



Sensitivity Analysis of Surface Runoff Simulation Parameters in Velenjak sub-basin of the Tehran city: Application of VARS, Sobol and Morris Methods

M. Hashemi¹ and N. Mahjouri^{2*}

Abstract

Integrated management of urban runoff is important to the sustainable development of urban infrastructures neglecting of which would not only lead to waste of resources, but also may cause considerable problems from the perspective of living environment and transportation inside the city. Therefore, urban runoff modeling and prediction of flood are essential. In this paper, the Velenjak catchment in Tehran city was selected as the study area and the SWMM model was used to simulate rainfall-runoff process. Due to the spatial variations of the model parameters, the model response was subjected to uncertainty. The purpose of this paper was to identify, rank and screen the parameters that contribute to variability of model responses and to identify the impact of each parameter on the uncertainty of the model response. For the first time, the sensitivity analysis of the SWMM model performance based on the different metricse was performed on the basis of the variogram. To do this, the fifteen parameters of SWMM model were considered and the sensitivity analysis was performed using three methods of VARS, Sobol and Morris and the results of the three methods were compared. Overall, six parameters were identified as the effective parameters.

Keywords: Urban Runoff, SWMM, Velenjak Watershed, Sensitivity Analysis, VARS, Uncertainty.

Received: December 31, 2018

Accepted: May 25, 2018

تحلیل حساسیت پارامترهای شبیه‌سازی رواناب سطحی در منطقه ولنجک تهران: کاربرد روش‌های VARS، Morris و Sobol

مجید هاشمی^۱ و نجمه مهجوری مجد^{۲*}

چکیده

مدیریت یکپارچه رواناب‌های شهری در توسعه پایدار زیرساخت‌های شهری امری مهم محسوب می‌شود؛ به طوری که عدم توجه به آن نه تنها سبب هدر رفت منابع می‌شود، بلکه می‌تواند منجر به بروز مشکلات بسیاری از منظر زیست‌محیطی و حمل و نقل شهری شود. شبیه‌سازی صحیح رواناب‌های شهری در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی ضروری است. در این مقاله، محدوده زیرحوضه ولنجک از زیرحوضه‌های شهری تهران به عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب و مدل SWMM^۱ به منظور مدل‌سازی رواناب‌های سطحی در این حوضه به کار گرفته شده است. به دلیل ماهیت تصادفی سیل، تغییرات مکانی شدید پارامترهای مدل و خطاهای اندازه‌گیری، مدل‌سازی رواناب‌ها با عدم قطعیت همراه است. هدف این مقاله، شناسایی، رتبه‌بندی و غربالگری پارامترهای کنترل‌کننده خروجی مدل و تعیین میزان تأثیرگذاری هر یک از آن‌ها بر عدم قطعیت خروجی مدل می‌باشد. تحلیل حساسیت عملکرد مدل SWMM بر اساس معیارهای مختلف، برای نخستین بار به وسیله مفهوم واریوگرام انجام شده است. به این منظور، ۱۵ پارامتر مدل SWMM در نظر گرفته شده‌اند و تحلیل حساسیت به سه روش وارس^۲، سوبول^۳ و موریس^۴ انجام شده است. نتایج حاصل از سه روش با یکدیگر مقایسه شده در نهایت، شش پارامتر به عنوان پارامترهای مؤثر شناسایی شده‌اند.

کلمات کلیدی: رواناب سطحی شهری، SWMM، حوضه ولنجک، تحلیل حساسیت، وارس، عدم قطعیت.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۱/۱۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۷/۳/۴

1- M. Sc. Student, Faculty of Civil Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

2- Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran. Email: mahjouri@kntu.ac.ir

*- Corresponding Author

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان بهار ۱۳۹۸ امکانپذیر است.

طور کامل قابل اطمینان نیست (Razavi and Gupta, 2015). مهم‌ترین روش مبتنی بر مشتق جزئی توسط موریس (Morris, 1991) ارائه شده است. این رویکرد به تجمیع حساسیت‌های محلی در فضای پارامترها تأکید دارد؛ به طوری که ابتدا با نمونه‌گیری تصادفی از فضای چندبعدی پارامترها، سعی می‌کند در محل هر یک از نقاط نمونه‌گیری شده، مشتق جزئی مرتبه اول را نسبت به هر یک از پارامترها حساب کند و میانگین مشتق جزئی برای هر یک از پارامترها را به عنوان معیار حساسیت ارائه دهد. همان‌طور که اشاره شد، این روش برای هر یک از پارامترها در محل هر یک از نقاط نمونه‌گیری شده یک حساسیت محلی حساب می‌کند؛ بدین طریق می‌تواند با بررسی نحوه توزیع این مقادیر، ویژگی‌های ساختاری سطح پاسخ مدل را ارزیابی کند. اگرچه روش‌های GSA در زمینه‌های مختلف علوم و مهندسی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، اما در زمینه مدل‌های زهکشی رواناب‌های شهری چندان مورد استفاده قرار نگرفته‌اند. (Li et al., 2014) به منظور شناسایی و رتبه‌بندی پارامترهای کلیدی مدل SWMM، با استفاده از روش‌های PRCC^A و اطلاعات متقابل⁹ به تحلیل حساسیت سراسری (GSA) این مدل پرداختند. آنان در مطالعه خود، حساسیت متغیرهای حجم رواناب، مقدار جریان و زمان پیک جریان را نسبت به پارامترهای مدل SWMM ارزیابی کردند. براساس تحقیق آنان، روش‌های PRCC و اطلاعات متقابل می‌توانند به عنوان روش‌هایی کارآمد برای تحلیل حساسیت مدل SWMM و تشخیص سهم هر یک از پارامترها در عدم قطعیت خروجی مدل، مورد توجه قرار گیرند. (Knighton et al., 2016) به منظور تحلیل حساسیت پاسخ مدل SWMM نسبت به تغییرات پارامترهای هیدرولوژیکی و هیدرولیکی‌ای که در عدم قطعیت خروجی مدل مؤثر هستند، از یک روش مبتنی بر واریانس چندهدفه که توسط (Bastidas et al., 2006) ارائه شده است، استفاده کردند. آنان در مطالعه خود، متغیرهای حجم رواناب و نرخ پیک جریان را به عنوان پاسخ مدل SWMM در نظر گرفتند.

با نظر به مطالب فوق، فقدان یک مطالعه قوی و به کارگیری یک روش مطمئن و جامع در زمینه تحلیل حساسیت و عدم قطعیت پارامترهای مدل SWMM به عنوان یک مدل شبیه‌سازی رایج در زمینه مدل‌سازی سیستم‌های زهکشی شهری، به طوری که تمام نواقص و ایرادهای رویکردها و روش‌های گذشته را رفع کند، به شدت احساس می‌شود. در این مقاله، به منظور شناسایی پارامترهای تأثیرگذار و کنترل‌کننده عملکرد مدل SWMM و تشخیص سهم هر یک از پارامترهای مدل SWMM در عدم قطعیت خروجی مدل، تحلیل حساسیت عملکرد مدل SWMM برای نخستین بار بر اساس مفهوم واریوگرام و با به کارگیری مدل تحلیل حساسیت وارس

با وجود پیشرفت در زمینه توسعه تکنیک‌ها و مدل‌های شبیه‌سازی سیلاب، عدم قطعیت در پیش‌بینی سیلاب اجتناب‌ناپذیر است. این در حالی است که نتایج مدل‌های بارش-رواناب به شکل قابل توجهی به این موضوع بستگی دارد. بنابراین لازم است عدم قطعیت‌های موجود به طور مناسب ارزیابی و در مدل‌ها لحاظ شوند. اکثر مدل‌های بارش-رواناب توسعه داده شده برای شبیه‌سازی رواناب‌ها پیچیده بوده، پارامترهای مختلفی را شامل می‌شوند و به دلیل تغییرات مکانی و زمانی قابل توجه و عدم قطعیت زیاد این پارامترها، برآورد دقیق آن‌ها امری دشوار است. بنابراین لازم است طی فرآیند تحلیل حساسیت، پارامترهای مهم و مؤثر مدل به طور صحیح انتخاب شوند. مزیت اصلی این کار این است که می‌توان پارامترهای تأثیرگذار بر خروجی مدل شبیه‌سازی و منابع عدم قطعیت را با تحلیل حساسیت تشخیص داد. دو پارامتر A و B از یک مدل را در نظر بگیرید و تصور کنید که تحلیل حساسیت بتواند به ما بگوید پارامتر A که دارای عدم قطعیت زیادی است، تأثیر زیادی در عدم قطعیت موجود در خروجی مدل ندارد، در حالی که پارامتر B با وجود اینکه خود عدم قطعیت کمی دارد، تأثیر قابل توجهی بر عدم قطعیت خروجی مدل دارد. در نتیجه، پرواضح است که خروجی مدل و عدم قطعیت موجود در آن را پارامتر B کنترل می‌کند (Razavi, 2017). چنین اطلاعاتی در مورد هر یک از پارامترهای هر مدل شبیه‌سازی، به منظور توسعه یک مدل شبیه‌سازی قابل اطمینان، بسیار ارزشمند است.

تاکنون رویکردهای مختلفی با فلسفه‌های متفاوت در حوزه GSA^۵ ارائه شده است که هر یک بر ویژگی‌های متفاوت خروجی مدل تأکید کرده‌اند و از این رو، نتایج به دست آمده از طریق هر کدام از آن‌ها متفاوت یا حتی متناقض هستند (Razavi and Gupta, 2015). معروف‌ترین و رایج‌ترین رویکردها در این زمینه، رویکردهای مبتنی بر واریانس و همچنین مبتنی بر مشتق می‌باشند. قوی‌ترین روش مبتنی بر واریانس روش سوبول می‌باشد (Sobol, 1993). ویژگی بسیار مهم این روش تشخیص تأثیر هر پارامتر به تنهایی^۶ و همچنین در برهم‌کنش با پارامترهای دیگر^۷ بر واریانس کل پاسخ مدل می‌باشد و نسبت سهم هر کدام از پارامترها در واریانس کل به واریانس کل به عنوان اندازه حساسیت تعریف می‌شود (Sobol, 2001; Saltelli, 2008; Razavi and Gupta, 2015). در این روش، چون واریانس کل پاسخ مدل بدون در نظر گرفتن ساختار سطح پاسخ مدل و نحوه توزیع پاسخ مدل در فضای پارامترها به دست آورده می‌شود، ممکن است مدل نتواند تفاوت‌های ساختاری دو سطح پاسخ با واریانس کل یکسان را تشخیص دهد و در نتیجه این روش به

(Razavi and Gupta, 2016a and b) انجام خواهد شد.

حوضه آبریز رودخانه ولنجک قرار دارد. این حوضه از شرق به حوضه آبریز رودخانه دربند و از غرب به حوضه آبریز رودخانه درکه منتهی می‌شود و از سرچشمه رودخانه ولنجک در ناحیه کوهستانی (قله ولنجک) تا اتصال به کانال مقصودییک (در تقاطع خیابان شریعتی شمالی و خیابان شهید مجتبیایی) ادامه می‌یابد و بخش بالادستی آن در منطقه ۱ و بخش پایین‌دستی آن در منطقه ۳ شهرداری تهران واقع شده است. کانال ولنجک در غرب تله‌کابین توچال حد فاصل درکه و سعدآباد قرار دارد. این کانال پس از عبور از منطقه زعفرانیه و ولنجک، در بستر طبیعی تا خیابان مقدس اردبیلی ادامه می‌یابد و سپس توسط تونل انحرافی، در مسیر خیابان ولی‌عصر به سمت میدان ونک جریان پیدا می‌کند و پس از عبور از پارک ملت به سمت شرق تغییر مسیر می‌دهد. از طرف دیگر هرزآب‌های حد فاصل مسیل تونل ولنجک و میدان ونک توسط کانال خشایار جمع‌آوری شده، از طریق کانال رازان و در مسیر بزرگراه جهان کودک (حقانی) به سمت شرق هدایت می‌شوند تا به کانال مقصودییک (در تقاطع خیابان شریعتی شمالی و خیابان شهید مجتبیایی) پیوندند. مساحت محدوده سرویس کانال ولنجک ۱۳/۳ کیلومتر مربع می‌باشد که ۳/۳ کیلومتر مربع آن حوضه کوهستانی و ۱۰ کیلومتر مربع آن حوضه درون‌شهری را شامل می‌شود (MahabGhods Consulting Engineering Company, 2011).

شهر تهران در سال‌های اخیر شاهد تغییرات بسیار زیادی بوده است که عمده آن ناشی از افزایش شدید جمعیت و توسعه اقتصادی و اجتماعی می‌باشد. بسیاری از این تغییرات بدون توجه به اثرات آنها بر محیط زیست و سیستم طبیعی منطقه صورت گرفته است که اثرات نامطلوبی را بر جای گذاشته است. محدودیت شدید منابع تامین آب، افت کیفیت منابع و آب گرفتگی مکرر خیابان‌ها و معابر پس از بارش‌های رگباری از جمله این موارد می‌باشد. به همین دلیل در این تحقیق، بخشی از حوضه شهری تهران به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است. در مقاله حاضر سعی شده است تا پارامترهای مؤثر و کنترل‌کننده خروجی مدل بارش-رواناب SWMM و عدم قطعیت موجود در آن، به وسیله تحلیل حساسیت عملکرد مدل (خروجی مدل یا معیارهای ارزیابی عملکرد مدل) شناسایی شود. با این کار می‌توان به سهم عدم قطعیت هر یک از پارامترها در عدم قطعیت خروجی مدل پی برد و اهمیت عدم قطعیت موجود در هر یک از پارامترها را مشخص کرد.

۲- حوضه مورد مطالعه

شهر تهران بین عرض‌های جغرافیایی ۳۵ درجه و ۳۱ دقیقه و ۳۵ درجه و ۵۷ دقیقه شمالی و طول‌های جغرافیایی ۵۱ درجه و ۴ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۴۷ دقیقه شرقی واقع شده است. سیستم زهکشی آب‌های سطحی شهر تهران دارای پیچیدگی‌هایی است که بیشتر ناشی از توسعه ناهمگون شهر می‌باشد. سیستم زهکشی و جمع‌آوری آب‌های سطحی تهران در حد گسترده‌ای از شیب زمین تبعیت می‌نماید و این موضوع در نواحی شمالی شهر مشهودتر است. با توجه به این که تهران در دامنه رشته کوه‌های البرز گسترش یافته که دارای بارندگی قابل توجهی است، رودخانه‌های متعددی وجود دارند که علاوه بر جمع‌آوری و زهکشی رواناب‌های درون‌شهری، رواناب‌های حوضه‌های برون‌شهری (کوهستان‌های شمالی مشرف بر شهر تهران) را نیز زهکشی کرده، به دشت‌های پایین‌دست منتقل می‌کنند. این رودخانه‌ها عبارتند از: ۱) مسیل درکه، ۲) مسیل ولنجک، ۳) مسیل دربند، ۴) مسیل دارآباد، ۵) مسیل سرخه حصار. سیستم جمع‌آوری و هدایت آب‌های سطحی شهر تهران شامل چهار قسمت عمده حوضه منتهی به سیل‌برگردان شرق، حوضه منتهی به سیل‌برگردان غرب و رودخانه کن، حوضه رودخانه چیتگر و حوضه مرکزی تهران است که موقعیت آن‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است.

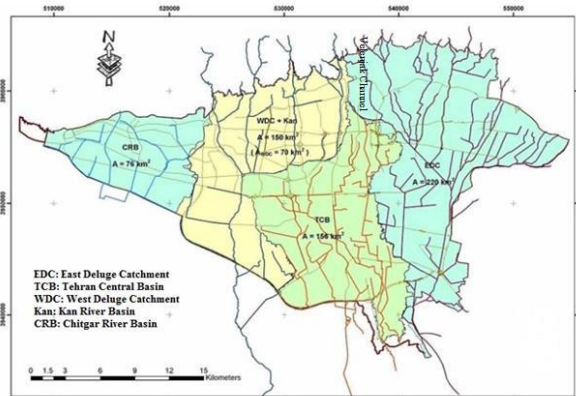


Fig. 1- Drainage system of the surface runoff in Tehran (MahabGhods Consulting Engineering Company, 2011)

شکل ۱- سیستم زهکشی رواناب‌های سطحی شهر تهران

۳- روش تحقیق

۳-۱- شبیه‌سازی رواناب‌های شهری

به منظور شبیه‌سازی رواناب منطقه، حوضه مورد مطالعه بر اساس نقشه‌های هوایی، بازبدهای میدانی، توپوگرافی، مشخصات کاربری زمین، شبکه جمع‌آوری و محل خروجی رواناب حوضه، به ۲۷ زیرحوضه

در این تحقیق، بخشی از حوضه شهری تهران در قسمت سیل‌برگردان شرق به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است که در محدوده

رویدادهای مستقل و پیوسته بارش را دارد. در بخش هیدرولوژیکی این مدل، پس از دریافت بارش (به صورت باران یا برف) توسط زیرحوضه‌ها به عنوان المان‌هایی که نشان‌دهنده المان‌های سطح زمین در مدل SWMM هستند، فرآیندهای هیدرولوژیکی شامل تبخیر، انباشتگی و ذوب برف، نفوذ باران به لایه‌های غیراشباع خاک، تراوش آب نفوذ کرده در زمین به لایه‌های آب زیرزمینی شبیه‌سازی می‌شوند و آب مازاد به صورت رواناب در هر یک از زیرحوضه‌ها تولید می‌شود. بخش هیدرولیکی این مدل، قابلیت روندیابی رواناب تولید شده به سه روش جریان ماندگار، موج سینماتیکی و موج دینامیکی را دارد.

در این مقاله، برای مدل‌سازی نفوذ عمقی آب در خاک، با توجه به سادگی و نیاز به داده‌های کم، از روش هورتون استفاده شده است. برای شبیه‌سازی شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی، با توجه به روباز بودن کانال ولنجک، از روندیابی سینماتیکی جریان به منظور مدل‌سازی هیدرولیکی در نرم‌افزار SWMM استفاده شده است. مقادیر اولیه پارامترهای مدل SWMM بر اساس شرایط حوضه ولنجک و مقادیر پیشنهاد شده در راهنمای مدل و ادبیات فنی استخراج شده است (Rossman, 2010). برای شبیه‌سازی رواناب‌های سطحی و وضعیت موجود شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی، داده‌های بارش ثبت شده در ایستگاه هواشناسی شمال تهران (نزدیک‌ترین ایستگاه به حوضه ولنجک)، کاربری اراضی (مسکونی با تراکم زیاد، مسکونی با تراکم کم و غیره) و مشخصات سطوح حوضه (نظیر مساحت، شیب متوسط حوضه، نفوذپذیری و غیره) به عنوان داده‌های ورودی در نرم‌افزار SWMM مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

۳-۲- تحلیل‌های حساسیت

در این مقاله، مدل تحلیل حساسیت وارس برای شناسایی، اولویت‌بندی و غربالگری مهم‌ترین پارامترهای مدل SWMM که خروجی مدل را کنترل می‌کنند، به کار گرفته می‌شود و حساسیت عملکرد مدل SWMM در تولید سری زمانی جریان در خروجی حوضه (هیدروگراف جریان) نسبت به تغییرات پارامترهای مدل SWMM بر اساس چند معیار ارزیابی عملکرد مدل^{۱۱} شبیه‌سازی سنجیده می‌شود. همچنین، به منظور ارزیابی تحلیل حساسیت توسط روش وارس، پارامترهای مدل SWMM با روش‌های سوپول و موریس نیز تحلیل حساسیت می‌شوند و نتایج سه روش با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

۳-۲-۱- مدل وارس

مدل وارس به منظور تشخیص نحوه تغییرات پاسخ مدل شبیه‌سازی

تقسیم شده است (شکل ۳). روشی که برای تقسیم‌بندی زیرحوضه‌ها به کار گرفته شده است بر اساس شیب خیابان‌ها و مسیر حرکت رواناب می‌باشد. این روش تقسیم‌بندی به دو دلیل مورد استفاده قرار گرفته است. اول این که رواناب یک زیرحوضه بعد از جریان یافتن در طول زیرحوضه وارد کانال شود و دوم این که رواناب موجود در زیرحوضه باید از نقاط خروجی زیرحوضه خارج شود.

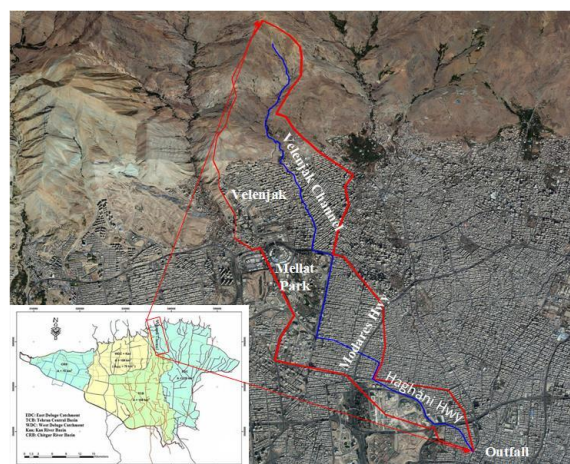


Fig. 2- Satellite image of the study area (Velenjak)
شکل ۲- تصویر هوایی منطقه مورد مطالعه (ولنجک)

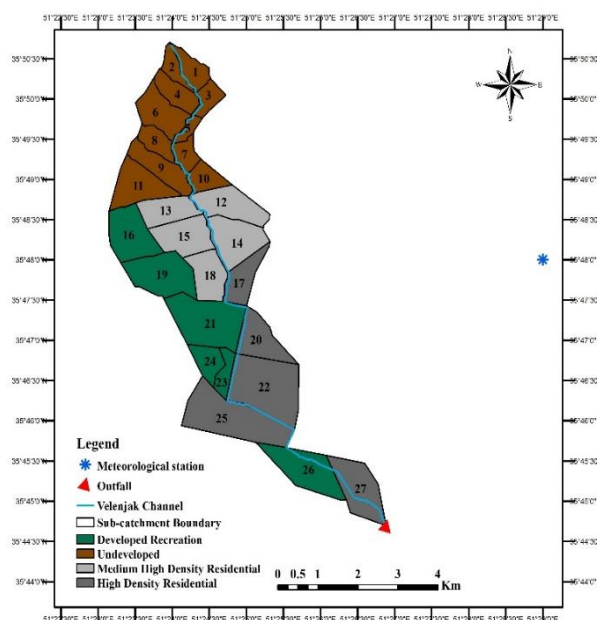


Fig. 3- Velenjak urban watershed and its sub-catchments

شکل ۳- حوضه شهری ولنجک و زیرحوضه‌های آن

به منظور شبیه‌سازی رواناب شهری، نسخه ۵ مدل SWMM که توسط آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا ارائه شده، به کار گرفته شده است. این مدل توانایی شبیه‌سازی رواناب‌های شهری تحت

یک بعد خاص (به طوری که مقدار مربوط به سایر ابعاد ثابت می‌ماند) دارد. با توجه به این که این جابه‌جایی در فضای چندبعدی از چندین نقطه مانند x (که به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند) شروع می‌شود، تغییرات همزمان پارامترها را نیز در نظر می‌گیرد (شکل ۴). این روش با محاسبه واریوگرام جهتی برای هر یک از پارامترها با مقیاس‌های تغییر (h) مختلف (از مقادیر بسیار کوچک (۱٪ طول بازه تغییرات پارامتر) تا مقیاس‌های تغییر متوسط و بزرگ (۳۰٪ تا ۵۰٪ طول بازه تغییرات پارامترها)، وابستگی حساسیت پاسخ مدل نسبت به تنها یک مقیاس تغییر پارامترها (h) را که ایراد اصلی روش‌های مبتنی بر واریانس و مبتنی بر مشتق است، از بین می‌برد. بدین طریق، وارس طیفی از اطلاعات را درباره حساسیت پاسخ مدل نسبت به هر یک از پارامترهای مورد نظر فراهم می‌کند که از ویژگی‌های منحصر به فرد روش وارس است.

با توجه به مطالب فوق، مقدار $\gamma(h_i)$ در h_i های کوچک، حساسیت پاسخ مدل نسبت به پارامتر i ام مدل را در مقیاس کوچک و در h_i های بزرگ، حساسیت پاسخ مدل نسبت به پارامتر i ام را در مقیاس بزرگ نشان می‌دهد. مقدار h_i که توسط کاربر تعیین می‌شود، می‌تواند مقادیر متوسط را نیز داشته باشد. باید توجه داشت که جز در موارد خاص (مدل‌های خطی)، ارزیابی حساسیت پاسخ مدل نسبت به پارامترهای در یک مقیاس خاص نتیجه صحیح در مورد حساسیت پاسخ مدل نمی‌دهد، زیرا در مدل‌های پیچیده، رابطه بین پارامترهای ورودی و متغیر(های) خروجی مدل، غیرخطی است و ممکن است سطح پاسخ تشکیل شده برای مدل در فضای چندبعدی پارامترها، تغییرات متنوعی در مقیاس‌های مختلف تغییر مقدار پارامترها داشته باشد (Razavi and Gupta, 2016a). در مدل وارس، برای رفع این مشکل و ارائه معیارهای جامع‌تر، با انتگرال‌گیری از واریوگرام جهتی بین بازه‌ای از مقیاس تغییر مقدار پارامتر در جهت بعد i ام ($0 \leq h_i \leq H_i$) در فضای چندبعدی پارامترها، معیار جدید و جامع $IVARS$ جهتی ارزیابی حساسیت پاسخ مدل نسبت به پارامتر i ام ارائه می‌شود که به صورت $IVARS_{H_i}$ نشان داده می‌شود که H_i حداکثر مقیاس تغییر مقدار پارامتر i ام است. بدین طریق، می‌توان با استفاده از رابطه زیر حساسیت پاسخ مدل نسبت به هر یک از پارامترهای مدل را در طیف وسیعی از مقیاس‌ها سنجید:

$$\Gamma(H_i) = \int_0^{H_i} \gamma(h_i) dh_i \quad (2)$$

مقدار H_i که توسط کاربر تعیین می‌شود، ۱۰٪، ۳۰٪ و ۵۰٪ طول بازه تغییرات پارامترها پیشنهاد می‌شود و $\Gamma(H_i)$ مقدار انتگرال واریوگرام جهتی می‌باشد. باید توجه داشت که به منظور در نظر گرفتن تمام طول بازه تغییرات پارامترها، مقیاس تغییر مقدار پارامترها (h_i) کوچک‌تر یا

اعم از خروجی مدل یا شاخص‌های ارزیابی عملکرد مدل) نسبت به تغییرات پارامترهای مدل شبیه‌سازی، از مفهوم واریوگرام استفاده می‌کند. به طور کلی، واریوگرام‌ها ابزارهایی برای تشخیص ساختار فضایی متغیرها، همبستگی فضایی بین پارامترها و همچنین قابلیت تغییر متغیرهای وابسته (خروجی‌های مدل) در فضای چندبعدی پارامترها می‌باشند.

به طور کلی، واریوگرام‌ها به دو دسته واریوگرام جهتی و غیرجهتی تقسیم می‌شوند. در واریوگرام جهتی، جهت هر کدام از ابعاد در فضای چندبعدی، نشان‌دهنده یک پارامتر خاص است و به نوعی فضای چندبعدی فاکتورها ناهمگن است. اما در واریوگرام غیرجهتی فضا همگن است. در فضای n بعدی پارامترها، $x = \{x_1, \dots, x_i, \dots, x_n\}$ موقعیت یک نقطه در فضای پارامترها، $y = f(x_1, \dots, x_n)$ پاسخ مدل شبیه‌سازی، h_i مقیاس تغییر مکان متوالی نقطه x در فضای n بعدی پارامترها در جهت پارامتر i ام می‌باشد (با توجه به شکل ۴، مقدار h_i در طی این تغییر مکان متوالی ثابت است). اگر فاصله بین موقعیت قبلی و جدید x در فضای پارامترها زیاد باشد، مقیاس تغییر مکان زیاد، و اگر این فاصله کم باشد، مقیاس تغییر مکان کم خواهد بود. در صورتی که $V(\cdot)$ تابع واریانس باشد، واریوگرام جهتی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\gamma(h_i) = \frac{1}{2} \cdot V(y(x_1, \dots, x_i + h_i, \dots, x_n) - y(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n)) \quad (1)$$

هر چه مقدار واریوگرام جهتی برای یک پارامتر بیش‌تر باشد، خروجی مدل نسبت به آن پارامتر حساسیت بیش‌تری دارد. طبق رابطه فوق، واریوگرام جهتی پارامتر i ام، نصف واریانس تغییر پاسخ مدل (y) به ازای مجموعه جفت نقاطی به فاصله ثابت h در راستای بعد مربوط به پارامتر i ام است؛ به طوری که اگر بین دو نقطه به فاصله h در راستای بعد i ام در فضای پارامترها حرکت کنیم، فقط مقدار پارامتر i ام تغییر می‌کند و مقدار سایر پارامترها ثابت می‌مانند. مقدار واریوگرام جهتی هر پارامتر تنها به مقیاس تغییر مکان نقطه x در جهت بعد مربوط به همان پارامتر در فضای پارامترها بستگی دارد.

برجسته‌ترین ویژگی روش وارس که آن را از سایر روش‌های تحلیل حساسیت سراسری متمایز می‌کند و ایرادهای روش‌های گذشته را از میان برمی‌دارد و نتایج این روش را نسبت به روش‌های گذشته قابل اعتمادتر می‌کند، این است که: (۱) این روش با تعریف یک فضای چندبعدی برای پارامترهای مدل شبیه‌سازی (هر بعد نمایانگر یک پارامتر خاص است) و با استفاده از مفهوم واریوگرام جهتی، قابلیت تغییر مقدار یک متغیر وابسته (خروجی مدل) را در اثر جابه‌جایی در جهت

محاسبات اضافی، شاخص‌های تحلیل حساسیت سوپول و موریس را نیز بر اساس روش نمونه‌گیری STAR-VARS حساب کند (Razavi and Gupta, 2016a and b).

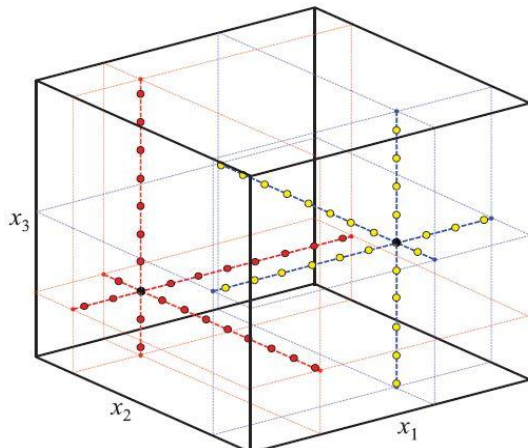


Fig. 4- A 3D illustration of STAR-VARS sampling strategy (Razavi and Gupta, 2016b)
شکل ۴- نمایشی از فضای سه بعدی در روش نمونه‌گیری STAR-VARS (Razavi and Gupta, 2016b)

در روش سوپول، ^{15}TO ، جامع‌ترین معیار تحلیل حساسیت می‌باشد. مقدار TO برای یک پارامتر برابر نسبت مجموع تأثیر تغییر آن پارامتر در حالت مرتبه اول و در مراتب بالاتر بر مقدار واریانس کل پاسخ مدل به واریانس کل می‌باشد (Homma and Saltelli, 1996). از آنجا که در این تحقیق برای محاسبه معیار TO از روش نمونه‌گیری STAR-VARS استفاده می‌شود، به صورت VARS-TO نشان داده می‌شود و هر چه مقدار معیار VARS-TO برای یک پارامتر بیشتر باشد، به معنای حساسیت زیاد پاسخ مدل نسبت به تغییرات آن پارامتر است. وارس همچنین می‌تواند شاخص تحلیل حساسیت مربوط به روش موریس (Morris, 1991) را که یک رویکرد مبتنی بر مشتق جزئی است، اندازه بگیرد. این روش به تجمیع حساسیت‌های محلی در فضای پارامترها تأکید دارد؛ به طوری که ابتدا با نمونه‌گیری تصادفی از فضای چندبعدی پارامترها، سعی می‌کند در محل هر یک از نقاط نمونه‌گیری شده، مشتق جزئی مرتبه اول را نسبت به هر یک از پارامترها حساب کند و میانگین مشتق جزئی برای هر یک از پارامترها را به عنوان معیار حساسیت جهت رتبه‌بندی پارامترها ارائه دهد. از آنجا که در این تحقیق از روش نمونه‌گیری STAR-VARS برای محاسبه معیار تحلیل حساسیت موریس استفاده می‌شود، معیار تحلیل حساسیت به روش موریس به صورت VARS-ABE^{۱۶} نشان داده می‌شود که برای مواردی که مشتقات جزئی به دلیل اختلاف علامت اثر یکدیگر را خنثی می‌کنند، استفاده از قدرمطلق مشتق جزئی توصیه می‌شود (Campolongo et al., 2007).

مساوی ۵۰ درصد بازه تغییرات پارامترها ($h_i \leq 50\%$) در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه، به تبع آن، حداکثر مقیاس تغییر مقدار پارامتر (H_i) نیز کوچک‌تر یا مساوی ۵۰ درصد بازه تغییرات پارامترها ($H_i \leq 50\%$) در نظر گرفته می‌شود. اگرچه معیار $IVARS_{50}$ به دلیل در نظر گرفتن همه مقیاس‌های ممکن تغییر پارامترها جامعیت بیشتری دارد، اما معیارهای تحلیل حساسیت $IVARS_{30}$ و $IVARS_{10}$ نیز به منظور پی بردن به ساختار و نحوه تغییرات سطح پاسخ مدل شبیه‌سازی، اهمیت دارند. با توجه به مفهوم واریوگرام، هر چه مقدار معیارهای $IVARS_{H_i}$ برای یک پارامتر بیش‌تر باشد، پاسخ مدل نسبت به آن پارامتر حساسیت بیشتری دارد.

مشابه سایر روش‌های تحلیل حساسیت، روش VARS نیز جهت محاسبه معیارهای حساسیت، از یک روش نمونه‌گیری از فضای پارامترها استفاده می‌کند. با توجه به معادله ۲ و ویژگی‌های منحصر به فرد VARS (Razavi and Gupta, 2016b)، جهت تسهیل در محاسبه سطح پاسخ مدل و پوشش مناسب آن در تمام طول بازه تغییرات پارامترها در فضای چندبعدی پارامترها، یک روش جدید نمونه‌گیری به نام STAR توسعه دادند که به دلیل پیوند با VARS، به طور کلی STAR-VARS نامیده می‌شود. با در نظر گرفتن شکل ۴، مراحل نمونه‌گیری به روش STAR-VARS به ترتیب، تعیین کوچکترین مقیاس تغییر پارامترها (h) در فضای n بعدی پارامترها توسط کاربر، تعیین تعداد نقاط مرکزی (m) در فضای چندبعدی پارامترها توسط کاربر و انتخاب تصادفی m نقطه مرکزی در فضای پارامترها به روش مکعب لاتین^{۱۳} (McKay, 1979)، ایجاد مقاطع عرضی از محل هر یک از نقاط مرکزی در جهت هر یک از محورهای فضای چندبعدی و برداشت نقاطی به فواصل h از یکدیگر بر روی هر یک از مقاطع عرضی می‌باشد. از آنجا که ممکن است مقدار معیارهای حساسیت متأثر از تعداد و موقعیت نقاط اولیه (نقاط مرکزی) انتخاب شده از فضای پارامترها باشند، به منظور اطمینان کامل از صحت نتایج به دست آمده، بازه اطمینان ۹۰ درصد شاخص‌های حساسیت و اعتمادپذیری نتایج رتبه‌بندی پارامترها، به روش بوت استرپ^{۱۴} محاسبه می‌شوند (Razavi and Gupta, 2016a and b; Efron, 1994).

وارس همچنین علاوه بر محاسبه شاخص‌های تحلیل حساسیت $IVARS$ ، می‌تواند شاخص‌های تحلیل حساسیت سوپول و موریس را نیز محاسبه کند که به منظور حذف تأثیر روش نمونه‌برداری در مقایسه نتایج تحلیل حساسیت مدل وارس و روش‌های سوپول (رویکرد مبتنی بر واریانس) و موریس (رویکرد مبتنی بر مشتق جزئی) و بررسی تأثیر مقیاس‌ها در نتایج تحلیل حساسیت، بدون

در روابط فوق، Q_{obs} ، بیانگر سری زمانی داده‌های مشاهده شده در یک بازه زمانی مشخص، Q_{sim} ، بیانگر سری زمانی داده‌های شبیه‌سازی شده در یک بازه زمانی معین و $\overline{Q_{obs}}$ ، بیانگر میانگین سری زمانی داده‌های مشاهده شده است. NSE، به دلیل مجذور تفاضل دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده، نسبت به جریان پرابی (دبی پیک) حساسیت زیادی دارد. در معیار NSE_{log} ، لگاریتم دبی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده سبب افزایش تأثیر جریان‌های کم‌آبی و کاهش تأثیر جریان‌های پرابی می‌شود (Krause et al., 2005). معیار PBIAS، تمایل داده‌های شبیه‌سازی به بزرگتر یا کوچکتر بودن از داده‌های اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد (Moriasi et al., 2007). به عبارت دیگر، این معیار میزان انحراف کلی داده‌های شبیه‌سازی شده از داده‌های مشاهده شده را نشان می‌دهد. بنابراین، PBIAS، به عنوان معیاری برای سنجش میزان توانایی مدل SWMM در پیش‌بینی کل حجم جریان، در نظر گرفته می‌شود.

۳-۳-۳- آیسنجی

با توجه به اهداف تحقیق و روش‌های ذکر شده برای تحلیل حساسیت مدل شبیه‌سازی SWMM بر اساس معیارهای ارزیابی عملکرد مدل، به داده‌های دبی جریان در کانال ولنجک (هیدروگراف) و شدت بارش ثبت شده در نزدیک‌ترین ایستگاه به حوضه ولنجک (هائیتوگراف بارش) نیاز است. به دلیل نبود ایستگاه آیسنجی در حوضه مورد مطالعه، هیدروگراف جریان حاصل از رویداد مستقل بارندگی در تاریخ ۹۵/۱۱/۲۱ با حضور در منطقه و در نقطه خروجی حوضه (تقاطع خیابان شریعتی شمالی و خیابان شهید مجتبیایی) اندازه‌گیری شد. به دلیل عمق زیاد کانال (حدود ۴ متر) و کمبود امکانات، طریقه اندازه‌گیری عمق آب به این صورت بود که عمق آب در مقطع مستطیلی کانال به عرض ۴ متر در خروجی حوضه با استفاده از یک متر پارچه‌ای (با وزنه‌ای در انتهای آن) با فواصل زمانی ۱۵ دقیقه‌ای اندازه‌گیری شد (Alizadeh, 2008). همچنین جهت اندازه‌گیری سرعت متوسط حرکت آب، ابتدا زمان حرکت جسم شناور (قطعه فوم) بین دو نقطه مشخص از مسیر نسبتاً مستقیم حرکت آب به فاصله ۴۱ متر با فواصل زمانی ۳۰ دقیقه‌ای اندازه‌گیری شد (Alizadeh, 2008). سرعت سطحی جریان آب در کانال با در دست داشتن فاصله دو نقطه و زمان حرکت جریان بین آن‌ها، با فواصل زمانی ۳۰ دقیقه‌ای محاسبه شد. بر اساس توصیه (Alizadeh, 2008)، در روش فوق، سرعت متوسط جریان برابر با ۰/۸ سرعت سطحی جریان در کانال در نظر گرفته شد. از آنجا که به دلیل نبودن امکانات و سختی کار، سرعت جریان هر ۳۰ دقیقه یک بار اندازه‌گیری شده است، سرعت جریان در طول ۳۰ دقیقه ثابت فرض شده است. بدین ترتیب با در دست داشتن ابعاد مقطع

به منظور اجرای روش‌های فوق بر اساس روش نمونه‌گیری STAR-VARS، جهت تحلیل حساسیت پارامترهای مدل شبیه‌سازی SWMM، نیاز است که مدل SWMM به تعداد دفعات زیادی اجرا شود. برای انجام این کار، یک تابع در محیط نرم‌افزار متلب تعریف می‌شود؛ به طوری که پس از دریافت فایل *.txt، نقاط نمونه‌گیری شده از فضای چندبعدی پارامترها به روش STAR-VARS، مدل شبیه‌سازی SWMM به صورت خودکار به تعداد دفعات زیادی فراخوانی و اجرا می‌شود.

۳-۲-۲- انتخاب معیارهای ارزیابی عملکرد مدل شبیه‌سازی

انتخاب معیارهای ارزیابی عملکرد مدل می‌تواند تأثیر زیادی بر نتایج تحلیل حساسیت و رتبه‌بندی پارامترهای مدل داشته باشد. تاکنون در زمینه تحلیل حساسیت مدل SWMM توجهی به تحلیل حساسیت چندمعیاره و نحوه انتخاب آن‌ها صورت نگرفته است. تحلیل حساسیت چندمعیاره مدل شبیه‌سازی زمانی کارا و حاوی اطلاعات مفید است که معیارها نسبت به هم ناهمبسته^{۱۷} باشند و هر کدام ویژگی‌های متفاوتی را اندازه‌گیری کنند (Gupta et al., 1998). به طور کلی، نوع معیارهای ارزیابی عملکرد مدل بر اساس اهداف تحقیق انتخاب می‌شوند. در زمینه تحلیل حساسیت و واسنجی مدل‌های هیدرولوژیکی، به منظور نزدیکی و شباهت هیدروگراف شبیه‌سازی به هیدروگراف ثبت شده، انتخاب یکی از معیارهای NSE ^{۱۸}، MSE ^{۱۹} و $RMSE$ ^{۲۰} جهت ارزیابی عملکرد مدل ضروری است (Legates and McCabe, 2005). از جمله اهداف نهایی این تحقیق می‌تواند ارائه راهکارهای مدیریتی جهت کنترل رواناب‌های شهری باشد. بدیهی است که به منظور ارائه راهکارهای مدیریتی جهت کنترل رواناب شهری، نیاز است که حجم رواناب، مقدار دبی پیک، زمان وقوع دبی پیک و مقدار دبی جریان‌های کم در زمان‌های مختلف به صورت نسبتاً درست پیش‌بینی شوند. بنابراین، در این تحقیق سه معیار رایج NSE ^{۲۱}، $PBIAS$ ^{۲۲} را انتخاب می‌شوند که هر کدام، عملکرد مدل را به ترتیب در تولید جریان‌های پرابی^{۲۳}، جریان‌های کم‌آبی^{۲۴} و حجم رواناب اندازه‌گیری می‌کنند. رابطه مربوط به هر یک از معیارها در ذیل ارائه شده است.

$$NSE = 1 - \frac{\sum (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (-\infty \leq NSE \leq 1) \quad (3)$$

$$NSE_{log} = 1 - \frac{\sum (\log(Q_{obs}) - \log(Q_{sim}))^2}{\sum (\log(Q_{obs}) - \log(\overline{Q_{obs}}))^2} \quad (-\infty \leq NSE_{log} \leq 1) \quad (4)$$

$$PBIAS = \frac{\sum (Q_{obs} - Q_{sim})}{\sum Q_{obs}} \times 100 \quad (5) \quad (-100\% \leq PBIAS \leq 100\%)$$

عنوان پارامترهای که می‌توانند در تولید رواناب سطحی تأثیرگذار باشند، انتخاب شدند. در جدول ۱، اسامی و دامنه تغییرات آن‌ها ارائه شده است. تحلیل حساسیت مدل SWMM بوسیله مدل وارس و دو روش سوپول و موریس بوسیله روش نمونه‌گیری STAR-VARS با تعداد نقاط مرکزی ۱۰۰ و حداقل مقیاس تغییر $h=0.1$ بر اساس معیارهای مذکور، با کد نویسی در محیط نرم‌افزار متلب بر روی سیستم کامپیوتری با مشخصات Core(TM) i5- 2.50 GHz Intel(R) 3210M با ۶ گیگابایت حافظه (RAM) اجرا شد؛ به طوری که مدل SWMM ۱۳۶۰۰ بار فراخوانی و اجرا شد و این فرآیند در مجموع حدود ۴۶ دقیقه به طول انجامید.

شاخص‌های تحلیل حساسیت $IVARS_{50}$ ، $IVARS_{30}$ ، $IVARS_{10}$ ، $IVARS_{TO}$ و $IVARS_{ABE}$ برای هر یک از پارامترها نسبت به هر کدام از معیارهای ارزیابی عملکرد مدل $NSE(Flow)$ ، $NSE_{log}(Flow)$ و $PBIAS(Flow)$ محاسبه شدند.

کانال، عمق آب و سرعت متوسط جریان، سری زمانی دبی جریان با فواصل زمانی ۱۵ دقیقه‌ای محاسبه شد.

به دلیل کوچک بودن حوضه ولنجک و نبودن ایستگاه هواشناسی در محدوده حوضه، ایستگاه هواشناسی شمال تهران (متعلق به سازمان هواشناسی استان تهران) با مختصات ۳۵ درجه و ۴۸ دقیقه عرض شمالی، ۵۱ درجه و ۲۹ دقیقه طول شرقی و ارتفاع ۱۵۴۸/۲ متر، به عنوان نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی به حوضه ولنجک، انتخاب شده است. داده‌های ۱۵ دقیقه‌ای بارش ثبت شده در تاریخ ۹۵/۱۱/۲۱ در ایستگاه هواشناسی شمال تهران با مراجعه به سازمان هواشناسی تهیه شد. هایتوگراف بارش و هیدروگراف جریان ناشی از این رخداد بارش در شکل ۵ نشان داده شده است.

۴- نتایج و تحلیل نتایج

در مجموع، ۱۵ پارامتر هیدرولوژیکی و هیدرولیکی مدل SWMM به

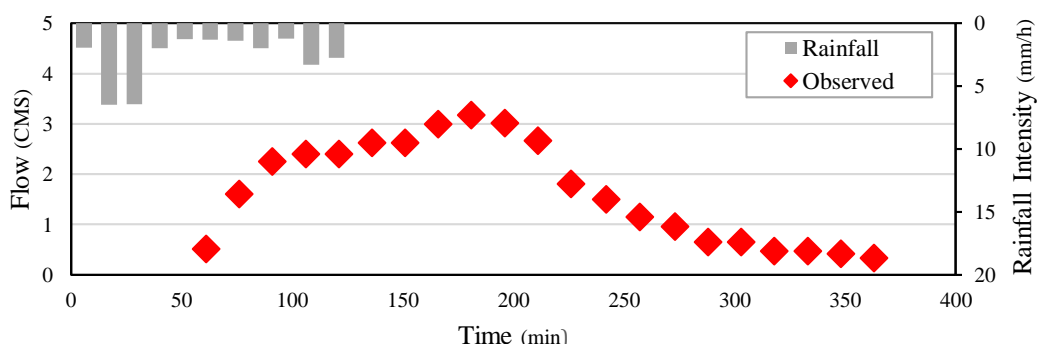


Fig. 5- Hyetograph of the rainfall event in 2017/2/21 and the observed hydrograph

شکل ۵- هیتوگراف بارش رخ داده در تاریخ ۹۵/۱۱/۲۱ و هیدروگراف مشاهداتی

Table 1- Possible range of SWMM hydrologic and hydraulic parameters
جدول ۱- محدوده تغییرات ممکن پارامترهای هیدرولوژیکی و هیدرولیکی مدل SWMM

Name	Description	Possible range
U-%Imperv	Urban imperviousness (%)	(5, 80)
SU-Slope	Sub-urban slope (%)	(35, 60)
U-%Slope	Urban slope (%)	(7, 12)
Su-Width	Sub-urban width (m)	(940, 1420)
U-Width	Urban width (m)	(360, 540)
N-Imperv	Impervious Manning's roughness coefficient	(0.011, 0.06)
N-Perv	Pervious Manning's roughness coefficient	(0.077, 0.115)
S-Imperv	Depression storage in impervious surfaces (mm)	(1.27, 2.54)
S-Perv	Depression storage in pervious surfaces (mm)	(2.54, 5.08)
PctZero	Percent of impervious area with no depression storage (%)	(5, 25)
MaxRate	Maximum rate on the Horton infiltration curve (mm/h)	(76, 254)
MinRate	Minimum rate on the Horton infiltration curve (mm/h)	(1.27, 7.62)
Decay	Decay constant for the Horton infiltration curve (1/h)	(2, 7)
DryTime	Time for a fully saturated soil to completely dry up (day)	(2, 14)
N-Conduit	Manning's roughness coefficient for the conduit	(0.018, 0.026)

IVARS، پارامترهای U-%Imperv و N-Imperv تأثیر زیادی بر مقدار جریان پیک (معیار NSE) هیدروگراف دارند؛ در حالی که در معیار NSE_{log} که عملکرد مدل را در جریان‌های کم نشان می‌دهد، مشاهده می‌شود که سهم پارامتر U-%Imperv در کنترل عملکرد مدل و عدم قطعیت خروجی مدل در جریان‌های کم ($NSE_{log}(Flow)$) در مقایسه با جریان‌های پیک ($NSE(Flow)$) کم‌تر و تأثیرگذاری پارامترهای PctZero، S-Imperv و حتی N-Conduit بیش‌تر است. با نگاه به عملکرد مدل در شبیه‌سازی حجم جریان سطحی خروجی از حوضه ($PBIAS(Flow)$)، پارامترهای U-%Imperv و N-Imperv بیشترین تأثیر را بر مقدار حجم جریان خروجی از حوضه و عدم قطعیت‌های آن دارند.

نمودارهای حلقه‌ای در شکل ۶ حساسیت معیارهای مختلف نسبت به پارامترهای مدل SWMM را بر اساس شاخص VARS-TO نیز نشان می‌دهند. تأثیر انتخاب نوع معیارهای ارزیابی عملکرد مدل بر نتایج تحلیل حساسیت در این شاخص نیز نمایان است. نتایج مربوط به این شاخص نسبتاً مشابه نتایج مربوط به شاخص حساسیت $IVARS_{50}$ می‌باشد. با در نظر گرفتن فلسفه روش سوپول، انتظار می‌رفت که چنین نتیجه‌ی به دست آید. همچنین، در شکل ۶، حساسیت معیارهای مختلف نسبت به پارامترهای مدل SWMM بر اساس شاخص حساسیت VARS-ABE نیز نشان داده شده است. با توجه به این که روش مورس بر اساس مقیاس تغییر کوچک کار می‌کند، این شاخص را بر اساس مقیاس تغییر $h = 0/1$ محاسبه می‌کنیم. به همین دلیل به طور کلی، شباهت بین نتایج به دست آمده بر اساس این شاخص و شاخص $IVARS_{10}$ نسبت به شاخص‌های دیگر بیش‌تر است. مشابه یافته‌های مربوط به شاخص‌های $IVARS$ در این شاخص نیز تأثیر انتخاب نوع معیارهای ارزیابی عملکرد مدل بر نسبت حساسیت پارامترهای مؤثر مشهود است.

قابل ذکر است، فارغ از نوع معیارهای ارزیابی عملکرد مدل شبیه‌سازی و شاخص‌ها و روش‌های تحلیل حساسیت، به طور کلی، حدود ۹۸ درصد از تغییرات پاسخ مدل را ۳ تا ۷ پارامتر کنترل می‌کنند. با توجه به این که شاخص $IVARS_{50}$ نسبت به شاخص‌های دیگر جامعیت بیشتری دارد، پارامترهای مهم و خیلی مهم برای هر یک از معیارهای ارزیابی و به طور کلی، بر اساس این شاخص شناسایی و رتبه‌بندی شده‌اند. رتبه‌بندی کلی پارامترها با در نظر گرفتن رتبه هر کدام از پارامترها در هر یک از معیارها به صورت اجتماع آن‌ها انجام گرفته است. لیست پارامترهای مهم و خیلی مهم و رتبه‌بندی آن‌ها در جدول ۲ نشان داده شده است.

به منظور مقایسه حساسیت پارامترها و واضح‌تر شدن میزان تأثیر هر کدام از پارامترها بر خروجی مدل SWMM و شناسایی سهم نسبی آن‌ها در عدم قطعیت خروجی مدل، مقدار شاخص‌های حساسیت مربوط به هر یک از پارامترهای مدل SWMM نسبت به هر کدام از معیارهای ارزیابی عملکرد مدل بین صفر تا ۱۰۰٪ تغییر مقیاس داده شدند؛ به طوری که درصد حساسیت هر یک از پارامترها در یک معیار ارزیابی عملکرد و شاخص حساسیت مشخص، از تقسیم مقدار شاخص حساسیت مربوط به آن پارامتر به مجموع شاخص حساسیت همه پارامترها به دست می‌آید. همچنین، به منظور بررسی تأثیر مقیاس تغییر پارامترها و انتخاب نوع معیارهای ارزیابی عملکرد مدل بر نتایج تحلیل حساسیت و رتبه‌بندی پارامترها و مقایسه نتایج تحلیل حساسیت بوسیله مدل وارس با روش‌های سوپول و مورس، نمودار حلقه‌ای نسبت حساسیت پارامترهای مدل SWMM برای هر کدام از معیارهای ارزیابی عملکرد مدل شبیه‌سازی NSE ، NSE_{log} و $PBIAS$ بر اساس شاخص‌های حساسیت $IVARS_{10}$ ، $IVARS_{30}$ ، $IVARS_{50}$ و VARS-TO در شکل ۶ نشان داده شده است. لازم به ذکر است، در این شکل اسامی پارامترهایی که نسبت حساسیت آن‌ها برابر یا بزرگ‌تر از ۱٪ است بر چسب شده‌اند و همچنین پارامترهای که نسبت حساسیت آن‌ها برابر یا بیشتر از ۱٪ است به عنوان پارامترهای مهم و پارامترهای که نسبت حساسیت آن‌ها برابر یا بیشتر از ۱۰٪ است به عنوان پارامترهای خیلی مهم در نظر گرفته می‌شوند (Rosolem et al., 2012).

با توجه به شکل ۶ مشاهده می‌شود که حساسیت معیارهای ارزیابی عملکرد مدل نسبت به پارامترهای مدل، با تغییر مقیاس تغییرات پارامترها (h)، تغییر می‌کند. این تغییر تقریباً در همه موارد، بین $IVARS_{10}$ و $IVARS_{30}$ بیشتر از بین $IVARS_{30}$ و $IVARS_{50}$ می‌باشد.

برای مثال، نسبت تأثیر پارامتر U-%Imperv در معیار ارزیابی عملکرد $NSE(Flow)$ نسبت تأثیر و رتبه پارامتر N-Imperv در معیار ارزیابی $NSE_{log}(Flow)$ و نسبت تأثیر و رتبه پارامتر U-Width در معیار ارزیابی عملکرد $PBIAS(Flow)$ را در نظر بگیرید. با در نظر گرفتن تعریف شاخص $IVARS$ و اینکه $IVARS_{10}$ یک سوم $IVARS_{30}$ و $IVARS_{30}$ سه پنجم $IVARS_{50}$ است، انتظار می‌رفت که چنین نتیجه‌ای به دست آید. همچنین، این نمودارها ما را قادر می‌سازند که از سهم هر یک از پارامترها در نحوه عملکرد مدل و عدم قطعیت موجود در خروجی مدل SWMM در هر یک از معیارهای ارزیابی عملکرد مدل و شاخص‌های تحلیل حساسیت دید بهتری داشته باشیم. برای مثال، با توجه به شکل ۶ و با در نظر گرفتن شاخص‌های

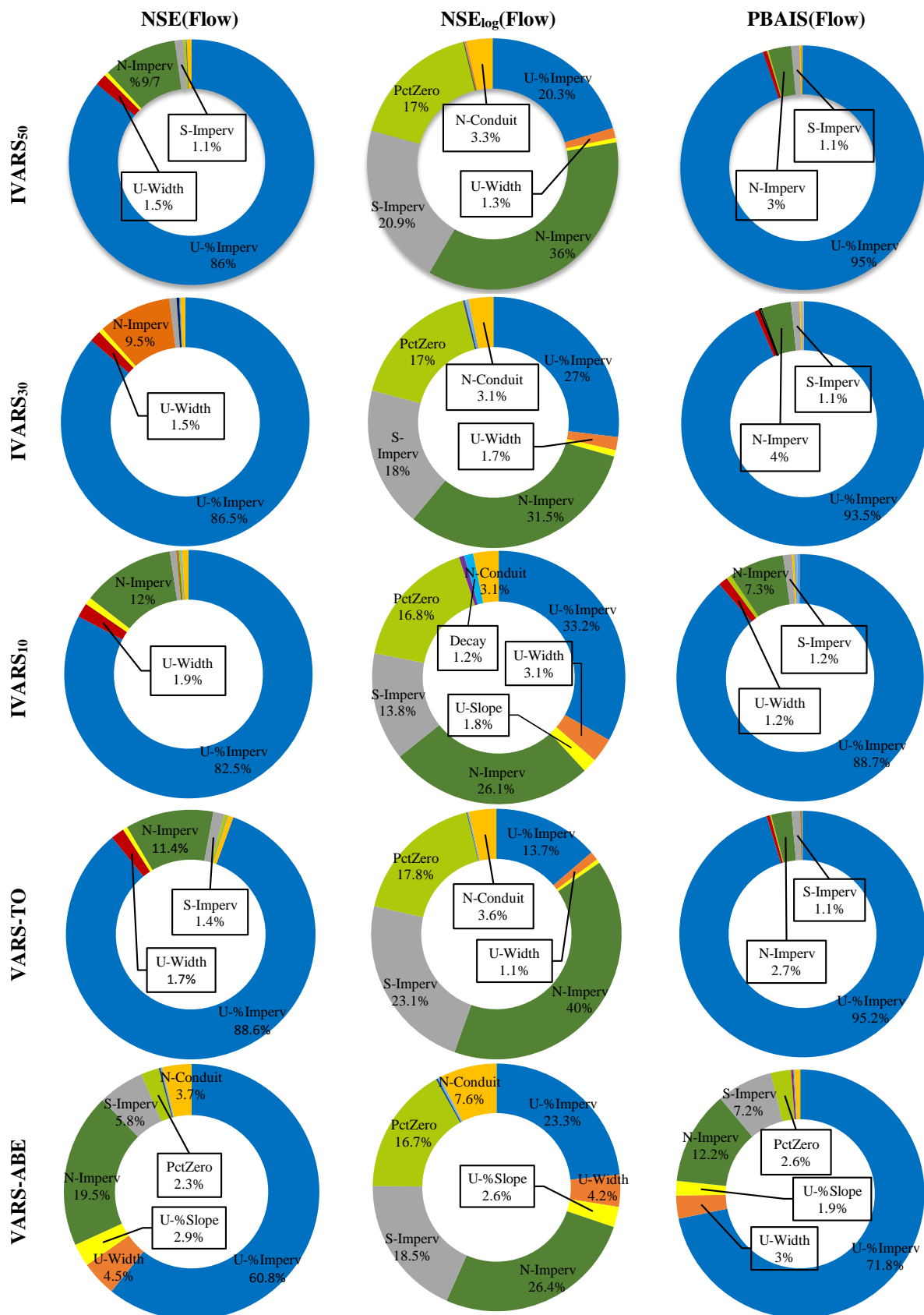


Fig. 6- The ratio of sensitivity (%) for each parameter

شکل ۶- نسبت حساسیت (%) هر یک از پارامترها

Table 2- List of important and very important parameters

جدول ۲- لیست پارامترهای مهم و خیلی مهم

NSE(Flow)	NSE _{log} (Flow)	PBIAS(Flow)	Overall
U-% Imperv*	N-Imperv*	U-% Imperv*	U-% Imperv*
N-Imperv*	S-Imperv*	N-Imperv	N-Imperv*
U-Width	U-% Imperv*	S-Imperv	S-Imperv*
S-Imperv	PctZero*		PctZero*
	N-conduit		U-Width
	U-Width		N-conduit

*Very important parameter (ratio of sensitivity $\geq 10\%$)

اساس ادبیات فنی انتخاب شدند (جدول ۱). به منظور تحلیل حساسیت، روش جدید وارس به کار گرفته شد. وارس به دلیل در نظر گرفتن مقیاس تغییرات پارامترها و محاسبه حساسیت معیارهای ارزیابی عملکرد مدل در طیف وسیعی از مقیاس تغییرات پارامترها بر اساس مفهوم وارپوگرام که ویژگی منحصر به فرد وارس است، شاخص‌های تحلیل حساسیت آن جامعیت بیشتری نسبت به روش‌های رایج سوپول و مورس دارد. به کمک شاخص‌های IVARS می‌توان به تأثیر مقیاس تغییر پارامترها بر پاسخ مدل پی برد و میزان اهمیت و رتبه هر یک از پارامترها را در مقیاس‌های مختلف تعیین کرد. همچنین به منظور جامعیت تحقیق، دو شاخص VARS-TO و VARS-ABE به ترتیب بر اساس روش‌های سوپول و مورس و با استفاده از روش نمونه‌گیری STAR-VARS برای هر یک از پارامترها و نسبت به معیارهای ارزیابی عملکرد NSE(Flow)، NSE_{log}(Flow) و PBIAS(Flow) محاسبه شدند و با نتایج روش وارس مقایسه شدند.

نتایج اصلی این تحقیق عبارتند از: (۱) مقیاس تغییرات پارامترهای مدل شبیه‌سازی SWMM تأثیر قابل توجهی در تشخیص سهم تأثیرگذاری هر یک از پارامترها بر خروجی مدل دارد.

به منظور اطمینان از نتایج به دست آمده، بازه اطمینان ۹۰٪ هر یک از شاخص‌های حساسیت برای هر کدام از پارامترها به روش بوت‌استرپ با اندازه تکرار ۱۰۰۰ محاسبه شد. نتایج نشان داد که بازه اطمینان ۹۰٪ هر یک از شاخص‌ها برای هر کدام از پارامترها محدوده نسبتاً باریکی دارد. با توجه به جامعیت شاخص IVARS₅₀ و این که رتبه‌بندی پارامترها بر اساس این شاخص انجام شد، برای نمونه، نمودار مقدار و بازه اطمینان ۹۰٪ شاخص IVARS₅₀ هر کدام از پارامترها برای معیار NSE در شکل ۷ نشان داده شده است.

۵- خلاصه و جمع‌بندی

در این مقاله، به منظور شناسایی پارامترهای مؤثر بر عملکرد مدل SWMM و تعیین سهم هر یک از آن‌ها در عدم قطعیت عملکرد مدل SWMM، حساسیت عملکرد مدل SWMM در تولید سری زمانی جریان در خروجی حوضه (هیدروگراف جریان) شهری ولنجک نسبت به تغییرات پارامترهای مدل SWMM، بر اساس معیار ارزیابی تغییرات پارامترهای مدل SWMM، NSE(Flow)، NSE_{log}(Flow) و PBIAS(Flow) سنجیده شد. برای این کار، ۱۵ پارامتر هیدرولوژیکی و هیدرولیکی مدل SWMM و بازه تغییرات آن‌ها با توجه به ویژگی‌های حوضه مورد مطالعه و بر

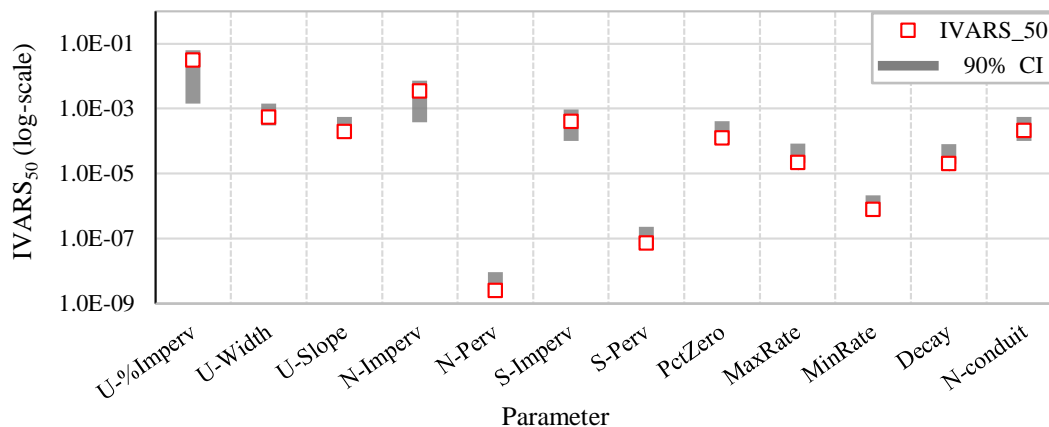


Fig. 7- The result of the bootstrap method with 90% confidence interval

شکل ۷- نتایج اجرای روش بوت‌استرپ با بازه اطمینان ۹۰٪

- 12- Integration Variogram Analysis of Response Surface (IVARS)
- 13- Latin Hypercube (LH)
- 14- Bootstrapping
- 15- Total Order (TO)
- 16- ABSolute Elementary Effects (ABE)
- 17- Unrelated
- 18- Nash-Sutcliffe Coefficient of Efficiency (NSE)
- 19- Main Squared Error (MSE)
- 20- Root Main Squared Error (RMSE)
- 21- Nash-Sutcliffe for the Logarithm of Flows
- 22- Percent Bias
- 23- High Flow
- 24- Low Flow
- 25- Distributed Evaluation of Local Sensitivity Analysis (DELSA)
- 26- PAWN

۶- مراجع

- Alizadeh A (2008) Principles of practical hydrology. Astanghods press, 800p (In persian)
- Bastidas LA, Hogue TS, Sorooshian S, Gupta HV and Shuttleworth WJ (2006) Parameter sensitivity analysis for different complexity land surface models using multicriteria methods. Journal of Geophysical Research 111(D20):D20101
- Campolongo F, Cariboni J and Saltelli A (2007) An effective screening design for sensitivity analysis of large models. Environmental Modelling and Software 22(10):1509–1518
- Moriasi DN, Arnold GJ, Van Liew MW, Bingner RL, Harmel RD and Veith TL (2007) Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Transactions of the ASABE 50(3):885–900
- Efron B and Tibshirani RJ (1994) An Introduction to the bootstrap. Taylor and Francis, N. Y
- Gupta HV, Sorooshian S and Yapo PO (1998) Toward improved calibration model of hydrologic models: multiple and non commensurable measures of information. Water Resources Research 34(4):751–763
- Homma T and Saltelli A (1996) Importance measures in global sensitivity analysis of nonlinear models. Reliability Engineering & System Safety 52:1–17
- Knighton J, Lennon E, Bastidas L and White E (2016) Stormwater detention system parameter sensitivity and uncertainty analysis using SWMM. Journal of Hydrologic Engineering 21(Pwd 2011):1-15
- Krause P, Boyle DP and Bäse F (2005) Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. Advances in Geosciences 5:89–97

۲) مقیاس تغییر پارامترها تأثیر کمی بر تغییر رتبه پارامترهای مدل SWMM دارد، در حالی که مقیاس تغییر پارامترها تأثیر زیادی بر مقدار شاخص‌های حساسیت و نسبت حساسیت پارامترها دارد. (۳)

انتخاب نوع معیارهای ارزیابی عملکرد مدل تأثیر قابل توجهی بر نتایج تحلیل حساسیت دارد؛ به طوری که درجه اهمیت و رتبه‌بندی پارامترها برای معیارهای مختلف تغییر زیادی دارد. بنابراین، معیارهای ارزیابی عملکرد مدل باید بر اساس اهداف نهایی تحقیق انتخاب شوند. (۴) به کارگیری چند معیار ارزیابی عملکرد مدل شبیه‌سازی که ویژگی‌های متفاوت را اندازه‌گیری می‌کنند، می‌تواند روش ارجحی به منظور جامعیت بیشتر نتایج تحلیل حساسیت باشد. (۵) در اکثر معیارهای ارزیابی عملکرد مدل و شاخص‌های تحلیل حساسیت، قابلیت تغییر پاسخ مدل را تعداد معدودی از پارامترها کنترل می‌کنند (۳ تا ۷ پارامتر). این نتیجه بر اهمیت تحلیل حساسیت تأکید می‌کند و منابع اصلی عدم قطعیت در پارامترها را نشان می‌دهد؛ به طوری که عمده عدم قطعیت پاسخ مدل را این پارامترها کنترل می‌کنند. (۶) با شناسایی پارامترهای تأثیرگذار و منابع عمده عدم قطعیت در بین پارامترها، می‌توان عدم قطعیت خروجی مدل را کاهش داد یا با حذف پارامترهای غیر تأثیرگذار از فرآیند واسنجی مدل شبیه‌سازی، بار محاسباتی را کاهش داد.

محدودیت اصلی این تحقیق، استفاده از روش نمونه‌گیری STAR-VARS می‌باشد که ممکن است نتایج تحلیل حساسیت متأثر از روش نمونه‌گیری باشد. به منظور مطالعات بیشتر در این زمینه و بررسی هر چه بیشتر کارایی روش وارس و قابلیت اطمینان نتایج به دست آمده در این تحقیق، به کارگیری یا حتی توسعه روش‌های نمونه‌گیری متفاوت و مقایسه نتایج آن با یافته‌های این تحقیق، به کارگیری مدل وارس برای مدل‌های شبیه‌سازی و مطالعات موردی مختلف و مقایسه نتایج حاصل از این تحقیق با رویکردهای تحلیل حساسیت جدیدی از جمله دلسا^{۲۵} (Rakovec et al., 2014) و پاون^{۲۶} (Pianosi and Wagener, 2015) پیشنهاد می‌شود.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Storm Water Management Model (SWMM)
- 2- Variogram Analysis of Response Surface (VARS)
- 3- Sobol
- 4- Morris
- 5- Global Sensitivity Analysis (GSA)
- 6- First-Order Effect
- 7- Two or Higher-Order Interaction effect
- 8- Partial Rank Correlation Coefficient (PRCC)
- 9- Mutual Information
- 10- United States Environmental Protection Agency (US EPA)
- 11- Goodness of Fit Criteria

- Razavi S and Gupta H (2016a) A new framework for comprehensive, robust, and efficient global sensitivity analysis: 1. Theory. *Water Resource Research* 52:423–439
- Razavi S and Gupta H V (2015) What do we mean by sensitivity analysis? The need for comprehensive characterization of “global” sensitivity in earth and environmental systems models. *Water Resources Research* 51(5):3070–3092
- Razavi S and Gupta H V (2016b) A new framework for comprehensive, robust, and efficient global sensitivity analysis:2. Application. *Water Resources Research* 52:440–455
- Rosolem R, Gupta HV, Shuttleworth WJ, Zeng X and De Gonçaves LGG (2012) A fully multiple-criteria implementation of the Sobol’ method for parameter sensitivity analysis. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 117(7):1–18
- Rossmann LA (2010) Storm water management model user's manual, version 5.0. National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency, p276
- Saltelli A (2008) *Global sensitivity analysis: the primer*. John Wiley & Sons, Ltd
- Sobol IM (2001) Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models. *Review. Wilmott* 2001, (1):56–61
- Legates DR and McCabe Jr. GJ (2005) Evaluating the use of “Goodness of Fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research* 35(1):233–241
- Li C, Wang W, Xiong J and Chen P (2014) Sensitivity analysis for urban drainage modeling using mutual information. *Entropy* 16(11):5738–5752
- McKay MD Beckman RJ and Conover WJ (1979) Comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code. *Technometrics* 21(2):239–245
- Mahab Ghods Consulting Engineering Company (2011) Integrated plan of Tehran surface runoff management, Second Volume, Third Section: ,Urban Flood Hydrology & Sediment Load. Technical Report (In Persian)
- Morris MD (1991) Factorial plans for preliminary computational experiments. *Technometrics* 33(2):161–174
- Pianosi F and Wagener T (2015) A simple and efficient method for global sensitivity analysis based on cumulative distribution functions. *Environmental Modelling & Software* 67:1–11
- Rakovec O, Hill MC, Clark MP, Weerts AH, Teuling AJ and Uijlenhoet R (2014) Distributed evaluation of local sensitivity analysis (DELSA), with application to hydrologic models. *Water Resources Research* 50(1):409–426
- Razavi S (2017) Feature: when uncertainty matters. *American Geophysical Union, Newsletter, Hydrology section*, 50–51