

## مدل بهینه‌سازی کانال آبیاری با لحاظ شرایط سیلابی و عدم قطعیت

سعید فرزین<sup>۱\*</sup>، حجت کرمی<sup>۲</sup>، مهدی ولیخان انارکی<sup>۳</sup>، محمد احترام<sup>۴</sup>

تاریخ ارسال: ۱۳۹۶/۱۲/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۳/۰۵

### چکیده

در پژوهش حاضر برای نخستین بار، الگوریتم فراابتکاری خفاش به منظور طراحی مقطع کانال آبیاری با حداقل هزینه ساخت و لحاظ احتمال سیلاب به عنوان محدودیت و عدم قطعیت، معرفی شده است. بدین منظور، با در نظر گرفتن مقطع کانال با زبری‌های یکنواخت و مرکب و همچنین ارتفاع آزاد جریان در حالات ثابت و متغیر، سه مدل به صورت اول (زبری یکنواخت-ارتفاع ثابت، دوم) زبری مرکب-ارتفاع ثابت و سوم) زبری مرکب-ارتفاع متغیر تعریف شده است. الگوریتم پیشنهادی بر اساس نتایج آنالیز حساسیت برای مدل‌های اول تا سوم اجرا گردیده است. در ادامه، مقدار ضریب تغییرات و سرعت همگرایی حاصل از پانزده اجرای تصادفی الگوریتم مذکور، برای مدل‌های معرفی شده در مقدار احتمال سیلاب ۰/۳۶ مقایسه شده است. در نهایت، نتایج حاصل از الگوریتم مذکور برای مقادیر مختلف احتمال سیلاب، با نتایج نرم افزار لینگو، روش‌های ضرایب لاگرانژ و برنامه‌ریزی متوالی و الگوریتم ازدحام ذرات مقایسه شده است. نتایج حاصل از اجراهای تصادفی نشان داد که مقدار ضریب تغییرات برای مدل‌های اول تا سوم به ترتیب برابر با ۰/۰۰۰۴۹، ۰/۰۰۰۱۹ و ۰/۰۰۰۲۳ می‌باشد که قابل قبول است. همچنین هر سه مدل، در ۵۰۰ تکرار، همگرا شده‌اند. دیگر نتایج، حاکی از آن است که استفاده از الگوریتم خفاش در مقایسه با روش‌های دیگر، موجب بهبود نتایج بهینه‌سازی تا ۱۳/۹۷ درصد شده است. از سوی دیگر، این الگوریتم مقدار بهینه مطلق را نسبت به نرم‌افزار لینگو تا ۰/۵۱ درصد کمتر تخمین می‌زند. در میان سه مدل معرفی شده، استفاده از مدل سوم در مقایسه با مدل‌های اول و دوم، موجب صرفه‌جویی هزینه ساخت تا ۵۹/۶۰ و ۵۳/۸۷ درصد می‌شود.

کلمات کلیدی: کانال آبیاری، بهینه‌سازی، الگوریتم خفاش، عدم قطعیت، احتمال سیلاب، نرم افزار لینگو.

<sup>۱\*</sup> نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

saeed.farzin@semnan.ac.ir، ۰۹۱۷۴۱۱۲۸۹۱

<sup>۲</sup> استادیار، گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران. ۰۹۱۲۴۸۰۳۳۵۰

hkarami@semnan.ac.ir

<sup>۳</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده سمنان، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران. 091999983419

mvalikhan@semnan.ac.ir

<sup>۴</sup> دانشجوی دکترای مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران. ۰۹۱۶۲۲۸۱۷۴۴

mohammedheram@semnan.ac.ir

## مقدمه

طراحی بهینه کانال‌های آبیاری، یکی از بحث‌های مهم در پروژه‌های آبیاری و آبرسانی به شمار می‌رود. این کانال‌ها دارای نقش اساسی در آبیاری زمین‌های کشاورزی و تامین غذا هستند. بخش عظیمی از محصولات غذایی، در بخش کشاورزی وابسته به آبیاری تولید می‌شود (هاشمی شاهدانی و همکاران، ۱۳۹۵). لذا، مطالعه و طراحی اقتصادی کانال‌های آبیاری، به طوری که به ازای عبور یک مقدار مشخص جریان دارای کمترین هزینه باشند، امری ضروری و انکارناپذیر است.

در طراحی بهینه کانال‌های باز فاکتورهای مختلفی مانند دبی جریان، شیب طولی کانال و ضرایب زبری موثر هستند. استفاده از مصالح با زبری مختلف نیز می‌تواند موجب کاهش هزینه ساخت کانال شود. تروت در طراحی کانال‌های باز از زبری مرکب استفاده کرد. نتایج حاکی از کاهش چشمگیر هزینه ساخت کانال بود (Trout, 1982). در کانال مرکب، بستر از مصالح با زبری مختلف ساخته می‌شود. یکی از روش‌های رایج در تبدیل زبری مرکب به زبری یکنواخت استفاده از روش هورتون است. این روش توسط جین و همکاران در طراحی کانال با زبری مرکب استفاده شد (Jain et al., 2004).

در دهه‌های گذشته از مدل‌های ریاضی و محدودیت‌های مختلف به منظور طراحی کانال‌های باز استفاده شده است. موناджمی و همچنین فرهلیچ از روش ضرایب لاگرانژ برای طراحی بهینه کانال تحت محدودیت‌های مختلف استفاده کردند (Froehlich, 1994; Monadjemi, 1994). در پژوهشی که داس با استفاده از روش ضرایب لاگرانژ انجام داد، از معادله هورتون و فرمول مانینگ برای طراحی بهینه مقطع کانال استفاده نمود (Das, 2000). سوامی و همکاران نیز تلفات نفوذ و تبخیر آب را در سطح به عنوان تابع هدف در نظر گرفتند (Swami et al., 2002). باتاتاکاریا از روش برنامه ریزی مرتبه دوم متوالی برای طراحی کانال تحت شرایط زیر بحرانی استفاده کرد. نتایج این پژوهش در مقایسه با نتایج روش داس از

تطابق مطلوبی برخوردار بود (Bhattacharjya, 2006). در پژوهشی دیگر، باتاتاکاریا از روش ترکیبی الگوریتم ژنتیک و الگوریتم برنامه ریزی مرتبه دوم متوالی برای طراحی بهینه و پایدار کانال‌های باز استفاده کرد. نتایج نشان از عملکرد بالای روش مذکور در طراحی کانال‌های باز بود (Bhattacharjya, 2007).

پارامترهای طراحی کانال مانند دبی طراحی، شیب طولی کانال و ضرایب زبری دارای ماهیت احتمالاتی هستند. پارامترهای مانند ضرایب زبری و شیب طولی بستر کانال ممکن است در طول زمان به دلایلی مانند فرسایش یا رسوب گذاری، نسبت به مقداری که کانال برای آن طراحی شده بود، تغییر کنند. مقدار دبی جریان نیز ممکن است به علت وقوع یک بارش پیش-بینی نشده، از مقدار دبی جریان در نظر گرفته شده برای طراحی کانال، بیشتر شود. این موضوع موجب ایجاد عدم قطعیت در تعیین عمق جریان و سرریز یا سیلابی شدن کانال می‌شود. از طرفی، در طول ۲۵ سال گذشته، ۷۶۹ سیل در کشور ایران رخ داده است که از این میان ۱۱۷ سیل با خسارات زیادی همراه بوده‌اند (یخکشی و همکاران، ۱۳۹۲). لذا در نظر گرفتن احتمال سیلاب در طراحی کانال‌های آبیاری امریست ضروری که موجب کاهش خسارات می‌شود. در پژوهش داس، محدودیت احتمال سیلاب با استفاده از روش آنالیز مرتبه اول بررسی شد. نتایج نشان داد که لحاظ محدودیت احتمال سیلاب، موجب افزایش هزینه ساخت کانال می‌شود (Das, 2007). باتاتاکاریا ارتفاع آزاد را در طراحی بهینه کانال لحاظ کرد. مقایسه نتایج با مطالعات گذشته نشان داد که استفاده از این روش، موجب کاهش هزینه ساخت کانال می‌شود (Bhattacharjya, 2008).

در سال‌های اخیر، الگوریتم‌های فراابتکاری در مباحث مربوط به منابع آب از جمله طراحی کانال‌های باز مورد استفاده قرار گرفته‌اند. جین و همکاران روشی برای طراحی کانال با استفاده از الگوریتم ژنتیک ارائه داد. نتایج نشان داد استفاده از مدل مذکور با و بدون در نظر گرفتن محدودیت سرعت موجب کاهش هزینه‌ها

همکاران از الگوریتم خفاش به منظور بهینه‌سازی بهره‌برداری از یک سیستم تک مخزنه و یک سیستم چهارمخزنه استفاده کردند. الگوریتم خفاش در مقایسه با الگوریتم ژنتیک از سرعت همگرایی و دقت بالاتری برخوردار بود (Bozorghaddad et al., 2015). احمدیان‌فر و همکاران از ترکیب الگوریتم‌های خفاش و تکاملی تفاضلی برای بهینه‌سازی سیستم‌های چهار و پنج مخزنه استفاده کردند. نتایج نشان از تولید سود بیشتر نسبت به سایر روش‌ها بود. همچنین مقدار بهینه مطلق به دست آمده، مطابقت بالایی با نتایج نرم‌افزار لینگو داشت (Ahmadianfar et al., 2016). احترام و همکاران پارامترهای مدل ماسکینگام را با استفاده از الگوریتم خفاش بهینه کردند. نتایج نشان داد که الگوریتم مذکور نسبت به الگوریتم‌های ژنتیک و ازدحام ذرات از عملکرد بهتری برخوردار است (احترام و همکاران، ۱۳۹۶).

با توجه به جمع‌بندی تحقیقات پیشین، الگوریتم‌های فراابتکاری دارای کاربردی موفق در حل مسائل مرتبط با مدیریت منابع آب و سازه‌های هیدرولیکی بوده‌اند. لیکن مطالعات اندکی در مورد کاربرد این روش‌ها در طراحی کانال‌های آبیاری با در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترهای طراحی و احتمال سیلاب صورت گرفته است. در این راستا، بررسی قابلیت الگوریتم‌های توانمند جدید جهت طراحی بهینه کانال‌های باز با لحاظ احتمال سیلاب، از اهمیت بالایی برخوردار است. در پژوهش حاضر برای نخستین بار، عملکرد و قابلیت الگوریتم فراابتکاری خفاش، به منظور طراحی اقتصادی کانال‌های آبیاری با در نظر گرفتن شرایط سیلابی و عدم قطعیت مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. بدین منظور، با در نظر گرفتن مقطع کانال با زبری‌های یکنواخت و مرکب و همچنین ارتفاع آزاد جریان در حالات ثابت و متغیر، سه مدل مختلف تعریف شده است. پس از انجام آنالیز حساسیت، الگوریتم خفاش، برای مدل‌های معرفی شده به ازای مقادیر مختلف احتمال سیلاب، پانزده بار اجرا گردیده است. مقادیر انحراف معیار و سرعت همگرایی برای مدل‌ها محاسبه شده است. در نهایت، نتایج الگوریتم

در حدود ۵۵٪ و ۳۵٪ می‌شود (Jain et al., 2004). کاوه و طلعت اهری الگوریتم بهبود یافته کلونی مورچگان را در بهینه‌سازی کانال‌های باز به کار بردند. الگوریتم ارائه شده، جواب‌ها را نسبت به الگوریتم ژنتیک بهبود داد (Kaveh and Talatahari, 2010). ردی و آدارش از الگوریتم ازدحام ذرات برای طراحی بهینه کانال‌های باز استفاده کردند. نتایج نشان از کاهش هزینه ساخت کانال نسبت به روش ضرایب لاگرانژ بود (Reddy and Adarsh, 2010). آدارش از الگوریتم جستجوی سراسری احتمالاتی لوزان برای طراحی احتمالاتی کانال باز استفاده کرد. این الگوریتم نسبت به روش ضرایب لاگرانژ از دقت و سرعت بالاتری برخوردار بود (Adarsh, 2012). عروجی و همکاران از الگوریتم جهش غورباقه برای طراحی بهینه کانال استفاده کردند که موجب کاهش در هزینه ساخت کانال گردید (Orouje et al., 2016). روشنگر و همکاران از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی کانال باز استفاده کردند. نتایج نشان داد استفاده از محدودیت عرض بالای کانال می‌تواند منجر به کاهش هزینه ساخت شود (Roushangar et al., 2017). گوپتا و همکاران از الگوریتم دسته ماهی‌ها برای طراحی بهینه کانال دوزنقه‌ای استفاده کردند. نتایج در مقایسه با نتایج الگوریتم ازدحام ذرات، حاکی از کاهش هزینه ساخت کانال بود (Gupta et al., 2017).

اخیراً الگوریتم خفاش به عنوان یک روش فراابتکاری جدید و قدرتمند برای بهینه‌سازی مسائل مختلف ریاضی و مهندسی مطرح شده است. این الگوریتم توسط یانگ با الهام گرفتن از توانایی تولید پژواک خفاش‌ها ارائه شده است. یانگ الگوریتم خفاش را با الگوریتم‌های ژنتیک و ازدحام ذرات مقایسه کرد. نتایج نشان از سرعت و دقت بالاتر الگوریتم خفاش در تعیین بهینه مطلق برای توابع بنج مارک مختلف بود (Yang, 2010). یانگ و گندمی از الگوریتم خفاش برای بهینه‌سازی چندین مسأله مهندسی استفاده کردند. برتری الگوریتم خفاش نسبت به الگوریتم‌های ژنتیک، ازدحام ذرات و تکاملی تفاضلی مورد تایید قرار گرفت (Yang and Gandomi, 2012). بزرگ حداد و

بهبودسازی معتبر، مورد مقایسه قرار گرفته است. ۳. خفاش‌ها می‌توانند نرخ تولید پالس خود را در محدوده

پیشنهادی با نتایج نرم‌افزار لینگو و سایر روش‌های

جدول (۱): جزئیات مدل‌های به کار برده شده

مدل	توضیحات
مدل اول (Das, 2007)	کانال با زبری یکنواخت طراحی شده است. معادله مانینگ برای اعمال محدودیت جریان یکنواخت به کار گرفته شده است. محدودیت احتمال سیلاب نیز با استفاده از روش تحلیل مرتبه اول عدم قطعیت (Das, 2007)، اعمال شده است. مقدار ارتفاع آزاد، ثابت است.
مدل دوم (Das, 2007)	کانال، مانند مدل اول است با این تفاوت که سه ضریب زبری مختلف برای بستر و دیواره‌های کانال دوزنقه‌ای در نظر گرفته شده است. معادله هورتون برای تعیین ضریب زبری معادل به کار گرفته شده است.
مدل سوم (Bhattacharjya, 2008)	کانال، مانند مدل دوم با زبری مرکب در نظر گرفته شده است. با این تفاوت که ارتفاع آزاد کانال به عنوان یک متغیر تصمیم در نظر گرفته شده است.

صفر تا یک تغییر دهند. بلندی صدای خفاش‌ها می‌تواند از یک مقدار بزرگ مثبت  $A_0$  تا یک مقدار کوچک مثبت  $A_{min}$  تغییر کند.

جستجوی الگوریتم خفاش برای پیدا کردن شکار یا جواب بهینه مسأله با اختصاص یک موقعیت تصادفی به هر یک از خفاش‌ها آغاز می‌شود.

سپس موقعیت هر یک از خفاش‌ها بر اساس مقدار تابع هدف ارزیابی و بهترین موقعیت  $x_{best}$  انتخاب می‌شود. بر اساس رابطه ۱ به هر خفاش یک مقدار فرکانس اختصاص داده می‌شود. سپس بر اساس روابط ۲ و ۳ مقدار سرعت و موقعیت هر خفاش به‌روز می‌شود.

$$f_i = f_{min} + (f_{max} - f_{min})\beta \quad (1)$$

$$v_i^t = v_i^{t-1} + (x_i^t - x_{best})f_i \quad (2)$$

$$x_i^t = x_i^{t-1} + v_i^t \quad (3)$$

که  $f_i$  فرکانس  $i$  امین خفاش است و بین دو مقدار فرکانس حداقل  $f_{min}$  و فرکانس حداکثر  $f_{max}$  تغییر می‌کند.  $x_i^{t-1}$  موقعیت  $i$  امین خفاش در زمان  $t-1$ ،  $v_i^{t-1}$  سرعت خفاش در زمان  $t-1$ ،  $x_i^t$  موقعیت  $i$  امین خفاش در زمان  $t$ ،  $v_i^t$  سرعت  $i$  امین خفاش در زمان  $t$ ،  $\beta$  یک بردار تصادفی با آرایه‌های بین صفر و یک می‌باشد. در مرحله بعد، به‌منظور انجام جستجوی محلی با استفاده از یک گام تصادفی یک جواب در اطراف موقعیت فعلی هر خفاش ایجاد می‌شود:

$$x_i^t = x_i^{t-1} + \epsilon A^t \quad (4)$$

## مواد و روش‌ها

### مدل‌های تعریف شده جهت بهینه‌سازی کانال تحت شرایط احتمال سیلاب:

منظور بهینه‌سازی کانال دوزنقه‌ای با استفاده از الگوریتم خفاش، سه مدل مختلف به کار برده شده است. در هر سه مدل، مجموع هزینه ساخت کانال به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است. همچنین، در همه مدل‌ها، محدودیت جریان یکنواخت و محدودیت احتمال سیلاب در اثر عدم قطعیت پارامترهای طراحی، در نظر گرفته شده است. جزئیات سه مدل معرفی شده، در جدول ۱ ارائه گردیده است.

### معرفی الگوریتم بهینه‌سازی خفاش

الگوریتم فراابتکاری خفاش، یک الگوریتم بهینه‌سازی است که از رفتار خفاش‌ها در پیدا کردن شکار الهام گرفته شده است. خفاش‌ها در حین پرواز کردن صوتی را به اطراف انتشار می‌دهند و با گوش دادن به پژواک صوت تولیدشده، موقعیت خود و موانع اطراف را تشخیص می‌دهند. الگوریتم خفاش بر اساس سه ایده اساسی زیر توسعه داده شده است:

۱. همه خفاش‌ها دارای توانایی تولید صدا و دریافت پژواک هستند. خفاش‌ها بر اساس این توانایی مانع را از شکار تشخیص می‌دهند.

۲. همه خفاش‌ها در حین پرواز تصادفی دارای سرعت  $V_i$  در موقعیت  $X_i$  هستند. خفاش‌ها در این موقعیت صوتی با فرکانس ثابت  $f_{min}$  و طول موج  $\lambda$  تولید می‌کنند.

$$Cost(b, y, z) = c_1 A_t + c_2 P_1 + c_3 P_2 + c_4 P_3 \quad (7)$$

$$\phi_1(b, y, z) = \left| \frac{Qn}{\sqrt{S_0}} - \frac{A_w^{\frac{5}{3}}}{P_w^{\frac{2}{3}}} \right| - \varepsilon_1 \geq 0 \quad (8)$$

$$\phi_2(b, y, z) = P(h > h + f) = p \quad (9)$$

که  $C_1$  هزینه مجموع خاک برداری بر واحد مساحت،  $C_2$ ،  $C_3$  و  $C_4$  هزینه پوشش دار کردن کانال بر واحد طول، به ترتیب برای دیواره‌های جانبی و عرض بستر کانال است.  $A_t$  مساحت کل کانال،  $P_1$ ،  $P_2$  و  $P_3$  به ترتیب محیط دیواره‌های کانال و بستر کانال هستند.  $A_w$  مساحت جریان،  $P_w$  محیط مرطوب شده کانال و  $P(h > h + f)$  احتمال تجاوز عمق جریان از ارتفاع آزاد کانال است که باید برابر با مقدار ثابت  $p$  شود.

در مدل دوم، کانال با زبری مرکب در نظر گرفته شده است. فرمول بندی این مدل به شکل روابط ۱۰ تا ۱۲ ارائه شده است:

$$Cost(b, y, z, 1, z 2) = c_1 A_t + c_2 P_1 + c_3 P_2 + c_4 P_3 \quad (10)$$

$$\phi_1(b, y, z, 1, z 2) = \left| \frac{Qn_e}{\sqrt{S_0}} - \frac{A_w^{\frac{5}{3}}}{P_w^{\frac{2}{3}}} \right| - \varepsilon_1 \geq 0 \quad (11)$$

$$\phi_2(b, y, z, 1, z 2) = P(h > h + f) = p \quad (12)$$

که  $n_e$  ضریب زبری معادل کانال است و به صورت رابطه ۱۳ محاسبه می‌شود.

$$n_e = \left[ \frac{\left( \sqrt{z_1^2 + 1n_1^2} + \sqrt{z_2^2 + 1n_2^2} \right) h + bn_3^{\frac{3}{2}}}{P_w} \right]^{\frac{2}{3}} \quad (13)$$

مدل سوم، مانند مدل دوم است اما ارتفاع آزاد کانال به عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفته شده است. بنابراین در این مدل، محدودیت حداقل مقدار ارتفاع آزاد مجاز به محدودیت‌های جریان یکنواخت و احتمال سیلاب

که  $\varepsilon$  یک عدد تصادفی بین ۱- و ۱ است و  $A_t$  متوسط بلندی صدا خفاش‌ها در زمان  $t$  است. با نزدیک شدن خفاش‌ها به شکار مقدار بلندی صدا کاهش و نرخ تولید پالس افزایش پیدا می‌کند، که مقدار بلندی صدای صفر و نرخ تولید پالس ۱ به معنی یافتن شکار است. بلندی صدا و نرخ تولید پالس بر اساس روابط ۵ و ۶ محاسبه می‌شوند:

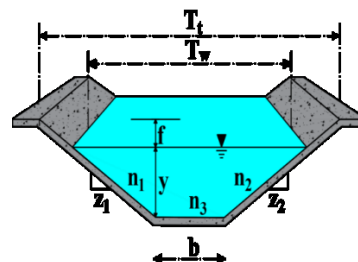
$$A_t^{t+1} = \alpha A_t^t \quad (5)$$

$$r_i^{t+1} = r_i^0 [1 - \exp(-\gamma t)] \quad (6)$$

که  $\alpha$  و  $\gamma$  پارامترهای ثابت هستند. نرخ تولید پالس نیز عددی بین صفر و یک است.

### مدل‌سازی مسأله بهینه‌سازی کانال با لحاظ شرایط سیلابی

کانال دوزنقه‌ای در نظر گرفته شده برای مدل‌های اول تا سوم، در شکل ۱ نشان داده شده است.  $Z1:1$  و  $Z2:1$  شیب دیواره‌ها هستند.  $n_1$ ،  $n_2$ ،  $n_3$  نشان دهنده ضرایب زبری دیواره‌ها و بستر کانال می‌باشند.  $b$ ،  $h$  و  $f$  نیز به ترتیب معرف عرض بستر، عمق جریان و ارتفاع آزاد کانال هستند.



شکل (۱): طرح شما تیک کانال دوزنقه‌ای برای مدل‌های بررسی شده

با توجه به جدول ۱، در مدل اول کانال با زبری یکنواخت فرض شده است. در این مدل، ضریب زبری برای تمام کانال یکسان فرض شده است. مقدار شیب هر دو دیواره نیز، یکسان در نظر گرفته شده است. تابع مربوط به هزینه ساخت و محدودیت‌های مسأله در روابط ۷ تا ۹ ارائه شده‌اند:

ترتیب نشان دهنده انحراف معیار دیواره‌ها و بستر کانال و  $S_s = 0.005$  انحراف معیار شیب طولی کانال است (Das, 2007; Reddy and Adarsh, 2010). مقدار انحراف معیار عمق جریان با فرض توزیع نرمال با استفاده از رابطه ۱۹ حاصل می‌شود:

$$S_h = \frac{(h+f-h)}{Z} \quad (19)$$

که  $Z$  متغیر توزیع نرمال استاندارد است. مقدار این پارامتر، با توجه به احتمال سیلاب و درون‌یابی در جدول توزیع تجمعی احتمالاتی توزیع نرمال به دست می‌آید.

$$\phi_2 = \frac{f}{z} - \frac{\left[ \frac{S_0^2}{Q^2} + \frac{1}{\left(\sum n_i^{3/2} p_{wi}\right)^2} \sum n_i p_{wi}^2 S_{ni}^2 + \frac{1}{4S^2} S_s^2 \right]^{1/2}}{\left[ \frac{5}{A_w} \frac{dA_w}{dh} - \frac{2}{\left(\sum n_i^{3/2} p_{wi}\right)} \frac{d}{dh} \left(\sum n_i^{3/2} p_{wi}\right) \right]}$$

با مقایسه روابط ۱۸ و ۱۹، محدودیت احتمال سیلاب برای مدل‌های اول تا سوم، به صورت رابطه ۲۰ بیان می‌شود

از آنجا که الگوریتم خفاش با یک تابع هدف در نظر گرفته شده است و همچنین هر یک از مدل‌های بررسی شده، محدودیت‌هایی دارند، از روش پنالتی برای اعمال محدودیت‌ها استفاده شده است. تابع هدف نهایی با استفاده از رابطه ۲۱ بیان می‌شود:

$$f_{fitness} = Cost + \sum_{i=1}^l R(\phi_i)^2 \quad (21)$$

که  $R$  یک عدد مثبت بزرگ و معرف ضریب پنالتی است.  $\phi_i$  محدودیت  $i$ ام مسأله است.

پارامترهای طراحی مختلف شامل دبی جریان، شیب طولی کانال، ارتفاع آزاد، ضرایب زبری و ضرایب هزینه،

اضافه می‌شود. فرمول بندی این مدل در روابط ۱۴ تا ۱۷ بیان شده است:

$$Cost(b, y, z, 1, z, 2, f) = c_1 A_t + c_2 P_1 + \quad (14)$$

$$c_3 P_2 + c_4 P_3$$

$$\phi_1(b, y, z, 1, z, 2, f) = \left| \frac{Q n_e}{\sqrt{S_0}} - \frac{A_w^{5/3}}{P_w^{3/2}} \right| - \varepsilon_1 \geq 0 \quad (15)$$

$$\phi_2(b, y, z, 1, z, 2, f) = P(h > h + f) = p \quad (16)$$

$$\phi_3(b, y, z, 1, z, 2, f) = f > f_{min} \quad (17)$$

که  $f_{min}$  مقدار کمینه ارتفاع آزاد و  $P_w$  محیط مرطوب کانال است.

عواملی مانند ورود رسوبات یا رواناب ناشی از وقوع یک بارش پیش‌بینی نشده، به جریان کانال می‌تواند موجب تغییر پارامترهای طراحی کانال از مقداری که برای آن طراحی شده بودند شود. لذا، پارامترهای طراحی مانند دبی جریان، شیب طولی و ضرایب زبری دارای ماهیت احتمالاتی و عدم قطعیت هستند. این موضوع موجب ایجاد عدم قطعیت در تعیین عمق جریان می‌شود. برای در نظر گرفتن این عدم قطعیت در طراحی کانال دوزنقه‌ای بر اساس مرجع (Chow, 1988)، از تحلیل مرتبه اول عدم قطعیت با فرض توزیع نرمال برای پارامترهای طراحی، استفاده گردیده است. پس از اعمال تحلیل مرتبه اول عدم قطعیت به معادله مانینگ مطابق با مرجع (Das, 2007; Reddy and Adarsh, 2010)، مقدار انحراف معیار عمق جریان توسط رابطه ۱۸ محاسبه می‌شود:

$$S_h = 3 \left[ \frac{S_0^2}{Q^2} + \frac{1}{\left(\sum n_i^{3/2} p_{wi}\right)^2} \sum n_i p_{wi}^2 S_{ni}^2 + \frac{1}{4S^2} S_s^2 \right]^{1/2} \times \left[ \frac{5}{A_w} \frac{dA_w}{dh} - \frac{2}{\left(\sum n_i^{3/2} p_{wi}\right)} \frac{d}{dh} \left(\sum n_i^{3/2} p_{wi}\right) \right]^{-1} \quad (18)$$

که  $S_0 = 51.8941$  انحراف معیار دبی جریان،  $S_{n1} = 0.00572$ ،  $S_{n2} = 0.004$  و  $S_{n3} = 0.003$  به

جدول (۳): نتایج آنالیز حساسیت الگوریتم خفاش برای

مدل‌های مختلف				
پارامترها	جمعیت	ماکزیمم	مینیمم	ماکزیمم
مدل اول	۱۰۰	۱	۰/۱	۰/۸
مدل	۱۰۰	۱	۰/۱	۰/۸
مدل	۱۰۰	۱	۰/۱	۰/۸

جدول ۴ نتایج ۱۰ اجرای تصادفی الگوریتم خفاش

برای مدل‌های بررسی شده را نشان می‌دهد. در این جدول، مقدار احتمال سیلاب برای مدل‌های مختلف برابر با ۰/۳۶ در نظر گرفته شده است. در همه مدل‌ها، کانال آبیاری در احتمال ۰/۳۶ دارای کمترین مقدار هزینه است. مدل دوم دارای کمترین ضریب تغییرات برابر با ۰/۰۰۱۹ است. مدل اول دارای بیشترین ضریب تغییرات برابر با ۰/۰۰۴۹ است. مقدار ضریب تغییرات برای مدل سوم نیز برابر با ۰/۰۰۲۳ است. با توجه به مقدار ضریب تغییرات پایین مدل‌های بررسی شده، می‌توان نتیجه گرفت الگوریتم خفاش با یک بار اجرا به جواب بهینه مطلوب رسیده است.

جدول ۴- نتایج ۱۵ اجرای تصادفی الگوریتم خفاش

برای مدل‌های مختلف و احتمال سیلاب ۰/۳۶				
تعداد اجرای الگوریتم	مدل اول	مدل دوم	مدل	مدل
۱	۲۴/۸۵	۲۲/۸۵	۲۲/۸۵	۲۲/۸۵
۲	۲۴/۸۵	۲۲/۸۵	۲۲/۸۷	۲۲/۸۷
۳	۲۴/۸۵	۲۲/۸۵	۲۲/۸۵	۲۲/۸۵
۴	۲۴/۸۵	۲۲/۸۵	۲۲/۸۵	۲۲/۸۵
۵	۲۴/۸۵	۲۲/۸۵	۲۲/۸۶	۲۲/۸۶
۶	۲۴/۸۵	۲۲/۸۵	۲۲/۸۵	۲۲/۸۵
۷	۲۴/۸۶	۲۲/۸۵	۲۲/۸۶	۲۲/۸۶
۸	۲۴/۸۵	۲۲/۸۶	۲۲/۸۵	۲۲/۸۵
۹	۲۴/۸۵	۲۲/۸۵	۲۲/۸۵	۲۲/۸۵
۱۰	۲۴/۸۵	۲۲/۸۵	۲۲/۸۵	۲۲/۸۵
۱۱	۲۲/۸۴	۲۲/۸۵	۲۲/۸۵	۲۲/۸۵
۱۲	۲۲/۸۴	۲۲/۸۵	۲۲/۸۶	۲۲/۸۶
۱۳	۲۲/۸۴	۲۲/۸۵	۲۲/۸۵	۲۲/۸۵
۱۴	۲۲/۸۵	۲۲/۸۶	۲۲/۸۵	۲۲/۸۵
۱۵	۲۲/۸۴	۲۲/۸۵	۲۲/۸۵	۲۲/۸۵
بهترین جواب	۲۴/۸۵	۲۲/۸۴	۲۲/۸۵	۲۲/۸۵
میانگین جواب‌ها	۲۴/۸۵	۲۲/۸۴	۲۲/۸۵	۲۲/۸۵
بدترین جواب	۲۴/۸۶	۲۲/۸۵	۲۲/۸۷	۲۲/۸۷

بر اساس مراجع ( Das, 2007; Bhattacharjya, ) در نظر گرفته شده‌اند. جدول ۲ مقادیر پارامترهای طراحی برای مدل‌های مختلف را نشان می‌دهد.

جدول (۲): پارامترهای طراحی برای کانال آبیاری

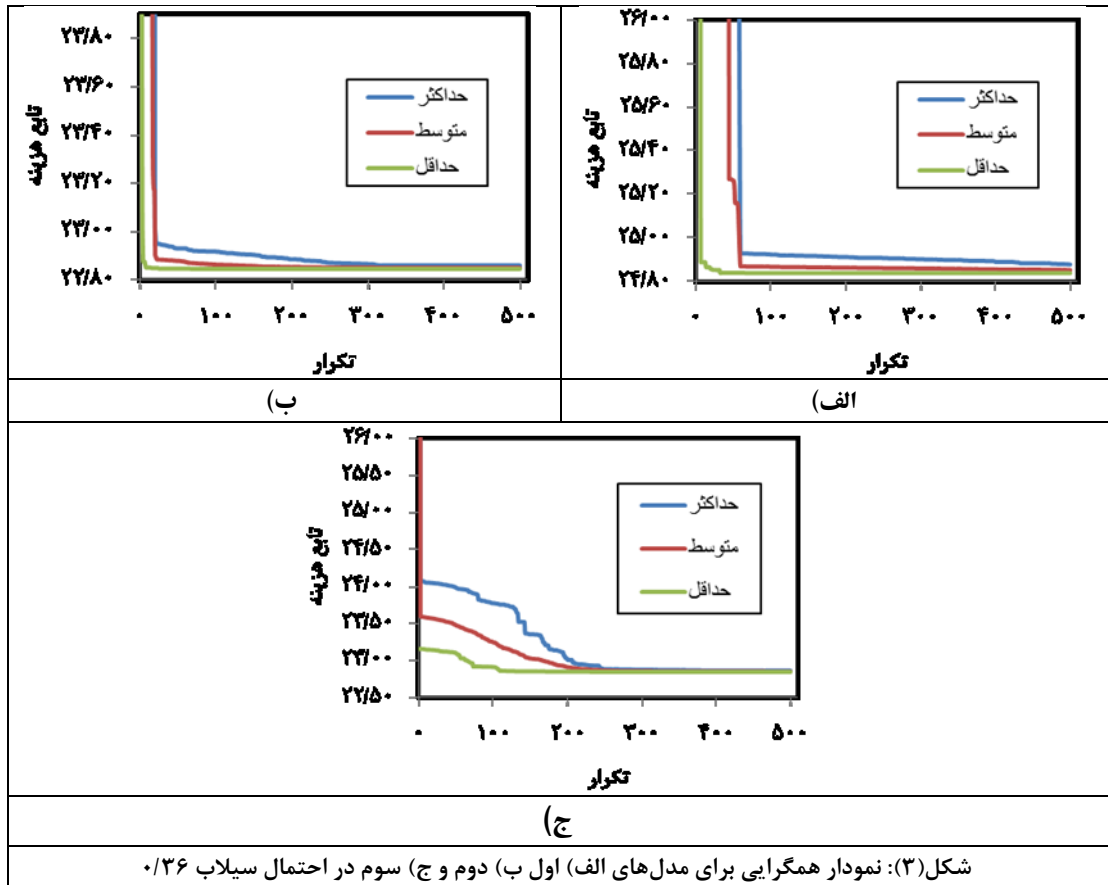
مقادیر پارامترهای طراحی برای مدل‌های				
پارامترها	علامت	مدل اول	مدل دوم	مدل
مشخصات	Q(m <sup>3</sup> /s)	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
جریان	S0	۰/۰۰۲۵	۰/۰۰۲۵	۰/۰۰۲۵
	f(m)	۰/۵	۰/۵	متغیر
ضرایب	n <sub>1</sub>	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۳
مانینگ	n <sub>2</sub>	۰/۰۲۵	۰/۰۳	۰/۰۲۵
	n <sub>3</sub>	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۲
ضرایب	c1	۰/۵	۰/۵	۰/۵
هزینه	c2	۰/۳	۰/۳	۰/۳
	c3	۰/۳۵	۰/۳	۰/۳۵
	c4	۰/۴	۰/۳	۰/۴

## نتایج و بحث

به منظور طراحی بهینه مقطع کانال آبیاری برای مدل‌های مختلف ارائه شده، بر اساس مرجع (Das, 2007) مقدار عرض بستر b بین ۱ تا ۱۰۰ متر، مقدار عمق جریان h بین ۰ تا ۱۰ متر، مقدار شیب دیواره‌ها Z<sub>1</sub> و Z<sub>2</sub> نیز بین ۰ تا ۱ در نظر گرفته شده است. مقدار ارتفاع آزاد کانال نیز برای مدل اول و دوم برابر با مقدار ثابت ۰/۵ و برای مدل سوم بین ۰/۵ تا ۳ متر می‌باشد. جدول ۳ نتایج آنالیز حساسیت الگوریتم خفاش را برای مدل‌های مختلف نشان می‌دهد. پس از انجام آنالیز حساسیت برای هر مدل، پارامترهای که به ازای آن‌ها کمترین تابع هدف وجود داشته باشد، انتخاب می‌شوند. با توجه به نتایج جدول ۳، بهترین مقدار جمعیت برای همه مدل‌های بررسی شده برابر با ۱۰۰ می‌باشد. همچنین با افزایش جمعیت از مقدار ۱۰۰ مقدار تابع هدف تغییری نمی‌کند. بهترین مقدار فرکانس حداکثر برای هر سه مدل برابر با ۱ است. در مورد فرکانس حداقل همه مدل‌ها در مقدار ۰/۱ دارای کمترین مقدار تابع هدف می‌باشند. مقدار ماکزیمم فرکانس و مینیمم فرکانس نیز برای همه مدل‌ها، به ترتیب برابر با ۰/۸ و ۰/۳ است.

دوم در حدود ۰/۰۱ و برای مدل سوم در حدود ۰/۰۲ است. در همه مدل‌ها مقدار میانگین و بهترین جواب‌ها، برابر شده‌اند. اختلاف کم جواب‌های تولید شده توسط الگوریتم خفاش، نشان دهنده عملکرد موفق این الگوریتم در طراحی کانال آبیاری است.

در شکل ۳ نمودار همگرایی برای مدل‌های اول تا سوم، ارائه شده است. در این شکل مقدار احتمال سیلاب، برابر با ۰/۳۶ در نظر گرفته شده است. با توجه به شکل ۳، مدل‌های اول، دوم و سوم در ۵۰۰ تکرار همگرا می‌شوند. در این شکل میانگین، حداکثر و حداقل مقدار جواب‌ها نشان داده شده است. مقدار اختلاف حداکثر و حداقل جواب‌ها برای مدل‌های اول و



مقدار هزینه ساخت کانال برای احتمال سیلاب ۰/۰۱ با استفاده از الگوریتم خفاش نسبت به روش لینگو، در حدود ۰/۴۳٪ کمتر می‌باشد.

دیگر نتایج نشان می‌دهد با افزایش احتمال سیلاب تا ۰/۳۶، مقدار هزینه ساخت کانال کاهش پیدا می‌کند. این هزینه توسط روش‌های مختلف، در احتمال سیلاب ۰/۳۶ دارای کمترین مقدار است. این مقدار برای نرم-افزار لینگو برابر ۲۴/۸۵ است. این مقدار هزینه ساخت برای روش ضرایب لاگرانژ و الگوریتم ازدحام ذرات در حدود ۲۵/۵۴ و ۲۴/۸۵ است. بنابراین الگوریتم خفاش نسبت به دو روش مذکور، موجب کاهش هزینه ساخت

در جدول ۵، نتایج طراحی کانال باز برای مدل اول با استفاده از الگوریتم خفاش و با در نظر مقادیر مختلف برای احتمال سیلاب کانال ارائه شده است. همچنین نتایج الگوریتم خفاش با سایر روش‌های بهینه‌سازی از جمله روش غیر خطی نرم‌افزار لینگو مقایسه شده است. مطابق با نتایج این جدول، کانال با در نظر گرفتن احتمال سیلاب ۰/۰۱، دارای بیشترین مقدار هزینه ساخت است. این مقدار هزینه ساخت کانال با استفاده از الگوریتم خفاش در حدود ۹۰/۴۷ محاسبه شده است که نسبت به روش ضرایب لاگرانژ و الگوریتم ازدحام ذرات در حدود ۱/۲۱ و ۱۳/۹۷٪ کمتر است. همچنین



محاسبه ابعاد کانال با استفاده از الگوریتم خفاش نشان می‌دهد که با افزایش احتمال سیلاب مقدار عرض بستر کانال کاهش و مقدار عمق جریان افزایش می‌یابد. مقدار شیب جانبی کانال نیز با افزایش احتمال سیلاب از مقدار ۰/۰۱ تا مقدار ۰/۲۶ افزایش، و بعد از آن کاهش می‌یابد. این روند در ابعاد محاسبه شده با سایر روش‌ها از جمله نرم‌افزار لینگو نیز قابل مشاهده است.

در حدود ۲/۷۴ و ۰/۰۴٪ شده است. این مقدار هزینه محاسبه شده با استفاده از الگوریتم خفاش در مقایسه با روش لینگو نیز، در حدود ۰/۰۴٪ کمتر می‌باشد. برای همه روش‌ها، افزایش مقدار احتمال سیلاب، بعد از مقدار ۰/۳۶ موجب افزایش هزینه ساخت کانال می‌شود. می‌توان چنین نتیجه گرفت که الگوریتم خفاش در مقایسه با سایر روش‌ها، از قابلیت بیشتری در تعیین بهینه مطلق مسأله برخوردار می‌باشد.

جدول (۵): نتایج طراحی بهینه کانال برای مدل اول با استفاده از الگوریتم خفاش و سایر روش‌ها

روش	احتمال سیلاب	b	$\gamma$	Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	تابع هزینه
LMM	۰/۰۱	۹۷/۵۸	۰/۸۴	۰/۶۱	۰/۶۱	۹۱/۵۸
PSO	۰/۰۱	۱۱۹/۸۶	۰/۶۹	۰/۶۴	۰/۶۴	۱۰۶/۴۵
BA	۰/۰۱	۹۸/۸۵	۰/۷۰	۰/۵۹	۰/۵۹	۹۰/۴۷
LINGO	۰/۰۱	۱۰۰/۰۵	۰/۶۹	۰/۶۷	۰/۶۷	۹۰/۸۶
LMM	۰/۱	۴۸/۸۱	۱/۱۸	۰/۷۱	۰/۷۱	۵۷/۱۴
PSO	۰/۱	۴۶/۰۲	۱/۱۹	۰/۸۲	۰/۸۲	۵۴/۳۵
BA	۰/۱	۴۱/۹۴	۱/۲۴	۰/۹۰	۰/۹۰	۵۱/۷۰
LINGO	۰/۱	۴۲/۲۲	۱/۲۴	۰/۸۳	۰/۸۳	۵۱/۹۰
LMM	۰/۱۶	۳۲/۴۳	۱/۵۳	۰/۷۶	۰/۷۶	۴۴/۴۹
PSO	۰/۱۶	۳۰/۲	۱/۵۲	۰/۸۶	۰/۸۶	۴۲/۴۳
BA	۰/۱۶	۲۸/۴۷	۱/۵۷	۰/۸۸	۰/۸۸	۴۱/۵۳
LINGO	۰/۱۶	۲۸/۵۱	۱/۵۷	۰/۸۸	۰/۸۸	۴۱/۵۴
LMM	۰/۲	۲۵/۰۶	۱/۴۹	۰/۷۹	۰/۷۹	۳۸/۷۷
PSO	۰/۲	۲۲/۷۹	۱/۸۳	۰/۸۹	۰/۸۹	۳۶/۷۱
BA	۰/۲	۱۸/۲۷	۲/۰۴	۰/۹۶	۰/۹۶	۳۳/۹۳
LINGO	۰/۲	۱۸/۴۷	۲/۰۴	۰/۹۱	۰/۹۱	۳۳/۹۳
LMM	۰/۲۶	۱۵/۷	۲/۳	۰/۸۲	۰/۸۲	۳۱/۸۸
PSO	۰/۲۶	۱۴/۰۵	۲/۴۳	۰/۹۱	۰/۹۱	۳۰/۱۵
BA	۰/۲۶	۱۳/۲۹	۲/۴۹	۰/۸۵	۰/۸۵	۳۰/۰۰
LINGO	۰/۲۶	۱۳/۰۳	۲/۵۱	۰/۹۰	۰/۹۰	۳۰/۰۰
LMM	۰/۳	۱۰/۷۳	۲/۸۸	۰/۸۳	۰/۸۳	۲۸/۴۳
PSO	۰/۳	۹/۲۵	۳/۰۷	۰/۸۶	۰/۸۶	۲۷/۱۴
BA	۰/۳	۷/۹۹	۳/۳۴	۰/۸۱	۰/۸۱	۲۶/۶۵
LINGO	۰/۳	۷/۹۶	۳/۳۴	۰/۸۱	۰/۸۱	۲۶/۶۵
LMM	۰/۳۶	۵/۹۷	۴/۳۲	۰/۵۶	۰/۵۶	۲۵/۵۴
PSO	۰/۳۶	۵/۸۳	۴/۵۰	۰/۵۳	۰/۵۳	۲۴/۸۵
BA	۰/۳۶	۵/۴۲	۴/۸۱	۰/۳۸	۰/۳۸	۲۴/۸۴
LINGO	۰/۳۶	۵/۳۹	۴/۸۴	۰/۳۸	۰/۳۸	۲۴/۸۵
LMM	۰/۴	۵/۴۶	۵/۴۲	۰/۲۳	۰/۲۳	۲۵/۵۸
PSO	۰/۴	۵/۶۷	۵/۳۸	۰/۱۹	۰/۱۹	۲۴/۹۳
BA	۰/۴	۵/۴۷	۵/۳۷	۰/۲۱	۰/۲۱	۲۴/۸۸
LINGO	۰/۴	۵/۵۱	۵/۳۴	۰/۲۰	۰/۲۰	۲۴/۸۸

مقایسه شده است. مطابق جدول ۶، برای تمام روش‌های بررسی شده، بیشترین هزینه ساخت کانال برای کمترین مقدار احتمال سیلاب کانال (۰/۰۱) است. این

نتایج طراحی کانال آبیاری برای مدل دوم با استفاده از الگوریتم خفاش، در جدول ۶ ارائه شده است. نتایج حاصل، با نتایج مطالعات گذشته و نرم‌افزار لینگو

الگوریتم ازدحام ذرات در حدود ۰/۴۸ و ۰/۳۵ درصد کمتر است. مقدار هزینه محاسبه شده با استفاده از الگوریتم خفاش و روش لینگو نیز تقریباً برابر می‌باشد. با توجه به جدول ۶، افزایش احتمال سیلاب موجب کاهش عرض بستر و افزایش عمق جریان شده است. مقدار شیب دیواره‌ها نیز با افزایش مقدار احتمال سیلاب تا مقدار ۰/۲ افزایش و بعد از آن کاهش داشته است. این روند در الگوریتم خفاش و سایر روش‌های بررسی شده مشاهده می‌شود.

هزینه با استفاده از الگوریتم خفاش در حدود ۷۹/۲۴ محاسبه شده است که در مقایسه با روش ضرایب لاگرانژ، الگوریتم ازدحام ذرات و روش لینگو به ترتیب در حدود ۱۲/۶۶، ۱/۰۲ و ۰/۵۱ درصد صرفه‌جویی داشته است.

در همه روش‌ها، کمترین مقدار هزینه ساخت کانال برای احتمال سیلاب ۰/۳۶ است. الگوریتم خفاش، این مقدار هزینه ساخت را در حدود ۲۲/۸۵ محاسبه کرده است. این هزینه در مقایسه با روش ضرایب لاگرانژ و

جدول (۶): نتایج طراحی بهینه کانال برای مدل دوم با استفاده از الگوریتم خفاش و سایر روش‌ها

روش	احتمال سیلاب	b	y	Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	f	تابع هزینه
LMM	۰/۰۱	۹۴/۲۶	۰/۶۰	۰/۴۶	۰/۵۶	۰/۵	۹۰/۷۳
PSO	۰/۰۱	۸۰/۳۵	۰/۶۶	۰/۴۷	۰/۵۶	۰/۵	۸۰/۰۶
BA	۰/۰۱	۷۹/۵۹	۰/۶۶	۰/۳۹	۰/۴۸	۰/۵	۷۹/۲۴
LINGO	۰/۰۱	۸۰/۰۱	۰/۶۶	۰/۴۲	۰/۵۲	۰/۵	۷۹/۶۵
LMM	۰/۱	۳۶/۱۸	۱/۰۸	۰/۵۲	۰/۶۶	۰/۵	۴۵/۱۷
PSO	۰/۱	۳۲/۴۱	۱/۱۷	۰/۵۳	۰/۶۷	۰/۵	۴۲/۱۰
BA	۰/۱	۳۲/۰۶	۱/۱۷	۰/۵۳	۰/۵۶	۰/۵	۴۱/۶۰
LINGO	۰/۱	۳۲/۱۶	۱/۱۷	۰/۵۵	۰/۶۹	۰/۵	۴۱/۷۰
LMM	۰/۱۶	۲۴/۵۳	۱/۴۰	۰/۵۳	۰/۶۸	۰/۵	۳۵/۶۸
PSO	۰/۱۶	۲۲/۴۷	۱/۴۸	۰/۴۵	۰/۵۹	۰/۵	۳۴/۰۱
BA	۰/۱۶	۲۲/۰۹	۱/۵۰	۰/۵۳	۰/۶۱	۰/۵	۳۳/۴۹
LINGO	۰/۱۶	۲۲/۲۰	۱/۴۹	۰/۴۸	۰/۶۱	۰/۵	۳۳/۵۴
LMM	۰/۲	۱۹/۱۲	۱/۶۵	۰/۵۳	۰/۶۹	۰/۵	۳۱/۳۳
PSO	۰/۲	۱۷/۸۳	۱/۷۴	۰/۵۲	۰/۶۹	۰/۵	۳۰/۲۹
BA	۰/۲	۱۷/۶۶	۱/۷۴	۰/۴۸	۰/۶۵	۰/۵	۲۹/۹۷
LINGO	۰/۲	۱۷/۷۶	۱/۷۴	۰/۳۸	۰/۴۵	۰/۵	۳۰/۰۰
LMM	۰/۲۶	۱۲/۹۳	۲/۱۷	۰/۵۲	۰/۶۶	۰/۵	۲۶/۶۴
PSO	۰/۲۶	۱۲/۳۷	۲/۲۵	۰/۵۱	۰/۶۶	۰/۵	۲۶/۶۵
BA	۰/۲۶	۱۱/۷۸	۲/۳۲	۰/۴۷	۰/۶۱	۰/۵	۲۵/۶۱
LINGO	۰/۲۶	۱۱/۸۸	۲/۳۱	۰/۴۸	۰/۶۰	۰/۵	۲۵/۶۷
LMM	۰/۳	۹/۷۰	۲/۶۹	۰/۴۸	۰/۶۱	۰/۵	۲۴/۵۲
PSO	۰/۳	۹/۳۷	۲/۷۵	۰/۴۹	۰/۶۲	۰/۵	۲۴/۳۷
BA	۰/۳	۹/۶۰	۲/۷۲	۰/۴۴	۰/۵۵	۰/۵	۲۴/۱۹
LINGO	۰/۳	۹/۵۲	۲/۷۳	۰/۴۶	۰/۵۶	۰/۵	۲۴/۲۰
LMM	۰/۳۶	۶/۶۰	۳/۸۲	۰/۳	۰/۳۵	۰/۵	۲۲/۹۶
PSO	۰/۳۶	۶/۳۷	۳/۹۶	۰/۲۹	۰/۳۴	۰/۵	۲۲/۹۳
BA	۰/۳۶	۶/۰۹	۴/۲۲	۰/۲۴	۰/۲۸	۰/۵	۲۲/۸۵
LINGO	۰/۳۶	۶/۲۸	۴/۱۷	۰/۲۲	۰/۲۵	۰/۵	۲۲/۸۵
LMM	۰/۴	-	-	-	-	-	-
PSO	۰/۴	۶/۲۰	۴/۷۱	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۵	۲۳/۲۵
BA	۰/۴	۶/۲۳	۴/۶۹	۰/۰۷	۰/۰۹	۰/۵	۲۳/۱۳
LINGO	۰/۴	۶/۱۸	۴/۷۱	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۵	۲۳/۱۳

مقدار هزینه، برای الگوریتم خفاش و روش لینگو تقریباً برابر است. با توجه به جدول ۷، مقدار هزینه ساخت کانال با افزایش احتمال سیلاب از مقدار ۰/۳۶ به بعد، افزایش می‌یابد.

در مورد ابعاد کانال نیز برای الگوریتم خفاش با افزایش احتمال سیلاب مقدار عرض بستر افزایش، مقدار عمق جریان کاهش و مقدار شیب دیواره‌ها نیز تا احتمال سیلاب ۰/۳ افزایش و بعد از آن کاهش می‌یابد. همانطور که بیان گردید، مقدار ارتفاع آزاد کانال به عنوان یک متغیر در نظر گرفته شده است. مقدار این متغیر با استفاده از الگوریتم خفاش برای احتمال سیلاب ۰/۰۱ دارای بیشترین مقدار (۲/۳۷) است. مقدار این متغیر با افزایش احتمال سیلاب تا مقدار ۰/۳۶ کاهش می‌یابد و بعد از آن برابر با مقدار ارتفاع آزاد حداقل، (۰/۵) می‌شود. این روند برای نرم‌افزار لینگو نیز مشاهده می‌شود که نشان دهنده کیفیت بالای نتایج حاصل از الگوریتم پیشنهادی است.

در جدول ۷، نتایج طراحی کانال باز برای مدل سوم با استفاده از الگوریتم خفاش و با در نظر گرفتن مقادیر مختلف برای احتمال سیلاب، نشان داده شده است. بیشترین مقدار هزینه کانال مربوط به احتمال سیلاب ۰/۰۱ و کمترین مقدار آن مربوط به احتمال سیلاب ۰/۳۶ می‌باشد. الگوریتم خفاش مقدار هزینه کانال را برای احتمال سیلاب ۰/۰۱ در حدود ۳۶/۵۵ محاسبه کرده است. این مقدار برای الگوریتم برنامه ریزی مرتبه دوم متوالی در حدود ۳۷/۱۷ بوده است. بنابراین استفاده الگوریتم خفاش در این مقدار احتمال سیلاب کانال، موجب کاهش هزینه در حدود ۱/۶۷٪ شده است. الگوریتم خفاش در مقایسه با روش لینگو نیز، این مقدار هزینه را در حدود ۰/۲۵٪ کمتر محاسبه کرده است.

مقدار هزینه ساخت کانال با استفاده از الگوریتم خفاش برای احتمال سیلاب ۰/۳۶، در حدود ۲۲/۸۵ می‌باشد که در مقایسه با الگوریتم برنامه ریزی مرتبه دوم متوالی در حدود ۰/۴۸٪ کاهش داشته است. این

جدول (۷): نتایج طراحی بهینه کانال برای مدل اول با استفاده از الگوریتم خفاش و سایر روش‌ها

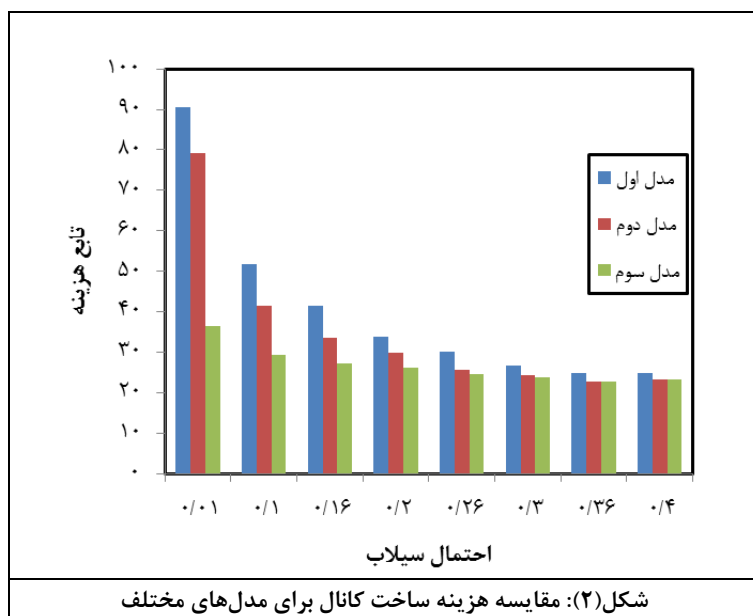
روش	احتمال	b	y	z <sub>1</sub>	z <sub>2</sub>	f	تابع هزینه
SQP	۰/۰۱	۱۰/۸۱	۲/۷۰	۰/۱۰	۰/۱۱	۲/۴۷	۳۷/۱۷
BA	۰/۰۱	۱۰/۸۳	۲/۶۸	۰/۱۱	۰/۱۳	۲/۳۷	۳۶/۵۵
LINGO	۰/۰۱	۱۰/۰۰	۲/۸۴	۰/۱۵	۰/۱۸	۲/۵۱	۳۶/۶۴
SQP	۰/۱	۹/۰۳	۲/۹۹	۰/۲۷	۰/۳۳	۱/۴۳	۲۹/۶۴
BA	۰/۱	۹/۲۲	۲/۹۴	۰/۲۷	۰/۳۲	۱/۳۷	۲۹/۲۲
LINGO	۰/۱	۹/۱۸	۲/۹۵	۰/۲۷	۰/۳۲	۱/۳۷	۲۹/۲۲
SQP	۰/۱۶	۸/۴۶	۳/۱۱	۰/۳۲	۰/۳۸	۱/۱۴	۲۷/۵۳
BA	۰/۱۶	۸/۵۸	۳/۰۷	۰/۳۲	۰/۳۷	۱/۱۰	۲۷/۱۹
LINGO	۰/۱۶	۸/۵۹	۳/۰۷	۰/۳۱	۰/۳۷	۱/۱۰	۲۷/۱۹
SQP	۰/۲	۸/۱۵	۳/۱۸	۰/۳۳	۰/۴۰	۰/۹۸	۲۶/۴۰
BA	۰/۲	۸/۲۵	۳/۱۵	۰/۳۴	۰/۴۰	۰/۹۴	۲۶/۱۰
LINGO	۰/۲	۸/۲۶	۳/۱۵	۰/۳۳	۰/۴۰	۰/۹۴	۲۶/۱۰
SQP	۰/۲۶	۷/۷۴	۳/۲۸	۰/۳۶	۰/۴۳	۰/۷۶	۲۴/۹۳
BA	۰/۲۶	۷/۸۹	۳/۲۴	۰/۳۶	۰/۴۲	۰/۷۳	۲۴/۶۵
LINGO	۰/۲۶	۷/۸۲	۳/۲۶	۰/۳۶	۰/۴۳	۰/۷۳	۲۴/۶۵
SQP	۰/۳	۷/۵۱	۳/۳۵	۰/۳۷	۰/۴۵	۰/۶۳	۲۴/۰۵
BA	۰/۳	۷/۴۷	۳/۳۵	۰/۳۸	۰/۴۵	۰/۶۱	۲۳/۸۵
LINGO	۰/۳	۷/۵۸	۳/۳۲	۰/۳۷	۰/۴۴	۰/۶۱	۲۳/۸۵
SQP	۰/۳۶	۶/۶۱	۳/۸۲	۰/۳۰	۰/۳۵	۰/۵	۲۲/۹۶
BA	۰/۳۶	۶/۲۷	۴/۱۷	۰/۲۲	۰/۲۵	۰/۵	۲۲/۸۵
LINGO	۰/۳۶	۶/۲۸	۴/۱۷	۰/۲۲	۰/۲۵	۰/۵	۲۲/۸۵
SQP	۰/۴	-	-	-	-	-	-
BA	۰/۴	۶/۰۳	۴/۷۷	۰/۱	۰/۱	۰/۵	۲۳/۱۳
LINGO	۰/۴	۶/۱	۴/۷۲	۰/۱	۰/۱	۰/۵	۲۳/۱۳

که با هزینه مدل دوم برابر است. همچنین این مقدار هزینه در مقایسه با مدل اول در تقریباً ۸ درصد کمتر محاسبه شده است. با افزایش مقدار احتمال سیلاب از مقدار ۰/۳۶ تا مقدار ۰/۴۰، مقدار هزینه ساخت مدل اول ۰/۲۰ درصد افزایش داشته است. این مقدار افزایش برای مدل دوم و سوم در حدود ۱/۲۳ درصد می‌باشد.

می‌توان چنین نتیجه گرفت که استفاده از مدل دوم نسبت به مدل اول موجب کاهش هزینه ساخت کانال شده است. این موضوع می‌تواند به دلیل استفاده از زبری مرکب به جای زبری یکنواخت، در مدل دوم باشد. همچنین استفاده از مدل سوم موجب کاهش هزینه ساخت کانال در مقایسه با مدل دوم شده است. این امر نیز به دلیل در نظر گرفتن ارتفاع آزاد به عنوان یک متغیر تصمیم در مدل سوم می‌باشد.

هزینه ساخت کانال توسط الگوریتم خفاش برای مدل‌های اول تا سوم، با در نظر گرفتن مقادیر مختلف برای احتمال سیلاب، در شکل ۲ نشان داده شده است. در این شکل بیشترین مقدار هزینه ساخت کانال برای سه مدل بررسی شده، مربوط به احتمال سیلاب ۰/۰۱ است. این مقدار هزینه برای مدل‌های اول، دوم و سوم به ترتیب در حدود ۹۰/۴۷، ۷۹/۲۴ و ۳۶/۵۵ می‌باشد. بنابراین استفاده از مدل سوم در مقایسه با مدل‌های اول و دوم موجب کاهش هزینه در حدود ۵۹/۶۰ و ۵۳/۸۷ درصد می‌شود.

با افزایش احتمال سیلاب کانال، تا مقدار ۰/۳۶، مقدار هزینه برای هر سه مدل، کاهش و بعد از آن افزایش می‌یابد. مقدار هزینه ساخت کانال برای مدل سوم در احتمال سیلاب ۰/۳۶، برابر با ۲۲/۸۵ می‌باشد



شکل (۲): مقایسه هزینه ساخت کانال برای مدل‌های مختلف

سیلاب استفاده شد. پس از انجام آنالیز حساسیت، الگوریتم خفاش برای مدل‌های مختلف و مقادیر مختلف احتمال اجرا شد. پانزده اجرای تصادفی برای سه مدل معرفی شده، در احتمال سیلاب ۰/۳۶، توسط الگوریتم خفاش انجام شد. سپس نمودارهای همگرایی جواب‌ها، ترسیم شد. در ادامه، نتایج حاصل از الگوریتم پیشنهادی با نتایج نرم افزار لینگو، روش‌های ضرایب لاگرانژ و برنامه‌ریزی متوالی و الگوریتم مدل معرفی

### نتیجه‌گیری

طراحی مقطع کانال دوزنقه‌ای به طوری که با کمترین هزینه در مقابل سیلاب نیز ایمن باشد، یکی از بحث‌های مهم آبیاری و آب است. در پژوهش حاضر، الگوریتم خفاش با در نظر گرفتن سه مدل مختلف برای طراحی اقتصادی کانال‌های آبیاری مبتنی بر احتمال سیلاب به کار گرفته شد. در هر سه مدل، از روش تحلیل مرتبه اول عدم قطعیت برای بررسی احتمال

حدود ۱۳/۹۷، ۱۲/۶۶ و ۱/۶۷٪ بود. همچنین الگوریتم خفاش در مقایسه با نرم افزار لینگو، قابلیت و دقت بالاتری در تعیین بهینه مطلق مسأله داشت. الگوریتم مذکور نسبت به نرم افزار لینگو، مقدار بهینه مسأله را تا ۰/۵۱ درصد کمتر محاسبه کرد.

۳- در میان مدل های مختلف، استفاده از مدل سوم، اقتصادی تر بود. استفاده از این مدل در مقایسه با سایر مدل های بررسی شده، موجب صرفه جویی چشمگیر در هزینه ساخت کانال به خصوص در پایین ترین مقدار احتمال سیلاب شد. این مقدار صرفه جویی برای مدل سوم نسبت به مدل اول و دوم به ترتیب برابر با ۵۹/۶۰ و ۵۳/۸۷ درصد بود. لذا در نظر گرفتن ارتفاع آزاد کانال به عنوان متغیر تصمیم، می تواند موجب کاهش هزینه ساخت کانال شود.

بنابراین الگوریتم خفاش دارای توانایی و پتانسیل بالا برای حل سایر مسائل بهینه سازی مربوط به آب می باشد.

شده، با لحاظ مقادیر مختلف احتمال سیلاب، ارزیابی گردید. اهم نتایج حاصل به شرح زیر است:

۱- برای هر سه مدل معرفی شده، مقدار ضریب تغییرات حاصل از اجراهای تصادفی در احتمال ۰/۳۶، بسیار پایین (نزدیک به صفر) بود. این مقدار برای مدل های اول، دوم و سوم به ترتیب برابر با ۰/۰۰۰۴۹، ۰/۰۰۰۲۳ و ۰/۰۰۰۱۹ محاسبه شد. همچنین، الگوریتم خفاش برای سه مدل معرفی شده، در سرعتی بالا (برابر با ۵۰۰ تکرار) همگرا شد.

۲- مشخص شد که بیشترین و کمترین مقدار هزینه به ترتیب مربوط به کمترین و بیشترین مقدار احتمال سیلاب در حدود ۰/۰۱ و ۰/۳۶ می باشد. الگوریتم خفاش توانست، در همه ی مقادیر احتمال سیلاب، مقدار هزینه ساخت کانال را نسبت به سایر روش های بهینه سازی کاهش دهد. این مقدار کاهش در هزینه ساخت کانال نسبت به روش ضرایب لاگرانژ، برنامه ریزی متوالی و الگوریتم ازدحام ذرات به ترتیب در

#### منابع

احترام، م.، کرمی، ح.، موسوی، س.، ف. فرزین، س و س، سرکمریان. ۱۳۹۶. ارزیابی عملکرد الگوریتم خفاش در بهینه سازی پارامترهای مدل غیرخطی ماسکینگام برای روندیابی سیلاب. نشریه اکوهیدرولوژی. دوره ۴، شماره ۴، ص ۱۰۳۲-۱۰۲۵

هاشمی شاهدانی، س.، م.، صادقی، س.، ا. ادیب مجد. ۱۳۹۵. بهره گیری از سامانه کنترل خودکار متمرکز به منظور بهبود عملکرد بهره برداری کانال اصلی تحت نوسانات شدید جریان ورودی؛ مطالعه موردی کانال اصلی شبکه رودشت. فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب. سال هفتم، شماره بیست و ششم، ص ۲۷-۱۴  
یخکشی، م.، مفتاح هلقی، م.، ظهیری، ع. یخکشی، م.، ا و م، مددی. ۱۳۹۳. نقش احداث سد مخزنی نرم آب بر کاهش پهنه سیل و خسارات وارده به اراضی پایین دست. فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب. سال چهارم، شماره شانزدهم، ص ۳۷-۲۴.

Adarsh, S. (2012). Modeling parametric uncertainty in optimal open channel design using FORM-PGSL coupled approach. Stochastic environmental research and risk assessment, 26(5): 709-720.

Ahmadianfar, I., Adib, A. and M, Salarijazi. 2015. Optimizing multireservoir operation: Hybrid of bat algorithm and differential evolution. Journal of Water Resources Planning and Management, 142(2): 05015010.

Bhattacharjya, R.K. 2006. Optimal design of open channel section incorporating critical flow condition. Journal of irrigation and drainage engineering, 132(5): 513-518.

Bhattacharjya, R.K and M.G, Satish. 2007. Optimal design of a stable trapezoidal channel section using hybrid optimization techniques. Journal of irrigation and drainage engineering, 133(4): 323-329.

Bhattacharjya, R.K. and M, Satish. 2008. Flooding probability-based optimal design of trapezoidal open channel using freeboard as a design variable. Journal of irrigation and drainage engineering, 134(3): 405-408.

- Bozorg-Haddad, O., Karimirad, I. Seifollahi-Aghmiuni, S and H.A, Loáiciga. 2014. Development and application of the bat algorithm for optimizing the operation of reservoir systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 141(8): 04014097.
- Das, A., 2000. Optimal channel cross section with composite roughness. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 126(1): 68-72.
- Das, A. 2007. Flooding probability constrained optimal design of trapezoidal channels. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 133(1): 53-60.
- Froehlich, D.C. 1994. Width and depth-constrained best trapezoidal section. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 120(4): 828-835.
- Gupta, S.K., Mishra, U. Datta, D and V.P, Singh. 2017. Fish shoal optimization for identification of the most suitable revetment stone for design of minimum cost earthen canals carrying sediment-laden flow. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 23(1):1-18.
- Horton, R.E. 1933. Separate roughness coefficients for channel bottom and sides. *Engineering News Record*, 111(22): 652-653.
- Jain, A., Bhattacharjya, R.K and S, Sanaga. 2004. Optimal design of composite channels using genetic algorithm. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 130(4): 286-295
- Kaveh, A and S, Talatahari. 2010. An improved ant colony optimization for constrained engineering design problems. *Engineering Computations*, 27(1): 155-182.
- Monadjemi, P. 1994. General formulation of best hydraulic channel section. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 120(1): 27-35.
- Orouji, H., Mahmoudi, N. Fallah-Mehdipour, E. Pazoki, M and A, Biswas. 2016. Shuffled Frog-Leaping Algorithm for Optimal Design of Open Channels. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 142(10): 06016008.
- Reddy, M.J and S, Adarsh. 2010. Overtopping probability constrained optimal design of composite channels using swarm intelligence technique. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 136(8): 532-542.
- Roushangar, K., Alami, M.T. Nourani, V and A, Nouri. 2017. A cost model with several hydraulic constraints for optimizing in practice a trapezoidal cross section. *Journal of Hydroinformatics*, 19(3): 456-468.
- Swamee, P.K., Mishra, G.C and B.R, Chahar. 2002. Design of minimum water-loss canal sections. *Journal of Hydraulic Research*, 40(2): 215-220.
- Trout, T.J. 1982. Channel design to minimize lining material costs. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers. Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 108(4): 242-249.
- Yang, X.S. 2010. A new metaheuristic bat-inspired algorithm. *Nature inspired cooperative strategies for optimization*. 284: 65-74.
- Yang, X.S and H.A, Gandomi. 2012. Bat algorithm: a novel approach for global engineering optimization. *Engineering Computations*, 29(5): 464-483.

## Optimization Modelling of Irrigation Channel Considering Flooding Conditions and Uncertainty

Saeed Farzin<sup>1\*</sup>, Hojat Karami<sup>2</sup>, Mahdi Valikhan Anaraki<sup>3</sup>, Mohammad Ehteram<sup>4</sup>

### Abstract

In the present study, for the first time, metaheuristic Bat Algorithm (BA) is proposed for design of irrigation-channel cross section with minimum construction costs and taking into account flood probability as a constraint and uncertain parameter. For this purpose, considering cross section of the channel with uniform and composite roughness and fixed and variable freeboard, three models are defined as: a) uniform roughness+ fixed freeboard, b) composite roughness+ fixed freeboard, and c) composite roughness+ variable freeboard. The proposed algorithm is implemented for the first to third models, based on the results of sensitivity analysis. Coefficient of variation and convergence speed of the 15 random runs of the mentioned algorithm is compared for 0.36 flood probability. At last, results of the mentioned algorithm for different flood probabilities have been compared with the results of Lingo software, Lagrange multiplier, sequential minimal programming and Particle Swarm Optimization Algorithm. Results of the random runs showed that coefficient of variation for the first to third models is 0.00049, 0.00019 and 0.00023, respectively, which are acceptable. Also, all three models converged after 500 iterations. Other results showed that using BA, with respect to other methods, increased optimization results up to 13.97 %. Furthermore, this algorithm estimated the global optimum up to 0.51% less than Lingo software. Among the three proposed models, using the third model saved construction costs by 59.6 and 53.87 percent, as compared to the first and second models, respectively.

**Keywords:** Irrigation channel, Optimization, Bat algorithm, Uncertainty, Flood probability, Lingo software.

<sup>1</sup> Assistant Professor, Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran. [saeed.farzin@semnan.ac.ir](mailto:saeed.farzin@semnan.ac.ir)

<sup>2</sup> Assistant Professor, Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

<sup>3</sup> M.Sc. Student of Water Resources Engineering and Management, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

<sup>4</sup> Ph.D student of Water Resources Engineering and Management, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.