



Institute of Geography



Research Paper

**Monitoring of Debris-glacial floods by radar Interferometry
Case Study: Debris-glacial flood of 2022 in Oshtorankuh, East Lorestan**

Abolghasem Goorabi ^{a*}, Seiyed Mossa Hosseini ^a, Pooya Kamrani ^a

^a. Department of Natural Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Keywords:

Debris-glacial Flood,
Oshtorankuh,
Radar interferometry,
Offset tracking Technique



Received:

2 September 2022

Received in revised form:

1 December 2022

Accepted:

1 February 2023

pp.497-511

Monitoring the performance and environmental changes caused by deposited floods play an important role in land planning and management. Monsoon's rains in summer 1401 occurred in large areas of Iran, which in the Astran Mountain created a flood of deposits. It also had significant morphological changes to the most important river in the area (CD) and damaged the water transfer facilities of the cities of Azna and Oligodarz. Nowadays, radar methods are effective in studying qualitative and quantitative dimensions of deposited flows, with high accuracy and low cost, and this study is also for tracking the origin of deposits-ally from radar and Sentinel-1 and index data (NDSI) to evaluate the impact of sudden snow melting. Used in snowfalls in the area. The results indicated the sudden melting of snowfalls in the area due to Monsoon's rainfall, which played an important role in the creation of a deposited-water flood. The flow through the glacier valleys of the area, the plant's sediments and remnants of the area were transferred to water transfer facilities and caused a lot of damage to them. Radar analysis of water zones also showed that the Kandan Dam before the flooding phase has prevented more serious damage to the downstream.

Citation: Goorabi, A., Hosseini, S.M., & Kamrani, P. (2022). Monitoring of Debris-glacial floods by radar Interferometry Case Study: Debris-glacial flood of 2022 in Oshtorankuh, East Lorestan. *Physical Geography Research Quarterly*, 54 (4), 497-511.

 <http://doi.org/10.22059/JPHGR.2023.355408.1007750>

* . Corresponding author (Email: goorabi@ut.ac.ir)

Extended Abstract

Introduction

Natural hazards can affect living beings and especially humans in various scales. Also, geomorphological hazards are considered one of its most important sub-sections. Also, it is necessary to record information such as: magnitude, frequency, extent of the area, speed of onset, spatial distribution and time interval for each of the geomorphic hazards. Every year debris floods cause great damages to humans and significant geomorphic changes in the mountainous basins. debris floods carry a lot of sediments along with the remains of plants, trees and large boulders for a long distance and in a short time, they have the ability to cause significant human and financial losses in the downstream areas. In general, a flash flood phenomenon has three parts: 1- source area, 2- transfer area, and 3- accumulation area. Monitoring and environmental changes caused by debris floods play an important role in planning and managing land use. ongoing land use and climate changes increases the frequency of debris floods. Due to complexity of flood debris occurrence mechanism, it attract many researchers attentions. Since, the debris floods in mountainous areas, contain glacial sediments, it also called debris-glacial floods. The researchers identify the heavy rains that happened in a short period of time and the melting of snowdrifts and the sudden increase in air temperature in the mountainous areas as the main driving factors for the occurrence of devastating debris floods. Tracing the origin of glacial sediment production in flood in different parts of a mountain can help us in the implementation of protection plans to identify sediment production areas and prevent their transfer in subsequent floods to the downstream areas. One of the technologies for tracking and monitoring debris-glacial floods is the use of interferometric radar. One of the techniques used in interferometric radar is the use of offset tracking, that its efficiency is proven in the studies related to monitoring glaciers, landslides, and moving dunes. Monsoon rains in the summer of 1401 occurred in large areas

of Iran, which caused avalanche-glacial floods in Oshtorankuh. In this study, the interferometric method was used to trace the origin of the debris flood event occur at July 2022 in Oshtorankuh area located in eastern Lorestan.

Materials and methods

The type of this study is applied-developmental research and its method is analytical-field. The input data used for this research is Sentinel 1A_IW-GRDH data in two ascending and descending orbits for use in offset tracking and McVitie techniques and Sentinel-2A data for use in the NDSI index. The offset tracking technique was used to determine the places in the Oshtorankuh with the most sediment mass displacement. This method is based on the calculation of the displacement in the pixel unit using the optimization of the mutual correlation between the pair of images resulting from the phase intensity of the SAR data. Also, the Normalized-Difference Snow Index (NDSI) was used to monitor the condition of the snow reserves of Oshtorankuh before and after the monsoon rains. This index is based on low reflectance in the mid-infrared and high reflectance in the visible region, which can distinguish snow-covered areas from non-snowy and cloudy areas. McVittie technique was used to determine the situation and prepare a flood map downstream of the Kamandan basin.

Result and discussion

By using the offset tracking technique, the soil masses displacement after the northeast monsoon rains of Oshtorankuh (Kamandan) in two descending orbits and ascending orbits were identified and analyzed. The results show that the highest recorded values are due to displacement tracking belonging to the cirques, snowdrifts, and glacial deposits of Oshtorankuh. Also, the highest displacement and speed of movement related to the sediments of Kol-e Geno Cirque and Aznadar glacial deposits are located in and at the lower levels of the sediments in Kol Jenou and Aznader glacial valleys. From this event, the

V shape (interglacial period) was in the U-shaped bed (glacial period), it has given its place again to the U shape (caused by the sediments carried by the debris flow). Also, the changes in snow cover before and after the monsoon rains were moreover, the results revealed melting of all the snowfields located around the cirques and glacier valleys of Koll-e Geno and Eznader ranges in the period. Also, the morphological responses of the waterways to the debris-glacial flood event were not the identical, and some responded by digging or filling. Another point is that the degree of sphericity and poor compaction of the sediments transported by the debris flood shows that there are few channel erosions in them and most of them are from the glacial sedimentary deposits of this mountain such as the end parts of the cirques and moraines. This dangerous event also caused a lot of damage to the water conveyance structures and canals from this region to Aliguderz and Azna. The condition of the downstream basin and the recently drained Kamdan Dam showed the retention effect of this structure on preventing the flooding of the downstream parts.

Conclusion

Nowadays, the use of interferometric radar in monitoring environmental changes has become a popular and practical tool. In this research, it was found that it is possible to evaluate and identify the displacement and origin of sediment deposits, as well, quantify their speed and movement patterns using interferometric radar and the Offset tracking technique. The monsoon event occurred at

July 2022 leads to sudden melting of the snowfields in Oshtorankuh played and a flash floods along with glacial deposits. But field evidence showed that waterway responses to this event is not identical. Considering that this region plays an important role in supplying water to its neighboring cities and some regions of central Iran, the results of this research can be used in the management and supply of water resources and the management of torrential floods to reduce possible damages to water transmission channels. The evaluation of the floodplains in the lower basin shows that the dams can be at risk of being filled with deposited sediments. Therefore, it is requested that the potential of a deposited flood be taken into account in the location stage. Although Kamandan reservoir stored a significant part of the flood and prevented damage to the residential and agricultural areas downstream of the dam.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to all the scientific consultants of this paper.

پایش سیلاب‌های واریزه‌ای-یخچالی با استفاده از اینترفرومتری راداری مطالعه موردی: سیلاب مرداد ۱۴۰۱ اشترانکوه، شرق استان لرستان

ابوالقاسم گورابی^۱ - گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران
سید موسی حسینی - گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران
پویا کامرانی - گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران

چکیده

پایش عملکرد و تغییرات محیطی ناشی از سیلاب‌های واریزه‌ای در برنامه‌ریزی و مدیریت آمایش سرزمین نقش مهمی دارد. بارش‌های مونسونی تابستان ۱۴۰۱ در مناطق وسیعی از ایران به وقوع پیوست که در اشترانکوه سبب ایجاد سیلابی واریزه‌ای-یخچالی شد. همچنین تغییرات مورفولوژیکی قابل توجهی بر مهم‌ترین رودخانه این منطقه (کمندان) داشت و به تأسیسات انتقال آب شهرهای ازنا و الیگودرز آسیب وارد شد. امروزه روش‌های راداری در مطالعه ابعاد کیفی و کمی جریان‌های واریزه‌ای، با دقتی بالا و هزینه‌ای کم مؤثر هستند، این پژوهش نیز جهت ردیابی منشأ رسوبات واریزه‌ای - یخچالی از روش‌های راداری و داده‌های Sentinel-1 و شاخص (NDSI) برای ارزیابی تأثیر ذوب ناگهانی برف در برف‌چال‌های منطقه استفاده کرده است. نتایج بیانگر ذوب ناگهانی برف‌چال‌های منطقه به دلیل بارش مونسونی بود که در ایجاد سیلاب واریزه‌ای-یخچالی نقش مهمی را ایفا کرده بود. این جریان با گذر از دره‌های یخچالی این منطقه، رسوبات و بقایای گیاهی این ناحیه را بر روی تأسیسات انتقال آب منتقل و خسارت‌های زیادی به آن‌ها وارد کرده بودند. تحلیل راداری پهنه‌های آبی نیز نشان دادند که سد کمندان قبل از مرحله آبیگری، با جذب سیلاب در خود، مانع از ورود آسیب‌های جدی‌تر به مناطق پایین دست شده است.

اطلاعات مقاله

واژگان کلیدی:

سیلاب واریزه‌ای، اشترانکوه، اینترفرومتری راداری، روش ردیابی نقطه شروع.



تاریخ دریافت:

۱۴۰۱/۰۶/۱۱

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۱/۰۹/۱۰

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۱/۱۱/۱۲

صص. ۵۱۱-۴۹۷

استناد: گورابی، ابوالقاسم؛ حسینی، سیدموسی و کامرانی، پویا. (۱۴۰۱). پایش سیلاب‌های واریزه‌ای-یخچالی با استفاده از اینترفرومتری راداری مطالعه موردی: سیلاب مرداد ۱۴۰۱ اشترانکوه، شرق استان لرستان مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۵۴ (۴)، ۴۹۷-۵۱۱.

 <http://doi.org/10.22059/JPHGR.2023.355408.1007750>

مقدمه

مخاطرات طبیعی در مقیاس‌های گوناگونی می‌توانند موجودات زنده و به‌ویژه انسان‌ها را تحت تأثیر قرار دهند (Trogrli et al, 2022). در واقع با تغییرات اقلیمی و کاربری‌های اراضی غیراصولی، این مخاطرات تشدید می‌شوند (Coronese et al, 2019; WMO, 2020). که مخاطرات ژئومورفولوژیک یکی از مهم‌ترین زیر بخش‌های آن به شمار می‌رود. همچنین ثبت اطلاعاتی مانند: بزرگی، فراوانی، وسعت منطقه، سرعت شروع، پراکندگی فضایی و فاصله زمانی برای هر یک از مخاطرات ژئومورفیک، کاری ضروری است (Marston et al, 2017). به‌طور کلی پدیده اتمسفری بارش رگباری به‌ویژه آن‌هایی که در طول فصل مونسونی به وقوع می‌پیوندد، توانایی ایجاد مخاطراتی مانند سیلاب‌های سریع و واریزه‌ای، زمین‌لغزش‌ها و حرکات توده‌ای را دارند (Sati, 2022). در این میان سیلاب‌های واریزه‌ای که به‌نوعی یک فرآیند هیدروژئومورفولوژیک حوضه محسوب می‌شود (Stoffel & Wilford, 2012) به علت حمل رسوبات بسیار زیاد به همراه بقایای گیاهان و درختان و تخته‌سنگ‌های بزرگ تا مسافت زیاد و در طی زمان کوتاه (Coe et al, 2014) توانایی وارد آوردن زیان‌های جانی و مالی قابل‌توجهی در نواحی پایین‌دست را دارند. همچنین استفاده از داده‌های مربوط به فرکانس-شدت فرآیندهای هیدروژئومورفولوژیک به‌منظور درک بهتر تکامل بلندمدت چشم‌انداز مهم می‌باشند. (Stock & Dietrich, 2006) به‌طور کلی یک پدیده سیلاب واریزه‌ای دارای سه بخش ۱-منطقه منشأ ۲-منطقه انتقال و ۳-منطقه انباشت است (Calligaris & Luca Zini, 2012). از نظر مفهومی اغلب این مخاطره در اولین مراحل مربوط به آمایش سرزمین و به‌ویژه ارزیابی مخاطره، برنامه‌ریزی کاربری زمین و طرح‌های مهار سیلاب توسط برنامه ریزان در نظر گرفته می‌شود (Schraml et al, 2013; Wilford et al, 2004) که مسائل مربوط به نوع، شدت-مدت و میزان بارش در آغاز سیلاب واریزه‌ای در مناطق کوهستانی نقش کلیدی را ایفا می‌کند. در واقع با هر بار رخداد سیلاب واریزه‌ای، پژوهشگران به درک بیشتری از عملکرد این فرآیند می‌رسند که تلاش‌ها برای پیش و کمی کردن چنین پدیده‌ای به‌منظور درک مکانیسم و ارزیابی مخاطرات ناشی از آن می‌بایست بیش‌ازپیش ادامه پیدا کند (Lee and et al, 2022).

پژوهشگران، بارش‌های شدید اتفاق افتاده در یک مدت‌زمانی کوتاه (Calligaris, 2012; Novak et al, 2020; Luca Zini & Destro, 2018; Palau et al, 2019). و ذوب برف‌چال‌ها و افزایش ناگهانی دمای هوا را در نواحی کوهستانی (Moreiras et al, 2021) به‌عنوان عوامل محرک اصلی وقوع سیلاب‌های واریزه‌ای ویرانگر معرفی می‌کنند. آسیب‌های محیطی زیاد ناشی از وقوع سیلاب‌های واریزه‌ای از یک‌سو و فقدان ایستگاه‌های زمینی پایش آن‌ها از سوی دیگر موجب می‌شود که بررسی و پایش این نوع مخاطرات با استفاده از فناوری‌های دورسنجی مانند تداخل سنجی رادار دهانه ترکیبی (InSAR^۲) اهمیت زیادی داشته باشد. در ادبیات فنی، در زمینه استفاده از روش‌های راداری به‌منظور پایش عوامل مؤثر بر حرکات دامنه‌ای و سیلاب‌های واریزه‌ای می‌توان به پژوهش (Tay et al, 2020) اشاره نمود که با توسعه شاخص افراستگی موج لگاریتمی (LAR) به بررسی حرکات دامنه‌ای با استفاده از روش‌های راداری پرداخت. همچنین مدل‌سازی مسیر حرکت جریان‌های اقلیمی مؤثر بر سیلاب واریزه‌ای (Seo et al, 2020; Singhroy et al, 2018) پایش وضعیت خطوط لوله‌ای در برابر جریان‌های واریزه‌ای با استفاده از روش (SBAS^۳)، (Yuankun Xu et al, 2020). پایش زمین‌لغزش Hooskanaden با استفاده از روش‌های Pixel Offset tracking، گمانه‌زنی و اندازه‌گیری هیدروژئولوژیک، (Handayani and et al, 2015). تحلیل ویژگی‌های ژئومورفولوژیک جریان گدازه‌ای کوه

1 . World Meteorological Organization

2 . Interferometric Synthetic Aperture Radar

3 . Satellite-Based Augmentation Systems

در غرب جزیره جاوه کشور اندونزی با استفاده از رادار دهانه ترکیبی تمام پلاریمتری، (Mondini et al, 2021). شناسایی و نقشه‌برداری تغییرات ژئومورفولوژیکی ناشی از زمین‌لغزش با استفاده از رادار اینترفرومتری، (Liu et al, 2021). پیش زمین‌لغزش‌های مرتبط با مخزن سدها با استفاده از رادار اینترفرومتری مطالعه موردی: مخزن سد Yalong در کشور چین، (Li et al, 2020). آشکارسازی حرکات دامنه‌ای با استفاده از مشاهدات رادار زمینی و فضایی، (Darvishi et al, 2018). ترکیب روش‌های Intensity-Based Sub-Pixel Offset Tracking & PSI & MAI با یکدیگر به منظور پیش زمین‌لغزش Corvara در کشور ایتالیا با استفاده از کرنر رفلکتورهای باند X اشاره کرد. کارایی استفاده از روش ردیابی نقطه شروع امروزه در مطالعات مربوط به پیش و بررسی یخچال‌ها (Riveros et al, 2013; Strozzi et al, 2020)، جابه‌جایی حدود تلماسه‌ها (Abdalla Mahmoud et al, 2020) و تغییرات ناشی از معدن‌کاوی (Zhao et al. 2021) نیز احراز شده است. در واقع این روش به صورت بهینه کمیت برداری جابه‌جایی پیکسل‌ها را بر روی داده راداری (GRDH) که از رادار دهانه ترکیبی (SAR) با دید چندگانه (Multi Looking) اخذ شده‌اند، طی یک دور زمانی محاسبه می‌کند (Zhao et al., 2021). از مزیت‌های روش ردیابی نقطه شروع^۱ می‌توان به سرعت و سهولت انجام پردازش‌های آن اشاره کرد که تاکنون در داخل کشور برای پیش سیلاب‌های واریزه‌ای به‌ویژه واریزه‌ای-یخچالی مورد استفاده قرار نگرفته است.

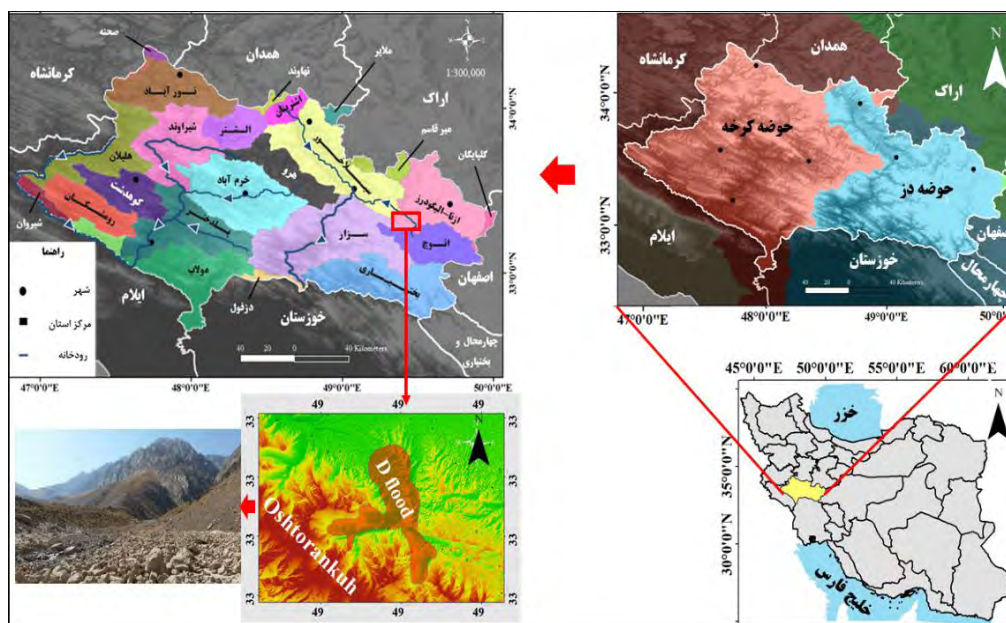
رخداد بارش‌های مونسونی که در مرداد ۱۴۰۱ در مناطق وسیعی از جنوب غرب آسیا به‌ویژه ایران به وقوع پیوست به دو دلیل گرمایش جوی و اقیانوسی و اثر فعالیت‌های انسانی در حوضه‌های زهکشی، خسارت‌های زیادی به دنبال داشت (پژوهشکده سوانح طبیعی، ۱۴۰۱)؛ که در نتیجه آن وقوع سیلاب‌های واریزه‌ای متعدد در این کشورها گزارش شده است. یکی از این مناطق، دامنه‌های شمال شرقی اشترانکوه بود که با وجود بارندگی با دوره بازگشت ۵۰ سال در آن، رودخانه کمندان (واقع در شمال شرقی اشتران کوه) تغییرات مورفولوژیکی زیادی از خود نشان داد و خسارت‌ها و آسیب‌های سنگینی نیز به تأسیسات انتقال آب شهرستان‌های الیگودرز و ازنا وارد کرد. با توجه به دوره بازگشت کوتاه (۵۰ سال) سیلاب مرداد ۱۴۰۱ حوضه کمندان، این پژوهش به دنبال یافتن سایر عوامل و عناصر موثر بر تشدید رویداد واریزه‌ای-یخچالی این منطقه با استفاده از سنجش‌ازدور طیفی (شاخص پوشش نرمال شده سطح برف^۲) و به‌ویژه راداری (روش ردیابی نقطه شروع) است.

محدوده مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه دره یخچالی کمندان واقع در دامنه شمالی اشترانکوه و در شرق استان لرستان می‌باشد که در زیر حوضه ازنا-الیگودرز (بالادست حوضه آبخیز دز) واقع شده است (شکل ۱). مساحت این حوضه ۲۱۹۳ کیلومترمربع و حداکثر و حداقل ارتفاع آن از سطح دریا به ترتیب ۳۸۰۰ و ۱۸۳۰ متر می‌باشد. مقطع عرضی این دره U شکل بوده و وجود رسوبات زاویه‌دار با اندازه‌های مختلف با آثار سایش یخچالی بر روی آنان نشان از فعالیت‌های یخچالی این مکان در دوران گذشته دارد. از نظر اقلیمی متوسط بارندگی سالانه این محدوده ۷۴۴ میلی‌متر می‌باشد؛ همچنین حداکثر و حداقل دمای متوسط مطلق سالانه آن به ترتیب ۳۶/۹ و ۰/۳- است (احمدآبادی و فتح‌الله زاده، ۱۳۹۷)؛ و دارای دو بخش اقلیمی متفاوت یعنی گرمسیری (پوشش گیاهی غالب درختان بلوط) در جنوب و سردسیری (پوشش گیاهی غالب بوته‌گون) در شمال آن می‌باشد.

1 . Offset tracking

2 . Normalized Difference Snow Index (NDSI)



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد پژوهش

با توجه به این مورد که ارتفاع و عرض جغرافیایی در حجم و نوع بارش تأثیرگذار است و دینامیک یخچالی را نیز شکل می‌دهد (بیمانی، ۱۳۹۶)، به علت ارتفاع زیاد منطقه (وجود بیش از ۱۰ قله بالای ۳۰۰۰ متر ارتفاع)، روند شمال غربی- جنوب شرقی (وجود دامنه‌های سایه در شمال و آفتابی در جنوب) و ویژگی‌های اقلیم کوهستانی در اشتران کوه، دما و بارش این محیط علاوه بر به وجود آمدن دینامیک یخچالی و سپس ایجاد لندفرم‌های یخچالی (اشکال کاوشی و اشکال تراکمی) باعث فعال شدن هوازدگی فیزیکی (کریوکلاستی) سنگ‌های کربناته این محیط شده و رسوبات با اندازه‌های مختلف، زاویه‌دار و کروی شدگی ضعیف با جور شدگی پایین را در این منطقه به وجود آورده که آن را مستعد سیلاب‌های واریزه‌ای-یخچالی کرده است (شکل ۲).



شکل ۲. انباشت رسوبات با اندازه‌های مختلف ناشی از هوازدگی فیزیکی در دره کول جنو

روش پژوهش

این تحقیق از نوع کاربردی-توسعه ای و روش آن تحلیلی-میدانی هست. از ابزارهای مختلفی مانند داده‌های راداری Sentinel 1A_IW-GRDH در دو مدار صعودی و نزولی به منظور استفاده در روش ردیابی نقطه شروع و تهیه نقشه پهنه‌های سیلابی پایین دست حوضه کمندان، داده‌های طیفی Sentinel-2A به منظور استخراج شاخص NDSI و نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ بکار گرفته شد. همچنین پیمایش‌های میدانی در منطقه مورد مطالعه در چندین نوبت به منظور صحت سنجی خروجی‌های مربوط به روش‌های راداری و اپتیکی صورت گرفت و تغییرات ژئومورفولوژیکی محیط از نزدیک مورد مشاهده قرار گرفتند. به‌طور کلی برای مشخص کردن محل‌های دارای بیشترین تغییرات و تولید رسوب برای جریان واریزه‌ای یخچالی اشتراکوه از روش ردیابی نقطه شروع استفاده شد. همچنین برای پایش وضعیت ذخیره‌های برفی اشتراکوه در قبل و بعد از بارش‌های مونسونی نیز از شاخص پوشش نرمال شده برف (NDSI) بهره گرفته شد. به منظور مشخص کردن وضعیت و تهیه وسعت پیکره آبی پایین دست حوضه کمندان از روش ارائه شده McVittie در سال ۲۰۱۹ استفاده شد.

داده‌های هیدرومتری حوضه مورد مطالعه

ایستگاه هیدرومتری دره کمندان در سال ۱۳۴۶ و در ارتفاع ۲۰۵۰ متری از سطح دریا بر روی رودخانه کمندان ایجاد شد. حداکثر دبی پیک لحظه‌ای، حداکثر دبی روزانه و متوسط دبی روزانه این حوضه از ابتدای تأسیس تا به حال به ترتیب ۵۰، ۹۰، ۳ و ۲، ۴۷ مترمکعب بر ثانیه محاسبه شده‌اند (شرکت مدیریت منابع آب ایران، ۱۴۰۱).

جدول ۱. مقادیر دبی و رسوب حوضه آبخیز کمندان

مقدار	پارامترها	ردیف
۵۰	حداکثر دبی پیک لحظه‌ای (مترمکعب بر ثانیه)	۱
۹۰، ۳ (اردیبهشت)	حداکثر دبی روزانه (مترمکعب بر ثانیه)	۲
۲، ۴۷	متوسط دبی روزانه (مترمکعب بر ثانیه)	۳

منبع: (شرکت مدیریت منابع آب ایران)

این ایستگاه دارای ۳۲ سال دبی پیک لحظه‌ای ثبت شده (طی سال‌های ۱۳۴۶ تا ۱۳۹۸) می‌باشد که حداکثر آن ۵۰/۳۶ (سال ۱۳۹۸) و کمترین نیز ۱/۹۲ مترمکعب بر ثانیه (سال ۱۳۸۰) بود. با توجه به این نکته که سیلاب واریزه‌ای مرداد ۱۴۰۱ کمندان با دبی پیک لحظه‌ای ۴۵ مترمکعب بر ثانیه گزارش شده است (شرکت آب منطقه‌ای لرستان، ۱۴۰۱)، به منظور مشخص کردن دوره بازگشت این رخداد سیل، تحلیل فراوانی داده‌های دبی پیک لحظه‌ای این ایستگاه با استفاده از نرم‌افزار Easyfit انجام شد. بر اساس سه معیار نکوئی برازش کلموگروف-اسمیرنوف (K-S)، اندرسون دارلینگ (A-D) و کای اسکواتر (Chi-Square)، توزیع مقادیر حدی کلی (GEV) بهترین توزیع شناخته شد (جدول ۲).

جدول ۲. مقادیر به دست آمده از معیارهای نکوئی برازش برای توزیع GEV^۱

توزیع	Anderson Darling	Kolmogorov Smirnov	Chi-Squared
توزیع مقدار حدی تعمیم یافته	0.18571	0.0843	0.2767

1 . Generalized Extreme Value (GEV)

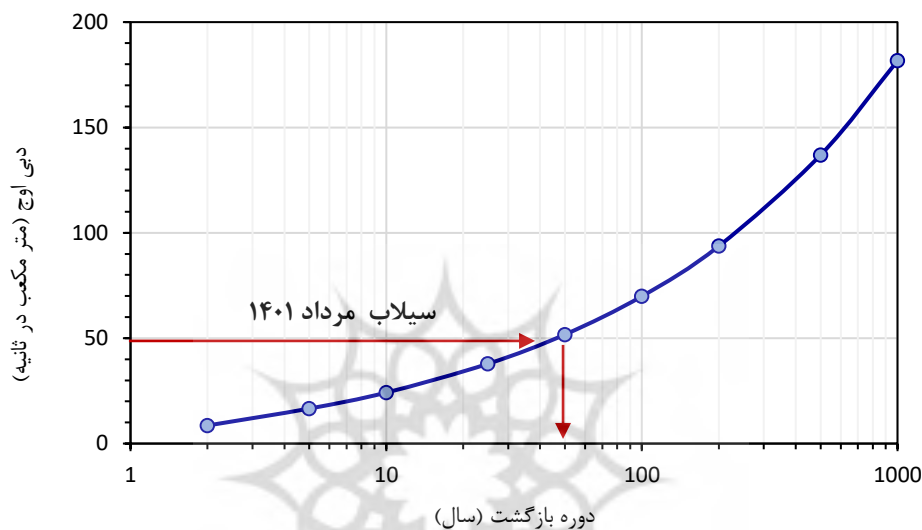
درواقع توزیع مقدار حدی تعمیم‌یافته به منظور مدل‌سازی کمترین و بیشترین تعداد از داده‌های تصادفی به کار گرفته می‌شود و تابع چگالی احتمال آن به صورت رابطه ۱ می‌باشد:

$$1 + k \frac{(x - \mu)}{\sigma} > 0 \quad \text{for } k \neq 0$$

$$-\infty < x < +\infty \quad \text{for } k = 0$$

(رابطه ۱)

که k پارامتر شکل پیوسته σ پارامتر مقیاس و μ پارامتر موقعیت توزیع است. مقادیر دبی پیک سیلاب با دوره بازگشت‌های ۲ تا ۱۰۰۰ ساله که بر اساس توزیع GEV برآورد شده است، در شکل ۳ ارائه شده است که در آن دوره بازگشت سیلاب مرداد ۱۴۰۱ در دره کمندان حدود ۵۰ سال می‌باشد.



شکل ۳. تغییرات دبی پیک سیلاب با دوره بازگشت‌های ۲ تا ۱۰۰۰ ساله در ایستگاه کمندان بر اساس توزیع احتمالاتی GEV

روش ردیابی نقطه شروع (Offset tracking)

رادار دهانه ترکیبی که به اختصار SAR نامیده می‌شود دارای کاربردهای زیادی در پایش تغییر شکل‌های مربوط به پوسته زمین و به‌ویژه حرکات دامنه‌ای است (Xu et al, 2020). روش ردیابی نقطه شروع بر پایه محاسبه جابه‌جایی در واحد پیکسلی با استفاده از بهینه‌سازی همبستگی متقابل بین زوج تصویر حاصل از شدت فاز داده‌های SAR است. به‌طور کلی این روش با استفاده از نوعی درونیابی، جابه‌جایی شبکه‌ای نقاط کنترل زمینی (GCP) سرعت برداری (جهت و کمیت) را می‌سنجد و به نقاط دیگر تعمیم می‌دهد (Lu Veci, 2016). ورودی‌های این روش داده‌های نوع SLC یا GRD^۲ می‌تواند باشد که رابطه مورد استفاده روش ردیابی نقطه شروع به صورت زیر است (Bamler & Eineder, 2005):

$$\sigma_{CR} = \sqrt{\frac{3}{2NM} \frac{\sqrt{1-\rho^2}}{\pi\rho}} \cdot \sigma_{pix}$$

(رابطه ۲)

که N و M اندازه پنجره‌ها برای همبستگی متقابل، ρ ضریب همبستگی متقابل، σ_{pix} رزولوشن پیکسلی است. در این پژوهش با توجه به مقیاس مکانی پدیده سیلاب واریزه‌ای عدد ۱۰ در جهت آزیموت و ۲۰ در جهت رنج در نظر گرفته شد

1 . Single Look Complex
2 . Ground Range Detected

و با توجه به مقدار توصیه شده توسط (Bamler & Eineder, 2005) برای بررسی‌های مربوط به حرکات دامنه‌ای با استفاده از ماهواره Sentinel-1، ضریب همبستگی متقابل ۰/۲ در نظر گرفته شد. برای صحت سنجی خروجی‌های مربوط به این روش از تصاویر Sentinel-2A قبل و بعد از سیلاب واریزه‌ای و مشاهدات میدانی بهره گرفته شد. اطلاعات داده‌های اخذ شده در جدول ۳ نمایش داده شده است.

جدول ۳. مشخصات تصاویر راداری استفاده شده برای پایش سیلاب واریزه‌ای-یخچالی اشتران کوه

شماره	تصویر	تاریخ و زمان	مدار	چارچوب	نزولی یا صعودی	زمان اخذ تصویر نسبت به رویداد واریزه‌ای-یخچالی
1	S1A_IW_GRDH_1SDV	D=2022/07/22 T=02:38:37	26 7	35	نزولی	قبل
2	S1A_IW_GRDH_1SDV	D=2022/08/03 T=02:38:37	26 8	35	نزولی	قبل
3	S1A_IW_GRDH_1SDV	D=2022/07/14 T=14:43:58	26 6	101	صعودی	قبل
4	S1A_IW_GRDH_1SDV	D=2022/08/15 T=02:38:38	26 9	35	نزولی	بعد
5	S1A_IW_GRDH_1SDV	D=2022/08/19 T=14:44:25	26 9	101	صعودی	بعد
6	S1A_IW_GRDH_1SDV	D=2022/08/27 T=02:38:39	27 0	35	نزولی	بعد

شاخص پوشش نرمال شده برف

شاخص پوشش نرمال شده سطح برف (NDSI) برای تعیین سطوح ارتفاعی دارای برف با استفاده از مقادیر بازتابندگی سطحی به کار می‌رود (Sibandze et al, 2014). اساس کار این شاخص تفاضلی بر بازتابندگی پایین در فرو سرخ میانی و بازتابندگی بالا در ناحیه مرئی است (رابطه ۳)، که می‌تواند مناطق پوشیده شده توسط برف را نسبت به غیر برفی و ابری تشخیص دهد.

$$\text{NDSI} = (\text{Band 3} - \text{Band 11}) / (\text{Band 3} + \text{Band 11}) \quad (\text{رابطه ۳})$$

برای پژوهش حاضر، داده‌های Sentinel-2A (جدول ۵) وارد نرم‌افزار QGIS شده و پس از تبدیل رزولوشن مکانی باند ۱۱ از ۲۰ به ۱۰ متر، شاخص پوشش نرمال شده سطح برف با استفاده از رابطه ۳ به دست آمد.

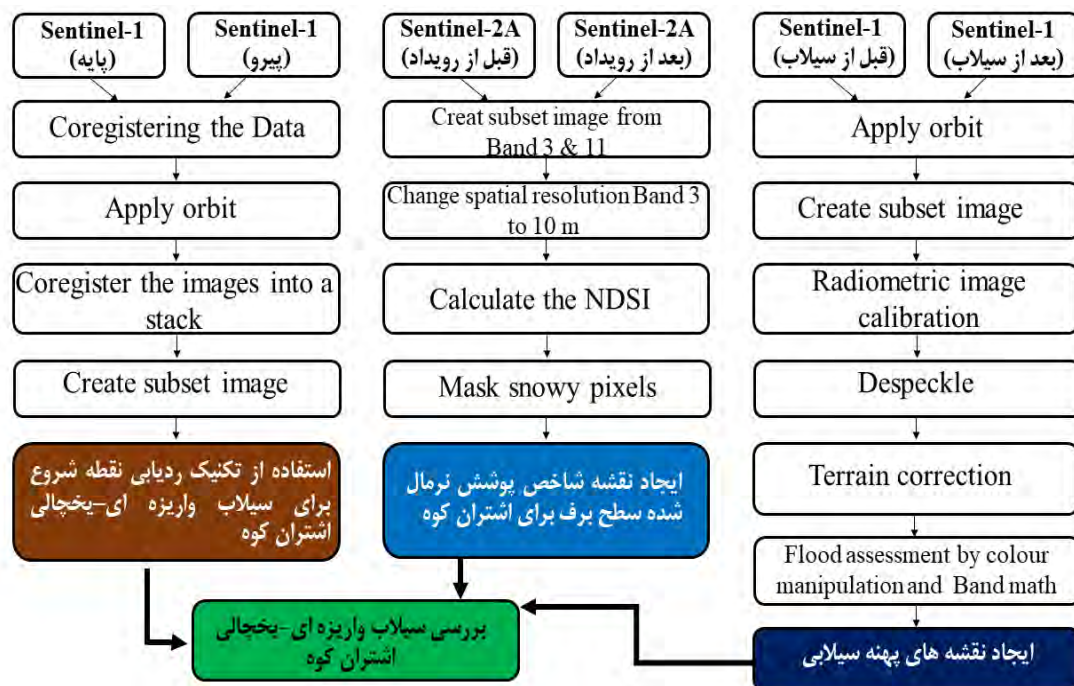
جدول ۵. مشخصات تصاویر طیفی Sentinel-2A استفاده شده برای پایش سیلاب واریزه‌ای-یخچالی اشتران کوه

شماره	تصویر	تاریخ و زمان	زمان نسبت به رویداد واریزه‌ای
1	S2A_MSIL2A	D=20220805,T=071631	قبل
2	S2A_MSIL2A	D=20220815,T=071631	بعد

تهیه نقشه پهنه‌های آبی

برای تهیه نقشه پهنه‌های آبی پایین دست حوضه کمندان، می‌توان از داده‌های راداری S1A_IW_GRDH_1SDV استفاده و با روش‌های کاربردی طبقه‌بندی مجدد، به تغییرات ناشی از سیلاب در منطقه مورد مطالعه پی برد (McVittie et al, 2019).

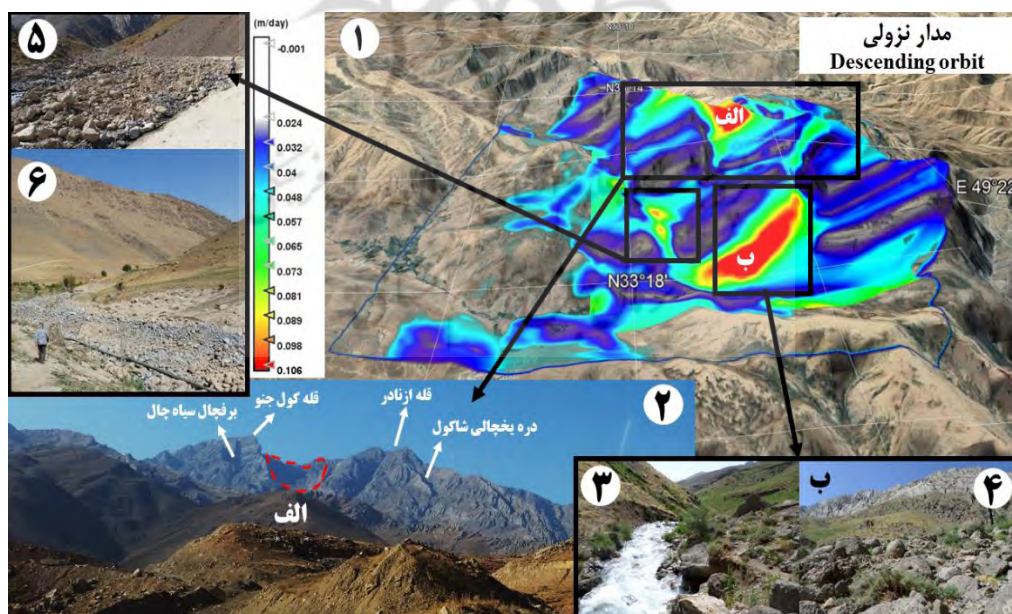
برای نمایش مراحل و جزئیات بیشتر، مدل فرآیندی این پژوهش در شکل ۴ نمایش داده شده است.



شکل ۴. فرآیندی پژوهش

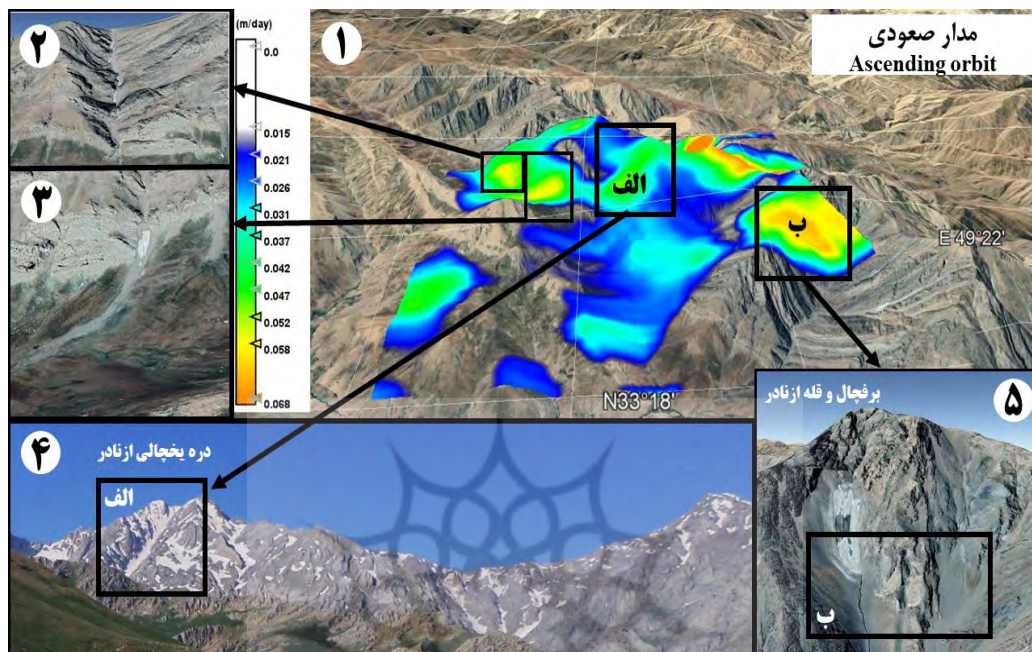
یافته‌ها و بحث

پس از انجام پردازش‌ها و به‌کارگیری تکنیک رادار اینترفرومتری با استفاده از روش ردیابی نقطه شروع، نتایج تغییرات محیطی بعد از بارش مونسونی شمال شرقی اشتراک‌کوه (کمدان) در دو مدار نزولی (Descending orbit) (شکل ۵) و صعودی (Ascending orbit) (شکل ۶) استخراج و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند.



شکل ۵. پایش تغییرات محیطی مناطق شمالی اشتراک‌کوه پس از بارش‌های مونسونی مرداد ۱۴۰۱ با استفاده از رادار اینترفرومتری در مدار نزولی (Descending orbit) (عکس ۱ نتیجه حاصل از روش ردیابی نقطه شروع، عکس ۲ سیرک و قله کول جنو، عکس ۳ دره از نادر به همراه قطعه سنگ‌های ناشی از فرسایش یخچالی، عکس ۴ رسوبات واریزه‌ای ناشی از هوازدگی مکانیکی مشرف به قله از نادر، عکس‌های ۵ و ۶ رسوبات یخچالی حمل شده در اندازه‌های مختلف توسط سیلاب واریزه‌ای)

نتایج روش ردیابی نقطه شروع و تغییرات با استفاده از داده‌های مدار نزولی (شکل ۵) بیانگر آن هستند مناطقی که دارای بیشترین تغییرات مورفولوژیکی پس از این رویداد بوده‌اند به ترتیب عبارت‌اند از: سیرک کول جنو و ازنادر، برفچال سیاه‌چال و واریزه‌های یخچالی ازنادر و دره یخچالی کول جنو. همچنین بیشترین جابه‌جایی و سرعت حرکت مربوط به رسوبات سیرک کول جنو و واریزه‌های یخچالی ازنادر با ۱,۲ متر در روز (۱۲ روز فاصله اخذ زوج تصویرهای راداری *۰,۱ متر) می‌باشد. در ترازهای پایین‌تر رسوبات موجود در دره‌های یخچالی کول جنو و ازنادر قرار دارند.

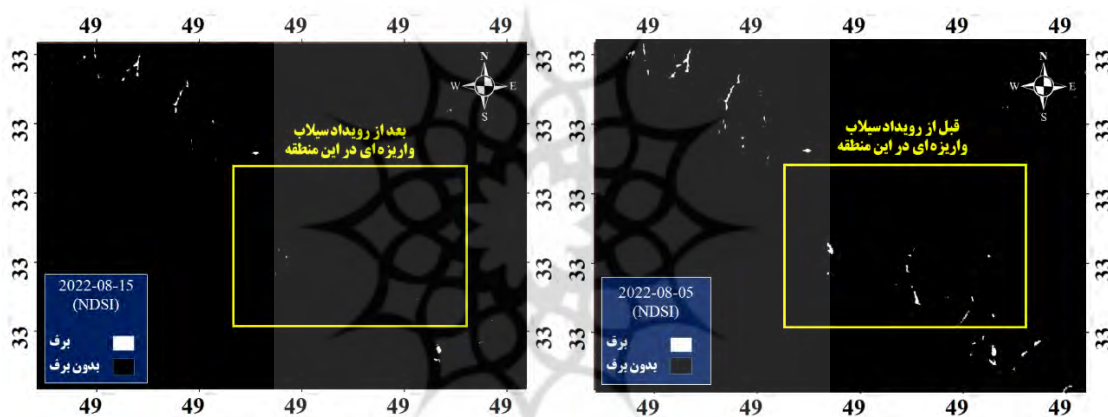


شکل ۶. پایش تغییرات محیطی مناطق شمالی اشترانکوه پس از بارش‌های مونسونی مرداد ۱۴۰۱ با استفاده از رادار ایترفرومتری در مدار نزولی (Ascending orbit) (عکس ۱ نتیجه حاصل از روش ردیابی نقطه شروع، عکس‌های ۲ و ۳ دره‌های یخچالی شرق اشترانکوه و مشرف به کوه خلیل‌آباد، عکس ۴ دره و قله کول جنو، عکس ۵ نمایی از قله و دره ازنادر)

همچنین ارزیابی جابه‌جایی با استفاده از داده‌های مدار صعودی انجام گرفت که نتایج (شکل ۶) نشان‌دهنده بیشترین میزان جابه‌جایی در رسوبات یخچالی مربوط به قسمت‌های پایینی برف‌چال‌های ازنادر و کول جنو نسبت به سایر قسمت‌ها بود (شکل ۶). در واقع نتایج حاصل از مدارهای صعودی و نزولی بیان‌کننده توانایی روش ردیابی نقطه شروع در آشکارسازی محل‌هایی است که در آنان بیشترین رسوبات یخچالی برای جریان واریزه‌ای برداشت شده است. همان‌طور که در شکل ۷ مشخص است بیشترین تغییرات مورفولوژیک آبراه‌های متأثر از سیلاب واریزه‌ای متعلق به دره کول جنو می‌باشد که بسترهای اصلی و موقت جای خود را به رسوبات یخچالی جابه‌جاشده توسط جریان واریزه‌ای داده است. در واقع به‌طور کلی توپوگرافی مقطع عرضی رودخانه نیز که تا قبل از این رویداد ۷ شکل (دوران بین یخچالی) در بستر U شکلی (دوران یخچالی) بود، جای خود را مجدداً به U شکل (ناشی از رسوبات حمل شده توسط جریان واریزه‌ای) داده است.

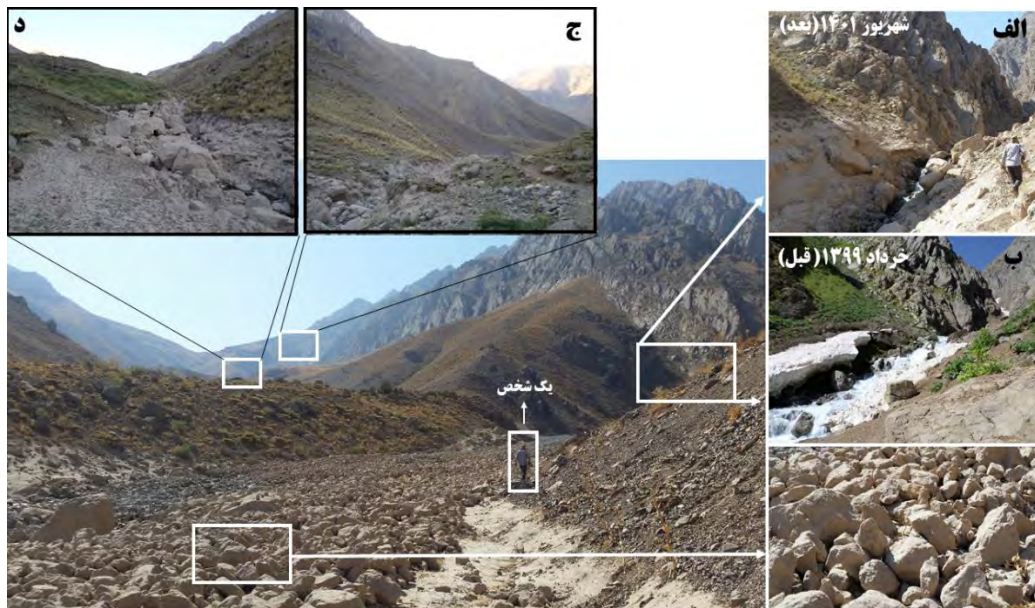


شکل ۷. تغییرات مورفولوژیک آبراهه کول جنوب قبل (خرداد ۱۳۹۹) و بعد از سیلاب واریزه‌ای (شهریور ۱۴۰۱)



شکل ۸. آشکارسازی ذخیره برف‌چال‌های اشتراک‌کوه در قبل (بعد از سیلاب واریزه‌ای-یخچالی) و بعد از بارش‌های مونسونی (بعد از سیلاب واریزه‌ای-یخچالی) با استفاده از شاخص NDSI

با توجه به این نکته که اشتراک‌کوه و به‌ویژه دامنه‌های شمالی آن در ماه‌های گرم سال (تابستان) دارای ذخیره‌های برفی قابل توجهی بوده و در تأمین آب مهم‌ترین رودخانه‌های دائمی این منطقه نقش مهمی دارند، با استفاده از شاخص NDSI تغییرات پوشش برفی قبل و بعد از بارش‌های مونسونی آشکارسازی شدند که نشان از ذوب برف برف‌چال‌ها و به‌ویژه دره‌های یخچالی کول جنوب و ازنا در پس از این بارش بود (شکل ۸). در واقع ذوب بالای ذخیره‌های برفی در مناطق اشاره‌شده نسبت به سایر قسمت‌های اشتراک‌کوه را می‌توان مرتبط با بارش‌های مونسونی دانست که آب مایع ناشی از آن به توانایی برداشت رسوبات منفصل و به‌ویژه یخچالی کمک کرده است.



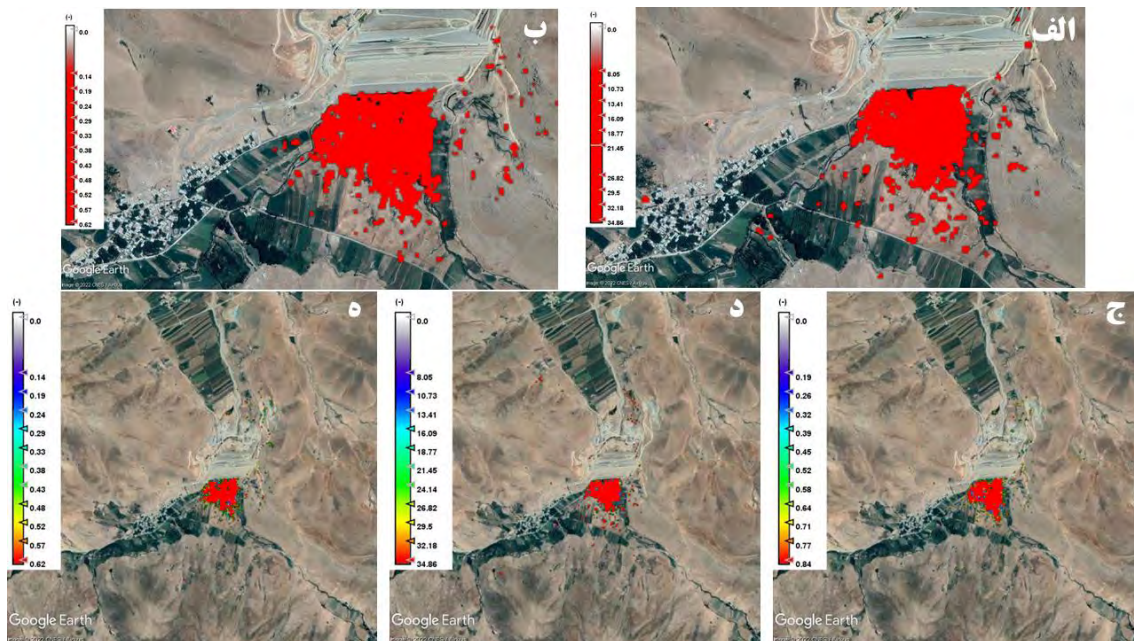
شکل ۹. پاسخ‌های گوناگون آبراهه‌های بالادست حوضه به رویداد سیلاب واریزه‌ای (الف و ب: حفر بستر و ج و د: رسوب‌گذاری در بستر)

در واقع آبراهه‌های بالادست حوضه نیز پاسخ‌های متفاوتی به رویداد ذوب برف و ایجاد سیلاب واریزه‌ای نشان داده‌اند. برخی با تجمع رسوبات یخچالی مواجه شده و بعضی نیز به حفر بستر خود پرداختند (شکل ۹). نکته دیگر با توجه به مشاهدات غیر ایزاری می‌توان دریافت که زاویه‌داری بالا، درجه کروی بودن و جور شدگی ضعیف رسوبات منتقل شده به وسیله سیلاب واریزه‌ای نشان می‌دهد که فرسایش‌های آبراهه‌ای در آنان اندک بوده و بیشتر آنان از ذخیره‌های رسوبی یخچالی این کوهستان مانند قسمت‌های انتهایی سیرک‌ها، مورن‌ها و واریزه‌های یخچالی به این محیط وارده شده‌اند.



شکل ۱۰. تأسیسات انتقال آب به شهرهای الیگودرز و ازنا (۱) انباشت بقایای گیاهی و رسوبی پس از پاک‌سازی دریاچه (۲) ورود رسوبات درشت‌دانه ناشی از سیلاب واریزه‌ای به ابتدای کانال روباز (۳) کانال سرپیسته انتقال آب به شهرهای الیگودرز و ازنا (۴)

این سیلاب علاوه بر تغییرات ژئومورفولوژیکی در قسمت‌های مختلف حوضه کمندان، باعث ورود ذرات رسوبی و بقایای گیاهی به کانال و بروز خسارت به تأسیسات انتقال آب شهرهای الیگودرز و ازنا نیز شد (شکل ۱۰).



شکل ۱۱. مشخص کردن وضعیت سیلاب در زمین‌های پایین‌دست حوضه و سد تازه بهره‌برداری شده کمندان با استفاده از رادار اینترفرومتری (الف) قبل از سیلاب ۲۰۲۲/۰۸/۰۵ (ب) بعد از سیلاب ۲۰۲۲/۰۸/۱۵ (ج، د، ه) به ترتیب ۸ روز بعد، ۸ روز قبل و ۲۰ روز بعد از سیلاب

وضعیت پایین‌دست حوضه و پهنه آبی در پشت سد که به‌تازگی آبیگری شده نشان از تأثیر مثبت این سازه بر جلوگیری از آب‌گرفتگی قسمت‌های پایین‌دست بود. افزایش قابل توجه مساحت دریاچه پشت این سد درست ۸ روز پس از سیلاب و کاهش یکنواخت و مجدد آب آن به وضعیت قبل از سیلاب در شکل ۱۱ نمایان است.

نتیجه‌گیری

امروزه استفاده از رادار اینترفرومتری در پایش تغییرات محیطی فراگیر شده است. در این پژوهش مشخص شد که ارزیابی و شناخت مکان و منشأ رسوبات واریزه‌ای و کمیت برداری سرعت و الگوی حرکت آنها با استفاده از رادار اینترفرومتری و روش ردیابی نقطه شروع (در مدارهای صعودی (Ascending) و نزولی (Discending)) سنجنده (Sentinel-1) میسر است. در واقع در این رویداد بارش‌های مونسونی و به دنبال آن ذوب ناگهانی برف‌چال‌های موجود در اشتران کوه، در به وقوع پیوستن سیلاب همراه با واریزه‌های یخچالی نقش مهمی را ایفا کرده بود. اما شواهد میدانی نشان داد که پاسخ‌های آبراهه‌ای به این رویداد متفاوت بوده است. با توجه به اینکه این منطقه نقش مهمی در تأمین آب شهرهای هم‌جوار (ازنا و الیگودرز) و برخی از مناطق ایران مرکزی (گلپایگان-سد ۱۵ خرداد-قم رود) دارد نتایج این پژوهش می‌تواند در مدیریت و تأمین منابع آب و مدیریت سیلاب واریزه‌ای جهت تقلیل و تعدیل خسارات احتمالی به کانال‌های انتقال آب جهت جلوگیری از وقفه آبرسانی به مناطق موردنظر سودمند باشد. همچنین ارزیابی پهنه‌های سیلابی قسمت‌های پایینی حوضه، بیانگر آن است که سدها (در این پژوهش سد کمندان) می‌توانند در معرض خطر پرشدگی رسوبات واریزی باشند، لذا می‌طلبید که در مرحله مکان‌یابی پتانسیل وقوع سیلاب واریزه‌ای موردتوجه باشد. اگرچه در این پژوهش سد کمندان که در مرحله آبیگری بوده بخش قابل‌توجهی از سیلاب واریزه‌ای را در خود ذخیره کرده و مانع از بروز خسارت به مناطق سکونت و زراعی در پایین‌دست سد شده است، امری که جزء اهداف این سد شاید تعریف نشده بود.

تقدیر و تشکر

بنا به اظهار نویسنده مسئول، این مقاله حامی مالی نداشته است.

منابع

- ۱) احمدآبادی، علی؛ فتح‌اله زاده، محمد؛ کیانی، طیبه و عمادالدین، فاطمه. (۱۳۹۷). تعیین و بررسی سیرک‌های یخچالی اشترانکوه با استفاده از شاخص نرمال شده پوشش برف (NDSI). *هیدروژئومورفولوژی*، ۱۹ (۵)، ۱۸-۱.
- ۲) پژوهشکده سوانح طبیعی. (۱۴۰۱). گزارش سیلاب مرداد ۱۴۰۱، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری.
- ۳) خبرگزاری ایرنا. (۱۴۰۱). مصاحبه با مدیرعامل شرکت آب منطقه‌ای لرستان. <https://www.irna.ir/news/84847685/>
- ۴) شرکت مدیریت منابع آب ایران، دفتر مطالعات منابع پایه آب. (۱۴۰۱). *پورتال ارائه آمار پایه*. <https://stu.wrm.ir/>
- ۵) گورابی، ابوالقاسم. (۱۴۰۱). دورسنگی در ژئومورفولوژی. تهران: انتخاب.
- ۶) گورابی، ابوالقاسم. (۱۴۰۱). ژئومورفومتری: مفاهیم، نرم‌افزار، کاربردها. تهران: انتخاب.
- ۷) یمانی، مجتبی. (۱۳۹۶). *نقشه‌های ژئومورفولوژی*. چاپ سوم، تهران: انتشارات دانشگاه تهران.

References

- 1) Abdalla Mahmoud, A., Novellino, A., Hussain, E., Marsh, S., Psimoulis, P., & Smith, M. (2020). The Use of SAR Offset Tracking for Detecting Sand Dune Movement in Sudan. *Remote Sens*, 12, 3410.
- 2) Ahmedabadi, A., Fathullah Zadeh, M., Kayani, T., & Emaduddin, F. (2017). Determining and investigating Ashtrankoh glacier cirques using the normalized snow cover index (NDSI). *Hydrogeomorphology*, 19(5), 1-18. [In Persian].
- 3) Bamler, R., & Eineder, M. (2005). Accuracy of differential shift estimation by correlation and split bandwidth interferometry for wideband and delta k SAR systems. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2(2), 151-155.
- 4) Calligaris, C., & Zini, L. (2012). *Debris Flow Phenomena: A Short Overview?*. In book: Earth Sciences, Intech.
- 5) Coe, J.A., Kean, J.W., Godt, J.W., Baum, R.L., Jones, E.S., Gochis, D.J., & Anderson, G.S. (2014). New insights into debris-flow hazards from an extraordinary event in the Colorado Front Range. *GSA Today*, 24, 4-10.
- 6) Coronese, M., Lamperti, F., Keller, K., Chiaromonte, F., & Roventini, A. (2019). Evidence for sharp increase in the economic damages of extreme natural disasters. *P. Natl. Acad. Sci. USA*, 116, 21450-21455.
- 7) Darvishi, M., Schlögel, R., Bruzzone, L., & Cuzzo, G. (2018). Integration of PSI, MAI, and Intensity-Based Sub-Pixel Offset Tracking Results for Landslide Monitoring with X-Band Corner Reflectors—Italian Alps (Corvara). *Remote Sens*, 10(3), 409.
- 8) Destro, E., Amponsah, W., Nikolopoulos, E., Marchi, L., Marra, F., Zoccatelli, D., & Borga, M. (2018). Coupled prediction of flash flood response and debris flow occurrence: Application on an alpine extreme flood event. *Jornal of Hydrology*, 558, 225-237.
- 9) Gourabi, A. (2022). *Geomorphometry: concepts, software, applications*. Tehran: Nashre entekhab. [In Persian].
- 10) Gourabi, A. (2022). *Telemetry in geomorphology*. Tehran: Nashre entekhab. [In Persian].
- 11) Handayani, L., Trisasongko, B., & Tjahjono, B. (2015). Geomorphology analysis of lava flow of Mt. Guntur in West Java using Synthetic Aperture Radar (SAR) with fully polarimetry, The 1st International Symposium on LAPAN-IPB Satellite for Food Security and Environmental Monitoring. *Procedia Environmental Sciences*, 24, 303 - 307.
- 12) Iran Water Resources Management Company, Basic Water Resources Studies Office. (2022). *basic statistics presentation portal*, <https://stu.wrm.ir/>[In Persian].
- 13) IRNA news agency. (2022). *Interview with the CEO of Lorestan Regional Water Company*. <https://www.irna.ir/news/84847685/>[In Persian].

- 14) Lee, S., An, H., Kim, M., Lim, H., & Kim, Y. (2022). A Simple Deposition Model for Debris Flow Simulation Considering the Erosion– Entrainment–Deposition Process. *Remote Sens*, 1-18.
- 15) Li, Y., Jiano, Q., Hu, X., Li, Z., Li, B., Zhang, J., Jiano, W., Luo, Y., Li, Q., & Ba, R. (2020). Detecting the slope movement after the 2018 Baige Landslides based on ground-based and space-borne radar observations. *Int J Appl Earth Obs Geoinformation*, 84, 101949
- 16) Liu, Z., Xu, B., Wang, Q., Yu, W., & Miao, Z. (2022). Monitoring landslide associated with reservoir impoundment using synthetic aperture radar interferometry: A case study of the Yalong reservoir. *Geodesy and Geodynamics*, 13, 138-150.
- 17) Lu, J., & Veci, L. (2016). *Offset Tracking Tutorial*, Array Systems Computing Inc, <http://step.esa.int/>.
- 18) Marston, R., Butler, W., & Patch, N. (2017). *Geomorphic hazards. The International Encyclopedia of Geography*. Published by John Wiley & Sons, Ltd.
- 19) McVittie, A. (2019). *Flood mapping tutorial (Sentinel-1)*. SkyWatch Space Applications Inc, <http://step.esa.int/>.
- 20) Mondini, A., Guzzetti, F., Chang, K., Monserrat, O., Martha, T., & Manconi, A. (2021). Landslide failures detection and mapping using Synthetic Aperture Radar: Past, present and future. *Earth-Science Reviews*, 216, 103574
- 21) Moreiras, S.M., Sepúlveda, S.A., Correas-González, M., Lauro, C., Vergara, I., Jeanneret, P., Junquera-Torrado, S., Cuevas, J.G., Maldonado, A., & Antinao, J.L. (2021). Debris Flows Occurrence in the Semiarid Central Andes under Climate Change Scenario. *Geosciences*, 11, 43, 1-25.
- 22) Novak, A., Tomislav, P., Levanič, T., Šmuc, A., & Kaczka, R. (2020). Debris flooding magnitude estimation based on relation between dendrogeomorphological and meteorological records. *Geomorphology*, 367, 1-12,
- 23) Palau, R., Hürlimann, M., Berenguer, M., & Sempere-Torres, D. (2019). Debris-flow early warning system at regional scale using weather radar and susceptibility mapping. *7th International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation*, At: Golden, Colorado, USA.
- 24) Research Institute of Natural Disasters. (2022). *August 1401 flood report, Ministry of Science, Research and Technology*. [In Persian].
- 25) Riveros, N., Euillades, L., Euillades, P., Moreiras, S., & Balbarani, S. (2013). Offset tracking procedure applied to high resolution SAR data on Discussions Viedma Glacier, Patagonian Andes, Argentina, *Adv. Geosci.*, 35, 7–13.
- 26) Sati, V. (2022). Glacier bursts-triggered debris flow and flash flood in Rishi and Dhaulti Ganga valleys: A study on its causes and consequences. *Natural Hazards Research*, 2, 33-40.
- 27) Schraml, K., Kogelnig, B., Scheidl, C., Stoffel, M., & Kaitna, R. (2013). Estimation of debris flood magnitudes based on dendrogeomorphic data and semi-empirical relationships. *Geomorphology*, 201, 80-85.
- 28) Seo, S., Park, Y., Kim, K. (2020). Tracking flood debris using satellite-derived ocean color and particle-tracking modeling. *Marine Pollution Bulletin*, 161, 1-10
- 29) Sibandze, P., Mhangara, P., Odindi, J., & Kganyago, M. (2014). A Comparison of Normalised Difference Snow Index (NDSI) and Normalised Difference Principal Component Snow Index (NDPCSI) techniques in distinguishing snow from related cover types. *South African Journal of Geomatics*, 3(2):197-209.
- 30) Singhroy, V., Li, J., Blais –Stevens, A., & Fobert, M. (2018). I NSAR MONITORING OF PIPELINE ROUTES. *IGARSS 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 212-215.
- 31) Stock, J.D., & Dietrich, W.E. (2006). Erosion of steepland valleys by debris flows. *Geological Society of America Bulletin*, 118, (9–10), 1125–1148.

- 32) Stoffel, M., & Wilford, D.J. (2012). Hydrogeomorphic processes and vegetation: disturbance, process histories, dependencies and interactions. *Earth Surface Processes and Landforms* 37, 9–22.
- 33) Strozzi, T., Caduf, R., Jones, N., Barboux, C., Delaloye, R., Bodin, X., Käab, A., Mätzler, E., & Schrott, L. (2020). Monitoring Rock Glacier Kinematics with Satellite Synthetic Aperture Radar. *Remote Sens.*, 12, 559.
- 34) Tay, C., Yun, S., Chin, S., Bhardwaj, A., Jung, J., & Hill, E. (2020). *Rapid food and damage mapping using synthetic aperture radar in response to Typhoon Hagibis, Japan*, <http://www.nature.com/scientificdata>.
- 35) Trogrli, R., Donovan, A., & Malamud, B. (2022). Invited perspectives: Views of 350 natural hazard community members on key challenges in natural hazards research and the Sustainable Development Goals. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 22, 2771–2790.
- 36) Wilford, D., Sakals, M., Innes, J., Sidle, R., Bergerud, W. (2004). Recognition of debris flow, debris flood and flood hazard through watershed morphometrics. *Landslides* 1, 61–66.
- 37) WMO (World Meteorological Organization): WMO Atlas of Mortality and Economic Losses from Weather, Climate and Water Extremes (1970–2019) (WMO-No. 1267), WMO, Geneva, 90 pp., https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10989 (last access: 1 May 2022).
- 38) Xu, Y., Lu, Z., Schulz, W. H., & Kim, J. (2020). Twelve Year Dynamics and Rainfall Thresholds for Alternating Creep and Rapid Movement of the Hooskanaden Landslide From Integrating InSAR, Pixel Offset Tracking, and Borehole and Hydrological Measurements. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 125.
- 39) Yamani, M. (2016). *Geomorphological maps*. Third edition, Tehran: Tehran University Press. [In Persian].
- 40) Zhao, G., Wang, L., Deng, K., Wang, M., Xu, Y., Zheng, M., & Luo, Q. (2022). An Adaptive Offset-Tracking Method Based on Deformation Gradients and Image Noises for Mining Deformation Monitoring. *Remote Sens.* 13, 2958.