Archive of SID

تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال چهاردهم، شماره ۵، زمستان ۱۳۹۷
Volume 14, No. 5, Winter 2019 (IR-WRR)
۹۷-۱۰۸

ارزیابی عدم‌قطعیت مدل سیلاب شهری SWMM با استفاده از روش GLUE

مطالعه موردی: منطقه ۲ شهرداری کلان‌شهر تبریز

محمد کبارفرد[۱]، رامین فضل اولی[۲*]، مهدی ضرغامی[۳] و ابوالفضل اکبرپور[۴]

چکیده

با توجه به پیچیدگی‌های موجود در محیطهای شهری، در سال‌های اخیر ریسک سیلاب در حوضه‌های شهری افزایش یافته است. برای ایجاد یک مدیریت صحیح شهری و استفاده بهینه از آب‌های سطحی، باید شناختی دقیق از فرآیند پیچیدهٔ بارش-رواناب در محیطهای شهری به دست آید. از مشکلات حوضه‌های شهری عدم وجود پارامترهای ورودی دقیق، عدم شناخت از فرآیند تولید رواناب، عدم وجود سیستم اندازه‌گیری جریان در خروجی زیر حوضه‌های شهری برای واسنجی، عدم‌قطعیت پارامترهای ورودی و نتایج مدل‌های ریاضی و عددی همچون SWMM می‌باشد. این تحقیق به بررسی و تحلیل عدم‌قطعیت به روش GLUE در سطوحی از منطقه ۲ شهرداری کلان‌شهر تبریز با مدل سیلاب شهری SWMM پرداخته است. به‌منظور کمی کردن عدم‌قطعیت، محدوده اولیه پارامترهای ورودی شامل شماره منحنی، درصد نفوذناپذیری، ضریب زبری سطح نفوذپذیری و ضریب زبری سطح نفوذناپذیری تعیین و با استفاده از الگوریتم GLUE عملیات نمونه‌برداری اولیه از فضای پارامتری توسط روش نمونه‌گیری مربع لاتین انجام شد. با توجه به نتایج شبیه‌سازی‌ها و مقادیر رخدادهای به‌هنگام مشاهداتی، ۲۰ درصد از کل خروجی‌ها و سری پارامترهای تولید شده به‌عنوان شبیه‌سازی‌های قابل قبول جدا شدند. مطابق نتایج ارزیابی نمودارهای توزیع پسین، پارامترهای ورودی درصد نفوذناپذیری و ضریب زبری سطح نفوذناپذیری به‌عنوان پارامترهای حساس و تأثیرگذار بر شبیه‌سازی مدل شناخته شدند و محدوده بهینه پارامترها تعیین شد.

کلمات کلیدی: روش GLUE، سیلاب شهری، عدم‌قطعیت، مدل SWMM.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۶/۹/۲۶
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۷/۴/۲۴

۱- دانش‌آموخته دکتری سازه‌های آبی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.
۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.
۳- استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز.
۴- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران، دانشگاه بیرجند.
*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان بهار ۱۳۹۸ امکانپذیر است.

Assessing the Uncertainty of SWMM Urban Flood Model Using GLUE Method

Case Study: 2nd District Municipality of Tabriz

M. Kobarfard [1], R. Fazloula [2], M. Zarghami[3] and A. Akbarpour[4]*

Abstract

Given the complexity of urban environments, flood risk has increased in urban areas in recent years. In order to establish a correct urban management and the control and optimal use of surface water, the complex rainfall-runoff process in urban environments should be thoroughly understood. When dealing with urban basins, the shortcomings can list as the lack of precise input parameters, the lack of knowledge on the runoff producing processes, the lack of flow measurement system at the outlet of sub-basins needed for model calibration, and the uncertainty in input parameters and results of mathematical and numerical models such as SWMM. This research investigated and analyzed the uncertainty of SWMM urban flood model in District 2 of the Metropolitan Municipality of Tabriz, using the GLUE method. In order to quantify the uncertainty, the initial range of input parameters including CN, fraction of impervious surface, N (roughness) for pervious and impervious area were determined. Using the GLUE algorithm, initial sampling operations were performed using parametric space by lattice square sampling. According to the results of simulations and the magnitudes of observational events, 20% of the total outputs and the series of generated parameters were extracted as acceptable simulations. According to the results of the evaluation of the distribution diagrams, the input parameters of Imperv % and N Imperv were identified as sensitive parameters affecting the model simulation and the optimal range of parameters was obtained.

Keywords: GLUE Method, SWMM Model, Urban Flood, Uncertainty.

Received: December 17, 2017
Accepted: July 15, 2018

1- Ph.D. Water Structures, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.
2- Associate Professor, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. Email: raminfazl@yahoo.com
3- Professor, Faculty of Civil Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran.
4- Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, Birjand University, Birjand, Iran.
*- Corresponding Author

www.SID.ir

Archive of SID

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر ریسک سیلاب در حوضه‌های شهری نسبت به حوضه‌های غیر شهری افزایش یافته است. به منظور رفع مشکلات ناشی از جاری شدن سیلاب در مناطقی از شهر که ریسک سیل بالا است، باید با دقت کافی، مقدار حجم یا دبی سیلاب‌ها، عمق سیلاب و پهنه سیلاب، با استفاده از روش‌ها و مدل‌های متعارف تعیین گردد. در چنین شرایطی مدل‌های ریاضی شبیه‌سازی بارش–رواناب از جمله ابزارهای مناسبی می‌باشند که می‌توانند به‌منظور بررسی اثرات ناشی از کمیت سیلاب شهری و شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی و هیدرولیکی در سیستم‌های پیچیده جمع‌آوری آب‌های سطحی به‌کار گرفته شود. از مشکلات و پیچیدگی حوضه‌های شهری (تخمین نفوذ، ضریب رواناب و زبری، تغییرات شیب، شبکه پیچیده شهری و غیره) عدم شناخت دقیق از فرآیند تولید رواناب، عدم وجود سیستم اندازه‌گیری جریان در خروجی زیر حوضه‌های شهری برای واسنجی و صحت‌سنجی و عدم‌قطعیت در دبی برآوردی توسط مدل‌های ریاضی و عددی همچون SWMM می‌باشد.

امروزه استفاده از روش‌های احتمالاتی در کلیه علوم محض و محاسباتی جای خود را برای پیش‌بینی وقایع و پدیده‌ها باز کرده است. استفاده از این روش‌ها در طراحی و پیش‌بینی وقایع، مستلزم شناخت دقیق عدم‌قطعیت‌ها می‌باشد. شناخت عدم‌قطعیت‌ها به طراح وسعت دید گسترده‌تری می‌دهد و به تصمیم گیرندگان اجازه می‌دهد که با اطلاعات بیشتر و شناخت عمیق‌تری در مورد یک پدیده، تصمیم‌گیری کرده و بازدهی سیستم را حداکثر کنند. برای استفاده از روش‌های احتمالاتی ابتدا لازم است تا به خوبی عدم‌قطعیت‌های موجود در سیستم، شناسایی و کمی گردد.

با دستیابی به این شناخت نه‌تنها می‌توان به تدریج عملکرد سیستم‌ها را بهبود بخشید، بلکه می‌توان در زمان وقوع خطر، با بیشترین سرعت و دقت و کمترین ریسک محتمل در مورد سیستم، برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری نمود. هدف اصلی از تحلیل عدم‌قطعیت، تشخیص خواص آماری خروجی‌های مدل بر اساس روابط موجود بین پارامترهای آماری ورودی است. از این گذشته، این تجزیه و تحلیل، شناختی راجع به سهم هر کدام از پارامترهای ورودی بر خطای ظاهر شده در خروجی مدل ارایه می‌دهد. از این‌رو پارامترهایی که بیشترین تأثیر را بر روی نتایج خروجی دارند، تشخیص داده می‌شوند و دقت بیشتری در برآورد آن‌ها لحاظ می‌شود و در نتیجه خطای مقادیر خروجی مدل کاسته می‌شود. در حقیقت عدم‌قطعیت یک مرحله مهم همزمان با واسنجی پارامترهای مدل است (Vrugt et al., 2003).

اولین پیشگامان بررسی عدم‌قطعیت در هیدرولوژی، Kitanidis and Bras (1980) بودند که برای اولین بار مدل مفهومی غیر خطی را که قادر به تحلیل و در نظر گرفتن عدم‌قطعیت‌ها و استفاده از اطلاعات زمان واقعی برای به‌هنگام کردن و اصلاح پیش‌بینی‌ها بود را تهیه کردند (Beven and Binley, 1993).

پس از آن، Binley et al. (1991) عدم‌قطعیت همدل توزیعی پایه فیزیکی بارش–رواناب را با استفاده از روش‌های روزنبلات و شبیه‌سازی مونت کارلو بررسی و اثرات تغییر کاربری اراضی را ارزیابی کردند. Beven and Binley (1993) روش تخمین عدم‌قطعیت تشابهات عمومی (GLUE[1]) را پیشنهاد کردند که در آن شبیه‌سازی مونت کارلو و تئوری بیز تلفیق شده بود.

GLUE یکی از روش‌های محبوب در تحلیل عدم‌قطعیت پارامتر در مدل‌سازی هیدرولوژیکی است که به طور گسترده در طی ده سال گذشته استفاده شده تا عدم‌قطعیت پیش‌بینی را تحلیل و برآورد کند (Montanari., 2005; Beven and Freer, 2001).

Campbel et al. (1999) روش‌های تحلیل عدم‌قطعیت مبتنی بر روش تلفیقی مونت کارلو، زنجیره مارکوف (MCMC[2]) را ارائه نمود که در آن بر خلاف روش GLUE که فرض بر تبعیت پارامترهای مدل از توزیع احتمالاتی یکنواخت بود، از توزیع احتمالاتی واقعی پارامترها استفاده شد. این روش، متکی بر متروپولیس–هیستینگ بود.

Blasone et al. (2008) در تحقیق مشابه دیگری، کاربرد GLUE در تحلیل عدم‌قطعیت پارامترهای چند مدل هیدرولوژیکی با دو روش نمونه‌گیری را ارزیابی کردند. آن‌ها پیشنهاد استفاده از روش نمونه‌گیری مونت کارلو–زنجیره مارکوف برگرفته از روش تکامل رقابتی جوامع مبتنی بر معیار پذیرش یا رد متروپولیس (Vrugt et al., 2003) را برای مدل‌های شبیه‌سازی شده پیچیده دارای پارامتر زیاد به جای روش مونت کارلوی تنها ارائه نمودند. این روش هم اکنون در انواع روش‌های مختلف مدل‌سازی هیدرولوژیک و هیدرولیکی مانند روش Lee et al. (2010) و Mannina (2011) با معیارهای تشابه متفاوت کاربرد یافته است.

www.SID.ir

Archive of SID

Wei et al. (2015) با استفاده از روش GLUE به ارزیابی عدم‌قطعیت مدل‌سازی کیفیت آب با مدل SWMM برای یک حوضه آبریز شهری در مقیاس کوچک در شانگهای چین پرداختند. مقایسه از عدم اطمینان در ایجاد آلودگی‌های مختلف و مدل‌های شستشو که در SWMM موجود می‌باشد نشان داد که این عدم‌قطعیت کمی متفاوت بود.

Meishui et al. (2016) به تجزیه و تحلیل عدم‌قطعیت پارامترهای SWMM پکن چین بر اساس روش GLUE پرداختند. نتایج نشان داد که دو پارامتر سطح غیر قابل نفوذ و زبری کانال، قابل شناسایی‌ترین پارامترهایی هستند که تأثیر زیادی بر روی عملکرد مدل‌سازی SWMM دارند. همچنین این مطالعه نشان داد که روش GLUE یک ابزار قدرتمند برای تجزیه و تحلیل پارامترها و عدم اطمینان است.

Farzi (2011) به بررسی عدم‌قطعیت با استفاده از تئوری مجموعه‌های فازی پرداخت. برای این منظور از پارامترهای دارای عدم صراحت در مدل، در قالب اعداد فازی در مدل SWMM استفاده نمود و نتایج را در قالب اعداد فازی ارائه نمود.

Derrickand et al. (2013) با روش GLUE، آبنمود سیلاب بر اساس عدم‌قطعیت پارامترهای مدل بارش–رواناب توزیعی AFFDEF را برآورد نمودند. نتایج بازه‌های ۹۵ درصد اطمینان رویدادهای دوره واسنجی نشان داد که با به‌کارگیری روش GLUE، عدم‌قطعیت ناشی از پارامترهای مدل تا حد زیادی کاهش یافته است.

تا به‌حال اغلب کاربردهای روش GLUE در واسنجی پارامترهای مدل‌های هیدرولوژی و در مقیاس حوضه‌های آبریز بوده است و از روش اخیر در مدل بارش–رواناب شهری با توجه به پیچیدگی پارامترهای ورودی حوضه‌های شهری به‌طور جدی بحث نشده است لذا در این تحقیق به این سؤال که آیا این روش می‌تواند در مورد مدل‌های بارش–رواناب شهری با پیچیدگی زیاد کارایی لازم را داشته باشد و عدم‌قطعیت ارتفاع آب به عنوان خروجی مدل را با استفاده از روش GLUE ارزیابی نماید و این‌که به مدل‌های بارش–رواناب شهری برای برنامه‌ریزی دقیق و مدیریت شهری کارآمد می‌توان اطمینان نمود، پاسخ داده شده است. در ادامه تحقیق، نحوه مدل‌سازی سیلاب شهری، روش عدم‌قطعیت، تعیین محدوده پارامترهای ورودی، تعیین محدوده عدم‌قطعیت به صورت باند اطمینان ٪۹۵ و پارامترهای مؤثر بر خروجی‌ها در مدل SWMM ارائه شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- محدوده مطالعاتی و متدولوژی

محدوده تحقیق، سطوحی از منطقه ۲ شهرداری کلان‌شهر تبریز است که به رودخانه مهرانه‌رود زهکشی می‌گردد. منطقه ۲ شهرداری تبریز یکی از مناطق ده گانه شهرداری کلان‌شهر تبریز می‌باشد. این محدوده سطحی در حدود ۴۸۸ هکتار با مختصات ′۰۲ و °۳۸ عرض شمالی و ′۲۲ و °۴۶ طول شرقی در ارتفاع بین ۱۵۵۰ تا ۱۷۵۰ متر قرار دارد. به‌طور کلی بیشترین کاربری اراضی این حوضه، کاربری مسکونی بوده و در اولویت‌های بعدی فضای سبز و معابر قرار دارد. جهت کلی شیب محدوده مطالعاتی از نواحی جنوبی به سمت محدوده‌های شمالی است و متوسط مقدار شیب بین ۱/۵ تا ۶ درصد می‌باشد (شکل ۱). از آن‌جا که هیچ‌گونه ایستگاه هیدرومتری برای اندازه‌گیری دبی در داخل شهر و محدوده مطالعاتی وجود نداشته است، به‌منظور اندازه‌گیری جریان و ثبت به‌هنگام سیل ناشی از رخدادهای بارش در محل خروجی محدوده مطالعاتی، اشل تهیه و نصب شد. در محل خروجی حوضه مورد مطالعه، سرعت و ارتفاع رواناب متناظر با این رگبارها با استفاده از اشل نصب شده، برداشت شد. روش نمونه‌برداری به‌این صورت بود که هر ۱۵ دقیقه یک بار ارتفاع رواناب در کانال مذکور با استفاده از اشل نصب شده اندازه‌گیری شد. کانال خروجی دارای مقطع مستطیلی به عرض ۵ متر و ارتفاع ۴ متر با بستر بتنی و دیوار سنگی با شیب ۱ درصد می‌باشد. از آنجایی که نمونه‌برداری از رواناب شهری به دلیل غیرقابل پیش‌بینی بودن رگبارها و همچنین عدم استفاده از دستگاه‌های ثبات (به دلیل کم بودن امنیت) کاری سخت و پر هزینه است، به همین دلیل در این مطالعه پنج رخداد به‌هنگام اندازه‌گیری شد.

جهت تهیه مدل بارش–رواناب شهری، از آمار و اطلاعات ایستگاه باران‌سنج ثبات تبریز به‌دلیل نزدیکی به محدوده مطالعاتی استفاده شده است. طول آماری ایستگاه بارانسنجی مورد نظر ۴۰ سال (از سال آبی ۱۳۵۶–۱۳۵۵ الی ۱۳۹۵–۱۳۹۴) است.

برای شبیه‌سازی سیلاب شهری محدوده مورد مطالعه از نرم‌افزار SWMM استفاده شد. اطلاعات مورد نیاز جهت مدل‌سازی شامل: اطلاعات بارش، خصوصیات فیزیکی حوضه و زیر حوضه‌ها و شبکه زهکشی می‌باشد.

۲-۲- معرفی مدل

نرم‌افزار EPA-SWMM یک مدل دینامیکی برای شبیه‌سازی بارش–رواناب، مدیریت و برنامه‌ریزی سیلاب شهری، تحلیل و طراحی شبکه

www.SID.ir

Archive of SID

جمع‌آوری آب‌های سطحی، فاضلاب و سیستم‌های زهکشی می‌باشد که در حوضه‌های شهری کاربـــرد دارد کـــه بـــرای نخستین بار در سال ۱۹۷۱ تـــوسط آژانس محیط زیست امریـکا ارائه گردید. قابلیت‌ها: سادگـــی محیط کـــاری، حجم کم، آسـانی نصب و رایـگان بـــودن و قـدرت بـــالا در شبیه‌سازی مـــدل‌هـــای کمی و کیفی (Kobarfard and Fazloula, 2015). مدل SWMM یک مدل سیلابی تک واقعه‌ای یا پیوسته (با قابلیت احتساب پدیده‌های تبخیر، ذوب برف، چالاب، نفود عمقی و جریان‌های زیر سطحی) به‌منظور شبیه‌سازی کمیت و کیفیت رواناب حوضه‌های شهری می‌باشد که روندیابی جریان در سه حالت جریان دایمی، موج سینماتیک و موج دینامیک با استفاده از آن امکان‌پذیر می‌باشد.

۲-۳- اطلاعات ورودی مدل و نحوه مدل‌سازی

به‌منظور شبیه‌سازی هیدرولوژیکی حوضه آبریز شهری و مدل‌سازی هیدرولیکی جریان در شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی از نرم‌افزار SWMM استفاده شده است. در این مدل هر حوضه آبریز به زیر حوضه‌های کوچک‌تر تقسیم شده و به‌عنوان مخزن غیر خطی شبیه‌سازی می‌شود. جریان‌های ورودی از بارش و یا زیر حوضه‌های بالادست ناشی می‌شود. خروجی‌های زیادی مانند تبخیر، نفوذ و رواناب سطحی وجود دارد. ظرفیت این مخزن برابر حداکثر ذخیره چالابی است که شامل حداکثر ذخیره‌ی سطحی ایجاد شده توسط گودال‌ها، رطوبت سطحی و برگاب می‌باشد. هنگامی که عمق آب در مخزن از حداکثر ذخیره چالابی d_p بیشتر شود، رواناب سطحی شکل می‌گیرد و جریان خروجی به‌وسیله معادله‌ی مانینگ به‌دست می‌آید. عمق آب روی سطح زیر حوضه d با حل عددی معادله بیلان آب روی زیرحوضه به‌طور مداوم نسبت به زمان به‌روز می‌شود. به‌علت آنکه نقش عواملی مثل تبخیر و تعرق و سایر موارد در تشکیل سیل محدود و قابل صرف‌نظر می‌باشد و با توجه به کوتاه مدت بودن دوره بارش‌های شبیه‌سازی شده، از اثر تبخیر در مدل‌سازی فرآیند بارش-رواناب صرف‌نظر شده است (شکل ۲).

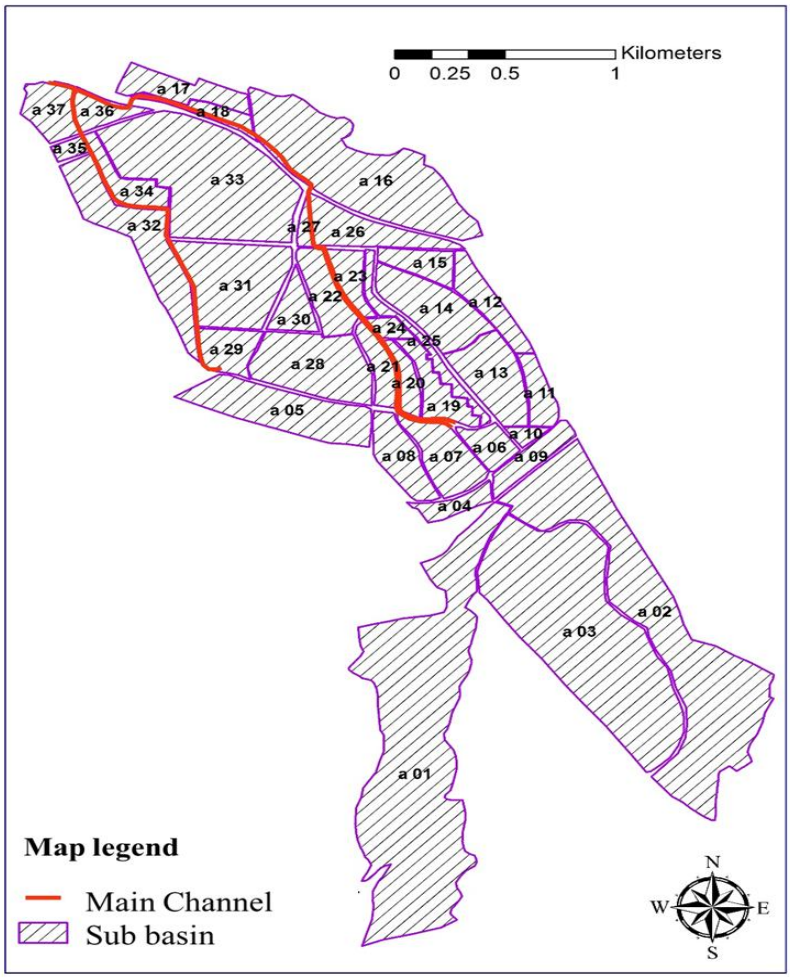

Fig. 1- Study area and the sub-basins

شکل ۱- محدوده مورد مطالعه و زیر حوضه‌ها

www.SID.ir

Archive of SID

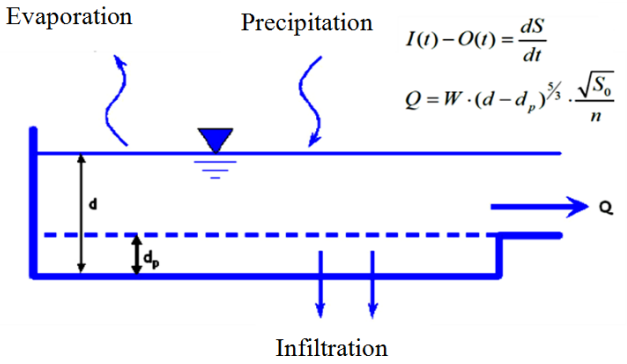

Fig. 2- SWMM schematic nonlinear reservoir and rainfall transformation into runoff

شکل ۲- شماتیک مدل مخزن غیر خطی و تبدیل بارش به رواناب در SWMM

از میان روش‌های مختلف هیدرولوژیکی و هیدرولیکی در این مدل، از روش SCS[۳] (روابط ۳ و ۴) به‌عنوان روش هیدرولوژیکی و نفوذ آب در خاک و به‌منظور روندیابی هیدرولیکی جریان، مدل موج دینامیکی با توجه به دقت بالای آن و با استفاده از معادلات یک بعدی سنت و نانت انتخاب شد که در روابط ۱ و ۲ ارائه شده است (Karami et al., 2015):

$$\frac{\partial A}{\partial t}+\frac{\partial Q}{\partial x}=0 \qquad (۱)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{\partial\left(Q^2/A\right)}{\partial X}+g\cdot A\cdot\frac{\partial H}{\partial X}+g\cdot A\cdot S_f+g\cdot A\cdot h_L=0 \qquad (۲)$$

که در روابط فوق Q: دبی، v: سرعت جریان، A: سطح جریان، H: ارتفاع هیدرولیکی و S_f: شیب اصطکاکی می‌باشند.

در تمام روش‌های روندیابی برای ارتباط دادن شیب یا زبری بستر و عمق با دبی جریان، از معادله مانینگ استفاده می‌شود و فقط برای مقاطع تحت فشار با سطح مقطع دایره‌ای به‌جای معادله مانینگ از معادله هیزن-ویلیامز یا دارسی-ویسباخ استفاده می‌شود (Rossman, 2015).

برای معادله مانینگ، ضریب زبری از نشریه شماره ۳۳۱-الف وزارت نیرو استفاده شد. برای مدل‌سازی نفوذ آب در خاک به روش SCS از عدد شماره منحنی[۴] استفاده شد. برای تعیین شماره منحنی از جداول پیشنهادی توسط سازمان حفاظت خاک امریکا استفاده شد که در روابط ۳ و ۴ ارائه شده است (Alizadeh, 2015):

$$R=\frac{(P-0.2(S))^2}{(P+0.8(S))} \qquad (۳)$$

$$S=\frac{25400}{CN}-254 \qquad (۴)$$

که در روابط فوق R: رواناب برحسب میلی‌متر، P: میزان بارندگی برحسب میلی‌متر و S: پتانسیل تلفات برحسب میلی‌متر می‌باشد.

دیگر داده‌های مورد نیاز برای شبیه‌سازی کمی شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی که در این مطالعه استفاده شده است عبارت است از مشخصات فیزیوگرافی منطقه مورد مطالعه نظیر شیب، مساحت، نفوذپذیری، کاربری اراضی، طول شبکه و گره‌ها و اطلاعات بارش و هیدرولوژیکی. برای مدل‌سازی، حوضه مورد مطالعه با استفاده از نقشه رقومی با مقیاس ۱:۲۰۰۰ سازمان عمران شهرداری کلان شهر تبریز، بررسی‌های میدانی و تصاویر ماهواره‌ای، به ۳۷ زیرحوضه تقسیم گردید. تقسیم‌بندی زیرحوضه‌ها با در نظر گرفتن توپوگرافی، مشخصات کاربری زمین، شبکه جمع‌آوری و محل خروجی رواناب انجام شد (شکل ۱). بر اساس بازدید میدانی و نقشه‌های موجود، خصوصیات شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی مانند طول آبرو، ضریب زبری، شکل مقطع، عرض کف و سطح مقطع و محل اتصال آبروها برداشت شد. تیپ کانال‌ها و مجراهای مدل‌سازی شده با مقطع مستطیلی شکل در مجموع به طول ۱۴۲۴۷ متر می‌باشد (جدول ۱).

در این تحقیق برای تحلیل عدم‌قطعیت پارامترهای ورودی مدل، تعیین محدوده مناسب پارامترهای ورودی مدل SWMM و شبیه‌سازی شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی از پنج رخداد به‌هنگام بارش که سیل آن‌ها در خروجی حوضه اندازه‌گیری شده، استفاده شد (جدول ۲). اطلاعات توزیع بارندگی رخدادهای به‌هنگام اخذ شده از دفتر آب‌های سطحی شرکت آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی در شکل ۳ نشان داده شده است.

۲-۴- پارامترهای واسنجی مدل

کاربرد موفقیت‌آمیز مدل‌های مفهومی بارش-رواناب به چگونگی واسنجی پارامترهای آن‌ها بستگی دارد.

www.SID.ir

Archive of SID

Table 1- Type of rectangular-shaped conduit modeling
جدول ۱- تیپ مجراهای مدل‌سازی شده با مقطع مستطیلی شکل

Depth * Width (m)	0.5*0.5	0.5*1	2*1	1*2	1*3	4*3	4*5
Conduit Length (m)	1811	9062	318	1381	284	861	530

این مدل‌ها به طور عموم دارای پارامترهای زیادی هستند که نمی‌توان آن‌ها را به صورت مستقیم اندازه‌گیری نمود و لازم است که آن‌ها را طی فرآیند واسنجی تعیین نمود. بنابراین واسنجی مدل برای بهبود عملکرد مدل لازم است. مقادیر پارامترهایی که از واسنجی مدل تعیین می‌شوند و همچنین پیش‌بینی‌های بعدی که با استفاده از آن مدل واسنجی شده انجام می‌شوند را تا اندازه‌ای می‌توان واقعی و قابل اعتماد دانست که اولاً فرضیات به کار رفته در مدل صحیح بوده و همچنین آمار و اطلاعات به‌کار رفته برای شبیه‌سازی دقیق باشند. بنابراین، تعیین پارامترهای دقیق و کاهش فضای پارامتری به‌منظور آسان‌سازی فرآیند واسنجی و رسیدن به درجه اطمینان بالاتر، امری ضروری می‌باشد. بررسی عدم‌قطعیت در واسنجی پارامترهای مدل بارش- رواناب در حوضه‌های شهری هدف اصلی این تحقیق می‌باشد. پارامترهای ورودی که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته‌اند عبارتند از: شماره منحنی (CN)، درصد نفوذناپذیری (impervious)، ضریب مانینگ سطوح نفوذپذیر (N pervious) و ضریب مانینگ سطوح نفوذناپذیر (N impervious) که برآورد آن‌ها با خطا مواجه بوده و برآورد دقیقی نمی‌توان ارائه نمود. بنابراین محدوده‌هایی برای آن‌ها در نظر گرفته شده است (جدول ۳).

۲-۵- روش عدم‌قطعیت GLUE

روش GLUE تخمین عدم‌قطعیت درست‌نمایی تعمیم‌یافته یکی از روش‌های محبوب برای تحلیل عدم‌قطعیت پارامتر در مدل‌سازی آبی است که در تحلیل عدم‌قطعیت به‌عنوان یک رویکرد کلی برای واسنجی و تخمین عدم‌قطعیت پارامترهای مدل بر اساس اصل یکسانی نتایج توسط Beven and Binley (1992) معرفی شد. روش GLUE، مبتنی بر روش مونت کارلو- زنجیره مارکوف توسعه یافته است. در روش GLUE، لازم است تا پیش‌بینی‌های احتمالاتی مربوط به شبیه‌سازی‌های مختلف، به روزرسانی شوند. این مسأله به‌سادگی با استفاده از تئوری بیز به‌دست می‌آید که اجازه می‌دهد یک توزیع پیشین از وزن‌های احتمالاتی با مجموعه‌ای از وزن‌های احتمالاتی ناشی از شبیه‌سازی‌های مجموعه داده‌های جدید اصلاح گردد تا یک به روزرسانی یا توزیع احتمالاتی پسین را تولید کند. این به روزرسانی وزن احتمال، مهم است تا برآورد عدم‌قطعیت را چندین بار تصحیح کند تا زمانی که داده‌های مشاهداتی در دسترسی باشند (Montanari, 2005; Beven and Freer, 2001). به طور کلی مراحل اصلی روش GLUE را می‌توان در گام‌های زیر خلاصه کرد (Heidari et al., 2004):

۱) روش GLUE در اولین گام نیاز به تبیین محدوده تغییرات هر پارامتر دارد که این محدوده می‌تواند بر اساس مشخصات فیزیکی یا تجربه تا حد ممکن وسیع در نظر گرفته شود،

۲) در دومین گام، تولید n تعداد گروه پارامتر تصادفی براساس روش‌های مبتنی بر مونت کارلو که در این تحقیق از تکنیک نمونه‌گیری مربع لاتین[5] (LHS) استفاده شده است. در واقع روش LHS با نمونه‌گیری در فواصل مساوی در فضای هر پارامتر باعث افزایش دقت در شبیه‌سازی مونت کارلو بدون افزایش در تعداد نمونه‌ها می‌شود. در این تحقیق تعداد ۲۰۰۰ نمونه تولید شده است،

۳) در سومین گام، نیاز به تعریف تفضیلی از معیار درست‌نمایی و معیار قبول یا رد مدل خواهد بود. در این رابطه انتخاب تابع معیار درست‌نمایی، حائز اهمیت می‌باشد. در این صورت نحوه ترکیب این توابع، ضروری خواهد بود. معیار قبول یا رد مدل براساس آستانه در معیار درست‌نمایی شکل می‌گیرد. چنانچه معیار درست‌نمایی مدل یا به عبارت دیگر معیار نکویی برازش کمتر از آستانه مورد نظر باشد، مدل رد خواهد شد. بنابراین در مدل‌هایی که رابطه زیر برقرار باشد، مدل جزء مدل‌های قابل قبول قرار خواهد گرفت (رابطه ۵):

Table 2- Selected precipitation events and their duration at Tabriz Logging Rain Gauge Station
جدول ۲- رویدادهای بارش انتخابی و تداوم آن‌ها در ایستگاه باران‌سنجی ثبات تبریز

Event	2016 April 11	2016 June 12	2016 June 19	2016 Dec 2	2017 April 14
Height of precipitation (mm)	14.1	9.9	14.5	10	13
Duration of precipitation (min)	30	60	90	100	60

www.SID.ir

Archive of SID

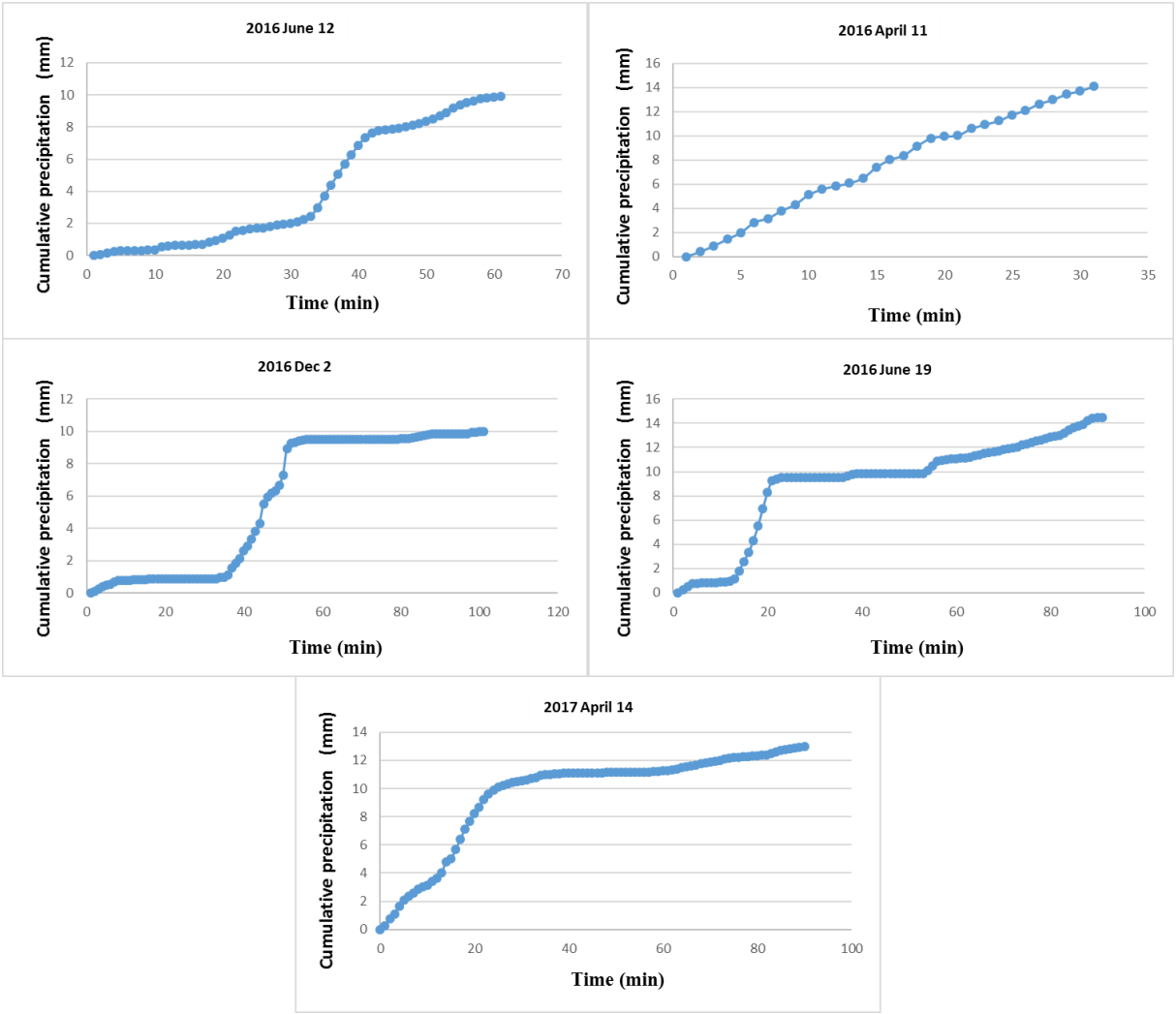

Fig. 3- Cumulative Precipitation in Tabriz Logging Rain Gauge Station

شکل ۳- هیستوگراف بارندگی تجمعی رخدادهای بارش در ایستگاه باران‌سنجی ثبات تبریز

Table 3- Introducing the initial input parameters of the model and the defined range

جدول ۳- معرفی پارامترهای اولیه ورودی مدل و محدوده تعریف شده

Parameter	Abbreviation Name	Unit	Down limit	Up limit	Estimated method
Curve number	CN	-	78	95	Calibration
Fraction of the Impervious Surface	Imperv%	-	40	90	Calibration
N pervious	N perv	s/m^(1/3)	0.01	0.05	Calibration
N Impervious	N imperv	s/m^(1/3)	0.008	0.02	Calibration

$$L(\theta_i|Y)>\alpha \quad (۵)$$

که در آن α آستانه رد مدل و $L(\theta_i|Y)$ معیار درست‌نمایی می‌باشد.

۴) چهارمین گام، اصلاح مدل‌های قابل قبول با استفاده از رابطه (۶) می‌باشد. مبنای مفهومی روش GLUE این است که یکی از عواملی که موجب ایجاد عدم‌قطعیت در خروجی مدل‌ها می‌شود، وجود مجموعه پارامترهای مختلف است که سبب نتایج یکسان (عملکرد برابر) در پیش‌بینی‌های مدل می‌شود که به اصل برابری نتایج (هم‌پایانی) معروف است. به‌طور کلی، در فرآیند واسنجی پارامترهای مدل، امکان تعیین یک مجموعه پارامتر مناسب (یکتا) وجود ندارد، بنابراین تشخیص مجموعه پارامترهای قابل‌قبول که موجب نتایج نسبتاً خوب

www.SID.ir

Archive of SID

و برابر می‌شوند اهمیت داشته و روش GLUE که بر این مبنا ارائه شده، می‌تواند این مجموعه پارامترها را مشخص کند. تعریف محدوده تغییرات پارامترها بدین صورت انجام می‌شود که تشابه پیشین برای پارامترهای خارج از محدوده، صفر در نظر گرفته می‌شود. به‌هنگام‌سازی تشابه با دسترسی به داده‌های بیشتر با به‌کارگیری تئوری بیز امکان‌پذیر است:

$$L(Y \mid \theta_i) = L(\theta_i \mid Y) L(\theta_i)/C \qquad (۶)$$

که در آن:

$L(\theta_i)$: تشابه پیشین سری پارامترهای θ برای iامین مدل

$L(\theta_i|Y)$: معیار تشابه حاصل از سری متغیرهای مشاهده‌ای Y

$L(Y \mid \theta_i)$: تشابه پسین شبیه‌سازی Y با θ معلوم

C: ضریب ثابت، طوری محاسبه می‌شود که مجموع $L(Y|\theta_i)$ مساوی یک گردد.

۲-۶- معیارهای نیکویی برازش

مجموع مربع خطاها می‌تواند به‌عنوان معیار درست‌نمایی به‌صورت رابطه (۷) به‌کار گرفته شود:

$$L(\theta_i \mid Y) = \left(1 - \frac{\sigma_i^2}{\sigma_{obs}^2}\right)^N \qquad (۷)$$

که در آن:

$L(\theta_i|Y)$: معیار تشابه iامین مدل مشروط بر مشاهدات

σ_i^2: واریانس خطاهای ناشی از iامین مدل

σ_{obs}^2: واریانس مشاهده‌ای از دوره آماری

N: پارامتر رابطه می‌باشد.

در این رابطه با کاهش خطاهای مشاهده‌ای، واریانس خطاها به صفر نزدیک شده و کمیت تشابه به عدد یک می‌رسد و برعکس با افزایش خطاها، واریانس خطاها به واریانس دبی مشاهده‌ای می‌رسد و مقدار تشابه، صفر یا حتی منفی می‌گردد. با فرض N=1 این معادله تبدیل به معیار کارآیی ناش – ساتکلیف[۶] خواهد شد (رابطه ۸). معیار مورد استفاده در این تحقیق به‌منظور صحت‌سنجی، انتخاب ۲۰ درصد از کل خروجی‌ها (حداکثر ارتفاع آب) و سری پارامترهای تولید شده مدل بارش–رواناب شهری، معیار ناش – ساتکلیف است.

اگر مقدار NSE برابر ۱ باشد، تناسب کاملی بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده وجود دارد. مقدار صفر نشان می‌دهد که مدل، نسبت به استفاده از مقادیر میانگین داده‌های مشاهداتی بهتر یا بدتر پیشگویی نمی‌کند. اگر بزرگ‌تر از ۰/۷۵ باشد نتایج شبیه‌سازی خوب توصیف می‌شوند، اما زمانی که مقادیر بین ۰/۳۶ و ۰/۷۵ باشد، نتایج مدل رضایت بخش به شمار می‌رود.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (Z(X_i) - Z^*(X_i))^2}{\sum_{i=1}^{n} (Z^*(X_i) - Zav(X_i))^2} \qquad (۸)$$

که در آن Z مقادیر محاسباتی، Z^* مقادیر مشاهده‌ای، Zav میانگین داده‌های مشاهده‌ای و n تعداد داده می‌باشد (Badiyazadeh et al., 2015).

۳- نتایج و تحلیل نتایج

پس از تعیین محدوده تغییرات برای هر یک از پارامترهای واسنجی مدل، عملیات نمونه‌برداری از فضای پارامتری صورت پذیرفت. در این تحقیق، نمونه‌برداری اولیه از فضای پارامتری توسط روش نمونه‌گیری مربع لاتین انجام گرفت. در این تحقیق عملیات نمونه‌برداری برای ۲۰۰۰ بار تکرار انجام شد. سپس مدل با استفاده از گروه پارامترها (نمونه‌های تولید شده) و محاسبه مقدار تابع درست‌نمایی براساس مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی اجرا شد، به‌طوری که ۴ پارامتر واسنجی از مدل و مقادیر ارتفاع آب هیدروگراف سیل ناشی از ۵ رخداد به‌هنگام و رواناب اندازه‌گیری شده طی ۲۰۰۰ بار تکرار برای هر رخداد تولید شدند، پس از آن مقادیر ارتفاع آب و سری پارامترها از تکرار ۱ام تا تکرار ۲۰۰۰ام بر اساس معیارهای درست‌نمایی مورد استفاده در این تحقیق به صورت نزولی مرتب شدند و ۲۰ درصد از کل خروجی‌ها و سری پارامترهای تولید شده به‌عنوان شبیه‌سازی‌های قابل قبول از بقیه شبیه‌سازی‌ها با استفاده از معیار ناش – ساتکلیف جدا شدند. نهایتاً ۴۰۰ سری تکرار از پارامترهای مدل و مقادیر ارتفاع آب شبیه‌سازی شده توسط مدل به صورت نزولی مرتب شده به عنوان بهترین شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته شدند. در این تحقیق ارزیابی عدم‌قطعیت با استفاده از الگوریتم GLUE در نرم‌افزار MATLAB انجام شده است. نمودارهای توزیع پسین و جعبه‌ای هر ۴ پارامتر در هر ۴۰۰ تکرار و شبیه‌سازی، برای ۵ رخداد اندازه‌گیری شده، ترسیم شد (شکل ۴ و ۵). درصد ضریب تغییرات، میانگین، انحراف معیار و محدوده مناسب هر پارامتر در جدول ۴ ارائه شده است.

با توجه به توزیع پسین پارامترها (شکل ۴) در نمودارهای فوق، در رخداد اول شکل گراف توزیع پسین به توزیع نرمال نزدیک بوده و داده‌ها به‌طور متوازن در اطراف میانگین پراکنده شده‌اند که بیانگر حساسیت زیاد مدل نسبت به تغییرات درصد نفوذناپذیری است. همچنین در دو رخداد چهارم و پنجم گراف‌ها دارای چولگی منفی بوده و دنباله‌های کوچک و داشتن نقطه اوج مشخص نشان‌دهنده حساسیت مدل به این پارامتر است.

www.SID.ir

Archive of SID

Table 4- Optimum range of the parameters and their mean, standard deviation and coefficient of variation

جدول ۴- محدوده مناسب پارامتر، میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات پارامترها

Parameter	Optimum range	Mean	Standard Deviation	Coefficient of Variation
CN	85.62-88.13	86.83	4.8	5.52
Imperv%	54.11-76.93	68.73	10.4	15.13
N perv	0.0275-0.0325	0.0296	0.011	37.08
N imperv	0.0118-0.0183	0.0141	0.002	14.12

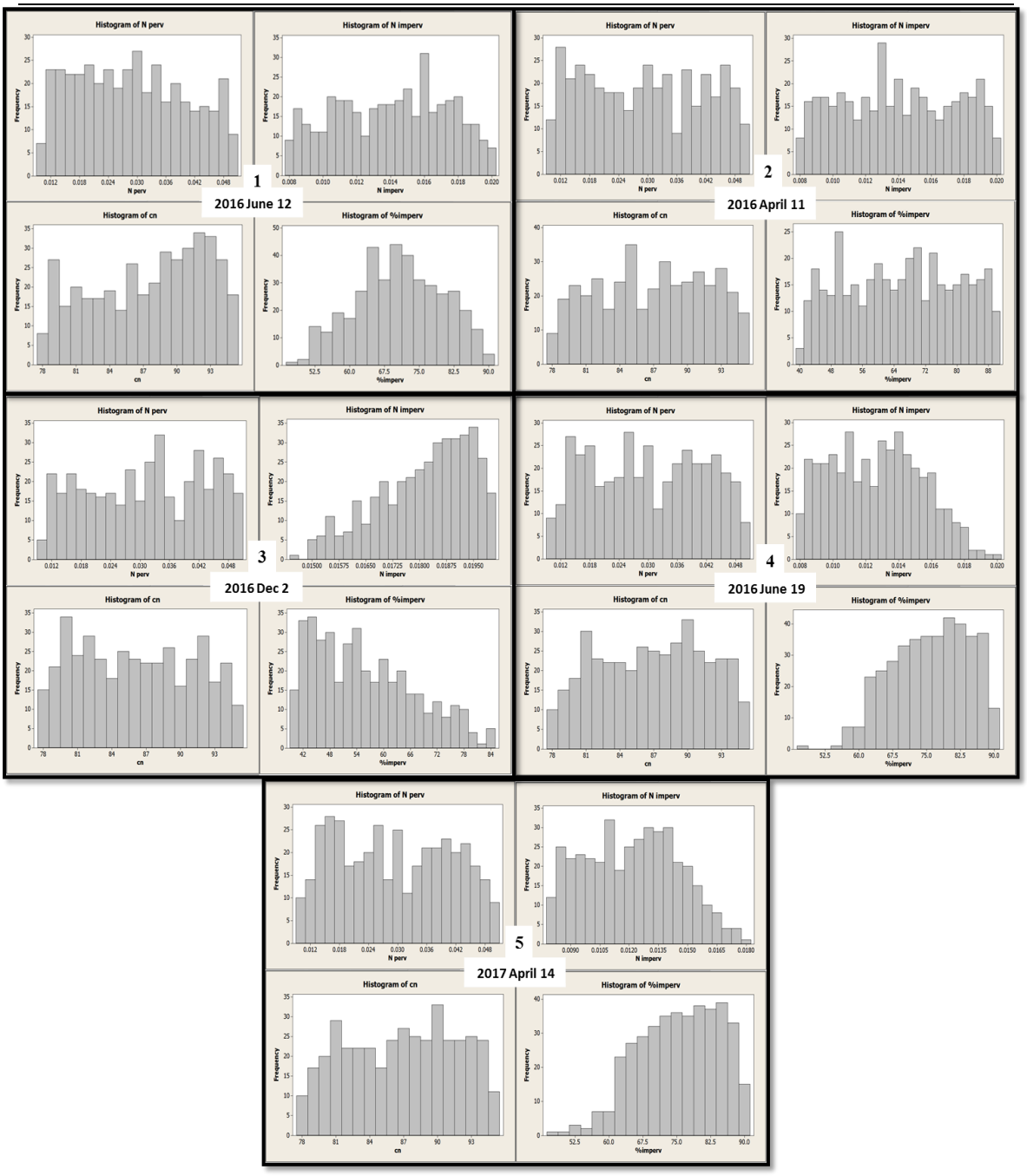

Fig. 4- Posterior Distribution Charts for four parmeters in 5 events
(Vertical axis is the Frequency and horizontal axir represents the parameter range)

شکل ۴- نمودارهای توزیع پسین ۴ پارامتر ورودی برای ۵ رخداد
(محور عمودی فراوانی و محور افقی محدوده تغییر پارامتر است)

www.SID.ir

Archive of SID

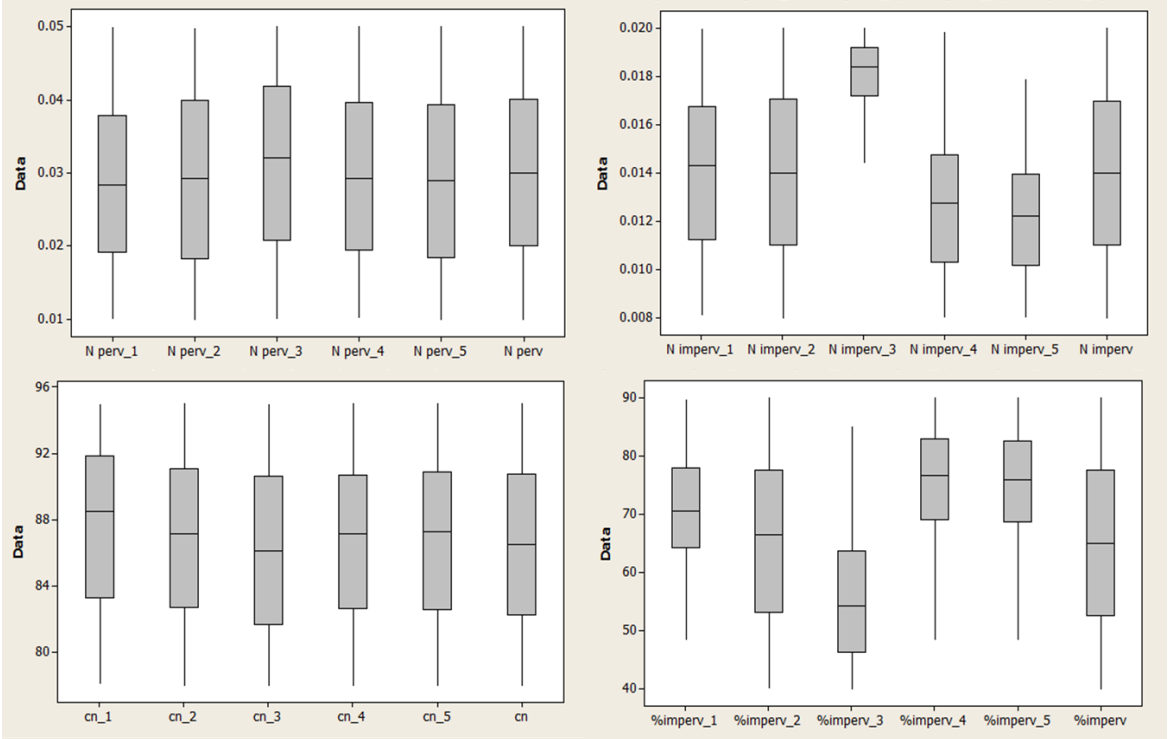

Fig. 5- Box plot for calibration of four parameters in 5 events

شکل ۵- نمودارهای جعبه‌ای ۴ پارامتر واسنجی برای ۵ رخداد

بطور مشابه در رخداد سوم نیز این گراف دارای چولگی مثبت با مقدار ضریب تغییرات بالاتر نسبت به دو رخداد قبل است. در رخداد دوم نیز این نمودار شکلی تقریباً یکنواخت و پراکنش نامتقارن دارد که نشان‌دهنده حساسیت کمتر مدل به این پارامتر در این رخداد است. در مورد پارامتر شماره منحنی تقریباً همه گراف‌های رخدادهای مختلف دارای میانگین و انحراف معیار مشابه و تقریباً همه گراف‌ها دارای شکل یکنواخت هستند. در مورد پارامتر ضریب مانینگ سطوح نفوذناپذیر، گراف‌های توزیع پسین رخداد دوم و سوم دارای توزیع یکنواخت بوده و حساسیت بیشتر مدل نسبت به این پارامتر در سه رخداد سوم، چهارم و پنجم است. در مورد پارامتر ضریب مانینگ سطوح نفوذپذیر، تقریباً در همه تاریخ‌ها پارامتر توزیع یکنواختی دارد به غیر از رخداد اول که حساسیت مدل نسبت به این پارامتر در این تاریخ بیشتر از سایر رخدادها است. در این تحقیق از نمودارهای جعبه‌ای (شکل ۵) جهت تصدیق تفاسیر مربوط به نمودارهای توزیع پسین استفاده شد و برای ارائه تفسیر بهتر نمودارهای جعبه‌ای در پنج رخداد، نمودار جعبه‌ای هر پارامتر کنار هم رسم شدند. نتایج نشان داد که بیشترین تغییرات مربوط به محدوده‌ی پسین ضریب مانینگ سطوح نفوذناپذیر و درصد نفوذناپذیری می‌باشد. محدوده‌ی پسین قابل قبول پارامتر شماره منحنی در همان محدوده‌ی داده شده‌ی اولیه می‌باشد. در اولویت بعدی پارامتر ضریب مانینگ سطوح نفوذپذیر قرار دارد ولی برای پارامترهای درصد نفوذناپذیری و ضریب زبری نفوذناپذیری بخشی از محدوده‌ی اولیه‌ی داده شده، به‌عنوان محدوده‌ی پسین قابل قبول به‌دست آمده است، که نشانگر حساسیت بالای این پارامترها می‌باشد. پارامترهایی که محدوده پسین و پیشین متفاوتی دارند، حساس‌تر هستند. بنابراین به‌غیر از پارامتر شماره منحنی و تا حدودی پارامتر ضریب مانینگ سطوح نفوذپذیر، بقیه پارامترها در رخدادهای مختلف دارای محدوده‌های پسین و پیشین متفاوت هستند. با توجه به نتایج، مدل‌های مورد قبول و تعیین محدوده مناسب پارامترهای ورودی (جدول ۴)، عدم‌قطعیت پارامترهای ورودی مدل کاهش یافته و به تبع آن عدم‌قطعیت خروجی مدل بارش–رواناب شهری نیز کاهش می‌یابد.

۴- خلاصه و جمع بندی

در این تحقیق تعداد ۲۰۰۰ داده تصادفی برای هریک از ۴ پارامتر واسنجی ورودی مدل بارش–رواناب شهری (نرم‌افزار SWMM) با استفاده از الگوریتم عدم‌قطعیت GLUE تولید شد و از آن‌ها برای شبیه‌سازی استفاده شد. از میان کل شبیه‌سازی‌ها ۲۰ درصد از کل خروجی‌ها و سری پارامترهای تولید شده به عنوان شبیه‌سازی‌های قابل قبول با استفاده از معیار ناش–ساتکلیف جدا شدند. با درنظر گرفتن

www.SID.ir

Archive of SID

تحلیل نمودارهای توزیع پسین، حدود اطمینان ۹۵ درصد به‌دست آمده و محدوده مناسب پارامترها، نتایج حاصله نشان داد که به‌کارگیری روش GLUE در کمی کردن عدم‌قطعیت خروجی مدل بارش–رواناب شهری ناشی از عدم‌قطعیت پارامترهای این تحقیق موفق بوده است و روش عدم‌قطعیت GLUE می‌تواند در مورد مدل‌های بارش–رواناب شهری با پیچیدگی زیاد، کارایی لازم را داشته بـــاشد و این‌که به مـــدل‌های بارش–رواناب شهری برای برنامه‌ریزی دقیق و مدیریت شهری کارآمد می‌توان اطمینان نمود. بر اساس تحلیل انجام شده، یافته‌های اساسی ذیل به‌دست آمده است:

۱- در مدل‌سازی رواناب‌های شهری از میان پارامترهای تأثیرگذار دو پارامتر درصد نفوذناپذیری و ضریب زبری نفوذناپذیری به‌عنوان پارامترهای حساس در شبیه‌سازی مدل شناخته شدند و بیشترین سهم و تأثیر را نسبت به سایر پارامترها بر روی نتایج خروجی رواناب‌های شهری دارند و نمی‌توان آن را با مقداری ثابت جایگزین کرد. بنابراین مقدار نهایی باید با دقت بالایی برآورد شود که نشان‌دهنده لزوم واسنجی و تحلیل عدم‌قطعیت پارامترهای ورودی است.

۲- نتایج تحقیقات حاضر نشان داد که الگوریتم عدم‌قطعیت GLUE در مدل‌های بارش–رواناب شهری از کارایی لازم برخوردار بوده و می‌تواند محدوده مناسبی از پارامترهای تأثیرگذار بر سیلاب خروجی را ارائه دهد.

۳- با تحلیل عدم‌قطعیت رواناب‌های شهری و تعیین محدوده مناسب پارامترهای ورودی مدل می‌توان راه‌کارهای توسعه کم اثر و بهترین راه‌کار مدیریتی را با اطمینان بیشتری در راستای مدیریت صحیح جمع‌آوری رواناب‌های شهری و استحصال آب‌های سطحی استفاده نمود.

پی‌نوشت‌ها

1- Generalized Likelihood Uncertainty Estimation
2- Marcov Chain Monte Carlo
3- Soil Conservation Service
4- Curve Number
5- Latin Hypercubic Sampling
6- Nash Sutcliff

۵- مراجع

Alizadeh A (2015) Applied hydrology. Astan Quds Razavi press, 800 p (In Persian)

Badiyazadeh S, Bahremand A, Dehghani A, Nora N (2015) Urban flood management through surface runoff simulation using SWMM model in Gorgan. Journal of Water and Soil Conservation Research 22(4):155-170 (In Persian)

Beven KJ, Binley A (1993) The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. Hydrological Process 6(3):279-298

Beven KJ, and Binley A (1992) The future of distributed models: Model calibration anduncertainty prediction. Hydrological Processes 6:279–298

Binley AM, Beven KJ, Calver A and Watts LG (1991) Changing responses in hydrology assessing the uncertainty in physically based model predictions. Water Resources Research 27(6):1253-1261

Beven K and Freer J (2001) Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modelling of complex environmental systems using the GLUE methodology. Journal of Hydrology 249:11-29

Blasone RS, Vrugt J A, Madsen H, Rosbjerg D, Robinson BA and Zyvoloski GA (2008) Generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE) using adaptive Markov Chain Monte Carlo sampling. Advance in Water Resources 31:630-648

Campbell EP, Fox DR and Bates BC (1999) A Bayesian approach to parameter estimation and pooling in nonlinear flood event models. Water Resource Research 35:211-220

Derrickand D, Akbarpour A, Bilandi MP, Hashemi SR (2013) Flood simulation based on uncertainty using GLUE method. In: 12th Iranian Hydraulic Conference, University of Tehran, 11pp (In Persian)

Farzi A (2011) Investigation of the uncertainty of rainfall-runoff modeling in urban basins using fuzzy parameters. In: Second National Conference on Iranian Water Resources Research, Zanjan, 8 pp (In Persian)

Heidari A, Saghafian B, And Maknon R (2004) Flood hydrograph simulation based on uncertainty of rainfall runoff model parameters. Journal of Esteghlal 23(2):93-111 (In Persian)

Kobarfard M, Fazloula R (2015) Quantitative and qualitative modeling of urban flood with EPA-SWMM model. Case study part of Tehran 22 area. In: Third National Conference on Flood Management and Engineering, Tehran 14 pp (In Persian)

Karami M, Ardeshir A, Behzadian K (2015) Hazard management of inundation and pollutants in urban floods using optimal conventional and novel strategies. Journal of Iranian Water Resources Research 11(3):100-112 (In Persian)

www.SID.ir

Archive of SID

Rossman LA (2015) Storm water management model user's manual version 5.1. EPA- 600/R-14/413b, National Risk Management Laboratory Office of Research and Development U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH 45268, 353 p

Vrugt JA, Gupta HV, Bouten W and Sorooshian S (2003) A shuffled complex evolution Metropolis algorithm for optimization and uncertainty assessment of hydrologic model parameters. Water Resources Research 39(8):1-14

Water and Waste Water standard (2001) Guidelines for determining the roughness coefficients of river, No. 331- A, 106p (In Persian)

Wei Z, Tian L, Meihong D (2015) Uncertainty assessment of water quality modeling for a small-scale urban catchment using the GLUE methodology: a case study in Shanghai, China. Environ Sci Pollut Res 22(12):9241-9

Lee JG, Heaney JP, Pack CA (2010) Frequency methodology for evaluating urban and highway storm-water quality control infiltration BMPs. Journal of Water Resources Planning and Management 136(2):237

Mannina G (2011) Uncertainty assessment of a water-quality model for ephemeral rivers using GLUE analysis. Journal of Environmental Engineering 137:177-186

Meishui L, Xiaohua Y, Boyang S, Lei C, Zhenyao S (2016) Parameter uncertainty analysis of SWMM based on the method of GLUE. 7th International Conference on Biology, Environment and Chemistry. Volum 98 of IPCBEE. 6pp

Montanari A (2005) Large sample behaviors of the generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE) in assessing the uncertainty of rainfall-runoff simulations. Water Resources Research 41:W 08406

www.SID.ir