تصاویر سنجش از دور ماهواره‌ای است. در الگوریتم geoBAM، شیب بستر، عرض و دبی به‌عنوان ورودی لحاظ می‌شوند که شیب بستر و دبی با بهره‌گیری از مدل هیدرولیکی HEC-RAS و در پی آن فرایند واسنجی برای بهبود اعتبار نتایج مدل به‌دست آمده‌اند. واسنجی و عرض رودخانه از دو ماهواره Landsat 8 و Sentinel-2 استخراج شده‌است. بکارگیری داده‌های حاصل از دو ماهواره به‌منظور بررسی تأثیر وضوح زمانی و مکانی مختلف بر نتایج تخمین دبی ضروری به نظر می‌رسد. در شکل ۲ روندنمای مراحل پیاده‌سازی روش انجام پژوهش مشهود است.



**Figure 2-Flowchart of the overall process of the work done in the research**

شکل ۲-روندنمای مراحل پیاده‌سازی روش انجام پژوهش

### ۱-۳- مدل سازی هیدرولیکی HEC-RAS

در این پژوهش پیش از مدل سازی، اطلاعات هندسی ۱۱۹ مقطع عرضی رودخانه بدست آمده از سازمان آب و برق خوزستان وارد نرم افزار شده اند و مطابق آن ها جریان رودخانه در محیط نرم افزار ترسیم گشته است. جریان یک بعدی و ناپایدار تحت سری زمانی دبی برای شرایط مرزی مقطع عرضی بالادست جریان و عمق نرمال برای مقطع عرضی پایین دست جریان، برای دوره یک ساله در سال آبی ۱۸-۲۰۱۷ مدل سازی شده است. برای مدل جریان یک بعدی ناپایدار در نرم افزار HEC-RAS، از حل عددی دستگام معادلات سنت و نانت<sup>۹</sup> استفاده می شود. این دستگام از دو معادله دیفرانسیل جزئی، مطابق معادلات زیر تشکیل شده است:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial(\Phi Q)}{\partial x_c} + \frac{\partial[(1-\Phi)Q]}{\partial x_f} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(\Phi^2 Q^2 / A_c)}{\partial x_c} + \frac{\partial[(1-\Phi^2)Q^2 / A_f]}{\partial x_f} + g A_c \left( \frac{\partial H}{\partial x_c} + S_{fc} \right) + g A_f \left( \frac{\partial H}{\partial x_f} + S_{ff} \right) = 0 \quad (2)$$

که در آن ها اندیس های c و f به ترتیب به کانال و سیلاب دشت اشاره دارد. Q جریان کل در مقطع عرضی،  $\Phi$  ضریب توزیع جریان، g شتاب گرانش،  $S_f$  شیب انرژی، A مساحت مقطع عرضی، H ارتفاع سطح آب، x فاصله و t زمان می باشد. معادله (۱) بیانگر اصل پایستگی جرم در جریان کانال باز است. معادله (۲)، معادله پایستگی تکانه است که برای شرایط جریان با تغییر تدریجی تراز آب در کانال بکار می رود. برنامه ی عددی حل مسئله های معادلات سنت و نانت که در نرم افزار HEC-RAS استفاده می شود، معادلات پایستگی جرم و تکانه را با استفاده از یک دستگام معادلات خطی ضمنی به کمک طرح جعبه ای مرتبه دوم (Preissmann, 1961) Preissmann حل می کند. متغیرهای حالت برای این روش عددی شامل دبی و ارتفاع آب هستند که در هر مقطع عرضی محاسبه و ذخیره می شوند.

### ۲-۳- واسنجی مدل HEC-RAS

پارامتر اصلی واسنجی مدل HEC-RAS در این مطالعه همچون اکثر مطالعات پیشین (برای مثال Timbadiya et al., 2011; Yang et al., 2014; Dysarz, 2018; Kamran et al., 2020; Philippus et al., 2021; Hadi et al., 2021) ضریب "n" مانینگ در نظر گرفته شده است. در این پژوهش، از داده های ارتفاع آب موجود در مقطع عرضی واقع در موقعیت جغرافیایی ایستگاه ملاثانی (ایستگاه بالادست) و داده های دبی موجود در مقطع عرضی واقع در موقعیت جغرافیایی ایستگاه اهواز (ایستگاه پایین دست) برای واسنجی مدل هیدرولیکی در دوره زمانی یک ساله ۱۸-۲۰۱۷ استفاده گردید. روش ارزیابی خطا برای واسنجی به طور پیش فرض خطای میانگین در نظر گرفته شد که مطابق رابطه (۳) توسط نرم افزار محاسبه گردیده است:

$$\text{Average error} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (WS_C - WS_O) \quad (3)$$



که در آن،  $WS_C$ ،  $WS_O$  به ترتیب ارتفاع آب محاسباتی، ارتفاع آب مشاهداتی و  $n$  تعداد داده‌ها می‌باشد. فرایند بهینه‌سازی تا زمانی ادامه می‌یابد که یا حداکثر خطای محاسبه شده توسط نرم‌افزار از میزان خطای مجاز که توسط کاربر تعریف شده‌است، کمتر شود و یا به حداکثر تعداد تکرارهای شبیه‌سازی تعریف شده برسد. در این پژوهش، قابلیت واسنجی خودکار به صورت پیش فرض، Global در نظر گرفته شده‌است. میزان خطای مجاز در نظر گرفته شده ۰.۱ و حداکثر تعداد تکرار شبیه سازی ۱۰ می‌باشد. واسنجی در چهار حالت برای ضریب زبری‌های مختلف انجام شده‌است. ضرایب زبری از حالت اول تا حالت چهارم برای بستر رودخانه به ترتیب ۰.۰۲۵، ۰.۰۲۷، ۰.۰۳ و ۰.۰۳۵ و برای سیلاب‌دشت‌ها به ترتیب ۰.۰۲۷۵، ۰.۰۳، ۰.۰۳۵ و ۰.۰۴ در فرایند سعی و خطا در نظر گرفته شده‌است. طبق مطالعاتی مانند Fard et al. (2013) و Azarang et al. (2015)، ضرایب زبری برای بسترهای شنی و سیلتی رودخانه‌های جنوب غربی ایران معمولاً در این بازه قرار دارند. همچنین، جدول‌های استاندارد مانیگ ماندن جدول Chow (1959) نیز برای رودخانه‌هایی با بستر نسبتاً صاف و عاری از پوشش گیاهی انبوه،  $n \approx 0.025-0.035$  را پیشنهاد می‌کنند. بنابراین، حدس اولیه از ضریب مانیگ در این تحقیق با شرایط واقعی رودخانه کارون هم‌خوانی دارند.

### ۳-۳- دورسنجی پهنه آبی رودخانه

در این پژوهش، به منظور استخراج پهنه‌های آبی رودخانه با استفاده از قابلیت‌های بستر Google Earth Engine، فرآیند Pansharpening بر روی تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 و Landsat 8 اعمال شده‌است. در این روش، تصویر پانکروماتیک با وضوح مکانی بالا و دقت طیفی پایین (سیاه و سفید)، با تصاویر چندطیفی دارای دقت طیفی بالا و وضوح مکانی پایین ترکیب می‌شود تا تصویری با تفکیک مکانی و طیفی بهبود یافته حاصل گردد. با انجام Pansharpening، قدرت تفکیک مکانی در تصاویر Landsat 8 از ۳۰ متر به ۱۵ متر و در تصاویر Sentinel-2 از ۲۰ متر به ۱۰ متر رسیده‌است. برای دورسنجی پهنه آبی رودخانه از تصاویر Sentinel-2 و Landsat 8 دو روش متفاوت بکار گرفته شده‌است. در این پژوهش، بر اساس مطالعه Zhou et al. (2020) پس از محاسبه شاخص‌های طیفی MNDWI<sup>۱۱</sup>، NDVI<sup>۱۲</sup> و EVI<sup>۱۳</sup>، پیکسل‌های تصاویر ماهواره Landsat 8 به شرط برقراری رابطه (۴) به عنوان پیکسل‌های آبی تلقی شده‌اند:

$$((MNDWI > EVI) \cup (MNDWI > NDVI)) \cap (EVI < 0.1) \quad (4)$$

برای تشخیص پیکسل‌های آبی در تصاویر Sentinel-2، بر اساس مطالعه Jones (۲۰۱۹) الگوریتم DSWE<sup>۱۴</sup> اجرا شده‌است. مطابق این الگوریتم ابتدا شاخص‌های طیفی (MNDWI، NDVI، AWEI<sup>۱۴</sup>، MBSRV<sup>۱۵</sup> و MBSRN<sup>۱۶</sup>) محاسبه می‌شوند. سپس آستانه‌هایی برای هر شاخص تعریف می‌شود. ماسک‌های دودویی (۰ و ۱) تا  $t_1$  تا  $t_5$  با اعمال آستانه‌های مختلف بر روی شاخص‌های طیفی مذکور به صورت زیر ایجاد می‌شوند که نشان دهند آیا پیکسل، معیارهای آب را بر اساس هر شاخص برآورده می‌کند یا خیر.

$$t_1: MNDWI > 0.124 \quad (5)$$

$$t_2: MBSRV > MBSRN \quad (6)$$

$$t_3: AWEI_{sh} > 0 \quad (7)$$

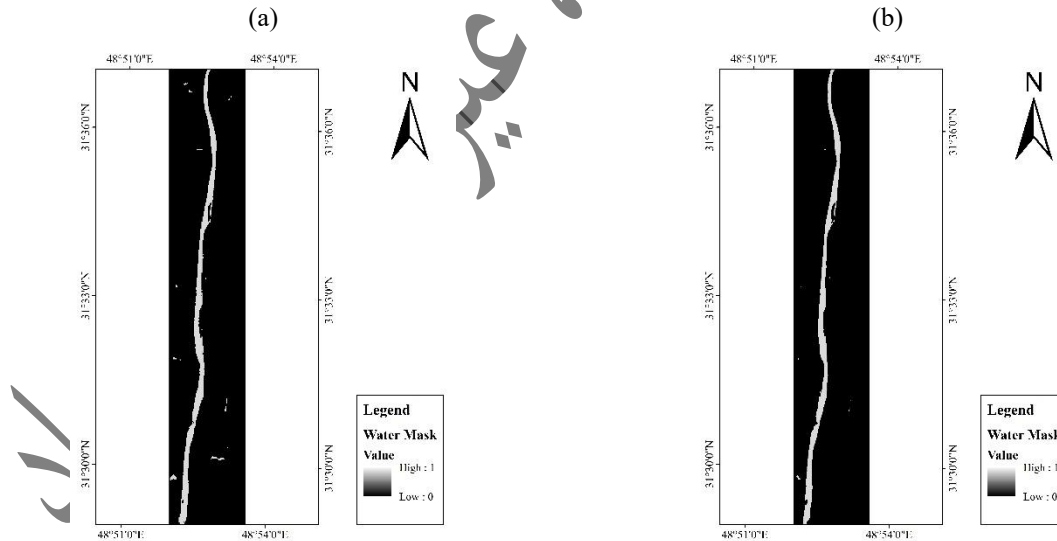
$$t_4: (MNDWI > -0.44) \cap (SWIR1 < 900) \cap (NIR < 1500) \cap (NDVI < 0.7) \quad (8)$$

$$t_5: (MNDWI > -0.5) \cap (blue < 1000) \cap (SWIR1 < 3000) \cap (SWIR2 < 1000) \cap (NIR < 2500) \quad (9)$$

شاخص نهایی طبقه‌بندی آب برای هر پیکسل بر اساس محاسبه ترکیبی از ماسک‌های باینری فوق و سهم وزنی مربوط به آن‌ها ایجاد می‌شود که نشان دهنده ارزیابی جامع‌تری از وجود آب است:

$$t = t_1 + 10t_2 + 100t_3 + 1000t_4 + 10000t_5 \quad (10)$$

در رابطه (۱۰) اختصاص وزن به هر شرط به منظور تمایز قائل شدن بین سطوح مختلف اطمینان در طبقه‌بندی آب است. مطابق رابطه فوق وزن‌های بالاتر به آستانه‌هایی اختصاص داده شده‌اند که برای تشخیص آب قابل‌اعتمادتر می‌باشند. شاخص نهایی  $t$  عددی بین ۰ تا ۱۱۱۱۱ خواهد بود که هر کدام از اعداد نشان دهنده برآورده شدن شرایط مختلف برای طبقه‌بندی آب با سطوح مختلف اطمینان اند. در نهایت، پیکسل‌هایی از تصویر، "آب" تلقی می‌شوند که به عنوان آب با اطمینان بالا و آب با اطمینان متوسط طبقه‌بندی شده باشند. شکل ۳ پهنه آبی بدست آمده در یک روز دارای تصویر مشترک از دو ماهواره را نشان می‌دهد.



**Figure 3- An example of the water mask obtained on 12/07/2017 from a) Landsat 8 and b) Sentinel-2 satellite image**

شکل ۳- نمونه ای از پهنه آبی بدست آمده در تاریخ ۲۰۱۷/۰۷/۱۲ از تصویر ماهواره الف) Landsat 8 و ب) Sentinel-2



عرض رودخانه در موقعیت‌های مکانی ۱۲۸ مقطع عرضی واقع در ۱۲ کیلومتر ابتدایی محدوده مورد مطالعه با استفاده از نرم‌افزار RivWidth 4.0 که توسط (Smith and Pavelsky (2008) منتشر شده‌است، محاسبه گردیده‌است. لازم به ذکر است این تعداد مقطع عرضی در محیط HEC-RAS با درون‌یابی در میان ۹ مقطع عرضی اصلی، در فواصل طولی منظم حدوداً ۹۰ متری بدست آمد (شکل ۴). RivWidth، یک ابزار نرم‌افزاری است که به زبان برنامه‌نویسی ITTVIS IDL توسعه داده شده‌است. توسط این نرم‌افزار مقادیر عرض رودخانه در فواصل مکانی منظم در طول مسیر رودخانه با اجرای کد به طور خودکار استخراج می‌شوند. به طور کلی، روش و الگوریتم مورد استفاده توسط RivWidth برای محاسبه مقادیر عرض رودخانه را می‌توان به دو مرحله تفکیک کرد: ۱) استخراج یک خط مرکزی در طول رودخانه و ۲) محاسبه عرض در هر پیکسل در امتداد آن خط مرکزی؛ به طوری که یک پاره خط متعامد در هر پیکسل خط مرکزی استخراج کرده و سپس کل عرض رودخانه را در امتداد هر خط عمود محاسبه می‌کند. اصلی‌ترین ورودی این نرم‌افزار پهنه آبی به صورت دودویی است. سایر اطلاعات ورودی شامل عرض، ارتفاع، قدرت تفکیک مکانی، مختصات گوشه تصویر، مختصات UTM مربوط به ناحیه، مشخص کردن انشعاب دار بودن یا نبودن رودخانه و تعیین مکان دریافت فایل‌های ورودی و خروجی نرم‌افزار در فایل مختص RivWidth توسط کاربر ویرایش می‌گردند. در نهایت خروجی، عرض رودخانه در مختصات UTM هر پیکسل واقع روی خط مرکزی است. در این پژوهش عرض‌های مورد استفاده در محل مقاطع عرضی ترسیم شده در محیط نرم‌افزار HEC-RAS استخراج شده‌اند.

فایل‌های ورودی و خروجی نرم‌افزار در فایل مختص RivWidth توسط کاربر ویرایش می‌گردند. در نهایت خروجی، عرض رودخانه در مختصات UTM هر پیکسل واقع روی خط مرکزی است. در این پژوهش عرض‌های مورد استفاده در محل مقاطع عرضی ترسیم شده در محیط نرم‌افزار HEC-RAS استخراج شده‌اند.

فایل‌های ورودی و خروجی نرم‌افزار در فایل مختص RivWidth توسط کاربر ویرایش می‌گردند. در نهایت خروجی، عرض رودخانه در مختصات UTM هر پیکسل واقع روی خط مرکزی است. در این پژوهش عرض‌های مورد استفاده در محل مقاطع عرضی ترسیم شده در محیط نرم‌افزار HEC-RAS استخراج شده‌اند.

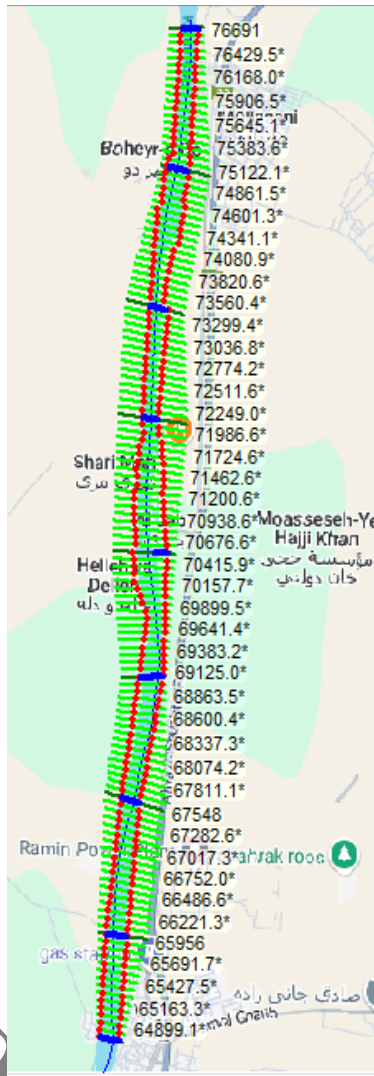


Figure 4-view of the interpolated cross-sections (in green) among the original cross-sections (in blue)

شکل ۴-نمایی از مقاطع عرضی درون یابی شده (به رنگ سبز) در میان مقاطع عرضی اصلی (به رنگ آبی)

### ۳-۵- برآورد دبی رودخانه مبتنی بر الگوریتم geoBAM

تجزیه و تحلیل (Brinkerhoff et al. (2019) یک عبارت جدید AMHG (معادله ۱۱) را به دست آورد که توسط  $p$  (توان رابطه تعمیم یافته سرعت-عمق)،  $K$  (ضریب زبری تعمیم یافته)،  $W_b$  (عرض کانال)،  $D_b$  (عمق کانال)،  $r$  (عبارت مربوط به شکل کانال که توسط Dingman (2007) تعریف شده است:  $r=1$  کانال مثلثی،  $r=2$  کانال سهمی شکل،  $r=\infty$  کانال مستطیلی است) و  $S$  (شیب کانال) تعریف می شود. Brinkerhoff et al. (2020) این فرض را در نظر گرفته و با جایگذاری معادله (۱۱) به قانون اصلی جریان AMHG (معادله ۱۲) - Gleason (2015) and Wang, 2015) و همچنین جایگزینی پارامترهای ثابت مانینگ برای عبارت های تعمیم یافته، یک قانون جریان جدید (معادله ۱۳) استخراج کردند.



$$W_c^{1+r+rp} Q_c^{-1} = W_b^{r+rp} D_b^{-(1+p)} (KS^2)^{-1} \quad (11)$$

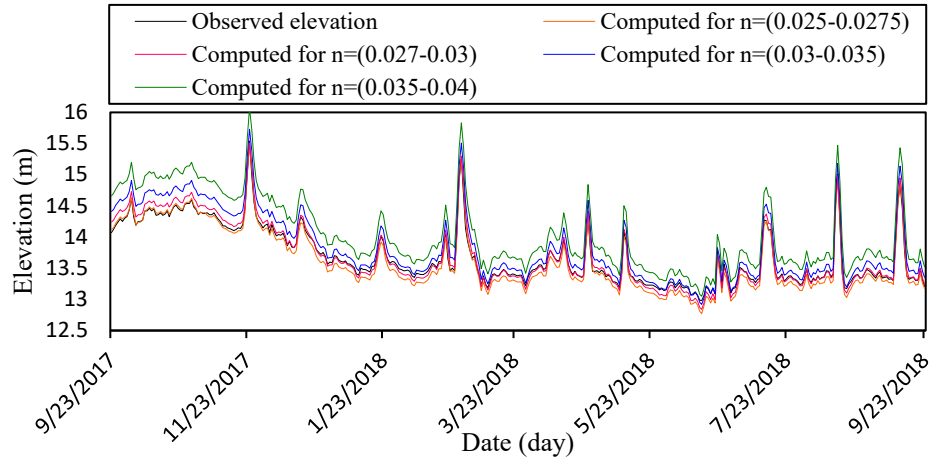
$$Q_t = \left(\frac{W_{it}}{W_c}\right)^{\frac{1}{b_i}} Q_{cw} \quad (12)$$

$$Q_t = \left(\frac{W_{it}}{W_c}\right)^{\frac{1}{b_i}} \left(W_b^{\frac{5r}{3}} D_b^{\frac{-5r}{3}} \left(\frac{r_i}{r_i+1}\right)^{\frac{-5r}{3}} S_{it}^{\frac{1}{2}} \Omega_i^{-1} W_c^{-(1+\frac{5r_i}{3})}\right)^{-1} \quad (13)$$

در رابطه (۱۳)، ضریب زبری مانینگ،  $K$  برابر با  $\frac{1}{n}$  دبی رودخانه،  $b$  توان AHG عرض و  $W$  عرض کانال برای مقطع  $i$  و گام زمانی  $t$  است. الگوریتم geoBAM بر مبنای رابطه (۱۳) توسعه یافته است. الگوریتم مورد استفاده تحت عنوان geoBAMr در محیط برنامه نویسی R تدوین گشته است. geoBAMr با استفاده از دسته بندی های ژئومورفیکی رودخانه، در دو چارچوب اصلی بدون نظارت و خبره، پارامترهای ورودی مدل را بهبود می دهد. در حالت بدون نظارت، خوشه بندی داده های ریخت شناسی با الگوریتم DBSCAN انجام می شود، در حالی که در حالت خبره، طبقه بندی بر اساس تحلیل مؤلفه های اصلی (PCA) و قضاوت تخصصی روی ویژگی های هیدرولیکی صورت می گیرد. هر یک از دو رویکرد طبقه بندی، منجر به تولید مجموعه ای از توزیع های پیشین<sup>۱۷</sup> برای پارامترهای هیدرولیکی کلیدی شامل عرض و عمق، ضریب زبری مانینگ، نمای توان هندسی عرض ( $b$ )، پارامتر شکل مقطع ( $r$ ) و شیب بستر می شوند. این توزیعها به صورت نگاشت های پارامتریک استخراج شده و به عنوان ورودی به الگوریتم وارد می شوند تا از طریق چارچوب استنباطی بیزی و با استفاده از نمونه برداری همپلتونی مونت کارلو، دبی جریان در مقاطع زمانی و مکانی مختلف تخمین زده شود. در نهایت دبی در ۱۲۸ مقطع عرضی واقع در قسمت بدون انشعاب رودخانه با سطح اطمینان ۰.۹۵ برآورد شده و شاخص های دقت و خطا شامل  $^1NSE$ ،  $^1RRMSE$ ،  $^1NRMSE$  و  $^2rBIAS$  برای آن ها محاسبه گردیده است.

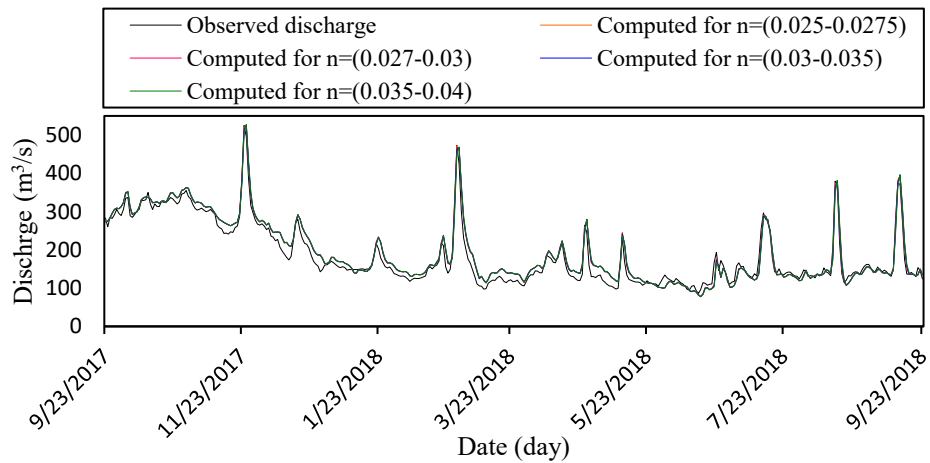
#### ۴- نتایج

واسنجی با اعمال ضرایب زبری مختلف برای بستر رودخانه و سیلاب دشتها تا زمان مشاهده کمترین اختلاف میان ارتفاع آب مشاهداتی و شبیه سازی شده ادامه یافته است. نتایج حاصل از واسنجی و تحلیل حساسیت پارامتر ضریب زبری به صورت مقایسه ارتفاع آب شبیه سازی شده و ارتفاع آب مشاهداتی در ایستگاه بالادست (ایستگاه ملاثانی) و مقایسه دبی شبیه سازی شده و دبی مشاهداتی در ایستگاه پایین دست رودخانه (ایستگاه اهواز) به ترتیب در شکل ۵ و شکل ۶ ارائه گردیده است. از شکل های مذکور می توان نتیجه گرفت که بیشترین انطباق و تشابه داده های ارتفاع آب مشاهداتی و شبیه سازی شده در حالتی رخ داده است که ضریب زبری برای بستر اصلی رودخانه ۰.۰۲۷ و برای سیلاب دشتها ۰.۰۳ اعمال شده است.



**Figure 5- Comparison of observed and simulated stage hydrograph at Mollasani station**

شکل ۵- مقایسه هیدروگراف‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده ارتفاع آب در ایستگاه ملاثانی



**Figure 6- Comparison of observed and simulated discharge hydrograph at Ahvaz station**

شکل ۶- مقایسه هیدروگراف‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده دبی در ایستگاه اهواز

به منظور ارزیابی نتایج واسنجی مدل، ضریب تعیین  $R^2$  برای هر چهار حالت اعمال ضریب زبری محاسبه گردیده‌است. مطابق جدول ۱ به وضوح می‌توان نتیجه گرفت که بهترین حالت انطباق در انتخاب و اعمال ضریب زبری برابر ۰.۰۲۷ برای بستر و ۰.۰۳ برای سیلاب‌دشت رودخانه بدست آمده‌است و ضریب  $R^2$  برابر ۰.۹۹۱۵ و ۰.۹۶۵۲ به ترتیب برای ارتفاع آب در ایستگاه ملاثانی و دبی در ایستگاه اهواز گواهی بر این موضوع می‌باشد.

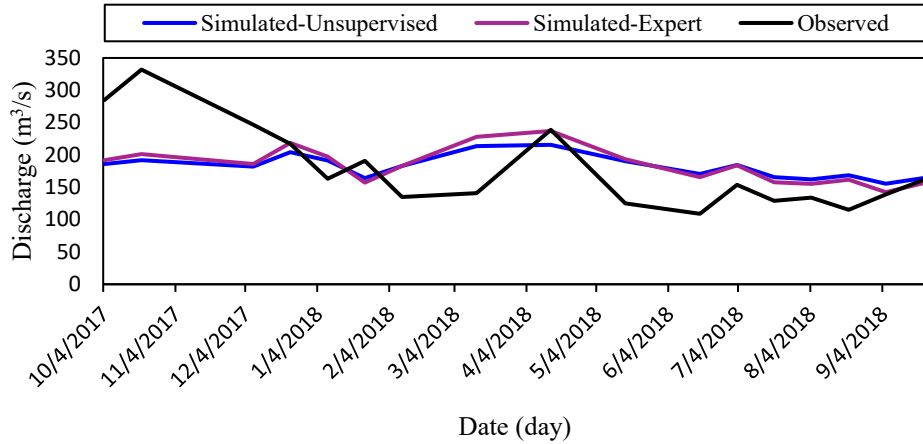


Table 1-R<sup>2</sup> coefficient for different modes of applying the roughness coefficient

جدول ۱- ضریب R<sup>2</sup> به ازای حالت‌های مختلف اعمال ضریب زبری

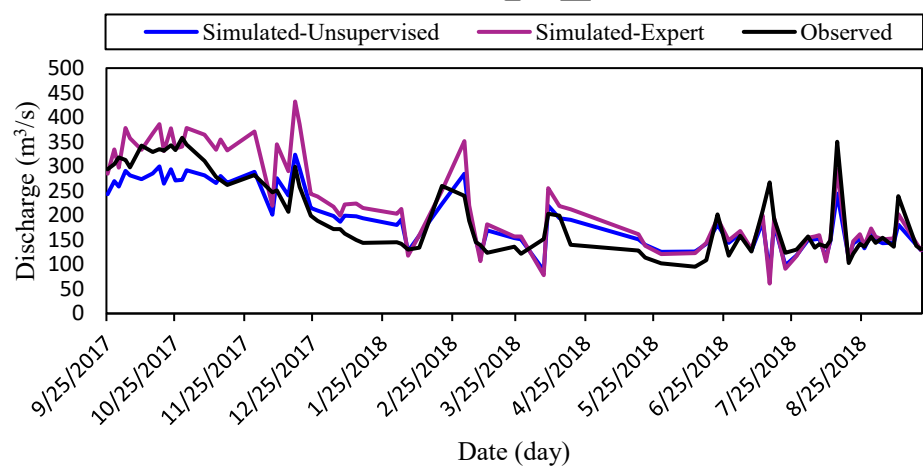
n	R <sup>2</sup> for	
	Water level at Mollasani station	Discharge at Ahvaz station
0.025-0.0275	۰,۹۹۱۲	۰,۹۶۵۰
0.027-0.03	0.9915	۰,۹۶۵۲
0.03-0.035	0.9905	۰,۹۶۱۴
0.035-0.04	۰,۹۸۸۶	۰,۹۵۴۴

پس از استخراج داده‌های مربوطه از خروجی مدل HEC-RAS، الگوریتم geoBAM در دو حالت استفاده از داده‌های ماهواره‌ای اجرا شده‌است. طبق نتایج بدست آمده از اجرای الگوریتم geoBAM با استفاده از عرض‌های بدست آمده از ماهواره Landsat 8، با توجه به هیدروگراف‌های شکل ۷ می‌توان گفت الگوریتم برآورد دبی در مقایسه با دبی‌های مشاهده‌ای در هر دو حالت بدون نظارت و خبره، نتوانسته‌است روند تغییرات زمانی را به خوبی بازتاب دهد و به خصوص در تخمین جریان‌های حدی دارای خطای بیشتری است؛ هرچند که در حالت خبره نتایج نسبتاً بهتری نسبت به حالت بدون نظارت حاصل شده‌است. در حالت استفاده از تصاویر ماهواره Sentinel-2 مطابق هیدروگراف‌های شکل ۸، در حالت دسته‌بندی خبره، الگوریتم در اکثر روزها تخمین بیش از حد معمول دارد. در تخمین جریان‌های زیاد نیز در مواردی عملکرد ضعیف داشته‌است. با این حال عملکرد آن در حالت کلی متوسط تا خوب می‌باشد. با توجه به دبی‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در حالت دسته‌بندی بدون نظارت، الگوریتم در مشاهده روند تغییرات دبی نسبتاً موفق عمل کرده‌است، هرچند که در بعضی موارد در تخمین جریان‌های زیاد عملکرد خیلی خوبی نداشته‌است. با این حال ظاهراً نتیجه رضایت بخش بدست آمده‌است.



**Figure 7- Discharge hydrographs generated by the geoBAM algorithm for the 2017–18 water year using channel widths extracted from Landsat 8 imagery under expert and unsupervised classification mode**

شکل ۷- هیدروگراف دبی به دست آمده از اجرای الگوریتم geoBAM برای سال آبی ۱۸-۲۰۱۷ با عرض‌های بدست آمده از تصاویر ماهواره Landsat 8 در حالت دسته‌بندی خبره و بدون نظارت

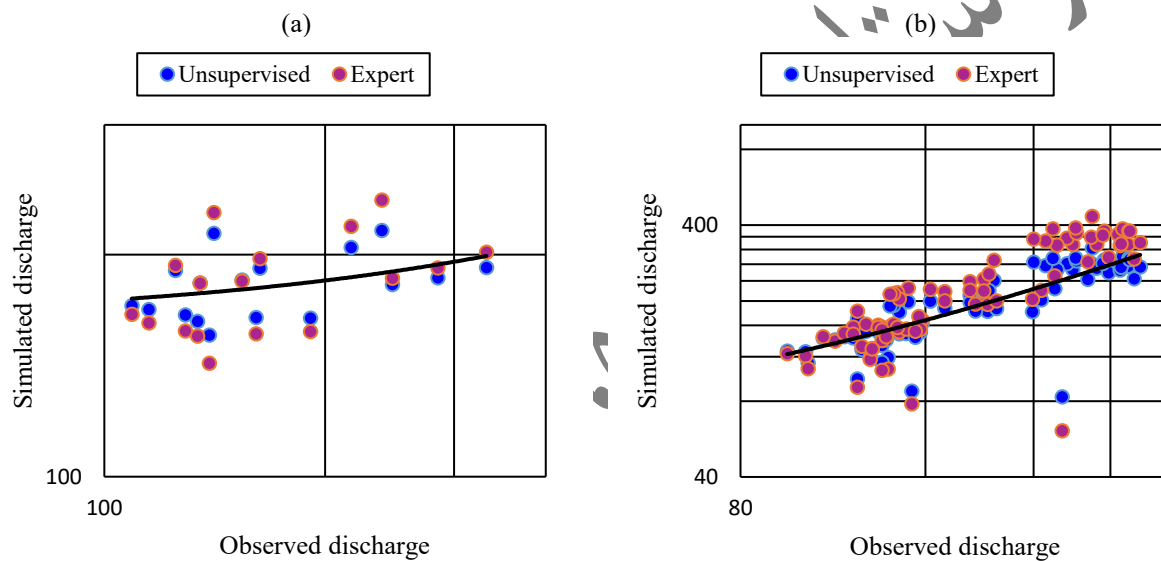


**Figure 8- Discharge hydrographs generated by the geoBAM algorithm for the 2017–18 water year using channel widths extracted from Sentinel-2 imagery under expert and unsupervised classification mode**

شکل ۸- هیدروگراف دبی به دست آمده از اجرای الگوریتم geoBAM برای سال آبی ۱۸-۲۰۱۷ با عرض‌های بدست آمده از تصاویر ماهواره Sentinel-2 در حالت دسته‌بندی خبره و بدون نظارت

نمودار پراکندگی برای یافتن الگوی حاکم بر داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی دبی و بررسی میزان همبستگی آن‌ها مطابق شکل ۹ به ترتیب در حالت استفاده از داده‌های Landsat 8 و Sentinel-2 ترسیم شده‌است. خط مشکی رسم شده در نمودارهای پراکندگی، نشان دهنده بهترین

تخمین است (مقدار شبیه سازی شده = مقدار مشاهداتی). نقاط بالا و پایین خط مشکی به ترتیب نشان دهنده تخمین بیشتر و کمتر از مقدار مشاهداتی می‌باشند. مطابق نمودار پراکندگی در شکل ۹ (الف) دبی برآورد شده از اجرای الگوریتم و دبی مشاهداتی همبستگی مثبت ضعیف دارند. در شکل ۹ (ب) علیرغم وجود چند نقطه خارج از محدوده، تراکم داده‌ها در اطراف خط برازش نسبتاً خوب بوده و می‌توان گفت که دبی شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در این حالت همبستگی خوبی با هم دارند؛ با این حال در حالت دسته‌بندی بدون نظارت تراکم داده‌ها در اطراف خط برازش نسبت به تراکم داده‌ها در حالت دسته‌بندی خبره بهتر بوده و می‌توان ادعا کرد که با چشم پوشی از نقاط پرت مشاهده شده در خارج از محدوده، دبی شبیه‌سازی شده همبستگی مثبت و قوی با دبی مشاهداتی دارد و در این حالت الگوریتم در برآورد دبی موفق‌تر عمل کرده‌است.



**Figure 9-Logarithmic scatter plots of simulated versus observed discharge derived from the geoBAM algorithm under expert and unsupervised classification using a) Landsat 8 and b) Sentinel-2 imagery**

شکل ۹- نمودار پراکندگی لگاریتمی دبی برآورد شده در مقابل دبی مشاهداتی حاصل از اجرای الگوریتم geoBAM در حالت دسته‌بندی خبره و بدون نظارت با استفاده از تصاویر الف) Landsat 8 و ب) Sentinel-2

معیارهای اعتبارسنجی برای ارزیابی کمی دبی شبیه‌سازی شده توسط الگوریتم geoBAM در جدول ۲ ارائه شده‌است. به منظور بررسی تأثیر مقدار عرض رودخانه، الگوریتم با استفاده از عرض‌های بدست آمده از مدل واسنجی شده HEC-RAS به ازای روزهای دارای تصویر ماهواره Landsat 8، Sentinel-2، اجرا گشته و نتایج در جدول ۲ ارائه شده‌است. مطابق معیارهای دقت و خطا، تخمین دبی با استفاده از تصاویر ماهواره Landsat 8 در هر دو حالت دسته‌بندی نسبتاً ضعیف عمل کرده و نتایج رضایت بخشی بدست نیامده‌است. این امر احتمالاً به دلیل قدرت تفکیک مکانی و زمانی کمتر تصاویر این ماهواره است. مادامی که از ماهواره Sentinel-2 استفاده شود، نتایج تا حد زیادی نسبت به حالت استفاده از تصاویر Landsat 8 بهبود یافته‌است. همین امر، بیش از پیش بیان می‌کند که تا چه میزان کیفیت مکانی تصویر در تخمین آبدهی تأثیرگذار است؛ چرا که عواملی نظیر وجود پوشش گیاهی کنار رودخانه و سایه به دلیل ماهیت نزدیک امضای طیفی آن‌ها به آب، باعث تشخیص اشتباه به جای آب



و ایجاد خطا در طبقه‌بندی می‌گردند. همچنین تغییرات عرض در تناسب با تغییرات دبی کمتر بوده و به همین دلیل داده‌های عمق همبستگی بهتری نسبت به عرض دارند (Gleason et al., 2015; Gleason et al., 2021). با توجه به مقادیر پایین معیارهای خطا و بالا بودن مقادیر NSE، عملکرد الگوریتم به خصوص در حالت دسته‌بندی بدون نظارت در برآورد دبی موفقیت‌آمیز بوده و نتیجه قابل قبول بدست آمده‌است. با مقایسه نتایج اعتبارسنجی در حالت استفاده از عرض بدست آمده از HEC-RAS، با حالت استفاده از عرض بدست آمده از ماهواره‌ها به وضوح می‌توان دریافت که هرچقدر عرض رودخانه، دقیق‌تر باشد، نتایج حاصل از الگوریتم دقیق‌تر خواهد بود. همچنین این نکته که با افزایش وضوح مکانی داده‌ها دقت برآورد آبدهی افزایش یافته، امیدواری‌ها را در زمینه بهبود عملکرد الگوریتم geoBAM با بکارگیری داده‌های با وضوح بالاتر از ماهواره Sentinel، همچون داده‌های ماهواره‌ی خیام، افزایش می‌دهد.

**Table 2-Validation metrics for discharge estimation obtained from the application of the geoBAM algorithm using width obtained from satellite imagery and HEC-RAS model under expert and unsupervised classification**

جدول ۲- معیارهای اعتبارسنجی برآورد دبی از اجرای الگوریتم geoBAM با استفاده از عرض بدست آمده از تصاویر ماهواره‌ای و مدل HEC-RAS در حالت‌های دسته‌بندی خبره و بدون نظارت

Input width source	Corresponding satellite overpass days	classification	NSE	RRMSE	NRMSE	rBIAS
Satellite Imagery	Landsat 8	Unsupervised	۰,۱۴	۰,۳۳	۰,۳۳	۰,۰۳
		Expert	0.2	0.32	0.32	0.06
	Sentinel-2	Unsupervised	0.74	0.19	0.2	-0.03
		Expert	0.53	0.26	0.27	0.13
HEC-RAS Model	Landsat 8	Unsupervised	0.86	0.15	0.13	0.03
		Expert	0.87	0.1	0.13	0.06
	Sentinel-2	Unsupervised	0.98	0.06	0.05	0.1
		Expert	0.77	0.14	0.21	0.09

## ۵- نتیجه‌گیری

این مطالعه با استفاده از داده‌های هیدرولیکی و ویژگی‌های زمین‌ریخت‌شناسی خاص رودخانه کارون، به بررسی اثر تفاوت در قدرت تفکیک مکانی و زمانی دو ماهواره Landsat 8 و Sentinel-2 بر عملکرد الگوریتم geoBAM پرداخته است. نتایج حاصل از اجرای الگوریتم و تحلیل شاخص‌های اعتبارسنجی نشان دادند که استفاده از داده‌های عرض رودخانه استخراج‌شده از ماهواره Sentinel-2، دقت بالاتری در برآورد دبی نسبت به داده‌های ماهواره Landsat 8 به همراه داشته است. مقایسه ضریب کارایی نش-ساتکلیف نشان می‌دهد که در روش دسته‌بندی بدون نظارت،



مقدار ۰.۷۴ در برابر ۰.۱۴ و در روش دسته‌بندی خبره، مقدار ۰.۵۳ در مقابل ۰.۲ به ترتیب برای Sentinel-2 و Landsat 8 به دست آمده است. این نتایج بیانگر برتری داده‌های Sentinel-2 در بهبود عملکرد الگوریتم می‌باشد. علت این امر قدرت تفکیک مکانی و زمانی بالاتر ماهواره Sentinel-2 نسبت به ماهواره Landsat 8 می‌باشد. در این راستا پیش‌بینی می‌شود که بکارگیری عرض‌های بدست آمده از ماهواره‌های با قدرت تفکیک مکانی و زمانی بسیار بالاتر نظیر ماهواره خیام، روش‌های زیرپیکسلی یا super resolution در استخراج عرض از تصاویر ماهواره‌ای به منظور افزایش دقت عرض‌های بدست آمده از ماهواره، افزایش دقت تخمین دبی را به دنبال خواهد داشت. در این میان، بهره‌گیری از الگوریتم‌های یادگیری ماشین به منظور ارتقاء فرآیند طبقه‌بندی می‌تواند نقش بسزایی در افزایش دقت نتایج ایفا نماید. تاکنون مطالعات اندکی به بررسی این موضوع پرداخته‌اند و پژوهش نظام‌مندی در زمینه مقایسه تأثیر الگوریتم‌های مختلف یادگیری ماشین بر دقت طبقه‌بندی و برآورد نهایی انجام نشده است. در هر دو دسته‌بندی خبره و بدون نظارت، عرض رودخانه پیش‌بینی کننده نوع رودخانه است. در مورد مطالعاتی این پژوهش در حالت استفاده از عرض‌های بدست آمده از ماهواره Sentinel-2، دسته‌بندی بدون نظارت نتایج بهتری نسبت به حالت خبره ارائه داد، ولی در حالت استفاده از عرض‌های بدست آمده از ماهواره Landsat 8 نتایج در حالت دسته‌بندی خبره بهتر بود. می‌توان گفت هر دسته‌بندی، مادامی که عرض‌ها را در کلاس درستی اختصاص دهد، نتایج بهتر و دقیق‌تر بدست می‌آید. همچنین با در نظر گرفتن حالت استفاده از عرض‌های بدست آمده از ماهواره Sentinel-2 به عنوان حالت ارجح نسبت به ماهواره Landsat 8 با توجه به قدرت تفکیک بالاتر ماهواره Sentinel-2 و همچنین مشاهده نتایج در حالت استفاده از عرض‌های بدست آمده از مدل HEC-RAS، می‌توان ادعا کرد که در حالت کلی دسته‌بندی بدون نظارت نماینده درست‌تری از ویژگی‌های رودخانه مورد مطالعه در این پژوهش است. در مناطقی که کیفیت داده‌های ماهواره‌ای خوب باشد (مثلاً پوشش ابرخ پایین، هندسه ساده)، حالت بدون نظارت به‌تنهایی می‌تواند دبی را با دقت خوبی تخمین بزند. در حالی که افزودن محدودیت‌های خبره ممکن است بیش‌برازش یا افزایش خطای سیستماتیک ایجاد کند. با توجه به پیشرفت جهانی استفاده از روش‌های غیرمستقیم و مبتنی بر سنجش از دور و نیز کاهش چشم‌گیر ایستگاه‌های هیدرومتری، پیاده‌سازی این روش برای پایش دبی به خصوص در قسمت‌های حائز اهمیت رودخانه‌های کشور (از جمله رودخانه‌های فرامرزی)، توصیه می‌شود. در این پژوهش، عملکرد موفق رویکرد مبتنی بر سنجش از دور، چشم‌انداز مثبتی را برای برآورد دبی در مناطق و بازه‌های زمانی فاقد داده‌های میدانی فراهم می‌سازد. این روش می‌تواند به کاهش گسست‌های مکانی و زمانی در داده‌ها، افزایش سرعت دسترسی به اطلاعات دبی از طریق حذف فرآیندهای زمان‌بر جمع‌آوری میدانی، و همچنین کاهش هزینه‌های مربوط به احداث و نگهداری ایستگاه‌های سنجش زمینی منجر شود.

## پی‌نوشت‌ها

- 1- Mass conserved Flow Law Inversion
- 2- Manning's equation
- 3- at-many-stations hydraulic geometry
- 4- at-a-station hydraulic geometry

- 5- Bayesian AMHG-Manning
- 6- Geomorphologically-enhanced variant of BAM
- 7- Unsupervised
- 8- Expert
- 9- Saint-Venant
- 10- Modified Normalized Difference Water Index
- 11- Normalized Difference Vegetation Index
- 12- Enhanced Vegetation Index
- 13- Dynamic Surface Water Extent
- 14- Automated Water Extraction Index shadow
- 15- Multi-band Spectral Relationship Visible
- 16- Multi-band Spectral Relationship Near-Infrared
- 17- Prior distributions
- 18- Nash–Sutcliffe efficiency
- 19- Relative Root Mean Square Error
- 20- Normalized Root Mean Square Error
- 21- Relative bias

۶- مراجع

- Andreadis, K. M., Brinkerhoff, C. B., & Gleason, C. J. (2020). Constraining the assimilation of SWOT observations with hydraulic geometry relations. *Water Resources Research*, 56(5):e2019WR026611
- Azarang, F. B. M. S., & Bajestan, M. S. (2015). Simulating the erosion and sedimentation of Karun Alluvial River in the Region of Ahvaz (southwest of Iran). *American Journal of Engineering Research*, 4(7):233-245
- Beven, K. J., & Cloke, H. L. (2012). Comment on: Hyperresolution global land surface modeling: Meeting a grand challenge for monitoring Earth's terrestrial water by Eric F Wood et al. *Water Resources Research*, 48(1)
- Bjerklie, D. M. (2007). Estimating the bankfull velocity and discharge for rivers using remotely sensed river morphology information. *Journal of hydrology*, 341(3-4):144-155
- Bjerklie, D. M., Birkett, C. M., Jones, J. W., Carabajal, C., Rover, J. A., Fulton, J. W., & Garambois, P. A. (2018). Satellite remote sensing estimation of river discharge: Application to the Yukon River Alaska. *Journal of hydrology*, 561:1000-1018
- Bjerklie, D.M.; Lawrence Dingman, S.; Vorosmarty, C.J.; Bolster, C.H.; Congalton, R.G. Evaluating the potential for measuring river discharge from space. *J. Hydrol.* 2003, 278:17–38
- Bjerklie, D. M., Moller, D., Smith, L. C., & Dingman, S. L. (2005). Estimating discharge in rivers using remotely sensed hydraulic information. *Journal of hydrology*, 309(1-4):191-209
- Brakenridge, G. R., Cohen, S., Kettner, A. J., De Groot, T., Nghiem, S. V., Syvitski, J. P., & Fekete, B. M. (2012). Calibration of satellite measurements of river discharge using a global hydrology model. *Journal of hydrology*, 475:123-136
- Brakenridge, G. R., Nghiem, S. V., Anderson, E., & Mic, R. (2007). Orbital microwave measurement of river discharge and ice status. *Water Resources Research*, 43(4)
- Chow, V. T. (1959). *Open channel hydraulics*. The McGraw-Hill Book Co., New York, N.Y.:161
- Dingman, S. L. (2007). Analytical derivation of at-a-station hydraulic–geometry relations. *Journal of Hydrology*, 334(1-2):17-27
- Durand, M., Fu, L. L., Lettenmaier, D. P., Alsdorf, D. E., Rodriguez, E., & Esteban-Fernandez, D. (2010). The surface water and ocean topography mission: Observing terrestrial surface water and oceanic submesoscale eddies. *Proceedings of the IEEE*, 98(5):766-779



- Durand, M., Gleason, C. J., Garambois, P. A., Bjerklie, D., Smith, L. C., Roux, H., ... & Vilmin, L. (2016). An intercomparison of remote sensing river discharge estimation algorithms from measurements of river height, width, and slope. *Water Resources Research*, 52(6):4527-4549
- Durand, M., Gleason, C. J., Pavelsky, T. M., Prata de Moraes Frasson, R., Turmon, M., David, C. H., ... & Wang, J. (2023). A framework for estimating global river discharge from the surface water and ocean topography satellite mission. *Water Resources Research*, 59(4):e2021WR031614
- Durand, M., Neal, J., Rodríguez, E., Andreadis, K. M., Smith, L. C., & Yoon, Y. (2014). Estimating reach-averaged discharge for the River Severn from measurements of river water surface elevation and slope. *Journal of Hydrology*, 511:92-104
- Durand, M., Rodriguez, E., Alsdorf, D. E., & Trigg, M. (2009). Estimating river depth from remote sensing swath interferometry measurements of river height, slope, and width. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 3(1):20-31
- Dysarz, T. (2018). Application of python scripting techniques for control and automation of HEC-RAS simulations. *Water*, 10(10):1382
- Fard, R. S., Heidarnajad, M., & Zohrabi, N. (2013). Study factors influencing the hydraulic roughness coefficient of the Karun river (Iran). *International Journal of Farming and Allied Sciences*, 22(2):976-981
- Feng, D., Gleason, C. J., Yang, X., & Pavelsky, T. M. (2019). Comparing discharge estimates made via the BAM algorithm in high-order Arctic rivers derived solely from optical CubeSat, Landsat, and Sentinel-2 data. *Water Resources Research*, 55(9):7753-7771
- Garambois, P. A., & Monnier, J. (2015). Inference of effective river properties from remotely sensed observations of water surface. *Advances in Water Resources*, 79:103-120
- Gleason, C. J., & Durand, M. T. (2020). Remote sensing of river discharge: A review and a framing for the discipline. *Remote sensing*, 12(7):1107
- Gleason, C., Garambois, P. A., & Durand, M. (2017). Tracking river flows from space. *EOS Earth & Space Science News*, (98)
- Gleason, C.J.; Hamdan, A.N. Crossing the (Watershed) Divide: Satellite Data and the Changing Politics of International River Basins. *Geogr. J.* 2017:183, 2–15
- Gleason, C. J., & Smith, L. C. (2014). Toward global mapping of river discharge using satellite images and at-many-stations hydraulic geometry. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(13):4788-4791
- Gleason, C. J., Smith, L. C., & Lee, J. (2014). Retrieval of river discharge solely from satellite imagery and at-many-stations hydraulic geometry: Sensitivity to river form and optimization parameters. *Water Resources Research*, 50(12):9604-9619
- Gleason, C. J., & Wang, J. (2015). Theoretical basis for at-many-stations hydraulic geometry. *Geophysical Research Letters*, 42(17):7107-7114
- Hadi, Z. N., & Almansori, N. J. H. (2023). Estimation of Manning coefficient for the section between Al-Hindiya barrage and Al-Kufa barrage utilizing HEC-RAS. *Materials Today: Proceedings*, 80:2595-2601
- Jones, J. W. (2019). Improved automated detection of subpixel-scale inundation—Revised dynamic surface water extent (DSWE) partial surface water tests. *Remote Sensing*, 11(4):374
- Kamran, M., Yousaf, W., Rajapakse, R. L. H. L., Kareem Awan, W., Riaz, M., Asif, N. M., ... & Shah, U. T. (2021). Innovative initiative for effective operation and monitoring using HEC-RAS modelling of Hakra Branch Canal System, Pakistan. *Irrigation and Drainage*, 70(3):490-504
- Lin, P., Feng, D., Gleason, C. J., Pan, M., Brinkerhoff, C. B., Yang, X., ... & de Moraes Frasson, R. P. (2023). Inversion of river discharge from remotely sensed river widths: A critical assessment at three-thousand global river gauges. *Remote Sensing of Environment*, 287:113489
- Mohsen, A., Kovács, F., & Kiss, T. (2022). Remote sensing of sediment discharge in rivers using Sentinel-2 images and machine-learning algorithms. *Hydrology*, 9(5):88
- Nathanson, M., Kean, J. W., Grabs, T. J., Seibert, J., Laudon, H., & Lyon, S. W. (2012). Modelling rating curves using remotely sensed LiDAR data. *Hydrological Processes*, 26(9):1427-1434
- Neal, J., Schumann, G., Bates, P., Buytaert, W., Matgen, P., & Pappenberger, F. (2009). A data assimilation approach to discharge estimation from space. *Hydrological Processes: An International Journal*, 23(25):3641-3649
- Pavelsky, T. M. (2014). Using width-based rating curves from spatially discontinuous satellite imagery to monitor river discharge. *Hydrological Processes*, 28(6):3035-3040
- Pavelsky, T. M., & Smith, L. C. (2008). RivWidth: A software tool for the calculation of river widths from remotely sensed imagery. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 5(1):70-73
- Preissmann, A. (1961) Propagation des intumescences dans les canaux et rivières. First Congress of the French Association for Computation, Grenoble, 433-442

- Philippus, D., Wolfand, J. M., Abdi, R., & Hogue, T. S. (2021). Raspy-Cal: A Genetic Algorithm-Based Automatic Calibration Tool for HEC-RAS Hydraulic Models. *Water*, 13(21):3061
- Sichangi, A. W., Wang, L., & Hu, Z. (2018). Estimation of river discharge solely from remote-sensing derived data: An initial study over the Yangtze river. *Remote Sensing*, 10(9):1385
- Smith, L. C., Isacks, B. L., Bloom, A. L., & Murray, A. B. (1996). Estimation of discharge from three braided rivers using synthetic aperture radar satellite imagery: Potential application to ungauged basins. *Water Resources Research*, 32(7):2021-2034
- Smith, L. C., & Pavelsky, T. M. (2008). Estimation of river discharge, propagation speed, and hydraulic geometry from space: Lena River, Siberia. *Water Resources Research*, 44(3)
- Tarpanelli, A., Brocca, L., Lacava, T., Melone, F., Moramarco, T., Faruolo, M., ... & Tramutoli, V. (2013). Toward the estimation of river discharge variations using MODIS data in ungauged basins. *Remote Sensing of Environment*, 136:47-55
- Prafulkumar V, T., Prem Lal, P., & Prakash D, P. (2011). Calibration of HEC-RAS model on prediction of flood for lower Tapi River, India. *Journal of Water Resource and Protection*, 2011
- Yang, T. H., Wang, Y. C., Tsung, S. C., & Guo, W. D. (2014). Applying micro-genetic algorithm in the one-dimensional unsteady hydraulic model for parameter optimization. *Journal of Hydroinformatics*, 16(4):772-783
- Yoon, Y., Durand, M., Merry, C. J., Clark, E. A., Andreadis, K. M., & Alsdorf, D. E. (2012). Estimating river bathymetry from data assimilation of synthetic SWOT measurements. *Journal of Hydrology*, 464:363-375
- Zhou, X., Prigent, C., & Yamazaki, D. (2021). Toward improved comparisons between land-surface-water-area estimates from a global river model and satellite observations. *Water Resources Research*, 57(5):e2020WR029256

### **Estimation of River Discharge Based on Remote Sensing-based geoBAM Algorithm and hydraulic modeling; Karun River study**

#### **Abstract**

Recent advances in remote sensing have provided effective solutions to address data scarcity. This study estimates river discharge using the remote sensing-based geoBAM (geomorphologically-enhanced variant of BAM) algorithm, applied in both expert and unsupervised classification frameworks. The algorithm follows the McFLI approach and incorporates river geomorphological features. To obtain the initial dataset, river width information was extracted from satellite imagery, while the remaining hydraulic parameters were obtained from the HEC-RAS model. A total of 17 images of Landsat 8 as well as 78 images of Sentinel-2 from the 2017–2018 water year were used to analyze a non-braided and non-meandering section of the Karun River between Mollasani and Ahvaz. Time series validation of the estimated discharge result against observed data showed that Sentinel-2-based discharge estimates outperformed those from Landsat 8 in both classification modes (NSE values of 0.53 vs. 0.20 and 0.74 vs. 0.14 for expert and unsupervised modes, respectively). The improved spatial and temporal resolution of Sentinel-2 led to more accurate discharge estimation. Interestingly, the unsupervised mode yielded better results than the expert mode when using Sentinel-2 data, which may be due to a mismatch between predefined expert priors and the actual hydraulic characteristics of the study area.

**Keywords:** Remote Sensing, River Discharge Estimation, Geomorphology, McFLI, Karun River.