

## تعیین آستانه بارندگی‌های وقوع جریان واریزه‌ای در بخشی از حوضه کوهستانی البرز

میترا تنهاپور<sup>۱</sup> و محمد ابراهیم بنی‌حبیب<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه تهران، پردیس ابوریحان و <sup>۲</sup> دانشیار، گروه مهندسی آبیاری زهکشی، دانشگاه تهران، پردیس ابوریحان

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۰/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۵/۲۴

### چکیده

جریان واریزه‌ای از جمله مخاطرات طبیعی است که زندگی انسان‌ها را در نواحی پر جمعیت کوهستانی تهدید می‌کند. لذا تعیین آستانه بارندگی وقوع جریان واریزه‌ای، برای توسعه یک سامانه پیش‌بینی مؤثر، ضروری است. در تحقیق حاضر، آستانه‌های تجربی بارندگی برای وقوع جریان واریزه‌ای به وسیله روش هیرانو در بخشی از حوضه‌های کوهستانی البرز شامل گرگان‌رود، ناورود، نکا و بابل‌رود ارزیابی شده است. بدین منظور، از هایتوگراف بارندگی باران‌سنج‌های ثابت در محدوده زمانی سال‌های ۱۳۸۳-۱۳۶۲ استفاده شد. سپس آستانه شدت-مدت بارش برای حوضه‌های منتخب برآورد شده، با تحقیقات پیشین در مقیاس محلی، ناحیه‌ای و جهانی مقایسه شد. بررسی آستانه‌های بارندگی برای شروع جریان واریزه‌ای نشان داد، بارندگی‌های بیشتر از ۲۷/۲ و ۱۴/۸ میلی‌متر به ترتیب در حوضه‌های ناورود و گرگان‌رود و بارندگی‌های بیشتر از ۳۷/۸۴ و ۶۶/۱۲ میلی‌متر در حوضه‌های بابل‌رود و نکا در مدت زمان تمرکز آن‌ها، قادر به راه‌اندازی جریان واریزه‌ای هستند. مقایسه آستانه شدت-مدت بارندگی این پژوهش با نتایج تحقیقات قبل نشان داد که به طور کلی، آستانه شدت-مدت بارش ناحیه مطالعاتی نسبت به آستانه‌های شدت-مدت محلی و ناحیه‌ای سایر کشورها پایین‌تر و از آستانه‌های جهانی بالاتر هستند. به عبارت دیگر، در برخی نقاط دنیا بارندگی‌های کوچک‌تر نسبت به مناطق مورد مطالعه می‌توانند جریان واریزه‌ای تولید کنند. این اختلافات در میان آستانه‌ها می‌تواند به دلیل تنوع ناشی از عوامل اقلیمی، جغرافیایی، فیزیوگرافی، زمین‌شناسی برخی مناطق دیگر باشد.

**واژه‌های کلیدی:** آستانه شدت-مدت، باران‌سنج ثابت، جریان واریزه‌ای، روش هیرانو، هایتوگراف بارندگی

### مقدمه

کوهستانی شیب‌دار و آتشفشانی به دلایلی از جمله بارش شدید بارندگی، ذوب سریع برف در اثر خروج گدازه‌های آتشفشانی، فرسایش‌پذیری شدید خاکسترهای آتشفشانی و حرکت توده‌های خاک اشباع شده در اثر زلزله به وجود می‌آید (Banihabib, ۲۰۰۲؛ Banihabib و Forghani, ۲۰۱۷؛ Masumi, ۲۰۰۸). به‌طور عمده عواملی نظیر بارش،

جریان واریزه‌ای به نوعی از جریان با غلظت بالای رسوب گفته می‌شود که دست‌کم ۱۵ درصد از وزن رسوبات آن حاوی سنگ‌های درشت بوده، یا دارای تنه درخت رسوبات حمل شده باشد. غلظت رسوب در این جریان‌ها تا حدود ۵۶ درصد نیز گزارش شده است. جریان واریزه‌ای عمدتاً در نواحی نیمه‌خشک،

۲۰۱۶). بنابراین، رخداد مکرر این واقعه فاجعه بار در کشور، بیانگر اهمیت وجود یک سامانه هشدار دهنده است که می‌تواند برای هشدار و آگاهی مردم در مناطق خطرناک مورد استفاده قرار گیرد (Jakob و Weatherly، ۲۰۰۳).

خطرات جریان واریزه‌ای می‌تواند با اقدامات متقابل نظیر ساخت و ساز سدها و حوضچه‌ها کاهش یابد. با این حال، ممکن است توپوگرافی مناطق یا کمبود فضا مشکلاتی را برای ساخت آن‌ها به وجود آورد. علاوه بر این، تأثیری که این سازه‌ها روی چشم‌انداز منطقه دارند، ممکن است زیاد باشد. این مشکل بیشتر متوجه مناطقی با ارزش زیست محیطی و تاریخی بالا است. به علاوه، هزینه کمتر روش‌های کنترل غیر سازه‌ای، می‌تواند از دلایل دیگر انتخاب این روش‌ها باشد. به دلایل فوق، اقدامات متقابل غیر سازه‌ای مانند استفاده از مدل‌های پیش‌بینی سیلاب برای کاهش این خطرات مناسب‌ترند. در حقیقت استفاده از این مدل‌ها می‌تواند در هشدار به موقع این سیلاب‌ها برای کاهش خسارات مالی و تلفات جانی از طریق تخلیه مناطق در خطر موثر باشد.

در جریان واریزه‌ای زمان تأخیر بین وقوع بارش و اثرات آن در مناطق پایین‌دست معمولاً کوتاه است (بعضاً حدود یک ساعت). به دلیل زمان تمرکز کوتاه، سامانه‌های هشدار دهنده برای پیش‌بینی بارندگی‌هایی که منجر به سیلاب می‌شوند، بایستی قابل اعتماد باشند. هشدار، زمانی داده می‌شود که بارش پیش‌بینی شده از حد آستانه بحرانی وقوع سیلاب تجاوز کند. بنابراین، پیش‌بینی رخداد این سیلاب‌ها و توسعه سامانه‌های هشدار مؤثر، بر اساس رابطه بین بارندگی و وقایع سیلاب، ضروری است (Papa و همکاران، ۲۰۱۲).

بسیاری از محققان تلاش کردند، بین جریان واریزه‌ای و بارش ارتباط برقرار کنند. بر این اساس، مدل‌ها و حد آستانه‌های بحرانی زیادی برای راه‌اندازی جریان واریزه‌ای با استفاده از پارامترهای مختلف بارندگی به‌وسیله محققان مختلف پیشنهاد شده است. به‌عنوان مثال می‌توان به آستانه‌های شدت-مدت بارش (Cannon و همکاران، ۲۰۱۱)، بارندگی-تجمعی-بارش پیشین (Wieczorek و Guzzetti، ۱۹۹۹) و مدل‌های

مقدار مواد رسوب و شیب بستر جریان از عوامل اصلی راه‌اندازی جریان واریزه محسوب می‌شوند. در واقع زمانی که بارش عامل اصلی وقوع جریان واریزه‌ای باشد، جریان‌های واریزه به‌صورت لغزش زمین به‌وسیله بارش‌های سنگین شروع می‌شوند. ولی در صورتی که تجمع مواد رسوب در بستر رودخانه عامل اصلی رخداد جریان واریزه‌ای باشد، جریان واریزه‌ای در اثر فرسایش بستر به‌وسیله تنش برشی جریان ایجاد می‌شود (Zhuang و همکاران، ۲۰۱۵).

با رشد روزافزون جمعیت و به‌دنبال آن افزایش مناطق مستعد زمین‌لغزش و جریان‌های واریزه‌ای، شدت اثرات آن‌ها بر جمعیت و زیرساخت‌ها افزایش می‌یابد. به‌طور کلی، به دلایل زیر، شدت خسارات جریان واریزه‌ای بر زندگی بشر بسیار زیاد است. (۱) از آنجا که بیشتر حجم جریان را مواد درشت دانه تشکیل می‌دهد، لذا عبور سنگ و رسوبات از روی تأسیسات و سازه‌ها نظیر سرریز سدها و حوضچه‌های آرامش، باعث ایجاد خوردگی، فرسایش، حفره و در نهایت منجر به اختلال در عملکرد سازه‌ها می‌شود. به‌عنوان مثال مطابق با گزارشات، سد انحرافی روزبهان در ایران، یکی از سدهایی است که عبور جریان واریزه‌ای از روی آن، خسارات زیادی به بار آورد. بنابراین، غلظت بالای رسوبات بر نیروی ناشی از ضربه شدید این سیلاب‌ها اثرگذار است و در نتیجه خسارات وارده به تأسیسات به نسبت بیشتر است (Elahi و Banihabib، ۲۰۰۹). (۲) افزایش غلظت رسوب در جریان‌های واریزه‌ای موجب افزایش زبری هیدرولیکی جریان می‌شود و افزایش زبری باعث می‌شود تا برای دبی‌های مشخص، عمق جریان افزایش یافته، باعث تشدید طغیان رودخانه‌ها و افزایش پهنه سیل‌گیری شود (Banihabib و Masumi، ۲۰۰۸). (۳) از نظر هیدرولوژیکی دبی اوج این سیلاب‌ها نسبت به دبی اوج سیلاب معمولی بیشتر است، لذا شدت خسارات جریان واریزه‌ای بسیار زیاد است (Banihabib و Masumi، ۲۰۰۸). در واقع این جریان‌ها اغلب بدون هشدار و به سرعت حرکت می‌کنند و قادرند در مدت زمان کوتاهی بزرگراه‌ها، پل و سایر تأسیسات و اجسام را در مسیر خود، تخریب و نابود کنند (Chen و همکاران، ۲۰۱۱؛ Hassan-Esfahani و Banihabib).

بستگی دارد. این آستانه‌ها دست کم ۳۰ درصد نسبت به قبل از زمین‌لرزه کاهش یافته است. علاوه بر این، روابط مختلف بین میزان فرسایش و حجم واریزه تولیدی در هر حوضه نشان داد، رسوبات جریان در مناطق بینگسیو و دوجانین نسبت به مناطق دیگر بیشتر فرسایش می‌یابند.

Guo و همکاران (۲۰۱۳)، درصد ارائه یک آستانه برای هشدار وقوع جریان واریزه‌ای با استفاده از بارش پیشین در حوضه جیان‌جیا واقع در چین بودند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد، آستانه شدت-مدت برای شروع جریان واریزه‌ای در حوضه جیان‌جیا، پایین‌تر از آستانه‌های ارائه شده قبلی در مناطق دیگر است. همچنین، مدت زمان بارندگی بحرانی که منجر به راه-اندازی جریان واریزه‌ای می‌شد را به صورت تابعی از بارش پیشین ارائه دادند. Tang و همکاران (۲۰۱۲)، یک آستانه شدت-مدت برای رخداد جریان واریزه‌ای در منطقه چینگینگ به صورت توانی ارائه دادند. همچنین، آن‌ها یک آستانه برای بارش پیشین برای شروع جریان واریزه‌ای در این منطقه پیشنهاد دادند.

در این پژوهش، برای نخستین بار از آستانه بارندگی تجمعی-زمان برای تعیین آستانه وقوع جریان واریزه‌ای و هشدار، در چهار حوضه مطالعاتی شامل ناورود، نکا، گرگان‌رود و بابل‌رود واقع در استان‌های گیلان و مازندران استفاده شده است. سپس آستانه شدت-مدت بارندگی در ناحیه شمالی کوهستان البرز برآورد شده و با روابط ارائه شده به وسیله محققان قبل مقایسه شده است. استخراج آستانه‌های بارندگی مطابق با روش پیشنهادی Hirano (۱۹۹۳) صورت گرفته است که در ادامه توضیح داده خواهد شد. این روش، جز روش‌های تجربی تعیین آستانه‌های بارندگی است. در عمل، این آستانه‌ها از داده‌های بارندگی و آمار وقوع جریان واریزه‌ای در گذشته به دست می‌آیند. این روش به این علت استفاده شده که روشی ساده بر اساس داده‌های هواشناسی بوده، داده‌های مورد نیاز آن برای تعیین آستانه‌های بارندگی وقوع جریان واریزه‌ای در حوضه‌های ایران برای استفاده از آن موجود می‌باشد. علاوه بر این، این روش نیاز به اندازه‌گیری دشوار داده‌های میدانی ندارد و با توجه به این‌که داده‌های هواشناسی قابل پیش‌بینی هستند، لذا با

شدت بیشینه-بارندگی تجمعی (Guzzetti و همکاران، ۲۰۰۸) اشاره کرد. Hirano و Moriyama (۱۹۹۳) در مطالعه بر روی پیش‌بینی بارندگی بحرانی ایجاد کننده جریان واریزه‌ای در محدوده حوضه رودخانه میزونانشی واقع در ژاپن، از روش تجزیه تحلیل سامانه استفاده کردند. نتیجه مطالعه آن‌ها نشان داد، در صورتی که مقدار بارندگی از ۱۴ میلی‌متر در زمان تمرکز حوضه بیشتر شود، جریان واریزه‌ای رخ خواهد داد. Nikolopoulos و همکاران (۲۰۱۵)، اثر عدم قطعیت تخمین باران، به وسیله باران‌سنج‌ها را بر آستانه شدت-مدت (بارندگی که منجر به رخداد جریان واریزه‌ای می‌شود) رخداد جریان واریزه‌ای مورد بررسی قرار دادند. همچنین، اثر تراکم شبکه باران‌سنج‌ها و روش درون‌یابی را بر تخمین بارندگی‌هایی که منجر به رخداد جریان واریزه‌ای می‌شود، ارزیابی کردند. با استفاده از شبکه باران‌سنج‌ها، بارندگی به وسیله سه روش درون‌یابی، شامل نزدیک‌ترین همسایگی، وزن-دهی معکوس مسافت و کریجینگ معمولی تخمین زده شد. نتایج نشان داد که روش درون‌یابی نزدیک‌ترین همسایگی نسبت به دو روش دیگر، اریبی کمتر، اما واریانس بیشتری دارد. به‌طور کلی، کاهش تراکم باران‌سنج‌ها منجر به افزایش عدم قطعیت و افزایش واریانس تخمین بارش‌هایی می‌شود که منجر به رخداد جریان واریزه‌ای می‌شوند. Ma و همکاران (۲۰۱۷)، آستانه شدت-مدت بارش و شرایط تولید جریان واریزه‌ای، در چهار منطقه آسیب‌دیده (بینگسیو<sup>۱</sup>، دوجانین<sup>۲</sup>، چینگینگ<sup>۳</sup> و بیچوان<sup>۴</sup>) در اثر زمین‌لرزه ونچوان<sup>۵</sup> واقع در فلات غرب سیچوان<sup>۶</sup> تحلیل کرده، با یکدیگر مقایسه کردند. یافته‌های پژوهش آن‌ها نشان داد، رویدادهای جریان واریزه‌ای در چهار منطقه، آستانه‌های شدت-مدت متفاوتی ایجاد کرده است. آن‌ها دریافتند، آستانه‌های بارش رخداد جریان واریزه‌ای، پس از زمین‌لرزه، در مناطق مختلف، متفاوت بوده، به حجم رسوبات تحت تأثیر

<sup>1</sup> Yingxiu

<sup>2</sup> Dujiangyan

<sup>3</sup> Qingping

<sup>4</sup> Beichuan

<sup>5</sup> Wenchuan

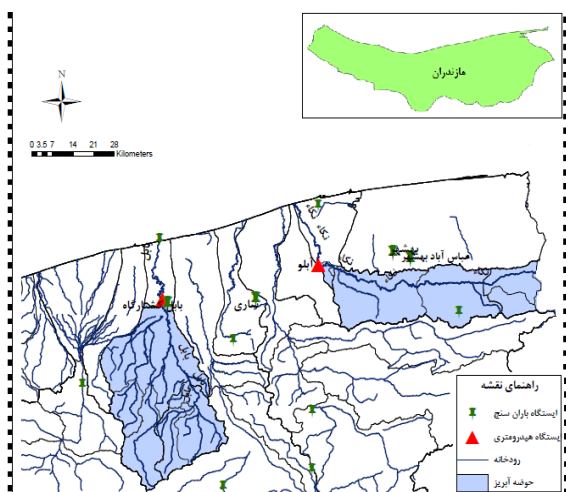
<sup>6</sup> Sichuan

استفاده از این روش، هشدار و پیش‌بینی وقوع جریان‌های واریزه‌ای را میسر می‌کند.

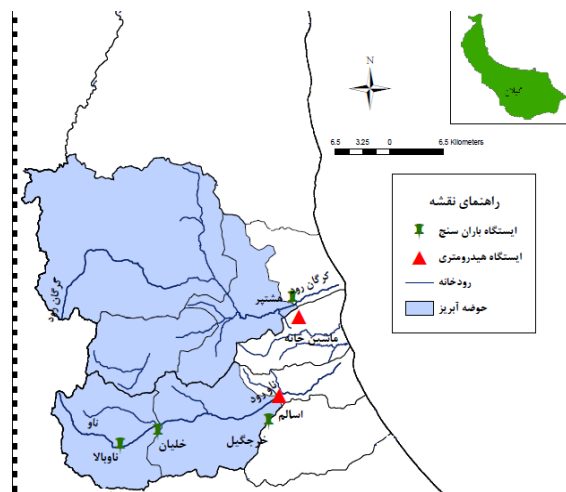
### مواد و روش

**منطقه مورد پژوهش:** در این تحقیق، به‌منظور شناسایی حوضه‌هایی که در آن‌ها جریان واریزه‌ای رخ داده است، از اطلاعات مربوط به ۵۲ زیرحوضه در ناحیه البرز، شامل استان‌های گلستان، مازندران، گیلان، تهران، قزوین و سمنان استفاده شده است. ایران از تنوع آب و هوایی زیادی برخوردار است. از آنجا که در کشور وقوع جریان واریزه‌ای اغلب تحت تأثیر بارش‌های سنگین می‌باشد، به همین علت، منطقه مورد مطالعه، بخشی از ناحیه خزری است که تحت تأثیر بادهای سیبری، شدیدترین بارندگی‌ها در این مناطق رخ داده، بیشتر مستعد وقوع جریان

واریزه‌ای هستند (Asghari-Pari, ۲۰۰۲). پس از بررسی اطلاعات، ۱۰ حوضه از میان ۵۲ حوضه مورد بررسی، رخداد جریان واریزه‌ای داشته است. اما به دلایلی از جمله عدم ثبت وقایع بارندگی در کلیه تاریخ‌های وقوع جریان واریزه‌ای، عدم دسترسی به داده‌های هایتوگراف بارندگی در استان‌های مختلف کشور و عدم وجود تعداد داده کافی، تعداد حوضه‌های مطالعاتی به چهار حوضه آبخیز شامل ناورود و گرگان‌رود واقع در استان گیلان، نکا و بابل‌رود در استان مازندران کاهش یافت. شکل ۱، موقعیت جغرافیایی حوضه‌های مطالعاتی، ایستگاه‌های هیدرومتری و رودخانه‌ها و جدول ۱، اطلاعات فیزیوگرافی مربوط به آن‌ها و متوسط بارش سالانه در سال‌های رخداد جریان واریزه‌ای را نشان می‌دهد.



(ب)



(الف)

شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوضه‌ها، ایستگاه‌های هیدرومتری و باران‌سنجی مورد مطالعه، الف) گیلان و ب) مازندران

جدول ۱- مشخصات فیزیوگرافی حوضه‌های آبخیز مورد مطالعه

رودخانه	ایستگاه هیدرومتری	مساحت حوضه (کیلومتر مربع)	متوسط بارش سالانه (میلی‌متر)	متوسط شیب (درجه)	متوسط ارتفاع (متر)
ناورود	اسالم	۲۶۵/۲۳	۱۴۲۸/۷	۴۱/۵۳	۱۳۹۰/۵۱
گرگان‌رود	ماشین‌خانه	۵۸۹/۰۹	۱۲۷۹/۵	۳۷/۹۹	۱۴۱۱/۷۸
نکا	آبلو	۱۹۳۳/۶۷	۷۹۰/۳	۲۴/۷۶	۱۵۵۶/۵۲
بابل‌رود	کشتارگاه	۱۵۰۶/۶۱	۱۰۱۲/۵	۲۱/۹۱	۷۶۴/۸۳

داده‌های روزانه دبی جریان (مترمکعب در ثانیه) و دبی رسوب (تن در روز) برای مجموعه حوضه‌های واقع در ناحیه کوهستانی البرز، در محدوده سال‌های ۱۳۹۲-

### روش پژوهش

داده‌های بارندگی و وقایع جریان واریزه‌ای: در این تحقیق، به‌منظور شناسایی رخداد جریان واریزه‌ای،

هیدرومتری واقع در ناحیه البرز ایران، تاریخ وقوع جریان واریزه‌ای و غلظت رسوب در تاریخ‌های مربوطه را نشان می‌دهد.

$$c = \frac{q_s}{q_w} \quad (1)$$

که در آن،  $C$  بیانگر غلظت رسوبات جریان واریزه-ای،  $q_s$  دبی رسوب و  $q_w$  دبی جریان آب است.

۱۳۴۲، از سازمان مدیریت منابع آب ایران اخذ شد. برای تعیین وضعیت رخداد جریان واریزه‌ای، برای مجموعه ایستگاه‌های یاد شده، غلظت رسوبات، مطابق رابطه (۱) محاسبه شد. بدین ترتیب، در صورتی که غلظت بدون بعد رسوب جریان (حجم رسوب به حجم جریان) بیشتر از ۰/۰۲ شود، جریان واریزه‌ای رخ داده است (Hirano و همکاران، ۱۹۹۷؛ Banihabib، ۱۹۹۹). جدول ۲، مجموعه‌ای از اسامی ایستگاه‌های

جدول ۲- مجموعه اسامی حوضه‌ها و ایستگاه‌های هیدرومتری و تاریخ وقوع جریان واریزه‌ای

استان	حوضه	ایستگاه هیدرومتری	تاریخ رخداد	غلظت رسوب	استان	حوضه	ایستگاه هیدرومتری	تاریخ رخداد	غلظت رسوب
گیلان	ناورود	اسالم	۷۶/۴/۱۵	۰/۱۴	مازندران	چالوس	پل زغال	۶۶/۵/۳	۰/۰۲۳
گیلان	ناورود	اسالم	۷۷/۳/۸	۰/۲۱	مازندران	چالوس	پل زغال	۶۷/۶/۲	۰/۰۲۸
گیلان	ناورود	اسالم	۸۱/۵/۴	۰/۲۲	مازندران	تالار	شیرگاه	۵۱/۲/۳۱	۰/۰۲۶
گیلان	ناورود	اسالم	۸۱/۵/۱	۰/۱۷۹	مازندران	بابلرود	کشتارگاه	۷۵/۷/۱۱	۰/۰۲
گیلان	گرگانرود	ماشین‌خانه	۷۵/۷/۲۳	۰/۰۵۷	مازندران	بابلرود	کشتارگاه	۷۵/۷/۱۶	۰/۰۳۷
گیلان	قزل‌اوزن	گیلوان	۴۲/۸/۵	۰/۰۲	مازندران	بابلرود	کشتارگاه	۷۵/۷/۲۵	۰/۰۷۹
گیلان	قزل‌اوزن	گیلوان	۶۳/۵/۲	۰/۰۳۳	گلستان	قره‌چای	رامیان	۸۷/۷/۸	۰/۰۲
مازندران	نکا	آبلو	۶۵/۶/۴	۰/۰۳۴	گلستان	قره‌چای	رامیان	۶۶/۱/۱۵	۰/۰۲۲
مازندران	نکا	آبلو	۹۱/۶/۱۳	۰/۰۳۲	سمنان	حبله‌رود	بنکوه	۸۰/۵/۲۱	۰/۰۶
مازندران	نکا	آبلو	۵۰/۸/۲۷	۰/۰۲۹	سمنان	حبله‌رود	بنکوه	۸۳/۱۲/۲۳	۰/۰۵۳
مازندران	نکا	آبلو	۵۰/۹/۱۸	۰/۰۴	سمنان	حبله‌رود	بنکوه	۸۸/۱۲/۸	۰/۱۱
مازندران	نکا	آبلو	۸۰/۶/۲۸	۰/۱	سمنان	حبله‌رود	بنکوه	۵۹/۴/۲۸	۰/۰۲
مازندران	نکا	آبلو	۸۲/۳/۴	۰/۰۲۴	سمنان	حبله‌رود	بنکوه	۶۱/۳/۷	۰/۰۲۸
مازندران	نکا	آبلو	۵۰/۸/۲۶	۰/۰۲	سمنان	حبله‌رود	بنکوه	۸۳/۴/۲۳	۰/۰۲۳
مازندران	چالوس	پل زغال	۶۷/۶/۳	۰/۰۳۹	سمنان	حبله‌رود	بنکوه	۸۹/۱/۲۹	۰/۰۳
مازندران	چالوس	پل زغال	۶۶/۱/۳۰	۰/۰۲۲	گیلان	پلرود	درازلات	۶۲/۲/۲۴	۰/۰۴۱

سازمان‌های آب وزارت نیرو دریافت شد. به‌علت آمار محدود مجموعه داده‌های وزارت نیرو در بازه زمانی ۱۳۸۳-۱۳۶۲، عدم ثبت وقایع بارندگی در خارج از بازه زمانی مذکور، عدم دسترسی به داده‌های هایتوگراف بارش در استان‌های مختلف کشور و در ایستگاه‌های باران‌سنجی منتخب برای هر ایستگاه هیدرومتری و همچنین، فقدان وجود ایستگاه باران‌سنجی مناسب در اطراف ایستگاه هیدرومتری، تعداد ایستگاه‌های مطالعاتی به چهار ایستگاه اسالم، ماشین‌خانه، آبلو و کشتارگاه کاهش یافت. جدول ۳، اسامی ایستگاه‌های باران‌سنجی ثابت مورد استفاده برای هر یک از ایستگاه‌های هیدرومتری مورد مطالعه و سایر اطلاعات بارندگی‌های ایجاد کننده جریان واریزه-

پس از شناسایی وقایع رخداد جریان واریزه‌ای، به‌منظور تعیین آستانه‌های بارندگی که منجر به وقوع جریان واریزه‌ای می‌شوند، ابتدا فهرست مجموعه ایستگاه‌های باران‌سنجی از سازمان‌های هواشناسی و وزارت نیرو در استان‌های مذکور دریافت شد. پس از بررسی موقعیت جغرافیایی هر یک از ایستگاه‌های باران‌سنجی در اطراف ایستگاه‌های هیدرومتری، در محیط نرم‌افزار GIS، نزدیک‌ترین ایستگاه باران‌سنجی به هر یک از ایستگاه‌های هیدرومتری انتخاب شد. شکل ۱، موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های باران‌سنجی، واقع در اطراف ایستگاه‌های هیدرومتری مورد مطالعه را نشان می‌دهد. سپس آمار هایتوگراف بارندگی برای مجموعه ایستگاه‌های باران‌سنجی ثابت گزینش شده، از

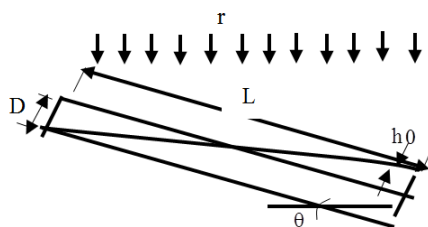
ای را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است، از میان تاریخ-های وقوع جریان واریزه‌ای ذکر شده در جدول ۲، تنها داده شده در جدول ۳ در دسترس بوده است.

جدول ۳- اطلاعات ثبت شده بارندگی‌های مربوط به تاریخ‌های موجود رخداد جریان واریزه‌ای

ایستگاه هیدرومتری	ایستگاه باران‌سنج	تاریخ وقوع	مدت بارش (دقیقه)	مقدار بارش (میلی‌متر)	زمان شروع	زمان خاتمه
ناورود	خرجگیل	۷۶/۴/۱۵	۵۴۰	۴۲/۱	۱۲:۵۰	۹:۵۰
ناورود	خرجگیل	۷۷/۳/۸	۶۲	۷/۰۴	۱۸:۵۶	۱۹:۵۸
ماشین‌خانه	هشتپر	۷۵/۷/۲۳	۹۴۱	۱۸/۲۹	۱۳:۴۴	۵:۲۴
آبلو	ساری	۸۲/۳/۴	۱۰۳	۱۳/۸۹	۲:۱۵	۳:۵۷
آبلو	بهشهر	۸۰/۶/۲۸	۷۸۱	۳۵/۰۱	۱:۴۵	۱۳:۴۶
کشتارگاه	بابل	۷۵/۷/۲۵	۵۲۳	۲۵/۹۹	۳:۴۳	۱۲:۲۵
کشتارگاه	بابل	۷۵/۷/۱۵	۶۶۱	۲۰/۵	۹:۰۰	۲۰:۰۱
ماشین‌خانه	هشتپر	۷۵/۷/۲۳	۴۲	۵/۳۱	۹:۴۸	۱۰:۲۹
ماشین‌خانه	هشتپر	۷۵/۷/۲۳	۱۷۱	۷/۰۹	۴:۴۸	۷:۳۸
ماشین‌خانه	خرجگیل	۷۵/۷/۲۳	۳۸۹	۱۰/۰۵	۱۸:۵۳	۱:۲۱
ماشین‌خانه	خرجگیل	۷۵/۷/۲۳	۴۴	۳/۸۲	۹:۲۶	۱۰:۰۹

که در آن،  $t$  زمان بارش،  $R_c$  بارندگی بحرانی،  $\theta$  زاویه شیب،  $D$  عمق نهشته‌ها،  $L$  طول سطح شیب‌دار،  $K$  هدایت هیدرولیکی،  $T$  زمان تمرکز و  $r(t)$  شدت بارش است. برای به‌دست آوردن معیاری برای رخداد جریان واریزه باید  $R_c$  و  $T$  تخمین زده شوند، از آنجا که تعیین  $K$ ،  $D$ ،  $L$  و  $\theta$  در عمل به‌علت خطای اندازه‌گیری، از دقت کافی برخوردار نیست، از این‌رو هیرانو روش تجزیه تحلیل سامانه را برای تخمین  $T$  و  $R_c$  به کاربرد و بارش تجمعی را به‌صورت زیر تعریف کرد.

$$R(t, t_0) = \int_{t-t_0}^t r(\tau) d\tau \quad (۴)$$



شکل ۲- نمایی از طرح شماتیک یک سطح شیب‌دار

مقادیر بیشینه  $R(t, t_0)$  برای هر زمان بارش،  $R \max t_0$  با زمان تمرکزهای مختلف قابل ترسیم است. اگر خطایی در اطلاعات و تئوری بحث وجود

روش پیشنهادی هیرانو برای پیش‌بینی بارندگی‌های ایجاد کننده جریان واریزه‌ای: Hirano (۱۹۹۳)، بیان کرد شرایط بحرانی برای وقوع جریان واریزه‌ای در یک شیب از نهشته‌ها زمانی روی می‌دهد که تنش برشی با مقاومت برشی در عمق  $a$  برابر شود (شکل ۲). سپس زاویه بحرانی برای رخداد جریان واریزه‌ای را به‌صورت رابطه (۲) بیان کرد (Hirano, ۱۹۹۷).

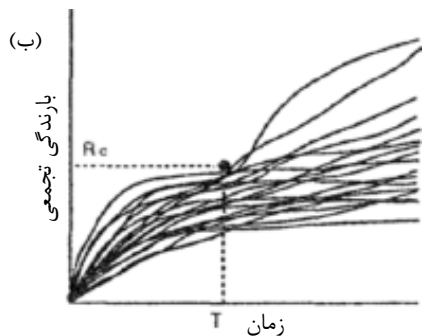
$$\tan \theta_c = \frac{C / (\rho g a \cos \theta_c) + C * (\sigma / \rho - 1) \tan \phi}{C * (\sigma / \rho - 1) + 1 + \frac{h_0}{a}} \quad (۲)$$

که در آن،  $C$  نیروی چسبندگی،  $\rho$  و  $\sigma$  به‌ترتیب چگالی نهشته‌ها و آب،  $a$  فاصله از سطح،  $h$  عمق جریان سطحی و  $C^*$  غلظت مواد انباشته شده،  $\phi$  زاویه اصطکاک داخلی و  $g$  شتاب گرانش می‌باشد.

هیرانو شرایط رخداد جریان واریزه‌ای به‌علت بارندگی را با حل معادلات جریان بر روی سطح شیب‌دار به‌دست آورد. معادله زیر نشان می‌دهد که جریان واریزه‌ای بر روی سطح شیب‌دار هنگامی رخ می‌دهد که بارندگی تجمعی در زمان تمرکز از مقدار معینی (که به خصوصیات شیب بستگی دارد) تجاوز کند.

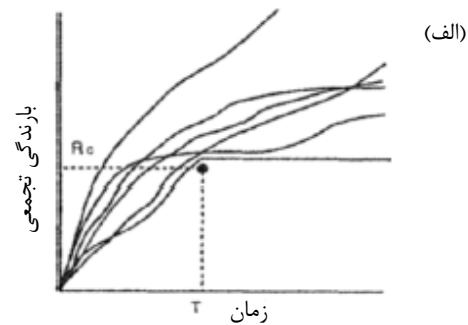
$$R(t, T) = \int_{t-T}^t r(t) d(t) \geq \frac{DK}{L} \tan \theta = R_c \quad (۳)$$

نداده باشد، از پایین آن عبور نمایند (شکل ۳- ب)  
(Hirano, 1997).



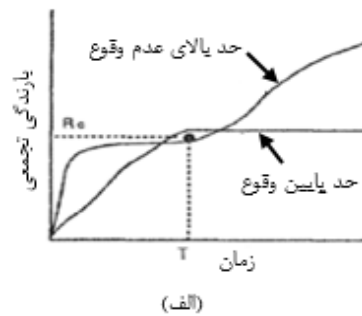
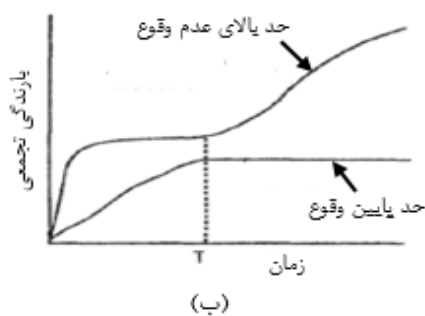
شکل ۳- بارندگی تجمعی در زمان، الف) رخداد جریان واریزه‌ای و ب) عدم رخداد (Hirano, 1997)

نداشته باشد، در صورتی که جریان واریزه‌ای رخ دهد، بایستی خطوط جریان واریزه‌ای از بالای نقطه  $(R_c, t)$  عبور کنند (شکل ۳- الف) و اگر جریان واریزه‌ای رخ



۴- ب خواهد شد. نقطه‌ای که اختلاف بین دو منحنی کمینه است، زمان تمرکز در نظر گرفته می‌شود و مقادیر حد پایین رخداد و حد بالای عدم رخداد تعیین می‌شود (Hirano, 1997).

هیرانو بیان کرد، حد بالای عدم رخداد جریان واریزه‌ای و حد پایین رخداد، بایستی در نقطه  $(R_c, t)$  هم‌دیگر را قطع نمایند (شکل ۴- الف) که به دلیل خطا در داده‌ها و شرایط منطقه‌ای غیر دائمی، مشابه شکل



شکل ۴- حد پایین وقوع و حد بالای عدم وقوع (Hirano, 1997)

با شدت زیاد و یا طولانی مدت با شدت کم). بنابراین، لازم است، رابطه بین جریان واریزه‌ای با پارامترهای مختلف بارندگی مانند شدت و مدت بارش بررسی شود (Zhuang و همکاران، ۲۰۱۵). در این بخش، استخراج آستانه‌های وقوع جریان واریزه‌ای در مجموعه حوضه‌های ناورود، گرگان‌رود، بابل‌رود و نکا مطابق با روش تجزیه تحلیل سامانه صورت گرفته، با یکدیگر مقایسه شده است. بدین ترتیب، برای استخراج آستانه‌ها از هایتوگراف بارندگی باران‌سنج‌های ثابت در ایستگاه‌های باران‌سنج منتخب، در بازه زمانی سال‌های ۱۳۸۳-۱۳۶۲ استفاده شد. سپس، آستانه شدت-مدت بارندگی در ناحیه شمالی کوهستان البرز، برآورد کرده

مطابق توضیحات فوق، بر اساس روش پیشنهادی هیرانو، ابتدا زمان تمرکز حوضه‌ها بر اساس داده‌های فیزیوگرافیک آن‌ها تعیین شد. سپس از مجموعه داده‌های هایتوگراف بارندگی موجود منحنی‌های شدت-مدت جریان واریزه‌ای و جریان‌های غیر واریزه‌ای مشخص شد. نهایتاً با استفاده از داده‌های شدت-مدت موجود حد بالا و حد پایین رخداد جریان واریزه‌ای در زمان معادل زمان تمرکز تعیین شد.

## نتایج و بحث

جریان واریزه‌ای به وسیله بارش‌هایی با ویژگی‌ها و شرایط مختلف اتفاق می‌افتد (بارندگی‌های کوتاه‌مدت

بهترین رابطه برآورد زمان تمرکز در سایر حوضه‌های کوهستانی معرفی کردند که به صورت رابطه زیر است.

$$T_c = 58.04A^{0.32} \quad (۵)$$

که در آن،  $T_c$  زمان تمرکز حوضه (دقیقه) و  $A$  مساحت حوضه (کیلومتر مربع) می‌باشد. به منظور تعیین زمان تمرکز حوضه‌ها برای جریان واریزه‌ای، بدین صورت عمل شده که ابتدا با توجه به رابطه فوق، زمان تمرکز برای حوضه‌های مورد مطالعه، برآورد شده است. با توجه به این که غلظت بالای رسوب جریان‌های گلی و واریزه‌ای باعث افزایش زبری جریان و طبعاً کاهش سرعت آن شده، بنابراین، کاهش سرعت جریان، باعث افزایش زمان تمرکز می‌شود. لذا با توجه به روش هیرانو، هر جا منحنی‌های حد پایین وقوع و حد بالای عدم وقوع پس از زمان تمرکز برآورد شده، کمینه فاصله را با یکدیگر داشتند، حد وسط فاصله بین دو منحنی در این قسمت، به عنوان زمان تمرکز جریان واریزه‌ای در نظر گرفته شده است.

در نمودار شکل ۵، اشکال مربوط به حوضه گرگان‌رود نشان می‌دهند، این حوضه دارای زمان تمرکز حدوداً ۴۹۰ دقیقه می‌باشد و مقدار بارندگی بحرانی برای رخداد جریان واریزه‌ای معادل ۱۴/۱۵ میلی‌متر به دست می‌آید. همچنین، حد پایین وقوع و حد بالای عدم وقوع به ترتیب معادل ۱۳/۵ و ۱۴/۸ میلی‌متر برآورد شده است. در حقیقت، در صورتی که مقدار بارندگی در ۴۹۰ دقیقه از ۱۳/۵ میلی‌متر بیشتر نشود، جریان واریزه‌ای رخ نداده در صورتی که مقدار بارندگی در زمان تمرکز از ۱۴/۸ میلی‌متر تجاوز کند، جریان واریزه‌ای رخ خواهد داد. به عبارتی، اگر در زمان تمرکز، بارندگی مقداری بین بازه بحرانی ۱۳/۵ - ۱۴/۸ میلی‌متر (به طور متوسط ۱۴/۱۵ میلی‌متر) داشته باشد، جریان واریزه‌ای ممکن است رخ دهد. در واقع این محدوده آستانه بحرانی برای وقوع جریان واریزه‌ای در حوزه آبخیز گرگان‌رود است. در مورد حوزه آبخیز بابل‌رود، پس از تعیین زمان تمرکز حوضه تقریباً معادل ۶۰۰ دقیقه، مشاهده می‌شود، به ازای مدت زمان بیشتر از ۶۰۰ دقیقه منحنی‌های وقوع و عدم وقوع واگرا شده‌اند. این موضوع باعث شده برآورد حد پایین وقوع و حد بالای عدم وقوع جریان واریزه‌ای توأم با شک و تردید باشد.

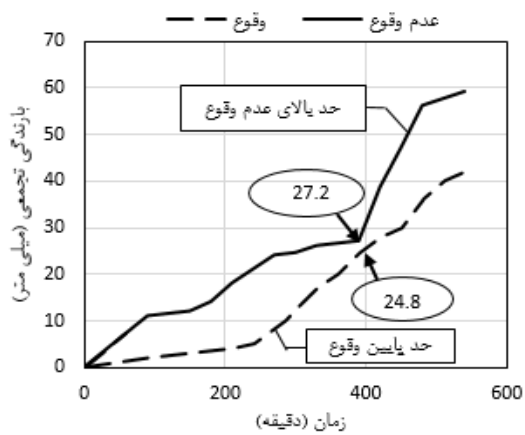
و با آستانه‌های ارائه شده قبلی به وسیله محققان دیگر مقایسه شده است.

**حد آستانه بارندگی‌های ایجاد کننده جریان واریزه‌ای به روش هیرانو:** پس از شناسایی بارش‌های سنگین و با شدت بالا در حوضه‌های یاد شده، طبق روش هیرانو، نمودار بارش تجمعی نسبت به زمان، برای بارش‌های منتخب ترسیم شد. در شکل ۵، اشکال سمت راست این بارش‌ها را به تفکیک رخداد و عدم رخداد جریان واریزه‌ای برای هر یک از ایستگاه‌های هیدرومتری نشان می‌دهد و در سمت چپ، حد پایین رخداد و حد بالای عدم رخداد مشخص شده است.

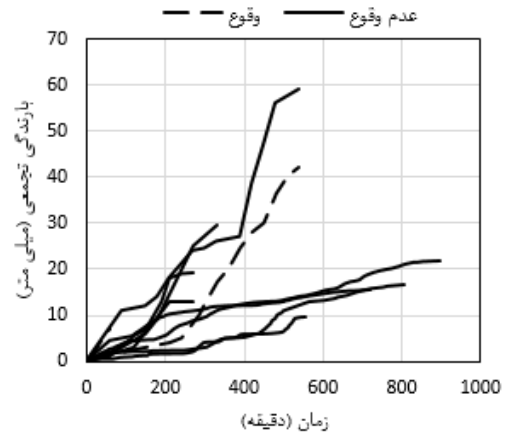
شکل ۵، اشکال مربوط به حوضه ناورود را نشان می‌دهند. حد پایین رخداد ۲۴/۸ میلی‌متر و حد بالای عدم رخداد ۲۷/۲ میلی‌متر است. در واقع، بارش‌های کمتر از ۲۴/۸ میلی‌متر در زمان تمرکز موجب رخداد جریان‌های واریزه‌ای نشده، اما بارش‌های بیشتر از ۲۷/۲ میلی‌متر باعث وقوع جریان واریزه‌ای در حوضه ناورود می‌شوند. همچنین، زمان تمرکز حوضه از این روش شش ساعت و ۳۰ دقیقه به دست می‌آید که نسبت به زمان تمرکز حوضه در حالت جریان بدون غلظت بالای رسوب (پنج ساعت و ۲۸ دقیقه، (Asghari-Pari, ۲۰۰۲)، زمان بیشتری نشان می‌دهد که این مطلب بیانگر افزایش زمان تمرکز حوضه، برای جریان‌های واریزه‌ای است.

به منظور اطمینان از زمان تمرکز حوضه‌ها از نتیجه تحقیق Eslamian و Mehrahi (۲۰۰۵)، استفاده شده است. بیشتر روابط ارائه شده برای برآورد زمان تمرکز حوضه‌ها در تحقیقات دیگر بر اساس اطلاعات و شرایط اقلیمی مخصوص به محدوده مورد مطالعه آن تحقیق به دست آمده است و به کارگیری این روابط در مناطقی با ویژگی‌های اقلیمی متفاوت با شک و تردید همراه است. در تحقیق یاد شده از حوضه‌های کوهستانی با الگوی آب و هوایی مشابه با محدوده مطالعاتی تحقیق حاضر استفاده شده، روابط مختلف برآورد زمان تمرکز ارزیابی و با یکدیگر مقایسه شده است. بدین ترتیب آن‌ها با واسنجی ۱۴ رابطه تجربی زمان تمرکز، در ۱۱ حوضه کوهستانی واقع در استان‌های مازندران، تهران و اصفهان، رابطه پیلگریم-مک درمات را به عنوان

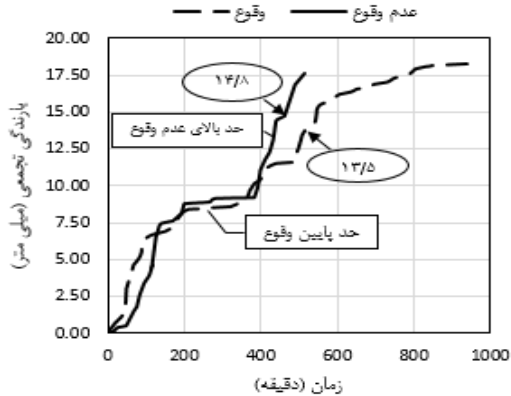




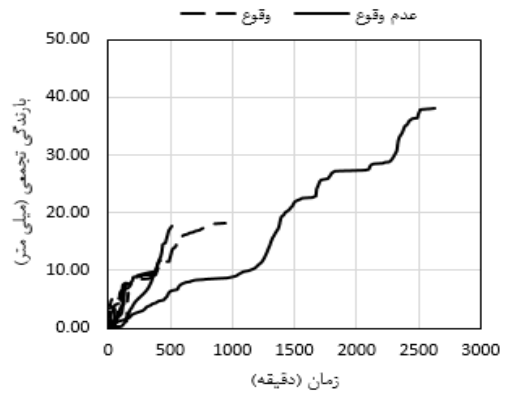
حوزه آبخیز ناورود-ایستگاه هیدرومتری اسالم



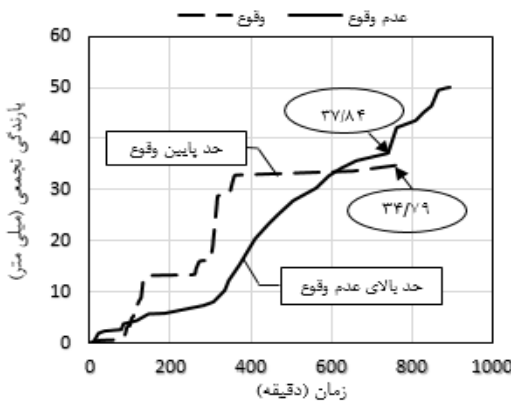
حوزه آبخیز ناورود-ایستگاه هیدرومتری اسالم



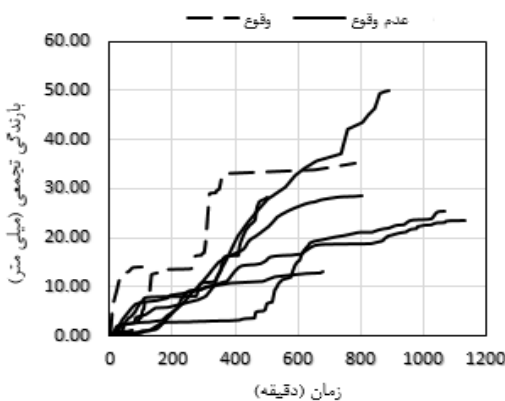
حوزه آبخیز گرگان رود-ایستگاه هیدرومتری ماشین خانه



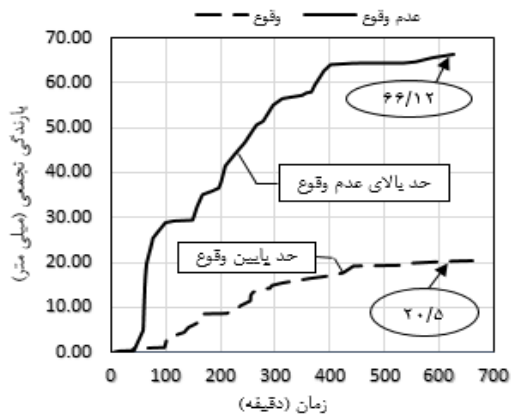
حوزه آبخیز گرگان رود-ایستگاه هیدرومتری ماشین خانه



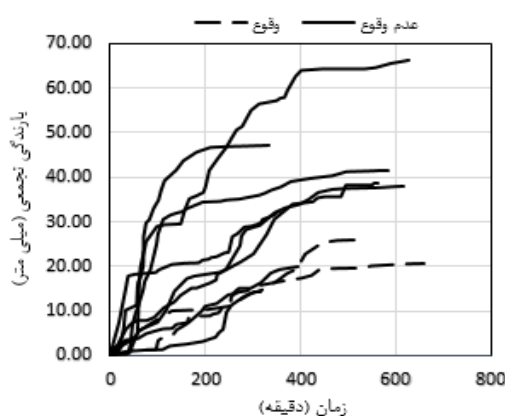
حوزه آبخیز نکا-ایستگاه هیدرومتری آبلو



حوزه آبخیز نکا-ایستگاه هیدرومتری آبلو



حوزه آبخیز بابلرود-ایستگاه هیدرومتری کشتارگاه



حوزه آبخیز بابلرود-ایستگاه هیدرومتری کشتارگاه

شکل ۵- آستانه بارندگی-تجمعی-زمان برای هر یک از حوضه‌های مورد مطالعه

جدول ۴- ویژگی‌های حد آستانه بارندگی‌های وقوع جریان واریزه‌ای به روش هیرانو

حوزه آبخیز	زمان تمرکز جریان واریزه‌ای (دقیقه)	بارندگی بحرانی (میلی‌متر)	حد پایین وقوع بارش (میلی‌متر)	حد بالای عدم وقوع بارش (میلی‌متر)
ناورود	۳۹۰	۲۸/۴	۲۴/۸	۲۷/۲
گرگان‌رود	۴۹۰	۱۴/۱۵	۱۳/۵	۱۴/۸
نکا	۷۴۵	۳۶/۲۹	۳۴/۷۹	۳۷/۸۴
بابل‌رود	۶۲۸	۴۳/۳۱	۲۰/۵	۶۶/۱۲

بارندگی‌هایی که باعث وقوع این جریان واریزه‌ای شدند، مطابق جدول زیر استفاده شده است. سپس، نمودار مربوط به شدت بارندگی (محور عمودی) در برابر مدت زمان (محور افقی) بارش‌های موجود در جدول ۵، رسم شده است (شکل ۶). بدین ترتیب، رابطه توانی میان شدت و مدت این بارش‌ها، به‌عنوان آستانه شدت-مدت بارندگی برای این ناحیه معرفی شده است که رابطه آن به‌صورت زیر است.

$$I = 6.14D^{-0.536} \quad 0.7 \leq D \leq 15 \quad (7)$$

که در آن،  $I$  شدت بارندگی (میلی‌متر در ساعت)،  $D$  مدت بارندگی (ساعت) است. این رابطه به‌خوبی نشان می‌دهد، با افزایش مدت بارندگی، شدت بارش کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است، از آنجا که تعداد وقوع جریان‌های واریزه‌ای محدود است و همه این جریان‌ها نیز ثبت نشده‌اند، لذا برآورد آستانه شدت-مدت بارندگی نیز، بر اساس آمار محدود موجود، صورت گرفته است. به‌طور مشابه، ارائه این آستانه‌ها برای تحقیقات پیشین، نیز بر اساس آمار و اطلاعات محدودی صورت گرفته است (Zhou و Tang، ۲۰۱۴).

این واگرایی می‌تواند به‌علت عدم ثبت بارش در کلیه تاریخ‌های وقوع جریان واریزه‌ای باشد. در واقع با استفاده از این روش، هر چه تعداد منحنی‌های هایتوگراف بارندگی‌های وقوع بیشتری در دسترس باشد، آستانه‌های وقوع جریان واریزه‌ای را می‌توان با دقت بیشتری به‌دست آورد. به‌طورکلی، جدول ۴، ویژگی‌های حد آستانه وقوع جریان واریزه‌ای برآورد شده از روش هیرانو را برای هر یک از حوزه‌های آبخیز نشان می‌دهد.

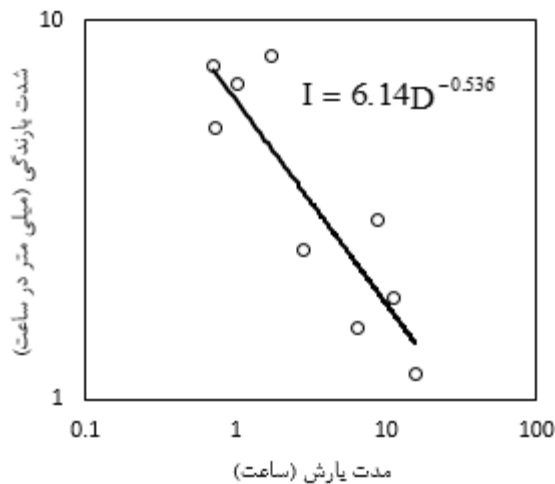
**حد آستانه‌های شدت-مدت بارش و مقایسه با نتایج تحقیق دیگران:** حد آستانه‌های شدت-مدت، از داده‌های شدت-مدت بارندگی‌هایی که منجر به وقوع جریان واریزه‌ای شده‌اند (طبق جدول ۳)، به‌دست آمده است. رابطه بین حد آستانه شدت-مدت بارش به‌صورت زیر نشان داده می‌شود.

$$I = c + \alpha D^\beta \quad (6)$$

که در آن،  $I$  شدت بارندگی،  $D$  مدت بارش و  $c$ ،  $\alpha$  و  $\beta$  ضرایب ثابت هستند. برای بیشتر حد آستانه‌های شدت-مدت، پارامتر  $c$  برابر صفر است (Zhuang و همکاران، ۲۰۱۵). بنابراین، به‌منظور برآورد آستانه شدت-مدت بارندگی برای ناحیه شمال البرز، از داده

جدول ۵- داده بارندگی‌های ایجادکننده جریان واریزه‌ای در حوضه‌های شمالی ایران

حوضه	ایستگاه باران‌سنج	تاریخ وقوع	زمان (ساعت)	مقدار بارش (میلی‌متر)	شدت بارش (میلی-متر در ساعت)
نکا	ساری	۸۲/۰۳/۰۴	۱/۷۱	۱۳/۸۹	۸/۰۹
ناورود	خرجگیل	۷۷/۰۳/۰۸	۱/۰۳	۷/۰۴	۶/۸۱
بابل‌رود	بابل	۷۵/۰۷/۲۵	۸/۷۱	۲۵/۹۹	۲/۹۸
بابل‌رود	بابل	۷۵/۰۷/۱۵	۱۱/۰۱	۲۰/۵	۱/۸۶
گرگان‌رود	هشتپر	۷۵/۰۷/۲۳	۱۵/۶۸	۱۸/۲۹	۱/۱۶
گرگان‌رود	هشتپر	۷۵/۰۷/۲۳	۰/۷	۵/۳۱	۷/۵
گرگان‌رود	هشتپر	۷۵/۰۷/۲۳	۲/۵۸	۷/۰۹	۲/۴۸
گرگان‌رود	خرجگیل	۷۵/۰۷/۲۳	۶/۴۸	۱۰/۰۵	۱/۵۵
گرگان‌رود	خرجگیل	۷۵/۰۷/۲۳	۰/۷۳	۳/۸۲	۵/۲



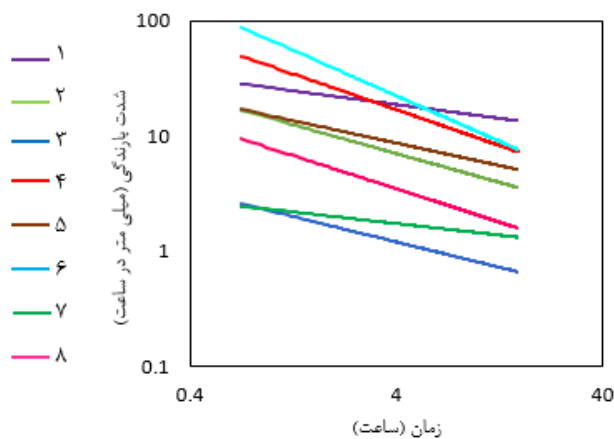
شکل ۶- آستانه شدت-مدت بارندگی‌های ایجاد کننده جریان واریزه‌ای برای حوضه‌های دامنه شمالی البرز

میلی‌متر دارند، جریان‌های واریزه‌ای رخ داده در آن‌ها بیشتر از نوع لغزشی بوده که در اثر وقوع بارندگی‌های سنگین به وجود می‌آیند. بنابراین، منشأ رخداد جریان واریزه‌ای در مناطق مورد مطالعه تقریباً یکسان است و اغلب در اثر بارندگی‌های سنگین رخ دادند.

آستانه‌های شدت-مدت ارائه شده در این تحقیق با نتایج محققان دیگر در مقیاس منطقه‌ای، ناحیه‌ای و جهانی مقایسه شده است (جدول ۶ و شکل ۷). نتیجه مطالعه Asghari-Pari (۲۰۰۲) بر روی نواحی مستعد وقوع جریان واریزه‌ای در ایران نشان داده است، مناطقی که متوسط بارش سالیانه بیشتر از ۵۵۰

جدول ۶- حد آستانه‌های شدت-مدت برای شروع جریان واریزه‌ای

محقق	مقیاس	منطقه مطالعاتی	رابطه شدت-مدت	بازه زمانی (ساعت)	شماره در شکل ۷
Tang و همکاران (۲۰۱۲)	محلی	چین-چینگینگ	$I = 25.962D^{-0.239}$	۱-۲۴	۱
Cannon و همکاران (۲۰۱۲)	ناحیه‌ای	جنوب کالیفرنیا	$I = 14D^{-0.5}$	۱۶۷-۱۲	۲
Guzetti و همکاران (۲۰۰۸)	جهانی	جهان	$I = 2.2D^{-0.44}$	۱-۱۰۰۰	۳
Jibson (۱۹۸۹)	ناحیه‌ای	ژاپن	$I = 39.71D^{-0.62}$	۵-۱۲	۴
Caine (۱۹۸۰)	جهانی	جهان	$I = 14.82D^{-0.39}$	۱۶۷-۲۴	۵
Tang و Zhou (۲۰۱۴)	محلی	چین-ونچوان	$I = 66.36D^{-0.79}$	۲-۱۵	۶
Guzetti و همکاران (۲۰۰۸)	جهانی	جهان	$I = 0.48D^{-0.11}$	۴۸-۱۰۰۰	۷
این تحقیق	ناحیه‌ای	ناحیه شمالی البرز	$I = 6.14D^{-0.536}$	۷-۱۵	۸



شکل ۷- مقایسه آستانه شدت-مدت ناحیه مورد مطالعه با نتایج محققان دیگر

هوای کوهستانی و سرد هستند و مقدار نمای مدت بارش (D) بین ۰/۴۸- الی ۰/۶۴- دارند، تندتر است و اغلب مقدار نمای مدت زمان بارش آن‌ها بین ۰/۷- و ۰/۸۱- است. این موضوع برای حوضه‌های کوهستانی البرز که در تحقیق حاضر مورد بررسی واقع شدند، نیز صدق می‌کند.

برخی از محدودیت‌های تعیین آستانه‌های تجربی وقوع جریان واریزه‌ای که بر اساس تحلیل آماری داده‌های تجربی به دست می‌آیند، این است که این آستانه‌ها وابسته به کل مجموعه داده‌های مورد استفاده هستند. لذا افزایش تعداد ایستگاه‌های باران‌سنجی، توسعه و استفاده از سامانه‌های رادار هواشناسی و ایجاد ارتباط بین بارندگی‌های مشاهده شده در مکان‌های مختلف، برای هشدار دقیق جریان واریزه‌ای پیشنهاد می‌شود. در واقع، نتایج بهتر، زمانی به دست می‌آید که از مجموعه داده‌های بیشتری استفاده شود، که از طریق افزایش تعداد باران‌سنج‌ها، ایجاد تجهیزات اندازه‌گیری پارامترهای مربوط به جریان واریزه‌ای و ثبت دقیق بارش‌ها محقق می‌شود.

### نتیجه‌گیری

تعیین آستانه وقوع جریان واریزه‌ای برای پیش‌بینی بارندگی‌هایی که منجر به جریان واریزه‌ای می‌شوند، حائز اهمیت است. در این پژوهش، آستانه‌های تجربی وقوع جریان واریزه‌ای به وسیله روش هیرانو برای حوضه‌های واقع در ناحیه کوهستانی البرز شامل ناورود، نکا، بابل‌رود و گرگان‌رود ارزیابی شد. این آستانه‌ها به وسیله داده‌های هایتوگراف بارندگی ایستگاه‌های باران‌سنج ثبات به دست آمد. سپس آستانه شدت-مدت بارندگی با استفاده از داده‌های شدت-مدت بارندگی‌هایی که منجر به وقوع جریان واریزه‌ای می‌شوند، برای ناحیه مورد مطالعه برآورد گشته، با نتایج تحقیقات قبل، مقایسه شد. نتایج این تحقیق نشان داد، برای حوضه‌های ناورود و گرگان‌رود، در صورتی که مقدار بارندگی در زمان تمرکز به ترتیب از ۲۷/۲ و ۱۴/۸ میلی‌متر تجاوز کند، جریان واریزه‌ای رخ می‌دهد. همچنین، در حوضه‌های بابل‌رود و نکا بارندگی‌های

مقایسه آستانه‌های شدت-مدت بارش ناحیه مورد مطالعه با نتایج محققان دیگر نشان می‌دهد، این آستانه‌ها با یکدیگر متفاوت هستند. در حالت کلی، آستانه‌های شدت-مدت بارندگی این پژوهش نسبت به آستانه‌های محلی و ناحیه‌ای سایر کشورها ارائه شده به وسیله تحقیقات پیشین، پایین‌تر است. به عبارت دیگر، حوضه‌های مورد مطالعه تحقیق حاضر، نسبت به نواحی دیگر (مطابق جدول ۶ و شکل ۷) ناپایدارتر بوده، پتانسیل بالاتری برای وقوع این جریان‌ها دارند. این نتایج نشان می‌دهد، حوضه‌های مناطق و نواحی مورد بررسی از جمله ایالت ونچوان در جنوب غرب چین با وضعیت اقلیمی کوهستانی، همچنین، ژاپن و کالیفرنیا در برابر وقوع جریان واریزه‌ای پایدارتر از حوضه‌های واقع در ایران هستند. زیرا اگرچه در نواحی مذکور، ممکن است شرایط فیزیوگرافی حوضه‌ها برای وقوع این جریان‌ها مستعد باشد، اما به علت انجام اقدامات حفاظتی مانند تثبیت خاک حوضه از طریق ایجاد پوشش گیاهی محکم و به دنبال آن افزایش پایداری حوضه در مناطق مذکور (ایالت ونچوان در جنوب غرب چین، ژاپن و کالیفرنیا)، احتمال وقوع جریان واریزه‌ای را کاهش دادند. لذا اقدامات یاد شده باعث می‌شود، وقوع بارندگی‌های بزرگ‌تری نسبت به کشور ایران، جریان واریزه‌ای تولید نکند و در مقابل به علت شرایط ناپایدار حوضه‌های ایران، بارندگی‌های کوچک نیز قادر به ایجاد این جریان‌ها خواهند بود.

آستانه شدت-مدت بارندگی این تحقیق، به میزان قابل توجهی نسبت به آستانه‌های جهانی ارائه شده به وسیله Guzzetti و همکاران (۲۰۰۸) بالاتر است و نشان می‌دهد، هنوز در برخی از نقاط جهان، مناطقی وجود دارد که در برابر رخداد جریان واریزه‌ای آسیب‌پذیرتر هستند و جریان واریزه‌ای در آن‌ها در اثر بارندگی‌های کوچک‌تری نسبت به ناحیه مورد مطالعه، رخ می‌دهد. به طور کلی، تفاوت در ویژگی‌های اقلیمی، زمین‌شناسی، توپوگرافی، ریخت‌شناسی و فعالیت‌های انسانی باعث اختلاف میان آستانه‌های شدت-مدت بارندگی شده است (شکل ۷). Guzzetti و همکاران (۲۰۰۷) اشاره کردند، آستانه‌های تعریف شده به وسیله محققان مختلف برای مناطقی که در عرض جغرافیایی میانی واقع شدند، نسبت به مناطقی که دارای آب و

بزرگ‌تر و سنگین‌تری قابلیت تولید جریان واریزه‌ای دارند. به‌منظور کاهش خسارات ناشی از این جریان‌ها، یک سامانه پیش‌بینی آب و هوای مورد اعتماد لازم است. بنابراین سازمان‌ها و ارگان‌های مربوطه می‌توانند بر اساس آستانه‌های بارندگی پیشنهاد شده این تحقیق در نواحی کوهستانی البرز، برای هشدار در مواقع اضطراری تصمیم‌گیری کنند.

### تشکر و قدردانی

نویسندگان از آقایان مهندس مجتبی مرادی و مهندس محمد نکوآمال برای جمع‌آوری داده‌های هایتوگراف بارندگی از وزارت نیرو و سازمان هواشناسی تشکر و قدردانی می‌کنند.

بیشتر از ۳۷/۸۴ میلی‌متر و ۶۶/۱۲ میلی‌متر، می‌توانند جریان واریزه‌ای تولید کنند. پس از برآورد آستانه شدت-مدت این ناحیه و مقایسه آن با مطالعات قبل مشخص شد، این آستانه‌ها با یکدیگر متفاوت هستند و آستانه شدت-مدت بارندگی این تحقیق، نسبت به سایر آستانه‌های محلی و ناحیه‌ای پایین‌تر و از آستانه‌های جهانی به میزان قابل توجهی بالاتر است. این اختلاف می‌تواند به دلیل تنوع ناشی از عوامل جغرافیایی، فیزیوگرافی، زمین‌شناسی، آب و هوایی و انسانی در برخی مناطق دیگر باشد. در واقع، حوضه‌های بررسی شده در مطالعه حاضر، نسبت به برخی مناطق (ژاپن، چین و کالیفرنیا) برای وقوع جریان‌های واریزه‌ای ناپایدارتر است و نسبت به متوسط سطح دنیا، بارندگی‌های

### منابع مورد استفاده

1. Asghari-Pari, A. 2002. Evaluation of the appropriate conditions occurrence debris flow in the country. MSc Thesis, 105 pages (in Persian).
2. Banihabib, M.E. and A. Masumi. 2008. Effect of high-concentrated sediment transport on inundation of rivers, case study: Masuleh flood. Iranian Hydraulic Conference, 2: 166-173 (in Persian).
3. Banihabib, M. 1999. Hydraulic roughness of flow with high concentrations of sediment. 2nd Hydraulic Conference, Tehran, Iran (in Persian)
4. Banihabib, M.E. and M. Elahi. 2009. Empirical equation for abrasion of stilling basin caused by impact of sediment. World Environmental and Water Resources Congress, 2009: 1-10.
5. Banihabib, M.E. and A. Forghani. 2017. An assessment framework for the mitigation effects of check dams on debris flow. Catena, 152: 277-284.
6. Banihabib, M.E. 2002. Mud flow and debris. Proceedings of a Conference on Prevent and Reduce of Flood Risks, Gorgan, Iran, 1-8 (in Persian).
7. Caine, N. 1980. The rainfall intensity: duration control of shallow landslides and debris flows. Geografiska Annaler, Series A, Physical Geography, 23-27.
8. Cannon, S.H., E.M. Boldt, J.L. Laber, J.W. Kean and D.M. Staley. 2011. Rainfall intensity-duration thresholds for post fire debris-flow emergency-response planning. Natural Hazards, 59: 209-236.
9. Cannon, S.H., J.E. Gartner, R.C. Wilson, J.C. Bowers, and J.L. Laber. 2008. Storm rainfall conditions for floods and debris flows from recently burned areas in south-western Colorado and southern California. Geomorphology, 96: 250-269.
10. Chen, N.S., C.L. Yang, W. Zhou, F.Q. Wei, Z.L. Li, D. Han and G.S. Hu. 2011. A new total volume model of debris flows with intermittent surges: based on the observations at Jiangjia Valley, south-west China. Natural Hazards, 56: 37-57.
11. Eslamian, S.S. and A. Mehrabi. 2005. Identifying empirical equations for time of concentration in mountainous watersheds. Agricultural Science and Natural Resources, 12: 1-10 (in Persian).
12. Guo, X.J., P. Cui and Y. Li. 2013. Debris flow warning threshold based on antecedent rainfall: a case study in Jiangjia Ravine, Yunnan, China. Journal of Mountain Science, 10: 305-314.
13. Guzzetti, F., S. Peruccacci, M. Rossi and C.P. Stark. 2007. Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe. Meteorology and Atmospheric Physics, 98: 239-267.
14. Guzzetti, F., S. Peruccacci, M. Rossi and C.P. Stark. 2008. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: an update. Landslides, 5: 3-17.
15. Hassan-Esfahani, L. and M.E. Banihabib. 2016. The impact of slit and detention dams on debris flow control using GSTARS 3.0. Environmental Earth Sciences, 75: 328-345.

16. Hirano, M. and T. Moriyama. 1993. Prediction of occurrence and runoff analysis of debris flow. Proceeding Paper, In Hydraulic Engineering, American Society of Civil Engineers, ASCE Library, 1780-1785.
17. Hirano, M. 1997. Prediction of debris flow for warning and evacuation. Recent Developments on Debris Flows, 7-26, DOI: 10.1007/BFb0117759
18. Hirano, M., T. Harada, M.E. Banihabib and K. Kawahara. 1997. Estimation of hazard area due to debris flow. In Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment, 697-706.
19. Jakob, M. and H. Weatherly. 2003. A hydro-climatic threshold for landslide initiation on the north shore mountains of Vancouver, British Columbia. *Geomorphology*, 54: 137-156.
20. Jibson, R.W. 1989. Debris flows in southern Puerto Rico. *Geological Society of America Special Papers*, 236: 29-56.
21. Ma, C., Y. Wang, K. Hu, C. Du and W. Yang. 2017. Rainfall intensity–duration threshold and erosion competence of debris flows in four areas affected by the 2008 Wenchuan earthquake. *Geomorphology*, 282: 85-95.
22. Nikolopoulos, E.I., M. Borga, J.D. Creutin and F. Marra. 2015. Estimation of debris flow triggering rainfall: Influence of rain gauge density and interpolation methods. *Geomorphology*, 243: 40-50.
23. Papa, M.N., V. Medina, F. Ciervo and A. Bateman. 2012. Estimation of debris flow critical rainfall thresholds by a physically-based model. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 9: 12797-12824.
24. Tang, C., T.W. van Asch, M. Chang, G.Q. Chen, X.H. Zhao and X.C. Huang. 2012. Catastrophic debris flows on 13 August 2010 in the Qingping area, south-western China: the combined effects of a strong earthquake and subsequent rainstorms. *Geomorphology*, 139: 559-576.
25. Wiczorek, G.F. and F. Guzzetti. 1999. A review of rainfall thresholds for triggering landslides. In *Proceedings of the EGS Plinius Conference*, Maratea, Italy, 407-414.
26. Zhou, W. and C. Tang. 2014. Rainfall thresholds for debris flow initiation in the Wenchuan earthquake-stricken area, south-western China. *Landslides*, 11(5): 877-887.
27. Zhuang, J., P. Cui, G. Wang, X. Chen, J. Iqbal and X. Guo. 2015. Rainfall thresholds for the occurrence of debris flows in the Jiangjia Gully, Yunnan Province, China. *Journal of Engineering Geology*, 195: 335-346.

## Determination of the rainfall threshold for debris flow occurrence in a part of Alborz mountainous basins

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

<sup>1</sup>MSc Student, University of Tehran, University college of Abouraihan, Iran and <sup>2</sup>Associate Professor, Department of Irrigation and Drainage Engineering, University of Tehran, University college of Abouraihan, Iran

Received: 15 August 2017

Accepted: 14 January 2018

### Abstract

Debris flow is one of the natural hazards that threatens people's lives in the mountainous populated areas. Thus, it is necessary to determine the rainfall thresholds for debris flow occurrence in order to develop an effective forecasting system. In this study, the empirical thresholds of rainfall for the occurrence of debris flow by Hirano method were assessed in a part of Alborz mountainous basins including Gorganrood, Navrood, Neka and Babolrood. For this purpose, the rainfall hyetographs of recording rain gauges were used from the period of 1983-2004. Then, the intensity-duration rainfall thresholds (I-D threshold) for selected basins were estimated and compared with previous studies from the local, regional and global scale. The examination of rainfall thresholds for the initiation of debris flow showed that the rainfall of more than 27.2 and 14.8 mm, respectively, in the Navrood and Gorganrood watersheds and rainfall more than 37.84 and 66.12 mm, respectively, in the Babolrood and Neka basins are able to trigger debris flow during their concentration time. Comparison of the I-D threshold of this study with the results of previous studies showed I-D threshold of the studied basins generally are lower than the thresholds of local and regional but higher than global thresholds. In other words, there are some areas in the world that need smaller rainfalls for initiation debris flow in comparison to the study area. The difference among threshold of debris flow occurrence in the world's basins comes from their variety in climatic, geographical, physiographic and geological factors.

**Keywords:** Debris flow, Hirano method, Intensity-duration threshold, Rainfall hyetograph, Recording rain gauge

---

\* Corresponding Author: [banihabib@ut.ac.ir](mailto:banihabib@ut.ac.ir)