

کاربرد الگوریتم خفاش به منظور طراحی اقتصادی کانال‌های باز

سعید فرزین^{۱*}، حجت کرمی^۲، مهدی ولیخان انارکی^۳، محمد احترام^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۰/۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۱/۱۶

چکیده

کانال‌های باز دارای نقش مهمی در انتقال آب و کنترل سیلاب هستند که البته هزینه زیادی به پروژه‌های آبرسانی تحمیل می‌کنند. در پژوهش حاضر برای نخستین بار، الگوریتم خفاش به منظور طراحی بهینه کانال‌های باز استفاده شد. بدین منظور، ۵ مدل مختلف در نظر گرفته شد. در مدل اول، از کانال دوزنقه‌ای و معادله مانینگ استفاده گردید. مدل دوم مانند مدل اول است اما مقطع کانال دوزنقه‌ای به دو بخش مثلثی و یک بخش مستطیلی تقسیم شد. در مدل سوم، سرعت حداکثر به عنوان یک محدودیت به مدل دوم اضافه شده. مدل چهارم مانند مدل دوم می‌باشد اما شیب جانبی مجاز به عنوان یک محدودیت لحاظ گردید. مدل پنجم نیز مانند مدل اول است اما عدد فرود به عنوان یک محدودیت اعمال شد. در مدل‌سازی‌ها، هزینه ساخت کانال به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شد. پارامترهای بهینه الگوریتم خفاش با استفاده از آنالیز حساسیت انتخاب شد. همچنین مقدار ضریب تغییرات حاصل از ده اجرای تصادفی برای مدل‌های مختلف در حدود ۰/۰۰۰۰۱ تا ۰/۰۰۰۱۷ می‌باشد. نتایج حاصل از الگوریتم پیشنهادی، با نتایج نرم‌افزار لینگو و همچنین چندین الگوریتم هوشمند رایج مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج، حاکی از آن است که جواب‌های حاصل از الگوریتم خفاش به طور قابل توجه به جواب‌های بهینه مطلق نرم‌افزار لینگو نزدیک می‌باشد. دقت این الگوریتم در مقایسه با سایر الگوریتم‌های تکاملی نیز بالاتر می‌باشد. با توجه به دیگر نتایج، استفاده از الگوریتم خفاش در مقایسه با سایر روش‌های فراابتکاری، موجب کاهش هزینه تا ۳۲٪ می‌گردد. در میان پنج مدل مورد بررسی، مدل دوم دارای کم‌ترین هزینه است. استفاده از مدل دوم بجای مدل اول موجب کاهش هزینه در حدود ۴۷٪ شد. از سوی دیگر، اضافه کردن محدودیت‌های سرعت مجاز، شیب مجاز و عدد فرود به مدل دوم موجب افزایش هزینه به ترتیب برابر ۶۵٪، ۳۹٪ و ۵۵٪ شد. همچنین الگوریتم پیشنهادی برای مدل‌های مختلف در ۱۰۰ تا ۵۰۰ تکرار همگرا شد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم خفاش، کانال‌های باز، طراحی بهینه، هزینه ساخت

مقدمه

کانال‌های باز از مهم‌ترین سیستم‌های عبور آب به شمار می‌روند که به منظور انتقال آب جهت تامین نیازهای کشاورزی، صنعت و شرب، کنترل سیلاب و زهکشی مورد استفاده قرار می‌گیرند. به دلیل وابستگی حیاتی بین اقتصاد جامعه و مسایل مربوط به آب، بررسی و مطالعه بحث آبیاری و زهکشی، به خصوص کانال‌های آبیاری امری غیرقابل انکار است (فرخی و همکاران، ۱۳۹۳). از آن‌جا که طول این کانال‌ها معمولاً زیاد است، کوچک‌ترین تغییر در ابعاد مقطع این کانال‌ها تأثیر زیادی در هزینه نهایی ساخت این سازه‌ها به دنبال دارد. به همین دلیل طراحی بهینه ابعاد مقطع این کانال‌ها از بحث‌های مهم مسایل آبیاری و زهکشی است.

فاکتورهای مختلفی مانند ضرایب زبری، شیب جانبی مجاز، حداکثر سرعت مجاز و عدد فرود در ابعاد مقطع بهینه کانال و هزینه تمام‌شده ساخت آن موثر هستند. همچنین بخش‌های مختلف کانال می‌تواند از مصالح مختلف با زبری متفاوت ساخته شود. تروت از زبری مرکب برای طراحی کانال استفاده کرد (Trout., 1982). کانال با ضرایب زبری مختلف در بستر به عنوان کانال با زبری مرکب شناخته می‌شود. داس از روش هورتون انیشتین برای تبدیل ضرایب زبری مختلف به ضریب زبری معادل استفاده کرد (Das., 2007a). در دهه‌های گذشته مدل‌های مختلف ریاضی برای طراحی بهینه کانال مورد استفاده قرار گرفته‌اند. روش ضرایب لاگرانژ با در نظر گرفتن محدودیت‌های مختلف برای تعیین مقطع بهینه کانال توسط فرلیچ مورد استفاده قرار گرفت که کاهش در هزینه ساخت کانال قابل ملاحظه بود (Froehlich., 1994). داس از روش ضرایب لاگرانژ برای به دست آوردن مقطع بهینه کانال استفاده کرد (Das., 2000). سوامی و همکاران تلفات نفوذ را به عنوان تابع هدف در طراحی بهینه مقطع کانال در نظر گرفتند (Swamee et al., 2000 a,b). به منظور زهکشی و کنترل سیلاب احتمال سرریز شدن کانال می‌تواند یک محدودیت مهم باشد زیرا سیلابی شدن کانال می‌تواند موجب خسارت

۱ و ۲- استادیار، گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان
۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان
۴- دانشجوی دکتری مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان
* - نویسنده مسئول: (Email: saeed.farzin@semnan.ac.ir)

ماسکینگام استفاده کردند. نتایج این تحقیق نشان از برتری این روش نسبت به الگوریتم‌های ژنتیک و ازدحام ذرات بود (احترام و همکاران، ۱۳۹۶).

با توجه به تحقیقات پیشین، مطالعات اندکی در مورد استفاده از الگوریتم خفاش در بهینه‌سازی مباحث مربوط به مدیریت منابع آب صورت گرفته است. این الگوریتم تاکنون در طراحی کانال‌های باز استفاده نشده است. از سوی دیگر، موضوع کاهش هزینه ساخت کانال‌های باز با استفاده از روش‌های نوین همواره از اهمیت زیادی برخوردار بوده است. بنابراین در پژوهش حاضر، پس از معرفی الگوریتم تکاملی خفاش، عملکرد و قابلیت این الگوریتم در طراحی بهینه و اقتصادی کانال‌های باز بررسی و تحلیل شد. در این راستا پس از تعریف پنج مدل مختلف و انجام آنالیز حساسیت برای مدل‌های مختلف، الگوریتم خفاش برای هر مدل ده بار اجرا شد. سپس نتایج حاصل از الگوریتم پیشنهادی با سایر روش‌ها و الگوریتم‌ها مقایسه گردید. در نهایت، پس از مقایسه دقت و کارایی روش‌های مختلف، سرعت همگرایی مدل‌ها محاسبه شد.

مواد و روش‌ها

مدل‌های تعریف شده جهت طراحی مقطع بهینه کانال

به منظور به دست آوردن مقطع بهینه کانال با استفاده از الگوریتم خفاش، پنج مدل به شرح ذیل تعریف شد.

۱. مدل اول (M1): کانال با سه ضریب زبری مختلف برای دیواره‌ها و بستر در نظر گرفته شد. معادله هورتون علاوه بر معادله مانینگ، برای تعیین زبری معادل به کار گرفته شد (Das., 2000).
۲. مدل دوم (M2): کانال به سه بخش شامل یک بخش مستطیلی و دو بخش مثلثی تقسیم شد. هر بخش دارای سرعت متوسط مجزا است و دبی کل برابر مجموع دبی هر بخش است (Jain et al., 2004).
۳. مدل سوم (M3): کانال مانند مدل ۲ به سه بخش تقسیم شد با این تفاوت که قید سرعت بیشینه اضافه شد. این قید باعث می‌شود سرعت در هر بخش از سرعت بیشینه تجاوز نکند (Jain et al., 2004).
۴. مدل چهارم (M4): کانال مانند مدل ۲ به سه بخش تقسیم شد اما شیب دیواره‌های کانال نباید از مقدار مجاز تجاوز کند (Reddy and Adarsh., 2010).
۵. مدل (M5): مانند مدل ۱ از معادله هورتون برای ضریب زبری معادل استفاده شد اما قید عدد فرود اضافه شد. این قید اجازه نمی‌دهد عدد فرود در کانال از مقدار حداکثر آن تجاوز کند (Bhattacharjya., 2006).

به نواحی مجاور شود. داس از احتمال سیلاب به عنوان محدودیت در بهینه‌سازی کانال به روش ضرایب لاگرانژ استفاده کرد. نتایج این پژوهش نشان داد که در نظر گرفتن این محدودیت موجب افزایش هزینه کانال می‌شود (Das., 2007b).

در سال‌های اخیر الگوریتم‌های فراابتکاری به صورت گسترده در مسایل بهینه‌سازی مختلف از جمله کانال‌های باز مورد استفاده قرار گرفته‌اند. جین و همکاران از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک برای طراحی مقطع کانال استفاده کردند. نتایج نشان داد که جواب‌های حاصل از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک از دقت خوبی نسبت به روش ضرایب لاگرانژ برخوردار است (Jain et al., 2004). نورانی و همکاران از الگوریتم مورچگان برای به دست آوردن مقطع بهینه کانال استفاده کردند. نتایج حاکی از کاهش هزینه ساخت کانال نسبت به الگوریتم ژنتیک در حدود ۰/۰۵ تا ۱/۳٪ بود (Nourani et al., 2009). ردی و آدراش الگوریتم ژنتیک و الگوریتم ازدحام ذرات را در بهینه‌سازی کانال باز به کار بردند و بیان داشتند که الگوریتم‌های فراابتکاری در مقایسه با روش ضرایب لاگرانژ از سرعت همگرایی بالاتری برخوردارند (Reddy and Adarsh., 2010). عروجی و همکاران الگوریتم بهینه‌سازی جهش قورباغه و نرم‌افزار لینگو را برای بهینه‌سازی مقطع کانال مورد استفاده قرار دادند. نتایج در مقایسه با مطالعات گذشته نشان از کاهش هزینه ساخت کانال در حدود ۱/۳۴ تا ۲۶/۱۴٪ برای نرم‌افزار لینگو و ۰/۶۳ تا ۲۳/۴۳٪ برای الگوریتم بهینه‌سازی جهش قورباغه بود (Orouje et al., 2016). روشنگر و همکاران قیده‌های مختلف هیدرولیکی رادر مسئله بهینه‌سازی کانال ذوزنقه‌ای با استفاده از الگوریتم ژنتیک بررسی کردند. نتایج نشان داد در نظر گرفتن قیده‌های سرعت و عدد فرود باعث افزایش هزینه ساخت کانال می‌شود (Roushangar et al., 2017).

از الگوریتم‌های فراابتکاری جدید و موفق، الگوریتم بهینه‌سازی خفاش است. این الگوریتم در سال‌های اخیر به صورت گسترده در مسایل مهندسی به خصوص مسایل مربوط به آب استفاده شده است. یانگ از الگوریتم خفاش برای حل چندین تابع بنج مارک پیچیده استفاده کرد که نتایج نشان از نزدیک بودن جواب‌های به دست آمده به جواب‌های سراسری و سرعت بالای همگرایی این الگوریتم نسبت به الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات بود (Yang., 2010). نیکنام و همکاران از الگوریتم خفاش برای بهینه‌سازی تولید انرژی توسط نیروگاه استفاده کردند. نتایج نشان داد که این روش باعث تولید انرژی بیش‌تر نسبت به الگوریتم ژنتیک می‌شود (Niknam et al., 2013). بزرگ حداد و همکاران از الگوریتم خفاش برای بهینه‌سازی سیستم چند مخزنه استفاده کردند که نتایج نشان داد این الگوریتم نسبت به الگوریتم ژنتیک در حدود ۹/۶٪ به بهینه سراسری حاصل از روش غیرخطی نزدیک‌تر است (Bozorg- Hadad et al., 2014). احترام و همکاران از الگوریتم خفاش برای بهینه‌سازی پارامترهای مدل

معرفی الگوریتم خفاش

الگوریتم خفاش بر اساس پژواک صدا و موقعیت خفاش عمل می‌کند. خفاش پالس‌های صوتی تولید می‌کند و پژواک آن‌ها را دریافت می‌کند. خفاش‌ها دارای این توانایی هستند که بر اساس پژواک، مانع را از شکار تشخیص دهند. زیرا پژواک صوت تولید شده برای اشیاء مختلف متفاوت است و گوش‌های آن‌ها با استفاده از این روش موقعیت را تشخیص می‌دهند. الگوریتم خفاش بر اساس سه گام اساسی زیر عمل می‌کند:

۱- همه خفاش‌ها می‌توانند صدا تولید کنند و پژواک آن را دریافت کنند. آن‌ها بر اساس این توانایی می‌توانند منبع غذا و مانع را از یکدیگر تشخیص دهند.

۲- خفاش‌ها به صورت تصادفی پرواز می‌کنند و در حین پرواز دارای سرعت V_i در موقعیت X_i و فرکانس ثابت f_{min} و طول موج λ هستند. هم‌چنین آن‌ها می‌توانند پالس‌های صوتی با مقداری بین ۰ و ۱ تولید کنند.

۳- بلندی صدای خفاش‌ها می‌تواند از یک مقدار بزرگ مثبت A_0 تا یک مقدار کوچک مثبت A_{min} تغییر کند.

می‌توان فرض کرد مقدار فرکانس f می‌تواند بین دو مقدار f_{min} و f_{max} و طول موج متناظر با آن نیز بین λ_{min} و λ_{max} تغییر کند. هم‌چنین دامنه طول موج می‌تواند متغیر باشد. طول موج باید بر اساس فضای جستجوی مسئله انتخاب شود. در الگوریتم خفاش به‌عنوان جواب سراسری مسئله یا بهترین موقعیت خفاش‌ها در نظر

گرفته شده است. معادله ۱ تا ۳ به ترتیب فرکانس، سرعت و موقعیت به روز شده خفاش‌ها را نشان می‌دهد.

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

$$v_i' = v_i^{t-1} + (x_i^{t-1} - x_{best})f_i \quad (2)$$

$$x_i' = x_i^{t-1} + v_i' \quad (3)$$

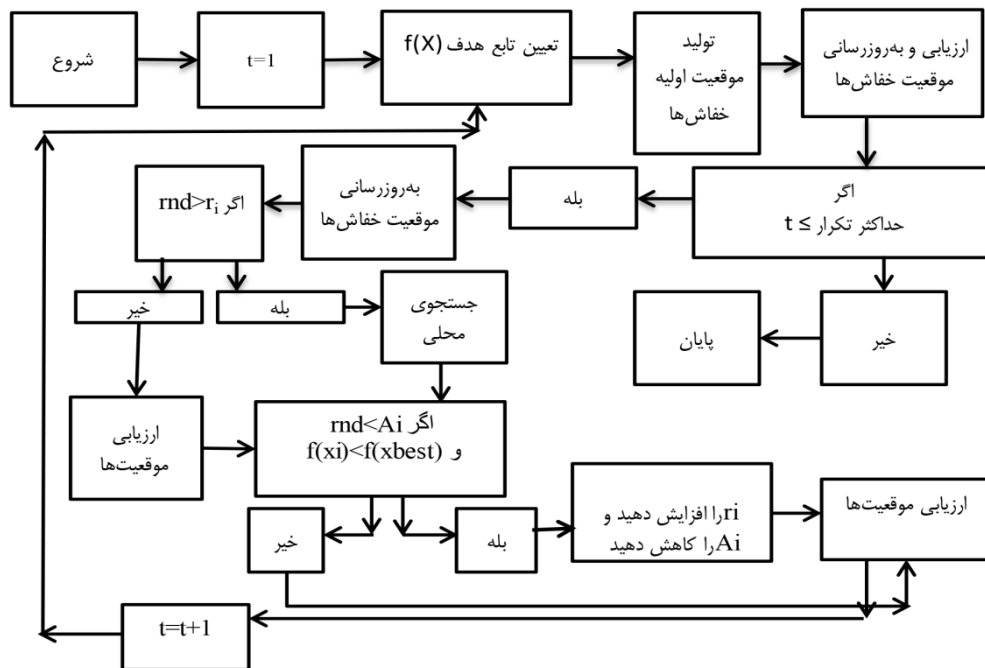
f_i فرکانس i امین خفاش، v_i' سرعت جدید i امین خفاش، v_i^{t-1} سرعت قبلی i امین خفاش، x_i^{t-1} موقعیت قبلی i امین خفاش، x_i^{t-1} موقعیت قبلی i امین خفاش و β یک بردار تصادفی با آرایه-های بین ۰ و ۱ است. اول، یک عدد تصادفی بین f_{min} و f_{max} به هر خفاش اختصاص داده می‌شود. سپس سرعت و موقعیت خفاش بر اساس رابطه ۲ و ۳ به‌روز می‌شود. در ادامه، یک عدد تصادفی تولید می‌گردد. در صورتی‌که مقدار نرخ تولید پالس از این عدد تصادفی کوچک‌تر باشد، جستجوی محلی با استفاده از تولید یک گام تصادفی براساس رابطه ۴ انجام می‌شود:

$$x_i' = x_i^{t-1} + \varepsilon A^t \quad (4)$$

ε یک عدد تصادفی است و A^t میانگین بلندی صدا است. زمانی‌که خفاش‌ها شکار را پیدا می‌کنند، بلندی صدا کاهش و نرخ تولید پالس افزایش پیدا می‌کند. بلندی صدا و نرخ تولید پالس به‌صورت رابطه ۵ محاسبه می‌شود:

$$r_i^{t+1} = r_i^0 [1 - \exp(-\gamma t)] A_i^{t+1} = \alpha A_i^t, t = 1, \dots, T \quad (5)$$

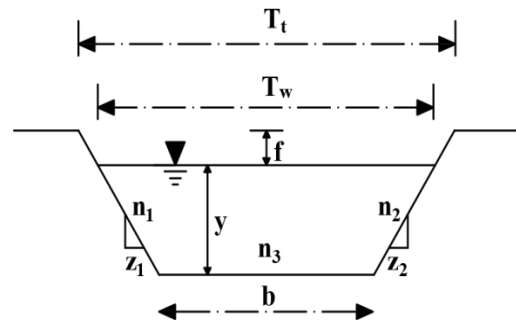
γ و α پارامترهای ثابت هستند. مراحل عملکرد الگوریتم خفاش در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- مراحل اجرای الگوریتم خفاش

مدل سازی مسئله

در شکل ۲، مدل های اول و پنجم نشان داده شده است. $z_1:1$ و $z_2:1$ شیب دیواره ها هستند. ضرایب زبری n_1 ، n_2 و n_3 معرف ضریب زبری دیواره ها و بستر هستند. b ، h و f به ترتیب نشان دهنده عرض بستر، عمق جریان و ارتفاع آزاد کانال هستند. همچنین A_w ، P_w و T_w و n_e به ترتیب مساحت جریان، محیط مرطوب شده، عرض بالای کانال و ضریب زبری معادل هستند. پارامترهای هیدرولیکی در روابط ۶ تا ۹ محاسبه می شوند.



شکل ۲- مقطع کانال دوزنقه ای برای مدل اول و پنجم

$$A_w = by + (z_1 + z_2) \frac{y^2}{2} \quad (۶)$$

$$P_w = \left\{ \left[(z_1^2 + 1)^{\frac{1}{2}} + (z_2^2 + 1)^{\frac{1}{2}} \right] y + b \right\} \quad (۷)$$

$$T_w = b + (z_1 + z_2)y \quad (۸)$$

$$n_e = \left[\frac{\left(\sqrt{z_1^2 + 1} n_1^{\frac{3}{2}} + \sqrt{z_2^2 + 1} n_2^{\frac{3}{2}} \right) y + b n_3^{\frac{3}{2}}}{P_w} \right] \quad (۹)$$

مساحت کل A_t ، محیط کل P_t و عرض بالای کانال T_t در روابط ۱۰ تا ۱۲ محاسبه شده اند:

$$P_t = \left\{ \left[(z_1^2 + 1)^{\frac{1}{2}} + (z_2^2 + 1)^{\frac{1}{2}} \right] (y + f) + b \right\} \quad (۱۰)$$

$$A_t = (y + f)b + \left(\frac{z_1 + z_2}{2} \right) (y + f)^2 \quad (۱۱)$$

$$T_t = b + (z_1 + z_2)(y + f) \quad (۱۲)$$

در روابط ۱۳ تا ۱۶ متغیرهای P_1 و P_2 طول دیواره ها را مشخص می کنند و P_3 نشان دهنده عرض بستر کانال است. A_{w1} ، A_{w2} و A_{w3} به ترتیب مساحت بخش های اول، دوم و سوم مقطع جریان (با توجه به شکل ۳) را نشان می دهند.

$$P_1 = \sqrt{(1 + z_1^2)} (y + f) \quad (۱۳)$$

$$P_2 = \sqrt{(z_2^2 + 1)} (y + f) \quad (۱۴)$$

$$P_3 = b \quad (۱۵)$$

$$A_{w1} = \frac{z_1 y_1^2}{2}, A_{w2} = \frac{z_2 y_2^2}{2}, A_{w3} = by \quad (۱۶)$$

معادله مانینگ برای محاسبه دبی تخلیه بر اساس پارامترهای هیدرولیکی کانال به کار می رود. این معادله به شکل رابطه ۱۷ در نظر گرفته شده است:

$$\frac{Qn}{\sqrt{S_0}} = \frac{A^{\frac{5}{3}}}{P^{\frac{3}{2}}} \quad (۱۷)$$

که Q مجموع دبی تخلیه از کانال ($m^3 \cdot s^{-1}$)، S_0 شیب بستر، A سطح مقطع کانال، P محیط مرطوب شده و n ضریب زبری است. تابع هدف مربوط به هزینه ساخت کانال به شکل رابطه ۱۸ بیان شده است:

$$f_{cost}(b, h, z_1, z_2) = c_1 A_1 + c_2 P_1 + c_3 P_2 + c_4 P_3 \quad (۱۸)$$

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 دیواره های جانبی و عرض بستر کانال است.

الگوریتم فراابتکاری با یک تابع هدف در نظر گرفته شده است و روش پناستی برای در نظر گرفتن قیدها استفاده شده است. تابع پناستی برای مدل M1 به شکل رابطه ۱۹ در نظر گرفته شده است:

$$f_{penalty}(b, y, z_1, z_2) = \left| \frac{Qn_e}{\sqrt{S_0}} - \frac{A_w^{\frac{5}{3}}}{P_w^{\frac{3}{2}}} \right| - \varepsilon_1 \geq 0 \quad (۱۹)$$

ε_1 مقدار خطایی قابل قبول است. مقدار n_e به شکل رابطه ۲۰ محاسبه می شود:

$$n_e = \left\{ \frac{\left[(1 + z_1^2)^{\frac{1}{2}} n_1^{\frac{3}{2}} + (1 + z_2^2)^{\frac{1}{2}} n_2^{\frac{3}{2}} \right] y + b n_3^{\frac{3}{2}}}{P_w} \right\} \quad (۲۰)$$

در مدل دوم که کانال به دو بخش مثلثی و یک بخش مستطیلی تقسیم شده است، تابع پناستی به شکل رابطه ۲۱ در نظر گرفته شده است:

$$(۲۱)$$

$$f_{penalty} = \left| \frac{Q}{\sqrt{S_0}} - \frac{A_{w1}^{\frac{5}{3}}}{n_1 (\sqrt{1 + z_1^2} h)^{\frac{2}{3}}} - \frac{A_{w2}^{\frac{5}{3}}}{n_2 b^{\frac{2}{3}}} - \frac{A_{w3}^{\frac{5}{3}}}{n_3 b^{\frac{2}{3}}} \right| - \varepsilon_1 \geq 0$$

تابع هدف با در نظر گرفتن $f_{penalty}$ به صورت رابطه ۲۲ بیان می شود:

$$f_{fitness} = (1 + \varepsilon_2 f_{penalty})^{\varepsilon_3} \times f_{cost} \quad (۲۲)$$

که ε_2 و ε_3 به عنوان ضرایب پویش و انتفاع در نظر گرفته شده اند.

جدول ۱، پارامترهای مدل‌های مختلف بر اساس مراجع (Das., 2000; Jain et al., 2004; Nourani et al., 2009; Orouje et al., 2016) را نشان می‌دهد. در این جدول، پارامترهای جریان شامل دبی و شیب طولی کانال، ضرایب مانینگ و ضرایب هزینه برای بخش‌های مختلف کانال آمده است.

جدول ۱- پارامترهای طراحی کانال

پارامترها	علامت اختصاری	مقدار
	پارامتر	
	Q(m ³ /s)	۱۰۰
مشخصات جریان	S0	۰/۰۰۱۶
	f(m)	۰/۵
	n ₁	۰/۰۱۸
ضرایب مانینگ	n ₂	۰/۰۲
	n ₃	۰/۰۱۵
	c1	۰/۶
	c2	۰/۲۵
ضرایب هزینه	c3	۰/۲
	c4	۰/۳

نتایج و بحث

در جدول ۲ حدود پایین و بالا در نظر گرفته شده برای متغیرهای تصمیم آورده شده است. با توجه به این جدول، حد پایین متغیر عرض بستر برابر با ۱ متر و حد بالایی آن برابر با ۲۰ متر در نظر گرفته شد. حدود پایین و بالای ارتفاع جریان به ترتیب برابر ۱ و ۲۰ متر می‌باشد. در مورد شیب دیوار اول و دوم نیز حدود پایین و بالا برابر با ۰/۱ و ۲ قرار داده شد.

جدول ۲- حدود پایین و بالا متغیرهای تصمیم

متغیرهای تصمیم	مرز پایین	مرز بالا
b(m)	۱	۲۰
h(m)	۱	۲۰
z1	۰/۱	۲
z2	۰/۱	۲

آنالیز حساسیت برای مدل‌های مختلف با پارامترهای مختلف انجام شد که نتایج در جدول ۳ آورده شده است. با توجه به نتایج، بهترین جمعیت خفاش‌ها برای همه مدل‌ها برابر ۱۰۰ می‌باشد. با کاهش جمعیت اولیه، کیفیت جواب‌ها کاهش پیدا می‌کند. افزایش جمعیت از مقدار ۱۰۰ به ۱۵۰ نیز موجب کاهش کیفیت جواب‌ها می‌گردد. مقدار فرکانس حداکثر نیز برای مدل‌های ۱ و ۴ برابر ۱ است. این مقدار برای مدل‌های ۲، ۳ و ۵ نیز برابر با ۲ می‌باشد. به طور کلی مشاهده شد مقادیر بالا برای فرکانس حداکثر موجب کاهش کیفیت جواب‌ها می‌شود. بهترین مقدار فرکانس حداقل برای مدل ۳ برابر ۰/۱ و برای

در مدل سوم، حداکثر سرعت مجاز به شکل رابطه ۲۳ تا ۲۵ در نظر گرفته شده است:

$$f'_{penalty}(z_1, h) = V_{1max} - V_1 \geq 0 \quad (23)$$

$$f''_{penalty}(z_1, h) = V_{2max} - V_2 \geq 0 \quad (24)$$

$$f'''_{penalty}(z_1, h) = V_{3max} - V_3 \geq 0 \quad (25)$$

که V_{1max} ، V_{2max} و V_{3max} به ترتیب به عنوان سرعت مجاز در بخش‌ها یک، دو و سه در نظر گرفته شده‌اند که به ترتیب برابر ۱، ۲ و ۳/۵ متر بر ثانیه هستند. مقادیر V_1 ، V_2 و V_3 نیز با استفاده از رابطه ۲۶ حاصل می‌شوند:

$$V_1 = \frac{\sqrt{S_0}}{n_1} \left(R_1^{\frac{2}{3}} \right), V_2 = \frac{\sqrt{S_0}}{n_2} \left(R_2^{\frac{2}{3}} \right), V_3 = \frac{\sqrt{S_0}}{n_3} \left(R_3^{\frac{2}{3}} \right) \quad (26)$$

ضرایب زبری به ترتیب برابر $n_1=0.18/0$ ، $n_2=0.2/0$ و $n_3=0.15/0$ است (Jain et al., 2004). تابع هدف به شکل رابطه ۲۷ در نظر گرفته شده است.

$$f'_{fitness} = [1 + \epsilon_2 (f'_{penalty} + f''_{penalty} + f'''_{penalty})]^{\epsilon_3} f_{cost}$$

در مدل چهارم مانند مدل دوم، کانال به سه بخش تقسیم شده است و محدودیت شیب دیواره‌های جانبی به شکل روابط ۲۸ تا ۳۱ به مدل افزوده شده است.

$$f'_{penalty} = z_1 - z_{min} \geq 0 \quad (28)$$

$$f''_{penalty} = z_2 - z_{min} \geq 0 \quad (29)$$

$$f'''_{penalty} = z_{max} - z_1 \geq 0 \quad (30)$$

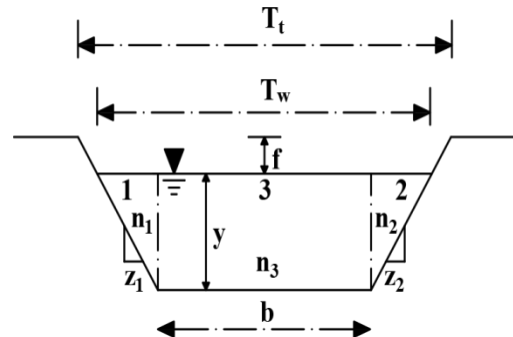
$$f''''_{penalty} = z_{max} - z_2 \geq 0 \quad (31)$$

در مدل پنجم، مقدار عدد فرود نباید از عدد حداکثر تجاوز کند. عدد فرود حداکثر Fr_{max} برابر با ۱ در نظر گرفته شده است. تابع پنتالتی برای این مدل به شکل رابطه ۳۲ بیان می‌شود:

$$f'_{penalty} = Fr_{max} - Fr \quad (32)$$

$$f'_{fitness} = [1 + \epsilon_2 (f'_{penalty} + f''_{penalty})]^{\epsilon_3} f_{cost}$$

شکل ۳ مشخصات مدل‌های دوم، سوم و چهارم را نشان می‌دهد.



شکل ۳- طرح شماتیک مدل‌های دوم، سوم و چهارم

حداقل بهترین جواب برای مدل ۱ و ۴ برابر با ۰/۲ است. بهترین مقدار بلندی صدای حداقل نیز برای مدل‌های ۲، ۳ و ۵ برابر با ۰/۱ است. همچنین مشاهده شد که برای همه مدل‌ها افزایش مقدار بلندی صدا بعد از مقدار ۰/۳، موجب کاهش کیفیت جواب‌ها گردید. فرکانس حداقل نیز از ۰/۱ تا ۰/۲ افزایش داشت.

مدل‌های ۱، ۲، ۴ و ۵ برابر با ۰/۲ می‌باشد. برای همه مدل‌ها، افزایش فرکانس حداقل، بعد از مقدار ۰/۲، با کاهش دقت الگوریتم خفاش همراه است. بهترین مقدار بلندی صدا حداکثر در مدل‌های ۱، ۲ و ۵ برابر ۰/۶ و در مدل‌های ۳ و ۴ برابر با ۰/۸ است. کاهش بلندی صدای حداکثر نیز موجب کاهش دقت جواب‌ها شد. برای بلندی صدای

جدول ۳- نتایج آنالیز حساسیت الگوریتم خفاش برای مدل‌های مختلف و پارامترهای مختلف

پارامترها	مدل ۱	مدل ۲	مدل ۳	مدل ۴	مدل ۵
اندازه جمعیت	تابع هزینه	تابع هزینه	تابع هزینه	تابع هزینه	تابع هزینه
۲۵	۱۹/۴۸۸	۱۱/۲۸۳	۲۹/۷۸۲	۱۶/۸۶۱	۲۲/۸۵۹
۵۰	۱۹/۴۷۲	۱۰/۴۰۴	۲۹/۵۷۴	۱۶/۸۵۱	۲۲/۷۳۱
۷۵	۱۹/۴۶۸	۱۰/۳۹۸	۲۹/۳۵۱	۱۶/۸۰۱	۲۲/۷۲۲
۱۰۰	۱۹/۴۶۷	۱۰/۳۴۰	۲۹/۳۳۵	۱۶/۸۰۰	۲۲/۷۲۲
۱۵۰	۱۹/۴۶۸	۱۰/۳۴۹	۲۹/۳۴۲	۱۶/۸۰۱	۲۲/۷۲۳
فرکانس حداکثر	تابع هزینه	تابع هزینه	تابع هزینه	تابع هزینه	تابع هزینه
۱	۱۹/۴۶۸	۱۰/۲۴۰	۲۹/۳۳۶	۱۶/۸۰۰	۲۲/۷۲۲
۲	۱۹/۴۷۰	۱۰/۲۸۴	۲۹/۳۳۵	۱۶/۸۰۱	۲۲/۷۳۱
۳	۱۹/۴۷۱	۱۰/۵۸۶	۲۹/۴۰۷	۱۶/۸۰۱	۲۲/۷۲۲
۴	۱۹/۴۷۶	۱۰/۶۷۰	۲۹/۴۶۹	۱۶/۸۰۲	۲۲/۷۲۳
فرکانس حداقل	تابع هزینه	تابع هزینه	تابع هزینه	تابع هزینه	تابع هزینه
۰/۱	۱۹/۴۷۱	۱۰/۲۴۱	۲۹/۴۷۸	۱۶/۸۰۰	۲۲/۷۲۲
۰/۲	۱۹/۴۶۷	۱۰/۲۳۹	۲۹/۳۳۵	۱۶/۸۰۱	۲۲/۷۳۱
۰/۳	۱۹/۴۷۰	۱۰/۵۲۷	۲۹/۷۹۳	۱۶/۸۸۰	۲۲/۷۲۲
۰/۴	۱۹/۴۸۲	۱۱/۰۲۳	۳۰/۳۶۹	۱۷/۰۰۴	۲۲/۷۲۶
بیش‌ترین بلندی صدا	تابع هزینه	تابع هزینه	تابع هزینه	تابع هزینه	تابع هزینه
۰/۲	۱۹/۴۷۱	۱۰/۲۶۰	۲۹/۵۰۷	۱۶/۸۹۵	۲۲/۷۲۲
۰/۴	۱۹/۴۷۱	۱۰/۲۴۳	۲۹/۳۹۷	۱۶/۸۰۱	۲۲/۷۲۲
۰/۶	۱۹/۴۶۸	۱۰/۲۳۹	۲۹/۳۳۶	۱۶/۸۰۱	۲۲/۷۳۱
۰/۸	۱۹/۴۶۹	۱۰/۲۴۹	۲۹/۳۳۵	۱۶/۸۰۰	۲۲/۷۲۲
کم‌ترین بلندی صدا	تابع هزینه	تابع هزینه	تابع هزینه	تابع هزینه	تابع هزینه
۰/۱	۱۹/۴۷۱	۱۰/۲۵۵	۲۹/۴۱۴	۱۶/۸۰۱	۲۲/۷۲۲
۰/۲	۱۹/۴۶۷	۱۰/۲۴۵	۲۹/۴۰۶	۱۶/۸۰۱	۲۲/۷۳۱
۰/۳	۱۹/۴۶۸	۱۰/۲۳۹	۲۹/۳۳۵	۱۶/۸۰۰	۲۲/۷۲۲
۰/۴	۱۹/۴۷۱	۱۰/۲۴۳	۲۹/۳۳۶	۱۶/۸۰۱	۲۲/۷۲۲

تغییرات در تمامی مدل‌ها، نشان‌دهنده این موضوع است که الگوریتم خفاش تنها با یک بار اجرا تصادفی توانایی به دست آوردن جواب بهینه مساله را دارد. در ادامه از نرم‌افزار لینگو برای به دست آوردن مقطع بهینه کانال استفاده شد. در این نرم‌افزار از روش غیرخطی به منظور حل مسئله استفاده گردید. این نرم‌افزار توانایی به دست آوردن

در جدول ۴ نتایج ۱۰ اجرای تصادفی براساس الگوریتم خفاش آورده شده است. در این جدول، کم‌ترین ضریب تغییرات برای مدل ۳ و برابر با ۰/۰۰۰۰۱ و بیش‌ترین آن برای مدل ۴ و برابر با ۰/۰۰۰۱۷ است. ضریب تغییرات برای مدل‌های ۱، ۲ و ۳ نیز به ترتیب برابر ۰/۰۰۰۱، ۰/۰۰۰۰۲، ۰/۰۰۰۰۴ محاسبه شد. مقدار کوچک ضریب

جواب نرم‌افزار لینگو آن است که الگوریتم خفاش، قابلیت و کاربرد وسیعی در حل مسایل پیچیده غیرخطی دارد. هم‌چنین، کار با این الگوریتم نسبت به نرم‌افزار لینگو، ساده‌تر می‌باشد. از سوی دیگر، نرم‌افزار لینگو دارای محدودیت‌هایی در تعریف تعداد متغیرهای تصمیم و قیود مساله است که الگوریتم خفاش این محدودیت‌ها را ندارد.

بهینه مطلق را دارد و معیار خوبی برای مقایسه با جواب‌های حاصل از الگوریتم خفاش است. با توجه به جدول ۴، برای همه مدل‌ها، جواب‌های الگوریتم خفاش در مقایسه با جواب‌های بهینه مطلق حاصل از نرم‌افزار لینگو از انطباق کامل برخوردار هستند. این امر حاکی از عملکرد موفق الگوریتم خفاش در به‌دست آوردن جواب بهینه مطلق مساله می‌باشد. دلیل استفاده از الگوریتم فراابتکاری خفاش با وجود

جدول ۴- نتایج ۱۰ اجرای تصادفی برای مدل ۵

تعداد اجرای الگوریتم خفاش	مدل ۱	مدل ۲	مدل ۳	مدل ۴	مدل ۵
۱	۱۹/۴۷۰	۱۰/۲۳۹	۲۹/۳۳۵	۱۶/۸۰۰	۲۲/۷۲۰
۲	۱۹/۴۶۷	۱۰/۲۳۹	۲۹/۳۳۵	۱۶/۸۰۰	۲۲/۷۲۲
۳	۱۹/۴۶۶	۱۰/۲۳۹	۲۹/۳۳۵	۱۶/۸۰۰	۲۲/۷۲۱
۴	۱۹/۴۶۸	۱۰/۲۴۰	۲۹/۳۳۵	۱۶/۸۰۰	۲۲/۷۲۱
۵	۱۹/۴۷۰	۱۰/۲۳۹	۲۹/۳۳۵	۱۶/۸۰۰	۲۲/۷۲۰
۶	۱۹/۴۶۷	۱۰/۲۳۹	۲۹/۳۳۴	۱۶/۸۰۰	۲۲/۷۲۱
۷	۱۹/۴۷۲	۱۰/۲۳۹	۲۹/۳۳۴	۱۶/۸۰۰	۲۲/۷۲۱
۸	۱۹/۴۷۴	۱۰/۲۴۰	۲۹/۳۳۵	۱۶/۸۰۰	۲۲/۷۲۳
۹	۱۹/۴۶۷	۱۰/۲۳۹	۲۹/۳۳۴	۱۶/۸۰۱	۲۲/۷۲۱
۱۰	۱۹/۴۶۶	۱۰/۲۳۹	۲۹/۳۳۵	۱۶/۸۰۰	۲۲/۷۲۱
بدترین جواب	۱۹/۴۷۴	۱۰/۲۴۰	۲۹/۳۳۴	۱۶/۸۰۹	۲۲/۷۲۳
بهترین جواب	۱۹/۴۶۶	۱۰/۲۳۹	۲۹/۳۳۵	۱۶/۸۰۰	۲۲/۷۲۰
مقدار متوسط	۱۹/۴۶۹	۱۰/۲۳۹	۲۹/۳۳۵	۱۶/۸۰۱	۲۲/۷۲۱
ضریب تغییرات	۰/۰۰۰۱۰	۰/۰۰۰۰۲	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱۷	۰/۰۰۰۰۴
جواب بهینه سراسری با استفاده از روش غیرخطی	۱۹/۴۶	۱۰/۲۳۹	۲۹/۳۳۴	۱۶/۸۰۰	۲۲/۷۲۰

2009) و جهش قورباغه (Orouji et al., 2016) در حدود ۲/۵٪، ۲/۳٪ و ۱/۱٪ کم‌تر شد.

نتایج نشان می‌دهد استفاده از الگوریتم خفاش در مدل چهارم، موجب صرفه‌جویی هزینه ساخت کانال به مقدار ۱۹/۷٪ و ۱٪ نسبت به الگوریتم کلونی مورچگان و الگوریتم جهش قورباغه گردیده است. در مورد مدل پنجم نیز، هزینه ساخت کانال با استفاده از الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با روش ضرایب لاگرانژ (Bhattacharjya., 2006) در حدود ۱٪ کم‌تر بود.

در جدول ۶، پارامترهای طراحی کانال برای مدل‌های مختلف با استفاده از الگوریتم خفاش (BA) و مقایسه آن با روش لینگو نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که هزینه کل ساخت کانال با استفاده از الگوریتم خفاش، برای مدل ۲ دارای کم‌ترین مقدار (۱۰/۲۳۹) می‌باشد. این مقدار هزینه، نسبت به مدل‌های ۱، ۳، ۴ و ۵ در حدود ۴۷٪، ۶۵٪، ۳۹٪ و ۵۵٪ کم‌تر است.

مساحت کل برای مدل ۲ برابر ۱۲/۱۳۶ مترمربع است که از مدل‌های ۱، ۳، ۴ و ۵ در حدود ۵۴٪، ۶۸٪، ۴۷٪ و ۶۱٪ کم‌تر می‌باشد. هم‌چنین مقدار مساحت کل با استفاده از نرم‌افزار لینگو برای

در جدول ۵ نتایج استفاده از الگوریتم خفاش از نظر هزینه ساخت، با سایر روش‌ها و الگوریتم‌ها مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که هزینه ساخت مدل اول با استفاده از الگوریتم خفاش برابر ۱۹/۴۶۶ محاسبه شد. این هزینه با استفاده از روش ضرایب لاگرانژ (Das, 2000) برابر ۲۲/۹۵۸ بود. بنابراین هزینه ساخت کانال بر اساس الگوریتم خفاش نسبت به روش لاگرانژ، در حدود ۱۵٪ کم‌تر می‌باشد. این کاهش هزینه، در مقایسه با نتایج حاصل از الگوریتم‌های ژنتیک (Jain et al., 2004.) و کلونی مورچگان (Nourani et al., 2009) به ترتیب در حدود ۱۵/۳٪ و ۱۵/۲٪ می‌باشد.

مطابق جدول ۵، هزینه ساخت کانال برای مدل دوم با استفاده از الگوریتم خفاش برابر ۱۰/۲۳۹ برآورد شد. این هزینه در مقایسه با الگوریتم‌های ژنتیک (Jain, et al., 2004.)، کلونی مورچگان (Nourani et al., 2009) و جهش قورباغه (Orouji et al., 2016) به ترتیب در حدود ۳۲٪، ۳۱٪ و ۱۰٪ کاهش داشت.

هزینه ساخت کانال برای مدل سوم نیز در مقایسه با الگوریتم‌های ژنتیک (Jain, et al., 2004.)، کلونی مورچگان (Nourani et al.,

مدل ۲ در میان مدل‌های دیگر دارای کم‌ترین مقدار بود.

کانال برای این مدل با استفاده از نرم‌افزار لینگو نیز دارای کم‌ترین مقدار در میان مدل‌های دیگر بود.

برای مدل سوم مقدار سرعت محاسبه شده برای قسمت اول، دوم و سوم از سطح مقطع کانال به ترتیب برابر با ۰/۳۹۳، ۰/۳۵۴ و ۳/۴۸۹ متر بر ثانیه است که هر سه مقدار کوچک‌تر از سرعت بیشینه (۱، ۲ و ۳/۵ متر بر ثانیه) است. در مورد مقدار عدد فرود نیز، این مقدار با استفاده از الگوریتم خفاش در مدل پنجم برابر با ۰/۶۲۱ محاسبه شد که از عدد فرود حداکثر به میزان ۰/۳۷۹ کم‌تر بود. با توجه به کم‌تر بودن سرعت و عدد فرود از مقدار مجاز در مدل‌های سوم و پنجم می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم خفاش مقدار پارامترهای بهینه را براساس محدودیت‌های مساله برآورد کرده است.

با توجه به جدول ۵، مقدار عرض بالای کانال با استفاده از الگوریتم خفاش برای مدل ۲ دارای کم‌ترین مقدار برابر با ۲/۶۸۲ می‌باشد که از مدل‌های ۱، ۳، ۴ و ۵ به ترتیب در حدود ۰/۶۴٪، ۰/۸۶٪، ۰/۷۰٪ و ۰/۶۵٪ کم‌تر است.

می‌توان چنین نتیجه گرفت که استفاده از مدل ۲ بجای مدل ۱ و تقسیم کانال به سه بخش موجب کاهش هزینه ساخت کانال می‌گردد. همچنین افزودن محدودیت‌های سرعت حداکثر، حداکثر شیب مجاز و عدد فرود حداکثر نیز می‌تواند سبب افزایش هزینه کانال شود.

جدول ۵- مقایسه هزینه ساخت کانال برای الگوریتم‌های مختلف

مدل	روش	هزینه
۱	(LMM)	۲۲/۹۵۸
	(GA)	۲۲/۹۷۳
	(ACO)	۲۲/۹۶۱
	(SFLA)	۱۹/۵۳۴
	(BA)	۱۹/۴۶۶
۲	GA	۱۵/۰۸۹
	ACO	۱۴/۸۸۸
	SFLA	۱۱/۳۸۸
	(BA)	۱۰/۲۳۹
	GA	۳۰/۰۹۰
۳	ACO	۳۰/۰۳۳
	SFLA	۲۹/۶۵۲
	(BA)	۲۹/۳۳۴
	GA	۲۰/۹۳۲
	ACO	۲۰/۹۳۳
۴	SFLA	۱۶/۹۸۰
	(BA)	۱۶/۸۰۰
	(LMM)	۲۲/۹۵۰
	(BA)	۲۲/۷۲۰
	۵	

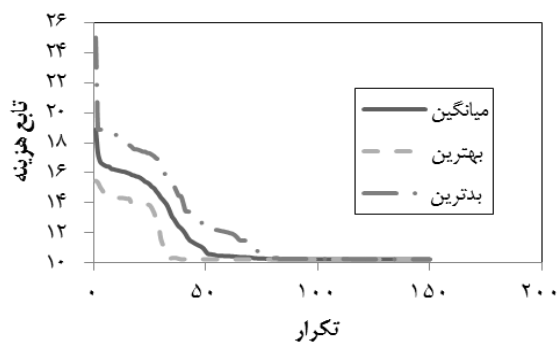
مقدار محیط کانال نیز با استفاده از الگوریتم خفاش برای مدل ۲ برابر با ۱۲/۸۸۸ متر بود که نسبت به مدل‌های ۱، ۳، ۴ و ۵ به ترتیب در حدود ۰/۸٪، ۰/۴۴٪، ۰/۱۵٪ و ۰/۱۵٪ کاهش داشت. مقدار محیط کل

جدول ۶- پارامترهای بهینه برای طراحی مدل‌های آرایه شده

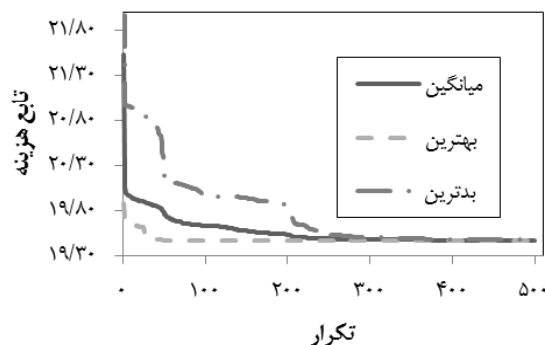
پارامترها	مدل ۱		مدل ۲		مدل ۳		مدل ۴		مدل ۵	
	Lingo	BA	Lingo	BA	Lingo	BA	Lingo	BA	Lingo	BA
b(m)	۵/۸۰۶	۵/۸۱۰	۵/۶۹۸	۵/۶۷۲	۱۸/۸۴۸	۱۸/۸۱۵	۳/۹۰۶	۳/۹۰۰	۵/۶۱۰	۵/۵۸۸
h(m)	۴/۰۲۲	۴/۰۲۲	۴/۹۱۸	۴/۹۶۲	۱/۴۹۷	۱/۴۹۷	۲/۹۶۹	۲/۹۶۸	۳/۵۶۹	۳/۵۸۹
z ₁	-/۲۵۰	-/۲۴۵	-/۱۰۰	-/۱۰۰	-/۱۰۰	-/۱۰۰	-/۱۰۰	-/۱۰۰	-/۲۰۹	-/۲۰۹
z ₂	-/۲۶۰	-/۲۶۳	-/۱۰۰	-/۱۰۰	-/۱۰۰	-/۱۰۰	-/۱۰۰	-/۱۰۰	-/۲۳۵	-/۲۳۰
A ₁ (m ²)	۲/۵۶۶	۲/۵۰۲	۱/۴۶۸	۱/۴۹۲	۶/۰۱۷	۶/۰۱۷	۶/۰۱۲	۶/۰۱۲	۱/۷۳۹	۱/۷۴۴
A ₂ (m ²)	۲/۶۵۸	۲/۶۸۸	۱/۴۶۸	۱/۴۹۲	۶/۰۱۷	۶/۰۱۷	۶/۰۱۲	۶/۰۱۲	۱/۹۴۵	۱/۹۱۹
A ₃ (m ²)	۲۶/۲۵۵	۲۶/۲۷۲	۹/۲۰۰	۹/۱۳۰	۳۷/۵۷۹	۳۷/۶۳۹	۱۰/۷۴۰	۱۰/۷۴۹	۲۲/۸۴۶	۲۲/۸۲۷
A ₄ (m ²)	۳۱/۴۶۹	۳۱/۴۶۲	۱۲/۱۳۶	۱۲/۱۱۴	۳۸/۰۳۷	۳۸/۰۳۷	۲۲/۷۷۴	۲۲/۷۷۳	۲۶/۵۱۱	۲۶/۵۰۹
P ₁ (m)	۴/۶۶۱	۴/۶۵۵	۵/۴۴۵	۵/۴۸۹	۲/۱۰	۲/۱۰	۴/۹۰۶	۴/۹۰۴	۴/۱۵۸	۴/۱۷۷
P ₂ (m)	۴/۶۷۲	۴/۶۷۵	۵/۴۴۵	۵/۴۸۹	۲/۱۰	۲/۱۰	۴/۹۰۶	۴/۹۰۴	۴/۱۸۰	۴/۱۹۵
P ₃ (m)	۵/۸۰۶	۵/۸۱۰	۵/۶۹۸	۵/۶۷۲	۱۸/۸۴۸	۱۸/۸۱۵	۳/۰۹۶	۳/۱۰۰	۵/۶۱۰	۵/۶۲۰
P _t (m)	۱۵/۱۳۹	۱۵/۱۴۰	۱۲/۸۸۸	۱۲/۶۵۰	۲۲/۸۶۸	۲۲/۸۳۵	۱۲/۹۰۸	۱۲/۹۰۸	۱۳/۹۴۸	۱۳/۹۹۲
T _t (m)	۷/۸۵۷	۷/۸۵۳	۲/۶۸۲	۲/۶۶۴	۱۹/۱۴۷	۱۹/۱۱۴	۹/۰۳۴	۹/۰۳۴	۷/۴۲۱	۷/۳۸۳
V ₁ (m/s)	۱/۲۳۹	۱/۲۴۴	-/۶۸۲	-/۷۸۷	-/۳۵۴	-/۳۵۴	۲/۰۶۶	۲/۰۶۵	۱/۲۵۰	۱/۲۵۰
V ₂ (m/s)	۱/۴۱۱	۱/۴۲۱	-/۶۹۷	-/۷۸۵	-/۳۹۳	-/۳۹۳	۲/۲۹۵	۲/۲۹۴	۱/۲۲۳	۱/۲۱۱
V ₃ (m/s)	۶/۷۴۴	۶/۷۴۴	۶/۱۸۶	۷/۷۵۸	۳/۴۸۹	۳/۴۹۰	۵/۵۰۹	۵/۵۰۶	۶/۲۲۸	۶/۲۵۸
V _{average} (m/s)	۳/۶۳۹	۳/۶۴۰	۸/۴۴۱	۹/۲۹۵	۳/۵۱۶	۳/۵۲۲	۵/۵۵۳	۵/۵۵۵	۴/۳۷۵	۴/۳۷۰
Fr	-/۶۲۱	-/۶۲۱	۱/۵۰۷	۱/۴۷۷	-/۹۲۱	-/۹۲۱	۱/۲۵۶	۱/۲۵۷	-/۷۸۴	-/۷۸۱
f _{cost}	۲۲/۷۲۰	۲۲/۷۲۰	۱۰/۲۳۹	۱۰/۲۳۹	۲۹/۳۳۴	۲۹/۳۳۴	۱۶/۸۰۰	۱۶/۸۰۰	۱۹/۴۶۶	۱۹/۴۶۶

برای مدل ۳ دارای کم‌ترین مقدار در حدود ۰/۰۰۱ و برای مدل ۴ دارای بیش‌ترین مقدار برابر ۰/۰۰۹ می‌باشد. این اختلاف برای مدل‌های ۱، ۲ و ۵ نیز برابر با ۰/۰۰۳، ۰/۰۰۸ و ۰/۰۰۳ می‌باشد. بنابراین در تمامی مدل‌ها، اختلاف کم میان مقدار بدترین و بهترین جواب‌ها نشان دهنده عملکرد موفق الگوریتم خفاش در طراحی کانال است.

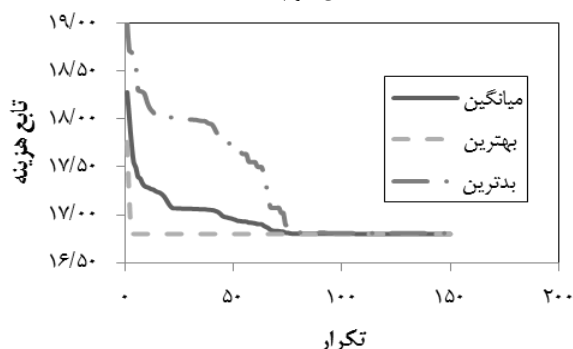
در شکل ۴، نمودار همگرایی تابع هزینه برای پنج مدل ارائه شده ترسیم گردید. در این شکل، مدل ۳ با بیش‌ترین سرعت در ۱۰۰ تکرار همگرا شد. مدل‌های ۱ و ۵ در میان مدل‌های دیگر با کم‌ترین سرعت در ۵۰۰ تکرار همگرا شده‌اند. مدل‌های ۲ و ۴ نیز در ۱۵۰ تکرار همگرا شده‌اند. همچنین در این شکل، میانگین، بدترین و بهترین جواب‌ها نشان داده شده است. اختلاف مقدار بدترین و بهترین جواب



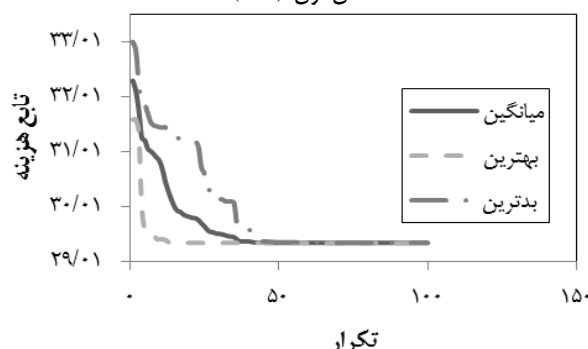
مدل دوم (M2)



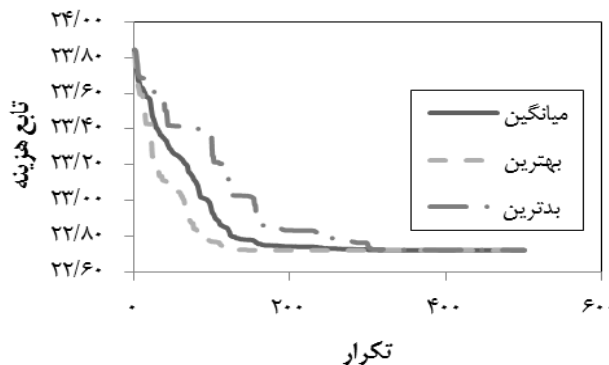
مدل اول (M1)



مدل چهارم (M4)



مدل سوم (M3)



مدل پنجم (M5)

شکل ۴- نمودار همگرایی تابع هزینه برای مدل‌های مختلف

معادله مانینگ استفاده گردید. مدل دوم مانند مدل اول بود اما کانال دوزنقه‌ای به یک بخش مستطیلی و دو بخش مثلثی تقسیم شد. در مدل سوم مانند مدل دوم، کانال به سه بخش تقسیم شد اما محدودیت سرعت مجاز اضافه گردید. در مدل چهارم نیز مانند مدل

نتیجه گیری

در تحقیق حاضر، الگوریتم بهینه‌سازی خفاش به منظور طراحی بهینه کانال‌های باز با مدل‌های مختلف به کار گرفته شد. مدل اول مربوط به کانال دوزنقه‌ای با جریان یکنواخت بود. در این مدل از

- Bozorg-Hadad, O., Karimirad, O., Seifollahi-Aghmiuni, S and Loáiciga, A.H. 2014. Development and Application of the Bat Algorithm for Optimizing the Operation of Reservoir Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 8.141: 1-10.
- Das, A. 2000. Optimal channel cross section with composite roughness. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 1.126: 68-72.
- Das, A. 2007, a. Flooding probability constrained optimal design of trapezoidal channels. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 1.133: 53-60.
- Das, A. 2007, b. Optimal design of channel having horizontal bottom and parabolic sides. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 2.133: 192-197.
- Froehlich, D.C. 1994. Width and depth constrained best trapezoidal section. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 4.120: 828-835.
- Jain, A., Bhattacharya, R.K and Sanaga, S. 2004. Optimal design of composite channels using genetic algorithm. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 4. 130: 286-295.
- Niknam, T., Sharifinia, S and Azizpanah-Abarghoee, R. 2013. A new enhanced bat-inspired algorithm for finding linear supply function equilibrium of GENCOs in the competitive electricity market. *Energy Conversion and Management*. 76: 1015-1028.
- Nourani, V., Monadjemi, P., Talatahari, S and Shahradsfar, S. 2009. Application of ant colony optimization to optimal design of open channels. *Journal of Hydraulic Research*. 5.47: 656-665.
- Orouji, H., Mahmoudi, N and Pazoki, M. 2016. Shuffled frog leaping algorithm for optimal design of open channels. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 10.142: 1-8.
- Reddy, M. and Adarsh, S. 2010. Chance constrained optimal design of composite channels using meta-heuristic techniques. *Water resources management*. 10.24: 2221-2235.
- Roushanga, K., Alami, M.T., Nourani, V and Nouri, A. 2017. A cost model with several hydraulic constraints for optimizing in practice a trapezoidal cross section. *Journal of Hydro informatics*. 3.19: 456-468.
- Swamee, P.K., Mishra, G.C and Chahar, B.R. 2000, a. Comprehensive design of minimum cost irrigation canal sections, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 5.126: 322-327.
- Swamee, P.K., Mishra, G.C and Chahar, B.R. 2000, b. Design of minimum seepage loss canal sections. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 1.126: 28-32.
- دوم، سه بخش برای کانال در نظر گرفته شد اما محدودیت شیب مجاز اضافه شد. در مدل پنجم مانند مدل اول، کانال به صورت یکنواخت در نظر گرفته شد اما محدودیت عدد فرود لحاظ گردید. هزینه ساخت کانال به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شد. به منظور تعیین پارامترهای بهینه الگوریتم خفاش، آنالیز حساسیت برای مدل‌ها و پارامترهای مختلف انجام پذیرفت. سپس الگوریتم مذکور براساس نتایج آنالیز حساسیت، برای هر مدل ۱۰ بار اجرا شد. نتایج حاکی از ضریب تغییرات پایین (نزدیک به صفر) برای مدل‌های مختلف بود. این موضوع، نشان دهنده کیفیت بالای جواب‌های حاصل از الگوریتم خفاش بود. به منظور نشان دادن قابلیت و توانایی الگوریتم ارایه شده، نتایج حاصل با نتایج روش‌های غیرخطی لینگو و ضرایب لاگرانژ و همچنین الگوریتم‌های تکاملی ژنتیک، کلونی مورچگان و جهش قورباغه مورد مقایسه قرار گرفت. جواب‌های حاصل از الگوریتم خفاش در مقایسه با جواب‌های حاصل از نرم‌افزار لینگو، از تطابق بالایی برخوردار بودند. الگوریتم پیشنهادی، علاوه بر قابلیت بدست آوردن بهینه مطلق دقیق‌تر، نسبت به سایر الگوریتم‌های فراابتکاری عملکرد بهتری داشت؛ ساخت کانال با مدل‌های مختلف توسط الگوریتم خفاش، در مقایسه با روش ضرایب لاگرانژ و الگوریتم‌های ژنتیک، کلونی مورچگان و جهش قورباغه مقرون به صرفه‌تر بود. برای هزینه ساخت کانال، در میان مدل‌های بررسی شده، مدل‌های دوم و سوم به ترتیب دارای کم‌ترین و بیش‌ترین هزینه بودند. بنابراین تقسیم مقطع کانال به دو بخش مثلثی و یک بخش مستطیلی، برای محاسبه دبی جریان می‌تواند منجر به کاهش هزینه ساخت شود. با توجه به نتایج حاصل از این تحقیق، الگوریتم خفاش، پتانسیل بالایی جهت استفاده در دیگر مسایل مربوط به منابع آب، دارا می‌باشد. به منظور انجام تحقیقات آتی جهت طراحی اقتصادی کانال‌ها، هیبرید الگوریتم خفاش با سایر الگوریتم‌های فراابتکاری پیشنهاد می‌شود.

منابع

- فرخی، م.، کامگار حقیقی، ع.، سپاس‌خواه، ع.، زندپارسا، ش و هنر، ت. ۱۳۹۳. تغییرات زمانی و مکانی آب توزیع شده در کانال‌های شبکه سد درودزن، نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۸. ۴: ۶۸۴ - ۶۹۳.
- احترام، م.، کرمی، ح.، موسوی، س.، فرزین، س و سرکمریان، س. ۱۳۹۶. ارزیابی عملکرد الگوریتم خفاش در بهینه‌سازی پارامترهای مدل غیرخطی ماسکینگام برای روندیابی سیلاب، نشریه اکوهیدرولوژی. ۴. ۴: ۱۰۲۵ - ۱۰۳۲.
- Bhattacharjya, R.K. 2006. Optimal design of open channel section incorporating critical flow condition. *Journal of Irrigation And Drainage Engineering*. 132.5: 513-518.

material costs. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 4.108: 242-249.

Yang, X.S. 2010. A new metaheuristic bat-inspired algorithm. *Nature inspired cooperative strategies for optimization*. 284: 65-74.

Trout, T.J. 1982. Channel design to minimize lining

The Application of Bat Algorithm for Economical Design of Open Channels

S. Farzin^{1*}, H. Karami², M. Valikhan Anaraki³, M. Ehteram⁴

Received: Dec.22, 2017

Accepted: Feb.05, 2018

Abstract

Open channels have an important role in transferring water and flood control. Of course, it imposes the high cost to water supply projects. In the present study for the first time, bat algorithm has been used for optimal channel design. For this purpose, five different models are considered. In the first model, trapezoidal channel and Manning equation are used. The second model is such as the first model, but the trapezoidal cross-section of the channel is divided into two triangular segments and one rectangular segment. In the third one, the maximum velocity is considered as a constraint. The fourth model is such as the second model, but the permissible side slope is considered as a constraint. The fifth model resembles the first model, but Froude number is considered as a constraint. In modeling, the cost of channel construction is considered as an objective function. Optimal parameters of bat algorithm are selected by using sensitivity analysis. The coefficient of variation of ten random runs for different models is about 0.00001 to 0.00017. The results of proposed algorithm have been compared with LINGO software solutions and several common intelligent algorithms. Based on the findings, the results of bat algorithm significantly are close to the global solutions of LINGO software. The accuracy of this algorithm is also more than the other evolutionary algorithms. According to the other results, using the bat algorithm for the different evolutionary methods has caused to 32% decreasing in cost. Among five considered models, the second model has the lowest cost. Using the second model instead of the first model leads to 47% decreasing in cost. But, adding maximum velocity, permissible side slope and Froude number constraints to the second model has caused to 65%, 39%, and 55% increase in cost. Also, the proposed algorithm converges in 100 to 500 iterations.

Keywords: Bat algorithm, Construction cost, Open channels, Optimal design

1,2- Assistant Professor, Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

3- M.Sc. Student of Water Resources Engineering and Management, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

4- Ph.D student of Water Resources Engineering and Management, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

(*-Corresponding Author Email:saeed.farzin@semnan.ac.ir)