نشریه علمی-پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز
جلد ۱۱، شماره ۲، ۱۳۹۸، صفحات ۵۲۳-۵۳۶

Journal of Watershed Engineering and Management
Volume 11, Issue 2, 2019, Pages 523-536
DOI: 10.22092/ijwmse.2018.120069.1417

شناسایی عوامل مؤثر بر بروز سیلاب شهری در حوزه آبخیز شهر ایلام

میلاد باقلانی[۱]، نورالدین رستمی[*۲] و محسن توکلی[۳]

[۱] کارشناس ارشد آبخیزداری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام و [۲و۳] استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۰/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۷/۱۱

چکیده

سیلاب شهری، حجم آبی است که از ظرفیت شبکه زهکشی شهر خارج شده، منجر به بروز مشکلات و خسارات زیادی در شهر می‌شود. بیشتر تحقیقات صورت گرفته در سراسر جهان حاکی از افزایش سیلاب‌های شهری، به‌ویژه در کلان‌شهرها است. تمرکز جمعیت در مناطق شهری با توسعه شهرها و تغییر چهره طبیعی زمین سبب افزایش سطوح نفوذناپذیر و تغییر چرخه هیدرولوژی شده است. در این مطالعه، به‌منظور شبیه‌سازی رواناب سطحی حوزه آبخیز شهر ایلام از مدل هیدرولوژی- هیدرولیکی SWMM استفاده شده است. نتایج حاصل از اعتبارسنجی مدل نشان داد که دبی اوج و حجم جریان شبیه‌سازی شده، انطباق خوبی با مقدار مشاهداتی دارد (شاخص بایاس ۳/۲۵ و خطای نسبی ۰/۰۶۵). با توجه به نتایج به‌دست آمده از تحلیل حساسیت پارامترهای مهم مدل، عوامل مؤثر بر بروز سیلاب در شهر ایلام به‌ترتیب شامل کافی نبودن ابعاد کانال‌های شهری برای عبور حجم سیلاب، افزایش مناطق نفوذناپذیر، ضریب زبری مناطق نفوذپذیر، شیب، مساحت، عرض معادل و ضریب زبری مناطق نفوذناپذیر هستند. طبق نتایج این پژوهش، زیرحوضه شماره ۲ به‌دلیل تغییرات کاربری اراضی، ساخت و سازهای غیر اصولی و شبکه زهکشی نامناسب که باعث افزایش سطوح نفوذناپذیر می‌شوند، دارای بیشترین خطر سیلاب می‌باشد و در صورت عدم توجه به زیرساخت‌های شبکه زهکشی و عدم رعایت نکات مربوط به گسترش شهرنشینی، شهر ایلام با خطر جدی سیلاب رو به رو است. همچنین، مدل SWMM دقت مورد نیاز برای شبیه‌سازی سیلاب شهری در شهر ایلام را دارد و از این مدل می‌توان برای طرح‌های مدیریت رواناب شهری و طراحی شبکه جمع‌آوری و دفع آب‌های سطحی استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: آبخیزداری شهری، تحلیل حساسیت، شهرنشینی، مدل SWMM، مناطق نفوذناپذیر

مقدمه

باران یکی از رویدادهای طبیعی است که چنانچه تدابیر لازم برای استفاده درست و به موقع از آن به‌کار رود، می‌تواند در رفع نیازهای بشر بسیار مؤثر باشد. هرگاه بارانی با شدت زیاد بر روی حوضه‌ای می‌بارد، به‌دلیل کاهش نفوذپذیری خاک در همان اوایل بارندگی، آب بر روی خاک جاری شده، از طریق مسیل‌ها به رودخانه‌ها می‌پیوندد. نقش مسیل‌ها در هدایت و انتقال آب جاری شده به سمت رودخانه‌ها غیر قابل انکار بوده، که در صورت نادیده گرفتن شرایط مورفولوژیکی آن و دخل و تصرف در حریم آن، می‌تواند باعث به‌وجود آمدن خسارات مالی و جانی شود (Alizadeh، ۲۰۰۸). تغییر الگوی استفاده از زمین و توسعه مناطق شهری، باعث بر هم خوردن فرایندهای هیدرولوژیکی منطقه و افزایش مناطق نفوذناپذیر، باعث بر هم خوردن تعادل طبیعی آب

[*] مسئول مکاتبات: n.rostami@ilam.ac.ir

می‌شود. کاهش نفوذپذیری و افزایش رواناب نیز باعث افزایش پیک سیلاب حتی در بارش‌های اندک و کوتاه مدت می‌شود. توسعه مناطق شهری باعث افزایش ۱/۸ تا هشت برابری پیک سیل می‌شود و حجم سیل را تا شش برابر افزایش می‌دهد و زمان تمرکز نیز کوتاه‌تر می‌شود (National Disaster Management Authority Government of India، ۲۰۱۰). در حوضه‌های غیر شهری (حوضه‌های جنگلی) حدود ۲۵ درصد و در حوضه‌های شهری حدود ۹۰ درصد از بارندگی به رواناب تبدیل می‌شود (Shang و Wilson، ۲۰۰۹). جاری شدن سیل در مناطق شهری نسبت به سایر مناطق از نظر پارامترهای تبخیر و تعرق، نفوذ و رواناب متفاوت است (M.P.C.A.، ۲۰۱۵).

فعالیت‌های مضر بشری اغلب سبب افزایش سیلاب‌ها می‌شود. امروزه افزایش جمعیت، پیشرفت علم و گسترش تأسیسات صنعتی و کمبود مکان برای ساخت و ساز، خصوصاً در کلان‌شهرها، باعث شده تا تغییرات شدیدی در مورفولوژی حوزه‌های آبخیز ایجاد شود. تجاوز به حریم رودخانه‌ها، مسیل‌ها و آبراهه‌ها، باعث تغییر الگوی زهکشی طبیعی و جاری شدن جریان‌های بیش از ظرفیت آبراهه‌ها و مسیل‌های شهری می‌شود. این مسئله منجر به تشدید خطر سیل‌خیزی و آب گرفتگی معابر و افزایش هزینه‌های نگهداری شهر شده و خسارات احتمالی جانی و مالی را به‌طور چشم‌گیری افزایش داده است.

یکی از پیچیده‌ترین فرایندهای هیدرولوژیکی، فرایندهای بارش-رواناب است که از پارامترهای مختلف فیزیکی و هیدرولوژیکی تأثیر می‌پذیرد. لذا، درک و پیش‌بینی فرایندهای تولید رواناب و انتقال آن به نقطه خروجی حوزه آبخیز یکی از اساسی‌ترین مباحث علم هیدرولوژی محسوب می‌شود (Salajegheh و همکاران، ۲۰۰۹). به‌طور کلی، یک مدل، نمایشی ساده از یک سامانه پیچیده بوده، در مدل ریاضی رفتار یک سامانه به‌وسیله یک سری معادلات ریاضی همراه با جملات منطقی، ارتباط بین متغیرها و پارامترها بیان می‌شود. مدل‌های محاسباتی در فرایند مدل‌سازی رفتار هیدرولوژیکی حوضه جایگاه ویژه‌ای دارند. این مدل‌ها خصوصیات فیزیکی و هیدرولوژیکی حوضه شامل نفوذ و بارندگی را در نظر گرفته، سیلاب را در خروجی و در درون حوضه شبیه‌سازی می‌کند (Ghafouri Roozbehani، ۱۹۸۹). تا کنون، مدل‌های هیدرولوژیکی مختلفی ابداع شده‌اند که مدل SWMM[1] یکی از مدل‌های مناسب برای شبیه‌سازی و مدیریت رواناب و بارش در حوضه‌های شهری می‌باشد. این مدل، نخستین بار در سال ۱۹۷۱ به‌وسیله Rossman در بخش منابع آب آزمایشگاه تحقیقاتی مدیریت ملی ریسک سینسیناتی (اوهایو) آمریکا ایجاد شد و تا کنون که نسخه ۵/۱ این نرم‌افزار ارائه شده، تغییر و تحولات بسیاری در آن ایجاد شده است. گرچه از این نرم‌افزار در مسائل غیر شهری نیز استفاده می‌شود، ولی شهرت آن به‌دلیل مدل‌سازی و مدیریت حوضه‌های شهری می‌باشد (EPA[2]، ۲۰۱۵).

تحلیل حساسیت[3] به بررسی تأثیرپذیری متغیرهای خروجی از متغیرهای ورودی یک مدل آماری گفته می‌شود. به‌عبارت دیگر، روشی برای تغییر دادن در ورودی‌های یک مدل آماری به‌صورت سازمان‌یافته است که بتوان تأثیرات این تغییرها را در خروجی مدل پیش‌بینی کرد. در این تحلیل، پارامترهای حساس شناخته شده و تمرکز بر روی این پارامترها صورت می‌گیرد و به این ترتیب با کاهش عدم قطعیت، دقت نتایج افزایش می‌یابد. تحلیل حساسیت به دو صورت جزئی و کلی صورت می‌گیرد. در روش جزئی یا مطلق، تأثیر هر پارامتر به شکل مجزا با ثابت نگه‌داشتن سایر پارامترها محاسبه می‌شود. در مقیاس کلی، همه پارامترها به‌طور هم‌زمان، تغییر داده می‌شود و نحوه عملکرد آن بر اساس انتخاب تصادفی پارامترها و روش‌های احتمالاتی است.

در سالیان اخیر، محققان مختلفی در مناطق مطالعاتی گوناگون از توانایی‌های این مدل بهره گرفته‌اند. در پژوهشی که به‌وسیله Rostami Khalaj و همکاران (۲۰۱۲) با هدف تحلیل حساسیت متغیرهای مؤثر بر سیلاب شهری با استفاده از مدل SWMM انجام شد، مشخص شد که درصد مناطق نفوذناپذیر بیشترین تأثیر را بر دبی اوج داشته، به‌عنوان

[1] Strom Water Management Model
[2] Environmental Protection Agency
[3] Sensitivity analysis

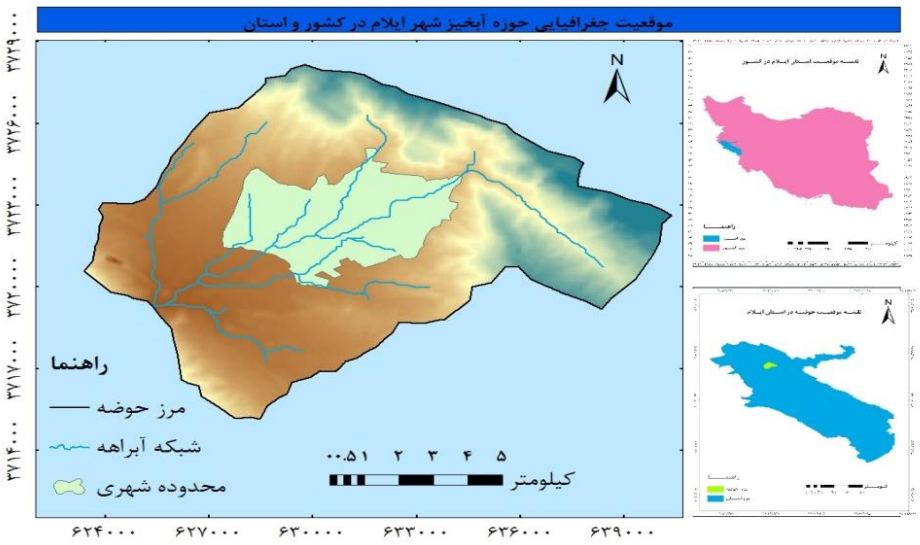
حساس‌ترین پارامتر مدل شناخته شد. در تحقیقی دیگر، Badiezadeh و همکاران (۲۰۱۵) به مطالعه مدیریت سیلاب شهری از طریق شبیه‌سازی رواناب سطحی با استفاده از مدل SWMM در شهر گرگان پرداختند. نتایج حاصل از واسنجی مدل نشان داد که دبی اوج و حجم جریان شبیه‌سازی انطباق خوبی با مقادیر مشاهداتی دارد و مدل SWMM دقت مورد نیاز برای شبیه‌سازی رواناب شهری را دارد. در تحقیقی دیگر، Rostami و Kazemi (۲۰۱۷) به پهنه‌بندی خطر سیلاب در محدوده شهر ایلام با استفاده از روش AHP و GIS پرداختند. نتایج حاصل از تحقیق نشان داد که به‌ترتیب ناحیه مرکزی شهر ایلام و ناحیه آزادگان دارای بالاترین میزان خطر سیلاب هستند که این امر به‌علت تراکم بالای جمعیت و ساختمان در هر دو ناحیه، نزدیکی هر دو ناحیه به‌خصوص ناحیه مرکزی به مسیل و همچنین، بافت فرسوده و قدیمی ناحیه مرکزی است. Sheeder و همکاران (۲۰۰۲) با مطالعه سه حوزه آبخیز واقع در ایالات متحده آمریکا، اثر توسعه اراضی شهری را بر واکنش هیدرولوژیک مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که با توسعه اراضی شهری، شماره منحنی اراضی افزایش یافته، زمان تأخیر حوضه کاهش می‌یابد. در نتیجه، واکنش هیدرولوژیک حوضه به‌وقوع بارندگی، سریع‌تر شده و دبی اوج بیشتری تولید می‌شود. همچنین، آن‌ها منشأ دبی اوج هیدروگراف سیل را تفکیک کرده و بیان کردند که منشأ رواناب در پیک‌های سریع، اراضی شهری است و پیک‌های تأخیری هیدروگراف ناشی از رواناب اراضی طبیعی (غیر شهری) است. در تحقیقی، Jang و همکاران (۲۰۰۷) به بررسی کاربردی بودن مدل SWMM در سه حوزه آبخیز طبیعی در کشور کره جنوبی پرداختند. آن‌ها با مقایسه روش‌های مرسوم هیدروگراف مصنوعی (SCS و Clark) و مدل هیدرولوژیکی SWMM در ارزیابی سیلاب، برای شرایط قبل و بعد از توسعه شهری، در چهار منطقه از کشور کره جنوبی، به این نتیجه رسیدند که استفاده از مدل SWMM برای بررسی شرایط قبل و بعد از توسعه شهری، بهترین نتیجه را ارائه می‌کند و اثرات شهرسازی را بر روی رواناب تولیدی را به خوبی نشان می‌دهد. با توجه به مطالعات صورت گرفته، می‌توان به این نتیجه رسید که مدل SWMM کارایی لازم برای ارزیابی عوامل مؤثر بر بروز سیلاب شهری را دارا می‌باشد.

برای مدیریت و کنترل رواناب‌های شهری و طراحی بهینه سامانه‌های زهکشی و جلوگیری از آبگرفتگی معابر شهری لازم است که مسئولان، آگاهی لازم در مورد افزایش دبی و حجم رواناب ناشی از گسترش مناطق شهری داشته باشند و بر اساس آن برای شرایط فعلی و آینده برنامه‌ریزی صورت گیرد. همچنین، با توجه به پیچیدگی محیط شهری و گستردگی عوامل مؤثر بر سیلاب شهری که امکان اندازه‌گیری دقیق همه آن‌ها وجود ندارد، نیاز به مدلی است که با ساختاری ساده و کمترین اطلاعات ورودی، رواناب ایجاد شده از بارش را پیش‌بینی کند. از طرفی، این‌گونه مطالعات در حوزه آبخیز شهر ایلام کمتر صورت گرفته، ضروری است که این مطالعات به‌عنوان پیش‌نیازهای مدیریت شهری فراهم شود. هدف از این تحقیق، ارزیابی کارایی مدل SWMM در حوزه آبخیز شهر ایلام و بررسی تأثیر سیلاب حوضه‌های بالادست بر وضعیت سیلابی شدن مناطق شهری به‌منظور کاهش خطرات و خسارات سیلاب در حوضه شهر ایلام است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد پژوهش: حوزه آبخیز شهر ایلام در منطقه شمال شرق استان ایلام با طول جغرافیایی ″۳۹ ′۱۹ °۴۶ تا ″۲۴ ′۳۰ °۴۶ و عرض جغرافیایی ″۵۷ ′۳۳ °۳۳ تا ″۱۶ ′۴۱ °۳۳ و مساحت ۱۱۹ کیلومتر مربع و ارتفاع متوسط ۱۴۰۱ متر از سطح دریای آزاد در دامنه‌های جنوب غربی رشته کوه‌های زاگرس واقع شده است (شکل ۱). شهر ایلام دارای ویژگی‌هایی مانند وجود ارتفاعات در شرق، غرب و شمال، اختلاف درجه حرارت و بارندگی در بخش‌های شمالی، آب و هوای نسبتاً سرد و زمستان طولانی می‌باشد. بر اساس آمار و اطلاعات ثبت شده در ایستگاه سینوپتیک ایلام، متوسط بارندگی سالانه این ایستگاه ۵۶۰ میلی‌متر می‌باشد. سامانه‌های جوی مختلفی مانند توده هوای غربی از دریای مدیترانه و دریای سیاه، جریانات سودانی و دریای سرخ و صحرای عربستان و توده‌های

شمالی از مناطق سیبری به‌ترتیب باعث بارندگی در پاییز و زمستان، کاهش رطوبت در تابستان و یخبندان در شمال استان می‌شوند. بارندگی سالانه فراوان از یک سو و نقش استان به‌عنوان یکی از زهکش‌های مهم آب‌های سطحی سلسله جبال زاگرس از سوی دیگر، موجب پیدایش رودخانه‌های زیادی در استان شده است.



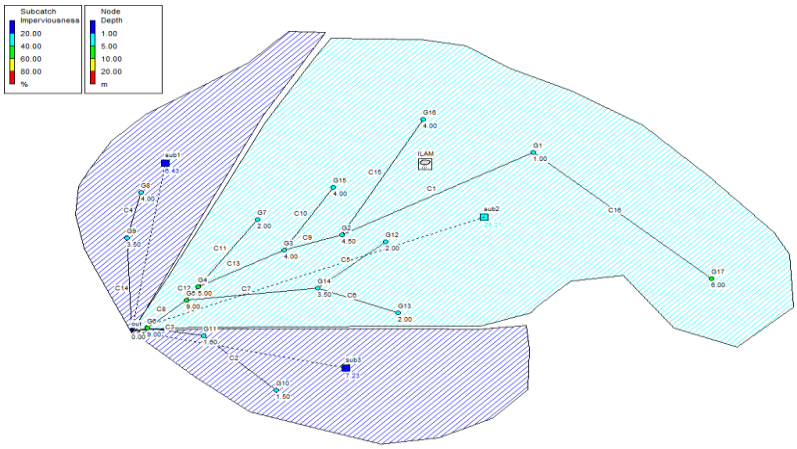
شکل ۱- موقعیت منطقه مورد پژوهش

روش تحقیق: برای انجام این پژوهش، لایه‌های اطلاعاتی زیر با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS و به روش زیر تهیه شدند.

۱) نقشه شیب و جهت شیب منطقه
۲) نقشه کاربری اراضی با استفاده از پردازش تصاویر جدید ماهواره‌ای OLI
۳) نقشه زمین‌شناسی و خاکشناسی منطقه شامل سازندهای مختلف زمین‌شناسی که به‌وسیله سازمان زمین‌شناسی کشور در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ تهیه و رقومی شده است.
۴) نقشه شبکه هیدروگرافی
۵) نقشه هیپسومتری و طبقات ارتفاعی حوضه
۶) نقشه خطوط ارتباطی (راه‌ها)
۷) نقشه مناطق مسکونی

مدل SWMM: این مدل، با توجه به قابلیت‌های آن برای مدل‌سازی سیلاب‌های شهری، جمع‌آوری آب‌های سطحی، مدل‌سازی کیفیت آب مسیل‌های شهری، بررسی اقدامات حفاظتی در بالادست و داخل محدوده شهری بر میزان رواناب خروجی و ...، مناسب ارزیابی می‌شود. این مدل، شبیه‌ساز دینامیکی بارش- رواناب (تک واقعه و پیوسته) با قابلیت احتساب پدیده‌های تبخیر، ذوب برف، چالاب، نفوذ عمقی و جریان‌های زیرسطحی است. در این مدل، برآورد سیلاب با روش موج سینماتیک و ترکیب پارامترهای جریان‌های روی زمین و متمرکز شده، صورت می‌پذیرد. بنابراین، دارای مبنای فیزیکی، نگاه توزیعی، امکان بررسی جداگانه نواحی نفوذپذیر و نفوذناپذیر و همچنین، قابلیت شبیه‌سازی پاسخ غیر خطی حوضه به بارش مازاد است. خروجی‌های مدل نیز به‌صورت جدولی و گرافیکی بوده، اهم آن‌ها عبارتند از هیدروگراف سیلاب ورودی و میزان سیل‌گرفتگی در اتصالات، پروفیل سطح آب، میزان ظرفیت اشغال‌شده، عمق، سرعت و عدد فرود در زمان‌های مختلف در مجاری، نقاط و بازه‌های بحرانی بر اساس شاخص کاربر و همچنین، هیدروگراف سیلاب خروجی از زیرحوضه‌ها را شامل است (Rossman، ۲۰۰۹). مدل برای محاسبه مقدار نفوذ از سه معادله هورتون، گرین‌امپ و روش شماره منحنی استفاده می‌کند. روندیابی جریان داخل مجرای آب به‌وسیله معادلات بقای جرم و اندازه حرکت برای جریان غیردائمی و

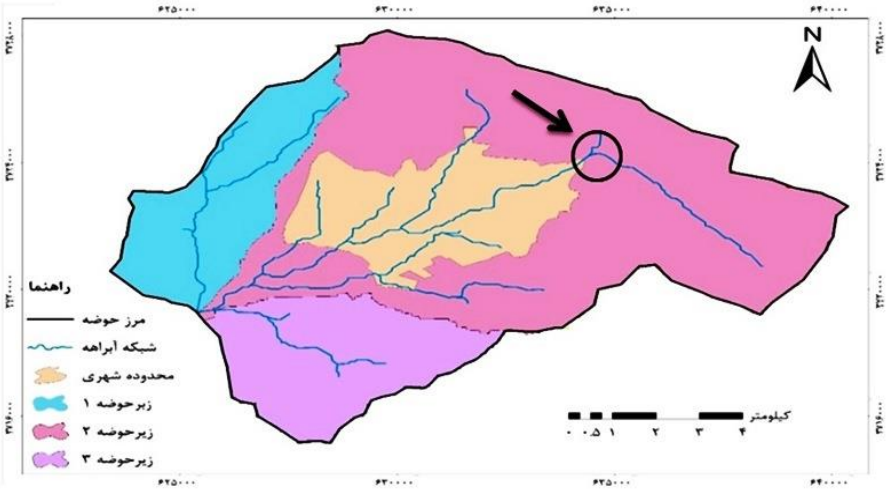
متغیر تدریجی انجام می‌گیرد. بدین‌منظور، مدل یکی از معادلات روندیابی جریان دائمی، موج کنیماتیک و موج دینامیک را مورد استفاده قرار می‌دهد. برای اجرای هر مدلی باید پارامترهای آن را تعیین و سپس مشخصات هر جزء را در مدل وارد کرد. اجزای این مدل شامل باران‌سنج، زیرحوضه، گره، ریزشگاه، مقسم، مخزن، مجرا، پمپ، روزنه، سرریز، خروجی و برچسب می‌باشد (شکل ۲).



شکل ۲- شکل شماتیک زیر واحدهای هیدرولوژیکی شهر ایلام در محیط مدل SWMM

اطلاعات باران‌سنج، شامل مقادیر بارش (تک واقعه یا پیوسته)، تبخیر ماهانه، سرعت باد و همچنین، پارامترهای برف است. از آن‌جا که برآورد رواناب در مدل SWMM و سایر مدل‌های جمع‌آوری رواناب شهری بر اساس مقادیر بارش می‌باشد، بنابراین، این اطلاعات از مهمترین و اساسی‌ترین اطلاعات مورد استفاده مدل هستند. در این مطالعه، اطلاعات مربوط به بزرگ‌ترین بارش در صد سال اخیر با پایه زمانی ده دقیقه انتخاب و به‌صورت تجمعی به‌صورت سری زمانی به مدل عرضه شد. همچنین، میزان تبخیر ماهانه و سرعت باد، بر اساس آمار سازمان هواشناسی، وارد مدل شد.

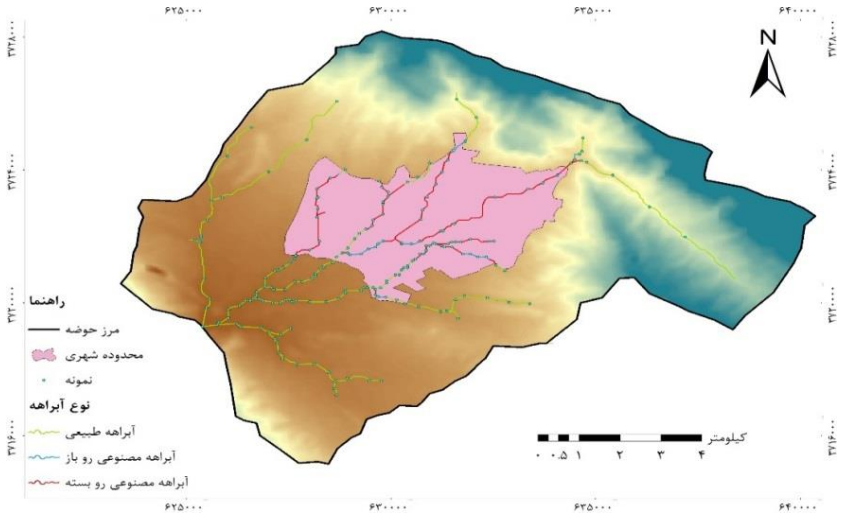
در این مدل، ابتدا باید زیرحوضه‌های هر حوضه مشخص شود و سپس اطلاعات مربوط به هر زیرحوضه در مدل وارد شود. اطلاعات مربوط به زیرحوضه، شامل مساحت، عرض، شیب، درصد نفوذناپذیری، ضریب زبری مناطق نفوذپذیر و نفوذناپذیر، میزان ذخیره چالابی مناطق نفوذپذیر و نفوذناپذیر و درصد ناحیه نفوذناپذیر بدون ذخایر چالابی می‌باشد. با استفاده از نرم‌افزارهای Arc GIS و Arc Hydro زیرحوضه‌های حوزه آبخیز شهر ایلام تعیین شد (شکل ۳).



شکل ۳- زیرحوضه‌های حوضه مورد مطالعه و موقعیت اندازه‌گیری جریان در محل دره ارغوان

از طرفی، مهمترین عوامل مؤثر در تحولات هیدرولوژیک، میزان سطوح با پتانسیل رواناب سطحی مختلف یا اراضی نفوذناپذیر حوضه و همچنین، خصوصیات مسیرهای حرکت جریان آب است که هر دو عامل در حوضه‌های تحت تأثیر شهرسازی به نحو بارزی تغییر می‌یابند. افزایش سطوح نفوذناپذیر حوضه، تحت تأثیر این روند بالطبع از سطح نفوذپذیر حوضه که نقش زیادی در جذب بارندگی دارند، کاسته و متعاقباً بر حجم کل رواناب‌ها می‌افزاید و باعث کاهش زمان تمرکز حوضه و افزایش دبی پیک می‌شود. درصد مناطق نفوذناپذیر هر زیرحوضه با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS و نقشه کاربری اراضی محاسبه شد.

یکی دیگر از پارامترهای مورد نیاز مدل، مربوط به خصوصیات فیزیکی آبراهه‌ها می‌باشد. تعیین خصوصیات فیزیکی آبراهه‌های حوضه مستلزم عملیات میدانی است. در این گونه عملیات میدانی، مقاطع عرضی نهرها، مسیل‌ها، سیلاب‌روها و کانال‌های طبیعی و مصنوعی برداشت شد. خصوصیات عمومی آبراهه‌ها نظیر جنس مواد متشکله بستر و کناره‌ها، وضعیت عمومی دیواره‌ها و سواحل جانبی آبراهه از نظر پایداری و شیب جانبی، رویش نباتات در داخل مقطع و سواحل آبراهه، آثار و شواهد جابه‌جایی، تغییر مسیر، عمق آب موجود در کانال و ضریب زبری طی بازدیدهای محلی در ۲۰۳ نقطه ثبت شد (شکل ۴).



شکل ۴- مشخصات آبراهه‌ها و نقاط نمونه‌برداری

اعتبارسنجی مدل: به‌منظور صحت‌سنجی و اعتبار نتایج مدل، بایستی نتایج به‌دست آمده از مدل را با نتایج واقعی و مشاهده شده مقایسه کرد. برای اعتبارسنجی مدل، با توجه به نبود آمار و داده‌های مشاهداتی مربوط به دبی، اقدام به اندازه‌گیری دبی با روش هیدرولیکی داغاب (روش شیب- سطح مقطع) شد. این روش با بررسی و مطالعات صحرایی در مناطقی از آبراهه که اثر مربوط به داغاب معلوم می‌باشد و تعیین محل دقیق آن و با استفاده از فرمول منینگ به شرح زیر انجام شد.

۱) ابتدا با استفاده از بازدیدهای میدانی وضع سواحل رودخانه و سیلاب‌دشت به دقت بررسی و تراز دبی مورد نظر برآورد شد و مسیر واجد شرایط انتخاب شد.

۲) مقطع کلی رودخانه و مقطع مربوط به تراز دبی بیشینه در دو نقطه از رودخانه با استفاده از دوربین نقشه‌برداری در نزدیکی خروجی زیرحوضه دوم برداشت شد.

۳) در دو نقطه از رودخانه مزبور برای تعیین شیب، اقدام به اندازه‌گیری اختلاف ارتفاع در فواصل مشخص با استفاده از دوربین نقشه‌برداری شد و میزان شیب تعیین شد (جدول ۱).

۴) با تهیه تصاویری از بستر رودخانه و سیلاب‌دشت و مقایسه آن‌ها با جدول مربوط به ضریب زبری منینگ، ضریب زبری تعیین شد.

جدول ۱- مشخصات مقطع اندازه‌گیری شده در خروجی حوزه آبخیز شهر ایلام

ارتفاع نقطه اول (متر)	ارتفاع نقطه دوم (متر)	فاصله بین دو نقطه (متر)	شیب (S) (٪)	مساحت خیس شده (A) (متر مربع)	محیط (P) (متر)	عرض رودخانه (متر)	شعاع هیدرولیکی (R) (متر)	ضریب زبری (n)
۹۸/۵۳	۹۹/۰۹۲	۱۱۹/۴۹۹	۰/۴۷	۱۶۸/۶۴	۵۴/۴۵۶	۵۲/۲۲	۳/۰۹۷	۰/۰۳۲

با استفاده از موارد فوق و رابطه منینگ (رابطه ۱)، ضمن انجام بازدیدهای محلی، مسیر مستقیم و یکنواختی از رودخانه انتخاب شد. سپس مساحت مقطع عبور جریان و محیط تر شده در ابتدا و انتهای مسیر منتخب با انجام عملیات نقشه‌برداری برداشت و تعیین شد. شیب سطح آب، طول مسیر منتخب و ضریب زبری نیز در همین مرحله مشخص شد.

$$Q=\frac{1}{n}AR^{0.67}S^{0.5} \qquad (۱)$$

که در آن، Q بیشینه آبدهی لحظه‌ای سیل (متر مکعب در ثانیه)، A سطح مقطع (متر مربع)، n ضریب زبری منینگ که با مراجعه به جداول استاندارد استخراج می‌شود، R شعاع هیدرولیکی متوسط (متر) که برای تعیین شعاع هیدرولیکی باید سطح مقطع متوسط را بر محیط تر شده متوسط تقسیم کرد و S شیب طولی آبراهه (متر بر متر) است.

از آن‌جا که نتایج حاصل از مدل‌ها در تصمیم‌گیری‌ها و طرح‌های منابع آب و خاک و همچنین، مسائل مربوط به سیل و امثال آن کاربرد فراوانی دارد همواره درجه اعتبار و صحت آن‌ها مورد سؤال است. البته از هیچ مدل کامپیوتری نمی‌توان پیش‌بینی‌های کامل و دقیقی را انتظار داشت و همیشه به‌صورت نسبی مطرح است؛ بنابراین، برای رسیدن به نتایج مورد انتظار و این‌که آیا مدل رضایت بخش است یا خیر، روش‌های توسعه و بهبود ارزیابی دقت مدل ضروری است و این مرحله از آزمون مدل به‌عنوان اعتباریابی شناخته می‌شود. پس از تعیین دبی مشاهداتی با استفاده از روابط زیر اقدام به صحت‌سنجی مدل شد.

الف) شاخص خطای نسبی: مقدار شاخص بین منفی و مثبت بی‌نهایت است ولی بهترین حالت صفر می‌باشد (رابطه ۲).

$$RE=\frac{\Sigma(Y_{(ob)}-Y_{(si)})}{\Sigma(Y_{(ob)})} \qquad (۲)$$

که در آن، $Y_{(ob)}$ مقادیر مشاهده شده و $Y_{(si)}$ مقادیر شبیه‌سازی شده است.

ب) شاخص بایاس (اریب): خطای کل در حجم جریان که مقادیر مثبت و منفی این ضریب نشان‌دهنده بیشتر یا کمتر بودن متوسط حجم جریان شبیه‌سازی شده به‌وسیله مدل نسبت به جریان مشاهداتی است (رابطه ۳).

$$BIAS=\frac{\Sigma(Y_{(ob)}-Y_{(si)})^2}{\Sigma(Y_{(ob)})} \qquad (۳)$$

که در آن، $Y_{(ob)}$ مقادیر مشاهده شده و $Y_{(si)}$ مقادیر شبیه‌سازی شده می‌باشد.

تحلیل حساسیت پارامترهای مدل: تحلیل حساسیت، ابزار مناسبی برای نمایش تأثیر پارامترها بر خروجی مدل در اثر تغییر در پارامترهای مدل است. تحلیل حساسیت نقش کلیدی در تحلیل‌های مربوط به سیلاب دارد و استفاده از آن برای تحلیل‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت توصیه شده است. تحلیل حساسیت یک دید کلی برای مطالعه نتایج مدل ایجاد می‌کند که این دید برای پیش‌بینی پتانسیل خطر مهم خواهد بود.

در این مطالعه، برای بررسی حساسیت پارامترهای مدل SWMM، از روش تحلیل حساسیت جزئی (مطلق) استفاده شد. به این ترتیب مقدار اولیه هفت پارامتر مؤثر ارائه شده در جدول ۲ با توجه به دامنه تغییرات قابل قبول، برای زیر حوضه دوم تغییر یافت و مدل برای آن‌ها اجرا شد.

نتایج و بحث

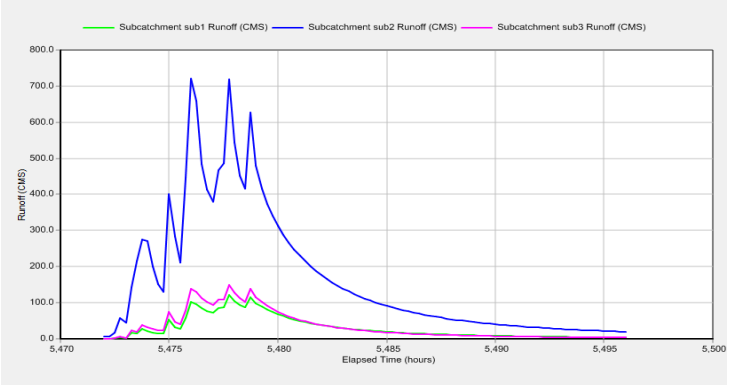
وضعیت توپوگرافی و کوهستانی استان ایلام، شرایطی را به‌وجود آورده است که افزایش حجم بارندگی‌ها، سیلابی شدن مسیرها و طغیان رودخانه‌ها را در پی خواهد داشت. با توجه به پارامترهای ورودی برای هر زیرحوضه، هیدروگراف بارش رواناب برای بزرگ‌ترین بارش به‌وقوع پیوسته در صد سال اخیر

به‌دست آمد (شکل ۵). همان‌طور که در هیدروگراف معلوم است، زیرحوضه دوم دارای رواناب بسیار بیشتری نسبت به دو زیرحوضه دیگر است، که از جمله دلایل آن، وسعت بیشتر زیرحوضه و درصد نفوذناپذیری بالای آن می‌باشد. همچنین، هیدروگراف سیلاب در خروجی دره ارغوان و قبل از ورود به شهر برای بارش مذکور به‌دست آمد (شکل ۶).

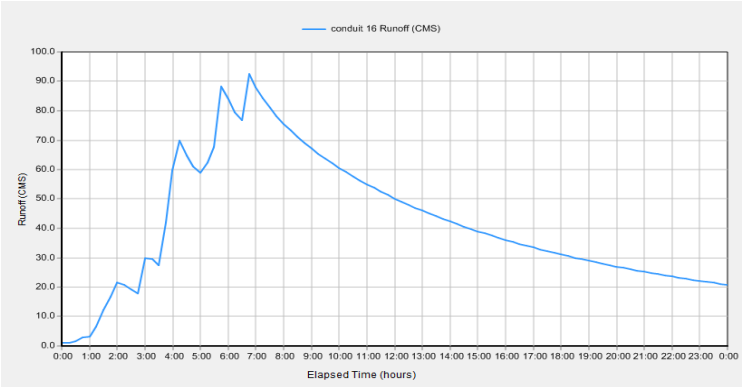
با توجه به این‌که سرشاخه اصلی که از واحد کوهستان وارد شهر ایلام می‌شود، از سمت دره ارغوان می‌باشد، موقعیت این دره نسبت به شهر ایلام و خروجی این حوزه آبخیز در شکل ۷ مشخص شده است.

جدول ۲- مقادیر اولیه و دامنه تغییر پارامترها برای تحلیل حساسیت مدل

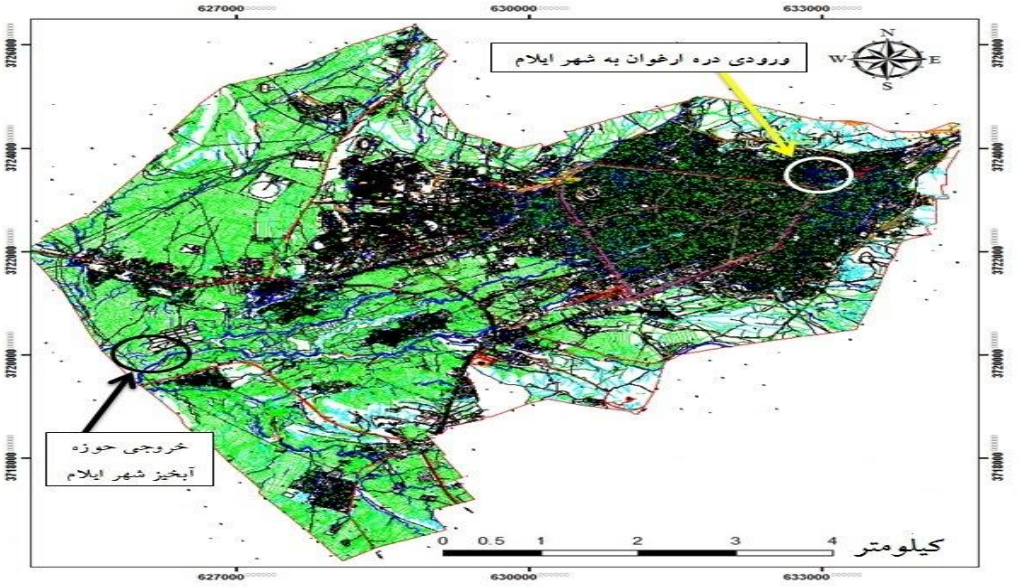
پارامتر	مقادیر اولیه	دامنه تغییرات مجاز	منبع
درصد مناطق نفوذناپذیر	۲۴/۲۱	۳۰+ تا ۳۰-	Temprano et al (2006)
شیب (درصد)	۲۴/۴	۳۰+ تا ۳۰-	Temprano et al (2006)
عرض معادل (متر)	۴۳۹۰	۳۰+ تا ۳۰-	Temprano et al (2006)
مساحت زیرحوضه (هکتار)	۸۳۱۸	۳۰+ تا ۳۰-	Rossman (2005)
ضریب زبری منینگ برای مناطق نفوذناپذیر	۰/۰۱۵	۰/۰۳۳ تا ۰/۰۱۱	Huber and Dickinson (1992)
ضریب زبری منینگ برای مناطق نفوذپذیر	۰/۱۳	۰/۸ تا ۰/۰۲	Huber and Dickinson (1992)
ابعاد کانال (متر مربع)	متغیر	۱۵+ تا ۱۵-	نگارنده



شکل ۵- هیدروگراف بارش رواناب مربوط به بارش ۷ آبان ۱۳۹۴ با بارش ۱۸۴ میلی‌متر در مدت هفت ساعت

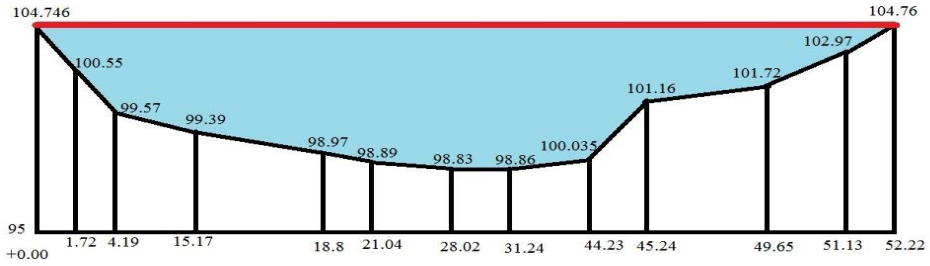


شکل ۶- هیدروگراف سیلاب در خروجی دره ارغوان و قبل از ورود به شهر



شکل ۷- موقعیت مکانی دره ارغوان و خروجی حوزه آبخیز شهر ایلام

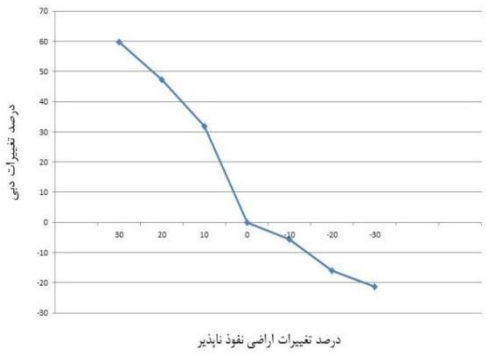
اعتبارسنجی مدل: از آن‌جایی که هیچ ایستگاه اندازه‌گیری هیدرومتری برای اندازه‌گیری دبی در داخل حوضه وجود نداشت، در این تحقیق، اقدام به اندازه‌گیری بیشترین دبی به‌وقوع پیوسته در سالیان اخیر با توجه به اثر داغاب در فاصله ۷۰۰ متری نقطه خروجی زیرحوضه دوم شد (شکل ۸). با توجه به این که بیشترین دبی به‌وقوع پیوسته در سالیان اخیر مربوط به ۷ آبان ۱۳۹۴ می‌باشد، میزان دبی شبیه‌سازی شده به‌وسیله مدل و دبی اندازه‌گیری شده به‌ترتیب ۷۲۰ و ۷۷۰ متر مکعب به‌دست آمد.



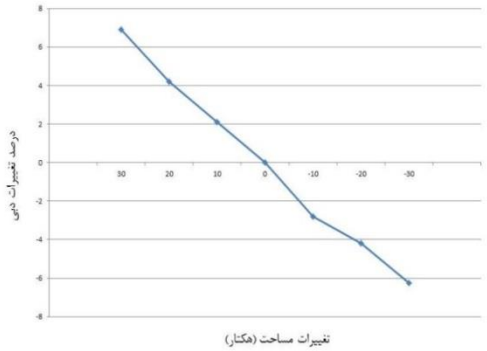
شکل ۸- نمای شماتیک از مقطع اندازه‌گیری شده

برای بررسی میزان انطباق هیدروگراف شبیه‌سازی شده و مشاهداتی از روابط ریاضی استفاده می‌شود. رایج‌ترین روابط ریاضی که در بیشتر مطالعات هیدرولوژی شهری از آن‌ها استفاده می‌شود، شاخص خطای نسبی و شاخص بایاس می‌باشد. لذا، پس از اجرای مدل، به‌منظور اعتبارسنجی آن از این شاخص‌ها استفاده و مقدار شاخص خطای نسبی و بایاس به‌ترتیب برای واقعه بررسی شده برابر ۰/۰۶۵ و ۳/۲۵ تعیین شد. در نتیجه می‌توان گفت انطباق خوبی بین رواناب شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای وجود دارد و مدل SWMM دقت مورد نیاز برای شبیه‌سازی رواناب شهری را دارد.

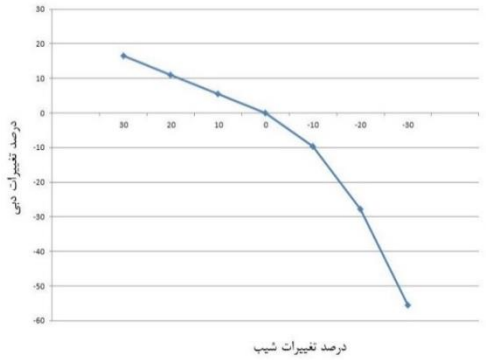
تحلیل حساسیت پارامترهای مهم مدل SWMM: برای انجام تحلیل حساسیت مدل به پارامترهای ورودی و تعیین پارامترهای مؤثر در شبیه‌سازی جریان از روش یک پارامتر در هر مرتبه استفاده شد. در این روش، در هر مرتبه اجرای مدل یک پارامتر تغییر کرده، بقیه پارامترها ثابت می‌مانند و اثر آن تغییر بر خروجی مدل، حساسیت پارامتر را مشخص می‌کند (شکل‌های ۹ تا ۱۵). پارامتری که در دامنه تغییرات خود بیشترین تأثیر را بر خروجی مدل داشته باشد، به‌عنوان پارامتر حساس انتخاب می‌شود.



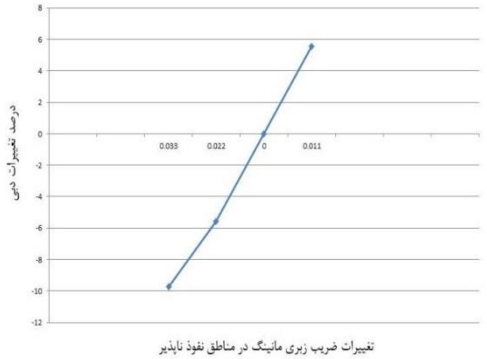
شکل ۹- درصد تغییرات اراضی نفوذناپذیر و تأثیر آن بر دبی اوج



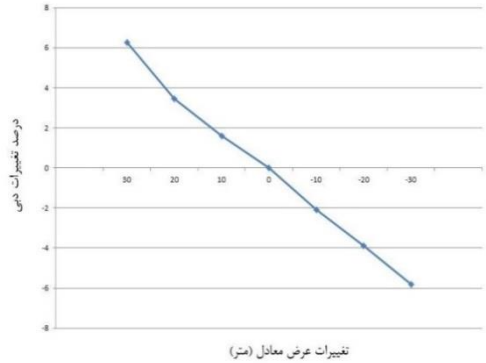
شکل ۱۲- تغییرات مساحت و تأثیر آن بر دبی اوج



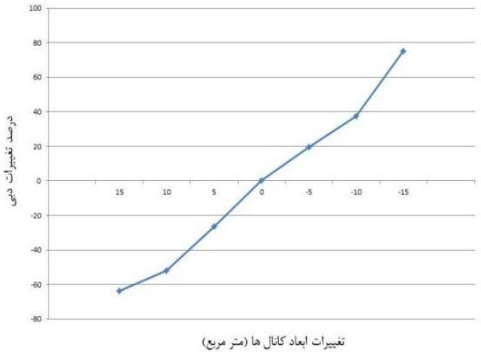
شکل ۱۰- درصد تغییرات شیب و تأثیر آن بر دبی اوج



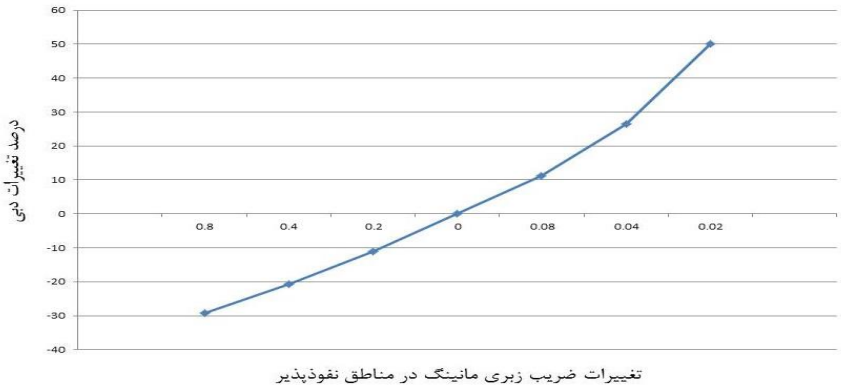
شکل ۱۳- تغییرات ضریب زبری در مناطق نفوذناپذیر و تأثیر آن بر دبی اوج



شکل ۱۱- تغییرات عرض معادل و تأثیر آن بر دبی اوج



شکل ۱۴- تغییرات ابعاد کانال‌ها و تأثیر آن بر دبی اوج



شکل ۱۵- تغییرات ضریب زبری در مناطق نفوذپذیر و تأثیر آن بر دبی اوج

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج تحلیل حساسیت، مشخص شد که مهمترین عامل مؤثر در ایجاد سیلاب شهری در حوزه آبخیز شهر ایلام، ابعاد کانال‌های شهری است. به‌طوری که با افزایش ۱۵ متر مربعی ابعاد کانال‌های سطح شهر ایلام، دبی پیک ۶۳/۸ درصد کاهش می‌یابد و با کاهش ۱۵ متر مربعی ابعاد آن، دبی پیک سیلاب حدود ۷۵ درصد افزایش می‌یابد. این در حالی است که در بازدیدهای میدانی صورت گرفته از کانال‌های سطح شهر ایلام، مشاهده شد که بیشتر کانال‌ها در اثر دلایل مختلف با مشکل کاهش سطح مقطع عبوری مواجه هستند (شکل ۱۶). در محدوده حوزه آبخیز شهری ایلام چندین شبکه آبراهه وجود دارند که مشرف به شهر ایلام هستند و کلیه آب‌های سطحی وارد شبکه معابر شهر ایلام می‌شوند. شاید آنچه که در تشدید سیلاب اخیر شهر ایلام مؤثر بوده و حجم خسارات را بالا برده است، از بین رفتن مسیل‌های فصلی و اتفاقی درجه دو و سه در داخل شهر ایلام می‌باشد. منطقه بالادست شهر ایلام و ارتفاعات آن‌ها چیزی جدا از شهر ایلام نیست و به لحاظ سامانه‌های دینامیک بیرونی و فرایندهای پویای ریخت‌شناسی خارج و داخل شهر به‌هم وابسته‌اند. بخشی از مسیل‌های فصلی در سطح شهر که از ارتفاعات سرچشمه می‌گیرند و قبل از ایجاد و توسعه شهر فعال بوده‌اند، به‌وسیله مسئولین شهری محدود و سربسته شده، بالای آن تبدیل به خیابان شده است.

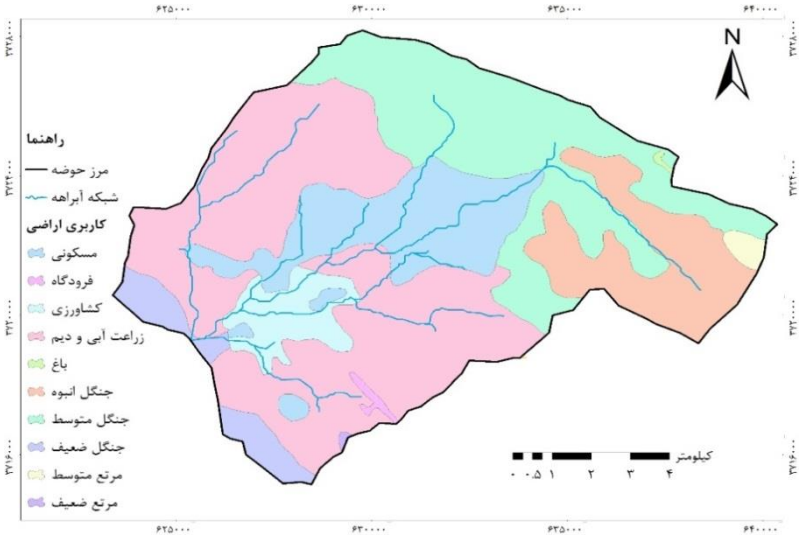
شکل ۱۶- نمونه‌ای از مشکلات کانال‌های شهر ایلام

دومین عامل مؤثر در ایجاد سیلاب در شهر ایلام، درصد اراضی غیر قابل‌نفوذ است که برای بررسی تأثیر این پارامتر با فرض افزایش ۳۰ درصدی اراضی نفوذناپذیر، دبی پیک ۵۹/۷ درصد افزایش می‌یابد و کاهش ۳۰ درصدی آن با کاهش ۲۱/۴۴ درصدی دبی پیک سیلاب همراه است. اراضی نفوذناپذیر علاوه بر اثری که در کاهش نفوذپذیری دارند، با کاهش ضریب زبری باعث افزایش سرعت رواناب شهری و کاهش زمان تمرکز می‌شوند. طبق نقشه کاربری اراضی حوضه، بیشترین میزان اراضی نفوذناپذیر در زیرحوضه دوم قرار دارد که همین عامل در افزایش میزان رواناب نقش اساسی دارد (شکل ۱۷). ضمناً با توجه به این‌که شهر ایلام در حال حاضر در سمت شمال، شرق و شمال غربی تا کوهپایه توسعه یافته، دیگر امکان گسترش در این قسمت‌ها وجود ندارد. بنابراین، روند توسعه آتی این شهر به سمت مناطق کم شیب اطراف شهر در سمت جنوب و جنوب غربی خواهد بود که گسترش کنونی شهر ایلام این موضوع را تأیید می‌کند و با توجه به شیب کم این مناطق، تأثیر آن در افزایش دبی پیک نسبت به مناطق پرشیب کمتر خواهد بود.

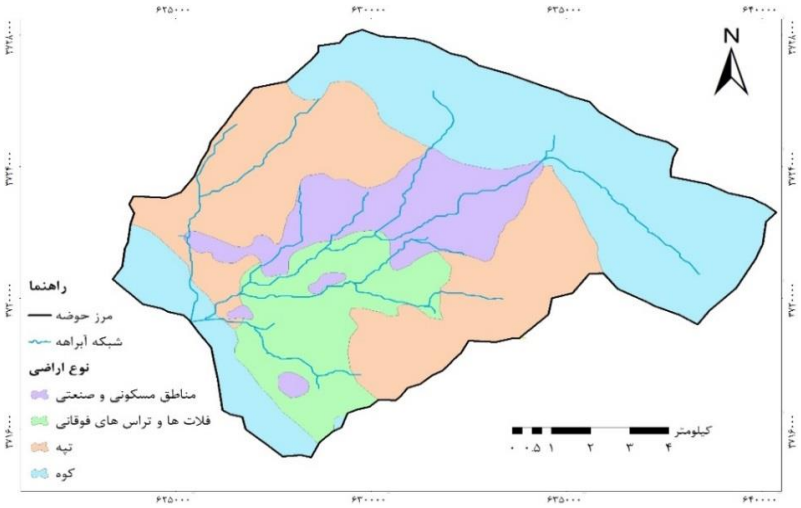
سومین عاملی که بیشترین تأثیر را بر دبی پیک سیلاب دارد، ضریب زبری منینگ در مناطق نفوذپذیر

است. در محدوده رایج تعیین شده به‌وسیله پژوهشگران، برای تحلیل حساسیت این پارامتر، به ازای ضریب زبری ۰/۰۲ در حوضه شهر ایلام دبی پیک سیلاب ۵۰ درصد افزایش می‌یابد و به ازای ضریب زبری ۰/۸ دبی پیک سیلاب به میزان ۲۹ درصد کاهش می‌یابد. لذا، با اتخاذ تدابیری (توسعه پوشش گیاهی و ...)، به‌منظور افزایش ضریب زبری، می‌توان دبی پیک سیلاب را به مقدار قابل توجهی کاهش دارد. بنابراین، هر چند توسعه فضاهای سبز شهری در هر نقطه‌ای تأثیر چشم‌گیری در کاهش رواناب خواهد داشت، ولی توجه به این امر در مناطقی که سیل‌خیزی بیشتری در شهر ایلام دارند (زیرحوضه شماره ۲) ضرورت می‌یابد. ضمن این‌که، این زیرحوضه بیشترین مساحت را دارد و در اطراف مناطق مسکونی واقع شده و رواناب آن به‌طور مستقیم به درون شهر وارد می‌شود. لذا، باید بیشترین اهمیت به احیای پوشش گیاهی آن داده شود.

شیب، چهارمین عامل مؤثر بر دبی پیک سیلاب است. به ازای افزایش ۳۰ درصدی شیب حوضه، دبی پیک ۱۶/۶۶ درصد افزایش و به ازای کاهش ۳۰ درصدی شیب حوضه، دبی پیک سیلاب به میزان ۵۵/۵ درصد کاهش می‌یابد. با توجه به این‌که حوزه آبخیز شهر ایلام، به‌جز منطقه جنوب شهر، ارتفاعات را در برگرفته و از شرق و غرب به واحدهای تپه‌ماهوری، از شمال به واحد کوهستان و از جنوب و جنوب غرب به مناطق نسبتاً هموار و شبه‌دشت محدود می‌شود، شیب، تأثیر قابل توجهی در ایجاد سیلاب در شهر ایلام دارد (شکل ۱۸).



شکل ۱۷- نقشه کاربری اراضی حوضه



شکل ۱۸- نقشه طبقه‌بندی اراضی حوضه

گسترش شهر به سمت ارتفاعات و تسخیر اراضی شیب‌دار پای کوه، ضمن آسیب‌پذیری بیشتر شهر در برابر سیلاب‌های دوره‌ای، بر حجم سیلاب حاصل از سطوح مذکور نیز افزوده است. به‌عبارت دیگر، در حال حاضر شهر ایلام در شرایطی قرار گرفته که بخشی از آن مستقیماً در معرض سیلاب‌های شدید دوره‌ای و بخش وسیعی نیز با مشکل آب گرفتگی سطح معابر و آلودگی‌های ناشی از آن قرار دارد. سایر عوامل مؤثر بر ایجاد سیلاب در شهر ایلام، به‌ترتیب شامل مساحت حوضه، عرض معادل حوضه و ضریب زبری منینگ در مناطق نفوذناپذیر می‌شوند.

یافته‌های این پژوهش با نتایج حاصل از تحقیق Zare (۱۹۹۲) که از بین رفتن مسیل‌های طبیعی، توسعه شهری و همچنین، گسترش شهر در بستر رودخانه را از علل بروز سیلاب در محدوده شهر می‌داند، مطابقت دارد. همچنین، نتایج این مدل با نتایج Nikbakht و Hassanpour (۲۰۱۴) که با استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی-هیدرولیکی برای رواناب شهری نشان داد که به ازای هر درصد افزایش در مناطق نفوذناپذیر حوضه، دو تا چهار درصد به اوج سیلاب نسبت به حالت قبل از توسعه اضافه می‌شود، انطباق دارد. نتایج این تحقیق با نتایج تحقیق Rostami و Kurd (۲۰۱۶) و Rostami و Kazemi (۲۰۱۷) که زیرحوضه شماره ۲، دارای بیشترین خطر بروز سیلاب به‌دلیل بالا بودن مساحت حوضه و درصد بالای اراضی غیر قابل نفوذ می‌باشد، انطباق دارد. همچنین، نتایج این پژوهش با نتایج Jang و همکاران (۲۰۰۷) که استفاده از مدل SWMM اثرات شهرسازی را بر روی رواناب تولیدی را به‌خوبی نشان می‌دهد، انطباق دارد.

با استفاده از نتایج این پژوهش، می‌توان ضمن شناسایی مناطق پرخطر و دلایل ایجاد خطر سیلاب، مدیریت جامعی را در خصوص این مناطق و کاربری‌های موجود در این مناطق و راه‌کارهای مناسب برای کاهش خطر سیلاب در این نواحی ارائه کرد. با استفاده از مدل، این امکان برای پژوهشگران و مدیران اجرایی به وجود می‌آید تا سناریوهای مختلف مدیریتی را (که امکان اجرای آن‌ها در زمان کوتاه و بدون صرف هزینه سنگین وجود ندارد) مورد ارزیابی قرار داده، با تحلیل نتایج، بهترین تصمیم را اتخاذ کرد. از این مدل می‌توان برای طرح‌های مدیریت رواناب سطحی و تعیین ابعاد بهینه شبکه جمع‌آوری و دفع آب‌های سطحی در حوضه شهری ایلام نیز استفاده کرد. با توجه به فقدان آمار برای واسنجی مدل‌های رواناب شهری در شهر ایلام، پیشنهاد می‌شود که این شهر به‌عنوان حوضه معرف انتخاب شود و کلیه اطلاعات آماری مربوط به بارندگی، هیدرولوژی و هیدرولیک جریان و سایر مواردی که برای شهرهای بزرگ دنیا مرسوم است، ثبت شده و برای واسنجی مدل‌های رواناب شهری مورد استفاده قرار گیرند. با توجه به این‌که بیشتر شهرهای کشور دارای معضل آبگرفتگی معابر هستند، پیشنهاد می‌شود تا ضرورت اجرای طرح پایش برای جمع‌آوری و ثبت داده‌های پایه در این زمینه، در دستور کار دستگاه‌های اجرایی قرار گیرد تا بتوان نتایج دقیق‌تری را به‌دست آورده و مناسب‌ترین روش مدیریت سیلاب‌های شهری را معرفی کرد.

منابع مورد استفاده

1. Alizadeh, A. 2008. Principles of applied hydrology: surface runoff. Imam Reza University Press, Mashhad, 811 pages (in Persian).
2. Badiezadeh, S., A. Bahremand and A. Dehghani. 2015. Urban flood management by simulation of surface runoff using SWMM model in Gorgan City, Golestan Province. Journal of Soil and Water Conservation Studies, 2(4): 155-170 (in Persian).
3. Nikbakht, S. and F. Hassanpour. 2014. Estimated flood peak in Zahedan urban watersheds using empirical relationships. 1st National Conference on Architecture, Civil and Urban Environment (in Persian).
4. Ghafouri Roozbahani, A. 1989. A digital simulation of the hydrological cycle in the remittance and experimental domain of the Yellow River. MSc Thesis, University of Tehran, 121 pages (in Persian).
5. Huber, W.C and R.E. Dickinson. 1992. Storm water management model user's manual, version 4. Environmental Protection Agency, Georgia, 500 pages.
6. Jang, S., M. Cho, J. Yoon, Y. Yoon, S. Kim, G. Kim, L. Kim and HAksoyh. 2007. Using SWMM as a

tool for hydrologic impact assessment. Journal of Desalination, 212(1-3): 344-356.
7. M.P.C.A. 2015. Minnesota storm water best management practices manual, Chapter 7 and 9. Minnesota Pollution Control Agency.
8. National Disaster Management Authority Government of India. 2010. Management of Urban Flooding, New Delhi, 110 029.
9. Rossman, L.A. 2009. Storm water management model user's manual Ver. 5.0.EPA/60 0/R-05/040. National Risk Management Research Laboratory, United States Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio.
10. Rossman, L.A. 2005. Storm water management model user manual. National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development United States Environmental Protection Agency.
11. Rostami Khalaj, M., M. Mahdavi, Sh. Khalighi Sigarodi and A. Salajegheh. 2012. Sensitivity analysis of variables affecting urban flooding using SWMM model. Journal of Watershed Management Research, 3(5): 81-91 (in Persian).
12. Rostami, N. and L. Kurd. 2016. Prioritization of sub-basin flooding in urban logic, case study: Ilam City Watershed. National Conference on Applied Agricultural Research (in Persian).
13. Rostami, N. and Y. Kazemi. 2017. Flood risk zoning in the city of Ilam using AHP and GIS methodology. Research Project, Ilam University (in Persian).
14. Salajegheh, A., M. Mahdavi and A. Fathabadi. 2009. Effect of neuro-fuzzy methods and statistical models in simulation of the rainfall-runoff process. Pasture and Watershed Journal, 1: 65-77 (in Persian).
15. Shang, J. and J.P. Wilson. 2009. Watershed urbanization and changing flood behavior across the Los Angeles metropolitan region. Natural Hazards, 48: 41–57.
16. Sheeder, S.A., J.D. Ross and T.N. Carlson. 2002. Dual urban and rural hydrograph signals in three small watersheds. American Water Resources Association, 38(4): 1027-1040.
17. Temprano, J., O. Arango, J. Cagiao, J. Suarez and I. Tejero. 2006. Storm water quality calibration by SWMM: a case study in northern Spain. Water SA, 32(1): 55-63.
18. U.S. Environmental Protection Agency. 2015. SWMM 5.1 user's manual, EPA/600/R-05/040. National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, Cincinnati, OH.
19. Zare, J. 1992. Causes and factors of flood and water damage in urban areas of Iran and its preventive methods. 1st International Conference on Natural Disasters in Urban Areas, Tehran (in Persian).