



مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس

# پژوهش‌های آبخیزداری

شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱



مؤسسه تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

## ارزیابی مدل‌های تعیین پاسخ آب‌شناختی در آبخیز آزمایشگاهی

محمد محمدی‌هاشمی<sup>۱</sup>، بهرام ثقفیان<sup>۲\*</sup>، محمود ذاکری‌نیری<sup>۳</sup>، محسن نجارچی<sup>۴</sup>

۱ و ۴- گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

۲- گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۳- گروه مهندسی عمران، واحد اسلام‌شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اسلام‌شهر، ایران

### چکیده‌ی مبسوط

#### مقدمه و هدف

با توجه به کاربرد پاسخ آب‌شناختی آبخیز، روش‌های مختلفی برای تعیین این پاسخ انجام شده است و نتایج آن با توجه به داده‌های استفاده شده تنوع دقت و صحت زیادی داشته است. با بررسی و جمع‌بندی نتایج پژوهش‌های انجام شده در بحث مدل‌سازی بارش-رواناب و به‌ویژه روش زمان-مساحت، مشخص شد که در اغلب این پژوهش‌ها، از مفهوم زمان تمرکز آبخیز بهره گرفته شده است که در اکثر رابطه‌های تعیین اندازه‌ی آن، از خصوصیات فیزیکی آبخیز استفاده شده است و وابستگی زمان تمرکز به شرایط بارش بررسی نشده است. از این رو، این پژوهش با هدف ارزیابی این روش‌ها با بهره‌گیری از روش موج جنبشی در بستر GIS، روش HEC-1 و روش بهینه‌سازی با استفاده از دستورالعمل ژنتیک، در یک آبخیز آزمایشگاهی وی-شکل انجام شد.

#### مواد و روش‌ها

در این پژوهش به منظور مدل‌سازی بارش-رواناب از داده‌های مشاهده‌ای موجود در آبخیز آزمایشگاهی وی-شکل آزمایشگاه دانشگاه ایلینویز استفاده شد. آبخیز مطالعه شده، با سطح نفوذناپذیر از جنس آلومینیوم و دو صفحه‌ی جانبی همسان با شیب یک‌طرفه به سمت کانال با اندازه‌ی ثابت ۱٪ بود. افزون بر این، یک کانال میانی هم با شیب یک‌طرفه به سمت خروجی آبخیز با اندازه‌ی ثابت ۱٪ داشت. اندازه‌ی زبری مانینگ در این آبخیز، بر پایه‌ی سعی و خطا ۰/۰۱۴ تعیین شد.

#### نوع مقاله: پژوهشی

\*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: b.saghafian@gmail.com

استناد: محمدی‌هاشمی، م.، ثقفیان، ب.، ذاکری‌نیری، م.، نجارچی، م. ۱۴۰۲. ارزیابی مدل‌های تعیین پاسخ آب‌شناختی در آبخیز آزمایشگاهی. پژوهش‌های آبخیزداری، ۳۶ (۳): ۱۱۱-۱۲۷.

شناسه‌ی دیجیتال: 10.22092/WMRJ.2023.360149.1490

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۰۶، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۸/۱۵، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۳۰، تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۷/۰۱  
پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۲، دوره‌ی ۳۶، شماره‌ی ۳، شماره‌ی پیاپی ۱۴۰، پاییز ۱۴۰۲، صفحه‌های ۱۱۱ تا ۱۲۷.

© نویسنندگان

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



## نتایج و بحث

پس از تهیه نمودار زمان-مساحت آبخیز با استفاده از هریک از روش‌های مزبور، آب‌نگار خروجی آبخیز متناظر با این روش‌ها تعیین شد. سپس نتایج به‌دست آمده با داده‌های مشاهده‌ای مقایسه شد و اجزای مختلف آب‌نگارهای محاسبه‌ای نیز بررسی شد. نتایج نشان داد که عملکرد دستورالعمل ژنتیک در تعیین زمان اوج آب‌نگار با ۱۵٪ خطای نسبی، از عملکرد مدل‌های موج جنبشی و HEC-1 بهتر بود. همچنین مدل دستورالعمل ژنتیک با میانگین شاخص نش-ساتکلیف ۰/۹۶۸ و میانگین شاخص همبستگی ۰/۹۸۳ بیشترین تطابق را با آب‌نگارهای مشاهده‌ای داشت. همچنین با برازش منحنی با نتایج مدل‌سازی، معادله‌ی تعیین زمان تعادل آبخیز نسبت به شدت بارش به‌دست آمد که ضریب تعیین آن ۰/۹۹۹ بود. این معادله بیان‌گر رابطه‌ی عکس زمان تعادل با شدت بارش (با توان ۰/۳۳) است یعنی با دو برابر شدن شدت بارش، زمان تعادل ۲۰٪ کاهش می‌یابد. در نهایت ضریب معادله‌ی تعیین زمان تعادل برای این آبخیز ۴۹۵/۲ به‌دست آمد که به ازای هر شدت بارش، زمان تعادل متناظر آن با دقت زیاد قابل محاسبه است.

## نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش در شرایط آبخیز آزمایشگاهی مدل‌سازی بارش-رواناب با سه دسته رخداد و سه دسته مدت بارش گوناگون که هر دسته رخداد با چهار اندازه‌ی مختلف شدت بارش بود انجام شد. نمودارهای آب‌نگار متناظر با هر رخداد به‌دست آمد. با بررسی نمودارهای محاسبه‌ای و مقایسه با نمودارهای مشاهده‌ای، مشخص شد عملکرد سه مدل در تعیین حداکثر آبدهی، خطای نسبی یک تا دو درصد بود ولی در تعیین زمان رسیدن به اوج آب‌نگار، مدل‌های موج جنبشی و HEC-1 با خطای نسبی ۴۴٪، عملکرد متوسط داشت. در نهایت با بهره‌گیری از دو شاخص همبستگی و نش-ساتکلیف، مشخص شد که در روش دستورالعمل ژنتیک، آب‌نگار محاسبه‌ای به اندازه‌های مشاهده‌ای نزدیک‌تر بودند و تطابق بیشتری با داده‌های مشاهده‌ای داشتند. شایان ذکر است در این آبخیز آزمایشگاهی وابستگی زمان تعادل به شدت بارش در شرایط نفوذناپذیری تأیید شد. پیشنهاد می‌شود در صورت اعمال شرایط نفوذ عمقی و یا تغییر در اندازه‌ی زبری سطح و تعیین اندازه‌ی وابستگی تعیین و بررسی شود.

واژگان کلیدی: آبخیز وی شکل، بهینه‌سازی، پاسخ آب‌شناختی، دستورالعمل ژنتیک، مدل HEC-1، موج جنبشی

## مقدمه

نقاط قوت و ضعفی دارند. در یک پژوهش، شش نوع از روش‌های عکس‌فرآیند انتگرال پیچیده<sup>۱</sup> برای تعیین پاسخ بررسی شد. از جمله این روش‌ها تبدیل فوریه، شناسایی سامانه، بهینه‌سازی محدود، حداکثر آنتروپی، دستورالعمل ژنتیک بوده است که نتایج بررسی روش‌ها بیان‌گر عملکرد بسیار ضعیف روش تبدیل فوریه بود. در بررسی مزبور بهترین دستورالعمل از نظر عملکرد کلی، روش حداکثر آنتروپی بود (مدن و همکاران ۱۹۹۶). اخیراً از دستورالعمل ژنتیک در پژوهش‌های آب‌شناسی و سایر موضوع‌های مرتبط استفاده شده است (صبا و همکاران ۲۰۱۸، معصومی و همکاران ۲۰۲۱، صادقی و همکاران ۲۰۲۱). از دستورالعمل ژنتیک به‌عنوان ابزار بهینه‌سازی برای ترکیب با سایر روش‌ها همچون مدل فازی در تعیین پاسخ مدل‌های واسنجی بارش-رواناب نیز استفاده شده است (دونگ ۲۰۰۸). همچنین در واسنجی معادله‌های موج جنبشی نیز استفاده شده است

یکی از هدف‌های اصلی بررسی‌های بارش-رواناب، تعیین پاسخ آب‌شناختی آبخیز در مقابل رخداد بارش است. پژوهش‌های زیادی برای تعیین روش مناسب مدل‌سازی بارش-رواناب انجام شده است که به ارائه‌ی رابطه‌های تجربی منجر شده است (علیزاده ۲۰۰۸). یکی از روش‌هایی که برای تعیین رواناب خروجی آبخیز به کار برده می‌شود، روش زمان-مساحت است که حالت پیشرفته‌تر روش استدلالی است؛ با این تفاوت که شدت بارش نسبت به زمان متغیر است (علیزاده ۲۰۰۸). در این روش، آبخیز به یک گروه ناحیه تقسیم می‌شود که زمان پیمایش رواناب (تا خروجی آبخیز) در آنها یکسان و برابر است (چو و همکاران ۱۹۸۸). با فرض اینکه نمودار زمان-مساحت، پاسخ آب‌شناختی آبخیز به یک رخداد بارش است و رفتار آبخیز را در تولید رواناب با توجه به نمودار بارش بیان می‌کند، می‌توان به روش‌های مختلفی تابع این پاسخ را تعیین کرد که هر کدام از این روش‌ها

مدل‌های بارش-رواناب، مدل‌های آب‌شناختی دقیق‌تری را ارائه داده است (برخورداری و وارثانیان ۲۰۱۴، زراعتکار ۲۰۱۶). همچنین در پژوهشی، کانگ و مرواده (۲۰۱۱) یک مدل توسعه‌یافته همراه با کاربرد مدل آب‌شناختی توزیعی براساس روش آنگیر-انتشار در بستر GIS را ارائه دادند. در پژوهش ایشان، چارچوب مفهومی **STORM DHM** در سه آبخیز در ایندیانا به کار گرفته شده است. این مدل ابتدا به وسیله‌ی یک رخدادهای نقطه‌ای و داده‌های پیوسته با استفاده از شاخص‌های نش-ساتکلیف و  $R^2$  ارزیابی شد. با بررسی نتایج مشخص شد که انتخاب گام زمانی در برآورد ویژگی‌های پستی-بلندی مانند شیب، جهت جریان و مسیر جریان موثر بود، و این یافته به نوبه‌ی خود بر محاسبه‌ی زمان پیمایش و آبنگار جریان نیز مؤثر بود. همچنین ترکیب GIS و مدل موج جنبشی، کارایی این مدل را افزایش داده است (سبزواری و همکاران ۲۰۰۰، ژیونگ و ملچینگ ۲۰۰۵، لیانگ ۲۰۱۰، لیانگ و ملچینگ ۲۰۱۲، ۲۰۱۵).

کاربرد تمام مدل‌های بارش-رواناب در نهایت در پژوهش‌های آبخیز خواهد بود، اما از آنجا که متغیرها و مولفه‌های بسیاری از شرایط آبخیز، در نتیجه‌ی پایانی پژوهش‌های آبخیز مؤثر است، به شرایط ایده‌آل‌تری برای بررسی کارایی مدل‌ها و مقایسه‌ی عملکرد و دقت آنها نیاز است. از این رو آبخیزهای آزمایشگاهی در پژوهش‌های بسیاری استفاده شده است و اجرای مدل بارش-رواناب در آبخیزهای آزمایشگاهی به‌عنوان مدل ساده‌ای از آبخیزهای واقعی، در تعیین رفتار آب‌شناختی آبخیز نتایج مفیدی داشته است (لیانگ و ملچینگ ۲۰۱۲، ژیونگ و ملچینگ ۲۰۰۵)، اغلب پژوهش‌ها روی آبخیزهای آزمایشگاهی با شکل ساده‌ی هندسی است که از آنها پیشتر در مدل‌سازی آبخیزهای نظری استفاده شده است (ثقفیان و شکوهی ۲۰۰۶، سبزواری و همکاران ۲۰۱۵).

با بررسی و جمع‌بندی نتایج پژوهش‌ها در بحث مدل‌سازی بارش-رواناب و به‌ویژه روش زمان-مساحت، مشخص شد که در اغلب این پژوهش‌ها، از مفهوم زمان تمرکز آبخیز بهره گرفته شده است و در اکثر رابطه‌های تعیین اندازه‌ی آن، از خصوصیات فیزیکی آبخیز استفاده شده است و وابستگی زمان تمرکز به شرایط بارش بررسی نشده است. همچنین در اغلب پژوهش‌ها، روش زمان-مساحت و ویژگی‌های آبنگار به‌دست آمده از رواناب خروجی آبخیز از این روش در

(درسیا و کومار ۲۰۱۷). در یک بررسی، از دستورالعمل ژنتیک به عنوان مدل بهینه‌سازی و یک مدل تکمیلی برای سایر مدل‌های نرم‌افزاری هم استفاده شده است (فرزین و همکاران ۲۰۱۸). انعطاف‌پذیری مدل‌های مبتنی بر دستورالعمل ژنتیک، سبب عملکرد مطلوب آن شده است، به طوری در یک بررسی در تعیین آبدهی سیلاب در مقایسه با سایر مدل‌ها همچون مدل شبکه‌ی عصبی، مدل ترکیب خوشه‌بندی کاهشی و مدل تطبیقی استنتاج عصبی فازی<sup>۲</sup>، عملکرد بهتری داشت (نوری و همکاران ۲۰۱۹).

با توجه به سیر پیشرفت روش زمان-مساحت و کارایی آن، پژوهش‌های گوناگونی برای ارائه‌ی روش مناسب برای تهیه‌ی نمودار زمان-مساحت انجام شده است (ملسه و همکاران ۲۰۰۳، ثقفیان و شکوهی ۲۰۰۶، ذاکری و همکاران ۲۰۱۲، سبزواری و همکاران ۲۰۱۵، صادقی و همکاران ۲۰۱۵، هر و هیتوول ۲۰۱۶). همچنین دقت و کارایی استفاده از مدل موج جنبشی به‌عنوان اساس محاسبه‌های این روش نیز نشان داده شده است (ثقفیان و شکوهی ۲۰۰۶، ثقفیان و همکاران ۲۰۰۰)، موج جنبشی برای روندیابی جریان مشابه روش ماسکینگ-کانج (چابکپور ۲۰۲۲)، و هم برای تعیین رواناب مستقیم آبخیز استفاده شده است (محمدی‌هاشمی و همکاران ۲۰۲۱). اما نیاز اغلب این مدل‌ها به اطلاعات دقیق آبخیز، سبب شده است تا کارایی مدل زمان-مساحت به ویژگی‌های آب‌شناختی آبخیز وابسته باشد (هر و هیتوول ۲۰۱۶).

یکی از موضوع‌های مهم در بحث پاسخ آب‌شناختی آبخیز و مبنای بسیاری از مدل‌های بارش رواناب از جمله روش زمان-مساحت، تعیین زمان تمرکز آبخیز است. در یک پژوهش با استفاده از مدل HEC-HMS و با بهره‌گیری از روش SCS و تغییر در زمان تأخیر از روش بهینه‌سازی استفاده شد و با مقایسه‌ی آبنگارهای مشاهده‌ای و محاسبه‌ای، زمان تأخیر به‌دست آمد. در پژوهش مزبور با نزدیک شدن آبنگار مشاهده‌ای به آبنگار پیش‌بینی‌شده، زمان تأخیر بهینه به‌دست آمد و مشاهده شد که اندازه‌ی زمان تمرکز در روش SCS، ۱/۶۷ برابر زمان تأخیر بود. این زمان تمرکز، مبنای مقایسه با سایر روش‌ها قرار گرفته است. نتایج دیگر استفاده از روش مزبور نشان داد که مدل‌سازی نیازمند اطلاعات زیادی از زمین‌ریخت‌شناختی بود، در این صورت نتایج به‌دست آمده (تعیین زمان تمرکز آبخیز) دقت زیادی داشتند (سبزواری و همکاران ۲۰۰۹). استفاده از سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی همراه با

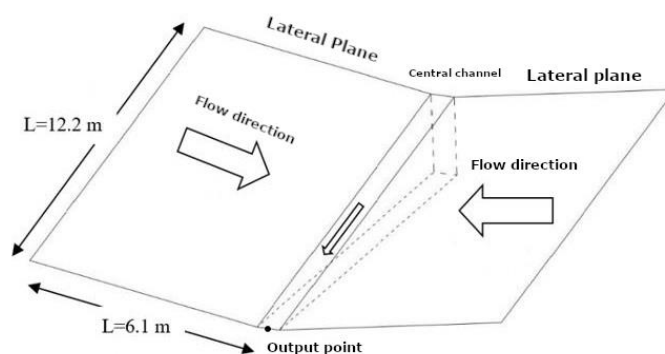
بارش-رواناب در آبخیزهای وی-شکل در پژوهش‌های گوناگون (لیانگ و ملچینگ ۲۰۱۲، محمدی‌هاشمی و همکاران ۲۰۲۱) سبب شد تا آبخیز وی-شکل برای بررسی مدل‌های مختلف در تعیین پاسخ آب‌شناختی آبخیز انتخاب شود. از این رو از داده‌های مشاهده‌ای موجود در آبخیز آزمایشگاهی وی-شکل آزمایشگاه دانشگاه ایلینویز برای این پژوهش استفاده شد (لیانگ و ملچینگ ۲۰۱۲). آبخیز شامل دو صفحه و یک کانال میانی با شرایط ریخت‌شناختی و آب‌شناختی مشخص بود. آبخیز مطالعه شده، با سطح نفوذناپذیر از جنس آلومینیوم و با دو صفحه‌ی جانبی هر یک به عرض ۶/۱ متر و طول ۱۲/۲ متر و شیب یک‌طرفه به سمت کانال با اندازه‌ی ثابت ۰/۱٪ و یک کانال میانی با طول ۱۲/۲ متر و شیب یک‌طرفه به سمت خروجی آبخیز با اندازه‌ی ثابت ۰/۱٪ بود. اندازه‌ی زبری مانینگ در این آبخیز، بر پایه‌ی سعی و خطا ۰/۰۱۴ تعیین شد. نمای آبخیز وی-شکل بررسی شده در شکل ۱ نشان داده شده است.

آبخیزهای نظری دقیق بررسی شده است. از این رو در این مقاله با هدف بررسی رفتار نزدیک به واقعیت آبخیز، یک آبخیز آزمایشگاهی وی-شکل با سطح نفوذناپذیر انتخاب شد. اگرچه نبودن شرایط نفوذ عمقی، کاربرد پژوهش را معطوف به آبخیزهای شهری (با سطح نفوذناپذیر) کرده است، اما رخداد واقعی بارش و تبدیل آن به رواناب بررسی شد و سادگی در پیاده‌سازی مدل با حذف متغیر نفوذ و نبود انواع خطاهای ساده‌سازی رایج این متغیر، فراهم شد. در این پژوهش، عملکرد مدل‌های موج جنبشی، HEC-1 و دستورات عمل ژنتیک در تعیین پاسخ آب‌شناختی آبخیز آزمایشگاهی مطالعه شد و در نهایت رابطه‌ی میان شدت بارش و زمان تعادل آبخیز به دست آمد.

### مواد و روش‌ها

#### آبخیز آزمایشگاهی مطالعه شده

کارایی آبخیزهای آزمایشگاهی و نتایج مطلوب مدل‌سازی



شکل ۱- نمای آبخیز آزمایشگاهی بررسی شده در این پژوهش.

Figure 1- The shape of the laboratory watershed investigated in this research.

شد و به وسیله‌ی رابطه‌ی عمق-حجم واسنجی شد. آب آبیگر مجدداً با استفاده از سامانه‌ی پمپاژ به نازل‌های بارش هدایت شد. همچنین با مدیریت شیرهای برقی از روش فرمان رایانه‌ای، شدت‌های مختلف بارش و مدت بارش گوناگونی ایجاد شد. شدت بارش ایجاد شده به وسیله‌ی سامانه‌ی پمپاژ، به وسیله‌ی بده‌سنج<sup>۳</sup> اندازه‌گیری شد و داده‌های برداشت شده به رایانه‌ی آزمایشگاه فرستاده شد. مشخصات رخدادهای بارش-رواناب استفاده شده در این پژوهش در جدول ۱ نشان داده شده است.

مجموعه رخدادهای بارش-رواناب در این آبخیز آزمایشگاهی، شامل ترکیبی از حالت‌های مختلف بارش و شیب آبخیز بود. در این پژوهش شرایط فیزیکی آبخیز (شیب صفحه‌ها و کانال) ثابت در نظر گرفته شد و اثرات تغییر در شرایط بارش، شامل مدت و شدت بارش بررسی شد. این آبخیز آزمایشگاهی ۴۰۰ نازل باران مصنوعی با شیرهای برقی با قابلیت دریافت دستور رایانه‌ای برای باز و بسته شدن داشت که در بلندی دو متر از سطح آبخیز نصب شده بودند. رواناب خروجی آبخیز در یک آبیگر جمع‌آوری

جدول ۱- مشخصات رخداد‌های استفاده شده در این پژوهش.

Table 1- Characteristics of events used in this research.

| Test No. | Rainfall duration (s) | Rainfall intensity (mm/hr) |
|----------|-----------------------|----------------------------|
| 1        | 120                   | 193                        |
| 2        | 120                   | 169                        |
| 3        | 120                   | 114                        |
| 4        | 120                   | 273                        |
| 5        | 180                   | 278                        |
| 6        | 180                   | 283                        |
| 7        | 180                   | 288                        |
| 8        | 180                   | 286                        |
| 9        | 240                   | 203                        |
| 10       | 240                   | 206                        |
| 11       | 240                   | 172                        |
| 12       | 240                   | 110                        |

$n_c$ : اندازه‌ی زبری کانال،  $L_c$ : طول کانال (بر حسب متر)،  
 $S_c$ : اندازه‌ی شیب کانال (بر حسب متر بر متر) است.  
 اندازه‌ی زمان کل پیمایش تا خروجی آبخیز برای هر نقطه از آبخیز با استفاده از معادله‌ی ۳ محاسبه شد.

$$t_m = t_o + t_c \quad (3)$$

$t_m$ : اندازه‌ی زمان کل پیمایش (بر حسب ثانیه)،  $t_o$ : زمان پیمایش در ناحیه‌ی صفحه‌ها (بر حسب ثانیه)،  $t_c$ : زمان پیمایش در ناحیه‌ی کانال (بر حسب ثانیه) است.

### مدل HEC-1

هسته‌ی گروه آب‌شناختی ارتش ایالات متحده در مدل معروف خود به نام HEC-1 و بعدها در مدل HEC-HMS، معادله‌ای برای نمودار زمان-مساحت ارائه دادند که قابل استفاده در اکثر آبخیزها بود (مرکز مهندسی آب‌شناختی ۱۹۹۱، ارتش ایالات متحده ۲۰۰۰). نمودار زمان-مساحت در آبخیز با استفاده از معادله‌ی ۴ به‌دست آمد.

$$\frac{A_t}{A} = \begin{cases} 1.414 \left(\frac{t}{t_c}\right)^{1.5} & \text{for } t \leq \frac{t_c}{\gamma} \\ 1 - 1.414 \left(1 - \frac{t}{t_c}\right)^{1.5} & \text{for } t \geq \frac{t_c}{\gamma} \end{cases} \quad (4)$$

$A_t$ : مساحت تجمعی بخشی از آبخیز مشارکت کننده (بر حسب مترمربع) در تولید رواناب در زمان  $t$ ،  $A$ : مساحت کل آبخیز (بر حسب مترمربع)،  $t_c$ : زمان تمرکز آبخیز است.

برای استفاده از این روش نیاز به تعیین زمان تمرکز بود که با استفاده از معادله‌ی ۳ برآورد شد. پس از تعیین نمودار زمان-مساحت، با روش انتگرال پیچیده از نمودار

### مدل‌های بارش-رواناب استفاده شده

#### مدل موج جنبشی در بستر GIS

یکی از روش‌های استفاده شده در این پژوهش، مدل توزیعی بر پایه‌ی معادله‌های موج جنبشی در بستر نرم افزار GIS است. در این مدل، آبخیز به دو ناحیه صفحه و کانال تقسیم می‌شود. در این پژوهش، با استفاده از سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی، آبخیز در دو ناحیه‌ی صفحه‌ها و کانال به مجموعه سلول‌هایی به شکل مربع با طول ضلع ۱۰ سانتی‌متر تقسیم‌بندی شد و برای هر سلول، زمان پیمایش رواناب تا خروجی سلول محاسبه شد و با استفاده از روندیابی جریان (مجموع زمان پیمایش از سلول‌های واقع در مسیر جریان رواناب خروجی)، زمان پیمایش سلول مد نظر تا خروجی آبخیز محاسبه شد. تعیین زمان پیمایش در ناحیه‌ی صفحه‌ها با استفاده از معادله‌ی ۱ محاسبه شد (وولهایزر و لیگت ۱۹۶۷).

$$t_o = \left( \frac{n_o L_o}{\sqrt{S_o} i_o^{2/\tau}} \right)^{2/\tau} \quad (1)$$

$t_o$ : زمان پیمایش در ناحیه صفحه‌ها (بر حسب ثانیه)،  
 $n_o$ : اندازه‌ی زبری صفحه‌ها،  $L_o$ : عرض صفحه‌ها (بر حسب متر)،  
 $S_o$ : اندازه‌ی شیب صفحه‌ها (بر حسب متر بر متر)،  
 $i_o$ : شدت بارش مؤثر روی صفحه‌ها (بر حسب متر بر ثانیه) است.

زمان پیمایش در ناحیه‌ی کانال، با استفاده از معادله‌ی ۲ محاسبه شد (وونگ ۲۰۰۱).

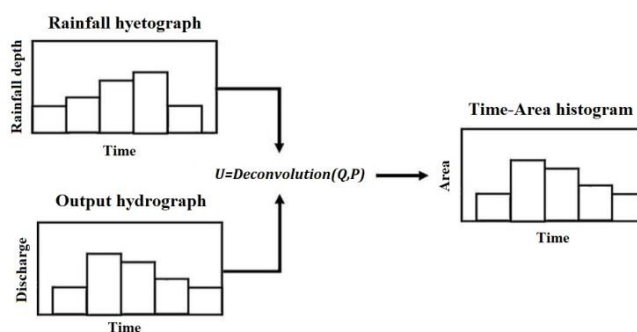
$$t_c = \left[ \frac{\gamma^{2/\tau} n_c L_c (1 + S_o^\tau)^{1/\tau}}{\sqrt{S_c} S_o^{1/\tau} (\gamma i_c L_o)^{1/\tau}} \right]^{2/\tau} \quad (2)$$

$t_c$ : زمان پیمایش در ناحیه‌ی کانال (بر حسب ثانیه)،

$$Q_n = \sum_{m=1}^{n \leq M} P_m U_{n-m+1} \quad (5)$$

$P$ : ماتریس بارش مازاد،  $U$ : نمودار زمان-مساحت در نقش پاسخ آبخیز،  $Q$ : آبنگار رواناب خروجی آبخیز در قالب ماتریس است.

با معلوم بودن دو ماتریس بارش مازاد و آبنگار رواناب خروجی، با استفاده از دستورالعمل ژنتیک و اعمال بهینه‌سازی، ماتریس پاسخ آبخیز تعیین شد. این فرایند در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- فرآیند تعیین پاسخ آب‌شناختی آبخیز براساس رخداد بارش-رواناب.

Figure 2- The process of determining the watershed hydrological response based on rainfall-runoff events.

$R$ : شاخص همبستگی،  $Cov$ : کوواریانس دو متغیر  $Q_o$  و  $Q_c$ ،  $\sigma Q_c$ : انحراف معیار  $Q_c$ ،  $\sigma Q_o$ : انحراف معیار  $Q_o$  است.

شاخص نش-ساتکلیف با استفاده از معادله ۸ محاسبه شد (نش و ساتکلیف ۱۹۷۰).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{o_i} - Q_{c_i})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{o_i} - \bar{Q})^2} \quad (8)$$

$NSE$ : شاخص نش-ساتکلیف،  $Q_{o_i}$ : آب‌دهی مشاهده‌ای،  $Q_{c_i}$ : آب‌دهی محاسبه‌ای،  $\bar{Q}$ : میانگین آب‌دهی مشاهده‌ای است.

هر چه اندازه‌ی شاخص نش-ساتکلیف به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد مدل برازش بهتری بین دو دسته داده‌های مشاهده‌ای و محاسبه‌ای را نشان می‌دهد (بیاتی و همکاران ۲۰۲۱).

#### زمان تعادل<sup>۷</sup>

زمان تمرکز آبخیز، زمان لازم برای مشارکت دورترین نقطه‌ی آبخیز به خروجی در تولید رواناب سطحی تعریف

زمان-مساحت و نمودار بارش، آبنگار رواناب خروجی آبخیز به‌دست آمد. در این پژوهش، روش HEC-1 به‌عنوان یک مدل تعیین پاسخ آب‌شناختی آبخیز استفاده شد.

#### مدل ترکیبی دستورالعمل ژنتیک

این مدل، ترکیبی از روش‌های دستورالعمل ژنتیک و زمان-مساحت است. در این مدل، با استفاده از رخداد‌های پیشین بارش-رواناب در آبخیز، پاسخ آب‌شناختی آبخیز به‌دست آمده به شکل نمودار زمان-مساحت ارائه می‌شود. معادله ۵، معادله اصلی استفاده شده در این مدل است.

#### شاخص‌های ارزیابی

در این پژوهش برای بررسی دقت نتایج مدل‌ها از شاخص‌های آماری خطای نسبی<sup>۴</sup>، همبستگی<sup>۵</sup> و نش-ساتکلیف<sup>۶</sup> استفاده شد. در تمام ارزیابی‌ها، خروجی‌های هر مدل با اندازه‌های مشاهده‌ای (داده‌های بارش-رواناب ثبت شده قبلی) مقایسه شد. شاخص خطای نسبی با استفاده از معادله ۶ محاسبه شد.

$$RE = \frac{|Q_o - Q_c|}{Q_o} \times 100 \quad (6)$$

$Q_o$ : اندازه‌ی مشاهده‌ای آب‌دهی،  $Q_c$ : اندازه‌ی محاسبه‌ای آب‌دهی،  $RE$ : خطای نسبی برآورد است.

هر چقدر اندازه‌ی شاخص خطای نسبی کم‌تر باشد، نزدیکی دو آبنگار به هم بیشتر است و بر عکس هر چقدر این شاخص بیشتر باشد دقت نتایج مدل‌سازی کم‌تر است. شاخص همبستگی با استفاده از معادله ۷ محاسبه شد.

$$R = \frac{Cov(Q_o, Q_c)}{\sigma Q_o \sigma Q_c} \quad (7)$$

4 - Relative error

5 - Correlation

6 - Nash-Sutcliffe Efficiency

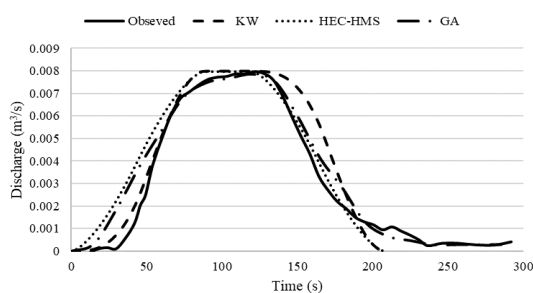
7- Equilibrium time

## نتایج

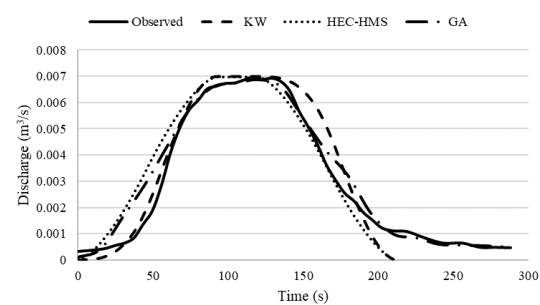
## تعیین آبنگارهای خروجی

در این پژوهش مدل‌سازی با بهره‌گیری از مدل‌های معرفی شده و با دو دسته از رخدادهای بارش-رواناب (با مدت و شدت بارش متفاوت) انجام شد (جدول ۱). نمودارهای آبنگار رواناب خروجی آبخیز در شکل‌های ۳ تا ۵ نشان داده شده است. در شکل‌های مزبور، روش‌های دستورات عمل ژنتیک با نماد GA، موج جنبشی با نماد KW و مدل هسته‌ی آب‌شناختی ارتش ایالات متحده با نماد HEC-HMS نمایش داده شده است.

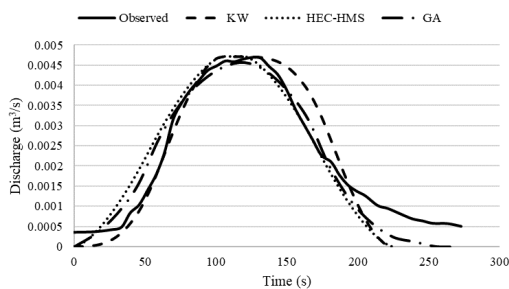
شده است (علیزاده ۲۰۰۸). اگر مدت بارش (با شدت ثابت) برابر یا بزرگتر از زمان تمرکز آبخیز باشد، می‌توان از عبارت زمان تعادل به جای زمان تمرکز استفاده کرد (ثقفیان و جولین ۱۹۹۵). در این پژوهش یکی از مولفه‌های بررسی شده در این آبخیز، تعیین اندازه‌ی زمان تعادل به ازای هر رخداد بارش-رواناب بوده است که در پایان پژوهش، رابطه‌ی آن با اندازه‌ی شدت بارش ارزیابی شد.



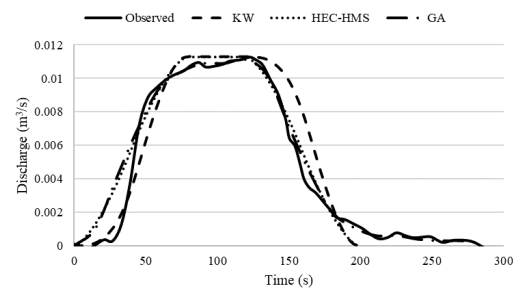
آبنگار متناظر با آزمایش ۱



آبنگار متناظر با آزمایش ۲

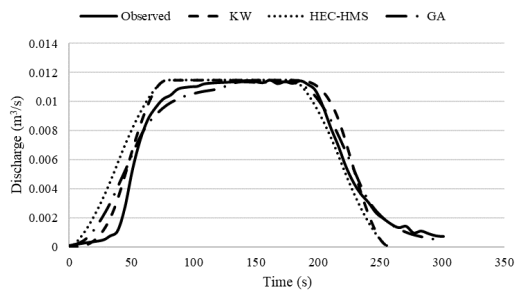


آبنگار متناظر با آزمایش ۳

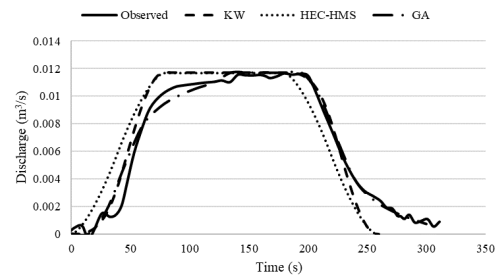


آبنگار متناظر با آزمایش ۴

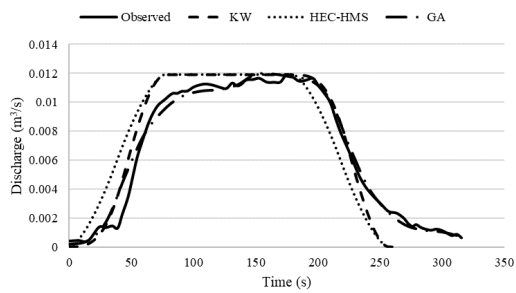
شکل ۳- آبنگارهای رواناب خروجی متناظر با مدل‌سازی‌های آزمایش‌های ۱ تا ۴.  
Figure 3- Output runoff hydrograph corresponding to the modeling of tests 1 to 4.



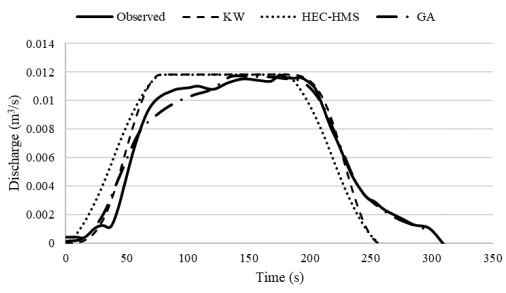
آب‌نگار متناظر با آزمایش ۵



آب‌نگار متناظر با آزمایش ۶



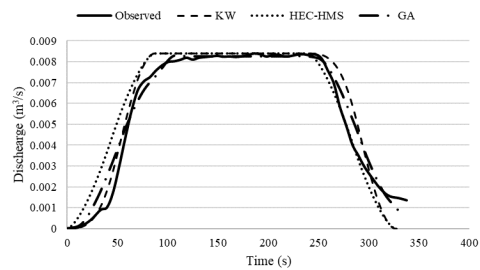
آب‌نگار متناظر با آزمایش ۷



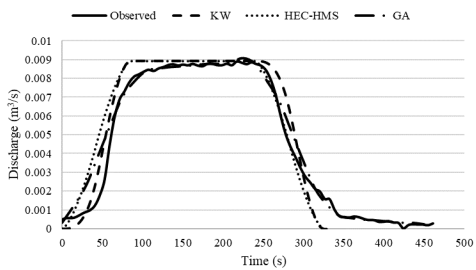
آب‌نگار متناظر با آزمایش ۸

شکل ۴- آب‌نگارهای رواناب خروجی متناظر با مدل‌سازی‌های آزمایش‌های ۵ تا ۸.

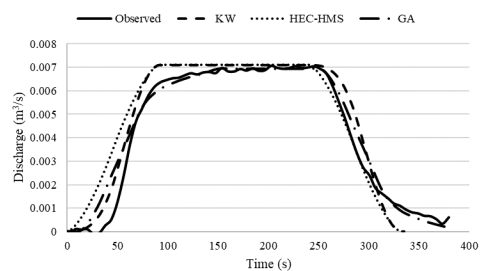
Figure 4- Output runoff hydrograph corresponding to the modeling of tests 5 to 8.



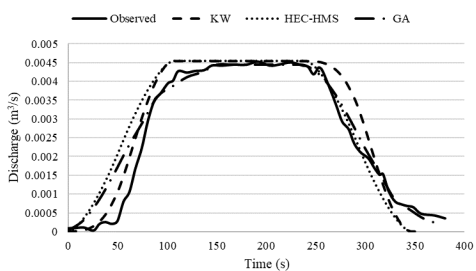
آب‌نگار متناظر با آزمایش ۹



آب‌نگار متناظر با آزمایش ۱۰



آب‌نگار متناظر با آزمایش ۱۱



آب‌نگار متناظر با آزمایش ۱۲

شکل ۵- آب‌نگارهای رواناب خروجی متناظر با مدل‌سازی‌های آزمایش‌های ۹ تا ۱۲.

Figure 5- Output runoff hydrograph corresponding to the modeling of tests 9 to 12.



افزایش یافته است. مقایسه‌ی نتایج سه مدل در تعیین اندازه‌ی حداکثر آبدهی در جدول ۲ نشان داده شده است. برای تعیین اندازه‌ی تفاوت‌ها و سنجش عملکرد مدل‌ها، از معیار خطای نسبی (RE) <sup>۱</sup> (مقایسه‌ی اندازه‌های محاسبه‌ای با اندازه‌های مشاهده‌ای) استفاده شد (لیانگ و ملچینگ ۲۰۱۲).

میان اندازه‌های مشاهده‌ای و نتایج مدل‌سازی آبنگارهای رواناب خروجی در سه دسته رخداد بارش با مدت‌های ۱۲۰، ۱۸۰ تفاوت بود (شکل‌های ۳ تا ۵). نتایج نشان داد متناسب با شدت بارش، اندازه‌ی حداکثر آبدهی در نمودار آبنگار نیز افزایش یافته است. همچنین متناسب با افزایش مدت بارش، طول ناحیه‌ی فلات آبنگار نیز

جدول ۲- مقایسه‌ی اندازه‌ی حداکثر آبدهی به‌دست آمده از روش‌های محاسبه‌ای و مشاهده‌ای.

Table 2- Comparison of the maximum discharge resulting from calculation and observational methods.

| Test No.      | * Observed | * KW  | * HEC-1 | * GA  | ** KW-RE | ** HEC-1-RE | ** GA-RE |
|---------------|------------|-------|---------|-------|----------|-------------|----------|
| 1             | 7.96       | 7.97  | 7.97    | 7.85  | 0.1      | 0.1         | 1.4      |
| 2             | 6.97       | 6.98  | 6.98    | 6.87  | 0.1      | 0.1         | 1.0      |
| 3             | 4.69       | 4.71  | 4.71    | 4.57  | 0.4      | 0.4         | 2.6      |
| 4             | 11.28      | 11.28 | 11.28   | 11.11 | 0        | 0           | 1.5      |
| 5             | 11.49      | 11.49 | 11.49   | 11.35 | 0        | 0           | 1.2      |
| 6             | 11.68      | 11.70 | 11.70   | 11.69 | 0.2      | 0.2         | 0        |
| 7             | 11.91      | 11.91 | 11.91   | 11.92 | 0        | 0           | 0        |
| 8             | 11.79      | 11.82 | 11.82   | 11.69 | 0.3      | 0.3         | 0.8      |
| 9             | 8.39       | 8.39  | 8.39    | 8.25  | 0        | 0           | 1.7      |
| 10            | 8.90       | 8.93  | 8.93    | 9.09  | 0.3      | 0.3         | 2.1      |
| 11            | 7.08       | 7.11  | 7.11    | 6.93  | 0.4      | 0.4         | 2.1      |
| 12            | 4.52       | 4.55  | 4.55    | 4.44  | 0.7      | 0.7         | 1.8      |
| Error average | -          | -     | -       | -     | 0.2      | 0.2         | 1.3      |

\* اندازه‌ها بر حسب متر مکعب بر ثانیه ( $\times 10^{-3}$ ) است.

\*\*Values are in percentage.

\*\* اندازه‌ها بر حسب درصد است.

ثانیه، عملکرد مدل دستورالعمل ژنتیک بهتر از دو روش دیگر بود.

بررسی نتایج مدل‌سازی با سه روش مزبور در تعیین زمان رسیدن به اوج آبنگار و مقایسه با اندازه‌های موجود در آبنگارهای مشاهده‌ای آبخیز، نشان داد که عملکرد مدل‌های مزبور با یکدیگر متفاوت بود. نتایج مقایسه‌ی اندازه‌ی زمان رسیدن به اوج آبنگار به‌دست آمده از روش‌های محاسبه‌ای و مشاهده‌ای در جدول ۳ نشان داده شده است.

میانگین خطای سه روش موج جنبشی، HEC-1 و دستورالعمل ژنتیک تقریباً برابر بود. در نتیجه خطای نتایج به‌دست آمده از اندازه‌های محاسبه‌ای در مقایسه با اندازه‌های مشاهده‌ای، نسبتاً کم بود که بیانگر دقت زیاد هر سه مدل، در تعیین اندازه‌ی حداکثر آبدهی در آبنگار رواناب خروجی آبخیز است (جدول ۲). همچنین با بررسی دقیق‌تر نتایج جدول ۲، اختلاف اندازه‌ی خطا در سه دسته رخداد بارش-رواناب با مدت بارش متفاوت، مشخص شد. به طوری که در مجموعه رخدادهای با طول مدت ۱۸۰

جدول ۳- مقایسه اندازه‌ی زمان رسیدن به اوج آبنگار به‌دست آمده از روش‌های محاسبه‌ای و مشاهده‌ای.

Table 3- Comparison of hydrograph peak time value obtained from calculation and observational methods.

| Test No.      | * Observed | * KW | * HEC-1 | * GA | ** KW-RE | ** HEC-1-RE | ** GA-RE |
|---------------|------------|------|---------|------|----------|-------------|----------|
| 1             | 127        | 88   | 88      | 120  | 31       | 31          | 1        |
| 2             | 129        | 92   | 92      | 120  | 29       | 29          | 1        |
| 3             | 132        | 105  | 105     | 120  | 20       | 20          | 1        |
| 4             | 122        | 79   | 79      | 120  | 35       | 35          | 2        |
| 5             | 186        | 78   | 78      | 135  | 58       | 58          | 27       |
| 6             | 180        | 78   | 78      | 135  | 57       | 57          | 25       |
| 7             | 175        | 78   | 78      | 150  | 55       | 55          | 14       |
| 8             | 175        | 78   | 78      | 135  | 55       | 55          | 23       |
| 9             | 182        | 87   | 87      | 105  | 52       | 52          | 42       |
| 10            | 181        | 85   | 85      | 225  | 53       | 53          | 2        |
| 11            | 202        | 92   | 92      | 150  | 54       | 54          | 26       |
| 12            | 225        | 110  | 110     | 150  | 51       | 51          | 33       |
| Error average | -          | -    | -       | -    | 46       | 46          | 16       |

\* اندازه‌ها بر حسب ثانیه است.

\*\*Values are in percentage.

\*\* اندازه‌ها بر حسب درصد است.

HEC-1 در تعیین زمان اوج آب‌نگار بود (جدول ۳). به منظور بررسی اندازه‌ی تطابق دو آب‌نگار محاسبه‌ای و مشاهده‌ای در سه مدل از شاخص‌های همبستگی و نش-ساتکلیف استفاده شد. نتایج این بررسی در جدول ۴ نشان داده شده است.

نتایج مدل دستورالعمل ژنتیک، با اندازه‌ی خطای نسبی ۱۶٪، در تعیین زمان رسیدن به اوج آب‌نگار، در مقایسه با مدل موج جنبشی با خطای نسبی ۴۶٪ و مدل HEC-1 با خطای نسبی ۴۶٪، نشان داد که مدل دستورالعمل ژنتیک عملکرد بهتری داشته است، که این یافته یکی از محدودیت‌های مدل‌های موج جنبشی و

#### جدول ۴- تطابق آب‌نگارهای به‌دست آمده از روش‌های محاسبه‌ای و مشاهده‌ای.

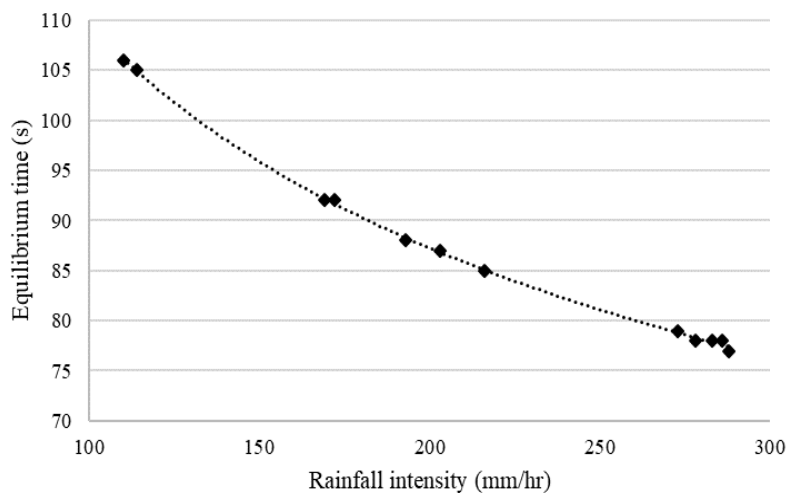
Table 4- Matching of hydrographs obtained from calculation and observational methods.

| Index<br>Test No. | R     |       |       | NSE   |       |       |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                   | KW    | HEC-1 | GA    | KW    | HEC-1 | GA    |
| 1                 | 0.906 | 0.927 | 0.953 | 0.915 | 0.900 | 0.953 |
| 2                 | 0.929 | 0.950 | 0.963 | 0.938 | 0.901 | 0.966 |
| 3                 | 0.937 | 0.968 | 0.993 | 0.913 | 0.916 | 0.938 |
| 4                 | 0.931 | 0.961 | 0.975 | 0.896 | 0.942 | 0.964 |
| 5                 | 0.944 | 0.949 | 0.997 | 0.951 | 0.875 | 0.971 |
| 6                 | 0.945 | 0.948 | 0.995 | 0.933 | 0.828 | 0.984 |
| 7                 | 0.931 | 0.933 | 0.996 | 0.918 | 0.799 | 0.987 |
| 8                 | 0.935 | 0.938 | 1.006 | 0.923 | 0.815 | 0.985 |
| 9                 | 0.947 | 0.955 | 0.984 | 0.946 | 0.915 | 0.973 |
| 10                | 0.934 | 0.941 | 0.979 | 0.920 | 0.877 | 0.976 |
| 11                | 0.931 | 0.937 | 0.984 | 0.939 | 0.880 | 0.969 |
| 12                | 0.914 | 0.922 | 0.974 | 0.914 | 0.862 | 0.945 |
| Index average     | 0.932 | 0.944 | 0.983 | 0.926 | 0.876 | 0.968 |

گرفتن خاصیت آبخیزی، دنباله‌ی آب‌نگار در بازوی پایین رونده شکل دقیق‌تری داشت که این یافته در دو روش موج جنبشی و HEC-1 کمتر مشاهده شد و این یکی از ضعف‌های مدل موج جنبشی به‌شمار می‌رود.

**تعیین رابطه‌ی میان شدت بارش و زمان تعادل آبخیز**  
براساس معادله‌های ۱ و ۲، اندازه‌ی زمان تعادل آبخیز رابطه‌ی مستقیم با اندازه‌ی شدت بارش داشت. این در حالی است که زمان تعادل آبخیز مستقل از مدت بارش بود. با توجه به نتایج مدل دستورالعمل ژنتیک در بستر GIS و تعیین زمان تعادل آبخیز براساس رخدادهای بارش، با وایازی اندازه‌های دوازده‌گانه‌ی شدت بارش و زمان تعادل متناظر با هر رخداد بارش، یک منحنی برازش به‌دست آمد (شکل ۶).

نتایج سه مدل موج جنبشی، HEC-1 و دستورالعمل ژنتیک در تعیین آب‌نگار رواناب خروجی در این آبخیز مقایسه و ارزیابی شد. در این پژوهش می‌توان گفت که از میان آب‌نگارهای محاسبه‌ای به‌دست آمده با سه روش موج جنبشی، HEC-1 و دستورالعمل ژنتیک، آب‌نگارهای محاسبه‌ای روش دستورالعمل ژنتیک انطباق بیشتری با آب‌نگار مشاهده‌ای داشتند. به طور کلی این یافته با اندازه‌ی شاخص نش-ساتکلیف ۰/۹۶۸ و شاخص همبستگی ۰/۹۸۳ تأیید شد. همچنین از میان روش موج جنبشی و HEC-1، خروجی روش موج جنبشی نزدیک‌تر به نتایج مشاهده‌ای بود. اما با بررسی دقیق‌تر می‌توان گفت که در مدل‌سازی بازوهای بالارونده آب‌نگار، عملکرد روش دستورالعمل ژنتیک از دو روش دیگر بهتر بوده است. در روش دستورالعمل ژنتیک ضمن در نظر



شکل ۶- تغییرات زمان تعادل آبخیز متناظر با تغییرات شدت بارش.

Figure 6- Changes in equilibrium time corresponding to changes in rainfall intensity.

آبخیز آزمایشگاهی وی-شکل با شرایط فیزیکی ثابت و مجموعه‌ای از رخدادها با شدت و مدت بارش متغیر بود. در این پژوهش مدل موج جنبشی اجرا شده، مدل توزیعی در بستر نرم‌افزار GIS بود که از معادله‌های موج جنبشی در دو ناحیه‌ی صفحه‌های جانبی و کانال استفاده شد. مدل HEC-1 نیز که در نسخه‌های نرم‌افزار HEC-HMS هم استفاده شد شامل دو دسته معادله بود که با فرض معلوم بودن زمان تمرکز آبخیز، نمودار زمان-مساحت به‌وسیله‌ی آن تعیین شد و با انجام انتگرال کانولوشن، آبنگار رواناب خروجی آبخیز مشخص شد. مدل سوم که شامل بهینه‌سازی براساس دستورالعمل ژنتیک بود، با استفاده از رخدادها بارش-رواناب موجود آبخیز، رفتار آبخیز در قالب نمودار زمان-مساحت به‌وسیله‌ی آن تعیین شد و با انجام انتگرال پیچیده با نمودار بارش مازاد آبخیز، نمودار آبنگار خروجی آبخیز محاسبه شد.

مدل‌سازی با سه دسته رخداد بارش-رواناب و سه دسته مدت بارش گوناگون که هر دسته رخداد با چهار اندازه‌ی مختلف شدت بارش بود، انجام شد. نمودارهای آبنگار متناظر با هر رخداد نیز به‌دست آمد. با بررسی نمودارهای محاسبه‌ای و مقایسه با نمودارهای مشاهده‌ای، مشخص شد که عملکرد سه مدل در تعیین حداکثر آبدهی، خطای نسبی یک تا دو درصد داشت، ولی در تعیین زمان رسیدن به اوج آبنگار، مدل‌های موج جنبشی و HEC-1 با خطای نسبی ۴۴٪، عملکرد متوسط داشتند. در نهایت با بهره‌گیری از دو شاخص همبستگی و نش-ساتکلیف، مشخص شد که در روش دستورالعمل ژنتیک، آبنگار محاسبه‌ای با اندازه‌های مشاهده‌ای نزدیک‌تر بود و تطابق بیشتری با داده‌های مشاهده‌ای داشت.

$$t_e = 495.2i^{-0.33} \quad (9)$$

$t_e$ : زمان تعادل آبخیز (بر حسب ثانیه)،  $i$ : شدت بارش روی آبخیز (بر حسب میلی‌متر بر ساعت) است. شایان ذکر است که اندازه‌ی ضریب تعیین ( $R^2$ ) در این منحنی ۰/۹۹۹ به‌دست آمد که تابعیت زیاد زمان تعادل از شدت بارش را تأیید کرد. این یافته بیانگر پویایی زمان تعادل آبخیز در مقایسه با تغییرات شدت بارش بود. به عبارت دیگر به‌رغم نتایج پژوهش‌های پیشین و معادله‌های قدیمی که تعیین زمان تمرکز آبخیز را فقط متأثر از خصوصیات فیزیکی آبخیز و مستقل از خصوصیات بارش می‌دانستند، نتایج این پژوهش نشان داد تغییرات شرایط بارش در شکل آبنگار رواناب خروجی آبخیز مؤثر بوده است. همچنین در پاسخ آب‌شناختی آبخیز و به‌طور ویژه در زمان تعادل آبخیز نیز تأثیرگذار بود. همچنین با توجه به معادله‌ی ۹، مشخص شد که با افزایش شدت بارش، اندازه‌ی زمان تعادل نیز کاهش می‌یابد، به‌طوری که با دو برابر شدن شدت بارش، اندازه‌ی زمان تعادل ۲۰٪ کاهش یافت. همچنین با تعیین ضریب معادله ۴۹۵/۲ برای این آبخیز، می‌توان به‌ازای هر شدت بارش، زمان تعادل متناظر با آن را با دقت زیاد تعیین کرد.

### بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت پاسخ آب‌شناختی آبخیز در مقابل رخداد بارش، در این پژوهش پاسخ آبخیز در مقابل بارندگی، نحوه‌ی تولید رواناب خروجی آبخیز با سه مدل بارش-رواناب بررسی شد. این مدل‌ها براساس معادله‌های موج جنبشی، روش HEC-1 و روش بهینه‌سازی براساس دستورالعمل ژنتیک ارزیابی شد. آبخیز بررسی شده، یک

نتایج پیشین پژوهشگران (ناگی و همکاران ۲۰۱۶)، زمان تمرکز در یک آبخیز اندازه‌ی ثابت و فقط متأثر از ویژگی‌های فیزیکی آبخیز نیست و مؤلفه‌ی شدت بارش، روی آن موثر می‌باشد. یعنی اندازه‌ی زمان تعادل آبخیز با تغییرات شدت بارش، متغیر خواهد بود. همچنین بر خلاف مدل‌های پیشین که نیازمند داده‌های پرشمار از آبخیز هستند (هر و هیتوول ۲۰۱۶)، مدل‌های بررسی شده در این پژوهش، با توجه به ماهیت آن‌ها با حداقل داده‌های موجود از آبخیز، عملکرد مناسبی در تعیین پاسخ آب‌شناختی آبخیز داشتند.

در بخش پایانی پژوهش، براساس زمان تعادل آبخیز در هر یک از حالت‌های رخداد بارش-رواناب، با ایجاد برآزش میان نقاط نمودار، یک معادله نمایی میان شدت بارش و زمان تعادل آبخیز به دست آمد. در این آبخیز آزمایشگاهی با محاسبه‌ی ضریب تعیین مشخص شد که زمان تعادل به مؤلفه‌ی شدت بارش در شرایط نفوذناپذیری وابستگی زیادی دارد. پیشنهاد می‌شود در صورت اعمال شرایط نفوذ عمقی و یا تغییر در اندازه‌ی زبری سطح، معادله و اندازه‌ی وابستگی آن به مولفه‌های مزبور بررسی شود. در این پژوهش مشخص شد که به‌رغم

## فهرست منابع

- Alizadeh, A. 2010. Principles of applied hydrology. 30. 5. University of Emam Reza. Mashhad. Iran. 991 p. (In Persian).
- Barkhordari J, Vartanian T. 2014. Evaluation of a Distributed Monthly Water Balance Model to Determine Catchment Runoff in Arid Region Using RS and GIS (A Case Study in Yazd-Ardakan Basin). *Watershed Management Research* 27(2):154–64. <https://doi.org/10.22092/wmej.2014.106267>. (In Persian).
- Bayati F, Mirabbasi R, Fatahi Nafchi R, Radfar M. 2021. Performance Assessment of Copula Functions in Estimation of Rainfall Losses and Rainfall-Runoff Modelling (Case Study: Kasilian Watershed). *Watershed Engineering and Management* 13(1): 125-136. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2020.120498.1441>. (In Persian).
- Chabokpour J. 2022. Operation of the Non-Linear Muskingum Model in the Prediction of the Pollution Breakthrough Curves through the River Reaches. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*. 54(1):21-34. <https://doi.org/10.22060/ceej.2021.17413.6556>. (In Persian).
- Chow VT, Maidment DR, Mays LW. 1988. *Applied Hydrology*. 5. McGraw Hill. 588 p.
- Dong Si-Hui. 2008. Genetic Algorithm Based Parameter Estimation of Nash Model. *Water Resources Management* 22(4):525–33. <https://doi.org/10.1007/s11269-007-9208-6>.
- Drisya J, Sathish Kumar D. 2017. Automated Calibration of a Two-Dimensional Overland Flow Model by Estimating Manning's Roughness Coefficient Using Genetic Algorithm. *Journal of Hydroinformatics*. 20(2):440–56. <https://doi.org/10.2166/hydro.2017.11>.
- Farzin S, Noori H, Karami H. 2018. Developing the Performance of Modern Methods Using Multi-Objective Optimization in Urban Runoff Control. *Iran Water Resources Research*. 14(3):45-58. (In Persian).
- Her Y, Heatwole C. 2016. HYSTAR Sediment Model: Distributed Two-Dimensional Simulation of Watershed Erosion and Sediment Transport Using Time-Area Routing. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 52(2): 376–96. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12396>.
- Hydrologic Engineering Center. 1991. HEC-1 Flood Hydrograph Package. Davis, CA.
- Kang K, Merwade V. 2011. Development and Application of a Storage-Release Based Distributed Hydrologic Model Using GIS. *Journal of Hydrology*. 403(1–2):1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.03.048>.
- Liang J. 2010. Evaluation of runoff response to moving rainstorms. Marquette University. Milwaukee, Wisconsin. (Dissertation).
- Liang J, Melching CS. 2012. Comparison of Computed and Experimentally Assessed Times of Concentration for a V-Shaped Laboratory Watershed. *Journal of Hydrologic Engineering*. 17(12):1389–96. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000609](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000609).
- Liang J, Melching CS. 2015. Experimental Evaluation of the Effect of Storm Movement on Peak Discharge. *International Journal of Sediment Research*. pp. 166–77. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2015.03.004>.
- Madden Francis N, Godfrey Keith R, Chappell MJ, Hovorka R, Bates RA. 1996. A Comparison of Six Deconvolution Techniques. *Journal of Pharmacokinetics and Biopharmaceutics*. 24(3):283–99. <https://doi.org/10.1007/BF02353672>.
- Masoumi F, Bashi-Azghadi SN, Afshar A. 2021. Application of Achieve-Based Genetic Algorithm for Consequence Management of Contaminant Entering in Water Distribution Networks. *Amirkabir Journal of Civil Engineering* 53(8): 3593-3604. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2015.03.004>.

- org/10.22060/ceej.2020.18055.6750. (In Persian).
- Melesse AM, Graham WD, Jordan JD. 2003. Spatially Distributed Watershed Mapping and Modeling: GIS-Based Storm Runoff Response and Hydrograph Analysis: Part 2. *Journal of Spatial Hydrology*. 3(2):1–28.
- Mohammadi Hashemi M, Saghafian B, Zakari Niri, Najarchi M. 2021. Applicability of Rainfall–Runoff Models in Two Simplified Watersheds. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, September. <https://doi.org/10.1007/s40996-021-00733-5>.
- Nagy ED, Torma P, Bene K. 2016. Comparing Methods for Computing the Time of Concentration in a Medium-Sized Hungarian Catchment. *Slovak Journal of Civil Engineering*. 24(4):8–14.
- Nash JE, Sutcliffe JV. 1970. River Flow Forecasting through Conceptual Models Part I — A Discussion of Principles. *Journal of Hydrology*. 10(3):282–290. doi: 10.1016/0022-1694(70)90255-6.
- Nouri H, Ildoromi A, Sepehri M, Artimani M. 2019. Comparing Three Main Methods of Artificial Intelligence in Flood Estimation in Yalphan Catchment. *Geography and Environmental Planning* 29(4):35–50. <https://www.magiran.com/paper/1976405> LK - <https://www.magiran.com/paper/1976405>. (In Persian).
- Saba HR, Kamalian M, Raeisizadeh I. 2018. Determining Impending Slip of Slope and Optimized Embankment Operation Volume of Earth Dams Using a Combination of Neural Networks and Genetic Algorithms (GA). *Amirkabir Journal of Civil Engineering*. 50(4):747–54. <https://doi.org/10.22060/ceej.2017.11051.4965>. (In Persian).
- Sabzevari T, Ardakanian R, Shamsaee A, Talebi A. 2009. Estimation of Flood Hydrograph in No Statistical Watersheds Using HEC-HMS Model and GIS (Case Study: Kasilian Watershed). *Journal of Water Engineering* 4: 1–11
- Sabzevari T, Noroozpour S, Pishvaei MH. 2015. Effects of Geometry on Runoff Time Characteristics and Time–Area Histogram of Hillslopes. *Journal of Hydrology* 531(December). pp. 638–48. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.10.063>.
- Sadeghi SHR, Mostafazadeh R, Sadoddin A. 2015. Changeability of Simulated Hydrograph from a Steep Watershed Resulted from Applying Clark's IUH and Different Time–Area Histograms. *Environmental Earth Sciences*. 74: 3629–3643. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4426-3>.
- Sadeghi S, Samani J, Samani H. 2021. Optimal Design of Storm Sewer Network Based on Risk Analysis by Combining Genetic Algorithm and SWMM Model. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*. 54(5): 1903–1924. <https://doi.org/10.22060/ceej.2021.19990.7308>. (In Persian).
- Saghafian B, Lieshout AM, M Rajaei H. 2000. Distributed Catchment Simulation Using a Raster GIS. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2(3–4):199–203. [https://doi.org/10.1016/S0303-2434\(00\)85014-X](https://doi.org/10.1016/S0303-2434(00)85014-X).
- Saghafian B, Alireza Sh. 2006. A Corrected Time–Area Technique for One-Dimensional Flow. *International Journal of Civil Engineering*. 4(1):34–41.
- Saghafian B, Julien PY. 1995. Time to Equilibrium for Spatially Variable Watersheds. *Journal of Hydrology*. 172(1–4): 231–245. doi:10.1016/0022-1694(95)02692-I.
- US Army Corps of Engineers. 2000. Hydrologic Modeling System HEC-HMS Technical Reference Manual.
- Wong TSW. 2001. Formulas for Time of Travel in Channel with Upstream Inflow. *Journal of Hydrologic Engineering*. 6(5):416–22.

- [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2001\)6:5\(416\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2001)6:5(416))
- Woolhiser DA, Liggett JA. 1967. Unsteady, One-Dimensional Flow over a Plane-The Rising Hydrograph. *Water Resources Research*. 3(3):753–71. <https://doi.org/10.1029/WR003i003p00753>.
- Xiong Y, Melching CHS. 2005. Comparison of Kinematic-Wave and Nonlinear Reservoir Routing of Urban Watershed Runoff. *Journal of Hydrologic Engineering*. 10(1):39–49. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2005\)10:1\(39\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2005)10:1(39))
- Zakeri Niri M, Saghafian B, Golian S, Moramarco T, Shamsai A. 2012. Derivation of Travel Time Based on Diffusive Wave Approximation for the Time-Area Hydrograph Simulation. *Journal of Hydrologic Engineering*. 17(1):85–91. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000399](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000399)
- Zeraatkar Z. 2016. Simulation of Birjand Urban Flood Using HEC-RAS and ARC-GIS. *Watershed Management Research Journal*. 29(3):41–56. <https://doi.org/10.22092/wmej.2016.112239>. (In Persian).



## Evaluation of Hydrological Response Extraction Models in Laboratory Watershed

Mohammad Mohammadi Hashemi<sup>1</sup>, Bahram Saghafian<sup>\*2</sup>, Mahmoud Zakeri Niri<sup>3</sup>, Mohsen Najarchi<sup>4</sup>

1 and 4- Department of Civil Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran

2- Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

3- Department of Civil Engineering, Islamshahr Branch, Islamic Azad University, Islamshahr, Iran

### Extended Abstract

#### Introduction and Objective

Given the application of hydrological response in a watershed, various methods have been used to determine this response and the results have shown a high degree of accuracy and accuracy variability depending on the data used. By reviewing and summarizing the results of research carried out in the modeling of rainfall-runoff, particularly the time-area method, it was found that in most of these studies, the concept of watershed time concentration was used, which in most of the formulas used, the physical properties of the watershed were used and the dependence of time concentration on rainfall conditions was not studied. Therefore, this study was conducted to evaluate these methods using the kinematic wave method in the GIS environment, the HEC-1 method, and optimization methods using genetic algorithms in a V-shaped experimental watershed.

#### Materials and Methods

Observational data available in the V-shaped experimental watershed of the University of Illinois was used for rainfall-runoff modeling. The studied watershed had an impermeable aluminum surface and two uniform side sheets with a one-sided slope towards the channel with a constant value of 1%. In addition, a central channel with a one-sided slope towards the outlet of the watershed with a constant value of 1% was present. The roughness coefficient in this watershed was determined based on trial and error at 0.014.

#### Article Type: Research Article

\*Corresponding Author E-mail: b.saghafian@gmail.com

**Citation:** Mohammadi Hashemi, M., Saghafian, B., Zakeri Niri, M., Najarchi, M. 2023. Evaluation of hydrological response extraction models in laboratory watershed. *Watershed Management Research*. 36(3): 111-127.

DOI: 10.22092/WMRJ.2023.360149.1490

**Received:** 28 September 2022, **Received in revised form:** 06 November 2022, **Accepted:** 21 December 2022,

**Published online:** 23 September 2023

*Watershed Management Research*, VOL. 36, No.3, Ser. No: 140, Autumn 2023, pp. 111-127.

**Publisher:** Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center ©Author(s)





### Results and Discussion

After preparing the time-area histogram of the watershed using each of the mentioned methods, the corresponding outflow hydrographs of the watershed were determined. Then, the results were compared with observational data, and various components of the computational hydrographs were also examined. The results showed that the performance of the genetic algorithm in determining the peak time of the hydrograph with a 15% relative error was better than the performance of the kinematic wave and HEC-1 models. Additionally, the genetic algorithm model had the highest correlation coefficient with observational hydrographs with an average Nash-Sutcliffe Index of 0.968 and an average correlation coefficient of 0.983. Furthermore, by fitting the curve to the modeling results, an equation was obtained to determine the equilibrium time of the watershed relative to rainfall intensity, with a determination coefficient of 0.999. This equation expresses the inverse relationship between equilibrium time and rainfall intensity (with a power of 0.33), i.e., doubling the rainfall intensity reduces the equilibrium time by 20%. Finally, the coefficient of the equation determining the equilibrium time for this watershed was found to be 495.2, and for each rainfall intensity, its corresponding equilibrium time can be calculated with high accuracy.

### Conclusion and Suggestions

In this study, under experimental watershed conditions, rainfall-runoff modeling was performed with three categories of events and three categories of different rainfall durations, each event category having four different rainfall intensity sizes. Corresponding hydrographs were obtained for each event by examining the computational hydrographs and comparing them with observational hydrographs, and it was found that the three models had one to two percent relative error in determining the maximum runoff, but in determining the time to reach the hydrograph peak, the kinematic wave and HEC-1 models had an average error of 44%. Finally, using the correlation and Nash-Sutcliffe coefficients, it was determined that the computational hydrographs produced by the genetic algorithm method were closer to the observational hydrographs and had a higher degree of correlation. It is worth mentioning that in this experimental watershed, the dependence of equilibrium time on rainfall intensity in impermeable conditions was confirmed. It is recommended that the effect of infiltration or changes in surface roughness and the determination of the dependence size be investigated.

**Keywords:** Genetic algorithm, HEC-1 model, hydrological response, kinematic wave, optimization, V-shaped watershed