

An Analysis of the Joint Performance of ALOS Satellite and UAV Technology for Flood Simulation in Two Hydrological Basins with Contrasting Characteristics

Masih Zolghadr^{1*} , Mehdi Sohrabi² , Fatemeh Rustapour² , Mohammad Reza Kargar³ 

Received: 13-09-2025, Revised: 31-10-2025, Accepted: 15-11-2025, Published: 16-11-2025

<https://doi.org/10.22034/19.70.6>

Extended Abstract

Introduction

A key component in flood simulations is the Digital Elevation Model (DEM), which provides a numerical representation of topography and governs flow routing and floodplain delineation. In recent years, a wide range of DEM sources have become available, ranging from high-resolution Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-derived models and LiDAR systems to ground surveys and freely accessible satellite data. UAV-based DEMs offer centimeter-scale accuracy, making them well-suited for small-scale, urban, or complex terrain. However, their limited spatial coverage, operational constraints, and high costs restrict their large-scale applications. In contrast, satellite-based DEMs, such as those provided by the Advanced Land Observing Satellite (ALOS), are globally available, free of charge, and cover extensive and inaccessible areas. Despite these advantages, concerns remain about their accuracy in representing micro-topographic features, especially in urbanized basins with significant anthropogenic disturbances. This research addresses the fundamental question: to what extent can ALOS-derived DEMs be trusted for hydraulic flood modeling in basins with contrasting characteristics? To answer this, two hydrologically distinct catchments in Iran were selected: the heavily urbanized Darvaze Quran basin in Shiraz, which has experienced severe anthropogenic modifications and devastating floods, and the relatively undisturbed Maroon basin with stable topography and minimal land-use change. By comparing the performance of ALOS and UAV DEMs in two-dimensional HEC-RAS simulations, this study provides new insights into the applicability and limitations of satellite DEMs for flood risk assessment.

Materials and Methods

Two contrasting watersheds were analyzed to evaluate the reliability of DEMs from different sources. Darvaze Quran basin in Shiraz, characterized by rapid urban expansion, road construction, and structural interventions-such as six detention dams built after the catastrophic 2019 flood-represents a highly disturbed environment. Conversely, the Maroon basin, located near Paskouhak in northwestern Shiraz, is a relatively pristine catchment of 4.3 km² with gentle slopes, loamy soils, and natural vegetation dominated by wild pistachio and rangeland species. UAV imagery was acquired using a Phantom 4 Pro UAV to produce centimeter-scale DEMs. Satellite DEMs were obtained from ALOS with a spatial resolution of 12.5 meters and calibrated against UAV-derived control points. Both datasets were processed and integrated into HEC-RAS 2D. Independent grids were generated for each DEM: a 2×2 m mesh for UAV-based DEMs and a 5×5 m mesh for ALOS. Simulations were performed for

1. Assistant Professor, Dept. of Water Sciences Engineering, Jahrom University, Jahrom, Fars, Iran, Corresponding Author: zolghadr.masih@jahromu.ac.ir

2. Post Graduate Student of Irrigation and Drainage, Jahrom University, Fars, Iran.

3. M.Sc. in Remote Sensing, General Department of Natural Resources and Watershed Management of Fars Province, Fars, Iran.

multiple flood return periods in the Darvaze Quran basin and for observed rainfall-runoff events in the Maroon basin. Calibration and validation were performed using local rainfall data, river discharge records, and the optimization of Manning's roughness coefficient. Model outputs included peak discharge, time-to-peak, hydrograph shape, and flood extent. The comparison of results between UAV and ALOS provided a basis for assessing the spatial and temporal accuracy of satellite DEMs under varying geomorphological and anthropogenic conditions.

Results and Discussion

The results showed clear contrasts between the two study areas. In the Darvaze Quran basin, ALOS-derived DEMs significantly underestimated the effects of structural flood-control measures, with UAV simulations indicating a 47% reduction in peak discharge and a 36-minute delay in time-to-peak, compared with only an 11% reduction and an 18-minute delay from ALOS. ALOS also produced flood-routing times nearly twice those of UAV outputs, reflecting the inability of 12.5 m resolution data to capture fine-scale terrain features and leading to attenuation underestimation of up to 36%. In the Maroon basin, however, UAV and ALOS simulations closely matched observed hydrographs, with similar rising and falling limbs and minor deviations in peak discharge; the main difference was ALOS's consistent underestimation of time-to-peak due to smoothed micro-topography. These results demonstrate that in stable basins with limited disturbance, ALOS provides sufficiently accurate, low-cost inputs for flood modeling, whereas in urbanized or topographically altered basins it can misrepresent flood dynamics. Temporal factors further contributed to discrepancies, as UAVs capture current land use and structural changes while ALOS, last updated in 2011, cannot reflect recent development. Overall, UAV DEMs offered higher precision, but their limited coverage suggests that combining UAV data for critical hotspots with satellite DEMs for broader areas provides an optimal balance between accuracy and efficiency.

Conclusion

This study demonstrates that UAV-derived DEMs offer superior accuracy in simulating flood hydraulics, particularly in complex or urbanized basins, by capturing detailed topographic features that influence flow paths, flood peaks, and timing. In contrast, ALOS DEMs, despite their lower spatial resolution and outdated acquisition, remain valuable for large-scale, stable basins where anthropogenic disturbance is minimal. In such contexts, they provide cost-effective and reliable inputs for flood modeling. The contrasting results between Darvaze Quran and Maroon basins emphasize the conditional reliability of ALOS: effective in relatively undisturbed terrains but prone to errors in disturbed or urban areas. The research further underscores the potential of a hybrid UAV-ALOS approach as a balanced strategy of both datasets. Practical implications include improved decision-making for flood management, particularly in regions where high-resolution UAV surveys are impractical due to cost or accessibility constraints. The study also highlights the role of rainfall-driven boundary conditions in simplifying hydraulic modeling by bypassing separate hydrological simulations, and the advantages of finer temporal resolution in UAV outputs for capturing rapid flood dynamics. Future works should focus on integrating advanced UAV sensors, multi-UAV coordination protocols for larger coverage, and employing machine learning algorithms to enhance DEM calibration and flood prediction. By addressing the inherent limitations of both UAV and satellite DEMs, such approaches can pave the way for more robust, scalable, and cost-effective flood risk management strategies.

Keywords: *ALOS satellite, UAV, HEC-RAS 2D, flood modeling, DEM accuracy*

Article Type: Research Paper

Acknowledgements

The authors would like to express their sincere appreciation to Fanaavar Payeshgaran Farasanjesh Tabiat Fars Company for their cooperation and assistance in providing aerial surveying equipment.

Conflict of Interest

The authors declare that there are no conflicts of interest regarding the authorship and publication of the contents of this research.

Data Availability

The data and results used in this study will be made available upon reasonable request through correspondence with the corresponding author.

Author Contributions

Masih Zolghadr: Supervision, conceptualization, results verification, drafting the initial manuscript, editing, and manuscript revision, Mehdi Sohrabi: Software-based analyses of the Darvazeh Qur'an watershed, Fatemeh Roustapour: Software-based analyses of the Marun watershed, Mohammadreza Kargar: Consultation, aerial surveying, results verification, and manuscript review.

Citation: Zolghadr M, Sohrabi M, Rustapour F, Kargar MR, An analysis of the joint performance of ALOS satellite and UAV technology for Flood Simulation in Two Hydrological Basins with Contrasting Characteristics. *jwmseir* 2025; 19 (70):91-107

Iran-Watershed Management Science & Engineering, Year 2025, Vol 19, No 70, PP 91-107

Publisher: Watershed Management Society of Iran

© Author(s)



تحلیلی بر عملکرد مشترک ماهواره آلوس و فناوری پهپاد جهت شبیه‌سازی سیلاب در دو حوضه با ویژگی‌های متفاوت

مسیح ذوالقدر^۱، مهدی سهرابی^۲، فاطمه روستاپور^۳، محمدرضا کارگر^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۲۲، تاریخ داوری: ۱۴۰۴/۰۸/۰۹، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۲۴، تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۸/۲۵

<https://doi.org/10.22034/19.70.6>

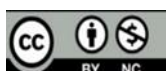
چکیده

در دهه‌های اخیر، استفاده از مدل‌های رقومی ارتفاعی (DEM) برای شبیه‌سازی دقیق سیلاب به ابزاری حیاتی در مهندسی آب تبدیل شده است. در این میان، داده‌های ماهواره‌ای مانند آلوس (ALOS) به دلیل دسترسی آزاد و گسترده پوشش این ماهواره، به‌ویژه در مناطق فاقد داده‌های زمینی، مورد توجه قرار گرفته است. با این حال، میزان دقت این داده‌ها در مقایسه با برداشت‌های دقیق‌تری همچون پهپاد در محیط‌های متفاوت، همواره محل بحث بوده است. هرچند فناوری پهپاد محدودهای کوچک‌تری را در مقایسه با ماهواره تحت پوشش قرار می‌دهد. هدف این پژوهش، ارزیابی قابلیت اعتماد به داده‌های آلوس در کنار فناوری پهپاد در شبیه‌سازی هیدرولیکی سیلاب، با مقایسه عملکرد آن در دو حوضه متفاوت از نظر تغییرات سطح زمین است. دو مطالعه موردی در حوضه دروازه قرآن شیراز (با توسعه شهری و تغییرات شدید) و حوضه مارون در شمال غربی شهر شیراز (با شرایط طبیعی و توسعه نیافته) انتخاب شدند. در هر دو مطالعه، مدل‌های DEM استخراج‌شده از داده‌های آلوس و پهپاد به عنوان ورودی مدل عددی HEC-RAS دوبعدی به کار گرفته شدند. نتایج نشان داد که در منطقه شهری، مدل آلوس در دوره بازگشت ۵۰۰ ساله حدود ۴۸٪ خطا را نشان می‌دهد (در بدترین حالت) اما در مدل پهپاد همین دوره زمانی را ۱۵٪ نشان می‌دهد، پس مدل آلوس در برآورد دبی اوج و زمان اوج خطا دارد، در حالی که در منطقه طبیعی، نتایج هر دو مدل به یکدیگر نزدیک بوده و هیدروگراف‌های شبیه‌سازی‌شده تقریباً منطبق بودند. یافته‌ها حاکی از آن است که داده‌های آلوس در حوضه‌هایی که طی زمان تغییرات توپوگرافی و دخالت انسانی زیادی را تجربه نکرده‌اند، قابل اتکا هستند؛ اما در مناطق شهری و دستخورده، تنها داده‌های دقیق‌تری مانند پهپاد می‌توانند بازنمایی مناسبی از شرایط واقعی ارائه دهند. این نتیجه در انتخاب منبع داده برای مدیریت سیلاب از اهمیت بالایی برخوردار است.

کلید واژه‌ها: ماهواره، نقشه برداری هوایی، مدل هک-رس، سیلاب، تفکیک مکانی

نوع مقاله: پژوهشی

استناد: ذوالقدر مسیح، سهرابی مهدی، روستاپور فاطمه، کارگر محمد رضا. تحلیلی بر عملکرد مشترک ماهواره آلوس و فناوری پهپاد جهت شبیه‌سازی سیلاب در دو حوضه با ویژگی‌های متفاوت. علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. ۱۴۰۴؛ ۱۹(۷۰): ۹۱-۱۰۷
علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، سال ۱۴۰۴، دوره ۱۹، شماره ۷۰، صفحه ۹۱-۱۰۷



© نویسندگان

ناشر: انجمن آبخیزداری ایران

۱- استادیار گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه جهرم، فارس، ایران. نویسنده مسئول: zolghadr.masih@jahromu.ac.ir

۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشگاه جهرم، فارس، ایران.

۳- کارشناس ارشد سنجش از دور اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان فارس.

موزاییک‌های ۱۲/۵ متری بوده و به صورت رایگان در اختیار کاربران قرار دارد. این داده‌ها توسط سازمان‌هایی مثل ASF⁶ و JAXA⁶ در دسترس قرار گرفته‌اند. این داده‌ها تصاویر راداری موزاییکی شده هستند که با دقت ۱۲/۵ متر پیکسل تهیه و اصلاح هندسی^۷ شده‌اند [۱۵].

هدف از نگارش مقاله پیش‌رو این موضوع بوده است که به یکی از پرسش‌های بنیادین در انتخاب منبع داده برای شبیه‌سازی سیلاب پاسخ دهد:

آیا داده‌های ماهواره آلوس برای مدل‌سازی دقیق سیلاب در همه مناطق قابل اتکا هستند؟ برای پاسخ به این پرسش، دو منطقه با ویژگی‌های متضاد انتخاب شده‌اند. یکی حوضه دروازه قرآن شیراز که در مجاورت کلان‌شهر شیراز قرار داشته و طی سال‌های اخیر تغییرات عمده‌ای در کاربری زمین، ساخت‌وساز و زیرساخت‌های شهری را تجربه کرده است و تجربه سیلاب مرگبار سال ۹۸ را دارد. دیگری حوضه مارون که منطقه‌ای طبیعی، فاقد توسعه گسترده شهری و دارای پوشش گیاهی نسبتاً پایدار است.

لازم به ذکر است که در مطالعات جداگانه‌ای در هر دو حوضه، DEM‌های استخراج‌شده از داده‌های آلوس و پهپاد به عنوان ورودی مدل عددی HEC-RAS^۸ دوبعدی معرفی شده‌اند و نتایج خروجی شامل دبی اوج، زمان اوج و هیدروگراف سیلاب مورد مقایسه قرار گرفته‌اند [۱۸]. با ترکیب داده‌های ماهواره آلوس و پهپاد در حوضه دروازه قرآن شیراز، به بررسی تاثیر ساخت سازه‌های هیدرولیکی بر مهار سیلاب در دوره بازگشت‌های مختلف پرداختند. آن‌ها ابتدا کل حوضه را با داده‌های ماهواره آلوس شبیه‌سازی کردند. سپس داده‌های پهپاد را در مناطق ساخت سدها شبیه‌سازی نمودند. نتایج نشان می‌داد که گرچه ساخت سدها تاثیر مهمی در کاهش اوج سیلاب و به تاخیرانداختن زمان سیلاب دارد و شکل کلی هیدروگراف‌های حاصله از پهپاد و ماهواره آلوس نزدیک به هم است اما به ویژه در نقاط اوج تفاوت‌های قابل ملاحظه‌ای دیده می‌شود. این در حالی است که در مطالعه دیگری که توسط [۱۷] در حوضه مارون انجام شد هیدروگراف‌های خروجی که یکبار با داده‌های پهپاد و بار دیگر با داده‌های ماهواره آلوس شبیه‌سازی شده بودند، انطباق خوبی با یکدیگر داشتند. همین موضوع، یعنی نزدیکی هیدروگراف‌های داده پهپاد و آلوس در یک حوضه (مارون) و تفاوت قابل ملاحظه آن‌ها در حوضه دیگر (دروازه قرآن) هدف اصلی این مقاله را ایجاد می‌کند. به بیان دیگر، انتخاب دو منطقه با ویژگی‌های متفاوت، به طوری که یکی توسعه شهری را تجربه کرده و دیگری نسبتاً بدون تغییر باقی مانده، به ما این امکان را می‌دهد تا تأثیر ویژگی‌های فیزیکی و تغییرات انسانی بر عملکرد DEM‌های ماهواره‌ای را به‌طور مستقیم ارزیابی کنیم.

سیلاب‌ها از مهم‌ترین و پرتکرارترین بلایای طبیعی در جهان به‌شمار می‌آیند که هر ساله موجب خسارات گسترده انسانی، اقتصادی و محیط‌زیستی می‌شوند. افزایش شهرنشینی، تغییرات کاربری اراضی، و تشدید پدیده‌های حدى ناشی از تغییر اقلیم، همگی به افزایش فراوانی و شدت رخداد‌های سیل در مقیاس‌های محلی و منطقه‌ای دامن زده‌اند. در این راستا، شبیه‌سازی دقیق رفتار جریان‌های سطحی و تحلیل خطرپذیری سیلاب از ضروری‌ترین ابزارهای مدیریت ریسک سیلاب محسوب می‌شود. یکی از مؤلفه‌های کلیدی در این شبیه‌سازی‌ها، مدل‌های رقومی ارتفاعی (DEM)^۱ هستند که توپوگرافی منطقه را به‌صورت عددی بازنمایی می‌کنند.

در سال‌های اخیر، منابع مختلفی برای تولید DEM توسعه یافته‌اند که از میان آن‌ها می‌توان به داده‌های برداشت‌شده با پرنده هدایت‌پذیر از دور که به اختصار پهپاد (UAV)^۲ نامیده می‌شود، سیستم‌های LiDAR^۳، سامانه‌های نقشه‌برداری زمینی، و داده‌های ماهواره‌ای اشاره کرد. داده‌های برداشت‌شده توسط پهپادها با وضوح مکانی بسیار بالا، دقت عمودی قابل توجه، و انعطاف‌پذیری در انتخاب منطقه برداشت، جایگاه مهمی در مطالعات محلی پیدا کرده‌اند. از سوی دیگر، داده‌های ماهواره‌ای مانند ماهواره آلوس^۴ (ALOS) به دلیل دسترسی آزاد و پوشش گسترده، در مطالعات وسیع مقیاس و مناطق صعب‌العبور، کاربرد فراوانی یافته‌اند.

با وجود این مزایا، عملکرد DEM‌های استخراج‌شده از داده‌های آلوس در مقایسه با داده‌های دقیق‌تر مانند پهپاد، همواره با چالش‌هایی مواجه بوده است. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که وضوح مکانی پایین‌تر DEM‌های ماهواره‌ای منجر به کاهش دقت در شبیه‌سازی عمق، دبی اوج و وسعت سیلاب می‌شود. این مسأله به‌ویژه در مناطق شهری یا مناطقی که دستخوردگی‌های شدید و تغییرات کاربری زمین را تجربه کرده‌اند، تشدید می‌شود. در مقابل، در حوضه‌هایی که طی زمان دستخوش تغییرات توپوگرافی عمده نبوده‌اند، ممکن است مدل‌های ماهواره‌ای عملکرد نسبتاً قابل‌قبولی داشته باشند.

ماهواره ALOS یکی از مهم‌ترین ماهواره‌های سنجنش از دور است که توسط آژانس فضایی ژاپن (JAXA)^۵ طراحی و راه‌اندازی شده است. این ماهواره نقشی کلیدی در نقشه‌برداری زمین، پایش منابع طبیعی، مدیریت بحران‌ها و بررسی تغییرات محیط‌زیستی ایفا کرده است. در می ۲۰۱۱، ماهواره ALOS دچار نقص در سیستم توان شد (عدم دریافت برق از پنل‌های خورشیدی) و ارتباط با آن قطع گردید. در نتیجه JAXA رسماً پایان مأموریت آن را اعلام کرد. تفکیک زمانی این ماهواره ۴۶ روز و تفکیک مکانی آن در قالب

1. Digital Elevation Model
2. Unmanned (Aerial Vehicle)
3. Light Detection and Ranging
4. Advanced Land Observing Satellite
5. Japan Aerospace Exploration Agency

6. Alaska Satellite Facility
7. Orthorectification
8. Hydrology Engineering Center-River Analysis System

با توجه به اهمیت روزافزون مدیریت سیلاب و دقت شبیه‌سازی‌های هیدرولیکی، انتخاب نوع مدل رقومی ارتفاعی به‌عنوان یکی از عوامل کلیدی در تعیین دقت خروجی مدل‌ها شناخته می‌شود. منابع متعددی به بررسی و مقایسه بین داده‌های برداشت‌شده از پهپادها، سیستم‌های LiDAR و داده‌های ماهواره‌ای مانند ALOS پرداخته‌اند. در این بخش، مروری جامع بر مهم‌ترین مطالعات انجام‌شده در این زمینه ارائه می‌شود.

مطالعات اخیر نشان داده‌اند که DEM‌های تولیدشده از داده‌های پهپاد، به‌ویژه در مناطق شهری و پیچیده، عملکرد بسیار بهتری در مدل‌سازی سیلاب دارند. برای مثال، [۸] از فناوری LiDAR نصب‌شده بر روی پهپاد برای شبیه‌سازی سیلاب در یک منطقه کوهستانی استفاده کردند و نشان دادند که دقت مکانی بالا منجر به پیش‌بینی بهتری از رفتار جریان، به‌ویژه در آبراهه‌های فرعی و مناطق پست می‌شود. همچنین، [۲۰] در کشور غنا مدل‌های رقومی ارتفاعی با وضوح ۰/۳ متر را با مدل‌های ۱۰ متری مقایسه کردند و بهبود ۶۲/۵ درصدی در برآورد عمق جریان در مناطق مسطح را گزارش دادند [۲]. نیز با استفاده از مدل FLO-2D نشان دادند که DEM‌های پهپاد در مقایسه با داده‌های دوربین زمینی در پیش‌بینی وسعت و عمق سیلاب دقت بسیار بالاتری دارند. در مطالعات آن‌ها، داده‌های پهپاد به‌عنوان بهترین جایگزین برای LiDAR در مناطق کوچک معرفی شدند، به‌خصوص وقتی که نیاز به تصمیم‌گیری سریع و دقیق وجود دارد.

ماهواره آلوس (ALOS) با تفکیک مکانی ۱۲/۵ متر به عنوان یکی از منابع رایگان DEM، به طور گسترده در شبیه‌سازی‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی به‌کار گرفته شده است. در مطالعات [۳] دقت داده‌های آلوس در مقایسه با منابع مرجع زمینی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که در مناطق با توپوگرافی ساده، خطایی بین دو تا ۳۸ درصد دارد، ولی در مناطق پیچیده‌تر مانند شهرها یا مناطق کوهستانی دقت آن کاهش می‌یابد. در مطالعه [۶] DEM‌های گرفته‌شده از پهپاد و چند ماهواره از جمله ALOS برای شبیه‌سازی سیلاب مقایسه شدند. نتایج نشان داد که مدل‌های ماهواره‌ای نسبت به پهپاد در برآورد زمان و شدت اوج جریان دارای خطای بیشتری هستند، به‌ویژه در مناطق دارای عوارض ساخت‌وساز. بایستی توجه داشت که هرچند دقت پهپاد نسبت به منابع ماهواره‌ای بیشتر است اما، استفاده از آن در مناطق وسیع و صعب‌العبور اگر غیرممکن نباشد اما بسیار پرهزینه و زمانبر خواهد بود. این در حالیست که دستیابی به داده‌های عوارض زمین با ماهواره آلوس رایگان و بدون محدودیت است.

یکی از رویکردهای جدید، ترکیب داده‌های پهپاد و آلوس برای دستیابی به تعادل بین دقت بالا و پوشش وسیع است. در پژوهش [۵] داده‌های پهپادی با استفاده از نقاط کنترل زمینی (GCPs) و LiDAR کالیبره شدند تا DEM دقیق‌تری حاصل شود. نتایج حاکی

1. Ground Control Points

از آن بود که این ترکیب می‌تواند در مطالعات محلی که نیاز به دقت بالا دارند، بسیار موثر واقع شود. در مطالعه‌ای دیگر، [۱۱] اثر تفکیک مکانی DEM در بازسازی کانال‌های رودخانه و الگوهای جریان را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که مدل‌های با وضوح کمتر، گرایش به هموارسازی عوارض زمین دارند که باعث کاهش دقت پیش‌بینی اوج سیلاب می‌شود.

مدل HEC-RAS به عنوان ابزار اصلی شبیه‌سازی هیدرولیکی دوبعدی در اغلب مطالعات معرفی شده است [۱] نشان دادند که این مدل قابلیت بالایی در تطبیق سرعت و عمق سیلاب در مناطق بدون داده اندازه‌گیری دارد. همچنین [۱۳] در بررسی DEM‌های ماهواره‌ای مختلف (ALOS, ²SRTM, ³ASTER) در مدل HEC-RAS، به این نتیجه رسیدند که ALOS در میان گزینه‌های رایگان، تعادل مناسبی بین دقت و پوشش ارائه می‌دهد.

مرور مطالعات به طور خلاصه نشان می‌دهد که داده‌های پهپاد دقت بالایی در بازسازی دقیق ناهمواری زمین، به‌ویژه در مناطق شهری دارند. داده‌های آلوس برای حوضه‌های وسیع و نسبتاً یکنواخت مناسب‌اند در میان گزینه‌های رایگان، تعادل مناسبی بین دقت و پوشش ارائه می‌دهد ترکیب این دو منبع، می‌تواند راه‌حل متعادلی برای بسیاری از پروژه‌ها باشد.

در نهایت، یافته‌های این مقاله می‌تواند راهنمایی عملی برای تصمیم‌گیرندگان و مهندسان منابع آب در انتخاب نوع داده مورد استفاده در شبیه‌سازی‌های سیلابی باشد. همچنین با توجه به رایگان بودن داده‌های آلوس، شناخت دامنه کاربرد و محدودیت‌های آن در پروژه‌های مختلف اهمیت فراوانی دارد.

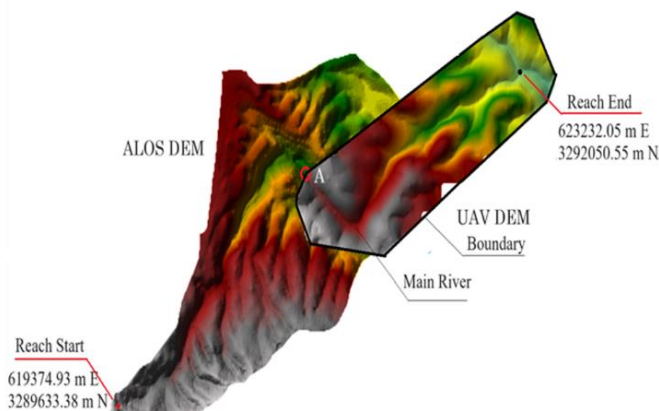
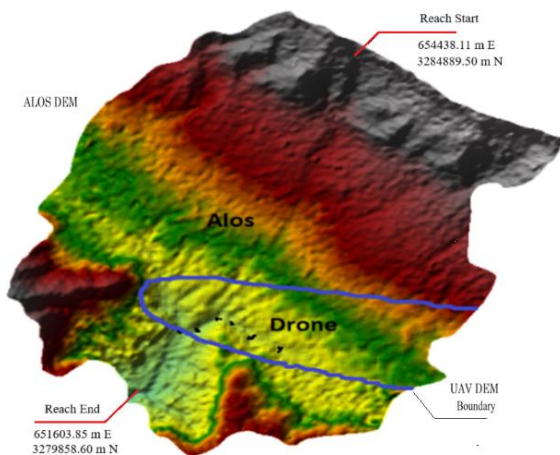
مواد و روش‌ها

در این پژوهش، به‌منظور ارزیابی عملکرد مدل‌های رقومی ارتفاعی با منشأ مختلف، دو حوضه‌ی آبریز با ویژگی‌های توپوگرافی و انسانی متفاوت و تا حدودی متضاد انتخاب شده‌اند. حوضه دروازه قرآن شیراز با سابقه تغییرات انسانی شدید و حوضه مارون در منطقه پسکوکهک، با پوشش طبیعی و کمترین تغییرات کاربری زمین. در ادامه به تفصیل بیشتری در مورد این دو حوضه بحث شده است.

معرفی حوضه‌های مورد مطالعه

حوضه دروازه قرآن شیراز به وسعت ۲۵/۶ کیلومتر مربع و با آبراهه فصلی که بخش کوچکی از حوضه آبریز مهارلو می‌باشد، در شمال شرقی کلان‌شهر شیراز واقع شده و در فروردین ۱۳۹۸ شاهد وقوع یک سیل ویرانگر بود که منجر به تلفات جانی و خسارات مالی سنگین شد. پس از این حادثه، شش سد تاخیری در حوضه احداث گردید. این حوضه به‌دلیل توسعه شهری، جاده‌سازی، خاک‌برداری و تغییرات زیرساختی، دستخوردگی شدید توپوگرافی را تجربه کرده

2. Shuttle Radar Topography Mission
3. Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer



مریعات خطا نیز انجام شد که در حوضه دروازه قرآن ۱۲/۱ و در حوضه مارون ۸/۱ متر بوده است. علت میزان این مقادیر خطا ریشه در تفکیک مکانی داده‌های مورد مقایسه (پهپاد و ماهواره) دارد که در مورد آن بحث خواهد شد.

برای شبیه‌سازی هیدرولیکی جریان، از نرم‌افزار HEC-RAS نسخه شش استفاده شد که مبتنی بر حل عددی معادلات آب کم‌عمق^۱ با روش حجم محدود است. در هر دو مطالعه، مدل‌ها به صورت دوبعدی با مش‌بندی مستقل برای هر DEM اجرا شدند. داده‌های ورودی به غیر از مدل‌های رقومی ارتفاعی ماهواره آلوس و پهپاد شامل هیدروگراف‌های جریان در حوضه دروازه قرآن و بارندگی در حوضه مارون است.

نتایج

الف) حوضه دروازه قرآن

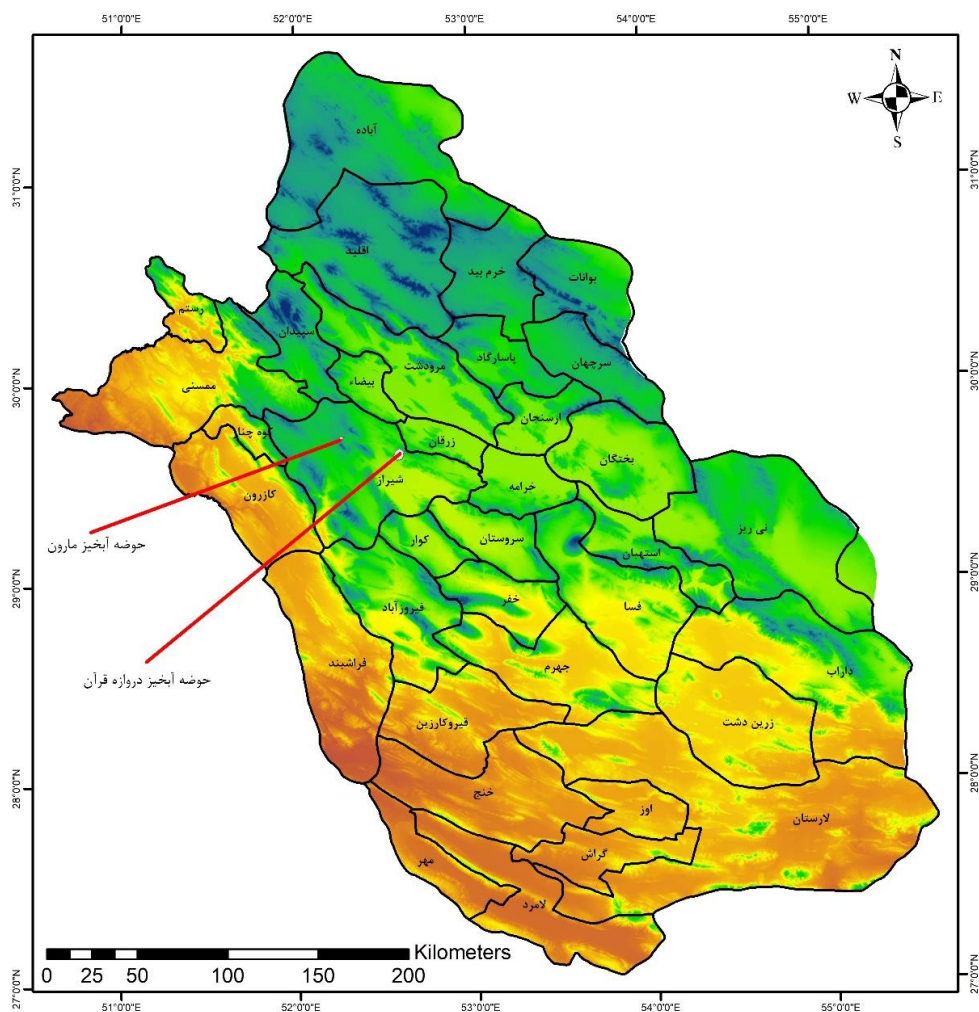
خروجی‌های مدل هیدرولیکی در مقطع‌های عرضی حوضه دروازه قرآن بررسی شد (شکل شماره سه). متغیرهای بررسی شده شامل تغییرپذیری‌های زمانی دبی و عمق جریان در این مقطع‌ها است. در شکل چهار شماری از نتایج و خروجی‌های شبیه‌سازی هیدرولیکی مشاهده شد. در این نمودارها WS نشان‌دهنده وجود سازه (شرایط پس از ساخت سازه) می‌باشد. همچنین عبارت whitout بیانگر شرایط پیش از احداث سازه است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود به طور کلی ساخت سازه‌های مهار سیلاب منجر به کاهش دبی اوج و همچنین ایجاد تاخیر زمانی در رویداد بیشینه سیلاب می‌شود. با توجه به شکل‌های بالا، میانگین ایجاد تاخیر در اوج سیلاب در مدل‌های آلوس و پهپاد به ترتیب ۱۸ و ۳۶ دقیقه است. بنابراین مدل رقومی ارتفاعی تهیه شده از داده‌های پهپاد تاخیر بیشتری در زمان اوج سیلاب را نسبت به مدل رقومی ارتفاعی ماهواره آلوس نشان می‌دهد. دلیل این موضوع را می‌توان

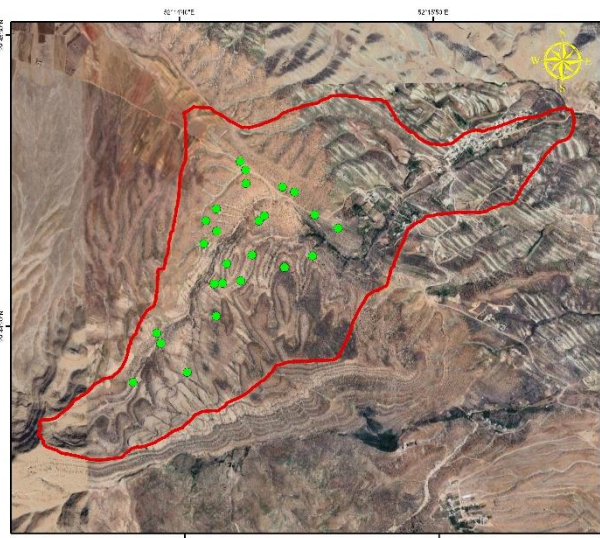
است [۱۸]. در مقابل، حوضه مارون در شمال غرب شیراز و در منطقه پسکوهک واقع شده و به مساحت حدود ۴/۳ کیلومتر مربع، با شیب ملایم، خاک لومی، و پوشش طبیعی شامل پسته‌ی کوهی و گیاهان مرتعی بوده و تغییرات شدید توپوگرافی را تجربه نکرده است. این منطقه توسعه شهری قابل توجهی نداشته و وضعیت زمین طی سال‌های اخیر پایدار باقی مانده است. در شکل شماره یک نمای کلی دو حوضه مورد بررسی و ناحیه برداشت به وسیله پهپاد نشان داده شده است.

در هر دو حوضه، از پهپاد مدل Phantom 4 Pro برای تهیه تصویرهای هوایی و تبدیل آن به مدل رقومی ارتفاعی استفاده شد. بدین منظور ابتدا با استفاده از سامانه شمیم در محدوده عملیاتی نقاط کنترل پیاده‌سازی شده و سپس با استفاده از GPS مولتی فرکانس متصل به سامانه شمیم مختصات آنها قرائت شد. پس از اتمام عملیات زمینی با استفاده از پهپاد و مشخصات ذکر شده عملیات تصویربرداری هوایی انجام شد. سپس تصاویر پهپاد تخلیه شده و میزان کیفیت و وضوح آن‌ها از نظر گرافیکی چک شد. پس از آن تصاویر به نرم افزار Agisoft metashape منتقل شد و ابتدا ابر نقاط تنک از تصاویر تهیه گردید. پس از آن ابر نقاط تنک با استفاده از نقاط کنترل زمینی زمین مرجع گردید و در نهایت به ترتیب محصولات زیر در نرم افزار تهیه گردید: ابر نقاط مترآکم، مدل رقومی ارتفاعی، اورتوموزاییک. داده‌های ماهواره‌ای از ALOS PALSAR با تفکیک مکانی ۱۲/۵ متر استفاده شد DEM های ماهواره‌ای برای هر منطقه جداگانه کالبره شدند و نقاط کنترلی مشترک با مدل پهپاد در نظر گرفته شد (شکل شماره دو) تا ارزیابی عملکرد با مرجع دقیق امکان‌پذیر گردد. پردازش داده‌ها منجر به تولید مدل‌های رقومی ارتفاعی با دقت مکانی پنج سانتی‌متر و دقت عمودی دو سانتی‌متر شد. داده‌های ماهواره آلوس با دقت مکانی ۱۲/۵ متر به کمک داده‌های پهپاد کالبره شد تا قابلیت مقایسه و اطمینان‌پذیری افزایش یابد. لازم به ذکر است که مقایسه مدل‌های رقومی ارتفاعی پهپاد و ماهواره آلوس از طریق محاسبه ریشه میانگین

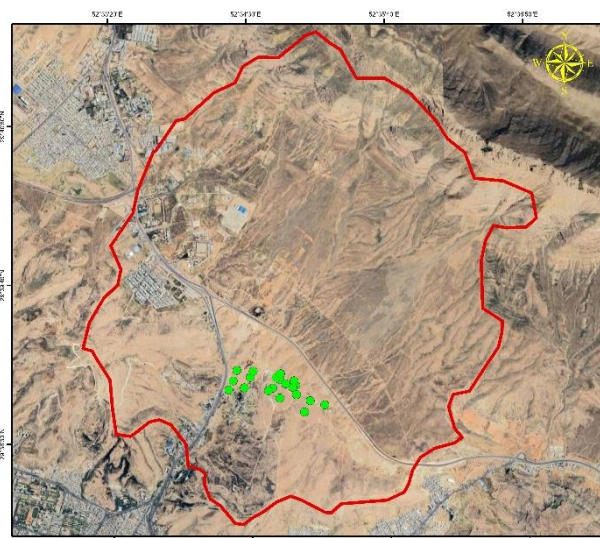
1. Shallow Water Equations



شکل ۱- نمای کلی حوضه آبریز مارون (سمت راست) و دروازه قرآن (سمت چپ) و محدوده های برداشت شده به وسیله پهپاد
Fig 1. Overview of the Maroon watershed (right) and the Darvazeh Quran watershed (left), along with the areas surveyed using UAV.

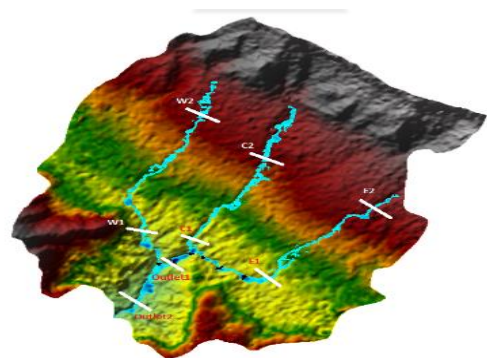


(ب)

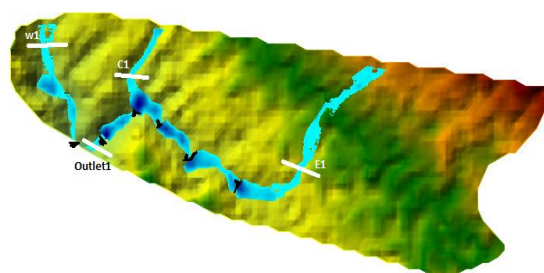


(الف)

شکل ۲- نقاط کنترلی مشترک ماهواره الوس و پهپاد در حوضه الف) دروازه قرآن ب) مارون
Fig 2. Common GCPs of the ALOS satellite and UAV in a) Darvazeh Quran b) Marun basins

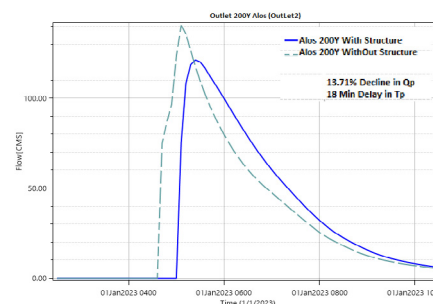
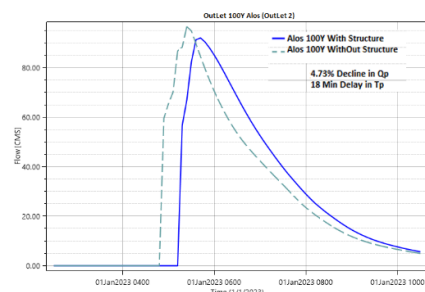


(ب)

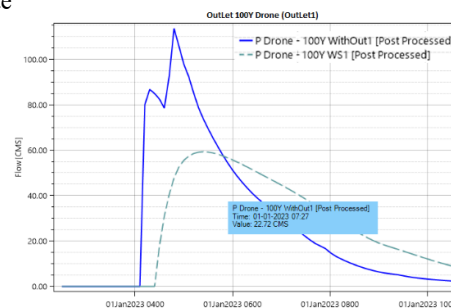
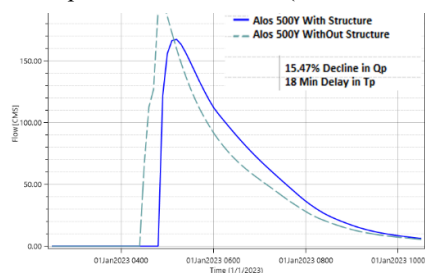


(الف)

شکل ۳- مدل رقومی ارتفاعی (الف) پهپاد و (ب) ماهواره آلوس و محل مقطع‌های عرضی استخراج اطلاعات
Fig 3. Digital Elevation Model (a) UAV-based and (b) ALOS satellite-based, along with the locations of the cross-sections used for data extraction.

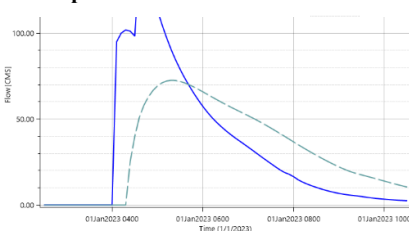


a) 100-years output of ALOS satellite (With Structure) b) 200-years output of ALOS satellite

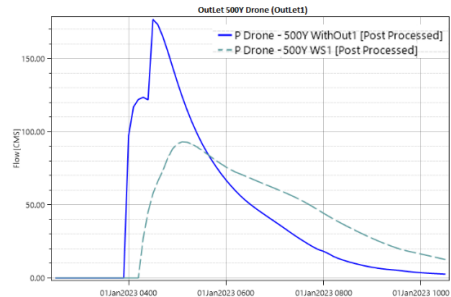


c) 500-years output of ALOS satellite

d) 100-years output of UAV



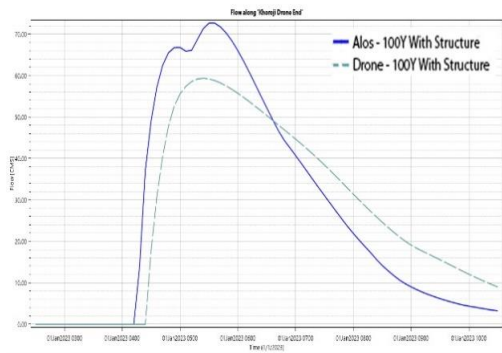
e) 200-years output of UAV



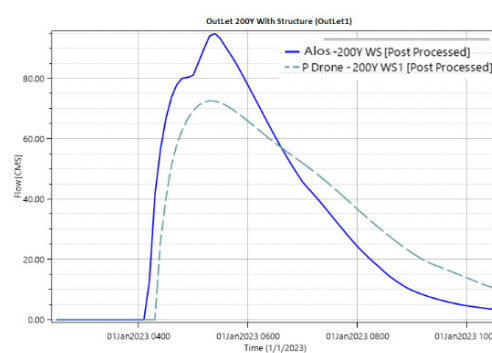
f) 500-years output of UAV

بود. طبیعی است که با توجه به نزدیک‌تر بودن مدل پهپاد به زمین واقعی نتایج آن نسبت به مدل آلوس دقیق‌تر خواهد بود و می‌تواند مبنای مقایسه قرار گیرد. به بیان دیگر خطای مدل آلوس در پیش‌بینی زمان طی سیلاب قابل ملاحظه و در حد دوبرابر مقدار واقعی آن برآورد می‌شود. در ارتباط با کاهش دبی اوج، می‌توان نتیجه گرفت

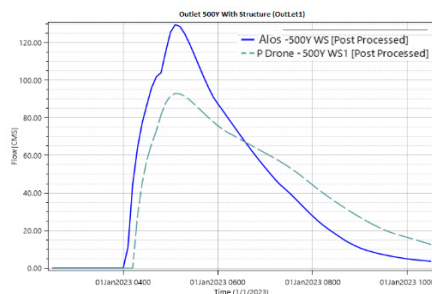
به جداسازی مکانی متفاوت دو مرجع بالا مرتبط دانست. جداسازی مکانی ماهواره آلوس ۱۲/۵ متر و تفکیک مکانی داده‌های پهپاد در حد ۴/۵ سانتی‌متر است. لذا با توجه به اینکه پستی و بلندی‌ها و عوارض طبیعی زمین در مدل پهپاد دقیق‌تر نشان داده شده، مدت زمانی که جریان آب در یک مسیر مشخص طی می‌کند بیشتر خواهد



g) Comparison of the 100-years output of ALOS and UAV with



h) Comparison of the 200-years output of ALOS and



i) Comparison of the 500-years output of ALOS and UAV

شکل ۴- مقایسه هیدروگراف‌های حاصل از مدل ماهواره آلوس و پهپاد

Fig 4. Comparison of hydrographs obtained from the ALOS satellite-based model and the UAV-based model.

منجر به نتایج دقیق‌تری می‌شود. نتایج این تحقیق می‌تواند در این بررسی نیز مد نظر قرار گیرد [۷]. به طور کلی بررسی‌های اخیر نشان می‌دهند که مدل‌های رقومی ارتفاعی مستخرج از پهپاد نتایج درستی برای مدل‌سازی هیدرولیکی در مقایسه با مدل‌های رقومی ارتفاعی مبتنی بر ماهواره ارائه می‌دهند. داده‌های پهپاد وضوح و دقت بسیار بالایی دارند و هزینه‌ها و زمان کمتری نسبت به LiDAR، ماهواره یا عملیات میدانی مثل GPS نیاز دارند [۲]. در مقایسه با مدل‌های رقومی ارتفاعی جهانی مانند ASTER، ALOS، SRTM و TanDEM-X، داده‌های پهپاد عملکرد بهتری در پیش‌بینی ویژگی‌های سیل دارند [۱۴]. حتی در محیط‌های چالش‌برانگیز گرمسیری، مدل‌های رقومی ارتفاعی مستخرج از پهپاد خطاهایی در محاسبه‌های عمق آب در محدوده‌های قابل قبول و قابل مقایسه با مدل‌های جانگاری با دقت بالا تولید می‌کنند [۹]. برای مدل‌سازی جریان‌های سطحی شهری، UAV-DEM نیز پهپادها به صورت رقابتی در برابر DEM‌های مبتنی بر لیدار سنتی عمل می‌کنند و ارتفاع پرواز به عنوان تأثیرگذارترین فراسنجه بر کیفیت مدل رقومی ارتفاعی شناخته می‌شود [۸]. هر چند پهپادها با محدودیت‌هایی از جمله مساحت برداشت کمتر و حساسیت بیشتر به عامل‌های آب و هوایی در مقایسه با داده‌های ماهواره ای روبرو هستند [۲۰، ۱۶].

که میانگین کاهش دبی اوج در مدل ماهواره آلوس و مدل پهپاد به ترتیب ۱/۳ درصد و ۴۷/۶ درصد است. به بیان دیگر، هر چند استفاده از داده‌های ماهواره آلوس روند تغییرپذیری‌های دبی اوج در اثر ایجاد سازه‌ها را درست پیش‌بینی می‌کند اما میزان کاهش دبی اوج در اثر اقدام‌های سازه‌ای را در حدود ۳۶ درصد کمتر پیش‌بینی می‌کند. به طور کلی نتایج نشان می‌دهد که هرچند با توجه به رایگان بودن داده‌های ماهواره آلوس می‌توان برای برآورد کلی سیلاب، مسیر سیلاب و تغییرپذیری‌های سیلاب در اثر ایجاد سازه‌ها از آن بهره گرفت اما پیش‌بینی زمان طی سیلاب به وسیله داده‌های این ماهواره همراه با خطاهای قابل توجهی بوده و پیش‌بینی افت نقطه اوج سیلاب دست‌کم با سی درصد خطا همراه است.

نتایج این پژوهش با پژوهش‌های [۴، ۲۱، ۲۳] نیز همخوانی دارد. آنان طی بررسی و ارزیابی‌های خود گزارش کردند که ساخت سازه‌های مهار سیل منجر به کاهش دبی اوج و ایجاد تاخیر در بیشینه سیلاب می‌شود. در یک پژوهش دیگر تأثیر ساخت سدهای مرتعی (سدهایی کوتاه و پراکنده که با هدف ذخیره آب باران از یکسو و آبیاری از سوی دیگر احداث و بهره‌برداری شوند) بررسی و ارزیابی شد و چگونگی مدل‌سازی هیدرولوژیکی و تأثیر ۱۴ درصدی آن‌ها در مهار سیلاب گزارش شد [۱۲]. در پژوهش دیگری که در مورد مقایسه مدل رقومی ارتفاعی مستخرج از پهپاد و چندین ماهواره مختلف انجام شد، نتایج نشان داد که شبیه‌سازی سیلاب با داده‌های پهپاد

در این مطالعه، بارش به عنوان شرط مرزی در نظر گرفته شد که رویکردی نوین در مقایسه با روش‌های متداول مبتنی بر دبی است. کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل بر اساس هیدروگراف‌های مشاهده‌ای انجام گرفت و ضریب زبری مانینگ برای دستیابی به دقت بالاتر بهینه شد. برای حفظ تعادل بین دقت نتایج و کارایی محاسباتی، اندازه شبکه مدل‌سازی با دقت انتخاب شد. برای مدل رقومی ارتفاعی پهپاد، از شبکه 2×2 متر و برای مدل آلود، از شبکه 5×5 متر استفاده شد. رودخانه مارون بر خلاف رودخانه دروازه قرآن دارای ایستگاه هیدرومتری بوده که می‌تواند به عنوان معیاری جهت مقایسه پاسخ دو روش مورد استفاده قرار گیرد. در شکل شماره پنج، نتایج شبیه سازی عددی هر دو مدل رقومی ارتفاعی در وقایع مختلف بارندگی با داده های مشاهده شده در ایستگاه هیدرومتری مورد مقایسه قرار گرفته است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، شکل کلی هیدروگراف‌ها با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی شده است. وجود ایستگاه اندازه‌گیری دبی در خروجی حوضه و داده‌های بارش ثبت‌شده در داخل حوضه، نقش مؤثری در بازسازی دقیق شکل هیدروگراف داشته‌اند. تطابق مناسب بین شاخه‌های صعودی و نزولی هیدروگراف در مقایسه با نقطه اوج آن، قابل توجه است. به عبارت دیگر، دقت شبیه‌سازی با استفاده از هر دو منبع عمق‌سنجی، در دبی‌های کمتر نسبت به دبی اوج، بالاتر بوده است. این نتایج بر اهمیت جمع‌آوری داده‌های جامع در سطح حوضه تأکید دارد که منجر به افزایش دقت شبیه‌سازی‌های هیدرولیکی می‌شود. بازنمایی دقیق شکل هیدروگراف، به‌ویژه در دبی‌های پایین، نشان‌دهنده کالیبراسیون مناسب مدل‌ها و توانایی آن‌ها در بازتاب پویایی‌های اصلی پاسخ حوضه به رویدادهای بارندگی است. در نتیجه، تطابق بالای این شبیه‌سازی‌ها می‌تواند به‌طور چشمگیری در بهبود پیش‌بینی سیلاب و مدیریت منابع آب در منطقه مؤثر واقع شده و کارایی تلفیق داده‌های دقیق هیدرومتری و بارش را در مدل‌سازی‌های هیدرولیکی به‌خوبی نشان دهد.

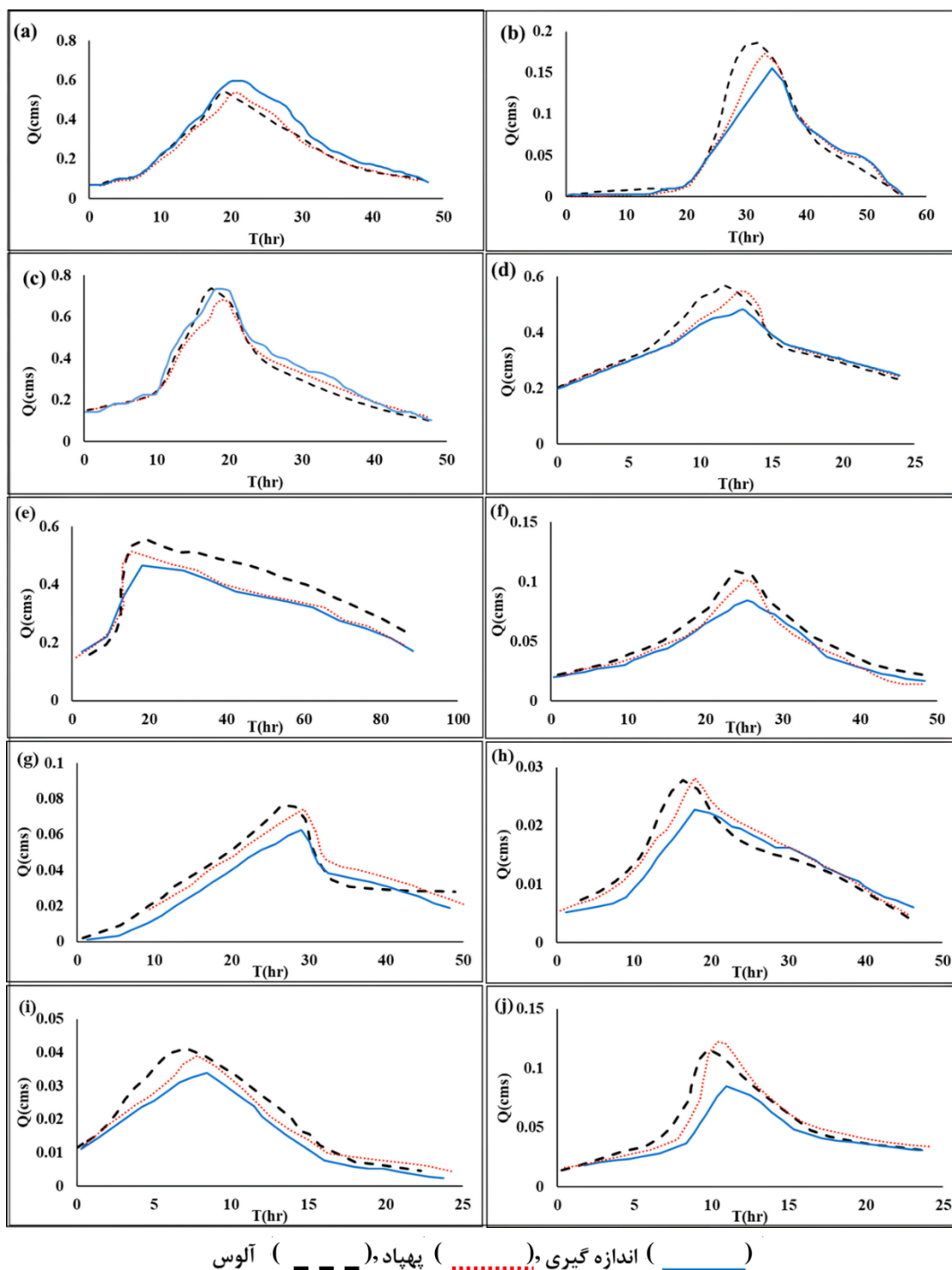
شایان ذکر است که دبی‌های اوج پیش‌بینی شده توسط مدل‌های ALOS و UAV به یکدیگر نزدیک هستند. یکی از دلایل این امر می‌تواند ورودی شرایط مرزی معرفی شده از مدل ALOS به مدل UAV باشد. به عبارت دیگر، مدل هیدروگراف UAV، هیدروگراف مدل ALOS را به عنوان ورودی بالادستی خود پذیرفته و مسیر آن را در امتداد رودخانه شبیه‌سازی کرده است. بنابراین، مقادیر حداکثر جریان پیش‌بینی شده هر دو مدل به هم نزدیک هستند. با این حال، همان‌طور که مشاهده می‌شود، زمان رسیدن به دبی اوج در مدل UAV به‌طور مداوم دیرتر از مدل ALOS است. دلیل این امر را می‌توان به تفاوت وضوح مکانی بین مدل رقومی ارتفاع (DEM) مشتق شده از ALOS و DEM مشتق شده از UAV نسبت داد. وضوح مکانی داده‌های ماهواره‌ای ALOS برابر $12/5$ متر است، در حالی که داده‌های UAV وضوح مکانی در محدوده چند سانتی‌متر دارند. به

بیان دیگر، پهنه‌بندی توپوگرافی یا عمق‌سنجی در مدل ALOS در نقاطی با فاصله $12/5$ متری از هم درون‌یابی می‌شود، حال آنکه در مدل UAV این درون‌یابی در نقاطی با فاصله تنها چند میلی‌متر یا سانتی‌متر انجام می‌شود. این وضوح بالاتر در مدل‌های مبتنی بر UAV امکان شناسایی دقیق‌تر جزئیات توپوگرافی زیرین شامل کانال‌ها، پیچان‌رودها، یال‌ها، شبکه‌های زهکشی ریزمقیاس و موانع را فراهم می‌کند. در نتیجه، نمایش مسیر آب و زهکشی طبیعی بهبود یافته، که منجر به افزایش تمرکز رواناب در کانال اصلی و زمان بیشتر تا رسیدن به دبی اوج می‌شود. در مقابل، DEM‌های ماهواره‌ای وضوح کمتری دارند که قادر به ثبت این ویژگی‌های ظریف نبوده و عموماً مسیر را بیش‌ازحد ساده‌سازی می‌کنند؛ این امر موجب کاهش تمرکز رواناب و زمان کوتاه‌تر تا رسیدن به اوج می‌گردد. افزون بر این، DEM‌های UAV در مقایسه با DEM‌های ماهواره‌ای از دقت عمودی بالاتری اطمینان می‌دهند. عدم قطعیت در داده‌های ارتفاعی باعث تغییر سرعت جریان و ایجاد نگهداشت مصنوعی آب می‌شود که به زمان کوتاه‌تر تا رسیدن به اوج کمک می‌کنند [۱۰، ۲۲، ۲۴].

به‌منظور ارزیابی دقت مدل‌های مبتنی بر داده‌های پهپاد (UAV) و تصاویر ماهواره‌ای ALOS در شبیه‌سازی جریان سیلاب، از سه شاخص آماری شامل شاخص کارایی نش-سانتلیف (NSE)^۱، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)^۲ و میانگین خطای مطلق (MAE)^۳ استفاده شد. نتایج که در جدول یک نمایش داده شده، نشان داد که مقادیر میانگین NSE برای مدل‌های UAV و ALOS به ترتیب برابر با 0.48 و 0.49 است که بیانگر عملکرد ضعیف‌تر مدل ماهواره‌ای در بازتولید دقیق تغییرات مشاهده‌شده جریان می‌باشد. مقادیر RMSE و MAE برای مدل UAV به ترتیب برابر با 0.28 و 0.22 ، و برای مدل ALOS برابر با 0.43 و 0.36 به دست آمد. با توجه به این که مقادیر کمتر این شاخص‌ها بیانگر دقت بالاتر مدل هستند، می‌توان نتیجه گرفت که مدل مبتنی بر داده‌های پهپاد عملکرد مطلوب‌تری در شبیه‌سازی شدت و دامنه تغییرات دبی سیلاب دارد. به‌طور کلی، نتایج نشان دادند که هرچند نتایج به یکدیگر نزدیک هستند اما داده‌های استخراج‌شده از پهپاد نسبت به داده‌های ماهواره ALOS در برآورد پارامترهای هیدرولوژیکی سیلاب از دقت بالاتری برخوردارند. این امر ناشی از تفکیک مکانی بالاتر داده‌های UAV و توانایی آن در نمایش بهتر ناهمگنی‌های سطح زمین و الگوهای ریزمقیاس جریان سطحی است.

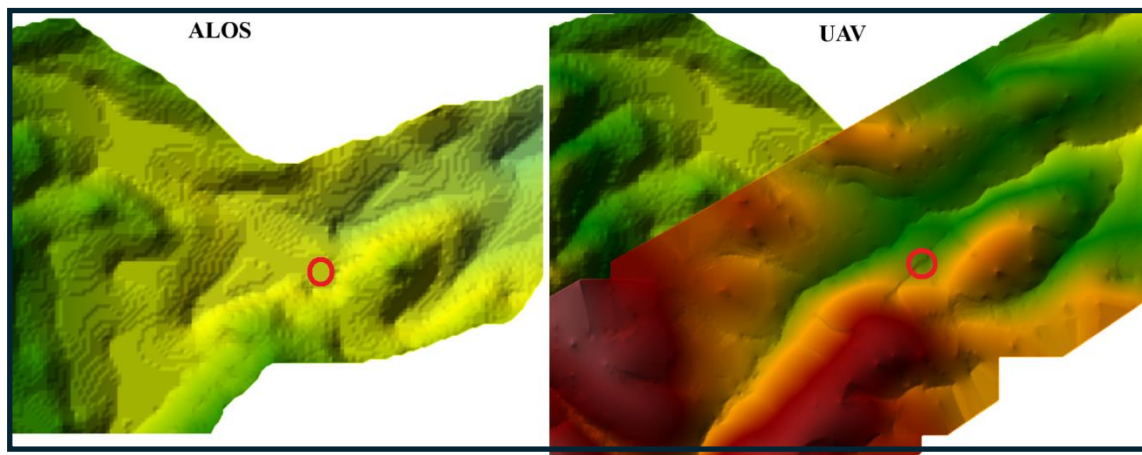
شکل شش بخش مشترکی از مسیر تخمین‌زده‌شده توسط هر دو منبع UAV و ALOS را نشان می‌دهد. در نتیجه، زمان انتقال سیلاب در مدل UAV نسبت به مدل ALOS طولانی‌تر و نزدیک‌تر به شرایط واقعی انتظار می‌رود. با بررسی این شکل، آشکار است

1. Nash-Sutcliffe Efficiency
2. Root Mean Square Error
3. Mean Absolute Error



شکل ۵- مقایسه هیدروگراف‌های پیش‌بینی‌شده بر اساس بائیمتری‌های تولیدشده توسط ALOS و پهپاد: (الف) آذر ۱۳۹۱، (ب) دی ۱۳۹۱، (پ) دی ۱۳۹۴، (ت) بهمن ۱۳۹۵، (ث) بهمن ۱۳۹۵، (ج) فروردین ۱۳۹۶، (چ) آذر ۱۳۹۶، (ح) اسفند ۱۳۹۶، (خ) اردیبهشت ۱۳۹۷، (د) بهمن ۱۳۹۷

Fig 5. Comparison of predicted hydrographs based on bathymetries generated by ALOS and UAV: (a) December 2012, (b) January 2013, (c) January 2016, (d) February 2017, (e) February 2017, (f) April 2017, (g) December 2017, (h) March 2018, (i) May 2018, (j) February 2019.



شکل ۶- بخش مشترک پهنه‌بندی عمق‌سنجی تولیدشده توسط ALOS و UAV (دایره قرمز رنگ یک نقطه واحد را نشان می‌دهد)
Fig 6. Overlapping section of the bathymetric mapping generated by ALOS and UAV (The red circle indicate a single point)

جدول ۱- ارزیابی عملکرد مدل‌های UAV و ALOS بر اساس شاخص‌های آماری

Table 1. Performance Evaluation of UAV and ALOS Models Based on Statistical Indicators

زیر شکل Sub-plot	پهپاد UAV			آلوس ALOS		
	شاخص کارایی نش ساتکلیف NSE	ریشه میانگین مربعات خطا RSME	میانگین خطای مطلق	شاخص کارایی نش ساتکلیف NSE	ریشه میانگین مربعات خطا RSME	میانگین خطای مطلق
(a)	-1.87	0.26	0.20	-6.59	0.42	0.35
(b)	0.36	0.30	0.16	-0.83	0.50	0.41
(c)	0.24	0.22	0.16	-1.38	0.39	0.31
(d)	-3.02	0.38	0.33	-9.98	0.63	0.56
(e)	-0.59	0.20	0.14	-5.90	0.41	0.35
(f)	-0.99	0.28	0.22	-3.90	0.44	0.36
(g)	-0.40	0.27	0.21	-1.70	0.37	0.31
(h)	-0.81	0.32	0.29	-1.70	0.39	0.32
(i)	-0.37	0.29	0.23	-0.87	0.34	0.29
(j)	-7.33	0.28	0.22	-16.56	0.41	0.33
میانگین Mean	-7.33	0.28	0.22	-4.94	0.43	0.36

جزئی‌تری از رویداد سیل ارائه دهند. در مطالعه حاضر، خروجی‌ها در فواصل شش دقیقه‌ای ثبت شدند که امکان نمایش با وضوح بالاتر در نمودار اوج را فراهم می‌کند. این وضوح زمانی بالاتر به مدل اجازه می‌دهد تغییرات سریع نرخ جریان در اوج سیلاب را ثبت کند که اغلب در داده‌های مشاهداتی به دلیل بازه‌های زمانی درشت‌تر از دست می‌روند. نتیجه، هیدروگرافی دقیق‌تر و پرجزئیات‌تر است که پویایی رویداد سیل را بهتر نمایش می‌دهد.

قابلیت تنظیم بازه‌های زمانی در مدل‌های عددی یک امتیاز کلیدی است که به محققان امکان می‌دهد لحظات بحرانی سیل را با دقت بالاتر ثبت و تحلیل کنند. این دقت بهبودیافته به‌ویژه برای مدیریت و کاهش خطر سیل حیاتی است زیرا داده‌های

که توپوگرافی عرصه در مدل UAV دقیق‌تر و نزدیک‌تر به واقعیت می‌باشد. وضوح مکانی بالاتر مدل UAV امکان نمایش دقیق‌تر ویژگی‌های عرصه را فراهم می‌کند که دقت شبیه‌سازی‌های هیدرولیکی را به‌طور معناداری افزایش می‌دهد. در مورد نقاط اوج هیدروگراف‌ها، لازم به ذکر است که داده‌های سیلاب ثبت‌شده در ایستگاه اندازه‌گیری جریان در بازه‌های زمانی ساعتی ضبط شده‌اند. در نتیجه، در بسیاری موارد، نقطه اوج به صورت تخت نمایش داده می‌شود زیرا اوج واقعی سیل در بازه‌های زمانی ثبت‌نشده رخ داده و تنها ساعات قبل و بعد آن ثبت گردیده است. این محدودیت در تضاد با هیدروگراف‌های شبیه‌سازی‌شده در مدل عددی است که در آن بازه‌های زمانی قابل تنظیم‌اند تا نمایش

قابل اتکاتری برای فرآیندهای تصمیم‌گیری فراهم می‌کند. هیدروگراف‌های دقیق تولیدشده توسط مدل UAV می‌تواند به درک جامع‌تر رفتار سیلاب کمک کند که منجر به راهبردهای آگاهانه‌تر برای پیشگیری و کنترل سیل می‌گردد. مقایسه میان هیدروگراف‌های پلکانی مشاهداتی و هیدروگراف‌های پرجزئیات شبیه‌سازی‌شده، اهمیت استفاده از داده‌های با وضوح بالا و بازه‌های زمانی مناسب در مدل‌سازی هیدرولیکی را برجسته می‌سازد. این رویه اطمینان می‌دهد که دبی‌های اوج و دیگر جنبه‌های بحرانی رویداد سیل به‌درستی نمایش داده شوند که در نهایت به الگوهای مؤثرتر مدیریت سیل می‌انجامد. با این حال، شایان توجه است که داده‌های ALOS، علیرغم منبع رایگان بودن، همچنان برای پیش‌بینی دبی اوج مفیدند، گرچه تمایل به کم‌نمایی زمان رسیدن به اوج دارند.

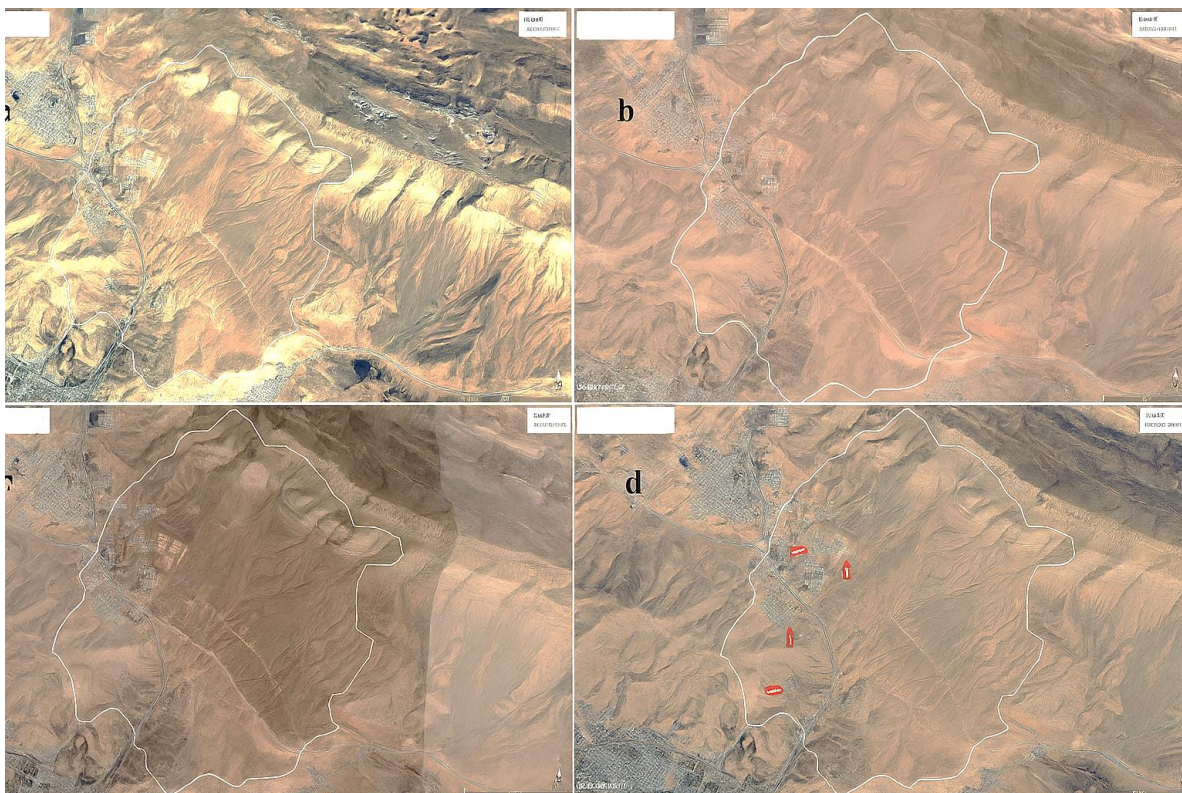
بحث و نتیجه‌گیری

هدف اصلی این بخش، تحلیل نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی سیلاب با استفاده از مدل‌های رقومی ارتفاعی پهباد و ماهواره ALOS در دو حوضه با ویژگی‌های متفاوت است. وجود برتری آشکار داده‌های پهبادی، محدودیت‌هایی همچون هزینه بالا، نیاز به تیم متخصص، محدودیت جغرافیایی و شرایط آب‌وهوایی برای پرواز، مانعی در استفاده گسترده از آن‌هاست. در این میان، داده‌های آلوس به‌عنوان یک منبع رایگان و در دسترس، در حوضه‌های باثبات و بزرگ مقیاس می‌توانند گزینه‌ای مقرون به‌صرفه باشند. از این رو، استفاده از هر دو منبع داده‌های پهباد و ماهواره در فرآیند مدل‌سازی به‌عنوان رویکردی متوازن مطرح می‌شود؛ به‌ویژه زمانی که لازم است دقت در نواحی کلیدی حفظ شده ولی پوشش مکانی نیز وسیع باشد. جدای از بحث تفاوت دقت مکانی داده‌های ماهواره و پهباد، موضوع تاریخ داده‌برداری نیز حائز اهمیت است. در استفاده از پهباد، برداشت داده‌های به‌روز میسر بوده در حالیکه آخرین داده‌های ماهواره آلوس مربوط به سال ۲۰۱۱ می‌باشد و همین موضوع علت اختلاف نتایج در دو حوضه مارون و دروازه قرآن را توضیح می‌دهد. به عبارتی هرچه میزان تغییرات توپوگرافی و دستخوردگی عوارض و توسعه شهری در منطقه‌ای بیشتر باشد، اختلاف نتایج پهباد و ماهواره آلوس بیشتر خواهد شد. حوضه دروازه قرآن مثالی از این دست مناطق است (شکل هفت) در این حالت بدیهی است که نتایج پهباد از دقت بیشتری برخوردار است. این در حالی است که در مناطقی که نسبتاً بکر باقی مانده اند و دچار کمینه دستخوردگی بوده‌اند، نتایج آلوس همچنان کاربردی و قابل اعتماد است. حوضه آبریز مارون مثالی از این دست مناطق با دستخوردگی کم است (شکل هشت). لذا در انتخاب منبع داده‌های زمینی توجه به این موضوع از اهمیت بیشتری برخوردار است.

لازم به ذکر است که تفاوت رنگ در تصاویر مختلف ناشی از شرایط نوری (فصل، زاویه تابش، ...) و جوی (ابر، گرد و غبار، ...) متفاوت است. همچنین تصاویر ممکن است از ماهواره‌های مختلف گرفته شده باشند که هریک ویژگی‌های متفاوتی از نظر

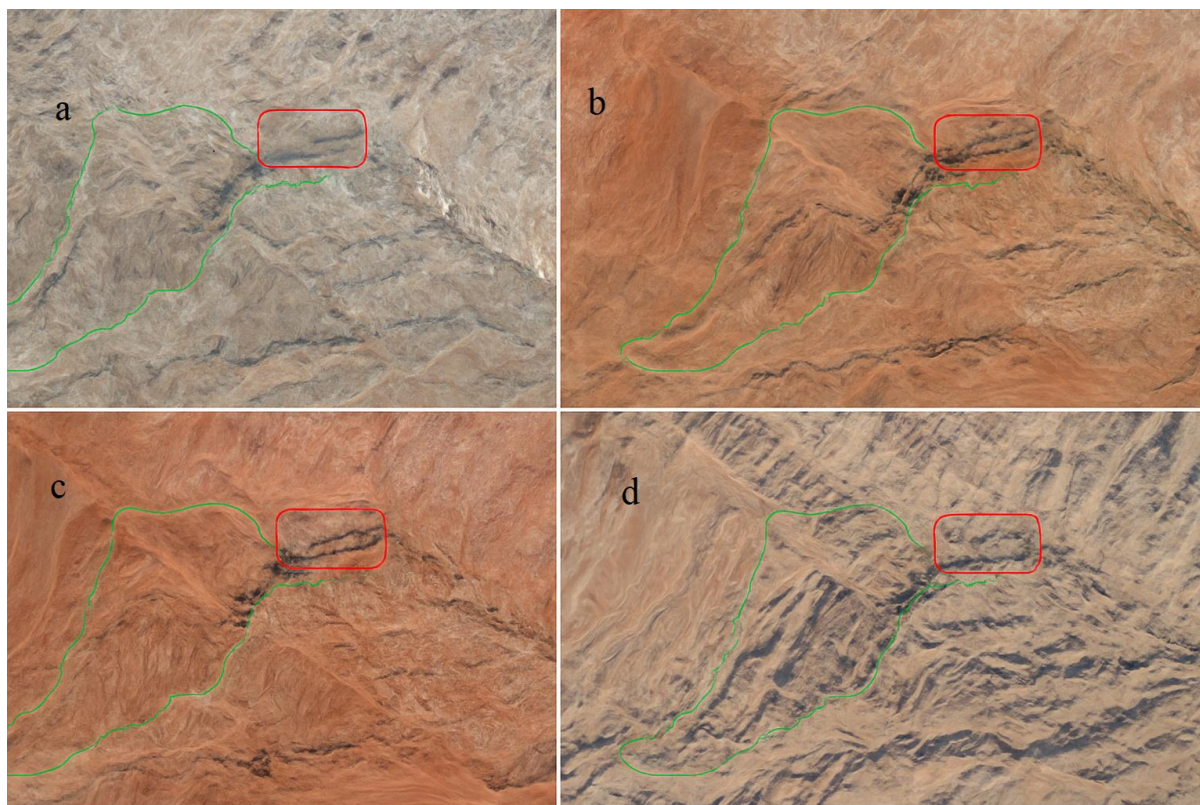
دقت مکانی، طیف نوری یا پردازش رنگ دارند. لذا نباید به عنوان ملاک تغییرات قرار گیرند. با اغماض از تفاوت رنگ، همانطور که دیده می‌شود، در حوضه آبریز مارون، مناطق شهری در طی ۲۲ سال محدود به کادر قرمز رنگ بوده و توسعه و دستخوردگی اراضی آنچنان قابل ملاحظه نیست. اما در حوضه آبریز دروازه قرآن، توسعه مناطق شهری، افزایش سطح نفوذناپذیر و دستخوردگی اراضی قابل ملاحظه بوده و تعدادی از آن‌ها با فلش‌های قرمز رنگ در تصویر d نمایش داده شده است. آنچه بیشترین تغییرات در توپوگرافی را ایجاد نموده توسعه مناطق مسکونی و دخالت انسانی بوده است. همانطور که قبلاً نیز اشاره شد در سال‌های اخیر شش سد سنگ و سیمانی نیز در حوضه ایجاد شده که ساخت آن‌ها مستلزم تغییرات توپوگرافی در بالادست و پایین دست این سازه‌ها بوده است. ضمن اینکه خود سدها به طور ذاتی تغییراتی در بستر و توپوگرافی آبراهه تحمیل می‌کنند. این در حالی است که در حوضه آبریز مارون جدای از عدم توسعه شهری، سدها و سازه‌های هیدرولیکی نیز در حوضه ساخته نشده‌اند که این موضوع نیز در عدم ایجاد تغییرات در حوضه موثر بوده است.

یکی دیگر از عوامل مؤثر، وضوح مکانی DEM است. مدل‌های پهبادی با تفکیک چند سانتی‌متری توانسته‌اند ویژگی‌های دقیق زمین از جمله جدول‌ها، کانال‌ها، شیب‌های جزئی و پیچ‌وخم‌های کانال را به‌درستی نمایش دهند. در مقابل، مدل ALOS با تفکیک ۱۲/۵ متر، بسیاری از این ویژگی‌ها را هموارسازی کرده و بدین ترتیب منجر به کاهش دقت در تخمین دبی اوج و زمان رسیدن به اوج شده است. این مسأله به‌ویژه در حوضه دروازه قرآن نمود بیشتری دارد، جایی که تراکم سازه‌ها و جزئیات زیرساختی در مقیاس کمتر از ۱۰ متر است. نوع شرایط مرزی نیز بر نتایج نهایی مؤثر بوده است. در مارون از بارش به‌عنوان شرط مرزی مستقیم استفاده شده که منجر به دینامیک طبیعی‌تر و واقعی‌تر جریان شده است. در مقابل، در دروازه قرآن، جریان ورودی به مدل UAV از خروجی مدل ALOS تأمین شده که خود موجب تأخیر زمانی و خطای تجمعی در شبیه‌سازی مدل پهباد شده است. با وجود برتری آشکار داده‌های پهبادی، محدودیت‌هایی همچون هزینه بالا، نیاز به تیم متخصص، محدودیت جغرافیایی و شرایط آب‌وهوایی برای پرواز، مانعی در استفاده گسترده از آن‌هاست. در این میان، داده‌های آلوس به‌عنوان یک منبع رایگان و در دسترس، در حوضه‌های باثبات و بزرگ مقیاس می‌توانند گزینه‌ای مقرون به‌صرفه باشند. به عنوان پیشنهاد، به کارگیری همزمان داده‌های پهباد و ماهواره در فرآیند مدل‌سازی به‌عنوان رویکردی متوازن مطرح می‌شود؛ به‌ویژه در مناطق کمتر دست‌خورده و زمانی که لازم باشد دقت در نواحی کلیدی حفظ شده ولی پوشش مکانی نیز وسیع باشد. همچنین بایستی توجه داشت که بخشی از اختلاف نتایج میان مدل پهباد و ماهواره آلوس می‌تواند ناشی از تفاوت در شرایط مرزی و رزولوشن شبکه باشد. به‌طور کلی، مدل‌های رقومی ارتفاعی پهباد در مقایسه با داده‌های



شکل ۷- حوضه دروازه قرآن در گذر زمان: a)2003, b)2011, c)2016, d)2024

Fig 7. The Darvazeh Quran watershed over time: (a) 2003, (b) 2011, (c) 2016, (d) 2024.



شکل ۸- حوضه آبریز مارون در گذر زمان: a) 2002, b) 2010, c) 2016, d) 2024. کادر قرمز رنگ محدوده پایدار مسکونی را نشان می دهد

Fig 8. The Maroon watershed over time: (a) 2002, (b) 2010, (c) 2016, (d) 2024. The red box indicates the stable residential area.

فارس جهت تامین تجهیزات نقشه برداری هوایی سپاسگزاری می‌شود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچگونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

مسبح ذوالقدر: راهنمایی، مفهوم سازی، کنترل نتایج، نگارش نسخه اولیه، ویرایش و بازبینی مقاله، مهدی سهرابی: انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری حوضه دروازه قرآن، فاطمه روستاپور: انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری حوضه مارون، محمدرضا کارگر: مشاوره، نقشه‌برداری هوایی، کنترل نتایج، بازبینی متن مقاله

منابع مورد استفاده

- 1- Al-Hosseini, S. A., Al-Salman, A. and Hadi, R. M. 2022. Flood risk assessment using HEC-RAS and HEC-GeoRAS in Iraq's Khazir River Basin. *Arabian Journal of Geosciences*. 15: 117. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-09432-z>.
- 2- Annis, A., Nardi, F. and Petroselli, A. 2020. Flood hazard mapping by means of geomorphic methods: An application in ungauged basins. *Journal of Hydrology*, 582: 124435. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124435>
- 3- Azizian, A., & Brocca, L. (2019). Determining the best remotely sensed DEM for flood inundation mapping in data sparse regions. *International Journal of Remote Sensing*, 41(5), 1884–1906. <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1677968> Callow, J. N. and Smettem, K. R. J. 2009. The effect of farm dams and constructed banks on hydrologic connectivity and runoff estimation in agricultural landscapes. *Environmental Modelling & Software*. 24(8): 959-968.
- 4- Escobar V., M. A., Rosas, C. C., and Peña, R. R. 2019. UAV-derived DEMs for flood modeling: Comparison with LiDAR and implications. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 13: 152–162. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2018.11.001>.
- 5- Iqbal, A., Mondal, M. S., Veerbeek, W., Khan, M. S. A. and Hakvoort, H. 2023. Effectiveness of UAV-based DTM and satellite-based DEMs for local-level flood modeling in Jamuna floodplain.

آلوس عملکرد برتری در پیش‌بینی پارامترهای هیدرولیکی ارائه می‌دهند؛ به‌گونه‌ای که با وضوح زمانی و مکانی بالاتر، قادر به نمایش دقیق‌تری از پویایی سیلاب، خصوصاً در جریان‌های اوج هستند و عمق‌های حداکثری کمتر و حاشیه خطای کاهش‌یافته‌تری را به‌دست می‌دهند. با این حال، ادغام داده‌های پهپاد و ماهواره‌ای می‌تواند رویکردی متوازن برای دستیابی هم‌زمان به دقت و مقیاس‌پذیری در مدل‌سازی هیدرولیکی فراهم کند.

در حوضه دروازه قرآن، نتایج نشان می‌دهد که ساخت سازه‌ها نقش مهمی در مهار سیلاب داشته و از طریق کاهش دبی اوج و به‌تویق انداختن زمان وقوع آن، شرایط را به‌طور چشمگیری بهبود داده است؛ به‌طوری‌که دبی اوج به‌طور میانگین ۴۷ درصد کمتر از دوره پیش از ساخت سازه‌ها بوده و زمان وقوع دبی اوج نیز حدود ۳۶ دقیقه به تأخیر افتاده است. علاوه بر این، به دلیل دستخوردگی زیاد منطقه، دقت مدل آلوس در برآورد زمان طی سیلاب پایین بوده و مدت زمان شبیه‌سازی‌شده در آن تقریباً دو برابر مدل مبتنی بر داده‌های پهپاد است؛ ضمن اینکه در برآورد کاهش دبی اوج نیز حداقل ۳۰ درصد خطا همراه است. در مقابل، استفاده از بارش به‌عنوان شرط مرزی می‌تواند موجب ساده‌سازی فرآیند مدل‌سازی هیدرولیکی شود، زیرا نیاز به انجام مطالعات مستقل هیدرولوژیکی را کاهش می‌دهد.

با وجود برتری پهپاد در محیط‌های پیچیده و متحول، بررسی‌ها نشان می‌دهد که در حوضه‌هایی با ثبات توپوگرافی و بدون تغییرات انسانی اخیر، داده‌های آلوس همچنان عملکرد قابل‌قبولی دارند و می‌توانند گزینه‌ای اقتصادی و مناسب برای پروژه‌های کم‌هزینه باشند. نمونه بارز آن حوضه مارون است که در آن، به دلیل دستخوردگی اندک، مدل‌های مبتنی بر آلوس—با وجود وضوح مکانی پایین‌تر—توانایی پیش‌بینی دقیق دبی اوج را داشته و کارآمدی لازم را نشان داده‌اند. با این حال، در مناطق شهری، متراکم و دستخورده، به‌روز نبودن و دقت مکانی پایین داده‌های آلوس منجر به بروز خطاهای قابل‌توجه در شبیه‌سازی هیدرولیکی شده و کارایی آنها را در چنین محیط‌هایی محدود می‌کند.

این پژوهش مسیر پیشرفت‌های آینده در مدل‌سازی هیدرولیکی را هموار می‌کند و بر ضرورت روش‌های نوین کسب داده و روش‌های محاسباتی پیشرفته تأکید دارد. پیشنهادها شامل به‌کارگیری حسگرهای پهپادی پیشرفته، استفاده از چندین پهپاد برای پوشش وسیع‌تر و بهره‌گیری از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای تسهیل پردازش داده و بهبود دقت پیش‌بینی است. با پرداختن به محدودیت‌های داده‌های پهپاد و ماهواره، این مطالعه مسیر بهینه‌سازی شبیه‌سازی‌های هیدرولیکی را ترسیم کرده و به مدیریت مؤثرتر ریسک سیلاب و تصمیم‌گیری‌های بهتر کمک می‌کند.

سپاسگزاری

از همکاری و مساعدت شرکت فناوری پایشگران فراسنجش طبیعت

- 16- Rudd, J. D., Roberson, G. T. and Classen, J. J. 2017. Application of satellite, unmanned aircraft system, and ground-based sensor data for precision agriculture: A review. In Proceedings of International Structural Engineering and Construction. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:135160271>.
- 17- Zolghadr M., Fathi, A., Rustapour F., Kargar M.R. 2025. Bridging Satellite and UAV Technologies for High-Resolution Hydraulic Simulations: A Case Study in Iran's Marun, Journal of Water and Soil Conservation. 32(1): 129-151, doi: 10.22069/jwsc.2025.23131.3779.
- 18- Sohrabi, M. 2024. Two-dimensional simulation of flood for investigating the effect of check dams on flow hydraulic properties (Case study: Darvaze Quran Basin, Shiraz, Fars), MSc Thesis, Jahrom University, Jahrom, Fars, Iarn.
- 19- Trepekli, M., Opoku, S. K. and Agyemang, K. 2022. UAV LiDAR for urban flood modeling in Accra, Ghana: A resolution-based comparison. ISPRS International Journal of Geo-Information, 11(3): 125. <https://doi.org/10.3390/ijgi11030125>.
- 20- Villa, T. F., Gonzalez, F., Miljevic, B., Ristovski, Z. D. and Morawska, L. 2016. An overview of small unmanned aerial vehicles for air quality measurements: Present applications and future prospectives. Sensors, 16(7),1072. <https://doi.org/10.3390/s16071072>
- 21- Xia, J., Chen, J. 2021. A new era of flood control strategies from the perspective of managing the 2020 Yangtze River flood. Sci. China Earth Sci. 64: 1–9 . <https://doi.org/10.1007/s11430-020-9699-8>.
- 22- Xu, K., Fang, J., Fang, Y. Sun, Q., Wu, Ch., Lui., M. 2021. The Importance of Digital Elevation Model Selection in Flood Simulation and a Proposed Method to Reduce DEM Errors: A Case Study in Shanghai. Int J Disaster Risk Sci 12, 890–902. <https://doi.org/10.1007/s13753-021-00377-z>
- 23- Yoshikawa, N., Nagao, N. and Misawa, S. 2010. Evaluation of the flood mitigation effect of a Paddy Field Dam project. Agricultural Water Management. 97(2): 259-270.
- 24- Zhu, H.; Chen, Y. 2024. A Study of the Effect of DEM Spatial Resolution on Flood Simulation in Distributed Hydrological Modeling. Remote Sens. 16: 3105. <https://doi.org/10.3390/rs16163105>.
- Journal of Flood Risk Management. 16, e12937,
- 6- Iqbal, A., Mondal, M. S., Veerbeek, W., Khan, M. S. A., & Hakvoort, H. 2023. Effectiveness of UAV-based DTM and satellite-based DEMs for local-level flood modeling in Jamuna floodplain. Journal of Flood Risk Management, 16(4), e12937. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12937>
- 7- Sohrabi, M., Zolghadr, M., & Kargar, M. R. 2025. Two-dimensional flood simulation and investigating the effect of control structures on the hydraulic characteristics of the flow in the Koran Gate basin of Shiraz using UAV and satellite data. Journal of Hydraulics, 20(2), 117-129. <https://doi.org/10.30482/jhyd.2024.459974.1705>.
- 8- Iqbal, M. F., Zahid, M. Z. and Ahmad, M. 2023. Evaluation of DEMs from satellite and UAV sources for hydraulic flood modeling. Water, 15(1): 50. <https://doi.org/10.3390/w15010050>.
- 9- Mazzoleni, M., Paron, P., Reali, A. et al. 2020. Testing UAV-derived topography for hydraulic modelling in a tropical environment. Nat Hazards. 103: 139–163 . <https://doi.org/10.1007/s11069-020-03963-4>.
- 10- McClean, F. , Dawson, R., Kilsby, C. 2020. Implications of Using Global Digital Elevation Models for Flood Risk Analysis in Cities. 56(10). <https://doi.org/10.1029/2020WR028241>.
- 11- Muthusamy, M., Prakash, A. and Jeganathan, C. 2021. DEM resolution impacts on HEC-RAS 2D flood simulation: A case study from India. Hydrology. 8(3): 118. <https://doi.org/10.3390/hydrology8030118>.
- 12- Nihei, Y., Ogata, Y., Yoshimura, R., Ito, T., and Kashiwada, J. 2024. Subgrid Model of Water Storage in Paddy Fields for a Grid-Based Distributed Rainfall–Runoff Model and Assessment of Paddy Field Dam Effects on Flood Control. Water, 16(2): 255. <https://doi.org/10.3390/w16020255>.
- 13- Pandya, S., Patel, D., and Shah, M. 2024. Evaluation of various DEM sources for flood modeling in the Mahi River Basin. Geocarto International, 39(1): 1–17. <https://doi.org/10.1080/10106049.2022.2125794>.
- 14- Parizi, E., Khojeh, SH., Hosseini, S.M., Jouybari Moghadam, Y. 2022. Application of unmanned aerial vehicle DEM in flood modeling and comparison with global DEMs: Case study of Atrak River Basin, Iran. Journal of Environmental Management, 317. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114650>.
- 15- Rosenqvist, A., Shimada, M., Ito, N. and Watanabe, M. 2007. ALOS PALSAR: A Pathfinder Mission for Global-Scale Monitoring Using L-Band SAR. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 45(11): 3307–3316.