

مقایسه رویکردهای قطعی و غیرقطعی در بهسازی سامانه کنترل سیلاب حوضه سیل برگردان شرق تهران

سعید محمدیون¹، جعفر یزدی²، سید علی اکبر صالحی نیشابوری^{3*}

1- دانشجوی دوره دکتری، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

3- استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست و پژوهشکده مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* salehi@modares.ac.ir

چکیده - روند رو به افزایش شهرنشینی در سرتاسر جهان، اثر تغییرات اقلیمی بر افزایش دفعات و شدت رخداد سیلاب‌های شهری، ضرورت توجه به استفاده از منابع آب تجدید شونده و نیز حفظ کیفیت منابع آب موجود، منجر به توجه بیش‌تر به طراحی/بهسازی سامانه‌های کنترل سیلاب شهری شده است. بیشتر تحقیقات صورت گرفته در زمینه روش‌های کنترل سیلاب شهری بر پایه طراحی‌های مبتنی بر قابلیت اطمینان هیدرولیکی و با فرض یک سیلاب طراحی با دوره بازگشت مشخص بوده‌اند. یک رویکرد جایگزین که امکان رخداد سیلاب‌های شدید بیش از سیلاب طراحی را در نظر گرفته و همچنین مانع از هزینه‌های غیرضروری طراحی‌های دست بالا نیز می‌گردد، طراحی مبتنی بر خطرپذیری است. این رویکرد عدم قطعیت‌های موجود در بارگذاری سامانه را نیز مد نظر قرار می‌دهد. در تحقیق حاضر با توسعه یک مدل تلفیقی شبیه‌سازی و بهینه‌سازی چندهدفه، عملکرد دو رویکرد قطعی و غیرقطعی در بهسازی سامانه کنترل سیلاب حوضه سیل برگردان شرق تهران، که با کمبود ظرفیت هیدرولیکی مواجه است، با کاربرد توأم تونل‌های کمکی و استخرهای تعدیل مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج این تحقیق بیانگر عملکرد مناسب طرح ارائه شده توسط مشاور برای بهبود ظرفیت سامانه مذکور، در عین حال کاهش هزینه‌ها و بهبود عملکرد شبکه مفروض با کاربرد مدل تلفیقی شبیه‌سازی و بهینه‌سازی ارائه شده در تحقیق حاضر می‌باشد. از دیگر نتایج، عدم تأثیر در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های ورودی سامانه برای کنترل سیلاب حوضه سیل برگردان شرق تهران در فرایند بهینه‌سازی شبکه، به ازای طرح‌بندی ثابت بدست آمده بر اساس مطالعات امکان‌سنجی، بوده است.

کیدواژگان: سامانه کنترل سیلاب شهری، بهینه‌سازی، شبیه‌سازی عددی، غیرقطعی، شبیه‌سازی مونت کارلو، تهران.

1- مقدمه

زیست‌محیطی و ایجاد مسائل بهداشتی شده است. در مجموع، خسارات سیلاب در پنج دهه اخیر بیش از نیمی از کل خسارات ناشی از بلایای طبیعی در دنیا را به خود اختصاص داده است (کمیته ملی کاهش اثرات بلایای طبیعی، 1387). رشد 250 درصدی خسارات ناشی از سیل در کشور در پنج دهه گذشته نیز مؤید این مدعا می‌باشد (یزدی، 1389). با توجه به اهمیت طراحی و

در سال‌های اخیر با توجه به افزایش قابل توجه شهرسازی، کاهش اراضی نفوذپذیر و همچنین تغییرات آب و هوایی ناشی از عوامل مختلف، فراوانی رخداد سیلاب‌های شهری، با بزرگی بیش از حد انتظار، افزایش یافته است. در ایران نیز سیلاب‌های شهری متعدد باعث مشکلات گوناگون اجتماعی، ضررهای اقتصادی و همچنین تبعات

قسمتی از سامانه زهکش شمال شرق تهران پرداختند (Karamuz et al., 2012 و Nazif et al., 2013). کارآموز و نظیف در سال 2013، یک مدل بهینه‌سازی چند معیاره را با در نظرگیری اثرات تغییر اقلیم به منظور انتخاب "بهترین اقدامات مدیریتی" (BMP) ارائه دادند. برای این منظور از نتایج مدل گردش عمومی جو HADCM3 استفاده شد و بعد از ریزمقیاس‌سازی و گسسته‌سازی زمانی خروجی‌های این مدل، تغییرات سیلاب‌ها در بخشی از شهر تهران در دهه‌های آتی را پیش‌بینی نمود و استراتژی‌های تطبیقی با استفاده از مدل بهینه‌سازی استخراج شد (Karamuz and Nazif, 2013). تحقیقات یزدان‌دوست و همکاران (2013) و نیز طهماسبی بیرگانی و یزدان‌دوست (2013)، به منظور بررسی کمی و کیفی ارجحیت استفاده از طیفی از بهترین اقدامات مدیریتی با کاربرد ابزار MCDM⁴ (در قالب نرم افزار Definite) صورت پذیرفت (Yazdandoost et al., 2013) و Tahmasebi B. and Yazdandoost, 2013). فو و بوتلر (2014) به بررسی اثر ساختار همبسته متغیرهای عمق و تداوم بارش بر روی پیش‌بینی عمل‌کرد سامانه‌های زهکش شهری - با بکارگیری توابع مختلف کاپولا در خلال کاربرد روش شبیه‌سازی مونت-کارلو برای تولید بارش‌های طراحی مصنوعی - پرداختند (Fu and Butler, 2014). زحمتکش در سال 1393 الگوی ارزیابی سازگاری و تاب‌آوری در مدیریت سیلاب شهرهای ساحلی را مورد بررسی قرار داد. در تحقیق زحمتکش با توجه به اهمیت شبیه‌سازی محلی و ترکیب آن با سیلاب‌های ساحلی، مدل‌سازی بارش - رواناب با رویکرد جامع و با در نظر گرفتن منابع مختلف عدم قطعیت شامل پارامترهای ورودی و ساختار مدل انجام شده است (زحمتکش، 1393). و جینویچ و همکاران در سال 2014 بیان می‌کنند، اغلب مشکل کمبود داده‌های کارآمد در طراحی و اخذ تصمیم در مورد شبکه‌های زهکش شهری وجود دارد. در تحقیق آن‌ها با بکارگیری بهینه‌سازی چند هدفه (با کاربرد GA) تحت عدم قطعیت، توابع هدف به منظور کمینه نمودن هزینه احیا و هزینه خسارت سیلاب، فرموله شده‌اند. آن‌ها در تحقیق خود

تقویت سامانه‌های کنترل سیلاب شهری در کاهش خسارات سیلاب، تحقیقات متعددی در این زمینه صورت پذیرفته است.

پرزیدینی و همکاران (1993) با توجه به اهمیت سازه‌های ذخیره دائمی و موقت در کنترل سیلاب، به بررسی کاربرد روش‌های مبتنی بر نفوذپذیری و نگهداشت به منظور کنترل سیلاب شهری پرداختند. هدف تحقیق آن‌ها تعیین مکان و تعداد بهینه "بهترین اقدامات مدیریتی" (BMPs¹)، عمل‌کننده بر پایه نفوذ، به منظور کاهش مقادیر حداکثر سیلاب در خروجی حوضه شهری - با کاربرد یک مدل هیدرولوژیکی و الگوریتم ژنتیک - بوده است (Perez-Pedini et al., 1993). دلایلجن و همکاران (2011) بیان نموده‌اند، روش‌های مختلفی برای بهبود عمل‌کرد سامانه‌های موجود، از قبیل کنترل در منشا با حداقل اثرات (LID²) و کاربرد مخازن ذخیره، در دسترس است. در تحقیق آن‌ها، تنها گزینه مخازن ذخیره مورد بررسی قرار گرفته است (Delelegn et al. 2011). سان و همکاران در سال 2011 به ارائه یک چارچوب طراحی بر اساس خطرپذیری در شبکه زهکش شهری پرداختند. این محققان بیان نمودند استاندارد طراحی مناسب می‌بایست تعادل مطلوبی را بین هزینه‌های ساخت و نیز عواقب احتمالی ایجاد نماید. در این تحقیق با بکارگیری یک رویکرد غیرقطعی، برآورد خسارت مورد انتظار سیلاب در حلقه تکرار بهینه‌سازی صورت پذیرفته و برای هر طرح پیشنهادی خسارت مورد انتظار سیلاب به وسیله شبیه‌سازی شبکه زهکش مدفون تحت چندین سیلاب طراحی صورت می‌گیرد (Sun et al., 2011). کارآموز و همکاران (2012) و نظیف و همکاران (2013) در تحقیقاتی بیان نمودند سامانه زهکش شهری مستقیماً تحت تأثیر اثرات تغییرات اقلیمی می‌باشد و این سامانه باید قابلیت تطبیق با تغییرات اقلیمی آتی را دارا باشد. آن‌ها با توسعه یک شبکه عصبی مصنوعی به تخمین خصوصیات ماهیانه بارش پرداخته و با اعمال سری‌های زمانی بارش بر مدل EPA-SWMM³ به بررسی عملکرد

¹ Best Management Practices

² Low Impact Development

³ Environmental Protection Agency-Stormwater Management Model

⁴ Multi Criteria Decision Making

کار گرفته شده است - آنالیز شده‌اند (Duan et al., 2016). تحقیقات مختلف صورت پذیرفته و نیز رخدادهای اخیر سیلاب‌های شهری بیان‌گر آن است که طراحی سامانه‌های کنترل سیلاب شهری به گونه‌ای که توانایی حفظ عملکرد خود در هنگام رخداد سیلاب‌هایی با شدت‌های بیش از انتظار و غیرقطعی را داشته باشند، حائز اهمیت است. لذا در تحقیق حاضر با توسعه یک مدل ترکیبی بهینه‌سازی چند هدفه و شبیه‌سازی عددی، اقدام به بهسازی سامانه کنترل سیلاب حوضه سیل‌برگردان شرق تهران، به عنوان یک مطالعه موردی که با کمبود ظرفیت هیدرولیکی و نیز عدم اطمینان تصمیم‌گیران از صحت و تناسب فرض سیلاب طراحی با دوره بازگشت ثابت مواجه است، در قالب کاربرد توأم تونل‌های کمکی و استخرهای تعدیل پرداخته شده است. برای این منظور، علاوه بر رویکرد قطعی، سامانه مذکور با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های ورودی بارش نیز مورد بررسی قرار گرفته تا سامانه اثرات سیلاب‌های شدید بیش از دوره بازگشت طراحی را نیز در انتخاب استراتژی بهینه در نظر داشته باشد. نتایج این دو رویکرد با یکدیگر مقایسه شده است. در نهایت، مدل‌های تلفیقی توسعه داده شده امکان ارائه جبهه‌های پارتو به منظور ارائه نمودن اطلاعات کافی به تصمیم‌گیران برای انتخاب طرح‌های مناسب بهسازی را، با توجه به بودجه در دسترس و سطح عملکردی مطلوب سامانه، فراهم آورده است. به طور مشخص نوآوری‌های تحقیق حاضر شامل ارائه مدل تلفیقی شبیه‌سازی و بهینه‌سازی متناسب با شبکه مقابله با سیلاب تهران، ارائه آنالیزهای عدم قطعیت بر روی داده‌های موجود در این منطقه و نیز تعیین میزان حساسیت دوره بازگشت منتخب بر روی طرح‌های بهسازی شبکه (با ارائه مدل غیرقطعی تلفیقی)، که از نگرانی‌های تصمیم‌گیران می‌باشد، هستند.

2- روش تحقیق

همان‌گونه که بیان شد در این تحقیق یک چارچوب طراحی/بهسازی ترکیبی شبیه‌سازی و بهینه‌سازی با دو رویکرد قطعی و غیرقطعی برای کاربرد در سامانه‌های کنترل سیلاب شهری توسعه داده شده است. در تحقیقات

مشکلات طراحی سامانه‌های زهکشی و انواع عدم قطعیت‌های موجود را معرفی می‌نمایند (Vojinovic et al., 2014). یزدی و همکاران (2015a) عمل‌کرد سه الگوریتم تکاملی چندهدفه شامل NSGA-II¹، NSHS² و MOPSO³ را به صورت مدل‌های تلفیقی با نرم‌افزار SWMM به منظور ارائه طرح‌های بهینه بهسازی در شبکه‌های زهکش مدفون مورد ارزیابی قرار دادند (Yazdi et al., 2015a). یزدی و کیم (2015) بیان نمودند، عمل‌کرد پمپ‌ها و دریچه‌های کنترل نقش مهمی در کاهش موثر خطرات سیلاب دارند. آن‌ها با بکارگیری الگوریتم جستجوی هارمونی، به بهینه‌سازی بهره‌بردار از مخازن تعدیل، دریچه‌های کنترل و ایستگاه‌های پمپاژ پرداختند (Yazdi and Kim, 2015). یزدی و همکاران در سال 2015 به ارائه یک چارچوب بهینه‌سازی مبتنی بر توابع کاپولا برای طراحی/بهسازی سامانه‌های زهکش شهری، با در نظر داشتن ساختار وابسته متغیرهای بارش (شامل شدت و تداوم بارش) پرداختند. آن‌ها از یک تابع توزیع احتمال توأم برای در نظر گرفتن ساختار وابسته بین این متغیرها استفاده نمودند (Yazdi et al., 2015b). طهماسبی بیرگانی و یزدان‌دوست (2015) در تحقیقی به ارائه چارچوب بررسی ایستادگی⁴ در تحلیل خطرپذیری سامانه‌های زهکش شهری پرداختند. آن‌ها بیان کردند، برخی سامانه‌های طراحی شده بر اساس یک دوره بازگشت مشخص، توانایی مقابله با سیلاب‌های بزرگ‌تر ناشی از در نظر نگرفتن عدم قطعیت‌های متغیرهای ورودی را ندارند (Tahmasebi B. and Yazdandoost, 2015). دوان و همکاران (2016) به بررسی طراحی بهینه چندهدفه استخرهای تعدیل، تحت هر دو شرایط پیچیده عدم قطعیت و ضوابط طراحی محلی پرداختند. در این تحقیق فرایندهای اتفاقی همراه با وقوع و گسترش عدم قطعیت، توسط روش شبیه‌سازی قدرتمند مونت کارلو- و درحالی که طرح نورتا (NORTA⁵) برای تولید پایگاه داده تصادفی مناسب برای ورودی‌های مدل و پارامترهای همبسته به

¹ Non-dominated Sorting Genetic Algorithm

² Non-dominated Sorting Harmony Search

³ Multi-Objective Particle Swarm Optimization

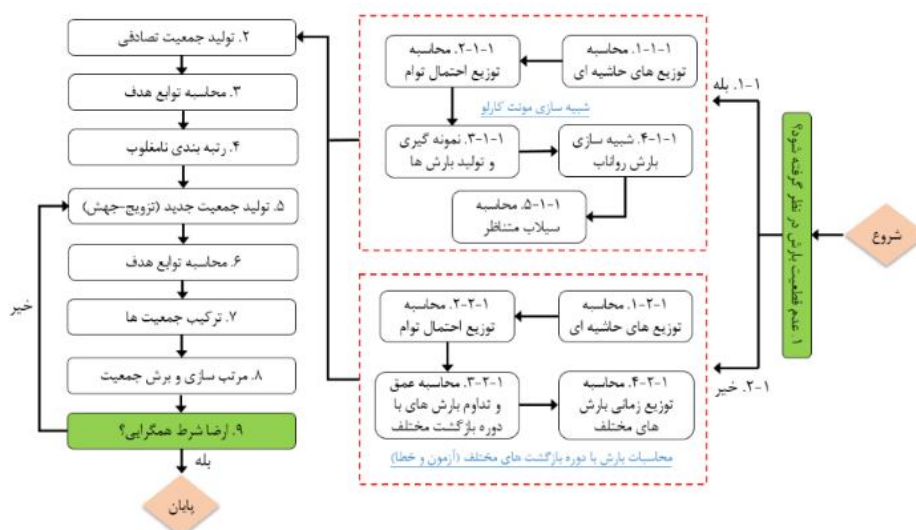
⁴ Persistence

⁵ Normal To Anything

بارش بدست آمد و در ادامه با نمونه‌گیری از توزیع کاپولای منتخب، بارش‌های مصنوعی مورد نیاز برای کاربرد روش شبیه‌سازی مونت کارلو به همراه مدل هیدرولیکی شبکه تولید شدند. شایان ذکر است که هر "عمق بارش" بر اساس "الگوی زمانی غالب" بارش‌های منطقه در "مدت بارش" متناظر توزیع می‌شود تا یک بارش مصنوعی تولید شود. مراحل مختلف به کار گرفته شده در تحقیق حاضر در شکل 1 بطور خلاصه به نمایش درآمده است.

بر اساس این شکل ابتدا با توجه به رویکرد منتخب، یکی از روش‌های تحلیل قطعی و یا غیرقطعی برای تعیین شرایط مرزی مدل مورد استفاده قرار می‌گیرد. در هر دو رویکرد، پس از تعیین توزیع‌های احتمالاتی مربوطه، نرم‌افزار EPA-SWMM وظیفه تبدیل بارش به رواناب را برعهده دارد (مراحل 1-1 و 2-1). در گام بعد با کاربرد یک الگوریتم فراابتکاری یک جمعیت تصادفی اولیه شامل ترکیبات مختلفی از تونل‌های کمکی و استخرهای تعدیل تولید می‌گردد (مرحله 2)، سپس توابع هدف مساله شامل هزینه طرح‌ها و سیلاب شبکه (که در قسمت‌های بعد معرفی می‌گردند) مورد ارزیابی قرار می‌گیرند (مرحله 3). در این حالت در رویکرد غیرقطعی، تابع سیلاب شبکه باید به تعداد بارش‌های مصنوعی محاسبه گردد.

پیشین مربوط به نمونه مورد مطالعه برای انتخاب طرح بهسازی، بر اساس توصیه طرح جامع مدیریت آب‌های سطحی شهر تهران (سازمان مشاور فنی و مهندسی شهر تهران، 1390 ب)، دوره بازگشت 50 سال بعنوان سیلاب طراحی انتخاب گردیده است. در تحقیق حاضر و در رویکرد قطعی، برای محاسبه رواناب مربوط به زیرحوضه‌های مختلف، از مدل EPA-SWMM استفاده شده است. بزرگی بارش‌های با دوره بازگشت 10، 25، 50 و 100 ساله (متعارف در طراحی سامانه‌های کنترل سیلاب شهری) بر اساس تحلیل فراوانی رکوردهای بارش در ایستگاه بارانسنجی نیاوران (واقع در محدوده مورد مطالعه) بدست آمده است. سپس این مقادیر به منظور مدل‌سازی هیدرولیکی سامانه در EPA-SWMM به کار برده شده است. در نهایت نیز این مدل هیدرولیکی، در محیط MATLAB، به یک کد بهینه‌سازی چند هدفه متصل گردید تا طرح‌های بهینه تقویت سامانه با حداقل‌سازی "هزینه بهسازی" و "حجم سیلاب شهری" استخراج شوند. در رویکرد غیرقطعی نیز با توجه به داده‌های موجود طولانی مدت در ایستگاه بارانسنجی نیاوران و تحلیل بارش‌هایی که منجر به آب گرفتگی شهری می‌شوند، عمق و تداوم آن بارش‌ها در بازه سال‌های 1352 تا 1392 استخراج شد. سپس با استفاده از توابع کاپولا توزیع توأم متغیرهای غیرقطعی و همبسته عمق و تداوم



شکل 1 چارچوب کلی بهینه‌سازی و شبیه‌سازی پژوهش حاضر

روش‌های آماری، توزیع‌های احتمالاتی حاشیه‌ای و توأم متغیرها استخراج شده‌اند. این وقایع با مدل‌سازی شبکه موجود در نرم‌افزار SWMM تحت تمامی بارش‌های ثبت شده در ایستگاه بارانسنجی نیاوران تعیین شده‌اند، و لذا بارش‌هایی که منجر به خروج آب از شبکه نشده، از تحلیل‌های آماری حذف گردیده‌اند. بدین ترتیب، از بین 362 واقعه بارش با شدت و تداوم‌های مختلف مربوط به ایستگاه نیاوران، 158 مورد بارش، مولد سیلاب شناخته شده‌اند. زمان جداسازی وقایع بارش بزرگ‌تر و مساوی زمان تمرکز حوضه و برابر با 1 ساعت فرض شده است. همچنین، بیش‌ترین و کم‌ترین عمق بارش مولد سیلاب به ترتیب برابر با 61/5 میلی‌متر (با تداوم 1335 دقیقه‌ای) و 7/1 میلی‌متر (با تداوم 45 دقیقه‌ای) بوده‌اند. بیش‌ترین و کم‌ترین تداوم این بارش‌ها نیز به ترتیب برابر با 2100 دقیقه (با عمق بارش 28 میلی‌متری) و 15 دقیقه (با عمق بارش 7/29 میلی‌متری) بوده‌اند. بیش‌ترین و کم‌ترین شدت بارش‌ها نیز به ترتیب 29/16 و 0/69 میلی‌متر بر ساعت بوده است. از توابع کاپولا به منظور استخراج تابع توزیع توأم دو متغیر غیرقطعی استفاده شده است. کاپولا توابعی چند متغیره با حاشیه‌های یکنواخت در بازه [0,1] هستند که توزیع‌های چند متغیره را به توزیع‌های حاشیه‌ای مرتبط می‌نمایند. چنانچه H یک تابع توزیع توأم با توزیع‌های حاشیه‌ای G_Y و F_X باشد، تابع کاپولای C برای هر متغیر x و y در بازه $(-\infty, +\infty)$ وجود دارد که توزیع‌های حاشیه‌ای و توأم را مطابق رابطه (1) مرتبط می‌نماید (سازمان مشاور فنی و مهندسی شهر تهران، 1390 د):

$$H(x, y) = C[F_X(x), G_Y(y)] \quad (1)$$

چنانچه $F_X(x)$ و $G_Y(y)$ توابع چگالی احتمال متغیرهای x و y باشند، سپس توابع چگالی احتمال توأم و حاشیه‌ای مطابق رابطه (2) مرتبط می‌گردند:

$$f_{x,y}(x, y) = c[F_X(x), G_Y(y)]f_x(x)g_y(y) \quad (2)$$

که ضریب c با رابطه (3) به تابع کاپولا (C) مربوط می‌شود:

$$c(u, v) = \frac{\partial^2 C(u, v)}{\partial u \partial v}, \quad 0 < u < 1, 0 < v < 1 \quad (3)$$

که u و v به ترتیب، توابع توزیع حاشیه‌ای F_X و G_Y هستند. برای انتخاب بهترین خانواده از توابع کاپولا برای

در گام بعد هر یک از طرح‌ها بر اساس قواعد "رتبه‌بندی نامغلوب" و "ازدحام جمعیت" رتبه‌بندی می‌شوند (مرحله 4). سپس با کاربرد عملگرهای تزویج و جهش یک جمعیت جدید از راهکارهای بهسازی شبکه تولید می‌گردد (مرحله 5). مجدداً مشابه مرحله 3، توابع هدف مساله محاسبه می‌شوند (مرحله 6). این جمعیت جدید با جمعیت قبلی ترکیب شده (مرحله 7) و سپس با رتبه‌بندی جواب‌ها و باتوجه به تعداد مجاز جمعیت، یک جمعیت جدید تشکیل می‌شود (مرحله 8). این روند تا ارضای شرط خاتمه یعنی تعداد تکرار از پیش تعیین شده ادامه می‌یابد (مرحله 9) تا در نهایت جواب‌های بهینه مساله موسوم به جبهه پارتو بدست آید. در ادامه شرح تفصیلی مراحل نیز ارائه خواهد شد.

2-1- شبیه‌سازی بارش و رواناب و تحلیل عدم قطعیت

عموماً یک رخداد بارش با سه مشخصه کلیدی تداوم، الگوی زمانی و عمق بارش شناخته می‌شود. در روش‌های طراحی متعارف مبتنی بر دوره بازگشت، تداوم بارش حداقل برابر با زمان تمرکز حوضه در نظر گرفته می‌شود، اما در روش‌های مبتنی بر خطرپذیری (یا احتمالاتی) فرض تداوم ثابت برقرار نیست. لذا در روش‌های مبتنی بر خطرپذیری، عمق و تداوم بارش به عنوان متغیرهایی غیرقطعی در نظر گرفته می‌شوند.

این پارامترها دارای همبستگی بوده و برای حفظ ساختار همبسته آن‌ها نیاز به کاربرد یک تابع توزیع احتمالاتی مشترک (توأم) می‌باشد. همچنین در مقاله حاضر روش بلوک‌های متناوب (McCuen, 1977) برای تعیین مشخصه الگوی زمانی بارش‌ها به کار رفته است.

همان‌گونه که بیان شد به منظور بارگذاری شبکه از دو رویکرد قطعی (بارش با دوره بازگشت‌های 10، 25، 50 و 100 ساله) و غیرقطعی (100 نمونه بارش مصنوعی) بهره برده شده است. در تحقیق حاضر با توجه به اطلاعات در دسترس از ایستگاه باران‌سنجی (ایستگاه نیاوران)، در ابتدا و بوسیله مدل‌سازی‌های اولیه حوضه سیل‌برگردان شرق تهران، وقایعی تاریخی که منجر به شکل‌گیری سیلاب در این شبکه شده‌اند، انتخاب گردیده و سپس با بکارگیری

هر مساله بخصوص، می توان از معیار حداکثر درستنمائی (ML^1) استفاده کرد. در این روش، تابع کاپولایی که بیشترین مقدار درستنمائی را داراست برای برازش به داده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد (Zhang and Singh, 2007). در تحقیق حاضر، با توجه به روش حداکثر درستنمائی (ML)، از تابع کاپولای فرانک بعنوان تابع منتخب استفاده شده است. روابط مربوط به این تابع در مراجع مختلف در دسترس می‌باشند (Zhang and Singh, 2007 و Yazdi et al. 2015).

2-2- مدل ترکیبی بهینه‌سازی و شبیه‌سازی

حال در رویکرد قطعی، با توجه به مد نظر قرار دادن بارش‌های با دوره بازگشت‌های 10، 25، 50 و 100 ساله با تداوم 6 ساعت برای بهسازی شبکه، عمق این بارش‌ها از توزیع احتمال توأم (کاپولا) استخراج شد. سپس اعماق بارش‌های مربوطه با روش بلوک‌های متناوب در طول 6 ساعت توزیع گردید (مراحل مختلف گام 1-2 در شکل 1). در رویکرد غیرقطعی، پس از تعیین تابع کاپولای مناسب، با طی مراحل زیر و بکارگیری روش معکوس توابع توزیع، می‌توان بارش‌های مصنوعی مورد نیاز برای تحلیل شبکه را بدست آورد. بر اساس فرضیه اسکالر² تابع توزیع مشروط $c_u(v)$ برای V با شرط $U=u$ مطابق با مشتق تابع کاپولا نسبت به u می‌باشد (Yazdi et al., 2015b).

$$\frac{\partial Q}{\partial x_{st}} + \frac{\partial A}{\partial T} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial T} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x_{st}} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial y_{st}}{\partial x_{st}} - g(S_o - S_f) = 0 \quad (6)$$

در این روابط Q دبی جریان، A سطح مقطع، g شتاب گرانش، S_o شیب کانال، S_f شیب خط گرادیان انرژی، x_{st} و y_{st} راستای حرکت و راستای عمود بر حرکت جریان و T زمان می‌باشند (Chaudhry, 2008).

به منظور بهینه‌سازی توابع هدف مساله حاضر تحت قیود خاص (روابط (7) تا (14))، از الگوریتم تکاملی NSDE⁴ استفاده شده است. NSDE یک الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری چند هدفه است که با توجه به کاربرد عملگرهای مناسب‌تر به لحاظ یافتن بهینه‌های سراسری و همچنین روند همگرایی بهتر، یک نسخه بهبودیافته از الگوریتم ژنتیک برای کاربرد در سامانه‌های کنترل سیلاب شهری می‌باشد (Yazdi et al., 2015).

حال در رویکرد قطعی، با توجه به مد نظر قرار دادن بارش‌های با دوره بازگشت‌های 10، 25، 50 و 100 ساله با تداوم 6 ساعت برای بهسازی شبکه، عمق این بارش‌ها از توزیع احتمال توأم (کاپولا) استخراج شد. سپس اعماق بارش‌های مربوطه با روش بلوک‌های متناوب در طول 6 ساعت توزیع گردید (مراحل مختلف گام 1-2 در شکل 1). در رویکرد غیرقطعی، پس از تعیین تابع کاپولای مناسب، با طی مراحل زیر و بکارگیری روش معکوس توابع توزیع، می‌توان بارش‌های مصنوعی مورد نیاز برای تحلیل شبکه را بدست آورد. بر اساس فرضیه اسکالر² تابع توزیع مشروط $c_u(v)$ برای V با شرط $U=u$ مطابق با مشتق تابع کاپولا نسبت به u می‌باشد (Yazdi et al., 2015b).

حال برای تولید نمونه (x,y) از یک جفت متغیر تصادفی (X,Y) با تابع توزیع مشترک H که $H=C(U,V)$ است، مراحل زیر طی می‌شود:

1- دو متغیر تصادفی یکنواخت مستقل u و t در بازه $(0,1)$ تولید می‌گردند؛

$$c_u(v) = \frac{\partial C(u,v)}{\partial u} \quad (4)$$

2- قرار داده می‌شود: $v=c_u^{-1}(t)$ که v شبه معکوس³ c_u است؛

3- به ازای جفت (u,v) قرار داده می‌شود: $x=F^{-1}(u)$ و $y=G^{-1}(v)$ و جفت (x,y) تعیین می‌گردد.

همان‌گونه که بیان شد، پس از تولید جفت نمونه‌های همبسته عمق و تداوم بارش، از روش بلوک‌های متناوب برای توزیع زمانی عمق در گام‌های مدت زمان بارش

همان‌گونه که بیان شد، پس از تولید جفت نمونه‌های همبسته عمق و تداوم بارش، از روش بلوک‌های متناوب برای توزیع زمانی عمق در گام‌های مدت زمان بارش

همان‌گونه که بیان شد، پس از تولید جفت نمونه‌های همبسته عمق و تداوم بارش، از روش بلوک‌های متناوب برای توزیع زمانی عمق در گام‌های مدت زمان بارش

⁴ Soil Conservation Service- Curve Number

⁵ Non-dominated Sorting Differential Evolution

¹ Maximum Likelihood

² Sklar Theorem

³ Quasi-Inverse

SWMM بدست می‌آید. همچنین پارامترهای v_{st} ، v_{max} ، d ، w ، h_b ، A و h_s به ترتیب معرف سرعت جریان در کانال‌ها، حداکثر سرعت مجاز، قطر تونل‌های کمکی با مقطع دایره-ای، عرض و ارتفاع تونل‌های کمکی با مقطع مستطیلی، مساحت مقاطع استخرهای تعدیل و عمق این استخرها می‌باشند. در این جا، تونل‌های کمکی می‌توانند 18 مقدار ارائه شده در جدول 1 و یا مقدار صفر در حالت عدم کاربرد تونل کمکی را به خود اختصاص دهند. به طریق مشابه استخرهای تعدیل نیز می‌توانند از عمق 1/5 متر تا 8/4 متر و مساحت 3000 مترمربع تا 109000 مترمربع و یا صفر در حالت عدم کاربرد استخر تعدیل را اخذ نمایند. حدود مجاز کاربرد عمق و مساحت استخرهای تعدیل با توجه به گزارشات امکان‌سنجی و بازدیدهای میدانی منطقه حوضه سیل‌برگردان شرق تهران تعیین شده است. استخرهای در نظر گرفته شده، از نوع نفوذناپذیر هستند.

$$C_j = 1.04 \times 3680 \times V^{-0.6} \quad (15)$$

در رابطه فوق V حجم مخزن تعدیل برحسب مترمکعب می‌باشد و برای تخمین هزینه نگهداری استخر تعدیل، عمر مفید استخر تعدیل تقویتی برابر با 20 سال فرض شده است (سازمان مشاور فنی و مهندسی شهر تهران، 1390 ج).

$$\text{Min } f_1 = \sum_{i=1}^n C_i \times L_i + \sum_{j=1}^m (C_j \times V_j) \quad (7)$$

$$\text{Min } f_2 = \sum_{i=1}^N V_{f_i} \quad (8)$$

تحت قیود:

$$v_{st} \leq v_{max} \quad (9)$$

$$d_i \in \{0, D_1, D_2, \dots, D_{18}\} \quad (10)$$

$$w_i \in \{0, W_1, W_2, \dots, W_{18}\} \quad (11)$$

$$h_{b_i} \in \{0, H_{b_1}, H_{b_2}, \dots, H_{b_{18}}\} \quad (12)$$

$$A_i \in \{0, A_1, A_2, \dots, A_{18}\} \quad (13)$$

$$h_{s_i} \in \{0, H_{s_1}, H_{s_2}, \dots, H_{s_{18}}\} \quad (14)$$

که در اینجا، C_i (ریال) هزینه ساخت و نگهداری واحد طول تونل‌های تعدیل بر اساس جدول 1 می‌باشد. L (متر) و n به ترتیب طول و تعداد تونل‌های کمکی، C_j (ریال) هزینه ساخت و نگهداری واحد حجم مخازن تعدیل که از رابطه (15) بدست می‌آید، V_j حجم ز-آمین مخزن تعدیل، m تعداد مخازن و V_f (م³) حجم سیلاب در گره-های شبکه می‌باشند. شایان ذکر است در رویکرد غیرقطعی، V_f برابر با میانگین سیلاب خروجی از گره‌های شبکه در همه بارش‌های مصنوعی و N تعداد کل گره‌های شبکه تولید شده است. این مقادیر با مدل‌سازی هیدرولیکی شبکه کنترل سیلاب مطالعاتی در نرم‌افزار

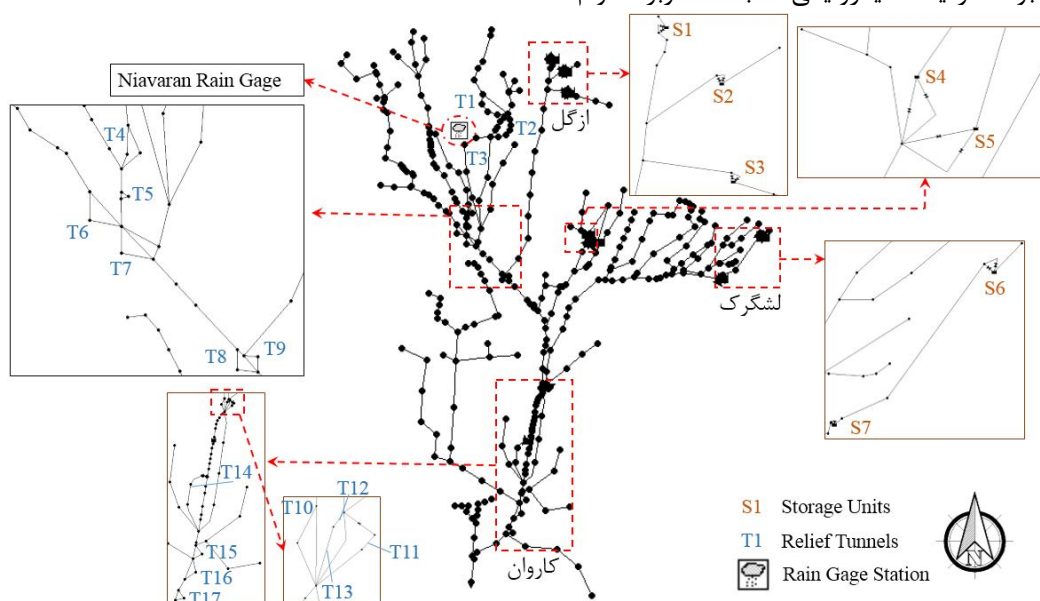
جدول 1 ابعاد و هزینه اجرا و نگهداری متر طول مقاطع تجاری (سازمان مشاور فنی و مهندسی شهر تهران، 1390 د)

ردیف	قطر لوله (متر)	هزینه (ریال/متر)	ابعاد مقطع مستطیلی (متر)	هزینه (ریال/متر)	ردیف	قطر لوله (متر)	هزینه (ریال/متر)	ابعاد مقطع مستطیلی (متر)	هزینه (ریال/متر)
1	0/3	6019960	1/8×0/7	22465220	10	2/2	41579980	3/0×0/7	29047200
2	0/6	9240080	1/8×0/9	25492680	11	2/5	45628120	3/0×0/9	32961580
3	1	17324960	1/8×1/8	36126980	12	2/6	47354840	3/0×1/8	46711500
4	1/2	19634980	1/8×2/5	42618140	13	3/2	56594920	3/0×2/5	55104180
5	1/4	21945000	1/8×3/0	46711500	14	3/4	60060140	3/0×3/0	60396820
6	1/5	24837940	2/4×0/7	25963500	15	3/5	61214960	3/5×0/7	31389140
7	1/6	28275040	2/4×0/9	29461780	16	3/6	62370160	3/5×0/9	35618920
8	1/8	28875060	2/4×2/5	49253700	17	4/2	71609860	3/5×1/8	50477680
9	2	30029880	2/4×3/0	53984320	18	5/6	93554860	3/5×4/5	80031420

3- مطالعه موردی

شهر تهران به عنوان بزرگ‌ترین و پرجمعیت‌ترین شهر ایران و با جمعیت ساکن تقریبی 8/5 میلیون نفر به لحاظ شبکه کنترل سیلاب، دارای چهار حوضه سیلاب‌برگردان شرق، سیلاب‌برگردان غرب، مرکزی و رودخانه چیتگر می‌باشد؛ که با توجه به توپولوژی منطقه و خروجی‌های مستقل آن‌ها امکان مدل‌سازی هیدرولیکی هر کدام به صورت مجزا وجود دارد. همان‌گونه که پیش‌تر بیان شد، قسمت شرقی سامانه کنترل سیلاب شهر تهران یا همان حوضه سیلاب‌برگردان شرق تهران، به عنوان مطالعه موردی تحقیق حاضر انتخاب شده است. این منطقه با مساحت تقریبی 220 کیلومتر مربع شامل 205 کیلومتر شبکه زهکش اصلی بوده و بر طبق گزارشات طرح جامع مدیریت آب‌های سطحی شهر تهران، از بیش‌ترین کمبود ظرفیت هیدرولیکی و بیرون‌زدگی آب از نقاط مختلف شبکه رنج می‌برد (سازمان مشاور فنی و مهندسی شهر تهران، 1390 د). این حوضه شامل گستره وسیعی از انواع کانال‌های باز و بسته می‌باشد. همچنین بر اساس مطالعات پیشین بر روی شبکه کنترل سیلاب شهر تهران توسط شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس (سازمان مشاور فنی و مهندسی شهر تهران، 1390 ج)، یک راهکار مناسب برای بهبود کمبود ظرفیت هیدرولیکی شبکه، کاربرد توأم

تونل‌های کمکی و استخرهای تعدیل بوده است. این راهکار شامل ساخت 7/5 کیلومتر تونل کمکی و 7 استخر تعدیل (با حجم تقریبی 865453 مترمکعب) در مکان‌های مناسبی که بر اساس مطالعات امکان‌سنجی تعیین شده، بوده است. در تحقیق حاضر به منظور فراهم آوردن فضای جستجوی بهتر، علاوه بر این موارد، 5 تونل کمکی در مناطق پایین‌دست شهر که بیش‌تر در معرض رخداد سیلاب هستند، در نظر گرفته شده است. نمایی از مدل هیدرولیکی تولید شده از شبکه کنترل سیلاب حوضه سیلاب‌برگردان شرق تهران در شکل 2 نشان داده شده است. در این شکل T1 تا T17 تونل‌های کمکی و S1 تا S7 در این استخرهای تعدیل مورد بررسی در تحقیق حاضر می‌باشند. 5 تونل کمکی مازاد در نظر گرفته شده در تحقیق حاضر شامل تونل‌های T9 و T10 و تونل‌های T15 تا T17 هستند. مکان‌های پیشنهادی برای این موارد با توجه به نقاط خروجی سیلاب در مدل‌سازی‌های اولیه هیدرولیکی به ازای بارش‌های حدی تعیین شده است. همان‌گونه که بیان شد برای بهسازی سامانه کنترل سیلاب شهر تهران، مطالعات پیشین سیلاب تعدیل شده با دوره بازگشت ثابت 50 سال را مد نظر قرار داده‌اند (سازمان مشاور فنی و مهندسی شهر تهران، 1390 الف).



شکل 2 مدل عددی حوضه سیلاب‌برگردان شرق تهران

مشاور فنی و مهندسی شهر تهران، 1390 الف). با توجه به اهداف تحقیق حاضر، تعدیل صورت پذیرفته بر اساس این قضاوت مد نظر قرار نگرفته است و بارش‌های با دوره بازگشت‌های 10، 25، 50 و 100 ساله مستقیماً از تحلیل وقایع حدی داده‌های طولانی مدت ایستگاه بارانسجی نیاوران بدست آمده‌اند.

4- نتایج

در ادامه نتایج حاصل از رویکردهای قطعی و غیرقطعی مورد اشاره در قبل ارائه شده و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. باید توجه داشت نتایج حاصل از رویکرد قطعی و نیز راهکار بهسازی ارائه شده توسط مهندس مشاور، با در نظر گرفتن تنها یک بارش طراحی با دوره بازگشت ثابت بوده- اند. در حالی که نتایج رویکرد غیرقطعی با میانگین‌گیری نتایج حاصل از 100 نمونه بارش مصنوعی و به عبارت دیگر با 100 بار مدل‌سازی هر راهکار بدست آمده است. همچنین تفاوت‌هایی در فرضیات و داده‌های در دسترس تحقیق حاضر و مهندس مشاور پروژه، که منجر به تفاوت حدودی نتایج می‌گردد، دور از انتظار نمی‌باشد.

4-1- رویکرد قطعی

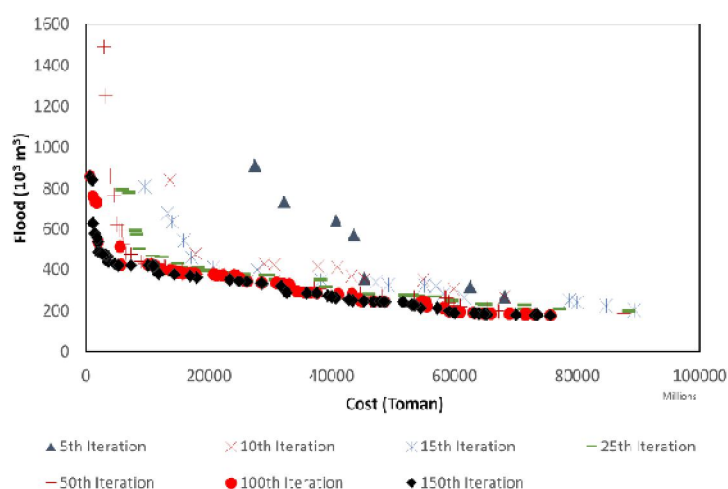
در رویکرد قطعی 150 نسل از جواب‌ها مورد بررسی قرار گرفته‌اند. روند همگرایی به ازای بارش با دوره بازگشت 50 ساله، در شکل 3 به نمایش درآمده است.

شایان ذکر است، در تحقیقات صورت پذیرفته توسط شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس، بارش تعدیل شده با دوره بازگشت 50 ساله بر اساس مشخصات زیر حوضه‌های مختلف ناحیه شرق تهران (اعداد منحنی، افت اولیه، زمان تأخیر و ...) و همچنین با محاسبه عمق بارش هر زیر حوضه از رابطه (16)، به رواناب متناظر آن تبدیل شده است (سازمان مشاور فنی و مهندسی شهر تهران، 1390 الف).

$$i = C_{ALT,RP} D^{-0.645} \quad (16)$$

در این رابطه i معرف شدت بارش (mm/h)، D تداوم بارش (دقیقه) و $C_{alt, RP}$ ضریب معادله شدت-مدت-فراوانی شهر تهران برحسب دوره بازگشت طراحی و ارتفاع متوسط زیرحوضه است، که از جداول مربوطه در مرجع (سازمان مشاور فنی و مهندسی شهر تهران، 1390 الف) بدست می‌آید. در ادامه نیز توزیع زمانی بارش با کاربرد روش بلوک‌های متناوب مد نظر قرار گرفته است. با توجه به مطالعات پیشین، تداوم بارش نیز برابر با 6 ساعت فرض شده است (سازمان مشاور فنی و مهندسی شهر تهران، 1390 الف).

مشاور پس از طی این مراحل با توجه به قضاوت مهندسی و به منظور کاهش مقادیر بارش نقطه‌ای و پخش آن با توجه به مساحت زیرحوضه‌های مختلف، اقدام به تعدیل سیلاب متناظر این بارش (به نوعی کاهش عمق بارش) بر اساس مساحت زیرحوضه‌ها نموده است. این روش تعدیل در گزارشات مربوطه قابل دسترس می‌باشد (سازمان

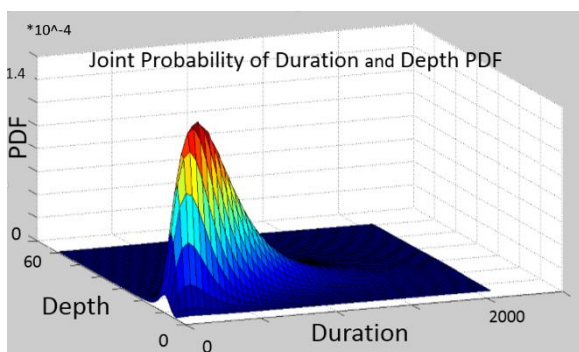


شکل 3 روند همگرایی در رویکرد قطعی (بارش 50 ساله)

توزیع احتمال توأم بدست آمده از کاربرد تابع فرانک برای دو متغیر غیر قطعی شدت و تدام بارش در شکل 4 به نمایش در آمده است.

همان گونه که پیش تر نیز بیان شد، نتایج ارائه شده در این قسمت تحت بارگذاری 100 نمونه بارش مصنوعی تولید شده از این رویه بدست آمده‌اند. مشابه آنچه در رویکرد قطعی بیان شد، روند همگرایی نتایج حاصل از مدل تلفیقی شبیه‌سازی-بهینه‌سازی غیرقطعی نیز در شکل 5- الف به نمایش در آمده است. نتایج نسل‌های مختلف بهینه‌سازی، بیانگر تغییرات اندک پارتوهای نهایی از نسل 15-ام به بعد می‌باشد. با توجه به هزینه محاسباتی بسیار بالا در رویکرد غیرقطعی و نتایج حاصل از بررسی روند همگرایی در رویکرد قطعی، مدل تلفیقی غیرقطعی به ازای تکرار تا 50 نسل مورد ارزیابی قرار گرفته است.

همچنین شکل 5- ب پارتوهای مربوط به بارش‌های با دوره بازگشت‌های مختلف و نیز رویکرد غیرقطعی را به ازای تکرار 50 نسل نشان می‌دهد. همان گونه که انتظار می‌رود افزایش دوره بازگشت منجر به تشدید سیلاب‌های مشاهده شده در شبکه شده است. باید توجه داشت در این شکل فضای محاسباتی رویکرد غیرقطعی با رویکردهای قطعی متفاوت بوده و این تفاوت ناشی از متوسط‌گیری سیلاب ناشی از بارش‌های مصنوعی است.



شکل 4 تابع توزیع احتمال توأم تداوم و عمق بارش

خطچین قائم رسم شده، راهکارهای منتخبی است که از فضای قطعی به غیرقطعی منتقل می‌گردند (طبعاً با هزینه‌کرد تقریباً مشابه) و در قسمت‌های بعد مقایسه می‌شوند. شکل 6 جبهه پارتوی غیرقطعی به همراه راهکار

همان گونه که ملاحظه می‌شود از نسل‌های 15 الی 25 به بعد جواب‌های پارتوها به یکدیگر نزدیک شده و تقریباً به ازای 50 نسل، پاسخ‌های مناسب و نهایی (قابل مقایسه و مشابه با 150 نسل) حاصل شده‌اند. با توجه به شکل 3، واضح است با افزایش هزینه بهسازی، مقادیر سیلاب مشاهده شده در شبکه کاهش می‌یابد و بالعکس. شایان ذکر است در ابتدا نتایج بارش 50 ساله به نمایش درآمده و سپس سایر حالات نیز مقایسه می‌گردند.

4-2- رویکرد غیرقطعی

در ابتدا باید بیان نمود با توجه به کاربرد معیارهای نکویی برازش کلموگروف-اسمیرنوف¹⁵، اندرسون-دارلینگ¹⁶ و مجذور کای¹⁷ بهترین توزیع برازش داده شده به تداوم بارش، توزیع گاما¹⁸ با مقادیر α و β به ترتیب برابر با 271/25 و 2/2558 و همچنین بهترین توزیع برازش داده شده به مقدار بارش، توزیع مقدار حدی تعمیم‌یافته¹⁹ به ازای K ، σ و μ به ترتیب برابر با 0/22105، 5/7477 و 15/486 بوده است. همچنین، مقادیر مربوط به حداکثر درست‌نمایی توابع مختلف کاپولای مورد بررسی در تحقیق حاضر در جدول 2 ارائه شده است.

جدول 2 مقادیر حداکثر درست‌نمایی توابع کاپولا

ردیف	تابع کاپولا	حداکثر درست‌نمایی
1	Frank	-1/634513
2	Joe	-1/659403
3	Plackett	-1/637715
4	Galambos	-1/662549
5	Clyton	-1/642037
6	Ali-Mikhail-Haq	-1/640365

با توجه به این مقادیر، همان گونه که پیش تر نیز بیان شد، تابع کاپولای فرانک با بیش‌ترین مقدار حداکثر درست‌نمایی، به عنوان تابع توزیع توأم متغیرهای بارش در ایستگاه نیاوران انتخاب شده است.

¹⁵ Kolmogorov-Smirnov

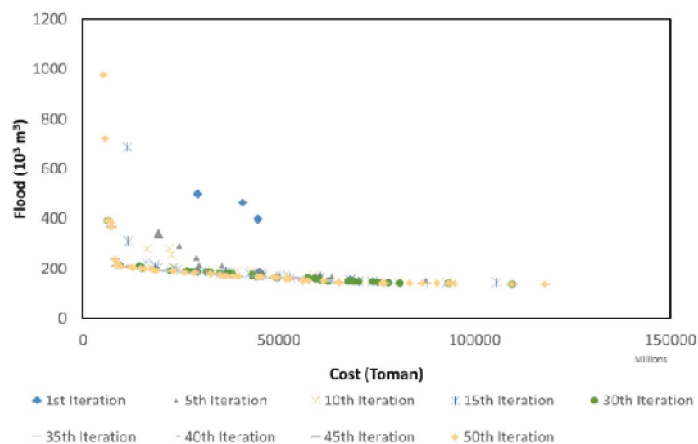
¹⁶ Anderson-Darling

¹⁷ Chi-Square

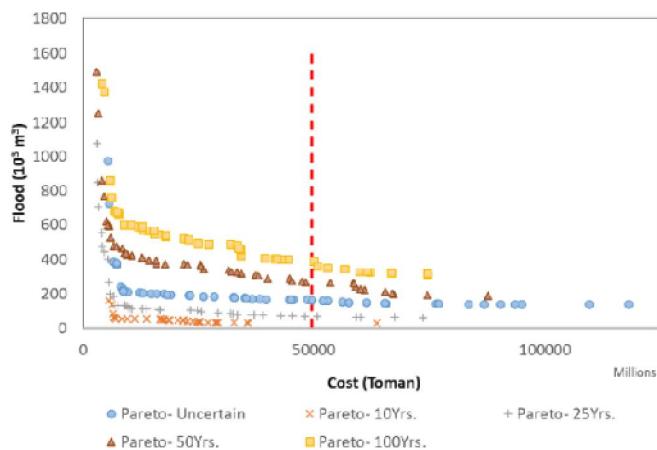
¹⁸ Gamma

¹⁹ Generalized Extreme Value

پیشنهادی مشاور و راهکارهای منتخب با هزینه کرد نزدیک بهم را در فضای هدف غیر قطعی نشان می‌دهد.

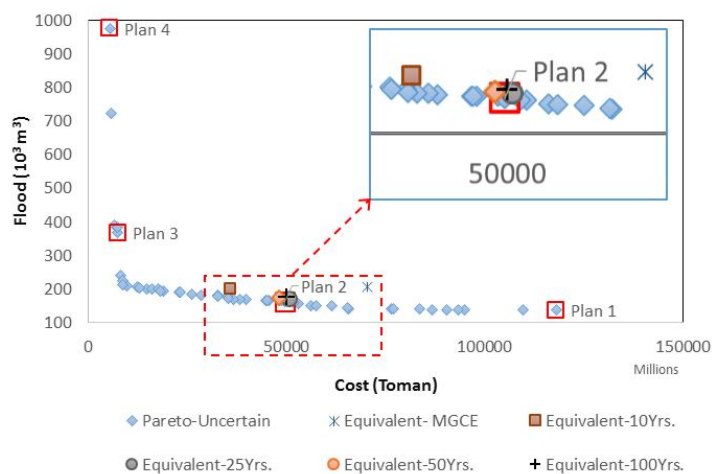


الف- روند همگرایی رویکرد غیرقطعی



ب- مقایسه پارتوهای قطعی و غیرقطعی (50 نسل)

شکل 5 روند همگرایی در رویکرد غیرقطعی و مقایسه نتایج



شکل 6 جبهه پارتو نهایی حاصل از مدل غیرقطعی و نتایج هم‌ارز

در این قسمت، نتایج منتخب از شکل 5- ب از فضای قطعی به فضای غیرقطعی منتقل شده و به عبارت دیگر سیلاب متوسط‌گیری شده به ازای بارش‌های مصنوعی تولیدی در هر یک از این راهکارها بدست آمده که در شکل 6 به نمایش درآمده است. به منظور انتقال پاسخ‌های قطعی به فضای غیرقطعی، پس از کاربرد مدل تلفیقی بهینه‌سازی-شبه‌سازی ارائه شده با رویکرد قطعی بر روی شبکه مورد مطالعه، پارتو بهینه نهایی بدست آمد. سپس یک استراتژی بهینه بهسازی پیشنهادی مدل با هزینه‌کرد مشخص (که در قالب خط قائم رسم شده در شکل 5- ب نشان داده شده است) از پارتو نهایی انتخاب شد. در گام بعدی ابعاد این راهکار به صورت دستی و در قالب یک

طرح پیشنهادی به مدل غیرقطعی معرفی گردید. سپس مطابق روند مورد استفاده در رویکرد غیرقطعی، این طرح بهسازی به ازای 100 نمونه بارش مصنوعی مورد ارزیابی قرار گرفت و با متوسط‌گیری مقادیر سیلاب بدست آمده از SWMM، سیلاب متناظر این طرح در رویکرد غیرقطعی بدست آمد. همچنین جواب‌های منتخب در جدول 3 ارائه شده‌اند. نتایج بدست آمده بیانگر آن است که در نظرگیری شرایط غیرقطعی منجر به تغییر جدی در راهکارهای بهینه بدست آمده از رویکردهای قطعی نشده است و در سطح هزینه‌کردی مشابه مقادیر سیلاب در شبکه شرق تهران در فضای غیرقطعی تغییر جدی نداشته است.

جدول 3 راهکارهای منتخب پارتو در رویکرد غیرقطعی

متغیر تصمیم		شماره راهکار (بر اساس شکل 6)											
شماره تونل	شماره استخر تعدیل	1			2			3			4		
		هزینه (10 ⁶ Toman)	سیلاب (10 ⁶ lit)	سیلاب (10 ⁶ lit)	هزینه (10 ⁶ Toman)	سیلاب (10 ⁶ lit)	سیلاب (10 ⁶ lit)	هزینه (10 ⁶ Toman)	سیلاب (10 ⁶ lit)	سیلاب (10 ⁶ lit)	هزینه (10 ⁶ Toman)	سیلاب (10 ⁶ lit)	سیلاب (10 ⁶ lit)
		118029.5	136.9697	49627.25	161.5281	7331.078	367.0629	5345.393	974.5025				
		D ⁽¹⁾	H ⁽²⁾	W ⁽³⁾ /V ⁽⁴⁾	D	H	W/V	D	H	W/V	D	H	W/V
-	S1	-	8.0	332957	-	8.0	332957	-	2.0	83239	-	-	-
-	S2	-	4.8	64510	-	3.2	10752	-	6.4	86014	-	4.8	16128
-	S3	-	6.0	132120	-	4.5	99090	-	6.0	3303	-	4.5	24773
-	S4	-	3.0	10656	-	7.4	26640	-	7.4	106560	-	3.7	53280
-	S5	-	1.5	60094	-	3.0	30047	-	4.5	75118	-	3.0	30047
-	S6	-	4.8	108839	-	2.6	34829	-	6.4	290239	-	-	-
-	S7	-	4.2	101154	-	2.1	84295	-	-	-	-	2.1	168590
	Leng.												
T1	1900m	5.6	-	-	1.0	-	-	-	-	-	-	-	-
T2	1400m	-	3.0	3.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T3	4900m	-	3.5	4.5	-	1.8	0.7	-	-	-	-	-	-
T4	790m	0.3	-	-	1.4	-	-	-	-	-	-	-	-
T5	40m	-	3.5	4.5	-	3.0	2.5	-	2.4	0.7	-	3.5	0.9
T6	670m	5.6	-	-	1.0	-	-	-	-	-	-	-	-
T7	1000m	1.5	-	-	2.6	-	-	-	-	-	-	-	-
T8	420m	2.0	-	-	1.6	-	-	-	-	-	-	-	-
T11	200m	-	3.5	4.5	-	3.5	4.5	-	1.8	1.8	-	2.4	0.7
T12	200m	4.2	-	-	3.4	-	-	3.6	-	-	3.2	-	-
T13	300m	-	3.5	4.5	-	3.5	4.5	-	2.4	0.9	-	-	-
T14	1900m	5.6	-	-	2.0	-	-	-	-	-	-	-	-
T9	300m	0.6	-	-	1.2	-	-	1.2	-	-	-	-	-
T10	470m	-	-	-	0.6	-	-	0.6	-	-	1.4	-	-
T15	525m	5.6	-	-	2.2	-	-	-	-	-	-	-	-
T16	780m	5.6	-	-	5.6	-	-	-	-	-	-	-	-
T17	370m	5.6	-	-	4.2	-	-	1.8	-	-	2.0	-	-

⁽¹⁾Diameter (m)- In case of circular-shaped tunnel, ⁽²⁾Height (m)- In case of rectangular-shaped tunnel/storage unit, ⁽³⁾Width (m)- In case of rectangular-shaped tunnel ⁽⁴⁾Volume (m³)- In case of storage unit

سیلاب مشاهده شده با افزایش دوره بازگشت، افزایش می‌یابند. از طرفی باید توجه داشت که جبهه پارتوی حاصل از رویکرد غیر قطعی نسبت به سایر رویکردها (شکل 5-ب) طیف بیش‌تری از راهکارها را پوشش داده و به عبارتی گستردگی جواب‌های بهینه بیش‌تر است. این امر ناشی از در نظر گرفتن اثرات بارش‌های متعدد با دوره بازگشت‌های مختلف در این رویکرد است. لذا کاربرد این رویکرد می‌تواند راهکارهای بهینه بیش‌تری را برای تصمیم‌گیران فراهم آورد.

در زمینه بررسی راهکار ارائه شده توسط مشاور و عملکرد مدل تلفیقی حاضر نیز باید بیان نمود، که این راهکار با توجه به نزدیکی مقادیر سیلاب آن (در فضای متناظر غیرقطعی) با مقادیر سیلاب پارتوی غیرقطعی (که در شکل 6 قابل مشاهده است)، قادر به کاهش قابل ملاحظه مقادیر سیلاب شبکه می‌باشد. با این حال کاربرد مدل تلفیقی شبیه‌سازی-بهینه‌سازی غیرقطعی در مقایسه با طرح مشاور توانسته است در سطح هزینه‌کرد مشابه، کاهش قابل ملاحظه مقادیر سیلاب (31/4 درصد) و یا در سطح عملکردی مشابه، کاهش هزینه طرح‌های پیشنهادی (82/5 درصد کاهش نسبت به طرح مشاور) را فراهم آورد. به طور کلی مقایسه نتایج دو رویکرد نشان می‌دهد، در نظر گرفتن عدم قطعیت داده‌های ورودی شدت و تداوم بارش در ناحیه شرق تهران منجر به رخداد سیلاب‌هایی بزرگی بیش از سیلاب طراحی/بهسازی شبکه (سیلاب 50 ساله تعدیل شده که مشخصاً از سیلاب 50 ساله کم‌تر است) شده است. اما کاربرد مدل بهینه‌ساز در تلفیق با مدل شبیه‌ساز، راهکارهای بهینه‌تری را در این دو رویکرد حاصل نموده است. لذا در تقویت سامانه حساسیتی نسبت به فرض دوره بازگشت‌های مختلف مشاهده نشده است.

بررسی نتایج جدول 3 نشان دهنده حساسیت زیاد به وجود تونل‌های کمکی ارتباط دهنده قسمت شرقی شبکه مطالعه شده به پایین‌دست، شامل تونل‌های T11 تا T13 می‌باشد. این امر ناشی از حجم سیلاب زیاد در این قسمت و عدم کفایت ظرفیت ارتباط موجود برای انتقال آن به پایین‌دست در بارش‌های حدی است. همچنین با توجه به

شکل 5-ب بیانگر آن است که در دوره بازگشت 10 ساله نزدیک‌ترین جواب به سطح هزینه‌ای منتخب (خط قائم شکل 5-ب) فاصله نسبتاً زیادی با این هزینه داشته است؛ لذا در شکل 6 نیز با انتقال نزدیک‌ترین راهکار به لحاظ هزینه به فضای محاسباتی غیرقطعی، سیلاب این دوره بازگشت با دیگر دوره بازگشت‌های مورد بررسی متفاوت بوده و به سطح عملکردی متناظر خود در رویکرد غیرقطعی نزدیک‌تر است. همچنین سایر دوره بازگشت‌های (25، 50 و 100 ساله) در سطح هزینه‌کرد مشابه و با انتقال از فضای قطعی به غیرقطعی، سیلابی تقریباً یکسان با نتایج حاصل از رویکرد غیرقطعی می‌دهند. به صورتی که به ترتیب، تنها 5/4، 6/4 و 9/5 درصد افزایش مقادیر سیلاب نسبت به رویکرد غیر قطعی مشابه خود (راهکار 2 پارتوی غیرقطعی در شکل 6) قابل مشاهده بوده است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، با افزایش دوره بازگشت بارش‌ها مقادیر سیلاب در شبکه در فضای غیرقطعی نسبت به نتایج رویکرد غیرقطعی افزایش بیش‌تری داشته، اما این مقادیر در شبکه بزرگ شرق تهران قابل ملاحظه نمی‌باشند. از طرف دیگر این تفاوت‌های اندک با توجه به عدم برابری دقیق سطح هزینه‌کرد در حالات منتخب، می‌تواند قابل انتظار نیز باشد. همچنین، تفاوت مشاهده شده در نتایج مشاور با جبهه پارتوی قطعی و غیرقطعی، به دلیل عدم بهینه بودن طرح مشاور است. بعبارت دیگر بکارگیری ابزار بهینه‌سازی در این تحقیق (هم در رویکرد قطعی و هم غیرقطعی) توانسته است جواب‌های بهتری نسبت به طرح مشاور ارائه دهد. بر اساس نتایج بدست آمده از رویکرد قطعی و غیرقطعی باید بیان نمود که با توجه به جانمایی گزینه‌های ممکن برای تقویت سامانه سیل‌برگردان شرق تهران که بر اساس مطالعات امکان-سنجی و شرایط موجود در این منطقه پیشنهاد شده، و نیز یکسان بودن نقاط خروج آب از شبکه در دوره بازگشت-های مختلف (سازمان مشاور فنی و مهندسی شهر تهران، 1390 د)، در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های ورودی سامانه در رویکرد غیرقطعی منجر به تفاوت چشم‌گیر نتایج نسبت به حالت قطعی نشده است. لذا شبکه مورد بررسی نسبت به دوره بازگشت طراحی حساسیتی نداشته و تنها مقادیر

کاربرد روش شبیه‌سازی مونت-کارلو) به منظور تقویت سامانه کنترل سیلاب حوضه سیل‌برگردان شرق تهران - که با کمبود ظرفیت جدی روبروست - توسعه داده شدند. نتایج بیانگر عملکرد مناسب طرح پیشنهادی مشاور برای کاهش قابل توجه سیلاب در رویکرد قطعی و نیز عملکرد مناسب مدل تلفیقی تحقیق حاضر در کاهش سیلاب شبکه با سطح هزینه‌کرد بهسازی مشابه با طرح مشاور (حدود 31/4 درصد) بوده است. همچنین بررسی‌ها بیانگر عدم حساسیت طرح‌های بهینه پیشنهادی، به دوره بازگشت طراحی منتخب در این شبکه می‌باشد. این امر ناشی از جانمایی ثابت و محدود گزینه‌های تقویت سامانه (که بر اساس مطالعات امکان‌سنجی صورت پذیرفته) و نیز یکسان بودن قابل توجه محل‌های خروج آب از شبکه در سیلاب‌های با دوره بازگشت مختلف می‌باشد. به عبارت دیگر، بارش‌های طراحی با دوره بازگشت بیش‌تر تنها منجر به تشدید مقادیر سیلاب مشاهده شده در بخش‌های ثابتی از شبکه شده و بزرگتر کردن ابعاد تجاری مقاطع (تا حد ممکن) و نیز ابعاد ممکن برای استخرهای تعدیل، تاثیری بر کاهش سیلاب آن نقاط خاص شبکه نداشته است. از برتری‌های رویکرد غیرقطعی به رویکرد قطعی نیز می‌توان به گستره وسیع‌تر پارتوی حاصل از رویکرد غیرقطعی اشاره نمود که ناشی از در نظر گرفتن بارش‌های مختلف طراحی می‌باشد. باید توجه نمود که زمان مورد نیاز برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی شبکه حوضه سیل‌برگردان شرق تهران در رویکرد غیرقطعی در حدود 55 برابر زمان مورد نیاز در رویکرد دیگر بوده است. همچنین در این تحقیق، نقاط دارای کمبود ظرفیت در رویکرد غیرقطعی شناسایی و معرفی شده‌اند.

6- فهرست علائم

A	سطح مقطع
C	تابع کاپولا
c	مشقت دوم تابع کاپولا
C_i	هزینه ساخت و نگهداری واحد طول تونل‌های تعدیل
C_j	هزینه ساخت و نگهداری واحد حجم مخازن تعدیل
$C_{ii}(V)$	تابع توزیع مشروط
$C_{alt, RP}$	ضریب معادله شدت-مدت-فراوانی

جواب‌های منتخب پارتو نهایی، در بهترین حالت کاهش سیلاب سامانه در رویکرد غیرقطعی، مقدار سیلاب در شبکه حدود 137000 مترمکعب خواهد شد؛ که با توجه به طرح‌بندی مفروض و نیز ابعاد لوله‌های موجود، حذف این مقدار سیلاب میسر نخواهد بود.

اما نتایج حاصل، امکان انتخاب سطح عملکردی قابل قبول با توجه به بودجه تخصیص یافته را به ازای بارش‌های شدید و غیرقطعی در این ناحیه، فراهم می‌آورد. از طرفی بررسی‌ها نشان می‌دهد بیش‌ترین مقدار خروج سیلاب از شبکه در بهترین حالت کاهش سیلاب به ازای رویکرد بهسازی غیرقطعی (طرح 1 از جدول 3) و تحت شدیدترین رخداد بارش مورد بررسی در 100 نمونه بارش مصنوعی، مربوط به تونل‌های بالادستی لشگرک، کاروان و ازگل به ترتیب در شرق، جنوب و شمال شرقی شبکه بوده است، که به منظور حذف کامل سیلاب نیازمند طرح‌های تقویت شبکه هستند. در نهایت در زمینه مقایسه نیاز محاسباتی دو رویکرد نیز باید بیان نمود، با استفاده از یک رایانه محاسبات سریع مجهز به دو پردازشگر $Intel^{\circledR}$ "Xeon $^{\circledR}$ CPU E5-2699 v4" زمان تکرار 50 نسل در رویکرد غیرقطعی تقریباً برابر با 276/233 ساعت بوده در حالی که این زمان برای تکرار 150 نسل در رویکرد قطعی تقریباً برابر با 15/010 ساعت می‌باشد. لذا به ازای تکرار برابر نسل‌ها برای هر دو رویکرد، نیاز محاسباتی رویکرد غیرقطعی تقریباً 55 برابر رویکرد قطعی خواهد بود.

مجدداً یادآور می‌شود که با توجه به اهداف مقایسه‌ای تحقیق حاضر، از داده‌های موجود در گزارشات طرح جامع آب‌های سطحی تهران مانند اعداد منحنی، ضرایب مربوط به سطوح نفوذپذیر و نیز سطوح نفوذناپذیر و ... برای 81 زیرحوضه مختلف حوضه سیل‌برگردان شرق تهران، استفاده شده است. به منظور ادامه تحقیق می‌توان در اختیار داشتن چندین رخداد هم‌زمان بارش و هیدروگراف جریان خروجی شبکه، اقدام به کالیبراسیون دقیق‌تر مدل عددی نیز نمود.

5- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر مدل‌های تلفیقی شبیه‌سازی و بهینه‌سازی با دو رویکرد بهسازی قطعی و غیرقطعی (با

جامعه مدیریت آب‌های سطحی تهران - گزارش هیدرولوژی و رسوب حوضه‌های درون شهری. جلد دوم، قسمت سوم. معاونت فنی و عمرانی شهرداری تهران، تهران.

سازمان مشاور فنی و مهندسی شهر تهران. (1390 ب). طرح جامع مدیریت آب‌های سطحی تهران - گزارش تحلیل هیدرولیکی و ارزیابی ظرفیت شبکه. جلد چهارم، قسمت دوم. معاونت فنی و عمرانی شهرداری تهران، تهران.

سازمان مشاور فنی و مهندسی شهر تهران. (1390 ج). طرح جامع مدیریت آب‌های سطحی تهران - گزارش تقویت شبکه اصلی و سایر گزینه‌ها. جلد ششم، قسمت اول. معاونت فنی و عمرانی شهرداری تهران، تهران.

سازمان مشاور فنی و مهندسی شهر تهران. (1390 د). طرح جامع مدیریت آب‌های سطحی تهران - خلاصه گزارش مطالعات. جلد یازدهم. معاونت فنی و عمرانی شهرداری تهران، تهران.

زحمتکش، ز. (1393). "الگوی ارزیابی سازگاری و برگشت‌پذیری در مدیریت سیلاب شهرهای ساحلی." رساله دکتری، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران.

کمیته ملی کاهش اثرات بلایای طبیعی. (1387). مدیریت سیلاب، الزامات و راهکارها. کارگروه تخصصی سیل و طغیان رودخانه.

یزدی، ج. (1389). "مدل شبیه‌سازی-بهبودسازی مدیریت سیل در رودخانه‌های کوهستانی." پیشنهاد رساله دکتری، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

Chaudhry, M. H. (2008). *Open-Channel Flow*, Springer, USA.

Delelegn, S.W., Pathirana, A., Gersonius, B., Adeogun, A. G., and Vairavamoorthy, K. (2011). "Multi-objective optimisation of cost-benefit of urban flood management using a 1D-2D coupled model." *Water Science and Technology*, 63(5), 1053-1059.

Duan, H.F., Li, F., and Tao, T. (2016). "Multi-objective optimal design of detention tanks in the urban stormwater drainage system: Uncertainty and sensitivity analysis." *Water Resources Management*, 30(7), 2213-2226.

Fu, G., and Butler, D. (2014). "Copula-based frequency analysis of overflow and flooding in urban drainage systems." *Journal of Hydrology*, 510, 49-58.

D	تداوم بارش
d	قطر تونل با مقطع دایره‌ای
F_X	تابع توزیع حاشیه‌ای متغیر اول بارش
$f_x(x)$	تابع چگالی احتمال متغیر x
g	شتاب گرانش زمین
G_Y	تابع توزیع حاشیه‌ای متغیر دوم متغیر بارش
$g_y(y)$	تابع چگالی احتمال متغیر y
H	تابع توزیع توأم متغیرهای بارش
h_b	ارتفاع تونل کمکی مستطیلی
h_s	عمق استخر تعدیل
i	شدت بارش
L	طول تونل‌های کمکی
m	تعداد استخرهای تعدیل
N	تعداد کل گره‌های شبکه
n	تعداد تونل‌های کمکی
Q	دبی جریان
S_0	شیب کانال
$S1$	استخر تعدیل شماره 1
S_f	شیب خط گرادیان انرژی
t	متغیر تصادفی یکنواخت
T	زمان
$T1$	تونل کمکی شماره 1
u	تابع توزیع حاشیه‌ای F_X
V	حجم مخزن تعدیل
v	تابع توزیع حاشیه‌ای G_Y
V_f	سیلاب در گره‌های شبکه
V_j	حجم j -امین مخزن تعدیل
v_{max}	حداکثر سرعت مجاز جریان
v_{st}	سرعت جریان
w	عرض کانال مستطیلی
x	متغیر اول بارش
x_{st}	راستای حرکت جریان
y	متغیر دوم بارش
y_{st}	راستای عمود بر حرکت جریان
X	مختصه اول متغیر تصادفی
Y	مختصه دوم متغیر تصادفی

7- منابع

سازمان مشاور فنی و مهندسی شهر تهران. (1390 الف). طرح

- (2015). "A framework for evaluating the persistence of urban drainage risk management systems." *Journal of Hydro-environment Research*, 8(4), 330-342.
- Vojinovic, Z., Sahlou, S., Torres, A.S., Seyoum, S.D., Anvarifar, F., Matungulu, H., Barreto, W., Savic, D., and Kapelan, Z. (2014). "Multi-objective rehabilitation of urban drainage systems under uncertainties." *Journal of Hydroinformatics*, 16(5), 1044.
- Yazdandoost, F., Tahmasebi Birgani, Y., and Moghadam, M. (2013). "Resilient risk management strategies in urban drainage systems." *Proc. of 35th IAHR World Congress*, Tsinghua University Press, Beijing, China.
- Yazdi, J., and Kim, J.H. (2015a). "Intelligent pump operation and river diversion systems for urban storm management." *Journal of Hydrologic Engineering*, 20(11), 04015031.
- Yazdi, J., Lee, E. H., and Kim, J. H. (2015b). "Stochastic multiobjective optimization model for urban drainage network rehabilitation." *Journal of Water Resources Planning and Management*, 141(8), 04014091.
- Yazdi, J., Sadollah, A., Lee, E.H., Yoo, D.G., and Kim, J.H. (2015). "Application of multi-objective evolutionary algorithms for the rehabilitation of storm sewer pipe networks." *Journal of Flood Risk Management*, 10(3), 326-338.
- Zhang, L., and Singh, V. P. (2007). "Bivariate rainfall frequency distributions using Archimedean copulas." *Journal of Hydrology*, 332(1-2), 93-109.
- Karamouz, M., and Nazif, S. (2013). "Reliability-based flood management in urban watersheds considering climate change impacts." *Journal of Water Resources Planning and Management*, 139(5), 520-533.
- Karamouz, M., Nazif, S., and Zahmatkesh, Z. (2013). "Self-organizing Gaussian-based downscaling of climate data for simulation of urban drainage systems." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139(2), 98-112.
- McCuen R.H. (1997). *Hydrologic Analysis and Design*, Prentice hall, USA.
- Nazif, S., Karamouz, M., and Zahmatkesh, Z. (2012). "Climate change impacts on runoff evaluation: A case study." *Proc. of World Environmental and Water Resources Congress*, Albuquerque, New Mexico, USA, ASCE, 3350-3360.
- Perez-Pedini, C., Limbrunner, J. F., and Vogel, R. M. (2005). "Optimal location of infiltration-based best management practices for storm water management." *Journal of Water Resources Planning and Management*, 131(6), 441-448.
- Sun, S.A., Djordjević, S., and Khu, S.T. (2011). "A general framework for flood risk-based storm sewer network design." *Urban Water Journal*, 8(1), 13-27.
- Tahmasebi Birgani, Y., and Yazdandoost, F. (2013). "Role of resilience in sustainable urban stormwater management." *Hydraulic Structures*, 1(1), 42-50.
- Tahmasebi Birgani, Y., and Yazdandoost, F.