



# Evaluation of the Vertical Piers Impact on Debris Flow Hazard Mitigation Using a Numerical Model

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Galoie M. <sup>1</sup> PhD

Motamedi A. <sup>2\*</sup> PhD

### How to cite this article

Galoie M, Motamedi A. Evaluation of the Vertical Piers Impact on Debris Flow Hazard Mitigation Using a Numerical Model. Geographical Research. 2023;38(2):373-380.

## ABSTRACT

**Aims** Debris Flow is a natural hazard phenomenon that frequently manifests suddenly, inflicting substantial economic and human losses. To date, numerous methodologies have been proposed to manage debris flow; however, the intricate nature of the governing equations renders the analysis of debris flow an exceedingly arduous and nearly unattainable task. The principal objective of this investigation was to assess the efficacy of vertical piers in mitigating debris flow.

**Methodology** This particular study, characterized as an empirical-computational endeavor, transpired between the months of April and August in 2023. Its focus was centered on the Solqan region, situated in the northwestern vicinity of Tehran, an area notably susceptible to debris flow. Within this study, the influence of truncated concrete piers on the reduction of flow velocity and blockage was explored and replicated through employment of the RAMMS numerical model. To accomplish this, a variety of pier arrangements were considered at different junctures along the pathway of flow, with subsequent assessment of the modeling outcomes.

**Findings** Among all the simulated scenarios, the scenario in which the piers were organized in a triangular shape pointing downwards exhibited the most noticeable impact on the reduction of momentum, inundation area, and run-out distance. Additionally, it is worth noting that if these piers were positioned in the lower section of the hill slope, their efficacy in halting the flow would be significantly enhanced.

**Conclusion** The utilization of vertical piers along the course of the debris flow can yield a substantial decrease in the momentum, inundation area, and run-out distance associated with the debris flow phenomenon. The influence exerted by the collective presence of piers on the flow is contingent upon the configuration of the piers, their dimensions, as well as the spacing between them. By employing numerical models the optimal scenario can be determined and implemented.

**Keywords** Debris Flow, RAMMS Software, Sulqan's District, Debris Hazard Mitigation, Debris Flow Modeling

## CITATION LINKS

[Armanini & Michiue, 1997] Recent developments on ...; [Behrad *et al.*, 2019] Ecotourism carrying capacity evaluation with emphasis ...; [Bezjak *et al.*, 2019] Impact of a random sequence of debris flows on ...; [Cui *et al.*, 2015] Experimental analysis on the impact force of viscous debris flow; [De Finis *et al.*, 2018] Anomalous alpine fans: From the genesis to ...; [Di Perna *et al.*, 2022] Empirical formulation for debris flow impact ...; [Etemad Online, 2022] A Huge landslide in Chalous road disconnected ...; [Fan *et al.*, 2021] Assessment of land cover resolution impact on flood ...; [Fan *et al.*, 2021] Impact of C factor of USLE technique on the accuracy of soil erosion modeling in an elevated mountainous area (case study: ...; [Farsnews, 2023] Some parts of Chalous road ...; [Frank *et al.*, 2017] Debris-flow modeling at Meretschibach and Bondasca catchments, Switzerland: sensitivity testing of ...; [Galoie & Motamedi, 2021] Optimization of export coefficient model based on precipitation and terrain ...; [Gong *et al.*, 2020] Characteristics of a debris flow disaster and its mitigation countermeasures in Zechawa Gully, ...; [Hussin *et al.*, 2012] Parameterization of a numerical 2-D debris flow model with entrainment: A case study of the Faucon catchment, ...; [Jakob & Hungr, 2005] Debris-flow hazards and ...; [Ji *et al.*, 2020] A multivariate statistical method for susceptibility analysis of debris flow in ...; [King, 2018] What is a debris ...; [Krušić *et al.*, 2019] Influence of DEM resolution on numerical modeling of debris flows ...; [RAMMS, 2022] RAMMS debris flow user's manual ...; [Takahashi, 2007] Debris flow: Mechanics, prediction and ...; [Takahashi & Das, 2014] Debris flow: Mechanics, prediction and ...; [Termini & Fichera, 2020] Experimental analysis of velocity distribution in a coarse-grained debris flow: A modified ...; [Wang, 2013] Lessons learned from protective measures associated with the 2010 Zhouqu ...; [Xiong *et al.*, 2016] Effectiveness of debris flow mitigation strategies in ...; [Zhao *et al.*, 2018] Experimental study of the debris flow slurry impact and ...; [Zhou *et al.*, 2019] Empirical relationships for the estimation of debris flow runout distances on depositional fans in ...; [Zimmermann *et al.*, 2020] 2D runout modeling of hillslope debris flows, based on well-documented ...

<sup>1</sup> Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

<sup>2</sup> Civil Engineering Department, Buein Zahra Technical University, Qazvin, Iran

### \*Correspondence

Address: Civil Engineering Department, Buein Zahra Technical University, Imam Khomeini Boulevard, Buein Zahra, Qazvin, Iran. Postal Code: 3451745346

Phone: +98 (28) 33894000

Fax: +98 (28) 33894121

artemis.mot@bzte.ac.ir

### Article History

Received: August 8, 2023

Accepted: September 20, 2023

ePublished: October 2, 2023

## ارزیابی اثر پایه‌های قائم بر کاهش خطر ناشی از جریان واریزه‌ای با استفاده از یک مدل عددی

مجید گلوئی PhD

گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

آرتیمس معتمدی\* PhD

گروه مهندسی عمران، مرکز آموزش عالی فنی و مهندسی بوئین زهرا، قزوین، ایران

### چکیده

**اهداف:** یکی از پدیده‌های مخرب طبیعی که اغلب به صورت ناگهانی رخ می‌دهد و باعث خسارت‌های شدید مالی و جانی می‌شود، جریان واریزه‌ای است. روش‌های مختلفی به منظور کنترل جریان واریزه‌ای پیشنهاد شده است اما تحلیل جریان واریزه‌ای با وجود معادلات پیچیده حاکم بر آن بسیار دشوار و تقریباً غیرممکن است. هدف اصلی پژوهش حاضر ارزیابی تاثیر پایه‌های عمودی بر کنترل جریان واریزه‌ای است.

**روش‌شناسی:** این پژوهش از نوع تجربی-محاسباتی بوده و در سال ۱۴۰۲ در منطق سولقان واقع در شمال غرب شهر تهران که یکی از مناطق مستعد وقوع پدیده جریان واریزه‌ای بود انجام شد. در این پژوهش اثر پایه‌های کوتاه بتنی بر کاهش سرعت جریان و متوقف نمودن آن با استفاده از مدل عددی RAMMS و از طریق شبیه‌سازی و نحوه کنترل جریان‌های واریزه‌ای بررسی شد. سپس چیدمان مختلفی از پایه‌ها در محل‌های مختلف مسیر حرکت جریان در نظر گرفته شد و نتایج مدل‌سازی آنها مورد ارزیابی قرار گرفت.

**یافته‌ها:** فرارگیری پایه‌ها به صورت ترکیب مثلثی با راس به سمت پایین‌دست، موثرترین حالت بود و نقش مهمی در کاهش اندازه حرکت، پهنه تاثیر و طول جابه‌جایی جریان داشت. همچنین در حالتی که این پایه‌ها در قسمت پایین دامنه قرار داده شدند، عملکرد بسیار مناسب‌تری در توقف جریان داشتند.

**نتیجه‌گیری:** به‌کارگیری پایه‌های قائم در مسیر جریان واریزه‌ای می‌تواند باعث کاهش چشمگیر اندازه حرکت، پهنه تاثیر و فاصله جابه‌جایی جریان واریزه‌ای شود. میزان تاثیر گروه پایه‌ها بر جریان، بستگی به نحوه آرایش پایه‌ها، ابعاد و فاصله بین آنها دارد. با استفاده از مدل عددی، می‌توان بهترین گزینه را انتخاب نمود.

**کلیدواژه‌ها:** جریان واریزه‌ای، نرم‌افزار RAMMS، منطقه سولقان، کنترل جریان واریزه‌ای، مدل‌سازی جریان واریزه‌ای

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۱۷

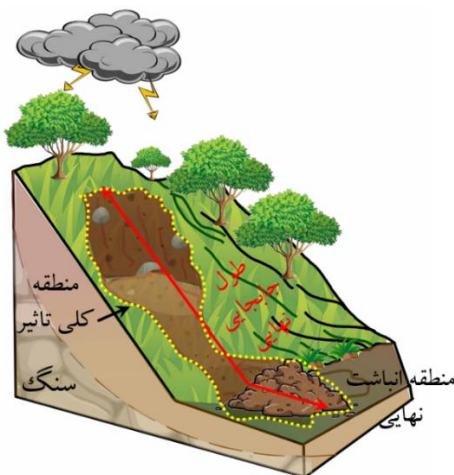
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۲۹

\*نویسنده مسئول: artemis.mot@bzte.ac.ir

### مقدمه

جریان واریزه‌ای یکی از پدیده‌های مخرب طبیعی و زیست‌محیطی است که در آن حجم عظیمی از مخلوط آب، سنگ، خاک و گیاهان تحت اثر نیروی وزن بر روی یک بستر شیب‌دار به حرکت درآمده و معمولاً در انتهای دامنه شیب متوقف می‌شود [King, 2018]. این پدیده معمولاً برای شروع حرکت به یک نیروی محرک نیاز دارد که در اغلب موارد سیلاب ناشی از بارندگی‌های شدید یا ذوب سریع برف بوده و در برخی موارد نیز زلزله و یا عوامل انسانی (مانند جنگل‌زدایی و تغییر شیب طبیعی زمین) عامل اصلی حرکت هستند [Takahashi, 2007]. در این پدیده، فشار و اندازه حرکت ناشی

از حرکت ذرات ریزدانه و آب به‌حدی است که سنگ‌های درشت دانه و تخته سنگ‌های بزرگ را به دلیل ناپایداری خاک و بستر زیرین آن به حرکت درآورده و به دلیل اصطکاک شدید با سطح خاک، باعث فرسایش بیشتر مسیر در ضمن حرکت جریان می‌شوند [Takahashi & Das, 2014]. از این رو، تحلیل جریان واریزه‌ای و برآورد پارامترهای مربوط به شکل‌گیری آن نظیر فاصله کلی جابه‌جایی مواد از نقطه شروع تا محل انباشت نهایی، پهنه تاثیر کل، حداکثر عمق جریان و غیره (شکل ۱)، بدون شناخت کافی از ضرایب اصطکاک بستر و همچنین ذرات داخل توده امکان‌پذیر نیست [Armanini & Michiue, 1997].



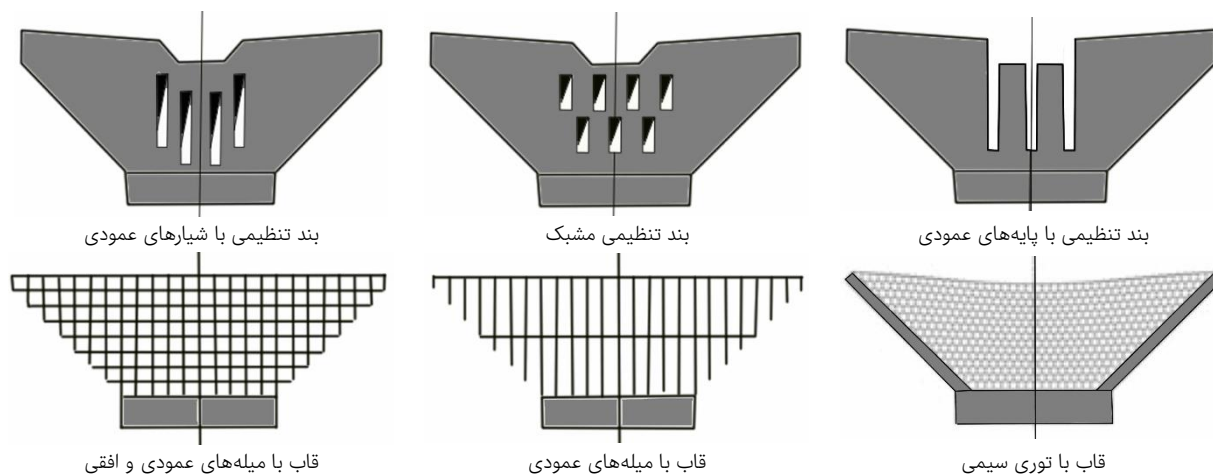
شکل ۱) پارامترهای مهم مربوط به شکل‌گیری نهایی جریان واریزه‌ای از قبیل فاصله جابه‌جایی مواد از نقطه شروع تا محل انباشت نهایی و پهنه تاثیر کل



شکل ۲) نمایی از پدیده جریان واریزه‌ای و رانش زمین در جاده چالوس، خرداد ۱۴۰۲ [Farsnews, 2023]

در ایران نیز پدیده رانش زمین و جریان واریزه‌ای به طور مکرر و در سال‌های مختلف و به خصوص با شروع بارندگی‌های شدید بهاری به وقوع می‌پیوندد که در آخرین مورد آن در ۱۹ خرداد ۱۴۰۲ (شکل ۲)، حجم عظیمی از گل و سنگ به حجم تخمینی ۱/۶ میلیون متر مکعب بخش وسیعی از محورهای مواصلاتی شمال کشور را در بر گرفت به طوری که عمق انباشت آن در برخی مناطق به بیش از ۶ متر رسیده بود و به دلیل ورود بخشی از این گل‌ولای به مخزن سد

وقوع پدیده، دوره بازگشت‌های وقوع آن و غیره توسط محققان مختلف پیشنهاد شده است [Jakob & Hungr, 2005]. برخی از کاربردی‌ترین این روش‌ها عبارت‌اند از ساخت بندهای تنظیمی، بندهای مشبک یا شیاردار، شبکه توری یا سیمی، پایدارسازی شیب و یا ترکیبی از موارد فوق که باعث کندشدن جریان و یا توقف کامل آن می‌شود (شکل ۳).



شکل ۳) برخی از معمول‌ترین سازه‌هایی که در مسیر حرکت جریان واریزه‌ای ساخته می‌شوند تا باعث توقف کامل و یا کاهش جریان شوند [Jakob & Hungr, 2005]

دلایل مختلفی از قبیل کوچک‌مقیاس‌بودن و عدم امکان در نظر گرفتن شرایط واقعی (مانند توپوگرافی، شیب، پیچ و خم مسیر حرکت، جنس خاک و سنگ و غیره)، کارایی مناسبی نداشته و نتایج آنها قابل استفاده در همه نقاط دنیا نیست [Cui et al., 2015; Zhao et al., 2018; Termini et al., 2020]. همچنین، نتایج مربوط به استفاده از روش‌های مبتنی بر روابط تجربی، که اغلب از تعداد محدودی داده‌های آزمایشگاهی و یا مشاهده‌ای استخراج می‌شوند نشان داده است که این روابط عموماً ضعیف بوده و دارای خطای زیادی هستند [Zhou et al., 2019; Ji et al., 2020; Di Perna et al., 2022]. امروزه با پیشرفت کامپیوترها و روش‌های عددی، حل معادلات پیچیده حاکم بر این پدیده با استفاده از ساده‌سازی امکان‌پذیر شده است به طوری که می‌توان جریان واریزه‌ای را در توپوگرافی‌های گوناگون شبیه‌سازی نمود. نرم‌افزار زمس (RAMMS: The Rapid Mass Movement Simulation) یکی از مدل‌های عددی است که در مرکز تحقیقات برف و بهمن کشور سوئیس (WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF) توسعه یافته است و در سال‌های اخیر به دلیل سادگی در یادگیری، کاربرپسند بودن، نیاز به داده‌های اندک ورودی و نمایش گرافیکی خروجی‌ها، بسیار مورد توجه محققین، مخصوصاً در اروپا، قرار گرفته است. این مدل برای شروع شبیه‌سازی جریان واریزه‌ای به یک نقشه دیجیتالی ارتفاعی (DEM) از منطقه مطالعاتی، تعریف ضرایب اصطکاکی مربوط به سیال ولمی (Voellmy) و هیدروگراف جریان ورودی دارد [RAMMS, 2022]. برخی از محققان با مطالعات خود نشان دادند که این مدل

کرج، آب برخی مناطق تهران به مدت ۶ روز با افت فشار و کدورت مواجه شد. در این رخداد، میزان خسارات وارده و حجم مواد انباشته‌شده به حدی زیاد بود که پاکسازی آن در برخی از محورها بیش از یک ماه به طول انجامید [Etemad Online, 2022]. به منظور کاهش مخاطرات این پدیده، روش‌های مختلف سازه‌ای بسته به توپوگرافی منطقه، نوع مواد تشکیل‌دهنده جریان، شدت

هر کدام از این روش‌ها مزایا و معایب خاص خود را دارد و بررسی‌ها نشان داده است که کارایی برخی از آنها بسیار کم و حتی ممکن است وجود آنها خطرآفرین نیز باشد. به عنوان مثال، در ۸ آگوست ۲۰۱۰، سد تنظیمی جریان واریزه‌ای در دره سانیانو شهر ژوچو چین در اثر فشار ناشی از جریان واریزه‌ای شکست و باعث ویرانی بیش از ۲۰۰ ساختمان و مرگ ۱۷۵۶ نفر شد [Wang, 2013]. همچنین، استفاده از شبکه توری یا سیمی نیز ممکن است به دلیل فرسودگی و یا طراحی نامناسب، باعث ناپایداری در پایه‌ها، پارگی شبکه و یا شکست شود [Gong et al., 2020]. البته برخی از محققین نیز در مطالعات خود روش‌هایی به منظور مهار خطر سیلاب ناشی از شکست سد ارائه نموده‌اند که تاثیر فراوانی بر کاهش عمق و سرعت پیشانی موج ناشی از شکست سد و یا بندهای تنظیمی دارد [Fan et al., 2020; Fan et al., 2021].

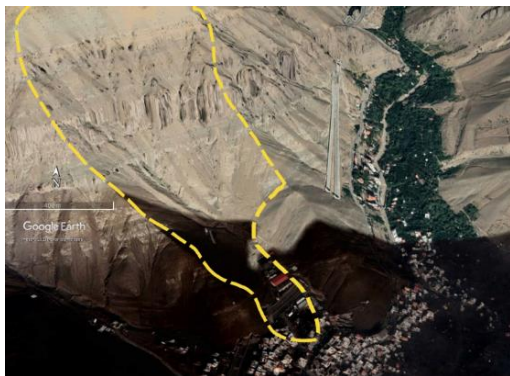
طراحی مناسب هر یک از روش‌های فوق و همچنین بررسی کارایی آنها نیاز به شناخت دقیق از نیروهای وارده، سرعت، عمق و سایر پارامترهای مربوط به جریان واریزه‌ای دارد [Xiong et al., 2016]. از آنجا که جریان واریزه‌ای سیالی چندفازی و غیرهمگن است و ساختار حرکتی پیچیده‌ای دارد و در پدیده‌های مختلف رفتارهای متفاوتی از خود بروز می‌دهد، معادلات حاکم بر آن در حالت کلی بسیار پیچیده و حل تحلیلی آنها بسیار دشوار و تقریباً غیرممکن است. از این رو، به منظور برآورد پارامترهای جریان، از روش‌های آزمایشگاهی، ایجاد معادلات تجربی مبتنی بر داده‌های آماری و یا مدل‌سازی عددی استفاده می‌شود. بررسی‌ها نشان داده است که استفاده از روش‌های آزمایشگاهی به



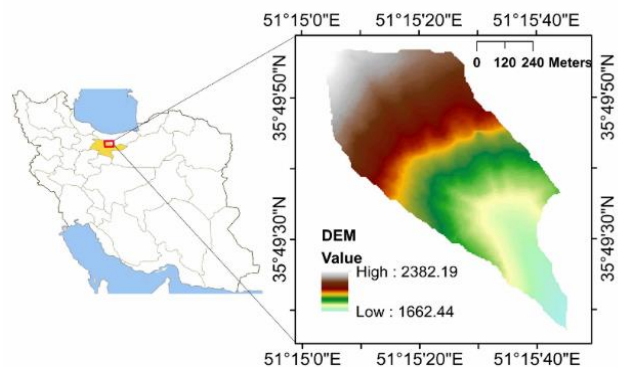
قرارگیری و محل نصب آنها می‌تواند باعث تغییرات زیادی در پارامترهای جریان شود.

### روش‌شناسی

پژوهش حاضر از نوع تجربی-محاسباتی بوده و در نیمه اول سال ۱۴۰۲ انجام شد. محدوده مطالعاتی پژوهش حاضر قسمتی از روستای سولقان واقع در شمال غرب شهر تهران است که به دلیل قرارگیری در قسمت انتهایی دامنه یک کوه با شیب نسبتاً تند (۲۹/۵ درجه)، در مواقعی که بارندگی شدید به وقوع می‌پیوندد، شاهد جریان شدید سیلاب همراه با گل‌ولای فراوان است. شکل ۴ نقشه DEM و گوگل ارث (Google Earth) منطقه مورد نظر را نمایش می‌دهد.



(ب)



(الف)

شکل ۴) موقعیت محدوده مطالعاتی روستای سولقان: (الف) نقشه DEM و مختصات محدوده مطالعاتی؛ (ب) نمایش محدوده محاسباتی در گوگل ارث

شکل در جهت  $x$  و  $y$  را نشان می‌دهند و از نقشه DEM به دست می‌آیند؛  $k_{a/p}$  ضریب فشار زمین است که در صورت استفاده از مدل اصطکاکی سیال ولمی، مقدار آن برابر با ۱ است.  $S_{gx} = g_x H$  و  $S_{gy} = g_y H$  شتاب جاذبه موثر زمین در دو جهت  $x$  و  $y$  و  $g(g_x, g_y, g_z)$  شتاب جاذبه زمین و  $S_f$  از روابط زیر به دست می‌آید (رابطه‌های ۴ و ۵) [Frank et al., 2017].

رابطه (۴)

$$S_{fx} = U_x \left( \mu g_z H + \frac{g|U|^2}{\xi} \right)$$

رابطه (۵)

$$S_{fy} = U_y \left( \mu g_z H + \frac{g|U|^2}{\xi} \right)$$

که در این رابطه،  $\mu$  ضریب اصطکاک خشک کولمب و  $\xi$  ضریب اصطکاک آشفته-لج در مدل اصطکاکی سیال ولمی هستند. دامنه تغییرات ضرایب اصطکاکی فوق بسیار وسیع است اما براساس مدل‌سازی‌های انجام‌شده در نرم‌افزار RAMMS و واسنجی آنها طبق داده‌های واقعی از جریان واریزه‌ای، مشاهده شده است که ضریب اصطکاک  $\mu$  معمولاً در دامنه ۰/۱ تا ۰/۵ و ضریب  $\xi$  در محدوده ۲۰۰ تا ۸۰۰ تغییر می‌نماید [RAMMS, 2022].

وابستگی و حساسیت شدیدی نسبت به داده‌های ورودی دارد که ممکن است باعث ایجاد خطا در نتایج شود [De Finis et al., 2018; Bezak et al., 2019; Krušić et al., 2019; Zimmermann et al., 2020; Frank et al., 2017]. اما، استفاده از آن می‌تواند باعث درک بهتر پارامترهای جریان و شبیه‌سازی روند حرکتی جریان بر روی بستر تقریباً واقعی از منطقه مورد مطالعه شود.

هدف از تحقیق حاضر، ارزیابی میزان تاثیر و کارایی استفاده از پایه‌های بتنی قائم بر کنترل جریان واریزه‌ای با استفاده از مدل عددی RAMMS است. استفاده از پایه‌های قائم در مسیر جریان سیالات نقش بسزایی بر پارامترهای جریان دارد و تعداد، آرایش

### معادلات حاکم بر جریان واریزه‌ای در مدل RAMMS

معادلات حاکم در نرم‌افزار RAMMS، معادلات دو بعدی میانگین‌گیری‌شده در عمق هستند که به صورت معادله بقای جرم و اندازه حرکت دو جهت  $x$  و  $y$  مطابق زیر بیان می‌شوند (رابطه ۱ تا ۳) [Hussin et al., 2012].

رابطه (۱)

$$\partial_t H + \partial_x (HU_x) + \partial_y (HU_y) = \dot{Q}(x, y, t)$$

رابطه (۲)

$$\partial_t (HU_x) + \partial_x \left( c_x HU_x^2 + g_z k_{a/p} \frac{H^2}{2} \right) + \partial_y (HU_x U_y) = S_{gx} - S_{fx}$$

رابطه (۳)

$$\partial_t (HU_y) + \partial_x (HU_x U_y) + \partial_y \left( c_y HU_y^2 + g_z k_{a/p} \frac{H^2}{2} \right) = S_{gy} - S_{fy}$$

در این روابط،  $\dot{Q}(x, y, t)$  شار جرمی عبوری،  $H(x, y, t)$  عمق جریان،  $U(x, y, t)$  سرعت جریان،  $U_x$  و  $U_y$  به ترتیب سرعت‌های میانگین‌گیری‌شده در عمق در دو جهت  $x$  و  $y$  و  $c_x$  و  $c_y$  فاکتورهای

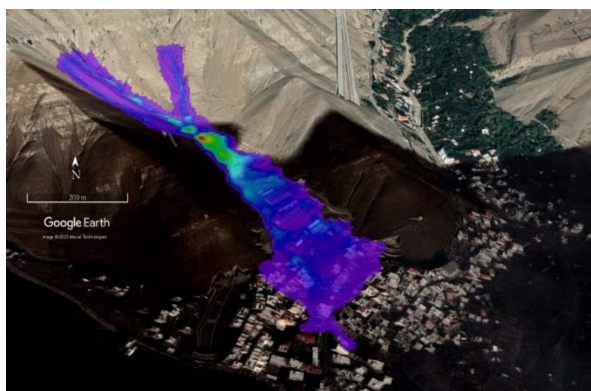
از آنجا که هدف از نصب پایه‌ها، کاهش اندازه حرکت ذرات تشکیل‌دهنده جریان (به خصوص سنگ‌های درشت‌دانه و تخته سنگ‌های موجود در پیشانی موج جریان) است، ابعاد پایه‌ها و فاصله بین آنها نیز تاثیر بسزایی بر عملکرد گروهی آنها دارد. در این پژوهش، قطر و ارتفاع این پایه‌ها به ترتیب برابر با ۱ و ۲ متر انتخاب شد و برای تله‌اندازی و کاهش هر چه بیشتر انرژی جنبشی ذرات، فاصله بین پایه‌ها نیز بین ۲ تا ۵ متر متغیر در نظر گرفته شد. شکل ۶ نحوه عملکرد پایه‌ها در کاهش اندازه حرکت ذرات درشت‌دانه و توقف آنها را در فضای بین پایه‌ها نشان می‌دهد.



شکل ۶) نحوه عملکرد گروه پایه‌ها در کاهش اندازه حرکت ذرات درشت‌دانه جریان و توقف آنها در فضای بین پایه‌ها

### یافته‌ها

جریان واریزه‌ای با استفاده از نرم‌افزار RAMMS در منطقه مطالعاتی و در حالتی که هیچ سازه کنترلی در مسیر جریان قرار ندارد، مدل‌سازی شد. برای این منظور از نقشه DEM با ابعاد سلول ۵ متر استفاده شد که دارای دقت نسبتاً مطلوبی در شبیه‌سازی این پدیده است. نتایج مربوط به مدل‌سازی به صورت پهنه تاثیر کل جریان در شکل ۷ و در محیط گوگل ارث نمایش داده شده است تا محل‌های تحت خطر مشخص شوند. اگرچه در مدل‌سازی از زمان ۱۵۰۰ ثانیه استفاده شد اما طبق شبیه‌سازی انجام‌شده در نرم‌افزار RAMMS، جریان واریزه‌ای در حدود زمان ۹۴۰ ثانیه به دلیل رسیدن اندازه حرکت جریان به صفر، کاملاً متوقف شد.



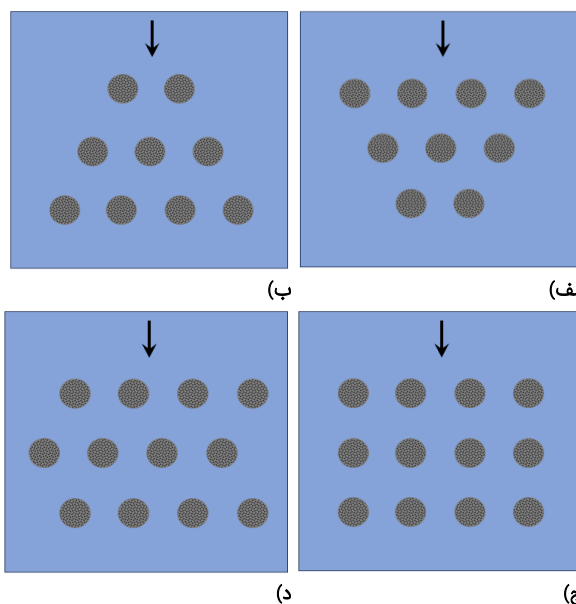
شکل ۷) نمایش پهنه تاثیر جریان واریزه‌ای در گوگل ارث در حالتی که هیچ سازه کنترلی وجود ندارد

### شرایط اولیه

نرم‌افزار RAMMS برای مدل‌سازی جریان واریزه‌ای به دو روش تعریف هیدروگراف ورودی یا عمق فرسایش منطقه محاسباتی عمل می‌نماید. در این تحقیق برای مدل‌سازی جریان واریزه‌ای از روش هیدروگراف استفاده شده است که در این روش هیدروگراف ورودی براساس داده‌های مشاهده‌ای فراوان از پدیده‌های جریان واریزه‌ای به صورت ۳ و یا ۴ نقطه‌ای تعریف می‌شود که روش ۳ نقطه‌ای آن معمول‌تر است [RAMMS, 2022]. حجم کل جریان با توجه به حوضه آبریز مورد مطالعه برابر با ۲۰۰۰۰ متر مکعب بود. براساس این حجم، نرم‌افزار به طور خودکار هیدروگراف ۳ نقطه‌ای را محاسبه و بدین صورت در نظر می‌گیرد: نقطه اول (زمان صفر) دارای دبی صفر و سرعت ۲ متر بر ثانیه، نقطه اوج (زمان ۵ ثانیه) دارای دبی ۳۸۲ متر مکعب بر ثانیه و سرعت ۵ متر بر ثانیه، نقطه سوم (زمان ۱۰۴ ثانیه) دبی صفر و سرعت ۱ متر بر ثانیه.

سایر پارامترهای مورد نیاز برای مدل‌سازی بدین صورت در نظر گرفته شدند: مدت‌زمان مدل‌سازی ۱۵۰۰ ثانیه، جرم حجمی سیال ۲۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، ضریب اصطکاک خشک-کولمب  $(\mu) 0.2$  و ضریب اصطکاک لزج-آشفته  $(\xi) 200$  متر بر مجذور ثانیه. همچنین، به منظور شبیه‌سازی هرچه دقیق‌تر توپوگرافی و در نظر گرفتن اثرات ناشی از پیچ و خم مسیر جریان بر حرکت جریان واریزه‌ای، گزینه انحنا مسیر حرکت و شتاب‌های ناشی از آن نیز در مدل‌سازی در نظر گرفته شده‌اند.

علاوه بر موارد فوق و به منظور ارزیابی اثر پایه‌های بتنی قائم بر پارامترهای جریان، الگوهای مختلفی از آرایش پایه‌ها در نظر گرفته شده است و جریان واریزه‌ای در اطراف آنها شبیه‌سازی شده است تا براساس نتایج مدل عددی، بهترین و موثرترین الگو انتخاب شود. الگوهای استفاده شده در شکل ۵ نمایش داده شده‌اند.



شکل ۵) الگوهای مختلف قرارگیری پایه‌های قائم، به منظور شبیه‌سازی جریان واریزه‌ای در اطراف آنها

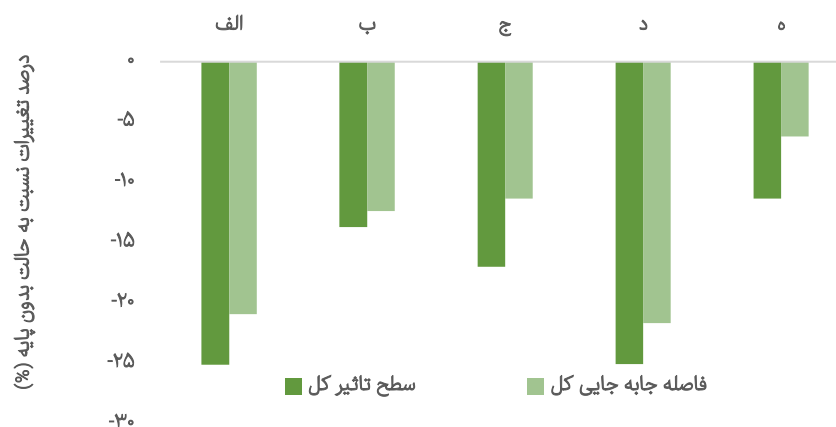
با توجه به نمودار ۱ و شکل ۵، معلوم می‌شود که قرارگرفتن پایه‌ها در شیب تند بالادست جریان (حالت ه)، تاثیر قابل توجهی بر کنترل جریان در مقایسه با سایر حالت‌ها نداشته است. علت آن این است که اگرچه جریان در شیب تند بالادست پس از برخورد به پایه‌ها مقداری از انرژی جنبشی خود را از دست می‌دهد اما مجدداً در شیب تند سرعت گرفته و تاثیر پایه‌ها کم خواهد شد. در این حالت، پهنه تاثیر ۱۲/۳٪ و طول جابه‌جایی ۶/۸٪ کمتر از حالت بدون پایه است. اما با قرارگیری این پایه‌ها در شیب ملایم پایین‌دست، در اثر برخورد ذرات با پایه‌ها، مقدار زیادی از انرژی جنبشی مستهلک شده و به دلیل شیب کمتر این ناحیه نسبت به بالادست، سرعت آن افزایش پیدا نکرد و در فاصله کوتاهی متوقف شد. در این وضعیت، حالت‌هایی که پایه‌های تداخلی نامنظم داشتند به دلیل برخوردهای متوالی ذرات با پایه‌ها و تله‌اندازی کافی، تاثیر بیشتری بر کاهش پهنه تاثیر و طول جابه‌جایی نهایی داشتند. حالت ج تاثیر زیادی بر جریان نداشت زیرا پایه‌ها به طور منظم در ردیف‌های متوالی قرار گرفته بودند و در فاصله آزاد بین پایه‌هایی که در راستای جریان قرار داشتند برخوردی بین ذرات و پایه‌ها صورت نمی‌گرفت. در این حالت، پهنه تاثیر ۱۶/۸٪ و طول جابه‌جایی ۱۱/۴٪ کمتر از حالت بدون پایه بود. همچنین در حالت ب، به دلیل اینکه جریان پس از برخورد به اولین پایه‌ها در راس مثلث، به اطراف منحرف می‌شد و این عمل باعث می‌شد تا برخوردهای کمتری با پایه‌های موجود در ردیف‌های بعدی داشته باشد، عملاً تاثیر قابل توجهی بر جریان نداشته و روش مناسبی نخواهد بود. در این حالت، پهنه تاثیر ۱۳/۱٪ و طول جابه‌جایی ۱۲/۲٪ کمتر از حالت بدون پایه بود.

با مقایسه شکل‌های ۴ و ۷، مشخص می‌شود که جریان واریزه‌ای بخش نسبتاً زیادی از ساختمان‌های نزدیک دامنه کوه را تحت تاثیر قرار داده بنابراین به منظور جلوگیری از خسارت‌های ناشی از این پدیده به سازه‌های کنترل‌کننده جریان در بالادست نیاز است. به منظور برآورد میزان تاثیر پایه‌های قائم به عنوان یک سازه کنترلی جریان، مدل‌سازی جریان واریزه‌ای در منطقه فوق با واردنمودن الگوهای مختلف از پایه‌های قائم مجدداً تکرار شد. در این مرحله برای مقایسه نتایج مربوط به هر یک از این الگوها با حالتی که هیچ سازه کنترلی وجود ندارد و درک میزان تاثیر هر یک از این الگوها بر پارامترهای جریان واریزه‌ای، از رابطه درصد تغییرات استفاده شد (رابطه ۶) [Fan et al., 2021; Galoie & Motamedi, 2021].

رابطه ۶)

$$R = \left( \frac{P_n - P_0}{P_0} \right) \times 100$$

که در آن R درصد تغییرات،  $P_n$  و  $P_0$  به ترتیب مقدار یک پارامتر یکسان در خروجی مربوط به حالت بدون پایه و حالت پایه‌دار است. پس از مدل‌سازی هر یک از الگوها، درصد تغییرات برای دو پارامتر مهم جریان (پهنه کل تاثیر جریان و فاصله کل جابه‌جایی) که نقش زیادی در برآورد مناطق آسیب‌پذیر دارد، محاسبه شد (نمودار ۱). لازم به توضیح است که الگوی "ه" که در نمودار ۱ آورده شده است مربوط به حالتی است که در آن پایه‌های قائم در مسیر حرکت جریان و در شیب بالادست و نزدیک محل شروع جریان قرار داده شده باشد سایر حالت‌ها همگی در شیب ملایم پایین‌دست قرار گرفتند.



نمودار ۱) درصد تغییرات پارامترهای پهنه کل تاثیر جریان و فاصله کل جابه‌جایی در الگوهای مختلف پایه‌های قائم (شکل ۵) نسبت به حالت بدون پایه

راس رو به پایین‌دست بود، بهترین گزینه برای مهار جریان واریزه‌ای است. در این حالت پهنه تاثیر ۲۵/۱٪ و طول جابه‌جایی ۲۰/۸٪ کمتر از حالت بدون پایه بود که مقدار قابل توجهی است. البته می‌توان با تغییر در تعداد پایه‌ها و یا فاصله بین آنها این مقدار تاثیر را بیش از پیش نیز افزایش داد.

از میان همه حالت‌های در نظر گرفته‌شده، حالت‌های الف و د بیشترین کارایی را در مهار جریان واریزه‌ای و کاهش توام پهنه تاثیر و طول جابه‌جایی جریان داشتند. با توجه به اینکه اختلاف بین نتایج این دو حالت بسیار اندک و تقریباً شبیه به هم بودند، بنابراین حالت الف به دلیل تعداد کمتر پایه که به صورت آرایش مثلثی با

قرارگیری پایه‌ها و فاصله بین آنها نقش قابل توجهی بر پارامترهای مربوط به جریان واریزه‌ای دارد. در این تحقیق اگرچه برای همه حالات‌ها از فواصل یکسان بین پایه‌ها استفاده شد تا تفاوت بین آرایش‌های مختلف قرارگیری برآورد شود، اما می‌توان با تغییر در فواصل پایه‌ها، عملکرد آنها را بهبود بخشید.

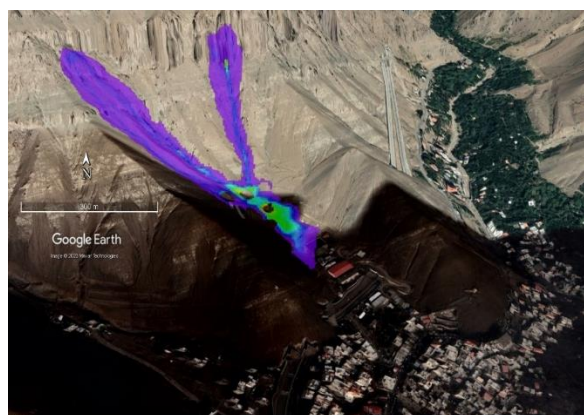
استفاده از پایه‌ها در مهار جریان واریزه‌ای چندین مزیت نسبت به حالت‌های معمول از قبیل ساخت بندهای تنظیمی دارد. ساخت پایه‌ها سریع‌تر و مقرون به‌صرفه‌تر از بندهای تنظیمی است و در صورت شکست تعدادی از آنها در زمان سیلاب، عملکرد کلی مجموعه مختل نمی‌شود و پایه‌های باقیمانده همچنان می‌توانند اندازه حرکت جریان را کاهش دهند. از طرف دیگر عملیات پاکسازی و ترمیم پس از هر سیلاب نسبت به مواد به‌جامانده در مخزن بندهای تنظیمی، بسیار آسان‌تر انجام می‌شود.

از آنجا که در هر مدل عددی برای گسسته‌نمودن معادلات حاکم پیچیده از فرضیات و ساده‌سازی‌هایی استفاده می‌شود که می‌توانند باعث بروز خطاهای عددی شوند و در برخی موارد نتایج را دور از واقعیت نمایش دهند، بنابراین پیشنهاد می‌شود تا نتایج این مدل عددی به وسیله یک مدل فیزیکی نیز شبیه‌سازی شود تا کارایی پایه‌ها در مهار جریان واریزه‌ای ارزیابی شود. البته بایستی به این نکته توجه نمود که مدل RAMMS توسط محققان فراوانی در نقاط مختلف دنیا مورد استفاده قرار گرفته است و صحت نتایج آن حداقل در اروپا مورد تایید واقع شده است [RAMMS, 2022]. با این وجود، متأسفانه تا کنون مطالعه دیگری به روش عددی یا آزمایشگاهی با موضوع مورد بحث در این تحقیق انجام نشده است و به همین دلیل امکان مقایسه نتایج این تحقیق با سایر مطالعات وجود ندارد. البته مواردی قابل جستجو هستند که از پایه‌های قائم به منظور تاثیرگذاری بر جریان‌ات مختلف رسوب، شکست سد و غیره استفاده شده است. نتایج یک تحلیل عددی جامع در این زمینه نشان داده است که استفاده از پایه‌های قائم نقش قابل توجهی در کاهش اندازه حرکت جریان و عمق موج ناشی از شکست سد دارد [Fan et al., 2020]. در آن تحقیق نشان داده شده است که برخوردی متوالی موج شکست سد با پایه‌ها چگونه باعث ازدست‌رفتن چشمگیر انرژی جنبشی و اندازه حرکت جریان شده است. بنابراین از عملکرد گروه پایه‌ها در کاهش انرژی جنبشی و اندازه حرکت جریان، می‌توان در زمینه مهار جریان واریزه‌ای نیز بهره برد.

### نتیجه‌گیری

استفاده از گروه پایه‌های قائم به عنوان یک روش کاربردی برای مهار جریان واریزه‌ای مورد بحث قرار گرفت و نهایتاً چیدمان مثلثی پایه‌های بتنی استوانه‌ای شکل با قطر ۱ و ارتفاع ۲ متر و استقرار آنها در دامنه پایین‌دست مناطق کوهستانی به عنوان بهترین راهکار در مقایسه با سایر چیدمان‌ها معرفی شدند.

شکل ۸ جریان واریزه‌ای شبیه‌سازی شده را پس از قرارگیری پایه‌ها به صورت مثلثی (حالت الف) نشان می‌دهد که در مقایسه با شکل ۷، کاهش قابل ملاحظه و چشمگیر پهنه تاثیر و طول جابه‌جایی جریان را نمایان می‌سازد به طوری که تقریباً هیچکدام از ساختمان‌های واقع در پایین‌دست دامنه، در معرض خطر قرار ندارند. استفاده از پایه‌های قائم بر خلاف روش‌های دیگر (شکل ۳) دارای مزایای متعددی بود. در این روش، در صورت شکست یک و یا حتی چند پایه، اگرچه کارایی سیستم کاهش می‌یافت، اما عملکرد کلی مجموعه مختل نمی‌شد، در صورتی که در روش قاب با توری سیمی و یا سد تنظیمی، شکست سد و یا پارگی توری می‌توانست عملکرد کل سیستم را از بین ببرد. همچنین، ساخت پایه‌ها در مقایسه با سایر روش‌ها بسیار ساده‌تر و مقرون به‌صرفه‌تر بود. بنابراین، با توجه به موارد فوق و نیز نتایج مدل‌سازی عددی، روش پایه‌های قائم یکی از روش‌های موثر و کاربردی در مهار جریان واریزه‌ای به شمار می‌رود.



شکل ۸) نمایش پهنه کل تاثیر جریان واریزه‌ای شبیه‌سازی شده در گوگل ارث در حالتی که گروه پایه‌ها به صورت مثلثی (حالت الف در شکل ۵) در پایین‌دست دامنه قرار گرفته‌اند

### بحث

عامل اصلی جریان واریزه‌ای اندازه حرکت ناشی از ذرات خاک و آب است که سنگ‌های بسیار درشت‌دانه را نیز به حرکت در می‌آورند. روش‌های کنترل سازه‌ای بایستی قادر باشند انرژی جنبشی جریان را مهار و از حرکت آن جلوگیری نمایند. روش‌های معمول اکثراً براساس ساخت بندهای تنظیمی و یا قاب توری استوار هستند، اما این سازه‌ها در برابر جریان شدید واریزه‌ای ممکن است با شکست مواجه شده و باعث تخریب پایین‌دست شوند.

استفاده از پایه‌های قائم در مهار انرژی جنبشی جریان واریزه‌ای تا کنون مورد استفاده و ارزیابی قرار نگرفته است اما نتایج مدل‌سازی نشان داد که می‌توان به وسیله این پایه‌ها، جریان واریزه‌ای را مهار نمود. گروه پایه‌ها این قابلیت را دارد که در برخوردهای متوالی جریان با پایه‌ها، باعث کاهش چشمگیر اندازه حرکت و انرژی جنبشی آن شده و از این طریق باعث توقف ذرات درشت‌دانه در فضای بین پایه‌ها شوند. در این زمینه، تعداد پایه‌ها، آرایش



- Farsnews (2023). Some parts of Chalous road is destroyed [Internet]. Tehran: Fars Media Corporation [Cited 2023, 26 Nov]. Available from: B2n.ir/r24086
- Frank F, McArdell BW, Oggier N, Baer P, Christen M, Vieli A (2017). Debris-flow modeling at Meretschibach and Bondasca catchments, Switzerland: sensitivity testing of field-data-based entrainment model. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 17(5):801-815.
- Galoie M, Motamedi A (2021). Optimization of export coefficient model based on precipitation and terrain impact factors. *Geographical Researches*. 36(4):337-346. [Persian]
- Gong XL, Chen KT, Chen XQ, You Y, Chen JG, Zhao WY, Lang J (2020). Characteristics of a debris flow disaster and its mitigation countermeasures in Zechawa Gully, Jiuzhaigou Valley, China. *Water*. 12(5):1256.
- Hussin HY, Quan Luna B, Van Westen CJ, Christen M, Malet JP, Van Asch ThWJ (2012). Parameterization of a numerical 2-D debris flow model with entrainment: A case study of the Faucon catchment, Southern French Alps. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 12(10):3075-3090.
- Jakob M, Hungr O (2005). *Debris-flow hazards and related phenomena*. Heidelberg: Springer.
- Ji F, Dai Z, Li R (2020). A multivariate statistical method for susceptibility analysis of debris flow in southwestern China. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 20(5):1321-1334.
- King HM (2018). What is a debris flow?. *Geoscience News and Information*.
- Krušić J, Abolmasov B, Samardžić-Petrović M (2019). Influence of DEM resolution on numerical modeling of debris flows in RAMMS-Selanac case study. *Proceedings of the 4th Regional Symposium on Landslides in the Adriatic-Balkan Region*.
- RAMMS (2022). *RAMMS debris flow user's manual 1.8.0*. Davos: WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF. P. 120.
- Takahashi T (2007). *Debris flow: Mechanics, prediction and countermeasures*. 1st ed. London: Taylor & Francis.
- Takahashi T, Das DK (2014). *Debris flow: Mechanics, prediction and countermeasures*. 2<sup>nd</sup> Edition. London: CRC press.
- Termini D, Fichera A (2020). Experimental analysis of velocity distribution in a coarse-grained debris flow: A modified Bagnold's equation. *Water*. 12(5):1415.
- Wang GL (2013). Lessons learned from protective measures associated with the 2010 Zhouqu debris flow disaster in China. *Natural Hazards*. 69:1835-1847.
- Xiong M, Meng X, Wang S, Guo P, Li Y, Chen G, et al (2016). Effectiveness of debris flow mitigation strategies in mountainous regions. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*. 40(6):768-793.
- Zhao H, Yao L, You Y, Wang B, Zhang C (2018). Experimental study of the debris flow slurry impact and distribution. *Shock and Vibration*. 2018(4):1-15.
- Zhou W, Fang J, Tang C, Yang G (2019). Empirical relationships for the estimation of debris flow runout distances on depositional fans in the Wenchuan earthquake zone. *Journal of Hydrology*. 577:123932.
- Zimmermann F, McArdell BW, Rickli C, Scheidl C (2020). 2D runout modeling of hillslope debris flows, based on well-documented events in Switzerland. *Geosciences*. 10(2):70.

**تشکر و قدردانی:** این پژوهش، براساس قسمتی از یک پروژه مطالعاتی در زمینه مدل‌سازی و کنترل خطرات ناشی از جریان واریزه‌ای است که در موسسه تحقیقات مخاطرات کوهستانی و محیط زیست در کشور چین انجام شده است و برای مقایسه نتایج، بخشی از آن نیز به صورت تحقیق حاضر در یکی از حوضه‌های ایران صورت گرفته است. از این رو، از زحمات، راهنمایی‌ها و کمک‌های تیم تحقیق به خصوص آقای پروفیسور فن و همچنین مرکز کامپیوتر موسسه تحقیقات فوق به دلیل فراهم‌نمودن لایسنس نرم‌افزار، تشکر و قدردانی می‌شود.

**تأییدیه اخلاقی:** این مقاله تاکنون در هیچ یک از مجلات داخلی و خارجی به چاپ نرسیده است.

**تعارض منافع:** این مقاله فاقد هرگونه تعارض با منافع ارگان‌ها و اشخاص است و هدف از نگارش آن صرفاً معرفی روش‌های کاربردی در حوزه سیستم اطلاعات جغرافیایی و کاربرد موثر آن در مدیریت و حفاظت منابع آبی است.

**سهم نویسندگان:** دکتر مجید گلوئی (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی/روش‌شناس (۵۰٪)؛ دکتر آرتمیسی معتمدی (نویسنده دوم)، تحلیلگر داده/نگارنده بحث (۵۰٪)

**منابع مالی:** این مقاله مستخرج از فعالیت مشترک بین ایران و چین است و کلیه هزینه‌های حق پژوهش و استفاده از نرم‌افزار توسط وزارت علوم چین پرداخت شده است.

## منابع

- Armanini A, Michiue M, editors (1997). *Recent developments on debris flows*. Heidelberg: Springer.
- Bezak N, Sodnik J, Mikoš M (2019). Impact of a random sequence of debris flows on torrential fan formation. *Geosciences*. 9(2):64.
- Cui P, Zeng C, Lei Y (2015). Experimental analysis on the impact force of viscous debris flow. *Earth Surface Processes and Landforms*. 40(12):1644-1655.
- De Finis E, Gattinoni P, Marchi L, Scesi L (2018). Anomalous alpine fans: From the genesis to the present hazard. *Landslides*. 15(4):683-694.
- Di Perna A, Cuomo S, Martinelli M (2022). Empirical formulation for debris flow impact and energy release. *Geoenvironmental Disasters*. 9(8).
- Etemad Online (2022). A Huge landslide in Chalous road disconnected running water [Internet]. Tehran: Etemad Online [Cited 2023, 26 Nov]. Available from: B2n.ir/d79544
- Fan JH, Galoie M, Motamedi A (2020). Mitigation of the amplitude and celerity of dam break shock wave using combination of groyne and vertical pier. *Journal of Mountain Science*. 17(6):1452-1461.
- Fan J, Motamedi A, Galoie M (2021). Impact of downstream lakes on dam break wave attenuation. *Natural Hazards*. 106(1):595-612.
- Fan J, Galoie M, Motamedi A, Huang J (2021). Assessment of land cover resolution impact on flood modeling uncertainty. *Hydrology Research*. 52(1):78-90.
- Fan J, Motamedi A, Galoie M (2021). Impact of C factor of USLE technique on the accuracy of soil erosion modeling in an elevated mountainous area (case study: The Tibetan plateau). *Environment, Development and Sustainability*. 23(8):12615-12630.