

طراحی بهینه مقطع کانال‌های مرکب با در نظر گرفتن تغییرات ضرایب زبری و محدودیت‌های هیدرولیکی

کیومرث روشنگر^{۱*}، محمدتقی اعلمی^۲ و آیدا نوری^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۰/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۱/۲۶

چکیده

کانال‌ها به عنوان یکی از مهمترین سیستم‌های انتقال آب برای اهداف آبیاری، مصارف آب شرب و کنترل سیل به شمار می‌رود. بنابراین با طراحی بهینه مقطع کانال می‌توان مجموع هزینه‌های ساخت کانال را کم کرد. در این تحقیق تابع هدف بر اساس هزینه ساخت کانال در نظر گرفته شده و معادله مانینگ به عنوان تابع قید تساوی استفاده گردیده است. آبراه‌های طبیعی بازسازی شده معمولاً دارای مقطع عرضی معمولی نیستند. این آبراه‌ها معمولاً کانال‌های ترکیبی هستند. برای این منظور، طراحی بهینه شده در یک سناریو برای دو نوع کانال مرکب انجام شد بدین منظور طراحی بهینه در دو سناریو برای دو نوع مقطع کانال مرکب، نوع اول کانال دوزنقه‌ای با شیب‌های کناری متفاوت و ضرایب زبری مختلف و نوع دوم به صورت کانال اصلی همراه مقاطع کناری با ضرایب زبری متفاوت با استفاده از الگوریتم ژنتیک با متغیرهای عمق، عرض کف و شیب‌های کناری انجام گرفت. تغییرات ضرایب زبری مانینگ و تاثیر آن در هزینه ساخت برای دو نوع مقطع کانال مورد تحلیل قرار گرفت که افزایش ضرایب زبری قسمت‌های مختلف کانال، سبب افزایش هزینه گردید و دو مدل با محدودیت اضافی عدد فرود و سرعت جریان برای نوع اول کانال مورد بررسی قرار گرفت که نتایج بدست آمده نشان داد با محدودیت عدد فرود و سرعت، سطح مقطع و در نتیجه هزینه ساخت مقطع کانال زیاد شدند.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، ضریب زبری، طراحی، کانال‌های مرکب، هزینه

مقدمه

در نظر گرفتن کلیه پارامترهای هیدرولیکی و جلوگیری از مسئله نشت از کانال‌ها و اثرات سوء حاصل از این پدیده می‌باشد. هزینه‌های احداث کانال معمولاً شامل هزینه‌های خاکبرداری، پوشش سطوح و هزینه نگهداری می‌باشد. بنابراین اولین قدم در طراحی کانال، تعیین ابعاد بهینه آن جهت انتقال دبی مورد نیاز با کم‌ترین هزینه ساخت می‌باشد. باباین و همکاران خصوصیات هیدرولیکی کانال با مقطع مثلثی با ته سهمی شکل را معرفی کردند. آن‌ها برای بدست آوردن ابعاد بهینه کانال، با این فرض که به ازای دبی، ضریب زبری و شیب کف مشخص، مقطع کانال با کم‌ترین محیط خیس شده یا مساحت مقطع بهترین مقطع خواهد بود، از روش ضرایب لاگرانژ استفاده کردند. (Babaeyan-Koopaei et al., 2000) سوامی و همکاران طراحی بهینه کانال با مقاطع مثلثی، مستطیلی و دوزنقه‌ای را با در نظر گرفتن تلفات نشت مورد تحلیل قرار داده و از روش بهینه‌سازی غیرخطی در معادله طراحی استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که مقطع بهینه کانال دوزنقه‌ای دارای مساحت مقطع و تلفات نشت کم-تری نسبت به مقاطع مستطیلی و مثلثی می‌باشد. (Swamee et al., 2000) بهاتچارجیا یک مدل بهینه‌سازی برای طراحی مقطع بهینه کانال که شرایط جریان بحرانی در کانال را نیز در نظر می‌گیرد، ارائه

یکی از ضروری‌ترین و حیاتی‌ترین نیازهای بشر «آب» است که بخصوص با افزایش جمعیت و ضرورت رشد کشاورزی و صنعت از یک طرف و محدودیت مخازن و منابع آبی از طرف دیگر، حساسیت آن روز به روز بیش‌تر می‌شود. حفاظت از آب با توجه به محدودیت‌های روزافزون منابع آب و بالارفتن نیازهای روزمره بشر به آب برای مصارف گوناگون دارای اهمیت فراوانی است. کانال‌های روباز از گذشته، از میان روش‌های مختلفی که برای انتقال آب استفاده می‌شود، بیش‌ترین کاربرد را دارند که می‌توانند در نقاط مختلف و شرایط گوناگون خاک با مقاطع عرضی متفاوت طراحی شوند. اساسی-ترین محور طراحی کانال‌های آب، انتقال آب از محل استحصال تا مصرف با حداقل تلفات و کم‌ترین هزینه بهره‌برداری می‌باشد و یکی از راه‌های حفاظت و صرفه‌جویی در مصرف آب، طراحی بهینه کانال با

۱- دانشیار گروه آب، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز

۲- استاد گروه آب، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز

۳- دانشجوی دکتری عمران، سازه‌های هیدرولیکی دانشگاه تبریز

*- نویسنده مسئول: (Email: kroshangar@yahoo.com)

جزء روش‌های بهینه‌سازی جستجوی کلی محسوب می‌شوند. الگوریتم ژنتیک که روش بهینه‌سازی الهام گرفته از طبیعت جاندار (موجودات زنده) است که می‌توان در طبقه‌بندی‌ها، از آن به‌عنوان یک روش عددی، جستجوی مستقیم و تصادفی یاد کرد. در الگوریتم ژنتیک روش‌های جستجو بر اساس مکانیزم انتخاب و ژنتیک طبیعی عمل می‌نمایند. این الگوریتم‌ها مناسب‌ترین رشته‌ها را از میان اطلاعات تصادفی سازماندهی شده انتخاب می‌کنند. در هر نسل یک گروه جدید رشته‌ها با استفاده از بهترین قسمت‌های دنباله‌های قبلی و بخش جدید اتفاقی برای رسیدن به یک جواب مناسب به وجود می‌آیند. معمولاً جمعیت جدید برآزندگی بیش‌تری دارد. جستجو هنگامی نتیجه بخش خواهد بود که به حداکثر نسل موردنظر رسیده باشد یا همگرایی حاصل شده باشد و یا معیارهای توقف برآورده شود (Goldberg., 1989).

در این تحقیق در نرم افزار متلب با توجه به تابع هدف و توابع قید برای هر یک از مدل‌ها کدهایی اتخاذ شد و با الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی انجام شد که در تنظیمات الگوریتم ژنتیک جهت دقت بیش‌تر، اندازه جمعیت ۱۰۰ گرفته شد و تعداد خاتمه نسل که معیاری برای خاتمه الگوریتم است ۱۰۰۰ در نظر گرفته شد و همچنین گزینه ترسیم روی بهترین برآزش تنظیم شد و بقیه گزینه‌های الگوریتم بر اساس پیش‌فرض برنامه تعریف شدند و نتایج بهینه برای هر یک از مدل‌ها با آنالیزهای مکرر بدست آمدند.

$$C = C_e + C_f + C_w = \beta_e A + \beta_f A \bar{y} + \beta_f P + \beta_{ws} F_s y_n + \beta_{we} T \quad (1)$$

اولین قدم در طراحی کانال تعیین ابعاد بهینه آن جهت انتقال دبی مورد نیاز با کم‌ترین هزینه ساخت می‌باشد. تابع هدف برای حداقل-سازی هزینه‌های خاکریزی و خاکبرداری (مساحت مقطع عرضی)، پوشش سطوح (محیط ترشده)، تراوش (عمق کانال) و تبخیر (عرض سطح آزاد) در واحد طول در نظر گرفته می‌شود. مقادیر بدست آمده از حداقل کردن این تابع باید در یک رابطه جریان یکنواخت که به عنوان یک قید تساوی مسئله در نظر گرفته می‌شود، صدق کند.

هزینه خاکریزی، هزینه پوشش و هزینه هدرفت آب

کل هزینه احداث کانال برای واحد طول C با رابطه ۲ محاسبه می‌شود.

$$C_e = \beta_e + \beta_f A \bar{y} \quad C_f \text{ هزینه خاکریزی، } C_w \text{ هزینه هدر رفت آب} \quad (2)$$

بر حسب $\left(\frac{\text{ریال}}{m}\right)$ است. که در آن، β_e هزینه واحد حجم خاکریزی در سطح زمین که بر حسب $\left(\frac{\text{ریال}}{m^3}\right)$ می‌باشد و β_f اضافه بها به ازای افزایش عمق حفاری که واحد آن به صورت $\left(\frac{\text{ریال}}{m^4}\right)$ است. A (m²) و \bar{y} (m) به ترتیب سطح

کرد. وی همچنین برای طراحی مقطع بهینه از روش بهینه‌سازی غیرخطی و رابطه استریکلر به عنوان قید استفاده کرد. (Bhattacharjya, 2006) روشنگر و همکاران نیز طراحی بهینه برای مقطع دوزنقه‌ای تحت محدودیت‌های هیدرولیکی، دبی‌های مختلف و شیب‌های هیدرولیکی متفاوت انجام دادند. (Roushangar et al., 2017) داس، بهینه‌سازی مقطع کانال دوزنقه‌ای و کانال با مقطع سهمی شکل با ته صاف را با استفاده از ضریب زبری معادل هورتون و انیشتین بررسی کردند. (Das., 2007) نورانی و همکاران با استفاده از روش بهینه‌سازی کلونی مورچه (ACO) و الگوریتم ژنتیک (GA)، بهینه‌سازی مقطع کانال دوزنقه‌ای مرکب را انجام دادند که در طراحی تغییرات سرعت در امتداد افقی مقطع کانال علاوه بر تغییرات در عمق جریان، با تقسیم مقطع کانال توسط خطوط قائم به قسمت‌های مختلف در نظر گرفته شده است (Nourani., 2009). ساهو و همکاران با استفاده از شبکه عصبی دبی جریان را پیش‌بینی کردند (Sahu et al., 2011). همچنین اونال و همکاران نتایج شبکه مصنوعی را با نتایج مدل‌های یک و دو بعدی تخمین جریان در مقاطع مرکب مستقیم، مورد مقایسه قرار دادند (Unal et al., 2010). آدارش و جانگا رددی نیز از روش PSO (الگوریتم تجمعی) جهت بهینه‌سازی ابعاد بهینه با محدودیت‌های مختلف هندسی و هیدرولیکی استفاده کرده و نیز نمودارهای طراحی بهینه برای طراحی کانال‌های دوزنقه‌ای مرکب ارائه دادند (Adarsh and Janga Reddy., 2010). هدف از این تحقیق بررسی ضرایب زبری مختلف برای انواع پوشش‌های کانال، اعمال محدودیت‌های هیدرولیکی و تاثیر آن‌ها در هزینه ساخت مقطع و بدست آوردن ابعاد بهینه برای مدل‌های مختلف می‌باشد که با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام می‌شود. تابع هدف همان تابع هزینه می‌باشد که تابع قید بر اساس معادله مانینگ و دیگر قیده‌های هیدرولیکی تعریف شده است.

مواد و روش‌ها

در دهه‌های اخیر به کارگیری روش‌های هوش مصنوعی که از طبیعت الهام گرفته شده‌اند، برای حل مسائل بهینه‌سازی مورد توجه واقع شدند. با توجه به اینکه در حل مسائل پیچیده، روش‌های گرادیانی احتمال خطا و توقف در مقادیر محلی را دارد، می‌توان از روش‌های بهینه‌سازی کلی تصادفی و قطعی که هیچ وابستگی به گرادیان تابع ندارند استفاده کرد. روش‌های بهینه‌سازی فراکاووشی علاوه بر داشتن مزایای الگوریتم جستجو دارای مزایایی چون سرعت همگرایی سریع‌تر و همچنین دقت بیش‌تر در حل مسائل نسبت به الگوریتم‌های جستجوی قبلی می‌باشند. این دسته از روش‌های بهینه‌سازی، الگوریتم‌های متنوعی را در بر می‌گیرد که از آن جمله می‌توان به روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک (GA) اشاره کرد که

$$Q - \frac{1}{n_e} AR^{2/3} \sqrt{S_0} = 0 \quad (8)$$

با اتخاذ یک مقیاس طول به صورت γ ابعاد بی بعد می شوند.

$$\gamma = \left(\frac{Q n_e}{\sqrt{S_0}} \right)^{3/8} \quad (9)$$

تابع هدف و قید بی بعد

با استفاده از رابطه‌های ۷، ۸ و ۹ مسأله تعیین ابعاد بهینه مقطع کانال کاهش یافت به.

$$\text{Minimize } C^* = A^* + \beta_r A^* \bar{y} + \beta_l P^* + \beta_{wE} T \quad (10)$$

با قید

$$\phi = I - A^* \frac{5}{3} P^* \frac{-2}{3} \quad (11)$$

زیرنویس * نشان دهنده ابعاد بی بعد می باشد.

تابع جریمه با اعمال ضرایبی و انجام ترکیب جمع با تابع هزینه، تابع برازندگی را ایجاد می کند. در این تحقیق، تابع برازندگی که هم شامل تابع هزینه و هم تابع جریمه می باشد، برای تمامی مدل ها به صورت فرم کلی رابطه ۱۲ در نظر گرفته شده است با این تفاوت که ضرایب برای مدل ها عوض شدند که با سعی و خطا بدست آمدند.

$$F_{fitness} = F_{cost} + \sum_{i=1}^I \alpha |F_{penalty}|^{\beta} \quad (12)$$

که α و β به ترتیب توان و ضریب تابع جریمه بوده و اعداد مثبت می باشند. n شماره قید و I تعداد کل قیدها است.

طراحی بهینه کانال

طراحی برای دو نوع مقطع کانال مرکب با دبی عبوری Q (m^3/s) ۱۰۰ و ۲۰۰ با شیب کف طولی کانال به اندازه ۰/۰۰۰۱ می باشد که کانال از میان قشر خاکی با نسبت های $\frac{\beta_e}{\beta_r}$ عبور می کند. فرضیات طراحی در جدول ۱ نشان داده شده است که در آن کانال با پوشش با ضرایب زبری مختلف است (Swamee and Chahar., 2000).

γ ها برای زبری ها محاسبه شده که براساس آن ضرایب تابع هزینه بی بعد به صورت زیر می باشند (جدول ۱).

مقطع کانال و عمق مرکز ثقل از سطح آزاد آب می باشند. هزینه هر واحد سطح پوشش داده شده مستقل از عمق در نظر گرفته شده است که با رابطه ۳ داده شده است.

$$C_l = \beta_l P \quad (3)$$

β_l : هزینه هر واحد سطح پوشش شده که مستقل از عمق جابجایی می باشد و واحدش بر حسب $(\frac{m^2}{m})$ می باشد. P (m) محیط

ترشده است.

هزینه هدر رفت آب به صورت روابط [۴] تا [۶] شرح داده می شود:

$$C_w = \beta_{ws} \gamma_n F + \beta_{wE} T \quad (4)$$

$$\beta_{ws} = 3/156 \times 10^7 k C_w / r \quad (5)$$

$$\beta_{wE} = 3/156 \times 10^7 E C_w / r \quad (6)$$

T : نرخ بهره سالانه ($\frac{\%}{\text{year}}$) و C_w : هزینه واحد حجمی آب ($\frac{m^3}{\text{year}}$) می باشند. هزینه حجمی آب ممکن است برای تلفات تبخیر متفاوت باشد که بستگی به تراوش کناره ها دارد. T عرض سطح آزاد آب (m) و E تبخیر واحد سطح ($\frac{m}{s}$) می باشند که در معادله انتقال جرم E تابعی از سرعت باد روی سطح، دمای سطح آب، دمای هوا و رطوبت نسبی هوای بالای سطح آب است. K ضریب نفوذپذیری متوسط بر حسب $(\frac{m}{s})$ و γ_n عمق نرمال آب در کانال بر حسب (m) می باشند. F_s تابع تراوش (بی بعد) که خود تابعی از هندسه کانال است. از آنجایی که β_l / β_e ، β_r / β_e و β_{wE} / β_e ابعاد طولی دارند تحت تاثیر واحد پول انتخاب شده قرار نمی گیرند، این نسبت ها را می توان برای انواع مختلف پوشش، لایه های خاکی و شرایط آب و هوایی با استفاده از نسبت های مناسب به کار برد.

Q کل دبی عبوری از مقطع کانال ($\frac{m^3}{s}$)، S_0 شیب کف طولی کانال، R شعاع هیدرولیکی (m)، g شتاب گرانشی ($\frac{m}{s^2}$) می باشند.

تابع هدف

$$f_{cost}(b, \gamma, m) = C_e + C_l + C_w = \beta_e A + \beta_r A \bar{y} + \beta_l P + \beta_{wE} T \quad (7)$$

با قید:

جدول ۱- فرضیات طراحی.

S_0	$Q (m^3/s)$	$g (m/s^2)$	فاکتورهای جریان
۰/۰۰۰۱۶	۲۰۰ و ۱۰۰	۹/۷۹	
$1 \cdot \frac{\beta_{wE}}{\beta_e} =$	$\sqrt{\frac{\beta_l}{\beta_e}} =$	$5/5 \cdot \frac{\beta_e}{\beta_r} =$	ضرایب هزینه

کف و کناره های کانال و شیب های کناری متفاوت (m1, m2) در نظر گرفته شده است (شکل ۱).

سناریو اول

سناریو اول کانال مرکب با ضرایب زبری مانینگ متفاوت برای

خیس شده و i بیانگر بخش‌های تقسیمی (مقطع اصلی و مقاطع طرفین) می‌باشند. روش‌های جدیدی نیز جهت تخمین دبی مانند روش CDM و COH وجود دارد که جهت محاسبه دبی بهتر از روش‌های SCM، که هورتون انیشتین نیز جزو این روش‌ها می‌باشند و به دبی واقعی نزدیک‌تر است. به علت اینکه در این تحقیق دبی مشخص می‌باشد و بر اساس این دبی، ضرایب زبری و شیب طولی کف کانال مشخص، هزینه بهینه و ابعاد بهینه بدست آمده است و برای بهینه‌سازی با اتخاذ یک مقیاس طول به صورت $\gamma\eta = \left(\frac{Qn_e}{\sqrt{S_0}}\right)^{3/8}$ ابعاد

بی‌بعد می‌شوند که برای این مقیاس بی‌بعد، به یک n معادل نیاز است که از روش هورتون انیشتین جهت بدست آوردن ضریب زبری معادل استفاده شده است. که نکته اصلی روش‌های SCM نیز محاسبه ضریب زبری معادل می‌باشد که یکی از رایج‌ترین آن‌ها روش هورتون انیشتین می‌باشد (Parsaie et al., 2016).

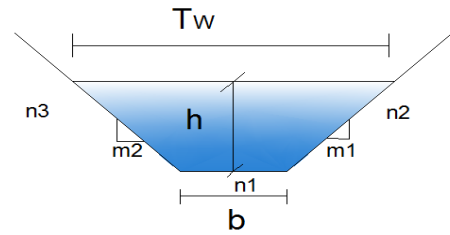
نتایج و بحث

سناریو اول: مدل I و II (محدودیت معادله مانینگ با ضرایب زبری مختلف)

در نوع اول سناریو در مدل اول برای n_1 ضریب زبری کف کانال مقادیر مختلف به صورت متغیر، از ۰/۰۱۲ تا ۰/۰۳ برای دبی ۱۰۰ متر مکعب بر ثانیه در نظر گرفته شده است در حالی که ضریب زبری کناره‌ها n_2 و n_3 ثابت در نظر گرفته شده است. در مدل دوم n_2 به صورت متغیر در بازه‌ی ۰/۰۱۸ تا ۰/۰۶۳ در نظر گرفته شده است. همانطور که از نتایج جداول ۲ و ۳ و شکل ۶ دیده می‌شود با افزایش ضریب زبری کف کانال (n_1) و کناره‌ها، هزینه روند صعودی و سرعت روند نزولی دارد. طوری که هزینه برای ضرایب زبری n_1, n_2, n_3 (۰/۰۱۱)، ۰/۰۶۳ و ۰/۰۱۴ (نسبت به ضرایب زبری (۰/۰۱۲، ۰/۰۱۳ و ۰/۰۱۴)، ۶۲٪ زیاد شده است. همچنین از نتایج قابل مشاهده است که با افزایش ضریب زبری فرود نیز بنابر کاهش سرعت، کاهش می‌یابد. مثلاً برای ضرایب زبری ۰/۰۱۱، ۰/۰۱۴ و ۰/۰۲۳ متغیرهای بهینه عرض کف ۶/۲۱ متر، عمق ۶/۷۴ متر و شیب‌های کناری ۰/۷۲ و ۰/۷۷ به دست آمدند.

مدل III (قید اضافی عدد فرود)

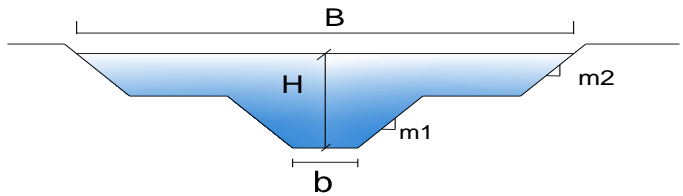
این مدل بهینه‌سازی شبیه مدل اول می‌باشد با این تفاوت که برای عدد فرود محدودیت قایل شده است چون برای جلوگیری از فرسایش در کانال باید عدد فرود محدود شود. اعداد بدست آمده در جدول ۴ نشان می‌دهد که با کاهش عدد فرود، سطح مقطع کانال زیاد و در نتیجه سبب افزایش هزینه ساخت می‌شود. محدودیت عدد فرود



شکل ۱- مقطع کانال ذوزنقه‌ای مرکب با زبری متفاوت در کف و کناره‌ها

سناریو دوم

در سناریو دوم طراحی برای مقطع کانال مرکب نوع دوم به صورت کانال اصلی همراه با قسمتی از مقطع که در طرفین کانال اصلی واقع می‌شود، انجام گرفته است (شکل ۲).



شکل ۲- مقطع کانال اصلی به همراه مقاطع کناری

آبراه‌های طبیعی بازسازی شده معمولاً مقاطع عرضی متداول ندارند. این آبراه‌ها معمولاً کانال‌های ترکیبی از یک کانال اصلی و قسمتی از مقطع مرکب است که دارای تراز کف به مراتب بالاتر از کانال اصلی می‌باشد که در طرفین کانال اصلی واقع می‌شود و با هندسه و زبری‌های متفاوت می‌باشد همچنین در بعضی مواقع در اصلاح مسیر رودخانه‌های داخل شهر، از این مقاطع مرکب نوع دوم استفاده می‌شود (Dupuis et al., 2017).

برای کانال با ضرایب زبری متفاوت به یک ضریب زبری معادل که ضریب زبری ترکیبی نامیده می‌شود در فرمول معادله مانینگ نیاز است. روش‌های مختلفی برای تعیین ضریب زبری معادل با فرضیات خاصی توسط محققین ارائه شده است. روش‌های مختلف از جمله هورتون (Horton., 1933)، انیشتین (Einstein., 1934) و غیره ارائه شده است. در این مطالعه از روش هورتون جهت محاسبه ضریب معادل استفاده شده است هورتون با فرض مساوی بودن جریان در تمام بخش‌ها رابطه [۱۳] را ارائه کرده است.

$$n_e = \frac{(\sum n_i^{3/2} P_i)^{2/3}}{p^{2/3}} \quad (13)$$

که در آن n_e ضریب زبری معادل، n ضریب زبری، p محیط

می‌باشند تقریباً نزدیک هم خواهند بود چون برای شیب‌های کناری کانال در آنالیز، اعداد یکسانی بدست آمده است و بیش‌ترین تغییرات در A_1 که همان سطح مقطع مستطیلی است، مشاهده می‌شود که به دلیل افزایش عرض کف کانال می‌باشد.

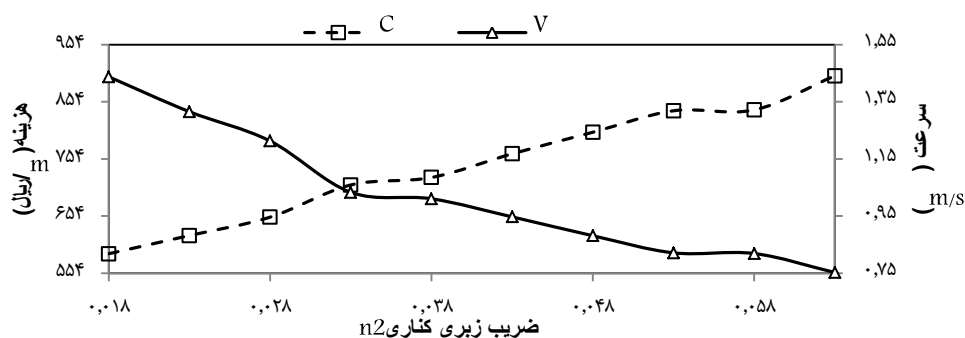
برای کلیه حالات جریان زیربحرانی و بحرانی در محدوده ۰/۲ تا ۱ برای ضرایب زبری ۰/۱۵، ۰/۱۸ و ۰/۰۲ بررسی شدند. نتایج به صورت جدول ۴ قابل مشاهده است. همانطور که از جدول ۴ مشاهده می‌شود اگر مقطع ذوزنقه‌ای به سه قسمت تقسیم شود مقادیر A_2 و A_3 که سطح مثلث‌های کناری

جدول ۲- نتایج ابعاد بهینه‌سازی برای ضریب زبری کف کانال متغیر (n_1)

هزینه (ریال/m)	m_2	m_1	h^*	b^*	ne	سرعت (m/s)	فروود	n_1	
۰۱۲/۵۵۴	۸۴۷/۰	۷۱۶/۰	۹۹۲/۰	۸۶۸/۰	۰۱۳/۰	۵۸۲/۱	۲۴۷/۰	۰۱۳/۰	$۰۱۳/۰ \cdot n_2 =$
۶۸۱/۵۵۹	۶۰۹/۰	۷۱۴/۰	۹۹۲/۰	۹۸۰/۰	۰۱۴/۰	۵۴۳/۱	۲۳۳/۰	۰۱۴/۰	$۰۱۴/۰ \cdot n_3 =$
۲۰۰/۵۷۴	۹۴۲/۰	۵۰۲/۰	۹۷۸/۰	۹۶۲/۰	۰۱۴/۰	۴۸۵/۱	۲۲۶/۰	۰۱۶/۰	
۵۱۲/۵۸۳	۵۸۶/۰	۹۰۰/۰	۹۷۱/۰	۹۵۸/۰	۰۱۵/۰	۴۴۵/۱	۲۱۹/۰	۰۱۸/۰	
۵۸۱/۵۹۵	۶۹۴/۰	۹۵۷/۰	۹۵۷/۰	۹۱۷/۰	۰۱۵/۰	۴۰۴/۱	۲۱۶/۰	۰۲۰/۰	
۸۹۳/۶۰۵	۸۰۵/۰	۷۷۳/۰	۹۷۱/۰	۹۱۱/۰	۰۱۶/۰	۳۶۴/۱	۲۰۶/۰	۰۲۲/۰	
۵۵۹/۶۱۶	۸۰۶/۰	۷۰۵/۰	۹۹۳/۰	۸۸۹/۰	۰۱۷/۰	۳۲۹/۱	۱۹۷/۰	۰۲۴/۰	
۲۹۲/۶۳۱	۵۸۹/۰	۸۸۴/۰	۹۵۸/۰	۹۹۶/۰	۰۱۸/۰	۲۷۰/۱	۱۸۷/۰	۰۲۶/۰	
۸۶۵/۶۴۱	۶۴۷/۰	۸۹۶/۰	۹۶۰/۰	۹۵۹/۰	۰۱۸/۰	۲۴۱/۱	۱۸۳/۰	۰۲۸/۰	
۶۶۱/۶۵۵	۲۳۷/۱	۵۵۹/۰	۹۴۹/۰	۸۸۲/۰	۰۱۸/۰	۲۱۵/۱	۱۸۳/۰	۰۳۰/۰	

جدول ۳- نتایج ابعاد بهینه‌سازی برای ضریب زبری کناره کانال متغیر (n_2)

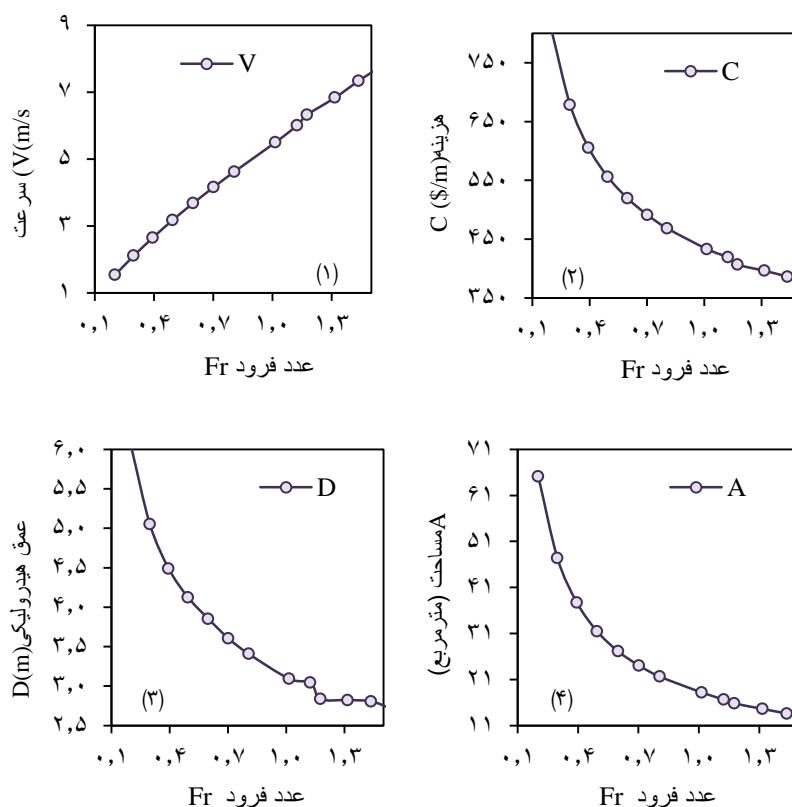
هزینه (ریال/m)	m_2	m_1	h^*	b^*	ne	سرعت (m/s)	فروود	n_2	
۰۳۰/۵۸۸	۹۲۷/۰	۹۷۴/۰	۹۰۶/۰	۹۵۰/۰	۰۱۵/۰	۴۳۸/۱	۲۳۰/۰	۰۱۸/۰	$۰۱۱/۰ \cdot n_1 =$
۸۹۹/۶۱۹	۷۷۰/۰	۷۳۷/۰	۹۸۷/۰	۹۰۹/۰	۰۱۷/۰	۳۱۶/۱	۱۹۵/۰	۰۲۳/۰	$۰۱۴/۰ \cdot n_3 =$
۰۶۳/۶۵۲	۹۲۱/۰	۶۹۳/۰	۹۵۶/۰	۹۳۴/۰	۰۱۹/۰	۲۱۳/۱	۱۷۹/۰	۰۲۸/۰	
۴۴۱/۷۰۸	۴۷۵/۰	۲۷۱/۱	۹۵۴/۰	۸۹۶/۰	۰۲۳/۰	۰۳۳/۱	۱۴۹/۰	۰۳۳/۰	
۵۱۸/۷۳۱	۸۷۷/۰	۶۹۵/۰	۹۶۵/۰	۹۳۱/۰	۰۲۳/۰	۰۱۰/۱	۱۴۶/۰	۰۳۸/۰	
۹۸۶۴/۷۶۲	۶۸۴/۰	۸۵۲/۰	۹۵۵/۰	۹۷۲/۰	۰۲۶/۰	۹۴۷/۰	۱۳۰/۰	۰۴۳/۰	
۷۴۵/۸۰۰	۶۸۳/۰	۸۹۳/۰	۹۵۲/۰	۹۶۲/۰	۰۲۹/۰	۸۸۱/۰	۱۲۰/۰	۰۴۸/۰	
۳۶۸/۸۳۸	۶۷۳/۰	۰۰۱/۱	۹۲۵/۰	۹۹۴/۰	۰۳۱/۰	۸۲۱/۰	۱۱۱/۰	۰۵۳/۰	
۸۴۵/۸۳۹	۸۶۵/۰	۶۲۹/۰	۹۵۷/۰	۹۸۶/۰	۰۳۲/۰	۸۱۹/۰	۱۰۸/۰	۰۵۸/۰	
۵۶۸/۸۹۹	۹۳۲/۰	۷۱۰/۰	۹۹۹/۰	۸۱۴/۰	۰۳۵/۰	۷۵۲/۰	۰۹۸/۰	۰۶۳/۰	



شکل ۳- تاثیر تغییرات ضریب زبری کناری کانال روی سرعت و هزینه ساخت کانال.

جدول ۴- نتایج بهینه سازی برای فرودهای مختلف

هزینه	A_{*2}	A_{*3}	A_{*1}	عرض کف * عمق	m_1	m_2	عدد فرود	سرعت (m/s)	عرض سطح آزاد*
۱۶/۶	۰/۰۹۹	۰/۱	۱/۱۴۸	۱/۱۵۴	-/۰۹۵	-/۰۲۰۱	-/۰۲۰۳	۱/۵۳۶	۱/۵۵۶
۱۴/۰۴۵	۰/۰۶۹	۰/۰۶۹	-/۰۸۴۳	۱/۰۱۶	-/۰۸۲۹	-/۰۲۰۰	-/۰۲۹۸	۲/۱۱۱	۱/۳۳۹
۱۲/۵۳۴	۰/۰۵۶	۰/۰۵۴	-/۰۶۷	۰/۹۰۸	-/۰۷۳۷	-/۰۲۰۰	-/۰۳۹۵	۲/۶۵۳	۱/۲۰۸
۱۱/۵۱۴	۰/۰۴۶	۰/۰۴۶	-/۰۵۶	۰/۸۲۷	-/۰۶۷۷	-/۰۲۰۰	-/۰۴۹۵	۳/۱۷۸	۱/۰۹۸
۱۰/۷۵۳	۰/۰۴۱	۰/۰۴۶	-/۰۴۷۴	۰/۷۴۱	-/۰۶۴۰	-/۰۲۰۰	-/۰۵۹۹	۳/۶۸۶	۱/۰۱۳
۱۰/۱۷۴	۰/۰۳۵	۰/۰۳۵	-/۰۴۲۸	۰/۷۲۳	-/۰۵۹۲	-/۰۲۰۰	-/۰۷۰۳	۴/۱۶۰	۰/۹۶۰
۹/۶۹۸	۰/۰۳۲	۰/۰۳۱	-/۰۳۸۴	۰/۶۸۵	-/۰۵۶	-/۰۲۰۰	-/۰۸۰۷	۴/۶۲۳	۰/۹۱۳
۸/۹۶۹	۰/۰۲۸	۰/۰۲۹	-/۰۳۱۹	۰/۶۲۲	-/۰۵۱۲	-/۰۲۱۴	۱/۰۱۶	۵/۵۰۴	۰/۸۴۵



شکل ۴- (۱) تغییرات سرعت، (۲) هزینه، (۳) عمق هیدرولیکی و (۴) مساحت کل در مقابل عدد فرود

مدل IV (قید اضافی سرعت حداکثر)

برای عبور دهی مطمئن دبی مورد نیاز و جلوگیری از فرسایش کانال خاکی از کانال باید سرعت متوسط از سرعت حداکثر محتمل بیش تر نشود، در این مدل رابطه سرعت به عنوان تابع قید به مدل اول اضافه شده است و برای مقادیر مختلف v از $1/5$ تا 3 متر بر ثانیه، بهینه‌سازی مقطع صورت گرفته است.

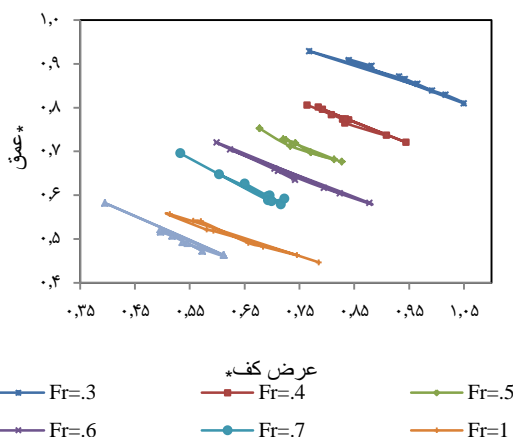
$$V = \frac{Q}{A} \quad (14)$$

شکل ۴ نمودار تغییرات فرود در مقابل تغییرات سرعت، هزینه، عمق هیدرولیکی و مساحت کل رسم شده است همانطور که دیده می‌شود با افزایش عدد فرود، سرعت روند صعودی اما مساحت، هزینه و عمق هیدرولیکی روند نزولی دارند.

شکل ۵ تغییرات عرض کف در برابر عمق با شیب‌های کناری ثابت در حدود $2/5$ برای فرودهای مختلف را نشان می‌دهد که با زیاد کردن عرض کف، عمق کم می‌شود همچنین از این نمودار می‌توان برای پیدا کردن عمق یا عرض کف برای فرود مشخص با معلوم بودن یکی از آن‌ها استفاده کرد.

جدول ۵- نتایج بهینه‌سازی برای محدودیت سرعت

هزینه (ریال/m)	T_*	سرعت (m/s)	فرود	m_2	m_1	y_*	b_*	A_{*1}	A_{*3}	A_{*2}
۷۷۶/۹۳	۱/۵۹	۱/۶۳	-۰/۲۲	-۰/۲۰	-۰/۴۲	-۰/۹۸	-۰/۹۹	-۰/۹۷	-۰/۱۰	-۰/۲۰
۷۷۰/۹۶	۱/۳۶	۱/۷۲	-۰/۲۲	-۰/۲۰	-۰/۲۰	۱/۰۳	-۰/۹۵	-۰/۹۸	-۰/۱۱	-۰/۱۱
۷۰۰/۵۰	۱/۳۰	۲/۰۰	-۰/۲۷	-۰/۲۰	-۰/۲۰	-۰/۹۲	-۰/۹۳	-۰/۸۶	-۰/۰۸	-۰/۰۹
۶۲۴/۰۰	۱/۱۶	۲/۵۰	-۰/۳۶	-۰/۲۰	-۰/۲۰	-۰/۸۳	-۰/۸۳	-۰/۶۹	-۰/۰۷	-۰/۰۷
۵۷۲/۰۷	۱/۰۷	۳/۰۰	-۰/۴۵	-۰/۲۰	-۰/۲۰	-۰/۷۵	-۰/۷۷	-۰/۵۷	-۰/۰۶	-۰/۰۶



شکل ۵- نمودار عرض و عمق بر اساس فرودهای مختلف

افزایش ضریب زبری سرعت کاهش یافته و هزینه روند صعودی دارد. در مدل I، n_1 به صورت متغیر از ۰/۱۲ تا ۰/۰۳ در نظر گرفته شده است در مقایسه مقادیر بهینه برای جدول ۲ و ۶ (دو نوع کانال) برای مدل I دیده می‌شود که هزینه‌ها برای سناریو دوم کانال افزایش یافته است طوری که برای ضریب زبری کف کانال برابر ۰/۱۲ و بقیه ضرایب، هزینه ۲۲٪ زیاد شده است ولی عرض، عمق و شیب قسمت اصلی کانال (دوزنقه‌ای) در سناریو دوم کانال نسبت به سناریو اول کاهش یافته است.

نتایج بهینه‌سازی در جدول ۵ نشان می‌دهد که کاهش سرعت منجر به کاهش عدد فرود شده است، همچنین دیده می‌شود که با کاهش سرعت، سطح مقطع جریان افزایش می‌یابد که در نتیجه آن هزینه ساخت مقطع کانال زیاد می‌شود.

سناریو دوم (نوع دوم)

در این طرح برای ضرایب زبری n_1 تا n_4 (شکل ۲) تغییرات برای دبی ۲۰۰ مترکعب بر ثانیه در نظر گرفته شده است که نتایج در جداول ۶ الی ۹ قابل مشاهده است. نتایج حاکی از آن است که با

جدول ۶- نتایج بهینه‌سازی برای ضریب زبری متغیر n_1 از ۰/۱۲ تا ۰/۰۳ (مدل I)

H_*	B_*	هزینه (ریال/m)	m_2	m_1	h	b	سرعت	فرود	n_1	
۱/۱۴۰	۲/۴۲۲	۶۷۹/۵۱۲	-۰/۴۰۷	-۰/۴۰۰	۴/۵۴۸	۴/۵۵۶	۱/۳۹۴	-۰/۱۷۵	-۰/۱۲	$n_2 = ۰/۱۳$
۱/۰۴۹	۲/۶۰۷	۶۸۲/۴۲۰	-۰/۴۱۷	-۰/۶۴۴	۴/۵۳۷	۴/۵۶۰	۱/۴۱۳	-۰/۱۸۵	-۰/۱۴	$n_3 = ۰/۰۲$
۱/۱۱۴	۲/۴۷۱	۶۸۷/۳۷۶	-۰/۴۰۹	-۰/۴۶۵	۴/۵۸۲	۴/۵۸۲	۱/۳۷۷	-۰/۱۷۴	-۰/۱۶	$n_4 = ۰/۲۲$
۱/۱۴۹	۲/۲۸۳	۶۹۱/۹۵۸	-۰/۲۶۸	-۰/۴۳۵	۴/۶۰۸	۴/۶۰۸	۱/۳۶۲	-۰/۱۶۵	-۰/۱۸	
۱/۱۶۰	۲/۳۴۵	۸۸۰/۶۹۸	-۰/۳۶۰	-۰/۳۷۱	۴/۶۳۹	۴/۶۳۹	۱/۳۳۹	-۰/۱۶۳	-۰/۲۰	
۱/۱۴۴	۲/۳۴۴	۷۰۲/۴۰۰	-۰/۳۲۷	-۰/۴۲۲	۴/۶۵۷	۴/۶۵۸	۱/۳۳۳	-۰/۱۶۲	-۰/۲۲	
۱/۱۵۰	۲/۳۹۲	۷۰۹/۴۶۵	-۰/۳۹۳	-۰/۳۷۹	۴/۶۸۷	۴/۶۸۷	۱/۳۱۲	-۰/۱۶۱	-۰/۲۴	
۱/۱۱۲	۲/۵۰۸	۷۱۴/۰۷۷	-۰/۴۵۳	-۰/۴۵۲	۴/۷۰۶	۴/۷۱۶	۱/۳۰۶	-۰/۱۶۴	-۰/۲۶	
۱/۰۶۵	۲/۵۳۲	۷۱۸/۴۶۵	-۰/۳۶۹	-۰/۶۱۳	۴/۷۱۵	۴/۷۳۷	۱/۳۱۰	-۰/۱۶۶	-۰/۲۸	
۱/۰۸۵	۲/۵۰۶	۷۲۴/۴۹۱	-۰/۳۸۹	-۰/۵۴۹	۴/۷۴۹	۴/۷۵۹	۱/۲۸۸	-۰/۱۶۱	-۰/۳۰	

جدول ۷- نتایج بهینه‌سازی برای ضریب زبری متغیر n_2 (مدل II)

H*	B*	هزینه (ریال/m)	m_2	m_1	h	b	سرعت	فرود	n_2
۱۱۵/۱	۴۴۵/۲	۲۳۸/۶۹۹	۳۸۴/۰	۴۷۱/۰	۶۴۱/۴	۶۴۱/۴	۳۴۵/۱	۱۶۸/۰	۰۱۸/۰
۰۹۳/۱	۴۵۹/۲	۴۶۹/۷۲۸	۳۴۹/۰	۵۴۳/۰	۷۶۹/۴	۷۶۹/۴	۲۷۷/۱	۱۵۸/۰	۰۲۰/۰
۱۴۷/۱	۳۸۵/۲	۹۶۱/۷۵۵	۳۸۱/۰	۳۸۹/۰	۸۹۶/۴	۸۹۷/۴	۲۰۵/۱	۱۴۴/۰	۰۲۲/۰
۰۷۰/۱	۴۱۰/۲	۲۲۴/۷۹۷	۲۲۱/۰	۶۵۸/۰	۰۵۸/۵	۰۵۸/۵	۱۳۹/۱	۱۳۶/۰	۰۳۳/۰
۰۵۳/۱	۴۸۳/۲	۰۶۸/۸۳۳	۲۶۶/۰	۶۸۸/۰	۲۰۷/۵	۲۰۷/۵	۰۷۵/۱	۱۲۸/۰	۰۳۸/۰
۰۵۸/۱	۵۵۳/۲	۴۳۸/۸۶۲	۳۷۴/۰	۶۳۵/۰	۳۳۵/۵	۳۵۲/۵	۰۲۳/۱	۱۲۲/۰	۰۴۳/۰
۰۲۵/۱	۶۰۹/۲	۹۵۶/۹۰۸	۳۴۰/۰	۷۵۰/۰	۵۰۷/۵	۵۰۷/۵	۹۶۱/۰	۱۱۴/۰	۰۴۸/۰
۱۱۳/۱	۴۷۵/۲	۵۵۰/۹۱۳	۴۱۶/۰	۴۶۵/۰	۵۵۱/۵	۵۵۳/۵	۹۳۹/۰	۱۰۸/۰	۰۵۳/۰
۰۰۱/۱	۶۹۷/۲	۲۷۰/۹۹۱	۳۶۷/۰	۸۲۶/۰	۸۱۰/۵	۸۲۷/۵	۸۶۳/۰	۱۰۱/۰	۰۵۸/۰
۰۶۹/۱	۴۷۵/۲	۶۷۵/۹۹۵	۳۰۴/۰	۶۲۹/۰	۸۶۴/۵	۸۶۴/۵	۸۴۷/۰	۰۹۵/۰	۰۶۳/۰

جدول ۸- نتایج بهینه‌سازی برای ضریب زبری متغیر n_3 از ۰/۰۲۵ تا ۰/۰۷ (مدل III)

H*	B*	هزینه (ریال/m)	m_2	m_1	h	b	سرعت	فرود	n_3
۰۴۱/۱	۶۲۱/۲	۷۲۴/۶۵	۴۰۸/۰	۶۵۸/۰	۶۳۲/۴	۶۳۲/۴	۳۵۹/۱	۱۷۶/۰	۰۲۵/۰
۱۲۴/۱	۴۴۰/۲	۹۰۶/۷۳۱	۳۹۷/۰	۴۳۸/۰	۷۸۹/۴	۷۸۹/۴	۲۶۱/۱	۱۵۴/۰	۰۳۰/۰
۱۴۷/۱	۳۶۲/۲	۰۱۵/۷۶۵	۳۴۲/۰	۳۹۰/۰	۹۳۲/۴	۹۳۲/۴	۱۸۵/۱	۱۴۰/۰	۰۳۵/۰
۱۱۲/۱	۴۶۹/۲	۵۰۰/۸۹۶	۳۴۲/۰	۴۲۹/۰	۰۹۸/۵	۰۹۸/۵	۱۰۵/۱	۱۳۱/۰	۰۴۰/۰
۰۹۵/۱	۵۴۳/۲	۷۴۶/۸۵۹	۳۱۰/۰	۴۰۵/۰	۳۰۰/۵	۳۰۰/۵	۰۱۳/۱	۱۱۹/۰	۰۴۵/۰
۰۷۸/۱	۶۱۲/۲	۳۷۴/۹۰۰	۳۳۱/۰	۴۲۷/۰	۴۵۹/۵	۴۵۹/۵	۹۵۴/۰	۱۱۲/۰	۰۵۰/۰
۰۸۸/۱	۵۶۴/۲	۸۵۶/۹۳۷	۲۹۱/۰	۴۱۲/۰	۶۰۵/۵	۶۰۵/۵	۹۰۴/۰	۱۰۴/۰	۰۵۵/۰
۰۸۴/۱	۴۷۷/۲	۳۱۶/۹۳۵	۲۹۱/۰	۵۳۴/۰	۷۷۷/۵	۷۷۷/۵	۹۱۳/۰	۱۰۴/۰	۰۶۰/۰
۰۶۵/۱	۶۷۴/۲	۱۷۴/۱۰۲۸	۳۰۵/۰	۴۲۲/۰	۹۳۴/۵	۹۳۴/۵	۸۰۲/۰	۰۹۱/۰	۰۶۵/۰
۰۴۶/۱	۷۹۰/۲	۷۶۱/۱۰۹۴	۲۹۸/۰	۴۰۷/۰	۱۵۲/۶	۱۵۲/۶	۷۳۹/۰	۰۸۴/۰	۰۷۰/۰

در مدل II ضریب زبری (n_2) به صورت متغیر از ۰/۰۱۸ تا ۰/۰۵۸ در نظر گرفته شده که با افزایش ضریب زبری هزینه زیاد شده است به طوری که برای ضریب زبری ۰/۰۵۸ نسبت به ضریب زبری ۰/۰۱۸ هزینه در حدود ۴۲٪ افزایش یافته است. در مدل III ضریب زبری (n_3) به صورت متغیر از ۰/۰۲۵ تا ۰/۰۷ می باشد که برای ضریب زبری ۰/۰۷ نسبت به مقدار ۰/۰۲۵ سرعت در حدود ۲ برابر کاهش یافته است (جدول ۸). در مدل IV برای n_4 مقادیر متغیر از ۰/۰۲۸ تا ۰/۰۸۲ در نظر گرفته شده است (جدول ۹).

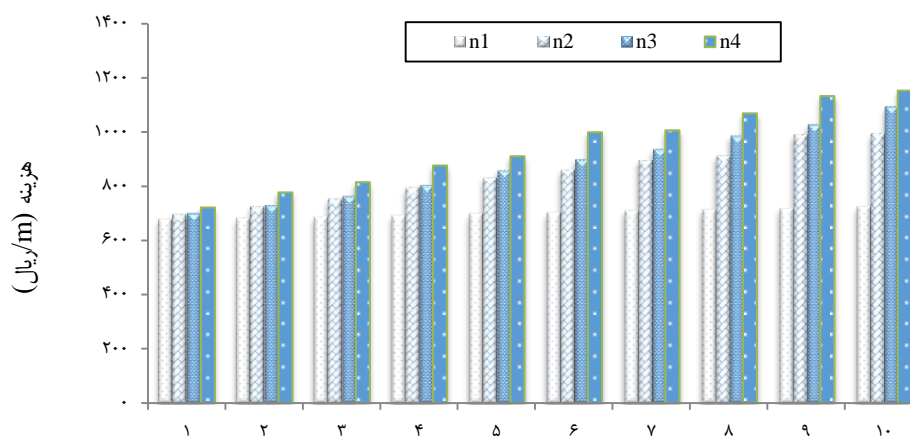
در مدل II ضریب زبری (n_2) به صورت متغیر از ۰/۰۱۸ تا ۰/۰۵۸ در نظر گرفته شده که با افزایش ضریب زبری هزینه زیاد شده است به طوری که برای ضریب زبری ۰/۰۵۸ نسبت به ضریب زبری ۰/۰۱۸ هزینه در حدود ۴۲٪ افزایش یافته است. در مدل III ضریب زبری (n_3) به صورت متغیر از ۰/۰۲۵ تا ۰/۰۷ می باشد که برای ضریب زبری ۰/۰۷ نسبت به مقدار ۰/۰۲۵ سرعت در حدود ۲ برابر کاهش یافته است (جدول ۸). در مدل IV برای n_4 مقادیر متغیر از ۰/۰۲۸ تا ۰/۰۸۲ در نظر گرفته شده است (جدول ۹).

جدول ۹- نتایج بهینه‌سازی برای ضریب زبری متغیر n_4 از ۰/۰۲۸ تا ۰/۰۷۶ (مدل IV)

H*	B*	هزینه (ریال/m)	m_2	m_1	h	b	سرعت	عدد فرود	n_4
۰۸۸/۱	۵۸۳/۲	۹۹۳/۷۲۰	۴۹۱/۰	۵۰۳/۰	۷۴۶/۴	۷۴۶/۴	۲۹۴/۱	۱۶۴/۰	۰۲۸/۰
۱۲۹/۱	۵۶۴/۲	۲۲۹/۷۷۷	۵۴۹/۰	۳۷۱/۰	۹۸۳/۴	۹۸۳/۴	۱۶۰/۱	۱۴۲/۰	۰۳۴/۰
۱۱۹/۱	۴۵۴/۲	۰۵۹/۸۱۵	۴۰۲/۰	۴۵۳/۰	۱۴۸/۵	۱۴۸/۵	۰۹۰/۱	۱۲۹/۰	۰۴۰/۰
۰۸۳/۱	۷۷۴/۲	۳۱۷/۸۷۶	۷۰۳/۰	۴۴۶/۰	۳۷۶/۵	۳۷۶/۵	۹۹۲/۰	۱۲۲/۰	۰۴۶/۰
۱۰۴/۱	۵۶۱/۲	۴۶۲/۹۱۰	۴۹۷/۰	۴۵۹/۰	۵۳۴/۵	۵۳۴/۵	۹۴۲/۰	۱۱۰/۰	۰۵۲/۰
۱۷۳/۱	۵۸۰/۲	۰۸۱/۹۹۹	۶۳۰/۰	۲۳۲/۰	۸۳۹/۵	۸۳۹/۵	۸۳۳/۰	۰۹۴/۰	۰۵۸/۰
۰۷۳/۱	۷۴۸/۲	۰۶۷/۱۰۰۶	۶۴۹/۰	۵۰۳/۰	۸۸۹/۵	۸۸۹/۵	۸۲۹/۰	۰۹۷/۰	۰۶۴/۰
۰۸۹/۱	۷۸۳/۲	۶۳۸/۱۰۶۸	۷۲۴/۰	۴۲۶/۰	۱۱۱/۶	۱۱۱/۶	۷۶۶/۰	۰۸۸/۰	۰۷۰/۰
۱۳۳/۱	۶۸۴/۲	۳۱۲/۱۱۳۲	۶۸۶/۰	۳۱۳/۰	۳۲۹/۶	۳۲۹/۶	۷۱۱/۰	۰۷۹/۰	۰۷۶/۰
۰۴۷/۱	۹۴۸/۲	۱۹۳/۱۱۵۳	۸۳۲/۰	۵۳۳/۰	۳۹۷/۶	۳۹۷/۶	۶۹۹/۰	۰۸۱/۰	۰۸۲/۰

هزینه‌ی ساخت را با توجه به ابعاد بهینه بدست آورد. به طوری که برای $n_4=0/022$ ، $n_3=0/02$ ، $n_2=0/033$ ، $n_1=0/011$ عرض و عمق کانال اصلی h (b) $5/05$ متر، $5/05$ متر شیب‌های کناری (m_1 ، m_2) به ترتیب $0/65$ ، $0/22$ ، عرض سطح آزاد و عمق کل کانال نوع دوم (کانال اصلی همراه با مقاطع کناری) برابر $24/35$ و $10/82$ متر می‌باشند.

از جداول می‌توان دید که برای ضرایب زیری هزینه برای ضرایب زیری n_1 ، n_2 ، n_3 و n_4 ($0/01$ ، $0/013$ ، $0/07$ ، $0/022$) هزینه بیشترین مقدار را دارد که نسبت به حالت n_1 ، n_2 ، n_3 و n_4 ($0/012$ ، $0/013$ ، $0/02$ ، $0/022$) که هزینه کمترین مقدار را دارد، هزینه در حدود ۷۰ درصد افزایش یافته است. از این جداول می‌توان برای ضرایب زیری مختلف کمترین



تغییرات ضرایب زیری کف و کناره‌ها

شکل ۷- نمودار ستونی برای چهار مدل کانال نوع دوم جهت مقایسه‌ی افزایش هزینه نسبت به یکدیگر

نتایج بدست آمده با دو روش بهینه‌سازی در جدول ۱۰ قابل مشاهده است که از نتایج می‌توان فهمید هزینه بدست آمده با روش GA کمی بهتر از روش PSO که توسط آدارش و رددی (Adarsh and Janga Reddy., 2010) بدست آمده بود می‌باشد. همچنین ابعاد بدست آمده نزدیک به هم می‌باشند که دلیل بر صحت نتایج قبلی دارد.

جدول ۱۰- مقایسه نتایج بهینه‌سازی

	$n_1=0.015$	$n_2=0.018$	$n_3=0.02$		
روش	هزینه*	b(m)	h(m)	m_1	m_2
GA	۲۰/۰۶۶۵	۵/۱۶۳	۴/۳۳۶	۰/۲۶۲	۰/۳۳۵
PSO	۲۲/۹۶۴	۷/۷۶۹	۳/۹۶۲	۰/۲۸۴	۰/۳۲۱

نتیجه‌گیری

در عملیات اجرایی ساخت کانال‌ها، با پوشش‌های مختلف می‌توان از روش پیشنهادی مقاله استفاده کرد و از نتایج جداول با مثال پیشنهادی برای کلیه پوشش‌ها استفاده کرد و ابعاد طراحی بهینه را با در نظر گرفتن کلیه تلفات به کار گرفت. در این تحقیق دو سناریو با چندین مدل برای بهینه‌کردن دو نوع

شکل ۷ نمودار ستونی جهت مقایسه تغییرات هزینه بهینه بر اساس تغییرات زیری‌ها می‌باشد همانطور که قابل مشاهده است هزینه هم در جهت افقی و هم در جهت عمودی روند صعودی دارد که نشان‌دهنده افزایش هزینه با افزایش زیری‌ها می‌باشد. طوری که عدد ۱ در محور افقی نشان‌دهنده ضرایب زیری n_1 ، n_2 ، n_3 و n_4 برای ردیف اول جداول و نمودار عمودی هزینه آن‌ها، عدد ۱۰ آخرین حالت ضرایب زیری‌ها (آخرین ردیف) برای کلیه جداول می‌باشد.

صحت‌سنجی

جهت مقایسه و دلیل بر صحت نتایج تحقیق، مثال تعریف شده برای کانال دوزنقه‌ای مرکب (سناریو اول) با ضرایب زیری ثابت n_1 ، n_2 ، n_3 ($0/015$ ، $0/018$ و $0/02$) آنالیز شد که تابع هدف و قید بر اساس مسئله بهینه‌سازی تعریف شده در تحقیق آدارش و رددی به صورت رابطه ۱۵ در نظر گرفته شدند. ایشان بر اساس روش بهینه‌سازی PSO مقطع دوزنقه‌ای مرکب را بهینه‌سازی کردند.

$$C = C_1A_t + C_2P_{1t} + C_3P_{2t} + C_4P_{3t} \quad (15)$$

$$Q - \frac{1}{n_e} AR^{2/3} \sqrt{S_0} = 0 \quad (16)$$

- Dupuis, V., Proust, S., Berni, C., Paquier, A. 2017. Compound channel flow with a longitudinal transition in hydraulic roughness over the floodplains. *Environmental Fluid Mechanics*. 17.5: 903–928.
- Einstein, H.A. 1934. Der hydraulische oder Profilradius [The hydraulic or cross-sectional radius]. *Schweizerische Bauzeitung*. 103.8:89–91 [in German].
- Goldberg, D.E. 1989. *Genetic Algorithms in Search Optimization and Machine Learning*, Addison Wesley Reading Mass 412p.
- Horton, R.E. 1933. Separate roughness coefficients for channel bottom and sides. *Engineering News-Record*. 111-22:652–653.
- Nourani, V., Talatahari, S., Monadjemi, P and Shahradfar, S. 2009. Application of ant colony optimization to optimal design of open channels. *Journal of Hydraulic Research*. 47.5: 656-665.
- Parsaie, A., Najafian, Sh., Yonesi, H.A. 2016. Flow discharge estimation in compound open channel using theoretical approaches. *Water Resource management*. 2:359–367
- Roushangar, K., Alami, M.T., Nourani, V., Nouri, A. 2017. A cost model with several hydraulic constraints for optimizing in practice a trapezoidal cross section. *Journal of Hydroinformatics*. 19.3: 456-468.
- Sahu, M., Khatua, K.K., Mahapatra, S.S. 2011. A neural network approach for prediction of discharge in straight compound open channel flow. *Flow Measurement and Instrumentation*. 22.5:438–446.
- Swamee, P.K., Mishra, G.C. and Chahar, R. 2000. Comprehensive design of minimum cost irrigation canal sections, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE Library*. 126.5: 322-327.
- Unal, B., Mamak, M., Seckin, G and Cobaner, M. 2010. Comparison of an ANN approach with 1-D and 2-D methods for estimating discharge capacity of straight compound channels. *Advances in Engineering Software*. 41: 120-129.
- مقطع کانال مرکب ارایه شده است. در سناریو اول مدل‌ها تابع هدف بر اساس تابع هزینه می‌باشد که در نوع اول یک کانال مرکب با ضرایب زبری مختلف و شیب‌های کناری متفاوت مورد بررسی قرار گرفت که تاثیر تغییرات ضرایب زبری مانینگ در هزینه ساخت مقطع کانال و ابعاد بهینه بررسی شدند که با افزایش زبری هزینه افزایش یافت و محدودیت‌های فرود، سرعت و سطح آزاد کانال بررسی شدند که نسبت به مدل اول علاوه بر تابع قید مانینگ، این روابط به عنوان قید اضافه شدند که نتایج نشان داده شده حاکی از آن است که با اعمال قید روی سرعت و عدد فرود هزینه افزایش می‌یابد و برای عرض سطح آزاد کانال هزینه نسبت به مدل اول (بدون محدودیت اضافی) کاهش یافته است. سناریو دوم، کانال مرکب به صورت کانال اصلی همراه با مقاطع کناری بود که جهت بهینه‌سازی ابعاد کانال و هزینه با ضرایب زبری مختلف قسمت‌های تشکیل‌دهنده کانال در چهار مدل، طراحی انجام شد که با افزایش ضرایب زبری، هزینه کل روند افزایشی داشت. در عملیات اجرایی ساخت کانال‌ها، با پوشش‌های مختلف می‌توان از روش پیشنهادی مقاله استفاده کرد و از نتایج جداول برای مثال تعریف شده برای کلیه پوشش‌ها استفاده کرد و ابعاد طراحی بهینه را که با در نظر گرفتن کلیه هزینه‌های ساخت بدست آمده است، به کار گرفت.

منابع

- Adarsh, S and Janga Reddy, M. 2010. Use of Particle Swarm Optimization for Optimal Design of Composite Channels. *Journal of Intelligent Systems*. In Press, 19.3: 227-248.
- Babaeyan-Koopaei, K., Valentine, E.M and Swales, D.C. 2000. Optimal design of parabolic-bottomed triangle canals, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 126.6: 408–411.
- Bhattacharjya, R.K. 2006. Optimal design of open channel section incorporating critical flow condition. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE Library*. 132.5: 513-518.
- Das, A. 2007. Optimal design of channel having horizontal bottom and parabolic side. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 133.2:192-197.

The optimal Design of Compound Channel Section Considering Changes of Roughness Coefficient and Hydraulic Restrictions

K. Roushangar^{*1}, M. T. Alami², A. Nouri³

Received: Jan.11, 2017

Accepted: Feb.15, 2018

Abstract

Channels are considered as one of the most important system of water transporting for irrigation purposes, drinking water consumption and flood control. Hence optimizing the design of channel structures can reduce the total cost of a channel. The objective function referred to the costs of channel structures. For this end, Manning equation has been used as an equality constraint. The optimization process was applied in various scenarios for two types of compound channel. The first type of trapezoidal channels had different side slopes, roughness coefficients and the second type was the main channel with side sections having different roughness coefficients. The optimizations were performed using genetic algorithm with depth, bottom width and a side slope variable. The influence of Manning roughness coefficients variation on construction costs for the two types of channel were analyzed. It was inferred that by increasing the roughness coefficients, the cost was increased. Several models with additional restrictions of Froude number, velocity of flow and the top width for the first type of channel were investigated. The results indicated that, Restriction of velocity and Froude number caused increasing cross section area and the cost construction.

Keywords: Compound channel ,Cost , Design , Optimization , Roughness coefficient

1- Associate Professor, Department of Civil Engineering, University of Tabriz

2- Professor, Department of Civil Engineering, University of Tabriz

3- Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, University of Tabriz

(* - Corresponding Author Email: kroshangar@yahoo.com)