مجله پژوهش آب ایران
جلد ۱۵/ شماره ۳/ پیاپی ۴۲/ پاییز ۱۴۰۰ (۵۱-۵۹)

مقاله پژوهشی

تحلیل حساسیت روش حذف انفرادی در استخراج سیل‌خیزی زیرحوضه‌ها به ارتفاع و الگوی زمانی بارش (مطالعهٔ موردی: حوضه زاهدان)

سید میثم میرکاظمی[۱]، نوید جلال کمالی[۲*] و محسن ایراندوست[۳]

چکیده

یکی از موارد بسیار ضروری در برنامه‌ریزی‌های مربوط به مهار خسارات سیلاب، شناسایی مناطق سیل‌خیز و تعیین پتانسیل سیل‌خیزی یک حوضه است. به‌این‌ترتیب مشخص می‌شود که در یک حوضه، کدام یک از زیرحوضه‌ها در اولویت اجرای سناریوهای کاهش خطرات سیلاب هستند. اولویت‌بندی سیل‌خیزی عبارت است از تفکیک و طبقه‌بندی زیرحوضه‌های یک حوضه با توجه به مشارکت آن‌ها در تولید دبی اوج سیلاب؛ به‌عبارت‌دیگر، زیرحوضه‌ای که بیش‌ترین مشارکت را در تولید دبی اوج سیلاب حوضه دارد، در اولویت اول سیل‌خیزی قرار خواهد گرفت. در این مطالعه حساسیت روش حذف انفرادی با استفاده از مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS بر تداوم بارش، دورهٔ بازگشت و الگوی زمانی آن به‌صورت موردی در حوضه لار زاهدان مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که نتایج روش مذکور به تداوم بارش، الگوی زمانی و دورهٔ بازگشت آن با درجات مختلفی دارای حساسیت است. با توجه به اینکه زمان تمرکز حوضه حدود ۱۲ساعت تخمین زده شد، بارندگی با تداوم ۶، ۱۲، ۱۸ و ۲۴ ساعت با الگوهای مختلف توزیع زمانی و در دوره‌های بازگشت ۵، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ سال مورد آزمون قرار گرفتند. به‌طورکلی می‌توان گفت در تداوم بارش کوچک، تغییر در دورهٔ بازگشت و همچنین تغییر در الگوی زمانی آن، تأثیر کمی بر روی الگوی رتبه‌بندی زیرحوضه دارد؛ اما با افزایش تداوم بارش به‌خصوص در تداومی حدود دو برابر زمان تمرکز با تغییر الگوی زمانی بارش و همچنین دورهٔ بازگشت، تغییر در الگوی رتبه‌بندی زیرحوضه‌ها مشهود بود.

واژه‌های کلیدی: الگوی زمانی بارش، پتانسیل سیل‌خیزی، حذف انفرادی، دورهٔ بازگشت، HEC-HMS.

ارجاع: میرکاظمی س. م. جلال کمالی ن. و ایراندوست م. ۱۴۰۰. تحلیل حساسیت روش حذف انفرادی در استخراج سیل‌خیزی زیرحوضه‌ها به ارتفاع و الگوی زمانی بارش (مطالعهٔ موردی: حوضه زاهدان). مجله پژوهش آب ایران. ۴۲: ۵۱-۵۹.

۱- دانشجوی دکترای مهندسی منابع آب، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان.
۲- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان.
۳- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان.
*** نویسنده مسئول**: **njalalkamali@gmail.com**
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۲۸

مقدمه

یکی از فن‌های کارا در برنامه‌ریزی‌های مربوط به مدیریت سیلاب، شناسایی مناطق سیل‌خیز و محاسبهٔ پتانسیل سیل‌خیزی حوضه‌ها است. با این‌حال، به‌دلیل پیچیدگی‌های محیطی، این شناسایی دارای چالش‌های بسیاری است. اولویت‌بندی سیل‌خیزی یک حوضه عبارت است از طبقه‌بندی زیرحوضه‌های یک حوضه برحسب نقش هر یک از آن‌ها در تولید دبی اوج سیلاب تولیدشده در خروجی حوضه. طیف وسیعی از روش‌ها، برای تخمین جریان از حوضه مانند استفاده از داده‌های مشاهداتی، فن‌های تجربی و آماری برای تخمین میزان تخلیهٔ رودخانه وجود دارد که بیشتر به‌عنوان مدل‌های رواناب بارش شناخته می‌شوند (تنگ و همکاران، ۲۰۱۷). بسیاری از مدل‌های بارش-رواناب، صرفاً برای اهداف تحقیقاتی به‌منظور درک فرایندهای هیدرولوژیکی حاکم‌بر یک سیستم در دنیای واقعی استفاده می‌شوند؛ درمقابل برخی دیگر از آن‌ها به‌عنوان ابزاری برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی استفاده می‌شوند که به‌نوبهٔ خود به تصمیم‌گیرندگان امکان برنامه‌ریزی مناسب را در زمینهٔ مدیریت ریسک سیل می‌دهند (مرادخانی و سروشیان، ۲۰۰۹). در سال‌های اخیر، پیشرفت سیستماتیک در توانایی مدل‌سازی و پهنه‌بندی سیل مشاهده می‌شود. نتایج حاصل از مدل‌های هیدرولیکی می‌تواند در پهنه‌بندی خطر سیل، ارزیابی خسارات سیل، پیش‌بینی سیل در زمان واقعی، برنامه‌ریزی منابع آب، بررسی فرسایش و حمل‌ونقل رسوب، اکولوژی و هیدرولوژی سیستم رودخانه، مورد استفاده قرار گیرد (تنگ و همکاران، ۲۰۱۷). بااین‌حال، مدل‌سازی دقیق سیل با وضوح زمانی و مکانی بالا، هنوز هم یک چالش اساسی در مطالعات هیدرولوژیکی و هیدرولیکی است. این امر عمدتاً به‌دلیل ماهیت پیچیده و آشفتگی طغیان و عدم‌اطمینان در ارتباط با مفهوم‌سازی فرایندها و پارامترهای مدل‌سازی است. یکی از مدل‌های استفاده شده در شبیه‌سازی فرایند بارش رواناب حوضه، مدل بارش رواناب HEC-HMS است. چنانچه این مدل به‌خوبی واسنجی و صحت‌سنجی شده باشد، قابلیت آن را دارد که در مطالعات اولویت‌بندی سیلاب حوضه، مورد استفاده قرار گیرد.

ویجایاراتن و کولیبالی (۲۰۲۰) در تحقیقی با عنوان شناسایی مدل‌های هیدرولوژیکی برای پیش‌بینی سیلاب در سنت جان نیوفاندلند کانادا با استفاده از ۵ مدل هیدرولوژیکی (سه مدل مفهومی SAC-SMA، GR4J و MAC-HBV، مدل نیمه‌توزیعی HEC-HMS و مدل کاملاً فیزیکی WATFLOOD) به این نتیجه رسیده‌اند که مدل HEC-HMS جواب‌های خوب و قابل‌اعتمادی برای دبی اوج سیلاب ارائه می‌کند. دهقانیان و همکاران (۲۰۱۹) در تحقیقی بر روی دو حوضهٔ تنگرا در ایران و والنوت گولچ در آریزونا، از مدل اصلاح‌شدهٔ کلارک همراه با روش روندیابی جریان ماسکینگام برای شبیه‌سازی هیدرولوژیکی و روش‌های خوشه‌بندی SOMFCM شامل نقشه‌های ویژگی خودسازمانده و الگوریتم فازی برای شناسایی مناطق همگن هیدرولوژیک (HHRs) استفاده کردند و دریافتند که هیچ ارتباط معنی‌داری بین شاخص سیلاب(FI) و ویژگی‌های ورودی فردی در مقیاس سلول وجود ندارد. همچنین مشخص شد که روش خوشه‌بندی SOMFCM می‌تواند به‌طور مستقیم مقدار شاخص سیلاب (FI) را در نقشهٔ کمّی FSA تعیین کند. سلیمانی ساردو و همکاران (۱۳۹۲) با استفاده از مدل بارش- رواناب HEC-HMS به بررسی مناسب‌ترین شاخص سیل‌خیزی در حوضهٔ سد جیرفت پرداختند و نشان دادند که مقادیر استخراج‌شده با استفاده از شاخص f (تغییرات دبی در واحد سطح حوضه) با مقادیر شمارهٔ منحنی، همبستگی بالایی (R=۰/۸۱۳) دارند؛ درنتیجه این شاخص به‌عنوان مناسب‌ترین شاخص سیل‌خیزی منطقه انتخاب شد. نتایج بیانگر این بود که شاخص F (تغییرات دبی در واحد دبی اوج حوضه) به‌علت دخالت‌دادن پارامتر مساحت در برآورد پتانسیل سیل‌خیزی نتایج غیرواقعی را ارائه می‌دهد.

بنی حبیب و همکاران (۱۳۹۰) در تحقیقی، ارزیابي روش‌های تعیین اولویت زمانی احداث سدهای تأخیري در حوضه تجریش را مورد بررسی قرار داده‌اند. در این تحقیق برای بررسی اثر اولویت‌بندی زمانی سازه‌های مهار سیلاب، شاخص‌های اولویت‌بندی زمانی آن‌ها ارزیابی شده است. به این منظور سیلاب این حوضه با استفاده از نرم‌افزار HMS-HEC ، شبیه‌سازی شده و براساس داده‌های بارش و سیلاب ثبت‌شده، واسنجی آن انجام شده است. شاخص‌های مساحت، دبی اوج، دبی ویژه، درصد کاهش دبی اوج سیلاب حوضه در اثر حذف رواناب یک زیرحوضه، کاهش دبی اوج ویژه سیلاب در اثر حذف رواناب یک زیرحوضه، درصد کاهش دبی اوج ویژهٔ سیلاب در اثر عملکرد سد تأخیري در یک زیرحوضه، کاهش دبی اوج

ویژهٔ سیلاب در اثر عملکرد سدهای تأخیري در یک زیرحوضه، هزینهٔ یک واحد کاهش دبی اوج سیلاب و هزینهٔ کل اجرا، برای تعیین اولویت‌بندي زمانی احداث سدهای تأخیري استفاده شد. محمدی مطلق و همکاران (۱۳۹۲) در تحقیقی دیگر با عنوان بررسی نقش مشارکت زیر حوضه‌ها در شدت سیل‌خیزی (مطالعهٔ موردی: حوضه دالکی) را انجام داده‌اند که در این تحقیق میزان مشارکت زیرحوضه‌های بالادست ایستگاه آب‌سنجی چم‌چیت واقع در حوضه دالکی براساس دورهٔ برگشت‌های ۲، ۵۰ و ۱۰۰ ساله با استفاده از روش تکرار حذف انفرادی زیرحوضه‌ها و در محیط مدل HEC-HMS تعیین شد.

هدف از تحقیق حاضر، مدل‌سازی و بررسی تأثیر عوامل مختلف در ایجاد سیلاب و ارائهٔ نقشهٔ پتانسیل سیل‌خیزی حوضه با استفاده از روش حذف انفرادی و همچنین تأثیر عوامل مختلف ازقبیل تغییرات مکانی و زمانی بارش و اثر آن در تغییر پتانسیل سیل‌خیزی در حوضه است. با توجه به تغییرپذیری شدید الگوی زمانی بارش، تمرکز این تحقیق بر حساسیت روش مذکور به تغییرات الگوی زمانی بارش و همچنین دورهٔ بازگشت بارش به‌عنوان شاخصی از ارتفاع آن است.

مواد و روش‌ها

خصوصیات منطقهٔ مورد مطالعه

منطقهٔ مورد مطالعه در استان سیستان و بلوچستان در شرق ایران و در زیرحوضهٔ هامون با مختصات ۰۸ ۲۹ تا ۴۴ ۲۹ عرض شمالی و ۳۶ ۶۰ تا ۰۰ ۶۱ طول شرقی قرار گرفته است (شکل ۱). مساحت این حوضه، ۱۶۸۱ کیلومترمربع و دارای ارتفاعی بین ۱۱۳۹ تا ۲۵۵۷ متر از سطح دریاست. میانگین بارندگی در منطقهٔ مورد مطالعه ۶۹ میلی‌متر است. از منظر کاربری اراضی، بخش عمده‌ای از حوضهٔ تحت‌پوشش مراتع (۷۰ درصد) است و ۳/۸ درصدِ آن شامل مناطق مسکونی و مابقی زیر کشت محصولات کشاورزی است (براساس نقشه‌های کاربری اراضی به‌روزشده با استفاده از سنجندهٔ لندست ۸ توسط نگارنده). رودخانهٔ لار که رودی فصلی است، وظیفهٔ زهکشی این حوضه را برعهده دارد. این رودخانه از دامنه‌کوه‌های لار و پدگی از جنوب‌شرقی تا شمال‌شرقی شهر زاهدان سرچشمه می‌گیرد و از روستای همت‌آباد گذشته و وارد تنگهٔ لار شده و سپس در ادامه از مرز کشور خارج شده و وارد پاکستان می‌شود. سیلاب‌های این حوضه عامل آب‌گرفتگی شهر زاهدان در پایین‌دست حوضه است.

روش تحقیق

در سال‌های اخیر برای وضعیت سیل‌خیزی حوضه‌های آبخیز، از تقسیم حوضه به تعدادی زیرحوضه و روندیابی سیل در هر زیرحوضه و سپس در شبکهٔ آبراههٔ اصلی، استفاده شده است. با این روش، زیرحوضه‌های سیل‌خیز و بحرانی با توجه به سهمی که در تولید سیل خروجی کل حوضه دارند، شناسایی می‌شوند. این نوع از مطالعات عمدتاً بر پایهٔ روش تکرار حذف انفرادی زیرحوضه (SSSE) که برای اولین بار توسط خسروشاهی و ثقفیان در سال ۱۳۸۱ معرفی شده است، صورت می‌گیرد (خسروشاهی و ثقفیان، ۱۳۸۱). در این روش به‌منظور نشان‌دادن اهمیت هر یک از زیرحوضه‌های منطقه، در هر بار اجرای مدل، زیرحوضهٔ مدنظر حذف می‌شود و تأثیر آن در میزان دبی خروجی ایجادشده توسط سایر زیرحوضه‌ها محاسبه می‌شود. شاخص سیل‌خیزی زیرحوضه‌ها براساس رابطهٔ ۱ محاسبه می‌شود (خسروشاهی و ثقفیان، ۱۳۸۱).

$$F = \frac{\Delta Q}{Q_p} \qquad (۱)$$

که در آن، F: سهم مشارکت زیر حوضه‌ها در دبی خروجی، ΔQ: مقدار کاهش دبی اوج خروجی در اثر حذف زیرحوضه موردنظر برحسب متر مکعب بر ثانیه و Q_p: دبی اوج خروجی کل حوضه برحسب متر مکعب بر ثانیه است.

در روش حذف انفرادی زیرحوضه‌ها، ابتدا دبی خروجی کل حوضه محاسبه و سپس در هر مرحله، هر یک از زیرحوضه‌ها از روند شبیه‌سازی حذف شده و مجدداً نسبت‌به محاسبهٔ دبی اوج اقدام می‌شود؛ سپس شاخص سیل‌خیزی زیرحوضهٔ (F) براساس رابطهٔ ۱ محاسبه شده و اولویت زیرحوضهٔ مذکور در تولید دبی اوج کل، رتبه‌بندی می‌شود. لازم‌به‌ذکر است در مطالعات قبلی صورت‌گرفته، حساسیت روش حذف انفرادی در استخراج سیل‌خیزی زیرحوضه‌ها به ارتفاع و الگوی زمانی بارش، مورد بررسی قرار نگرفته است و در این تحقیق سعی شده است به حساسیت این روش به عوامل ذکرشده پرداخته شود. در این تحقیق، دورهٔ بازگشت‌های مختلف، معیاری برای ارتفاع بارش درنظر گرفته شد و الگوهای زمانی استاندارد SCS و الگوی غالب بارش منطقه‌ای به‌عنوان معیار تغییر الگوی زمانی لحاظ شد.

شکل ۱- موقعیت حوضهٔ مورد مطالعه

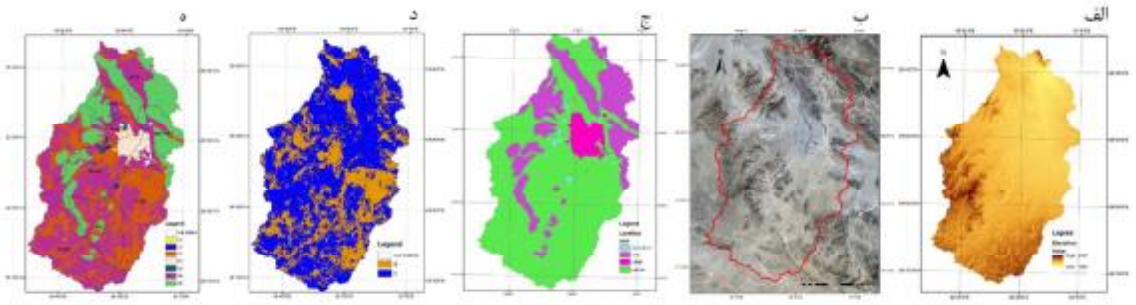
داده‌های مورد استفاده

داده‌های هواشناسی و هیدرومتری

داده‌های هواشناسی مورد استفاده در این تحقیق شامل مقدار بارش و رواناب ساعتی است که از آمار ایستگاه‌های هم‌دیدی (سینوپتیک)، اقلیم‌شناسی (کلیماتولوژی) و باران‌سنجی سازمان هواشناسی و تبخیرسنجی، باران‌سنجی، هیدرومتری وزارت نیرو در یک دورهٔ زمانی ۲۲ ساله (از سال ۱۹۹۷ لغایت ۲۰۲۰ میلادی) جمع‌آوری شد . در شکل ۱ موقعیت ایستگاه‌های منتخب محدودهٔ طرح نشان داده شده است. در منطقهٔ مورد مطالعه، ۲ ایستگاه هیدرومتری مربوط به شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان سیستان و بلوچستان وجود دارد که البته تنها ایستگاه هیدرومتری فعال موجود در حوضه‌های برون‌شهری زاهدان، ایستگاه لار است که اطلاعات موجود در آن براساس اندازه‌گیری عمق و دبی مربوط به بازهٔ زمانی سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۰ است. دبی حداکثر سالانهٔ مشاهداتی در ایستگاه هیدرومتری لار طی سال‌های ۱۹۹۵ لغایت ۲۰۲۰ در بازهٔ ۰ تا ۱۴۷/۳مترمکعب بر ثانیه متغیر است.

داده‌های ماهواره‌ای

مدل ارتفاع رقومی، ویژگی توپوگرافی منطقهٔ مورد مطالعه را نشان می‌دهد. برای منطقهٔ مورد مطالعه از مدل ارتفاع رقومی با وضوح مکانی ۱۲/۵ متر که توسط سنجندهٔ آلوس پالسار تهیه‌شده، استفاده شد. در شکل ۲-الف، مدل ارتفاعی رقومی منطقهٔ مورد مطالعه نشان داده شده است. همچنین با توجه به اینکه نقشه‌های موجود کاربری اراضی در منطقهٔ مورد مطالعه قدیمی بوده و قابلیت استناد ندارند، به‌منظور به‌روزرسانی نقشه‌های کاربری اراضی موجود، از اطلاعات سنجندهٔ لندست ۸ استفاده شد. کاربری اراضی در حوضهٔ مورد مطالعه به چهار گروه با عنوان اراضی کشاورزی، اراضی صخره‌ای، مناطق شهری و مراتع طبقه‌بندی‌شده است. بیشترین درصد کاربری در منطقه، مربوط به مراتع و کمترین درصد کاربری را کشاورزی به خود اختصاص داده است. در شکل ۲-ب، تصویر ماهواره‌ای منطقهٔ مورد مطالعهٔ به‌دست‌آمده از ماهواره لندست ۸ (سال ۲۰۲۰)، ۲-ج نقشهٔ کاربری اراضی، ۲-د نقشهٔ گروه‌های هیدرولوژیکی خاک و در شکل ۲-ه نقشهٔ شمارهٔ منحنی منطقهٔ مورد مطالعه نشان داده شده است. براساس نقشهٔ تهیه‌شده، متوسط شمارهٔ منحنی در منطقهٔ مورد مطالعه، ۸۰ و کمترین و بیشترین شمارهٔ منحنی به‌ترتیب ۴۷ و ۹۸ است.



شکل ۲- الف) مدل رقومی ارتفاع، ب) ماهواره‌ای سنجندهٔ لندست۸، ج) کاربری اراضی، د) گروه‌های هیدرولوژیکی خاک و ه) نقشهٔ شمارهٔ منحنی حوضه (تهیه‌شده توسط نگارنده، ۲۰۲۰)

واسنجی و صحت‌سنجی مدل

در این مطالعه از داده‌های بارش-رواناب ۶ آوریل ۲۰۱۳ و ۲۲ فوریه ۲۰۱۵ برای واسنجی و از داده‌های بارش-رواناب ۱۳ مارس ۲۰۱۴، ۲۵ دسامبر ۲۰۱۵، ۱ مارس ۲۰۱۹، ۱۱ دسامبر ۲۰۱۹ و ۵ ژانویه ۲۰۲۰ برای صحت‌سنجی مدل استفاده شد. ارزیابی صحت مدل، براساس چهار شاخص آماری شامل درصد خطا، Error%، جذر میانگین مربع خطا، RMSE و شاخص ناش ساتکلیف (NSE) (ناش و ساتکلیف، ۱۹۷۰) انجام شد. مقادیر ضریب NSE بیشتر از ۰/۷۵ نشان‌دهندهٔ شبیه‌سازی خوب و مدل مناسب و مقادیر کمتر از ۰/۵ نشان‌دهندهٔ شبیه‌سازی نامناسب است (شاهویی و همکاران، ۱۳۹۸).

بارش حداکثر ۲۴ ساعته

به‌منظور ارزیابی کارایی شاخص سیل‌خیزی حوضه تحت‌تأثیر تغییرات ارتفاع بارش از شاخص دورهٔ بازگشت بارندگی‌های ۲۴ ساعته استفاده شد. بارش‌های حداکثر ۲۴ ساعته نقش مهمی در بروز سیلاب‌های یک حوضه ایفا می‌کنند. به‌منظور بررسی بارش‌های حداکثر ۲۴ ساعتهٔ محدودهٔ مطالعاتی، از آمار ۱ ایستگاه سینوپتیک و ۹ ایستگاه باران‌سنجی موجود در منطقه با استفاده از روش چندضلعی‌های تیسن بهره گرفته شد و بارش با دوره‌های بازگشت ۵، ۲۵، ۵۰ و۱۰۰ سال تولید شد. با تجزیه‌وتحلیل‌های آماری، توزیع احتمال گامبل به‌عنوان بهترین توزیع استخراج شد. در جدول ۱ مقادیر بارش‌های حداکثر ۲۴ ساعته با دوره‌های بازگشت مختلف نشان داده شده است.

جدول ۱- ارتفاع بارش‌های حداکثر ۲۴ ساعته با دوره‌های بازگشت مختلف

دورهٔ بازگشت (سال)	۵	۲۵	۵۰	۱۰۰
بارش ۲۴ ساعته	۲۹/۶	۴۴/۲	۵۰/۴	۵۶/۶

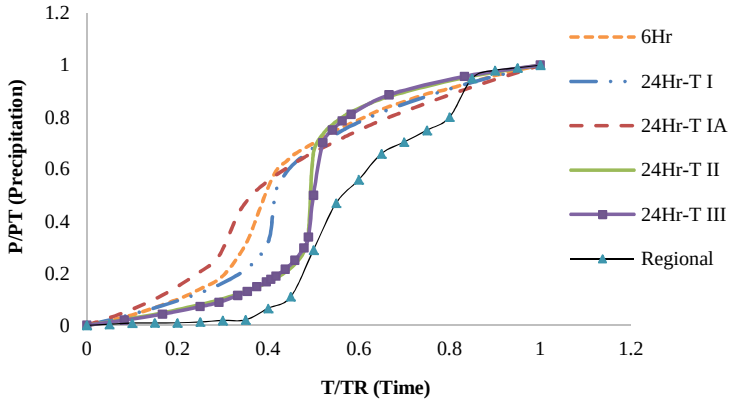
انتخاب الگوی توزیع زمانی بارش

در این تحقیق، با استفاده از داده‌های ایستگاه باران‌نگار زاهدان، الگوی توزیع زمانی بارش با تداوم ۱۳ ساعته (تقریباً برابر با زمان تمرکز حوضه) به روش میانگین ترسیمی استخراج شد (محمدی‌مطلق و همکاران، ۱۳۹۲). در شکل ۳، توزیع زمانی بارش منطقه‌ای استخراج‌شده در این تحقیق، به‌همراه توزیع‌های زمانی استاندارد SCS نشان داده شده است. منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی (مهندسین مشاور بنداب، ۱۳۹۵) برای استخراج هایتوگراف‌های ۶، ۱۲، ۱۸ و ۲۴ ساعتهٔ بارش مورد استفاده قرار گرفت.

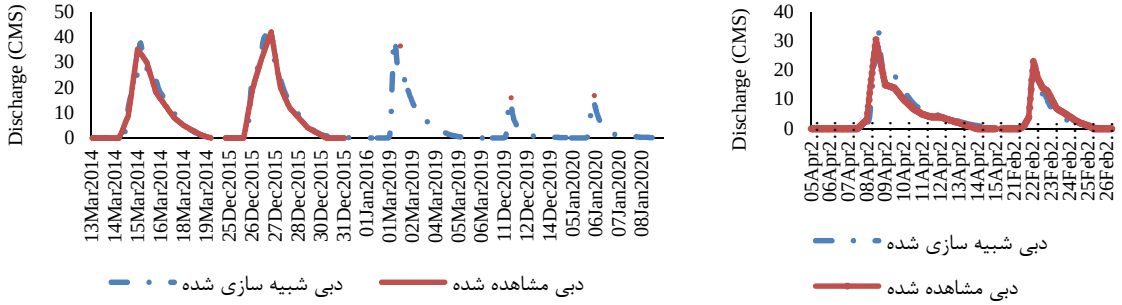
نتایج و بحث

در یک تحقیق جداگانه بهترین تعداد زیرحوضه به هدف دقیق‌ترین واسنجی برابر با ۸ زیرحوضه به‌دست آمد و با استفاده از داده‌های جریان اندازه‌گیری‌شدهٔ ایستگاه آب‌سنجی لار، مدل واسنجی شد. در مرحلهٔ بعد با استفاده از سری دیگری از داده‌ها، نسبت‌به صحت‌سنجی مدل واسنجی‌شده، اقدام شد. هیدروگراف مدل‌های شبیه‌سازی‌شده در نقطهٔ خروجی حوضه برای دوران‌های واسنجی و صحت‌سنجی و همچنین نتایج عددی و شاخص‌های آماری نیکویی برازش نتایج، در شکل ۴ و جدول ۲ ارائه شده است.

همان‌گونه که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، شاخص‌های نیکویی برازش برای مدل استفاده‌شده در دو مرحلهٔ واسنجی و صحت‌سنجی در حد قابل‌قبول قرار دارند. در مرحلهٔ بعدی به‌منظور محاسبهٔ شاخص سیل‌خیزی حوضه، با استفاده از داده‌های بارش به‌دست‌آمده برای بارندگی‌هایی با تداوم ۶، ۱۲، ۱۸ و ۲۴ ساعته و دورهٔ بازگشت‌های ۵، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ ساله نسبت‌به اجرای مکرر مدل اقدام شد. در هر بار اجرای مدل، نسبت‌به حذف هرکدام از زیرحوضه‌ها به‌صورت مجزا اقدام و دبی ایجادشدهٔ مابقی زیرحوضه‌ها محاسبه شد. در این مرحله مجموعاً ۸۶۴ مرتبه، مدل اجرا و نتایج خروجی آن ثبت شد. در شکل‌های ۵ تا ۷ نتایج رتبه‌بندی زیرحوضه‌ها نمایش داده شده است. همچنین میزان درصد فراوانی قرارگیری زیرحوضه‌ها در رتبه‌های ۱ تا ۸ در جدول ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- توزیع های زمانی مختلف بارش استخراج شده به روش میانگین ترسیمی



شکل ۴- الف) واسنجی مدل براساس وقایع بارش-رواناب مشاهداتی، ب) صحت‌سنجی مدل با استفاده از وقایع بارش رواناب مشاهداتی

جدول ۲- نتایج آماری اجرای مدل‌های مختلف برای دوران واسنجی و صحت‌سنجی

مرحله	بارندگی (mm)	دبی اوج مشاهداتی (cms)	سال	دبی اوج محاسباتی (cms)	Nash (NSE)	RMSE	%Error
واسنجی	۲۱/۹	۳۰/۵	۲۰۱۳	۳۳/۸۷	۰/۸۷	۰/۳۶	۱۱/۰۴
	۱۶/۵	۲۲/۷	۲۰۱۵	۲۱/۳	۰/۹۴	۰/۲۵	-۶/۱
	۲۲/۹	۳۵/۲	۲۰۱۴	۳۸/۴۱	۰/۹۳	۰/۲۶	۹/۱
	۲۴	۳۲/۸	۲۰۱۵	۴۰/۴۱	۰/۹۵	۰/۲۲	۲۳/۲
اعتبارسنجی	۱۲/۸	۱۵/۹	۲۰۱۹	۱۴/۹۲	*	*	-۶/۱
	۱۹/۷	۳۶/۴	۲۰۱۹	۳۹/۴۲	*	*	۸/۳
	۱۳/۶	۱۶/۸	۲۰۲۰	۱۵/۱۴	*	*	-۹/۸

* در این مدل‌ها فقط دبی اوج در دسترس بوده است.

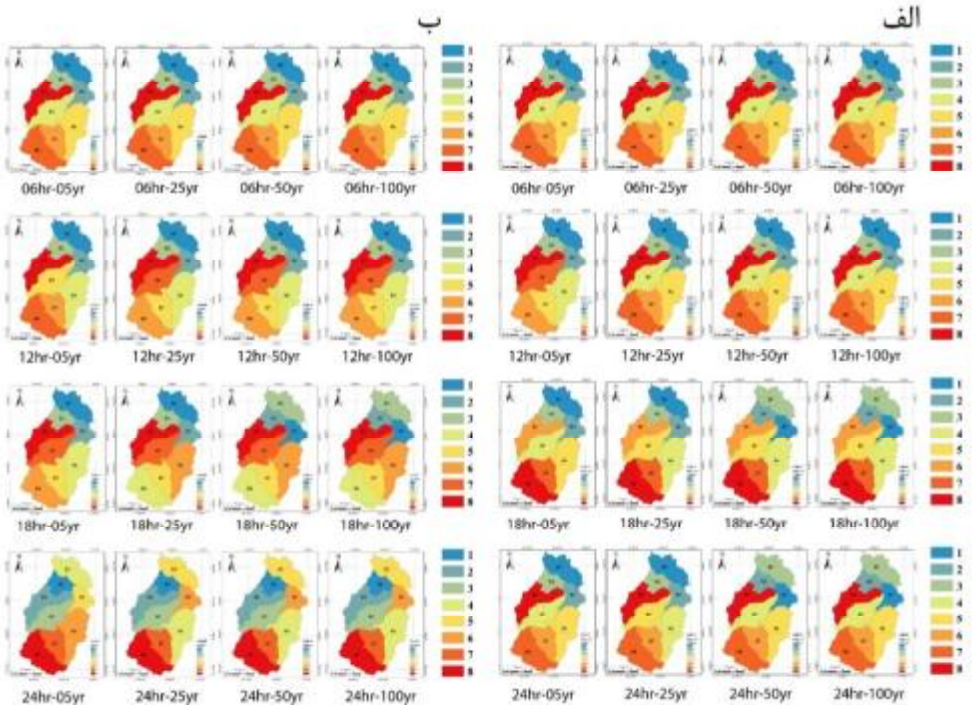
براساس اطلاعات جدول ۳ ملاحظه می‌شود که زیرحوضهٔ B1 با احتمال ۷۵ درصد دارای رتبهٔ اول سیل‌خیزی است؛ برای بقیهٔ زیرحوضه‌ها نیز به همین ترتیب می‌توان احتمال موردنظر را استخراج کرد. براساس نتایج شکل‌های ۵ تا ۷ مشاهده می‌شود که تغییر در رتبهٔ یک زیرحوضه بیش از هر چیز به زمان تداوم بارش وابسته است؛ به‌گونه‌ای که بیش‌ترین حساسیت در تداوم بارش بین زمان تمرکز تا دو برابر آن مشاهده ی شد. علاوه‌بر این، در این تحقیق الگوی توزیع مکانی بارش به‌صورت ثابت و یکنواخت بر روی تمامی سطح حوضه منظور شد؛ ولی در عمل، در زمان نزول بارش واقعی، به‌طورقطع الگوی مکانی بارش متفاوت خواهد بود و پیش‌بینی می‌شود خود این عامل، نقش بسزایی در تغییر پتانسیل سیل‌خیزی زیرحوضه‌ها با توجه به یکسان‌نبودن پراکندگی بارش در واقعیت در سطح حوضه، خواهد داشت. نهایتاً پیشنهاد می‌شود که قبل از کاربرد روش حذف انفرادی از دقت آن در حوضهٔ مذکور اطمینان حاصل شود و رتبه‌بندی بسته به هدف از آن برای تداوم بارش موردنظر صورت پذیرد. همچنین برابر با نتایج به‌دست‌آمده، در ۷۵ درصد نتایج، زیرحوضهٔ B1 به‌عنوان زیرحوضه‌ای با بیشترین پتانسیل سیل‌خیزی و زیرحوضهٔ B4 در ۷۶ درصد نتایج به‌عنوان زیرحوضه‌ای با کمترین پتانسیل سیل‌خیزی شناخته شده است.

جدول ۳- درصد قرارگیری زیرحوضه‌ها در رتبه‌های مختلف براساس روش حذف انفرادی

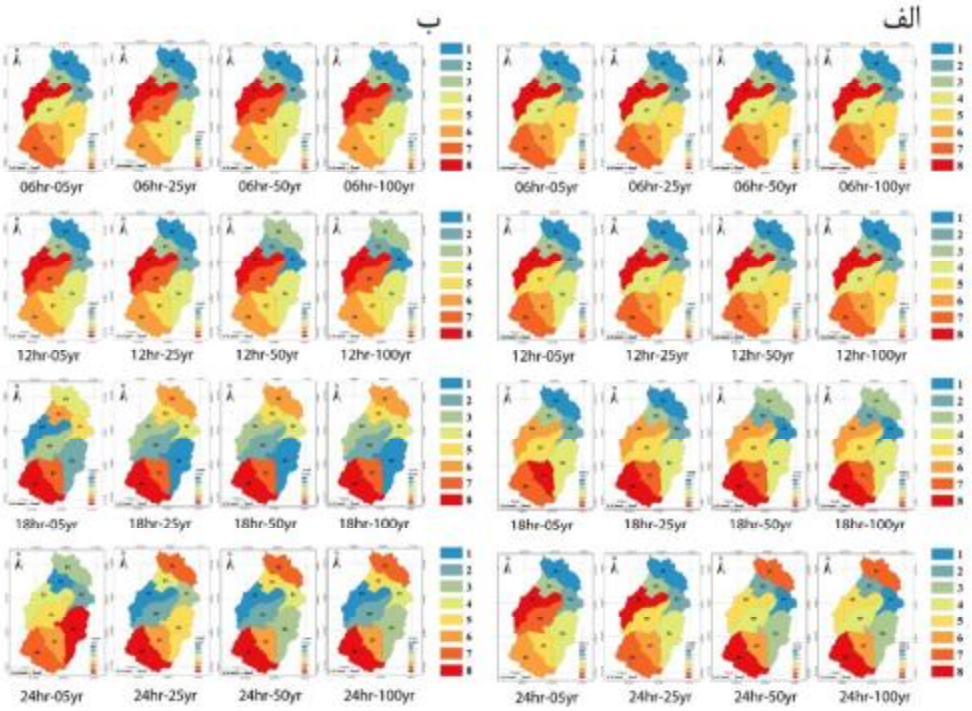
زیرحوضه	رتبهٔ سیل‌خیزی							
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
B1	۷۵	۰	۱۱	۲/۱	۳/۱	۳/۱	۵/۲	۰
B2	۵/۲	۱۴	۷۴	۱	۵/۲	۱	۰	۰
B3	۱۳	۷۵	۲/۱	۵/۲	۲/۱	۳/۱	۰	۰
B4	۴/۲	۴/۲	۳/۱	۱	۲/۱	۹/۴	۰	۷۶
B5	۰	۶/۳	۵/۲	۳۸	۲۶	۰	۲۵	۰
B6	۳/۱	۱	۴/۲	۵۰	۳۶	۴/۲	۰	۱
B7	۰	۰	۰	۰	۲۵	۵۷	۱۶	۲/۱
B8	۰	۰	۰	۳/۱	۰	۲۲	۵۴	۲۱

نتیجه‌گیری

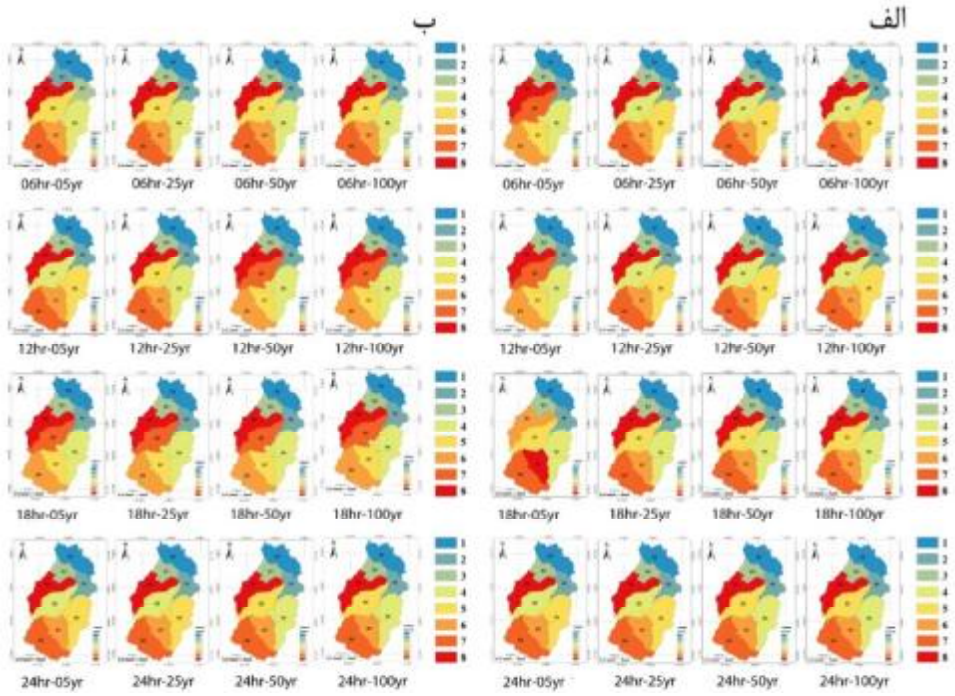
برابر با نتایج به‌دست‌آمده برای تعیین پتانسیل سیل‌خیزی و رتبه‌بندی زیرحوضه‌ها به روش تکرار حذف انفرادی زیرحوضه، مشاهده می‌شود که روش حذف انفرادی در تداوم بارش کوچک‌تر از زمان تمرکز، به الگوی زمانی بارش، میزان تداوم آن و دورهٔ برگشت حساسیت نشان نمی‌دهد. در تداوم ۱/۵ برابر زمان تمرکز حساسیت این روش به الگوی زمانی بارش مشاهده می‌شود و با افزایش دورهٔ بازگشت، آنومالی در رتبه‌بندی برحسب الگوهای مختلف افزایش می‌یابد. در تداوم ۲ برابر زمان تمرکز حساسیت به تغییر در الگوی زمانی بارش و دورهٔ برگشت وجود دارد؛ اما میزان آنومالی آن نسبت‌به حالت قبل کمتر است. باید متذکر شد که مستقل از رتبهٔ هر زیرحوضه به‌لحاظ تولید سیلاب و اثرگذاری آن بر دبی اوج هیدروگراف، باید بررسی شود که اعمال سناریوهای مهار سیلاب در آن حوضه چه اثری بر خسارات واردآمده در پایین‌دست شهر را خواهد داشت؛ به‌عبارت‌دیگر، به‌طورقطع علاوه‌بر میزان دبی اوج که حاصل این پژوهش است، سایر مؤلفه‌های سیلاب، مثل حجم آن، زمان متناظر با دبی اوج و همچنین پاسخ سامانهٔ زهکشی شهری در بروز و شدت اثرات مخرب سیلاب مؤثر خواهد بود؛ چه‌بسا زیرحوضه‌ای رتبهٔ اول در تولید سیلاب را نداشته باشد، اما دینامیک تولید سیلاب آن در تعامل با سامانهٔ زهکشی شهر، اثرات به‌مراتب مخرّب‌تری را چه به‌لحاظ اقتصادی و چه تلفات انسانی در شهر تحمیل کند. به این لحاظ و در تکمیل این مطالعه و به‌منظور ارزیابی کارایی سناریوهای مختلف مقابله با مخاطرات سیلاب، نیاز به یک مطالعهٔ هیدرولیکی از افزایش سطح آب در نقاط مختلف شهر با لحاظ‌کردن حساسیت هر نقطه ازنظر اقتصادی و تراکم جمعیتی است.



شکل ۵- رتبه‌بندی سیل‌خیزی زیرحوضه‌ها: الف) الگوی توزیع زمانی بارش منطقه‌ای، ب) الگوی توزیع زمانی بارش SCS-6hr



شکل ۶- رتبه‌بندی سیل‌خیزی زیرحوضه‌ها: الف) الگوی توزیع زمانی بارش SCS 24-hr I، ب) الگوی توزیع زمانی بارش SCS 24-hr IA



شکل ۷- رتبه‌بندی سیل‌خیزی زیرحوضه‌ها: الف) الگوی توزیع زمانی بارش SCS 24-hr II، ب) الگوی توزیع زمانی بارش SCS 24-hr III

منابع

۱.بنی‌حبیب م، ا. علمی ط، و عربی ا. ۱۳۹۰. ارزیابی روش‌های تعیین اولویت زمانی احداث سدهای تأخیری در حوضهٔ آبخیز تجریش. مجلهٔ علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. ۱۵(۵): ۴۵-۵۲.

۲.خسروشاهی م، و ثقفیان ب. ۱۳۸۱. نقش روندیابی رودخانه در شناسایی و تفکیک مناطق سیل‌خیز در حوضه‌های آبخیز. مجموعه مقالات ششمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز، بهمن ۱۳۸۱، صفحه ۱۳۸۳-۱۳۷۵.

۳.سلیمانی ساردو ف، سلطانی کوپایی س، و سلاجقه ع. ۱۳۹۲. انتخاب شاخص سیل‌خیزی مناسب با استفاده از مدل بارش-رواناب HEC-HMS و تکنیک‌های GIS و RS (مطالعهٔ موردی: حوضهٔ سد جیرفت). پژوهشنامهٔ مدیریت حوضهٔ آبخیز. ۸(۴): ۹۰-۱۰۵.

۴.شاهویی س، و، پرهمت ج، صدقی ح، حسینی م، و صرمی ع. ۱۳۹۸. شبیه‌سازی رواناب در مقیاس زمانی روزانه با استفاده از تصاویر با دورهٔ هشت روزهٔ سنجندهٔ MODIS و مدل آب‌شناسی SRM. مجلهٔ مهندسی منابع آب. ۱۲(۴۰): ۱-۱۲.

۵.محمدی مطلق ر، جلال کمالی ن، و جلال کمالی ا. ۱۳۹۲. بررسی نقش مشارکت زیرحوضه‌های آبریز در شدت سیل‌خیزی (مطالعهٔ موردی: حوضهٔ آبرزی دالکی). فصلنامهٔ علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب. ۱۳(۴): ۳۱-۴۴.

۶.مهندسین مشاور بنداب. ۱۳۹۵. طراحی سیستم مدیریت و کنترل سیلاب، جمع‌آوری، هدایت و ذخیرهٔ آب‌های سطحی در زاهدان. ادارهٔ کل منابع طبیعی و آبخیزداری سیستان و بلوچستان.

7. Dehghanian N. Nadoushani M. S. Saghafian B. and Akhtari R. 2019. Performance Evaluation of a Fuzzy Hybrid Clustering Technique to Identify Flood Source Areas. Water Resources Management. 33(13): 4621-4636.
8. Moradkhani H. and Sorooshian S. 2009. General review of rainfall-runoff modeling: model calibration, data assimilation, and uncertainty analysis. Hydrological Modelling and the Water Cycle. 63(2): 1-24.
9. Teng J. Jakeman A. J. Vaze J. Croke B. F. Dutta D. and Kim S. 2017. Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. Environmental Modelling & Software. 90: 201-216.
10. Wijayarathne D. B. and Coulibaly P. 2020. Identification of hydrological models for operational flood forecasting in St. John's, Newfoundland, Canada. Journal of Hydrology: Regional Studies. 27: 100646.