



طراحی بهینه مقطع کانال روباز با ناهمواری مرکب با روش‌های قطعی و تصادفی

سینا تقی‌زاده

^۱ دانشجوی کارشناسی‌ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ۴۰۰۲۰۹۲۷۹ و sina.taghizadeh123@gmail.com

چکیده

که می‌توانند در نقاط مختلف و شرایط گوناگون خاک با مقاطع عرضی متفاوت طراحی شوند [1].

برای این کانال‌های روباز زمانی می‌توان گفت به سطح مقطع بهینه دست‌یافته‌ایم که هزینه‌های ساخت آن کمینه و میزان انتقال دبی آن بیشینه گردد. لازم به ذکر است که هزینه‌های ساخت برای هر منطقه می‌تواند متفاوت باشد [2]. برای صرفه‌جویی در هزینه‌ها، در کانال‌های ساده می‌توان برای کف و دیواره‌های کانال از مواد مختلفی استفاده نمود. به عنوان مثال برای کاهش تلفات نشست، کف کانال‌ها را می‌توان بتن اندود کرد و بسته به امکانات محلی موجود، دیواره‌ها را می‌توان با خرده‌سنگ‌ها که تهیه‌ی آن‌ها هزینه‌ی بسیار کمتری خواهد داشت، ساخت. در نتیجه‌ی این کار سطح مقطع خیس‌شده با ناهمواری‌های متفاوتی حاصل خواهد گشت [3].

سوامی و همکاران طراحی بهینه کانال با مقاطع مثلثی، مستطیلی و دوزنقه‌ای را با در نظر گرفتن تلفات ناشی از نشست مورد تحلیل قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که مقطع بهینه کانال دوزنقه‌ای دارای مساحت مقطع و تلفات ناشی از نشست کم‌تری نسبت به مقاطع مثلثی و مستطیلی می‌باشد [4]. روش‌نگر و همکاران نیز طراحی بهینه برای مقطع دوزنقه‌ای تحت محدودیت‌های هیدرولیکی، دبی‌های مختلف و شیب‌های هیدرولیکی متفاوت انجام دادند [5].

گو و همکاران فاصله‌ی سطح آزاد آب تا سطح زمین^۱ را به عنوان یک پارامتر عملکردی به مسئله‌ی طراحی بهینه کانال‌های با سطح مقطع دوزنقه‌ای افزودند [2]. فروهلیچ نیز استفاده از عرض قسمت بالای کانال به عنوان یک قید اضافی برای دستیابی به بهترین سطح مقطع دوزنقه‌ای پیشنهاد داد [6]. لوگاناتان طراحی بهینه کانال‌ها با سطح مقطع سهموی را مورد بررسی قرار داد [7].

داس نیز در سال ۲۰۰۰ طراحی بهینه‌ی یک کانال با سطح مقطع دوزنقه‌ای با ناهمواری‌های مرکب را در سه سناریوی مختلف فرمول‌بندی نمود و با کمک روش لاگرانژ این مسئله را با کمک روش‌های عددی حل معادلات غیرخطی حل نمود [8]. ما نیز در این بخش مسئله‌ی فرمول‌بندی شده‌ی ایشان را در هر سه سناریو را با روش‌های مبتنی بر نزول در امتداد گرادیان و الگوریتم ژنتیک حل

ما در این پژوهش پس از بیان مقدماتی پیرامون کارهای قبلی انجام شده؛ به استخراج معادله‌ی جریان یکنواخت برای کانال‌های با ناهمواری مرکب برحسب مقادیر ضرایب زبری دیواره‌های آن پرداختیم. سپس پس از معرفی تابع هزینه‌ی مسئله به نحوی که هزینه‌ی ساخت کانال کمینه گردد؛ به فرمول‌بندی طراحی کانال‌های روباز با مقاطع مرکب در سه سناریوی مختلف پرداختیم. در ادامه با روش‌های الگوریتم ژنتیک و یک الگوریتم مبتنی بر نزول در امتداد گرادیان، یک مسئله‌ی بهینه‌سازی مقید را در سه سناریوی مختلف مورد تحلیل قرار داده و نتایج را با یکدیگر و همچنین با نتایج مقاله‌ی مرجع که همین مسئله را با روش ضرایب لاگرانژ به روش غیر مستقیم تبدیل به دسته‌ای از معادلات غیر خطی کرده و سپس با روش عددی حل کرده بود، مقایسه نمودیم. مشاهده کردیم نتایج حاصل از روش الگوریتم مبتنی بر گرادیان کاملاً منطبق بر نتایج مقله‌ی مذکور گردید و نتایج حاصل از الگوریتم ژنتیک نیز از نظر مقادیر توابع هزینه بسیار نزدیک به دو الگوریتم قبلی شد ولی از نظر متغیرهای طراحی در سناریوی اول مقادیر نسبتاً متفاوتی نسبت به دو الگوریتم دیگر پیشنهاد داد که نشان‌دهنده‌ی توانایی این الگوریتم برای یافتن جواب‌های متنوع و گاهی بهتری می‌باشد.

واژه‌های کلیدی

طراحی بهینه، الگوریتم ژنتیک، الگوریتم‌های مبتنی بر گرادیان، کانال با ناهمواری مرکب

مقدمه

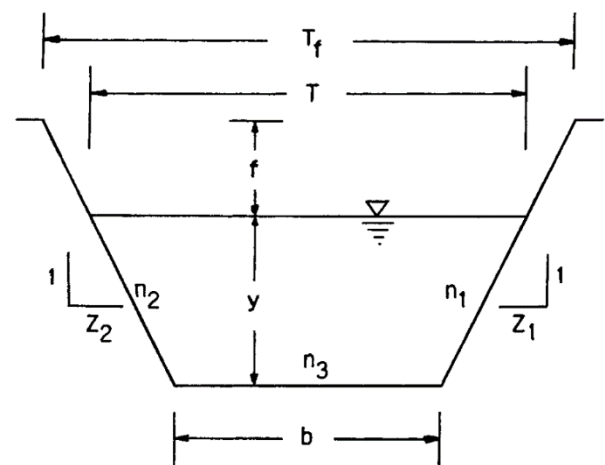
یکی از ضروری‌ترین و حیاتی‌ترین نیازهای بشر آب است که بخصوص با افزایش جمعیت و ضرورت رشد کشاورزی و صنعت از یک طرف و محدودیت مخازن و منابع آبی از طرف دیگر، حساسیت آن روز به روز بیشتر می‌شود. حفاظت از آب باتوجه به محدودیت‌های روزافزون منابع آب و بالا رفتن نیازهای روزمره بشر به آب برای مصارف گوناگون دارای اهمیت فراوانی است. کانال‌های روباز از گذشته، از میان روش‌های مختلفی که برای انتقال آب استفاده می‌شود، بیش‌ترین کاربرد را دارند

^۱ freeboard

خواهیم نمود و نتایج گرفته شده توسط مقاله‌ی مذکور را بار دیگر بازتولید و مورد مقایسه قرار خواهیم داد.

معادله‌ی جریان یکنواخت برای کانال با ناهمواری مرکب

شکل ۱ نامگذاری ابعاد هندسی را برای یک مقطع دوزنقه‌ای شکل نشان می‌دهد. مشاهده می‌کنیم محیط تر شده شامل کف کانال و بخشی از دیواره‌های کناری می‌باشد و بخشی از دیواره‌های کناری ترنشده باقی خواهند ماند. مقادیر ضرایب زبری منینگ^۲ برای دیواره‌های کناری با شیب‌های Z_1 و Z_2 و کف کانال به ترتیب برابر n_1 ، n_2 و n_3 می‌باشد. همچنین عرض جریان در قسمت بالای کانال با T و عرض مقطع بالایی کانال، فارغ از جریان، با T_f نمایش داده شده است [8].



شکل ۱: ابعاد هندسی مقطع دوزنقه‌ای

رابطه‌ی (۱) معادله‌ی جریان یکنواخت منینگ برای مقاطع دوزنقه‌ای با ناهمواری مرکب را نشان می‌دهد.

$$\frac{q}{(s_0)^{0.5}} = \frac{1}{n_e} \cdot \frac{\{b \cdot y + (z_1 + z_2) \cdot y^2 / 2\}^{5/3}}{\{[(z_1^2 + 1)^{0.5} + (z_2^2 + 1)^{0.5}] \cdot y + b\}^{2/3}} \quad (1)$$

که در آن q دبی طراحی و s_0 شیب طولی کف کانال می‌باشد. مشاهده می‌کنیم این رابطه برحسب ضریب زبری معادل یا n_e بیان گردیده است. برای این منظور از فرمول (۲) برای تخمین آن استفاده می‌کنیم [9].

$$n_e = \left\{ \frac{[(z_1^2 + 1)^{0.5} \cdot n_1^{1.5} + (z_2^2 + 1)^{0.5} \cdot n_2^{1.5}] \cdot y + b \cdot n_3^{1.5}}{[(z_1^2 + 1)^{0.5} + (z_2^2 + 1)^{0.5}] \cdot y + b} \right\}^{2/3} \quad (2)$$

با جاگذاری (۲) در (۱) به رابطه‌ی (۳) که معادله‌ی جریان یکنواخت منینگ برحسب ضرایب زبری سطوح است، می‌رسیم [8].

$$\frac{q}{(s_0)^{0.5}} = \frac{\{b \cdot y + (z_1 + z_2) \cdot y^2 / 2\}^{5/3}}{\{[(z_1^2 + 1)^{0.5} \cdot n_1^{3/2} + (z_2^2 + 1)^{0.5} \cdot n_2^{3/2}] \cdot y + b \cdot n_3^{3/2}\}^{2/3}} \quad (3)$$

رابطه‌ی (۳) به عنوان یک قید مساوی برای مسئله‌ی بهینه سازی کانال باید در نظر گرفته شود.

تابع هزینه ساخت کانال

تابع هزینه‌ی این مسئله با در نظر گرفتن فرض‌هایی که در ادامه می‌آیند نوشته شده است:

۱. مجموع کل هزینه‌های ساخت کانال از چهار نوع هزینه مشتق گردیده‌اند که شامل: (۱) هزینه ناشی از مساحت سطح مقطع، (۲) و (۳) هزینه‌ی دو دیواره‌ی کناری کانال (۴) هزینه‌ی کف کانال.

۲. برای دیواره‌های کناری چه بخش ترشده و چه بخش ترنشده، تماماً از یک نوع ماده استفاده شده است.

۳. هر چهار هزینه در واحد طول کانال ثابت هستند ولی بایکدیگر متفاوتند.

با این فرضیات تابع هزینه به شکل رابطه‌ی (۴) در خواهد آمد [8]:

$$CF = c_1 \cdot [b \cdot (y + f) + ((z_1 + z_2) \cdot \frac{(y+f)^2}{2})] + [c_2 \cdot (z_1^2 + 1)^{0.5} + c_3 \cdot (z_2^2 + 1)^{0.5}] \cdot (y + f) + b \cdot c_4 \quad (4)$$

که c_1 هزینه در واحد سطح برای سطح مقطع، c_2 و c_3 هزینه‌ها در واحد طول برای دیواره‌های کناری و c_4 هزینه در واحد طول برای کف کانال می‌باشد.

فرمول‌بندی مسئله طراحی بهینه

همانطور که در بخش مقدمه ذکر شد طراحی بهینه‌ی این مسئله تحت سه سناریوی مختلف مطرح می‌گردد. رابطه‌ی (۵) به عنوان تابع هزینه‌ی این مسئله باید کمینه گردد و رابطه‌ی (۳) تحت عنوان قید تساوی اصلی، همواره باید در این مسئله برقرار باشد.

متغیرهای طراحی ما شامل عمق جریان y ، عرض کف کانال b و شیب‌های دیواره‌های کناری کانال یعنی Z_1 و Z_2 می‌باشند و سایر پارامترها، عملکردی و ورودی مسئله محسوب می‌گردند.^۳

علاوه بر قید اصلی مسئله که در رابطه‌ی (۳) ذکر گردیده است؛ این مسئله تعدادی قید مخفی نیز دارد. همانطور که ناگفته پیداست y و b از نظر فیزیکی نمی‌توانند منفی گردند و منفی شدن مقادیر Z_1 و Z_2 هرچند از نظر فیزیکی مشکلی ایجاد نمی‌کند اما شکل کانال را تغییر داده و مورد نظر ما نیست. بنابراین شرط بزرگتر از صفر بودن برای تمام متغیرهای طراحی باید اعمال گردد.

فرمول‌بندی سه سناریوی پیشنهادی به شرح ادامه می‌باشد:

^۳ مقادیر پارامترهای ورودی و عملکردی مشابه مقاله‌ی مرجع در نظر گرفته شده‌اند و از ذکر مجدد آن‌ها در متن این گزارش صرف نظر کرده‌ایم. همچنین از پیوست‌های الحاقی گزارش این موارد قابل استحصال می‌باشند.

² The Manning roughness coefficient

استفاده خواهیم کرد. لازم به ذکر است که با انجام تنظیمات لازم، نرم افزار قیدها را به صورت یک سری توابع جریمه به تابع هدف خواهد افزود و بدین ترتیب مسئله را به مسئله‌ی بدون قید تبدیل نموده و حل خواهد کرد.

نتایج

برای حل با روش تصادفی الگوریتم ژنتیک، پس از تعریف توابع هدف و قیود در محیط نرم افزار برای هر سه سناریو و اعمال تنظیمات لازم در جعبه ابزار مربوطه^۷ برای حل، نرم افزار تحلیل را انجام می دهد. جدول ۱ نتایج حاصل از حل را به وسیله‌ی الگوریتم ژنتیک نشان می دهد. لازم به ذکر است توابع تعریف شده برای هر سناریو و تنظیمات محیط نرم افزار همگی در کنار گزارش به صورت دسته بندی شده پیوست گردیده اند و جهت خلاصه نمودن گزارش، از ذکر مجدد آن ها در این بخش صرف نظر کرده ایم.

جدول ۱: نتایج حاصل از الگوریتم ژنتیک

متغیرهای طراحی	سناریو ۱	سناریو ۲	سناریو ۳
y(m)	4.190	3.782	4.269
b(m)	5.090	3.779	5.830
z1	0.361	1.000	0.162
z2	0.384	1.000	0.189
تابع هزینه	23.018	24.571	23.002

همچنین مسائل را یکبار دیگر با کمک جعبه ابزار دیگری که مبتنی بر گرادیان می باشد^۸ حل نمودیم که نتایج آن را نیز در جدول ۲ ذکر کرده ایم. مشابه مورد قبل در اینجا نیز فقط به ذکر نتایج نهایی بسنده نموده ایم و جزئیات تنظیمات صورت گرفته و توابع هدف و قیود تعریف شده را جداگانه پیوست نموده ایم.

جدول ۲: نتایج حاصل از الگوریتم مبتنی بر گرادیان

متغیرهای طراحی	سناریو ۱	سناریو ۲	سناریو ۳
y(m)	4.052	3.783	4.261
b(m)	5.826	3.776	5.854
z1	0.247	1.000	0.167
z2	0.265	1.000	0.179
تابع هزینه	22.958	24.571	23.002

۱. در سناریوی اول هیچ قیدی علاوه بر قید تساوی (۳) و بزرگتر از صفر بودن ۴ متغیر طراحی، برای مسئله در نظر گرفته نمی شود. تابع هزینه نیز مطابق رابطه‌ی (۵) می باشد که باید کمینه گردد.

۲. در سناریوی دوم محدودیتی روی شیب های دیواره های کناری Z_1 و Z_2 اعمال می گردد. در عمل این شیب ها به دلیل معیارهای پایداری بایستی مقادیر بزرگ تری از مقدار صفر داشته باشند. به احتمال زیاد، راه حل بهینه برای چنین مواردی راه حلی خواهد بود که در آن این محدودیت های شیب جانبی به عنوان محدودیت های نوع برابری الزام آور برآورده شوند. تحت این شرایط این دو از بردار متغیرهای طراحی حذف گردیده و مقدار به خود خواهند گرفت. در مقاله‌ی [8] برای هر دو شیب مقدار واحد پیشنهاد گردیده است. بدین ترتیب برای این سناریو هدف ما کمینه نمودن تابع هزینه‌ی (۵) مشابه قبل به همراه قید (۳) و منفی نبودن y و b می باشد و در این روابط به جای Z_1 و Z_2 باید مقادیر آن ها با مقدار ۱ جایگزین گردد.

۳. در این سناریو محدودیتی بر روی عرض دهانه‌ی کانال به صورت یک قید تساوی اعمال می گردد. این محدودیت می تواند روی T یا T_f اعمال گردد و محدودیتی است که از محیط ممکن است به مسئله تحمیل گردد. برای T_f این رابطه به صورت رابطه‌ی (۵) می باشد.

$$T_f = b + (z_1 + z_2) \cdot (y + f) \quad (5)$$

اگر در رابطه (۵)، f را برابر صفر جاگذاری کنیم، T_f به T تبدیل شده و می توانیم محدودیت را بر روی عرض دهانه‌ی جریان قرار دهیم. بدین ترتیب فرمول بندی این سناریو کاملاً مشابه سناریوی اول بوده با این تفاوت که قید تساوی (۵) هم در کنار قید رابطه‌ی (۳) باید ارضا گردد.

طراحی بهینه‌ی کانال

مقاله‌ی [8] مسئله‌ی بهینه سازی مقید فوق را، در هر سه سناریو، با روش ضرایب لاگرانژ تبدیل به مسئله‌ی بدون قید نموده بود و سپس با اعمال شرط لازم بهینگی مرتبه اول بر روی تابع لاگرانژ حاصل، به یک دستگاه معادلات غیرخطی رسیده بود و در نهایت با یک الگوریتم تکراری اقدام به تقریب جواب ها کرده بود.

ما در این بخش مسائلی بهینه سازی فوق را با کمک الگوریتم ژنتیک، که در خانواده‌ی الگوریتم های تصادفی^۴ بوده، و همچنین یک الگوریتم مبتنی بر نزول در امتداد گرادیان، که جز روش های قطعی^۵ می باشد، حل خواهیم کرد. برای هر دو روش حل فوق از جعبه ابزارهای آماده‌ی نرم افزار متلب^۶ که برای این منظور طراحی گردیده اند

⁷ ga – genetic algorithm toolbox

⁸ fmincon toolbox

⁴ stochastic

⁵ deterministic

⁶ MATLAB

نتیجه گیری

برای بحث و اظهار نظر بهتر پیرامون نتایج گرفته شده، نتایج حاصل از مقاله ی [8] را نیز در جدول ۳ ذکر کرده ایم تا مقایسه ی نتایج در یک چهارچوب درست تری صورت پذیرد.

جدول ۳: نتایج مقاله ی [8]

متغیرهای طراحی	سناریو ۱	سناریو ۲	سناریو ۳
$y(m)$	4.052	3.783	4.261
$b(m)$	5.826	3.776	5.854
z_1	0.247	1.000	0.167
z_2	0.265	1.000	0.179
تابع هزینه	22.958	24.571	23.002

مشاهده می کنیم نتایج جدول ۲ و جدول ۳ کاملاً منطبق بر یکدیگر، هم در مقادیر توابع هزینه و هم در مقادیر متغیرهای طراحی، می باشند ولی این دو با جدول ۱ هرچند در مقدار تابع هزینه برای حالت های ۲ و ۳ بسیار نزدیک می باشند؛ اما در مقدار متغیرهای طراحی خصوصاً در حالت ۱ تفاوت هایی دارند.

به عنوان نمونه در سناریوی اول حل با الگوریتم ژنتیک از نظر تابع هزینه کمی بیشتر از مقادیر مقله برای این سناریو می باشد اما پیشنهادات دیگری در رابطه با مقادیر متغیرهای طراحی پیش روی ما قرار داده است که ممکن است از جهاتی که ما بررسی نکرده ایم، شرایط بهتری برای ساخت را موجب شود. برای مثال در این مورد خاص از آنجاییکه هرچه شیب های دیواره ها به مقدار ۱ نزدیک تر باشد، سازه ی پایدارتری خواهیم داشت؛ این حل حدود ۸۰ سانتی متر در ضخامت کف کانال صرفه جویی کرده و به سازه ی پایدارتری نیز رسیده است. هرچند هزینه ی آن به سبب افزایش ارتفاع کانال بیشتر شده است.

درواقع از آنجاییکه الگوریتم ژنتیک یک الگوریتم تصادفی برای یافتن بهینه ی کلی^۹ است؛ با اجرای چند باره ی این الگوریتم می توان به جواب های بهینه ی دیگری نیز دست پیدا کرد و در نهایت بهترین آن ها را برگزید. درحالیکه در الگوریتم دیگر که حل با الگوریتم مبتنی بر نزول در امتداد گرادیان بود، با فرض نقطه ی شروع ثابت همواره به یک جواب مشخص می رسیدیم. همچنین اگر مسئله نقاط کمینه ی محلی زیادی داشته باشد و محدب نباشد، این روش ممکن است در اولین نقطه ی کمینه ی محلی^{۱۰} که ببیند متوقف می شود و هیچگاه به کمینه ی کلی دست نخواهد یافت. روش غیرمستقیم لاگرانژ یا حالت تعمیم یافته ی آن نیز هرچند در اینجا ما را به مطلوب خود رسانند، ولیکن بسیار وقت گیر بوده و در مسائلی که تعداد قیود بالاتری به

همراه قیود نامساوی داشته باشند، مشتق گیری دستی و شرایط سوئیچینگ کار را بسیار دشوار و غیر منطقی از نظر حل خواهد نمود.

جمع بندی

ما در این پژوهش پس از بازنویسی فرمول بندی مقاله ی [8] مربوط به طراحی بهینه ی کانال های روباز با مقاطع با ناهمواری مرکب، به بازتولید نتایج آن با روش الگوریتم ژنتیک و همچنین یک الگوریتم مبتنی بر نزول در امتداد گرادیان در هر سه سناریوی مطرح شده پرداختیم. مشاهده نمودیم نتایج حاصل از روش الگوریتم مبتنی بر گرادیان کاملاً منطبق بر نتایج مقاله ی مذکور، که با روش غیر مستقیم لاگرانژ اقدام به حل کرده بود، گردید و نتایج حاصل از الگوریتم تصادفی ژنتیک علاوه بر رسیدن به مقادیر توابع هزینه ی نزدیک به مقادیر مقاله ی مذکور، از نظر مقادیر متغیرهای طراحی در سناریوی اول مقادیر متنوع تری نسبت به دو الگوریتم دیگر حاصل کرد. اما در نهایت با وجود اجرای متعدد الگوریتم با تنظیمات مختلف و یکسان، نظر به تصادفی بودن الگوریتم با تنظیمات یکسان نیز به جواب های متنوع می رسیدیم، علاوه بر رسیدن به بردار متغیرهای طراحی متنوع، بهبودی در مقادیر توابع هزینه ی آن ها حاصل نگشت. بنابراین می توان نتیجه گرفت که مقادیر بدست آمده از مقاله ی [8] هرچند با روش های عددی حل معادلات غیر خطی لاگرانژ بدست آمده بودند و تمام جواب ها را حاصل نکرده بودند؛ با احتمال قریب به یقین همان نتایج بهینه ی کلی مسئله ی مدنظر بوده اند.

تشکر و قدردانی

در انتها از جناب آقای دکتر سعید خدایگان عزیز بابت تدریس بسیار عالی و مفهومی ایشان در طول این ترم تحصیلی مجازی کمال تشکر و قدردانی را دارم. امید که فرصت و امکان جبران باشد.

فهرست علائم

b	عرض کف کانال، m
y	عمق کانال، m
T_f	عرض بخش بالایی سطح مقطع کانال، m
T	عرض بخش بالای جریان، m
f	فاصله ی سطح آزاد آب تا سطح زمین، m
q	دبی طراحی، m^3/s
z_1	شیب دیواره ی سمت راست کانال
z_2	شیب دیواره ی سمت چپ کانال
n	ضریب زبری کانال

مراجع

- [1] K. Roushangar, M. T. Alami and A. Nouri, "The optimal design of compound channel section

¹⁰ local minimum

⁹ global optimum

- [6] D. C. Froehlich, "Width and Depth-Constrained Best Trapezoidal Section," *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 120, no. 4, pp. 828-835, 1994.
- [7] G. V. Loganathan, "Optimal Design of Parabolic Canals," *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 117, no. 5, pp. 716-735, 1991.
- [8] A. Das, "Optimal Channel Cross Section with Composite Roughness," *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 126, no. 1, pp. 68-72, 2000.
- [9] R. E. Horton, "Separate roughness coefficients for channel bottom and sides," *Engrg. News-Record*, vol. 111, no. 22, p. 652-653, 1933.
- considering changes of roughness coefficient and hydraulic restrictions," *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, vol. 12, no. 3, pp. 624-634, 2018.
- [2] C.-Y. Guo and W. C. Hughes, "Optimal Channel Cross Section with Freeboard," *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 110, no. 3, pp. 304-314, 1984.
- [3] V. T. Chow, *Open-channel Hydraulics*, McGraw-Hill, 1959.
- [4] P. K. Swamee, G. C. Mishra and B. R. Chahar, "Comprehensive Design of Minimum Cost Irrigation Canal Sections," *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 126, no. 5, pp. 322-327, 2000.
- [5] K. Roushangar, M. Alami, V. Nourani and A. Nouri, "A cost model with several hydraulic constraints for optimizing in practice a trapezoidal cross section," *Journal of Hydroinformatics*, vol. 19, pp. 456-468, 2017.