

## کاربرد مدل EPASWMM در شبیه‌سازی سیلاب ورودی به مناطق شهری از بازه‌های هیدرولوژیکی روستایی با استفاده از روابط ریاضی، مطالعه موردی: شهرک پایداری مشهد

علیرضا معماری<sup>۱\*</sup>، کریم سلیمانی<sup>۲</sup>، محمود حبیب‌نژاد روشن<sup>۳</sup> و علی گلکاریان<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیز، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی ساری، <sup>۲</sup> استادیار گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی ساری و <sup>۴</sup> استادیار گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۱۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۱۲

### چکیده

مدل‌های متعددی برای شبیه‌سازی سیلاب ورودی به مناطق شهری از بازه‌های روستایی طراحی شده که مدل EPASWMM یکی از آنها است. حوزه آبخیز شهری مشهد (بازه‌های هیدرولوژیکی روستایی مشرف به شهر مشهد) با هشت زیرحوضه مستقل و با مساحت ۲۴۷۲ هکتار در جنوب شهر مشهد واقع شده، محدوده مورد مطالعه، منطقه مسکونی شهرک پایداری مشهد با مساحت ۹۵/۶ هکتار در پایین‌دست زیرحوضه‌های  $M_2$ ،  $M_3$  و  $M_4$  است. به دلیل دبی پیک زیاد سیلاب زیرحوضه‌های  $M_2$ ،  $M_3$  و  $M_4$ ، ظرفیت کانال‌های انتقال شهری در منطقه شهرک پایداری کافی نبوده، پس از هر بارندگی، رواناب زیادی وارد مناطق مسکونی می‌شود. هدف از این پژوهش، ارزیابی کارایی مدل EPASWMM در شبیه‌سازی رواناب است. محدوده مطالعاتی به ۱۲ واحد هیدرولوژیک (OUT1 الی OUT12) تفکیک شده و شبکه جمع‌آوری رواناب در قالب گره‌ها-کانال‌ها وارد مدل شد. از چهار واقعه بارندگی برای ارزیابی و واسنجی مدل استفاده شده که در بخش واسنجی، مقدار نمایه نش-ساتکلیف (NS) برای متغیر دبی در واقعه اول و سوم به-ترتیب ۰/۹۴ و ۰/۹۲ و برای ارتفاع رواناب به-ترتیب ۰/۹ و ۰/۸۶ بوده، نشان‌دهنده بالابودن دقت شبیه‌سازی رواناب شهری با استفاده از مدل EPASWMM در هر دو متغیر است. نتایج بخش ارزیابی مدل برای دو واقعه دوم و چهارم نشان می‌دهد که نمایه‌های NS و  $R^2$  برای سه متغیر دبی، ارتفاع و سرعت رواناب به-ترتیب از ۰/۷۸ تا ۰/۹ و ۰/۷۳ تا ۰/۸۹ متغیر بوده که نشان‌دهنده همبستگی زیاد داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده است. سناریوهای کاهش سیلاب در واحدهای هیدرولوژیکی با توجه به نتایج شبیه‌سازی بررسی شده، نتایج نشان داد که اتصال-گره‌های کد ۵، ۸، ۱۱ و ۱۲ ظرفیت انتقال رواناب در سرعت‌های بالا را نداشته و بر اساس نتایج روندیابی مدل، تغییر ابعاد گره و کانال انجام شده است.

واژه‌های کلیدی: ارزیابی، اتصال-گره، سیلاب شهری، واسنجی، هیدروگراف

## مقدمه

تمرکز جمعیت در کلان شهرهای کشور، سبب توسعه شهرها به سمت اراضی طبیعی حوزه آبخیز و تغییر چهره اکوسیستم آن شده است (Javaheri و Vazif, ۲۰۱۵) و شاخص‌ترین اثر این توسعه، افزایش سطوح نفوذناپذیر در حوزه‌های آبخیز مشرف به شهر و تغییر رژیم هیدرولوژیکی حوضه بوده، که نهایتاً منجر به شکل‌گیری دبی‌های اوج بالاتر و افزایش حجم سیلاب در معابر و کانال‌های شهری خواهد شد (Soleimani, ۲۰۱۵). مدل‌های هیدرولوژیکی متعددی برای شبیه‌سازی سیلاب‌های ورودی به مناطق شهری طراحی شده که یکی از آن‌ها، مدل EPASWMM است. آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا، مدل<sup>۱</sup> SWMM را برای شبیه‌سازی کمی و کیفی پدیده‌های مرتبط با سیلاب‌های مختلط و پیچیده طی سال‌های ۱۹۶۹ تا ۱۹۷۱ طراحی کرده است. این مدل تا کنون چندین بار بازنویسی شده که یکی از جدیدترین نسخه‌های آن EPASWMM5.1 است. مدل EPASWMM5.1 یک مدل بارش-رواناب با شبیه‌سازی هیدرولوژیکی-هیدرولیکی سیلاب بوده که برای مدیریت‌کردن و مدل‌سازی شبکه‌هایی با ابعاد نامناسب، به کار برده شده و شبیه‌سازی رواناب در حوزه‌های آبخیز شهری به صورت مقطعی و مدت‌دار را انجام می‌دهد (Siavoshi, ۲۰۱۶).

مطالعات مختلفی در ارتباط با مدل‌سازی سیلاب ورودی به مناطق شهری انجام شده است. در پژوهشی با روش‌های الگوریتمی و آماری مدل EPASWMM برای حوضه شهری شیراز، واسنجی و اعتبارسنجی شده است. نتایج حاصل از واسنجی مدل نشان داد که شبیه‌سازی دبی و عمق رواناب در سه واقعه بارندگی بررسی شده، انطباق خوبی دارد، در حالی که در مورد سرعت رواناب بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای، کمی اختلاف وجود دارد. مقادیر RMSE برای دبی، سرعت و عمق رواناب در فرایند اعتبارسنجی مدل به ترتیب ۰/۰۰۲۶ مترمکعب در ثانیه، ۰/۰۱۴ متر و ۰/۰۸۲ متر بر ثانیه به دست آمد که نشان‌دهنده نتایج قابل قبول مدل است (Moradi و Hashemi, ۲۰۱۸).

۲۰۱۸). در مطالعه‌ای دیگر، با استفاده از مدل EPASWMM رواناب خروجی از حوضه شهری بافت واقع در استان کرمان شبیه‌سازی شده است. در این پژوهش، مدل مذکور بر اساس چهار متغیر دبی پیک، زمان اوج، حجم جریان و سرعت رواناب در ورودی کانال‌های انتقال شبکه واسنجی شده است. نتیجه این پژوهش نشان داده که با افزایش ۲۵ درصد مقدار بارش، حجم رواناب شهری معادل ۴۸ درصد افزایش می‌یابد (Veysipanah و همکاران، ۲۰۱۹).

در حوضه شهری مریوان به تحلیل عدم قطعیت دبی جریان در خطوط انتقال سامانه‌های زهکشی رواناب‌های شهری پرداخته شده، از مدل EPASWMM برای شبیه‌سازی فرایند بارش-رواناب و روندیابی جریان در مجاری آب استفاده شده است. نتایج پژوهش نشان داد که ضریب دبی جریان در کانال‌های خروجی از ۱۲ تا ۶۶ درصد متغیر است. پارامترهای فیزیوگرافی و بارندگی بیشترین تاثیر را در دبی پیک سیل و عدم قطعیت آن دارند (Rasolinia و Jahedi, ۲۰۱۹).

Zhang و همکاران (۲۰۱۶) در پژوهشی اثر تغییرات هفت متغیر درصد نفوذپذیری، عمق ذخیره سطحی، ضریب زبری کانال‌های انتقال، SI، CN، سرعت جریان در محل خروجی زیرحوضه‌ها را بر روی سه خروجی حجم رواناب، دبی پیک و زمان پیک جریان به روش تحلیل حساسیت الگوریتم ریاضی در مدل SWMM و تلفیق با شبکه عصبی مصنوعی چند فاز، مطالعه کردند. نتایج پژوهش نشان داد که درصد نفوذناپذیری و عمق ذخیره سطحی نواحی نفوذناپذیر، بیشترین تغییر را بر روی حجم رواناب خروجی داشته و تغییر ۱۶ درصد این دو متغیر توانسته ۳۸/۶ درصد حجم رواناب را تغییر دهد.

Rutten و Vanrooj (۲۰۱۸) بر اساس محاسبه میزان تغییرات مساحت اراضی نفوذناپذیر در بالادست بخش شمالی شهر نیویورک توانسته‌اند، میزان تغییرات سیلاب‌های شهری را در دوره بازگشت‌های دو و پنج ساله در محیط EPASWMM شبیه‌سازی کرده و بیان کردند که با افزایش پنج درصد مساحت اراضی نفوذناپذیر در ۱۰ سال آینده، میزان سیلاب ورودی به

<sup>1</sup> Storm Water Management Model

استفاده از کمینه اطلاعات ورودی، رواناب متناظر با بارندگی را شبیه‌سازی کند، نیازی است که در مناطق مسکونی شهری، ملموس است. هدف از این پژوهش، ارزیابی کارایی مدل EPASWMM در شبیه‌سازی رواناب ورودی به منطقه مسکونی شهرک پایداری و سرافرازان شهر مشهد از بازه‌های هیدرولوژیکی روستایی می‌باشد.

### مواد و روش‌ها

شهر مشهد در شمال شرق ایران با مساحت ۲۰۴۰ کیلومتر مربع و بین رشته کوه‌های بینالود و هزارمسجد قرار گرفته است. حوزه آبخیز شهری مشهد (بازه‌های هیدرولوژیکی روستایی مشرف به شهر مشهد) با مساحت ۲۴۷۲ هکتار در جنوب شهر مشهد با امتداد غربی-شرقی، دارای هشت زیرحوضه به نام‌های  $M_1$  الی  $M_8$  بوده که خروجی همه آن‌ها بر روی شهر مشهد و مناطق مسکونی (خیابان‌های بلوار فکوری و بزرگراه شهید کلاتری) واقع شده است. جنوب و جنوب غربی این حوضه، مشرف به ارتفاعات بوده و رواناب خروجی این زیرحوضه‌های هشت‌گانه به سمت شمال و شمال شرقی جریان داشته و از طریق مسیل‌ها و کانال‌های انتقال شهری در مسیر جنوب به شمال شهر مشهد انتقال می‌یابند (شکل‌های ۱ و ۳).

شهر از ضلع جنوب غربی، معادل ۲۲ درصد افزایش یافته است.

Nagaran و همکاران (۲۰۱۹)، پیش‌بینی سیلاب حوزه آبخیز شهری کوچین را تا سال ۲۰۳۹ بر اساس تغییرات کاربری اراضی به روش رگرسیون لجستیک در محیط LCM انجام داده و متغیرهای مربوط به حجم و دبی سیلاب ناشی از تغییرات کاربری اراضی را در مدل EPASWMM روندیابی کرده‌اند. در این پژوهش، با استفاده از روش تحلیل حساسیت لگاریتمی و تلفیق با شبکه‌های عصبی مصنوعی، مهمترین عوامل تاثیرگذار بر سه متغیر دبی، حجم جریان و ارتفاع رواناب در دوره بازگشت‌های دو، پنج، ۱۰، ۲۵ و ۵۰ ساله تعیین شده‌اند. Dankan و همکاران (۲۰۱۸) برای شبیه‌سازی بارش و رواناب در حوضه شهری Macau در کشور کره جنوبی از مدل EPA SWMM استفاده کردند. نتایج نشان داد که استفاده از GIS در به‌دست آوردن برخی از متغیرهای مهم مدل EPASWMM بسیار موثر است.

پیچیدگی در حوزه‌های آبخیز شهری و از طرفی کمبود داده‌های هیدرولوژیکی، باعث شده امکان اندازه‌گیری همه کمیت‌های مورد نیاز برای بررسی واکنش حوزه آبخیز شهری، میسر نباشد. بنابراین، طراحی مدلی که بتواند در عین سادگی ساختار و

جدول ۱- تعیین پارامترهای فیزیوگرافی و اقلیمی حوزه آبخیز شهری مشهد

اقلیم	تبخیر و تفرق پتانسیل (mm)	ارتفاع (m)			شیب متوسط (درصد)	محیط (Km)	مساحت (ha)
		متوسط	کمینه	بیشینه			
نیمه خشک	۱۳۱۶/۷	۱۲۴۸/۶	۱۵۴۰	۱۰۲۰/۵	۱۶/۲۸	۳۳/۹	۲۴۷۲

سه زیرحوضه، وارد شبکه زهکشی منطقه شهرک پایداری می‌شود.

به‌دلیل دبی پیک زیاد سیلاب و زمان تمرکز کم زیرحوضه‌های  $M_2$ ،  $M_3$  و  $M_4$ ، ظرفیت کانال‌های انتقال شهری در منطقه شهرک دارای پایداری کافی نبوده، پس از هر نوبت بارندگی (به‌ویژه در فصل بهار)، بخش زیادی از رواناب وارد خیابان‌های اصلی و فرعی در محدوده مذکور شده، هر ساله خسارات متعددی به تاسیسات شهری و سامانه حمل و نقل در منطقه

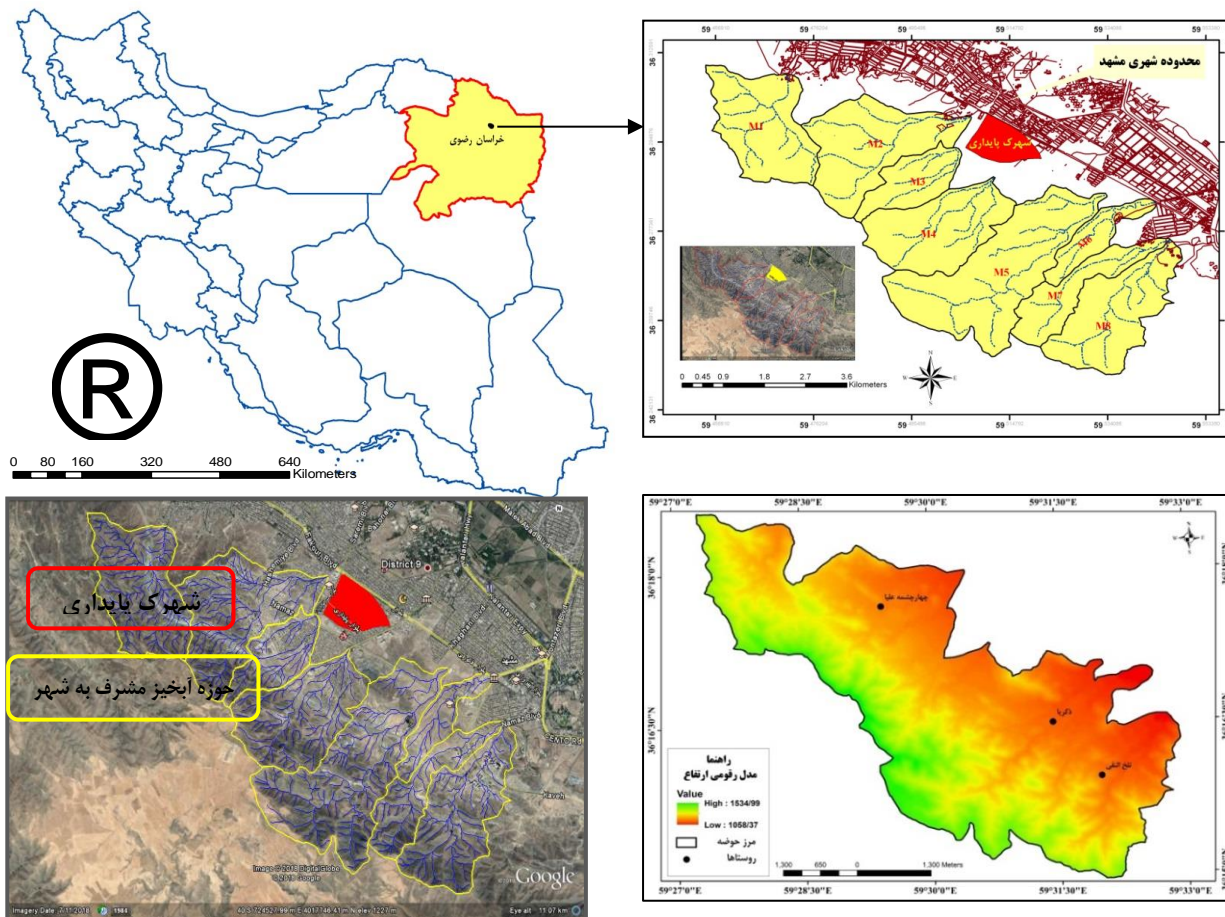
مهمترین زیرحوضه‌های محدوده مطالعاتی از نظر نوع و میزان خسارات وارده به مناطق مسکونی، زیرحوضه‌های  $M_2$ ،  $M_3$  و  $M_4$  با مجموع مساحت ۸۹۶/۴ هکتار و حجم رواناب سالانه ۴۲۴۰۴۷ متر مکعب هستند. محدوده مورد مطالعه در این پژوهش، علاوه بر زیرحوضه‌های سه‌گانه مذکور، منطقه مسکونی شهرک پایداری مشهد با مساحت ۹۵/۶ هکتار بوده که با فاصله حدود ۲۲۵ متر از خروجی زیرحوضه‌های  $M_2$ ،  $M_3$  و  $M_4$  واقع شده و بخش اعظم رواناب تولیدی این

مطالعاتی در مدل EPASWMM، بهترین سناریوی کنترل سیلاب بر اساس نتایج مدل، ارائه شود.

شهرک پایداری مشهد، وارد می‌آید. لذا، ضرورت دارد که پس از شبیه‌سازی بارش-رواناب این محدوده

جدول ۲- تعیین متغیرهای اقلیمی و هیدرولوژیکی زیرحوضه‌های محدوده مطالعاتی

زیرحوضه	مساحت (ha)	شیب متوسط (درصد)	طول آبراهه اصلی (km)	بارندگی (mm)	حجم رواناب سالانه (m <sup>3</sup> )	ضریب رواناب (درصد)	ارتفاع رواناب سالانه (mm)
M <sub>1</sub>	۳۴۷/۰	۱۸/۵	۳/۰۴	۲۴۳/۲	۱۶۸۷۷۶	۰/۲۰	۴۹
M <sub>2</sub>	۳۹۱/۴	۱۴/۳	۳/۸۶	۲۳۲/۷	۲۰۰۳۵۵	۰/۲۲	۵۱
M <sub>3</sub>	۱۵۹/۰	۱۱/۱	۲/۶۶	۲۳۰/۷	۶۶۰۰۳	۰/۱۸	۴۲
M <sub>4</sub>	۳۴۶/۰	۱۷/۴	۳/۳۰	۲۳۹/۹	۱۵۷۶۸۹	۰/۱۹	۴۶
M <sub>5</sub>	۵۷۸/۲	۱۸/۰	۶/۹۸	۲۳۸/۸	۳۳۱۳۱۷	۰/۲۴	۵۸
M <sub>6</sub>	۱۱۳/۳	۵/۷	۳/۲۸	۲۱۷/۳	۳۶۹۳۲	۰/۱۵	۳۳
M <sub>7</sub>	۱۸۷/۸	۱۵/۷	۴/۱۲	۲۳۱/۴	۷۸۲۲۴	۰/۱۸	۴۲
M <sub>8</sub>	۳۴۹/۴	۱۸/۵	۳/۹۲	۲۳۱/۱	۱۶۹۵۵۸	۰/۲۱	۴۹



شکل ۳- تصویر ماهواره‌ای حوزه آبخیز و منطقه مسکونی شهرک پایداری

جمع‌آوری رواناب شهری، جهت جریان در کانال‌ها و پیمایش زمینی مبتنی بر اطلاعات سال ۱۳۹۷، مشخص شد و در نهایت ۱۲ زیرحوضه یا واحد هیدرولوژیک (OUT<sub>1</sub> الی OUT<sub>12</sub>)، از یکدیگر تفکیک

تعیین واحدهای هیدرولوژیک و شبکه جمع‌آوری رواناب: مرز حوضه و واحدهای هیدرولوژیکی با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی و کاربری اراضی (با مقیاس ۱:۲۰۰۰)، بلوک‌های ساختمانی، سامانه

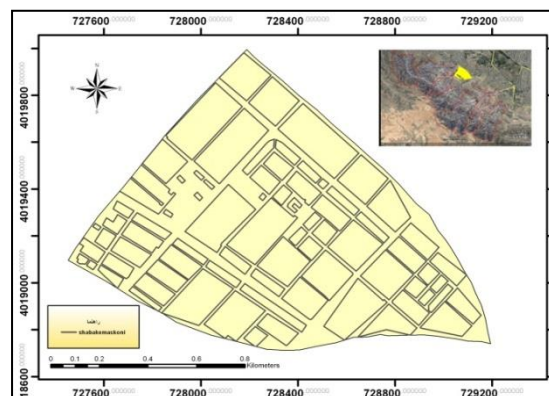
مستتر داشته و برای تعیین آن از جداول استاندارد موجود در راهنمای مدل استفاده شده است.

همچنین، برای تعیین مقادیر ارتفاع ذخیره در مناطق نفوذناپذیر و نفوذپذیر در هر زیرحوضه از مقادیر توصیه‌شده به‌وسیله راهنمای نرم‌افزار برای کاربردهای مختلف استفاده شد. در مدل EPASWMM برای مناطق نفوذپذیر، یکی از مدل‌های نفوذ پیشنهادی هورتن، گرین-آمیت اصلاح‌شده و روش حفاظت خاک آمریکا را به‌کار می‌رود. روش حفاظت خاک آمریکا در مناطقی که ایستگاه هیدرومتری ندارد، پیشنهاد شده، لذا، در این پژوهش برای تعیین مقادیر نفوذ، از این روش استفاده شد.

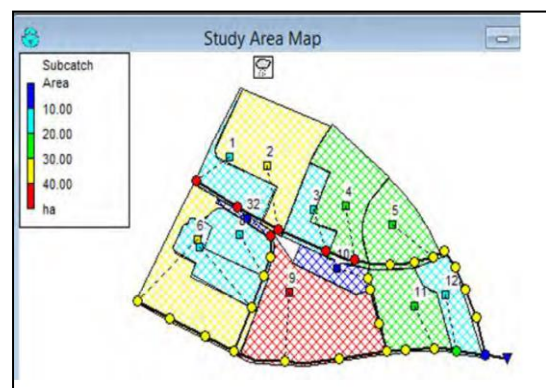
مشخصات اتصالات و محل ورود رواناب هر زیرحوضه به سامانه زهکشی رواناب از طریق بازدید میدانی و متری هر کانال تعیین شد و مشخصات فیزیوگرافی اتصالات با استفاده از نرم‌افزار ArcMap10.3 محاسبه شده است. این مشخصات عبارتند از: رقوم کف، طول و عرض جغرافیایی و بیشینه عمق اتصال. خصوصیات مجاری (شامل طول آبرو، ضریب زبری، شکل مقطع، عرض کف و سطح مقطع). در منطقه مورد مطالعه، ۱۸ حلقه چاه برای کنترل رواناب سطحی حفر شده تا از این طریق، بخشی از رواناب سطحی از چرخه سامانه زهکشی خارج شده و به داخل چاه هدایت شود. ورودی چاه‌ها به شکل دایره با قطر ۳۰ سانتی‌متر است که برای وارد کردن مشخصات آن‌ها در مدل EPASWMM، از ابزار روزنه استفاده شده است.

**محاسبه متغیرهای ورودی مورد نیاز مدل EPA SWMM:** به‌منظور شبیه‌سازی رواناب حوزه آبخیز مشرف به شهر مشهد با استفاده از مدل EPASWMM5.1 و واسنجی مدل مذکور، ضرورت دارد که قبل از واسنجی مدل، متغیرهای مورد نیاز مدل محاسبه شوند. متغیرهای مورد نیاز واحدهای هیدرولوژیک برای اجرای مدل شامل مساحت، شیب میانگین، عرض مستطیل معادل، درصد مناطق نفوذناپذیر، ضریب زبری مانینگ برای سطوح نفوذناپذیر و نفوذپذیر و کانال‌ها، ارتفاع نفوذپذیری و ذخیره برای سطوح مختلف و شماره منحنی است. نقاط ارتفاعی با دقت پنج متر از نقشه کاربری اراضی

شده‌اند. شبکه جمع‌آوری رواناب در قالب گره‌ها کانال‌ها به مدل وارد شده است. در هر نقطه‌ای از کانال که تغییری از نظر مقطع عرضی، شیب کف، ضریب زبری، ابعاد کانال و غیره ایجاد شده، یک گره جدید تعریف شده است. تهیه این اطلاعات بر اساس یک نقشه پایه توپوگرافی و پیمایش زمینی انجام شده، از این طریق متغیرهای اصلی شبکه جمع‌آوری رواناب اندازه‌گیری و وارد مدل شده‌اند. در مجموع ۳۰ اتصال-گره در ۱۲ زیرحوضه تعیین شده که ۱۲ اتصال-گره به‌عنوان اتصالات اصلی در سامانه جمع‌آوری رواناب مشخص شده، مشخصات آن‌ها در جدول ۳، ارائه شده‌اند.



شکل ۴- مدل رقومی شبکه مسکونی محدوده مطالعاتی



شکل ۵- تفکیک واحدهای هیدرولوژیکی و نمایش نقاط اتصال-گره در شبکه جمع‌آوری رواناب محدوده مورد مطالعه

منطقه تهیه و پس از آن متغیرهای مساحت، شیب میانگین و درصد مناطق نفوذناپذیر برای هر زیرحوضه محاسبه شد. نمایه زبری مانینگ، کلیه عوامل موثر در مقاومت بستر و کانال را در مقابل جریان در خود

هیدرومتری ندارد، پیشنهاد شده، لذا، در این پژوهش برای تعیین مقادیر نفوذ، از این روش استفاده شد. مشخصات اتصالات و محل ورود رواناب هر زیرحوضه به سامانه زهکشی رواناب از طریق بازدید میدانی و متری هر کانال تعیین شد و مشخصات فیزیوگرافی اتصالات با استفاده از نرم افزار ArcMap10.3 محاسبه شده است. این مشخصات عبارتند از: رقوم کف، طول و عرض جغرافیایی و بیشینه عمق اتصال. خصوصیات مجاری (شامل طول آبرو، ضریب زبری، شکل مقطع، عرض کف و سطح مقطع). در منطقه مورد مطالعه، ۱۸ حلقه چاه برای کنترل رواناب سطحی حفر شده تا از این طریق، بخشی از رواناب سطحی از چرخه سامانه زهکشی خارج شده و به داخل چاه هدایت شود. ورودی چاهها به شکل دایره با قطر ۳۰ سانتی متر است که برای وارد کردن مشخصات آنها در مدل EPASWMM، از ابزار روزنه استفاده شده است.

استخراج شده و با استفاده از نرم افزار ArcMap10.3، نقشه DEM (مدل رقومی ارتفاع) منطقه تهیه و پس از آن متغیرهای مساحت، شیب میانگین و درصد مناطق نفوذناپذیر برای هر زیرحوضه محاسبه شد. نمایه زبری مانینگ، کلیه عوامل موثر در مقاومت بستر و کانال را در مقابل جریان در خود مستتر داشته و برای تعیین آن از جداول استاندارد موجود در راهنمای مدل استفاده شده است.

همچنین، برای تعیین مقادیر ارتفاع ذخیره در مناطق نفوذناپذیر و نفوذپذیر در هر زیرحوضه از مقادیر توصیه شده به وسیله راهنمای نرم افزار برای کاربردهای مختلف استفاده شد. در مدل EPASWMM برای مناطق نفوذپذیر، یکی از مدل های نفوذ پیشنهادی هورتن، گرین-آمپت اصلاح شده و روش حفاظت خاک آمریکا را به کار می رود. روش حفاظت خاک آمریکا در مناطقی که ایستگاه

جدول ۳- تعیین مشخصات اتصال-گره های مورد مطالعه واحدهای هیدرولوژیک به عنوان متغیرهای ورودی مدل

مشخصات کانال یا مجرای اصلی عبور رواناب شهری						واحد هیدرولوژیک
بیشینه عمق اتصال (m)	رقوم کف (m)	عرض کف (m)	سطح مقطع (m <sup>2</sup> )	طول کانال اصلی (m)	کد اتصال-گره	
۱/۱۴	۱۱۰۳/۶	۱/۱	۱/۲۵	۹۶/۳	OUT <sub>1-1</sub>	OUT <sub>1</sub>
۱/۶۵	۱۱۰۰/۲	۱/۱	۱/۸۲	۱۱۸/۱	OUT <sub>2-2</sub>	OUT <sub>2</sub>
۱/۲	۱۰۹۹/۱	۱/۰	۱/۲	۷۲/۰	OUT <sub>3-3</sub>	OUT <sub>3</sub>
۱/۰۸	۱۰۹۷/۳	۱/۲۵	۱/۳۵	۱۰۸/۴	OUT <sub>4-4</sub>	OUT <sub>4</sub>
۱/۲	۱۰۹۴/۲	۰/۹	۱/۱۵	۹۲/۰	OUT <sub>5-5</sub>	OUT <sub>5</sub>
۱/۰۸	۱۱۱۷/۰	۱/۲۵	۱/۳۵	۱۴۲/۰	OUT <sub>6-6</sub>	OUT <sub>6</sub>
۱/۳۳	۱۱۰۵/۸	۰/۹	۱/۲	۱۲۲/۵	OUT <sub>7-7</sub>	OUT <sub>7</sub>
۱/۳۳	۱۱۰۵/۲	۰/۹۵	۱/۲	۶۳/۴	OUT <sub>8-8</sub>	OUT <sub>8</sub>
۱/۳۰	۱۱۱۴/۰	۱/۲	۱/۵۵	۱۱۴/۰	OUT <sub>9-9</sub>	OUT <sub>9</sub>
۱/۲۵	۱۰۹۷/۷	۱/۲	۱/۵۰	۵۱/۸	OUT <sub>10-10</sub>	OUT <sub>10</sub>
۱/۳۱	۱۰۹۵/۰	۰/۹۵	۱/۲۵	۸۴/۹	OUT <sub>11-11</sub>	OUT <sub>11</sub>
۱/۳۱	۱۰۹۲/۱	۱/۰	۱/۳۰	۸۸/۰	OUT <sub>12-12</sub>	OUT <sub>12</sub>

اطلاعات بارش و رواناب اندازه گیری شده: از آنجا که برآورد رواناب در مدل EPASWMM و سایر مدل های جمع آوری رواناب شهری بر اساس مقادیر بارش است، این اطلاعات از مهمترین و اساسی ترین

اطلاعات بارش و رواناب اندازه گیری شده: از آنجا که برآورد رواناب در مدل EPASWMM و سایر مدل های جمع آوری رواناب شهری بر اساس مقادیر بارش است، این اطلاعات از مهمترین و اساسی ترین

(۱). در بین این عوامل شیب، عرض معادل و درصد مناطق نفوذناپذیر با استفاده از ArcMap10.3 محاسبه شده است.

با توجه به همگن بودن منطقه مورد مطالعه، برای به کمینه‌رساندن زمان واسنجی و بالابردن دقت مقادیر، سایر متغیرها برای همه زیرحوضه‌ها به مقدار یکسان در نظر گرفته شده، به مقدار اولیه به میزان ثابت، افزوده یا کاسته شده است (جدول ۱). از این روش به‌طور گسترده برای واسنجی مدل‌های هیدرولوژیکی استفاده می‌شود. میزان صحت فرایند واسنجی با استفاده از نمایه نش-ساتکیف (NS) محاسبه شده که این نمایه از رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$NS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim} - Q_{obs})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{av})^2} \quad (1)$$

که در آن،  $Q_{obs}$  و  $Q_{sim}$  به ترتیب دبی شبیه‌سازی شده و دبی مشاهداتی در زمان  $t_{am}$ ،  $Q_{av}$  برابر میانگین دبی مشاهداتی و  $n$  تعداد داده‌ها است. مقدار نمایه NS می‌تواند مثبت یا منفی باشد. در صورتی که مقدار نمایه (NS) مثبت باشد، نشان‌دهنده آن است که داده‌های شبیه‌سازی شده بهتر از میانگین داده‌های مشاهداتی است و در صورتی که منفی باشد، نشان می‌دهد که خروجی مدل با ماهیت سامانه متناظر نیست. پایین‌ترین مقدار قابل قبول NS، ۰/۵ بوده و هرچه مقدار NS نزدیک به عدد یک باشد، نشان‌دهنده بالابودن دقت شبیه‌سازی است.

**ارزیابی مدل<sup>۲</sup> EPASWMM:** برای بررسی این‌که بین هیدروگراف شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در مدل EPASWMM چه مقدار انطباق وجود دارد، از روابط ریاضی استفاده می‌شود. رایج‌ترین روابط ریاضی و آماری که در بیشتر مطالعات هیدرولوژی شهری از آن‌ها استفاده می‌شود، نمایه نش-ساتکیف<sup>۳</sup> (NS)، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) و نمایه همبستگی ( $R^2$ ) هستند. ارزیابی مدل بر پایه بررسی کمی میزان خطای برآورد رواناب در یک واقعه مشاهداتی (غیر از وقایع مورد استفاده در مرحله واسنجی) با استفاده از مجذور میانگین مربعات خطا

رواناب متناظر با این رگبارها در کانال خروجی حوضه، هر ۰/۵ ساعت یک بار از طریق اندازه‌گیری ارتفاع رواناب و سرعت رواناب به‌صورت میدانی اندازه‌گیری شد. مقدار بارندگی این چهار واقعه از کاغذهای باران‌نگار ایستگاه هواشناسی مشهد استخراج شد.

اندازه‌گیری ارتفاع رواناب در کانال خروجی هر زیرحوضه از طریق مقیاس استاندارد صورت گرفته، نیز اندازه‌گیری سرعت رواناب با استفاده از مولینه (مولینه پرایس) در هر ۰/۵ ساعت انجام شده است. همچنین، اندازه‌گیری دبی متناظر رواناب از طریق روش‌های ریاضی و نیز ترسیم هیدروگراف‌های هر رگبار صورت گرفته و در نهایت اطلاعات ثبت‌شده در ایستگاه هیدرومتری، مورد استفاده قرار گرفته است.

از دو واقعه بارندگی که در تاریخ‌های ۱۳۹۶/۱۱/۲۱ (واقعه اول) و ۱۳۹۷/۰۱/۰۹ (واقعه سوم) اتفاق افتاده، برای واسنجی مدل EPASWMM استفاده شده، از دو واقعه دیگر (وقایع دوم و چهارم) برای ارزیابی مدل مذکور، استفاده شده است. با توجه به این‌که حجم رواناب سطحی معادل سطح زیرمنحنی هیدروگراف منهای آب پایه است، در این پژوهش از روش ذوزنقه‌ای، سطح زیرمنحنی هیدروگراف مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده، محاسبه شده است.

**واسنجی مدل<sup>۱</sup> EPASWMM:** نمونه‌برداری از رواناب شهری به‌دلیل پیش‌بینی ناپذیربودن رگبارها سخت و پرهزینه است. لذا، محققان معمولاً از چندین واقعه بارندگی برای ارزیابی و واسنجی مدل‌های هیدرولوژی استفاده کرده و مدل را کالیبره می‌کنند. در پژوهش حاضر، از چهار واقعه بارندگی نمونه‌برداری شده که از دو واقعه (واقعه اول و سوم) برای واسنجی مدل و از دو واقعه دیگر (واقعه دوم و چهارم) برای ارزیابی مدل EPASWMM استفاده شده است.

در این پژوهش، هشت متغیر مهم و موثر برای واسنجی مدل EPASWMM انتخاب شده که عبارتند از: درصد مناطق نفوذناپذیر، شیب، عرض معادل،  $N$  (ضریب زبری) برای سطوح نفوذناپذیر و نفوذپذیر، ارتفاع ذخیره برای مناطق نفوذناپذیر و نفوذپذیر و درصد مناطق نفوذناپذیر بوده ذخیره سطحی (جدول

<sup>2</sup> Evaluation

<sup>3</sup> Nash Sutcliffe

<sup>1</sup> Calibration

هر چه مقدار آن بیشتر بوده و به عدد یک نزدیکتر باشد، یعنی این که بین داده‌های مشاهده‌ای و برآوردی، همبستگی بیشتری وجود دارد.  $Q_{obs}$  مقادیر مشاهده‌ای،  $Q_{est}$  مقادیر برآوردی یا اندازه‌گیری شده،  $\bar{Q}_{obs}$  میانگین مقادیر مشاهده‌ای و  $\bar{Q}_{est}$  میانگین مقادیر برآوردی می‌باشند.

### نتایج و بحث

برای اجرای اولیه مدل EPASWMM، مقادیر برخی از متغیرهای ورودی برآورد می‌شود که پس از واسنجی مدل، با توجه به مقیاس درصد تغییرات که از منابع موجود استخراج شده است، مقادیر بهینه برای ورودی‌های مدل به دست می‌آید. جدول ۴، مقادیر بهینه شده و مقیاس درصد تغییرات برای هشت متغیر ورودی در فرایند واسنجی مدل را نشان می‌دهد.

انجام شد. مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) و نمایه ( $R^2$ ) از روابط ذیل محاسبه می‌شوند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{sim} - Q_{obs})^2} \quad (2)$$

$$R^2 = \frac{\sum((Q_{est} - \bar{Q}_{est}) \times (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs}))}{\sqrt{(\sum((Q_{est} - \bar{Q}_{est})^2) \times \sum((Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2))}} \quad (3)$$

که در آن ها،  $n$  تعداد نقاط مشاهده‌ای،  $Q_{sim}$  مقدار دبی برآوردی در نقطه نام و  $Q_{obs}$  مقدار دبی مشاهده‌ای برای نقطه نام است. شاخص RMSE بیانگر آن است که مقادیر برآوردی (شبیه‌سازی شده) چقدر از مقادیر مشاهده‌ای انحراف دارند و هرچه که مقدار آن کمتر باشد، نشان‌دهنده آن است که انحراف بین داده‌ها کمتر بوده و نتایج دقیق‌تر است. به عبارتی دیگر، ارزیابی عملکرد مدل بر مبنای مقایسه رواناب شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای بوده که هرچه این نمایه کوچک‌تر باشد، دقت پیش‌بینی مدل بیشتر خواهد بود. نمایه  $R^2$  همبستگی بین داده‌ها را نشان می‌دهد و

جدول ۴- متغیرهای ورودی موثر برای واسنجی مدل و تعیین مقادیر اولیه، تغییرات و مقادیر بهینه

ردیف	متغیرهای ورودی مدل	مقادیر اولیه	مقیاس تغییرات	مقادیر بهینه
۱	درصد مناطق نفوذناپذیر	-	$\pm 30$	-
۲	شیب (درصد)	-	$\pm 30$	-
۳	عرض معادل (m)	-	$\pm 30$	-
۴	N (سطوح نفوذناپذیر)	۰/۱۳	۰/۱۱-۰/۳۳	۰/۱۸
۵	N (سطوح نفوذپذیر)	۰/۰۵	۰/۰۲-۰/۸	۰/۲
۶	ارتفاع ذخیره مناطق نفوذناپذیر (mm)	۱/۷۷۸	۰/۳-۲/۵	۲
۷	ارتفاع ذخیره مناطق نفوذپذیر (mm)	۳/۸۱	۲/۵-۵/۱	۴/۱
۸	درصد مناطق نفوذناپذیر بدون ذخیره سطحی	۱۶	۵-۲۰	۱۸

مدل را نشان می‌دهد.

از واقعه بارندگی دوم (تاریخ وقوع ۱۳۹۶/۱۲/۱۵) و واقعه بارندگی چهارم (تاریخ وقوع ۱۳۹۷/۰۱/۲۶) برای ارزیابی مدل EPASWMM در این پژوهش استفاده شده و برای تجزیه و تحلیل نتایج از نمایه نش-ساتکیف (NS)، جذور میانگین مربعات خطا (RMSE) و نمایه همبستگی ( $R^2$ ) استفاده شده است. جدول‌های ۶ و ۷ به ترتیب نتایج ارزیابی مدل و نتایج محاسبه حجم رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده

در این مطالعه از دو واقعه بارندگی که در تاریخ‌های ۱۳۹۶/۱۱/۲۱ (واقعه اول) و ۱۳۹۷/۰۱/۰۹ (واقعه سوم) اتفاق افتاده، برای واسنجی مدل EPASWMM استفاده شد. برای تجزیه و تحلیل نتایج از نمایه نش-ساتکیف (NS) استفاده شده است. اگر در فرایند واسنجی، مقدار نمایه (NS) بیشتر از ۰/۵ باشد، نشان‌دهنده آن است که فرایند واسنجی از دقت کافی برخوردار بوده، نتایج در حد معنی‌داری قابل قبول است. جدول ۵، نتایج آماری حاصل از فرایند واسنجی



به‌وسیله مدل را نشان می‌دهند. در ارزیابی مدل EPASWMM در این پژوهش، سه متغیر دبی، ارتفاع رواناب و سرعت رواناب برای وقایع اول تا چهارم به‌عنوان موثرترین متغیرها انتخاب شده و با شاخص‌های NS، RMSE و  $R^2$  در داخل مدل ارزیابی شده‌اند.

شکل‌های ۶ الی ۹، هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده با مدل EPASWMM که برای محاسبه حجم رواناب وقایع اول تا چهارم استفاده شده را نشان می‌دهند.

جدول ۵- نتایج واسنجی مدل EPASWMM در خروجی حوضه برای واقعه اول و سوم

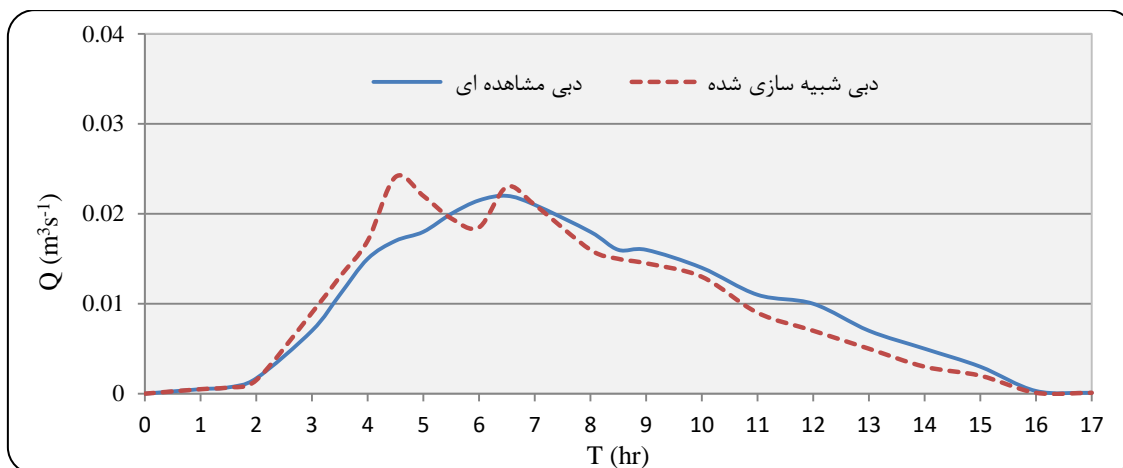
واقع‌بارندگی	عامل (رواناب)	NS	RMSE	$R^2$
واقع‌اول	دبی	۰/۹۴	۰/۰۰۱۸	۰/۹۳
	ارتفاع	۰/۹	۰/۰۱۲	۰/۸۵
	سرعت	۰/۶۹	۰/۱۰۶	۰/۷۶
واقع‌سوم	دبی	۰/۹۲	۰/۰۰۴۴	۰/۸۹
	ارتفاع	۰/۸۶	۰/۰۰۷۹	۰/۸۴
	سرعت	۰/۵۲	۰/۰۶۴۹	۰/۷۱

جدول ۶- نتایج ارزیابی مدل EPASWMM در خروجی حوضه برای واقعه دوم و چهارم

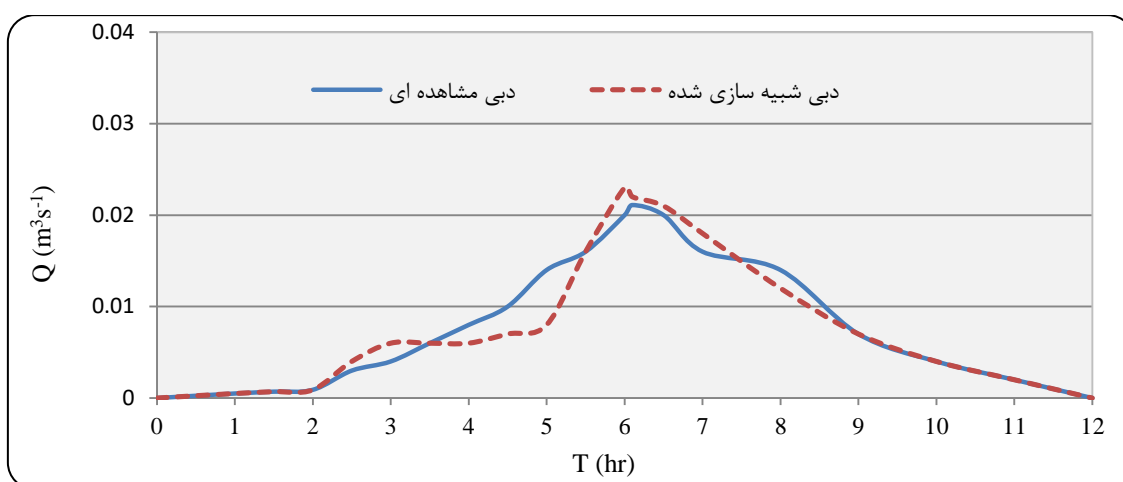
واقع‌بارندگی	عامل (رواناب)	NS	RMSE	$R^2$
واقع‌دوم	دبی	۰/۸۴	۰/۰۰۲۶	۰/۸۹
	ارتفاع	۰/۸۸	۰/۰۱۴	۰/۸۲
	سرعت	۰/۸۵	۰/۰۸۲	۰/۸۳
واقع‌چهارم	دبی	۰/۸۹	۰/۰۲۱	۰/۷۹
	ارتفاع	۰/۹	۰/۰۱۳	۰/۸۸
	سرعت	۰/۷۸	۰/۰۹۲	۰/۷۳

جدول ۷- نتایج محاسبه رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده با مدل EPASWMM در خروجی حوضه

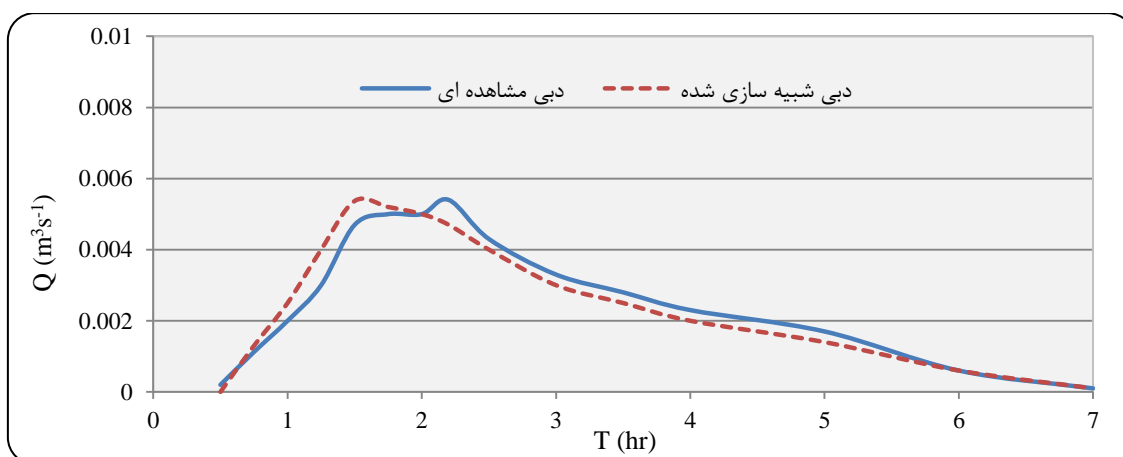
مشاهده‌ای				متغیر
واقع‌اول	واقع‌دوم	واقع‌سوم	واقع‌چهارم	
۵۶۳/۲	۲۶۷/۳	۵۲/۲	۲۱۲/۱	حجم رواناب ( $m^3$ )
۰/۰۲۲	۰/۰۲۱۱	۰/۰۰۵۴	۰/۰۱۸	دبی پیک ( $m^3 s^{-1}$ )
۶/۵	۶/۱	۲/۲	۵/۶	زمان تا اوج (hr)
شبیه‌سازی شده (برآورد شده) با مدل EPASWMM				متغیر
واقع‌اول	واقع‌دوم	واقع‌سوم	واقع‌چهارم	
۵۳۳/۱	۲۳۶/۲	۴۷/۱	۲۰۵/۸	حجم رواناب ( $m^3$ )
۰/۰۲۴۱	۰/۰۲۳	۰/۰۰۵۳۷	۰/۰۲۱	دبی پیک ( $m^3 s^{-1}$ )
۴/۵	۶	۱/۵	۵	زمان تا اوج (hr)



شکل ۶- هیدروگراف مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده با مدل برای واقعه اول



شکل ۷- هیدروگراف مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده با مدل برای واقعه دوم



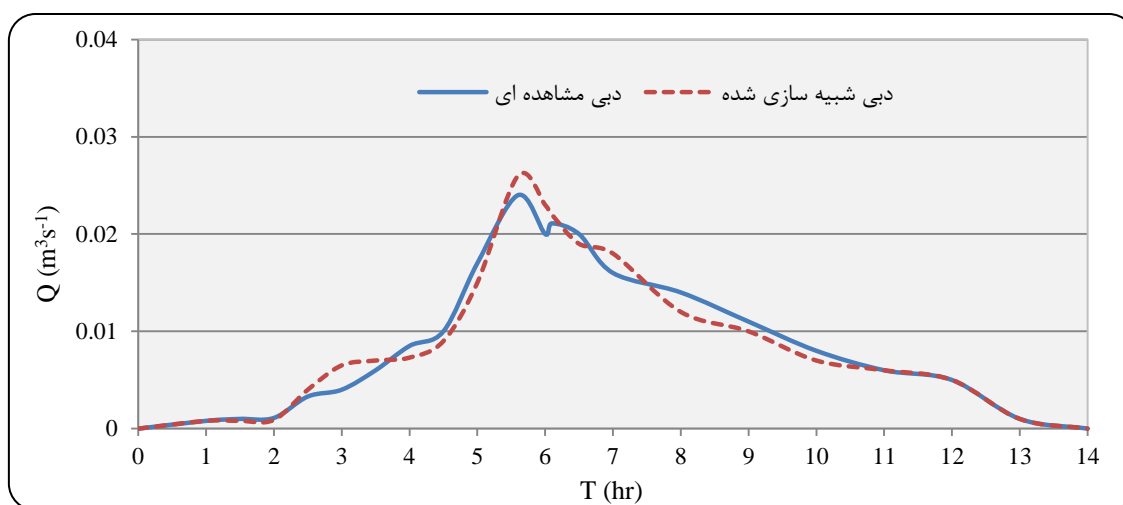
شکل ۸- هیدروگراف مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده با مدل برای واقعه سوم

NS برای متغیر دبی در واقعه اول و سوم به ترتیب ۰/۹۴ و ۰/۹۲ و برای ارتفاع رواناب به ترتیب ۰/۹ و ۰/۸۶ بوده، به دلیل نزدیک بودن به عدد یک، نشان-دهنده بالابودن دقت شبیه‌سازی در هر دو متغیر است

نتایج حاصل از واسنجی مدل نشان داد که مقادیر حاصل از شبیه‌سازی دبی و ارتفاع رواناب با مدل EPASWMM در دو واقعه اول و سوم، انطباق خوبی با مقادیر مشاهده‌ای دارند، به گونه‌ای که مقدار نمایه

دارد. به‌ویژه این‌که واقعه سوم در فروردین ماه اتفاق افتاده، لذا، مقدار شاخ و برگ ریزش کرده درختان در این ماه زیاد بوده و به مواد زائد کانال‌های شهری اضافه شده، در نتیجه دقت واسنجی را کاهش داده است. نتایج پژوهش‌های قبلی این اختلاف مقادیر شبیه‌سازی سرعت رواناب با مقادیر مشاهده‌ای و انطباق آن با واقعیت را تایید کرده، آن را از نکات مثبت شبیه‌سازی با مدل EPASWMM، بیان کرده‌اند (Siavoshi, ۲۰۱۶).

که البته نتایج پژوهش‌های قبلی، انطباق مقادیر شبیه‌سازی با مقادیر مشاهده‌ای در روش‌های واسنجی مبتنی بر روابط ریاضی را تایید می‌کند (Javaheri و Vazif, ۲۰۱۵). در حالی‌که در مورد سرعت رواناب بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای، کمی اختلاف وجود دارد. اما این اختلاف در حد قابل قبولی است و مقدار NS برای واقعه اول و سوم به ترتیب ۰/۶۹ و ۰/۵۲ و بیشتر از ۰/۵ است. علت ضعیف بودن نتایج سرعت می‌تواند ناشی از زباله یا مواد زائدی باشد که در رواناب‌های شهری و داخل کانال‌های شهری وجود



شکل ۹- هیدروگراف مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده با مدل برای واقعه چهارم

بررسی هیدروگراف‌های ترسیم‌شده نشان می‌دهد که در واقعه دوم، بیشترین همپوشانی (کمترین میزان انحراف) بین هیدروگراف مشاهده‌ای با شبیه‌سازی شده وجود داشته، به عبارتی دیگر، میزان اختلاف بین متغیرهای دبی پیک<sup>۱</sup> (Qp)، حجم سیلاب و زمان تا اوج<sup>۲</sup> (Tp) در حالت شبیه‌سازی شده با مشاهده‌ای، نسبت به سه واقعه دیگر بسیار کم است و می‌توان بیان کرد که مدل EPASWMM در محاسبه متغیرهایی همچون دبی پیک سیلاب (Qp)، دارای دقت بالاتر و حساسیت بیشتری هستند و در سایر پژوهش‌های صورت‌گرفته در این زمینه، این نتیجه بیان شده و آن را از ویژگی‌های مثبت مدل مذکور عنوان کرده‌اند (Ghasemian, ۲۰۱۵).

همچنین، مقدار ضریب تبیین R<sup>2</sup> برای واسنجی دو عامل دبی و ارتفاع رواناب بین ۰/۸۴ تا ۰/۹۳ متغیر بوده که نشان‌دهنده این است که بین داده‌های شبیه‌سازی شده با مدل EPASWMM و مشاهده‌ای، همبستگی قابل قبولی وجود دارد.

نتایج محاسبه حجم رواناب نشان داد که حجم رواناب مشاهده‌ای در هر چهار واقعه بیشتر از حجم رواناب شبیه‌سازی شده به‌وسیله مدل است، اما مقادیر دبی اوج مشاهده‌ای در وقایع اول، دوم و سوم از مقادیر شبیه‌سازی شده کمتر بوده، در واقعه سوم، اختلاف زیادی ندارند. ولیکن، بررسی مقادیر محاسبه‌شده برای هر سه متغیر نشان می‌دهد که نتایج مدل EPASWMM از یکنواختی خوبی برخوردار است که با نتایج پژوهش‌های صورت‌گرفته در این زمینه، منطبق است (Zhang و همکاران، ۲۰۱۶).

<sup>1</sup> Q Peak

<sup>2</sup> Time to peak

سناریوی کاهش سیلاب خروجی زیرحوضه‌های مذکور شامل موارد ذیل است.

\* ایجاد تاخیر در روند جریان سیلاب با احداث بندهای سنگی ملاتی و خاکی کوچک به صورت متوالی

\* ایجاد پوشش گیاهی از طریق نهال کاری و ایجاد کمربند سبز در ضلع جنوبی شهر مشهد

\* برای بررسی سناریوهای کاهش سیلاب در داخل محدوده شهرک پایداری یا همان واحدهای هیدرولوژیکی، به نتایج شبیه‌سازی بارش-رواناب مدل EPASWMM مراجعه کرده و نتایج نشان داده که اتصال-گره‌های کد ۵، ۸، ۱۱ و ۱۲ ظرفیت انتقال رواناب در سرعت‌های بالا را نداشته و ضرورت دارد که با تغییر ابعاد گره و کانال متناسب با دبی طراحی، ظرفیت انتقال رواناب به وجود آمده را داشته باشند. لذا متغیرهای اصلی زیرحوضه‌های OUT5، OUT8، OUT11 و OUT12 از نظر شکل، ابعاد کانال‌ها و لوله-های زهکشی در داخل مدل EPASWMM تعریف شده و پس از کالیبره کردن ابعاد با مدل و نیز تغییرات متوالی ابعاد کانال‌ها در داخل مدل، ابعاد مناسب با نتایج شبیه‌سازی مدل، به دست آمده است (جدول‌های ۸ و ۹).

### نتیجه‌گیری

پدیده سیلاب شهری در حوزه آبخیز مشرف به شهر مشهد با وجود همه پیچیدگی‌هایش، قابل بررسی و مطالعه بوده، می‌توان با استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی-هیدرولیکی با مبنای روابط ریاضی، روند حرکت سیلاب و رفتارهای هیدرولوژیکی آن را تحلیل کرده و با طراحی تغییرات شبکه زهکشی بر اساس نتایج شبیه‌سازی، میزان خسارات سیلاب را کاهش داد. در این پژوهش، با توجه به وجود بخش اعظم خسارات و مشکلات ناشی از سیلاب ورودی به منطقه مسکونی شهرک پایداری، شبیه‌سازی بارش-رواناب این محدوده مطالعاتی در مدل EPASWMM انجام شده و بر اساس نتایج شبیه‌سازی مدل، بهترین سناریوی کنترل سیلاب طراحی و ارائه شد.

بررسی نتایج روندیابی سیلاب در مدل EPASWMM نشان می‌دهد که یکی از علل اصلی ورود سیلاب‌ها به داخل محدوده مسکونی شهرک

نتایج ارزیابی مدل EPASWMM برای دو واقعه دوم و چهارم نشان می‌دهد که نمایه‌های NS و  $R^2$  برای سه متغیر دبی، ارتفاع و سرعت رواناب به ترتیب از ۰/۷۸ تا ۰/۹ و ۰/۷۳ تا ۰/۸۹ متغیر بوده که بررسی مقادیر هر دو نمایه نشان‌دهنده همبستگی زیاد داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده است و به عبارتی دیگر، مقادیر این نمایه‌ها، کارایی و دقت بالای مدل EPASWMM در شبیه‌سازی رواناب حوضه مورد مطالعه را تایید می‌کنند. همچنین، نتایج پژوهش‌های آماری و ریاضی انجام شده در بخش شبیه‌سازی سیلاب‌های شهری، بیان کرده که همبستگی مقادیر شبیه‌سازی با مقادیر مشاهده‌ای بر اساس نتایج نمایه‌های NS و  $R^2$ ، نشان‌دهنده دقت بالای مدل EPASWMM در شبیه‌سازی رواناب‌های شهری و انطباق آن با شواهد منطقه‌ای است (Ghaforifard, ۲۰۱۴).

بر اساس نتایج سرعت و حجم رواناب شبیه‌سازی شده مدل در بخش روندیابی اتصال-گره‌ها، مشخص شد که علت اصلی کافی نبودن ظرفیت عبور سیلاب از کانال‌های انتقال در محدوده مطالعاتی (شهرک پایداری) و ورود سیلاب به محدوده شهری، اتصال گره‌های کد ۵، ۸، ۱۱ و ۱۲ به ترتیب با عرض کف ۰/۹، ۰/۹۵، ۱/۰ و ۱/۰ متر می‌باشند. لذا، ضرورت دارد که سناریوهای کنترل سیلاب شهری برای این منطقه بررسی شده و بهترین روش برای کنترل رواناب شهری در محدوده مطالعاتی بر اساس نتایج شبیه‌سازی در مدل EPASWMM ارائه شود.

برای انتخاب بهترین روش کنترل سیلاب شهری، بازدیدهای میدانی مرحله‌ای در دو منطقه مجزا انجام شده است. منطقه اول شامل بالادست محدوده مطالعاتی (زیرحوضه‌های  $M_2$ ،  $M_3$  و  $M_4$ ) بوده و منطقه دوم داخل محدوده شهرک پایداری و واحدهای هیدرولوژیکی (OUT<sub>1</sub> الی OUT<sub>12</sub>) می‌باشد. بررسی نتایج مدل EPASWMM نشان می‌دهد که یکی از علل اصلی ورود سیلاب‌ها به داخل محدوده شهرک پایداری، بالابودن حجم سیلاب خروجی از زیرحوضه‌های  $M_2$ ،  $M_3$  و  $M_4$  و ورود سیلاب به محدوده شهرک پایداری است. بررسی‌های منطقه‌ای در زیرحوضه‌های بالادست نشان‌دهنده که بهترین

اصلی کافی نبودن ظرفیت عبور سیلاب از کانال‌های انتقال در منطقه شهرک پایداری، اتصال-گره‌های کد ۵، ۸، ۱۱ و ۱۲ بوده که در انتهای شبکه واقع شده‌اند. لذا، با توجه به نتایج شبیه‌سازی در مدل EPASWMM پیشنهاد می‌شود در زیرحوضه‌های OUT5، OUT8، OUT11 و OUT12 شکل و ابعاد کانال‌ها و لوله‌های زهکشی بر اساس نتایج جدول ۸ طراحی شده تا قابلیت هدایت رواناب بیشتری را داشته باشند.

پایداری (منطقه شهری)، بالابودن حجم سیلاب خروجی از زیرحوضه‌های  $M_2$ ،  $M_3$  و  $M_4$  و ورود سیلاب به محدوده شهرک پایداری می‌باشد. بهترین سناریوی کاهش سیلاب خروجی زیرحوضه‌های مذکور ایجاد تاخیر در روند جریان سیلاب با احداث بندهای سنگی ملاتی و خاکی کوچک به صورت متوالی و ایجاد پوشش گیاهی از طریق احداث کمربند سبز است. بر اساس نتایج سرعت و حجم رواناب شبیه‌سازی شده در بخش روندیابی اتصال-گره‌ها، مشخص شد که علت

**جدول ۸-** تعیین مشخصات اصلاحی اتصال-گره‌های مورد مطالعه واحدهای هیدرولوژیک بر اساس نتایج شبیه‌سازی مدل

مشخصات کانال یا مجرای اصلی عبور رواناب شهری				طول کانال اصلی (m)	کد اتصال-گره	واحد هیدرولوژیک
مشخصات جدید پس از شبیه‌سازی مدل		شرایط فعلی				
عرض کف (m)	سطح مقطع ( $m^2$ )	عرض کف (m)	سطح مقطع ( $m^2$ )			
۱/۴۴	۱/۷۵	۰/۹	۱/۱۵	۹۲/۰	OUT <sub>۵-۵</sub>	OUT <sub>۵</sub>
۱/۳۸	۱/۸۲	۰/۹۵	۱/۲۰	۶۳/۴	OUT <sub>۸-۸</sub>	OUT <sub>۸</sub>
۱/۳۰	۱/۸۵	۰/۹۵	۱/۲۵	۸۴/۹	OUT <sub>۱۱-۱۱</sub>	OUT <sub>۱۱</sub>
۱/۳۰	۱/۹۰	۱/۰	۱/۳۰	۸۸/۰	OUT <sub>۱۲-۱۲</sub>	OUT <sub>۱۲</sub>

**جدول ۹-** تعیین دبی طراحی و دبی شبیه‌سازی شده به وسیله مدل (بیشینه دبی ورودی به شبکه) برای اتصال-گره‌های واحدهای هیدرولوژیک

واحد هیدرولوژیک	کد اتصال-گره	دوره بازگشت دبی طرح (سال)	دبی طراحی یا بیشینه دبی عبوردهنده در شرایط فعلی		دبی شبیه‌سازی شده به وسیله مدل (بیشینه دبی ورودی محاسبه شده به شبکه زهکشی از بازه‌های بالادست) ( $m^3s^{-1}$ )	
			$m^3s^{-1}$	$m^3s^{-1}$	$m^3s^{-1}$	$m^3s^{-1}$
OUT <sub>۱</sub>	OUT <sub>۵-۵</sub>	۵	۱/۴۲	۲/۱۶		
OUT <sub>۲</sub>	OUT <sub>۸-۸</sub>	۵	۱/۴۸	۲/۲۴		
OUT <sub>۳</sub>	OUT <sub>۱۱-۱۱</sub>	۵	۱/۵۸	۲/۳۴		
OUT <sub>۴</sub>	OUT <sub>۱۲-۱۲</sub>	۵	۱/۶۵	۲/۴۲		

برآورد شده است. این اعداد نشان می‌دهند که سطح مقطع این چهار واحد هیدرولوژیکی بر اساس نتایج مدل، قابلیت عبور دبی و حجم جریان رواناب ورودی به شبکه از زیرحوضه‌های روستایی بالادست را نداشته و ضرورت دارد که طراحی مجدد برای شرایط آتی صورت گیرد.

بر اساس نتایج شبیه‌سازی مدل، مناسب‌ترین اندازه سطح مقطع کانال انتقال در زیرحوضه‌های OUT5، OUT8، OUT11 و OUT12 برای انتقال سیلاب‌های شهری و عدم ورود آن‌ها به داخل مناطق

بر اساس نتایج جدول ۹، دوره بازگشت دبی طراحی برای واحدهای هیدرولوژیکی OUT5، OUT8، OUT11 و OUT12 همگی پنج ساله بوده و دبی طراحی یا بیشینه دبی عبوردهنده در شرایط فعلی برای این واحدها به ترتیب ۱/۴۲، ۱/۴۸، ۱/۵۸ و ۱/۶۵ متر مکعب بر ثانیه است، در حالی که بر اساس نتایج شبیه‌سازی در مدل EPASWMM، دبی شبیه‌سازی شده به وسیله مدل یا بیشینه دبی ورودی محاسبه شده به شبکه زهکشی از بازه‌های بالادست به ترتیب ۲/۱۶، ۲/۲۴، ۲/۳۴ و ۲/۴۲ متر مکعب بر ثانیه

هیدروگراف جریان در هر بخش، می‌توان به‌عنوان ورودی برای مدل‌های دیگر استفاده کرد. به این ترتیب، مدل EPASWMM به‌عنوان ابزاری موثر و با کارایی بالا برای مدیریت سیلاب شهری و شبیه‌سازی هیدرولوژیکی-هیدرولیکی جریان سیلابی در مجاری شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی به‌ویژه در حوزه آبخیز شهری مشهد ارزیابی شده، می‌توان از این مدل برای مدیریت، طراحی و تغییر شبکه‌های زهکشی رواناب شهری در سایر مناطق شهر مشهد استفاده کرد.

مسکونی، به‌ترتیب ۱/۷۵، ۱/۸۲، ۱/۸۵ و ۱/۹۰ متر مربع و عرض کف کانال به‌ترتیب ۱/۴۴، ۱/۳۸، ۱/۳۰ و ۱/۳۰ متر است. البته نتایج به‌دست آمده برای تغییر ابعاد و شکل اتصال-گره‌ها و کانال‌های مذکور، با مشاهدات میدانی در سطح محدوده مطالعاتی کاملاً منطبق می‌باشد.

با توجه به قابلیت‌های مدل EPASWMM در برآورد رواناب و نتایج ارزیابی و واسنجی این مدل، می‌توان نتیجه گرفت که این مدل انعطاف‌پذیری قابل قبولی برای ترکیب با مدل‌های دیگر دارد و از

### منابع مورد استفاده

- Ahmadi, A.R. 2014. Video tutorials and EPASWMM tricks for drainage and runoff management in urban areas. First edition, Kalk Zarrin Publication, Tehran, 259 pages (in Persian).
- Alibakhshi, R., M. Fazolela and M. ziatabarhamadi. 2015. Flood management in urban areas using computer simulation. Iranian Journal of Water Resources Research, 11(3): 39-48 (in Persian).
- Del Giudice, G. and R. Padulano. 2016. Sensitivity analysis and calibration of a rainfall-runoff model with the combined use of EPA-SWMM and Genetic algorithm. Acta Geophysica, 64: 1755-1778.
- Dankan J., F. Blumensaat, W. Wang, P. Krebs and O. Kolditz. 2018. Coupling hydrogeological with surface runoff model in a Poltva, case study in Western Ukraine. Environmental Earth Sciences, 65: 1439-1457.
- Ghaforifard, K. 2014. Simulation of rainfall-runoff model using uncertainty analysis of hydrometer station data in EPASWMM Model, case study: urban area of Birjand. MSc Thesis, Faculty of Natral Resources, Birjand University, 168 pages (in Persian).
- Ghasemian, A. 2015. Study of changes in precipitation characteristics in urban rising runoff using the EPASWMM 5.1 calibration model. MSc Thesis, Faculty of Natural Resources, Torbat Heydarie University, 147 pages (in Persian).
- Hashemi, R. and N. Moradi. 2018. Investigating the effects of urban development on hydrological reactions in watershed areas, case study: Torqabeh, Hesar and Dehb. MSc Thesis, Faculty of Natural Resources, Kashan University, 154 pages (in Persian).
- Javaheri, M. and S. Nazif. 2015. Emission model of urban runoff based on sensitivity analysis. Journal of Water Resources Research, 8(4): 54-62 (in Persian).
- Nagaran, A. and A. Biswajeet Pradhan. 2019. Monitoring and predicting land use change in Tripoli Metropolitan City using an integrated Markov chain and cellular automata models in GIS. Arabian Journal of Geosciences, 7: 4291-4301.
- Rasoolinia, N. and M. Jahedi. 2019. Efficiency of SWMM Model in preparation of production runoff map in urban basins, Marivan Urban Watershed. National Conference on Flood Management and Engineering, Tehran, 290-299.
- Roostae, S., M. Ahadnejad and S. Farrokhi. 2014. Spatial measurement of urban sprawl with emphasis on land use change using multi-time satellite images. Geography and Planning Scientific Journal, 18(4): 22-34 (in Persian).
- Siavoshi, N. 2016. Investigation of SWMM Model calibration methods and their effects on urban runoff fluctuations. MSc Thesis, Faculty of Natural Resources, Birjand University, 198 pages (in Persian).
- Singh Bisht, D., C.H. Chatterjee, S.h. Kalakoti, P. Upadhyay, M. Sahoo and A. Panda. 2016. Modeling urban floods and drainage using SWMM and MIKE URBAN, a case study. Natural Hazards, 84: 749-776.
- Soleimani, K. 2010. Hydrology and quantitative modeling of urban flood in GIS and SWMM environments. First edition, Haraz Institute of Higher Education, 312 pages (in Persian).
- Veysipanah, M., A. Majidi and G. Salehi. 2019. Comparison of logical methods and SWMM in determining flood discharge in Zavareh Basin. Second National Conference on Applied Resources of Water Resources in Iran, Zanjan, 255-245.

16. Vanrooj, M. and A. Rutten. 2018. Identification of potential soil water retention using hydric numerical model at arid regions by land-use changes. *Science Direct, International Soil and Water Conservation Research*, 3: 305–315.
17. Wook Jung, Y., Sh.I. Han and D. Jo. 2015. Optimal design of permeable pavement using harmony search algorithm with SWMM. *Harmony Search Algorithm*, 382: 385-394.
18. Zhang, W. and T. Li. 2016. The influence of objective function and acceptability threshold on uncertainty assessment of an urban drainage hydraulic model with generalized likelihood uncertainty estimation methodology. *Water Resources Management*, 29: 2059–2072.