

## معرفی مقطع چرخزاد وارونه به منظور طراحی بهینه کانال‌ها با استفاده از هوش مصنوعی

سعید فرزین<sup>۱\*</sup>، حجت کرمی<sup>۲</sup>، جعفر دستورانی<sup>۳</sup>، مهدی ولیخان انارکی<sup>۴</sup> و محمد احترام<sup>۵</sup>

۱، ۲، ۳، ۴ و ۵- به ترتیب: استادیاران؛ دانشجوی کارشناسی ارشد؛ و دانشجوی دکترای گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران  
۳- استادیار گروه مهندسی مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران  
تاریخ دریافت: ۹۷/۲/۹؛ تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۰/۲۵

### چکیده

شکل مقطع کانال‌های مصنوعی و طراحی بهینه آن با روش‌های هوشمند، می‌تواند تأثیری چشمگیر در کاهش هزینه ساخت این کانال‌ها داشته باشد. در پژوهش حاضر، برای نخستین بار به معرفی کانال مصنوعی با مقطع چرخزاد وارونه و طراحی بهینه آن با الگوریتم خفاش پرداخته شده است. مقطع پیشنهادی، در دو طرح شامل چرخزاد وارونه بدون بستر افقی و چرخزاد وارونه با بستر افقی در نظر گرفته شده است. به منظور طراحی بهینه مقاطع معرفی شده، دو سناریو شامل کانال با ارتفاع آزاد ثابت و کانال با ارتفاع آزاد متغیر، تعریف شده است. هر دو سناریو از معادله مانینگ به عنوان محدودیت و از معادله هورتون برای در نظر گرفتن ضریب معادل استفاده شد. بر اساس روش آنالیز حساسیت، مقادیر بهینه پارامترهای الگوریتم پیشنهادی تعیین و پس از آن، الگوریتم خفاش برای هر مقطع و سناریو به صورت تصادفی پانزده بار اجرا و مقدار ضریب تغییرات و سرعت همگرایی محاسبه شده است. به منظور بررسی دقت الگوریتم خفاش در تعیین مقدار بهینه مطلق، بین جواب‌های این الگوریتم و نرم‌افزار لینگو مقایسه صورت گرفته است. نتایج طراحی بهینه مقاطع پیشنهادی، با کانال‌های دوزنقه‌ای، سهمی با بستر افقی، بیضوی و بیضوی عمومی نیز مقایسه شد. نتایج اجراهای تصادفی الگوریتم خفاش نشان می‌دهد ضریب تغییرات برای مقاطع و سناریوهای معرفی شده حدود ۰/۰۰۰۲ تا ۰/۰۰۱۳ است. با توجه به نمودارهای همگرایی، الگوریتم مذکور برای همه مقاطع و سناریوها در ۱۰۰۰ تکرار همگرا شده است. مقایسه نتایج الگوریتم خفاش و نرم‌افزار لینگو نیز بیان کننده دقت بالای الگوریتم مذکور در تعیین بهینه مطلق مسئله است. استفاده از مقاطع پیشنهادی در مقایسه با دیگر مقاطع متداول، موجب می‌شود هزینه ساخت کانال مصنوعی تا ۳۴/۷ درصد کاهش یابد. در میان مقاطع و سناریوهای بررسی شده، استفاده از مقطع چرخزاد وارونه تحت سناریوی دوم تا ۱۷/۱۵ درصد اقتصادی‌تر است.

### واژه‌های کلیدی

کانال مصنوعی، مقاطع کانال، الگوریتم خفاش، نرم‌افزار لینگو

### مقدمه

ساخت کمتر، می‌تواند موجب افزایش سود حاصل از انتقال آب برای مصارف مختلف، از جمله کشاورزی و آبیاری شود. مقاطع منحنی شکل می‌توانند جایگزین مناسبی برای مقطع دوزنقه‌ای باشند. برخی از مزایای کانال با این مقاطع از این قرار است:

شکل مقطع کانال‌های مصنوعی (ساخته شده به دست بشر) نقش مهمی در هزینه تمام شده ساخت شبکه‌های آبیاری و انتقال آب دارد. یافتن شکل‌های جایگزین برای مقطع دوزنقه‌ای با هزینه

قابلیت اجرا دارند (Chahar, 2007). در دهه‌های گذشته، شکل‌های مختلفی به‌جای مقطع دوزنقه‌ای بررسی شده‌اند. میروونکو و همکاران (Mironenko *et al.*, 1984) کانال باز با مقطع سهمی را طراحی و معرفی کردند. کانال با این مقطع در مقایسه با کانال دوزنقه‌ای عملکرد هیدرولیکی بالاتری داشته‌اند. لوگاناتان (Loganathan, 1991) بهترین مقطع هیدرولیکی کانال باز با مقطع سهمی را در نظر گرفتن محدودیت سرعت و ارتفاع آزاد محاسبه کرد. بابایان کوپایی و همکاران (Babaeyan-*et al.*, 2000) کانال باز با مقطع سه‌ضلعی و بستر سهمی را بررسی کردند. این مقطع در مقایسه با مقطع دوزنقه‌ای و سهمی مساحت و محیط مرطوب شده کمتری دارد. در پژوهش چهار (Chahar, 2005) مشخص شد هزینه ساخت کانال با مقطع سهمی، در مقایسه با کانال دوزنقه‌ای، کمتر و ظرفیت عبور دبی آن بیشتر است.

داس (Das, 2007a) از کانال با دیواره‌های سهمی و بستر افقی به‌عنوان یک مقطع جایگزین برای کانال دوزنقه‌ای استفاده کرد و گزارش داد هزینه ساخت آن نسبت به مقطع دوزنقه‌ای، کمتر است. عیسی (Easa, 2009) کانال با مقطعی شامل بستر افقی و دیواره‌های سهمی دو بخشی را ارائه کرد و نشان داد استفاده از این کانال نسبت به کانال با مقطع ارائه شده توسط داس (Das 2007a)، موجب صرفه‌جویی در هزینه ساخت کانال می‌شود. عیسی (Easa, 2011) در پژوهشی دیگر کانال با بستر افقی و دیواره‌های سهمی با  $m$  بخش را در نظر گرفت و اعلام کرد کانال با این مقطع، در مقایسه با مطالعات گذشته، هزینه کمتری دارد. عیسی و وطن‌خواه (Easa & Vatankhah, 2014) مقطع کانال را با بستر افقی و دیواره‌های بیضی شکل طراحی کردند. نتایج

۱- تغییرات ناگهانی زاویه در دیواره کانال‌های سهمی کمتر است تا در کانال دوزنقه‌ای. این موضوع سبب کاهش نقاط تمرکز تنش و کاهش ترک‌ها در دیواره‌های بتنی و کاهش تراوش‌ها می‌شود (Han & Easa, 2017). ۲- در طبیعت مقطع کانال‌های خاکی پس از بهره‌برداری طولانی‌مدت، تمایل دارد به حالت منحنی (به‌دلیل پایداری بیشتر) تغییر پیدا کند (Das, 2007a). ۳- دیواره‌های کانال‌های سهمی، نسبت به کانال‌های دوزنقه‌ای، پایدارترند زیرا شیب دیواره‌های مقاطع سهمی به‌تدریج از بستر تا بالای کانال افزایش می‌یابد (Han & Easa, 2017). ۴- کانال‌های سهمی، در مقایسه با کانال‌های دوزنقه‌ای، ظرفیت بیشتری برای عبور دبی دارند (Han, 2015). ۵- کانال‌های منحنی شکل به‌دلیل شباهت بیشتر به مقطع دایره‌ای، نسبت به کانال‌های دوزنقه‌ای، جریان مشخص را با ابعادی کوچک‌تر عبور می‌دهند. در نتیجه هزینه ساخت کانال منحنی شکل (مجموع هزینه خاکبرداری و پوشش‌دار کردن بستر و دیوارها) برای عبور دبی مشخص کمتر از هزینه ساخت کانال دوزنقه‌ای است.

کانال‌های دوزنقه‌ای به‌دلیل سادگی اجرا و دسترسی به تکنولوژی لازم، نسبت به کانال‌های منحنی شکل همچنان محبوبیت بیشتری دارند. با این حال، کانال‌های سهمی تا کنون در مقیاس‌های بزرگ در نقاط مختلف دنیا اجرا شده‌اند. کانال ژنیل کابرا در اسپانیا و کانال عمیق پهر در پاکستان از کانال‌های منحنی شکل معروف هستند (Han & Easa, 2017). اگر به تکنولوژی لازم دسترسی نباشد می‌توان از قطعات پیش‌ساخته برای اجرای این کانال‌ها استفاده کرد. کانال‌های کوچک نیز با استفاده از بولدوزر و دیگر تجهیزات خاکبرداری

استفاده کردند. داس (Das, 2000) بر اساس زبری مرکب و روش ضرایب لاگرانژ رویکردی برای بهینه‌سازی کانال باز ارائه داد. نتایج این تحقیقات بیان‌کننده عملکرد خوب این روش بوده است. سوامی و همکاران (Swamee et al., 2002) با استفاده از روش جستجوی مشبک و با توجه به تلفات نفوذ، به طراحی بهینه کانال باز پرداختند. داس (Das, 2007a) در پژوهشی دیگر به طراحی احتمالاتی کانال مرکب با استفاده از روش ضرایب لاگرانژ پرداخت. این روش طراحی کانال هزینه ساخت را گران‌تر محاسبه کرد. بهاتاچارجیا (Bhattacharjya, 2006) با استفاده از روش برنامه‌ریزی مرتبه دوم متوالی، کانال باز را در شرایط جریان با رژیم بحرانی طراحی کرد. نشان داده شده است که این روش در مقایسه با روش ضرایب لاگرانژ عملکرد مطلوب‌تری دارد.

در سال‌های اخیر، الگوریتم‌های هوشمند به‌صورت گسترده در مباحث مختلف مهندسی و منابع آب به‌ویژه مسائل طراحی و ساخت کانال‌های باز مورد توجه محققان قرار گرفته‌اند. جین و همکاران (Jain et al., 2004) الگوریتم ژنتیک را برای طراحی کانال‌های باز به‌کار گرفتند. این الگوریتم هزینه ساخت کانال را در مقایسه با روش ضرایب لاگرانژ کمتر محاسبه کرد. ردی و آدراش (Reddy & Adrash, 2010) با استفاده از الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات، هزینه ساخت کانال باز را بهینه‌سازی کردند. الگوریتم‌های بررسی شده در این پژوهش، نسبت به روش ضرایب لاگرانژ، عملکرد مطلوب‌تری دارد. عروجی و همکاران (Orouji et al., 2016) نیز از الگوریتم جهش قورباغه برای طراحی بهینه کانال باز استفاده کردند. این الگوریتم در مقایسه با تحقیقات پیشین اقتصادی‌تر بوده است. گوپتا و

پژوهش آنها منجر به کاهش هزینه ساخت کانال، نسبت به کانال‌های دوزنقه‌ای و سهمی، شد. هان (Han, 2015) مقطعی جدید بر اساس سهمی نیمه مکعبی ارائه و نشان داد این مقطع، نسبت به کانال دوزنقه‌ای، دارای مساحت و محیط مرطوب شده کمتری است. عیسی (Easa, 2016) در پژوهشی کانال با مقطع بیضی شکل عمومی را به‌عنوان جایگزین کانال با مقطع دوزنقه‌ای به‌کار برد و گزارش داد هزینه ساخت، در مقایسه با مقطع بیضی شکل معمولی، کمتر است. هان و عیسی (Han & Easa, 2017) مشخصات هیدرولیکی کانال سهمی با درجه ده‌سوم را با دیگر کانال‌های سهمی و دوزنقه‌ای مقایسه کردند. نتایج این مقایسه نشان از برتری کانال با این مقطع بود.

با توجه به تحقیقات پیشین، چنین استنباط می‌شود که تغییر مقطع کانال از دوزنقه‌ای به منحنی، علاوه بر مزیت‌های همچون پایداری بیشتر و کاهش تراوش، سبب کاهش ابعاد کانال و در نتیجه، کاهش هزینه خاکبرداری و بتن‌ریزی می‌شود. از همین رو در پژوهش حاضر به معرفی مقاطع منحنی شکل جدید پرداخته شده که هزینه ساخت آنها (مجموع هزینه خاکبرداری و بتن‌ریزی) کمتر است.

علاوه بر شکل مقطع کانال، روش طراحی کانال نیز نقشی مهم در تعیین هزینه نهایی ساخت کانال دارد. از این‌رو استفاده از یک روش بهینه‌سازی مناسب و قدرتمند برای تعیین ابعاد کانال با کمترین هزینه ساخت بسیار بااهمیت است. در دهه‌های گذشته، مدل‌های ریاضی و روش‌های عددی برای طراحی بهینه کانال‌های باز به‌کار گرفته شده‌اند. مونجمی (Monadjemi, 1994)، فرهلیچ (Frohlich, 1994) و سوامی (Swamee, 1995) از روش ضرایب لاگرانژ برای تعیین مقطع بهینه کانال

بردند و نشان دادند الگوریتم خفاش، نسبت به الگوریتم ازدحام ذرات، سرعت و دقت بالاتری دارد.

با توجه به جمع‌بندی تحقیقات گذشته، این نتیجه به دست می‌آید که شکل مقطع کانال و روش طراحی آن نقش مهمی در کاهش مجموع هزینه خاکبرداری و پوشش دار کردن (بتن‌ریزی) در ساخت کانال‌های مصنوعی و پروژه‌های آبرسانی دارد. مقاطع منحنی به دلیل شکل هندسی خود، علاوه بر مزایایی چون پایداری بیشتر و تراوش کمتر نسبت به مقاطع دوزنقه‌ای، می‌توانند با هزینه‌های کمتر در خاکبرداری و پوشش دار کردن کانال، جریان بیشتری را از خود عبور دهند. با وجود این، در بحث کاهش هزینه‌های ناشی از خاکبرداری و پوشش دار کردن کانال، مطالعات اندکی در مورد کاربرد مقاطع منحنی شکل به‌عنوان جایگزین مقاطع دوزنقه‌ای صورت گرفته است. در پژوهش حاضر برای نخستین بار مقطع منحنی شکل چرخزاد وارونه در دو حالت بدون بستر افقی و با بستر افقی به‌عنوان جایگزین مقاطع دوزنقه‌ای بررسی شده است. از طرفی، انتخاب روش‌های جدید در طراحی بهینه کانال‌های مصنوعی دارای اهمیت بالایی در کاهش هزینه‌های ساخت کانال‌های مصنوعی است. یکی از این روش‌ها الگوریتم‌های هوشمند هستند که تا کنون کاربرد آنها در مسائل مختلف مهندسی از جمله مهندسی منابع آب مطلوب بوده است. از این‌رو، الگوریتم خفاش برای نخستین بار در زمینه بهینه‌سازی هزینه ساخت مقاطع منحنی شکل معرفی شده، به کار برده شده است. بدین‌منظور پس از تعریف تابع هدف (مجموع هزینه خاکبرداری و پوشش دار کردن بستر و دیواره کانال‌ها) دو سناریوی مختلف با در نظر گرفتن ارتفاع آزاد در حالت ثابت و در حالت تابعی از عمق جریان، ارائه شده است. الگوریتم خفاش بر

همکاران (Gupta *et al.*, 2017) الگوریتم دسته ماهی‌ها را برای بهینه‌سازی کانال باز به کار بردند که نتیجه آن کاهش هزینه ساخت نسبت به زمانی بود که الگوریتم ازدحام ذرات به کار برده شده است. الگوریتم خفاش الگوریتم بهینه‌سازی جدید و قدرتمندی است که در سال‌های اخیر کاربردی موفق در مسائل مختلف مهندسی و منابع آب داشته است. این الگوریتم را اولین بار یانگ (Yang, 2010) و بر اساس توانایی خفاش‌ها در تولید پژواک ارائه داد. وی می‌گوید الگوریتم خفاش، در مقایسه با الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات، از دقت (۹۹ تا ۱۰۰ درصد) و سرعت همگرایی بالاتری برخوردار است. نیکنام و همکاران (Niknam *et al.*, 2013) از الگوریتم خفاش برای بهینه‌سازی تولید انرژی در نیروگاه استفاده و اعلام کردند الگوریتم خفاش، در مقایسه با الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات، عملکرد بهتری دارد. بزرگ‌حداد و همکاران (Bozorg-Haddad *et al.*, 2014) نشان دادند در مسئله تولید انرژی در نیروگاه، با بهینه‌سازی بر اساس الگوریتم خفاش در مقایسه با الگوریتم ژنتیک انرژی بیشتری تولید می‌شود. الگوریتم ژنتیک تولید می‌کند. در پژوهش احمدیان‌فر و همکاران (Ahmadianfar *et al.*, 2015) نشان داده شده است که در سیستمی چند مخزنه، ترکیب الگوریتم تکاملی تفاضلی و الگوریتم خفاش در مقایسه با سایر روش‌های بهینه‌سازی، توانایی بیشتری در بالابردن سود دارد. جایاباراتی و همکاران (Jayabarathi *et al.*, 2018) کاربرد الگوریتم خفاش را در مسائل مختلف مهندسی بررسی کردند؛ نتایج نشان از توانایی بالای این الگوریتم داشت. در ایران احترام و همکاران (Ehteram *et al.*, 2018) الگوریتم خفاش را برای بهینه‌سازی پارامترهای معادله ماسکینگام به کار

وارونه با بستر افقی برای کاهش بیشتر هزینه خاکبرداری و پوشش دار کردن (بتن ریزی)، به عنوان جایگزین کانال دوزنقه‌ای معرفی شده است.

چرخزاد یک منحنی است که با به حرکت در آمدن نقطه روی دایره ساخته می‌شود. فرض شود که نقطه روی دایره قرار دارد و با حرکت دایره روی یک خط مستقیم، نقطه هم با آن می‌چرخد. اگر حرکت نقطه روی دایره رسم شود، یک منحنی چرخزاد ایجاد می‌شود. مختصات  $x$  و  $y$  چرخزاد به شکل روابط ۱ و ۲ بیان می‌کند:

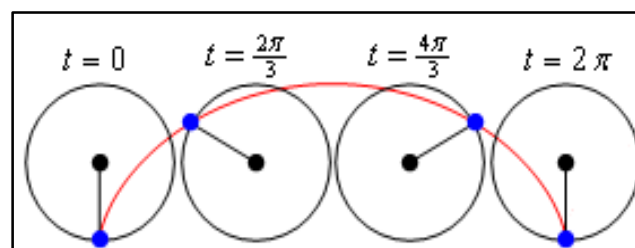
$$x = r(t - \sin(t)) \quad (1)$$

$$y = r(1 - \cos(t)) \quad (2)$$

که در آنها،

$r =$  شعاع دایره در حال دوران؛  $t =$  زاویه دوران؛ و  $r =$  یک عدد حقیقی بین  $(0, +\infty)$ .

مقدار پارامتر  $t$  نیز بین  $[0, 2\pi]$  فرض شده است. شکل ۱، نمودار چرخزاد ایجاد شده با حرکت دایره به‌ازای  $t$  بین  $[0, 2\pi]$  را نشان می‌دهد.



شکل ۱- منحنی چرخزاد به ازای مقادیر  $t$  بین  $[0, 2\pi]$

Fig 1. Cycloid curve for  $t$  values in range  $[0, 2\pi]$

وارونه: در شکل ۲، طرح شماتیک کانال با مقطع چرخزاد وارونه ارائه شده است. در این شکل  $d$  عمق جریان،  $f$  ارتفاع آزاد کانال،  $I$  شیب دیواره در قسمت بالای کانال،  $n_1$  و  $n_2$  ضرایب

اساس نتایج آنالیز حساسیت، برای مقاطع پیشنهادی تحت دو سناریوی ارائه شده، پانزده بار اجرا می‌شود. مقادیر ضریب تغییرات و سرعت همگرایی برای مقاطع و سناریوهای مختلف محاسبه شده است. جواب‌های حاصل از الگوریتم پیشنهادی با نرم‌افزار لینگو مقایسه می‌شود. با مقایسه هزینه ساخت مقاطع پیشنهادی با مقاطع ارائه شده در مطالعات گذشته بهترین مقطع با کمترین هزینه خاکبرداری و پوشش‌دار کردن کانال، انتخاب می‌شود.

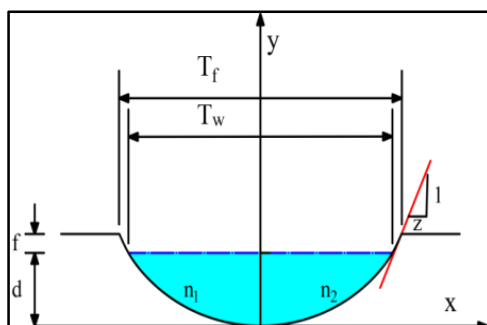
## مواد و روش‌ها

### مدل‌های معرفی شده برای طراحی بهینه کانال مصنوعی

دلیل استفاده از مقاطع منحنی شکل، با وجود سخت بودن خاکبرداری ترانشه‌ها، قالب‌بندی و بهره‌برداری از آنها، مزایایی چون بیشتر بودن پایداری و ظرفیت آنها و کمتر بودن تراوش، هزینه خاکبرداری و هزینه پوشش دار کردن (بتن ریزی) در این مقاطع است. در پژوهش حاضر برای نخستین بار دو مقطع منحنی شکل چرخزاد وارونه و چرخزاد

در اینجا دو مقطع چرخزاد وارونه و چرخزاد وارونه با بستر افقی به‌عنوان جایگزین مقطع دوزنقه‌ای در کانال‌های مصنوعی معرفی می‌شوند: معرفی طرح ۱، کانال مصنوعی با مقطع چرخزاد

زبری دیواره‌های اول و دوم،  $T_f$  عرض بالای کانال بدون در نظر گرفتن ارتفاع آزاد کانال با در نظر گرفتن ارتفاع آزاد و  $T_w$  عرض است.



شکل ۲- مقطع کانال چرخزاد وارونه

Fig 2. Inverse cycloid channel cross section

$$t = \cos^{-1}\left(\frac{y}{r} - 1\right) \quad (7)$$

$t_f$  و  $t_w$  به صورت روابط ۸ و ۹ در نظر گرفته شده‌اند:

$$t_w = \cos^{-1}\left(\frac{d}{r} - 1\right) \quad (8)$$

$$t_f = \cos^{-1}\left(\frac{d+f}{r} - 1\right) \quad (9)$$

با جایگذاری مقدار  $t$  در رابطه ۶، عرض بالای کانال بدون ارتفاع آزاد  $T_w$  و عرض بالای کانال با در نظر گرفتن ارتفاع آزاد  $T_f$  از روابط ۱۰ و ۱۱ حاصل می‌شود:

$$T_w = x_{2\pi-t_w} - x_{t_w} = 2\pi r - 2rt_w \quad (10)$$

$$T_f = x_{2\pi-t_f} - x_{t_f} = 2\pi r - 2rt_f \quad (11)$$

که  $x_{index}$  مقدار مختصات طولی چرخزاد به ازای  $t=index$  است.

مقدار مساحت و محیط کل چرخزاد وارونه به شکل روابط ۱۲ و ۱۳ بیان می‌شوند. محیط مرطوب شده و مساحت جریان نیز در روابط ۱۴ و ۱۵ ارائه شده‌اند:

برای استفاده از چرخزاد به عنوان مقطع کانال، نیاز است تا این شکل وارونه شود. بدین منظور، مقدار  $y$  در رابطه ۲ با مقدار  $2r-y$  جایگزین می‌شود. رابطه ۳، مقدار مختصات  $y$  چرخزاد وارونه را نشان می‌دهد:

$$y = r(1 + \cos(t)) \quad (3)$$

چرخزاد باید معادله دیفرانسیل نشان داده شده در رابطه ۴ را رعایت کند:

$$\left(\frac{dy}{dx}\right)^2 = \frac{2r}{y} - 1 \quad (4)$$

از طرفی، شیب جانبی در بالاترین قسمت کانال برابر است با (رابطه ۵):

$$z = \frac{dx}{dy} \Big|_{y=d+f} \quad (5)$$

با جایگزینی مقدار  $2r-y$  به جای  $y$  در رابطه ۴ و با توجه به رابطه ۵، پارامتر  $r$  با استفاده از رابطه ۶ محاسبه می‌شود:

$$r = \frac{(z^2 + 1)(d+f)}{2} \quad (6)$$

پس از ساده کردن رابطه ۳، مقدار  $t$  به ازای هر  $y$  از رابطه ۷ به دست می‌آید:

معرفی مقطع چرخزاد وارونه به منظور طراحی...

$$A_f = \int_{t=t_f}^{t=2\pi-t_f} r^2 (1 - \cos(t))^2 dt = r^2 \left( \frac{3}{2}t - 2\sin(t) + \frac{1}{2}\cos(t)\sin(t) \right) \Big|_{t_f}^{2\pi-t_f} - 0.5(2r - (d+f))T_f \quad (12)$$

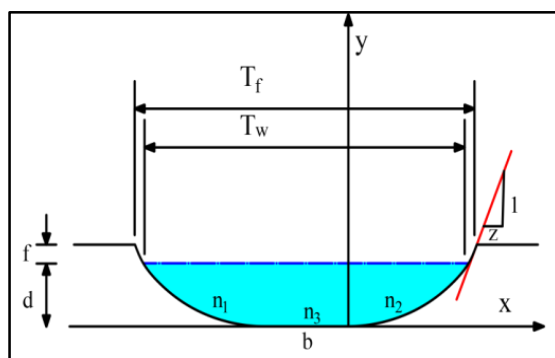
$$p_f = \int_{t=t_f}^{t=2\pi-t_f} \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2} dt = \int_{t=t_f}^{t=2\pi-t_f} r \sqrt{2 - 2\cos(t)} dt = -4r \left[ \cos\left(\frac{t}{2}\right) \right]_{t=t_f}^{2\pi-t_f} \quad (13)$$

$$A_w = r^2 \left( \frac{3}{2}t - 2\sin(t) + \frac{1}{2}\cos(t)\sin(t) \right) \Big|_{t_w}^{2\pi-t_w} - 0.5(2r - d)T_w \quad (14)$$

$$p_w = -4r \left[ \cos\left(\frac{t}{2}\right) \right]_{t=t_w}^{2\pi-t_w} \quad (15)$$

ارتفاع آزاد، عرض بستر و شیب دیواره‌ها در بالاترین قسمت کانال هستند.  $n_1$ ،  $n_2$  و  $n_3$  نیز ضریب‌های زبری دیواره‌ها و بستر کانال هستند.  $T_f$  عرض بالای کانال با در نظر گرفتن ارتفاع آزاد و  $T_w$  عرض بالای کانال بدون در نظر گرفتن ارتفاع آزاد است.

معرفی طرح ۲، کانال مصنوعی با مقطع چرخزاد وارونه و بستر افقی: در شکل ۳، دیواره‌های کانال مصنوعی به شکل چرخزاد وارونه و بستر آن افقی در نظر گرفته شده است. در این شکل  $d$ ،  $f$ ،  $b$  و  $z:1$  به ترتیب عمق جریان،



شکل ۳- مقطع کانال چرخزاد وارونه با بستر افقی

Fig 3. Inverse cycloid channel cross section without horizontal bed

مساحت و محیط مرطوب شده کانال نیز با استفاده از روابط ۱۸ و ۱۹ محاسبه شده‌اند:

روابط ۱۶ و ۱۷ مشخص‌کننده مساحت و محیط کل کانال‌اند:

$$A_w = r^2 \left( \frac{3}{2}t - 2\sin(t) + \frac{1}{2}\cos(t)\sin(t) \right) \Big|_0^{2\pi-t_w} + bd \quad (18)$$

$$A_f = r^2 \left( \frac{3}{2}t - 2\sin(t) + \frac{1}{2}\cos(t)\sin(t) \right) \Big|_0^{2\pi-t_f} + b(d+f) \quad (16)$$

$$p_w = -4r \left[ \cos\left(\frac{t}{2}\right) \right]_{t=t_w}^{2\pi-t_w} + b \quad (19)$$

$$p_f = -4r \left[ \cos\left(\frac{t}{2}\right) \right]_{t=t_f}^{2\pi-t_f} + b \quad (17)$$

$c_1$  = هزینه خاکبرداری بر واحد سطح؛ و  $c_2$ ،  $c_3$  و  $c_4$  = هزینه پوشش‌دار کردن بر واحد طول به ترتیب برای دیواره‌های اول، دوم و بستر کانال. مقدار محیط هر بخش از کانال بر اساس روابط ۲۲ و ۲۳ محاسبه می‌گردد:

$$p_{f1} = p_{f2} = \frac{1}{2}(p_f - b) \quad (22)$$

$$p_{f3} = b \quad (23)$$

مقدار محیط مرطوب شده هر بخش نیز از روابط ۲۴ و ۲۵ به دست می‌آید:

$$p_{w1} = p_{w2} = \frac{1}{2}(p_w - b) \quad (24)$$

$$p_{w3} = b \quad (25)$$

که مقدار  $b$  برای مقطع عرضی اول برابر با صفر و برای مقطع عرضی دوم یک متغیر تصمیم است. مقطع عرضی طراحی شده برای کانال باید گنجایش دبی عبوری را داشته باشد. به این منظور از محدودیت معادله مانینگ استفاده شده است. رابطه ۲۶ فرمول ضریب زبری معادل را ارائه می‌دهد:

$$n_e = \left[ \frac{p_{w1}n_1^{\frac{3}{2}} + p_{w2}n_2^{\frac{3}{2}} + bn_3^{\frac{3}{2}}}{p_w} \right]^{\frac{2}{3}} \quad (26)$$

الگوریتم خفاش، از یک تابع هدف برای بهینه‌سازی استفاده می‌کند. بنابراین از روش پنالتی برای اعمال محدودیت معادله مانینگ به تابع هدف استفاده شده است. تابع پنالتی به شکل رابطه ۲۷ بیان شده است:

تعریف سناریوها برای بهینه‌سازی کانال مصنوعی: به منظور بررسی عملکرد مقاطع معرفی شده، دو سناریو مختلف برای طراحی بهینه هر یک از مقاطع در نظر گرفته شده است. در سناریوی اول، ارتفاع آزاد ثابت است و از محدودیت معادله مانینگ استفاده شده است. سناریوی دوم مانند سناریوی اول است، اما ارتفاع آزاد به صورت متغیر و تابعی از عمق جریان در نظر گرفته می‌شود. در هر دو سناریو، از معادله هورتون (Horton, 1933; Das, 2007a) برای تبدیل زبری مرکب به زبری معادل استفاده شده است. ارتفاع آزاد در هر دو سناریو با استفاده از رابطه ۲۰ حاصل می‌شود:

$$f = k_1 + k_2 y^{k_3} \quad (20)$$

که در آن،

$k_1$ ،  $k_2$  و  $k_3$  پارامترهای ارتفاع آزاد کانال هستند. این پارامترها برای سناریوی اول به ترتیب برابر با ۰/۵، ۰ و ۰ و برای سناریوی دوم برابر با ۰، ۰/۲۵ و ۰/۵ در نظر گرفته شده‌اند (Das, 2007a). با توجه به مقادیر لحاظ شده برای پارامترهای ارتفاع آزاد، در سناریوی اول ارتفاع آزاد ثابت و برابر با ۰/۵ متر است. ارتفاع آزاد در سناریوی دوم نیز متغیر و تابعی از عمق جریان در کانال است.

معرفی تابع هدف و محدودیت‌های مسئله: تابع هزینه مربوط به بهینه‌سازی هر دو مقطع به شکل رابطه ۲۱ بیان شده است:

$$Minimize: f_{cost}(b, y, z) = c_1 A_f + c_2 p_{f1} + c_3 p_{f2} + c_4 p_{f3} \quad (21)$$

که در آن،



$$f_{penalty}(b, y, z) = f_{cost} + Cg(b, y, z) \quad (27)$$

پنالتی.

که در آن، پارامترهای طراحی برای بهینه‌سازی مقاطع تحت سناریوهای مختلف بر اساس مرجع (Das, 2007a) در جدول ۱ مشخص شده‌اند.  $C =$  یک عدد مثبت بزرگ و نشان‌دهنده ضریب پنالتی؛  $g =$  محدودیت مسئله؛ و  $f_{penalty} =$  تابع

جدول ۱- مقدار پارامترهای طراحی برای طرح‌ها و سناریوهای مختلف (Das, 2007a)

parameters	symbol	Scheme 1, inverse cycloid cross section		Scheme 2, inverse cycloid cross section with horizontal bed	
		Scenario 1	Scenario 2	Scenario 1	Scenario 2
Flow parameters	$Q(m^3s^{-1})$	100	100	100	100
	$S$	0.0016	0.0016	0.0016	0.0016
	$f(m)$	0.5	Depth depended variable	0.5	Depth depended variable
Roughness coefficients	$n_1$	0.02	0.02	0.02	0.02
	$n_2$	0.018	0.018	0.018	0.018
	$n_3$	0.015	0.015	0.015	0.015
	$c_1$	0.6	0.6	0.6	0.6
Cost coefficients	$c_2$	0.1	0.1	0.1	0.1
	$c_3$	0.2	0.2	0.2	0.2
	$c_4$	0.4	0.4	0.4	0.4

در موقعیت  $X_i$ ، فرکانس ثابت  $Q_{min}$  و طول موج  $\lambda$  است. خفاش‌ها می‌توانند شدت تولید پالس اصوات خود را از صفر تا یک تغییر دهند. ۳- خفاش‌ها دارای توانایی تولید اصواتی با بلندی صدای بزرگ  $A_0$  تا مقدار کوچک  $A_{min}$  هستند. برای آغاز پرواز تصادفی ابتدا به هر خفاش یک موقعیت تصادفی اختصاص داده می‌شود. پس از آن، سرعت و موقعیت خفاش‌ها بر اساس روابط ۲۸ و ۲۹ به‌روز می‌شود:

$$v_i^t = v_i^{t-1} + (x_i^t - x_{best}^t) Q_i \quad (28)$$

$$x_i^t = x_i^{t-1} + v_i^t \quad (29)$$

که در آنها،

$$v_i^{t-1} = \text{سرعت آامین خفاش در زمان } t-1$$

$$v_i^t = \text{سرعت آامین خفاش در زمان } t$$

### الگوریتم خفاش

الگوریتم خفاش را اولین بار یانگ (Yang, 2010) بر مبنای رفتار خفاش‌های در جستجوی شکار معرفی کرد و توسعه داد. خفاش‌ها امواج فراصوت را به محیط اطراف انتشار می‌دهند. پژواک حاصل از برخورد این امواج با موانع و ساختارهای اطراف به گوش‌های خفاش‌ها می‌رسد. خفاش‌ها با توجه به فرکانس صوت برگشتی مانع را از شکار تشخیص می‌دهند. الگوریتم خفاش الگوریتمی است فراابتکاری که بر مبنای این توانایی خفاش‌ها توسعه داده شده است. این الگوریتم بر پایه سه ایده اساسی زیر عمل می‌کند:

۱- همه خفاش‌ها با تولید صدا و دریافت پژواک آن، مانع را از شکار تشخیص می‌دهند.

۲- همه خفاش‌ها برای رسیدن به شکار به صورت تصادفی پرواز می‌کنند. هر خفاش دارای سرعت  $V_i$

که عدد تصادفی  $\varepsilon$  بین ۱- و ۱ تغییر می‌کند.  $A^t$  نیز متوسط بلندی صدای خفاش‌ها در زمان  $t$  است. در طبیعت زمانی که خفاش‌ها به شکار یا به منبع غذا نزدیک می‌شوند، بلندی صدای اصوات آنها کاهش و شدت تولید پالس افزایش پیدا می‌کند. این موضوع در الگوریتم خفاش بر اساس رابطه ۳۲ در نظر گرفته شده است:

$$A_i^{t+1} = \alpha A_i^t, r_i^{t+1} = r_i^0 [1 - \exp(-\gamma t)] \quad (32)$$

### نتایج و بحث

در جدول ۲، محدوده متغیرهای تصمیم برای طراحی بهینه کانال با مقطع معرفی شده نشان داده شده است. در این جدول، عمق جریان بین ۰ تا ۱۰ متر، عرض بستر بین ۰ تا ۱۰ متر و شیب جانبی در بالای کانال از ۰/۱ تا ۲ در نظر گرفته شده است.

$x_i^{t-1}$  = موقعیت آمین خفاش در زمان  $t-1$ ؛  $x_i^t$  موقعیت خفاش در زمان  $t$ ؛  $x_{best}$  = بهترین موقعیت خفاش‌ها تا کنون؛  $Q_i$  = فرکانس آمین خفاش که بین دو مقدار  $Q_{min}$  و  $Q_{max}$  متغیر است. فرکانس هر خفاش در هر تکرار با استفاده از رابطه ۳۰ به‌روز می‌شود:

$$Q_i = Q_{min} + (Q_{max} - Q_{min})\beta \quad (30)$$

که در آن،  $\beta$  یک عدد تصادفی بین صفر و یک است.

جستجوی محلی با ایجاد یک گام تصادفی در اطراف هر خفاش دنبال می‌شود. گام تصادفی برای هر خفاش از رابطه ۳۱ به‌دست می‌آید:

$$x_i^t = x_i^{t-1} + \varepsilon A^t \quad (31)$$

جدول ۲- حدود پایین و بالای متغیرهای تصمیم

Table 2. Lower and upper bound of decision variables

Decision variable	Lower bound	Upper bound
d(m)	0	10
b(m)	0	10
Z	0.1	2

سناریوی اول برابر با ۰ و برای مقطع طرح ۲ تحت سناریوی دوم برابر با ۰/۱ انتخاب شده است. در مورد فرکانس بیشینه، در هر دو مقطع و در دو سناریو، بهترین مقدار مربوط به فرکانس ۵ است. بهترین مقدار بلندی صدای کمینه برای مقطع طرح ۱ در سناریوهای اول تا دوم و طرح ۲ تحت سناریوی اول برابر با ۰/۱ و برای طرح ۲ تحت سناریوی دوم برابر با ۰/۲ است. بهترین مقدار بلندی صدای بیشینه نیز در همه مقاطع تحت سناریوهای بررسی شده برابر با ۰/۹ است.

برای تعیین بهترین پارامترهای الگوریتم خفاش برای مقاطع و سناریوهای بررسی شده، از روش آنالیز حساسیت استفاده شده است. جدول ۳ نتایج آنالیز حساسیت پارامترهای الگوریتم خفاش را برای مقاطع و سناریوهای مختلف نشان می‌دهد. در این جدول، الگوریتم خفاش برای همه مقاطع و سناریوها در جمعیت ۱۰۰ دارای کمترین مقدار تابع هدف است. افزایش جمعیت از مقدار ۱۰۰ تأثیری در نتایج ندارد. مقدار فرکانس کمینه برای مقطع طرح ۱ تحت سناریوهای اول تا دوم و مقطع طرح ۲ تحت

جدول ۳- نتایج آنالیز حساسیت الگوریتم خفاش برای مقاطع و سناریوهای بررسی شده

Table 3. Results of sensitivity analysis of bat algorithm for different investigated sections and scenarios

Sections	Scenario	Population	Minimum frequency	Maximum frequency	Minimum loudness	Maximum loudness
Scheme 1	First scenario	100	0	5	0.1	0.9
	Second scenario	100	0	5	0.1	0.9
Scheme 2	First scenario	100	0	5	0.1	0.9
	Second scenario	100	0.1	5	0.2	0.9

سراسری مدل لینگو برای ارزیابی دقت جواب‌های حاصل از الگوریتم خفاش، استفاده شده است. با توجه به جدول ۴، جواب‌های حاصل از الگوریتم خفاش و بهینه سراسری نرم‌افزار لینگو همخوانی بسیار مطلوبی دارند. بنابراین، الگوریتم پیشنهادی در تعیین بهینه سراسری مسئله دقت بالایی دارد. دلیل استفاده از الگوریتم پیشنهادی، سرعت و دقت بالاتر آن نسبت به نرم‌افزار لینگو است. برخلاف نرم‌افزار لینگو، الگوریتم خفاش محدودیتی در تعداد قیود مسئله ندارد.

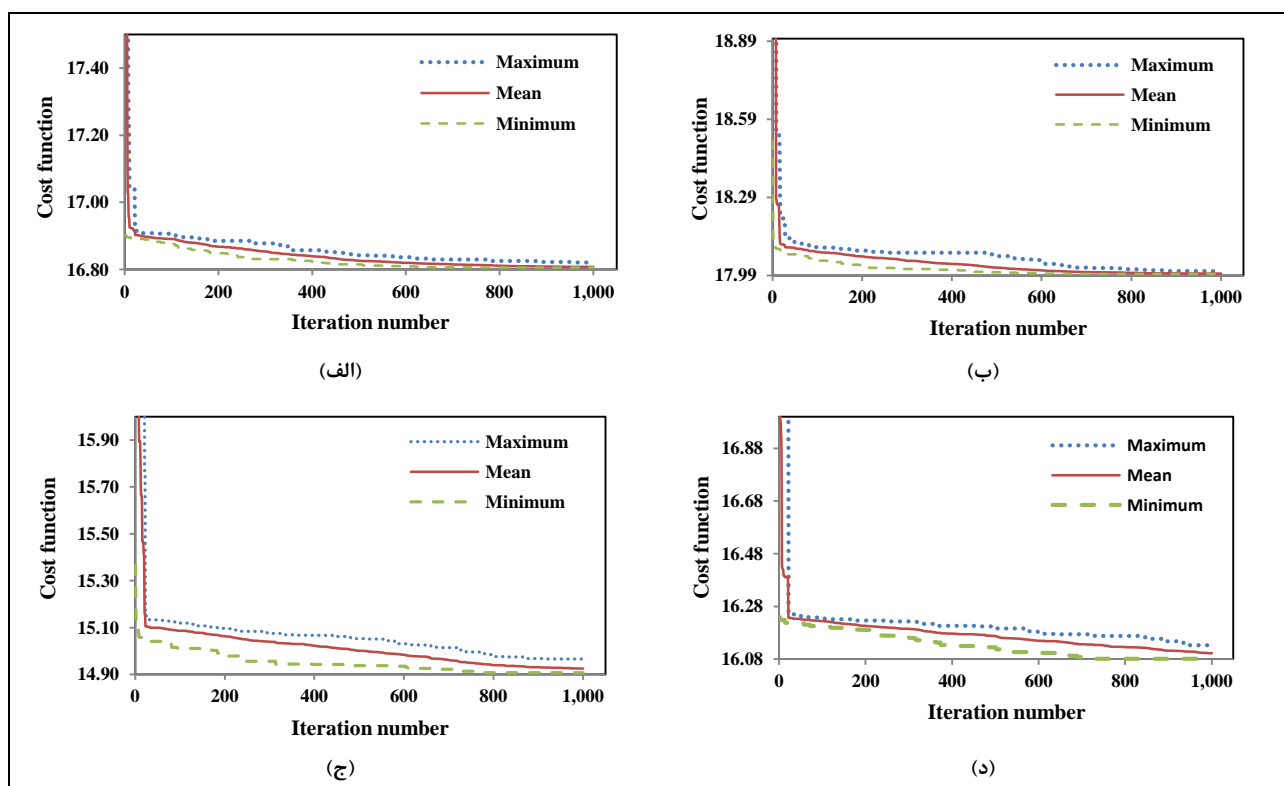
شکل ۴ نمودار همگرایی تابع هزینه برای مقاطع معرفی شده تحت سناریوهای اول و دوم را نشان می‌دهد. در این شکل، هر دو مقطع و دو سناریو در ۱۰۰۰ تکرار همگرا شده‌اند. اختلاف بین بدترین و بهترین جواب‌ها برای مقاطع و سناریوهای ارائه شده بسیار کم است. کمترین مقدار این اختلاف مربوط به مقطع طرح ۲ تحت سناریوی اول و برابر با ۰/۰۰۹ است. مقدار اختلاف میان بدترین و بهترین جواب برای مقطع طرح ۱ تحت سناریوی دوم نیز دارای بیشترین مقدار و برابر با ۰/۰۵۸ شده است. مقدار این اختلاف برای مقطع طرح ۱ و طرح ۲ تحت سناریو دوم برابر با ۰/۰۱۳ و ۰/۰۵۱ است.

الگوریتم خفاش الگوریتمی فراابتکاری و دارای ماهیت تصادفی است. برای بررسی کیفیت جواب‌های حاصل از الگوریتم پیشنهادی، نتایج ۱۵ اجرای تصادفی برای هر مقطع و سناریو در جدول ۴ ارائه شده است. در این جدول، کمترین ضریب تغییرات مربوط به مقطع طرح ۲ تحت سناریوی اول و برابر با ۰/۰۰۰۱۵ و بیشترین مقدار آن برای مقطع با طرح ۱ تحت سناریوی دوم و برابر با ۰/۰۰۱۳ است. برای طرح ۱ تحت سناریوی اول و طرح ۲ تحت سناریوی دوم نیز ضریب تغییرات برابر با ۰/۰۰۰۲ و ۰/۰۰۱ است. بنابراین با توجه به مقدار کم ضریب تغییرات برای هر دو مقطع و دو سناریو، تنها یک بار اجرای الگوریتم خفاش برای رسیدن به جواب بهینه مسئله کافی است. برای تعیین دقت الگوریتم خفاش نیاز به مقایسه این الگوریتم با یک روش بهینه‌سازی سراسری دقیق است. مدل لینگو یک روش بهینه‌سازی عددی است که بهینه سراسری مسئله را با دقت بالا تعیین می‌کند. در پژوهش حاضر، مطابق با مطالعات قبل (Bozorg-Haddad *et al.*, 2014; Ahmadianfar *et al.*, 2015; Ehteram *et al.*, 2017; Karami *et al.*, 2018)، از جواب بهینه

جدول ۴- نتایج ۱۵ اجرای تصادفی برای مقاطع پیشنهادی تحت سناریوهای مختلف

Table 4. Results of 15 random run for introduced sections under different scenarios

Number of iteration	Scheme 1		Scheme 2	
	First scenario	Second Scenario	First scenario	Second Scenario
1	16.821	14.908	17.997	16.033
2	16.807	14.908	17.996	16.082
3	16.807	14.996	17.996	16.106
4	16.807	14.908	17.995	16.082
5	16.807	14.908	17.996	16.101
6	16.807	14.908	17.995	16.098
7	16.807	14.947	17.996	16.098
8	16.807	14.935	18.006	16.082
9	16.807	14.928	17.996	16.117
10	16.807	14.913	17.996	16.113
11	16.807	14.947	17.996	16.114
12	16.807	14.908	17.996	16.082
13	16.807	14.908	18.000	16.093
14	16.807	14.941	17.996	16.082
15	16.821	14.966	18.006	16.133
Worst	16.808	14.925	17.997	16.102
Mean	16.808	14.908	17.995	16.082
Best	0.00020	0.00130	0.00015	0.00100
Global Optimum (LINGO)	16.808	14.908	17.995	16.082



شکل ۴- نمودار همگرایی برای طرح‌ها و مدل‌های مختلف. الف) طرح ۱ و سناریوی اول، ب) طرح ۱ و سناریوی دوم، ج) طرح ۲ و سناریوی اول، و د) طرح ۲ و سناریوی دوم

Fig 4. Convergence curve for different schemes and models. a) section 1 and first scenario, b) section 1 and second scenario, c) section 2 and first scenario, d) section 2 and second scenario

سهمی با بستر افقی (Das, 2007a) و بیضوی عمومی (Easa, 2016) در حدود ۲۴/۲۴ و ۱۹/۶۲ درصد کمتر است. استفاده از کانال با مقطع طرح ۲ نیز در مقایسه با مقاطع سهمی و بیضوی عمومی کاهش هزینه در حدود ۱۸/۸۹ و ۱۳/۹۴ درصد را نشان می‌دهد.

در سناریوی دوم نیز در نظر گرفتن ارتفاع آزاد متغیر برای ساخت کانال با مقطع طرح ۱ در مقایسه با مقاطع دوزنقه‌ای سبب کاهش هزینه در حدود ۳۴/۷۰ درصد شده است. این هزینه برای ساخت کانال در مقایسه با مقاطع سهمی و بیضوی عمومی حدود ۳۳/۲۳ و ۲۸/۷۰ درصد کمتر است. در مورد مقطع طرح ۲ نیز طراحی کانال با در نظر گرفتن ارتفاع آزاد متغیر در مقایسه با مقطع دوزنقه‌ای، سهمی و بیضوی عمومی با صرفه‌جویی ۲۹/۵۵، ۲۷/۹۷ و ۲۳/۰۹ درصد در هزینه‌های ساخت کانال همراه است. بنابراین می‌توان چنین نتیجه گرفت که استفاده از مقطع طرح ۱ و ۲ در مقایسه با مقاطع دوزنقه‌ای، سهمی و بیضوی عمومی موجب کاهش تابع هدف (مجموع هزینه خاکبرداری و پوشش‌دار کردن دیواره‌ها) به ترتیب در حدود ۳۴/۷۰ و ۲۹/۵۵ درصد می‌گردد. کاهش تابع هدف برای هر دو طرح در سناریوی دوم، در مقایسه با سناریو اول، حدود ۸/۶۱ و ۸/۶۸ است.

طبق گزارش‌های لیکاک (Laycock, A. 2007) در کانال‌های منحنی شکل می‌توان از قالب‌های لغزان برای قالب‌بندی پوشش بتنی بستر و دیواره‌های کانال استفاده کرد. این موضوع سبب افزایش سرعت اجرای پروژه می‌شود. این کانال‌ها نسبت به کانال‌های دوزنقه‌ای مزایایی دارند: مانند مقاومت، حجم بتن‌ریزی کمتر و نداشتن مشکل ترک خوردگی. علاوه بر این، مواردی چون هزینه خاکبرداری و پوشش‌دار کردن بتن نقش مهمی در هزینه ساخت کانال دارند. در جدول ۵، مجموع هزینه خاکبرداری و پوشش‌دار کردن حاصل از طراحی بهینه کانال با الگوریتم خفاش برای مقاطع معرفی شده تحت سناریوهای اول و دوم با نتایج مطالعات گذشته مقایسه شده است. با توجه به نتایج این جدول، مقدار هزینه ساخت کانال بر حسب هزار روپیه هند، تحت سناریو اول برای مقطع دوزنقه‌ای (Das, 2007a) برابر با ۲۲/۷۴۲ است. این هزینه برای کانال با مقطع به شکل طرح ۱ برابر با ۱۶/۸۰۸ هزار روپیه و برای کانال با مقطع طرح ۲ برابر با ۱۷/۹۹۵ هزار روپیه شده است. بنابراین استفاده از کانال با این دو طرح در مقایسه با کانال دوزنقه‌ای موجب کاهش هزینه ساخت در حدود ۲۶/۰۹ و ۲۰/۸۷ درصد می‌شود. این هزینه برای کانال با مقطع طرح ۱ نسبت به کانال با مقاطع به شکل

جدول ۵- مقایسه هزینه ساخت کانال (بر حسب هزار روپیه هند) برای مقاطع مختلف  
Table 5. Channel construction cost (Thousand Indian rupee) for different sections

Section	First scenario	Second scenario
Trapezoidal (Das, 2007b)	22.742	22.829
Parabolic with horizontal bed (Das, 2007a)	22.185	22.326
General Elliptic (Easa, 2016)	20.91	20.91
Inverse cycloid	16.808	14.908
Inverse cycloid with horizontal bed	17.995	16.082

برای مقطع طرح ۲ تحت سناریوی اول دارای بیشترین مقدار در حدود ۲۷/۰۴۴ متر مربع است. کمترین مقدار مساحت کل با استفاده از الگوریتم خفاش نیز در کانال با طرح ۱ تحت سناریوی دوم و

در جدول ۶، نتایج طراحی بهینه کانال مصنوعی با مقاطع معرفی شده، با الگوریتم خفاش و نرم‌افزار لینگو مشاهده می‌شود. نتایج این جدول نشان می‌دهد مساحت محاسبه شده با الگوریتم خفاش

سناریوی اول، مقطع طرح ۱ در سناریوی دوم و مقطع طرح ۲ در سناریوی دوم به ترتیب حدود ۱۴/۹۶۵، ۴۴/۱۵۰ و ۱۵/۹۲۷ درصد کوچک‌تر شده است. در میان مقاطع و سناریوهای طراحی شده با الگوریتم خفاش کمترین مقدار هزینه، برای مقطع طرح ۱ در سناریو دوم برابر با ۱۴/۹۰۸ هزار روپیه است. بنابراین، استفاده از کانال با مقطع طرح ۱ و سناریوی دوم در مقایسه با طرح ۱ در سناریوی اول، طرح ۲ در سناریوی اول و طرح ۲ در سناریوی دوم، توانسته است هزینه ساخت کانال را به ترتیب برابر با ۱۱/۳۰، ۱۷/۱۵ و ۷/۳۰ درصد کاهش دهد. با توجه به جدول ۵، پاسخ‌های به دست آمده از الگوریتم خفاش با آنچه از نرم‌افزار لینگو به دست آمده همخوانی بالایی دارد. این موضوع توانایی بالای الگوریتم خفاش را در تعیین ابعاد بهینه مقاطع معرفی شده نشان می‌دهد.

برابر با ۲۳/۱۵۴ متر مربع دیده می‌شود. نرم‌افزار لینگو نیز مساحت مقطع طرح ۱ را در سناریوی دوم، نسبت به مقاطع و سناریوهای دیگر، کمتر تخمین می‌زند. در میان مقاطع و سناریوهای بررسی شده، محیط کانال با استفاده از الگوریتم خفاش برای مقطع طرح ۲ تحت سناریوی اول دارای بیشترین مقدار حدود ۱۰/۱۲۴ متر و برای مقطع طرح ۱ تحت سناریو دوم دارای کمترین مقدار حدود ۶/۷۷۲ متر است. بیشترین و کمترین شعاع هیدرولیکی نیز با استفاده از الگوریتم خفاش در مقطع طرح ۱ در سناریوی دوم (در حدود ۳/۵۰۹) و مقطع طرح ۲ در سناریوی اول (در حدود ۲/۶۷۱ متر) است.

در مورد عرض بالای کانال نیز این مقدار برای مقطع طرح ۲ در سناریوی اول برابر با ۹/۴۲۶ متر شده است. این مقدار در مقایسه با مقطع طرح ۱ در

جدول ۶- ابعاد بهینه مقاطع معرفی شده تحت سناریوهای مختلف

Table 6. Optimal dimension of introduce section under different scenarios

Optimum dimensions	Inverse cycloid cross section				Inverse cycloid cross section with horizontal bed			
	First scenario		Second scenario		First scenario		Second scenario	
	BA	LINGO	BA	LINGO	BA	LINGO	BA	LINGO
b(m)	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000
y(m)	0.852	0.853	0.569	0.569	0.988	0.988	0.576	0.576
z	1.281	1.281	2.000	2.000	1.161	1.161	2.000	2.000
f(m)	0.500	0.500	0.189	0.189	0.500	0.500	0.190	0.190
Af1(m <sup>2</sup> )	0.000	0.000	0.000	0.000	1.488	1.488	0.765	0.765
Af2(m <sup>2</sup> )	12.907	12.906	11.577	11.577	12.778	12.778	11.830	11.830
Af3(m <sup>2</sup> )	12.907	12.906	11.577	11.577	12.778	12.778	11.830	11.830
Atf(m <sup>2</sup> )	25.814	25.812	23.154	23.154	27.044	27.044	24.425	24.425
Pf1(m)	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Pf2(m)	4.935	4.936	3.386	3.386	4.562	4.561	3.423	3.423
Pf3(m)	4.935	4.936	3.386	3.386	4.562	4.561	3.423	3.423
Ptf(m)	8.790	8.792	6.772	6.772	10.124	10.122	7.846	7.846
Rw(m)	2.937	2.936	3.509	3.509	2.671	2.672	3.113	3.113
f <sub>cost</sub> (thousand Indian rupee)	16.808	16.808	14.908	14.908	17.995	17.995	16.082	16.082

تحت دو سناریوی مختلف به کار گرفته شد. مقاطع معرفی شده با در نظر گرفتن دو سناریوی مختلف، با الگوریتم خفاش طراحی شد. الگوریتم خفاش برای مقاطع پیشنهادی با در نظر گرفتن دو سناریوی مختلف پانزده بار اجرا شد. مقایسه نتایج حاصل از

## نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، برای نخستین بار مقطع چرخزاد وارونه در دو طرح بدون بستر افقی و با بستر افقی، به عنوان جایگزین کانال دوزنقه‌ای معرفی شد. الگوریتم خفاش برای طراحی مقاطع معرفی شده

مقطع و سناریو در حدود ۱۷/۱۶ درصد کمتر از دیگر مقاطع و سناریوها برآورد شده است. در مورد سرعت اجرا نیز، تکنولوژی ساخت کانال‌های منحنی شکل موجب ساخت سریع‌تر کانال‌های منحنی شکل از کانال‌های دوزنقه‌ای می‌شود. کانال‌های مصنوعی برای مصارف آبرسانی و آبیاری معمولاً در مسافت‌های طولانی تا حدود چند صد کیلومتر ساخته می‌شوند. از همین رو، مقدار کاهش در مجموع هزینه خاکبرداری و پوشش‌دار کردن بستر و دیواره‌ها (۳۴/۷ درصد) در مقطع چرخزاد وارونه، می‌تواند هزینه ناشی از تهیه تجهیزات و ماشین‌آلات لازم را جبران کند. جمع‌بندی موارد گفته شده، پتانسیل و عملکرد بالای مقاطع چرخزاد وارونه را برای جایگزینی با مقطع دوزنقه‌ای بیان می‌کند. الگوریتم هوشمند خفاش نیز ظرفیت و توانمندی بالایی برای حل دیگر مسائل بهینه‌سازی منابع آب دارد. تحلیل مقطع معرفی شده در پژوهش حاضر با در نظر گرفتن قیود هیدرولیکی، برای مطالعات آتی پیشنهاد می‌شود.

اجراهای تصادفی در زمینه ضریب تغییرات و سرعت همگرایی برای مقاطع تحت سناریوهای مختلف نشان می‌دهد مقدار ضریب تغییرات برای مقطع طرح ۱ در سناریوی اول، مقطع طرح ۱ در سناریوی دوم، مقطع طرح ۲ در سناریوی اول و مقطع طرح ۲ در سناریو دوم به ترتیب حدود ۰/۰۰۰۲۰، ۰/۰۰۰۱۳۰، ۰/۰۰۰۱۵ و ۰/۰۰۰۱۰۰ محاسبه شد. همه مقاطع و سناریوها در ۱۰۰۰ تکرار به همگرایی رسیدند. برای بررسی دقت جواب‌های حاصل از الگوریتم خفاش نیز بین الگوریتم پیشنهادی و نرم‌افزار لینگو مقایسه شده است. نتایج نشان‌دهنده تطابق بالای جواب‌های بهینه الگوریتم خفاش نسبت به نرم‌افزار لینگو است. مقایسه بین مقاطع معرفی شده با مطالعات گذشته نیز نشان می‌دهد استفاده از مقاطع پیشنهادی کاهش ۳۴/۷۰ و ۲۹/۵۵ درصد را به دنبال داشته است. بررسی ابعاد بهینه و هزینه کانال برای مقاطع پیشنهادی تحت سناریوهای مختلف نشان از برتری مقطع چرخزاد وارونه در طرح ۱ و سناریو دوم دارد. مقدار هزینه برای این

## مراجع

- Ahmadianfar., I. Adib, A. and Salarijazi, M. 2015. Optimizing multireservoir operation: Hybrid of bat algorithm and differential evolution. *J. Water Resour. Plann. Manage.* 142(2): 05015010.
- Babaeyan-Koopaei, K., Valentine, E. M. and Swailes, D. C. 2000. Optimal design of parabolic-bottomed triangle canals. *J. Irrig. Drain. Eng.* 126(6): 408-411.
- Bhattacharjya, R. K. 2006. Optimal design of open channel section incorporating critical flow condition. *J. Irrig. Drain. Eng.* 132(5): 513-518.
- Bozorg-Haddad. O., Karimirad, I., Seifollahi-Aghmiuni, S. and Loáiciga, H. A. 2014. Development and application of the bat algorithm for optimizing the operation of reservoir systems. *J. Water Resour. Plann. Manage.* 141(8): 04014097.
- Chahar, B. R. 2005. Optimal design of parabolic canal section. 2005. *J. Irrig. Drain. Eng.* 131(6): 546-554.
- Chahar, B. R. 2007. Optimal Design of a Special Class of Curvilinear Bottomed Channel Section. *J. Hydraul. Eng.* 133(5): 571-576.

- Das, A. 2000. Optimal channel cross section with composite roughness. *J. Irrig. Drain. Eng.* 126(1): 68-72.
- Das, A. 2007a. Optimal design of channel having horizontal bottom and parabolic sides. *J. Irrig. Drain. Eng.* 133(2): 192-197.
- Das, A. 2007b. Flooding probability constrained optimal design of trapezoidal channels. *J. Irrig. Drain. Eng.* 133(1): 53-60.
- Easa, S. M. 2009. Improved channel cross section with two-segment parabolic sides and horizontal bottom. *J. Irrig. Drain. Eng.* 135(3): 357-365.
- Easa, S. M. 2011. New and improved channel cross section with piecewise linear or smooth sides. *Can. J. Civil Eng.* 38(6): 690-697.
- Easa, S. M. 2016. Versatile general elliptic open channel cross section. *KSCE J. Civil Eng.* 20(4): 1572-1581.
- Easa, S. M. and Vatankhah, A. R. 2014. New open channel with elliptic sides and horizontal bottom. *KSCE J. Civil Eng.* 18(4): 1197-1204.
- Ehteram, M., Mousavi, S. F., Karami, H., Farzin, S., Singh, V. P., Wing, K. and El-Shafie, A. 2017. Reservoir operation based on evolutionary algorithms and multi-criteria decision-making under climate change and uncertainty. *J. Hydroinform.* 20(2): 332-355.
- Ehteram, M., Karami, H., Mousavi, S. F., Farzin, S., Sarkamaryan, V. P., Wing, K. and El-Shafie, A. 2018. Evaluation of the performance of bat algorithm in optimization of nonlinear Muskingum model parameters for flood routing. *J. Hydroinform.* 4(4): 1025-1032.
- Froehlich, D. C. 1994. Width and depth-constrained best trapezoidal section. *J. Irrig. Drain. Eng.* 120(4): 828-835.
- Gupta, S. K., Mishra, U., Datta, D. and Singh, V. P. 2017. Fish shoal optimization for identification of the most suitable revetment stone for design of minimum cost earthen canals carrying sediment-laden flow. *ISH J. Hydraul.* 23(1): 1-18.
- Han, Y. C. 2015. Horizontal bottomed semi-cubic parabolic channel and best hydraulic section. *Flow. Meas. Instrum.* 45: 56-61.
- Han, Y. C. and Easa, S. M. 2017. New and improved three and one-third parabolic channel and most efficient hydraulic section. *Can. J. Civil Eng.* 44(5): 387-391.
- Horton, R. E. 1933. Separate roughness coefficients for channel bottom and sides. *Eng. News-Rec.* 111(22): 652-653.
- Jain, A., Bhattacharjya, R. K. and Sanaga, S. 2004. Optimal design of composite channels using genetic algorithm. *J. Irrig. Drain. Eng.* 130(4): 286-295.
- Jayabarathi, T., Raghunathan, T. and Gandomi, A. H. 2018. The Bat Algorithm, Variants and Some Practical Engineering Applications. In: Yang, X. S. (Ed) *Nature-Inspired Algorithms and Applied Optimization*. Springer, Cham.
- Karami, H., Ehteram, M., Mousavi, S. F., Farzin, S., Kisi, O. and El-Shafie, A. 2018. Optimization of energy management and conversion in the water systems based on evolutionary algorithms. *Neural Comput. Appl.* doi.org/10.1007/s00521-018-3412-6.
- Laycock, A. 2007. *Irrigation Systems: Design, Planning and Construction*. CABI.



- Loganathan, G. V. Optimal design of parabolic canals. 1991. *J. Irrig. Drain. Eng.* 117(5): 716-735.
- Mironenko, A. P., Willardson., L. S. and Jenab, S. A. 1984. Parabolic canal design and analysis. *J. Irrig. Drain. Eng.* 110(2): 241-246.
- Monadjemi, P. 1994. General formulation of best hydraulic channel section. *J. Irrig. Drain. Eng.* 120(1): 27-35.
- Niknam, T., Sharifinia, S. and Azizipanah-Abarghooee, R. 2013. A new enhanced bat-inspired algorithm for finding linear supply function equilibrium of GENCOs in the competitive electricity market. *Energy Convers. Manage.* 76, 1015-1028.
- Orouji, H., Mahmoudi, N., Fallah-Mehdipour., E, Pazoki, M. and Biswas, A. 2016. Shuffled frog-leaping algorithm for optimal design of open channels. *J. Irrig. Drain. Eng.* 142(10): 06016008.
- Reddy, M. and Adarsh, S. 2010. Chance constrained optimal design of composite channels using meta-heuristic techniques. *J. Water Resour. Plan. Manage.* 10(24): 2221-2235.
- Swamee, P. K. 1995. Optimal irrigation canal sections. *J. Irrig. Drain. Eng.* 121(6): 467-469.
- Swamee, P. K., Mishra, G. C. and Chahar, B. R. 2002. Design of minimum water-loss canal sections. *J. Hydraul. Res.* 40(2): 215-220.
- Yang, X. S. 2010. A New Metaheuristic Bat-Inspired Algorithm. In: González, J. R., Pelta, D. A., Cruz, C., Terrazas, G. and Krasnogor, N. (Eds.) *Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization (NICSO 2010)*. Studies in Computational Intelligence, Vol 284. Springer, Berlin, Heidelberg.

## **Introduction Inverse Cycloid Cross Section for Optimal Design of Channels by using Artificial Intelligence**

**S. Farzin\*, H. Karami, J. Dastorani, M. Valikhan-Anaraki and M. Ehteram**

\* Corresponding Author: Assistant Professor, Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran. Email: saeed.farzin@semnan.ac.ir

Received: 29 April 2018, Accepted: 15 January 2019

### **Abstract**

The shape of the artificial channel sections and their optimal design by artificial intelligence methods can have significant effects on lowering the costs of constructions. In this study, an artificial channel with inverse cycloid and its optimal design by bat algorithm was introduced for the first time. Two schemes of sections were proposed: inverse cycloid without horizontal bed and inverse cycloid with horizontal bed. For optimal designing of proposed section, two scenarios were defined: channel with fixed freeboard and channel with variable freeboard. In both scenarios, Manning equation was used as a constraint and Horton equation was used for considering equivalent roughness. Based on sensitivity analysis, optimal parameters of the proposed algorithm were determined. Bat algorithm has been implemented randomly for each section and for each scenario for fifteen times, and coefficient of variation and speed of convergence were estimated. To find out the accuracy of bat algorithm in the global optimum determination, a comparison between solutions of bat algorithm and lingo software was made. Eventually, results from optimal design of proposed sections were compared with trapezoidal channel, parabolic with horizontal bed channel, ellipsoid channel, and general ellipsoid channel. Results from random runs of bat algorithm indicated that coefficient of variation for defined sections and scenarios were about 0.0002 to 0.0013. Convergence curves showed that the algorithm was convergence for all sections and scenarios in 1000 repetition. Findings of bat algorithm and lingo software also demonstrated high accuracy of mentioned algorithm in determination of global optimum. Furthermore, using proposed sections, compared with other common sections, led to 34.7 percent decrease in construction costs. Among sections and scenarios investigated here, the inverse cycloid under second scenario was found more economical, up to 17.15 percent.

**Keywords:** Artificial Channel, Bat Algorithm, Channels sections, Lingo Software