

ارائه‌ی یک مدل تلفیقی شبیه‌سازی و بهینه‌سازی برای بهسازی شبکه‌ی کنترل سیلاب شهری (مطالعه موردی: حوضه‌ی سیل برگردان شرق تهران)

سعید محمدیون (دانشجوی دکتری)

دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس

جعفر یزدی (استادیار)

دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهیدبهشتی

سید علی اکبر صالحی نیشابوری* (استاد)

دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، پژوهشکده مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس

مهندسی عمران شریف، تابستان (۱۳۹۹)
دوری ۲-۳۶، شماره ۱/۲، ص. ۴۹-۶۰

امروزه، با توجه به افزایش دفعات رخداد سیلاب‌های شدید در مناطق شهری، طراحی و بهسازی سامانه‌های کنترل سیلاب شهری به یک موضوع بسیار حائز اهمیت تبدیل شده است. همچنین، با توجه به بهبود قابل ملاحظه‌ی روش‌ها و منابع محاسباتی، کاربرد مدل‌های تلفیقی شبیه‌سازی عددی و بهینه‌سازی در این زمینه بسیار مفید است. بدین منظور در تحقیق حاضر و با به‌کارگیری نرم‌افزار متلب یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه‌ی فرایتنکاری به یک شبیه‌ساز عددی متصل شده و قسمت شرقی سامانه‌ی کنترل سیلاب شهر تهران بهسازی شده است. به این منظور راهکارهای مختلفی شامل کاربرد تونل‌های کمکی و نیز کاربرد ترکیبی تونل‌های کمکی و استخرهای تعدیل برای کمیته‌سازی توابع هدف هزینه‌ی بهسازی و حجم سیلاب شبکه در نظر گرفته شده است. نتایج حاکی از کاهش چشم‌گیر هزینه‌ها با کاربرد این مدل تلفیقی در مقایسه با طرح‌های بهسازی پیشین است. همچنین با توجه به کاربرد استخرهای تعدیل در نقاط بالادستی شبکه، عملکرد تونل‌های کمکی در کاهش سیلاب بهتر بوده است اما استخرهای تعدیل منجر به کاهش چشم‌گیر هزینه‌های مربوط شده است.

واژگان کلیدی: سامانه‌ی کنترل سیلاب شهری، بهینه‌سازی، شبیه‌سازی عددی، تونل‌های کمکی، استخرهای تعدیل.

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر شدت و تواتر سیلاب‌های شهری، با توجه به رشد شهرنشینی و تغییرات اقلیمی، افزایش یافته است. این سیلاب‌ها منجر به شکل‌گیری مشکلات متعدد اقتصادی و اجتماعی شده است.^[۱] این عوامل در کنار اهمیت حفاظت از محیط‌زیست و حفظ منابع طبیعی منجر به توجه بیش از پیش به مقوله‌ی مدیریت آب‌های سطحی در دهه‌های اخیر شده است. همچنین با توجه به محدودیت منابع مالی، طراحی/بهسازی سامانه‌های کنترل سیلاب شهری به منظور کاهش خطرپذیری و هزینه‌های مربوط، بسیار مورد توجه قرار گرفته و در این زمینه تحقیقات متعددی به منظور تسهیل و بهبود روش‌های موجود صورت پذیرفته است.

ییزرس در سال ۲۰۰۹ یک مدل بهینه‌سازی به منظور کمیته‌کردن توابع هدف متضاد هزینه‌های ساخت‌وساز سامانه‌ی کنترل سیلاب شهری و نیز عملکرد مناسب

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۷/۴/۲۰، اصلاحیه ۱۳۹۷/۷/۱۴، پذیرش ۱۳۹۷/۸/۲۰.

DOI:10.24200/J30.2018.50734.2383

s.mohammadiun@modares.ac.ir
j.yazdi@sbu.ac.ir
salehi@modares.ac.ir

حوضه‌ی آبریز ارائه کرد.^[۲] ژانگ در همان سال، کاربرد روش‌های توسعه با اثرات محدود (LIDs)^۱ در این سامانه‌ها را به وسیله‌ی کاربرد الگوریتم بهینه‌سازی NSGA-II^۲ و مدل عددی EPA-SWMM^۳ بررسی کرد.^[۴]

دلیل‌جن و همکاران بیان کردند که روش‌های مختلفی برای بهبود عملکرد سامانه‌های موجود، از قبیل توسعه با اثرات محدود و کاربرد مخازن ذخیره در دسترس است.^[۵] کارآموز و همکاران و نظیف و همکاران در تحقیقاتی بیان کردند سامانه‌ی زهکش شهری به‌طور مستقیم تحت تأثیر تغییرات اقلیمی است و این سامانه باید قابلیت تطبیق با تغییرات اقلیمی آبی را دارا باشد. آن‌ها با ارائه‌ی یک شبکه عصبی مصنوعی به تخمین خصوصیات ماهیانه‌ی بارش پرداختند و با اعمال سری‌های زمانی بارش بر مدل EPA-SWMM به بررسی عملکرد قسمتی از سامانه‌ی زهکش شمال شرق تهران پرداختند.^[۶] کارآموز و نظیف در سال ۱، یک مدل بهینه‌سازی چندمعیاره را با در نظر گرفتن اثرات تغییر اقلیم به منظور انتخاب «بهترین اقدامات مدیریتی» (BMPs)^۴ ارائه دادند. به 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 پیش‌بینی شد و راهبردهای تطبیقی با استفاده از مدل بهینه‌سازی استخراج شد.^[۸] تحقیقات یزدان‌دوست و همکاران و نیز همسایبی بیرگانی و یزدان‌دوست، به منظور بررسی کمی و کیفی ارجحیت استفاده از طیفی از بهترین اقدامات مدیریتی با کاربرد MCDM^۵ (در قالب نرم‌افزار) Definite صورت پذیرفت.^[۹]

و جینویج و همکاران کمبود داده‌های کارا به منظور طراحی سامانه‌های کنترل سیلاب را مطرح کردند و با به‌کارگیری الگوریتم ژنتیک و یک رویکرد غیرقطعی به کمینه‌سازی توابع هدف هزینه و خسارت سیلاب مورد انتظار پرداختند.^[۱۱] یزدی و همکاران عملکرد سه الگوریتم تکاملی چندهدفه شامل NSGA-II، NSHS،^۶ و MOPSO^۷ را به صورت مدل‌های تلفیقی با نرم‌افزار SWMM به منظور ارائه‌ی طرح‌های بهینه‌ی بهسازی در شبکه‌های زهکش مدفون ارزیابی کردند.^[۱۲] محمدیون و همکاران با مقایسه‌ی اثرات دو رویکرد قطعی و غیرقطعی بر بهسازی سامانه‌ی کنترل سیلاب شرق تهران، بیان کردند که در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های شدت و تداوم بارش اثر مهمی بر طرح بهسازی این شبکه نداشته است. در تحقیق مذکور، آن‌ها فقط یک راهکار بهسازی شبکه را بررسی کردند.^[۱۳] محمدیون و همکاران در سال ۲۰۱۸ یک چارچوب طراحی و بهسازی مبتنی بر تاب‌آوری را در شبکه‌های کنترل سیلاب شهری ارائه کردند. در این رویکرد سامانه‌ی کنترل سیلاب شهری به گونه‌ی طراحی شده است که ظرفیت بازیابی سطح عملکردی مشخصی را در صورت رخداد خرابی‌های پیش‌بینی نشده داشته باشد.^[۱۴] قهرودی تالی به بررسی روش‌های کنترل سیلاب در نواحی شمال‌شرق تهران پرداخت و با توجه به دریافت رواناب‌های برون‌شهری و عدم انطباق شبکه‌ی کنترل سیلاب با زهکش طبیعی شهر، مهار سیلاب در نقاط بالادستی و یکپارچه‌سازی داده‌های شهری را برای کنترل سیلاب توصیه کرد.^[۱۵] همچنین وی با بررسی مسیله‌های مختلف شبکه‌ی کنترل سیلاب شهر تهران، مجموع ۱۳۰ کیلومتر از مسیله‌های قرار گرفته در حوضه‌ی سیل‌برگردان شرق تهران را دچار عدم انطباق با زهکش طبیعی این ناحیه معرفی کرد.^[۱۶] کاویان‌پور و همکاران به بررسی اثر کاربرد LID در کاهش حجم و بیشینه‌ی مقادیر سیلاب شهری در تهران پرداختند. بدین منظور در این تحقیق عکس‌های هوایی منطقه در طول یک بازه‌ی مشخص، برای تعیین تغییرات پارامترهای آب‌شناختی بررسی شد.^[۱۷] توفیقی و همکاران به روندیابی و کنترل سیلاب در حوضچه‌های تعدیل به کار گرفته شده در شمال شرق تهران پرداختند. آن‌ها کمبود ظرفیت این حوضچه‌ها را به منظور رسوب‌گیری و تعدیل سیلاب گزارش کردند.^[۱۸]

هدف اصلی تحقیق حاضر، ارائه‌ی یک مدل تلفیقی شبیه‌سازی و بهینه‌سازی چندهدفه به منظور بهسازی سامانه‌های کنترل سیلاب شهری در راهبردهای گوناگون، تحت قیود مختلف است. بدین منظور نرم‌افزار EPA-SWMM و روش NSDE^۸ به ترتیب برای روندیابی جریان در شبکه و نیز بهینه‌سازی راهکارهای مختلف بهسازی شبکه مورد استفاده قرار گرفته است. در این راستا، حوضه‌ی سیل‌برگردان شرق تهران که دچار کمبود قابل توجه ظرفیت عبوردهی جریان است.^[۱۹] به عنوان یک نمونه‌ی مطالعاتی دشوار انتخاب شده است. همچنین، ترکیبات مختلفی از کاربرد تونل‌های کمکی و / یا استخرهای تعدیل به منظور بهبود ظرفیت شبکه بررسی شده است. جواب‌های بهینه‌ی به دست آمده از کاربرد مدل تلفیقی مذکور، از منظر هزینه‌های ساخت و نیز حجم سیلاب شهری با پیشنهاد‌های مهندسان مشاور مربوط مقایسه شده و طرح‌های مختلفی برای بهبود آن پیشنهاد شده است.

۲. روش تحقیق

در تحقیق حاضر، یک چارچوب بهینه‌سازی چندهدفه به منظور کمینه‌سازی توابع هدف متضاد «حجم سیلاب شهری» و نیز «هزینه‌های بهسازی» ارائه شده است. به منظور انتخاب دوره‌ی بازگشت بارش طراحی در اغلب موارد محاسبات اقتصادی برای در نظر گرفتن نسبت سود به هزینه مورد توجه قرار می‌گیرد. اما عدم قطعیت‌های بالای این محاسبات در حوضه‌های شهری، منجر به تصمیم‌گیری بر اساس قضاوت مهندسی و منابع موجود نیز می‌شود. به منظور بهسازی و طراحی شبکه‌ی اصلی زهکش تهران، بارش با دوره‌ی بازگشت ۵۰ سال انتخاب شده و مورد تأیید تصمیم‌گیران قرار گرفته است.^[۱۹]

در تحقیق حاضر در ابتدا، یک مدل HEC-HMS که بر اساس اطلاعات موجود در شهر تهران ارائه شده بود، برای محاسبه‌ی رواناب سطحی متناظر با بارش طراحی منتخب، در هر یک از زیرحوضه‌های منطقه‌ی مطالعاتی استفاده شد. سپس سری‌های زمانی محاسبه شده در مرحله‌ی قبل به عنوان شرایط مرزی به مدل هیدرولیکی شبکه‌ی زهکش شهری معرفی شد. این مدل‌سازی هیدرولیکی در نرم‌افزار EPA-SWMM، که معمولاً در مدل‌سازی شبکه‌های زهکش شهری به کار می‌رود، انجام شد. در نهایت نیز این مدل هیدرولیکی، به منظور یافتن طرح‌های بهینه، به الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری NSDE^[۲۰] که در نرم‌افزار MATLAB کدنویسی شده بود، متصل شد.

۱.۲. محاسبه‌ی رواناب سطحی

با توجه به داده‌های در دسترس از مورد مطالعاتی منتخب، این قسمت از حوضه‌ی شهری به ۸۱ زیرحوضه تقسیم پذیر است. در قالب به‌کارگیری نرم‌افزار HEC-HMS، روش عدد منحنی ارائه شده توسط SCS^۹ و روش آب‌نگاشت واحد SCS به ترتیب به منظور تخمین افت‌ها و تبدیل بارش مازاد به رواناب سطحی استفاده شد. داده‌های ورودی نرم‌افزار شامل مساحت‌ها، افت‌های اولیه، اعداد منحنی، زمان‌های تأخیر و نیز گام‌های زمانی در هر ۸۱ زیرحوضه‌ی مذکور از مطالعات طرح جامع مدیریت آب‌های سطحی شهر تهران^[۲۱] استخراج شد. همچنین، بارش متناظر با هر زیرحوضه با به‌کارگیری معادله‌ی شدت - مدت - فراوانی شهر تهران، به دست آمد:^[۲۱]

$$i_r = C_{alt,RP} D^{-0.625} \quad (1)$$

در این رابطه i_r معرّف شدت بارش (mm/h)، D تداوم بارش (دقیقه) و $C_{alt,RP}$ ضریب معادله‌ی شدت - مدت - فراوانی شهر تهران برحسب دوره‌ی بازگشت طراحی و ارتفاع متوسط زیرحوضه است که از جداول مربوط در مرجع^[۲۱] به دست می‌آید. در ادامه نیز توزیع زمانی بارش با کاربرد روش بلوک‌های متناوب مدنظر قرار گرفت.^[۲۲] با توجه به مطالعات پیشین، تداوم بارش نیز برابر با ۶ ساعت فرض شد.^[۲۱]

۲.۲. روندیابی در شبکه‌ی زهکش

همان‌گونه که بیان شد، به منظور حل معادلات حاکم بر جریان در سامانه‌ی کنترل سیلاب شهری (معادلات سنت - ونانت مطابق روابط ۲ و ۳) از مدل عددی EPA-SWMM استفاده شده است. بدین منظور از روش عدد منحنی ارائه شده توسط اداره‌ی حفاظت از خاک (SCS-CN^{۱۰}) ایالات متحده برای محاسبه‌ی نفوذ، روش آب‌نگاشت واحد SCS برای تخمین آب‌نگاشت رواناب زیرحوضه‌ها و

جدول ۱. ابعاد و هزینه‌ی اجرا و نگهداری متر طول مقاطع تجاری. [۲۱]

ردیف	قطر لوله (متر)	هزینه (ریال/متر)	ابعاد مقطعی مستطیلی (متر)	هزینه (ریال/متر)	ردیف	قطر لوله (متر)	هزینه (ریال/متر)	ابعاد مقطعی مستطیلی (متر)	هزینه (ریال/متر)
۱	۰٫۳	۶۰۱۹۹۶۰	۰٫۷ × ۱٫۸	۴۱۵۷۹۹۸۰	۱۰	۲٫۲	۲۲۴۶۵۲۲۰	۰٫۷ × ۱٫۸	۲۹۰۴۷۲۰۰
۲	۰٫۶	۹۲۴۰۰۸۰	۰٫۹ × ۱٫۸	۴۵۶۲۸۱۲۰	۱۱	۲٫۵	۲۵۴۹۲۶۸۰	۰٫۹ × ۱٫۸	۳۲۹۶۱۵۸۰
۳	۱	۱۷۳۲۴۹۶۰	۱٫۸ × ۱٫۸	۴۷۳۵۴۴۰	۱۲	۲٫۶	۳۶۱۲۶۹۸۰	۱٫۸ × ۱٫۸	۴۶۷۱۱۵۰۰
۴	۱٫۲	۱۹۶۳۴۹۸۰	۲٫۵ × ۱٫۸	۵۶۵۹۴۹۲۰	۱۳	۳٫۲	۴۲۶۱۸۱۴۰	۲٫۵ × ۱٫۸	۵۵۱۰۴۱۸۰
۵	۱٫۴	۲۱۹۴۵۰۰۰	۳٫۰ × ۱٫۸	۶۰۰۶۰۱۴۰	۱۴	۳٫۴	۴۶۷۱۱۵۰۰	۳٫۰ × ۱٫۸	۶۰۳۹۶۸۲۰
۶	۱٫۵	۲۴۸۳۷۹۴۰	۰٫۷ × ۲٫۴	۶۱۲۱۴۹۶۰	۱۵	۳٫۵	۲۵۹۶۳۵۰۰	۰٫۷ × ۲٫۴	۳۱۳۸۹۱۴۰
۷	۱٫۶	۲۸۲۷۵۰۴۰	۰٫۹ × ۲٫۴	۶۲۳۷۰۱۶۰	۱۶	۳٫۶	۲۹۴۶۱۷۸۰	۰٫۹ × ۲٫۴	۳۵۶۱۸۹۲۰
۸	۱٫۸	۲۸۸۷۵۰۶۰	۲٫۵ × ۲٫۴	۷۱۶۰۹۸۶۰	۱۷	۴٫۲	۴۹۲۵۳۷۰۰	۲٫۵ × ۲٫۴	۵۰۴۷۷۶۸۰
۹	۲	۳۰۰۲۹۸۸۰	۳٫۰ × ۲٫۴	۹۳۵۵۴۸۶۰	۱۸	۵٫۶	۵۳۹۸۴۳۲۰	۳٫۰ × ۲٫۴	۸۰۰۳۱۴۲۰

از روش موج دینامیکی برای روندیابی جریان در کانال‌ها استفاده شده است. تحت قیود:

$$v_{st} \leq v_{max} \quad (۶)$$

$$d_i \in \{0, D_1, D_2, \dots, D_{18}\} \quad (۷)$$

$$w_i \in \{0, W_1, W_2, \dots, W_{18}\} \quad (۸)$$

$$h_{bi} \in \{0, H_{b1}, H_{b2}, \dots, H_{b18}\} \quad (۹)$$

$$A_i \in \{0, A_1, A_2, \dots, A_{18}\} \quad (۱۰)$$

$$h_{si} \in \{0, H_{s1}, H_{s2}, \dots, H_{s18}\} \quad (۱۱)$$

در این روابط Q آبدهی جریان، A سطح مقطع، g شتاب گرانش، S_0 شیب کانال، S_f شیب خط گرادیان انرژی x_{st} و راستای حرکت و راستای عمود بر حرکت جریان و T زمان هستند. [۲۲] واسنجی مدل تحقیق حاضر براساس داده‌های گزارش‌های طرح جامع مدیریت آب‌های سطحی شهر تهران و نیز مرجع [۲۴] صورت پذیرفته است؛ مدل آب‌شناختی قبلاً با استفاده از اطلاعات بارش ایستگاه‌های هواشناسی شهر تهران و آب‌نگاشت‌های ثبت شده در ایستگاه سنجش آب خروجی حوضه‌ی شرق تهران (ایستگاه بل سیمان) واسنجی شده است. [۲۴] نمونه‌ای از نتایج واسنجی مدل در پیوست مقاله‌ی حاضر ارائه شده است.

۳.۲. روش بهینه‌سازی

به‌منظور بهینه‌سازی توابع هدف مسئله‌ی حاضر تحت قیود خاص (روابط ۴ تا ۱۲)، از الگوریتم تکاملی NSDE استفاده شده است. NSDE یک الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری چندهدفه است که با توجه به کاربرد عملگرهای مناسب‌تر به لحاظ یافتن بهینه‌های سراسری و هم‌چنین روند هم‌گرایی بهتر، یک نسخه‌ی بهبودیافته از الگوریتم ژنتیک برای کاربرد در سامانه‌های کنترل سیلاب شهری است. [۲۵] برخلاف الگوریتم ژنتیک، DE عموماً از عملگر جهش مختص خود به جای عملگر رابج ترکیب استفاده می‌کند. این الگوریتم در مطالعات پیشین، از جنبه‌ی سرعت هم‌گرایی و یافتن پاسخ‌های بهینه‌ی سراسری، یک مدل بهینه‌سازی مناسب برای به‌کارگیری در سامانه‌های زهکش شهری معرفی شده است. [۲۵]

که در اینجا، C_i (ریال/هزینه‌ی ساخت و نگهداری واحد طول تونل‌های تعدیل بر اساس جدول ۱ است. L (متر) و n طول و تعداد تونل‌های کمکی، C_j (ریال/هزینه‌ی ساخت و نگهداری واحد حجم مخزن تعدیل است که از رابطه‌ی (۱۲) به‌دست می‌آید، V_j (م^۳) حجم زمین مخزن تعدیل، m تعداد مخازن و V_j (م^۳) سیلاب در گره‌های شبکه هستند. N تعداد کل گره‌های شبکه‌ی تولید شده است. این مقادیر با مدل‌سازی هیدرولیکی شبکه‌ی کنترل سیلاب مطالعاتی در نرم‌افزار SWMM به‌دست می‌آید. هم‌چنین پارامترهای v_{st} ، d ، w ، h_b ، A ، h_s به ترتیب معرف سرعت جریان در کانال‌ها، بیشینه‌ی سرعت مجاز، قطر تونل‌های کمکی با مقطع دایره‌ی، عرض و ارتفاع تونل‌های کمکی با مقطع مستطیلی، مساحت مقاطع استخرهای تعدیل و عمق این استخرها هستند. در این‌جا، تونل‌های کمکی می‌توانند ۱۸ مقدار ارائه شده در جدول ۱ یا مقدار صفر، در حالت عدم کاربرد تونل کمکی، به خود اختصاص دهند. به‌طریق مشابه استخرهای تعدیل نیز می‌توانند از عمق ۱٫۵ متر تا ۸٫۴ متر و مساحت ۳۰۰۰ مترمربع تا ۱۰۹۰۰۰ مترمربع یا صفر در حالت عدم کاربرد استخر تعدیل را اخذ کنند. حدود مجاز کاربرد عمق و مساحت استخرهای تعدیل با توجه به گزارش‌های امکان‌سنجی و بازدیدهای میدانی منطقه‌ی حوضه‌ی سیل‌برگردان شرق تهران تعیین شده است. استخرهای در نظر گرفته شده از نوع نفوذناپذیرند.

$$C_j = 1,04 \times 3680 \times V^{-0,6} \quad (۱۲)$$

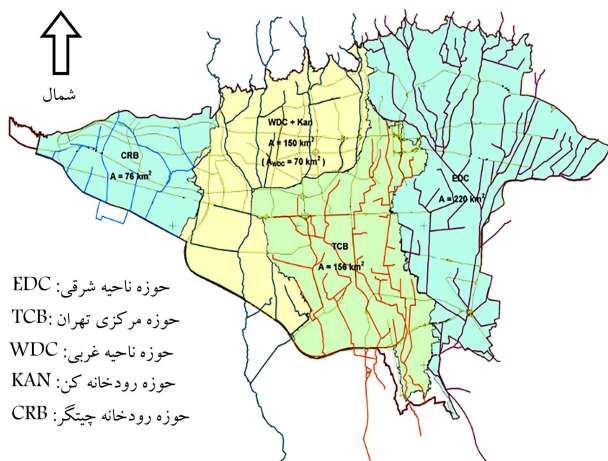
در رابطه‌ی ۱۲، V حجم مخزن تعدیل برحسب مترمکعب است و برای تخمین هزینه‌ی نگهداری استخر تعدیل، عمر مفید استخر تعدیل برابر با ۲۰ سال فرض شده است. [۲۶] پارامترهای مختلف الگوریتم بهینه‌سازی نیز مطابق جدول ۲ و با توجه

$$Min f_1 = \sum_{i=1}^n C_i \times L_i + \sum_{j=1}^m (C_j \times V_j) \quad (۴)$$

$$Min f_2 = \sum_{i=1}^N V_{f_i} \quad (۵)$$

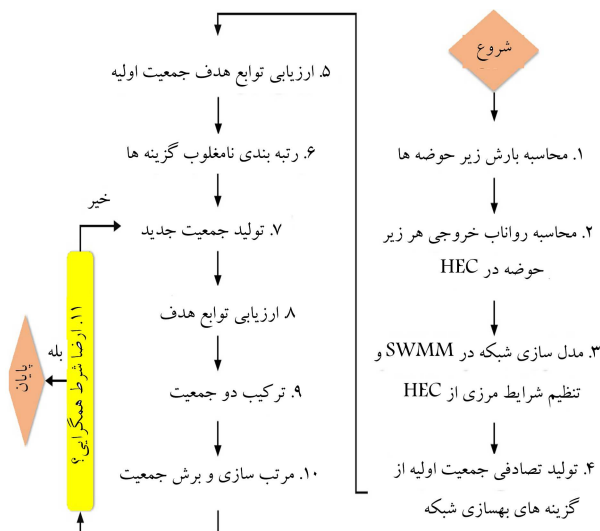
جدول ۲. تنظیمات پارامترهای بهینه‌ساز. [۲۰]

تعداد جمعیت	تعداد جمعیت جدید	جمعیت
۱۵۰	۱۵۰	معیار همگرایی
بیشینه‌ی تعداد تکرار	۱۵۰	عملگرها
احتمال ترکیب	۰٫۷	توابع هدف
تعداد توابع هدف	۲	عوامل موثر مقیاس
حد پایین	حد بالا	
۰٫۲	۰٫۸	



شکل ۲. سامانه‌ی کنترل سیلاب تهران.

- رتبه‌بندی اعضای جمعیت بر اساس توابع هدف محاسبه شده در مرحله‌ی قبل و قواعد رتبه‌بندی نامغلوب [۲۷] در مرحله‌ی ۶ از شکل ۱؛
- تولید یک جمعیت جدید با به‌کارگیری عملگرهای DE در مرحله‌ی ۷؛
- بررسی توابع هدف جمعیت جدید (مرحله‌ی ۸)؛
- ترکیب جمعیت‌های پیشین و جدید (مرحله‌ی ۹)؛
- رتبه‌بندی اعضای جمعیت بزرگ‌تر و به‌روزرسانی جمعیت بر اساس تعداد اعضای مجاز (مرحله‌ی ۱۰)؛
- تکرار مراحل مشخص شده در شکل ۱ به منظور رسیدن به تعداد تکرار از پیش تعیین شده.



شکل ۱. چارچوب کلی بهینه‌سازی و شبیه‌سازی تحقیق حاضر.

۳. نمونه‌ی مطالعاتی

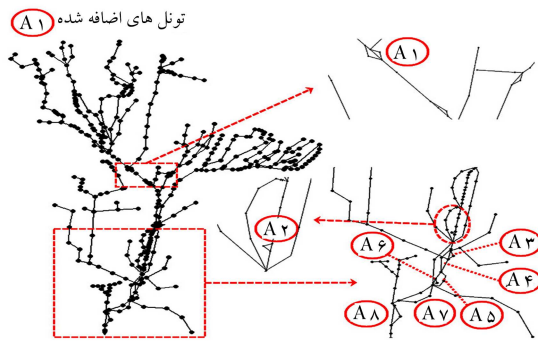
شهر تهران بزرگ‌ترین و پرجمعیت‌ترین شهر ایران و با جمعیت ساکن تقریبی ۸/۵ میلیون نفر از منظر شبکه‌ی کنترل سیلاب، دارای چهار حوضه‌ی سیل‌برگردان شرقی، سیل‌برگردان غربی، مرکزی و رودخانه چیتگر است که با توجه به نقشه‌ی منطقه و خروجی‌های مستقل آن‌ها امکان مدل‌سازی هیدرولیکی هر کدام به صورت مجزا وجود دارد. شکل ۲ نمایی از قسمت‌های مختلف سامانه‌ی کنترل سیلاب شهر تهران را نشان می‌دهد.

همان‌گونه که بیان شد، قسمت شرقی سامانه‌ی کنترل سیلاب شهر تهران یا همان حوضه‌ی سیل‌برگردان شرقی تهران، به‌عنوان نمونه‌ی مطالعاتی تحقیق حاضر انتخاب شده است. این منطقه با مساحت تقریبی ۲۲۵ کیلومتر مربع شامل ۲۰۵ کیلومتر شبکه‌ی زهکش اصلی است و بر طبق گزارش‌های طرح جامع مدیریت آب‌های سطحی شهر تهران، دچار بیشترین کمبود ظرفیت هیدرولیکی و بیرون‌زدگی آب از نقاط مختلف شبکه است. [۲۸] این حوضه شامل گستره‌ی وسیعی از انواع کانال‌های باز و بسته است. هم‌چنین بر اساس مطالعات پیشین صورت پذیرفته بر روی شبکه‌ی کنترل سیلاب شهر تهران توسط شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس [۲۶]، [۱۱] از راهکارهای مناسب برای بهبود کمبود ظرفیت هیدرولیکی شبکه، می‌توان به استفاده از تونل‌های کمکی که به تنهایی (از این پس در تحقیق حاضر «راهکار شماره ۱» نامیده می‌شود) و نیز کاربرد توأم تونل‌های کمکی و استخرهای تعدیل (از این پس در تحقیق حاضر «راهکار شماره ۲» نامیده می‌شود) اشاره کرد.

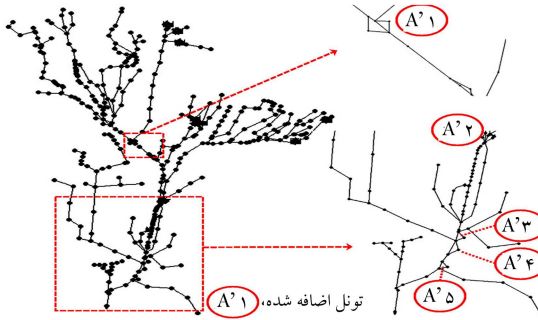
۴.۲. چارچوب تلفیقی

چارچوب بهینه‌سازی و شبیه‌سازی تلفیقی ارائه‌شده در تحقیق حاضر طبق شکل ۱ است. بر اساس این شکل، پس از مدل‌سازی مورد نیاز در نرم‌افزارهای HEC-HMS و EPA-SWMM (مراحل ۱ تا ۳)، مراحل زیر به‌منظور به‌دست آوردن طرح‌های بهینه (یا جبهه‌های پارتو) انجام می‌شود:

- تولید یک جمعیت تصادفی از طرح‌های ممکن شامل ترکیبی از تونل‌های کمکی و/یا استخرهای تعدیل با ابعاد مختلف (مرحله‌ی ۴ از شکل ۱)؛
- محاسبه‌ی هزینه‌های ساخت و نگهداری هر طرح و نیز مجموع سیلاب‌گره‌های شبکه با استفاده از رابطه‌ی ۴ و سپس مدل عددی (مرحله‌ی ۵)؛

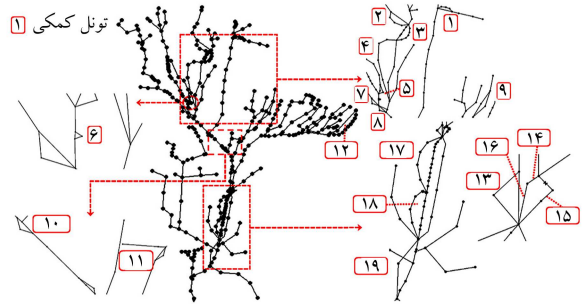


الف) راهکار شماره ۱ با تونل اضافی؛

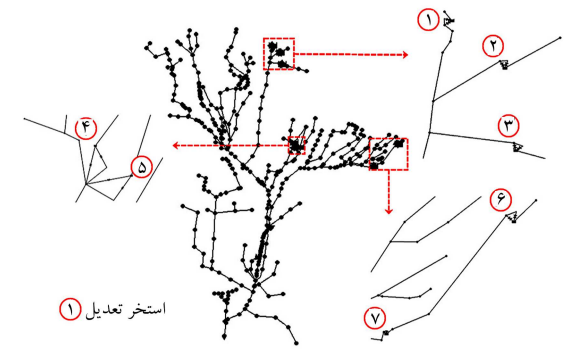


ب) راهکار شماره ۲ با تونل اضافی.

شکل ۴. مدل تغییر یافته‌ی سامانه‌ی کنترل سیلاب شرق تهران.



الف) کاربرد تونل کمکی (راهکار شماره ۱)؛



ب) کاربرد توأم تونل کمکی و استخر تعدیل (راهکار شماره ۲).

شکل ۳. مدل عددی سامانه‌ی کنترل سیلاب شرق تهران.

حاضر و مهندس مشاور که بدون کاربرد مدل بهینه‌سازی نیز بوده است، دور از انتظار نیست. این موارد می‌تواند منجر به اختلاف اندک مقادیر سیلاب به دست آمده از تحقیق حاضر و آنچه توسط مهندس مشاور گزارش شده است، بشود.

۴. نتایج

در ادامه نتایج حاصل از به کارگیری مدل تلفیقی توسعه داده شده بر روی راهکارهای شماره ۱ و ۲ نیز حالات تغییر یافته‌ی آن‌ها (با تونل‌های اضافی) ارائه و بررسی شده است. بدین منظور ترکیبات مختلف تونل‌های کمکی و/ یا استخرهای تعدیل در معرض فرایند بهینه‌سازی قرار گرفته‌اند تا جبهه‌های پارتو به منظور برقراری تعادل بین هزینه‌های بهسازی شبکه و سطح عملکردی مطلوب آن به دست آیند.

بررسی جبهه‌های پارتو تکرارهای منتخب برای تعیین روند همگرایی مدل ارائه شد نشان داد که از نسل ۱۵۰ام تا نسل ۱۵۰ام، تغییرات محسوسی بین نتایج نهایی حاصل نشده است. پس به ازای ۱۵۰ تکرار، جواب‌های قابل قبولی حاصل می‌شود. باید توجه داشت به ازای ۱۵۰ نسل، سرعت همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی به کار گرفته شده مناسب است و در زمان حدودی ۱۹ ساعت پاسخ‌های بهینه حاصل شده‌اند.

شکل ۵ جبهه‌های پارتو نهایی به دست آمده در فضای جست‌وجوی راهکار شماره ۱ و حالت تغییر یافته‌ی آن را نشان می‌دهد. با توجه به تضاد آشکار بین دو تابع هدف، مقادیر سیلاب مشاهده شده در شبکه به ازای افزایش هزینه‌ی بهسازی کاهش یافته است. با توجه به این شکل، به کارگیری راهکار شماره ۱ مشاور منجر به کاهش چشم‌گیر و حتی حذف سیلاب از شبکه شده است. با این حال مقایسه‌ی این طرح با طرحی متناظر از جبهه‌ی پارتو با مقادیر سیلاب مشابه، بیانگر کاهش

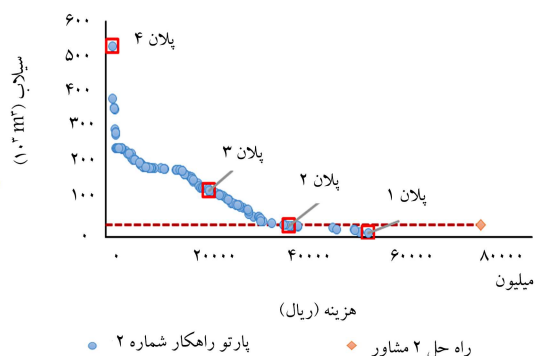
راهکار ۱ شامل احداث ۱۷/۵ کیلومتر تونل کمکی در نقاط دچار کمبود ظرفیت و راهکار ۲ شامل ساخت ۷/۵ کیلومتر تونل کمکی و ۷ استخر تعدیل (با حجم حدودی ۸۶۵۴۵۳ مترمکعب) در مکان‌های مناسبی است که براساس مطالعات امکان‌سنجی تعیین شده‌اند.

همان‌گونه که پیش‌تر بیان شد، در تحقیق حاضر از نرم‌افزار EPA-SWMM به منظور روندیابی سیلاب در شبکه استفاده شده است. بدین منظور مدل عددی سامانه‌ی مورد مطالعه براساس گزارش‌های موجود و بازدیدهای میدانی تولید شده است که نمایایی از شبکه‌ی موجود و طرح‌های بهسازی پیشنهادی مشاور در شکل ۳ نشان داده شده است.

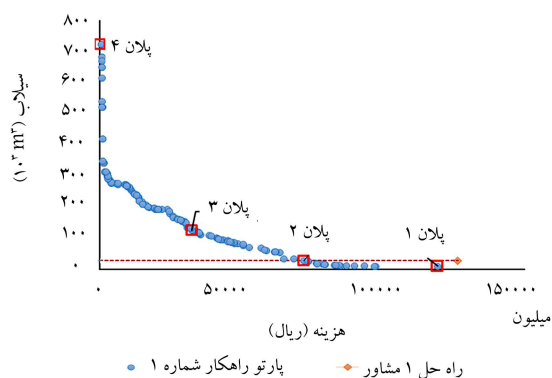
طبق شکل ۳ الف، در راهکار شماره ۱ تعداد ۱۹ تونل کمکی به منظور بهبود ظرفیت شبکه توسط مشاور پروژه پیشنهاد شده است. همچنین راهکار شماره ۲ (شکل ۳ ب) شامل ترکیبی از تونل‌های کمکی شماره ۲ تا ۸ به همراه تونل‌های ۱، ۱۴، ۱۵، ۱۶ و ۱۸ از شکل ۳ الف و نیز ۷ استخر تعدیل توزیع مکانی شده با حجم تقریبی ۸۶۵۴۵۳ مترمکعب است.

علاوه بر در نظر گرفتن تونل‌ها و استخرهای تعدیل مذکور، در تحقیق حاضر مجموع ۸ و ۵ تونل کمکی اضافی نیز به ترتیب برای راهکارهای شماره ۱ و ۲، به منظور فراهم‌سازی فضای جست‌وجوی بهتر استفاده و بررسی شده است (شکل ۴). مکان‌های پیشنهادی برای این موارد با توجه به نقاط خروجی سیلاب در مدل‌سازی‌های اولیه‌ی هیدرولیکی به ازای بارش‌های حدی تعیین شده است. این تونل‌ها غالباً در نواحی پایین‌دستی شبکه که دارای احتمال خروج حجم آب بیشتر است، در نظر گرفته شده است. در نهایت مدل تلفیقی ارائه شده در تحقیق حاضر، بر روی این چهار راهکار شرح داده شده به کار گرفته شده است.

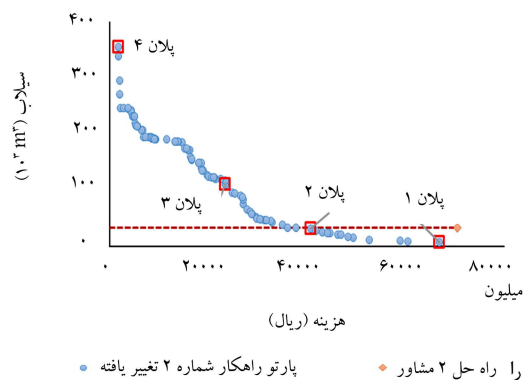
با توجه به عدم دسترسی به داده‌های با دقت بسیار بالا در مواردی همچون عارضه‌نگاری^{۱۲} و کاربری اراضی، تفاوت‌های جزئی بین نتایج مدل عددی تحقیق



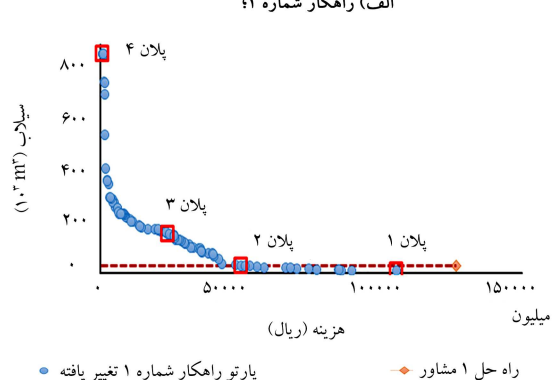
الف) راهکار شماره ۲



الف) راهکار شماره ۱



ب) راهکار شماره ۲ با تونل اضافی.



ب) راهکار شماره ۱ با تونل اضافی.

شکل ۶. جبهه‌های پارتو (کاربرد تونل کمکی و استخر تعدیل).

شکل ۵. جبهه‌های پارتو (کاربرد تونل کمکی).

در راهکار شماره ۱ (بدون تونل اضافی) شده است. با مقایسه نماهای شماره ۱ از جدول‌های ۳ و ۴، کاهش مقادیر سیلاب با به کارگیری تونل‌های اضافی نیز قابل مشاهده است. بنابراین، این تونل‌ها عملکرد مناسبی از خود نشان داده‌اند.

در به کارگیری این تونل‌های اضافی باید به محدودیت‌های اجرایی همچون قابلیت تملک اراضی و جنبه‌های مدیریتی نیز توجه داشت. همان‌گونه که بیان شد، راهکار شماره ۲ شامل به کارگیری توأم تونل‌های کمکی و استخرهای تعدیل است. مشابه راهکار قبل، جبهه‌های پارتوی مربوط به این راهکار و نیز حالت تغییر یافته‌ی آن (در نظر گرفتن تونل‌های اضافی) در شکل ۶ به نمایش در آمده است.

ابعاد تونل‌های کمکی و نیز عمق و حجم تقریبی استخرهای تعدیل برای طرح‌های بهینه‌ی منتخب که در شکل ۶ مشخص شده‌اند، در جدول‌های ۵ و ۶ به ترتیب برای راهکار شماره ۲ و نیز حالت تغییر یافته‌ی آن (با تونل اضافی) نشان داده شده است. نمای شماره ۱ از جدول ۵ که کمترین مقادیر سیلاب و بیشترین هزینه‌ی بهسازی را به خود اختصاص داده است، منجر به کاهش نسبی مقادیر سیلاب و نیز کاهش ۳۰ درصدی هزینه‌های بهسازی و نگهداری در مقایسه با راه‌حل مشابه پیشنهادی مشاور شده است. همچنین نمای شماره ۲ این جدول که مقادیر سیلاب قابل مقایسه با راه‌حل پیشنهادی مشاور در حالت کاربرد توأم تونل‌های کمکی و استخرهای تعدیل داشته است، منجر به کاهش بیش از ۵۰ درصدی هزینه‌ها در مقایسه با طرح مشاور شده است. مقایسه‌ی اخیر، عملکرد مناسب مدل تلفیقی ارائه شده در تحقیق حاضر را در بهبود شرایط عملکردی سامانه‌های کنترل سیلاب شهری، نشان می‌دهد.

قابل توجه هزینه‌های بهسازی شبکه به ازای به‌کارگیری مدل تلفیقی حاضر است. مشخصات چهار راهکار بهینه‌ی منتخب که با مربع‌های قرمز رنگ در شکل ۵ مشخص شده‌اند، در جدول‌های ۳ و ۴ به ترتیب برای راهکار شماره ۱ و نیز راهکار شماره ۱ با تونل‌های اضافی ارائه شده است.

طبق جدول ۳، با کاهش هزینه‌ی بهسازی از نمای منتخب شماره ۱ تا ۴، سیلاب مشاهده شده در شبکه افزایش یافته است. بنابراین، نمای شماره ۱ کم‌ترین مقدار سیلاب و بیشترین هزینه‌ی بهسازی را به خود اختصاص داده است. همچنین، نمای شماره ۲ که تقریباً سیلابی مشابه به راه‌حل ارائه شده توسط مشاور دارد، منجر به کاهش حدود ۴۰ درصدی هزینه‌ی بهسازی شبکه در مقایسه با طرح مشاور شده است. از سوی دیگر، بهترین طرح به لحاظ کاهش مقادیر سیلاب شبکه (نمای منتخب شماره ۱) نسبت به راه‌حل مشاور، باعث کاهش اندک سیلاب در شبکه شده است. براساس این دو مقایسه می‌توان گفت با اینکه راه حل ارائه شده توسط مهندس مشاور منجر به تقلیل قابل قبول مقادیر سیلاب شده است، این طرح نیازمند تخصیص هزینه‌های مازاد و غیر ضروری برای شبکه است.

بر اساس آنچه پیش‌تر بیان شد، به منظور بهبود راهکار شماره ۱، تونل‌هایی اضافی در مناطق مستعد شکل‌گیری سیلاب، در نظر گرفته شده است (تونل‌های A1 تا A4 در شکل ۴ الف و جدول ۴). همان‌گونه که در شکل ۴ الف و جدول ۴ مشاهده می‌شود، به کارگیری این تونل‌های اضافی می‌تواند باعث کاهش هر دو تابع هدف در سطوح عملکردی یا سطح هزینه‌ی یکسان شود. همچنین، نمای شماره ۲ در این حالت (جدول ۴) منجر به کاهش قابل ملاحظه هزینه‌ی بهسازی شبکه (حدود ۶۰ درصد) در مقایسه با حجم سیلاب مشابه

جدول ۳. جواب‌های بهینه منتخب از جبهه پارتوی راهکار شماره ۱.

شماره تونل		طول (متر)		متغیر تصمیم												
				شماره نما						شماره نما						
		۱			۲			۳			۴					
		هزینه (ریال ۱۰۷)			هزینه (ریال ۱۰۷)			هزینه (ریال ۱۰۷)			هزینه (ریال ۱۰۷)					
		سیلاب (لیتر ۱۰۶)			سیلاب (لیتر ۱۰۶)			سیلاب (لیتر ۱۰۶)			سیلاب (لیتر ۱۰۶)					
		۱۱۹۳۰۲			۷۲۳۵۸			۳۲۵۱۰			۱۲۵,۴۲۴					
		۱۰,۰۷۲			۲۷,۵۵۲			۲۷,۵۵۲			۶۳۵					
		(۱)D			(۲)H			(۳)W			W H D					
۱	۹۰۰	-	-	۲,۲	-	-	۱,۴	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۲	۱۹۰۰	-	-	۲,۵	-	-	۱,۶	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۳	۱۴۰۰	-	۲,۴	-	۲,۵	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۴	۴۹۰۰	-	۳,۵	-	۴,۵	-	۱,۸	۳,۰	-	-	-	-	-	-	-	-
۵	۷۹۰	-	۱,۸	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۶	۴۰	-	۳,۵	-	۴,۵	-	۲,۴	۲,۵	-	-	-	-	-	-	۰,۳	۰,۷
۷	۶۷۰	-	۵,۶	-	-	-	۰,۳	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۸	۱۰۰۰	-	۱,۲	-	-	-	۲,۲	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۹	۲۱۲۰	-	۲,۰	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۱۰	۴۲۰	-	۵,۶	-	-	-	۵,۶	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۱۱	۳۳۰	-	۱,۶	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۱۲	۲۱۰۰	-	۰,۶	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۱۳	۴۷۰	-	۲,۲	-	-	-	۰,۳	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۱۴	۲۰۰	-	۲,۶	-	-	-	۵,۶	-	-	-	-	-	-	-	۲,۰	-
۱۵	۲۰۰	-	۳,۵	-	۴,۵	-	۳,۵	۴,۵	-	-	-	-	-	-	۲,۴	۰,۷
۱۶	۳۰۰	-	۳,۵	-	۱,۸	-	۱,۸	۰,۷	۱,۸	-	-	-	-	-	-	-
۱۷	۲۳۰۰	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۱۸	۴۹۰۰	-	۳,۲	-	-	-	۲,۶	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۱۹	۲۵۰۰	-	۳,۵	-	۴,۵	-	۳,۵	۴,۵	-	-	-	-	-	-	۳,۰	-

۳. عرض تونل مستطیلی

۲. ارتفاع تونل مستطیلی

۱. قطر تونل دایره‌ای

بار دیگر به منظور بهبود عملکرد راهکار شماره ۲، تونل‌های کمکی اضافی نیز در نقاط پایین‌دستی شبکه در نظر گرفته شد. مطابق آنچه بیان شد، نتایج مربوط به این حالت در شکل ۶ و جدول ۶ ارائه شده‌اند. بدین منظور پس از در نظر گرفتن تونل‌های اضافی A1 تا A8 که در شکل ۴ ب به نمایش درآمده‌اند، مدل تلفیقی ارائه شده بر روی آن اجرا شد.

جزئیات نماهای منتخب از جبهه‌ی پارتوی نهایی این طرح در جدول ۵ ارائه شده است. در حالت در نظر گرفتن تونل‌های اضافی، بهترین راهکار به لحاظ کاهش سیلاب شبکه، سیلاب را از مقدار ۱۲۸۰ مترمکعب در طرح متناظر بدون در نظر گرفتن تونل‌های اضافی به ۸۱۷ مترمکعب رسانده است. هم‌چنین کاهش مقادیر سیلاب نسبت به راه‌حل پیشنهادی مشاور نیز مشخص است (شکل ۵). مشابه آنچه در راهکار شماره ۱ نیز مشاهده شد، کاهش ۴۰ درصدی هزینه‌ها،

در حجم سیلاب مشابه با راه‌حل ۲ مشاور (نمای ۲ از جدول ۶) به دست آمده است. به منظور مقایسه‌ی نمای‌های منتخب از راهکار شماره ۱ (جدول‌های ۳ تا ۶) و راهکار شماره ۲ (جدول‌های ۳ تا ۶)، بهترین موارد به لحاظ کاهش سیلاب (نماهای ۱) مقایسه شدند. سایر موارد نیز دارای رویه‌ی مشابهی هستند. نتایج بیانگر آن است که نمای در راهکار شماره ۱ منجر به بیش از ۲۰ درصد کاهش حجم سیلاب و ۵۹ درصد افزایش هزینه‌ها در مقایسه با نمای مشابه در راهکار شماره ۲ شده است. به بیان دیگر، عملکرد راهکار شماره ۱ در زمینه‌ی کاهش سیلاب (تابع هدف بیان شده با رابطه‌ی (۵)) بهتر از راهکار شماره ۲ بوده است. عملکرد ضعیف‌تر راهکار شماره ۲ در زمینه‌ی کاهش مقادیر سیلاب را می‌توان در کاربرد استخرهای تعدیل در نواحی بالادستی شبکه جست‌وجو کرد. به نظر می‌رسد

جدول ۴. جواب‌های بهینه منتخب از جبهه پارتو راهکار شماره ۱ با تونل اضافی.

متغیر تصمیم		شماره نما											
		۴			۳			۲			۱		
شماره تونل	طول (متر)	هزینه (۱۰۷ ریال)			هزینه (۱۰۷ ریال)			هزینه (۱۰۷ ریال)			هزینه (۱۰۷ ریال)		
		W	H	D	W	H	D	W	H	D	W	H	D
۱	۹۰۰	-	-	-	-	-	-	-	-	۲٫۲	-	-	۲٫۲
۲	۱۹۰۰	-	-	-	-	-	۱٫۴	-	-	۱٫۴	-	-	۱٫۸
۳	۱۴۰۰	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۱٫۸	۱٫۸	-
۴	۴۹۰۰	-	-	-	۰٫۹	۱٫۸	-	۱٫۸	۱٫۸	-	۲٫۵	۲٫۴	-
۵	۷۹۰	-	-	-	-	-	-	-	-	۱٫۸	-	-	۱٫۲
۶	۴۰	-	-	-	-	-	-	۴٫۵	۳٫۵	-	۱٫۸	۳٫۵	-
۷	۶۷۰	-	-	-	-	-	-	-	-	۵٫۶	-	-	۵٫۶
۸	۱۰۰۰	-	-	-	-	-	-	-	-	۲٫۲	-	-	۱٫۶
۹	۲۱۲۰	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۱٫۰
۱۰	۴۲۰	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۵٫۶
۱۱	۳۳۰	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۱۲	۲۱۰۰	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۰٫۳
۱۳	۴۷۰	-	-	-	-	-	-	-	-	۱٫۲	-	-	۴٫۲
۱۴	۲۰۰	-	-	۱٫۸	-	-	۲٫۵	-	-	۳٫۲	-	-	۳٫۴
۱۵	۲۰۰	-	-	-	۲٫۵	۲٫۴	-	۴٫۵	۳٫۵	-	۴٫۵	۳٫۵	-
۱۶	۳۰۰	-	-	-	۱٫۸	۳٫۵	-	۱٫۸	۳٫۵	-	۴٫۵	۳٫۵	-
۱۷	۲۳۰۰	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۱۸	۱۹۰۰	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۲٫۵
۱۹	۲۵۰۰	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۲٫۵	۱٫۸	-
A۱	۳۰۰	-	-	-	-	-	۱٫۰	-	-	۳٫۲	-	-	۵٫۶
A۲	۱۷۰	-	-	-	-	-	۰٫۶	-	-	۴٫۲	-	-	۵٫۶
A۳	۵۲۵	-	-	-	-	-	۳٫۴	-	-	۵٫۶	-	-	۵٫۶
A۴	۱۶۷	-	-	-	-	-	-	-	-	۰٫۳	-	-	۰٫۶
A۵	۱۴۳۳	-	-	-	-	-	-	-	-	۰٫۳	-	-	۲٫۰
A۶	۸۲۰	-	-	-	-	-	-	-	-	۳٫۶	-	-	۳٫۲
A۷	۱۶۰۳	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۱٫۶
A۸	۱۰۸۰	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۰٫۳

۵. نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر یک مدل تلفیقی شبیه‌سازی و بهینه‌سازی ارائه و عملکرد آن بر روی قسمت شرقی سامانه‌ی کنترل سیلاب شهر تهران بررسی شد. بدین منظور ۴ راهبرد بهسازی شبکه شامل طرح‌های مختلفی از به‌کارگیری تونل‌های کمکی و / یا استخرهای تعدیل مورد توجه قرار گرفت. بررسی نتایج بیانگر این موضوع بوده است

به‌کارگیری این استخرها در نقاط پایین‌دست شبکه که دارای حجم بیشتری از سیلاب هستند، مفیدتر باشد. با این حال به‌منظور به‌کارگیری این مخازن باید امکان تملک اراضی مربوط را نیز در نظر گرفت. با وجود این، با توجه به کاهش قابل ملاحظه‌ی طول مورد نیاز برای احداث تونل‌های کمکی با به‌کارگیری این مخازن، هزینه‌های به‌سازی و نگهداری شبکه در راهکار شماره ۲ نسبت به راهکار شماره ۱، کاهش چشم‌گیری داشته است.

جدول ۵. جواب‌های بهینه منتخب از جبهه پارتوی راهکار شماره ۲.

متغیر تصمیم		شماره نما									شماره استخر تعدیل	شماره تونل		
۴			۳			۲			۱					
سیلاب	هزینه	سیلاب	هزینه	سیلاب	هزینه	سیلاب	هزینه	سیلاب	هزینه	سیلاب	هزینه			
(۱۰۶ لیتر)	(۱۰۷ ریال)	(۱۰۶ لیتر)	(۱۰۷ ریال)	(۱۰۶ لیتر)	(۱۰۷ ریال)	(۱۰۶ لیتر)	(۱۰۷ ریال)	(۱۰۶ لیتر)	(۱۰۷ ریال)	(۱۰۶ لیتر)	(۱۰۷ ریال)			
۵۳۰,۳۶۹	۱۲۲۵	۱۲۹,۸۲۳	۱۹۴۷۷	۳۲,۹۸۹	۳۴۴۳۳	۱۲,۸۷۸	۴۹۳۲۸							
W/V	H	D	W/V	H	D	W/V	H	D	(^۱)H	(^۲)V/W	D			
-	-	-	۲۰۸۰۹۸	۶,۰	-	۱۶۶۴۷۹	۴,۰	-	۳۳۲۹۵۷	۸,۰	-	۱	-	
۸۶۰	۲,۶	-	۲۶۸۷۹	۴,۸	-	۲۱۵۰۳	۱,۶	-	۲۸۶۷۱	۲,۶	-	۲	-	
۴۱۲۸۸	۴,۵	-	۶۶۰۶۰	۳,۰	-	۱۳۲۱۲۰	۶,۰	-	۶۶۰۶۰	۳,۰	-	۳	-	
-	-	-	۱۰۶۵۶	۳,۰	-	۲۸۴۱۶	۳,۰	-	۳۳۳۰۰	۵,۶	-	۴	-	
۳۰۰۴۷	۳,۰	-	۲۵۰۳۹	۱,۵	-	۳۰۰۴۷	۰,۳	-	۷۵۱۱۸	۴,۵	-	۵	-	
-	-	-	۳۴۸۲۹	۲,۶	-	۷۲۵۶۰	۱,۶	-	۶۵۳۰۴	۴,۸	-	۶	-	
۱۳۴۸۷۲	۳,۴	-	۵۰۵۷۷۱	۶,۳	-	۸۰۹۲۳۴	۸,۴	-	۸۰۹۲۳۴	۸,۴	-	۷	-	
-	-	-	-	-	-	-	-	۱,۴	-	-	۱,۶	-	۲	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	۱,۸	۱,۸	-	-	۳	-
-	-	-	۰,۹	۱,۸	-	۲,۵	۱,۸	-	۳,۰	۱,۸	-	-	۴	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۵	-
۱,۸	۱,۸	-	-	-	-	۴,۵	۳,۵	-	۳,۰	۳,۰	-	-	۶	-
-	-	-	-	-	-	-	-	۵,۶	-	-	۵,۶	-	۷	-
-	-	-	-	-	۲,۵	-	-	-	-	-	۱,۰	-	۸	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۰,۳	-	۱۰	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۳,۲	-	۱۴	-
-	-	-	۲,۵	۱,۸	-	-	-	-	۴,۵	۳,۵	-	-	۱۵	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	۳,۰	۳,۰	-	-	۱۶	-
-	-	-	-	-	۰,۳	-	-	-	-	-	-	-	۱۸	-

۱. ارتفاع تونل مستطیلی/استخر تعدیل ۲. حجم استخر تعدیل

منجر به کاهش ۶۰ درصدی هزینه‌ها نسبت به راه‌حل مهندس مشاور شده است. به طور خلاصه، نتایج نشان‌دهنده‌ی عملکرد مطلوب مدل تلفیقی ارائه شده در یافتن راه‌حل‌های بهینه، هم به لحاظ کاهش هزینه‌ها و هم به لحاظ سطح عملکردی مناسب برای بهسازی شبکه‌های بزرگ کنترل سیلاب شهری بوده است.

فهرست علائم

$A(m^2)$: سطح مقطع؛

$C_i(Rial)$: هزینه‌ی ساخت و نگهداری واحد طول تونل‌های تعدیل؛

$C_j(Rial)$: هزینه‌ی ساخت و نگهداری واحد حجم مخازن تعدیل؛

$C_{dt,RP}$: ضریب معادله‌ی شدت - مدت - فراوانی؛

D : تداوم بارش؛

که این مدل تلفیقی نه تنها منجر به بهبود عملکرد سامانه‌ی کنترل سیلاب شهری به لحاظ کاهش حجم سیلاب می‌شود، بلکه هزینه‌های بهسازی و نگهداری شبکه را نیز کاهش می‌دهد. همچنین، با اینکه به‌کارگیری مخازن تعدیل سیلاب در نقاط بالادستی شبکه منجر به کاهش قابل توجه هزینه‌های بهسازی در مقایسه با طرح استفاده از فقط تونل‌های کمکی شده است، اما بیشترین کاهش مقادیر سیلاب به ازای راهکار به‌کارگیری فقط تونل‌های کمکی به‌دست آمده است.

از سوی دیگر، تغییرات ایجاد شده در راهکارهای پیشنهادی (در نظر گرفتن تونل‌های اضافی) منجر به بهبود عملکرد این طرح‌ها هم به لحاظ کاهش مقادیر سیلاب و هم به لحاظ هزینه‌های ساخت و نگهداری شبکه شده است. به‌طوری که بهترین راهکار به لحاظ کاهش سیلاب منجر به کم شدن ۷۵ درصدی مقادیر سیلاب در نمای شماره ۱ از راهکار ۱ با تونل‌های اضافی، نسبت به راهکار پیشنهادی مشاور شده است. همچنین به لحاظ کاهش هزینه‌ها نیز راهکار با سطح عملکردی مشابه مشاور (نمای دوم از حالت تغییر یافته‌ی راهکار شماره ۱)،

جدول ۶. جواب‌های بهینه منتخب از جبهه پارتوی راهکار شماره ۲ با تونل اضافی.

متغیر تصمیم												شماره نما			شماره استخر تعدیل	شماره تونل
۴			۳			۲			۱							
سیلاب	هزینه	سیلاب	هزینه	سیلاب	هزینه	سیلاب	هزینه	سیلاب	هزینه	سیلاب	هزینه					
(لیتر ۱۰۶)	(ریال ۱۰۷)	(لیتر ۱۰۶)	(ریال ۱۰۷)	(لیتر ۱۰۶)	(ریال ۱۰۷)	(لیتر ۱۰۶)	(ریال ۱۰۷)	(لیتر ۱۰۶)	(ریال ۱۰۷)	(لیتر ۱۰۶)	(ریال ۱۰۷)					
۳۵۶,۱۴۱	۱۷۳۹	۱۱۱,۸۱۲	۲۳۴۴۵	۳۲,۴۳۹	۴۰۷۴۶	۸,۱۷۴	۶۶۸۰۰									
W/V	H	D	W/V	H	D	W/V	H	D	W/V	H	D					
۱۶۶۴۷۹	۴,۰	-	۸۳۲۳۹	۸,۰	-	۳۳۲۹۵۷	۸,۰	-	۳۳۲۹۵۷	۸,۰	-	۱	-			
۱۶۱۲۸	۴,۸	-	۴۳۰۰۷	۳,۲	-	۲۱۵۰۳	۶,۴	-	۸۶۰۱۴	۶,۴	-	۲	-			
۲۴۷۷۳	۴,۵	-	۴۱۲۸۸	۴,۵	-	۵۵۰۵۰	۳,۰	-	۱۳۲۱۲۰	۶,۰	-	۳	-			
۲۲۲۰۰	۱,۹	-	۲۶۶۴۰	۷,۴	-	۶۶۶۰۰	۵,۶	-	۱۳۳۲۰	۳,۷	-	۴	-			
-	-	-	۱۵۰۲۳۵	۴,۵	-	۸۰۱۲۶	۲,۴	-	۱۵۰۲۳۵	۴,۵	-	۵	-			
۲۵۲۸۸۶	۶,۳	-	۲۰۲۳۰۹	۸,۴	-	۲۵۲۸۸۶	۶,۳	-	۱۵۱۷۳۱	۶,۳	-	۷	-			
-	-	-	-	-	-	-	-	۱,۶	-	-	۲,۵	-	۲			
-	-	-	-	-	-	۰,۹	۱,۸	-	۳,۰	۱,۸	-	-	۳			
-	-	-	۱,۸	۱,۸	-	۲,۵	۱,۸	-	۳,۰	۳,۰	-	-	۴			
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۱,۲	-	۵			
۰,۹	۱,۷	-	۰,۷	۳,۵	-	۰,۹	۳,۰	-	۲,۵	۳,۰	-	-	۶			
-	-	-	-	-	-	-	-	۰,۳	-	-	۵,۶	-	۷			
-	-	-	-	-	۲,۰	-	-	۳,۵	-	-	۱,۵	-	۸			
-	-	-	-	-	۲,۵	-	-	۰,۶	-	-	۰,۶	-	۱۰			
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۲,۵	-	۱۴			
-	-	-	-	-	-	-	-	-	۳,۰	۲,۴	-	-	۱۵			
-	-	-	-	-	-	-	-	-	۱,۲	۳,۰	-	-	۱۶			
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	طول	۱۸			
-	-	-	-	-	-	-	-	۰,۶	-	-	-	۳۰۰m	A'۱			
-	-	-	-	-	۰,۳	-	-	-	-	-	۲,۰	۴۷۰m	A'۲			
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۰,۶	۵۲۵m	A'۳			
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۱,۶	۷۸۰m	A'۴			
-	-	-	-	-	-	-	-	۱,۵	-	-	۱,۸	۳۷۰m	A'۵			

- | | |
|--|--------------------------------------|
| S_1 : استخر تعدیل شماره ۱؛ | $d(m)$: قطر تونل با مقطع دایره‌یی؛ |
| S_f : شیب خط گرادیان انرژی؛ | $g(m/s^2)$: شتاب گرانش زمین؛ |
| $T(s)$: زمان؛ | $h_b(m)$: ارتفاع تونل کمکی مستطیلی؛ |
| T_1 : تونل کمکی شماره ۱؛ | $h_s(m)$: عمق استخر تعدیل؛ |
| $V(m^3)$: حجم مخزن تعدیل؛ | $i_r(mm/h)$: شدت بارش؛ |
| $V_f(m^3)$: سیلاب درگره‌های شبکه؛ | $L(m)$: طول تونل‌های کمکی؛ |
| $V_j(m^3)$: حجم زامین مخزن تعدیل؛ | m : تعداد استخرهای تعدیل؛ |
| $v_{max}(m/s)$: بیشینه‌ی سرعت مجاز جریان؛ | N : تعداد کل گره‌های شبکه؛ |
| $v_{st}(m/s)$: سرعت جریان؛ | n : تعداد تونل‌های کمکی؛ |
| $w(m)$: عرض کانال مستطیلی؛ | $Q(m^3/s)$: دبی جریان؛ |
| $x_{st}(m)$: راستای حرکت جریان؛ | S : شیب کانال؛ |
| $y_{st}(m)$: راستای عمود بر حرکت جریان. | |

پانوشته‌ها

1. low impact developments
2. Non-dominated sorting genetic algorithm
3. environmental protection agency-stormwater management model
4. best management practices
5. multi criteria decision making
6. Non-dominated sorting harmony search
7. multi-objective particle swarm optimization
8. Non-dominated sorting differential evolution
9. soil conservation service
10. soil conservation service-curve number
11. Mahab Ghodss Consulting Engineering (MGCE)
12. topography

منابع (References)

1. Duan, H.F., Li, F. and Tao, T. "Multi-objective optimal design of detention tanks in the urban stormwater drainage system: Uncertainty and sensitivity analysis", *Water Resources Management*, **30**(7), pp. 2213-2226 (2016).
2. Yazdi, J. and Kim, J.H. "Intelligent pump operation and river diversion systems for urban storm management", *Journal of Hydrologic Engineering*, **20**(11), pp.04015031-1 - 04015031-11 (2015).
3. Pineres, M.E.H. "A Multi-objective optimization framework to support integrated stormwater management", PhD Thesis, Faculty of Graduate Studies, The University of Guelph (2009).
4. Zhang, G. "Development of an multi-objective optimization framework for implementing low impact development scenarios in an urbanizing watershed", PhD Thesis, Department of Agricultural and Biological Engineering, The Pennsylvania State University, USA (2009).
5. Deleegn, S.W., Pathirana, A. and Gersonius, B. "Multi-objective optimisation of cost-benefit of urban flood management using a 1D-2D coupled model", *Water Science and Technology*, **63**(5), pp. 1053-1059 (2011).
6. Karamouz, M., Nazif, S. and Zahmatkesh, Z. "Self-organizing gaussian-based downscaling of climate data for simulation of urban drainage systems", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **139**(2), pp. 98-112 (2013).
7. Zahmatkesh, Z. Nazif, S., Karamouz, M. and "Climate change impacts on runoff evaluation: A case study", Proc. of World Environmental and Water Resources Congress, ASCE, 3350-3360 (2012).
8. Karamouz, M. and Nazif, S. "Reliability-based flood management in urban watersheds considering climate change impacts", *Journal of Water Resources Planning and Management*, **139**(5), pp. 520-533. (2013).
9. Yazdandoost, F., Tahmasebi Birgani, Y. and Moghadam, M. "Resilient risk management strategies in urban drainage Systems", Proc. of IAHR World Congress, Tsinghua University Press (2013).
10. Tahmasebi Birgani, Y. and Yazdandoost, F. "Role of resilience in sustainable urban stormwater management", *Hydraulic Structures*, **1**(1), pp. 42-50 (2013).
11. Vojinovic, Z., Sahlou, S. and Torres, A.S. "Multi-objective rehabilitation of urban drainage systems under uncertainties", *Journal of Hydroinformatics*, **16**(5), p. 1044. (2014).
12. Yazdi, J., Sadollah, A., Lee, E.H. and et al. "Application of multi-objective evolutionary algorithms for the rehabilitation of storm sewer pipe networks", *Journal of Flood Risk Management*, **10**(3), pp.326-338 (2017).
13. Mohammadiun, S., Yazdi, J. and Salehi Neyshabouri, S.A.A. "Comparison of deterministic and uncertain approaches in rehabilitation of eastern part of Tehran stormwater drainage system", *Journal of Hydraulics*, **12**(4), pp. 57-72 (2017).
14. Mohammadiun, S., Yazdi, J., Salehi Neyshabouri, S.A.A. "Development of a stochastic framework to design/rehabilitate urban stormwater drainage systems based on a resilient approach", *Urban Water Journal*, **15**(2), pp. 167-176 (2018).
15. Ghahroudi Tali, M. "Application of integrated urban inundation model in metropolises-case study: North-east of Tehran", *Geography (Regional Planning)*, **1**, pp. 167-178 (2009).
16. Ghahroudi Tali, M. "Spatial assessment of Tehran's floodway network", *Lar Physical Geography*, **13**(4), pp. 59-70 (2011).
17. Kavianpour, M.R., Moghimi, A. and Sharifi, S. "Evaluation of Low Impact Development in urban storm water reduction and Tehran stormwater drainage system", *1st National Conference on Urban Stormwater Management*, Tehran, Iran (2010).
18. Tofighi, M.A., Fazeli, M. and Motevalian, S.S. "Hydraulic assessment of stormwater storage units in north of Tehran", *2nd National Conference on Stormwater Management and Engineering, Emphasizing on Urban Floods*, Tehran, Iran (2014).
19. Tehran Engineering and Technical Consulting Organization Tehran Stormwater Management Master Plan, Volume 2: Basic Studies, Part 3: Urban Flood Hydrology & Sediment Load. Tehran Municipality, Tehran, Iran. (2011).
20. Yazdi, J., Yoo, D.G. and Kim, J.H. "Comparative study of multi-objective evolutionary algorithms for hydraulic rehabilitation of urban drainage networks", *Urban Water Journal*, **14**(5), pp. 1-10 (2016).
21. Tehran Engineering and Technical Consulting Organization Tehran Stormwater Management Master Plan, Volume 4: Existing Main Drainage Network, Part 2: Hydraulic Modeling & Capacity Assessment. Tehran Municipality, Tehran, Iran (2011).
22. McCuen R.H. Hydrologic Analysis and Design, Prentice hall, USA. (1997).
23. Chaudhry, M.H. Open-Channel Flow, Springer, USA. (2008).
24. Khazaie, P. "Optimal design of urban storage units considering rainfall uncertainties", M.Sc. Dissertation, Faculty of Civil, Water and Environmental Eng., Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. (2018).

25. Yazdi, J., Mohammadiun. S. and Sadiq, R. "Assessment of different MOEAs for rehabilitation evaluation of urban stormwater drainage systems – case study: Eastern catchment of Tehran", *Journal of Hydro-environment Research*, **21**, pp. 76-85 (2018).

26. Tehran Engineering and Technical Consulting Organization Tehran Stormwater Management Master Plan, Volume 6: Existing Drainage System Improvement, Part 1: Major Drainage Network Capacity Improvement & Ex-

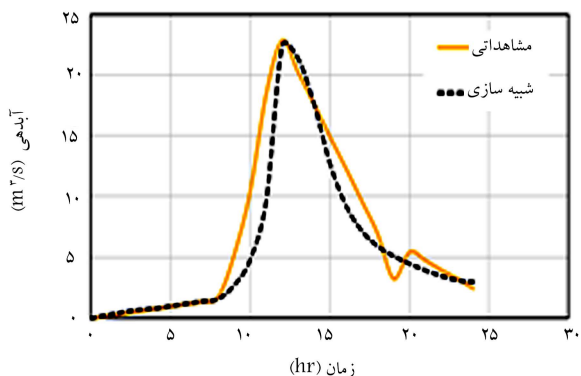
tension, and other Improvements. Tehran Municipality, Tehran, Iran (2011).

27. Deb, K., Pratap, A. and Agarwal, S. "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, **6**(2), pp. 182-197 (2002).

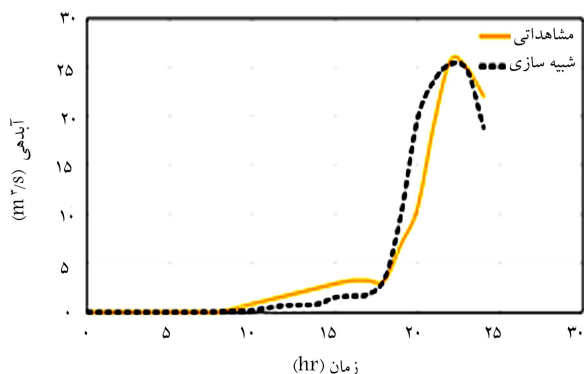
28. Tehran Engineering and Technical Consulting Organization Tehran Stormwater Management Master Plan, Volume 11: Summary Report. Tehran Municipality, Tehran, Iran (2011).

پیوست

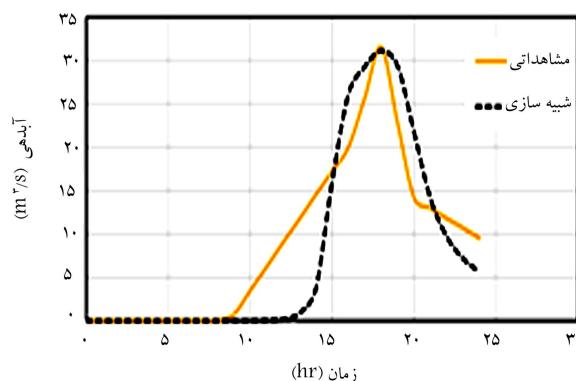
نمونه‌یی از نتایج از واسنجی مدل، به ازای سه رخداد بارش مختلف در این قسمت ارائه شده است. شکل‌های زیر آب‌نگاشت‌های شبیه‌سازی شده و نیز مشاهداتی در خروجی شبکه‌ی کنترل سیلاب شرق تهران را به ازای سه بارش مختلف نشان می‌دهند.



۲. آب‌نگاشت شبیه‌سازی و مشاهداتی برای رخداد ۹۰/۲/۱۹.



۳. آب‌نگاشت شبیه‌سازی و مشاهداتی برای رخداد ۸۸/۸/۲۷ آب‌نگاشت‌های سه رخداد بارش مختلف در خروجی حوضه [۲۴]



۱. آب‌نگاشت شبیه‌سازی و مشاهداتی برای رخداد ۸۹/۲/۱۲.