

ترکیب بهینه حجم و ظرفیت خروجی حوضچه تاخیری با استفاده از بهینه‌سازی ازدحام ذرات و مدل تحلیلی - احتمالاتی

میلاذ مرادی^۱، اکرم عباسپور^۲، سمیه عزیزی^۳، صابره دربندی^{۲*}

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۹/۰۴

تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۳/۰۵

۱-دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران

۲-دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: sdarbandi.tabrizu@yahoo.com

چکیده

حوضچه‌های تأخیری بهترین راهکارهای مدیریتی طراحی شده برای کنترل سیلاب شهری هستند و اهداف طراحی آن‌ها عمدتاً برای کنترل کمیت و کیفیت سیلاب به‌ازای هزینه کمینه می‌باشد. در این پژوهش، داده‌های طولانی‌مدت بارش ساعتی ایستگاه‌های سینوپتیک کرمان و مهرآباد مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و سه مشخصه بارش (مدت زمان بارش، حجم بارش و زمان بین دو رخداد بارش) تعیین شد. مدل‌های تحلیلی - احتمالاتی (APM) به‌کار گرفته شد و پارامترهای مدل با استفاده از نزدیک‌ترین ایستگاه باران‌سنجی به منطقه مورد مطالعه تخمین زده شدند. پارامترهای مدل تحلیلی - احتمالاتی، به‌همراه پارامتر حوضه آبخیز، به‌منظور ایجاد ترکیبی بهینه از حجم حوضچه و ظرفیت خروجی مورد استفاده قرار گرفتند. تابع هدف بصورت کمینه سازی هزینه‌ها با استفاده از مدل تحلیلی - احتمالاتی و بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) تعیین گردید. مقایسه بهینه‌سازی ازدحام ذرات با مدل تحلیلی - احتمالاتی نشان می‌دهد که نتایج PSO برای هزینه متغیرهای طراحی شده از دقت بالاتری برخوردار است و نیازی به اندازه ظرفیت خروجی حوضچه ندارد. همچنین نتایج نشان داد که مدل PSO، مدلی مقرون به صرفه و سریع برای اجرا خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی ازدحام ذرات، حوضچه تاخیری، حوضه آبخیز شهری، رواناب، مدل‌های تحلیلی احتمالاتی

Optimum Combination of Volume and Outlet Capacity of a Detention Pond using Particle Swarm Optimization and Analytical-Probabilistic Model

M Moradi¹, A Abbaspour², S Azizi², S Darbandi^{*2}

Received: November 24, 2016

Accepted: May 26, 2019

M. Sc. Student, Graduate of Water Resources Eng., Dept. of Water Engineering, Shahid Bahonar Univ., Kerman, Iran

Associ. Prof., Dept. of Water Eng., Faculty of Agric., University of Tabriz, Tabriz, Iran

M. Sc. Student, Hydraulic Structures, Dept. of Water Eng., Faculty of Agriculture, Univ. of Tabriz, Tabriz, Iran

*Corresponding Author, Email: sdarbandi.tabrizu@yahoo.com

Abstract

Detention ponds are best management practices designed for the control of urban stormwater and their design objectives are mainly controlling the quantity and quality of urban stormwater at the minimum cost. In this research, long term hourly rainfall data of Kerman and Mehrabad synoptic stations were analyzed and the three rainfall characteristics (rainfall duration, rainfall volume and inter event time duration) were obtained. Analytical probabilistic models (APM) were employed and the model parameters were derived from the closest stations to the study areas. The APM parameters, along with the catchment parameters, were used to develop the optimal combination of the pond volume and outlet capacity. Also, the PSO model led to lower computational costs in comparison with the APM model. Comparison of the PSO with APM showed that the PSO results were more accurate than the results of APM and there was no need for determination capacity in the forementioned model as it did not need outlet size. The PSO model was also found to be more computationally implemented more cheaper and faster.

Keywords: Analytical probabilistic models, Detention pond, Particle swarm optimization, Runoff, Urban watershed

مقدمه

را به پایین دست جریان رواناب منتقل می کنند. بر اثر فعالیت های شهری در سراسر حوضه، رواناب به پایین دست منتقل شده و تغییرات حاصل از هر دو مقدار کمیت و کیفیت در جریان پایین دست آشکارتر می شود (جنگ و همکاران ۲۰۰۵). حوضچه های تاخیری بهترین راه کار مدیریتی به منظور کنترل و تصفیه سیلاب شهری می باشند که یکی از اهداف ساخت آن ها، کنترل کمیت و کیفیت سیلاب شهری به منظور کمینه کردن هزینه، طراحی می باشد. علی رغم شهرت الگوریتم های تکاملی، تنها کاربردهای کمی از بهینه سازی ازدحام ذرات در علوم منابع آب گزارش شده است (نیکلو و همکاران ۲۰۱۰). این الگوریتم ها به دلیل پتانسیل بالا در حل مسائل بهینه سازی غیرخطی، غیرمحدب و گسسته برای فنون جستجوی قطعی در مواجه با مسائل بسیار

چرخه آب طبیعی با تغییر در پوشش طبیعی زمین دچار بی نظمی می شود. توسعه شهرنشینی؛ افزایش سطح نفوذناپذیر، کاهش نفوذپذیری و در نهایت افزایش رواناب را به همراه خواهد داشت. در این حالت، بارشی که برای نفوذ به زمین مورد استفاده قرار می گرفت به صورت رواناب در سطح زمین خودنمایی می کند (استگ ۲۰۱۰). بسته به میزان تغییرات سطح زمین، حجم رواناب نیز به طور چشم گیری تغییر می کند. این تغییرات موجب افزایش در حجم کل رواناب و سرعت بخشیدن به جریان رواناب در سطح زمین می گردد (مک کوین ۲۰۰۴). شهرنشینی نیز با افزایش غلظت آلاینده های حمل شده توسط سیلاب، بر کیفیت و کمیت رواناب تاثیر می گذارد. سطح پشت بام ها، جاده ها، پارکینگ ها، مناطق صنعتی و تجاری آلاینده های متفاوتی

رضایت‌بخش بودن نیاز پایین‌دست اجرا کردند. PSO را با روش مرسوم مقایسه کردند که نتایج حاکی از موفقیت الگوریتم در یافتن جواب‌های نزدیک به بهینه بود. شاهپور و همکاران (۲۰۱۱) سیلاب شهری شهر بمبئی را در یک حوضچه تأخیری و با استفاده از روش‌های تلفیقی سنجش از راه دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی مورد مطالعه انجام دادند. آن‌ها توانستند به‌وسیله رخداد سیلاب، مکان و اندازه‌های ممکن حوضچه تأخیری را شبیه‌سازی کنند و اثرات هر یک از آن‌ها را مورد تجزیه و تحلیل قرار دهند. موبلی و کالور (۲۰۱۴) با طراحی سازه‌های کنترل جریان خروجی از حوضچه تأخیری موفق شدند که علاوه بر شبیه‌سازی هیدرولوژیکی هیدروگراف جریان خروجی از حوضچه، تاثیر طراحی مدیریت سیلاب را بر محیط‌زیست نشان دهند. یو و همکاران (۲۰۱۵) به‌منظور کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و خسارت سیلاب و با به‌کارگیری الگوریتم ژنتیک و بارش طرح یک روزه با دوره‌های بازگشت مختلف به‌عنوان ورودی، موفق شدند تابعی بر اساس هزینه- سود- دوره بازگشت را برای حوضچه‌های تأخیری ارائه دهند. در پژوهش دیگری، ژائو و همکاران (۲۰۱۶) کنترل آلودگی پساب کشاورزی را با استفاده از حوضچه‌های تأخیری مورد بررسی قرار دادند. یافته‌های این محققین بیان می‌دارد که مواد جامد معلق، تاثیر قابل توجهی بر بار آلودگی جریان‌ات کشاورزی دارد. آن‌ها همچنین نشان دادند که حوضچه تأخیری می‌تواند با حذف ذرات معلق (در تمام اندازه‌ها) کیفیت آب را بهبود بخشند. اینگو و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از مدل SWMM و بهینه‌ساز تکاملی PSO نشان دادند که تحت شرایط بهینه، حوضچه تأخیری حجم سیلاب را در سطح حوضه ۷۹ درصد کاهش داده است. شکوهی و دانشور (۱۳۸۶)، تاثیر مخازن تأخیری قابل احداث در حوضه‌های آبریز شهری را در دو حالت بدون مخزن و با مخزن، بررسی کردند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که کنترل سیلاب حوضه آبریز در مقابل

محبوب هستند (جنونگ و همکاران ۲۰۰۹، نیکلو و همکاران ۲۰۱۰).
تانگ (۱۹۸۸)، رابطه خطر سیلابی شدن و هزینه آن را با استفاده از دو مدل بهینه‌سازی در حوضچه‌های تأخیری مطالعه و نتیجه دو منظوره بهینه‌سازی را با نمودارهای هزینه- خطر ارائه کرد. پاپا و همکاران (۱۹۹۹)، رابطه بین بهبود راندمان حذف آلاینده و کاهش حجم رواناب را با استفاده از مدل‌های احتمالاتی بررسی کردند. آن‌ها موفق شدند رفتار کنترل کیفیت حوضچه تأخیری را به‌منظور ایجاد حوضچه ذخیره با استفاده از روابط گرافیکی تعیین کنند. ناسیمنتو و همکاران (۱۹۹۹)، تجربه‌های عملیاتی حوضچه‌های تأخیری را به‌عنوان یک مساله چند هدفه مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با استفاده از اندازه حوضچه و خروجی آن توانستند تعداد سرریزهای سالانه رواناب را در حوضچه تعیین کنند. مدل‌های تحلیلی- احتمالاتی (APM^۱) توسط آدامز و پاپا (۲۰۰۰)، توسعه داده شد و تحت شرایط آب و هوای گرمسیری و برای ترکیب با شبیه‌سازی ازدحام ذرات (PSO^۲) تعمیم داده شد. لی و همکاران (۲۰۰۵)، یک استراتژی بهینه‌سازی را ارائه کردند که توانایی به‌دست آوردن مقرون به‌صرفه‌ترین استراتژی را برای کنترل جریان در شهرهایی با آب و هوای مرطوب را دارد. بهینه‌سازی ازدحام ذرات در ارزیابی یک مساله بهره‌برداری مخزن چهار هدفه با صرف‌نظر کردن از طبقات حرارتی مخزن و دو معیار، توسط بالتار و فونتان (۲۰۰۸) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج بهینه‌سازی ازدحام ذرات با توابع استاندارد مورد آزمون قرار گرفت که عملکرد قابل قبولی را از خود نشان داد. فلاح مهدی‌پور و همکاران (۲۰۰۹) PSO را در بهره‌برداری یک سیستم چند مخزنه با هدف بیشینه‌سازی قابلیت اعتماد، کمینه کردن آسیب‌پذیری و انعطاف‌پذیری سیستم مخازن به شرط

¹ Analytical probabilistic model

² Particle swarm optimization

آبریز شهری شهرک باهنر کرمان و شهرک غرب تهران می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد بررسی

برای انجام این پژوهش از دو حوضه آبریز شهری شهرک باهنر (بخشی از غرب شهر کرمان) و شهرک غرب (واقع در شمال تهران) استفاده شد. شهرک باهنر با مساحت ۲۵۳ هکتار در شمال غربی شهر کرمان و بین طول شرقی "۰'۱۰'۵۷" تا "۰'۳۰'۵۷" و عرض شمالی "۰'۰'۱۵" تا "۰'۱۷'۳۰" واقع شده است. شیب منطقه بسیار کم و برابر با ۲/۱۱ درصد است و ارتفاع متوسط حوضه از سطح آب‌های آزاد ۱۷۵۸ متر می‌باشد. شهرک غرب نیز با مساحت ۱۰۱۸ هکتار در قسمت شمالی شهر تهران و بین طول شرقی "۰'۳۰'۵۱" تا "۰'۴۵'۲۳" و عرض شمالی "۰'۰'۳۵" تا "۰'۰'۴۵" واقع شده است. شیب منطقه در حدود ۹/۹۲ درصد و ارتفاع متوسط حوضه از سطح آب‌های آزاد ۱۴۷۵ متر می‌باشد (شکل ۱).

برای انجام این پژوهش از داده‌های طولانی‌مدت بارش (۱۳۹۴-۱۳۶۰) ایستگاه سینوپتیک کرمان (برای شهرک باهنر) و ایستگاه سینوپتیک مهرآباد (برای شهرک غرب) در مقیاس زمانی ۶ ساعت، استفاده شده است.

برآورد ضریب رواناب و ذخیره چالابی برای

حوضه‌ها

ضریب رواناب (ϕ) برای هر حوضه آبریز با استفاده از روابط نسبت نفوذناپذیری حوضه (h) برآورد شده است (گاؤ و اوربوناس ۲۰۰۲):

$$\phi = 0.858h^3 - 0.78h^2 + 0.774h + 0.04 \quad [1]$$

ذخیره چالابی برای مناطق نفوذپذیر و نفوذناپذیر به صورت جداگانه و از طریق معادله ۲ برآورد شده است (باتلر و دیویس ۲۰۰۴):

$$S_{di} \text{ or } S_{dp} = \frac{k}{\sqrt{s}} \quad [2]$$

گزینه‌های کنترل سیل و عملیات مهندسی رودخانه به لحاظ اقتصادی از اولویت ویژه‌ای برخوردار است. احمدی شرف و تجریشی (۱۳۹۳) با استفاده از شبیه‌ساز SWMM^۱ و تصمیم‌گیری چند متغیره مکانی، جانمایی حوضچه‌های ذخیره را انجام دادند. خروجی کار آن‌ها نقشه‌ای بود که میزان تناسب هر نقطه از حوضه مورد مطالعه را برای احداث حوضچه‌های ذخیره نشان می‌داد. کرمی و همکاران (۱۳۹۴) مدیریت خطرپذیری سیلاب شهری را با هدف کاهش آبرفتگی در شهر گلستان بررسی کردند. مدل بهینه‌سازی چند هدفه با استفاده از الگوریتم ژنتیک چند هدفه توسعه یافته که با مدل شبیه‌سازی شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی توسط SWMM ترکیب می‌شود. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان می‌داد به کارگیری ترکیب بهینه هر دو رویکرد منجر به کاهش قابل ملاحظه و موثر خطرپذیری آبرفتگی می‌شود. قاسمی و فغور مغربی (۱۳۹۴)، با ارائه راهکارهای بهینه مدیریتی از حوضچه‌های تاخیری برای کنترل سیلاب استفاده کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که استفاده از حوضچه‌های تاخیری موجب کاهش آبدی اوج هیدروگراف، افزایش زمان رخداد اوج سیلاب و در نتیجه کنترل و مدیریت بهینه سیلاب می‌گردد. مرادی و همکاران (۱۳۹۷) چند روش توسعه مدل‌های تحلیلی-احتمالاتی را برای برآورد حجم رواناب ارزیابی نمودند و نشان دادند که مدل‌های تحلیلی می‌توانند با درجه پیچیدگی متفاوت براساس تبدیل‌های مختلف بارش-رواناب به دست آیند.

هدف از انجام این پژوهش، تحلیل و بررسی تاثیر ترکیب حجم حوضچه تاخیری و ظرفیت خروجی آن با استفاده از مقایسه بین دو مدل تحلیلی-احتمالاتی و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات به منظور کنترل کمی رواناب، کاهش دبی اوج و دستیابی به کمترین هزینه بهره‌برداری از این حوضچه‌ها در محدوده حوضه‌های

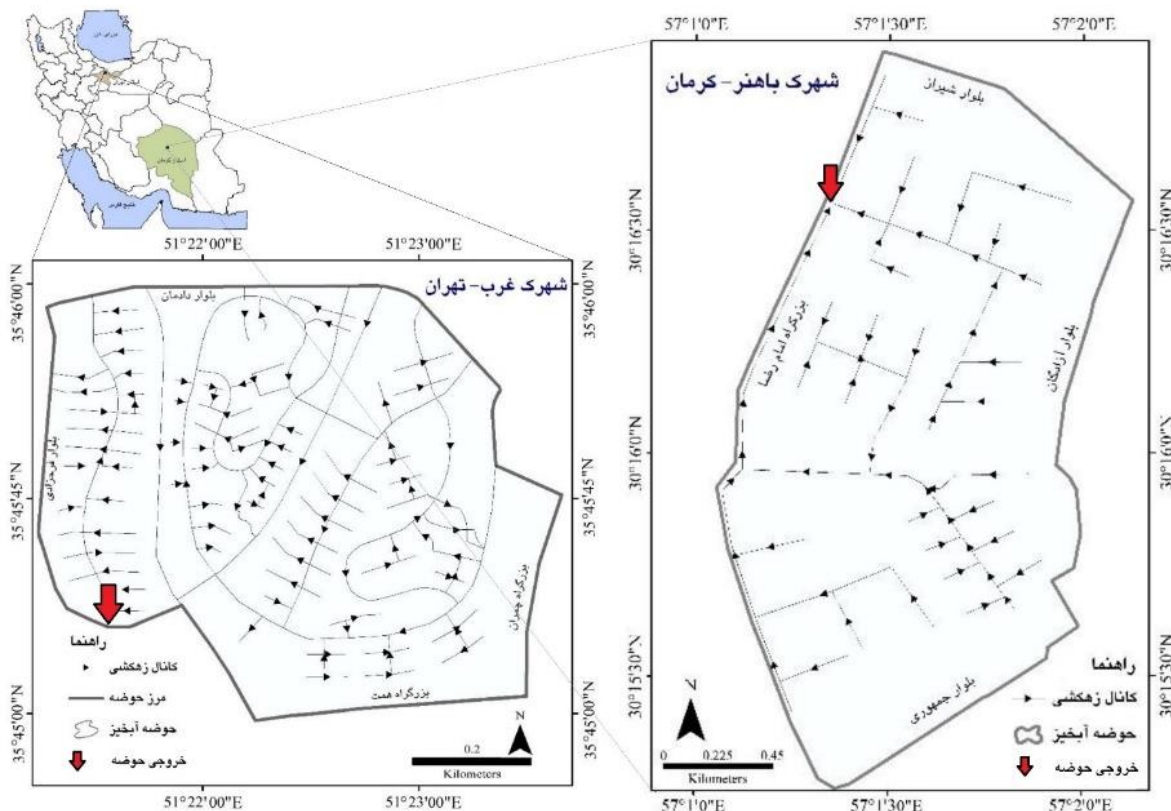
¹ Storm Water Management Model

$$S_d = hS_{di} + (1 - h)S_{dp} \quad [3]$$

در این جا h نسبت نفوذناپذیری حوضه، S_{dp} و S_{di} به ترتیب عمق‌های ذخیره چالابی مناطق نفوذناپذیر و نفوذپذیر هستند.

مشخصه‌های حوضه با استفاده از شیب، نفوذناپذیری و معادله‌های ۱، ۲ و ۳ تعیین شده است (جدول ۱).

در این جا k ضریبی است وابسته به نوع سطح (برای سطوح نفوذناپذیر برابر با ۰/۰۷ میلی‌متر و برای سطوح نفوذپذیر برابر با ۰/۲۸ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود) و s شیب زمین می‌باشد. مجموع ذخیره چالابی هر حوضه آبریز به صورت ذخیره چالابی وزنی مناطق نفوذناپذیر و نفوذپذیر به دست آمده است (باتلر و دیویس ۲۰۰۴) (معادله ۳):



شکل ۱- موقعیت حوضه‌های آبریز مورد مطالعه.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی حوضه‌های آبریز مورد مطالعه.

حوضه آبخیز	شیب	نسبت نفوذناپذیری	ذخیره چالابی منطقه نفوذناپذیر	ذخیره چالابی منطقه نفوذپذیر	ذخیره کل	ضریب رواناب
	s (%)	h (%)	S_{di} (mm)	S_{dp} (mm)	S_d (mm)	ϕ (-)
شهرک باهنر (کرمان)	۲/۱۱	۷۸	۰/۰۴۸	۰/۱۹۳	۰/۰۷۹	۰/۵۸
شهرک غرب (تهران)	۹/۹۲	۷۳	۰/۰۲۲	۰/۰۸۹	۰/۰۴۰۲	۰/۵۲

مدل‌های تحلیلی- احتمالاتی یک فرم برای تحلیل ارزیابی سیستم‌های خروجی استخراج شده از توزیع‌های احتمالاتی متغیرهای ورودی سیستم

توسعه پارامترهای مدل تحلیلی- احتمالاتی برای حوضه‌های مورد بررسی

میزان هر رخداد بارش و معکوس متوسط فاصله زمانی بین دو رخداد بارش در نظر گرفته شدند (آدامز و پاپا ۲۰۰۰).

در ساختار مدل تحلیلی- احتمالاتی پارامترهای ضریب رواناب (معادله ۴) و نفوذپذیری (معادله ۵) سطوح در نظر گرفته می‌شود. در این مدل سطح حوضه آبخیز شهری به سطوح نفوذپذیر و نفوذناپذیر تقسیم می‌گردد و رواناب با استفاده از معادله‌های ۴ و ۵ برآورد می‌گردد (چن و آدامز ۲۰۰۷):

$$v_r = \begin{cases} 0; \\ h(v - S_{di}); \\ [h + \phi_{dp}(1 - h)]v - hS_{di} - \phi_{dp}S_{dp}(1 - h); \end{cases}$$

$$v_r = \begin{cases} 0; \\ h(v - S_{di}); \\ v - hS_{di} - (1 - h)(S_{dp} + S_{iw}) - (1 - h)f_c/\lambda; \end{cases}$$

چون بارش اصلی‌ترین ورودی برای حوضچه می‌باشد، داده‌های طولانی‌مدت (۳۰ ساله) بارش ایستگاه سینوپتیک کرمان (نزدیک‌ترین ایستگاه به حوضه آبریز شهرک باهنر) و ایستگاه سینوپتیک مهرآباد (نزدیک‌ترین ایستگاه به حوضه آبریز شهرک غرب) در مقیاس زمانی ۶ ساعته مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. داده‌های بارش با در نظر گرفتن فاصله ۶ ساعته بین رخدادهای بارش به رویدادهای مجزا تقسیم‌بندی شدند (گائو و اوربوناس ۲۰۰۲). مشخصه‌های بارش هم‌چون عمق، مدت، شدت و مدت زمان بین دو رخداد در دوره آماری مورد مطالعه، تعیین شدند. برای مدل‌های تحلیلی- احتمالاتی، توزیع نمایی بسیار ضروری است (آدامز و پاپا ۲۰۰۰). آزمون‌های نکویی برازش کلموگروف- اسمیرنوف برازش مناسبی را در سطح احتمال ۹۵ درصد بر توزیع نمایی مشخصه‌های بارش را در هر دو ایستگاه تایید کرد (شکل ۲).

PSO یک الگوریتم بهینه‌سازی تصادفی بر اساس مدل‌های شبیه‌سازی گروهی است. این الگوریتم یک نمونه هوش گروهی توسعه یافته است که توسط کندی و ابرهارت (۱۹۹۵) برای شبیه‌سازی حرکت طراحی شده‌ای از دسته ماهی‌ها، دسته پرندگان و گله حیوانات

می‌باشد. در این روش، داده‌های پیوسته بارش با استفاده از حداقل فاصله زمانی بین رگبارها به رخدادهای مجزا تقسیم می‌شوند. توزیع احتمالاتی متغیرهای ورودی (عمق بارش، مدت زمان بارش و زمان بین دو رخداد) به توزیع احتمالاتی عملکرد خروجی با استفاده از تئوری احتمالاتی استخراج شده تبدیل می‌شوند (آدامز و پاپا ۲۰۰۰). پارامترهای مدل تحلیلی- احتمالاتی عبارتند از λ ، ζ و ψ که به ترتیب برابر با معکوس متوسط مدت زمان بارش، معکوس متوسط

$$v \leq S_{di} \quad [4]$$

$$S_{di} < v \leq S_{dp}$$

$$v > S_{dp}$$

$$v \leq S_{di} \quad [5]$$

$$S_{di} < v \leq S_{dp} + S_{iw} + f_c/\lambda$$

$$v > S_{dp} + S_{iw} + f_c/\lambda$$

که در این جا h نسبت سطح نفوذناپذیر حوضه آبخیز به کل مساحت حوضه (بر حسب درصد)، S_{di} ذخیره چالابی در مناطق نفوذناپذیر (بر حسب میلی‌متر)، v مقدار بارش (بر حسب میلی‌متر)، S_{dp} ذخیره چالابی در مناطق نفوذپذیر (بر حسب میلی‌متر)، ϕ_{dp} ضریب رواناب سطوح نفوذپذیر، f_c سرعت نفوذ نهایی در معادله هورتون (بر حسب میلی‌متر بر دقیقه)، پارامتر λ برابر است با معکوس میانگین مدت زمان رخداد بارش (بر حسب hr^{-1}) و S_{iw} هدر رفت (تلفات) ناشی از خیس شدگی اولیه خاک (بر حسب میلی‌متر) می‌باشد. در نتیجه تابع چگالی احتمال مقدار رواناب به صورت معادله ۶ بیان می‌گردد:

$$f_{v_r}(v_r) = \begin{cases} 1 - \exp(-\zeta S_{di}); & v_r = 0 \\ \zeta/h \exp[-\zeta(\frac{v_r}{h} + S_{di})]; & v_r \leq h(S_{dp} - S_{di}) \\ \zeta/\phi_h \exp[-\zeta(\frac{v_r}{h} + S_{di})]; & v_r > h(S_{dp} - S_{di}) \end{cases} \quad [6]$$

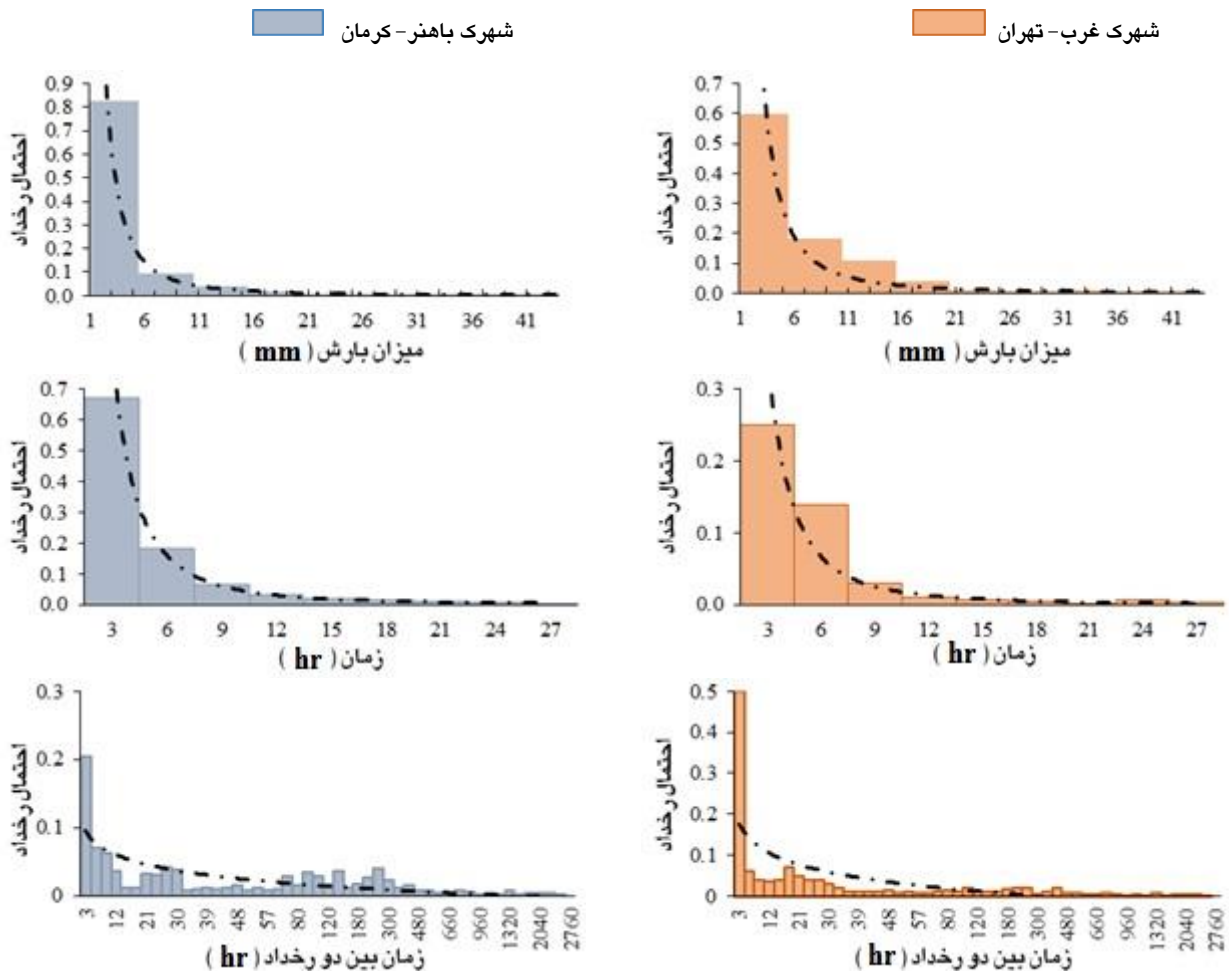
که در این رابطه ζ معکوس متوسط مقدار وقایع بارش (بر حسب mm^{-1})، ϕ_h ضریب رواناب وزنی سطوح نفوذناپذیر و سطوح نفوذپذیر است که به صورت معادله ۷ محاسبه می‌شود:

$$\phi_h = \frac{hS_{di} + \phi_{dp}S_{dp}(1 - h)}{h + \phi_{dp}(1 - h)} \quad [7]$$

می‌شود. حرکت گروهی ذرات شامل یک جزء تصادفی و یک جزء قطعی است. هر ذره به سمت بهترین موقعیت مکانی خود و همچنین بهترین موقعیت مکانی عمومی حرکت می‌کند، در حالی که در همان زمان میل به حرکت تصادفی نیز در رفتار آن‌ها دیده می‌شود (ساریابو و نیلاکانتان ۲۰۰۶). هنگامی که یک ذره i یک موقعیت بهتر از موقعیت قبلی خود بیابد، موقعیت فعلی را به عنوان بهترین موقعیت برای خود تعیین می‌کند. برای هر گروه ذرات به تعداد n ، بهترین موقعیت برای تمام n ذره در هر زمان (t) و هر تکرار تعیین می‌گردد. هدف از طرح‌واره ازدحام ذرات، یافتن بهترین موقعیت عمومی در بین تمام راه‌حل‌های رایج است به شرطی که هدف را بهبود بخشد و تکرارها نیز از تعداد معینی تجاوز نکند (پارسوپولوس و راهاتیس ۲۰۱۰).

برای یافتن منبع غذایی و دور ماندن از شکار شدن به وسیله شکارچیان به کار گرفته شد. الگوریتم از یک جمعیت جستجوی تصادفی در فضای جستجوی چند بعدی، استفاده می‌کند. اگر یک ذره بهترین موقعیت را بیابد، آن موقعیت را در حافظه خود حفظ می‌کند. این تجربه (یافتن بهترین موقعیت) به تمام جمعیت منتقل می‌شود، وزن‌ها به سمت امیدبخش‌ترین ناحیه‌ای که تا این مرحله تشخیص داده شده است حرکت می‌کنند. این برنامه ارتباطی توسط یک شبکه گروهی ثابت و یا تطبیقی تعیین شده است که نقش حیاتی بر مشخصه‌های همگرایی الگوریتم را ایفا می‌کند (پارسوپولوس و راهاتیس ۲۰۱۰).

جستجوی فضای ممکن یک تابع هدف در الگوریتم ازدحام ذرات با تنظیم کردن مسیرهای ذرات انجام



شکل ۲- برآزش تابع چگالی احتمال نمایی مشخصات بارش برای مناطق مورد بررسی.

• در گام نهایی، تابع هدف هر یک از ذرات طبق موقعیت جدید محاسبه می‌شود. در صورتی که شرط همگرایی ارضا نشده باشد بایستی دوباره سرعت و موقعیت ذره مورد برازش قرار گیرد، در غیر این صورت بهینه‌سازی پایان می‌یابد.

شبیه‌سازی PSO با واسنجی پارامترها برای تعیین مقداری بهینه که بتواند برای اجرای شبیه‌سازی استفاده شود، صورت پذیرفت. برای واسنجی، از متوسط سالانه تعداد سرریزهای برابر با دو استفاده شد. پارامترهای بهینه‌سازی ازدحام ذرات واسنجی شده برای اینرسی، فاکتور تصحیح و تعداد ازدحام به ترتیب برابر با ۰/۵۵، ۱/۵ و ۶۰ در نظر گرفته شده است. این مقادیر تضمینی برای شناسایی و بهره‌برداری از فضای جستجو می‌باشد (رائو ۲۰۰۹، پارسوپولوس و وراهاتیس ۲۰۱۰). در شکل ۳ فلوچارت الگوریتم PSO آورده شده است.

بهینه‌سازی حوضچه‌های تاخیری

حوضچه‌های تاخیری فرضی معمولاً در خروجی حوضه‌های آبریز در نظر گرفته می‌شوند و میانگین تعداد سرریز سالانه از حوضچه‌های تاخیری (n_s) با استفاده از معادله ۸ تعیین می‌گردد (آدامز و پاپا ۲۰۰۰).

$$n_s = \theta \left[\frac{\lambda/\Omega}{\lambda/\Omega + \zeta/\phi} \right] \left[\frac{(\psi/\Omega) + (\zeta/\phi) e^{-(\psi/\Omega + \zeta/\phi) S_A}}{(\psi/\Omega + \zeta/\phi)} \right] e^{-\zeta} \quad [12]$$

طراحی حجم ذخیره (S_A) وابسته به اندازه خروجی (Ω) و دیگر متغیرهای طراحی می‌باشد (آدامز و پاپا ۲۰۰۰).

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات شامل چهار گام اساسی است که به صورت زیر می‌باشد (رائو ۲۰۰۹):

• مقاردهی اولیه به موقعیت ازدحام و سرعت آن‌ها:

این مقاردهی ممکن است یک مقاردهی تصادفی یا گروهی باشد که بر روی شبکه فضای طراحی انجام می‌شود.

$$x_0^i = x_{min} + rand(x_{max} - x_{min}) \quad [8]$$

$$v_0^i = \frac{x_{min} + rand(x_{max} - x_{min})}{\Delta t} = \frac{position}{time} \quad [9]$$

در این جا x_0^i و v_0^i به ترتیب بردار موقعیت مکانی اولیه و سرعت اولیه می‌باشد. x_{min} و x_{max} نیز کمترین و بیشترین مقدار پارامتر x (موقعیت مکانی) است.

• ارزیابی موقعیت مکانی و کیفیت ازدحام. یک بردار مسافت ($v_{k+1}^i \Delta t$) به ازدحام افزوده می‌شود و موقعیت جدید ازدحام تعیین می‌شود.

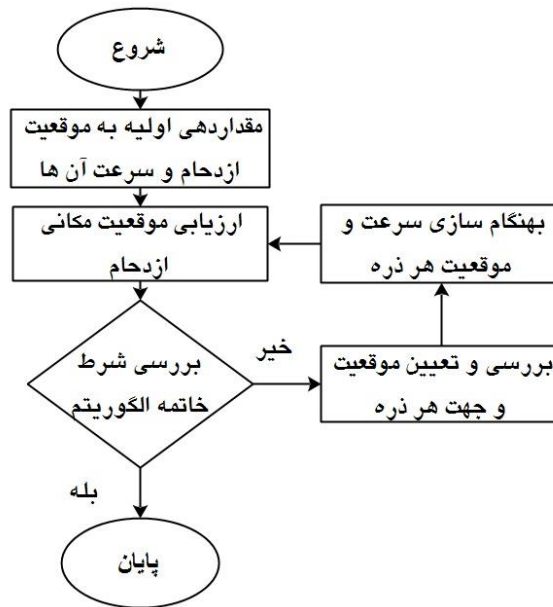
$$x_{k+1}^i = x_k^i + v_{k+1}^i \Delta t \quad [10]$$

• به هنگام سازی سرعت: سرعت ازدحام با در نظر گرفتن بهترین موقعیت قبلی (x_i^*) و همچنین بهترین موقعیت عمومی (g^*) آن‌ها به هنگام سازی می‌شود. برخی از اجزای تصادفی (rand)، اینرسی وزنی ذره (w) و فاکتورهای تصحیح نرخ یادگیری ذره و ازدحام (c_1 و c_2) در این نقطه به ازدحام افزوده می‌شوند.

$$v_{k+1}^i = wv_k^i + c_1 rand \frac{(x_i^* - x_k^i)}{\Delta t} + c_2 rand \frac{(g^* - x_k^i)}{\Delta t} \quad [11]$$

در این جا S_A پارامتر ذخیره حوضچه (میلی متر) و Ω نرخ رهاسازی (میلی متر بر ساعت) می‌باشد. متغیر

$$S_A = -\frac{\Omega \phi}{\psi \phi + \Omega \zeta} \ln \left\{ \frac{\phi}{\zeta} \left[\frac{n_s}{\theta} \left(1 + \frac{\Omega \zeta}{\lambda \phi} \right) \right] e^{\zeta S_A} \left(\frac{\psi}{\Omega} + \frac{\zeta}{\phi} \right) - \frac{\psi}{\Omega} \right\} \quad [13]$$



شکل ۳- فلوجارت الگوریتم PSO (رائو ۲۰۰۹).

به منظور ایجاد ترکیبی بهینه از ظرفیت ذخیره و نرخ خروجی از حوضچه، بهینه‌سازی اقتصادی انجام شد. تابع هزینه (TC) (شامل هزینه حوضچه و ظرفیت همگرایی در پایین‌دست) تابع هدفی برای کمینه‌سازی هزینه است. محدودیت (قید) این تابع هدف، کنترل رواناب در تعداد سالانه سرریزهای مجاز می‌باشد. نتایج بهینه‌سازی حوضچه تاخیری با استفاده از مدل تحلیلی- احتمالاتی

در شکل‌های ۴ و ۵ نتایج بهینه‌سازی با مدل تحلیلی- احتمالاتی ارائه شده است. مقادیر بهینه با استفاده از معادله‌های ۱۳ تا ۱۵ به دست آمد. لازم به ذکر است که در معادله ۱۳، مدل تحلیلی- احتمالاتی یک مجانب (مماس) برای ذخیره حوضچه- نرخ رهاسازی است و حل تحلیلی تنها در محدوده مقادیر خروجی انجام می‌شود و زمانی که خروجی از جریان کمینه کمتر باشد به صورت مماس در می‌آید (شکل‌های ۴ و ۵). علاوه بر این، مقادیر آستانه برای رهاسازی وابسته به میانگین تعداد سالانه سرریزها می‌باشد. مقدار آستانه برای تعداد سرریزهای ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ به ترتیب برابر با ۴/۱ میلی‌متر بر ساعت، ۲/۲ میلی‌متر بر ساعت، ۱/۹

هزینه کل ساخت حوضچه‌های تاخیری با استفاده از فرمول‌بندی آن‌ها توسعه داده شد. هزینه واحد حجم ذخیره هر حوضچه (P_s)، که تابعی از ارزش زمینی است که حوضچه بر روی آن احداث شده است، هزینه ساخت و ساز و بهره‌برداری و هزینه واحد ظرفیت خروجی و کانال پایین‌دست (P_Ω) برآورد گردید. به عنوان مثال، متوسط سالانه تعداد سرریزها می‌تواند برابر با یک مقدار مشخص وابسته به نیاز طراحی و مقررات کیفیت آب پایین‌دست تنظیم شود. در بهینه‌سازی، تعداد سرریزها در بازه بین ۲ تا ۱۰ محدود شده است (آدامز و پاپا ۲۰۰۰).

$$\text{Minimize } \{TC = P_s S_A + P_\Omega \Omega\} \quad [14]$$

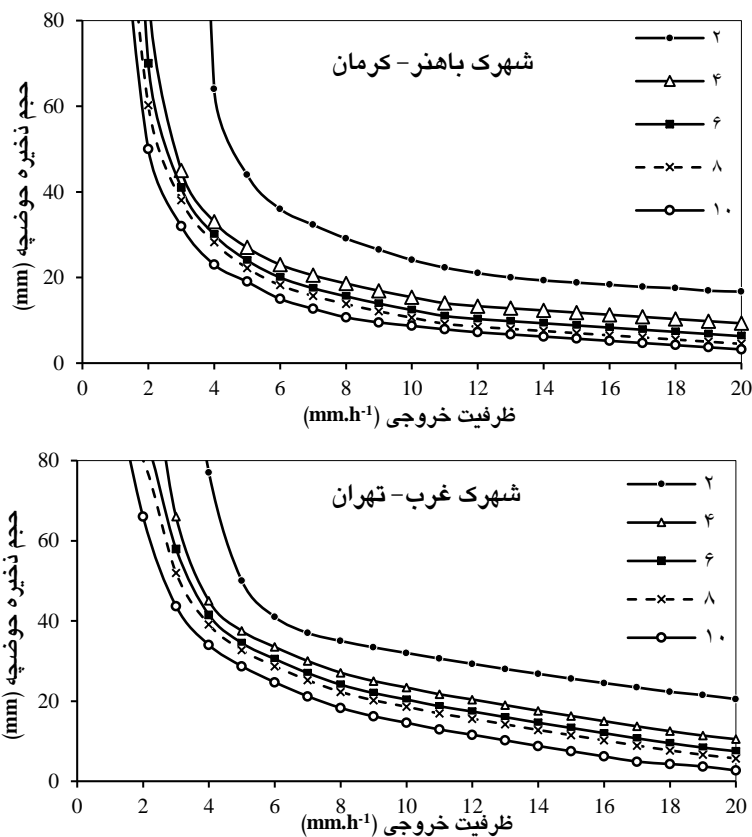
$$\text{st: } n_s = \theta \left[\frac{\lambda/\Omega}{\lambda/\Omega + \zeta/\phi} \right] \left[\frac{(\psi/\Omega) + (\zeta/\phi) e^{-(\psi/\Omega + \zeta/\phi) S_A}}{(\psi/\Omega + \zeta/\phi)} \right] e^{-\zeta S_A} \quad [15]$$

اطلاعات تقریبی درباره هزینه ساخت حوضچه‌ها از فهرست بهای واحد پایه رشته آبیاری و زهکشی استخراج گردید (بی‌نام ۱۳۹۵).

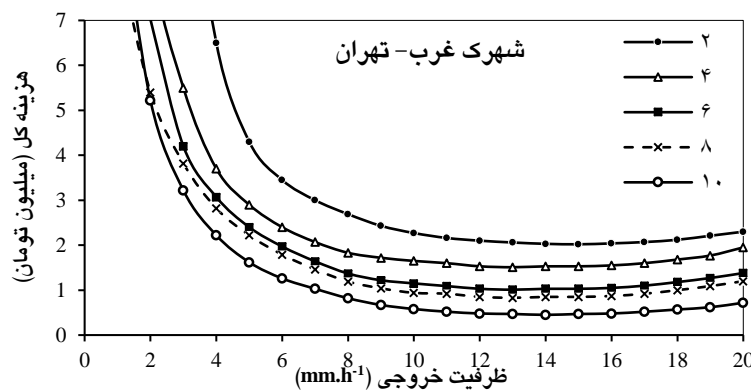
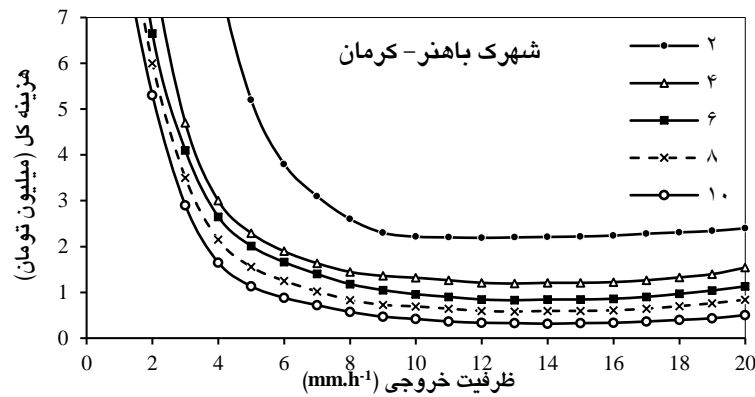
نتایج و بحث

میلی‌متر و میزان خروجی ۱۵ میلی‌متر بر ساعت بوده است. این هزینه، هزینه بهینه می‌باشد. زمانی که تعداد سرریز سالانه برابر با چهار باشد، حجم حوضچه ۱۳/۳۱ میلی‌متر اندازه بهینه برای هزینه کمینه ۱/۲۲ میلیون تومان می‌باشد. به‌طور مشابه، هنگامی که میانگین سالانه تعداد سرریزها به شش و هشت افزایش یابد، حجم‌های بهینه حوضچه برابر با ۱۱ میلی‌متر و ۱۰/۶ میلی‌متر بوده است که به‌ترتیب مربوط به هزینه کل ۰/۹۰ میلیون تومان و ۰/۶۹ میلیون تومان می‌باشد. در نهایت، اگر تعداد سالانه سرریزها به ۱۰ افزایش یابد، اندازه بهینه حوضچه ۸/۷ میلی‌متر بود و هزینه کمینه آن نیز ۰/۴۲ میلیون تومان می‌باشد (شکل ۵).

میلی‌متر بر ساعت، ۱/۶ میلی‌متر بر ساعت و ۱/۴ میلی‌متر بر ساعت می‌باشد. با توجه به میانگین سالانه تعداد سرریزها؛ چون اندازه خروجی افزایش می‌یابد، حجم ذخیره مورد نیاز حوضچه کاهش می‌یابد. همچنین، برای داشتن یک ظرفیت خروجی معین؛ حجم ذخیره حوضچه و هزینه کل با استفاده از افزایش میانگین سالانه تعداد سرریزها، کاهش داده شد (شکل ۵). اگر حجم ذخیره حوضچه کاهش یابد، به دلیل سرریزهای بیش‌تری که رخ خواهد داد، هزینه‌های وابسته به تدارکات حوضچه نیز کاهش می‌یابد. برای زمانی که تعداد سرریزهای سالانه برابر دو در نظر گرفته شده است، هزینه کمینه برابر با ۲/۲۲ میلیون تومان بوده است که مربوط به حجم حوضچه ۱۸/۸



شکل ۴- رابطه بین حجم ذخیره و ظرفیت خروجی از حوضچه تاخیری به‌ازای میانگین تعداد سرریزهای مجاز سالانه در مناطق مورد بررسی.



شکل ۵- رابطه بین هزینه و ظرفیت خروجی از حوضچه تاخیری با استفاده از APM به‌ازای میانگین سرریزهای سالانه مجاز در مناطق مورد بررسی.

نتایج بهینه‌سازی حوضچه تاخیری با استفاده از بهینه‌سازی ازدحام ذرات

نتایج برازش شبیه‌سازی الگوریتم ازدحام ذرات در شکل ۶ ارائه شده است. این نتایج نشان می‌دهد که در تمام پنج مورد تعداد سرریزهای سالانه (۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰)، یک مقدار تناسب ثابت در تکرار دهم به‌دست آمد و پس از آن نیز این تناسب ثابت ماند. مقادیر برازش برای تعداد سرریزهای میانگین سالانه ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ به‌ترتیب برابر با ۲/۱۹ میلیون تومان، ۱/۲۱ میلیون تومان، ۰/۹۱ میلیون تومان، ۰/۶۸ میلیون تومان و ۰/۴۱ میلیون تومان می‌باشد (شکل ۶). این مقادیر مربوط به حداقل هزینه‌ای است که از ترکیب بهینه حجم حوضچه و ظرفیت خروجی حوضچه به‌دست آمده است.

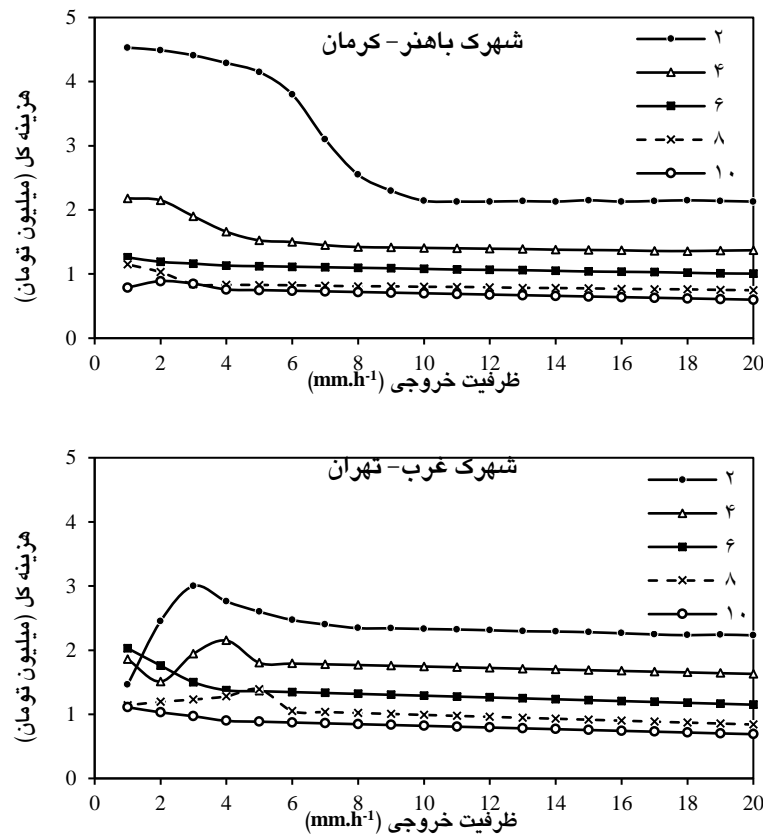
همچنین مقادیر پارامترهای مدل تحلیلی - احتمالاتی

و متوسط تعداد سالانه رخداد‌های بارش در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- مقادیر پارامتر مدل تحلیلی - احتمالاتی استخراج شده از داده‌های طولانی‌مدت حوضچه‌های مورد بررسی.

حوضه	پارامتر مدل تحلیلی - احتمالاتی			
	θ (#.year ⁻¹)	ψ (hr ⁻¹)	ζ (mm ⁻¹)	λ (hr ⁻¹)
شهرک				
بافنر	۴۰/۵۳	۰/۰۳۳	۰/۳۱	۰/۴۹
(کرمان)				
شهرک				
غرب*	۵۸/۱۷	۰/۰۰۳۳	۰/۰۹۲	۰/۲۳
(تهران)				

* مقادیر پارامترهای مدل تحلیلی - احتمالاتی منطقه مطالعاتی شهرک غرب، برگرفته از پژوهش سلاجقه و همکاران (۱۳۹۱) می‌باشد.



شکل ۶- برآزش هزینه کل بهره‌برداری از حوضچه‌های تاخیری با بهینه‌سازی ازدحام ذرات به‌ازای میانگین تعداد سرریزهای سالانه مجاز.

مجاز ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰، مقادیر برآورد شده با PSO با مدل تحلیلی- احتمالاتی سازگاری بالایی را دارد. همچنین، بجز در مواقع گسسته‌ای که خروجی حوضچه باعث سخت شدن محاسبات مدل تحلیلی می‌گردد، PSO مقادیر دقیق‌تری را به ما می‌دهد که نمی‌توان با مدل تحلیلی- احتمالاتی تعیین گردد. در تمام موارد، مقادیر بهینه پس از تعداد تکرارهای کم به‌دست آمدند (شکل ۶). مقادیر برآورد شده با استفاده از بهینه‌سازی ازدحام ذرات و مدل تحلیلی- احتمالاتی در جدول ۳ آورده شده است. از نتایج می‌توان دریافت که نتایج PSO بسیار نزدیک به مدل تحلیلی- احتمالاتی است. زمان انجام محاسبات در PSO بسیار کوتاه بود، در حالی‌که اجرای مدل تحلیلی نیازمند جامع برشمردن همه مقادیر ممکن و انتخاب مقدار بهینه از میان آن‌ها است. همچنین، مقادیر به‌دست آمده از مدل بهینه‌سازی

اجرای حوضچه تاخیری با افزایش حجم حوضچه توسعه داده شد. اما قیدهایی از لحاظ دسترسی به زمین و تامین بودجه، انتخاب حوضچه بزرگ‌تر را محدود می‌کند. به این ترتیب، با توجه به بودجه در دسترس یک حوضچه با ابعاد مناسب طراحی گردید. همچنین، اندازه خروجی حوضچه علاوه بر پایین‌دست حوضچه، بر عملکرد کنترل کیفیت و کمیت رواناب حوضچه نیز تاثیر می‌گذارد. کنترل کمیت رواناب با افزایش در اندازه خروجی، افزایش می‌یابد در حالی‌که کنترل آلودگی (کیفیت) رواناب وابسته روندی کاهشی دارد. بنابراین، طراحی حوضچه تاخیری می‌تواند برای هر دو عملکرد (کیفیت و کمیت) به‌کار گرفته شود.

هنگامی‌که هدف از بهینه‌سازی دستیابی به مقادیر بیشینه یا کمینه یک تابع باشد، شبیه‌سازی PSO به‌طور مستقیم نتایج بهینه‌ای را ارائه می‌دهد. برای سرریزهای

۲۰۱۱). این نتایج نشان می‌دهد که PSO در تعیین ترکیب بهینه متغیرهای طراحی حوضچه تاخیری قدرت‌مندتر است.

ازدحام ذرات در مقایسه با مدل تحلیلی- احتمالاتی کمی پایین‌تر و دقیق‌تر است که این مساله به دلیل این است که مدل PSO به صورت پیوسته می‌باشد و نیازی به گسسته‌سازی اندازه خروجی ندارد (آزیز و همکاران

جدول ۳- رابطه حجم ذخیره- ظرفیت خروجی- هزینه کل در حالت بهینه با استفاده از مدل تحلیلی- احتمالاتی و بهینه‌سازی ازدحام ذرات.

پارامتر	مدل بهینه‌سازی	تعداد سرریزهای مجاز			
		۱۰	۸	۶	۴
میزان ذخیره حوضچه (میلی‌متر)	APM	۸/۷۳	۱۰/۶	۱۱	۱۳/۳۱
ظرفیت خروجی (میلی‌متر بر ساعت)	PSO	۹/۰۳	۹/۸۱	۱۱/۲۲	۱۳/۳۴
هزینه کل (میلیون تومان)	APM	۱۰	۱۰	۱۱	۱۲
	PSO	۱۰/۱۸	۹/۷۸	۱۱/۰۷	۱۱/۹۱
	APM	۰/۴۲	۰/۶۹	۰/۹۰	۱/۲۲
	PSO	۰/۴۱	۰/۶۸	۰/۹۱	۱/۲۱

به دست آمد. ترکیب بهینه حجم حوضچه و میزان خروجی به منظور دستیابی به کمترین هزینه، با استفاده از مدل تحلیلی- احتمالاتی و بهینه‌سازی ازدحام ذرات ایجاد گردید. نتایج حاصل از بهینه‌سازی ازدحام ذرات نشان می‌دهد که مدل توانایی پیش‌بینی کمترین هزینه متغیرهای طراحی شده برای حجم حوضچه و ظرفیت خروجی را دارد. مقایسه مدل بهینه‌سازی ازدحام ذرات و مدل تحلیلی- احتمالاتی نشان می‌دهد که بهینه‌سازی ازدحام ذرات به صورت پیوسته است و به مقادیر گسسته میزان خروجی نیاز ندارد، بنابراین مقادیر پیش‌بینی شده قابل اعتمادتر خواهند بود. همچنین با مشاهده نتایج می‌توان دریافت که مدل بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای اجرای بهینه‌سازی قوی‌تر، ارزان‌تر و سریع‌تر از APM است.

نتیجه‌گیری کلی

طراحی حوضچه تاخیری شامل انتخاب ترکیب بهینه‌ای از حجم حوضچه، ظرفیت خروجی و هزینه بهره‌برداری از آن است که همواره یک مساله بهینه‌سازی توأم با تجاری‌سازی بوده است. هدف از اجرای این بهینه‌سازی، بیشینه‌سازی کنترل رواناب و کمینه‌سازی هزینه تدارکات حوضچه می‌باشد. در این پژوهش، عملکرد کنترل رواناب حوضچه تاخیری با استفاده از میانگین تعداد سرریزهای مجاز سالانه بیان شد. متغیرهای طراحی حوضچه تاخیری (حجم حوضچه و ظرفیت خروجی) به منظور رسیدن به این هدف طراحی شد. برای تعیین پارامترهای مدل تحلیلی- احتمالاتی از نزدیک‌ترین ایستگاه باران‌سنجی به حوضه استفاده شد و مشخصه‌های حوضه‌هایی آبخیز شهری مناطق مورد مطالعه (شهرک باهنر و شهرک غرب)

منابع مورد استفاده

- Adams BJ and Papa F, 2000. Urban stormwater management planning with analytical probabilistic Models. Wiley, New York, NY.
- Ahmadisharaf E and Tajrishy M, 2015. Siting Detention Basins Using SWMM and Spatial Multi-Criteria Decision Making. Journal of Water and Wastewater 25(6): 57-66.(Persian)
- Aziz NAA, Alias MY, Mohemmed AW and Aziz KA, 2011. Particle swarm optimization for constrained and multiobjective problems: A brief review. International conference on management and artificial intelligence IPEDR, Bali, Indonesia 6: 146-150.

- Baltar AM and Fontane DG, 2008. Use of multiobjective particle swarm optimization in water resources management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE 134: 257–265.
- Butler D and Davies JW, 2004. *Urban Drainage*. 2nd edition. Spon Press, Taylor & Francis Group. New York.
- Chen J and Adams BJ, 2006. Urban stormwater quality control analysis with detention ponds. *Water Environment Research* 78: 744–753.
- Chen J and Adams BJ, 2007. Development of analytical models for estimation of urban stormwater runoff. *Journal of Hydrology* 336: 458- 469.
- Cunha MC, Zeferino JA, Simões NE and Saldarriaga JG, 2016. Optimal location and sizing of storage units in a drainage system. *Environmental Modelling & Software* 30(83): 155-166.
- Fallah-Mehdipour EF, Haddad OB and Marinõ MA, 2009. MOPSO in multipurpose operation of single-reservoir system. In: ASCE, ed. *World Environmental and Water Resources Congress*, Kansas City, Missouri, USA: Great Rivers, ASCE.
- Ghasemi S and Faghfour Maghrebi M, 2015. Delay ponds as a solution for sustainable urban development and management. *Journal of Rainwater Catchment Systems* 3(1): 1-14.(Persian)
- Guo JCY and Urbonas B, 2002. Runoff capture and delivery curves for storm-water quality control designs. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE 12: 208–215.
- Guo Y, 2001. Hydrologic design of urban flood control detention ponds. *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE 6: 472–479.
- Jeng HAC, Englande AJ, Bakeer, RM and Bradford, H., 2005. Impact of urban stormwater runoff on estuarine environmental quality. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 63: 513–526.
- Jeong S, Hasegawa S, Shimoyama K and Obayash S, 2009. Development and investigation of efficient GA/PSO-hybrid algorithm applicable to real-world design optimization. *IEEE Computational Intelligence Magazine* 36–44.
- Karami M, Ardeshir A and Behzadian K, 2016. Hazard management of inundation and pollutants in urban floods using optimal conventional and novel strategies. *Iran Water Resources Research* 11(3): 100-112.(Persian)
- Kennedy J and Eberhart RC, 1995. Particle swarm optimization. *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks IV*. 27 November–1 December, NJ, USA: IEEE Service Center Piscataway, Perth, Australia.
- Lee JG, Heaney JP and Lai FH, 2005. Optimization of integrated urban wet-weather control strategies. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE 13: 307–315.
- Li JY and Adams BJ, 2000. Probabilistic models for analysis of urban runoff control systems. *Journal of Environmental Engineering*, ASCE 126: 217–224.
- Mccuen RH, 2004. *Hydrologic Analysis and Design*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Mobley JT and Culver TB, 2012. Design of outlet control structures for ecological detention ponds. *Journal of Water Resources Planning and Management* 140(2): 250-257.
- Moradi M, Darbandi S, Darbandi S, 2018. Development of analytical-probabilistic models for estimating urban storm water runoff, *Water and Soil Science* 4(28):1-16.(Persian).
- Muñoz Zavala AE, Aguirre AH and Villa Diharce ER, 2005. Constrained optimization via particle evolutionary swarm optimization algorithm (PESO). Pp.209-219. In *Proceedings of the 7th Annual Conference on Genetic and evolutionary computation*.
- Nascimento NO, Ellis JB, Baptista MB and Deutsch JC, 1999. Using detention basins: operational experience and lessons. *Urban water* 1: 113–124.
- Ngo TT, Yoo DG, Lee YS and Kim JH, 2016. Optimization of upstream detention reservoir facilities for downstream flood mitigation in urban areas. *Journal of Water* 14: 8(7):290.
- Nicklow J, Reed P, Savic D, Dessalegne T, Harrell L, Chan-Hilton A, Karamouz M, Minsker B, Ostfeld Singh A and Zechman E, 2010. State of the art for genetic algorithms and beyond in water resources planning and management. *Journal of Water Resources Planning and Management* 136: 412–432.
- Papa F, Adams BJ and Guo Y, 1999. Detention time selection for stormwater quality control ponds. *Canadian Journal of Civil Engineering* 26: 72–82.

- Park D, Jang S and Roesner LA, 2007. Multipurpose detention pond design for improved watershed management. Pp.11-20. In Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress, Florida, 15-19 May.
- Parsopoulos KE and Vrahatis MN, 2010. Particle swarm optimization and intelligence: advances and applications. New York: Information Science Reference.
- Rao SS, 2009. Engineering Optimization: Theory and Practice. 4th edition. New Jersey: John Wiley & Sons Inc.
- Salajegheh A, Forootan E, Mahdavi M, Ahmadi H, Sharifi F and Malek Mohammadi B, 2012. Runoff estimation in urban watersheds by analytical models (case study: The part of district No.22 of Tehran city), *Journal of Water and Wastewater* 23(1): 47-56.(Persian)
- Saribabu CR and Neelakantan TR, 2006. Design of water distribution networks using particle swarm optimization. *Urban Water Journal* 3 (2): 111–120.
- Shahapure SS, Eldho TI and Rao EP, 2011. Flood Simulation in an Urban Catchment of Navi Mumbai City with Detention Pond and Tidal Effects using FEM, GIS, and Remote Sensing. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering* 137(6): 286-299.
- Shokoohi A and Daneshvar S, 2007. Flood Control in Urban Basins Using Detention Ponds Comparison to Localized River Engineering Countermeasures. *Iran Water Resources Research* 3(1): 80-83.(Persian)
- Steg R, 2010. Summary of the stormwater sources in the Flathead Lake basin. Helena, MT, USA: USEPA, Montana Operations Office.(Persian)
- Tung YK, 1988. Multi-objective detention basin design in urban drainage systems - tradeoff between risk and cost. *Journal of Water Resources Management* 2: 51–62.
- Unmarked, 2016, Price Catalog for irrigation and drainage-water engineering, Management and Planning Organization of Islamic Republic of Iran,
- Yaghini M, Akhavan Kazemzadeh MR, 2016, Meta-heuristic optimization algorithms, Amirkabir University of Technology, Tehran.(Persian)
- Yu PS, Yang TC, Kuo CM and Tai CW, 2015. Integration of physiographic drainage-inundation model and nondominated sorting genetic algorithm for detention-pond optimization. *Journal of Water Resources Planning and Management* 141(11): 1-11.
- Zhao J, Zhao Y, Zhao X and Jiang C, 2016. Agricultural runoff pollution control by a grassed swales coupled with wetland detention ponds system: a case study in Taihu Basin, China. *Environmental Science and Pollution Research* 1; 23(9): 90-104.