

*Research Article***The application of drone technology in investigating the morphometric changes of the river (Case study: Vaz river, Chamestan)****Maryam Rashidi¹, Mohammad Mahdi Hosseinzadeh^{*1} , Reza Esmaili²**¹-Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran²-Department of Geography, Faculty of Humanities and Social Sciences, Mazandaran University, Babolsar, Iran

Received: 02 Mar 2024 Accepted: 09 Jun 2024

Extended Abstract**Introduction**

The newly emerging and rapidly evolving technology of Unmanned Aerial Systems (UASs), covering a wide range of devices and enabling photogrammetric applications from user-driven platform, presents new possibilities for research in geomorphology by obtaining spatially accurate geographic data. The low-level altitude of flight allows researchers to obtain imagery at high levels of detail, which is necessary for a detailed analysis of even fine fluvial forms of the dynamic river channels or landslides. After the early 2010s, the use of UAVs equipped with an RGB camera has become widely applied in geomorphology. It has expanded the capability of low-altitude aerial photo shootings and subsequent SfM photogrammetry. The basic principle of SfM photogrammetry is the same as the conventional photogrammetry, but SfM enables automatic alignment of many (hundreds to thousands) images thanks to automated detection of numerous tie-points, and then produces dense point cloud and rasterized DEMs, as well as orthorectified mosaic images. One of the advantages of SfM photogrammetry is its flexibility across camera platforms. conventional aerial images, and ground-based images are commonly used platforms to 3D models by SfM.

Materials and Methods

The Vaz watershed is located in the northern slope of the Alborz Mountain range and in the south of Chamestan city, which in terms of political divisions, this basin is located in Noor city of Mazandaran province. First, using the library method, international and domestic scientific literature was studied in order to examine the background and different methods of using UAVs in river studies and to prepare a study framework. After imaging, it was processed in Metashape software (Metashape 1.5.5) and orthophoto image and digital elevation model (DEM) were extracted in centimeters in order to prepare cross-sections and check the morphometric and hydrological characteristics of the river.

Citation: Rashidi, A. et al, 2024. The application of drone technology in investigating the morphometric, *Res. Earth. Sci.* 15(2), (43-56) DOI: 10.48308/esrj.2024.104522

* Corresponding author E-mail address: m_hoseinzadeh@sbu.ac.ir





Results and Discussion

The lateral changes of the Vaz River were studied across 2 different sections of the river. The first level of analysis included building an elevation model based on imagery provided by UAVs and processed in Metashape software, with a pixel resolution size of 4.6 centimeters. Through measuring cross sections of the channel at different flows at the edges and bankfull discharge of the channel, data was acquired. This data included active depth and width of the channel, cross sectional areas, average depth, hydraulic radius and width to depth ratio. These data could be combined with hydraulic data to calculate flow velocity, discharge, stream power, shear stress and other parameters which enable the quantification of river processes. In the statistical comparison of 2 reach at channel edge discharge, some parameters such as cross-sectional area, hydraulic radius, flow velocity, maximum and average channel depth, width-to-depth ratio, channel width susceptible to flooding, channel depth ratio, discharge and Froude number, decrease at the downstream section comparing to the upstream section. However, shear stress and specific stream power of the river increase in the downstream. At the bankfull discharge of the channel, all parameters except specific stream power of the river decrease comparing to the 1st section. The specific stream power increases at the 2nd section. Afterwards the research investigated the change in cross sections across the 2 sections. At the upstream, sand mining, road construction across the channel and construction of a secondary channel had changed the composition and material of the right banks of the river. At the downstream, dam construction, had changed the flow and sedimentation regime of the river.

Conclusion


The data acquired from UAVs enables extraction of relevant morphometric and hydrological data regarding the channel and its transverse sections, due to geometric precision and high resolution. The high precision of this data provides an appropriate alternative for field works such as mapping and surveying with different cameras. Orthophoto images prepared using UAVs have enabled the more accurate identification of geomorphic features and landforms. According to data acquired from the 2 different sections of River Vaz, it was demonstrated that upstream and downstream sections are not similar and variation in morphometric characteristics causes difference in hydraulic characteristics such as flow velocity, shear stress and specific stream power. These varieties have led to different geomorphic forms at the studied sections.

Keywords: UAV imagery, SFM technic, Morphometric changes, Vaz river.





کاربرد فناوری پهپاد در بررسی تغییرات مورفومتری رودخانه (مطالعه موردی: رودخانه واز، چمستان)

مریم رشیدی^۱، محمدمهدی حسین زاده^{۱*} , رضا اسماعیلی^۲

۱- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۲- گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران

(پژوهشی) دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۱۲ پذیرش نهایی مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۲۰

چکیده گسترده

مقدمه

فناوری نوظهور و به سرعت در حال تکامل سیستم‌های هوایی بدون سرنشین (UAS) با به دست آوردن داده‌های جغرافیایی دقیق مکانی، امکانات جدیدی را برای تحقیق در ژئومورفولوژی ارائه می‌دهد. ارتفاع پایین پرواز به محققان اجازه می‌دهد تا تصاویری را در سطوح بالایی از جزئیات به دست آورند که این جزئیات برای تجزیه و تحلیل دقیق اشکال ژئومورفیک رودخانه‌ای ضروری است. تصاویر منطقه‌ای گرفته شده در ارتفاع کم با استفاده از وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین تولید مدل‌های رقومی ارتفاعی با وضوح بالا را فراهم می‌کند. این داده‌ها برای نقشه‌برداری دقیق و تجزیه و تحلیل مورفومتریک لندفرم‌های رودخانه، و تشخیص تغییرات توپوگرافی کوتاه مدت به دلیل فرسایش و رسوب رودخانه مفید هستند. از اوایل دهه ۲۰۱۰، استفاده از پهپادهای مجهز به دوربین RGB به‌طور گسترده در ژئومورفولوژی مورد استفاده قرار گرفت. قابلیت عکسبرداری هوایی در ارتفاع پایین و متعاقب آن فتوگرامتری تکنیک‌های ساختار حرکتی (structure from motion-sfm) را افزایش داده است. تکنیک‌های ساختار حرکتی (sfm) به لطف تشخیص خودکار نقاط اتصال متعدد، تراز خودکار بسیاری از تصاویر (صدها تا هزاران) را امکان‌پذیر می‌کند و سپس ابر نقطه متراکم و DEM های شطرنجی تولید می‌کند. تصاویر مشتق شده از پهپاد، تصاویر هوایی معمولی و تصاویر زمینی معمولاً پلتفرم‌هایی برای مدل‌های سه بعدی توسط SfM هستند.

مواد و روش‌ها

حوضه آبخیز واز در دامنه شمالی سلسله جبال البرز و در جنوب شهر چمستان واقع شده است که از نظر تقسیمات سیاسی، این حوضه در شهرستان نور از استان مازندران قرار دارد. ابتدا با استفاده از روش کتابخانه‌ای مقالات علمی داخلی و خارجی مطالعه شد تا پیشینه و روش‌های مختلف استفاده از پهپاد در مطالعات رودخانه‌ای بررسی شود و چارچوب مطالعاتی تهیه گردد. پس از تصویربرداری، پردازش آن در نرم‌افزار متاشیپ (Metashape 1.5.5) انجام و تصویر ارتوفتو و مدل ارتفاعی رقومی (DEM) با دقت سانتی‌متر جهت تهیه مقاطع عرضی و بررسی خصوصیات مورفومتریک و هیدرولوژیک رودخانه استخراج شد.

استناد: رشیدی، م. و همکاران، ۱۴۰۳. کاربرد فناوری پهپاد در بررسی تغییرات مورفومتری رودخانه، پژوهشهای دانش زمین: ۱۵(۲)،

DOI: 10.48308/esrj.2024.104522، (۴۳-۵۶)

E-mail: m_hoseinzadeh@sbu.ac.ir

* نویسنده مسئول:



Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

نتایج و بحث

تغییرات عرضی کانال در ۲ بازه از رودخانه واز مورد بررسی قرار گرفت. اولین مرحله از تجربه و تحلیل شامل ساخت مدل ارتفاعی براساس خروجی از تصاویر بدست آمده به وسیله پهپاد در محیط نرم افزار متاشیپ با اندازه پیکس ۴/۶ سانتی متر است. با استفاده از اندازه گیری مقاطع عرضی کانال در دبی لبالی و دبی لبه کانال، داده‌هایی شامل عرض و عمق کانال فعال، مساحت مقطع عرضی، عمق متوسط، شعاع هیدرولیک و نسبت پهنا به عمق کانال رود را می‌توان بدست آورد. این مقادیر می‌توانند با داده‌های هیدرولیک ترکیب شده تا با استفاده از آن سرعت جریان، دبی، قدرت رود، تنش برشی و سایر پارامترهایی که برای کمی کردن فرایندهای کانال مهم هستند محاسبه شوند. در مقایسه آماری دو بازه در دبی لبه کانال پارامترهای مساحت مقطع عرضی، شعاع هیدرولیک، سرعت جریان، حداکثر و میانگین عمق کانال، نسبت عرض به عمق، عرض کانال مستعد سیلاب، نسبت عمق کانال، دبی و عدد فرود کاهش مقدار این پارامترها در پایین دست نسبت به بالادست شده است اما دو پارامتر تنش برشی و قدرت مخصوص رود افزایش خصوصیات کانال در پایین دست نسبت به بالادست است. در دبی لبالی کانال، تمامی پارامترها به جز قدرت مخصوص رود مقادیر در بازه دو نسبت به بازه یک کاهش یافته است اما در پارامتر قدرت مخصوص رود افزایش در پایین دست نسبت به بالادست وجود داشته است. در ادامه پژوهش تغییرات مقاطع عرضی در دو بازه مورد بررسی قرار گرفت. در بالادست به واسطه برداشت شن و ماسه، ایجاد جاده در عرض کانال و ایجاد کانال فرعی، در ترکیب و جنس کرانه راست رودخانه و در پایین دست به واسطه ساخت سیل بند تغییرات ایجاد شده در رژیم جریان و رسوب رودخانه مشاهده شده است.

نتیجه گیری

داده‌های بدست آمده از پهپاد به دلیل دقت بالای هندسی و قدرت تفکیک بالا امکان استخراج داده‌های مورفومتری و هیدرولوژیک مرتبط با کانال و نیمرخ‌های عرضی را فراهم می‌کند. این داده‌ها با توجه به دقت بالا می‌توانند جایگزین مناسبی برای کارهای میدانی از قبیل نقشه برداری با انواع دوربین‌ها باشد. تصاویر ارتوفتو تهیه شده با استفاده از پهپاد امکان شناسایی عوارض و لندفرم‌های ژئومورفیک رودخانه را با دقت مناسب فراهم نموده است. براساس مقایسه داده‌های بدست آمده در دو بازه از رودخانه واز مشخص گردید که مقاطع مختلف در بالا دست و پایین دست یکسان نیستند و تغییرات در ویژگی‌های مورفومتریک باعث تغییر ویژگی‌های هیدرولیک از جمله سرعت جریان، تنش برشی و قدرت مخصوص رود شده است. این تفاوت باعث تنوع اشکال ژئومورفیک در بازه‌های مورد مطالعه شده است.

واژگان کلیدی: تصاویر پهپاد، تکنیک sfm، تغییرات مورفومتری، رودخانه واز.

مقدمه

ها و اندازه‌گیری‌های میدانی از نظر دقت و تفکیک مکانی، فراوانی نمونه‌گیری یا ویژگی‌های کیفی داده‌های به دست آمده در اختیار محققان قرار می‌دهد (Wyrick et al, 2014 and Flener et al, 2013). تحقیقات هیدرولوژیکی و ژئومورفولوژیکی در بازه‌های کوچک دارای طیف وسیعی از الزامات خاص در رابطه با داده‌های تجربی و مکانی مورد نیاز برای تحقیق است. برای اینکه مبنای معتبری برای تحقیق باشد، داده‌های مکانی باید معیارهای زیر را داشته باشند:

پیشرفت کنونی در هیدرولوژی و ژئومورفولوژی رودخانه‌ها عمدتاً مبتنی بر تکنیک‌های جدید بررسی میدانی و تجزیه و تحلیل است که از فناوری‌های پیشرفته برای نظارت بر دینامیک فرآیند رواناب، انجام بررسی میدانی و نظارت از راه دور تغییرات در بستر و دینامیک رودخانه‌ها استفاده می‌کند. کاربرد این تکنیک‌ها اطلاعاتی را در سطح کیفی بسیار بالاتری نسبت به استفاده از روش‌های سنتی بررسی

SfM اغلب به عنوان داده‌های توپوگرافی با وضوح بالا (Passalacqua et al, 2015) در نظر گرفته می‌شود که بیشتر برای تحلیل در چشم اندازه‌های رودخانه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد (Dietrich, 2016; Sofia, 2020). ترکیب پهپادها و فتوگرامتری SfM به یک رویکرد استاندارد تبدیل شده است که توسط ژئومورفولوژیست‌ها برای تهیه داده‌های توپوگرافی استفاده می‌شود (Oguchi et al, 2022). تکنیک‌های ساختار حرکتی در زمینه علوم زمین روش تازه‌ای است اما در همین مدت کوتاه توانسته است تأثیر بسیار زیادی داشته باشد چرا که این امر نقشه‌های سه‌بعدی، مقرون به صرفه و با سرعت بالا در گستره‌های فضایی را ارائه می‌دهد. تکنیک sfm این امکان را فراهم می‌آورد که داده‌های برداشت شده با استفاده از هواپیماهای بدون سرنشین (پهپاد) با سهولت بیشتری مورد استفاده قرار بگیرد. رایج‌ترین کاربرد تصویربرداری با پهپاد (Unmanned aerial vehicles) بازسازی ارتفاع زمین از طریق تولید مدل رقومی زمین و تولید لایه پوشش زمین از طریق تولید ارتوفتو می‌باشد که این فرایند با استفاده از الگوریتم تکنیک‌های ساختار حرکتی (SfM) از طریق تولید ابرنقاط پراکنده و متراکم به دست می‌آیند. از آنجایی که تصویر ارتوفتوئی به دست آمده از تصاویر پهپاد قدرت تفکیک حتی تا زیر ۵ سانتیمتر را دارند در مطالعات مربوط به مخاطرات سیل تشخیص اندازه رسوبات سطحی و موانع گراولی در رودخانه‌های شریانی، بررسی توپوگرافی بستر و حتی داده‌های مربوط به بستر، حیات آبیان، تشخیص تغییرات بستر و کانال در گذر زمان، پایش سیستم رودخانه و بسیاری مطالعات دیگر در زمینه مورفولوژی رودخانه، مورفولوژی بستر، تغییرات کانال در گذر زمان، فرسایش رودخانه‌ای، پوشش گیاهی کناره رودخانه کاربرد دارند (kheyri et al, 2022). کمی‌سازی توپوگرافی رودخانه‌ها و شکل‌های بستر مرتبط با آن‌ها یکی از دغدغه‌های اساسی ژئومورفولوژی رودخانه‌ای برای دهه‌های اخیر بوده است. از جمله بررسی سیلاب دشت‌ها و مناطقی که در زیر آب قرار دارند با توجه به اینکه استفاده از تصاویر LIDAR از نظر هزینه مقرون به صرفه نمی‌باشد استفاده از الگوریتم‌های ساختار از حرکت (SfM) نوید یک تغییر اساسی در دسترسی به داده‌های توپوگرافی رودخانه می‌دهد (Woodget et al, 2014). پهپادها در مقایسه با LIDAR تصاویر و مدل ارتفاعی

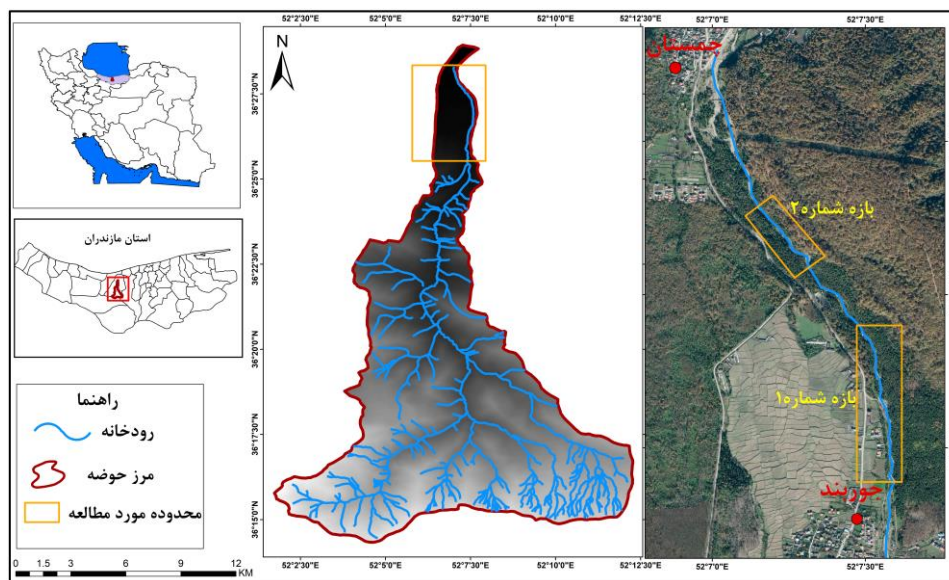
(الف) وضوح و دقت مکانی بالا برای مطابقت با دقت مشاهدات و بررسی‌های میدانی. (ب) وضوح زمانی بالا برای امکان ثبت تغییرات پویا در چشم انداز. (ج) عملکرد بهینه جهت قادر ساختن محققین برای به دست آوردن داده‌ها با توجه به تغییرات در چشم انداز و نیازهای بررسی‌ها. (د) هزینه معقولی برای تحقیقات تجربی داشته باشد. استفاده از منابع متعارف داده‌های مکانی، از نقشه‌ها، عکاسی هوایی کلاسیک و سنجش از راه دور ماهواره‌ای، برای حوضه‌های تجربی کوچک بسیار دشوار است. شایع‌ترین مشکل، فقدان اطلاعات مکانی مناسب با مقیاس مطالعه، تفکیک مکانی یا زمانی نامطلوب یا هزینه‌های عملیاتی هنگفت برای دستیابی به داده‌های مربوطه است (Hugenholtz et al, 2015). فناوری نوظهور و به سرعت در حال تکامل سیستم‌های هوایی بدون سرنشین (UAS) با به دست آوردن داده‌های جغرافیایی دقیق مکانی، امکانات جدیدی را برای تحقیق در ژئومورفولوژی ارائه می‌دهد (Lejot et al, 2007). ارتفاع پایین پرواز به محققان اجازه می‌دهد تا تصاویری را در سطوح بالایی از جزئیات به دست آورند که این جزئیات برای تحلیل دقیق اشکال ژئومورفیک رودخانه‌ای ضروری است (Miřijovský et al, 2015). تصاویر منطقه‌ای گرفته شده در ارتفاع کم با استفاده از وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین تولید مدل‌های رقومی ارتفاعی با وضوح بالا را فراهم می‌کند. این داده‌ها برای نقشه‌برداری دقیق و تجزیه و تحلیل مورفومتریک لندفرم‌های رودخانه، و تشخیص تغییرات توپوگرافی کوتاه مدت به دلیل فرسایش و رسوب رودخانه مفید هستند (Gguchi et al, 2022). از اوایل دهه ۲۰۱۰، استفاده از پهپادهای مجهز به دوربین RGB به‌طور گسترده در ژئومورفولوژی مورد استفاده قرار گرفت. قابلیت عکسبرداری هوایی در ارتفاع پایین و متعاقب آن فتوگرامتری تکنیک‌های ساختار حرکتی (structure from motion-sfm) را افزایش داده است (Westoby et al, 2012; Fonstad et al, 2013; Nex and Remondino, 2014). تکنیک‌های ساختار حرکتی (sfm) به لطف تشخیص خودکار نقاط اتصال متعدد، تراز خودکار بسیاری از تصاویر (صدها تا هزاران) را امکان‌پذیر می‌کند و سپس ابر نقطه متراکم و DEM های شطرنجی تولید می‌کند. تصاویر مشتق شده از پهپاد، تصاویر هوایی معمولی و تصاویر زمینی معمولاً پلتفرم‌هایی برای مدل‌های سه بعدی توسط SfM هستند (Bangen et al, 2014). محصول فتوگرامتری

۱). پایین‌ترین نقطه ارتفاعی حوضه مورد مطالعه حدود ۳۰۰ متر و بلندترین نقطه آن بیش از ۳۵۰۰ متر بالاتر از سطح آب‌های آزاد قرار دارد. ارتفاع متوسط حوضه آبخیز مورد مطالعه معادل ۱۸۰۰ متر از سطح دریا برآورد گردیده است. از نظر زمین‌شناسی حوضه آبریز واز جزء البرز مرکزی و از نظر تکتونیکی در منطقه فعال البرز قرار گرفته است. سازندهای موجود عمدتاً متعلق به زمان مزوزوئیک به بعد می‌باشند که از قدیم به جدید عبارتند از: تریاس (سازند الیکا که قسمت اعظم حوضه واز از این سازند پوشیده شده است)، ژوراسیک (سازند شمشک)، کرتاسه (سنگ آهک، مارن و ...)، ائوسن، میوسن و رسوبات کواترنر. رودخانه واز در جهتی موافق با شیب ارتفاعات و مخالف با روند گسل‌های منطقه جریان دارد. متوسط بارندگی سالیانه منطقه نیز برابر ۶۹۴/۶ میلی‌متر در سال می‌باشد. میانگین دمای سالانه حوضه از ۱۴ درجه سانتیگراد در ارتفاعات ۳۰۰ متر تا حدود ۵ درجه سانتیگراد در ارتفاعات بیش از ۳۰۰۰ متر متغیر است. از کل مساحت این حوزه منطقه‌ای با وسعت ۸۶/۷ کیلومتر مربع را عرصه جنگل و ۵۴/۲۶ کیلومتر مربع را عرصه مرتع در بر گرفته است.

رقومی (DEM) با وضوح بالا و دقت افقی و عمودی در محدوده سانتی‌متری و با هزینه، سرمایه و نیروی کار حتی با سطح تخصص پایین تولید می‌کنند (Fonstad et al., 2013) در نتیجه در مطالعات مختلف مرتبط با رودخانه‌های علی‌الخصوص در مقیاس بازه کاربرد فراوانی دارند لذا به همین منظور در این مطالعه که هدف آن مطالعه تغییرات مورفومتری رودخانه واز از روستای جوربند تا چمستان است از تصویربرداری با استفاده از پهپاد استفاده شد.

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز واز در دامنه شمالی سلسله جبال البرز و در جنوب شهر چمستان واقع شده است که از نظر تقسیمات سیاسی، این حوضه در شهرستان نور از استان مازندران قرار دارد. حوضه واز در شمال به آبادی جوربند، در شرق به حوضه‌های ناپلار رود و آلس رود، در جنوب به حوضه رود هراز و در غرب به حوضه لاویج رود منتهی می‌شود. حوضه واز دارای جهتی شمالی-جنوبی بوده که قسمت جنوبی حوضه (سرآب) پهن‌تر از قسمت شمالی حوضه (نقطه خروجی) می‌باشد و در نهایت به دریای خزر می‌ریزد (شکل



شکل ۱: موقعیت بازه مورد مطالعه در حوضه واز

میدانی در فصل‌های مختلف جهت بررسی منطقه و انتخاب تاریخ تصویربرداری انجام شد. با توجه به اینکه مطالعه در مقیاس بازه می‌باشد و نیاز به داشتن تصاویر با رزولیشن بالا و مدل ارتفاعی رقومی (DEM) با دقت سانتی‌متری وجود دارد لذا از روش سنجنش از دور و هواپیمای بدون سرنشین یا

مواد و روش‌ها

در این مطالعه ابتدا با استفاده از روش کتابخانه‌ای مقالات علمی داخلی و خارجی مطالعه شد تا پیشینه و روش‌های مختلف استفاده از پهپاد در مطالعات رودخانه‌ای بررسی شود و چارچوب مطالعاتی تهیه گردد. سپس چندین بازدید

پهپاد (تصویربرداری استرنوسکوپ یا روش فتوگرامتری برد کوتاه) جهت برداشت تصاویر استفاده شد. به دلیل نبود تاج درختان و پوشش گیاهی در فصل زمستان در بهمن ماه ۱۳۹۹ برداشت و تصویربرداری انجام شد. پس از تصویربرداری پردازش آن در نرم افزار متاشیپ

پهپاد (تصویربرداری استرنوسکوپ یا روش فتوگرامتری برد کوتاه) جهت برداشت تصاویر استفاده شد. به دلیل نبود تاج درختان و پوشش گیاهی در فصل زمستان در بهمن ماه ۱۳۹۹ برداشت و تصویربرداری انجام شد. پس از تصویربرداری پردازش آن در نرم افزار متاشیپ

جدول ۱: مشخصات پرواز با پهپاد جهت برداشت

مدل پهپاد	ارتفاع پرواز	نوع پرواز	خط پرواز	طول پرواز(متر)	پوشش طول و عرضی
Mavic 2 Pro	۷۰ متر	اتوماتیک	۵-۳	۱۵۰-۲۰۰	۸۰ درصد

رابطه (۱)

$$Q=A.V \quad \text{و} \quad V=R^{.67} \cdot S^{.5}/n$$

در این معادله؛ V : سرعت جریان به متر در ثانیه (m/s)، n : ضریب زبری مانینگ، R : شعاع هیدرولیکی (m)، S : شیب کانال بر حسب متر بر متر، Q : دبی متر مکعب در ثانیه (m^3/s) و A : مساحت مقاطع عرضی (m^2)، تنوع و پیچیدگی مورفولوژیکی اشکال کانال با استفاده از تعیین مساحت شاخص تقارن کانال نسبت به خط مرکزی جریان مشخص شد (Knighton, 1981; Milne, 1983; Rayburg and Neave, 2008) شاخص عدم تقارن کانال (رابطه ۲).

رابطه (۲)

$$A^* = A_{RI} - A_{LI} / A$$

در این معادله A برابر با شاخص عدم تقارن از منظر خط مرکزی کانال، A_{RI} = مساحت قسمت راست کانال نسبت به خط مرکزی، A_{LI} = مساحت قسمت چپ کانال نسبت به خط مرکزی. دامنه مقادیر محاسبه شده بین -1 و $+1$ است در حالی که مقادیر نزدیک به 0 نشان از تقارن کانال می دهد و شاخص هرچه به مقدار ± 1 نزدیک باشد نشان دهنده وضعیت نامتقارن شکل کانال است. برای تعیین تفاوت در شکل کانال و برای مقایسه مقادیر مختلف مقاطع در بازه بالادست و پایین دست از رابطه ۳ مورد استفاده قرار گرفته است (Roy and Sahu, 2018).

رابطه (۳)

$$V_{u-p} = V_{Down} - V_{up} / V_{up} * 100$$

در این معادله V_{u-p} برابر با درصد تفاوت مقدار بین بالادست و پایین دست هرجفت مقطع، V_{Down} برابر با مقادیر پایین دست، V_{up} برابر با مقادیر بالادست. مقدار مثبت نشان دهنده افزایش خصوصیات کانال در بازه پایین دست نسبت به بازه بالادست است، در حالی که مقدار منفی به معنای

تولید مدل ارتفاعی رقومی و ارتوفتو به صورت مراحل زیر می باشد:

(۱) قبل از برداشت: شامل کالیبره کردن دوربین پهپاد و بررسی تنظیمات مانند زاویه پرواز، رزولیشن و ... و تنظیم خطوط پرواز در بازه مورد نظر.

(۲) برداشت: شامل الف: توزیع GCP (Ground Control Station) یا نقاط کنترل زمینی، ب: پرواز پرند طبق خط پرواز، ج: برداشت مشخصات نقاط کنترل زمینی با GPS یا دوربین توتال، د: برداشت های تکمیل کننده مانند اندازه گیری عمق آب، دبی لبالی و ...

(۳) پس از برداشت: شامل مراحل: الف: انتقال عکس ها به محیط نرم افزار متاشیپ، ب: توجیح نسبی (تولید ابر نقاط نیمه متراکم)، ج: معرفی نقاط کنترل زمینی، ح: تولید ابر نقاط متراکم، و: کلاسه بندی ابر نقاط به نقاط زمینی و غیر زمینی، ه: تولید شبکه چند ضلعی، ن: تولید مدل ارتفاع رقومی، و: تولید ارتوفتو

(۴) انتقال لایه رقومی ارتفاع و ارتوفتو به محیط نرم افزار ArcGIS جهت ترسیم پروفیل های عرضی و طولی.

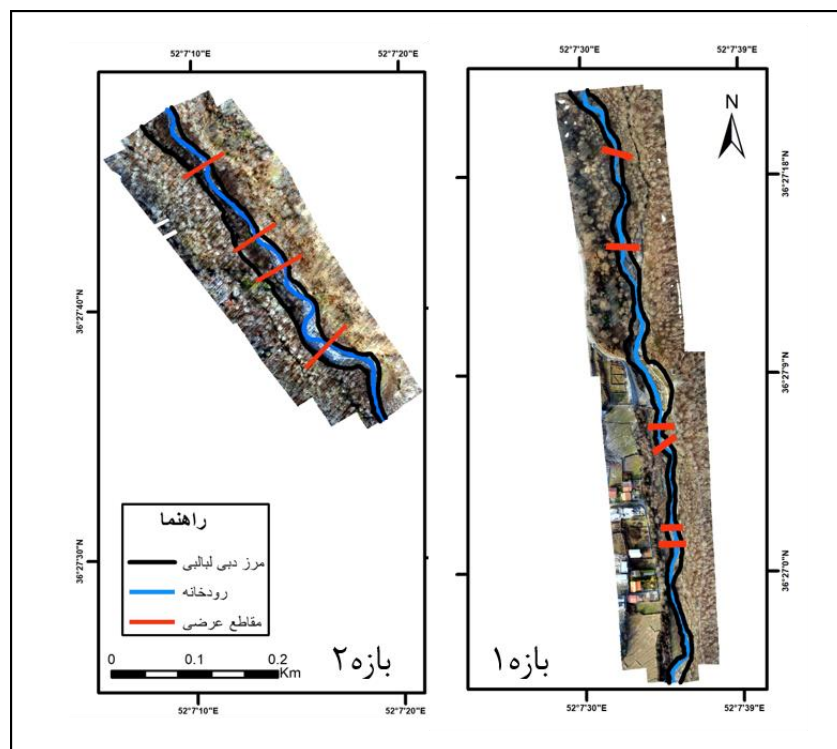
برای تشریح جریان آب در کانال رودخانه پارامترهای کانال و جریان مانند عرض کانال (W)، میانگین عمق کانال (d)، حداکثر عمق کانال (d_{max})، مساحت مقطع عرضی (A)، سرعت جریان (V)، عرض کانال مستعد سیل $(wf) * d_{max} (2)$ ، نسبت عمق کانال (ER) (wf/w)، ضریب انحنای رود یا شاخص سینوسیته (SI)، نسبت عرض به عمق (w/d) ، قدرت جریان (w)، عدد فرود (f)، شاخص تقارن فرم بستر (A^*) مورد بررسی قرار می گیرد. جهت برآورد سرعت جریان و دبی از معادله مانینگ استفاده شد (Hosseinzadeh ans esmaeili, 2014) (رابطه ۱).

شده و با استفاده از آن سرعت جریان، دبی، قدرت رود، تنش برشی و سایر پارامترهایی که برای کمی کردن فرایندهای کانال مهم هستند محاسبه شده‌اند. ثبت نیمرخ عرضی یک روش عینی و قابل تکرار است که داده‌های کمی را در مورد هر دو سطح رسوب و فرسایش که بین دو بازه زمانی متفاوت اتفاق افتاده فراهم می‌کند. اگر هدف از انتخاب بازه‌ها و مقاطع عرضی تخمین سرعت جریان و مقدار دبی جهت رسیدن به یک رابطه باشد از انتخاب بازه‌هایی که دچار پهن شدن یا عمیق شدن شده‌اند و یا کارهای ساختاری بر روی آنها صورت گرفته، دارای ریپ‌رپ هستند و یا سیمانی می‌باشند، چالاب‌های بزرگ یا دارای شیب تند محلی هستند اجتناب می‌شود. همچنین زیر شاخه‌ها نباید در اندازه‌گیری بازه رودخانه وارد شوند. از مقاطع عرضی با شکل غیرمعمول باید اجتناب نمود. نیمرخ عرضی مناسب در صورت امکان باید به صورت مستطیلی تا دوزنقه‌ای انتخاب شوند. از مقاطعی که در قسمت بالادست یا پایین دست رود از زیرشاخه‌هایی که تغییر مساحت زهکشی بیش از ۱۰ درصد دارند نیز باید اجتناب شود. در شکل ۲ مقاطع عرضی ترسیم شده در بازه شماره ۱ و ۲ نشان داده شده است.

کاهش مقدار پایین دست در مقایسه با همتای بالادست است. شاخص سینوسیته که در آن نسبت طول رود به طول دره است نشان از خمیدگی کانال است که بر پایه طبقه بندی بریرلی و فریس (Brierley and Fryirs, 2005)، کانال‌های با نسبت سینوسیته کمتر از ۱/۰۵ به عنوان الگوی مستقیم، نسبت بین ۱/۳ - ۱/۰۶ به عنوان الگوی سیونسی و بزرگتر از ۱/۳ نیز به عنوان رودخانه‌های پیچان رودی نامیده می‌شوند (Hosseinzadeh and esmaeili, 2014).

بحث و نتایج

تغییرات عرضی کانال در ۲ بازه از رودخانه واز مورد بررسی قرار گرفت. اولین مرحله تحلیل شامل ساخت مدل ارتفاعی براساس خروجی از تصاویر بدست آمده به وسیله پهپاد در محیط نرم افزار متاشیپ با اندازه پیکس ۴/۶ سانتی متر است. سپس پروفیل‌های عرضی کانال بر روی آن ترسیم شد. با استفاده از اندازه‌گیری مقاطع عرضی کانال، داده‌هایی شامل عرض و عمق کانال فعال، مساحت مقطع عرضی، عمق متوسط، شعاع هیدرولیک و نسبت پهنای به عمق کانال رود محاسبه گردید. این مقادیر با داده‌های هیدرولیک ترکیب

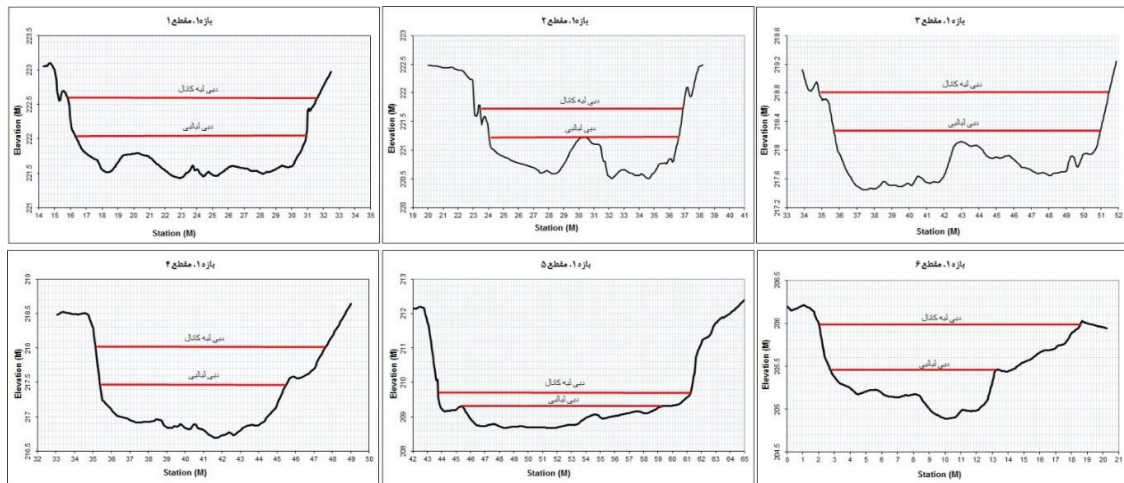


شکل ۲: مقاطع ترسیم شده در بازه‌های مورد مطالعه

داده‌های مورفومتریک و هیدرولوژیک در بازه ۱

بازه اول به طول ۹۰۰ متر در امتداد رودخانه واز در پایین دست روستای جوربند انتخاب و نیمرخ عرضی کانال در ۶ مقطع براساس ویژگی‌هایی که پیش‌تر اشاره شده است تهیه گردید (شکل ۳). برای هر یک از مقاطع اطلاعات

مورفومتریک جهت ترسیم نیمرخ عرضی از روی مدل رقومی ارتفاعی موجود (تهیه شده توسط پهپاد) استخراج و به محیط اکسل منتقل شد و در ادامه محاسبات مربوط به پارامترهای هیدرومتری و مورفومتری در جریان دبی لبالی و دبی لبه کانال انجام گرفت (جدول ۲).



شکل ۳: نیمرخ عرضی مقاطع ترسیم شده در بازه ۱

است. از نظر شاخص تقارن، مقاطع ۱، ۲ و ۶ دارای تقارن و مقاطع ۳، ۴ و ۵ دارای عدم تقارن می‌باشند. در این بازه میانگین تنش برشی $96/62$ و میانگین قدرت مخصوص $170/98$ در دبی لبالی در مرحله آستانه فرسایشی (100 نیوتن بر متر مربع برای تنش برشی و 300 وات بر متر مربع) قرار دارد اما در دبی لبه کانال در تمامی مقاطع مقادیر میانگین تنش برشی $157/27$ و میانگین قدرت مخصوص رود $471/65$ امکان فرسایش کانال و جابه‌جایی رسوبات را فراهم می‌کند.

براساس اندازه‌گیری‌های انجام شده میانگین سرعت جریان در وضعیت دبی لبالی $1/7$ متر بر ثانیه و میانگین سرعت جریان در وضعیت لبه کانال برابر با $2/53$ متر بر ثانیه بوده است. دبی متوسط رودخانه در این بخش در وضعیت دبی لبالی تقریباً $9/1$ متر مکعب بر ثانیه و دبی در وضعیت لبه کانال برابر با $29/21$ متر مکعب بر ثانیه بوده است. شیب بازه در مقاطع مختلف متفاوت بوده است و از $0/02$ متر بر متر تا $0/03$ متر بر متر متغیر بوده است. الگوی کانال در این بازه سینوسی تک کانالی نسبتاً محدود تا محدود بوده

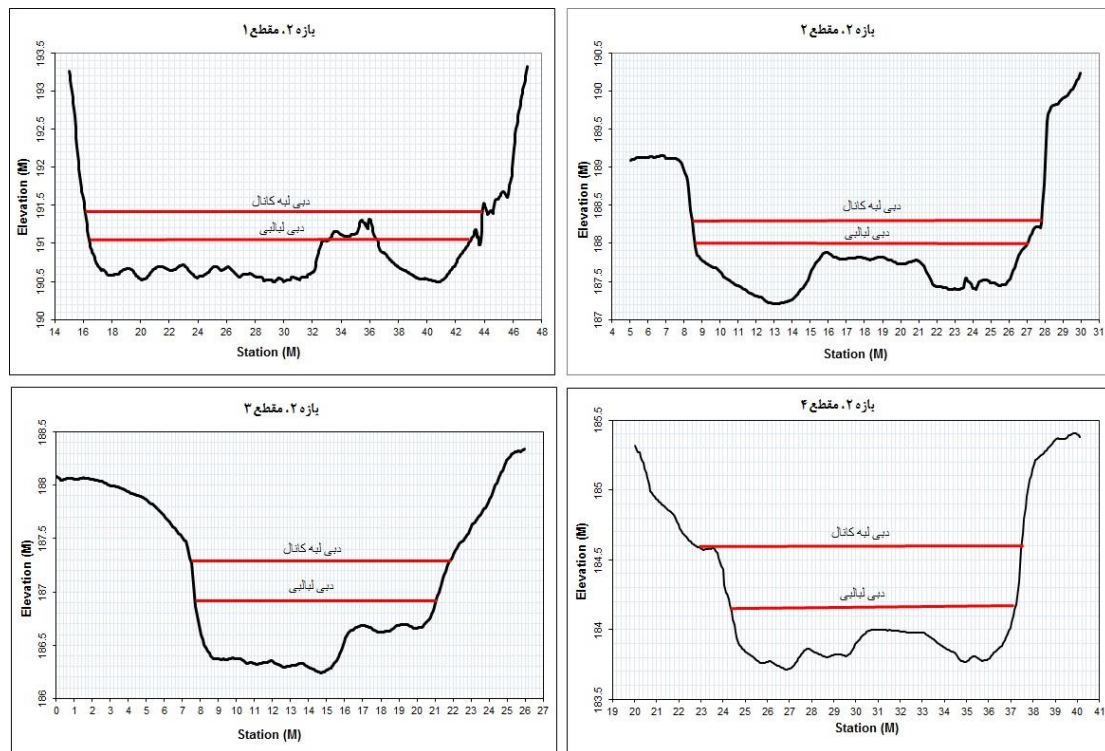
جدول ۲: مقادیر پارامترهای هیدرومتری و مورفومتری در دبی لبالی و دبی لبه کانال در بازه ۱

پارامتر	مقطع ۱ از بازه ۱		مقطع ۲ از بازه ۱		مقطع ۳ از بازه ۱		مقطع ۴ از بازه ۱		مقطع ۵ از بازه ۱		مقطع ۶ از بازه ۱	
	لبه کانال	دبی لبالی	لبه کانال	دبی لبالی	لبه کانال	دبی لبالی	لبه کانال	دبی لبالی	لبه کانال	دبی لبالی	لبه کانال	دبی لبالی
مساحت مقطع عرضی (A)	۱۴/۷۸	۵/۶۵	۱۱/۴۱	۹/۱۴	۱۱/۸۳	۵/۳۷	۱۰/۷۸	۴/۵۸	۱۲/۵۴	۵/۷۶	۱۱/۳۳	۴/۹۳
شعاع هیدرولیک (R)	۰/۷۳	۰/۳۸	۰/۷۵	۰/۴	۰/۷۱	۰/۳۶	۰/۸۳	۰/۴۷	۰/۶۹	۰/۳۷	۰/۶۲	۰/۳۸
سرعت جریان (V)	۲/۵۱	۱/۶۲	۲/۵۴	۱/۶۹	۲/۴۵	۱/۵۸	۲/۷	۱/۸۶	۲/۳۹	۱/۵۹	۲/۵۷	۱/۸۴
حداکثر عمق کانال (Dmax)	۰/۹۷	۰/۵۷	۱/۱۸	۰/۷۲	۱/۰۷	۰/۶۸	۱/۲۴	۰/۷۱	۱/۰۲	۰/۶۲	۱/۱۱	۰/۶۸
میانگین عمق جریان (d)	۰/۷۷	۰/۳۹	۰/۸۴	۰/۴۳	۰/۷۵	۰/۳۸	۰/۸۸	۰/۹۴	۰/۷۳	۰/۳۸	۰/۶۴	۰/۳۸
عرض کانال (W)	۱۵/۱	۱۴/۵	۱۳/۷	۱۲/۵	۱۵/۷	۱۵	۱۲/۳	۹/۹	۱۷/۵	۱۵/۱	۱۷/۷	۱۲/۸

نسبت عرض به عمق (w/d)	۱۹/۶	۳۷/۱۷	۱۶/۳	۲۹/۰۶	۲۰/۹۳	۳۹/۴۷	۱۳/۹۷	۲۰/۲	۲۴/۳	۳۹/۷۳	۲۷/۶۵	۳۳/۶۸
عرض کانال مستعد سیل (wf)	۱/۹۴	۱/۱۴	۲/۳۶	۱/۴۴	۲/۱۴	۱/۳۶	۲/۴۸	۱/۴۲	۲/۰۴	۱/۲۴	۲/۲۲	۱/۳۶
نسبت عمق کانال (ER)	۰/۱۲۸	۰/۷۸	۰/۱۷۲	۰/۱۱۵	۰/۱۳۶	۰/۰۹	۰/۲	۰/۱۴۳	۰/۱۱۶	۰/۰۸۲	۰/۱۲	۰/۱
شیب (S)	۰/۰۲۳۹	۰/۰۲۳۹	۰/۰۲۳۹	۰/۰۲۳۹	۰/۰۲۳۹	۰/۰۲۳۹	۰/۰۲۳۹	۰/۰۲۳۹	۰/۰۲۳۹	۰/۰۲۳۵	۰/۰۳۱	۰/۰۳۱
دبی (Q)	۲۹	۹/۱۶	۲۹	۹/۱۴	۲۹/۰۲	۹/۰۵	۲۹/۱۴	۹/۰۲	۳۰	۹/۱۷	۲۹/۱۲	۹/۰۶
عدد فرود (f)	۰/۹۵	۰/۸۸	۰/۹۹	۰/۹۵	۰/۹۷	۰/۹۶	۰/۰۲	۰/۹	۰/۹۸	۰/۹۶	۱/۱۹	۱/۰۹
شاخص سینوسیته (SI)	۱/۰۶	۱/۰۶	۱/۰۶	۱/۰۶	۱/۰۶	۱/۰۶	۱/۰۶	۱/۰۶	۱/۰۶	۱/۰۶	۱/۰۶	۱/۰۶
شاخص عدم تقارن (A*)	-۰/۰۲	-۰/۰۲	-۰/۰۳۴	-۰/۰۳۴	-۰/۰۱۱	-۰/۰۱۱	-۰/۰۱۱	-۰/۰۲۲	-۰/۰۱۸	-۰/۰۱۸	-۰/۰۱۸	-۰/۰۲
تنش برشی (τ)	۱۷۱/۱	۸۹/۱۵	۱۷۴/۸۷	۹۴/۶	۱۶۵/۷۳	۸۵/۶۲	۱۹۱/۱۷	۱۰۹/۲۲	۱۵۸/۹۹	۸۶/۳۳	۱۸۹/۷۷	۱۱۴/۸
قدرت جریان (Ω)	۶۸۱۴/۲	۲۱۴۹/۲	۶۷۹۹/۹۳	۲۱۴۲/۶	۶۸۰۴/۵۴	۲۱۲۳/۳۹	۶۷۴۷/۶	۲۰۹۰/۲۲	۶۹۲۰/۹	۲۱۱۴/۴۴	۸۸۵۸/۳۴	۲۷۵۶/۷۴
قدرت مخصوص جریان (G)	۴۵۲/۲۵	۱۴۸/۱۶	۴۹۸/۱۴	۱۷۰/۸۷	۴۳۴/۰۱	۱۴۱/۳۸	۵۵۰/۳۸	۲۱۰/۳۶	۳۹۵/۱۸	۱۴۰/۳۲	۴۹۹/۹۵	۲۱۴/۸۲

از روی مدل رقومی ارتفاعی موجود (تهیه شده توسط پهپاد) استخراج و به محیط اکسل منتقل شد و در ادامه محاسبات مربوط به پارامترهای هیدرومتری و مورفومتری در جریان دبی لبالی و دبی لبه کانال انجام گرفت (جدول ۳).

داده‌های مورفومتری و هیدرولوژیک در بازه ۲ بازه دوم به طول ۴۷۰ متر در امتداد رودخانه واز در بالادست شهر چمستان انتخاب و نیمرخ عرضی کانال در ۴ مقطع تهیه گردید (شکل ۴). همانند بازه اول برای هر یک از مقاطع اطلاعات مورفومتری جهت ترسیم نیمرخ عرضی



شکل ۴: نیمرخ عرضی مقاطع ترسیم شده در بازه ۲

می‌کند. کاهش سرعت جریان نتیجه کاهش شعاع هیدرولیک و شیب کانال می‌باشد و چون تنش برشی براساس شعاع هیدرولیک و شیب است به واسطه کاهش این دو پارامتر شاهد کاهش تنش برشی خواهیم بود. همچنین کاهش شیب کانال کاهش قدرت رود را به دنبال دارد. از طرف دیگر در بحث قدرت شکل‌زایی جریان، قدرت مخصوص رود تعیین کننده خواهد بود که متأثر از تغییر عرض کانال است. وقتی تفاوت تنش برشی بین دو بازه بیشتر می‌شود در بازه‌ای که تنش برشی بیشتر است فرسایشی بیشتر، عرض کمتر و تعداد موانع و پشته‌ها کمتر می‌شود. همچنین حفری که به واسطه حذف پوشش گیاهی ایجاد شده است باعث تمرکز جریان و افزایش قدرت رود شده است. بنابراین افزایش قدرت رود باعث افزایش فرسایش و به دنبال آن وقوع فرسایش جانبی کانال و حمل رسوبات آبرفتی می‌شود. فرسایشی مستقیماً به واسطه برداشت شن و ماسه در بخش‌های بالادست بازه‌های مورد مطالعه ایجاد شده است. تاثیر دخالت‌های انسانی به‌ویژه برداشت شن و ماسه مختص یک مکان نیست و اثرات خود را در پایین دست و بالادست خواهد گذاشت.

براساس اندازه‌گیری‌های انجام شده میانگین سرعت جریان در وضعیت دبی لبالبی ۱/۱۷ متر بر ثانیه و میانگین سرعت جریان در وضعیت لبه کانال برابر با ۱/۶۹ متر بر ثانیه بوده است. دبی متوسط رودخانه در این بخش در وضعیت دبی لبالبی تقریباً ۹/۱۶ متر مکعب بر ثانیه و دبی در وضعیت لبه کانال برابر با ۲۹/۲۵ متر مکعب بر ثانیه بوده است. شیب بازه در مقاطع مختلف متفاوت بوده است و از ۰/۰۲ متر بر متر تا ۰/۰۳ متر بر متر متغیر بوده است. الگوی کانال در این بازه سینوسی محدود بوده است. از نظر شاخص تقارن همه مقاطع دارای عدم تقارن می‌باشند. در این بازه میانگین تنش برشی ۴۶/۴۴ و میانگین قدرت مخصوص ۵۵/۸۳ در دبی لبالبی با توجه به آستانه‌های تعریف شده (۱۰۰ نیوتن بر متر مربع برای تنش برشی و ۳۰۰ وات بر متر مربع) فرسایشی و جابه‌جایی رسوبات وجود ندارد و رودخانه در مرحله رسوبگذاری قرار دارد. همچنین در دبی لبه کانال در تمامی مقاطع مقادیر میانگین تنش برشی ۱۱۹/۶۷ و میانگین ۲۷۷/۸۱ قدرت مخصوص رود می‌باشد که در مرحله آستانه فرسایشی قرار می‌گیرد و امکان فرسایش کانال و جابه‌جایی رسوبات به صورت خیلی محدود را فراهم

جدول ۳: مقادیر پارامترهای هیدرومتری و مورفومتری در دبی لبالبی و دبی لبه کانال در بازه ۲

پارامتر	مقطع ۱ از بازه ۲		مقطع ۲ از بازه ۲		مقطع ۳ از بازه ۲		مقطع ۴ از بازه ۲	
	لبه کانال	دبی لبالبی	لبه کانال	دبی لبالبی	لبه کانال	دبی لبالبی	لبه کانال	دبی لبالبی
مساحت مقطع عرضی (A)	۱۸	۸/۱۹	۱۵/۶	۹/۱	۱۱/۰۸	۵/۲۸	۱۰/۸۸	۵/۰۴
شعاع هیدرولیک (R)	۰/۶۲	۰/۳۶	۰/۷۶	۰/۴	۰/۷۴	۰/۳۹	۰/۶۸	۰/۳۷
سرعت جریان (V)	۱/۶۳	۱/۱۳	۱/۸۷	۱/۲۱	۲/۶۴	۱/۷۲	۲/۶۷	۱/۷۹
حداکثر عمق کانال (Dmax)	۰/۸۹	۰/۵۱	۱/۲۱	۰/۷۹	۲/۸۳	۰/۶۳	۲/۹۴	۰/۵۵
میانگین عمق جریان (d)	۰/۶۵	۰/۳۶	۰/۸	۰/۴۱	۰/۷۷	۰/۴	۰/۷۱	۰/۵۴
عرض کانال (W)	۲۷/۷	۲۲/۶	۱۹/۶	۱۸/۴	۱۴/۴	۱۳/۲	۱۵/۳	۱۳/۲
نسبت عرض به عمق (w/d)	۴۲/۶۱	۶۲/۷۷	۲۴/۵	۴۴/۸۷	۱۸/۷	۳۳	۲۱/۵	۲۴/۴
عرض کانال مستعد سیل (wf)	۱/۷۸	۱/۰۲	۲/۴۲	۱/۵۸	۵/۶۶	۱/۲۶	۵/۸۸	۱/۱
نسبت عمق کانال (ER)	۰/۰۶۴	۰/۰۴۵	۰/۱۲	۰/۰۸۵	۰/۴	۰/۰۹۵	۰/۳۸	۰/۰۸
شیب (S)	۰/۰۱۲۶	۰/۰۱۲۶	۰/۰۱۲۶	۰/۰۱۲۶	۰/۰۲۶	۰/۰۲۶	۰/۰۲۶	۰/۰۲۶
دبی (Q)	۲۹/۳۵	۹/۲۲	۲۹/۲	۹/۱	۲۹/۱۸	۹/۰۸	۲۹/۳	۹/۰۴
عدد فرود (f)	۱/۱۱	۰/۹۷	۱/۰۳	۰/۹۷	۰/۷۱	۰/۷	۰/۷	۰/۶۳
شاخص سینوسیته (SI)	۱/۱	۱/۱	۱/۱	۱/۱	۱/۱	۱/۱	۱/۱	۱/۱
شاخص عدم تقارن (A*)	-۰/۱	-۰/۱	-۰/۱	-۰/۱	-۰/۱	-۰/۱	-۰/۱	-۰/۱
تنش برشی (τ)	۷۶/۵۶	۴۳/۹۲	۹۴/۰۸	۴۸/۹۶	۱۸۸/۴۱	۹۹/۵۸	۱۹۸/۷۶	۱۰۹/۴۴
قدرت جریان (Ω)	۳۶۲۸/۷۹	۱۱۴۰/۴۷	۹۳۶/۳۷	۱۱۲۵/۰۴	۷۴۴۴/۲۹	۲۳۱۸/۵	۸۴۸۸/۹۴	۲۶۴۲/۳۳
قدرت مخصوص جریان (G)	۱۳۰/۹۳	۵۰/۵۶	۱۸۵/۲۴	۶۱/۱۱	۵۱۷/۲۶	۱۷۵/۱۲	۵۵۳/۹۹	۲۰۰/۷۱

داده در سطوح رها شده توسط پوشش گیاهی پوشیده می شود. به واسطه محدود شدن کانال و فروسایبی، مورفومتری کانال تغییر کرده و این باریک شدن با توجه به اصل پیوستگی جریان باعث افزایش سرعت جریان، تنش برشی و قدرت مخصوص جریان در بازه می شود. وقوع سیلاب های بزرگ که به صورت دوره ای رخ می دهد نیز می تواند تغییرات نسبتاً قابل توجهی را بر روی مورفومتری کانال ایجاد کند. رودخانه واز در طول سال های گذشته در بازه های زمانی ۲ تا ۵ ساله شاهد سیلاب های بزرگی بوده که این سیلاب های ناگهانی تغییرات اساسی در مورفومتری کانال ایجاد کرده است و باعث تغییرات در اشکال ژئومورفیک کانال نیز شده است. براساس شاخص سینوسیته ضریب سینوسیته کانال ۱/۰۶ در بازه شماره ۱ می باشد که بر پایه طبقه بندی بریرلی و فریس (Brierley and Fryirs, 2005)، کانال های با نسبت بین ۱/۳ - ۱/۰۶ به عنوان الگوی سینوسی شناخته شده اند.

مقایسه آماری مقادیر بازه ۱ به بازه ۲

ابتدا میانگین پارامترهای مختلف در وضعیت دبی لبالی و دبی لبه کانال در هر دو بازه محاسبه گردید. برای مقایسه مقادیر مختلف مقاطع در بازه یک و دو (بالادست و پایین دست) رابطه ۳ مورد استفاده قرار گرفته است. در دبی لبه کانال پارامترهای مساحت مقطع عرضی، شعاع هیدرولیک، سرعت جریان، حداکثر و میانگین عمق کانال، نسبت عرض به عمق، عرض کانال مستعد سیلاب، نسبت عمق کانال، دبی و عدد فرود منفی شده است که نشان دهنده کاهش مقدار این پارامترها در بازه دو (پایین دست) نسبت به بازه یک (بالادست) شده است اما دو پارامتر تنش برشی و قدرت مخصوص رود مثبت شده اند که نشان دهنده افزایش متغیرهای فوق در بازه دو (پایین دست) نسبت به بازه یک (بالادست) است. در دبی لبالی کانال، تمامی پارامترها به جز قدرت مخصوص رود منفی شده است. که نشان از کاهش مقادیر در بازه دو نسبت به بازه یک است اما در پارامتر قدرت مخصوص رود افزایش در پایین دست نسبت به بالادست وجود داشته است (جدول ۴).

در ادامه پژوهش تغییرات مقاطع عرضی در دو بازه مورد بررسی قرار گرفت. در بازه اول به واسطه برداشت شن و ماسه، ایجاد جاده در عرض کانال و ایجاد کانال فرعی، در ترکیب و جنس کرانه راست رودخانه و در بازه دوم یا پایین دست به واسطه ساخت سیل بند تغییرات ایجاد شده در رژیم جریان و رسوب رودخانه مشاهده شده است. براساس مدل های تحولی کانال (CEM) که مفهوم آن تنظیمات فرایندهای غالب در طول زمان در یک مکان می باشد در مرحله اول رودخانه دارای فرسایش اولیه بستر است و به دنبال آن ناپایداری کرانه و عریض شدن کانال رخ می دهد. در مراحل بعدی رسوبگذاری و بالا آمدن سطح بستر در پایین دست را به دنبال خواهد داشت و فروسایبی بستر به صورت عام اولین مرحله تعدیل کانال بعد از دخالت های انسانی خواهد بود که به دنبال آن تعریض شدن کانال رخ می دهد. زیرا ارتفاع کرانه به وضعیت بحرانی می رسد و منجر به شکست کرانه می شود (ترکیب و جنس کرانه نیز تاثیرگذار است). سپس رسوبگذاری بر روی بستر در جهت پایین دست شروع می شود زیرا رسوبات وارد شده به کانال به واسطه شکست کرانه از بالادست به پایین دست منتقل می شود و ادامه این روند منجر به ایجاد دشت های سیلابی جدید می شود. هر چند این مراحل تحولی می تواند به واسطه متغیرهای مختلفی مانند کنترل شرایط زمین شناسی بستر، مورفولوژی کانال و مواد تشکیل دهنده بستر و کرانه و شدت دخالت های انسانی دچار تغییر شود. عریض شدن کانال منجر به ایجاد یک مقطع عرضی در رودخانه شده در حالی که کاهش عرض رودخانه و باریک شدن آن باعث فروسایبی و ایجاد تراس های جدید در حاشیه رودخانه خواهد شد. ناپایداری کرانه ها ناشی از حفر یا فروسایبی بستر در نهایت منجر به تعریض کانال می شود. شرایط فوق یک عامل اصلی در رودخانه های تک کانالی با رسوبات ریزدانه و چسبنده است در حالی که فرایندهای فوق در کانال های سینوسی، عریض و با رسوبات درشت دانه کمتر رخ می دهد. البته در بخش هایی از رودخانه که به واسطه برداشت شن و ماسه، بار بستر کاهش پیدا می کند تمرکز جریان و حفر کانال رخ

جدول ۴: درصد نسب تفاوت های پارامترهای کانال در بالا دست و پایین دست

پارامتر	بازه ۱		بازه ۲	
	دبی لبالی	لبه کانال	دبی لبالی	لبه کانال
مساحت مقطع عرضی (A)	۱۲/۱۱	۵/۹	۶/۹	-۸۶/۱۱
				-۹۳/۱

۰/۲	۰/۴	۰/۷	۰/۳۸	-۹۹/۳	-۹۹/۶۲	شعاع هیدرولیک (R)
۲/۵۲	۱/۷	۲/۲	۱/۴۶	-۹۷/۸	-۹۸/۵۴	سرعت جریان (V)
۱/۱	۰/۶۶	۱/۹۶	۰/۶۲	-۹۸/۰۴	-۹۹/۳۸	حداکثر عمق کانال (Dmax)
۰/۷۷	۰/۴۸	۰/۷۳	۰/۴۲	-۹۹/۲۷	-۹۹/۵۸	میانگین عمق جریان (d)
۱۵/۳۴	۱۳/۳	۱۹/۲۵	۱۶/۸۵	-۸۰/۷۵	-۸۳/۱۵	عرض کانال (W)
۲۰/۴۵	۳۳/۲	۲۶/۸۲	۴۱/۲۶	-۷۳/۱۸	-۵۸/۷۴	نسبت عرض به عمق (w/d)
۲/۲	۱/۳۲	۳/۹۳	۱/۲۴	-۹۶/۰۷	-۹۸/۷۶	عرض کانال مستعد سیل (wf)
۰/۱۴۵	۰/۲۱	۰/۲۴	۰/۰۷	-۹۹/۷۶	-۹۹/۹۳	نسبت عمق کانال (ER)
۲۹/۲	۹/۱	۲۹/۲۵	۹/۱۱	-۷۰/۷۵	-۹۰/۸۹	دبی (Q)
۱/۰۹	۰/۹۵	۰/۸۹	۰/۸۱	-۹۹/۱۱	-۹۹/۱۹	عدد فرود (f)
۱۷۵/۲۷	۹۶/۶۲	۱۳۹/۴۵	۷۵/۴۷	۳۹/۴۵	-۲۴/۵۳	تنش برشی (τ)
۴۷۱/۶۵	۱۷۰/۹۹	۳۴۶/۸۵	۱۲۱/۸۷	۲۴۶/۸۵	۲۱/۸۷	قدرت مخصوص جریان (G)

نتیجه‌گیری

نتایج بدست آمده از این مطالعه نشان داد که داده‌های بدست آمده از پهپاد به دلیل دقت بالای هندسی و قدرت تفکیک بالا امکان استخراج داده‌های مورفومتری و هیدرولوژیک مرتبط با کانال و نیمرخ‌های عرضی را فراهم می‌کند. این داده‌ها با توجه به دقت بالا می‌توانند جایگزین مناسبی برای کارهای میدانی از قبیل نقشه‌برداری با انواع دوربین‌ها باشد. تصاویر ارتوفتو تهیه شده با استفاده از پهپاد امکان شناسایی عوارض و لندفرم‌های ژئومورفیک رودخانه را با دقت مناسب فراهم نموده است. براساس مقایسه داده‌های بدست آمده در دو بازه از رودخانه واز مشخص گردید که مقاطع مختلف در بالا دست و پایین دست یکسان نیستند و تغییرات در ویژگی‌های مورفومتریک باعث تغییر

ویژگی‌های هیدرولیک از جمله سرعت جریان، تنش برشی و قدرت مخصوص رود شده است. این تفاوت باعث تنوع اشکال ژئومورفیک در بازه‌های مورد مطالعه شده است. بررسی آماری مقادیر در بازه بالادست نسبت به بازه پایین دست نشان داد که پارامترهای تنش برشی و قدرت مخصوص رود افزایشی و پارامترهای مساحت مقطع عرضی، شعاع هیدرولیک، سرعت جریان، حداکثر و میانگین عمق کانال، نسبت عرض به عمق، عرض کانال مستعد سیلاب، نسبت عمق کانال، دبی و عدد فرود کاهش یافته است.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از هیچ سازمان یا ارگانی کمک مالی دریافت نکرده‌اند.

References

- Bangen, S.G., Wheaton, J.M., Bouwes, N., Bouwes, B. and Jordan, C., 2014. A methodological intercomparison of topographic survey techniques for characterizing wadeable streams and rivers, *Geomorphology*, v. 206, p. 343-361.
- Brierley, G.L. and Fryirs, K., 2005. *Geomorphology and River Management: Application of the River Style framework*. Blackwell publishing, UK. 398 p.
- Dietrich, J.T., 2016. Riverscape mapping with helicopter-based structure-from-motion photogrammetry, *Geomorphology*, v. 252, p. 144-157.
- Fonstad, M.A., Dietrich, J.T., Courville, B.C., Jensen, J.L. and Carbonneau, P.E., 2013. Topographic structure from motion: A new development in photogrammetric measurement, *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 38, p. 421-430.
- Flener, C., Vaaja, M., Jaakkola, A., Krooks, A., Kaartinen, H., Kukko, A., Kasvi, E., Hyypä, H., Hyypä, J. and Alho, P., 2013. Seamless mapping of river channels at high resolution using mobile LiDAR and UAV-photography. *Remote Sens*, v. 5, p. 6382-6407.
- Hosseinzadeh, M. and Esmaili, R., 2014. *River geomorphology, concepts, forms and processes*, Shahid Beheshti University Publications, 338 p (In persian).
- Hughenoltz, C.H., Whitehead, K., Brown, O.W., Barchyn, T.E., Moorman, B.J., LeClair, A., Riddell, K. and Hamilton, T., 2013. Geomorphological mapping with a small unmanned aircraft system (sUAS):

- Feature detection and accuracy assessment of a photogrammetrically-derived digital terrain model. *Geomorphology*, v. 194, p. 16-24.
- Knighton, A.D., 1981. Asymmetry of river channel cross-section: part 1, Quantitative indices, *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 6, p. 581-588.
- Khairi, A., Hosseinzadeh, M.M. and Sadouq Vanini, S., 2022. The effect of transverse structures (bridges) on river morphology (case study: Jorband village, Chamestan, Mazandaran), *Earth Science Research*, v. 13(1), p. 150-171 (in Persian).
- Lejot, J., Delacourt, C., Piégay, H., Fournier, T., Trémélo, M. and Allemand, P., 2007. Very high spatial resolution imagery for channel bathymetry and topography from an unmanned mapping controlled platform. *Earth Surf. Process. Landforms*, v. 32, p. 1705-1725.
- Milne, J.A., 1983. Variation in cross-sectional asymmetry of coarse bedload river channels, *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 8, p. 503-511.
- Miřijovský, J., Michalková, M.Š., Petyniak, O., Máčka, Z. and Trizna, M., 2015. Spatiotemporal evolution of a unique preserved meandering system in Central Europe the Morava River near Litovel. *Catena*, v. 127, p. 300-311.
- Nex, F. and Remondino, F., 2014. UAV for 3D mapping applications: A review. *Applied Geomatics*, v. 6, p. 1-15.
- Oguchi, T., Hayakawa, Y.S. and Wasklewicz, T., 2022. Remote Data in Fluvial Geomorphology: Characteristics and Applications, *Treatise on Geomorphology*, v. 6, p. 1116-1141.
- Passalacqua, P., Belmont, P., Staley, D.M., Simley, J.D., Arrowsmith, J.R., Bode, C.A., Crosby, C., DeLong, S.B., Glenn, N.F., Kelly, S.A., Lague, D., Sangireddy, H., Schaffrath, K., Tarboton, D.G., Wasklewicz, T. and Wheaton, J.M., 2015. Analyzing high resolution topography for advancing the understanding of mass and energy transfer through landscapes: A review. *Earth-Science Reviews*, v. 148, p. 174-193.
- Rayburg, S.C. and Neave, M., 2008. Assessing morphological complexity and diversity in river systems using three-dimensional asymmetry indices for bed elements, bedforms and bar units. *River Research and Applications*, v. 24, p. 1343-1361. doi:10.1002/rra.1096.
- Roy, S. and Sahu, A.S., 2018. Potential interaction between transport and stream networks over the lowland rivers in Eastern India, *Journal of Environmental Management*, v. 197, p. 316-330.
- Sofia, G., 2020. Combining geomorphometry, feature extraction techniques and Earth-surface processes research: The way forward. *Geomorphology*, v. 355, Doi: 10.1016/j.geomorph.2020.107055
- Wyrick, J.R., Senter, A.E. and Pasternack, G.B., 2014. Revealing the natural complexity of Fluvial morphology through 2D hydrodynamic delineation of river landforms, *Geomorphology*, v. 210, p. 14-22.
- Westoby, M.J., Brasington, J., Glasser, N.F., Hambrey, M.J. and Reynolds, J.M., 2012. Structure from-motion photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications, *Geomorphology*, v. 179, p. 300-314.
- Woodget, A.S., Carbonneau, P.E., Visser, F. and Maddock, I.P., 2014. Quantifying submerged fluvial topography using hyperspatial resolution UAS imagery and structure from motion photogrammetry, *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 40, p. 47-64.