

Estimation of River Discharge Using Remote Sensing-Based geoBAM Algorithm and Hydraulic Modeling; Karun River Case Study

N. Salahnezhad¹, S. Hedayati Aram², H. Alizadeh^{3*},
B. Mojaradi⁴, M. Fazeli⁵

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 for 2017–2018 water year were used to analyze a non-braided and non-meandering section of the Karun River between Mollasani and Ahvaz. Validating the time series of the estimated discharge result against the observed data showed that Sentinel-2-based discharge estimations 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 data 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. Using satellite data for river flow estimations is recommended as a complementary tool to field observations. With advancement in the future, these data can be a substitute to ground observations and can save the data gathering costs and give discharge evaluations in shorter times.

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

Received: June 2, 2025

Accepted: September 9, 2025

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

ندا صلاح نژاد^۱، سعید هدایتی آرام^۲، حسین علیزاده^{۳*}، برات مجردی^۴ و میثم فاضلی^۵

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 خبره و بدون نظارت انجام شده است. 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 ۲۰۱۷-۲۰۱۸ برای تحلیل بخش فاقد اشعاب و پیچان رود رودخانه کارون (بین ایستگاه‌های ملاسانی و اهواز) مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج حاصل از اعتبارسنجی سری زمانی دبی رودخانه با داده‌های ایستگاه هیدرومتری ملاسانی 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-سانکلیف ۰/۵۳ در مقابل ۰/۲ و ۰/۷۴ در مقابل ۰/۱۴ به ترتیب در حالت خبره 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 شده است. عملکرد بهتر حالت بدون نظارت در حالت استفاده از داده‌های Sentinel-2 می‌تواند ناشی از عدم تطابق برخی پیش‌فرض‌های خبره 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، ریخت‌شناسی، McFLI، رودخانه کارون.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۳/۱۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۹/۱۸

1- M.Sc. Graduate of Water Resources Management, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran. Email: salahnezhad_neda@alumni.iust.ac.ir

2- Ph.D. Candidate in Water Resources Management, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran. Email: s_hedayati@civileng.iust.ac.ir

3- Associate Professor, Department of Water and Environment, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran. Email: alizadeh@iust.ac.ir

4- Associate Professor, Department of Water and Environment, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran. Email: mojaradi@iust.ac.ir

5- Assistant Professor, School of Civil Engineering, Architecture and Art, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. Email: m.fazeli@srbiau.ac.ir

*- Corresponding Author

Doi: [10.22034/iwrn.2025.527862.2893](https://doi.org/10.22034/iwrn.2025.527862.2893)

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

۲- دانشجوی دکتری مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

۳- دانشیار گروه آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

۴- دانشیار گروه آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

۵- استادیار دانشکده عمران، معماری و هنر، واحد علوم تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان بهار ۱۴۰۵ امکان پذیر است.

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 ۳,۰۰۰ 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 انجام‌شده 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 ژئومورفیک 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 شد. 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 شده است. موقعیت محدوده مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است. لازم به ذکر است به منظور برآورد دبی توسط الگوریتم geoBAM، ۱۲ کیلومتر ابتدایی محدوده در نظر گرفته شده است. 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.

۳- روش پژوهش

در این بخش نحوه برآورد دبی با الگوریتم دورسنجی geoBAM تحت دو دسته‌بندی مبتنی بر ریخت‌شناسی رودخانه با عناوین خبره و بدون نظارت ارائه می‌شود. 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 و واسنجی و عرض رودخانه از دو ماهواره Landsat 8 و Sentinel-2 استخراج شده است. 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.

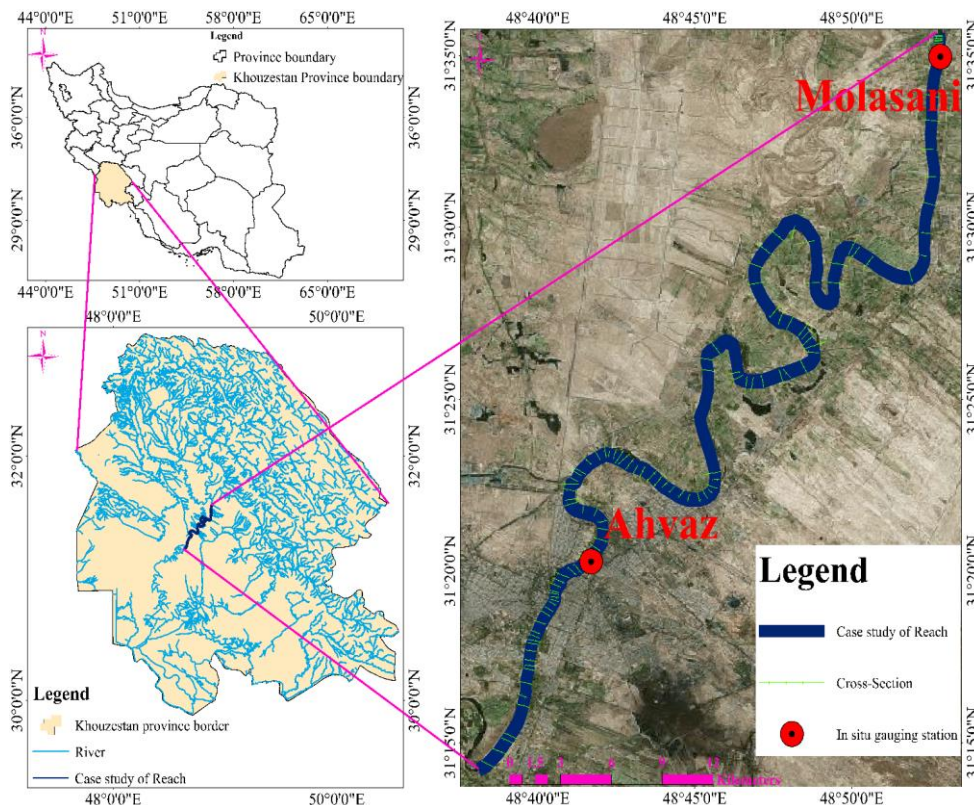


Fig. 1- Location of the study area along the Karun River in Khuzestan Province; between Mollasani and Ahvaz hydrometric stations

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

۳-۱- مدل‌سازی هیدرولیکی HEC-RAS

که در آن‌ها اندیس‌های c و f به ترتیب به کانال و سیلاب دشت اشاره دارد. Q جریان کل در مقطع عرضی، Φ ضریب توزیع جریان، g شتاب گرانش، S_f شیب انرژی، A مساحت مقطع عرضی، H ارتفاع سطح آب، x فاصله و t زمان است. 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 می‌رود. برنامه عددی حل مسئله‌های معادلات سنت و نانت که در نرم‌افزار HEC-RAS استفاده می‌شود، معادلات پایستگی جرم و تکانه را با استفاده از یک دستگاه معادلات خطی ضمنی به کمک طرح جعبه‌ای مرتبه دوم Preissmann (Preissmann, 1961) حل می‌کند. متغیرهای حالت برای این روش عددی شامل دبی و ارتفاع آب هستند که در هر مقطع عرضی محاسبه و ذخیره می‌شوند.

در این پژوهش پیش از مدل‌سازی، اطلاعات هندسی ۱۱۹ مقطع عرضی رودخانه بدست آمده از سازمان آب و برق خوزستان وارد نرم‌افزار شده‌اند و مطابق آن‌ها جریان رودخانه در محیط نرم‌افزار ترسیم شده 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 مدل‌سازی شده است. برای مدل جریان یک بعدی ناپایدار در نرم‌افزار HEC-RAS، از حل عددی دستگاه معادلات سنت و نانت^۹ استفاده می‌شود. این دستگاه از دو معادله دیفرانسیل جزئی، مطابق معادلات زیر تشکیل شده است:

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

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

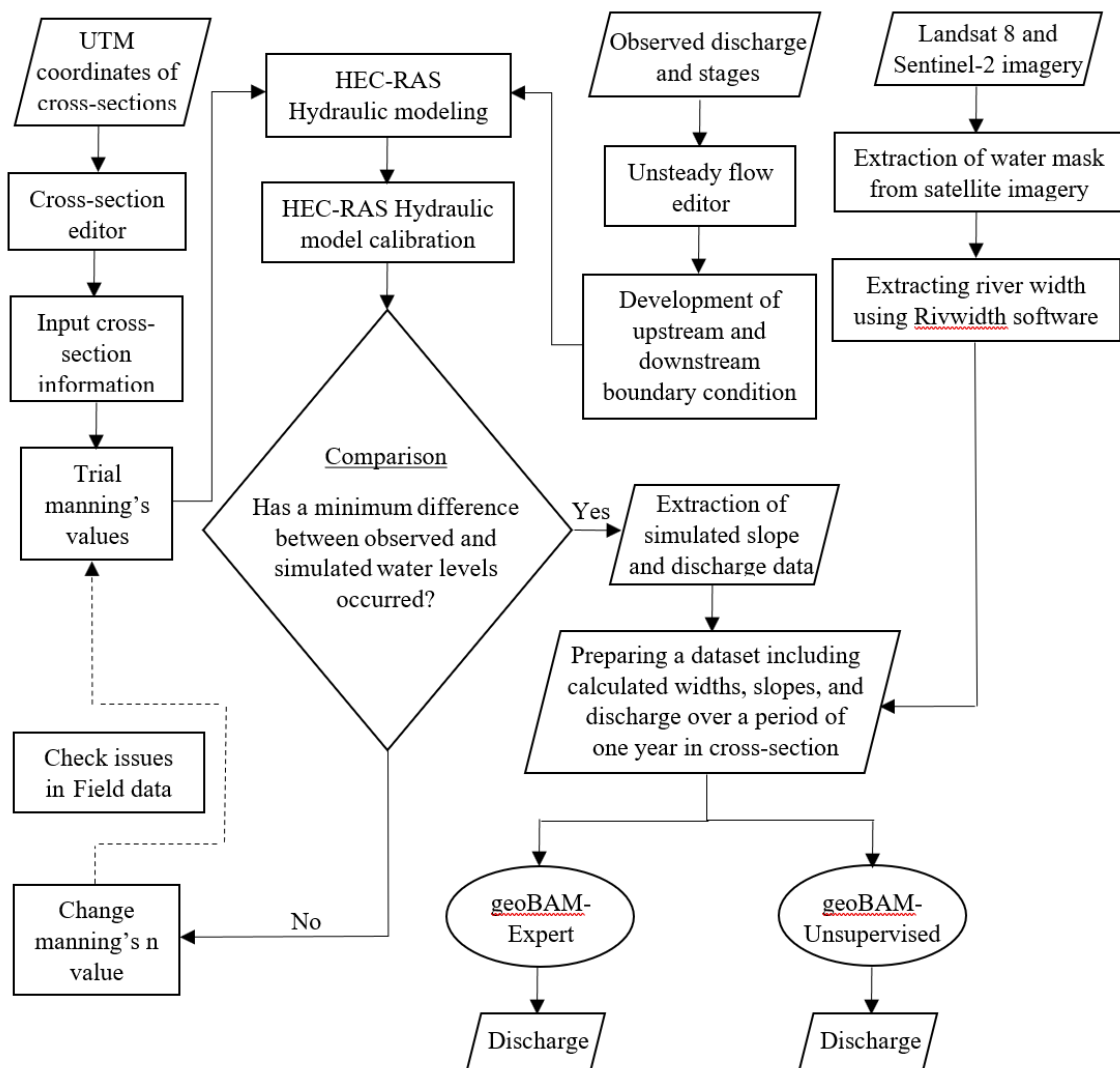


Fig. 2- Flowchart of the overall process of the work done in the research

شکل ۲- روندنمای مراحل پیاده‌سازی روش انجام پژوهش

خطای میانگین در نظر گرفته شد که مطابق رابطه (۳) توسط نرم‌افزار محاسبه شده 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 است. فرایند بهینه‌سازی تا زمانی ادامه می‌یابد که یا حداکثر خطای محاسبه شده توسط نرم‌افزار از میزان خطای مجاز که توسط کاربر تعریف شده است، کمتر شود و یا به حداکثر تعداد تکرارهای شبیه‌سازی تعریف شده برسد. در این پژوهش، قابلیت واسنجی خودکار به صورت پیش فرض، Global

۲-۳- واسنجی مدل HEC-RAS

پارامتر اصلی واسنجی مدل HEC-RAS در این مطالعه همچون اکثر مطالعات پیشین (برای مثال؛ Prafulkumar et al., 2011; Yang et al., 2014; Dysarz, 2018; Kamran et al., 2021; "n" ضریب (Philippus et al., 2021; Hadi et al., 2021 مایننگ در نظر گرفته شده است. در این پژوهش، از داده‌های ارتفاع آب موجود در مقطع عرضی واقع در موقعیت جغرافیایی ایستگاه ملاثانی (ایستگاه بالادست) و داده‌های 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 شد. روش ارزیابی خطا برای واسنجی به طور پیش فرض

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.

$$t_1: \text{MNDWI} > 0.124 \quad (5)$$

$$t_2: \text{MBSRV} > \text{MBSRN} \quad (6)$$

$$t_3: \text{AWEIsh} > 0 \quad (7)$$

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

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

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 هستند. 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 اطمینان‌اند. 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.

در نظر گرفته شده است. میزان خطای مجاز در نظر گرفته شده ۰/۱ و حداکثر تعداد تکرار شبیه‌سازی ۱۰ است. واسنجی در چهار حالت برای ضریب زبری‌های مختلف انجام شده است. 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 شده است. طبق مطالعاتی مانند (Azarang and Fard et al. (2013) و (Bajestan (2015)، ضرایب زبری برای بسترهای شنی و سیلتی رودخانه‌های جنوب غربی ایران معمولاً در این بازه قرار دارند. همچنین، جدول‌های استاندارد مانینگ مانند جدول Chow (1959) نیز برای رودخانه‌هایی با بستر نسبتاً صاف و عاری از پوشش گیاهی انبوه، ۰/۰۳۵-۰/۰۲۵ $n \approx$ را پیشنهاد می‌کنند. بنابراین، حدس اولیه از ضریب مانینگ 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 شده است. 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 شود. 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 رسیده است. برای دورسنجی پهنه آبی رودخانه از تصاویر Sentinel-2 و Landsat 8 دو روش متفاوت بکار گرفته شده است. در این پژوهش، بر اساس مطالعه (Zhou et al. (2020) پس از محاسبه شاخص‌های طیفی MNDWI^{10} ، NDVI^{11} و EVI^{12} ، پیکسل‌های تصاویر ماهواره Landsat 8 به شرط برقراری رابطه (۴) به عنوان پیکسل‌های آبی تلقی شده‌اند:

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

برای تشخیص پیکسل‌های آبی در تصاویر Sentinel-2، بر اساس مطالعه (Jones (2019) الگوریتم DSWE^{13} اجرا شده است. مطابق این الگوریتم ابتدا شاخص‌های طیفی (MNDWI ، NDVI ، AWEIsh^{14} ، MBSRV^{15} و MBSRN^{16}) محاسبه می‌شوند. سپس آستانه‌هایی برای هر شاخص تعریف می‌شود. ماسک‌های

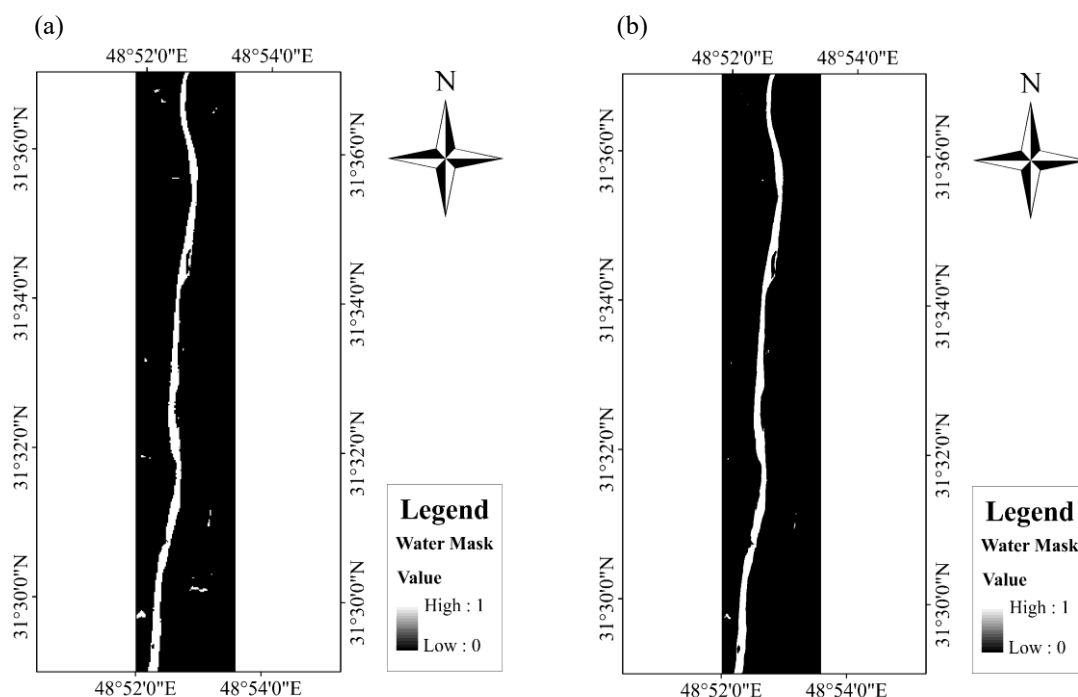


Fig. 3- An example of the water mask obtained on 12/07/2017 from a) Landsat 8 and b) Sentinel-2 satellite image
شکل ۳- نمونه‌ای از پهنه آبی بدست آمده در تاریخ ۲۰۱۷/۰۷/۱۲ از تصویر ماهواره الف) Landsat 8 و ب) Sentinel-2

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 می‌شوند. 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.

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 می‌شود. (Brinkerhoff et al. (2020) این فرض را در نظر گرفته و با جایگذاری معادله (۱۱) به قانون اصلی جریان

۳-۴- استخراج عرض رودخانه

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 شده است، محاسبه شده است. 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 شده است. 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

AMHG (معادله ۱۲- Gleason and Wang, 2015) و همچنین جایگزینی پارامترهای ثابت مانینگ برای عبارتهای تعمیم یافته، یک قانون جریان جدید (معادله ۱۳) استخراج کردند.

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

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

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

در رابطه (۱۳)، n 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 برنامه‌نویسی R تدوین گشته است. geoBAMr با استفاده از دسته‌بندی‌های ژئومورفیکی رودخانه، در دو چارچوب اصلی بدون نظارت و خبره، پارامترهای ورودی مدل را بهبود می‌دهد. در حالت بدون نظارت، خوشه‌بندی داده‌های ریخت‌شناسی با الگوریتم DBSCAN انجام می‌شود، در حالی که در حالت خبره، طبقه‌بندی بر اساس تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) و قضاوت تخصصی روی ویژگی‌های هیدرولیکی صورت می‌گیرد. هر یک از دو رویکرد طبقه‌بندی، منجر به تولید مجموعه‌ای از توزیع‌های پیشین^{۱۷} برای پارامترهای هیدرولیکی کلیدی شامل عرض و عمق، ضریب زبری مانینگ، نمای توان هندسی عرض (b)، پارامتر شکل مقطع (r) و شیب بستر می‌شوند. این توزیع‌ها به صورت نگاشت‌های پارامتریک استخراج شده و به عنوان ورودی به الگوریتم وارد می‌شوند تا از طریق چارچوب استنباطی بیزی و با استفاده از نمونه‌برداری همیلتونی 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 شاخص‌های دقت و خطا شامل NSE^{۱۸}، RRMSE^{۱۹}، NRMSE^{۲۰} و rBIAS^{۲۱} برای آن‌ها محاسبه شده است.

۴- نتایج

واسنجی با اعمال ضرایب زبری مختلف برای بستر رودخانه و سیلاب‌دشت‌ها تا زمان مشاهده کم‌ترین اختلاف میان ارتفاع آب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده ادامه یافته است. نتایج حاصل از واسنجی و تحلیل حساسیت پارامتر ضریب زبری به صورت مقایسه ارتفاع آب شبیه‌سازی شده و ارتفاع آب مشاهداتی در ایستگاه بالادست (ایستگاه ملاثانی) و مقایسه دبی شبیه‌سازی شده و دبی مشاهداتی در ایستگاه پایین دست رودخانه (ایستگاه اهواز) به ترتیب در شکل ۵ و شکل ۶ ارائه شده است. از شکل‌های مذکور می‌توان نتیجه گرفت که بیشترین انطباق و تشابه داده‌های ارتفاع آب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در حالتی رخ داده است که ضریب زبری برای بستر اصلی رودخانه ۰/۲۷ و برای سیلاب‌دشت‌ها ۰/۰۳ اعمال شده است.

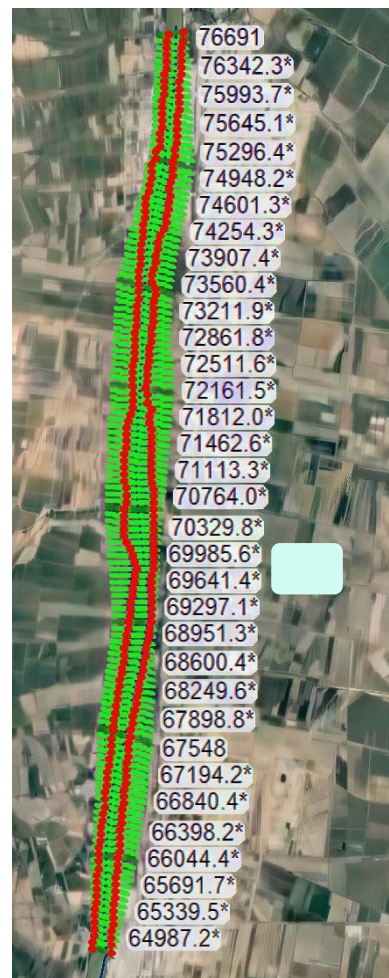


Fig. 4- View of the interpolated cross-sections (in green) among the original cross-sections (in blue) شکل ۴- نمایشی از مقاطع عرضی درون‌یابی شده (به رنگ سبز) در میان مقاطع عرضی اصلی (به رنگ آبی)

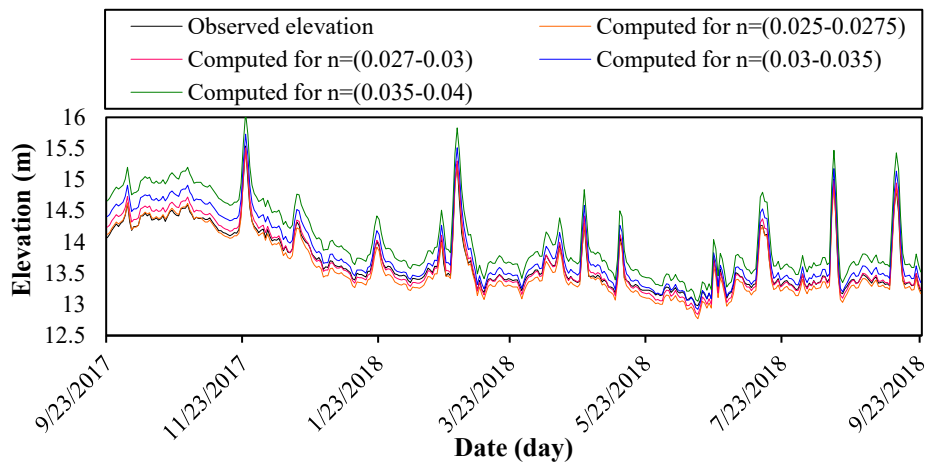


Fig. 5- Comparison of the observed and simulated stage hydrograph at Mollasani station
 شکل ۵- مقایسه هیدروگراف‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده ارتفاع آب در ایستگاه ملاتانی

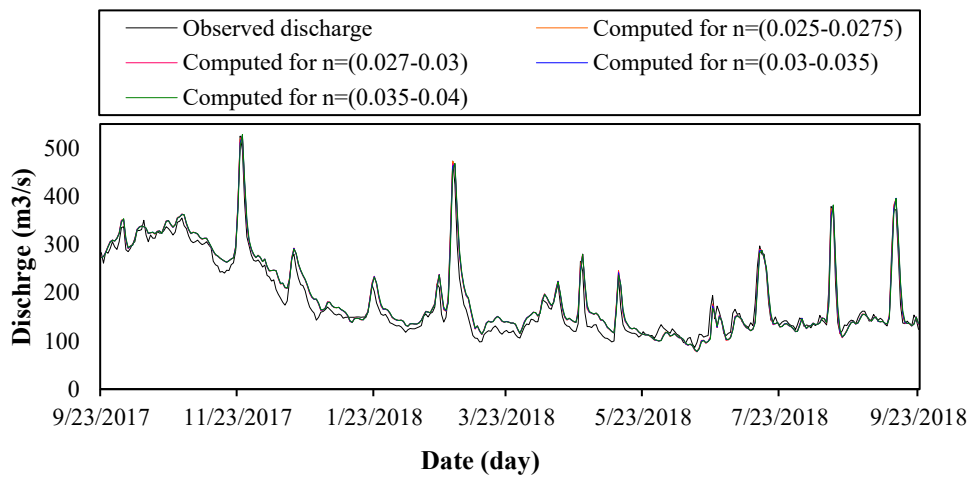


Fig. 6- Comparison of the observed and simulated discharge hydrograph at Ahvaz station
 شکل ۶- مقایسه هیدروگراف‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده دبی در ایستگاه اهواز

بدون نظارت و خبره، نتوانسته است روند تغییرات زمانی را به خوبی بازتاب دهد و به خصوص در تخمین جریان‌های حادی دارای خطای بیشتری است؛ هرچند که در حالت خبره نتایج نسبتاً بهتری نسبت به حالت بدون نظارت حاصل شده است. 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 است. با توجه به دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در حالت دسته‌بندی بدون نظارت، الگوریتم در مشاهده روند تغییرات دبی نسبتاً موفق عمل کرده است، هرچند که در بعضی موارد در تخمین جریان‌های زیاد عملکرد خیلی خوبی نداشته است. با این حال ظاهراً نتیجه رضایت بخش بدست آمده است.

به منظور ارزیابی نتایج واسنجی مدل، ضریب تعیین R^2 برای هر چهار حالت اعمال ضریب زبری محاسبه شده است. مطابق جدول ۱ به وضوح می‌توان نتیجه گرفت که بهترین حالت انطباق در انتخاب و اعمال ضریب زبری برابر 0.027 و برای بستر و 0.03 برای سیلاب‌دشت رودخانه بدست آمده‌است و ضریب R^2 برابر 0.9915 و 0.9652 به ترتیب برای ارتفاع آب در ایستگاه ملاتانی و دبی در ایستگاه اهواز گواهی بر این موضوع است. پس از استخراج داده‌های مربوطه از خروجی مدل HEC-RAS، الگوریتم geoBAM در دو حالت استفاده از داده‌های ماهواره‌ای اجرا شده است. 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 دبی مشاهداتی در هر دو حالت

Table 1- R^2 coefficient for different modes of applying the roughness coefficient
 جدول ۱- ضریب R^2 به ازای حالت‌های مختلف اعمال ضریب زبری

n	for R^2	
	Water level at Mollasani station	Discharge at Ahvaz station
0.025-0.0275	0.9912	0.9650
0.027-0.03	0.9915	0.9652
0.03-0.035	0.9905	0.9614
0.035-0.04	0.9886	0.9544

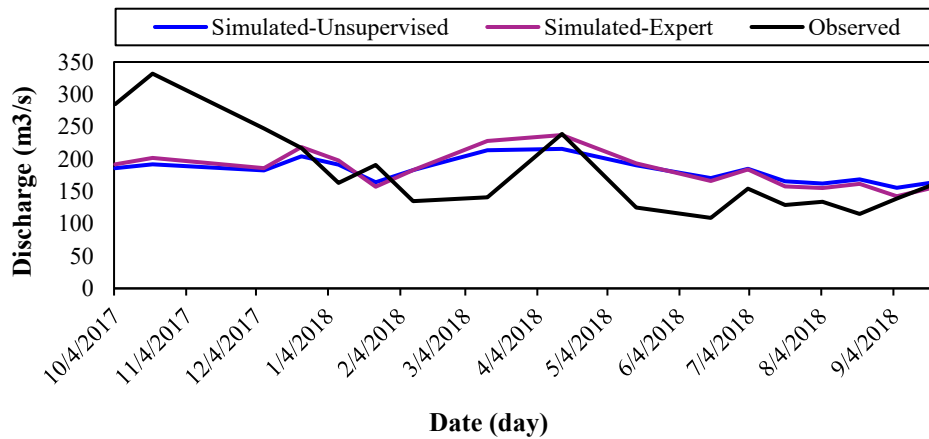


Fig. 7- Discharge hydrographs generated by the geoBAM algorithm for the 2017–18 water year using channel widths extracted from Landsat 8 imagery under expert and unsupervised classification mode
 شکل ۷- هیدروگراف دبی به دست آمده از اجرای الگوریتم geoBAM برای سال آبی ۱۸-۲۰۱۷ با عرض‌های بدست آمده از تصاویر ماهواره Landsat 8 در حالت دسته‌بندی خبره و بدون نظارت

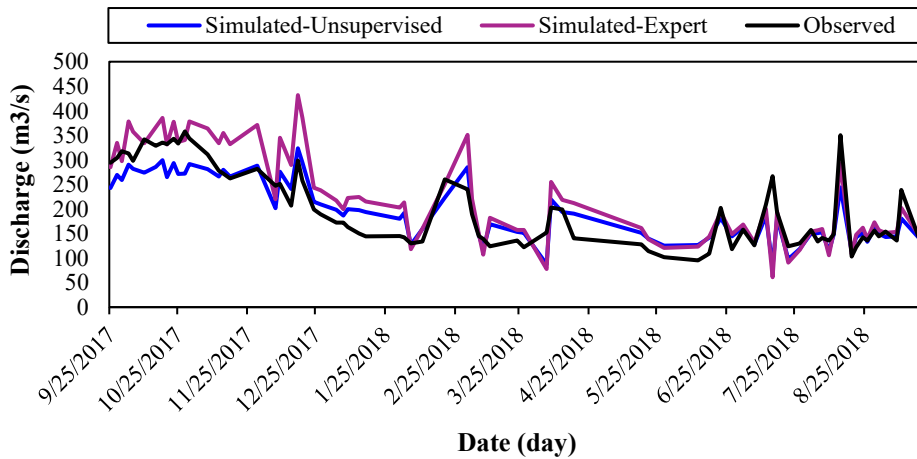


Fig. 8- Discharge hydrographs generated by the geoBAM algorithm for the 2017–18 water year using channel widths extracted from Sentinel-2 imagery under expert and unsupervised classification mode
 شکل ۸- هیدروگراف دبی به دست آمده از اجرای الگوریتم geoBAM برای سال آبی ۱۸-۲۰۱۷ با عرض‌های بدست آمده از تصاویر ماهواره Sentinel-2 در حالت دسته‌بندی خبره و بدون نظارت

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 کرده است.

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 شده است. خط مشکی رسم شده در نمودارهای پراکندگی، نشان دهنده بهترین تخمین است (مقدار شبیه‌سازی شده = مقدار مشاهداتی). نقاط بالا و پایین خط مشکی به ترتیب نشان دهنده تخمین بیشتر و کمتر از مقدار مشاهداتی هستند. مطابق نمودار پراکندگی در شکل ۹ (الف) دبی برآورد شده از اجرای الگوریتم و دبی مشاهداتی همبستگی مثبت ضعیف دارند. در شکل ۹ (ب)

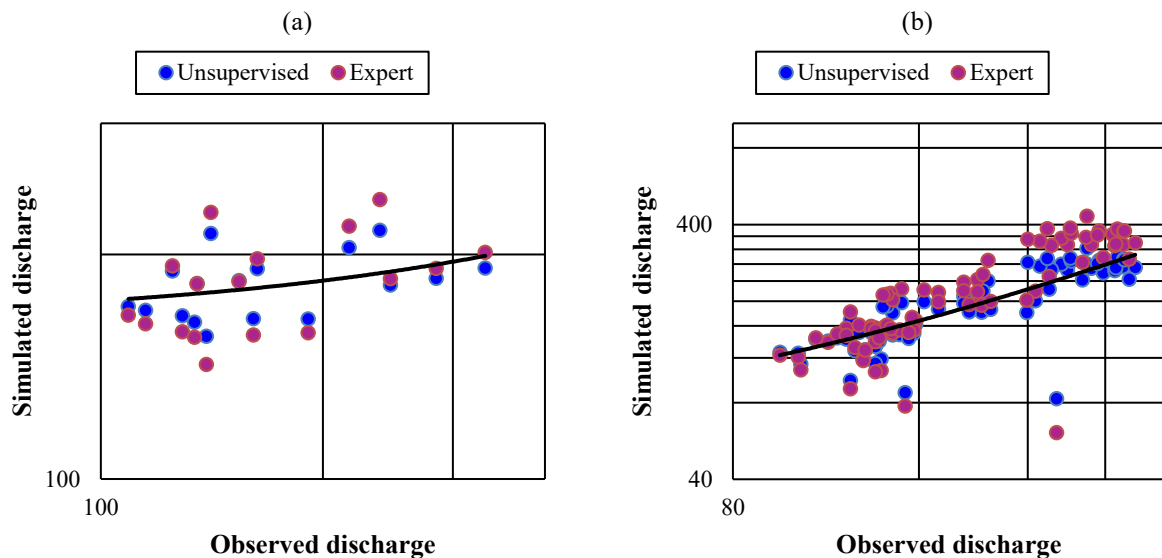


Fig. 9- Logarithmic scatter plots of simulated versus observed discharge derived from the geoBAM algorithm under expert and unsupervised classification using a) Landsat 8 and b) Sentinel-2 imagery
 شکل ۹- نمودار پراکندگی لگاریتمی دبی برآورد شده در مقابل دبی مشاهداتی حاصل از اجرای الگوریتم geoBAM در حالت دسته‌بندی خبره و بدون نظارت با استفاده از تصاویر الف) Landsat 8 و ب) Sentinel-2

Landsat 8 بهبود یافته است. همین امر، بیش از پیش بیان می‌کند که تا چه میزان کیفیت مکانی تصویر در تخمین آبدی تأثیرگذار است؛ چراکه 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 می‌شوند. همچنین، تغییرات عرض در تناسب با تغییرات دبی کمتر بوده و به همین دلیل داده‌های عمق همبستگی بهتری نسبت به عرض دارند (Gleason and Wang, 2015; Gleason et al., 2020). 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 آمده است. با مقایسه

معیارهای اعتبارسنجی برای ارزیابی کمی دبی شبیه‌سازی شده توسط الگوریتم geoBAM در جدول ۲ ارائه شده است. 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 شده و نتایج در جدول ۲ ارائه شده است. 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 نیامده است. 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

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.

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 هرچه قدر عرض رودخانه، دقیق‌تر باشد، نتایج حاصل از الگوریتم دقیق‌تر خواهد بود. همچنین، این نکته که با

Table 2-Validation metrics for the 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	0.14	0.33	0.33	0.03
		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

دنبال خواهد داشت. در این میان، بهره‌گیری از الگوریتم‌های یادگیری ماشین به‌منظور 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

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 استخراج شده از ماهواره Sentinel-2، دقت بالاتری در برآورد دبی نسبت به داده‌های ماهواره Landsat 8 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 به‌دست آمده است. این نتایج بیانگر برتری داده‌های Sentinel-2 در بهبود عملکرد الگوریتم است. علت این امر قدرت تفکیک مکانی و زمانی بالاتر ماهواره Sentinel-2 نسبت به ماهواره Landsat 8 است. 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

که کیفیت داده‌های ماهواره‌ای خوب باشد (مثلاً پوشش ابری پایین، هندسه ساده)، حالت بدون نظارت به‌تنهایی می‌تواند دبی را با دقت خوبی تخمین بزند. درحالی‌که 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

- 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, Dingman S L, Vorosmarty C J, Bolster C H, & Congalton R G (2003) Evaluating the potential for measuring river discharge from space. *Journal of Hydrology* 278(1-4):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 Groeve 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)
- Brinkerhoff C B, Gleason C J, Feng D, & Lin P (2020) Constraining remote river discharge estimation using reach-scale geomorphology. *Water Resources Research* 56(11):e2020WR027949
- Brinkerhoff C B, Gleason C J, & Ostendorf D W (2019) Reconciling at-a-station and at-many-stations hydraulic geometry through river-wide geomorphology. *Geophysical Research Letters* 46(16):9637-9647
- 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, Heidarnejad 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 (2017) Crossing the (watershed) divide: Satellite data and the changing politics of international river basins. *The Geographical Journal* 183(1):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
- Hagemann M W, Gleason C J, & Durand M T (2017) BAM: Bayesian AMHG-Manning inference of discharge using remotely sensed stream width, slope, and height. *Water Resources Research* 53(11):9692-9707
- 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
- Leopold L B & Maddock T (1953) *The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications* (Vol. 252). US Government Printing Office
- 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
- 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
- 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
- Preissmann A (1961) Propagation des intumescences dans les canaux et rivières. *First Congress of the French Association for Computation, Grenoble* 433-442
- 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 ungaged 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

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