

# بهینه‌سازی مقطع کانال سهموی مرکب براساس تغییرات دبی جریان و ارتفاع آزاد

سمیه پوربخشیان\* (استادیار)

پیمان فصیح (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد رامسر

مهندسی عمران شهریه (پیاپی ۱۴۰۱)  
دربی ۲ - ۳۸، شماره ۱/۲، ص. ۱۵۵-۱۶۷، (پادداشت نوی)

در نوشتار حاضر، شکل بهینه‌ی مقطع کانال سهموی مرکب براساس چهار مدل ارائه شده است. ارتفاع آزاد در مدل اول الی چهارم، به ترتیب: صفر،  $5^\circ$ ، متر، تابعی از دبی و عمق جریان است. تابع هدف، کمینه‌سازی تابع هزینه پوشش و خاک‌برداری، متغیرهای طراحی، شامل: عمق جریان و شیب‌های کناری و قیود، شامل: معادله‌ی مانینگ، عدد فرود، عرض کانال و سرعت جریان هستند. مسئله‌ی اخیر با الگوریتم تقریب‌سازی تصادفی مبتنی بر آشفته‌سازی هم‌زمان (SPSA) حل شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش دبی سبب افزایش عمق جریان، سرعت، عدد فرود، هزینه، شیب‌های کناری، عرض کلی کانال، عرض سطح آب، مساحت مقطع، مساحت جریان، محیط کلی کانال و محیط خیس شده‌ی کانال می‌شود. از طرفی، افزایش شیب‌های کناری، عرض کلی کانال، عرض سطح آب، مساحت مقطع، مساحت جریان، محیط کلی کانال، محیط خیس شده و عدد فرود، سبب افزایش هزینه و عمق و سرعت جریان سبب کاهش هزینه می‌شود. مقادیر هزینه در مدل اول کمتر و در مدل سوم بیشتر بوده است.

s.pourbakhshian@iauramsar.ac.ir  
fasih.peyman@gmail.com

واژگان کلیدی: کانال سهموی مرکب، بهینه‌سازی، الگوریتم SPSA، ارتفاع آزاد.

## ۱. مقدمه

لگاناتان<sup>۱</sup> (۱۹۹۱)، شکل بهینه‌ی مقطع سهموی کانال را با در نظر گرفتن ارتفاع آزاد به صورت تابعی از دبی جریان یا عمق و محدودیت‌های سرعت و ابعاد کانال ارائه کرده است. در مطالعات ایشان، مقدار شیب جانبی بهترین مقطع هیدرولیکی کانال سهموی شکل، برابر با  $514^\circ$  بوده است. پژوهشگران قبل از ایشان، مقدار اخیر را برابر با  $7^\circ$  به دست آورده بودند.<sup>[۱۵]</sup>

چاهار<sup>۲</sup> (۲۰۰۵)، مقطع بهینه‌ی کانال سهمی شکل را ارائه کرده است. مطالعات ایشان نشان می‌دهد که هزینه‌ی ساخت کانال سهموی شکل نسبت به مقطع ذوزنقه‌بی شکل کمتر است. همچنین دبی جریان عبوری از مقطع سهموی بیشتر است.<sup>[۱۶]</sup> داس<sup>۳</sup> (۲۰۰۷)، مقطع کانال مرکب با دیواره‌های سهموی شکل با کف افقی که در آن زبری معادل با معادله‌ی هورتن و انیشتین محاسبه شده بود، را بهینه کرد و به این نتیجه رسید که هزینه‌ی ساخت کانال مذکور در مقایسه با کانال ذوزنقه‌بی شکل کمتر است.<sup>[۱۷]</sup> عیسی (۲۰۰۹)، شکل مقطع یک کانال را به صورت کف افقی و دیواره‌های سهموی دو بخشی (TSPS) معرفی کرد و نشان داد که هزینه‌ی ساخت در کانال ذکر شده در مقایسه با مقطع کانال در مطالعات داس (۲۰۰۷) کمتر است.<sup>[۱۸]</sup> عیسی (۲۰۱۱)، مقطع کانالی با کف افقی و دیواره‌های سهموی با  $m$  بخش را بهینه ساخت. هزینه‌ی ساخت کانال اخیر، در مقایسه با مطالعات پیشین کمتر بوده است.<sup>[۱۹]</sup> از لحاظ عملی و اجرایی، شکل مقطع سهموی، بهترین شکل مقطع کانال باز است. یکی از مزایای آن، توانایی حفظ سرعت بالا در دبی جریان کم است که سبب کاهش تمایل به رسوب‌گذاری است و همچنین ایجاد

هدف از طراحی بهینه‌ی مقطع کانال روباز، تعیین ابعاد هندسی بهینه‌ی کانال به منظور عبور بیشینه‌ی دبی جریان و کمینه‌ی هزینه‌ی ساخت است. کانال‌های سهموی برای یک دبی مشخص، در مقایسه با کانال‌های ذوزنقه‌بی شکل، ابعاد کوچک‌تری دارند که این امر خود منجر به کاهش هزینه‌ی ساخت کانال می‌شود و از طرفی، ظرفیت عبور دبی جریان در کانال‌های سهموی بیشتر خواهد بود.

بستر رودخانه‌ها، کانال‌های غیرپوششی، نه‌رها و شیارهای آبیاری به طور طبیعی تمایل دارند که مقاطع‌شان به شکل سهموی باشد.<sup>[۱]</sup> تاکنون مطالعات وسیعی در زمینه‌ی طراحی بهینه‌ی مقطع کانال روباز و شکل مقطع کانال‌های ذوزنقه‌بی شکل با استفاده از روش‌ها و الگوریتم‌های مختلف بهینه‌سازی انجام شده است.<sup>[۲-۱۳]</sup> از آنجا که در مقاطع سهموی پوشش‌دار، شیب جانبی دیواره‌های سهمی در مقطع عرضی کانال همیشه کمتر از بیشینه‌ی شیب مجاز که در سطح آب اتفاق می‌افتد، است؛ لذا، کانال‌های سهموی از لحاظ فیزیکی پایدارتر هستند. از طرفی، در مقاطع سهموی پوشش‌دار، به دلیل نداشتن زوایای تند در گوشه‌ها، تمرکز تنش و به دنبال آن ترک و تراوش در مقطع کانال کمتر است. از لحاظ هیدرولیکی، مقاطع سهموی در مقایسه با مقاطع ذوزنقه‌بی شکل، برای شیب‌کناره‌های مساوی و کمتر از  $66^\circ$ ،  $Z = 0$ ، کاراتر هستند.<sup>[۱۴]</sup>

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۶/۲۰، اصلاحیه ۱۴۰۰/۹/۳۰، پذیرش ۱۴۰۰/۱۰/۱۳.

DOI:10.24200/J30.2022.58880.3011

عمق بیشتر جریان در دبی‌های کم است، که سبب می‌شود عبور جریان نسبت به مقاطع دیگر از جمله مقطع دوزنقه‌یی راحت‌تر باشد.<sup>[۲۰]</sup>

عیسی و وطن‌خواه (۲۰۱۴)، مقطع کانالی با دیواره‌های بیضوی و کف افقی را بهینه کردند که در مقایسه با کانال‌های دوزنقه‌یی و سهموی، هزینه‌ی ساخت آن کمتر بوده است.<sup>[۲۱]</sup> هان<sup>۴</sup> (۲۰۱۵)، یک مقطع جدید از کانال به شکل کف افقی با دیواره‌های سهمی نیمه‌مکعب را معرفی کرد و بهترین مقطع هیدرولیکی کانال مذکور در مقایسه با کانال‌های دوزنقه‌یی و سهموی نیمه‌مکعب کلاسیک، داشتن مساحت و محیط خیس شده‌ی کمتر و از لحاظ اقتصادی نیز کارایی بیشتر بوده است.<sup>[۲۲]</sup> هان و همکاران (۲۰۱۷) نشان دادند که مقطع کانال با کف افقی و دیواره‌های سهموی، در مقایسه با مقاطع سهموی، مستطیلی، دوزنقه‌یی، مثلثی، نیمه‌مکعبی و مقطع با کف افقی و دیواره‌های نیمه‌مکعبی، بیشترین ظرفیت را برای عبور دبی جریان و همچنین برای مقادیر یکسان دبی جریان، کمترین محیط خیس شده و مساحت مقطع جریان را دارد.<sup>[۲۳]</sup>

هان و عیسی (۲۰۱۷)، کانال با مقطع جدید سهموی با درجه  $\frac{1}{3}$  ( $3\frac{1}{3}$ ) را معرفی کردند. نتایج پژوهش ایشان نشان داده است که مشخصات هیدرولیکی کانال اخیر در مقایسه با انواع کانال‌های درجه دو، درجه سه، نیمه‌سهمی و دوزنقه‌یی هم در شرایط بهینه و هم در شرایط غیربهینه، برتری دارد. همچنین ظرفیت عبور دبی کانال مذکور بیشتر است.<sup>[۲۴]</sup> مقاطع کانال‌هایی با کف افقی و دیواره‌های منحنی‌شکل، سازگاری و انعطاف بیشتری نسبت به کانال‌های منحنی‌شکل دارند؛ لذا برای ساخت آن‌ها، کمترین هزینه برای خاک‌برداری و پوشش موردنیاز است. در این راستا، مقطع کانال با کف افقی و دیواره‌ی سهمی مکعب در مقایسه با مقاطع معمولی، از جمله: مقاطع منحنی‌شکل، مستطیلی، مثلثی، دوزنقه‌یی، نیمه‌مکعبی و سایر مقاطع با کف افقی، مقرون به صرفه‌ترین مقطع است و کمترین سطح مقطع و محیط خیس شده را برای مقادیر یکسان دبی جریان نسبت به سایر مقاطع دارد.<sup>[۲۵]</sup>

فرزین و انارکی (۲۰۲۰)، از روش‌های فراابتکاری مختلف، جهت اقدام طراحی بهینه‌ی مقطع کانال دوزنقه‌یی مرکب استفاده کرده‌اند. ایشان براساس ثابت یا متغیر درنظرگرفتن ارتفاع آزاد، یکتواخت یا مرکب بودن ضریب زبری و درنظرگرفتن قیود سرعت، عدد فرود و قید احتمال وقوع سیل، مدل‌هایی را ارائه کردند و دریافتند که استفاده از الگوریتم هیبرید خفاش در مقایسه با الگوریتم‌هایی، مانند: الگوریتم خفاش، اجتماع ذرات، لینگو، روش ضرایب لاگرانژ و الگوریتم جهش ترکیبی قورباغه سبب کاهش ۳۲ درصدی هزینه‌ی ساخت کانال شده است.<sup>[۲۶]</sup>

در نوشتار پوربخشیان و همکاران (۲۰۲۱)، طراحی بهینه‌ی شکل مقطع کانال‌های دوزنقه‌یی مرکب تحت مقادیر مختلف دبی با ارائه‌ی مدل‌های مفهومی و تحلیلی با استفاده از الگوریتم SPSA انجام شده است. در مقادیر مختلف دبی، معیارهای ارزیابی برای انتخاب بهترین مدل‌های تحلیلی آماره‌ی  $p$ ، مجموع مربعات خطا، ضریب تعیین و معیار آکایک در نظر گرفته شده است. افزایش عمق آب، شیب سمت چپ کانال، ضریب زبری معادل، ارتفاع آزاد افزایش هزینه‌ی ساخت را به دنبال داشته است و در مقابل، افزایش عرض کانال و شیب سمت راست مقطع کانال، سبب کاهش هزینه‌ی ساخت کانال شده است. روند اخیر برای مقادیر مختلف دبی یکسان بوده است. علاوه بر آن، مدل مفهومی  $\frac{y \cdot z_1 \cdot n_1 \cdot f}{b \cdot z_1} \propto \cos t$  به عنوان مدل مفهومی برتر انتخاب شده است که ارتباط بین هزینه با پارامترهای هندسی را نشان می‌دهد.<sup>[۲۷]</sup> در پژوهش حاضر، بهینه‌سازی شکل مقطع کانال سهموی مرکب به شکلی جامع و کلی‌تر براساس تغییرات دبی جریان و ارتفاع آزاد با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی به‌کارگیری روش ترکیب

تخمین آشوب تصادفی هم‌زمان (SPSA) با ارائه‌ی مدل‌های مختلف به شکلی جامع و کلی‌تر به‌صورت مدل‌های مفهومی، تحلیلی براساس تغییرات دبی جریان و ارتفاع آزاد ارائه شده است. طرح بهینه‌ی مقطع عرضی کانال طوری تعیین شده است که سبب عبور جریان موردنیاز از آن و هزینه‌ی کمیته جهت ساخت آن شود.

تفاوت نوشتار حاضر با مطالعات پیشین، در طراحی بهینه‌ی شکل مقطع کانال سهموی مرکب با درنظرگرفتن مجموعه‌ی کاملی از قیود و همچنین بررسی ارتباط بین متغیرهای طراحی، قیود با تابع هزینه در مقادیر مختلف دبی جریان است. در این راستا، مهم‌ترین بخش نوآوری، لحاظ کردن هزینه‌ی اضافه بها به ازاء افزایش عمق حفاری است که تاکنون این بخش از هزینه برای طراحی بهینه‌ی مقطع کانال سهموی با درنظرگرفتن ارتفاع آزاد لحاظ نشده است.

## ۲. مشخصات مقطع سهموی

در یک کانال سهموی به دلیل اینکه شیب از کف تا بالا به‌طور تدریجی زیاد می‌شود، لذا پایداری خوبی دارد.<sup>[۲۳]</sup> در شکل ۱، مقطع یک کانال سهموی مرکب مشاهده می‌شود.

مطابق شکل ۱،  $z_1 : 1$  و  $z_2 : 1$  و  $Z_1 : 1$  و  $Z_2 : 1$  به ترتیب شیب‌های جانبی در سطح آب و بالای کانال در سمت چپ و راست،  $n_1$  و  $n_2$  ضرایب زبری مانینگ در کناره‌های چپ و راست،  $y$  عمق جریان،  $f$  ارتفاع آزاد،  $T_w$  عرض سطح آب و  $T_t$  عرض کلی کانال هستند. معادله‌ی کلی سهمی شکل ۱، از معادله‌ی ۱ به دست می‌آید:

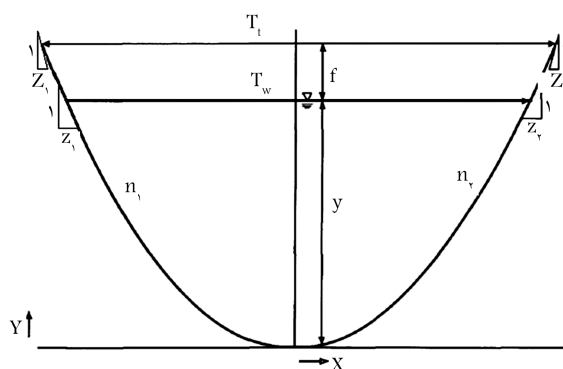
$$Y = aX^2 \quad (۱)$$

که در آن،  $Y$  مختصه‌ی محور  $Y$  (در راستای عمق کانال)،  $X$  مختصه‌ی محور  $X$  (در راستای عرض کانال) و  $a$  پارامتر هستند. با مشتق‌گیری از معادله‌ی ۱ و جایگذاری مختصات سمت راست و چپ در بالای کانال  $((T_1, y + f), (T_2, y + f))$  و همچنین مختصات سطح آب  $((T_{w1}, y), (T_{w2}, y))$  عرض کلی کانال  $(T_1, T_2)$  و عرض سطح آب  $(T_{w1}, T_{w2})$  مربوط به شیب‌های سمت راست و چپ، طبق معادله‌های ۲ الی ۵ به‌دست می‌آیند:

$$T_1 = 2Z_1(y + f) \quad (۲)$$

$$T_2 = 2Z_2(y + f) \quad (۳)$$

$$T_{w1} = 2z_1(y) \quad (۴)$$



شکل ۱. نمایش هندسه‌ی مقطع کانال سهموی.

جدول ۱. نمایش متغیرهای طراحی.

متغیر طراحی ( $X_i$ )	واحد	توصیف متغیر طراحی	مقدار کمینه ( $X_L$ ) بیشینه ( $X_R$ )
$X_1=y$	m	عمق جریان	۰/۵
$X_2=z_1$	-	شیب کانال در سطح آب در سمت چپ	۰/۲
$X_3=z_2$	-	شیب کانال در سطح آب در سمت راست	۰/۲

$$T_{w2} = 2z_2(y) \quad \text{می‌آیند (معادله‌های ۱۶ و ۱۷):} \quad (5)$$

$$A_w = \frac{4}{3}y^3(z_1 + z_2) \quad (16)$$

از طرفی با جایگذاری معادله‌های ۲ الی ۵ در معادله ۱ و حذف پارامتر شکل، معادلات شیب در بالای کانال بر حسب شیب کانال در سطح آب در قسمت‌های چپ و راست به ترتیب از روابط ۶ و ۷ به دست می‌آید:

$$Z_1 = z_1 \sqrt{\frac{y}{y+f}} \quad (6)$$

$$Z_2 = z_2 \sqrt{\frac{y}{y+f}} \quad (7)$$

مساحت کلی کانال طبق معادله ۸ به دست می‌آید:

$$A_t = \left[ \frac{(y+f)T_1}{2} + \frac{(y+f)T_2}{2} - \int_0^{T_1/2} Y dX - \int_0^{T_2/2} Y dX \right] = \frac{4}{3}(y+f)^3(Z_1 + Z_2) \quad (8)$$

محیط سهمی از رابطه‌های ۹ و ۱۰ به دست می‌آید:

$$P_t = \int \sqrt{(dX)^2 + (dY)^2} \quad (9)$$

$$= \int_0^T \sqrt{1 + \left(\frac{dY}{dX}\right)^2} dX \quad (10)$$

محیط سهمی سمت چپ و راست به ترتیب براساس معادله‌های ۱۱ الی ۱۴ به دست می‌آید:

$$P_{t1} = (y+f) \left( (Z_1^3) \left[ \frac{1}{Z_1} \sqrt{1 + \frac{1}{Z_1^2}} + \ln\left(\frac{1}{Z_1} \sqrt{1 + \frac{1}{Z_1^2}}\right) \right] \right) \quad (11)$$

$$P_{t2} = (y+f) \left( (Z_2^3) \left[ \frac{1}{Z_2} \sqrt{1 + \frac{1}{Z_2^2}} + \ln\left(\frac{1}{Z_2} \sqrt{1 + \frac{1}{Z_2^2}}\right) \right] \right) \quad (12)$$

$$J_{(Z_1)} = Z_1^3 \left[ \frac{1}{Z_1} \sqrt{1 + \frac{1}{Z_1^2}} + \ln\left(\frac{1}{Z_1} \sqrt{1 + \frac{1}{Z_1^2}}\right) \right] \quad (13)$$

$$J_{(Z_2)} = Z_2^3 \left[ \frac{1}{Z_2} \sqrt{1 + \frac{1}{Z_2^2}} + \ln\left(\frac{1}{Z_2} \sqrt{1 + \frac{1}{Z_2^2}}\right) \right] \quad (14)$$

لذا محیط کلی کانال از رابطه ۱۵ به دست می‌آید:

$$P_t = (y+f)(J(Z_1) + J(Z_2)) \quad (15)$$

با جایگذاری شیب کانال در سطح آب در قسمت‌های چپ و راست در معادله‌های مساحت و محیط، مساحت مقطع جریان و محیط خیس شده به دست

### ۳. بهینه‌سازی کانال سهموی مرکب

الگوی مسئله‌ی بهینه‌سازی، افزون بر به کارگیری کلی ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و هندسی طرح، باید بتواند چگونگی رفتار سازه در برابر بارهای وارد را نیز ارائه کند. همچنین باید کلیه‌ی قیدهای طراحی و اجرایی موردنیاز برای رسیدن به طرح مناسب را در بر بگیرد. در نوشتار حاضر، طراحی بهینه‌ی مقطع کانال سهموی مرکب با هدف کمینه‌سازی هزینه‌ی ساخت تحت شرایط برقراری جریان یکنواخت، عبور جریان زیر بحرانی، عبور جریان با سرعت مجاز و داشتن عرض مجاز سطح آب براساس متغیرهای طراحی، شامل: عمق آب، شیب‌های کناری مقطع صورت می‌گیرد.

#### ۱.۳. متغیر طراحی

بر طبق مدل هندسی شکل ۱، متغیرهای طراحی، توصیف و مقادیر کمینه و بیشینه‌ی آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

#### ۱.۱.۳. عمق جریان

عمق جریان ( $y$ )، فاصله‌ی عمودی پایین‌ترین نقطه در مقطع کانال تا سطح آب است. فاصله‌ی عمودی پایین‌ترین نقطه‌ی مقطع تا سطح زمین هم ( $Y$ ) نامیده می‌شود، که مطابق رابطه‌ی ۱۸ محاسبه می‌شود و در آن،  $f$  همان ارتفاع آزاد است.

$$Y = y + f \quad (18)$$

#### ۲.۱.۳. شیب دیواره‌ی کانال در سطح آب ( $Z_1, Z_2$ )

نوع خاکی که کانال در آن ساخته می‌شود، محدودیت مقدار شیب را تعیین می‌کند. [۲۸]

#### ۲.۳. قیود

##### ۱.۲.۳. قید برقراری جریان یکنواخت

در نوشتار حاضر، از روش هورتن<sup>۵</sup> برای محاسبه‌ی ضریب زبری معادل استفاده شده است (رابطه‌ی ۱۹): [۲۹]

$$ne = \left[ \frac{\sum_{i=1}^r P_{wi} n_i^{\frac{2}{3}}}{\sum_{i=1}^r P_{wi}} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (19)$$

که در آن،  $ne$  ضریب زبری معادل،  $p_w$  محیط خیس شده،  $n$  ضریب زبری و  $i$  بیانگر قسمت‌های تقسیم شده است. از آنجا که کانال پوشش‌دار برای هدایت جریان

یکنواخت طراحی می‌شود؛<sup>[۱۲]</sup> لذا در پژوهش حاضر، جهت کنترل جریان یکنواخت از قیدی مطابق معادله‌ی ۲۰ (معادله‌ی مانینگ) استفاده شده است:

$$\Phi_1 = \left| \frac{Q n_e}{\sqrt{S_0}} - \frac{A_w^{5/2}}{P_w^{2/3}} \right| - \varepsilon \leq 0 \Rightarrow \left| \frac{Q}{\sqrt{S_0}} - \frac{A_w^{5/2}}{\left( \sum_{i=1}^n n_i^{1/5} P_{wi} \right)^{2/3}} \right| - \varepsilon \leq 0 \quad (20)$$

### ۲.۲.۳. قید بر قراری جریان زیر بحرانی

همچنین به دلیل ناپایدار بودن جریان در شرایط بحرانی، لازم است که قید عدد فرود به منظور جلوگیری از ایجاد جریان بحرانی در طراحی بهینه‌ی کانال در نظر گرفته شود،<sup>[۸]</sup> که معادله‌ی آن به صورت رابطه‌ی ۲۱ است:

$$\Phi_2 = \frac{F_r}{F_{r_{\max}}} - 1 \leq 0 \quad (21)$$

### ۳.۲.۳. قید عرض کلی کانال

در طراحی بهینه‌ی شکل مقطع کانال، قید عرض کلی کانال برای کنترل هزینه‌ی تملک زمین، یکی از قیود بسیار مهم است،<sup>[۳،۶،۷]</sup> که به صورت رابطه‌ی ۲۲ نوشته می‌شود:

$$\Phi_3 = \frac{T_t}{T_{\max}} - 1 \leq 0 \quad (22)$$

### ۴.۲.۳. قید کمینه‌ی سرعت

کمینه‌ی سرعت مجاز برای جلوگیری از رسوب‌گذاری در محدوده‌ی ۶/۰ الی ۹/۰ (m/s) و کمینه‌ی سرعت برای جلوگیری از رشد پوشش گیاهی (m/s) ۷۵/۰ است.<sup>[۱]</sup> کمینه‌ی سرعت مجاز در طراحی کانال در محدوده‌ی ۷۵/۰ تا ۹/۰ (m/s) در نظر گرفته شده است.<sup>[۳۱]</sup> قید کمینه‌ی سرعت به صورت معادله‌ی ۲۳ است که در آن،  $V_{ave}$  سرعت متوسط جریان است.

$$\Phi_4 = \frac{V_{ave}}{V_{\min}} - 1 \leq 0 \quad (23)$$

### ۵.۲.۳. قید بیشینه‌ی سرعت

در کانال‌های با مرز صلب، بیشینه‌ی سرعت مجاز ( $V_L$ )، سرعتی است که سبب ایجاد فرسایش نمی‌شود. از طرفی، برای اطمینان از انتقال دبی جریان از مقطع عرضی لازم است که متوسط سرعت واقعی جریان ( $V_{ave}$ )، در کانال از بیشینه‌ی سرعت مجاز بیشتر نباشد (رابطه‌ی ۲۴).<sup>[۷]</sup> در پژوهش حاضر، مقادیر سرعت کمینه و بیشینه به ترتیب، برابر با ۷۵/۰ و ۴ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است.

$$\Phi_5 = \frac{V_{ave}}{V_{\max}} - 1 \leq 0 \quad (24)$$

### ۳.۳. تابع هدف

اولین قدم در طراحی کانال، تعیین ابعاد بهینه‌ی آن جهت انتقال دبی مورد نیاز با کمترین هزینه‌ی ساخت است (رابطه‌ی ۲۵). در پژوهش حاضر، کل هزینه‌ی ساخت ۱ متر کانال، شامل هزینه‌های خاک‌برداری (مساحت مقطع عرضی) و پوشش‌دار کردن سطوح (محیط تر شده) است (رابطه‌ی ۲۶).

$$\text{Minimize } Cost = Cost(y, z_1, z_2) \quad (25)$$

$$C_1 = C_e + C_L \quad (26)$$

که در آن،  $C_e$  هزینه‌ی خاک‌برداری به ازاء هر واحد طول کانال (رابطه‌ی ۲۷) و  $C_L$  هزینه‌ی پوشش کانال به ازاء هر واحد طول کانال ( $\frac{\$}{m}$ ) است (رابطه‌ی ۲۹).

$$C_e = c_e A + c_r A \bar{Y} \quad (27)$$

که در آن،  $c_e$  هزینه‌ی خاک‌برداری واحد حجم ( $\frac{\$}{m^3}$ ) است.  $c_r$  اضافه‌بها به ازاء افزایش عمق حفاری است که واحد آن ( $\frac{\$}{m^2}$ ) است.  $A_t$  مساحت کلی کانال ( $m^2$ ) است.  $\bar{Y}$  عمق مرکز سطح خاک‌برداری از سطح کانال است. در مقطع سهموی  $\bar{Y}$  به صورت رابطه‌ی ۲۸ تعریف می‌شود:

$$\bar{Y} = (0.4) Y \quad (28)$$

$$C_L = c_l P_t \quad (29)$$

که در آن،  $c_l$  هزینه‌ی هر واحد سطح پوشش بر حسب ( $\frac{\$}{m^2}$ ) که مستقل از عمق است.  $P_t$  محیط کل کانال بر حسب  $m$  است. لذا هزینه‌ی کلی ساخت کانال سهموی مطابق رابطه‌ی ۳۰ محاسبه می‌شود:

$$C = c_e A + c_r A \bar{Y} + c_l P \quad (30)$$

از آنجا که  $\frac{C_e}{c_e}$ ،  $\frac{C_r}{c_r}$  دارای بُعد طول هستند، لذا با تغییر واحد پولی، ثابت می‌مانند. نسبت‌های اخیر می‌توانند برای انواع مختلف پوشش، لایه‌های خاکی و شرایط آب و هوایی با استفاده از مقادیر مناسب استفاده شوند. در ادامه، به منظور سهولت تعیین تأثیر متغیرها و پارامترهای تابع هزینه در فرایند بهینه‌سازی شکل کانال سهموی، معادلات با انتخاب مقیاس طول به صورت بدون بُعد تبدیل می‌شوند (رابطه‌ی ۳۱):

$$L = \left( Q \cdot n_e / \sqrt{S_0} \right)^{(2/3)} \quad (31)$$

که در آن،  $L$  مقیاس طول ( $m$ ) است. لذا متغیرهای بدون بُعد به صورت روابط ۳۲ تعریف می‌شوند:

$$\bar{y}_* = \frac{\bar{y}}{L}, \bar{Y}_* = \frac{\bar{Y}}{L}, P_{t*} = \frac{P}{L}, R_* = \frac{R}{L}, T_* = \frac{T}{L}, A_* = \frac{A}{L^2}, c_{r*} = \frac{c_r L}{c_e}, C_* = \frac{C}{c_e L^2}, c_{l*} = \frac{c_l}{c_e L} \quad (32)$$

زیرنویس \* مربوط به پارامترهای بدون بُعد است. لذا تابع هدف به صورت رابطه‌ی ۳۳ تبدیل می‌شود:

$$C_* = A_* + c_{r*} A_* \bar{Y}_* + c_{l*} P_* \quad (33)$$

### ۴.۳. طراحی بهینه‌ی کانال

در نوشتار حاضر، برای طراحی بهینه‌ی شکل مقطع کانال سهموی مرکب از مقدار دبی جریان ( $\frac{m^3}{s}$ )، مقدار شیب کف طولی به اندازه‌ی ۰/۰۰۱ بوده است (جدول ۲). مقطع کانال از نوع بتنی بوده است که فرضیات طراحی آن در جدول ۲ ارائه شده است.

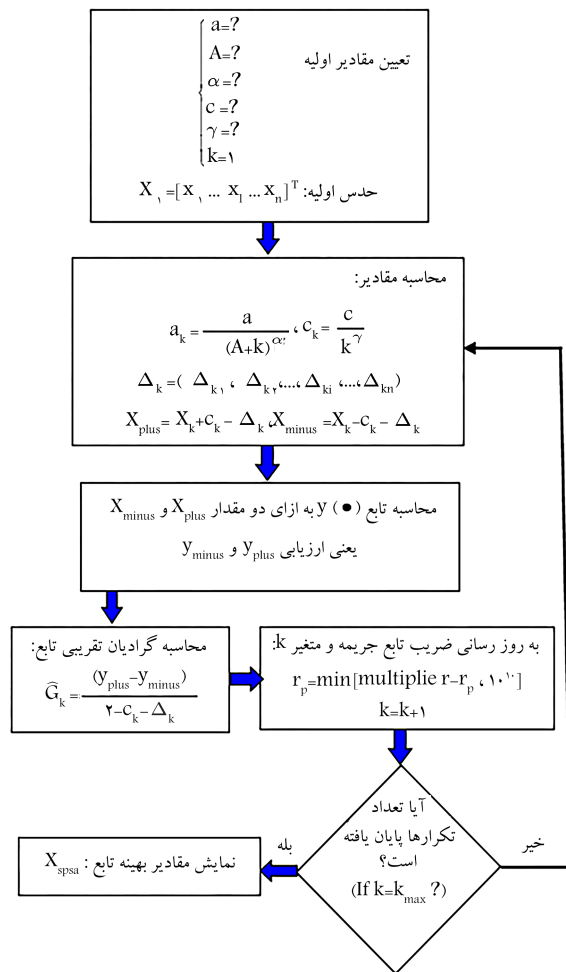
جدول ۲. نمایش پارامترهای طراحی.

ضرایب هزینه		پارامترهای جریان			
$\frac{C_e}{C_r}$	$\frac{c_e}{c_r}$	$n_1$	$n_2$	$S_0$	$g(\frac{m}{s^2})$
۱۳	۷	۰/۰۱۵	۰/۰۱۸	۰/۰۰۱	۹/۷۹



جدول ۳. مقادیر ارتفاع آزاد براساس مقادیر مختلف دبی جریان.

$< 0.06$	$> 10$	$10 - 5$	$5 - 1$	$0.1 - 0.6$	$Q(\frac{m^3}{s}) < 0.06$
$0.0 - 1/15$	$0/75$	$0/6$	$0/5$	$0/3$	$0/0 - 1/15 f(m)$



شکل ۲. فلوجارت الگوریتم SPSA. [۳۵]

که در آن، مقدار دلتا ( $\delta$ ) برابر با  $0.5$  است. مقادیر اپسیلون ( $\varepsilon$ ) وابسته به مقادیر دبی است؛ به طوری که برای مقدار دبی جریان  $Q = 0.57 (\frac{m^3}{s})$ ، مقدار  $\varepsilon = 0.6735$  و برای  $Q > 85 (\frac{m^3}{s})$  مقدار  $\varepsilon = 0.872$  در نظر گرفته شده است. [۱] ناومن<sup>۷</sup> (۲۰۰۳)، معادله‌ی جهت ارتباط بین  $\varepsilon$  و  $Q$  ارائه کرد که به صورت رابطه‌ی ۳۶ است. [۳۶]

$$\varepsilon = 0.6722 + 2/3569 \times 10^{-2} Q \quad (36)$$

داس (۲۰۰۷) نیز رابطه‌ی براساس ارتباط بین ارتفاع آزاد و عمق جریان به صورت رابطه‌ی ۳۷ ارائه کرده است:

$$f = k_1 + k_2 y^{k_3} \quad (37)$$

$k_1$ ،  $k_2$  و  $k_3$  ضرایب ثابت هستند. اگر  $k_2 = 0$  باشد، مقدار ارتفاع آزاد ثابت است. اگر  $k_1 = 0$  باشد، آنگاه ارتفاع آزاد تابعی از عمق جریان است. [۲۲]

### ۱.۴.۳. الگوریتم بهینه‌سازی (SPSA)

بیشتر روش‌های سنتی بهینه‌سازی مبتنی بر محاسبه‌ی مشتقات تابع هدف هستند که این مسئله موجب افزایش حجم محاسبات ریاضی می‌شود. در مطالعه‌ی حاضر، به منظور بهینه‌سازی سازه‌ها از الگوریتم تقریب‌سازی تصادفی مبتنی بر آشفته‌سازی هم‌زمان (SPSA) استفاده شده است. الگوریتم SPSA، یک الگوریتم قدرتمند برای بهینه‌سازی سیستم‌های پیچیده است که توسط اسپال (۱۹۹۸)، توسعه و گسترش یافته است. از جمله ویژگی‌های الگوریتم SPSA این است که در هر تکرار بهینه‌سازی، مستقل از تعداد متغیرهای طراحی، فقط به ۲ بار ارزیابی تابع هدف نیازمند است. بنابراین استفاده از الگوریتم SPSA، به شدت موجب کاهش حجم محاسبات و کاهش زمان کل بهینه‌سازی می‌شود. [۲۲]

الگوریتم SPSA در مهندسی عمران به ویژه در بهینه‌سازی سد قوسی، کاربرد مؤثری داشته است. [۲۳، ۲۴] الگوریتم SPSA برای بهینه‌سازی مسائل نامقید است. لذا جهت استفاده از آن در حل مسائل مقید با قیدهای نامساوی  $g_j \leq 0$  (که با استفاده از روش توابع جریمه‌ی خارجی به دست می‌آید، جایگزین تابع هدف  $f$  شود (رابطه‌ی ۳۴):

$$w(X, r_p) = f(X) + r_p \sum_{j=1}^m \max[0, g_j(X)]^r \Rightarrow f(\bullet) = w(\bullet) + noise \quad (34)$$

در شکل ۲، فلوجارت الگوریتم SPSA مشاهده می‌شود.

### ۲.۴.۳. مدل‌های بهینه‌سازی براساس نحوه‌ی انتخاب ارتفاع آزاد

در نوشتار حاضر، براساس نحوه‌ی انتخاب ارتفاع آزاد در فرایند بهینه‌سازی، چهار مدل در دبی‌های ۱، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ مترمکعب بر ثانیه در نظر گرفته شده است.

- در مدل اول الگوریتم بهینه‌سازی، در مدل اول، مقدار ارتفاع آزاد صفر در نظر گرفته شده است.
  - در مدل دوم، مقدار ارتفاع آزاد ثابت  $0.5$  متر در نظر گرفته شده است.
  - در مدل سوم، ارتفاع آزاد به صورت تابعی از دبی در نظر گرفته شده است.
  - در مدل چهارم، ارتفاع آزاد به صورت تابعی از عمق جریان لحاظ شده است.
- در جدول ۳، استاندارد هندوستان که در آن تغییرات ارتفاع آزاد براساس دبی جریان است، ارائه شده است.
- وابستگی ارتفاع آزاد فقط به مقدار دبی، کاملاً رضایت‌بخش نیست؛ زیرا بر این اساس مقدار ارتفاع آزاد برای یک کانال کم عمق با کانال عمیق برای یک مقدار دبی جریان داده شده، باید یکسان باشد؛ در حالی که در واقعیت چنین نیست. وابستگی ارتفاع آزاد به عمق جریان، مرسوم‌تر است. رابطه‌ی ۳۵، ارتباط بین عمق جریان و ارتفاع آزاد را نشان می‌دهد.

$$f = \varepsilon y^\delta \quad (35)$$

جدول ۴. نتایج راستی آزمایی.

پارامترها	مدل کاهاار (۲۰۰۵)	الگوریتم SPSA
$y(m)$	۳/۱۱۴۵	۳/۱۰۴۸
$Z$	۰/۶۷۴۵	۰/۶۷۴۵
$f(m)$	۰/۰۰	۰/۰۰
$T(m)$	۸/۴۰۲۹	۸/۳۷۶۷
$A(m^2)$	۱۷/۴۴۷۰	۱۷/۳۳۸۷
$p(m)$	۱۰/۸۷۱۷	۱۰/۸۳۸۰
$V(m^3/s)$	۲/۸۸۹۷	۲/۸۸۸۴

### ۳.۴.۳. اعتبارسنجی مدل

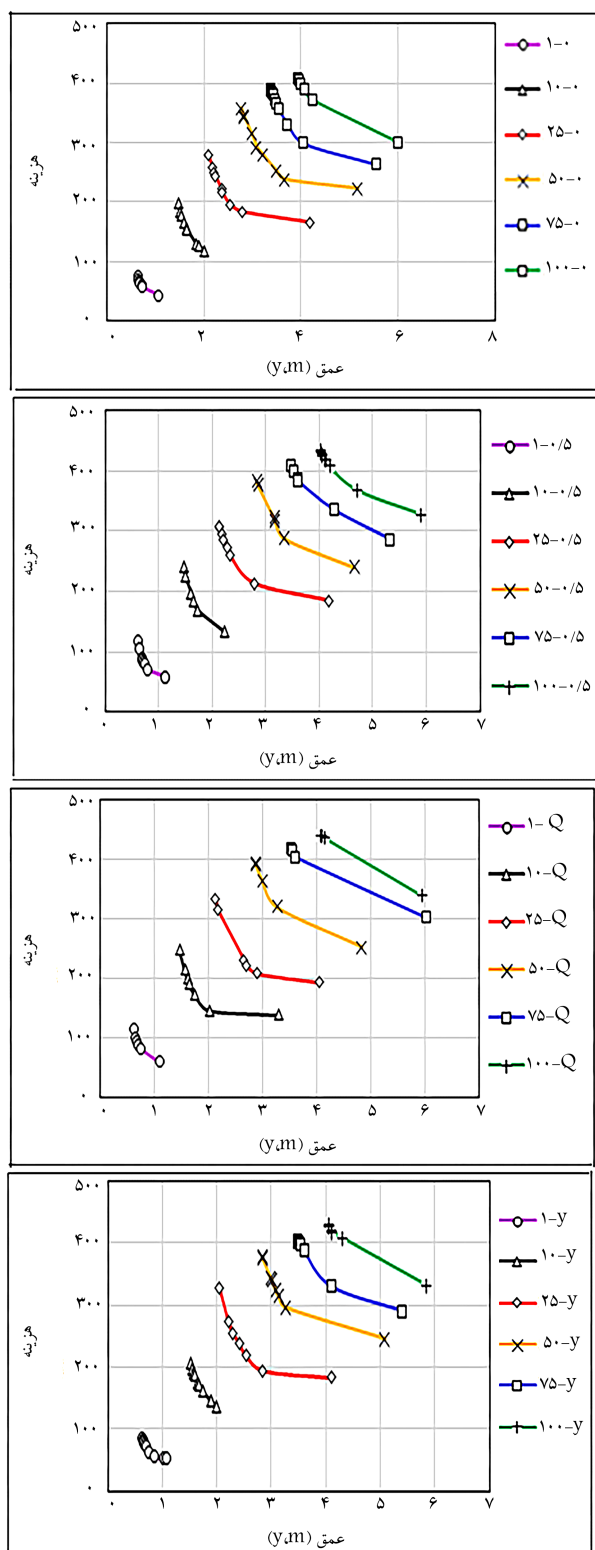
در نوشتار حاضر، در ابتدا لازم است صحت و درستی الگوریتم مورد نظر بررسی شود؛ لذا از مثال مطرح شده توسط کاهاار (۲۰۰۵) به منظور مقایسه‌ی نتایج الگوریتم SPSA با نتایج مدل تحلیل مرجع مذکور استفاده شده است. در این مثال، مقادیر دبی جریان، ضریب زبری مانینگ، شیب بستر و ارتفاع آزاد و نسبت‌های هزینه به این ترتیب است:  $Q = 50 m^3/s$ ,  $f = 0/00$ ,  $S_0 = 0/001$ ,  $n = 0/015$ ,  $C_e = 13$  و  $\frac{C_e}{C_r} = 7$ .

لازم به ذکر است در مدل تحلیلی کاهاار (۲۰۰۵)، مقدار ارتفاع آزاد صفر لحاظ شده است. شیب جانبی سمت چپ و راست مقطع سهموی یکسان در نظر گرفته شده و فقط قید مانینگ در فرایند بهینه‌سازی لحاظ شده است. در جدول ۴، مقایسه‌ی نتایج حاصل از مدل تحلیلی کاهاار و الگوریتم SPSA در پژوهش حاضر ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نتایج حاصل از الگوریتم SPSA بسیار نزدیک به نتایج آقای کاهاار است.

## ۴. نتایج

در نوشتار حاضر، مراحل مختلف بهینه‌سازی مقطع یک کانال سهموی مرکب با ارائه‌ی مدل‌های مختلف براساس تغییرات ارتفاع آزاد انجام شده است. مقادیر دبی جریان به ترتیب ۱، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ مترمکعب بر ثانیه بوده است. مقادیر بهینه‌ی متغیرهای طراحی، قیود، پارامترهای هندسی مقطع جریان، و تابع هزینه مطابق جدول ۵ ارائه شده است. در هر چهار مدل با افزایش دبی جریان، عرض کلی مقطع، عرض سطح آب، مساحت مقطع، مساحت مقطع جریان، محیط مقطع، محیط خیس‌شده‌ی مقطع، سرعت جریان، عدد فرود و هزینه افزایش یافته است. شیب‌های جانبی چپ و راست در مدل‌های ۲ و ۳، برای تمامی دبی‌های جریان و در مدل ۱، از دبی ۱۰ مترمکعب بر ثانیه و در مدل ۴ از دبی ۲۵ مترمکعب بر ثانیه با افزایش دبی جریان، کاهش یافته‌اند. برای هر دبی و در هر بار انجام الگوریتم بهینه‌سازی، ارتباط بین تابع هزینه و متغیرهای طراحی براساس مدل‌های مفهومی سنجیده شده است. در نهایت، برای ۲۰ بار انجام الگوریتم بهینه‌سازی، مدلی که بیشترین تعداد تکرار را از آن خود کرد، به‌عنوان بهترین مدل انتخاب شد.

مطابق شکل ۳، با افزایش دبی جریان، عمق و هزینه افزایش یافته است. از طرفی، در هر نمودار با افزایش عمق جریان، شیب جانبی سمت چپ و هزینه ساخت افزایش یافته است. نمودارها در هر چهار مدل در دبی‌های مختلف از نظم خاصی

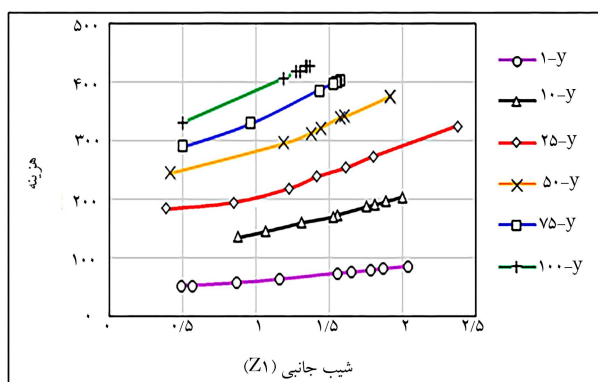
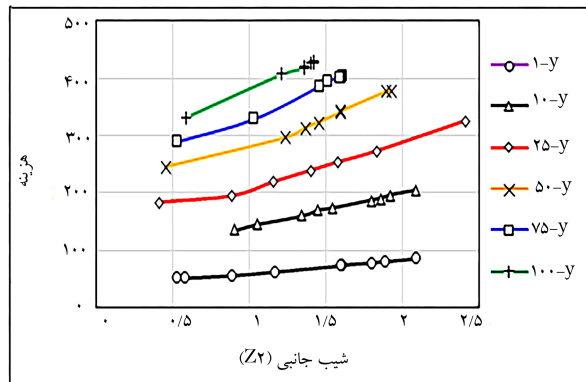
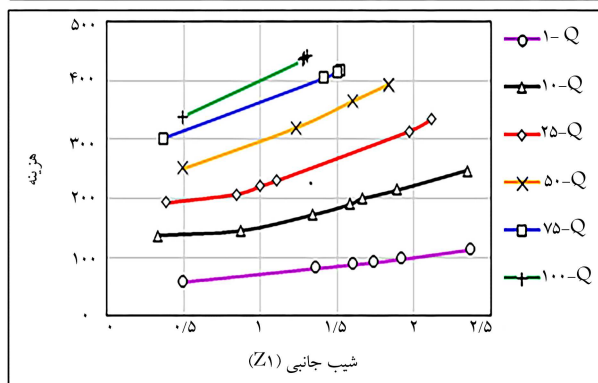
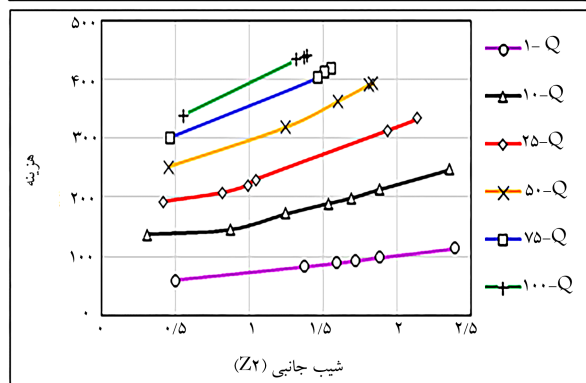
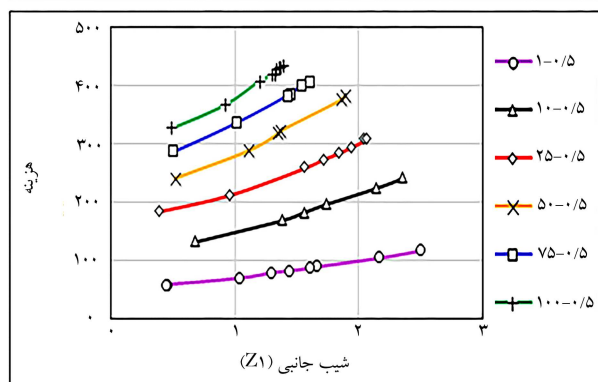
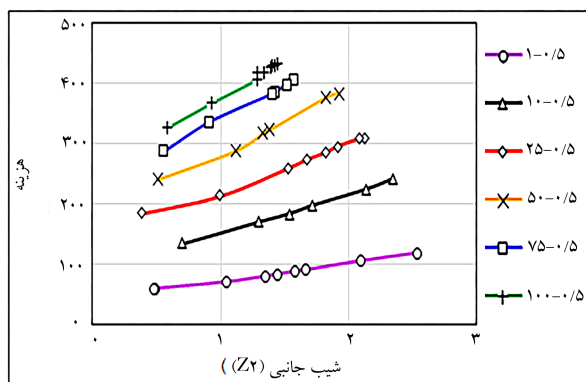
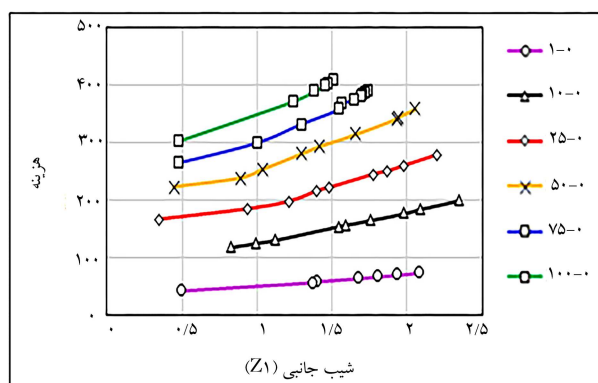
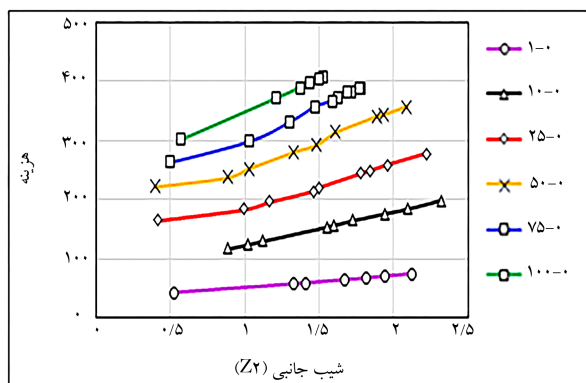


شکل ۳. نمودار عمق و هزینه در مدل‌ها و دبی‌های مختلف.

از طرفی، در تمامی مدل‌ها، تغییرات عمق مربوط به هر دبی تقریباً یکسان است. مطابق شکل ۴، با افزایش دبی جریان، شیب جانبی سمت چپ و هزینه ساخت یافته‌اند. از طرفی، در هر نمودار با افزایش شیب جانبی سمت چپ، هزینه ساخت افزایش یافته است. نمودارها در هر چهار مدل در دبی‌های مختلف از نظم خاصی

جدول ۵. نتایج اولین تکرار فرایند بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم SPSS در هر چهار مدل برای تمامی مقادیر دبی‌های جریان.

مدل	Q (m <sup>۳</sup> /s)	Y (m)	Z <sub>۱</sub>	Z <sub>۲</sub>	F (m)	T (m)	Tw (m)	A (m <sup>۲</sup> )	Aw (m <sup>۲</sup> )	P (m)	Pw (m)	V (m/s)	Fr	cost
۱	۱	۲/۳۹۷	۲/۰۸۱۴	۲/۱۲۰۲/	۰/۰۰	۵/۳۷۶۶	۵/۳۷۶۶	۲/۲۹۳۰	۲/۲۹۳۰	۵/۵۷۳۲	۵/۵۷۳۲	۱/۰۵۸۹	۰/۵۱۸۲	۷۴/۸۲۸۵
۱	۱۰	۱/۴۷۵۷	۲/۳۴۳۱	۲/۳۲۶۱	۰/۰۰	۱۳/۷۸۰۹	۱۳/۷۸۰۹	۱۳/۵۵۷۹	۱۳/۵۵۷۹	۱۴/۱۹۱۴	۱۴/۱۹۱۴	۱/۸۵۴۷	۰/۵۹۷۶	۱۹۹/۱۸۹۷
۱	۲۵	۲/۰۹۶۹	۲/۲۰۲۶	۲/۴۱۹۱	۰/۰۰	۱۸/۵۴۳۴	۱۸/۵۴۳۴	۲۵/۹۲۲	۲۵/۹۲۲	۱۹/۱۵۷۶	۱۹/۱۵۷۶	۲/۳۴۰۵	۰/۶۳۲۷	۲۷۸/۰۷۶۹
۱	۵۰	۲/۷۶۵۰	۲/۰۵۲۵	۲/۰۹۰۲	۰/۰۰۰	۲۲/۹۰۹۰	۲۲/۹۰۹۰	۴۲/۲۲۸۲	۴۲/۲۲۸۲	۲۳/۷۷۰۱	۲۳/۷۷۰۱	۲/۸۰۷۶	۰/۶۶۰۹	۳۵۷/۹۱۱۹
۱	۷۵	۳/۳۸۰۸	۱/۳۷۷۲	۱/۸۸۱۷	۰/۰۰	۲۳/۷۹۳۳	۲۳/۷۹۳۳	۵۳/۲۲۶۴	۵۳/۲۲۶۴	۲۵/۰۱۸۶	۲۵/۰۱۸۶	۳/۱۲۸۸	۰/۶۷۷۶	۳۸۹/۲۲۷۷
۱	۱۰۰	۳/۹۳۴۴	۱/۵۰۸۳	۱/۵۲۴۷	۰/۰۰۰	۲۳/۸۶۶	۲۳/۸۶۶	۶۲/۵۹۸۷	۶۲/۵۹۸۷	۲۵/۴۹۷۴	۲۵/۴۹۷۴	۳/۴۸۲۲	۳/۴۸۲۲	۴۰۸/۱۳۸۱
۲	۱	۰/۶۰۴۳	۲/۵۰۴۶	۲/۵۲۴۰	۰/۵۰۰	۸/۲۳۶	۸/۲۳۶	۶/۰۶۱۱	۲/۴۵۳۷	۸/۶۱۲۱	۶/۲۴۶۵	۱/۰۲۲۳	۰/۵۱۶۸	۱۱۸/۴۰۱۳
۲	۱۰	۱/۴۷۷۰	۲/۳۵۸۰	۲/۳۴۹۰	۰/۵۰۰	۱۶/۰۸۶۶	۱۶/۰۸۶۶	۲۱/۲۰۲۲	۱۳/۶۱۲۹	۱۶/۷۱۲۹	۱۴/۳۱۲۱	۱/۸۵۶۶	۰/۵۹۸۰	۲۴۰/۸۶۴۹
۲	۲۵	۲/۱۲۷۰	۲/۰۴۶۲/	۲/۱۲۲۹	۰/۵۰۰	۱۹/۷۴۵۶	۱۹/۷۴۵۶	۳۴/۵۸۰۸	۲۵/۱۹۳۹	۲۰/۶۴۱۸	۱۸/۴۲۵۰	۲/۳۶۰۲	۰/۶۳۳۵	۲۴۰/۸۶۴۹
۲	۵۰	۲/۸۳۰۹	۱/۸۹۰۷	۱/۹۲۳۷	۰/۵۰۰	۲۳/۴۲۶۶	۲۳/۴۲۶۶	۵۲/۰۲۱۲	۴۰/۷۵۹۲	۲۴/۶۳۴۵	۲۲/۵۴۹۲	۲/۸۴۰۱	۰/۶۶۰۷	۳۸۲/۱۷۱۰
۲	۷۵	۳/۴۸۲۶	۱/۶۰۳۷	۱/۵۷۲۷	۰/۵۰۰	۲۳/۶۵۸۷	۲۳/۶۵۸۷	۶۶/۸۱۴۹	۵۱/۳۶۵۰	۲۵/۳۴۱۲	۲۳/۵۰۹۱	۲/۴۱۷۹	۰/۶۷۴۹	۴۰۶/۵۴۵۲
۲	۱۰۰	۴/۰۱۶۷	۱/۳۸۹۰	۱/۴۴۸۸	۰/۵۰۰	۲۴/۱۷۵۰	۲۴/۱۷۵۰	۷۶/۷۹۳۸	۶۱/۰۴۷۲	۲۶/۲۶۷۳	۲۴/۵۶۵۱	۳/۵۱۴۸	۰/۶۸۶۵	۴۳۳/۰۵۶۴
۳	۱	۰/۶۱۵۴۴	۲/۳۶۸۶	۲/۳۸۸۷	۰/۵۰۰	۷/۸۸۲۷	۵/۸۵۵۱	۵/۸۶۱۴	۲/۴۰۲۰	۸/۲۸۵۳	۶/۰۲۲۲	۱/۰۳۶۶	۰/۵۱۷۲	۱۱۳/۹۴۴۲
۳	۱۰	۱/۴۷۱۱	۲/۳۴۴۷	۲/۳۵۳۸	۰/۶۰۰	۱۶/۴۰۲۳	۱۳/۸۲۳۷	۲۲/۶۴۷۱	۱۳/۵۵۷۳	۱۷/۰۷۵۱	۱۴/۲۳۰۵	۱/۸۵۲۱	۰/۵۹۷۷	۲۴۷/۳۰۴۱
۳	۲۵	۲/۱۳۲۷	۲/۱۱۰۷	۲/۱۴۲۸	۰/۷۵۰۰	۲۱/۰۹۳۳	۱۸/۱۴۳۰	۴۰/۵۳۷۶	۲۵/۹۶۶۲	۲۲/۱۰۱۲	۱۸/۷۹۱۰	۲/۳۶۳۹	۰/۶۳۳۶	۳۳۴/۵۳۱۰
۳	۵۰	۲/۸۲۶۶	۱/۸۳۴۴	۱/۸۴۰۷	۰/۷۵۰۰	۲۳/۶۳۶۵	۲۱/۰۴۰۴	۵۶/۹۲۶۲	۴۰/۱۵۳۵	۲۵/۰۳۵۸	۲۲/۰۳۷۱	۲/۸۵۳۶	۰/۶۶۰۲	۳۹۴/۱۴۲۶
۳	۷۵	۳/۵۱۲۹	۱/۵۲۳۱	۱/۵۵۸۵	۰/۷۵۰۰	۲۳/۸۵۰۴	۲۱/۶۵۰۹	۶۷/۷۸۱۰	۵۰/۷۰۴۷	۲۵/۷۴۹۶	۲۳/۰۸۷۰	۳/۲۳۴۵	۰/۶۷۵۵	۴۱۹/۰۳۶۳
۳	۱۰۰	۴/۰۷۸۰	۱/۳۰۷۲	۱/۳۹۳۵	۰/۷۵۰۰	۲۳/۹۶۷۷	۲۲/۰۲۷۵	۷۷/۱۴۴۲	۵۹/۸۸۵۸	۲۶/۳۵۵۲	۲۳/۹۰۲۴	۳/۵۳۶۸	۰/۶۸۵۶	۴۴۱/۰۴۴۹
۴	۱	۰/۶۳۹۱	۲/۰۴۵۵	۲/۰۸۵۴	۰/۱۹۹۹	۶/۰۴۹۶	۵/۲۸۰۱	۳/۳۸۳۶	۲/۲۴۹۷	۶/۳۴۶۹	۵/۴۷۹۷	۱/۰۵۷۳	۰/۵۱۷۷	۸۶/۰۵۵۸
۴	۱۰	۱/۵۲۳۹	۲/۰۰۴۰	۲/۰۹۰۰	۰/۳۰۹	۱۳/۶۸۲۹	۱۲/۴۷۷۶	۱۶/۷۱۶۰	۱۲/۶۷۶۴	۱۴/۳۱۲۰	۱۲/۹۵۷۷	۱/۸۸۸۱	۰/۵۹۸۷	۲۰۴/۵۲۱۸
۴	۲۵	۲/۰۵۶۹	۲/۳۸۰۱	۲/۴۱۱۵	۰/۳۵۸۶	۲۱/۳۶۰۸	۲۱/۷۱۱۸	۳۴/۳۹۷۹	۲۷/۰۳۰۷	۲۲/۰۶۸۳	۲۰/۲۷۰۱	۲/۳۱۸۵	۰/۶۳۲۸	۳۲۶/۰۳۴۱
۴	۵۰	۲/۸۲۶۶	۱/۹۱۹۲	۱/۹۲۸۰	۰/۴۲۰۳	۲۳/۳۰۹۵	۲۱/۷۴۸۵	۵۰/۴۵۵۲	۴۰/۹۸۲۳	۲۴/۴۶۴۸	۲۲/۶۹۱۸	۲/۸۳۷۰	۰/۶۶۰۵	۳۳۷/۸۵۹۱
۴	۷۵	۳/۴۷۹۳	۱/۵۷۷۰	۱/۶۰۵۰	۰/۴۶۶۳	۲۳/۵۷۹۳	۲۲/۱۴۲۱	۶۶/۰۲۲۸	۵۱/۳۵۸۹	۲۵/۲۳۷۳	۲۳/۵۲۳۹	۳/۲۲۱۱	۰/۶۷۵۹	۴۰۴/۰۹۱۴
۴	۱۰۰	۴/۰۴۳۵	۱/۳۶۶۲	۱/۴۱۸۶	۰/۵۰۲۷	۲۳/۸۷۸۹	۲۲/۵۲۰۰	۷۶/۳۷۱۷	۶۰/۷۰۵۸	۲۶/۰۱۹۴	۲۴/۳۲۸۹	۳/۵۲۳۷	۰/۶۸۵۹	۴۲۹/۴۲۵۱

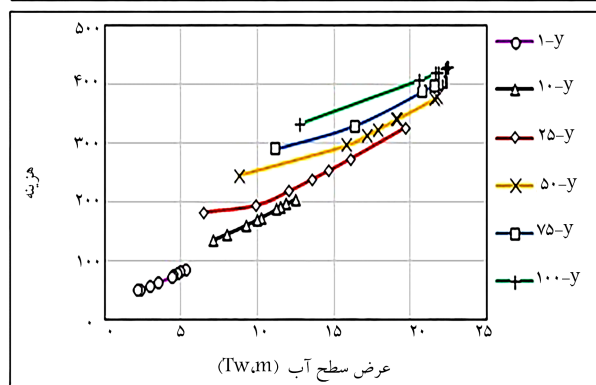
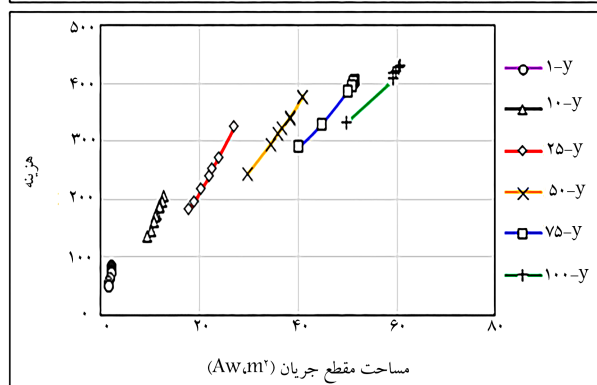
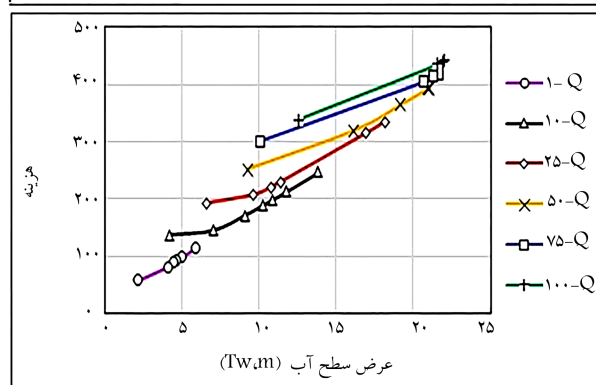
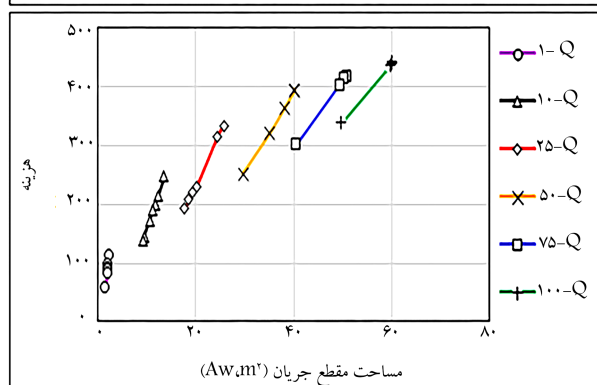
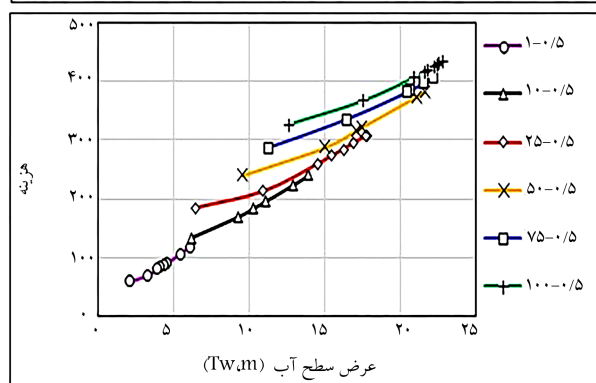
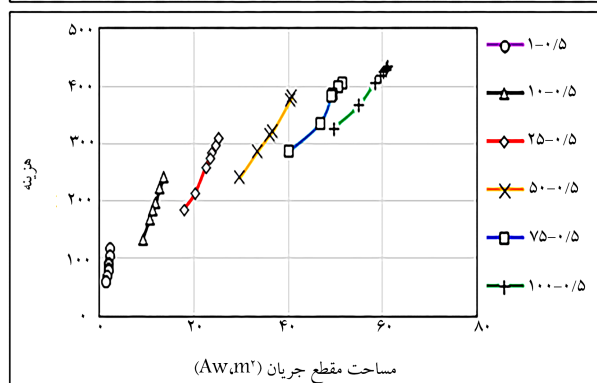
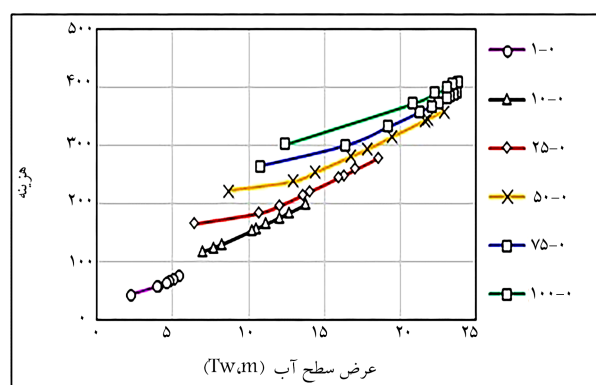
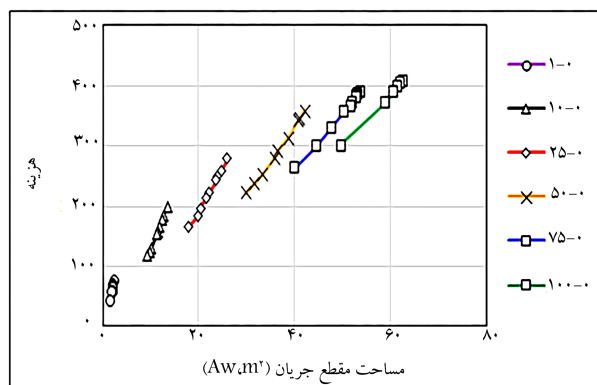


شکل ۵. نمودار شیب جانبی سمت راست و هزینه در مدل‌ها و دبی‌های مختلف.

شکل ۴. نمودار شیب جانبی سمت چپ و هزینه در مدل‌ها و دبی‌های مختلف.

مطابق شکل ۶، با افزایش دبی جریان، عرض سطح آب و هزینه افزایش یافته‌اند. از طرفی، در هر نمودار با افزایش عرض سطح آب، هزینه ساخت افزایش یافته است. روند تغییرات نمودارها در چهار تا مدل یکسان است. مطابق شکل ۷، با افزایش دبی جریان، مساحت مقطع جریان و هزینه افزایش یافته‌اند. از طرفی،

پیروی می‌کنند. مطابق شکل ۵، شیب جانبی سمت راست و هزینه با افزایش دبی جریان افزایش یافته‌اند. از طرفی، در هر نمودار با افزایش شیب جانبی سمت راست، هزینه ساخت افزایش یافته است. روند تغییرات نمودارها در چهار تا مدل یکسان است.

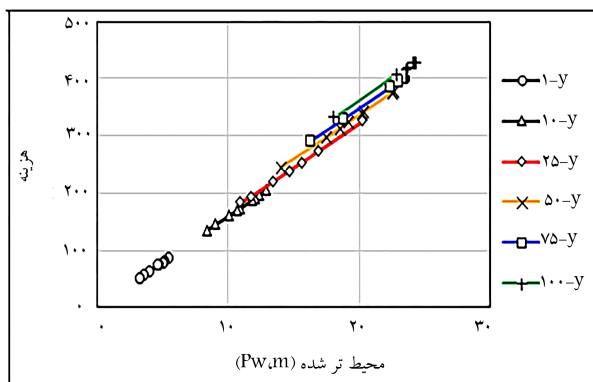
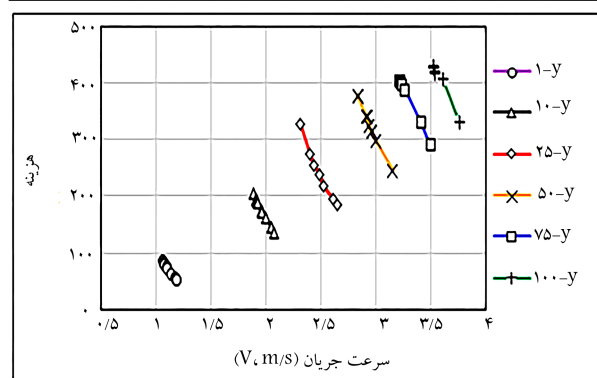
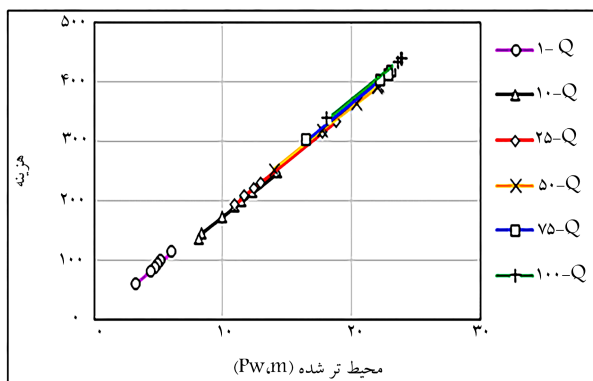
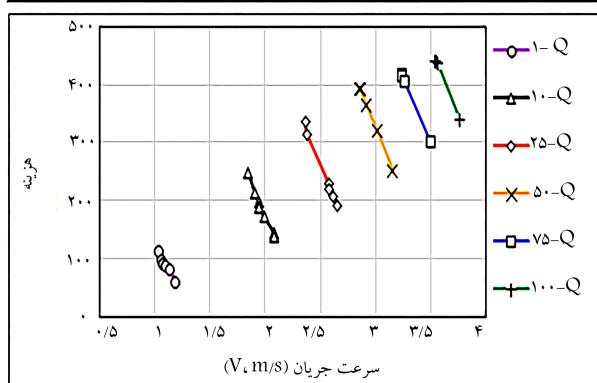
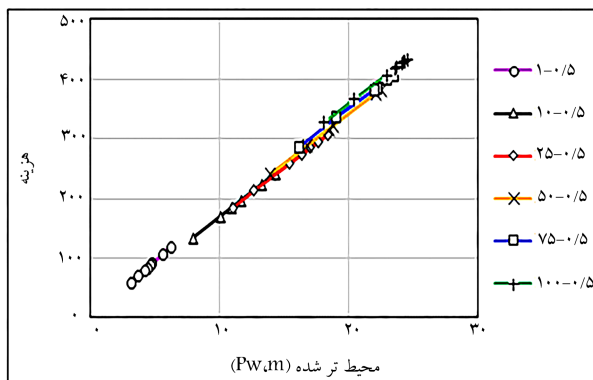
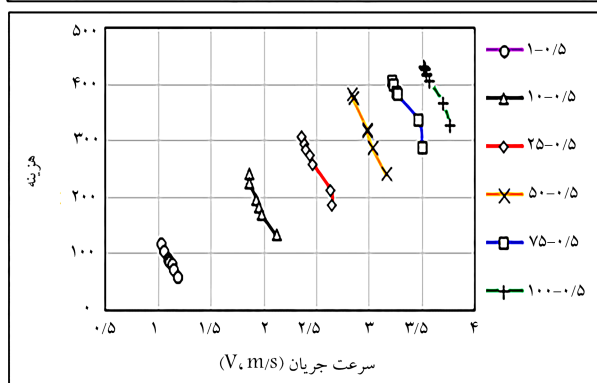
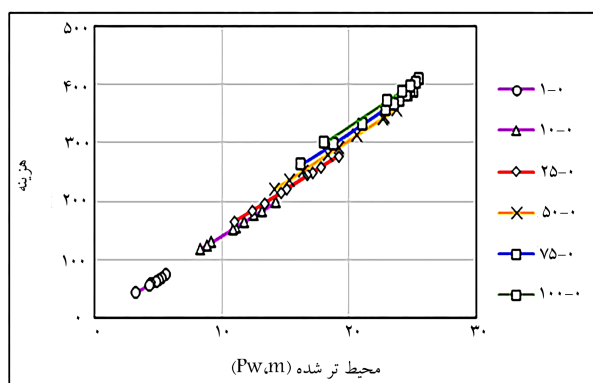
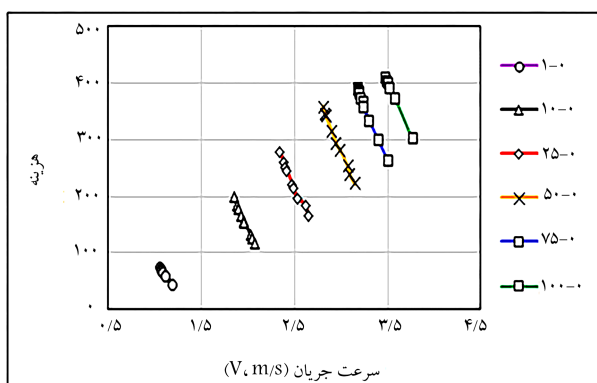


شکل ۷. نمودارهای مساحت مقطع جریان و هزینه در مدل‌ها و دبی‌های مختلف.

شکل ۶. نمودار عرض سطح آب و هزینه در مدل‌ها و دبی‌های مختلف.

است. در مقادیر مختلف دبی جریان، در هر چهار مدل، تغییرات نمودارها منظم بوده است. مطابق شکل ۹، با افزایش دبی جریان، سرعت و هزینه افزایش یافته است. از طرفی، در هر نمودار با افزایش سرعت جریان، هزینه ساخت کاهش یافته است. نمودارها در هر چهار مدل در مقادیر مختلف دبی، تغییرات تقریباً یکسانی دارند.

در هر نمودار با افزایش عرض سطح آب، هزینه‌ی ساخت افزایش یافته است. در مقادیر مختلف دبی جریان، در هر چهار مدل، تغییرات نمودارها منظم بوده است. مطابق شکل ۸، با افزایش دبی جریان، محیط تر شده و هزینه افزایش یافته است. از طرفی، در هر نمودار با افزایش عرض سطح آب، هزینه‌ی ساخت افزایش یافته

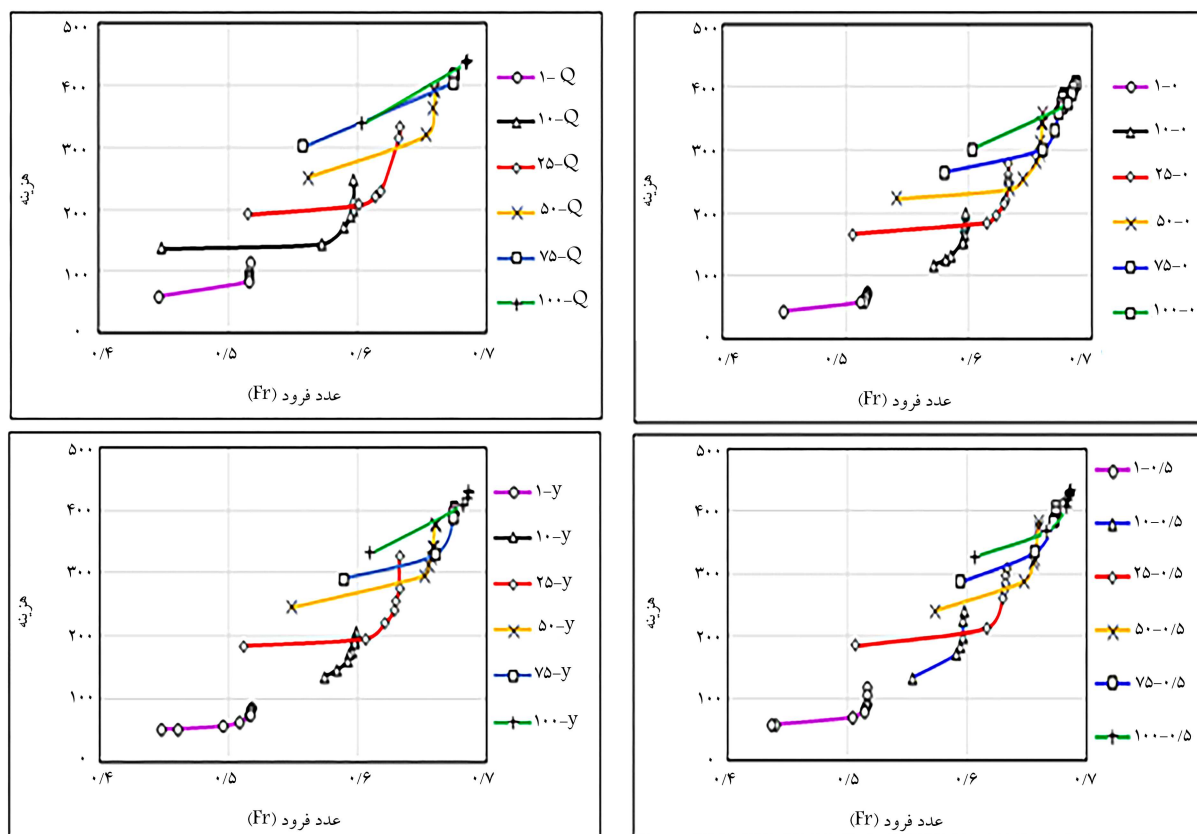


شکل ۹. نمودارهای سرعت و هزینه در مدل‌ها و دبی‌های مختلف.

شکل ۸. نمودارهای محیط تر شده و هزینه در مدل‌ها و دبی‌های مختلف.

و در هر چهار مدل معرفی شده براساس ارتفاع آزاد جهت طراحی بهینه‌ی مقطع کانال سهموی مرکب ارائه شده است که در جدول ۶ مشاهده می‌شود. مطابق مدل ارائه شده‌ی حاصل از نتایج پژوهش، با افزایش شیب‌های کناری و کاهش عمق، هزینه افزایش یافته است. از طرفی، تغییرات مذکور با افزایش عرض

مطابق شکل ۱۰، با افزایش دبی جریان، عدد فرود و هزینه افزایش یافته است. از طرفی، در هر نمودار با افزایش عدد فرود، هزینه‌ی ساخت کاهش یافته است. نمودارها در هر چهار مدل در مقادیر مختلف دبی، تغییرات تقریباً یکسانی داشته‌اند. مطابق نمودارهای اخیر، یک مدل مفهومی و تحلیلی برای تمامی مقادیر دبی‌ها



شکل ۱۰. نمودارهای عدد فرود و هزینه در مدل‌ها و دبی‌های مختلف.

ارائه‌ی چهار مدل براساس تغییرات ارتفاع آزاد انجام شده است. تأثیر دبی با در نظر گرفتن مقادیر مختلف در مدل‌های مذکور در متغیرهای طراحی، قیود، تابع هدف، پارامترهای هندسی و طراحی کانال بررسی شده است. با افزایش مقادیر دبی جریان، عمق جریان، شیب‌های کناری سمت چپ و راست، عرض کلی کانال و عرض سطح آب، مساحت مقطع کانال و مساحت جریان، محیط کلی کانال و محیط خیس شده‌ی کانال، سرعت جریان، عدد فرود و هزینه افزایش یافته است. در میان مدل‌های مفهومی ارتباط هزینه با سایر پارامترها، مدلی که بیشترین تعداد تکرار را از آن خود کرد، بدین صورت ظاهر شد که با افزایش شیب‌های کناری سمت چپ و راست، عرض کلی کانال و عرض سطح آب، مساحت مقطع کانال و مساحت جریان، محیط کلی کانال و محیط خیس شده‌ی کانال، عدد فرود، کاهش عمق جریان و سرعت جریان هزینه افزایش یافته است. در مقایسه‌ی مدل‌ها با یکدیگر، مقادیر هزینه در مدل اول نسبت به سایر مدل‌ها کمتر و در مدل سوم بیشتر بوده است.

جدول ۶. ارائه‌ی بهترین مدل مفهومی برتر بر اساس متغیر وابسته‌ی هزینه و متغیرهای مستقل عمق آب، شیب سمت چپ، شیب سمت راست و قیود.

#### بهترین مدل مفهومی

$$\frac{z_1, z_2, T, T_w, A, A_w, P, P_w, Fr_1}{y, f, V} \propto \text{Cost}$$

کلی کانال و عرض سطح آب، مساحت مقطع کلی کانال و مساحت مقطع جریان، محیط مقطع کانال و محیط خیس شده، عدد فرود و کاهش سرعت جریان همراه است.

## ۵. نتیجه‌گیری

در نوشتار حاضر، طراحی بهینه‌ی شکل مقطع کانال‌های سهموی شکل مرکب با

## پانویس‌ها

1. Loganathan
2. Chahar
3. Das

4. Han
5. Horton
6. simultaneous perturbation stochastic approximation (SPSA)
7. Novman



## منابع (References)

1. Chow, V.T. "Open channel hydraulics", New York, McGraw-Hill (1959).
2. Guo, C.Y. and Hughes, W.C. "Optimal channel cross section with freeboard", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **110**(3), pp. 304-314 (1984).
3. Monadjemi, P. "General formation of best hydraulic channel section", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **120**(1), pp. 27-35 (1994).
4. Swamee, P.K. "Optimal irrigation canal sections", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **121**(6), pp. 467-469 (1995).
5. Swamee, P.K., Mishra, G.C. and Chahar, B.R. "Comprehensive design of minimum cost irrigation canal sections", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **126**(5), pp. 322-327 (2000).
6. Das, A. "Optimal channel cross section with composite roughness", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **126**(1), pp. 68-72 (2000).
7. Jain, A., Bhattacharjya, R.K. and Sanaga, S. "Optimal design of composite channels using genetic algorithm", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **130**(4), pp. 286-295 (2004).
8. Bhattacharjya, R.K. "Optimal design of open channel section considering freeboard", *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, **11**(3), pp. 141-151 (2005).
9. Nourani, V., Talatahari, S., Monadjemi, P. and et al. "Application of ant colony optimization to optimal design of open channels", *Journal of Hydraulic Research*, **47**(5), pp. 656-665 (2009).
10. Reddy, M.J. and Adarsh, S. "Overtopping probability constrained optimal design of composite channels using swarm intelligence technique", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **136**(8), pp. 532-542 (2010).
11. Orouji, H., Mahmoudi, N., Fallah-Mehdipour, E. and et al. "Shuffled frog-leaping algorithm for optimal design of open channels", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **142**(10), pp. 1-8 (2016).
12. Gupta, S.K., Mishra, U., Datta, D. and et al. "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*, **24**(2), pp. 172-189.
13. Roushangar, K., Alami, M.T., Nourani, V. and et al. "A cost model with several hydraulic constraints for optimizing in practice a trapezoidal cross section", *Journal of Hydroinformatics*, **19**(3), pp. 456-468 (2017).
14. Mironenko, A.P., Willardson, L.S. and Jenab, S.A. "Parabolic canal design and analysis", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **110**(2), pp. 241-246 (1984).
15. Loganathan, G.V. "Optimal design of parabolic canals", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **117**(5), pp. 716-735 (1991).
16. Chahar, B.R. "Optimal design of parabolic canal section", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **131**(6), pp. 546-554 (2005).
17. Das, A. "Optimal design of channel having horizontal bottom and parabolic sides", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **133**(2), pp. 192-197 (2007a).
18. Easa, S.M. "Improved channel cross section with two-segment parabolic sides and horizontal bottom", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **135**(3), pp. 357-365 (2009).
19. Easa, S.M. "New and improved channel cross section with piecewise linear or smooth sides", *Canadian Journal of Civil Engineering*, **38**(6), pp. 690-697 (2011).
20. Mwiya, R.M. "Parabolic channel design", *International Journal of Scientific & Engineering Research*, **4**(4), pp. 804-809 (2013).
21. Easa, S.M. and Vatankhah, A.R. "New open channel with elliptic sides and horizontal bottom", *KSCE Journal of Civil Engineering*, **18**(4), pp. 1197-1204 (2014).
22. Han, Y.C. "Horizontal bottomed semi-cubic parabolic channel and best hydraulic section", *Flow Measurement and Instrumentation*, **45**, pp. 56-61 (2015).
23. Han, Y.C. and Easa, S.M. "New and improved three and one-third parabolic channel and most efficient hydraulic section", *Canadian Journal of Civil Engineering*, **44**(5), pp. 387-391 (2017).
24. Han, Y.C., Gao, X.P. and Xu, Z.H. "The best hydraulic section of horizontal-bottomed parabolic channel section", *Journal of Hydrodynamics*, **29**(2), pp. 305-313 (2017).
25. Chen, B., Wang, Z., Zhao, Y. and et al. "Exact solution of optimum hydraulic horizontal-bottomed power-law section with general exponent parameter", *Flow Measurement and Instrumentation*, **65**, pp. 166-173 (2019).
26. Farzin, S. and Valikhan Anaraki, M. "Optimal construction of an open channel by considering different conditions and uncertainty: Application of evolutionary method", *Engineering Optimization*, **53**(7), pp. 1-19 (2020).
27. Pourbakhshian, S. and Pouraminian, M. "Analytical models for optimal design of a trapezoidal composite channel cross-section", *Civil and Environmental Engineering Reports*, **31**(1), pp. 118-138 (2021).
28. Babaeyan-Koopaei, K., Valentine, E.M. and Swailes, D.C. "Optimal design of parabolic-bottomed triangle", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **126**(6), pp. 408-411 (2000).
29. Horton, R.E. "Separate roughness coefficients for channel bottom and sides", *Engineering News-Record*, **111**(22), pp. 652-653 (1933).
30. Reddy, M.J. and Adarsh, S. "Chance constrained optimal design of composite channels using meta-heuristic techniques", *Water Resources Management*, **24**(10), pp. 2221-2235 (2010).
31. Swamee, P.K., Mishra, G.C. and Chahar, B.R. "Optimal design of a transmission canal", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **128**(4), pp. 234-243 (2002b).
32. Spall, J.C. "An overview of the simultaneous perturbation method for efficient optimization", *Johns Hopkins apl Technical Digest*, **19**(4), pp. 482-492 (2002b).



33. Pourbakhshian, S., Ghaemian, M. and Jogatae, A. "The shape optimization of concrete arch dams considering stage construction", *Scientia Iranica*, **23**(1), pp. 21-35 (2016).
34. Pouraminian, M. and Ghaemian, M. "Shape optimisation of concrete open spandrel arch bridges", *Gradevinar*, **67**(12), pp. 1177-1185 (2015).
35. Seyedpoor, S.M., Salajegheh, J., Salajegheh, E. and et al. "Optimal design of arch dams subjected to earthquake loading by a combination of simultaneous perturbation stochastic approximation and particle swarm algorithms", *Applied Soft Computing*, **11**(1), pp. 39-48 (2011).
36. Novman, A. "Optimal Parabolic channel section with freeboard", M.E. Thesis, Dept. of Civil Engg., JNV University, Jodhpur (2003).