



## مدیریت آب و آبیاری (نشریه علمی)

دوره ۱۱ ■ شماره ۳ ■ پاییز ۱۴۰۰

صفحه‌های ۶۱۶-۶۰۷

DOI: 10.22059/jwim.2021.329769.914

مقاله پژوهشی:

### مروری بر روش‌های پیش‌بینی و هشدار سیلاب واریزه‌ای

میترا تنهاپور<sup>۱</sup>، محمد ابراهیم بنی‌حیب<sup>۲\*</sup>

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب، دانشکده پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۲. استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۷/۳۰

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۳/۲۶

#### چکیده

سیلاب‌های واریزه‌ای می‌توانند خسارت‌های شدیدی برای زندگی و اموال انسان‌ها به‌ویژه در مناطق پرجمعیت کوهستانی ایجاد کنند. در اثر تغییر اقلیم، فراوانی وقوع سیلاب واریزه‌ای روند افزایشی دارد. بنابراین ارزیابی روش‌های پیش‌بینی این پدیده جهت شناسایی رویکرد مناسب برای کاهش خطر و آگاهی مردم ضرورت دارد. در سال‌های اخیر، به‌طور عمده از رویکردهای آستانه‌های بارندگی، مدل‌های رگرسیون لجستیک و داده‌کاوی برای پیش‌بینی این جریان‌ها استفاده شده است. در این مطالعه مروری بر روش‌های یادشده برای پیش‌بینی سیلاب واریزه‌ای نشان می‌دهد، جهت انتخاب روش مناسب برای پیش‌بینی سیلاب واریزه‌ای بهتر است براساس شرایط و ویژگی‌های منطقه مورد مطالعه تصمیم‌گیری شود، به‌طوری‌که ممکن است یک یا ترکیبی از این روش‌ها نتایج مناسبی ارائه دهد. به‌طور کلی، در میان روش‌های مذکور، رویکردهای مبتنی بر داده، به دلیل سهولت کاربرد، دقت بالا و عدم نیاز به تعداد زیاد داده‌های مشاهداتی به‌ویژه در مناطقی که با مشکل کمبود داده مواجه هستند، به‌عنوان روش برتر در این پژوهش توصیه می‌شود. مطالعه حاضر می‌تواند برای شناسایی رویکردهای پیش‌بینی سیلاب واریزه‌ای جهت کاهش خسارت‌های ناشی از آن مؤثر باشد.

**کلیدواژه‌ها:** آستانه‌های بارندگی، داده‌کاوی، سیلاب واریزه‌ای، مدل رگرسیون لجستیک.

### A Review on the Methods of the Debris-Flow Prediction and Warning

Mitra Tanhapour<sup>1</sup>, Mohammad Ebrahim Banihabib<sup>2\*</sup>

1. Ph.D. Candidate, Department of Water Engineering, Faculty of Aburairhan, University of Tehran, Tehran, Iran.

2. Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Aburairhan, University of Tehran, Tehran, Iran.

Received: June 16, 2021

Accepted: October 22, 2021

#### Abstract

Debris flows can create severe damage for humans' life and estate especially in the mountainous areas. The frequency of debris flow occurrence has an increasing trend due to climate change. Therefore, it is necessary to evaluate the prediction methods of this phenomenon to identify an appropriate approach for reducing its danger and people awareness. In recent years, rainfall threshold, regression logistic model and data mining methods were mainly employed for predicting these flows. In this study, a review on the mentioned methods for predicting debris flows reveals that it is better to select the convenient method for predicting debris flow based on the conditions and characteristics of the case study so that one or a combination of these methods may provide appropriate results. Generally, among the mentioned methods, data mining approaches are recommended as superior method in this study because of easy application, high accuracy and lack of requirement for the large number of observed data especially in areas that have data shortage problem. The current study can be effective for identifying debris flows prediction approaches to reduce its damage.

**Keywords:** Data mining, Debris flow, Logistic regression model, Rainfall threshold.

## مقدمه

سیلاب واریزه‌های یک پدیده خطرناک در کشورهای دارای مناطق کوهستانی است. تعاریف متعددی برای سیلاب واریزه‌ای با توجه به پژوهش‌های قبل ارائه شده است. از جمله معیارهای مهم برای تعریف این سیلاب‌ها بر ویژگی‌هایی مانند غلظت رسوبات، توزیع اندازه ذرات و سرعت جریان تمرکز می‌شود (Lay & Pradhan, 2017). بر اساس پژوهش‌های گذشته، غلظت حجمی رسوبات در این جریان‌ها بالای ۵۰ درصد گزارش شده است (Banihabib & Elahi, 2009). با توجه به غلظت بالای رسوبات در این نوع جریان‌ها، زبری هیدرولیکی جریان یا به عبارتی مقاومت در برابر جریان تحت تأثیر قرار می‌گیرد (Banihabib & Masumi, 1999; Banihabib & Forghani, 2017). از نظر توزیع اندازه ذرات، حجم عمده این جریان‌ها به‌طور عمده شامل ذرات درشت‌دانه نظیر شن و ماسه، قلوه‌سنگ و سنگ می‌باشد. به گونه‌ای که حداقل ۱۵ درصد وزنی این جریان‌ها حاوی سنگ‌های درشت است. براساس گزارشات، در برخی موارد حتی سنگ‌هایی به قطر چندین متر نیز با خود حمل می‌کند (Banihabib, 2003). هم‌چنین سرعت این جریان‌ها بین ۳ تا ۱۵ متر بر ثانیه گزارش شده است (Zhuang et al., 2015). بنابراین با توجه به ویژگی‌های ذکرشده، این سیلاب‌ها از نظر ویژگی‌های ظاهری قابل شناسایی هستند. سیلاب‌های واریزه‌ای به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مخاطرات طبیعی قادر به ایجاد مجموعه حوادثی است که می‌تواند تهدیدی جدی برای جان و مال مردم و توسعه اقتصادی جوامع باشد. این سیلاب‌ها به‌طور عمده در نواحی نیمه‌خشک، مناطق کوهستانی شیب‌دار و آتشفشانی در اثر عواملی از قبیل بارش شدید بارندگی، ذوب سریع برف در اثر خروج گدازه‌های آتشفشانی و حرکت توده‌های خاک اشباع‌شده در اثر زلزله رخ می‌دهند و

خسارت‌های زیادی به بار می‌آورند (Banihabib, 2003). سیلاب واریزه‌ای اغلب به‌صورت ناگهانی، بدون هشدار و با سرعت حرکت کرده و در مدت کوتاهی پل، بزرگراه و جاده‌ها، زمین‌های کشاورزی، سیستم‌های تأمین و انتقال آب، خطوط راه‌آهن، لوله‌ها و سایر تأسیسات و اجسام را در مسیر خود، تخریب و نابود می‌کنند (Chen et al., 2016; Hassan-Esfahani & Banihabib, 2011). بنابراین این واقعه فاجعه‌بار تلفات انسانی و خسارت‌های اقتصادی سنگینی به‌وجود می‌آورد.

شدت خسارت‌های این پدیده به دلایلی که در ادامه توضیح داده خواهد شد، بر جوامع بشری بالاست. ۱- بیش‌تر حجم جریان از مواد درشت‌دانه تشکیل شده است. در نتیجه هنگام عبور این جریان‌ها از روی سازه‌ها و تأسیسات، فرسایش و خوردگی ایجاد شده و خسارت‌های زیادی وارد می‌کند. در واقع، غلظت بالای رسوب بر نیروی ناشی از ضربه شدید آن‌ها مؤثر بوده و بدین‌ترتیب خسارت‌های وارده به نسبت جریان‌های غیرواریزه‌ای بیش‌تر است (Banihabib & Elahi, 2009; Papa et al., 2012)، ۲- غلظت بالای رسوب در این جریان‌ها باعث افزایش ضریب زبری جریان می‌شود. از طرفی افزایش ضریب زبری باعث افزایش عمق جریان شده و در نهایت افزایش عمق جریان نیز باعث افزایش پهنه سیل‌گیری و به تبع آن افزایش خسارت‌ها می‌شود (Banihabib & Masumi, 1999)، ۳- براساس پژوهش‌های انجام‌شده، دبی پیک این سیلاب‌ها نسبت به سیلاب معمولی بیش‌تر و در نتیجه شدت خسارت‌های آن‌ها نیز بیش‌تر می‌باشد (Banihabib & Masumi, 1999; Banihabib & Forghani, 2017). در جوامع علمی به‌منظور پاسخ‌گویی به چالش‌های ارزیابی خطر این جریان‌ها و برای جلوگیری از وقوع خسارت، این پدیده مورد مطالعه زمین‌شناسان و هیدرولوژیست‌ها قرار گرفته

است. لذا با توجه به توانایی این سیلاب‌ها برای به بارآوردن خسارت‌های عظیم، توسعه اقدامات مؤثر برای کاهش آسیب‌پذیری جوامع محلی نسبت به سیلاب واریزه‌ای از اهمیت حیاتی برخوردار است. پیش‌بینی و هشدار اولیه سیلاب واریزه‌ای یک عنصر مهم برای کاهش خطر آن است. در واقع، استفاده از تکنولوژی‌های جدید مدل‌سازی مانند کاربرد روش‌های هیبریدی برای پیش‌بینی سیلاب واریزه‌ای (Huang et al., 2020; Banihabib et al., 2020) و نظارت سیلاب واریزه‌ای برای پیش‌بینی این جریان‌ها می‌تواند در کاهش میزان تلفات و خسارت‌های ناشی از آن مؤثر باشد (Lay & Pradhan, 2017). در طی دهه‌های گذشته، تعدادی از پژوهش‌گران بر توسعه روش‌هایی برای پیش‌بینی سیلاب واریزه‌ای متمرکز شدند (Hirano et al., 1995; Cannon et al., 2008; Staley et al., 2013). اساس روش‌های هشداردهنده بر مبنای روابط تجربی است که برای شناسایی شرایط رخداد سیلاب واریزه‌ای استفاده می‌شوند. در ساده‌ترین حالت، این روابط به آستانه‌های شدت-مدت بارندگی یا آستانه‌های بارندگی تجمعی-زمان که منجر به وقوع سیلاب واریزه‌ای می‌شوند، اشاره دارند (Cannon et al., 2008; Staley et al., 2013). روش دیگر برای پیش‌بینی سیلاب واریزه‌ای، استفاده از مدل‌های آماری است که برای پیش‌بینی احتمال وقوع سیلاب واریزه‌ای از ترکیب اطلاعات جغرافیایی، بارندگی و فیزیوگرافی حوضه‌ها استفاده می‌کند. رایج‌ترین مدل آماری برای پیش‌بینی سیلاب واریزه‌ای، مدل رگرسیون لجستیک است (Rupert et al., 2008; Cannon et al., 2010). هم‌چنین، در طول سال‌های اخیر استفاده از مدل‌های مختلف داده‌کاوی به سبب سهولت کاربرد، صرفه‌جویی در زمان و هزینه کم برای پیش‌بینی سیلاب واریزه‌ای توسط پژوهش‌گران مختلف، به‌کار گرفته شده است (Bai et al., 2015; Nikolopoulos et al., 2018).

#### بررسی روش‌های پیش‌بینی مبتنی بر آستانه‌های بارندگی رخداد سیلاب واریزه‌ای

آستانه‌های بارندگی ساده‌ترین و رایج‌ترین رویکرد برای پیش‌بینی وقوع سیلاب واریزه‌ای هستند. از این‌رو، بسیاری از پژوهش‌گران تلاش کردند بین سیلاب واریزه‌ای و بارش ارتباط برقرار کنند (Guo et al., 2016; Nikolopoulos et al., 2017; Pan et al., 2018; Chang et al., 2021). این آستانه‌ها معمولاً براساس رابطه توانی فرموله می‌شوند که دو پارامتر مقدار بارندگی و مدت آن را به‌صورت رابطه زیر به هم ارتباط می‌دهند:

$$I = c + \alpha D^{\beta} \quad (1)$$

در این رابطه،  $I$  شدت بارندگی (میلی‌متر در ساعت)،  $D$  مدت بارش (ساعت)،  $\alpha$ ،  $\beta$  و  $c$  ضرایب ثابت هستند. برای اکثر حد آستانه‌های شدت-مدت، پارامتر  $c$  برابر صفر است و  $\alpha$  و  $\beta$  پارامترهایی هستند که براساس مشاهدات موجود تعیین می‌گردند. به‌منظور برآورد آستانه شدت-مدت بارندگی برای هر ناحیه از داده بارندگی‌هایی که باعث وقوع سیلاب واریزه‌ای شدند، استفاده می‌شود (Zhuang et al., 2015; Nikolopoulos et al., 2018).

Nikolopoulos *et al.* (2015) اثر عدم قطعیت تخمین باران، توسط باران‌سنج‌ها را بر آستانه شدت- مدت بارندگی که منجر به رخداد سیلاب واریزه‌ای می‌شود، موردبررسی قرار گرفت. همچنین اثر تراکم شبکه باران‌سنج‌ها و روش‌های درون‌یابی شامل Nearest neighbor و Kriging را بر تخمین بارندگی‌هایی که منجر به رخداد سیلاب واریزه‌ای می‌شود، توسط باران‌سنج‌ها ارزیابی کردند. نتیجه مطالعه آن‌ها نشان داد روش نزدیک‌ترین همسایگی توانایی بالاتری در تخمین آستانه‌های شدت- مدت، دارند. همچنین کاهش تراکم باران‌سنج‌ها منجر به افزایش عدم قطعیت تخمین بارندگی می‌شود. Guo *et al.* (2016) ارتباط شدت- مدت بارندگی و تغییرات زمانی آن را براساس ۲۵۲ واقعه جریان واریزه‌ای که پس از زمین لرزه در جنوب‌غرب چین رخ داده بود، موردبررسی قرار دادند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد، وقوع زمین‌لرزه به شدت آستانه شدت- مدت بارندگی را کاهش داده است. همچنین نتایج حاکی از آن بود که حد آستانه بارش، در مدت سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۳ افزایش پیدا کرده و افزایش لگاریتمی آن، نشان‌گر بهبود حد آستانه در دهه‌های آینده است. Ma *et al.* (2017) آستانه شدت- مدت بارش در چهار منطقه در اثر زمین‌لرزه ونچوان در فلات غرب سیچوان تحلیل کرده و با یکدیگر مقایسه کردند. یافته‌های پژوهش آن‌ها نشان داد، رویدادهای سیلاب واریزه‌ای در چهار منطقه، آستانه‌های شدت- مدت متفاوتی ایجاد کرده است. آن‌ها دریافتند آستانه‌های بارش رخداد سیلاب واریزه‌ای پس از زمین‌لرزه، در مناطق مختلف، متفاوت بوده و به شدت تحت تأثیر حجم رسوبات قرار دارد. این آستانه‌ها حداقل ۳۰ درصد نسبت به قبل از زمین‌لرزه کاهش یافته است. در پژوهش دیگر، Li Pan *et al.* (2018) یک روش کمی برای برآورد آستانه بارندگی هشدار سیلاب واریزه‌ای در

مدل‌ها و حد آستانه‌های بحرانی زیادی برای راه‌اندازی سیلاب واریزه‌ای با استفاده از پارامترهای مختلف بارندگی توسط پژوهش‌گران مختلف پیشنهاد شده است. به‌عنوان مثال می‌توان به آستانه‌های شدت- مدت بارش (Cannon *et al.*, 2011)، بارندگی تجمعی- بارش پیشین (Wieczorek & Guzzetti, 1999) و مدل‌های شدت ماکزیمم- بارندگی تجمعی (Guzzetti *et al.*, 2008) اشاره کرد.

بعضی از پژوهش‌گران از رویکرد آستانه‌های بارندگی برای پیش‌بینی سیلاب واریزه‌ای استفاده کردند. برای نمونه Caine (1980) برای اولین بار آستانه شدت- مدت بارندگی را برای راه‌اندازی زمین‌لغزش و سیلاب واریزه‌ای با جمع‌آوری داده‌های بارندگی در سطح جهان توسعه داد. Hirano & Moriyama (1993) در مطالعه در مورد پیش‌بینی بارندگی بحرانی ایجادکننده جریان واریزه‌ای در محدوده حوضه رودخانه میزونانشی واقع در ژاپن، از روش تجزیه تحلیل سیستم استفاده کردند. نتیجه مطالعه آن‌ها نشان داد، در صورتی که مقدار بارندگی از ۱۴ میلی‌متر در زمان تمرکز حوضه بیش‌تر شود، سیلاب واریزه‌ای رخ خواهد داد. همچنین Zhuang *et al.* (2015) بارندگی‌هایی که باعث شروع سیلاب واریزه‌ای در حوضه جیان‌جیا می‌شد، تجزیه و تحلیل کردند. بدین منظور، حد آستانه‌های شدت- مدت و بارندگی تجمعی- مدت که منجر به رخداد سیلاب واریزه‌ای در حوضه جیان‌جیا می‌شد، توسعه دادند. این دو حد آستانه با داده‌های سیلاب واریزه‌ای مربوط به سال‌های ۲۰۰۷-۲۰۰۸ اعتبارسنجی کردند. سپس با حد آستانه‌های ارائه‌شده توسط پژوهش‌گران قبل، در جهان مقایسه کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد، منحنی‌های حد آستانه پیشنهادشده برای مناطق دیگر، بالاتر از منحنی‌های ارائه‌شده در پژوهش آن‌ها بود. در مطالعه‌ای دیگر توسط

تبدیلات برای برآورد توزیع نرمال متغیرها ندارد و خروجی آن به راحتی برای دانشمندان قابل تفسیر است. در رگرسیون لجستیک باینری، متغیر هدف یکی از دو مقدار منفرد صفر (عدم رخداد سیلاب واریزه‌ای) یا یک (رخداد سیلاب واریزه‌ای) به خود اختصاص می‌دهد. احتمال وقوع (P) رخداد سیلاب واریزه‌ای براساس مدل رگرسیون لجستیک توسط رابطه زیر به دست می‌آید (Nikolopoulos et al., 2018; Cama et al., 2015):

$$P = \frac{e^x}{1+e^x} \quad (2)$$

در رابطه فوق، c عدد نپر می‌باشد. رابطه فوق احتمال وقوع یا عدم وقوع متغیر هدف به ازای یک واحد تغییر در متغیرهای مستقل را نشان می‌دهد. در رابطه فوق، x یک ترکیب خطی از یک یا چند متغیر براساس رابطه زیر است:

$$x = \gamma + \delta_1 X_1 + \delta_2 X_2 + \dots + \delta_n X_n \quad (3)$$

و  $\gamma$  و  $\delta$  پارامترهای مدل هستند که براساس داده‌های مشاهداتی می‌توانند از روش رگرسیون حداقل مربعات به دست آیند. همبستگی منفی متغیرها باعث تولید اعداد منفی یا بین محدوده صفر و یک برای  $\delta$  می‌شود و در مقابل همبستگی مثبت بین آن‌ها منجر به تولید مقادیر مثبت برای  $\delta$  یا مقادیر بزرگ‌تر از یک می‌شود (Cama et al., 2015).

بعضی پژوهش‌گران در پژوهش‌های قبل، از مدل رگرسیون لجستیک برای پیش‌بینی وقوع سیلاب واریزه‌ای استفاده کردند. برای نمونه Zhenghong & Bin (1995) به منظور تعیین توزیع زمانی و مکانی سیلاب واریزه‌ای در چین، از روش رگرسیونی استفاده کردند و دریافتند بارندگی‌های سنگین (بارندگی بیش‌تر از ۵۰ میلی‌متر در روز) مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بر سیلاب واریزه‌ای می‌باشد. Xu et al. (2013) به منظور پیش‌بینی وقوع سیلاب واریزه‌ای در مناطقی با ریسک بالا در استان سیچوان، روش‌های آماری رگرسیون لجستیک و تجزیه

مناطق که کمبود داده‌های بارندگی دارند، پیشنهاد دادند. آن‌ها با استفاده از ویژگی‌های فیزیکی مواد سست، مشخصات توپوگرافی، هیدرولوژیکی و هواشناسی، منحنی آستانه بارندگی به صورت تابعی از شاخص بارندگی پیشین و شدت بارندگی یک ساعته ارائه دادند. به منظور تست روش پیشنهادی، از داده‌های سیلاب‌های واریزه‌ای در طول دوره ۲۰۰۸-۲۰۱۳ حوضه Guojuanyan واقع در چین، به عنوان منطقه مطالعاتی استفاده کردند. Tanhapour & Banihabib (2019) با استفاده از رویکرد تجزیه و تحلیل سیستم، آستانه شدت-مدت بارندگی را برای بخشی از حوضه‌های کوهستانی البرز ارائه دادند. در مطالعه‌ای دیگر، یک رویکرد جدید برای استخراج آستانه‌های شدت-مدت بارندگی وقوع سیلاب واریزه‌ای توسط Zhang et al. (2020) ارائه شد. در این مدل، چگالی سیلاب واریزه‌ای به عنوان پارامتر اصلی انتخاب شد و براساس آن، شدت و مدت بارندگی برای برازش منحنی شدت-مدت برآورده شد. دقت این مدل معادل ۸۰/۵ درصد برآورد شد. نتایج پژوهش‌های فوق نشان می‌دهد، استفاده از رویکرد استخراج آستانه‌های بارندگی، می‌تواند به عنوان یک رویکرد مورد اعتماد برای سیستم‌های هشدار سیلاب واریزه‌ای استفاده شود.

## ارزیابی روش آماری برای پیش‌بینی سیلاب‌های واریزه‌ای

روش دیگری که اغلب در پژوهش‌های قبل برای تعیین احتمال وقوع متغیر هدف باینری استفاده شده، مدل رگرسیون لجستیک است. این مدل یک روش آماری چندمتغیره است که برای مدل‌سازی مقادیر مورد انتظار متغیر پاسخ (متغیر خروجی) توسط ترکیب خطی از متغیرهای پیش‌بینی‌کننده پیوسته یا گسسته استفاده می‌شود (Hosmer & Lemeshow, 2000). این روش نیازی به

مختلف هوش مصنوعی برای پیش‌بینی وقوع سیلاب واریزه‌ای استفاده کردند (Wang et al., 2003; Liu et al., 2006; Chang & Chao, 2006; Chang & Chien, 2007; Wan & Lei, 2009; Chang et al., 2010).

تعداد زیادی از پژوهش‌ها از رویکردهای مختلف مبتنی بر داده برای پیش‌بینی وقوع سیلاب واریزه‌ای استفاده کردند. نتیجه پژوهش Hirano et al. (1995) نشان داد مدل شبکه عصبی، به‌عنوان یک ابزار کارآمد، علاوه بر پیش‌بینی سیلاب واریزه‌ای، می‌تواند برای آنالیز رواناب این سیلاب‌ها به‌خوبی عمل کند. در مطالعه‌ای دیگر Lin et al. (2012) از مدل فازی برای تجزیه و تحلیل خطرات بالقوه و ارزیابی ریسک سیلاب واریزه‌ای رخ داده در سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۰۸ در منطقه ویلین تایوان، استفاده کردند. آن‌ها عواملی نظیر میانگین شیب حوضه، مساحت حوضه، بارندگی تجمعی و شدت بارندگی و شرایط زمین‌شناسی را به‌عنوان عوامل مؤثر بر رخداد سیلاب واریزه‌ای در نظر گرفتند. دقت پیش‌بینی مدل، معادل ۹۶ درصد و خطای نسبی نرمال  $4/63$  درصد، گویای توانایی مدل فازی به‌عنوان یک سیستم ارزیابی خطر برای وقوع سیلاب واریزه‌ای می‌باشد. همچنین Zhang et al. (2013) با به‌کارگیری داده‌های بارندگی و عوامل زیست‌محیطی از روش گروهی مدل‌سازی داده‌ها<sup>۲</sup> (GMDH) برای پیش‌بینی سیلاب واریزه‌ای در چین استفاده کردند و عملکرد این مدل را با مدل‌های شبکه عصبی پس انتشار خطا و مدل ANFIS<sup>۳</sup> مقایسه کردند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد مدل GMDH با اختصاص ضریب تبیین بالای  $0/8$  و متوسط خطای نسبی  $3/54$  درصد بهترین عملکرد را در مراحل آموزش، آزمون و اعتبارسنجی داشته است و برای پیش‌بینی سیلاب واریزه‌ای نسبت به دو مدل دیگر مناسب‌تر است. در پژوهشی توسط Jianwei et al. (2015) از مدل بیزین با رویکرد خوشه‌بندی برای

تحلیل بیزی<sup>۱</sup> را با یکدیگر مقایسه کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد دقت پیش‌بینی روش رگرسیون لجستیک بالاتر از روش تجزیه تحلیل بیزی است. در پژوهشی، Staley et al. (2016) یک رابطه جدید برای پیش‌بینی احتمال وقوع سیلاب‌های واریزه‌ای که در اثر آتش‌سوزی ایجاد می‌شوند، با استفاده از مدل‌های رگرسیون لجستیک ارائه دادند. بدین منظور از پارامترهای مربوط به مورفولوژی حوضه، شدت آتش‌سوزی و ویژگی‌های بارندگی و خاک استفاده کردند و رابطه را برای سه دوره زمانی ۱۵، ۳۰ و ۶۰ دقیقه برآورد کردند. آن‌ها مدل رگرسیونی برای دوره زمانی ۱۵ دقیقه را برای استفاده در غرب ایالات متحده آمریکا توصیه کردند، زیرا پیش‌بینی بهتری برای رخداد سیلاب واریزه‌ای نسبت به دو دوره دیگر داشت. همچنین Wang & Wu (2019) از مدل رگرسیون لجستیک برای پیش‌بینی احتمال وقوع سیلاب واریزه‌ای براساس شدت و مدت بارندگی استفاده کردند. بدین منظور از ۳۵۴ داده برای کالیبره کردن مدل استفاده کردند سپس ریسک هشدار اشتباه و هشدار از دست‌رفته را برای مدل پیشنهادی محاسبه کردند. براساس مدل ارائه‌شده، احتمال وقوع سیلاب واریزه‌ای معادل ۷۰ درصد برآورد شده است. بنابراین ۳۰ درصد احتمال دارد که هشدار اشتباه داده شود.

### پیش‌بینی وقوع سیلاب واریزه‌ای با استفاده از روش‌های داده‌کاوی

تکنیک‌های پیشرفته هوش مصنوعی که از روابط غیرخطی استفاده می‌کنند، به‌عنوان یک رویکرد کاربردی برای مدل‌سازی احتمالاتی در بسیاری از زمینه‌های محیط زیستی مانند پیش‌بینی هیدرولوژیکی، پردازش داده‌های ماهواره‌ای و مدل‌سازی اکولوژیکی استفاده شدند (Kern et al., 2017). بر این اساس، پژوهش‌گران از گذشته تا به امروز از روش‌های

جمع‌آوری داده‌های مربوط به ۱۰۲ واقعه سیلاب واریزه‌ای ناشی از بهمن یخ در ۳۱ حوضه واقع در غرب آفریقا و آموزش مدل شبکه عصبی، دقت پیش‌بینی مدل را معادل ۷۸/۳۳ درصد برآورد کردند. هم‌چنین متوسط دقت پیش‌بینی مدل با استفاده از روش اعتبارسنجی متقابل K-fold معادل ۹۳/۳ درصد به‌دست آوردند. به‌طورکلی، ارزیابی پژوهش‌های قبل بیان‌گر ارائه نتایج رضایت‌بخش توسط رویکردهای متعدد هوش مصنوعی برای پیش‌بینی وقایع سیلاب واریزه‌ای است.

### نتیجه‌گیری

ارزیابی و مطالعه روش‌های پیش‌بینی وقوع سیلاب واریزه‌ای برای توسعه سیستم‌های هشدار مؤثر ضرورت دارد. در این مطالعه، رایج‌ترین و عمده‌ترین رویکردهای پیش‌بینی وقوع سیلاب واریزه‌ای مطالعه شد. در این بخش توصیه‌های لازم براساس موارد مطالعه‌شده ارائه می‌شود. روش‌های ارزیابی‌شده در این پژوهش شامل آستانه‌های بارندگی رخداد سیلاب واریزه‌ای، مدل‌های آماری و داده‌کاوی می‌باشند. بعضی از پژوهش‌گران از روش‌های آزمایشگاهی و فیلدی برای پیش‌بینی وقوع سیلاب واریزه‌ای استفاده کردند (Liu et al., 2020; Chen et al., 2006; Tang & Zhang, 2008; Ni, 2015; Banihabib & Tanhapour, 2020)، اما از آنجاکه این روش‌ها اغلب هزینه‌بر و زمان‌بر می‌باشند، در این پژوهش از پرداختن به آن‌ها چشم‌پوشی شده است. هم‌چنین، بخش عمده پژوهش‌های قبل از روش‌های بررسی‌شده در این پژوهش استفاده کردند و لذا روش‌هایی که در این پژوهش ارزیابی‌شده‌اند نسبت به دیگر روش‌ها کاربردی‌تر می‌باشند. با توجه به خسارت‌های عظیم ناشی از سیلاب واریزه‌ای، انتخاب روش مناسب برای پیش‌بینی سیلاب واریزه‌ای، به یک موضوع چالش‌برانگیز تبدیل شده و از

پیش‌بینی سیلاب واریزه‌ای استفاده شد. بدین ترتیب، با به‌کارگیری داده‌های بارندگی روزانه و بارندگی پنج روز اخیر به‌عنوان عوامل ورودی مدل، هر یک از عوامل ورودی را به دو دسته تقسیم‌بندی کردند و نشان دادند مدل دسته‌بندی بیزین با دقت ۸۸/۵ درصد می‌تواند رخداد سیلاب واریزه‌ای را به درستی پیش‌بینی کند. Kern et al. (2017) برای پیش‌بینی وقایع سیلاب واریزه‌ای در رشته کوه غربی ایالت متحده از روش‌های تکنیکی ماشین یادگیری از جمله رگرسیون لجستیک، آنالیز واریانس، درخت تصمیم‌گیری، شبکه عصبی، K نزدیک‌ترین همسایگی و ماشین بردار پشتیبان استفاده کردند. در این راستا، از سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده مجموعه اطلاعات توپوگرافی، بارندگی و حفاظت خاک دریافت کردند. نتایج روش‌های غیرخطی جدید، تقریباً دو برابر نسبت به مدل‌های خطی موفق‌تر عمل کرده است. Nikolopoulos et al. (2018) عملکرد مدل پیش‌بینی بر مبنای الگوریتم جنگل تصادفی با تکنیک‌های دیگر از جمله روش‌های رگرسیون لجستیک و آستانه بارندگی تجمعی - زمان را در منطقه غربی ایالات متحده با یکدیگر مقایسه کردند. آنالیزها براساس پایگاه داده سیلاب‌های واریزه‌ای رخ داده پس از آتش‌سوزی که به‌تازگی توسط سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده منتشرشده، صورت گرفته است. بدین منظور از اطلاعات مربوط به مدت بارندگی، بارندگی تجمعی، پیک شدت بارندگی در سه دوره ۱۵، ۳۰ و ۶۰ دقیقه، مساحت تحت تأثیر سوختگی، شدت سوختگی و شاخص مربوط به فرسایش خاک استفاده کردند. نتایج پژوهش آن‌ها حاکی از بهبود عملکرد پیش‌بینی براساس مدل جنگل تصادفی نسبت به روش‌های دیگر بوده است. Tang et al. (2021) برای پیش‌بینی سیلاب‌های واریزه‌ای راه‌اندازی‌شده توسط بهمن یخ، از مدل شبکه عصبی استفاده کردند. آن‌ها پس از

برجسته شده است، اما باید توجه داشت که بارندگی تنها عامل مهم راه‌اندازی سیلاب واریزه‌ای نیست. یک سیستم هشدار جامع، باید شامل عوامل زیست‌محیطی از جمله عوامل ژئومورفولوژی، زمین‌شناسی و توزیع منبع مواد باشد. در واقع، آستانه بارندگی سیلاب واریزه‌ای، توسط شاخص بارندگی پیشین، ویژگی‌های بارندگی، مقدار واریزه‌های سست و شیب کانال و ... تحت تأثیر قرار می‌گیرد. لذا کارهای آینده بیش‌تر در مورد ویژگی‌هایی مانند مواد متحرک حوضه، شکل حوضه و دیگر عوامل می‌باید متمرکز شود تا منحنی‌های آستانه بارندگی اصلاح شود.

در خصوص مدل‌های آماری و داده‌کاوی، توصیه می‌شود پژوهش‌های آینده بر بررسی عملکرد مدل‌ها با استفاده از منابع جایگزین اطلاعات بارندگی مانند رادارهای هواشناسی، سنسورهای ماهواره‌ها و مدل‌های عددی پیش‌بینی آب و هوا متمرکز شود. هم‌چنین در مورد ارزیابی اثر تعداد پارامترهای فیزیوگرافی بیش‌تر جهت بهبود توانایی پیش‌بینی مدل‌ها، پژوهش‌های بیش‌تری لازم است.

### پی‌نوشت‌ها

1. Bayes discriminant analysis (BDA)
2. Group Method of Data Handling (GMDH)
3. Adaptive Network Fuzzy Interference System (ANFIS)

### تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

### منابع

- Bai, T., Jiang, Z., & Tahmasebi, P. (2021). Debris flow prediction with machine learning: smart management of urban systems and infrastructures. *Neural Computing and Applications*, 1-11.
- Banihabib, M. E., & Masumi, A., (1999). Effect of High-Concentrated Sediment Transport on Inundation of Rivers: Case Study Masuleh Flood. In: *Proceeding of 2nd Iranian Hydraulic Conference, Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.*

اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. ارزیابی نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد، روش‌های مبتنی بر آستانه بارندگی به دلیل نیاز به تعداد زیاد وقایع تاریخی ثبت‌شده سیلاب واریزه‌ای، اغلب در مناطقی (مانند کشورهای چین و ژاپن) که اندازه‌گیری و ثبت این سیلاب‌ها دقیق‌تر انجام می‌شود و به تعداد کافی داده رخداد سیلاب واریزه‌ای در دسترس است، به‌عنوان روشی ساده می‌تواند جهت پیش‌بینی و هشدار سیلاب واریزه‌ای استفاده شود. هم‌چنین، ارزیابی پژوهش‌های گذشته در خصوص مقایسه دو روش رگرسیون لجستیک و روش‌های مبتنی بر داده گویای کاربرد بیش‌تر و ارائه نتایج دقیق‌تر توسط مدل‌های هوش مصنوعی است. بنابراین در حالت کلی، بین سه روش یادشده، روش‌های مبتنی بر داده به دلیل عدم نیاز به تعداد زیاد وقایع تاریخی ثبت‌شده، دقت پیش‌بینی بالا، سهولت کاربرد، انعطاف‌پذیری و سازگاری بیش‌تر می‌تواند کیفیت پیش‌بینی سیلاب واریزه‌ای را بهبود دهند و در مقایسه با دیگر روش‌ها در اولویت قرار دارد. بنابراین لازم است پژوهش‌های بیش‌تری به‌صورت مستمر در آینده در این زمینه صورت گیرد.

عملکرد روش‌های مذکور، توسط ثبت داده‌های دقیق سیلاب واریزه‌ای تحت تأثیر قرار می‌گیرد و برای استفاده از این روش‌ها به یک پایگاه داده نیاز است. لذا اقدامات لازم برای کاهش خطر این پدیده و مدیریت بهتر آن به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه شامل آموزش و انتقال اطلاعات لازم به شهروندان در مناطق کوهستانی، ساخت یک پایگاه داده برای ثبت دقیق وقایع سیلاب واریزه‌ای، افزایش نظارت‌های اقلیمی و توپوگرافی و ساخت شبکه‌های نظارتی وسیع در مناطق با حساسیت بالا، افزایش تعداد باران‌سنج‌ها و ثبت دقیق بارش‌ها و ایجاد تجهیزات اندازه‌گیری پارامترهای مربوط به سیلاب واریزه‌ای می‌باشد.

اگرچه در این مقاله اهمیت آستانه‌های بارندگی و پارامترهای وابسته به بارندگی بر وقوع سیلاب واریزه‌ای



- Banihabib, M. E. (2003). Mud and Debris Floods, In: Proceeding of *Flash Flood Prevention & Mitigation*, Gorgan, Iran.
- Banihabib, M. E., & Forghani, A. (2017). An assessment framework for the mitigation effects of check dams on debris flow. *Catena*, 152, 277-284.
- Banihabib, M.E., & Elahi, M. (2009). Empirical Equation for Abrasion of Stilling Basin Caused by Impact of Sediment. In: Proceeding of *World Environmental and Water Resources Congress: Great Rivers*©2009 ASCE, Kansas City,USA, 1-10.
- Banihabib, M. E., & Tanhapour, M. (2020). An empirical equation to determine the threshold for rainfall-induced landslides developing to debris flows. *Landslides*, 17, 2055-2065.
- Banihabib, M. E., Jurik, L., Kazemi, M. S., Soltani, J., & Tanhapour, M. (2020). A Hybrid Intelligence Model for the Prediction of the Peak Flow of Debris Floods. *Water*, 12(8), 2246.
- Caine, N. (1980). The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 62(1-2), 23-27.
- Cama, M., Lombardo, L., Conoscenti, C., Agnesi, V., & Rotigliano, E. (2015). Predicting storm-triggered debris flow events: application to the 2009 Ionian Peloritan disaster (Sicily, Italy). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(8), 1785-1806.
- Cannon, S. H., Boldt, E. M., Laber, J. L., Kean, J. W., & Staley, D. M. (2011). Rainfall intensity-duration thresholds for postfire debris-flow emergency-response planning. *Natural Hazards*, 59(1), 209-236.
- Cannon, S. H., Gartner, J. E., Rupert, M. G., Michael, J. A., Rea, A. H., & Parrett, C. (2010). Predicting the probability and volume of post-wildfire debris flows in the intermountain western United States. *Bulletin*, 122(1-2), 127-144.
- Cannon, S. H., Gartner, J.E., Wilson, R. C., Bowers, J. C., & Laber, J.L. (2008). Storm rainfall conditions for floods and debris flows from recently burned areas in southwestern Colorado and southern California. *Geomorphology*, 96(3-4), 250-269.
- Chang, M., Dou, X., Hales, T. C., & Yu, B. (2021). Patterns of rainfall-threshold for debris-flow occurrence in the Wenchuan seismic region, Southwest China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80(3), 2117-2130.
- Chang, T.C., Wang, Z.Y., & Chien, Y.H. (2010). Hazard assessment model for debris flow prediction. *Environmental Earth Sciences*, 60(8), 1619-1630.
- Chen, N. S., Yang, C. L., Zhou, W., Wei, F. Q., Li, Z. L., Han, D., & Hu, G. S. (2011). A new total volume model of debris flows with intermittent surges: based on the observations at Jiangjia Valley, southwest China. *Natural Hazards*, 56(1), 37-57.
- Chen, X. Q., Cui, P., Feng, Z. L., Chen, J., & Li, Y. (2006). Artificial rainfall experimental study on landslide translation to debris flow. *Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 25(1), 106-116.
- Guo, X., Cui, P., Li, Y., Ma, L., Ge, Y., & Mahoney, W.B. (2016). Intensity-duration threshold of rainfall-triggered debris flows in the Wenchuan earthquake affected area, China. *Geomorphology*, 253, 208-216.
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., & Stark, C. P. (2008). The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: an update. *Landslides*, 5(1), 3-17.
- Hassan-Esfahani, L., & Banihabib, M. E. (2016). The impact of slit and detention dams on debris flow control using GSTARS 3.0. *Environmental Earth Sciences*, 75(4), 328.
- Hirano, M., Moriyama, T., & Kawahara, K. (1995). Prediction of the occurrence of debris flow and a runoff analysis by the use of neural networks. *Journal of Natural Disaster Science*, 17(2), 53-63.
- Hirano, M., & Moriyama, T. (1993). Prediction of occurrence and runoff analysis of debris flow. In *Hydraulic Engineering*, ASCE, 1780-1785.
- Huang, J., Hales, T. C., Huang, R., Ju, N., Li, Q., & Huang, Y. (2020). A hybrid machine-learning model to estimate potential debris-flow volumes. *Geomorphology*, 367, 107333.
- Lay, U. S., & Pradhan, B. (2017). Identification of debris flow initiation zones using topographic model and airborne laser scanning data. In: *Proceeding of Global Civil Engineering Conference*. Springer, Singapore, 915-940.
- Liu, X., Wang, F., Nawnit, K., Lv, X., & Wang, S. (2020). Experimental study on debris flow initiation. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79(3), 1565-1580.
- Ni H-Y (2015) Experimental study on initiation of gully-type debris flow based on artificial rainfall and channel runoff. *Environmental Earth Science*, 73, 6213-6227.
- Nikolopoulos, E. I., Borga, M., Creutin, J. D., & Marra, F. (2015). Estimation of debris flow triggering rainfall: Influence of rain gauge density and interpolation methods. *Geomorphology*, 243, 40-50.
- Nikolopoulos, E. I., Destro, E., Maggioni, V., Marra, F., & Borga, M. (2017). Satellite rainfall estimates

- for debris flow prediction: an evaluation based on rainfall accumulation–duration thresholds. *Journal of Hydrometeorology*, 18(8), 2207-2214.
- Nikolopoulos, E.I., Destro, E., Bhuiyan, M.A.E., Borga, M., & Anagnostou, E.N. (2018). Evaluation of predictive models for post-fire debris flow occurrence in the western United States. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(9), 2331-2343.
- Pan, H. L., Jiang, Y. J., Wang, J., & Ou, G. Q. (2018). Rainfall threshold calculation for debris flow early warning in areas with scarcity of data. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(5), 1395-1409.
- Papa, M. N., Medina, V., Ciervo, F., & Bateman, A. (2012). Estimation of debris flow critical rainfall thresholds by a physically-based model. *Hydrology & Earth System Sciences Discussions*, 9(11), 12797-12824.
- Rupert, M., Cannon, S. H., Gartner, J. E., Michael, J.A., & Helsel, D.R. (2008). *Using logistic regression to predict the probability of debris flows in areas burned by wildfires, southern California, 2003-2006*. Washington, DC: US Geological Survey.
- Staley, D. M., Kean, J. W., Cannon, S. H., Schmidt, K. M., & Laber, J. L. (2013). Objective definition of rainfall intensity–duration thresholds for the initiation of post-fire debris flows in southern California. *Landslides*, 10(5), 547-562.
- Tang, C., & Zhang, S. (2008). Study progress and expectation for initiation mechanism and prediction of hydraulic-driven debris flows. *Advances in Earth Science*, 23(8), 787-793.
- Tang, W., Ding, H. T., Chen, N. S., Ma, S. C., Liu, L. H., Wu, K. L., & Tian, S. F. (2021). Artificial Neural Network-based prediction of glacial debris flows in the ParlungZangbo Basin, southeastern Tibetan Plateau, China. *Journal of Mountain Science*, 18(1), 51-67.
- Tang, W., Ding, H. T., Chen, N. S., Ma, S. C., Liu, L. H., Wu, K. L., & Tian, S. F. (2021). Artificial Neural Network-based prediction of glacial debris flows in the ParlungZangbo Basin, southeastern Tibetan Plateau, China. *Journal of Mountain Science*, 18(1), 51-67.
- Tanhapour, M., & Banihabib, M. (2019). Determination of the rainfall threshold for debris flow occurrence in a part of Alborz mountainous basins. *Watershed Engineering and Management*, 11(3), 575-588. (In Persian)
- Wieczorek, G. F., & Guzzetti, F. (1999, October). A review of rainfall thresholds for triggering landslides. In: *Proceeding of the EGS Plinius Conference, Maratea, Italy*, 407-414.
- Zhang, S. J., Xu, C. X., Wei, F. Q., Hu, K. H., Xu, H., Zhao, L. Q., & Zhang, G. P. (2020). A physics-based model to derive rainfall intensity-duration threshold for debris flow. *Geomorphology*, 351, 106930.
- Zhengong, C., & Bin, M. (1995). Spatial and Temporal Distribution of Rain-caused Slopeslides and Debris Flows in Hubei Province and Correlative Analysis of Rainfall Factors [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 3.
- Zhuang, J., Cui, P., Wang, G., Chen, X., Iqbal, J., & Guo, X. (2015). Rainfall thresholds for the occurrence of debris flows in the Jiangjia Gully, Yunnan Province, China. *Engineering Geology*, 195, 335-346.