



مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی

پژوهش‌های آب‌بخیزداری

شاپا: ۲۹۸۱-۲۰۳۸



مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی

شبیه‌سازی رفتار آب‌شناختی آبخیز نیشابور در دوره‌های گوناگون برگشت بارش و رواناب

سیدحمیدرضا صادقی^{۱*}، نسترن نادری مرنگلو^۲، سحر مصطفایی یونجالی^۳، اسماء بادامه^۴، زینب شیخی^۵،
علی نوری^۶، سودابه قره‌محمودلی^۷

۱- استاد گروه مهندسی آب‌بخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران
۲، ۳، ۴ و ۵- دانشجوی دکتری گروه مهندسی آب‌بخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران
۶- پژوهشگر پسادکتری گروه مهندسی آب‌بخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران
۷-

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف

بررسی تغییر رفتار سامانه‌های آبخیز در برابر ورودی‌هایی مانند بارش، به‌ویژه در تحلیل رواناب با دوره‌های گوناگون برگشت، از اهداف اصلی پژوهش‌های آب‌شناختی است. تحلیل دوره برگشت مؤلفه‌های آب‌شناختی از جمله بارش و رواناب پیشینه طولانی دارد. اما، به بررسی تطبیقی و هم‌زمان این مؤلفه‌ها و تحلیل ناهم‌زمانی رفتار آنها در دوره‌های گوناگون برگشت، کمتر توجه شده است. از سوی دیگر، روابط پیچیده و ناخطی میان بارش و رواناب و تفاوت‌های مشاهده‌شده میان ایستگاه‌ها ناشی از شرایط محلی حاکم بر هر زیرآبخیز است. در این راستا، با بررسی هم‌زمان این مؤلفه‌ها می‌توان به درک واقع‌بینانه‌تری از پاسخ آب‌شناختی آبخیز، به‌ویژه در شرایط رخداد رویدادهای حدی، رسید. از این‌رو، در این پژوهش اندازه‌های بارش و رواناب به‌طور هم‌زمان با دوره‌های گوناگون برگشت در آبخیز نیشابور در خراسان رضوی بررسی شد.

مواد و روش‌ها

داده‌های بارش و رواناب سالانه در دوره ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۹ برای چهار ایستگاه آب‌سنجی (زرنده، طاغون، عیش‌آباد و مجموع دورود) معتبر که نماینده شرایط آب‌شناختی متفاوت در آبخیز بودند، جمع‌آوری شد. با استفاده از روش‌های آماری، داده‌های بارش و آب‌دهی از دیدگاه کیفیت بررسی شدند و اندازه‌های ناقص یا نامنطبق با روند آب‌شناختی، با استفاده از روش وایازی خطی و همبستگی با ایستگاه‌های مجاور اصلاح یا جایگزین شدند. پس از اصلاح داده‌ها، اندازه‌های بارش و آب‌دهی روزانه به اندازه‌های بارش و آب‌دهی سالانه تبدیل شدند. با این فرایند امکان تحلیل بلندمدت و بررسی رفتار ناهم‌زمانی مؤلفه‌ها فراهم شد.

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات: sadeghi@modares.ac.ir

استناد: صادقی، س. ح. ر.، نادری مرنگلو، ن.، مصطفایی یونجالی، س.، بادامه، ا.، شیخی، ز.، نوری، ع.، قره‌محمودلی، س. ۱۴۰۵. شبیه‌سازی رفتار آب‌شناختی آبخیز نیشابور در دوره‌های گوناگون برگشت بارش و رواناب. پژوهش‌های آب‌بخیزداری. ۳۹(۳): ۱۴۲-۱۲۳.

شناسه دیجیتال: 10.22092/WMRJ.2026.372273.1660

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۳، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۲/۲۵، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۳۱، تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱
پژوهش‌های آب‌بخیزداری، سال ۱۴۰۵، دوره ۳۹، شماره ۳، شماره پیاپی ۱۵۲، پاییز ۱۴۰۵، صفحه‌های ۱۲۳ تا ۱۴۲.

© نویسندگان

ناشر: مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس



اندازه‌های بارش و رواناب متناظر با دوره‌های برگشت دو، پنج، ۱۰، ۲۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سال با استفاده از نرم‌افزار Hyfran-Plus برآورد شد. در این تحلیل، از میان توزیع‌های مختلف آماری، توزیع Weibull برای داده‌های بارش و توزیع Gumbel برای داده‌های آبدهی بر اساس پیشنهاد سامانه پشتیبان تصمیم نرم‌افزار Hyfran-Plus و با استفاده از معیارهای اطلاعات آکائیک و اطلاعات بیز، به‌عنوان بهترین برازش برای داده‌های مطالعه‌شده انتخاب شدند.

نتایج و بحث

نتایج نشان داد که اندازه بارش سالانه در دوره‌های برگشت دو، پنج، ۱۰، ۲۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ به‌ترتیب ۲۹۰/۲۶، ۳۵۷/۲۵، ۳۹۱/۸۷، ۴۱۸/۴۷، ۴۴۷/۴۰، ۴۶۵/۶۷ و ۴۸۲/۵۴ میلی‌متر بود. در زیرآبخیزهای مختلف، دوره‌های برگشت بارش و رواناب هم‌سان نبود و با افزایش دوره‌های برگشت بارش، آبدهی بیشینه لحظه‌ای، میانگین آبدهی سالانه و حجم رواناب در تمام ایستگاه‌ها با شیب متفاوت و به‌طور معنی‌دار افزایش یافت. به طوری‌که در دوره‌های برگشت کوتاه‌مدت نسبت ۵ به ۲ ساله، اندازه‌های بارش، آبدهی بیشینه لحظه‌ای، میانگین آبدهی سالانه و حجم رواناب به‌ترتیب در ایستگاه عیش‌آباد ۱/۲۳، ۲/۰۶، ۲/۳۹ و ۴/۹۱؛ در ایستگاه طاغون به‌ترتیب ۱/۲۳، ۲/۰۰، ۲/۲۲ و ۴/۰۰؛ ایستگاه دورود به‌ترتیب ۱/۲۳، ۱/۹۰، ۲/۱۶ و ۴/۱۳؛ و ایستگاه زرنده به‌ترتیب ۱/۲۴، ۱/۸۷، ۲/۰۹ و ۲/۷۸ به‌دست آمد. حال آن‌که نسبت مزبور در دوره‌های بلندمدت نسبت ۲۰۰ به ۱۰۰ ساله اندازه بارش، آبدهی بیشینه لحظه‌ای، میانگین آبدهی سالانه و حجم رواناب به‌ترتیب در ایستگاه عیش‌آباد ۱/۰۴، ۱/۱۳، ۱/۱۴ و ۱/۲۸؛ ایستگاه طاغون به‌ترتیب ۱/۰۴، ۱/۱۳، ۱/۱۳ و ۱/۲۸؛ و در ایستگاه دورود به‌ترتیب ۱/۰۳، ۱/۱۳، ۱/۱۳ و ۱/۴۶ و هم‌چنین نتایج در ایستگاه زرنده به‌ترتیب ۱/۰۴، ۱/۱۳، ۱/۱۳ و ۱/۳۱ و ۱/۲۸ به‌دست آمد. این تفاوت‌ها احتمالاً ناشی از ویژگی‌های محلی آبخیز است.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

یافته‌های این پژوهش مؤید آن بود که استفاده از رویکردهای هم‌زمان و چندمتغیره در تحلیل دوره برگشت بارش و رواناب، برای طراحی سازه‌های مهار سیلاب و رسوب، پیش‌بینی رخدادهای آب‌شناختی و مدیریت پایدار منابع آب و خاک در دشت‌های نیمه‌خشک ضروری است. نتایج نشان داد رابطه میان بارش و رواناب در دوره‌های گوناگون برگشت، ناخطی شده و این موضوع مؤید لزوم در نظرگیری توأم این مؤلفه‌ها در برآورد خطر سیلاب و طراحی زیرساخت‌های آبی است. افزون بر این، تفاوت‌های مکانی معنادار در پاسخ آب‌شناختی زیرآبخیزها، بیانگر اهمیت تدوین راهبردهای مدیریتی مبتنی بر شرایط خاص هر آبخیز است. با توجه به تأثیرپذیری زیاد آبخیزهای نیمه‌خشک از تغییرات اقلیمی، می‌توان با تلفیق داده‌های آب-اقلیمی بلندمدت با مدل‌های پیشرفته آماری نبودن قطعیت در پیش‌بینی‌ها را کاهش داد. در نتیجه، گسترش چنین پژوهش‌هایی در دیگر آبخیزهای مشابه و نیز ترکیب مؤلفه رسوب در تحلیل‌های آینده، گام مؤثری در راستای مدیریت جامع و تاب‌آور منابع آب و خاک است. بر پایه نتایج این پژوهش، پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آینده بر توسعه مدل‌های آب‌شناختی یکپارچه‌ای متمرکز شوند که پیش‌بینی‌های اقلیمی را به‌طور پویا با سناریوهای تغییر کاربری زمین، پیوند می‌دهند. با چنین مدل‌ها و تحلیل‌ها، توانمندی کارشناسان در مدیریت جامع منابع آب و خاک، کاهش مخاطره‌های سیلاب و برنامه‌ریزی کاربری زمین به‌طور سازگار و مبتنی بر شرایط هر آبخیز، افزایش خواهد یافت. افزون بر این، ترویج همکاری میان آب‌شناسان، اقلیم‌شناسان و برنامه‌ریزان کاربری زمین برای تبدیل این بینش‌های علمی به سیاست‌ها و استانداردهای مهندسی مناسب و متناسب با هر منطقه، به‌منظور بهبود خدمات بوم‌سازگانی و تاب‌آوری جامعه در مناطق نیمه‌خشک آسیب‌پذیر، پیشنهاد می‌شود.

واژگان کلیدی

آبدهی بیشینه لحظه‌ای، بارش سالانه، حجم رواناب سالانه، دوره برگشت، رواناب، میانگین آبدهی سالانه

مقدمه

مدل‌سازی بارش-رواناب به‌عنوان یکی از پیچیده‌ترین فرآیندهای آب‌شناختی شناخته‌شده که در برآورد متغیرهایی مانند آب‌دهی اوج، حجم رواناب، زمان تمرکز و زمان پایه، نقش مهمی دارد (گادورا و محمد ۲۰۲۴). دوره برگشت^۱ به‌عنوان میانگین فاصله زمانی میان رخداد‌های با شدت مشخص تعریف‌شده و برای طراحی سدها، کانال‌ها و سازه‌های مهار رسوب بسیار مهم است. تحلیل فراوانی تعیین دوره برگشت متغیرهای آب‌شناختی، از مهم‌ترین ارکان برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب^۲، طراحی سازه‌های آبی و ارزیابی مخاطره‌های طبیعی به‌شمار می‌آیند (افشاری‌پور ۲۰۱۸؛ ساریگیل و همکاران ۲۰۲۴؛ دب و همکاران ۲۰۲۵). متغیرهایی مانند بارش، رواناب^۳ و بار رسوب^۴ به‌عنوان مؤلفه‌های اصلی چرخه آب‌شناختی، در شکل‌گیری سیلاب‌ها، فرسایش خاک و نابودی منابع طبیعی نقش تعیین‌کننده‌ای دارند که با بررسی جداگانه آن‌ها نمی‌توان تصویر کاملی از فرآیندهای حاکم بر رخداد سیلاب‌ها و پدیده‌های فرسایشی ارائه داد. رابطه بارش-رواناب یک چالش اساسی در راستای آب‌شناسی، برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب و تکامل سامانه آبخیز است که با بهره‌گیری از این رابطه می‌توان پیچیدگی و ایستاد نبودن را نشان داد (ژانگ و همکاران ۲۰۱۸؛ فرانزن و همکاران ۲۰۲۰). بارش و رواناب به‌عنوان عنصرهای اساسی چرخه آب‌شناختی به‌هم پیوسته‌اند و رواناب در حقیقت، پاسخ یک آبخیز به بارش دریافتی است که اندازه آن در مکان‌های مختلف (تغییرات مکانی) و در زمان‌های مختلف (تغییرات زمانی) متفاوت است (خو و همکاران ۲۰۱۰). این رابطه تحت تأثیر ویژگی‌های اقلیمی و پوشش زمین، اندازه آبخیز، پستی‌بلندی، ترکیب خاک، پوشش گیاهی و ناهمگونی مکانی است (بالز و همکاران ۲۰۱۸). در بسیاری از آبخیزها رخداد بارش‌های حدی موجب افزایش سریع رواناب سطحی، افزایش آب‌دهی اوج و در نتیجه افزایش فرآیندهای فرسایشی و انتقال رسوب می‌شود. با این حال، واکنش هر یک از این متغیرها نسبت به رویدادهای حدی^۵

یکسان نیست و در دوره‌های گوناگون برگشت متفاوت است (بلوش و همکاران ۲۰۱۹). از این‌رو، با مقایسه هم‌زمان دوره برگشت بارش-رواناب می‌توان به درک جامع‌تری از رفتار سامانه آب‌شناختی آبخیزها و روابط متقابل این متغیرها رسید. در سال‌های پیشین، استفاده از مدل‌های آماری پیشرفته مانند SWAT، SCS-CN، IHACRES، HEC-HMS و برای تحلیل فراوانی رویدادهای آب‌شناختی گسترش‌یافته است (نصیری‌خیای و همکاران ۲۰۲۳؛ جابرزاده و همکاران ۲۰۲۴؛ کالیزایا و همکاران ۲۰۲۵).

افزون بر این، پیشرفت مدل‌سازی داده‌های ماهواره‌ای و پایگاه‌های داده اقلیمی با وضوح زیاد، امکان تحلیل دقیق‌تر بارش و رواناب در مقیاس‌های مختلف زمانی و مکانی را فراهم‌آورده است. پژوهشگران بر پایه این رویکردها، نوسان‌های زمانی بارش‌های شدید و اثرات آن‌ها بر رواناب و آب‌دهی اوج را با دقت بیشتری پیش‌بینی می‌کنند. نتایج پژوهش‌های گذشته نشان داد رابطه میان شدت بارش و پاسخ رواناب در آبخیزها تحت تأثیر عامل‌های پرشماری مانند پوشش گیاهی، کاربری زمین و ویژگی‌های خاک است و نمی‌توان آن را فقط با مدل‌های ساده توضیح داد (لین و همکاران ۲۰۲۴). افزون بر این، بررسی رفتار رواناب در دوره‌های برگشت بلندمدت و رخداد‌های نادر، برای ارزیابی خطرپذیری سیلاب‌های شدید و طراحی سازه‌های آبی مقاوم، ضروری است. استفاده از مدل‌های آماری ترکیبی و شبیه‌سازی‌های Monte Carlo امکان ارزیابی نبودن قطعیت در پیش‌بینی رواناب و دوره برگشت را فراهم‌آورده است و می‌توان خطای برآورد خطرات آب‌شناختی را کاهش داد. در نتیجه، با ترکیب داده‌های بارش، رواناب، میانگین آب‌دهی و آب‌دهی لحظه‌ای در یک چارچوب تحلیلی، می‌توان رویکردی جامع برای مدیریت منابع آب، برنامه‌ریزی مقابله با سیلاب و حفاظت از خاک ارائه داد که منجر به طراحی راهبردهای عملیاتی و کاهش خطرپذیری آبخیزها می‌شود.

پژوهش‌های پرشماری در راستای رابطه بارش و رواناب با دوره‌های گوناگون برگشت انجام‌شده است. در پژوهشی مروری، مونتتاری و همکاران (۲۰۱۳) بر لزوم تحلیل هم‌زمان متغیرهای آب‌شناختی تأکید کردند و نشان دادند نادیده گرفتن وابستگی میان بارش، رواناب و رسوب منجر به کم‌برآوردی خطرات فرسایشی شد. ژانگ و همکاران

- 1- Return period
- 2- Water resources management
- 3- Runoff
- 4- Sediment load
- 5- Extreme event

(۲۰۲۴) با مقایسه دوره برگشت بارش و رواناب در آبخیز رود زرد چین نتیجه گرفتند که تغییرات کاربری زمین، رابطه معمول بارش-رواناب را تغییر داد و موجب تفاوت قابل توجه میان دوره های برگشت این دو متغیر شد. نتایج پژوهش های پیشین در آبخیزهای آلپی نشان داد رویدادهای بارش با افزایش دوره برگشت، غالباً منجر به افزایش ناگهانی رواناب و حمل رسوب شدند. اما، اندازه رسوب معلق در طول زمان به منحنی رواناب-رسوب وابسته بود و دوره برگشت رسوب با دوره برگشت بارش و رواناب همیشه همخوان نیست (رحمان و همکاران ۲۰۲۴). افزون بر این، نتایج شبیه سازی های پیشین نشان داد تحلیل همزمان دوره برگشت سه مؤلفه رواناب-بارش-رسوب، سبب افزایش دقت پیش بینی رفتار آبخیز، کاهش خسارت ناشی از آب دهی سیلاب و فرسایش شد (سیامس الدین و همکاران ۲۰۲۵؛ فاگونددس و همکاران ۲۰۲۵؛ وان حامل و همکاران ۲۰۲۵). پژوهش ها نشان دادند که رویدادهای بزرگ بارش با افزایش دوره برگشت می توانند منجر به رخداد اوج های شدید رواناب و افزایش ناگهانی جریان رسوب شوند. اما، این افزایش در آبخیزهایی با فرآیندهای ریخت شناختی آبی پیچیده یا نفوذپذیری متفاوت خاک ممکن است با تأخیر یا به شکل ناخطی رخ دهد. بذرافشان و همکاران (۲۰۲۵) دریافتند که با تحلیل همزمان بازه های برگشت رواناب و رسوب در روش های آماری می توان نوسانات دوره ای و وابستگی های زمانی متفاوت میان این متغیرها را مشخص کرد. دوره برگشت رسوب گاهی مستقل از دوره برگشت رواناب است و این موضوع برای طراحی سازه های مهار رسوب اهمیت بسیاری دارد.

بر پایه نتایج پژوهش های پیشین، روابط میان بارش و رواناب همواره خطی نبوده و رفتار این مؤلفه ها در دوره های گوناگون برگشت می تواند به طور قابل توجهی متفاوت باشد. این تفاوت ها عمدتاً ناشی از شرایط محلی هر زیر آبخیز مانند ویژگی های گیتاشناسی، اقلیم، کاربری زمین و ویژگی های آماری داده های آب شناختی است. از این رو، با بررسی همزمان بارش و رواناب و مقایسه رفتار آنها در دوره های گوناگون برگشت می توان به درک دقیق تر و واقع بینانه تری از پاسخ آب شناختی آبخیز، به ویژه در شرایط رخدادهای حدی، رسید. در این چارچوب، با استفاده از نرم افزار Hyfran-plus به عنوان یکی از ابزارهای معتبر تحلیل فراوانی

و برآورد دوره های برگشت، می توان امکان انتخاب بهینه توزیع های آماری و ارزیابی نبودن قطعیت در برآورد اندازه های حدی را فراهم آورد. مزیت اصلی این نرم افزار در مقایسه با روش های متداول، قابلیت مقایسه همزمان چندین توزیع آماری و انتخاب توزیع برتر بر اساس شاخص های آماری است که دقت تحلیل را به ویژه در داده های آب شناختی حدی افزایش می دهد. بر این اساس، هدف اصلی این پژوهش بررسی همزمان دوره برگشت بارش و رواناب در آبخیز نیشابور و تحلیل تفاوت رفتار این مؤلفه ها در ایستگاه ها و زیر آبخیزهای مختلف با استفاده از نرم افزار Hyfran-plus بود. در این رویکرد هم گام با درک دقیق تری از رفتار آب شناختی آبخیز، می توان ابزار علمی مناسبی برای مدیریت سیلاب، طراحی سازه های آبی و برنامه ریزی برای مدیریت پایدار منابع آب و خاک در شرایط اقلیمی مشابه ارائه داد.

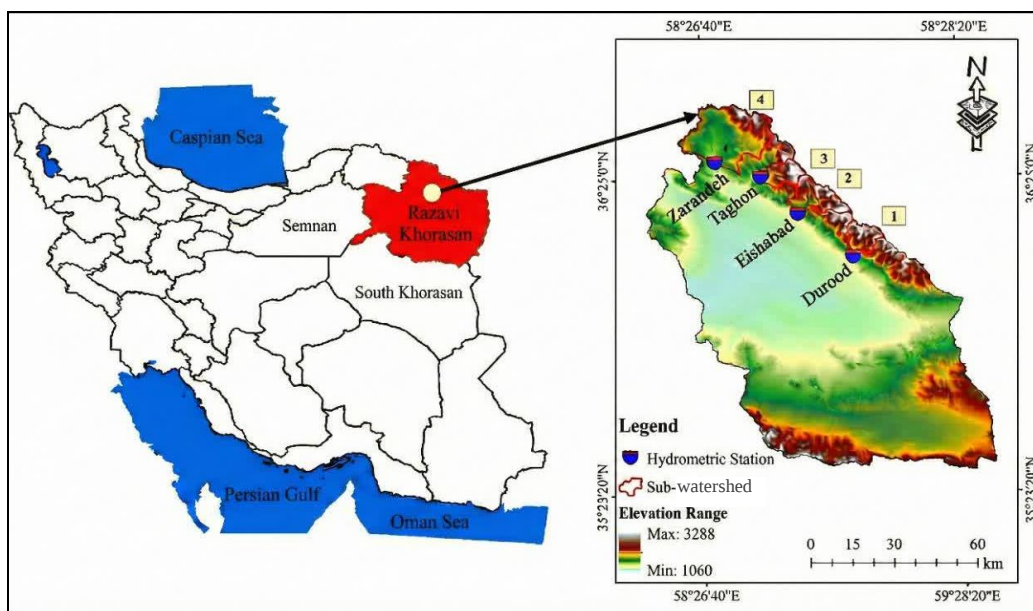
مواد و روش ها

معرفی منطقه مطالعه شده

آبخیز نیشابور بخشی از آبخیز کویر مرکزی ایران با مساحتی حدود ۹۲۵۷ کیلومتر مربع، یکی از مهم ترین پهنه های آب شناختی و کشاورزی شمال شرق ایران به شمار می آید. آبخیز نیشابور از شمال به خط الراس بلندی های بینالود، از شرق به بلندی های لیلاجوق و یال پلنگ، از جنوب به تپه ماهورهای نیزه بند، سیاه کوه و کوه نمک و از غرب به آبخیز دشت سبزوار محدود می شود (سعادت پور و همکاران ۱۳۹۸). این پژوهش در آبخیز نیشابور به دلیل داشتن طولانی ترین دوره آماری ۳۰ ساله (۱۳۷۰-۱۳۹۹) با داده های پیوسته و قابل اطمینان در چهار ایستگاه انتخاب شده، اجرا شد. افزون بر این، اهمیت کشاورزی و جمعیت این منطقه، مؤید ضرورت مدیریت سیلاب و منابع آب است. بلندی منطقه از حدود ۱۰۰۰ متر در نواحی جنوبی و دشت ها تا بیش از ۳۲۰۰ متر در بلندی های شمالی متغیر است. از دیدگاه اقلیمی، این آبخیز در محدوده اقلیم نیمه خشک است. میانگین بارش سالانه منطقه حدود ۲۷۰ میلی متر و بیشتر بارش ها در فصل های پاییز و زمستان رخ می دهد. میانگین دمای سالانه منطقه حدود ۱۵ درجه سانتی گراد است که با افزایش بلندی کاهش می یابد. تنوع پستی بلندی، زمین شناسی، نوع خاک و کاربری زمین در این آبخیز موجب تفاوت قابل توجه رفتار آب شناختی و تولید

منطقه پژوهشی انتخاب شد (شکل ۱).

رواناب در نقاط مختلف آن شده است. در این پژوهش، چهار ایستگاه آب‌سنجی به همراه آبخیز بالادست آن به عنوان



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی آبخیز نیشابور، مرز زیرآبخیزها، موقعیت ایستگاه‌ها در استان خراسان رضوی و ایران.
Figure 1- Geographical location of the Neyshabur Watershed, sub-watershed boundaries, and station locations in Razavi Khorasan Province and Iran.

خطادار با استفاده از روش‌های آماری وایزی‌گیری خطی چندمتغیره^۱ جایگزین شدند (گائو و همکاران ۲۰۲۳). این مرحله ضامن انجام تحلیل‌ها بر پایه داده‌های معتبر و قابل اطمینان است. پس از اصلاح داده‌ها، اندازه‌های بارش و آب‌دهی روزانه به اندازه‌های بارش و آب‌دهی سالانه تبدیل شدند. با استفاده از بیشینه اندازه‌های سالانه می‌توان امکان مقایسه مستقیم رفتار بلندمدت بارش، آب‌دهی و تحلیل ناهم‌زمانی دوره برگشت آن‌ها را فراهم آورد (وفاخواه و مقدم‌نیا ۲۰۱۹). در حالی‌که تحلیل رخدادمحور بیشتر مناسب بررسی پاسخ کوتاه‌مدت آبخیز است. با بهره‌گیری از این فرآیند که شامل محاسبه مجموع بارش سالانه و حجم رواناب سالانه برای هر ایستگاه بود، امکان تحلیل بلندمدت و بررسی رفتار آب‌شناختی آبخیز فراهم شد.

برآورد دوره برگشت با استفاده از Hyfran-Plus

نرم‌افزار Hyfran-Plus برای متناسب‌سازی داده‌های آماری استفاده می‌شود. این نرم‌افزار ابزاری قدرتمند برای تجزیه و تحلیل آماری سری‌های زمانی است. این نرم‌افزار

روش پژوهش

در این پژوهش، به منظور رفتارشناسی آب‌شناختی آبخیز نیشابور، از رویکرد ترکیبی تحلیل آماری و مدل‌سازی دوره برگشت استفاده شد. با این رویکرد می‌توان امکان بررسی جامع تغییرات و نوسانات بلندمدت بارش و رواناب، شناسایی الگوهای آب‌شناختی و ارزیابی خطرپذیری جریان‌های شدید را فراهم آورد. اطلاعات استفاده‌شده شامل داده‌های بارش روزانه و آب‌دهی در دوره زمانی ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۹ بود که از چهار ایستگاه آب‌سنجی و باران‌سنجی معتبر آبخیز نیشابور جمع‌آوری شدند (شکل ۱). داده‌های بارش و آب‌دهی این ایستگاه‌ها به وسیله سازمان‌های ذی‌ربط (شرکت آب منطقه‌ای و هواشناسی) تأیید شده‌اند. افزون بر این، آمار بلندمدت، پیوسته، بدون نقص آماری، با قابلیت بازبینی کیفیت استاندارد و مستندسازی کامل از دیگر ویژگی‌های این داده‌ها است. این ایستگاه‌ها نماینده شرایط آب‌شناختی متفاوت دشت بوده و با بررسی آنها می‌توان امکان تحلیل دقیق تغییرات مکانی و زمانی را فراهم آورد. پیش از تحلیل، داده‌ها از دیدگاه کیفیت بررسی و اندازه‌های ناقص یا

1- Multiple Linear Regression

میلی متر مربوط به ایستگاه عیش آباد و کمترین اندازه بیشینه بارش سالانه ۳۶۷/۵۰ میلی متر مربوط به ایستگاه طاغون بود.

نتایج دوره برگشت بارش سالانه

نتایج برآورد دوره های برگشت بارش سالانه در ایستگاه های مطالعه شده با استفاده از نرم افزار Hyfran-Plus در جدول ۲ ارائه شده است. مقایسه اندازه های بارش متناظر با دوره های گوناگون برگشت نشان داد رفتار آماری بارش در ایستگاه های مطالعه شده یکسان نیست و در تمام ایستگاه ها روند افزایش اندازه بارش با افزایش دوره برگشت، یکنواخت نیست. به طور مثال، در دوره برگشت ۵۰ ساله، اندازه بارش برآورد شده در ایستگاه عیش آباد ۴۴۷/۴۰ میلی متر و در ایستگاه دورود ۴۲۸/۷۱ میلی متر به طور قابل توجهی بیشتر از ایستگاه زرنده (۳۷۹/۷۱ میلی متر) بود. این یافته بیانگر ناهمگنی مکانی بارش های حدی در آبخیز نیشابور است. بررسی تغییرات بارش با افزایش دوره برگشت نشان داد با افزایش دوره برگشت از ۱۰۰ به ۲۰۰ سال، شیب افزایش بارش در ایستگاه های عیش آباد و طاغون در مقایسه با ایستگاه زرنده بیشتر بود و حساسیت این ایستگاه ها نسبت به رخداد های حدی نادر بیشتر بود. نتایج به دست آمده از نرم افزار Hyfran-Plus در جدول ۲ ارائه شده است. این نتایج بیانگر آن است که استفاده از یک اندازه ثابت بارش طراحی برای کل آبخیز نیشابور منجر به برآورد نادرست و در برخی شرایط قابل توجه در ارزیابی خطرات آب شناختی و طراحی سازه های آبی می شود. از این رو، در نظر گرفتن تغییر پذیری مکانی بارش های حدی در پژوهش های مدیریت منابع آب و مهار سیلاب ضروری است.

نتایج آب دهی بیشینه لحظه ای

تحلیل آب دهی بیشینه لحظه ای در ایستگاه های مطالعه شده نشان داد با افزایش دوره برگشت، اندازه های آب دهی افزایش یافت و این روند مؤید رخداد های شدید و نادر آب شناختی است (جدول ۳). به طور مثال، در ایستگاه عیش آباد، آب دهی بیشینه لحظه ای در دوره برگشت ۲ ساله ۳۵/۳۰ مترمکعب بر ثانیه و در دوره برگشت ۲۰۰ ساله به ۱۹۷/۰۰ مترمکعب بر ثانیه، افزایش یافت.

به دو زبان فرانسوی و انگلیسی موجود است. در ابتدا از این نرم افزار برای تجزیه و تحلیل داده های با رخداد های شدید طراحی شده بود. اما، امروزه در علوم مختلف مهندسی، هواشناسی و محیط زیست کاربرد دارد (عبادی فر و همکاران ۲۰۲۰). چمنی و همکاران (۲۰۲۳) از این نرم افزار برای بررسی اثر آب دهی در دوره های گوناگون برگشت بر آب دهی سیلاب استفاده کردند و کارایی آن را تأیید کردند. افزایش دوره برگشت در متغیرهای اقلیمی و آب شناختی معمولاً با افزایش شدت و قدرت ویرانی همراه است. از این رو، برای برآورد دقیق این متغیرها در دوره های گوناگون برگشت، از توزیع های آماری مناسب استفاده می شود. در این پژوهش، داده های ورودی شامل سری بیشینه بارش سالانه ۲۴ ساعته بودند. برای برازش توزیع های آماری، چند توزیع متداول شامل GEV، Log-Pearson III، Weibull، Gumbel و Log-Normal در نظر گرفته شد و فراسنجه های هر توزیع با روش بیشینه درست نمایی برآورد شد. توزیع مناسب برای هر ایستگاه بر اساس آزمون های نیکویی برازش Kolmogorov-Smirnov انتخاب شد. از میان توزیع های آماری مختلف، توزیع Weibull برای داده های بارش و توزیع Gumbel برای داده های آب دهی بر اساس پیشنهاد سامانه پشتیبان تصمیم^۱ نرم افزار Hyfran-Plus با استفاده از معیارهای اطلاعات Akaike^۲ و اطلاعات Bayes^۳ به عنوان بهترین برازش برای داده های مطالعه شده، انتخاب شدند. داده های بیشینه لحظه ای، میانگین آب دهی سالانه، حجم رواناب سالانه و بارش در دوره های برگشت دو، پنج، ۱۰، ۲۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سال برآورد شد (چمنی و همکاران ۲۰۲۳).

نتایج و بحث

نتایج آمار توصیفی بارش

نتایج آمار توصیفی بارش در ایستگاه های انتخاب شده آبخیز نیشابور در دوره آماری ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۹ در جدول ۱ ارائه شده است. بررسی اندازه های بیشینه، کمینه و میانگین بارش نشان داد که توزیع زمانی و مکانی بارش در ایستگاه های مطالعه شده ناهمگن بود؛ به گونه ای که بیشترین اندازه بیشینه بارش سالانه برابر با ۵۱۱/۵

1- Decision Support System

2- Akaike Information Criterion (AIC)

3- Bayesian Information Criterion (BIC)

جدول ۱- اندازه‌های متغیرهای بارش سالانه (میلی‌متر) در هر ایستگاه از سال ۱۳۷۰-۱۳۹۹.

Table 1- Values of annual precipitation variables (mm) at each station from 1991-2020.

Station	Maximum	Minimum	Mean	Standard Deviation	Coefficient of Variation (%)
Eishabad	511.50	49.50	293.14	88.35	30.14
Taghon	367.50	70.00	275.34	85.12	30.91
Durood	506.00	128.80	299.15	92.44	30.90
Zarandeh	404.00	62.00	201.70	68.76	34.09

جدول ۲- اندازه‌های میانگین بارش سالانه (میلی‌متر) در دوره‌های برگشت دو، پنج، ۱۰، ۲۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سال در ایستگاه‌های مطالعه‌شده.

Table 2- Mean annual precipitation (mm) in different return periods (2, 5, 10, 20, 50, 100, and 200 years) at the study stations.

Station	2	5	10	20	50	100	200
Eishabad	290.26	357.25	391.87	418.47	447.40	465.97	482.54
Taghon	285.41	351.40	384.93	410.78	439.20	457.29	473.47
Durood	278.91	343.46	375.99	401.16	428.71	446.53	462.12
Zarandeh	245.04	302.52	331.86	354.86	379.71	395.43	409.74

جدول ۳- اندازه‌های آب‌دهی بیشینه لحظه‌ای (مترمکعب بر ثانیه) در دوره‌های برگشت دو، پنج، ۱۰، ۲۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سال در ایستگاه‌های مطالعه‌شده.

Table 3- Maximum instantaneous discharge ($m^3 s^{-1}$) in different return periods (2, 5, 10, 20, 50, 100, and 200 years) at the study stations.

Station	2	5	10	20	50	100	200
Eishabad	35.30	72.60	97.30	121.00	152.00	175.00	197.00
Taghon	21.20	42.30	56.30	69.80	87.10	100.00	113.00
Durood	15.70	29.9	39.00	48.30	60.00	68.80	77.50
Zarandeh	31.40	58.60	76.60	93.80	116.00	133.00	150.00

آب‌دهی سالانه در دوره برگشت ۲ ساله برابر ۱۲/۲۰ مترمکعب بر ثانیه و در دوره ۲۰۰ ساله به ۸۵/۸۰ مترمکعب بر ثانیه، افزایش یافت.

نتایج دوره برگشت میانگین آب‌دهی سالانه

تحلیل میانگین آب‌دهی سالانه نشان داد با افزایش طول دوره برگشت، آب‌دهی سالانه به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافت (جدول ۴). این روند هم‌سو با نتایج دوره برگشت بارش و حجم رواناب بود. برای مثال، در ایستگاه عیش‌آباد میانگین

جدول ۴- اندازه‌های میانگین آب‌دهی سالانه (مترمکعب بر ثانیه) در دوره‌های برگشت دو، پنج، ۱۰، ۲۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سال در ایستگاه‌های مطالعه‌شده.

Table 4- Mean annual discharge ($m^3 s^{-1}$) in different return periods (2, 5, 10, 20, 50, 100, and 200 years) at the study stations.

Station	2	5	10	20	50	100	200
Eishabad	12.20	29.10	40.30	51.10	65.00	75.40	85.80
Taghon	5.36	11.90	16.20	20.40	25.80	29.80	33.80
Durood	3.23	6.99	9.49	11.90	15.00	17.30	19.60
Zarandeh	9.33	19.50	26.20	32.70	41.10	47.33	53.60

۳۱۱/۵۷ میلیون مترمکعب و در ایستگاه طاغون ۲۳۹/۲۵ میلیون مترمکعب بود، در حالی‌که این اندازه در ایستگاه دورد ۲۲/۸۵ میلیون مترمکعب برآورد شد. با افزایش دوره برگشت تا ۲۰۰ سال، اندازه رواناب در ایستگاه عیش‌آباد به ۵۳۳/۰۴ میلیون مترمکعب و در طاغون به ۴۰۲/۶۸ میلیون مترمکعب افزایش یافت، در حالی‌که در

نتایج دوره برگشت رواناب سالانه

نتایج تحلیل فراوانی رواناب سالانه با استفاده از نرم‌افزار Hyfran-Plus نشان داد حجم رواناب متناظر با دوره‌های گوناگون برگشت در ایستگاه‌های مطالعه‌شده به‌شکل قابل‌توجهی متفاوت است (جدول ۵). برای مثال، در دوره برگشت ۵۰ ساله، حجم رواناب در ایستگاه عیش‌آباد

ایستگاه دورود این اندازه به مراتب کمتر (۴۷/۹۰ میلیون مترمکعب) بود. این تفاوت‌ها بیانگر آن بود که با وجود روند افزایشی رواناب در تمام ایستگاه‌ها، اندازه افزایش آن یکنواخت نیست و در دوره‌های برگشت بلندمدت،

ناهمگنی مکانی و حساسیت پاسخ آب‌شناختی آبخیز شدت یافت. استفاده از اندازه‌های یکنواخت رواناب طراحی در مقیاس آبخیز می‌تواند منجر به خطای قابل توجه در ارزیابی خطر آب‌دهی سیلاب شود.

جدول ۵- اندازه‌های رواناب (میلیون مترمکعب) در دوره‌های برگشت دو، پنج، ۱۰، ۲۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سال در ایستگاه‌های مطالعه‌شده
Table 5- Runoff volume (Mm³) in different return periods (2, 5, 10, 20, 50, 100, and 200 years) at the study stations.

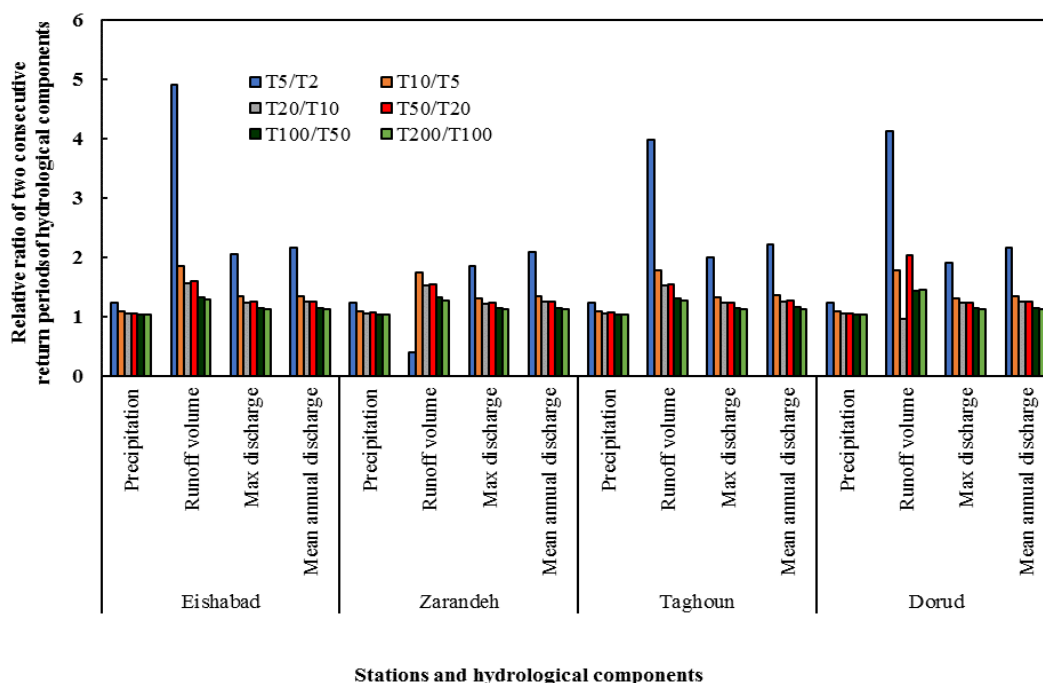
Station	2	5	10	20	50	100	200
Eishabad	13.59	66.62	123.66	194.99	311.57	416.12	533.04
Taghon	14.17	56.43	99.96	153.64	239.24	315.36	402.68
Durood	1.60	6.59	11.17	11.25	22.85	32.73	47.90
Zarandeh	8.32	23.10	40.58	62.12	96.58	127.5	162.73

نتایج تحلیل نسبت تغییرات مؤلفه‌های آب‌شناختی بارش و رواناب

تحلیل نسبت اندازه‌های مؤلفه‌های آب‌شناختی (بارش، حجم رواناب، میانگین آب‌دهی سالانه و آب‌دهی بیشینه لحظه‌ای) در شکل ۲ ارائه شده است. نتایج تحلیل در دوره‌های گوناگون برگشت نشان داد پاسخ آبخیزها نسبت به افزایش دوره برگشت ناخطی و بسیار حساس است، به‌ویژه برای مؤلفه‌هایی که نمایانگر شدت جریان و بحران‌های آب‌شناختی هستند.

تحلیل آمار توصیفی بارش

تفاوت اندازه‌های میانگین بارش سالانه میان ایستگاه‌های مطالعه‌شده نشان‌دهنده تفاوت الگوهای اقلیمی، شیب و پستی‌بلندی آبخیز، فاصله از منابع رطوبتی و شرایط محلی بود (میان ۲۰۲۰). تفاوت اندازه‌های میانگین بارش سالانه (بیش از ۳۰٪) نشان‌دهنده ناپایداری زمانی بارش و توزیع نامنظم آن در طول دوره آماری بود.



شکل ۲- نسبت دوره‌های برگشت بارش و مؤلفه‌های مختلف رواناب در دوره‌های گوناگون برگشت (سال) در ایستگاه‌های مطالعه‌شده.

Figure 2- Ratio of precipitation return periods and different runoff components in different return periods (year) at study stations.

بررسی اندازه‌های حدی بارش نیز نشان داد بیشترین بیشینه بارش مربوط به ایستگاه عیش‌آباد بود که نشان‌دهنده رخداد‌های شدید بارشی است، در حالی که کمترین اندازه‌های سالانه در همان ایستگاه و زرنده نیز نشان‌دهنده سال‌های بسیار خشک و نوسانات شدید اقلیمی است. این نتایج با یافته‌های مینا (۲۰۲۰) مبنی بر اینکه نوسانات میان سال‌های خشک و تر یکی از ویژگی‌های ذاتی بارش در اقلیم‌های مختلف است، هم‌راستا است.

تحلیل پراکندگی مطلق داده‌ها با استفاده از انحراف معیار نشان داد بیشترین نوسان مطلق بارش مربوط به ایستگاه‌های دورود و عیش‌آباد بود، به طوری که اندازه‌های بیش از انحراف معیار بیانگر کاهش پیش‌بینی‌پذیری و افزایش تغییرات بارش سالانه در این ایستگاه‌ها است. این یافته‌ها با نتایج پژوهش فرزانا و همکاران (۲۰۲۴) مبنی بر اینکه تحلیل‌های جهانی بارش نشان‌دهنده تغییرات اقلیمی و نوسانات طبیعی است که سبب افزایش نبودن قطعیت در اندازه‌های بارش بلندمدت می‌شود، مطابقت دارد. ضریب‌های تغییرات بارش در تمام ایستگاه‌ها نسبتاً زیاد بود و بیانگر نوسانات قابل‌توجه میان‌سالی بارش در آبخیز نیشابور است و این ویژگی بارز اقلیم‌های نیمه‌خشک به‌شمار می‌آید. بررسی مؤلفه‌های بارش ایستگاه‌های مختلف در دوره ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۹ نشان داد ایستگاه‌ها به‌رغم هم‌جواری مکانی، ناهمگن هستند. بررسی ضریب تغییرات که معیاری از تغییرپذیری نسبی به‌شمار می‌آید، نشان داد تغییرپذیری بارش در ایستگاه‌های طاغون، دورود و زرنده با ضریب تغییرات بیش از ۳۰٪، نسبتاً زیاد است. این الگو بیانگر آن است که ایستگاه‌هایی با ضریب تغییرات زیاد به‌ویژه زرنده نسبت به تغییرات اقلیمی و رخداد‌های خشک و تر حساس‌تر است و ممکن است نیازمند راهبردهای ویژه مدیریت منابع آب و کاهش خطرپذیری خشک‌سالی باشد (فرزانا و همکاران ۲۰۲۴). این نتایج نشان داد الگوی بارش در منطقه مطالعه‌شده هم از دیدگاه مکانی ناهمگن است و هم با داشتن نوسانات سالانه، پیامدهای مهمی برای آب‌شناسی و مدیریت منابع آب به‌همراه دارد. دامنه تغییرات اندازه‌های بیشینه و کمینه بارش سالانه نشان‌دهنده شرایط اقلیمی ناپایدار و رخداد متناوب سال‌های تر و

خشک است که با یافته‌های شارما و همکاران (۲۰۱۸) هم‌راستا است. بیشترین اندازه بیشینه بارش در ایستگاه عیش‌آباد و کمترین آن در ایستگاه طاغون ثبت شد. دلیل این تفاوت‌ها می‌تواند اثرات عامل‌هایی مانند بلندی و پستی‌بلندی آبخیز و سامانه‌های بارشی محلی باشد، اگرچه بررسی مستقیم این عامل‌ها در این پژوهش انجام نشد. این دامنه تغییرات بارش بر رواناب، ذخیره آب و کیفیت منابع آبی اثرگذار بوده و برنامه‌ریزی کشاورزی و سازگاری با تغییرات اقلیمی را پیچیده‌تر می‌کند. از این‌رو، ایستگاه‌هایی که تغییرپذیری نسبی بیشتری دارند نیازمند توجه ویژه در طراحی سازه‌های ذخیره آب، مدیریت خطرپذیری خشک‌سالی و توسعه راهبردهای پایدار منابع آب هستند (وانگ و همکاران ۲۰۲۵). میانگین بارش سالانه در ایستگاه‌های مطالعه‌شده نشان‌دهنده ناهمگنی مکانی بارش بود. بیشترین میانگین بارش سالانه مربوط به ایستگاه دورود (۲۹۹/۱۵ میلی‌متر) بود، در حالی که کمترین این اندازه مربوط به ایستگاه زرنده (۲۰۱/۷۰ میلی‌متر) بود. این تفاوت‌ها بیانگر اثرات پستی‌بلندی و موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌ها بر وضعیت بارش است، به طوری که ایستگاه‌های با بلندی و نزدیکی بیشتر به منابع رطوبتی معمولاً میانگین بارش بیشتری دارند (مینا ۲۰۲۰). میانگین بارش در دیگر ایستگاه‌ها شامل عیش‌آباد (۲۹۳/۱۴ میلی‌متر) و طاغون (۲۷۵/۳۴ میلی‌متر) نیز متفاوت بود که نشان‌دهنده تنوع بارش در سطح منطقه است و مؤید آن است که نمی‌توان از میانگین بارش به‌طور یکنواخت برای کل منطقه استفاده کرد و تحلیل‌های مکانی لازم است.

تحلیل دوره برگشت بارش سالانه

تحلیل اندازه‌های بارش متناظر بر اساس نتایج نرم‌افزار با دوره‌های گوناگون برگشت در ایستگاه‌های مطالعه‌شده در جدول ۲ ارائه‌شده است. رفتار آماری بارش‌های حدی در آبخیز از دیدگاه مکانی ناهمگن بود. نتایج روند افزایشی اندازه‌های بارش با افزایش طول دوره برگشت بیانگر آن است که اندازه‌های برآوردی در دوره برگشت بلندمدت (۲۰۰ سال) بیشتر از دوره‌های کوتاه‌مدت (دو سال) هستند. می‌توان گفت، افزایش تدریجی اندازه‌های بارش با افزایش دوره برگشت در تمام ایستگاه‌ها نشان‌دهنده تفاوت در شدت و فراوانی رخداد‌های حدی بارش در

به افزایش خطرپذیری سیلاب‌های ناگهانی حتی در آبخیزهایی با مساحت کوچک شود (مرز و همکاران ۲۰۱۲). در دوره‌های برگشت بلندمدت ۱۰۰ و ۲۰۰ ساله روند افزایشی بارش در تمام ایستگاه‌ها مشاهده شد. اما، شیب این افزایش در ایستگاه دورود و عیش‌آباد بیشتر از دیگر ایستگاه‌ها بود. توزیع بارش‌های حدی در این ایستگاه‌ها نشان‌دهنده افزایش احتمال رخداد‌های بسیار شدید است (شارما و همکاران ۲۰۱۸). در ایستگاه زرنده با وجود افزایش اندازه‌های بارش در دوره‌های برگشت بلندمدت، کمترین اندازه‌ها مشاهده شد که دلیل آن می‌تواند پیامدی از محدودیت‌های رطوبتی و شرایط اقلیمی خشک‌تر حاکم بر این بخش از آبخیز باشد. از نتایج بررسی تفاوت‌های مکانی در دوره‌های برگشت بارش می‌توان برای تحلیل‌های خطرپذیری آب، مدیریت سیل و تعیین اولویت‌های برنامه‌ریزی در مقیاس منطقه‌ای بهره برد (زرین و داداشی رودباری ۲۰۲۲).

تحلیل آب‌دهی بیشینه لحظه‌ای

بر پایه نتایج جدول ۳، حتی در ایستگاه‌هایی با میانگین بارش مشابه، رخداد‌های شدید بارشی می‌توانند آب‌دهی‌های بسیار زیاد به وجود آورند که پیامدهای جدی برای سامانه‌های زهکشی، پل‌ها و سازه‌های آب‌شناختی به‌همراه دارد (پرز و همکاران ۲۰۲۱). مقایسه میان ایستگاه‌ها نشان داد در دوره‌های بلندمدت، بیشترین آب‌دهی بیشینه لحظه‌ای مربوط به ایستگاه عیش‌آباد و زرنده در مقاسه با ایستگاه طاغون و دورود بود، در حالی که ایستگاه دورود در دوره‌های کوتاه‌مدت آب‌دهی کمتر و افزایش نسبتاً ملایم‌تری داشت. می‌توان گفت ایستگاه‌هایی با آب‌دهی بیشینه لحظه‌ای بیشتر، در معرض خطر سیلاب‌های ناگهانی و شدیدتر بوده و نیازمند طراحی و مدیریت مناسب هستند (فاران و همکاران ۲۰۲۵).

تحلیل مقایسه‌ای آب‌دهی بیشینه لحظه‌ای با میانگین آب‌دهی و حجم رواناب بیانگر رابطه میان شدت بارش، حجم رواناب و آب‌دهی لحظه‌ای بود. این یافته‌ها بیانگر آن است که ایستگاه‌هایی با بارش شدید و ناگهانی، افزون بر افزایش حجم رواناب، آب‌دهی‌های لحظه‌ای بسیار زیادی نیز دارند که می‌تواند منجر به سیلاب‌های شدید و آسیب‌زا در مقیاس آبخیز شود. از این‌رو، تحلیل آب‌دهی لحظه‌ای، به‌ویژه برای طراحی سازه‌های محافظتی، کانال‌ها

مقیاس محلی است (پارمسان و همکاران ۲۰۲۲). در ایستگاه عیش‌آباد اندازه برآوردی بارش در دوره دو ساله برابر با ۲۹۰/۲۶ میلی‌متر بود، در حالی که در دوره برگشت ۲۰۰ ساله این اندازه به ۴۸۲/۵۴ میلی‌متر افزایش یافت. این الگو در دیگر ایستگاه‌ها نیز مشاهده شد که نشان‌دهنده رخداد‌های شدید بارشی آسیب‌زا است. نتایج تحلیل دوره برگشت نشان‌دهنده ناهمگنی مکانی بارش‌های شدید در سطح ایستگاه‌های مطالعه‌شده بود. برای مثال، اندازه بارش در ایستگاه زرنده در دوره برگشت ۲۰۰ ساله، ۴۰۹/۴۷ میلی‌متر بود که کمتر از ایستگاه‌های عیش‌آباد و طاغون است. دلیل این تفاوت‌ها می‌تواند منعکس‌کننده تفاوت‌های اقلیمی و پستی‌بلندی میان ایستگاه‌ها باشد، که در پژوهش‌های مشابه به‌عنوان عامل مهمی در تغییرات مکانی دوره برگشت بارش شناخته شده‌اند (زرین و داداشی رودباری ۲۰۲۲). این یافته با نتایج پژوهش بلوش و همکاران (۲۰۱۹) مبنی بر اینکه افزایش بارش‌های حدی معمولاً به‌شکل مکانی ناهمگون رخ داده و حساسیت برخی زیرآبخیزها در مقایسه با دیگر مناطق به رخداد‌های شدید بیشتر است، هماهنگی دارد.

تفاوت میان ایستگاه‌ها، در دوره‌های برگشت ۲۰ و ۵۰ ساله که برای طراحی سازه‌های آبی و مدیریت خطر سیلاب، اهمیت زیادی دارد به‌طور قابل‌توجهی، افزایش یافت. بیشترین اندازه‌های بارش در این دوره‌ها مربوط به ایستگاه عیش‌آباد بود، در حالی که کمترین این اندازه مربوط به ایستگاه زرنده بود. این یافته بیانگر آن است که مناطق با میانگین بارش بیشتر، هم مناطق پرخطر هستند و هم بارش‌های حدی در آن‌ها به‌گونه‌ای است که احتمال رخداد‌های شدید با شدت زیاد بیشتر است. روند افزایشی اندازه‌های بارش با افزایش دوره برگشت نشان‌دهنده رخداد رویدادهای شدیدتر در بازه‌های زمانی طولانی‌تر است، و هم در برنامه‌ریزی مهندسی و مدیریت منابع آب اهمیت دارد. تعیین دقیق اندازه دوره‌های برگشت بارش به‌ویژه در ایستگاه‌هایی که در دوره‌های بلندمدت افزایش بارش‌های شدید مشاهده شد، برای طراحی سازه‌هایی چون سدها، کانال‌ها و سامانه‌های مهار سیلاب و طراحی زیرساخت‌های مقاوم و کاهش خطرپذیری سیل، اهمیت و ضرورت دارد (پرز و همکاران ۲۰۲۱). افزون بر این، نتایج پژوهش‌ها مؤید آن است که چنین رفتاری می‌تواند منجر

دورود کمتر بود. دلیل این تفاوت‌ها می‌تواند ناشی از ویژگی‌های آب‌شناختی و پستی‌بلندی آبخیزها، ظرفیت ذخیره‌سازی خاک و شبکه زهکشی طبیعی باشد. این یافته‌ها مؤید ضرورت تحلیل مکانی آب‌دهی و رواناب در مدیریت منابع آب و کاهش خطرپذیری سیلاب است (فاران و همکاران ۲۰۲۵).

تحلیل دوره برگشت رواناب سالانه

تحلیل اندازه‌های رواناب متناظر با دوره‌های گوناگون برگشت در ایستگاه‌های مطالعه‌شده نشان داد با افزایش دوره برگشت، حجم رواناب به‌طور قابل توجهی افزایش یافت (جدول ۵)، که این روند با نتایج تحلیل دوره برگشت بارش سالانه هم‌خوانی دارد. در ایستگاه عیش‌آباد، حجم رواناب در دوره برگشت دو ساله برابر با ۱۳/۵۸ میلیون مترمکعب بود و در دوره برگشت ۲۰۰ ساله به ۵۳۳/۰۴ میلیون مترمکعب افزایش یافت که نشان‌دهنده افزایش شدید اندازه رواناب در رخداد‌های بارشی شدید است. بر اساس نتایج پژوهش احمدی و همکاران (۲۰۱۶) با مدل PRMS، سالانه به‌طور میانگین ۲۹۵ میلیون مترمکعب آب از سطح به آبخوان نیشابور تغذیه می‌شود. با توجه به اینکه دوره برگشت ۲۰۰ سال نشان‌دهنده یک رخداد حدی و نادر است، حجم رواناب ۵۳۳ میلیون مترمکعب برای چنین رویدادی قابل انتظار است. زیرا، در رخداد‌های حدی، بخش بیشتر بارش به رواناب تبدیل‌شده و فرصت نفوذ بسیار کاهش می‌یابد. افزون بر این، مساحت بالادست ایستگاه عیش‌آباد و شیب زیاد منطقه، سبب افزایش تمرکز رواناب و آب‌دهی اوج می‌شود. این الگو در دیگر ایستگاه‌ها نیز مشاهده شد. برای مثال، در دوره‌های بلندمدت، حجم رواناب ایستگاه طاغون در مقایسه با ایستگاه دورود بیشتر بود در حالی‌که این اندازه در تمام دوره‌ها در ایستگاه دورود کمتر بود و حساسیت کمتری نیز نسبت به بارش‌های شدید داشت. این افزایش حجم رواناب با طول دوره برگشت نشان‌دهنده رابطه مستقیم میان شدت بارش و اندازه رواناب سالانه است و مؤید اهمیت تحلیل دوره برگشت در مدیریت منابع آب است. بر پایه نتایج پژوهش‌های پیشین، تحلیل احتمال رخداد رواناب و رابطه آن با دوره‌های برگشت بارش، ابزار مهمی برای پیش‌بینی آب‌دهی سیلاب و کاهش خطرپذیری در مناطق با بارش متغیر و ناهمگن به‌شمار می‌آید (پرز و

و سدهای مهار سیلاب، اهمیت زیادی دارد (زرین و داداشی رودباری ۲۰۲۲). افزایش آب‌دهی بیشینه لحظه‌ای با طول دوره برگشت نیز مؤید رخداد‌های شدید بارشی، با احتمال کم ولی پیامدهای زیاد، است که می‌توانند آب‌دهی‌های پیش‌بینی‌نشده تولید کنند. این یافته‌ها مؤید ضرورت مدل‌سازی دقیق آب‌شناختی و شبیه‌سازی جریان‌های سطحی شدید برای کاهش خطرپذیری سیلاب و طراحی سازه‌های مقاوم است.

تحلیل دوره برگشت میانگین آب‌دهی سالانه

بر پایه نتایج جدول ۴، افزایش میانگین آب‌دهی سالانه در دوره برگشت‌ها نشان داد رخداد‌های بارشی شدید منجر به آب‌دهی زیاد رودها و سامانه‌های زهکشی می‌شوند که اهمیت آن نیز در طراحی سازه‌های آب‌شناختی و پیش‌بینی آب‌دهی سیلاب بسیار زیاد است (پرز و همکاران ۲۰۲۱). مقایسه میانگین آب‌دهی سالانه میان ایستگاه‌ها نشان داد در دوره‌های برگشت کوتاه تا بلندمدت، آب‌دهی ایستگاه زرنده و عیش‌آباد در مقایسه با دیگر ایستگاه‌ها بیشتر بود، در حالی‌که این اندازه در ایستگاه دورود نسبتاً کمتر و روند افزایشی یکنواخت بود، و نسبت به رخداد‌های شدید حساسیت کمتری داشت. دلیل این تفاوت‌ها می‌تواند ناشی از ویژگی‌های آبخیز، ظرفیت نفوذ خاک، پوشش گیاهی و شیب پستی‌بلندی باشد که بر شدت رواناب و جریان سطحی اثرگذار است (فاران و همکاران ۲۰۲۵). افزایش میانگین آب‌دهی با طول دوره برگشت بیانگر آن است که حتی در ایستگاه‌هایی با میانگین بارش کمتر، احتمال رخداد جریان‌های شدید و حوادث آب‌شناختی به‌شدت تأثیرگذار وجود دارد. این موضوع مؤید اهمیت تحلیل دوره برگشت و حجم رواناب را در کنار آب‌دهی سالانه برای مدیریت سیلاب، طراحی پل‌ها، کانال‌ها و سدها است (زرین و داداشی رودباری ۲۰۲۲). ترکیب داده‌های میانگین آب‌دهی سالانه با نتایج دوره برگشت بارش و حجم رواناب نشان داد که رابطه میان شدت بارش، حجم رواناب و میانگین آب‌دهی سالانه مستقیم است. به‌بیان دیگر، ایستگاه‌هایی که دوره برگشت بارش طولانی‌تری دارند، میانگین آب‌دهی بیشتر و حجم رواناب بیشتری نیز دارند. افزون بر این، تحلیل میانگین آب‌دهی سالانه نشان داد تفاوت‌های مکانی میان ایستگاه‌ها قابل توجه است. برای مثال، میانگین آب‌دهی ایستگاه زرنده و عیش‌آباد در مقایسه با دیگر ایستگاه‌ها، بیشتر و این اندازه در ایستگاه

همکاران (۲۰۲۱). بررسی اندازه‌های ایستگاه‌ها نشان داد در دوره‌های کوتاه‌مدت میانگین حجم رواناب ایستگاه دورود در مقایسه با دیگر ایستگاه‌ها، بیشتر بود. اما، در دوره‌های بلندمدت مانند ۲۰۰ سال، بیشترین حجم رواناب مربوط به ایستگاه عیش‌آباد بود. دلیل این یافته می‌تواند ناشی از ترکیب الگوی بارش شدید و ظرفیت زهکشی آبخیزهای نامبرده باشد و مؤید اهمیت تحلیل دقیق آب‌شناختی و مدل‌سازی جریان سطحی است (فرنا و همکاران ۲۰۲۵). از سوی دیگر، حجم رواناب نسبتاً کم و افزایش تدریجی با طول دوره برگشت، در ایستگاه زرنده نشان‌دهنده ظرفیت کمتر رخدادهای آب‌دهی سیلابی شدید در این ایستگاه است. اما این یافته به معنای بی‌نیازی این منطقه به برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب نیست. زیرا، نوسانات بلندمدت و رخدادهای نادر می‌تواند اثرات پیش‌بینی نشدنی به‌همراه داشته باشند (زرین و داداشی رودباری ۲۰۲۲). بر پایه نتایج جدول ۵، می‌توان گفت رابطه میان بارش و رواناب مستقیم است. به بیان دیگر افزایش دوره برگشت بارش منجر به افزایش حجم رواناب‌ها می‌شود. این یافته‌ها مؤید اهمیت طراحی سازه‌های مهندسی آب‌شناختی، مدیریت خطر سیل و توسعه برنامه‌های مدیریت منابع آب در مناطق با بارش متغیر و نایک‌نواخت است. از ترکیب تحلیل‌های میانگین بارش، دوره‌های برگشت بارش و حجم رواناب می‌توان به‌عنوان چارچوب علمی کاملی برای مدیریت منابع آب و کاهش خطرپذیری آب‌دهی سیلاب به‌منظور تصمیم‌گیری‌های عملی در راستای برنامه‌ریزی شهری و کشاورزی، بهره برد.

تحلیل اندازه‌های مؤلفه‌های بارش و رواناب

بر پایه نتایج شکل ۲، افزایش نسبت بارش از دوره دو ساله به پنج ساله در تمام ایستگاه‌ها حدود ۱/۲۳ بود. اما، افزایش متناظر در حجم رواناب و آب‌دهی‌ها به‌مراتب بیشتر از افزایش بارش بود. برای مثال، نسبت حجم رواناب در ایستگاه عیش‌آباد در دوره پنج ساله نسبت به دو ساله ۴/۹۰ بود. این تفاوت بیانگر آن است که پاسخ رواناب نسبت به تغییرات بارش شدید است. این رفتار نشان‌دهنده اثرگذاری عامل‌هایی مانند نفوذپذیری خاک، ذخیره آب در آبخیز و شرایط اولیه خاک بر رابطه میان بارش و رواناب است که می‌تواند باعث افزایش ناخطی رواناب شود (ژو و همکاران ۲۰۲۱). دلیل نسبت بیشتر رواناب در عیش‌آباد می‌تواند

ناشی از ویژگی‌های گیتاشناسی آبخیز شامل شیب زیاد، خاک کم‌ژرف با نفوذپذیری کم و تراکم زیاد زهکشی باشد که موجب کاهش فرصت نفوذ و تبدیل سریع بارش به رواناب سطحی می‌شود. از سوی دیگر، ظرفیت ذخیره‌سازی و نفوذ ایستگاه زرنده به‌دلیل شیب ملایم‌تر و خاک‌های آبرفتی ژرف و نفوذپذیر، بیشتر بود و در نتیجه رواناب کمتری داشت. از این رو، تفاوت قابل‌توجه نسبت رواناب میان دو ایستگاه نامبرده بیشتر به‌دلیل تفاوت شرایط ریخت‌سنجی و آب‌شناختی آبخیزها است. با افزایش بازه دوره برگشت، شیب افزایش بارش به‌تدریج کاهش یافت. اما، مؤلفه‌های جریان (حجم رواناب، میانگین آب‌دهی و آب‌دهی بیشینه لحظه‌ای) نسبت به افزایش دوره برگشت مقاومت کمتری داشت و حتی در دوره‌های بلندتر نیز افزایش یافت. برای مثال، نسبت میانگین آب‌دهی در دوره ۲۰۰ ساله نسبت به ۱۰۰ ساله در ایستگاه عیش‌آباد حدود ۱/۱۳ بود، در حالی‌که نسبت بارش در همان دوره‌ها حدود ۱/۰۳ بود. چنین الگوهایی با نتایج پژوهش‌های پیشین در راستای تحلیل فراوانی رواناب مبنی بر اینکه بازده تبدیل بارش به جریان سطحی با طول دوره برگشت افزایش می‌یابد، هماهنگی دارد. دلیل این موضوع می‌تواند ناشی از رویدادهای شدید بارش باشد که ظرفیت ذخیره‌سازی آبخیز را افزایش می‌دهد. نتایج این پژوهش در راستای رابطه میان دوره‌های برگشت بارش و دوره‌های برگشت جریان با یافته‌های دیگر پژوهش‌ها مطابقت دارد. نتایج این پژوهش‌ها مؤید آن است که دوره برگشت جریان اغلب نسبت به بارش معادل آن بیشتر است. زیرا، فرآیندهای آب‌شناختی مانند تجمع جریان، اشباع خاک و تمرکز جریان باعث رفتار غیرخطی پاسخ جریان می‌شود (ونجلیس و همکاران ۲۰۲۲).

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

بر اساس پویایی، رفتار و ترتیب ایستگاه‌ها متناسب با مؤلفه‌های مطالعه‌شده، متفاوت بود. از دیدگاه بارش، ترتیب ایستگاه‌ها عیش‌آباد، طاغون، دورود و زرنده بود. از دیدگاه آب‌دهی بیشینه لحظه‌ای و میانگین آب‌دهی سالانه و ناپایداری در شرایط، ترتیب ایستگاه‌ها عیش‌آباد، طاغون، زرنده و دورود بود. از دیدگاه حجم رواناب، ترتیب ایستگاه‌ها عیش‌آباد، طاغون، زرنده و دورود بود. در این

ایستگاه‌ها هم ترتیب و هم نسبت تغییر متفاوت بود. به‌طوری که نسبت این تغییر در حجم رواناب بیشتر از دیگر مؤلفه‌های بررسی‌شده بود. مقایسه میان ایستگاه‌ها در شکل ۲ بیانگر آن است که افزایش مؤلفه‌های رواناب و آب‌دهی در ایستگاه‌های طاغون و عیش‌آباد نسبت به افزایش دوره برگشت، بیشتر بود. در حالی که ایستگاه زرنده و دورود با افزایش‌های نسبتاً ملایم‌تر در همه مؤلفه‌ها، در رتبه بعدی بودند. دلیل این الگوها می‌تواند تفاوت‌های پستی‌بلندی، شیب آبخیز، نوع خاک و شبکه زهکشی طبیعی آبخیزها باشد. زیرا، نقش چنین ویژگی‌های فیزیکی در شیوه تبدیل بارش به رواناب و جریان مهم است (ژو و همکاران ۲۰۲۱؛ ونجلیس و همکاران ۲۰۲۲). رابطه ناخطی میان بارش و مؤلفه‌های جریان سطحی مؤید آن است که فقط استفاده از بارش به‌عنوان معیار تحلیل آب‌شناختی برای برنامه‌ریزی و طراحی سازه‌های آبی کافی نیست. به‌ویژه در دوره‌های بلندمدت برگشت که احتمال رخداد‌های نادر و شدید افزایش می‌یابد، لازم است تا مؤلفه‌های جریان مانند آب‌دهی بیشینه لحظه‌ای و حجم رواناب نیز بررسی شوند تا بتوان پیش‌بینی‌های دقیق‌تر و طراحی‌های مهندسی با خطرپذیری کمتر انجام داد. افزون بر این، افزایش نسبت میانگین آب‌دهی‌ها و بیشینه لحظه‌ای در دوره‌های بلندتر نشان داد رخداد‌های نادر می‌توانند فراتر از ظرفیت طبیعی آبخیزها اثرگذار باشند و منجر به جریان‌های شدیدتر و بالقوه ویرانگر شوند. این یافته‌ها مؤید اهمیت تحلیل ترکیبی بارش، رواناب و جریان برای مدیریت سیلاب، تعیین مناطق پرخطر و طراحی زیرساخت‌های مهندسی است. استفاده از تحلیل‌های فراوانی و توزیع‌های آماری مناسب برای برآورد دوره‌های برگشت مؤلفه‌های مختلف آب‌شناختی، به‌ویژه در مواجهه با تغییرات اقلیمی و افزایش ناپایداری در الگوهای بارش، از ضروریات مدیریت منابع آب و کاهش خطرپذیری سیلاب است. بر پایه نتایج شکل ۲ می‌توان گفت رابطه میان مؤلفه‌های بارش و پاسخ آب‌شناختی سطحی، پیچیده و وابسته به ویژگی‌های آبخیز است. با تحلیل دقیق و یکپارچه این مؤلفه‌ها، همراه با مدل‌سازی فرکانس بارش و جریان، می‌توان چارچوب علمی برای برنامه‌ریزی، مدیریت

خطرپذیری و طراحی سازه‌های آبی در مقیاس‌های منطقه‌ای فراهم آورد. نتایج این پژوهش نشان داد در دوره‌های برگشت بارش و رواناب، الگوی رفتاری چهار ایستگاه آبخیز نیشابور (عیش‌آباد، زرنده، طاغون و دورود) هم‌زمان و هماهنگ نبود. این تفاوت‌ها با افزایش دوره برگشت افزایش یافت. تحلیل اندازه‌های متناظر با دوره‌های گوناگون برگشت نشان داد که اگرچه روند بارش با افزایش دوره برگشت روند افزایشی یکنواخت و تدریجی بود، اما رفتار پاسخ رواناب افزایش غیرخطی بود، به‌ویژه در دوره‌های برگشت متوسط تا بلندمدت که افزایش رواناب از افزایش بارش نیز بیشتر بود. افزون بر این، فرآیند تبدیل بارش به رواناب در آبخیز مطالعه‌شده تحت تأثیر مجموعه‌ای از فرآیندهای فیزیکی، آستانه‌ای و پویایی درون‌آبخیزی است. رفتار ناخطی مشاهده‌شده در پاسخ رواناب بیانگر آن است که رواناب برخلاف بارش به شرایط اولیه سامانه آب‌شناختی وابسته است. هنگامی که بارش از یک آستانه مشخص بیشتر شود، می‌تواند منجر به تغییر ساز و کار تولید رواناب شده و به‌طور هم‌زمان سبب شروع فرآیندهایی مانند اشباع خاک، جریان‌های ترجیحی و افزایش سهم رواناب سطحی شود. این نوع پاسخ آستانه‌ای که در این پژوهش در دوره‌های برگشت بلندمدت به‌خوبی مشاهده شد با نتایج پژوهش مرز و بلوشل (۲۰۱۵) که تغییر ساز و کارهای تولید رواناب در رخداد‌های حدی را بررسی کرده‌اند، مطابقت دارد. افزون بر این، با افزایش ناهم‌خوانی میان دوره‌های برگشت بارش و رواناب در اندازه‌های بزرگ‌تر دوره برگشت می‌تواند بازتابی از محدود شدن ظرفیت طبیعی آبخیز در برابر رخداد‌های شدید باشد. در شرایط بارش‌های معمول بخش بیشتر بارش با نفوذ و ذخیره در خاک تعدیل می‌شود، اما با افزایش شدت و تداوم بارش، این ظرفیت به‌سرعت اشباع شده و وضعیت آبخیز به گونه‌ای تغییر می‌کند که حتی افزایش ناچیزی در بارش می‌تواند منجر به افزایش در رواناب شود. این رفتار به‌طور گسترده در پژوهش‌های پیشین در آبخیزهای خشک و نیمه‌خشک بررسی‌شده است (فاولر و همکاران ۲۰۲۱). نتایج این پژوهش مؤید آن است که فقط با استفاده از دوره‌های برگشت بارش نمی‌توان پاسخ قابل قبولی برای برآورد خطر رواناب و سیلاب در آبخیز، به‌ویژه

در دوره‌های برگشت بلندمدت که رفتار رواناب ناخطی است، ارائه داد.

استفاده از یک اندازه ثابت بارش طراحی برای کل آبخیز نیشابور، به‌ویژه در دوره‌های برگشت بلندمدت می‌تواند منجر به نادرستی برآورد خطرات آب‌شناختی شود. به‌کارگیری یک بارش یکنواخت در مقیاس آبخیز، هنگامی که تحلیل‌ها به دوره‌های برگشت حدی تعمیم‌داده می‌شوند، سبب کم‌برآورد یا بیش‌برآورد آب‌دهی اوج و حجم رواناب می‌شود (رحمان و همکاران ۲۰۱۹). در مقایسه با بارش، نوسان رفتار رواناب بیشتر است. این تفاوت را می‌توان ناشی از ماهیت ناخطی فرآیندهای تبدیل بارش به رواناب دانست که احتمالاً تحت تأثیر عامل‌های پرشماری مانند رطوبت اولیه خاک، ویژگی‌های فیزیکی خاک، پستی‌بلندی، پوشش زمین و شبکه زهکشی است (بلوش و همکاران ۲۰۱۹). نتایج نشان داد نسبت‌های افزایش رواناب میان دوره‌های برگشت متوالی در بیشتر ایستگاه‌ها بزرگ‌تر از نسبت‌های متناظر بارش بود. به‌بیان دیگر، افزایش‌ها در شدت یا اندازه بارش‌های حدی می‌توانند منجر به افزایش‌های بزرگ‌تری در رواناب شوند. این رفتار در پژوهش‌های پیشین نیز بررسی شده است و به‌عنوان یکی از ویژگی‌های بارز پاسخ آب‌شناختی آبخیزها در مواجهه با رخداد‌های حدی شناخته‌شده است (شارما و همکاران ۲۰۱۸). افزایش تفاوت میان اندازه‌های بارش و رواناب در دوره‌های برگشت بلندمدت مانند ۱۰۰ و ۲۰۰ ساله را می‌توان در چارچوب نظریه رفتارهای آستانه‌ای سامانه‌های آب‌شناختی تفسیر کرد. بر اساس این نظریه هنگامی که سامانه از آستانه‌هایی مانند اشباع کامل خاک یا گسترش رواناب سطحی عبور می‌کند، پاسخ آن به ورودی‌ها به‌شدت ناخطی و جهشی است. تفاوت قابل‌توجه پاسخ رواناب میان ایستگاه‌ها نشان داد عامل‌های محلی و ساختاری، مانند شیب، نفوذپذیری خاک در آبخیز نیشابور، افزایش تدریجی بارش‌های حدی می‌تواند در مقاطعی به افزایش نامتناسب رواناب منجر شود، به‌ویژه زمانی که ظرفیت نفوذ خاک کاهش یافته یا شبکه زهکشی نقش مؤثرتری در انتقال جریان دارد. این یافته با نتایج پژوهش ون‌هامل و همکاران (۲۰۲۵) هم‌راستا است.

تغییر در متغیرهای آب‌اقلیمی همیشه یکی از مهم‌ترین چالش‌های بشر در مواجهه با پدیده‌های اقلیمی و

آب‌شناختی در مدیریت آبخیزها است. بر این اساس، پیش‌بینی این متغیرها در دوره‌های گوناگون برگشت می‌تواند نقش مؤثری بر مدیریت منابع آب داشته باشد. بر پایه نتایج این پژوهش، نسبت افزایش اندازه‌های بارش و رواناب در دوره‌های گوناگون برگشت یکسان نیست و این تفاوت با افزایش دوره برگشت شدت یافت. با تحلیل همزمان داده‌های آب‌اقلیمی با رسوب‌سنجی می‌توان به درک بهتری از رفتار آبخیزها رسید. محدودیت داده‌ها که در بسیاری از پژوهش‌های آب‌شناسی و رسوب‌گزارش‌شده است که می‌تواند موجب افزایش نبودن قطعیت در ارزیابی جامع خطرات سیلاب شود. از این‌رو، پیشنهاد می‌شود در دیگر پژوهش‌ها از داده‌های کامل و پیوسته، برای تحلیل دوره برگشت رسوب استفاده شود. افزون بر این، بر پایه نتایج این پژوهش به‌کارگیری مدل‌های آماری و ابزارهای تخصصی مانند Hyfran-Plus که امکان تحلیل فراوانی، برازش توزیع‌های آماری و برآورد نبودن قطعیت را فراهم می‌آورند، پیشنهاد می‌شود. پیشنهاد می‌شود مدیران منابع آب به رخداد بارش‌ها با افزایش دوره برگشت، توجه ویژه داشته باشند، زیرا این رخدادها افزون بر خسارت‌های اقتصادی و جانی، منجر به خروج سریع آب از منطقه و کاهش فرصت نفوذ می‌شوند. این موضوع در بلندمدت به افزایش کم‌آبی و کاهش منابع آب زیرزمینی منجر می‌شود.

تضاد منافع نویسندگان

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

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: مفهوم‌سازی، نظارت بر پژوهش، ویرایش نوشتار و نهایی کردن پژوهش
نویسندگان دوم تا ششم: جمع‌آوری داده‌ها، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماري، نگارش نسخه اولیه مقاله
نویسنده هفتم: راهنمایی، ویرایش و بازبینی اولیه نوشتار، بازبینی نتایج و انجام اصلاحات

فهرست منابع

- Afsharipour Z, Abdolhosseini, M, Bahremand A. 2018. Evaluation of the hydrological design of a dam spillway using bivariate return periods based on copula functions (Case study: Golestan 2 Dam, Golestan Province). *Iranian Journal of Irrigation and Water Engineering*. 8(3): 78-93. (In Persian). <https://www.magiran.com/p1858511>
- Bales RC, Goulden ML, Hunsaker CT, Conklin MH, Hartsough PC, O'Geen AT, Safeeq M. 2018. Mechanisms controlling the impact of multi-year drought on mountain hydrology. *Scientific Reports*. 8(1): 690. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-19007-0>
- Bazrafshan O, Pakdaman Z, Jamshidi S, Jalalifard A. 2025. Three-dimensional uncertainty analysis of sediment dynamics: Exploring suspended sediment concentration, flood discharge, and sediment yield. *Physics and Chemistry of the Earth. Parts A/B/C*, 104033. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2025.104033>
- Blöschl G, Gaál L, Hall J, Kiss A, Komma J, Nester T, Viglione A. 2015. Increasing river floods: Fiction or reality? *WIREs Water*. 2: 329-344. <https://doi.org/10.1002/wat2.1079>
- Blöschl G, Hall J, Viglione A, Perdigão RA, Parajka J, Merz B, Živković N. 2019. Changing climate both increases and decreases European river floods. *Nature*. 573(7772): 108-111. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1495-6>
- Calizaya E, Aráoz J, Sardón S, Calizaya F, Laqui W. 2025. Modeling surface runoff under climate change scenarios: An integrated SCS-CN and GIS techniques in a High Andean Basin of Puno, Peru. *International Journal of Geoinformatics*. 21(3): 1-17. <https://doi.org/10.52939/ijg.v21i3.3987>
- Chamani R, Mostafazadeh R, Kalehhouei M, Haji K. 2023. Determining spatial correlation and pattern of changes in elevation and runoff volume in the sub-watersheds of Sharqanj region of Birjand. *Quantitative Geomorphology Research*. 12(3): 201-219. (In Persian). <https://doi.org/10.22034/gmpj.2023.408752.1448>
- Deb P, Malakar P, Bora PK, Dubey SK. 2025. Univariate versus multivariate flood frequency analysis in tropical region: Employing two classes of hydrological models. *CLEAN–Soil, Air, Water*. 53(1): 2300351. <https://doi.org/10.1002/clen.202300351>
- Ebadifar M, Hosseini-Abri A, Ebadifar A, Abadizadeh M. 2020. Estimation of design flood discharge for studies on the regulation of the Sorkheh-e-Hesar River (Vali-Asr Town area, Ray City). *Scientific Journal of Water Sciences and Engineering. Islamic Azad University, Ahvaz Branch*. 10(28): 7-19. (In Persian). <https://sanad.iau.ir/ar/Journal/wsej/Article/921939>
- Fagundes HO, Maciel DA, Fassoni-Andrade AC, Silva VA, Rossoni R, Cavalcanti JRA, Fan FM. 2025. Simulating suspended sediment transport during the 2023-2024 floods in southern Brazil. *International Soil and Water Conservation Research*. 24: 100599. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2025.11.007>
- Farran MM, Masoud M, Elfeki AM. 2025. Frequency analysis of maximum daily rainfall for flood risk management in Jazan Province Kingdom of Saudi Arabia: Excel-based model. *Journal of King Abdulaziz University: Meteorology, Environment and Arid Land Agriculture Sciences*. 34(1). <https://doi.org/10.4197/Met.34-1.5>
- Farzana SZ, Paudyal DR, Chadavada S, Alam MJ. 2024. Spatiotemporal variability analysis of rainfall and water quality: Insights from trend analysis and wavelet coherence approach. *Geosciences*. 14(8): 225. <https://doi.org/10.3390/geosciences14080225>
- Fowler HJ, Lenderink G, Prein AF, Westra S, Allan RP, Ban N, Zhang X. 2021. Anthropogenic intensification of short-duration rainfall extremes. *Nature Reviews Earth and Environment*. 2(2): 107-122. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-00128-6>
- Franzen SE, Farahani MA, Goodwell AE. 2020. Information flows: Characterizing precipitation-streamflow dependencies in the Colorado headwaters with an information theory approach. *Water Resources Research*. 56(10): e2019WR026133. <https://doi.org/10.1029/2019WR026133>
- Gao Y, Taie Semiromi M, Merz C. 2023. Efficacy of statistical algorithms in imputing missing data of streamflow discharge imparted with variegated variances and seasonalities. *Environmental Earth Sciences*. 82(20): 476. <https://doi.org/10.1007/s12665-023-11139-z>
- Guduru JU, Mohammed AS. 2024. Hydrological modeling using HEC-HMS model, case of Tikur Wuha River Basin, Rift Valley River Basin, Ethiopia. *Environmental Challenges*. 17: 101017. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.101017>
- Jaberzadeh M, Saremi A, Ghorbanizadeh Kharazi H, Babazadeh H. 2024. SWAT and IHACRES models for the simulation of rainfall-runoff of Dez watershed. *Climate Dynamics*. 62(4): 2823-2835. <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06215-2>
- Lin Z, Wang Q, Xu Y, Luo S, Zhou C, Yu Z, Xu CY. 2024. Soil moisture dynamics and associated rainfall-runoff processes under different land uses and land covers in a humid mountainous watershed. *Journal of Hydrology*. 636: 131249. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131249>

- Meena M. 2020. Rainfall statistical trend and variability detection using Mann-Kendall test, Sen's slope and coefficient of variance—A case study of Udaipur district (1957–2016). *Applied Ecology and Environmental Sciences*. 8(1): 34-37. <https://doi.org/10.12691/aees-8-1-5>
- Merz B, Vorogushyn S, Uhlemann S, Delgado J, Hundecha Y. 2012. HESS Opinions" More efforts and scientific rigour are needed to attribute trends in flood time series". *Hydrology and Earth System Sciences*. 16(5): 1379-1387. <https://doi.org/10.5194/hess-16-1379-2012>
- Merz R, Blöschl G. 2003. A process typology of regional floods. *Water Resources Research*. 39(12). <https://doi.org/10.1029/2002WR001952>
- Montanari A, Young G, Savenije HH, Hughes D, Wagener T, Ren LL, Belyaev V. 2013. Panta Rhei everything flows: Change in hydrology and society—the IAHS scientific decade 2013–2022. *Hydrological Sciences Journal*. 58(6): 1256-1275. <http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2013.809088>
- Mphefu T, Nkhonjera G, Alowo R. 2025. Evaluation of the probability density function of unpredictable flood events in the Mngeni River Basin, South Africa. *Journal of Water and Climate Change*. 16(5): 1695-1714. <https://doi.org/10.2166/wcc.2025.566>
- Nasiri Khiavi A, Vafakhah M, Sadeghi SHR. 2023. Flood-based critical sub-watershed mapping: Comparative application of multi-criteria decision making methods and hydrological modeling approach. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 37(7): 2757-2775. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1711435/v1>
- Parmesan C, Morecroft MD, Trisurat Y. 2022. Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability (Doctoral Dissertation, GIEC). <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- Pérez RE, Cortés-Molina M, Navarro-González FJ. 2021. Analysis of rainfall time series with application to calculation of return periods. *Sustainability*. 13(14): 8051. <https://doi.org/10.3390/su13148051>
- Rahayu D, Rizal R, Chumaedi I. 2025. Utilization of HEC DSS and HEC SSP software for rainfall frequency analysis in drainage system design for City's Industrial Area. *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*. 10(1): 179-192. <https://doi.org/10.29244/jsil.10.1.179-192>
- Rahman MM, Harada D, Egashira S. 2024. Sediment transport processes in the Sangu River basin using a rainfall-sediment runoff model for sustainable river management. *Proceedings of International Association of Hydrological Scientists*. 386: 109-114. <https://doi.org/10.5194/piahs-386-109-2024>
- Rahman M, Ningsheng C, Islam MM, Dewan A, Iqbal J, Washakh RMA, Shufeng T. 2019. Flood susceptibility assessment in Bangladesh using machine learning and multi-criteria decision analysis. *Earth Systems and Environment*. 3(3): 585-601. <https://doi.org/10.1007/S41748-019-00123-Y>
- Ramzan MA, Alias NE, Yusop Z, Sai'di Z. 2025. Flood simulation for the Johor River Basin, Malaysia using the HEC-HMS model: Assessing impacts of climate change under SSP scenarios. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 1505(1): p. 012017. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/17551315/1505/1/012017>
- Ruff F, Pfahl S. 2024. Global estimates of 100-year return values of daily precipitation from ensemble weather prediction data. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 24(9): 2939-2952. <https://doi.org/10.5194/nhess-24-2939-2024>
- Saadatpour A, Alizadeh A, Ziaei AN, Izadi AA. 2019. Estimation and comparison of blue and green water using SWAT and SWAT-MODFLOW models in the Neishabour Watershed. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*. 13(4): 1113-1129. (In Persian). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20087942.1398.13.4.21.3>
- Sarigil G, Cavus Y, Aksoy H, Eris E. 2024. Frequency curves of high and low flows in intermittent river basins for hydrological analysis and hydraulic design. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 38(8): 3079-3092. <https://doi.org/10.1007/s00477-024-02732-0>
- Shah AI, Pan ND. 2024. Evaluation of probability distribution methods for flood frequency analysis in the Jhelum Basin of North-Western Himalayas, India. *Cleaner Water*. 2: 100044. <https://doi.org/10.1016/j.clwat.2024.100044>
- Sharma A, Wasko C, Lettenmaier DP. 2018. If precipitation extremes are increasing, why aren't floods? *Water Resources Research*. 54(11): 8545-8551. <https://doi.org/10.1029/2018WR023749>
- Syamsuddin GH, Pallu MS, Maricar F, Bakri B. 2025. Analysis of the seasonal change on the sediment transport in the primary channel of saddang irrigation area. *Engineering, Technology and Applied Science Research*. 15(1): 20138-20143. <https://doi.org/10.48084/etasr.9575>
- Tian F, Wescoat Jr JL, Loucks DP, Montanari A, Mukherji A, Di Baldassarre G, Zwarteveen M. 2026. Panta Rhei: Coevolutionary change in hydrology and society. In *Coevolution and Prediction of Coupled Human-Water Systems*. pp. 1-22. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-41736-8.00008-7>
- Vafakhah M, Moghadamnia A. 2019. Flood Control. Tarbiat Modares University. 395 p.
- Van Hamel A, Molnar P, Janzing J, Brunner MI. 2025. Suspended sediment concentrations in Alpine rivers: From annual regimes to sub-daily extreme

events. *Hydrology and Earth System Sciences*. 29(13): 2975-2995. <https://doi.org/10.5194/hess-29-2975-2025>

Vangelis H, Zotou I, Kourtis IM, Bellos V, Tsihrintzis VA. 2022. Relationship of rainfall and flood return periods through hydrologic and hydraulic modeling. *Water*. 14(22): 3618. <https://doi.org/10.3390/w14223618>

Wang Q, Yang J, Heidbüchel I, Xu T, Lu C. 2025. The effect of rainfall variability on Nitrogen dynamics in a small agricultural catchment. *Hydrology and Earth System Sciences*. 29(21): 6093-6113. <https://doi.org/10.5194/hess-29-6093-2025>

Xu K, Milliman JD, Xu H. 2010. Temporal trend of precipitation and runoff in major Chinese Rivers since 1951. *Global and Planetary Change*. 73(3-4): 219-232. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2010.07.002>

Zarrin A, Dadashi Roudbari A. 2022. Investigating precipitation return period and its probability of occurrence in Iran based on multi-source weighted-ensemble precipitation

(MSWEP). *Journal of Geography and Environmental Hazards*. 10(4): 209-227. <https://doi.org/10.22067/geoh.2021.71102.1079>

Zehe E, Sivapalan M. 2009. Threshold behaviour in hydrological systems as (human) geoecosystems: Manifestations, controls, implications. *Hydrology and Earth System Sciences*. 13(7): 1273-1297. <https://doi.org/10.5194/hess-13-1273-2009>

Zhang Y, Feng X, Wang X, Fu B. 2018. Characterizing drought in terms of changes in the precipitation-runoff relationship: A case study of the Loess Plateau, China. *Hydrology and Earth System Sciences*. 22(3): 1749-1766. <https://doi.org/10.5194/hess-22-1749-2018>

Zhou Z, Smith JA, Baeck ML, Wright DB, Smith BK, Liu S. 2021. The impact of spatiotemporal structure of rainfall on flood frequency over a small urban watershed: An approach coupling stochastic storm transposition and hydrologic modeling. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. 2021: 1-25. <https://doi.org/10.5194/hess-25-4701-2021>



Hydrological Behavior Simulation of the Neyshabur Watershed in Iran during Different Rainfall and Runoff Return Periods

Seyed Hamidreza Sadeghi^{1*}, Nastaran Naderi Marangalo², Sahar Mostafaei Yunjali³, Asma Badameh⁴, Zeinab Sheikhhi⁵, Ali Nori⁶, and Sudabeh Gharemahmudli⁷

1- Professor, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran

2, 3, 4, 5 and 6 - Ph.D. Student, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran

7- Postdoctoral Fellow, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran

Extended Abstract

Introduction and Goal

Investigating the response behavior of hydrological systems to inputs such as precipitation, particularly runoff analysis under different return periods is one of the primary objectives of hydrological research. The analysis of the return periods of hydrological components, including precipitation and runoff, has a long history. However, less attention has been paid to the comparative and simultaneous assessment of these components and to the analysis of their asynchronous behavior under different return periods. On the other hand, the complex and nonlinear relationships between precipitation and runoff, as well as the observed differences among stations, are attributed to the local conditions governing each sub-watershed. In this regard, the simultaneous assessment of these components can offer a more accurate understanding of the watershed's hydrological response, especially during extreme events conditions. Therefore, in this study, precipitation and runoff magnitudes were simultaneously investigated under different return periods in the Neyshabur Watershed in Khorasan Razavi, Iran.

Materials and Methods

Data on annual precipitation and runoff for the period from 1991 to 2021 were collected from four hydrometric stations, which represented different hydrological conditions within the watershed. Using statistical methods, precipitation and discharge data were verified in terms of quality, and missing values or data inconsistent with hydrological trends were corrected or replaced using linear regression and correlation analysis with neighboring stations. After data correction, daily precipitation and discharge values were converted into annual precipitation and discharge values. This process enabled long-term analysis and the assessment of the asynchronous behavior of the components.

Article Type: Research Article

***Corresponding Author E-mail:** sadeghi@modares.ac.ir

Citation: Sadeghi, S.H.R., Naderi Marangalo, N., Mostafaei Yunjali, S., Badameh, A., Sheikhhi, Z., Nori, A., Gharemahmudli, S. 2026. Hydrological Behavior Simulation of the Neyshabur Watershed during Different Rainfall and Runoff Return Periods. *Watershed Management Research*. 39(3):123-142.

DOI: 10.22092/WMRJ.2026.372273.1660

Received: 12 February 2026, **Received in revised form:** 16 March 2026, **Accepted:** 21 June 2026,

Published online: 23 September 2026

Watershed Management Research, Vol. 39, No. 3, Ser. No, 152, Autumn 2026, pp. 123-142.

Publisher: Fars Agricultural and Natural Resources and Education Center

©Author(s)



The corresponding precipitation and runoff magnitudes for return periods of 2, 5, 10, 20, 50, 100, and 200 years were estimated using the Hyfran-Plus software. In this analysis, among various statistical distributions, the Weibull distributions for precipitation data and the Gumbel distributions for discharge data were selected as the best-fit distributions for the studied datasets, based on the recommendation of the decision support system and using Akaike and Bayes information criteria.

Results and Discussion

The results show that the rainfall magnitudes for return periods of 2, 5, 10, 20, 50, 100, and 200 years were 290.26, 357.25, 391.87, 418.47, 447.40, 465.67, and 482.54 mm, respectively. Across different sub-watersheds, the return periods of precipitation and runoff were not consistent, and with increasing precipitation return periods, the instantaneous peak discharge, mean annual discharge, and runoff volume increased significantly at all stations, but with different rates of change. In short-term periods of 5 to 2 years, the amounts of precipitation, maximum instantaneous discharge, mean annual discharge, and runoff volume recorded at Eishabad station are 1.23, 2.06, 2.39, and 4.91 respectively; at Taghoun station, 1.23, 2.00, 2.22, and 4.00 respectively; at Dorud station, 1.23, 1.90, 2.16, and 4.13 respectively; and at Zarandeh station, 1.24, 1.87, 2.09, and 2.78 respectively. While the aforementioned ratio in long-term periods of 200 to 100 years, the precipitation amounts, maximum instantaneous discharge, average annual discharge, and runoff volume were obtained at Eishabad station 1.04, 1.13, 1.14, and 1.28; at Taghoun station 1.04, 1.13, 1.13, and 1.28; at Dorud station 1.03, 1.13, 1.13, and 1.46; and at Zarandeh station 1.04, 1.13, 1.31, and 1.28 respectively. These differences are likely due to local watershed characteristics.

Conclusion and Suggestions

The findings of this study confirmed that the use of simultaneous and multivariate approaches in precipitation and runoff return period analysis is crucial for designing flood and sediment control structures, predicting hydrological events, and managing water and soil resources sustainably in semi-arid plains. The results show that the relationship between precipitation and runoff across different return periods is nonlinear and amplified, emphasizing the importance of considering these components together in flood risk assessment and water infrastructure planning. Additionally, the significant spatial differences in the hydrological response of sub-watersheds indicate the importance of developing management strategies based on the specific conditions of each watershed. Given the high susceptibility of semi-arid watersheds to climate change, the uncertainty in predictions can be reduced by combining long-term hydroclimatic data with advanced statistical models. Finally, expanding such studies to other similar watersheds, as well as incorporating the sediment component in future analyses, is an effective step towards comprehensive and resilient management of water and soil resources. Based on the results of this study, it is suggested that future research focus on developing integrated hydrological models that dynamically link climate projections with land-use change scenarios. With such models and analyses, the ability of experts to comprehensively manage water and soil resources, reduce flood risks, and plan land-use in a manner that is consistent and based on the conditions of each watershed will increase. Furthermore, it is recommended to promote collaboration among hydrologists, climatologists, and land-use planners to translate these scientific insights into appropriate and region-specific engineering policies and standards, in order to improve ecosystem services and community resilience in vulnerable semi-arid regions.

Keywords: Annual precipitation, annual runoff volume, maximum instantaneous discharge, mean annual discharge, return period, Runoff

Article Type: Research Article

Conflicts of Interest

The authors of this article declare that they have no conflicts of interest in writing and publishing the materials and results of this research.

Data Availability Statement

All information and results are provided in the text of the article.

Authors' Contribution

Author 1: Responsible for ideation, research conceptualization, research methodology, supervision of different research parts, and final editing of the article

Authors 2 to 6: Data collection, software/statistical analysis, writing the first draft of the article

Author 7: Assisting in conducting research in different stages, writing the draft of the article, and revising the initial draft