



مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس

# پژوهش‌های آبخیزداری

شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱



مادان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

## بر آورد رواناب شهری به منظور تعیین نقاط سیل‌گرفتنی با استفاده از مدل SWMM در شهر ملایر

فاطمه زندی<sup>۱</sup>، محمد بشیرگنبد<sup>۲\*</sup>

۱ - دانش‌آموخته‌ی کارشناسی‌ارشد آبخیزداری، دانشکده‌ی منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

۲ - استادیار گروه مهندسی طبیعت، دانشکده‌ی منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

### چکیده‌ی مبسوط

#### مقدمه و هدف

با توجه به حجم زیاد فعالیت‌های انسانی و تجاری یکی از مهم‌ترین اهداف زیرساخت‌ها، جمع‌آوری و انتقال رواناب‌های شهری، مهار سیلاب و جلوگیری از آب‌گرفتگی در شهرها است. به منظور برآورد صحیح رواناب و خصوصیات واحدهای آب‌شناخت و کانال‌ها به‌کارگیری مدل‌های مناسب آب‌شناختی و آبی مهم است. با توجه به اهمیت موضوع، این پژوهش با هدف برآورد رواناب شهری ملایر به منظور تعیین نقاط احتمالی سیل‌گرفتنی با استفاده از مدل مدیریت طوفان آب (SWMM) انجام شد.

#### مواد و روش‌ها

بر پایه‌ی گزارش‌های فنی موجود، ابتدا محدوده‌ی زیر آبخیزها، گره‌ها و کانال‌های اصلی شهر تعیین شد. با استفاده از مدل رقمی ارتفاعی جهت جریان و شیب منطقه تعیین شد و ۱۱ عدد زیر آبخیز شناسایی شد. همچنین با صرف‌نظر از اندازه‌ی ژرفای اولیه‌ی آب و سطح ماندابی ۱۱ عدد گره تعیین شد. با استفاده از داده‌های بارش روزانه ایستگاه همدید ملایر در دوره‌ی آماري ۲۰۲۰-۱۹۹۲، بارش نه‌ساعته با دوره‌ی بازگشت دو سال به‌عنوان بارش طرح محاسبه و وارد مدل شد. شکل هندسی کانال‌ها، مستطیل باز و از روش موج جنبشی برای روندیابی جریان در کانال‌ها استفاده شد. اندازه‌های بیشترین آب‌دهی عبوری کانال‌ها با استفاده از رابطه‌ی سطح مقطع جریان و سرعت جریان برای بارش طرح ۹ ساعته با دوره‌ی بازگشت دو سال محاسبه

#### نوع مقاله: پژوهشی

\*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: mbgonbad@ut.ac.ir

استناد: زندی، ف.، بشیرگنبد، م. ۱۴۰۳. برآورد رواناب شهری به‌منظور تعیین نقاط سیل‌گرفتنی با استفاده از مدل SWMM در شهر ملایر. پژوهش‌های آبخیزداری، ۳۷ (۱): ۳۲-۱۸.

شناسه‌ی دیجیتال: 10.22092/WMRJ.2023.361283.1523

تاریخ دریافت: ۰۹/۱۱/۱۴۰۱، تاریخ بازنگری: ۰۳/۰۱/۱۴۰۲، تاریخ پذیرش: ۳۱/۰۳/۱۴۰۲، تاریخ انتشار: ۰۱/۰۱/۱۴۰۳

پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۳، دوره‌ی ۳۷، شماره‌ی ۱، شماره‌ی پیاپی ۱۴۲، بهار ۱۴۰۳، صفحه‌های ۱۸ تا ۳۲.

©نویسندگان

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



شد. برای واسنجی مدل از متغیرهای درصد مناطق نفوذناپذیر، ذخیره‌ی چالایی و ضریب زبری مناطق نفوذناپذیر در بازه‌ی تغییر دامنه‌ی مجاز اصلاح استفاده شد. به‌منظور ارزیابی مدل از ضریب کارایی نش-ساتکلیف و ریشه‌ی میانگین مربعات خطا استفاده شد.

### نتایج و بحث

نتایج نشان داد پس از بهینه‌سازی اندازه‌های متغیرها، ضریب کارایی نش-ساتکلیف و جذر میانگین مربعات خطا به‌ترتیب ۰/۷۳ و ۰/۰۲ بود. از کل بارش ۱۴/۵۴ میلی‌متری، اندازه‌ی ۵/۵۳ میلی‌متر مربوط به تلفات نفوذ، اندازه‌ی ۷/۵۵ میلی‌متر مربوط به رواناب سطحی و اندازه‌ی ۱/۴۵ میلی‌متر مربوط به ذخیره‌ی چالایی بود. نتایج نشان داد زیرآبخیزهایی که در شمال شهر و مشرف به بلندی‌ها بودند و به گره‌ی شماره‌ی ۱۰ منتهی می‌شدند حجم و آب‌دهی رواناب بیش‌تری داشتند و لازم است در این منطقه در طراحی و گسترش کانال‌ها تجدیدنظر شود. همچنین زیر آبخیزهای بخش غربی شهر (زیر آبخیز شماره‌ی ۴) و بخش جنوب‌غربی (زیر آبخیز شماره‌ی ۸) با ۰/۶۵۱ و ۰/۵۴۷ به‌ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین توان سیل‌خیزی را داشتند.

### نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش نتایج نشان داد تقریباً نیمی از شهر در رخداد بارش‌ها، تحت تأثیر خطرهای سیلاب قرار خواهند گرفت. از این‌رو شبکه‌ی زهکشی کنونی کارایی لازم برای تخلیه رواناب شهری در بخش شمال شهر را ندارند و تعیین ابعاد بهینه‌ی کانال‌ها ضروری است. به‌دلیل برف‌گیر بودن بلندی‌های شرقی منطقه‌ی مطالعه‌شده و با توجه به زمین‌شناسی آن پیشنهاد می‌شود از مدل‌هایی که توانایی محاسبه‌ی رواناب ناشی از ذوب برف را دارند در پژوهش‌های آتی استفاده شود.

### واژگان کلیدی: رواناب شهری، شهر ملایر، مدل‌سازی، SWMM، واسنجی

#### مقدمه

اندازه‌های رواناب تولیدشده در یک بارش، چگونگی انتقال، مدیریت و تخلیه‌ی رواناب‌های تولیدشده از مسائل پیش‌روی پژوهشگران و سازمان‌های مربوطه است. در سال‌های اخیر استفاده از مدل‌های کامپیوتری برای برآورد و شبیه‌سازی رواناب در آبخیزهای شهری گسترش زیادی داشته است. مبنای انتخاب هر یک از این مدل‌ها به‌وسیله‌ی پژوهشگران قابلیت‌های متفاوت و اندازه‌ی پیچیدگی آنها بوده است. از جمله این مدل‌ها می‌توان به مدل سلول خودسامانده دوعبده سیل CADDIES (گمیر و همکاران ۲۰۱۳)، مدل طغیان سیل شهری مبتنی بر سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی GUFIN (شن و همکاران ۲۰۰۹)، مدل آبی دوعبده سیل LISFLOOD (بیئتس و دی‌رو ۲۰۰۰) و مدل مدیریت طوفان آب SWMM (روسمن و همکاران ۲۰۰۷) اشاره کرد. از این میان مدل SWMM یکی از مناسب‌ترین و متداول‌ترین روش‌های برآورد رواناب در آبخیزهای شهری است که در پژوهش‌های بسیاری استفاده‌شده است (الیس و همکاران ۲۰۱۴، توبی و همکاران ۲۰۱۵، لوآن و همکاران ۲۰۱۷، شهاب و همکاران ۲۰۱۸، رابری و همکاران ۲۰۱۸). این مدل، نخستین مدل جامع، رایگان و کاربرپسند برای بررسی رواناب شهری است که دستاورد پژوهش بخش منابع آب آژانس حفاظت محیط‌زیست ایالات‌متحده است. سادگی کار و قدرت آن در تحلیل و مدیریت کمی و کیفی سیلاب در آبخیزهای شهری از ویژگی‌های این مدل است (ابراهیم‌زاده و همکاران ۲۰۲۱). با توجه به کاربرد موفق این مدل در پژوهش‌های پیشین در این پژوهش نیز از این مدل برای مدل‌سازی رواناب سطحی در شبکه‌ی زهکشی

از دیرباز، سیلاب یکی از مشکل‌های اصلی جامعه‌ی بشری بوده است. این پدیده سالانه در نقاط مختلف جهان، خسارت‌های جانی و مالی گوناگونی را به‌همراه دارد. سیلاب‌های شهری به‌دلیل اینکه می‌توانند خسارت‌های جبران‌ناپذیر زیادی را در مناطق به‌بارآورند، اهمیت بیش‌تری دارند (زکی زاده و همکاران ۲۰۲۲). در سال‌های اخیر، تلفات و خسارت‌های ناشی از سیل در شهرها در ابعاد گوناگونی گسترش یافته است. دلیل این مسئله، تراکم جمعیت و اثر گسترش پهنه‌های نفوذناپذیر در این مناطق است؛ بر پایه‌ی آمار اعلام‌شده، مناطق شهری ۳۰ تا ۱۰۰ درصد حجم رواناب‌ها را افزایش می‌دهند (بارون و همکاران ۲۰۱۱). به‌طور کلی می‌توان گفت یکی از گسترده‌ترین اثرهای توسعه‌ی شهری، تغییر در اندازه جریان و شکل بارش است و از سویی دیگر، اندازه‌ی نفوذ باران به سمت ذخیره‌ی عمقی کاهش می‌یابد و در نهایت حجم و آب‌دهی اوج سیلاب افزایش می‌یابد (شن و همکاران ۲۰۰۹). طراحی شهری مبتنی بر ایجاد شبکه‌ی جمع‌آوری آب‌های سطحی با ابعاد مناسب یکی از راه‌کارهای پیش‌گیری از سیلاب شهری است (بارکو و همکاران ۲۰۰۸). توسعه‌ی شهری یا نبودن بهره‌برداری و نگهداری مناسب موجب اشباع شدن سریع شبکه‌ی جمع‌آوری رواناب می‌شود و با کوچک‌ترین بارندگی، محل‌های عبور و کوچه‌ها دچار آب‌گرفتگی می‌شوند (تاج‌بخش و همکاران ۲۰۱۲). از این‌رو برای توسعه‌ی شهری، رفع مشکلات ناشی از جاری شدن سیلاب در رخداد بارندگی و آب‌گرفتگی محل‌های عبور و استفاده‌ی بهینه‌ی منابع آب، برنامه‌ریزی هدفمند لازم است (شهبازی و همکاران ۲۰۱۷). مدل‌سازی کمی

شهر ملایر استفاده شد.

در سال‌های اخیر در ایران و جهان پژوهش‌های زیادی در استفاده از این مدل انجام شده است. در پژوهشی خلیقی‌سیگارودی و همکاران (۲۰۱۵) به منظور واسنجی و ارزیابی مدل SWMM و شبیه‌سازی رواناب، از نقشه‌ی کاربری زمین‌ها، مدل رقمی ارتفاع و بازدهی‌های میدانی برای اجرای مدل استفاده کردند. مبنای کارایی مدل مزبور سه رخداد بارندگی و رواناب متناظر با آن در خروجی آبخیز در مقایسه با رواناب شبیه‌سازی شده بود. مقایسه‌ی آب‌دهی و ژرفای رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده با معیار ارزیابی نش-ساتکلیف برای سه رخداد استفاده شده در این مدل سازی به ترتیب ۰/۶۹، ۰/۸۵ و ۰/۵۲ به دست آمد. نتایج این پژوهش نشان داد که مدل SWMM برای طراحی و ارزیابی سامانه‌های شبکه‌ی زهکشی شهری کارآمد است. در پژوهشی رضایی و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از مدل SWMM مهم‌ترین متغیر تأثیرگذار بر اندازه‌ی رواناب منطقه‌ی ۹ شهر مشهد را بررسی کردند. تحلیل حساسیت مدل SWMM با استفاده از ۸ متغیر استفاده شده نشان داد تأثیرگذارترین متغیر درصد مناطق نفوذناپذیر بود. ضریب زبری مانینگ، عرض معادل، شیب، بلندی ذخیره در مناطق نفوذناپذیر و مناطق نفوذپذیر بدون ذخیره‌ی سطحی در رتبه‌های بعدی بودند. ارزیابی مدل نیز با استفاده از معیارهای نش-ساتکلیف (NSE) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) نشان داد مدل SWMM نتایج قابل قبولی در شبیه‌سازی رواناب در منطقه‌ی مطالعه شده داشت. وکیلی‌تجره و همکاران (۲۰۲۰)، در پژوهشی به منظور برآورد تغییرات آب‌دهی و حجم رواناب منتهی به شهر در نتیجه‌ی افزایش سطوح نفوذناپذیر، تغییر کاربری زمین‌های آبخیز آب‌شوران در سه دوره‌ی زمانی سال‌های ۱۳۷۰، ۱۳۸۰ و ۱۳۹۷، با استفاده از تصویرهای لندست را ردیابی کردند. در این پژوهش برای بررسی تغییرات آب‌دهی اوج رواناب، از مدل SWMM استفاده شد و پس از واسنجی مدل SWMM بر اساس رخدادهای بارش-رواناب مشاهده‌ای، نتایج واسنجی و صحت‌سنجی، تطابق شبیه‌سازی‌های مدل تأیید شد. برازش تغییرات کاربری و سیلاب‌های متناظر در طول دوره‌ی بررسی نشان داد که مساحت محدوده‌های شهری افزایش یافته است. نتایج نشان داد که با افزایش سطوح نفوذناپذیر شهری، آب‌دهی اوج و حجم رواناب برای بارش با دوره‌ی بازگشت ۲۰ سال افزایش یافت. ابراهیم‌زاده و همکاران (۲۰۲۱)، از مدل SWMM برای مشخص کردن نقاط حساس به آب‌گرفتنی در شهر فولادشهر استان اصفهان استفاده کردند. نتایج این پژوهش نشان داد برای دوره‌ی بازگشت ۲۵ سال کانال‌های ۲، ۱۶، ۱۷، ۲۵ و ۳۱ حساس به آب‌گرفتنی بودند. برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل سه رخداد بارندگی انتخاب شد. در فرایند واسنجی و اعتبارسنجی اندازه‌ی معیار NS در همه‌ی موردها

از ۰/۵ بیش‌تر بود. نتایج ارزیابی‌ها میان آب‌دهی، سرعت و ژرفا انطباق خوبی نشان داد.

در جنوب چین جیانگ و همکاران (۲۰۱۵)، شبیه‌سازی سیلاب شهر دونگ‌وان را با کاربرد نرم‌افزار SWMM برای دوره‌ی بازگشت‌های ۲، ۱۰، ۵ و ۲۰ سال بررسی کردند. آن‌ها بر اساس نتایج پیش‌بینی سیلاب شهری مدل SWMM را مناسب گزارش کردند. در جنوب کالیفرنیا بارکو و همکاران (۲۰۰۸)، کارایی مدل SWMM در شبیه‌سازی و واسنجی رواناب در آبخیز بالوناکریک را ارزیابی کردند. در این پژوهش نتایج تحلیل حساسیت متغیرها نشان داد دقت مدل SWMM زیاد بود و از آن می‌توان در آبخیزهای بزرگ هم استفاده کرد. در کارولینای شمالی رس و همکاران (۲۰۲۰) تأثیر شبکه‌ی زهکشی شهری روی سیلاب را بررسی کردند. از اهداف دیگر این پژوهش بررسی نقش گسترش شهر در تولید سیل و بهبود مدل‌سازی آب‌شناختی بود. در زیرآبخیزهای منطقه‌ی مزبور تغییرات درصد مناطق نفوذناپذیر در اثر توسعه‌ی شهری و شبکه‌ی زهکشی بررسی شد. نتایج این بررسی نشان داد افزایش معنی‌دار سطوح نفوذناپذیر سبب افزایش حجم رواناب و همچنین افزایش ضریب رواناب تا ۰/۴۴۶ شد. درحالی‌که زیرآبخیزهای با تراکم زهکشی بیشتر زمان تأخیر بیش‌تری را در مقایسه با دیگر زیرآبخیزها نشان دادند. ما و همکاران (۲۰۲۲) در پیش‌بینی دقیق سیلاب شهری با استفاده از مدل SWMM، برای واسنجی زمان واقعی متغیرهای مدل را اصلاح کردند. تجزیه و تحلیل ویژگی‌های نقاط غرقاب شهری در طول زمان سیلاب و تغییر بی‌درنگ متغیرهای مدل سبب شد تا خطای میان ژرفای رواناب در نقطه‌ی درگیر سیل و ژرفای سیل اندازه‌گیری شده به حداقل برسد. ژانگ و همکاران (۲۰۱۹) در کشور چین در منطقه‌ی ژنگ‌ژو به‌وسیله‌ی واسنجی پویای مدل شبیه‌سازی سیل با دقت خوبی انجام شد (معیار ارزیابی نش-ساتکلیف بیش‌تر از ۰/۸) که در ارزیابی تلفات و خطر سیل اهمیت زیادی داشت. در منطقه‌ی شهری جنوب‌شرقی اتیوپی بی‌بی و همکاران (۲۰۲۲) تأثیر تغییرات کاربری زمین‌ها و تغییر اقلیم را روی حجم و آب‌دهی اوج سیل با استفاده از مدل SWMM بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که روند توسعه‌ی شهری و در نتیجه افزایش سطوح غیرقابل نفوذ از ۵۹/۷۳ به ۸۶/۰۱٪ با روند افزایشی آب‌دهی اوج رابطه‌ی مستقیم داشت. همچنین افزایش آب‌دهی اوج و حجم رواناب با افزایش سرعت بارش‌های شدید ناشی از تغییرات اقلیمی ارتباط مستقیم داشت. در شهر پکن ژو و همکاران (۲۰۲۳) با استفاده از داده‌های مشاهده‌ای محدود، سیل شهری را با هدف ارزیابی خسارت‌های آن مدل‌سازی کردند. در این پژوهش برای واسنجی و اعتبارسنجی سنجه‌های مدل از سه روش واسنجی تجربی، اعتبارسنجی ریاضی و اعتبارسنجی بر اساس بازدهی‌های میدانی استفاده شد. سپس اندازه‌ی بارش در

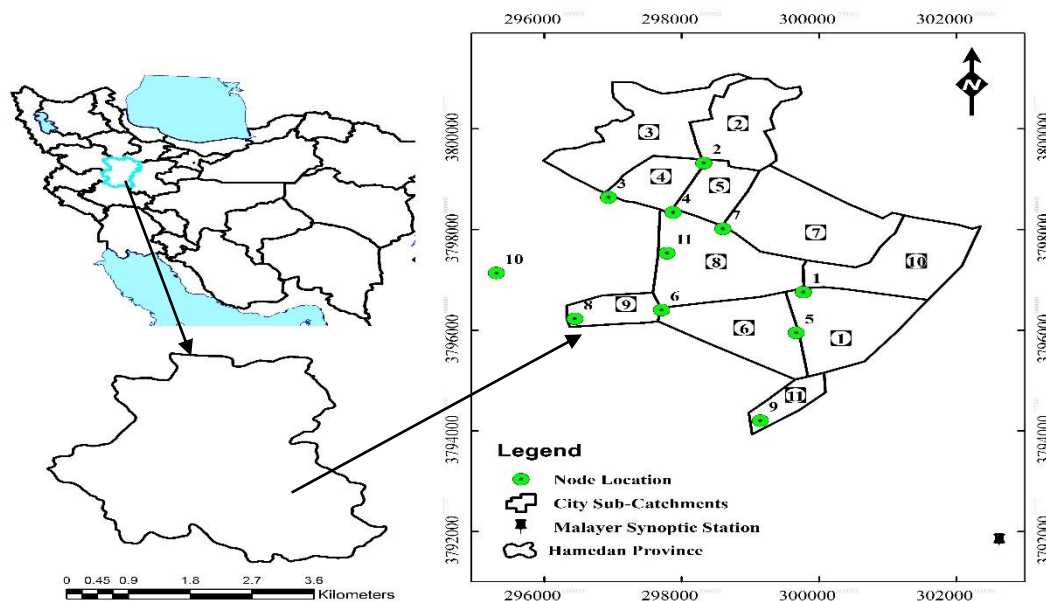
گستره‌ی آب‌گرفتگی شهر ملایر پهنه‌بندی شد تا بتوان در صورت وجود نقص در شبکه‌ی جمع‌آوری رواناب سطحی نسبت به رفع آن‌ها اقدام کرد.

### مواد و روش‌ها منطقه‌ی مطالعه‌شده

شهر ملایر در موقعیت جغرافیایی غرب ایران و جنوب شرقی استان همدان، میان طول جغرافیایی  $48^{\circ}15'45''$  تا  $48^{\circ}10'53''$  شرقی و عرض جغرافیایی  $34^{\circ}15'00''$  تا  $34^{\circ}20'50''$  شمالی است. بلندی این شهر از سطح دریا ۱۷۸۰ متر است و بافت اصلی شهر جلگه‌ای مسطح و در میان رشته کوه زاگرس است. میانگین دمای سالانه  $1/5^{\circ}C$  و میانگین بارندگی سالانه معادل  $329/2$  میلی‌متر است. مساحت شهر ۲۲۸۰ هکتار است. برپایه‌ی اقلیم نمای آمبرژه (۱۹۵۵) از دیدگاه آب و هوایی در اقلیم سرد و خشک است. این اقلیم در سال‌های اخیر گسترش زیادی از سمت شمال و شمال غرب داشته است. جریان‌های سطحی مشرف به شهر ملایر از نظر آب‌شناختی در زیر آبخیز رود گاماسیاب هستند که جزء سرشاخه‌های آبخیز کرخه به‌شمار می‌آید. موقعیت منطقه‌ی مطالعه‌شده در ایران و استان همدان در شکل ۱ نشان داده شده است.

دوره‌های بازگشت مختلف محاسبه و وارد مدل شد. نتایج این پژوهش نشان داد در دوره‌های بازگشت مختلف بخش‌هایی از شبکه‌ی هدایت آب‌های سطحی ظرفیت لازم برای عبور رواناب تولیدشده را نداشت.

با گسترش شهرنشینی و افزایش مناطق نفوذناپذیر سیلاب شهری نیز افزایش می‌یابد (سیلوا و همکاران ۲۰۲۰، میلر و همکاران ۲۰۱۴، برا و همکاران ۲۰۲۲، چیترا و همکاران ۲۰۱۵). نتایج برخی پژوهش‌ها در به‌کارگیری مدل SWMM مشخص کرد که از این مدل برای برنامه‌ریزی، مدیریت رواناب شهری و افزایش سطح خدمات شهری استفاده شده است. نتایج کارایی قابل قبول مدل SWMM برای شبیه‌سازی رواناب در مناطق شهری است. پس از شناخت مناطق آب‌گرفتگی و بروز سیلاب می‌توان از این مدل با سطح اطمینان زیاد برای طراحی شبکه‌های جمع‌آوری و دفع آب‌های سطحی و مدیریت رواناب در مناطق شهری استفاده کرد (بای و همکاران ۲۰۱۸). از این رو تاکنون پژوهش‌های زیادی در زمینه‌ی جمع‌آوری آب‌های سطحی در ایران انجام شده است، اما هنوز به اجرای رویکردهای نوین مدیریت رواناب شهری توجه زیادی نشده است. تاکنون در شهر ملایر در زمینه‌ی شبیه‌سازی رواناب سطحی با استفاده از مدل SWMM پژوهشی انجام نشده است. از این رو در این پژوهش رواناب ناشی از بارندگی طرح برآورد شد و همچنین



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه‌ی مطالعه‌شده در ایران و استان همدان.

Figure 1- Malayer city location in Hamedan province and Iran country.

بازدیدهای میدانی، بررسی نقشه‌ی پستی‌بلندی منطقه و اطلاعات نقشه‌های حدنگاری شهرداری ملایر مرز و شیب منطقه‌ی مطالعه‌شده برحسب درصد و با کمک نرم‌افزار ArcGIS.103 تعیین شد. موقعیت زیر آبخیزها در

محاسبه‌ی متغیرهای لازم برای مدل SWMM شبیه‌سازی بارش-رواناب در یک منطقه با استفاده از مدل SWMM نیازمند تعیین مرز منطقه‌ی پژوهش است. با استفاده از مدل رقومی ارتفاع منطقه (DEM)،

مناطق شمالی شهر می‌شد. خصوصیات محل برخورد جریان (گره‌ها)، شامل بیشترین ژرفای جریان و رقوم ارتفاعی است. این متغیرها نیز با اندازه‌گیری‌های میدانی محاسبه شد. مشخصات گره‌های اتصال در جدول ۲ ارائه شده است. خصوصیات مجراها با بازدیدهای میدانی و زمان تمرکز زیرآب‌خیزها با استفاده از روش کریپچ و برحسب ساعت محاسبه شد. تعیین مشخصات کانال‌های اتصال‌دهنده نیز از مراحل تکمیل فرایند مدل‌سازی آب‌شناختی است. این مشخصات در جدول ۳ نشان داده شده است. برای تعیین بلندی ذخیره در مناطق نفوذپذیر و نفوذناپذیر در هر زیرآب‌خیز از اندازه‌های توصیه شده به وسیله‌ی راهنمای نرم‌افزار برای تمام کاربری‌ها استفاده شد (یواس‌دبلیو‌اف ۱۹۸۲).

شکل ۱ نشان داده شده است. سپس متغیرهای مدل شامل ضریب زبری جریان (یواس‌دبلیو‌اف ۱۹۸۲) و سطوح (مک‌کوبین و همکاران ۱۹۹۶)، با استفاده از جدول‌های موجود در مدل محاسبه شد. سپس مساحت زیر آبخیزها برحسب کیلومترمربع با استفاده از نقشه‌های حدنگاری تعیین شد. همچنین، عرض معادل با استفاده از عرض مستطیل معادل (مهدوی و همکاران ۲۰۰۵) در محیط سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی محاسبه شد. خصوصیات مربوط به هر زیرآب‌خیز در جدول ۱ نشان داده شده است. کوچک‌ترین واحد آب‌شناخت ۰/۵۹ کیلومترمربع مساحت داشت که شامل بخشی از ورودی جنوب شهر می‌شد و بزرگ‌ترین واحد آب‌شناخت با مساحت ۲/۹۸ کیلومترمربع مربوط به زیر آبخیز با کد ۷ بود که شامل بخش بزرگی از

جدول ۱- مشخصات واحدهای آب‌شناختی محدوده‌ی شهری ملایر.

Table 1- Hydrologic unit attributes for Malayer city.

Sub Catchment ID	Area (km <sup>2</sup> )	Unit Width (m)	Impervious Area (%)	Slope (%)	Output Node
1	2.23	500	70	1.16	J5
2	1.72	500	60	8.13	J2
3	2.68	500	65	4.76	J3
4	0.995	500	70	3.23	J3
5	0.924	500	60	5.74	J4
6	2.075	500	70	1.05	J6
7	2.983	500	70	6.70	J7
8	2.803	500	70	1.55	J11
9	0.731	500	70	1.02	J8
10	2.265	500	70	5.99	J1
11	0.59	500	70	1.08	J9

جدول ۲- مشخصات گره‌های اتصال در محدوده‌ی شهری ملایر.

Table 2- Nodes attributes in Malayer city.

Node No.	Base Height (m)	Maximum Depth (m)
J1	1749	1
J2	1773	1
J3	1735	1
J4	1737	1
J5	1750	1
J6	1729	1
J7	1746	1
J8	1727	1
J9	1734	1
J10	1722	1
J11	1730	1

جدول ۳- مشخصات کانال‌های اتصال‌دهنده.

Table 3- Junction attributes.

Conduit Link	Input Node	Output Node	Length (m)	Slope (%)	Roughness Coefficient
1	J5	J1	670	0.15	0.015
2	J1	J6	1820	1.1	0.015
3	J6	J8	1580	0.13	0.015
4	J2	J4	980	3.67	0.015
5	J7	J4	740	1.22	0.015
6	J8	J3	960	0.21	0.015
7	J3	J10	2420	0.54	0.015
8	J11	J6	1000	0.1	0.015

سپس با توجه به زمان تداوم بارش کم‌تر یا بیش‌تر از دو ساعت به‌ترتیب از رابطه‌های ۲ و ۳ استفاده شد.

$$p_{t=}^r = 0.2009t^{0.3937} [0.5565 + 0.1948 \ln(t-0.08)] p_{60}^{10} \quad (2)$$

$$p_{t=}^r = 0.1327t^{0.4778} [0.4607 + 0.2349 \ln(t-0.62)] P_{60}^{10} \quad (3)$$

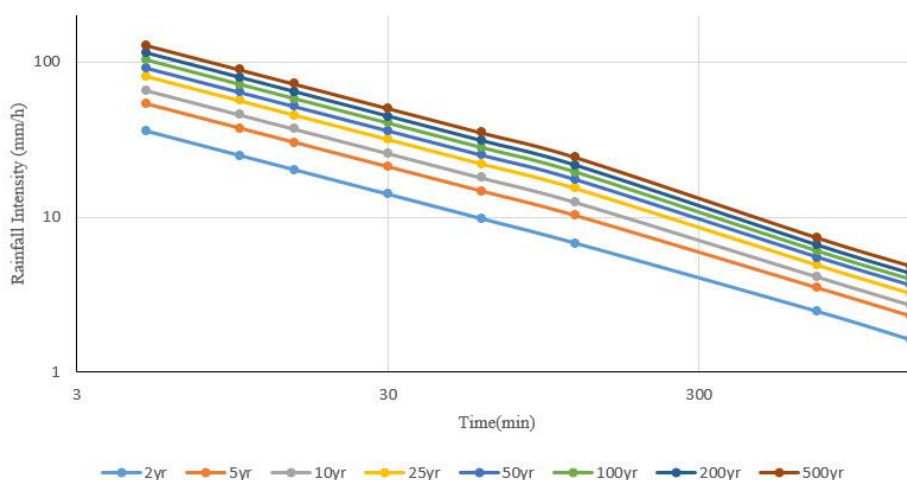
$t$ : دوره‌ی بازگشت،  $t$ : زمان تداوم بارندگی (ساعت) است. داده‌های بارش استفاده‌شده در مقیاس روزانه و مربوط به ایستگاه همدید ملایر در دوره‌ی آماری ۲۰۲۰-۱۹۹۲ از سازمان هواشناسی تهیه شد. سپس دسته منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی با استفاده از این داده‌ها رسم شد. منحنی‌های تهیه شده در شکل ۲ نشان‌دهنده شده است. با بررسی کاغذهای باران‌نگار ایستگاه مزبور بیش‌ترین فراوانی (۳/۲۳٪) مربوط به بارش نه‌ساعته با دوره‌ی بازگشت دو سال بود و این طبقه از بارش به‌عنوان بارش طرح انتخاب شد.

محاسبه‌ی بارش طرح

یکی از مهم‌ترین بخش‌های مطالعه‌ی آب‌شناسی آگاهی از شدت، مدت و فراوانی رخداد رگبار است. یکی از پیش‌نیازهای طراحی در سازه‌های آب‌شناختی، تعیین رابطه‌ای است که بتواند شدت بارندگی با یک تداوم مشخص را تعیین کند. برای تعیین بارش طرح از دسته منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی استفاده می‌شود (ابراهیم‌زاده و همکاران ۲۰۲۱). روش‌های گوناگونی برای تهیه‌ی این دسته از منحنی‌ها وجود دارد که در ایران رابطه‌ی قهرمان (آبخضر و همکاران ۲۰۰۴) کاربرد زیادی دارد و بر پایه‌ی شدت و مدت بارش استوار است. در این پژوهش بارش یک‌ساعته با دوره‌ی بازگشت ۱۰ سال با استفاده از رابطه‌ی ۱ محاسبه شد.

$$P_{60}^{10} = e^{0.993} \cdot (R_{1440}^2)^{1.06} \quad (1)$$

$R_{1440}^2$ : میانگین بیش‌ترین بارش روزانه،  $P$ : اندازه‌ی بارش در دوره‌ی بازگشت و زمان تداوم دلخواه برحسب میلی‌متر است.



شکل ۲- دسته منحنی شدت-مدت-فراوانی در منطقه‌ی مطالعه‌شده (دستگاه مختصات لگاریتمی).

Figure 2- Intensity-Duration-Frequency curves in logarithmic axis for case study.



### مدل‌سازی بارش-رواناب

ابتدا نقشه‌ی شبکه‌ی جمع‌آوری و انتقال رواناب منطقه‌ی شهری ملایر از شهرداری تهیه شد. به منظور مشخص کردن مرز زیرآب‌خیزها یا همان واحدهای آب‌شناخت درون شهری، بازدید میدانی از مجراهای موجود انجام شد. متغیرهایی مانند شیب مجراها، جهت جریان، ابعاد وضع موجود، مشکلات مجراها و محل تخلیه‌گاه‌ها با اطلاعات کسب‌شده بررسی شد. با توجه به شرایط موجود و نیز به منظور بهینه‌سازی محاسبه‌های مدل SWMM، زیرآب‌خیزهای کوچک‌تر با خروجی مشترک در زیرآب‌خیزهای بزرگ‌تر با جهت جریان مشترک یکی شدند. در نهایت ۱۱ زیرآب‌خیز در این پژوهش به عنوان واحد آب‌شناختی تعیین شد. مرز واحدهای آب‌شناخت در شکل لایه‌های رقومی با استفاده از نرم‌افزار آماری ArcGIS.10.3 مشخص شد. سپس مشخصات زیرآب‌خیزها شامل مساحت، عرض معادل، شیب، مدل نفوذپذیری، نقطه‌ی خروجی زیرآب‌خیز، درصد سطوح نفوذناپذیر تعیین شد. مسئله‌ی اصلی در زیرآب‌خیزها محاسبه‌ی اندازه‌ی تلفات بارش است که در این پژوهش و بر اساس قابلیت‌های مدل، از روش شماره‌ی منحنی (CN) استفاده شد. این روش ابزار مناسبی برای محاسبه‌ی اندازه‌ی رواناب در مناطق بدون ایستگاه اندازه‌گیری آب‌دهی است (مهدوی و همکاران ۲۰۰۵). در گام بعد مشخصات کانال‌های هدایت جریان وارد مدل شد. این کانال‌ها نقش مهمی در هدایت رواناب منطقه دارند و یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های مؤثر در پژوهش‌های جمع‌آوری و هدایت آب‌های سطحی هستند. با توجه به بازدیدهای میدانی و نقشه‌های سازمانی ۱۰ کانال اصلی برای محدوده‌ی پژوهش شناسایی شد که اغلب بتنی با شکل هندسی مستطیل روباز بودند. در این پژوهش از روش موج جنبشی برای روندیابی جریان در داخل کانال‌ها استفاده شد. همچنین جنس تمام کانال‌ها، بتنی انتخاب شد و برای لحاظ کردن اثرهای فرسایش‌های احتمالی آبی روی اصطکاک جداره‌های کانال‌ها، ضریب‌زبری مانینگ میانگین ضریب کانال‌های بتنی نو و قدیمی ۰/۰۱۵ در نظر گرفته شد. در گام بعد با توجه به نقشه‌ی شبکه‌ی زهکشی، مشخصات گره‌ها (محل برخورد جریان) در مدل SWMM تعریف شد. متغیرهای لازم در این بخش شامل بلندی محل برخورد نسبت به زمین، ژرفای اولیه‌ی آب در ابتدای شبیه‌سازی، بیشترین ژرفای محل برخورد، جریان ورودی و سطح ماندایی بود. در مدل مزبور برای منطقه‌ی مطالعه‌شده، بیشترین ژرفای محل برخورد برابر یک متر فرض شد و از اندازه‌ی ژرفای اولیه‌ی آب و سطح ماندایی صرف‌نظر شد. مشخصات و شمای کلی زیر آبخیزها، کانال‌ها و گره‌های اتصال‌دهنده در منطقه‌ی مطالعه‌شده در شکل ۱ نیز نشان داده شده است.

### واسنجی مدل

برای طراحی مدل باید شناخت نسبتاً کاملی از فرایندها،

معادله‌های ریاضی و دستورالعمل‌هایی که فرایندها را توصیف می‌کند، باشد. زیرا اکثر مدل‌های آب‌سنجی به برابرسنجی (تطبیق) و برابرسازی (تعدیل) متغیرهای مهارکننده‌ی فرایندها نیاز دارند. عملیات برابرسنجی متغیرها برای هماهنگی و سازگاری مدل در تولید داده‌هایی همانند پاسخ آبخیز یا نمونه‌ی اصلی سامانه است و تنظیم مدل یا واسنجی کردن آن می‌گویند (دو و همکاران ۲۰۰۷). ارزیابی برابرسنجی متغیرها و پاسخ مدل نسبت به تغییر آنها نیز فرایند تحلیل حساسیت است. به‌طور کلی دو رویکرد محلی و کلی برای تحلیل حساسیت وجود دارد (سالتلی و همکاران ۲۰۰۰). در این پژوهش از رویکرد محلی برای تحلیل حساسیت مدل استفاده شد. از این رو متغیرهای ورودی مؤثر مدل SWMM در آستانه‌ی ۱۰ تا ۵۰٪ اندازه‌های اولیه تغییر داده شد در حالی که دیگر متغیرها ثابت فرض شدند (توماس و همکاران ۱۹۷۸). نتایج تغییر در اندازه‌ی بیشترین آب‌دهی لحظه‌ای مبنای قضاوت حساسیت مدل نسبت به متغیر مزبور است. مطابق با رویکرد خلیقی‌سیگارودی و همکاران (۲۰۱۵) در این پژوهش نیز، سه متغیر درصد مناطق نفوذناپذیر، ذخیره‌ی چالایی مناطق نفوذناپذیر و ضریب زبری مناطق نفوذناپذیر برای واسنجی مدل SWMM استفاده شد.

سپس بیشترین آب‌دهی لحظه‌ای آب‌نگار واحد بر اساس مشخصات آب‌نگار واحد از بارش طرح، با استفاده از رابطه‌ی ۴ محاسبه شد (مهدوی و همکاران ۲۰۰۵).

$$q_p = \frac{0/208A * R}{t_p} \quad (4)$$

$q_p$ : بیشترین آب‌دهی لحظه‌ای آب‌نگار واحد (مترمکعب در ثانیه)،  $A$ : مساحت آبخیز (کیلومتر مربع)،  $R$ : بلندی رواناب (میلی‌متر)،  $t_p$ : زمان اوج سیلاب است. زمان اوج سیلاب معمولاً برابر ۷۰٪ زمان تمرکز آبخیز است.

در نهایت ارزیابی مدل قبل و بعد از واسنجی بر اساس بیشترین آب‌دهی لحظه‌ای آب‌نگار واحد مشاهده‌ای (رابطه ۴) و بیشترین آب‌دهی لحظه‌ای به‌دست‌آمده از مدل، انجام شد.

### ارزیابی کارایی مدل

به منظور ارزیابی قبل و بعد از واسنجی مدل SWMM از ضریب کارایی مدل نش-ساتکلیف (NSE) (دان و همکاران ۱۹۹۴) و برای تعیین جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) به ترتیب از رابطه‌های ۵ و ۶ استفاده شد. هر چه اندازه‌ی شاخص نش-ساتکلیف به عدد یک نزدیک‌تر باشد، مدل دقیق‌تر و هرچه اندازه‌ی جذر میانگین مربعات خطا به صفر نزدیک‌تر باشد، مدل کارایی بیشتری خواهد داشت (موریاسی و همکاران ۲۰۰۷).

مدل‌سازی است. نتایج مدل آب‌شناختی که با داده‌های غیرهماهنگ و با دقت کم واسنجی و یا اجرا شده باشد دستاوردهای یک پژوهش را تحت تأثیر قرار می‌دهد (پاکه و همکاران ۲۰۱۳). به این دلیل با بازدیدهای میدانی و تأمین داده‌ها از منابع قابل اطمینان ورودی‌های مدل تعیین شد. برای اجرای اولیه‌ی مدل، متغیرهای اندازه‌گیری شده و محاسبه‌ای وارد مدل شد. پس از واسنجی با توجه به درصد تغییر مجاز اندازه‌های بهینه متغیرهای ورودی محاسبه شد. متغیرهای استفاده‌شده در این پژوهش و درصد تغییر برای سه متغیر مؤثر در فرآیند واسنجی در جدول ۴ نشان داده شده است.

$$MSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_i - \hat{Q}_i)^2} \quad (5)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_i - \hat{Q}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q}_i)^2} \quad (6)$$

$Q_i$ : آب‌دهی مشاهده‌ای،  $\hat{Q}_i$ : آب‌دهی برآوردشده در زمان  $I$  برحسب مترمکعب در ثانیه،  $N$ : تعداد مشاهده‌ها یا برآوردها است.

### نتایج

دقت در اندازه‌گیری، محاسبه و جمع‌آوری داده‌های ورودی به مدل‌های آب‌شناختی یکی از مهم‌ترین بخش‌های فرایند

جدول ۴- اندازه‌های اولیه، دامنه‌ی تغییر و اندازه‌های بهینه متغیرهای واسنجی مدل.

Table 4- Initial values, range of changes and optimal values of the calibration variables of the model.

Parameters	Initial Value	Range of Variation	Optimized Value
Impervious Area (%)	60	-10	57.7
Impervious depression store	1.277 (mm)	+30 (%)	1.655(mm)
Impervious roughness coefficient	0.01	+50(%)	0.02

به ترتیب مربوط به زیرآبخیزهای شماره‌ی ۴ (۹/۴۷ میلی‌متر) و ۸ (۷/۹۶ میلی‌متر) بود. کم‌ترین زمان تمرکز و زمان تا اوج در زیرآبخیز شماره‌ی ۵ مشاهده شد. بیش‌ترین زمان تمرکز و زمان تا اوج به ترتیب مربوط به زیرآبخیزهای ۹ و ۶ بود. بیش‌ترین و کم‌ترین اندازه‌ی آب‌دهی اوج شبیه‌سازی شده نیز به ترتیب مربوط به زیرآبخیزهای ۷ (۰/۴۸ مترمکعب در ثانیه) و ۱۱ (۰/۰۹ مترمکعب در ثانیه) بود.

پس از واسنجی موفقیت‌آمیز مدل اندازه‌ی ضریب نش-ساتکلیف و جذر میانگین مربعات خطا به ترتیب ۰/۷۳ و ۰/۰۲ به دست آمد. سپس مدل واسنجی شده بر اساس بارش تجمعی الگوی زمانی بارش طرح دوباره اجرا شد. اندازه‌های بلندی رواناب هر زیرآبخیز، آب‌دهی اوج هر زیرآبخیز و دیگر متغیرها محاسبه شد. نتایج اجرای مدل در مرحله‌ی واسنجی در جدول ۵ ارائه شده است. بیش‌ترین و کم‌ترین بلندی رواناب

جدول ۵- نتایج اجرای مدل در مرحله‌ی واسنجی.

Table 5- Model results in calibration period.

Sub Catchment ID	Area (km <sup>2</sup> )	Runoff Height (mm)	Time of Concentration (min)	Time to Peak (min)	Observed Peak Discharge (m <sup>3</sup> /s)	Simulated Peak Discharge (m <sup>3</sup> /s)
1	2.231	9.3	39.42	27.59	0.15	0.31
2	1.728	8.11	19.89	13.92	0.2	0.26
3	2.68	8.72	35.45	24.81	0.19	0.39
4	0.995	9.47	24.67	17.27	0.1	0.17
5	0.924	8.14	18.51	12.95	0.12	0.14
6	2.075	9.28	53.63	37.54	0.1	0.28
7	2.983	9.4	26.82	18.77	0.31	0.48
8	2.803	7.96	43.74	30.61	0.15	0.33
9	0.731	8.1	75.36	25.72	0.04	0.11
10	2.265	8.08	29.86	20.89	0.18	0.33
11	0.59	8.12	35.02	24.51	0.04	0.09

که بیش‌ترین ژرفای رواناب مربوط به گره‌های J۸ و J۱۰ با یک متر بلندی بود. همچنین کم‌ترین ژرفای رواناب در حد صفر مربوط به گره‌ی J۹ بود (موقعیت گره‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است).

نتایج مدل پس از محاسبه‌ی خصوصیات جریان در زیرآبخیزها، به‌منظور بررسی وضعیت جریان در محل گره‌ها بررسی شد. اندازه‌های میانگین ژرفا و ژرفای بیش‌ترین جریان در محل گره‌ها در جدول ۶ ارائه شده است. یافته‌های جدول ۶ که نشانه‌ی بیرون‌زدگی یا ظرفیت مناسب در محل گره‌ها است، نشان داد



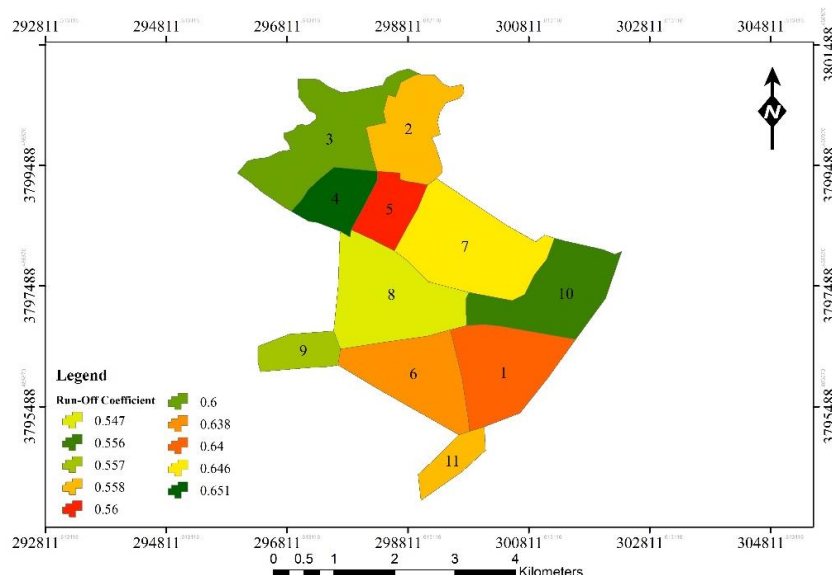
جدول ۶- میانگین ژرفا و ژرفای بیشترین جریان در محل گره‌ها.

Table 6- Average depth and depth of maximum current at the location of the nodes.

Node No.	Average Depth (m)	Maximum Depth (m)
J1	0.15	0.27
J2	0.04	0.09
J3	0.25	0.56
J4	0.24	0.56
J5	0.15	0.27
J6	0.42	0.8
J7	0.09	0.18
J8	0.94	1
J9	0	0
J10	0.92	1
J11	0.18	0.33

نقشه‌ی تهیه‌شده در شکل ۳ نشان‌دهنده شده است. برپایه‌ی نتایج این پژوهش بیش‌ترین و کم‌ترین توان سیل‌خیزی به‌ترتیب مربوط به زیرآبخیزهای ۴ (۰/۶۵۱) و ۸ (۰/۵۴۷) بود.

با محاسبه‌ی بلندی رواناب و اندازه‌های بارش طرح، اندازه‌ی ضریب رواناب هر زیر آبخیز به‌دست آمد. در نهایت، پهنه‌ی توان سیل‌خیزی شهر ملایر در نرم‌افزار ArcGIS.10.3 تهیه شد.



شکل ۳- نقشه‌ی پهنه‌ی توان سیل‌خیزی شهر ملایر.

Figure 3- Flood production potential maps for Malayer city.

مطابق با شکل ۳ توان سیل‌خیزی هر یک از زیرآبخیزها نیز تعیین شد. از این‌رو، بر اساس نتایج مدل‌سازی بارش طرح و نتایج جدول ۵ مشخص شد که در تمام زیرآبخیزها مدل SWMM آب‌دهی اوج را به‌شکل بیش برآورد شبیه‌سازی کرد و به این دلیل دقت در انتخاب متغیرهای واسنجی و تغییرات آن‌ها در دامنه‌ی مجاز (تحلیل حساسیت مدل) نیازمند سعی و خطای فراوانی بود. در این بخش مناطق نفوذناپذیر ۱۰٪ کاهش، ذخیره‌ی چالابی سطوح نفوذناپذیر ۳۰٪ افزایش و ضریب زبری سطوح نفوذناپذیر نیز دو برابر افزایش یافت. در پژوهش بدیع‌زاده و همکاران (۲۰۱۶) و میکوویتز و همکاران (۲۰۱۵) مشخص شد که متغیرهای مزبور در واسنجی مدل

### بحث و نتیجه‌گیری

فرایند توسعه‌ی شهری با افزایش سطوح نفوذناپذیر سبب تغییر سازوکار آبخیزها می‌شود. از این‌رو آب‌شناسی آبخیز در قالب سیلاب‌های شدید نیز تغییر یافته است. با افزایش سطوح نفوذناپذیر در اثر توسعه‌ی شهرها و افزایش اندازه‌ی تولید رواناب، مناطق شهری باید به یک سامانه‌ی کارآمد جمع‌آوری رواناب مجهز شوند. بنابراین برآورد رواناب و کمی‌سازی آن برای مدیریت رواناب شهری مهم است. امروزه مدل‌سازی بارش-رواناب با تأکید بر اثرهای توسعه‌ی شهری اهمیت زیادی دارد. بنابراین در این پژوهش اندازه‌ی رواناب تولیدشده در زیرآبخیزهای ۱۱ گانه‌ی شهر ملایر برآورد شد. در نهایت

به شکل متراکم نبود (شکل ۱). همچنین در انتهای غربی زیرآبخیز شماره ۸ تعداد محدودی زمین های کشاورزی بودند که سبزی و صیفی در آنها کشت شده بود. در بخش شرقی زیرآبخیز شماره ۱۰ وجود پارک تاریخی بزرگ همراه با جنگل دست کاشت از وسعت زمین های غیر قابل نفوذ در این زیرآبخیز کاسته است. در نتیجه ساخت وسازهای کم تراکم و وجود زمین ها با کاربری های غیرمسکونی در این دو زیرآبخیز و حساسیت روش شماره ۱ منحنی نسبت به درصد زمین های غیر قابل نفوذ دلیل جایگاه ۱۰ و ۱۱ این دو زیرآبخیز در تولید رواناب را توجیه می کند. این نتایج با یافته های رابری و همکاران (۲۰۱۸) مطابقت دارد. نقشه ی پهنه ی توان سیل خیزی شهر ملایر نشان داد که ضریب رواناب در زیر آبخیزهای منتهی به گره ی J۱۰ زیاد بود. به طوری که بیش ترین توان سیل خیزی در زیر آبخیز ۴ با ضریب رواناب ۰/۶۵۱ مشاهده شد. بررسی نقشه های حدنگاری، وجود تراکم ساخت وسازها و همچنین کم ترین سرانه ی فضای سبز در این زیرآبخیز دلیل اصلی توان زیاد تولید رواناب در زیرآبخیز شماره ۴ بود. بر پایه ی نتایج پژوهش های صادقی و همکاران (۲۰۲۰) و تای و همکاران (۲۰۱۲) توان سیل خیزی آبخیزهای شهری به مراتب بیش تر از آبخیزهای غیرشهری است. از این رو با توسعه ی شهر ملایر به ویژه در مناطق شمال شهر به دلیل عامل های گیتاشناسی (شیب زیاد)، توان سیل خیزی نیز زیاد بود. بنابراین، توجه در توسعه و طراحی درست تخلیه ی رواناب ها ضروری است. توسعه ی سریع سکونتگاه های شهر ملایر به عنوان دومین شهر بزرگ استان همدان، به دلیل جایگاه ویژه ی گردشگری، اقلیمی و اقتصادی و داشتن دو نشان جهانی در صنعت انگور و کشمش و صنایع مبل است. از این رو در مدیریت شهری یکی از مسئله های مهم سیلاب است که در این پژوهش با استفاده از مدل SWMM بررسی شد. نتایج این پژوهش نشان داد تقریباً نیمی از شهر، در رخداد بارش ها تحت تأثیر خطر سیلاب است و شبکه ی زهکشی کنونی کارایی لازم برای تخلیه ی رواناب شهری در بخش شمال شهر را ندارد. بنابراین تعیین ابعاد بهینه ی کانال ها ضروری است. با توجه به اینکه شهر ملایر روی دامنه ی شیب دار شمالی در حال توسعه و ساخت وساز است و این موضوع احتمال تولید سیل را افزایش می دهد، پیشنهاد می شود از کاربری های مکمل نظیر جنگل دست کاشت، پارک و سنگفرش نفوذپذیر در زیرآبخیزهایی که توان تولید رواناب زیاد است، استفاده شود. بررسی بایگانی سازمان خدمات شهرداری و بازدیدهای میدانی از محل بیرون زدگی سیلاب نشان داد، وجود درختان تنومند در برخی از کانال های بافت قدیمی شهر به ویژه کانال های منتهی به گره ی J۶ سبب کاهش ظرفیت آبگذری شده است. از این رو به منظور جلوگیری از ماندابی شدن سطوح خیابان ها در این مناطق، توصیه می شود مسیر کانال ها اصلاح شود.

حساسیت زیادی داشتند. در این پژوهش نتایج ضریب های ارزیابی مدل نشان داد که مدل SWMM برای مدل سازی و برآورد رواناب مناسب بود. این یافته با نتایج پژوهش های یاراحمدی و همکاران (۲۰۱۹)، وکیلی تجربه و همکاران (۲۰۲۰)، ابراهیمزاده و همکاران (۲۰۲۱)، جیانگ و همکاران (۲۰۱۵) و بارکو و همکاران (۲۰۰۸) هماهنگی دارد. همچنین نتایج اجرای مدل در زیرآبخیزها نشان داد زیرآبخیزهایی که در شمال شهر بودند و به گره ی J۱۰ منتهی می شدند حجم رواناب و آبدهی بیش تری داشتند. از سوی دیگر زیرآبخیزهای مرکز و جنوب شهر منتهی به گره ی J۸ نقش بیش تری در حجم و آبدهی رواناب داشتند. ابتدا ارتباط مستقیم مساحت و تولید رواناب زیرآبخیز بالادست در این گره بررسی شد. زیرآبخیز شماره ۹ از نظر مساحت در جایگاه رتبه ی دهم بود که نقش مستقیم متغیر مساحت در تولید رواناب را تأیید نکرد. این یافته می تواند به دلیل شیب کانال انتقال رواناب زیرآبخیز (۰/۱۳٪) به سمت گره ی خروجی J۸ باشد و در نتیجه بیش ترین زمان تمرکز زیرآبخیز در این نقطه باشد. بر اساس نتایج جدول ۶ میانگین ژرفای رواناب در گره ی J۸، ۰/۹۴ متر و نزدیک به بیشترین ظرفیت کانال مزبور بود که نشان دهنده ی روند جریان ناشی از شیب کم کانال بود. این در حالی است که تنها زیرآبخیز منتهی به گره ی J۹ در ورودی شهر ملایر به اراک، کمترین حجم رواناب و آبدهی را داشت. یکی از دلیل های اصلی این یافته موقعیت این زیرآبخیز و جدا بودن این بخش از تأثیر رواناب ورودی دیگر زیرآبخیزها است (شکل ۱). بررسی نتایج جدول ۳ و گره های ورودی و خروجی در هر زیر آبخیز نشان داد، زیر آبخیز شماره ۱۱ و کانال های این منطقه کاملاً جدا از دیگر زیر آبخیزها بودند. نتایج شبیه سازی آبدهی اوج لحظه ای نشان داد زیرآبخیز ۷ بیشترین اندازه ی آبدهی (۴۸/۰ مترمکعب در ثانیه) را داشت. متغیرهای مؤثر در این اندازه شامل مساحت زیرآبخیز، بلندی رواناب و زمان تا اوج بود (رابطه ی ۴). در زیرآبخیز شماره ۷ بلندی رواناب با اندازه ی ۹/۴ میلی متر در رتبه ی دوم و مساحت آن ۲/۸۰ کیلومترمربع در رتبه ی اول در مقایسه با دیگر زیرآبخیزها بود. هرچند در مقایسه با دیگر زیرآبخیزها زمان رسیدن به اوج در زیرآبخیز شماره ۷ با اندازه ی ۱۸/۷۷ دقیقه در رتبه ی هشتم بود اما اثر دوچندان متغیرهای مساحت و بلندی رواناب سبب شد تا این زیرآبخیز در جایگاه نخست از نظر اندازه ی آبدهی اوج لحظه ای قرار گیرد. بر پایه ی نتایج جدول ۵ اندازه ی بلندی رواناب زیرآبخیزهای شماره ۸ و ۱۰ به ترتیب ۷/۹۶ و ۸/۰۸ میلی متر بود. با این اندازه ها جایگاه این دو زیرآبخیز در میان دیگر زیرآبخیزهای منطقه ی مطالعه شده ۱۱ و ۱۰ شد. نکته ی قابل توجه در این دو زیرآبخیز این است در بخش مرکزی شهر واقع شده اند و ۲۵/۳۳٪ از مساحت منطقه ی شهری در این دو زیرآبخیز است و به دلیل وجود مناطق کمتر توسعه یافته در این دو زیرآبخیز، در مقایسه با دیگر زیر آبخیزها تغییر کاربری

فهرست منابع

- Abkhezr H. 2004. Improvement in intensity-duration-frequency relationships of rainfall in Iran. *Journal of Hydrology and Soil Science*. 8(2):1-13. (In Persian).
- Badiezadeh S, Bahremand A, Dehghani A. 2016. Urban flood management by simulation of surface runoff using SWMM model in Gorgan city Golestan Province- Iran. *Journal of Water and Soil Conservation*. 22(4):155-170. (In Persian).
- Bai Y, Zhao N, Zhang R, Zeng X. 2018. Storm water management of low impact development in urban areas based on SWMM. *Water (Switzerland)*. 11(1):1-16. <https://doi.org/10.3390/w11010033>.
- Barco J, Wong M, Stenstrom K, Asce F. 2008. Automatic calibration of the U.S. EPA SWMM Model for a Large Urban Catchment. 135(12):1108-1110. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000016](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000016).
- Barron OV, Pollock D, Dawes W. 2011. Evaluation of catchment contributing areas and storm runoff in flat terrain subject to urbanization. *Hydrology and Earth System Sciences*. 15(2):547-559. <https://doi.org/10.5194/hess-15-547-2011>.
- Bates PD, De Roo APJ. 2000. A simple raster-based model for flood inundation simulation. *Journal of Hydrology*. 236(1):54-77. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00278-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00278-X).
- Bera D, Kumar P, Siddiqui A, Majumdar A. 2022. Assessing impact of urbanisation on surface runoff using vegetation-impervious surface-soil (V-I-S) fraction and NRCS curve number (CN) model. *Modeling Earth Systems and Environment*. 8(1):309-322. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-01079-z>.
- Bibi TS. 2022. Modeling urban stormwater management in the town of Dodola based on landuse and climate change using SWMM 5.1. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 44:101267. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101267>.
- Chen J, Hill A, Urbano LD. 2009. A GIS-based model for urban flood inundation. *Journal of Hydrology*. 373(1-2):184-192. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.04.021>.
- Chithra SV, Harindranathannair M, Amarnath V, Anjana NS. 2015. Impacts of Impervious Surfaces on the Environment. *International Journal of Engineering Science Invention*. 4(5):27-31.
- Du J, Xie S, Xu Y, Yu Xu C, Singh VP. 2007. Development and testing of a simple physically-based distributed rainfall-runoff model for storm runoff simulation in humid forested basins. *Journal of Hydrology*. 336(3-4):334-346. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.01.015>.
- Duan Q, Sorooshian S, Gupta VK. 1994. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. *Journal of Hydrology*. 158(3-4):265-284. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)90057-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)90057-4).
- Ebrahimzadeh Z, Malekian A, Mohsenmohseni M, Zarebidaki R. 2021. Determination of possible waterlogging points of drainage network of Fooladshahr city in urban flood. *Ijwmse*. 15(52):54-62. (In Persian).
- Ellis JB, Viavattene C. 2014. Sustainable Urban Drainage System Modeling for Managing Urban Surface Water Flood Risk. *CLEAN – Soil Air Water*. 42(2):153-159. <https://doi.org/10.1002/clen.201300225>.
- Emberger L. 1955. Une classification biogéographique des climats. *Recueil, travaux de laboratoire géolo-zoologique, Faculté des sciences. Service botanique. Montpellier*. 7(2): 3-43.
- Ghimire B, Chen AS, Guidolin M, Keedwell EC, Djordjević S, Savić DA. 2013. Formu-

- lation of a fast 2D urban pluvial flood model using a cellular automata approach. *Journal of Hydroinformatics*. 15(3):676–686. <https://doi.org/10.2166/hydro.2012.245>.
- Jiang L, Chen Y, Wang H. 2015. Urban flood simulation based on the SWMM model. *Remote Sensing and GIS for Hydrology and Water Resources*. 25(2):186-191. <https://doi.org/10.5194/piahs-368-186-2015>.
- Khalighi Sigarodi S, Roštami Khalaj M, Mahdavi M, Salajegheh A. 2015. Calibration and validation SWMM model in order to simulate urban runoff (Case Study: Imam Ali Town in Mashhad). *Journal of Range and Watershed Management*. 68(3):487–498. (In Persian).
- Luan Q, Fu X, Song C, Wang H, Liu J, Wang Y. 2017. Typical mountainous low-lying urban areas: A Case study in China. *Water*. 439(9):1-21. <https://doi.org/10.3390/w9060439>.
- Ma B, Wu Z, Hu C, Wang H, Xu H, Yan D, Soomro S. 2022. Process-oriented SWMM real-time correction and urban flood dynamic simulation. *Journal of Hydrology*, 605:127269. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127269>.
- Mahdavi M. 2005. *Applied Hydrology*, 2nd Volume, University of Tehran Press. (In Persian).
- McCuen RH, Johnson PA, Ragan RM. 1996. *Highway hydrology: Hydraulic Design Series No. 2*.
- Mikovits C, Rauch W, Kleidorfer M. 2015. A dynamic urban development model designed for purposes in the field of urban water management. *Journal of Hydroinformatics*. 17(3):390-403. <https://doi.org/10.2166/hydro.2014.015>
- Miller D, Kim T, Kjeldsen R, Packman J, Grebby S, Dearden R. 2014. Assessing the impact of urbanization on storm runoff in a peri-urban catchment using historical change in impervious cover. *Journal of Hydrology*. 515:59-70. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.011>.
- Moriasi D, Arnold N, Jeffrey G, Michael W, Van Liew R, Bingner R, Harmel T, Veith L. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*. 50(3):885-900.
- Paquet E, Garavaglia F, Garçon R, Gailhard J. 2013. The SCHADEX method: A semi-continuous rainfall-runoff simulation for extreme flood estimation. *Journal of Hydrology*. 495(3):23–37. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.04.045>.
- Rabori MA, Ghazavi R. 2018. Urban flood estimation and evaluation of the performance of an urban drainage system in a semi-arid urban area using SWMM. *Water Environment Research*. 90(12):2075-2082.
- Ress L, Hung C, James A. 2020. Impacts of urban drainage systems on stormwater hydrology: Rocky Branch Watershed, Columbia, South Carolina. *Journal of Flood Risk Management*. 13(3):1-13. <https://doi.org/10.2175/106143017X>.
- Rezayi F, Bahremand A, Sheikh V, Daštórani M, Tajbakhsh M. 2019. Determination of the most important SWMM. *Journal of Watershed Management Research*. 9(18):135-145. (In Persian). <https://doi.org/10.29252/jwmr.9.18.135>.
- Rossmann L. 2007. *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.0*, Report No. EPA/600/R-05/040. U.S. EPA National Risk Management Research Laboratory, Cincinnati, OH. 295.
- Sadeghi S, Valisamani J, Valisaman H. 2020. Analyzing of hydraulic performance and possible damage to existing storm sewer networks Tehran region 2 using SWMM model. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*. 14(50):59-67. (In Persian).
- Saltelli A, Tarantola S, Campolongo F. 2000. Sensitivity analysis as an ingredient of mod-

- eling. *Statistical Science*. 15(4):377-395. <https://doi.org/10.1214/ss/1009213004>.
- Shahab M, Günther L, Jiri M, Maria V. 2018. Modeling urban runoff from rain-on-snow events with the U.S. EPA SWMM model for current and future climate scenarios. *Journal of Cold Regions Engineering*. 32(1):4017021. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CR.1943-5495.0000147](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CR.1943-5495.0000147).
- Shahbazi A, KhalighiSigarodi S, Malekian A, Salajegh A. 2017. Sensitivity analysis of input parameters of SWMM model to urban runoff management (Case study: Mahdasht Town). *Watershed Management Research Journal*. 30(1):67-75. (In Persian).
- Silva C de M, Silva GBL da. 2020. Cumulative effect of the disconnection of impervious areas within residential lots on runoff generation and temporal patterns in a small urban area. *Journal of Environmental Management*. 253(5):109719. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109719>.
- Tajbakhsh M, Khodashenas SR. 2012. Revision of surface- runoff drainage system by simulation and application of retention basins (Case study: East Eghbal Catchment Mashhad). *Water and Soil Science*. 22(1):109-123. (In Persian).
- Thi HL, Pathirana A, Thuc T. 2012. Facing multiple challenges: the future of flooding in Can Tho city. *VNU Journal of Science, Earth Sciences*. 28(2):84-91.
- Thomas K, Thomas J, Donald DA. 1978. Methodology for calibrating stormwater models. *Journal of the Environmental Engineering Division*. 104(3):485-501. <https://doi.org/10.1061/JEEGAV.0000772>.
- Tobio J, Maniquiz-Redillas L, Kim H. 2015. Optimization of the design of an urban runoff treatment system using stormwater management model (SWMM). *Desalination and Water Treatment*. 53(11):3134-3141. <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.922288>.
- USWEF-Water Environment Federation, Gravity Sanitary Sewer Design and Construction. 1982. 275p.
- Vakilitajareh A, Salajegheh A, Nazari Samani A, Malekian A, Shahbazi K. 2020. The impact of urban development and land use changes on runoff production in Abshouran Watershed. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*. 14(51):20-30. (In Persian).
- Xu H, Wang Y, Fu X, Wang D, Luan Q. 2023. Urban flood modeling and risk assessment with limited observation data: The Beijing Future Science City of China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 20(5):4640. <https://doi.org/10.3390/ijerph20054640>.
- Yarahmadi Y, Yousefi H, Jahangir MH, Sadatineghad SJ. 2019. Evaluation of the network performance of surface water collection and guidance using the SWMM Hydrological Model (Case study: District 6 of Tehran Municipality). *Iranian Journal of Ecohydrology*. 6(2):415-429. (In Persian).
- Zakizadeh F, Moghaddam Nia A, Salajegheh A, Fontaneda S, Alamdari N. 2022. Efficient urban runoff quantity and quality modeling using SWMM model and field data in an urban watershed of Tehran Metropolis. *Sustainability (Switzerland)*. 14(3): 1086. <https://doi.org/10.3390/su14031086>.
- Zhang Q, Tang Q, Knowles JF, Livneh B. 2019. Contribution of model parameter uncertainty to future hydrological projections. *Hydrology Earth System Science Discussions*. 85(3): 1–31. <https://doi.org/10.5194/hess-2019-52>.





## Estimation of Urban Runoff for Determine Potential Flooding Points Using SWMM Model in Malayer City

Fatemeh Zandi<sup>1</sup>, Mohammad Bashirgonbad<sup>\*2</sup>

1- M.Sc. in Urban Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Environment, Malayer University, Malayer, Iran

2- Assistant Professor, Faculty of Natural Resources and Environment, Malayer University, Malayer, Iran

### Extended Abstract

#### Introduction and Goal

Due to the large volume of human and commercial activities, one of the most important goals of infrastructure is to collect and transfer urban runoff, control floods and prevent flooding in cities. To correctly estimate the runoff and characteristics of hydrological units and channels, it is important to use appropriate hydrological and water models. Considering the importance of this topic, this research was conducted with the aim of estimating the urban runoff of the Malayer to determine the potential flooding points using a storm water management model (SWMM).

#### Material and Methods

On the basis of available technical reports, the area of the sub-watersheds, nodes and main channels of the city were first determined. Flow direction and slope of the area was determined using a digital elevation model and 11 sub-watersheds were identified. In addition, 11 nodes were determined, regardless of the initial water depth and water level. Using the daily rainfall data of the Malayer synoptic station during the 1992–2020 statistical period, a nine-hour rainfall with a return period of 2 years was calculated and entered into the model. The geometrical shape of the channels was an open rectangle and the flow trend in the channels was determined using the kinetic wave method. The size of the maximum flow of water through the channels was calculated using the relationship between the cross-section of the flow and the speed of the flow a 9-hour the rainfall with a return period of 2 years. To calibrate the model, the variables of percentage of impervious areas,

#### Article Type: Research Article

\*Corresponding Author E-mail: mbgonbad@ut.ac.ir

**Citation:** Zandi, F., Bashirgonbad, M. 2024. Estimation of Urban Runoff to Determine Potential Flooding Points in Malayer City Using SWMM Model . Watershed Management Research. 37(1): 18-32.

**DOI:** 10.22092/WMRJ.2023.361283.1523

**Received:** 29 January 2023, **Received in revised form:** 23 March 2023, **Accepted:** 21 June 2023,

**Published online:** 20 March 2024

Watershed Management Research, VOL. 37, No.1, Ser. No: 142, Spring 2024, pp. 18-32.

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



pond storage and roughness coefficient of impervious areas were used in the change range of the allowed modification range. In order to evaluate the model, Nash-Sutcliffe efficiency coefficient and the root mean square error were used.

#### Results and Discussion

The results showed that after optimizing the sizes of the variables, the Nash-Sutcliffe efficiency coefficient and the root mean square error were 0.73 and 0.02, respectively. Of the total rainfall of 14.54 mm, 5.53 mm was related to infiltration losses, 7.55 mm was related to surface runoff, and 1.45 mm was related to pond storage. The results showed that the sub-watersheds that were in the north of the city and overlooking the heights and leading to node number 10 had more volume and drainage and it is necessary to revise the design and expansion of the channels in this area. In addition, the sub-watersheds of the western part of the city (sub-watersheds no. 4) and the southwestern part (sub-watersheds no. 8) had the highest and lowest flood potential of 0.651 and 0.547, respectively.

#### Conclusion and Suggestion

In this research, the results showed that almost half of the city would be affected by flood risks in the event of rains. Therefore, the current drainage network does not have the necessary efficiency to discharge urban runoff in the northern part of the city, and it is necessary to determine the optimal dimensions of the channels. Because the eastern elevations of the studied area are snow-covered and considering the geology of the area, in future research, models capable of calculating the runoff caused by snow melting should be used.

**Keywords:** Calibration, Malayer city, modeling, SWMM, urban runoff