



ارزیابی کارائی شبکه جمع آوری و دفع آب‌های سطحی با استفاده از مدل SWMM (مطالعه موردی: شهر لیکک، استان کهگیلویه و بویراحمد)

فاطمه طاعت‌پور^۱، زهره خورسندی کوهانستانی^{۲*} و محسن آرمین^۳

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آبخیزداری، گروه مرتع و آبخیزداری دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیاء بهبهان.

۲- نویسنده مسئول، استادیار گروه مهندسی طبیعت دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان. khorsandi@ramin.ac.ir

۳- استادیار گروه مهندسی منابع طبیعی - آبخیزداری، دانشگاه یاسوج.

پذیرش: ۱۳۹۶/۴/۱۹

بازنگری: ۱۳۹۶/۴/۱۷

دریافت: ۱۳۹۵/۱۰/۳

چکیده

به منظور مدیریت رواناب شهری لازم است میزان رواناب به درستی برآورد گردد. از جمله مدل‌های پرکاربرد برای برآورد رواناب شهری، مدل SWMM است که یک برای یک واقعه رگبار و یا برای داده‌های پیوسته سری زمانی کیفیت و کمیت رواناب را شبیه‌سازی نماید. هدف از تحقیق حاضر ارزیابی کارائی کانال‌های جمع‌آوری رواناب با استفاده از مدل SWMM در حوضه شهری لیکک است. به این منظور ابتدا کارایی مدل مورد ارزیابی قرار گرفت. برای واسنجی مدل از سه واقعه بارندگی و به منظور ارزیابی و اعتبارسنجی مدل از دو واقعه استفاده شد. کارایی مدل در برآورد دبی اوج و حجم جریان با استفاده از ضریب ناش - ساتکلیف، خطای مجموع مربعات و ضریب BIAS مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از واسنجی مدل نشان داد که دبی اوج و حجم جریان شبیه‌سازی انطباق خوبی با مقادیر مشاهداتی دارد ($NS=+0.74$ ، $RMSE=+0.052$ ، $BIAS\%=10/48$) و از نتایج به دست آمده در واسنجی برای برآورد مقدار بهینه پارامترها استفاده شد. به منظور ارزیابی و اعتبارسنجی مدل از دو واقعه مجزا از مرحله واسنجی استفاده شد. نتایج حاصل از ارزیابی، کارایی و دقت مدل را تأیید می‌کند ($NS=+0.58$ ، $RMSE=+0.027$ ، $BIAS\%=10/95$). با استفاده از بارش طرح و مقادیر بهینه پارامترها، اقدام به شبیه‌سازی شبکه جمع‌آوری رواناب گردید. نتایج نشان داد که مدل SWMM کارایی خوبی در شبیه‌سازی دبی اوج و حجم سیلاب دارد. همچنین نتایج بیانگر این بود که کانال‌های موجود در شهر کارایی کافی در انتقال رواناب را ندارند و در بارش‌های با دوره‌های برگشت مختلف ممکن است باعث آبگرفتگی شوند.

کلید واژه‌ها: رواناب شهری، شبیه‌سازی، واسنجی، سیستم زهکشی.

مقدمه

قابل نفوذ از جمله مواردی هستند که اثرات مهمی در وقوع خطر سیلاب در نواحی شهری دارند (Sabeti, 2011). سیستم‌های جمع‌آوری و کنترل آب‌های سطحی ناشی از بارندگی از اجزاء مهم برنامه‌ریزی و عمران مناطق شهری هستند و هر گونه سهل‌انگاری در طراحی صحیح آن‌ها می‌تواند برای جوامع شهری مشکل‌آفرین باشد. کاهش پیامدهای زیان‌بار سیلاب شهری معمولاً با برآورد دقیق رواناب شهری و انتخاب روش مناسب کنترل آن، طراحی صحیح و تأمین ظرفیت کافی شبکه‌های جمع‌آوری آب‌های سطحی محقق می‌شود، به این منظور لازم است میزان رواناب شهری به درستی برآورد گردد. مدل‌سازی در حوضه‌های شهری با توجه به مشکلات مربوط به مدیریت منابع آب از جمله سیلاب و کنترل آلودگی اهمیت یافته است. از همین رو، رویکرد مهندسان در سال‌های اخیر به سمت و سوی مدل‌های کامپیوتری برای برآورد و شبیه‌سازی رواناب است. تاکنون مدل‌های بارش - رواناب فراوانی با قابلیت‌ها

امروزه خطر وقوع سیلاب به‌عنوان یکی از پدیده‌ها و مخاطرات طبیعی در سطح جهان بسیار مورد توجه قرار گرفته است. سالانه در نقاط مختلف جهان، جان و مال بسیاری از مردم در اثر وقوع این پدیده به مخاطره می‌افتد. بر اساس آمار منتشره در یک دوره ۳۰ ساله (۱۹۷۴-۲۰۰۳) در سطح جهان، ۲۱۶۲ سیل بزرگ و مهم رخ داده که ۳۴ درصد کل سوانح جهان را تشکیل داده است (Tajbakhsh and Khodashenas, 2012).

در ایران نیز به دلیل شرایط اقلیمی، سیلاب‌ها از رخداد‌های مکرر و آسیب بار محسوب می‌شوند. سیلاب‌ها نه تنها در نواحی برون شهری، بلکه در نواحی شهری نیز آسیب‌های فراوانی به بار می‌آورند. تغییرات کاربری اراضی، گسترش شهرنشینی، ساخت و سازهای غیراصولی، سیستم زهکشی نامناسب و توسعه اراضی غیر

کارآئی کانال‌ها و مقایسه شرایط حاضر سیستم زهکشی با شرایط ایده آل به طور جدی مورد بررسی قرار نگرفته است. شهر لیکک به‌ویژه با داشتن شرایط اقلیمی خاص و به دلیل شدت بارندگی زیاد و تداوم‌های زمانی کوتاه، همچنین رشد سریع شهرسازی و شهرنشینی و ساخت و سازهای غیراصولی بدون رعایت نکات ایمنی، همچنین مشکلات و معضلات اساسی این شهر از جمله آب‌گرفتگی معابر سطح شهر، عدم وجود سیستم زهکشی مناسب و ناکارآمدی کانال‌ها و مسیل‌ها نیز از این قاعده مستثنی نیست و مستعد وقوع سیلاب است که تاکنون رخدادهای سیل نگران‌کننده‌ای را تجربه کرده است. با این حال بررسی قابل توجه‌ای در رابطه با مشکلات و معضلات کانال‌های شهر و حل بحران‌های موجود صورت نگرفته است. با توجه به موارد ذکر شده ارزیابی کارآئی کانال‌های دفع آب‌های سطحی در محدوده شهر و تعیین ابعاد مناسب کانال‌ها در جهت کاهش خطرات ناشی از این پدیده‌ی مخرب امری ضروری به نظر می‌رسد. در این پژوهش با برآورد رواناب با استفاده از مدل هیدرولوژیکی SWMM میزان کارآئی کانال‌های انتقال رواناب در حوضه شهری لیکک مورد بررسی قرار می‌گیرد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

شهر لیکک با مساحتی بالغ بر ۳۱۸ هکتار از نظر جغرافیایی در مختصات $33^{\circ} 53' 34''$ عرض شمالی و $50^{\circ} 05' 34''$ طول شرقی و مرکز شهرستان بهمنی واقع در استان کهگیلویه و بویراحمد است. متوسط بارش سالانه در منطقه حدود ۲۷۲ میلی-متر و متوسط دمای ماهانه $25/7$ درجه سانتی‌گراد است.

روش و نحوه انجام تحقیق

برای بستن مرز حوضه از نقشه کاربری اراضی منطقه که توسط سازمان مسکن و شهرسازی با مقیاس ۱/۵۰۰۰ در سال ۱۳۸۹ تهیه شده است، استفاده گردید. با استفاده از نرم افزار Arc Map و نقشه‌برداری، خطوط توپوگرافی اصلاح و نقشه DEM (Digital Elevation Model) منطقه مورد مطالعه، با اندازه سلولی (Pixel) $0/5$ متر تهیه و بر اساس نقشه تهیه شده، نقشه شیب و طبقات ارتفاعی به‌دست آمد. اطلاعات رقومی محدوده مورد مطالعه به‌صورت مختصات (X,Y,Z) برای تهیه نقشه TIN (Triangulated Irregular Networks) مورد استفاده قرار گرفته است. لایه TIN و لایه مسیر جریان با یکدیگر ترکیب شده و با مشخص کردن نقاط خروجی، مرز حوضه در محدوده شهر لیکک مشخص گردیده است. در نهایت با استفاده از نقشه‌های کاربری اراضی و نقشه شیب به‌دست آمده و همچنین بازدهی‌های میدانی مرز زیرحوضه‌ها تعیین و منطقه مورد مطالعه به ۵۲ زیرحوضه تقسیم گردید (شکل ۱).

و پیچیدگی‌های متفاوتی برای پیش‌بینی سیلاب توسعه و به‌کار برده شده‌اند. از جمله این مدل‌ها می‌توان به MIDUSS, SWMM, URBAN, RISURSIM, STORM, ILLUDASS و غیره اشاره کرد. از این میان مدل SWMM ابزاری قدرتمند برای محاسبات زهکشی شهری و مدیریت رواناب می‌باشد. سادگی کار و قدرت آن در تحلیل و مدیریت کمی و کیفی سیلاب در حوضه‌های شهری از ویژگی‌های این مدل به‌شمار می‌رود (Gironas et al, 2010).

در ارتباط با برآورد رواناب در حوضه‌های شهری و شبیه‌سازی جریان و همچنین ارزیابی شبکه جمع‌آوری و دفع آب‌های سطحی در حوضه‌های شهری مطالعه‌های بسیاری در سراسر دنیا صورت گرفته که نشان از اهمیت این مسأله می‌باشد. Jang et al. (2007) طی تحقیقی اقدام به بررسی کارآئی مدل SWMM در تعدادی از حوضه‌های آبخیز طبیعی کره جنوبی نمودند. Park et al. (2008) اقدام به شبیه‌سازی هیدروگراف جریان و حجم بارهای آلاینده در شبکه زهکشی فاضلاب کره جنوبی با استفاده از مدل SWMM نمودند. نتایج نشان داد مدل SWMM برآورد خوبی از دبی اوج و حجم رواناب داشته است. Yu et al. (2014) از مدل SWMM برای برآورد رواناب شهر جینان در چین استفاده نمودند. آن‌ها چهارده رخداد را برای اعتبارسنجی و بررسی کارآئی مدل مورد استفاده قرار دادند و در نهایت دریافتند که این مدل قابلیت استفاده در شهرهای بزرگ را دارد.

در ایران نیز در سال‌های اخیر بررسی‌های قابل توجهی در مورد سیلاب‌های شهری صورت گرفته که در این مطالعه‌ها بیشتر سیلاب‌های ناشی از طغیان رودخانه‌های مجاور مناطق شهری بررسی شده و اقدام به پهنه‌بندی سیل در این مناطق گردیده است. در موارد دیگر نیز به شبیه‌سازی رواناب شهر پرداخته شده است. Rostami Khalag (2012) در تحقیقی اقدام به تحلیل حساسیت متغیرهای مؤثر بر سیلاب شهری در شهرک امام علی (ع) شهر مشهد با استفاده از مدل SWMM نمودند. ایشان تعداد هشت پارامتر تأثیرگذار را به‌عنوان متغیرهای مستقل و دبی اوج سیلاب را به‌عنوان متغیر وابسته بررسی کردند.

Khodashenas و Tajbakhsh (2012) در یک

بررسی اقدام به ارزیابی عملکرد سیستم زهکشی رواناب سطحی حوضه آبریز اقبال شرقی واقع در جنوب و جنوب شرق شهر مشهد با استفاده از مدل SWMM MIKE کردند. Badiezadeh (2012) با استفاده از مدل SWMM اقدام به تعیین ابعاد بهینه شبکه زهکشی از طریق شبیه‌سازی رواناب سطحی در شهر گرگان نمود. Veisi Panah et al (2014) در پژوهشی اقدام به شبیه‌سازی و برآورد رواناب در حوضه شهر مریوان با استفاده از مدل SWMM کرد. همان‌طور که بیان شد تاکنون تحقیقات زیادی با استفاده از این مدل ارائه شده است ولی مشخصاً ارزیابی

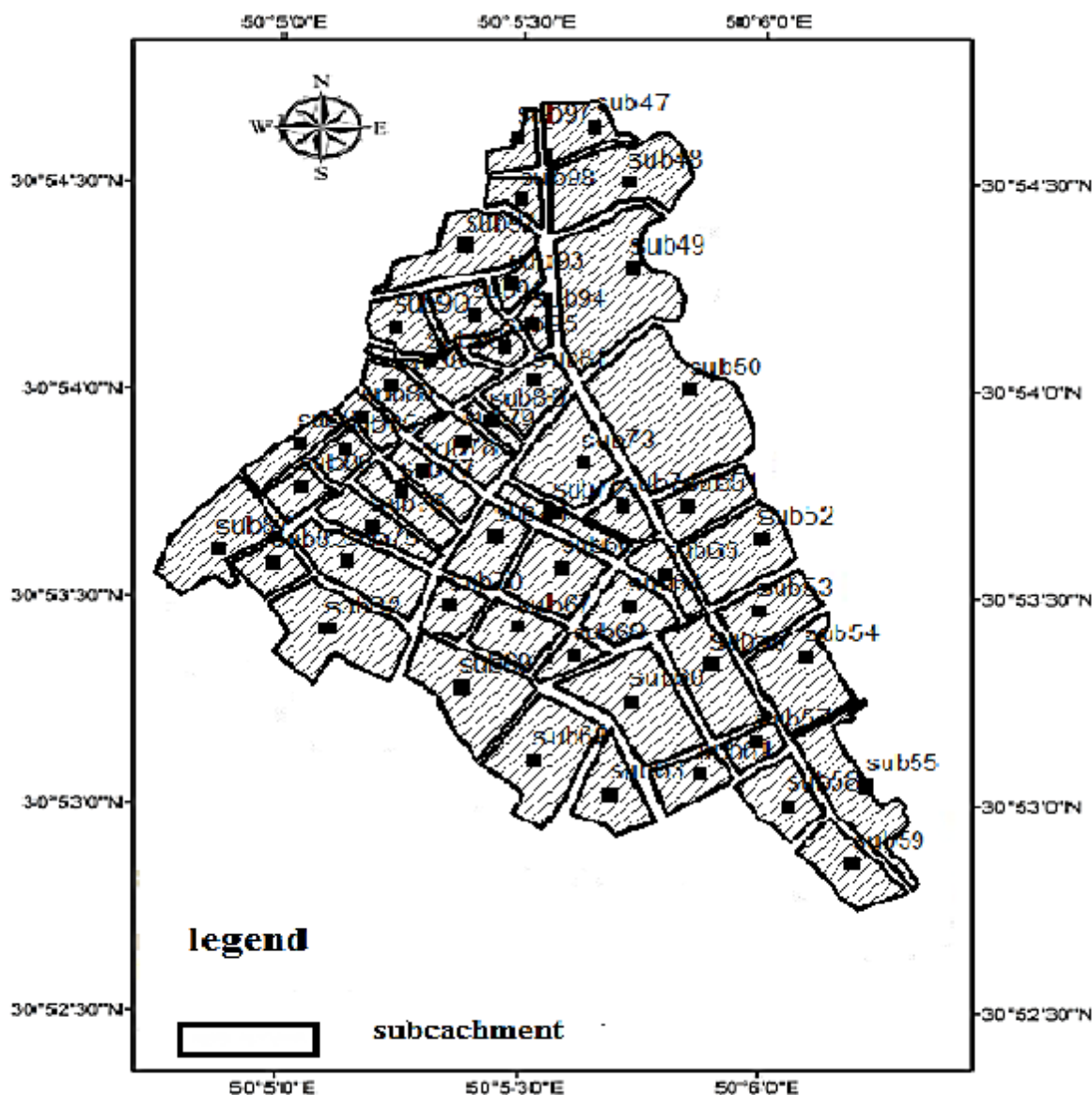


Fig. 1- Schematic figure of the location of sub-basins of the study area in the SWMM model
 شکل ۱- نمایش شماتیک از جانمایی زیر حوضه‌های منطقه مورد مطالعه در محیط مدل SWMM

و نقشه‌های کاربری اراضی در نرم افزار Arc GIS و همچنین جدول مربوط به راهنمای مدل به دست آمد. برای تخمین میزان نفوذ، مدل سه ارائه می‌کند که شامل هورتون، گرین-آمیت و شماره منحنی می‌باشد که با توجه به اطلاعات در دسترس (شماره منحنی، گروه‌های هیدرولیکی خاک و رطوبت پیشین خاک) روش شماره منحنی انتخاب گردید. در این مطالعه پنج واقعه رگباری همراه با رواناب متناظر آن‌ها برای ارزیابی و واسنجی مدل انتخاب شد. دبی جریان ایجاد شده بعد از چندین رگبار در خروجی کانال شماره ۳۰ از طریق برآورد ارتفاع رواناب با استفاده از خطکش تعیین گردید (شکل ۲). طریقه نمونه‌برداری به این صورت بود که هر ۱۵ دقیقه یک بار عمق رواناب در کانال خروجی

برای شبیه‌سازی بارش-رواناب لازم است تا یک سری پارامترها به عنوان ورودی به مدل اعمال شود. این پارامترها شامل عرض معادل زیرحوضه‌ها، مساحت، شیب، درصد نفوذناپذیری، ضریب زبری مانینگ و ذخیره سطحی می‌باشد. مساحت، عرض معادل زیر حوضه‌ها و شیب مستقیماً با استفاده از نرم افزار Arc GIS محاسبه شد. درصد مناطق نفوذناپذیر با استفاده از نقشه کاربری اراضی و به کمک نرم افزار Arc GIS محاسبه شد و مقادیر به دست آمده با بازدید میدانی از منطقه اصلاح گردید، مشخصات تعدادی از زیرحوضه‌ها در جدول (۱) ارائه شده است. مقادیر ضریب زبری در مناطق نفوذپذیر و نفوذناپذیر، ذخیره سطحی در مناطق نفوذپذیر و نفوذناپذیر از تلفیق اطلاعات میدانی

دقیقه، خصوصیات فیزیکی زیرحوضه مشرف به محل اندازه‌گیری و مشخصات هیدرولیکی شبکه زهکشی، روش مناسب برای روندیابی انتخاب و مدل هیدرولوژی برای سه رویداد اندازه‌گیری، اجرا و واسنجی گردید.

به‌منظور ارزیابی مدل از دو رگبار (غیر از وقایعی که در مرحله واسنجی به‌کار رفته‌اند) استفاده گردید. با استفاده از شاخص‌های ارزیابی ناش-سانکلیف، ریشه مربع خطا و BIAS اقدام به ارزیابی کارآئی مدل گردید که در ادامه روابط مربوط به این شاخص‌ها آورده شده است (روابط (۱)، (۲) و (۳)). Nash و Sutcliffe (1970) یک ضریب بی‌بعد به نام کارایی مدل (NS) ارائه دادند. که مقدار آن از منفی بی‌نهایت تا یک متغیر است و مقدار یک در نیاز، مدل با توجه به دوره‌های بازگشت منتخب اجرا گردید. با توجه به دوره‌های بازگشت و زمان تداوم بارش برابر با زمان تمرکز حوضه باران طرح در نظر گرفته شد. با تکمیل اطلاعات لازم، مدل برای شدت‌هایی برابر زمان تمرکز حوضه و دوره‌های بازگشت ۵، ۲ و ۱۰ ساله اجرا شده و در هر کدام از دوره‌های بازگشت عملکرد شبکه و اتصالات و مجاری بحرانی تعیین گردید. مقادیر بی‌های محاسبه شده در محل گره‌های ورودی سیل از زیر حوضه‌ها به شبکه زهکشی موجود، بارگذاری گردید و روندیابی سیل در مجاری زهکشی با روش موج سینماتیک و معادله افت انرژی Hazen-Williams انجام شد. بی‌اوج عبوری از مجاری، بر اساس شدت بارش‌های متفاوت مشخص و با توجه به نتایج حاصل از مدل براساس وجود و یا عدم وجود اضافه‌بار و شرایط سیلابی در محل گره‌ها و مجاری، کفایت شبکه موجود برای انتقال رواناب سطحی با دوره‌های بازگشت مختلف ارزیابی گردید. در نهایت ابعاد بهینه مجاری شبکه با توجه به دوره بازگشت طراحی تعیین گردید.

زیرحوضه منتخب با استفاده از خط‌کش اندازه‌گیری شد. در نهایت بی‌و سرعت رواناب تعیین گردید. پس از آماده کردن داده‌های هواشناسی و هیدرولوژی، پارامترهای مورد نیاز مدل مانند: اطلاعات بارش، خصوصیات فیزیکی زیر حوضه‌ها و شبکه زهکشی موجود به‌عنوان اطلاعات ورودی به مدل وارد شده، مدل برای شبیه‌سازی رواناب سطحی اجرا گردید. با توجه به مشخصات داده شده برای هر زیرحوضه، یک هیدروگراف واحد محاسبه شد. سپس این هیدروگراف تا نقطه خروجی زیرحوضه با روش موج سینماتیکی روندیابی شده و در نهایت بی‌خروجی از زیرحوضه تعیین گردید (Rossman, 2009). پس از وارد کردن داده‌های بارش اندازه‌گیری شده به‌صورت مقدار بارش و با فاصله زمانی ۱۵ این شاخص، نشان‌دهنده تطابق کامل هیدروگراف شبیه‌سازی شده و مشاهداتی است. BIAS خطای کل در حجم جریان بوده، مقادیر مثبت و منفی این ضریب نشان دهنده بیشتر یا کمتر بودن متوسط حجم جریان شبیه‌سازی شده توسط مدل نسبت به جریان مشاهداتی است.

$$CNS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{si} - Q_{oi})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{avo})^2} \quad (1)$$

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

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{si} - Q_{oi})^2}{\sum_{i=1}^n Q_{oi}} \times 100 \quad (3)$$

پس از ارزیابی قابلیت مدل، اقدام به شبیه‌سازی شبکه جمع‌آوری رواناب با استفاده از مدل شبیه‌سازی شده گردید. در این مرحله با استفاده از بارش طرح و مقادیر بهینه پارامترهای مورد

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی برخی از زیر حوضه‌ها

Table1- Physical properties of some sub-basins

Sub-basin	Area (ha)	Width (m)	Slope (%)	Imperv (%)
Sub1	2	151.2	1.2	82
Sub2	1.73	153	0.5	91
Sub3	2.1	162	1.5	93
Sub4	2.07	130	1.4	91
Sub5	3.76	164	0.5	92
Sub6	3.27	145	1.1	84
Sub7	3.05	189	1.3	93
Sub8	2.78	153	0.9	91

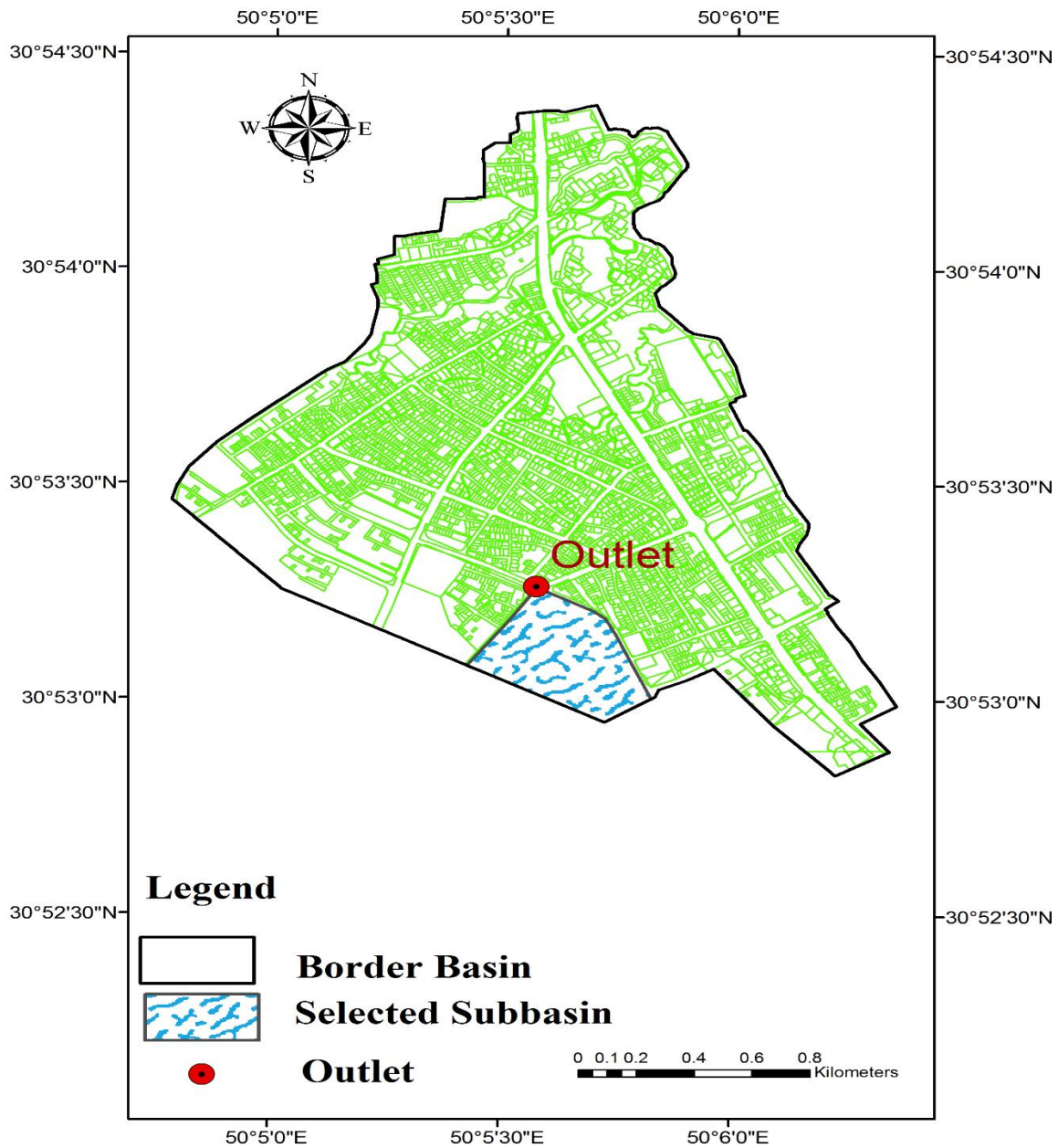


Fig.2- A view of the selected sub-basin to measure runoff speed and runoff depth
 شکل ۲- نمایی از زیر حوضه منتخب جهت اندازه گیری سرعت وعمق رواناب

می باشد و همچنین مدل کارایی مناسبی نیز در شبیه سازی حجم سیلاب دارد. نتایج به دست آمده با یافته های Sonei و Ahmadi (2008) Park et al. و (2006) Scotta؛ Jazi (2007) مطابقت دارد. اختلاف در هیدروگراف مشاهداتی و شبیه سازی می تواند ناشی از توسعه نیافتگی و یا توسعه غیراصولی و خارج از ضوابط شهر باشد.

نتایج و بحث

پس از وارد کردن داده های محاسباتی، مدل هیدرولوژی آماده و سپس برای رویدادهای اندازه گیری شده واقع در کانال شماره ۳۰ اجرا شد که مقایسه هیدروگراف های محاسباتی و مشاهداتی رگبارهای اندازه گیری شده در شکل (۳) و مقادیر دبی اوج و حجم سیلاب در جدول (۲) ارائه شده است. نتایج مقایسه هیدروگراف های محاسباتی و مشاهداتی نشان داد که مقادیر دبی اوج مشاهداتی و شبیه سازی شده تطابق خوبی با یکدیگر داشته که این امر نشان از کارایی مناسب مدل در برآورد دبی اوج جریان

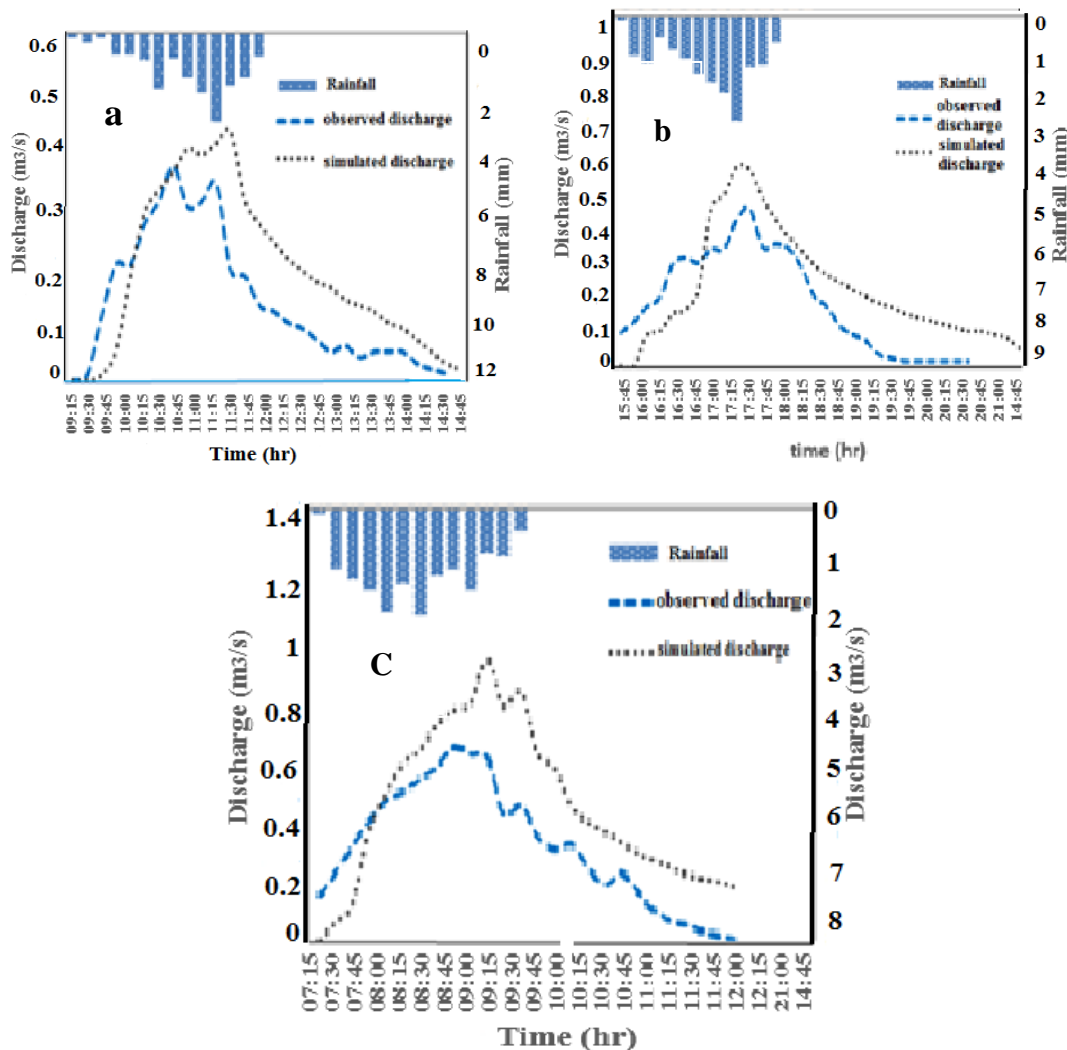


Fig3- Simulated and observed hydrographs for three measurement events
a: event date 2015/10/30 b: event date 2015/11/11 c: event date 2015/12/16

شکل ۳- هیدروگراف محاسباتی و مشاهداتی برای سه رویداد اندازه گیری:
a: تاریخ 2015/10/30 -b: تاریخ 2015/11/11 -c: تاریخ 2015/12/16

جدول ۲- مقادیر دبی اوج و حجم جریان شبیه سازی شده و مشاهداتی

Table 2- Simulated and observed amounts of peak flow and flow volume

event	Discharge (m ³ /s)			Volume (m ³)		
	Simulated	Observed	Error (%)	Simulated	Observed	Error (%)
2015/10/30	0.44	0.37	۷	6.32	3.65	۴۲
2015/11/11	0.78	0.59	۱۹	9.49	6.88	۲۷
2015/12/16	0.57	0.53	۴	7.06	5.1	۲۸

Khalaj (2012) و در واسنجی از آن‌ها استفاده شد. با فرض همگن بودن منطقه مورد مطالعه برای به حداقل رساندن زمان واسنجی و بالا بردن دقت، مقادیر سایر پارامترها به مقدار ثابت در نظر گرفته شد و به مقدار اولیه به میزان ثابت افزوده یا کاسته گردید. این روش به طور گسترده‌ای برای واسنجی مدل‌های هیدرولوژیکی استفاده می‌شود (Temprano et al., 2006). در

از آنجایی که واسنجی مدل با توجه به پارامترهای متعدد و تعداد زیاد زیرحوضه‌ها کاری سخت و زمان بر است، برای یک واسنجی دقیق و مناسب باید پارامترها را به حداقل رساند (Du et al., 2007). در این مطالعه پارامترهای مهم انتخاب (بر اساس یافته‌های Barco et al (2008) ، Beling et al (2011)؛ Alishahi Toosi و Boudaghpour (2010) و Rostami

مدل و هیدروگراف مربوط به آنها در جدول (۳) و شکل (۴) ارائه شده است. به دلیل همگن بودن منطقه مورد مطالعه برای به حداقل رساندن زمان واسنجی و بالا بردن دقت، مقادیر سایر پارامترها برای تمام زیر حوضه‌ها به مقدار ثابت در نظر گرفته و به مقدار اولیه به میزان ثابت افزوده یا کاسته گردید.

مرحله واسنجی پارامترهای عرض معادل، درصد مناطق نفوذ ناپذیر، ذخیره چالابی مناطق نفوذ پذیر و نفوذناپذیر، ضریب زبری مناطق نفوذ ناپذیر و نفوذ پذیر برای سه رویداد اندازه‌گیری شده واسنجی شدند که میانگین مقادیر پارامتر واسنجی شده براساس حجم جریان برای اجرای بعدی و اعتبارسنجی مدل در نظر گرفته شده است. مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی حاصل از واسنجی

جدول ۳- مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی دبی و حجم جریان در رویدادهای اندازه‌گیری کانال شماره ۳۰ در مرحله واسنجی

Table 3- Simulated and observed Discharges and flow volume for measurement events of channel number 30 at calibration stage

event	Discharge (m ³ /s)			Volume (m ³)		
	Simulated	Observed	Error (%)	Simulated	Observed	Error (%)
2015/10/30	0.36	0.37	2.7	4.05	3.65	10
2015/11/11	0.57	0.59	3.5	6.74	6.88	2
2015/12/16	0.48	0.45	6.25	4.4	5.1	16

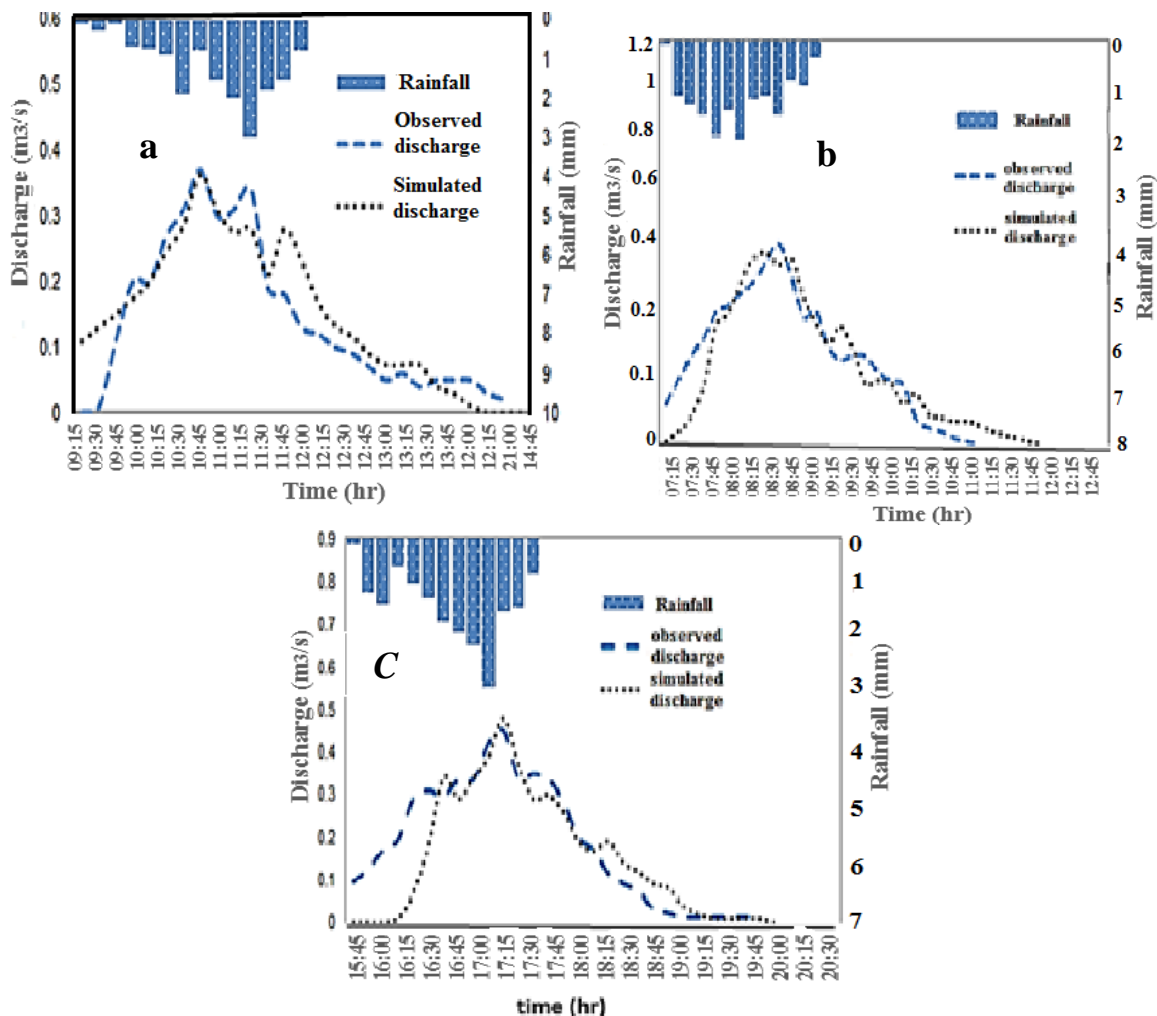


Fig. 4- Simulated and observed hydrographs at the calibration stage in three measurement events
 a: event date 2015/10/30 b: event date 2015/11/11 c: event date 2015/12/16

شکل ۴- هیدروگراف محاسباتی و مشاهداتی در مرحله واسنجی در سه رویداد اندازه‌گیری: a: رگبار مورخ ۲۰۱۵/۱۰/۳۰- رگبار مورخ ۲۰۱۵/۱۱/۱۱- c: رگبار مورخ ۲۰۱۵/۱۲/۱۶

خوب استفاده کرد. پژوهش‌های انجام شده توسط Rostami Khalaj (2012)، Veisi Panah (2014) و Donquan et al (2009) نیز این موضوع را تایید نموده‌اند. همچنین مقادیر RMSE برای متغیر دبی در فرایند واسنجی به ترتیب ۰/۰۰۳۲، ۰/۰۰۵۲، ۰/۰۰۷۳ و ۰/۰۰۲۱ در فرایند اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۰۰۳۴، ۰/۰۰۳۴ و ۰/۰۰۲۱ بوده است که نشان دهنده نتایج قابل قبول مدل و همچنین تأییدی بر قابل پذیرش بودن شکل کلی هیدروگراف شبیه‌سازی شده توسط مدل است. مقدار BIAS نشان دهنده درصد تغییرات بین میانگین هیدروگراف شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای در n فاصله زمانی است. همان‌طور که در جدول مشخص است مقدار مطلق BIAS کم بوده که نشان می‌دهد که مدل کالیبره شده حجم کل جریان را به خوبی پیش‌بینی نموده است (Croke., 2005). نتایج حاصل از واسنجی و اعتبارسنجی نشان داد مدل SWMM دقت مورد نیاز را برای شبیه‌سازی رواناب شهری دارد و می‌توان از این مدل برای طرح‌های مدیریت رواناب شهری و طراحی شبکه زهکشی رواناب شهری منطقه مورد مطالعه استفاده نمود.

پس از واسنجی مدل، به منظور اعتبارسنجی از دو رویداد مورخ 2015/12/28 و 2015/12/31 که ارتفاع و سرعت رواناب متناظر آنها در کانال شماره ۳۰ برداشت شد، استفاده گردید. نتایج اعتبارسنجی مدل هیدرولوژی با رویدادهای مذکور در جدول (۴) و در شکل (۵) نمایش داده شده است. نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWMM، تطابق مناسبی با داده‌های اندازه‌گیری شده در شبکه زهکشی منطقه مورد مطالعه از خود نشان می‌دهد. به منظور ارزیابی کارایی مدل در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی از سه شاخص Sutcliffe-Nash، RMSE و BIAS استفاده شد، که مقادیر این سه شاخص در جدول (۵) نشان داده شده است. مقدار ضریب Sutcliffe-Nash در مرحله واسنجی برای رویداد اول، دوم و سوم به ترتیب ۰/۷۱، ۰/۷۴ و ۰/۷۸ و این ضریب در مرحله اعتبارسنجی برای دو رویداد اندازه‌گیری شده به ترتیب ۰/۵۷ و ۰/۵۹ می‌باشد. مقدار قابل قبول شاخص Nash-Sutcliffe بزرگتر از ۰/۵ در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی نشان دهنده شبیه‌سازی خوب شکل هیدروگراف خروجی از مدل است (Henriksen et al., 2003). این نتایج نشان می‌دهد که می‌توان از این مدل در شبیه‌سازی حجم و دبی اوج سیلاب با دقت

جدول ۴- مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی دبی و حجم جریان رویدادهای اندازه‌گیری کانال شماره ۳۰ در مرحله اعتبارسنجی

Table 4. Simulated and observed Discharges and flow volume for Measuring events of Channel No. 30 in the validation step

event	Discharge (m ³ /s)			Volume (m ³)		
	Simulated	Observed	Error (%)	Simulated	Observed	Error (%)
2015/12/28	0.64	0.59	8	6.5	5.71	12
2015/12/31	0.09	0.088	2	1.02	1.05	3

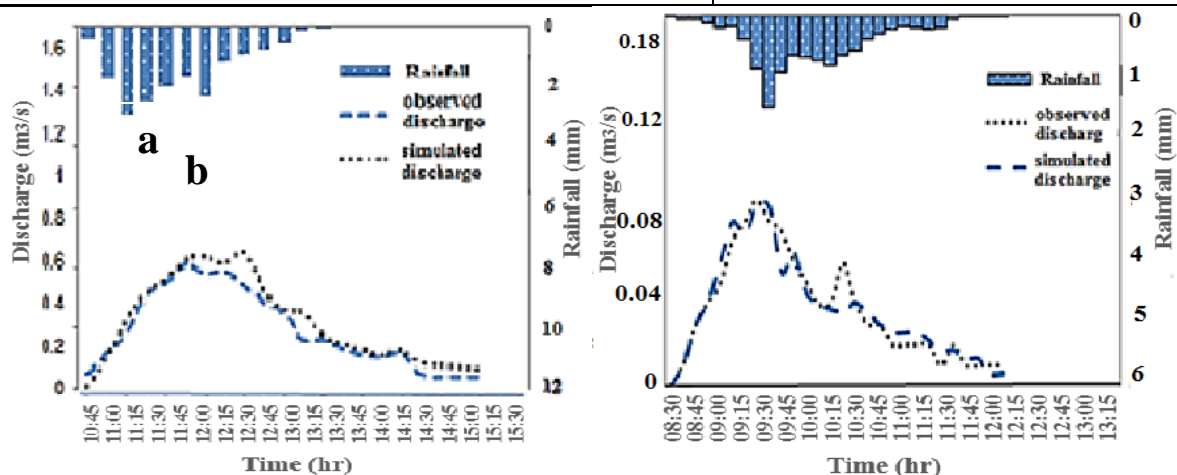


Fig. 5- Simulated and observed hydrographs at the validation stage of the model in three measurement events

a: event date 2015/12/28 b: event date 2015/12/31

شکل ۵- هیدروگراف محاسباتی و مشاهداتی در مرحله اعتبارسنجی در دو رویداد اندازه‌گیری

a: رگبار مورخ ۲۰۱۵/۱۲/۲۸ b: رگبار مورخ ۲۰۱۵/۱۲/۳۱

به این ترتیب مدل SWMM به عنوان ابزاری مؤثر و کارآمد برای مدیریت سیلاب و شبیه‌سازی هیدرولوژیکی و هیدرولیکی جریان سیلابی در مجاری جمع‌آوری آب‌های سطحی در حوضه‌های شهری ارزیابی شده و استفاده از آن توصیه می‌گردد. نتایج به‌دست آمده با نتایج سایر محققین Sonei و Ahmadi Jazi (2007)، Hse et al، Karimi et al (2015)، Badiezhadeh (2012)، Yu et al، (2000) همخوانی دارد. به‌منظور تعیین ابعاد بهینه هیدرولیکی کانال‌های سیستم زهکشی سطحی، قسمت‌هایی از سیستم جمع‌آوری آب‌های سطحی منطقه که با شرایط فعلی توانایی عبور دادن سیلاب طراحی را نداشتند پس از شبیه‌سازی، شناسایی شده و ابعاد بهینه تیپ برای آنها پیشنهاد شد. نتایج حاصل از بهینه‌سازی هیدرولیکی برای تعدادی از مجاری سیلابی شبکه زهکشی منطقه مورد مطالعه در دوره‌های بازگشت مختلف در جداول (۶)، (۷) و (۸) ارائه شده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده برای افزایش ظرفیت مجاری به‌منظور داشتن گنجایش لازم برای رواناب حاصل از رگبارهای طراحی، افزایش سطح مقطع یا شیب را می‌توان مدنظر قرار داده، و از طریق آن نسبت به اصلاح سیستم موجود اقدام نمود. نتایج مطالعه پژوهشگرانی چون Sonei و Ahmadi Jazi (2007)، Badiezhadeh (2012)، Karimi et al (2015) و Scotta (2006) نیز افزایش سطح مقطع و افزایش شیب را به‌عنوان راه‌حل پیشنهادی برای افزایش توان آبگذری کانال‌ها معرفی نمودند.

با استخراج هیدروگراف سیلاب به ازای دوره‌های بازگشت ۲، ۵ و ۱۰ ساله در نقاط ورودی به شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی منطقه، نواحی با بیشترین سهم در تولید رواناب مشخص گردید و به این ترتیب مناطق بحرانی شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی در هنگام وقوع سیلاب شناسایی شد و با ارائه نمایش دو بعدی مسیریابی که با مشکل اضافه بار در هنگام وقوع سیلاب طراحی مواجه می‌باشند امکان تحلیل بهتر شبکه فراهم گردید. با توجه به نتایج حاصل از مدل و تراز سطح آب در پروفیل طولی مقاطع، سیستم جمع‌آوری رواناب شهری در منطقه مورد مطالعه در دوره بازگشت دو ساله مشکل آب گرفتگی کمتری دارد و تنها ۹/۳۲ درصد از طول شبکه زهکشی موجود دچار شرایط بحرانی و آب گرفتگی بوده، در دوره بازگشت ۵ ساله و ۱۰ ساله، به‌ترتیب ۲۷/۳۴ و ۳۸/۸۵ درصد از طول شبکه موجود دارای شرایط بحرانی می‌باشد از نتایج به‌دست آمده در این مطالعه و تراز سطح آب در پروفیل‌های طولی مقاطع می‌توان چنین استنباط نمود که بیشتر منطقه از لحاظ خطر آب گرفتگی و کارایی شبکه زهکشی تقریباً در شرایط نامساعدی قرار دارد و این موضوع در مناطقی که شبکه زهکشی تخریب شده و از لحاظ ابعاد ظرفیت کافی را برای عبور رواناب سطحی ندارد پررنگ تر است، در نتیجه می‌توان گفت از منظر تولید سیلاب، طراحی فعلی و شرایط موجود در شهر لیکک نامناسب است.

جدول ۵- مقادیر شاخص‌های کارایی مدل در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWMM

Table 5- Values of model performance indicators in calibration and validation modes of the SWMM Model

event	factor	stage	NS	BIAS%	RMSE
2015/10/30	discharge	calibration	0.71	6.32	0.0032
2015/11/11	discharge	calibration	0.74	9.34	0.0052
2015/12/16	discharge	calibration	0.78	15.80	0.0073
2015/12/28	discharge	validation	0.57	11.33	0.0021
2015/12/31	discharge	validation	0.59	10.57	0.00034

جدول ۶- مقادیر ابعاد بهینه شبکه زهکشی سطحی منطقه مورد مطالعه با دوره بازگشت ۲ ساله

Table 6- The optimal dimensions of the surface drainage network of the study area with a 2-year return period

name	scenario	Optimal Width (m)	Optimal depth (m)	Maximum discharge (%)	Maximum depth (%)
C108	initial values	0.5	0.45	100	100
	depth	0.675	0.45	0.71	0.77
	width=initial depth×1.5	0.9	0.45	0.48	0.59
	width=initial depth×2				
C109	initial values	0.5	0.5	100	100
	depth	0.675	0.45	100	100
	width=initial depth×1.5	0.9	0.45	100	100
	width=initial depth×2	0.9	0.5	0.9	0.93
C121	initial values	1	1	100	100
	depth	1.5	1	100	100
	width=initial depth×1.5	2	1	100	100
	width=initial depth×2	2	1.2	0.71	0.76
C420	initial values	0.5	0.4	100	100
	depth	0.6	0.4	100	100
	width=initial depth×1.5	0.8	0.4	0.91	0.93
	width=initial depth×2				

جدول ۷- مقادیر ابعاد بهینه شبکه زهکشی سطحی منطقه مورد مطالعه با دوره بازگشت ۵ ساله

Table 7- The optimal dimensions of the surface drainage network of the study area with a 5-year return period

name	scenario	Optimal Width (m)	Optimal depth (m)	Maximum discharge (%)	Maximum depth (%)
C105	initial values	0.5	0.4	100	100
	width=initial depth×1.5	0.6	0.4	100	100
	width=initial depth×2	0.8	0.4	100	100
	initial depth+0.2	0.8	0.6	0.67	0.73
C107	initial values	0.5	0.7	100	100
	width=initial depth×1.5	1.05	0.7	0.58	0.66
	width=initial depth×2	1.4	0.7	0.39	0.51
	initial values	0.5	0.45	100	100
C108	width=initial depth×1.5	0.675	0.45	100	100
	width=initial depth×2	0.9	0.45	100	100
	initial depth+0.05	0.9	0.5	0.92	0.94
	initial values	0.9	0.45	100	100
C109	width=initial depth×1.5	0.675	0.45	100	100
	width=initial depth×2	0.9	0.45	100	100
	initial depth+0.5	1.5	1	0.4	0.51
	initial values				

جدول ۸- مقادیر ابعاد بهینه شبکه زهکشی سطحی منطقه مورد مطالعه با دوره بازگشت ۱۰ ساله

Table 8- The optimal dimensions of the surface drainage network of the study area with a 10-year return period

name	scenario	Optimal Width (m)	Optimal depth (m)	Maximum discharge (%)	Maximum depth (%)
C1	initial values	0.5	0.5	100	100
	width=initial depth×1.5	0.75	0.5	0.56	0.65
	width=initial depth×2	1	0.5	0.51	0.50
C3	initial values	0.7	0.4	100	100
	width=initial depth×1.5	0.6	0.4	100	100
	width=initial depth×2	0.8	0.4	100	100
	initial depth+0.1	1	0.5	0.58	0.58
C13	initial values	0.7	0.45	100	100
	width=initial depth×1.5	0.675	0.45	100	100
	width=initial depth×2	0.9	0.45	100	100
	initial depth+0.05	1	0.5	0.73	0.79
C17	initial values	0.5	0.4	100	100
	width=initial depth×1.5	0.6	0.4	100	100
	width=initial depth×2	0.8	0.4	100	100
	initial depth+0.1	1	0.5	0.78	0.83

به‌ویژه به دلیل کاهش زمان مورد نیاز برای تحلیل مسائل، می‌تواند جزء راه‌کارهای ممکن به منظور ارتقای سطح مدیریت منابع آب قلمداد گردد. روش مورد استفاده در این تحقیق می‌تواند در مرحله طراحی، پیشنهاد و ارزیابی شبکه زهکشی سطحی برای سایر مناطق شهری با وضعیت هیدرولوژیک مشابه، مورد استفاده طراحان، تصمیم‌گیران و مدیران اجرایی پروژه‌های آبخیزداری و مدیریت آب قرار گیرد.

تشکر و قدردانی

این مقاله با حمایت دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان تهیه شده است. همچنین از داورانی که با نظرات ارزشمند خود باعث بهبود کیفیت این مقاله شدند تشکر می‌نمایم.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از واسنجی مدل SWMM نشان داد که دبی اوج و حجم جریان شبیه‌سازی انطباق خوبی با مقادیر مشاهداتی دارد و از نتایج به‌دست آمده در فرایند واسنجی برای برآورد مقدار بهینه پارامترها استفاده شد. نتایج اعتبارسنجی، کارایی و دقت مدل را تأیید می‌کند که در مورد هر دو واقعه مورد استفاده در مرحله اعتبارسنجی شاخص‌های کارایی مدل، در حد قابل‌قبولی است. با شبیه‌سازی رواناب سطحی در شبکه زهکشی سطحی، نواحی با بیشترین سهم در تولید رواناب مشخص و به این ترتیب مناطق بحرانی شبکه جمع‌آوری آبهای سطحی در هنگام وقوع سیلاب شناسایی شد و با ارائه نمایش دو بعدی مسیرهایی که با مشکل اضافه بار در هنگام وقوع سیلاب طراحی مواجه می‌باشند امکان تحلیل بهتر شبکه فراهم گردید. استفاده از مدل SWMM یا مدل‌های کامپیوتری دیگر به دلیل کاهش هزینه عملیات میدانی و

References

- 1- Alishahi Toosi, M.R. and Boudaghpour, S., 2010. The analysis of sensitivity of EPA-Swmm Model in modeling of urban areas. *The 2nd conference of comprehensive management of water resources, Bahonar university of Kerman, Kerman, Iran.* (In persian).
- 2- Badiezhadeh, S., 2012. Has been upgraded Determination of optimal dimensions of drainage network by simulating surface runoff using SWMM model in Gorgan, Golestan province, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources - Faculty of Rangeland, *Watershed Management and Fisheries and the Environmen.* (In persian).

- 3- Barco, J., Wong, K. M. and Stenstrom, M. K., 2008. Automatic Calibration of the U.S. EPA SWMM Model for a Large Urban Catchment. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(4), pp. 466-474.
- 4- Beling, F.A., Garcia, J.I.B., Paiva, E.M.C.D., Bastos, G.A.P. and Paiva, J.B.D., 2011. Analysis of the SWMM Model Parameters for Runoff Evaluation in Periurban Basins from Southern Brazil. *12nd International Conference on Urban Drainage, Porto Alegre, Brazil*,
- 5- Croke, B.F.W., Andrews, F., Spate, J. and Cuddy, S.M., 2005. IHACRES User Guide. *Technical Report*.
- 6- Donquan, Z., Jining, C., Haozheng, W., Qingyuan, T., Shangbing, C. and Zheng, S., 2009. GIS-based urban rain fall-run off modeling using an automatic catchment-discretization approach: a case study in Macaa. *Environ Earth Sci.*, 59(2), pp. 465-472
- 7- Du, J.K., Xie, S.P., Xu, Y.P., Xu, C.Y. and Singh, V.P., 2007. Development and testing of a simple physically-based distributed rainfall-runoff model for storm runoff simulation in humid forested basins. *Journal of Hydrol* 306, pp. 334–346
- 8- Gironas, J., roesner, L.A., rossman, L.A. and dVis, J., 2010. A new applications manual for the storm water management model (swmm). *journal of Elsevier, environmental modeling & software*. 25(6), PP. 813-814.
- 9- Henriksen, H. J., Troldborg, L., Nyegaard, P., Sonnenborg, T.O., Refsgaard, J. C., and Madsen, B., 2003. Methodology for construction, calibration and validation of a national hydrological model for Denmark. *Journal of Hydrology*, 280(1), pp. 52-71.
- 10-Hse, M.H., Chen, S.H. and Chang, T.J., 2000. Inundation simulation for urban drainage basin with storm sewer system, *Journal of Hydrology*, 234, pp. 21-37.
- 11-Jang, S., Cho, M., Yoon, J., Yoon, Y., Kim, S., Kim, G., Kim, L. and Aksoy, H., 2007. Using SWMM as a tool for hydrologic impact assessment. *Desalination* 212, pp. 344–356.
- 12-Karimi, V., Solaimani, K., Habibnejad Roshan, M. and Shahedi, K., 2015. Simulation of Flow in Open & Closed Conduits by EPA-SWMM Model (Case Study: Babolsar Urban Watershed), *Journal of Watershed Management Research* 6(11), pp. 162-170. (in Persian).
- 13-Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting though conceptual models. Part 1-A discussion of principles: *Journal of Hydrology*, 10, pp. 282-290.
- 14-Park, S.Y., Lee, K.W., Park, I.H. and Ha, S.R., 2008. Effect of the aggregation level of surface runoff fields and sewer network for a SWMM simulation. *Desalination* 226, PP 328–337.
- 15-Rostami Khalaj, M., 2012. urban flood risk zoning using hydrological and hydraulic models integration (Case study: Zone 2, City of Mashhad), *University of Tehran, Faculty of Natural Resources, Department of Rehabilitation of Arid and Highlands, Watershed*, pp. 126 (in Persian)
- 16-Rossman, L. A., 2009. Storm water management model, User's Manual version 5.0. EPA/600/R-05/040, *National Risk Management Research Laboratory. United States Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio*, PP 259.
- 17-Sabeti, E., 2011. uantitative Modeling and Investigating the Effect of Variation of Permeable Surface on the Volume of Runoff Case Study: Zargande conduit located in Maghsoodbeyg-Sadr area. *in Tehra, sharif university, Tehran, Iran. (In persian)*.
- 18-Sonei, A. and Ahmadi Jazi, R., 2007. Comparison of Logical Methods and SWMM in Determination of Flood Discharges, The first National Engineering Conference of the channels, *Mashhad Municipality, Mashhad, Iran. (In Persian)*.

- 19-Scotta, L., 2006. Sanitary Sewer design using EPA Storm Water Management Model (SWMM). *Department of Civil and Environmental Engineering, Manhattan College, Parkway, Riverdale, New York*, 10(1).
- 20-Tajbakhsh, M. and Khodashenas, S.R., 2012. Revision of Surface-Run off Drainage System by Simulation and Application of Retention Basins (Case Study: East Eghbal Catchment, Mashhad). *Quarterly Water and Soil Science*, 21(1), pp.109-123.
- 21-Temprano, J., Arango, O., Cagiao, J., Suarez, J. and Tejero, I., 2006. Storm Water quality calibration by SWMM : a case study in Northern Spain. *Water SA*, 32(1), pp.55-63.
- 22-Veisi panah, M., barati, M.J. and falahati, F., 2014. The Efficiency of SWMM Model in Preparation of Production Runoff Map in Urban Basins (Case Study: Marivan Watershed), *second National Conference on Flood Management, Tehran, Iran*. (In Persian)
- 23-Yu, H., Huang, G. and Wu, C., 2014. Application of the storm water management model to a piedmont city: a case study of Jinan City, China. *Water Science & Technology* 70(5), pp. 858-864.