مجله پژوهش آب ایران
جلد ۱۴/ شماره ۲/ پیاپی ۳۷/ تابستان ۱۳۹۹ (۶۱-۶۹)

طراحی بهینهٔ مقطع کانال باز ذوزنقه‌ای با در نظر گرفتن ارتفاع آزاد پوشش به‌عنوان یک متغیر طراحی

انیس احمدی[۱*]، علی خوش‌فطرت[۲] و محمد ملکی[۳]

چکیده

در این پژوهش، برای اولین بار در بهینه‌سازی مقطع عرضی کانال‌های باز علاوه بر ارتفاع آزاد کل، ارتفاع آزاد پوشش نیز به‌عنوان یک متغیر طراحی در نظر گرفته شد. هدف نخست کمینه‌سازی هزینه خاک‌برداری و هزینه پوشش کانال بوده و هدف دوم کمینه‌سازی احتمال سرریز از مقطع عرضی آن بود. معادلهٔ مانینگ جریان نیز به‌عنوان قید در نظر گرفته شد. به‌دلیل احتمالی بودن هدف دوم، مدل‌ها در دسته بهینه‌سازی‌های احتمالی قرار گرفتند؛ بنابراین با مشتق‌گیری از معادلهٔ مانینگ نسبت به متغیرهای تصادفی به فرم قطعی و تک‌هدفه تبدیل شدند. نتایج حل مدل‌ها با نرم‌افزار Wolfram Mathematica برای یک مثال عددی نشان داد که در هر دو مدل بهینه‌سازی برای احتمال سرریز کم، هزینه کل بیشتر بوده و با افزایش احتمال سرریز از ۰/۰۲۵ تا ۰/۳، متغیرهای قیمت کل و عرض کف کانال، ارتفاع آزاد کل و ارتفاع آزاد پوشش کاهش پیدا کرد. از سوی دیگر، عمق جریان در کانال و شیب‌های جانبی افزایش یافت. به‌طور کلی در نظر گرفتن ارتفاع آزاد پوشش در کانال باز، مقطع بهینه با هزینهٔ کل کمتری را ایجاد کرد.

واژه‌های کلیدی: احتمال سرریز، تک‌هدفه، خاک‌برداری، غیرخطی، مانینگ.

ارجاع: احمدی ا. خوش‌فطرت ع. و ملکی م. ۱۳۹۹. طراحی بهینهٔ مقطع کانال باز ذوزنقه‌ای با در نظر گرفتن ارتفاع آزاد پوشش به‌عنوان یک متغیر طراحی. مجله پژوهش آب ایران. ۳۷: ۶۱-۶۹.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان).
۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان).
۳- استادیار گروه ریاضی، دانشکده علوم، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان).
* **نویسنده مسئول**: **ahmadi_a.a@yahoo.com**
تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۰۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۵/۳۱

مقدمه

ارتفاع آزاد یک کانال، فاصلهٔ عمودی لبه بالایی کانال تا سطح آب در حالت طراحی است. این فاصله باید به اندازه‌ای باشد که اجازهٔ تغییرات در سطح آب به علت امواج ناشی از باد، وقوع جریان‌های بیش از دبی طراحی و سایر علل را بدهد. در عمل، انتخاب ارتفاع آزاد، اغلب یک موضوع نیازمند داوری است یا به‌عنوان بخشی از استانداردهای طراحی متداول تصریح می‌شود. به توصیهٔ دفتر احیای اراضی ایالات متحده آمریکا (*USBR*) برای برآوردهای اولیه، ارتفاع آزاد کانال پوشش نشده به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$F=\sqrt{Cy} \qquad (۱)$$

که در آن، F ارتفاع آزاد کل، y عمق جریان و C یک ضریب است (عثمان آکان، ۲۰۰۶؛ چاو، ۱۹۵۹). در جدول ۱ ارتفاع آزاد نرمال بر اساس منابع هندوستان داده شده است (بیرامی، ۱۳۷۶).

جدول ۱- مقادیر ارتفاع آزاد نرمال مطابق استانداردهای هندوستان

دبی برحسب مترمکعب بر ثانیه	>۰/۱۵	۰/۱۵ تا ۰/۷۵	۰/۷۵ تا ۱/۵	۱/۵ تا ۹	<۹
ارتفاع آزاد کل برحسب متر	۰/۳۰	۰/۴۵	۰/۶۰	۰/۷۵	۰/۹۰

برای کانال‌های پوشش شده، منحنی‌های نشان داده شده در شکل ۱ می‌تواند برای تخمین ارتفاع خاکریز بالای سطح آب و ارتفاع پوشش شده بالای سطح آب استفاده شود. این نتایج توصیه‌های دفتر احیای اراضی ایالات متحده و مشابه شکل ارائه شده توسط چاو (۱۹۵۹) است (عثمان آکان، ۲۰۰۶).

در شکل ۲، ارتفاع آزاد نرمال و ارتفاع آزاد مربوط به پوشش سخت بر اساس استانداردهای ادارهٔ احیای اراضی ایالات متحده آمریکا و (*DSI*) (در ترکیه) دیده می‌شود.

فاصلهٔ عمودی سطح آزاد آب تا بالای خاکریز کانال برای دبی طرح به‌عنوان ارتفاع آزاد نرمال (P_1) و فاصلهٔ سطح آزاد آب تا سطح بالای پوشش (برای کانال‌های بزرگ) به‌عنوان ارتفاع آزاد پوشش (P_2) در نظر گرفته می‌شود (بیرامی، ۱۳۷۶). در حالت کلی مسألهٔ بهینه‌سازی چندهدفه می‌تواند به شکل زیر تعریف شود (چیانگ، ۲۰۰۹):

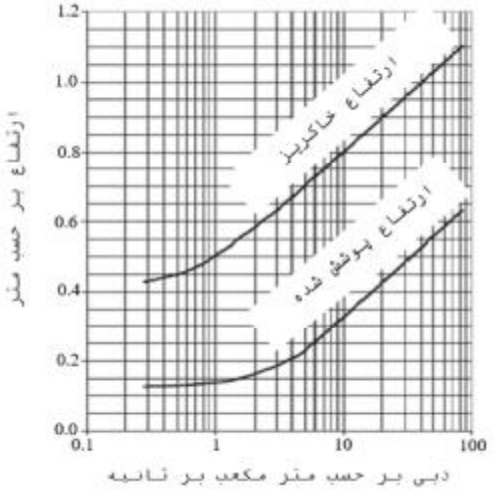
$$\begin{aligned} &Min\ \vec{f} \\ &= \{f_1(\vec{x}), f_2(\vec{x}), \dots, f_n(\vec{x})\} \\ &x^{\rightarrow} \in R^n \end{aligned} \qquad (۲)$$

$$\begin{aligned} &s.t. \\ &g(x) \le 0, h(x) = 0 \end{aligned} \qquad (۳)$$

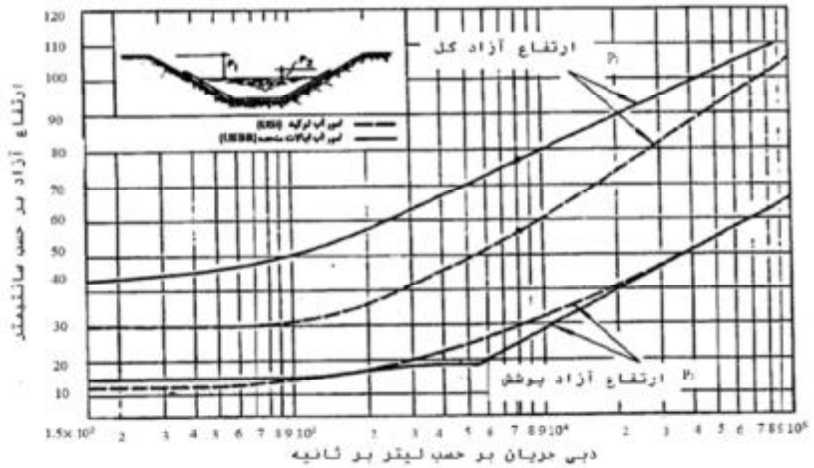
که $\vec{x}$ بردار متغیرهای تصمیم‌گیری و محدود به فضای تصمیم‌گیری Ω است، به گونه‌ای که $\vec{f}$ مجموعه‌ای از اهداف است که باید کمینه شود. توابع $\vec{h}$ و $\vec{g}$ بیان‌کنندهٔ مجموعه‌ای از قیدهای تساوی و ناتساوی‌اند که ناحیه‌های امکان‌پذیر از فضای جواب n بعدی گسسته یا پیوستهٔ ممکن را تعریف می‌کنند. در بهینه‌سازی تک‌هدفه، مجموعهٔ امکان‌پذیر به‌طور کامل بر اساس تابع هدف تعیین و برای هر مجموعهٔ جواب داده شده، بهترین جواب بر اساس مقدار تابع هدف مشخص می‌شود؛ بنابراین هدف یافتن پاسخی است که تابع هدف را کمینه یا بیشینه کند؛ در حالی که در بهینه‌سازی چندهدفه که هدف‌های زیادی دارد، مرتب‌کردن مجموعهٔ جواب بسیار پیچیده می‌شود. در مسائل چندهدفه، تنها یک پاسخ وجود ندارد، بلکه مجموعه‌ای از جواب‌ها به دست می‌آید (کوئلو، ۲۰۰۶). از متداول‌ترین رویکردهای حل مسائل احتمالی چندهدفه، برنامه‌ریزی مقید شده تصادفی است. بر اساس این رویکرد، یک مدل معادل قطعی و تک‌هدفه برای مسأله احتمالی چندهدفه ارائه می‌شود (اختیاری، ۱۳۸۸). گیو و هیوز (۱۹۸۴) مقطع بهینهٔ کانال را برای اولین بار با در نظر گرفتن ارتفاع آزاد کل به‌عنوان یک پارامتر ورودی به دست آورده‌اند. آنان با استفاده از تکنیک مشتق‌گیری، روشی تحلیلی برای تعیین ابعاد یک کانال باز ذوزنقه‌ای (برای کاهش مقاومت اصطکاکی و یا کاهش قیمت سازهٔ کانال) ارائه کرده‌اند. داس (۲۰۰۰) با روش ضرایب لاگرانژ مطالعات خود را روی بهینه‌سازی هزینهٔ ساخت کانال معطوف کرده است. وی الگوریتمی برای محاسبهٔ پارامترهای هندسی کانال ذوزنقه‌ای مرکب دارای ارتفاع آزاد کل ارائه کرده و به این ترتیب کانالی با کمترین هزینه ساخت به دست آمده است. باتاچرجیا (۲۰۰۵) یک مدل بهینه‌سازی غیرخطی را شامل ارتفاع آزاد کل به‌عنوان یک محدودیت اضافی برای طراحی بهینهٔ مقطع عرضی کانال باز ذوزنقه‌ای با زبری مرکب ارائه داده است. ارتفاع آزاد کل بر اساس تغییر در انرژی مخصوص کانال باز محاسبه شد و

یک ضریب اطمینان برای سایر علل مؤثر در ارتفاع آزاد کل افزوده شده است. این مدل با استفاده از برنامهٔ متلب حل شده است. او همچنین جدولی برای ارائهٔ ابعاد بهینهٔ کانال برای مقادیر مختلف ارتفاع آزاد کل و نیز جدولی برای تغییرات انرژی مخصوص به ازاء تغییرات ضریب اطمینان ارائه کرده و سپس نتایج مدل به کاربرده شده در تحقیق خود را با نتایج به دست آمده از مدل‌های پیشین که توسط محققین برای یک ارتفاع آزاد کل ثابت به دست آمده بود، مقایسه کرد. نتایج مقایسات، ظرفیت کاربرد مدل توسعه یافته را نشان داده است. داس (۲۰۰۷) یک مدل بهینه‌سازی با دو تابع هدف به حداقل‌رسانی قیمت کل کانال ذوزنقه‌ای و به حداقل‌رسانی احتمال سرریز شدن را به شرط این‌که معادله جریان یکنواخت به‌عنوان محدودیت در نظر گرفته شود، ارائه کرده است. وی در مدل خود ارتفاع آزاد کل را ثابت در نظر گرفت و با استفاده از تئوری لاگرانژ به این نتیجه رسید که برای احتمالات کم سرریز شدن باید عمق جریان در کانال کمتر و عرض کف بزرگ‌تر شود. همچنین با کاهش احتمال سرریز شدن قیمت کل افزایش می‌یابد. آنالیزهای مربوط به کانال‌های با زبری مرکب و یکنواخت توانایی و کارایی مدل را ثابت کرده است. باتاچرجیا و ساتیش (۲۰۰۸) مدلی ارائه کردند که مدل داس در سال (۲۰۰۷) را توسعه می‌داد و طراحی مقطع عرضی کانال باز ذوزنقه‌ای بر اساس احتمالات سرریز شدن و با استفاده از ارتفاع آزاد کل به‌عنوان یک متغیر طراحی اضافی انجام شد. هدف این مدل همانند مدل داس (۲۰۰۷) کاهش هزینهٔ ساخت و ساز کانال و نیز کاهش احتمال سرریز شدن بود. این مدل با استفاده از تکنیک بهینه‌سازی کلاسیک و همچنین با الگوریتم ژنتیک جدیدی حل شد. آنان به این نتیجه رسیدند که برخلاف مدل داس (۲۰۰۷) که برای احتمال پایین سرریز شدن، لازم بود عرض بالایی کانال بسیار بزرگ باشد، این مدل با وجود عرض بالایی کم در کانال و کاهش قیمت کل ساخت و ساز باز هم امکان استفاده داشت. همچنین نتایج نشان داد که الگوریتم ژنتیک به‌کار رفته برای حل مدل بهینه‌سازی مذکور در مقایسه با روش بهینه‌سازی کلاسیک می‌تواند به‌طور کارآمدی استفاده شود. مظفر و همکاران (۲۰۱۱) مقطع بهینهٔ کانال ذوزنقه‌ای گردگوشه را به ازاء یک دبی معین، با به حداقل‌رسانی مساحت کل سازه شامل مساحت جریان و مساحت مربوط به ارتفاع آزاد کل بالای سطح آب به دست آوردند. طبق استاندارد ادارهٔ احیای اراضی ایالات متحده آمریکا (USBR) و همچنین استاندارد هندوستان ارتفاع آزاد کل وابسته به دبی و بنا به استاندارد ادارهٔ احیای اراضی ایالات متحده آمریکا، ارتفاع آزاد کل وابسته به عمق جریان در نظر گرفته شد. روش به کار برده شده، تکنیک مشتق‌گیری بود و محاسبات بر اساس آزمون و خطای عددی انجام شد. آنان دریافتند که ارتفاع آزاد کل وابسته به دبی مقطع بهینه باریک‌تر است و نسبت عرض به عمق کمتری را ایجاد می‌کند و ارتفاع آزاد کل وابسته به عمق، مقطعی پهن‌تر با نسبت عرض به عمق بیشتر را نتیجه می‌دهد. مظفر و همکاران (۲۰۱۲) به این علت که معتقد بودند حل تابع هدف غیرخطی در به حداقل‌رسانی قیمت طراحی کانال ذوزنقه‌ای گردگوشه دارای ارتفاع آزاد کل وابسته به دبی یا وابسته به عمق، شامل به حداقل‌رسانی مجموع هزینه‌های خاک‌برداری و پوشش در شرایط جریان یکنواخت، به لحاظ تحلیلی مشکل است، با روش گام به گام و با استفاده از تکنیک مشتق‌گیری، معادله‌ای برای قیمت کل در واحد طول کانال به دست آوردند. نتایج نشان داد در حالتی که ارتفاع آزاد کل وابسته به دبی، استفاده شود، مقطع حاصل شده باریک‌تر و با نسبت عرض به عمق کمتری بود و در صورت به کارگیری ارتفاع آزاد کل وابسته به عمق جریان، مقطعی پهن‌تر با نسبت عرض به عمق بیشتر ایجاد شد. عروجی و همکاران (۲۰۱۶)، برای بهینه‌سازی پارامترهای کانال‌های باز، از الگوریتم جهش قورباغه استفاده و نتایج آن را با سایر الگوریتم‌های فراابتکاری مقایسه کردند. نتایج به وضوح نشان‌دهندهٔ کارایی الگوریتم جهش قورباغه در بهینه‌سازی طراحی کانال برای افزایش سودآوری بوده است. با مرور پژوهش‌های انجام شده در زمینهٔ بهینه‌سازی غیرخطی مقطع کانال، می‌توان دریافت که تاکنون ارتفاع آزاد پوشش در مدل‌های بهینه‌سازی در نظر گرفته نشده است. بغلانی و زندی (۱۳۹۵) برای طراحی بهینه ابعاد کانال‌ها، از الگوریتم بید- شعله استفاده کردند. متغیرهای ورودی، ابعاد کانال شامل عرض کف کانال، عمق کانال و شیب‌های جانبی آن در نظر گرفته شده است. همچنین تابع هدف، تابع هزینه ساخت کانال در واحد طول آن است. مسأله با دو فرمول ضریب زبری مختلف مدل‌سازی و بهینه‌سازی شده است. در انتها نتایج با برخی از

الگوریتم‌های فراابتکاری پیشین مانند الگوریتم ژنتیک، الگوریتم کلونی مورچگان و الگوریتم جست‌وجوی ذرات باردار مقایسه شده است. هان و همکاران (۲۰۱۷) مقطع بهینه ذوزنقه‌ای و پارامترهای آن را در شرایطی که لایهٔ یخ‌زده در سطح آب وجود داشته باشد، ارائه کرده و با استفاده از روش بهینه‌سازی لاگرانژ به فرمول‌هایی برای ابعاد مقطع هیدرولیکی بهینه ذوزنقه‌ای دست یافته‌اند. این نتایج نشان داده است که مقطع هیدرولیکی بهینه در شرایط زیر لایهٔ یخ متفاوت از شرایط بدون وجود یخ است. نسبت بهینهٔ عرض به عمق، نه تنها به شیب جانبی بلکه به ضریب زبری پوشش یخی و شیب کانال (کف و جداره‌ها) بستگی دارد. نسبت زبری کف (یا زبری پوشش یخ) به زبری‌های مرکب، از پارامترهای مهم در تعیین شکل مقطع هیدرولیکی بهینه در شرایط زیر پوشش یخی نسبتاً باریک و عمیق بوده‌اند که این موضوع به کاهش افت گرما در سطح آب کمک کرده است. در این پژوهش، ضمن توسعهٔ مدل بهینه‌سازی داس (۲۰۰۷) و باتاچرجیا (۲۰۰۸) و در نظر گرفتن ارتفاع آزاد پوشش به‌عنوان یک متغیر طراحی، به مقایسهٔ نتایج حاصل از حل مدل بهینه‌سازی بدون ارتفاع آزاد پوشش با نتایج مدل دارای ارتفاع آزاد پوشش پرداخته و مدل مذکور با استفاده از نرم‌افزار Wolfram Mathematica حل شده است.



شکل ۱- ارتفاع‌های پوشش شده و خاکریز بالای سطح آب پیشنهاد شده؛ عثمان آکان (۲۰۰۶)

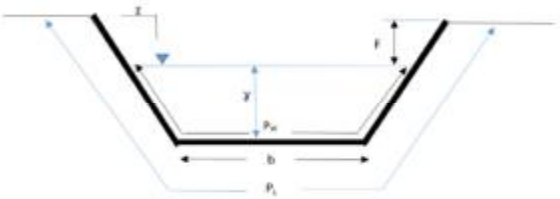


شکل ۲- ارتفاع آزاد نرمال (P_1) و ارتفاع آزاد پوشش سخت (P_2) در کانال‌ها بر اساس استانداردهای آمریکا و ترکیه (عثمان آکان، ۲۰۰۶)

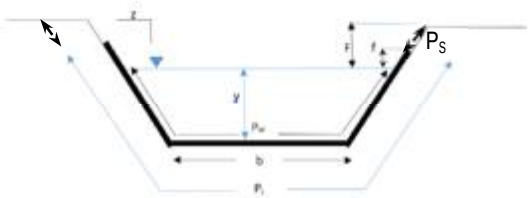
مواد و روش

فرمول‌بندی مدل

در شکل ۳ مشخصات هندسی مقطع عرضی کانال دارای ارتفاع آزاد کل و در شکل ۴ مشخصات هندسی مربوط به مقطع عرضی کانال دارای ارتفاع آزاد کل و ارتفاع آزاد پوشش مشخص شده است.



شکل ۳- مقطع عرضی کانال دارای ارتفاع آزاد کل



شکل ۴- مقطع عرضی کانال دارای ارتفاع آزاد کل و ارتفاع آزاد پوشش

در این شکل‌ها، b عرض کف کانال، z شیب جانبی، y عمق جریان، P_W محیط مرطوب و P_L محیط پوشش شده، P_S محیط پوشش نشده، F ارتفاع آزاد کل و f ارتفاع آزاد پوشش، مشخص شده‌اند. با توجه به اهمیت دستیابی به کمینه، مقدار هزینهٔ مربوط به مساحت خاک‌برداری شده در واحد سطح و محیط پوششی در واحد طول مقطع عرضی، در مدل‌های بهینه‌سازی مورد نظر، تابع هدف اول به صورت تابع هزینهٔ در نظر گرفته شده است. با توجه به فرضیات ذکر شده، دبی، ضریب زبری مانینگ و شیب طولی کف کانال، متغیرهای تصادفی بوده‌اند؛ به این علت که در واقعیت، مقدار دبی ممکن است به علت جریان‌های ورودی احتمالی و عوامل دیگر با دبی طراحی متفاوت باشد. همچنین مقادیر ضریب زبری مانینگ ممکن است به علت نقایص در ساخت با مقادیر طراحی تفاوت داشته باشد. شیب کف حاصل شده نیز ممکن است با مقادیر طراحی به‌دلیل خطاهای ساخت متفاوت باشد. این اختلافات می‌توانند موجب سرریز احتمالی از کانال‌های ساخته شده شود. برای برقراری محدودیت، برای اختلافات مذکور، یک محدودیت احتمال سرریز به مدل طراحی بهینه اضافه شده است تا در یک مقطع عرضی کانال باز، سرریز جریان به حداقل برسد؛ بنابراین به غیر از کمینه‌سازی تابع هزینه، به حداقل‌رسانی احتمال سرریز نیز به‌عنوان یک هدف مورد توجه قرار گرفته و قید مدل نیز معادلهٔ مانینگ جریان یکنواخت در نظر گرفته شده است. در حالتی که ارتفاع آزاد پوشش در نظر گرفته نشود، داریم (معادلات (۴) تا (۶)):

کمینه‌سازی:

$$J_1=C_1A_t+C_2P_L \qquad (۴)$$

کمینه‌سازی:

$$J_2= p(y > y + F) \qquad (۵)$$

به شزطی که:

$$\frac{Q}{\sqrt{S_0}}-\frac{A^{\frac{5}{3}}}{(n_1^{\frac{3}{2}}P_W)^{\frac{2}{3}}}=0 \qquad (۶)$$

که در آن A مساحت جریان و A_t مساحت کل مقطع خاک‌برداری شده، P_L و P_W به ترتیب محیط پوشش شده و محیط مرطوب است. C_1 هزینهٔ واحد حجم خاک‌برداری، C_2 هزینهٔ واحد سطح پوشش است و n_1 ضریب مانینگ برای قسمت پوششی است. y عمق جریان، F ارتفاع آزاد کل و $P(y> y + F)$ احتمال بیشتر شدن عمق جریان از ارتفاع آزاد کل است. Q دبی طراحی (m^3/s)، A سطح مقطع جریان (m^2)، S_0 شیب طولی کف کانال (بی‌بعد) است. به‌دلیل احتمالی بودن تابع هدف دوم، مدل مدنظر در دسته مدل‌های بهینه‌سازی تصادفی قرار می‌گیرد و این یک مسأله بهینه‌سازی دوهدفه برداری است. برای به‌دست آوردن پاسخ‌های مسأله بهینه‌سازی دوهدفه از روش مقید شدهٔ برنامه‌ریزی چندهدفه استفاده شده است که بهینه‌سازی برداری را به یک نوع عددی تبدیل می‌کند. این تبدیل از فرم برداری به عددی با مربوط دانستن هدف اول یعنی به حداقل‌رسانی هزینهٔ کل کانال به‌عنوان تنها هدف در این مسأله و هدف دوم که به دنبال به حداقل‌رسانی احتمال سرریز است، به‌عنوان یک محدودیت اضافه در فرم مقید هدف در نظر گرفته شده است (روش پیشنهادی داس، ۲۰۰۷). در نتیجه مدل حاصل، فرم عددی و قطعی مدل برداری و تصادفی پیشین است (معادلات (۶) تا (۸)):

کمینه‌سازی:

$$J_1=C_1A_t+C_2P_L \qquad (۶)$$

به شرطی که:

$$C_1=\frac{Q}{\sqrt{S_0}}-\frac{A^{\frac{5}{3}}}{(n_1^{\frac{3}{2}}P_W)^{\frac{2}{3}}}=0 \qquad (۷)$$

$$C_2=\frac{5}{A}\times\frac{dA}{dy}-\frac{2}{(n_1^{\frac{3}{2}}P_L)}\times\frac{d(n_1^{\frac{3}{2}}P_L)}{dy}- \qquad (۸)$$

$$\frac{3}{S_y}\left[\frac{S_Q^2}{Q^2}+\frac{(n_1P_L^2S^2n_1)}{(n_1^{\frac{3}{2}}P_L)}+\frac{S_{S_0}^2}{4\times S_0^2}\right]^{\frac{1}{2}}=0$$

در مدل فوق S_{n_1}، S_S و S_Q به ترتیب واریانس‌های ضریب زبری مانینگ، شیب طولی کف و دبی هستند. اگر ارتفاع آزاد پوشش در مدل در نظر گرفته شود، داریم:

کمینه‌سازی:

$$J_1=C_1A_t+C_2P_L \quad (۹)$$

به شرطی که:

$$\frac{Q}{\sqrt{S_0}}-\frac{A^{\frac{5}{3}}}{(n_1^{\frac{3}{2}}P_W)^{\frac{2}{3}}}=0 \quad (۱۰)$$

$$\frac{5}{A}\times\frac{dA}{dy}-\frac{2}{(n_1^{\frac{3}{2}}P_L+n_2^{\frac{3}{2}}P_S)}\times\frac{d(n_1^{\frac{3}{2}}P_L+n_2^{\frac{3}{2}}P_S)}{dy}-\frac{3}{S_y}\left[\frac{S_Q^2}{Q^2}+\frac{(n_1P_L^2S^2n_1+n_2P_S^2S^2n_2)}{(n_1^{\frac{3}{2}}P_L+n_2^{\frac{3}{2}}P_S)}+\frac{S_{S_0}^2}{4\times S_0^2}\right]^{\frac{1}{2}}=0 \quad (۱۱)$$

در مدل فوق P_S محیط قسمت پوشش نشده، n_2 ضریب مانینگ مربوط به قسمت پوشش نشده و S_{n_2} واریانس ضریب زبری مانینگ در قسمت پوشش نشده است.

مثال عددی

با توجه به مقطع عرضی کانال ذوزنقه‌ای شکل‌های ۳ و ۴، طراحی بهینهٔ مقطعی که دبی طرح معادل ۱۰ مترمکعب بر ثانیه را عبور دهد، در نظر است؛ به گونه‌ای که در آن هر دو هدف هزینه و احتمال سرریز به حداقل برسد (احتمال سرریز از ۰/۰۲۵ تا ۰/۳ با گام ۰/۰۲۵ در نظر گرفته شود). مقادیر پارامترهای ورودی، C1، C2 به ترتیب ۰/۴، ۰/۳ هزار ریال/مترمکعب، ۰/۳ هزار ریال/متر مربع و n1 و n2 به ترتیب ۰/۰۱۴ و ۰/۰۲۵ و S0 شیب طولی کف کانال برابر با ۰/۰۰۲۵ در نظر گرفته شده‌اند. مقادیر پارامترهای ورودی به صورت تصادفی و با احتمال‌های ۳۰ و ۲۰ درصد افزایش، به n1 و n2 به ترتیب ۰/۰۱۵۴ و ۰/۰۳، شیب طولی کف کانال ۰/۰۰۲۸ و دبی ۱۲ مترمکعب بر ثانیه تغییر یافته‌اند. برای به دست آوردن مقادیر واریانس‌های دبی، ضرایب زبری مانینگ و شیب طولی کف، با توجه به مقادیر احتمالات، $F_Z(Z)=1-F_Z(Z)$ محاسبه می‌شود، سپس برای تابع توزیع احتمالی نرمال استاندارد از جدول توزیع نرمال استاندارد چاو (۱۹۸۸) مقدار متغیر نرمال استاندارد حاصل شده و به این ترتیب مقادیر واریانس متغیرهای تصادفی به دست آمده است:

$S_{n_1}=0.0027;\ S_{S_0}=0.00057;\ S_Q=5.1894$

بر اساس اطلاعات داده شده و با توجه به مساحت مقطع خاک‌برداری شده و محیط‌های قسمت‌های پوشش شده و پوشش نشده، مدل بدون ارتفاع آزاد پوشش به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

کمینه‌سازی:

$$J_1=0.4[b(y+F)+z(y+F)^2]+0.3[b+2(y+F)\sqrt{(1+z^2)}] \quad (۱۲)$$

به شرطی که:

$$\frac{10}{\sqrt{0.0025}}-\frac{(by+zy^2)^{\frac{5}{3}}}{0.014\times(b+2y\sqrt{(1+z^2)})^{\frac{2}{3}}}=0 \quad (۱۳)$$

$$C_2=\frac{5}{(by+zy^2)}\times(b+2zy)-\frac{2}{0.014^{\frac{3}{2}}(b+2(y+F)\sqrt{(1+z^2)})}\times 0.014^{\frac{3}{2}}\times 2\sqrt{(1+z^2)})-\frac{3}{S_y}\left[\frac{5.1894^2}{10^2}+\frac{(0.014\times(b+2(y+F)\sqrt{(1+z^2)})^2\times(0.0027)^2)}{0.014^{\frac{3}{2}}(b+2(y+F)\sqrt{(1+z^2)})}+\frac{0.00057^2}{4(0.0025)^2}\right]^{\frac{1}{2}}=0 \quad (۱۴)$$

اما برای محاسبهٔ واریانس عمق جریان، مقادیری برای احتمال سرریز فرض شده است. مقادیر فرضی با توجه به حدود ۰/۰۲۵ تا ۰/۳ با گام ۰/۰۲۵ در نظر گرفت، سپس برای تابع احتمال توزیع نرمال استاندارد $F_Z(Z)$ از جدول احتمال تجمعی توزیع نرمال استاندارد چاو (۱۹۸۸) یک مقدار Z بدست آمده و مقدار S_y با استفاده از معادله زیر محاسبه شده است:

برای فرض اول احتمال سرریز داریم:

$$S_y=\frac{y-(y+F)}{Z}=\frac{F}{Z} \quad (۱۵)$$

$$p(y>y+F)=0.025 \quad (۱۶)$$

$$p(y>y+F)=1-F_z(z)_y=0.975 \quad (۱۷)$$

$$Z=1.9601 \quad (۱۸)$$

$$S_y=\frac{F}{1.9601} \quad (۱۹)$$

معادلهٔ (۱۹) در مدل جای‌گذاری و با استفاده از نرم‌افزار Wolfram Mathematica (نسخه یازده) حل شده است. همچنین برای مدل دارای ارتفاع آزاد پوشش و با توجه به $S_{n_2}=0.0594$ و این‌که محیط پوششی متفاوت با حالت قبل است، به تبع آن تابع هدف نیز تغییر می‌کند و در قید سرریز ضریب زبری پوشش نشده یا n_2 نیز دخیل می‌شود، مدل به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

به شرطی که:

$$J_1 = \\ ]+0.3[b+2(y+f)\sqrt{(1+z^2)}]^{\gamma}0.4[b(y+F)+z(y+F) \quad (۲۰)$$

$$\frac{10}{\sqrt{0.0025}} - \frac{(by+zy^2)^{\frac{5}{3}}}{0.014\times(b+2y\sqrt{(1+z^2)}^{\frac{2}{3}}} = 0 \quad (۲۱)$$

$$\frac{5}{by+zy^2}\times(b+2zy) - \frac{2}{(0.014^{\frac{3}{2}}(b+2y\sqrt{(1+z^2)})+0.025^{\frac{3}{2}}(2(F-f)\sqrt{(1+z^2)}))}\times 0.014^{\frac{3}{2}}\times 2\sqrt{(1+z^2)}) - \\ \frac{3}{S_y}\left[\frac{5.1894^2}{10^2} + \frac{(0.014\times\left(b+2(y+f)\sqrt{1+z^2}\right)^2\times\left(\frac{0}{0027}\right)^2)+(0.025\times(2(F-f)\sqrt{1+z^2})^2\times(0.0594)^2))}{(0.014^{\frac{3}{2}}(b+2y\sqrt{(1+z^2)})+0.025^{\frac{3}{2}}(2(F-f)\sqrt{(1+z^2)}))} + \frac{0.00057^2}{4\times(0.0025)^2}\right]^{\frac{1}{2}} = 0 \quad (۲۲)$$

برای به دست آوردن مقادیر S_y مانند حالت قبل عمل می‌شود.

نتایج و بحث

در جدول ۲ نتایج حاصل از حل مدل بدون ارتفاع آزاد پوشش نشان داده شده است.

با توجه به جدول فوق می‌توان دریافت که با افزایش احتمال سرریز در کانال قیمت کل، عرض کف و ارتفاع آزاد کل کاهش داشته و عمق جریان و شیب جانبی در کانال افزایش پیدا کرده است. در جدول ۳ نتایج مربوط به حل مدل دارای ارتفاع آزاد پوشش نشان داده شده است.

جدول ۲- نتایج مربوط به مدل (بدون ارتفاع آزاد پوشش)

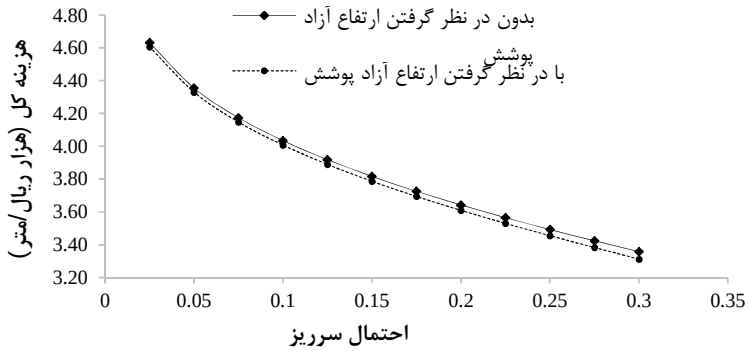
P	C	b	y	z	F
۰/۰۲۵	۴/۶۳	۲/۶۲	۱/۱۶	۰/۴۰	۰/۷۷
۰/۰۵	۴/۳۶	۲/۴۴	۱/۱۹	۰/۴۴	۰/۶۶
۰/۰۷۵	۴/۱۷	۲/۳۳	۱/۲۲	۰/۴۷	۰/۵۸
۰/۱	۴/۰۳	۲/۲۴	۱/۲۴	۰/۴۹	۰/۵۲
۰/۱۲۵	۳/۹۲	۲/۱۷	۱/۲۶	۰/۵۰	۰/۴۷
۰/۱۵	۳/۸۲	۲/۱۱	۱/۲۷	۰/۵۱	۰/۴۳
۰/۱۷۵	۳/۷۳	۲/۰۵	۱/۲۹	۰/۵۳	۰/۳۹
۰/۲	۳/۶۴	۲/۰۱	۱/۳۰	۰/۵۳	۰/۳۵
۰/۲۲۵	۳/۵۶	۱/۹۶	۱/۳۱	۰/۵۴	۰/۳۲
۰/۲۵	۳/۴۹	۱/۹۳	۱/۳۳	۰/۵۵	۰/۲۹
۰/۲۷۵	۳/۴۲	۱/۸۹	۱/۳۴	۰/۵۵	۰/۲۶
۰/۳	۳/۳۶	۱/۸۶	۱/۳۵	۰/۵۶	۰/۲۲

جدول ۳- نتایج مربوط به مدل (دارای ارتفاع آزاد پوشش)

P	C	b	y	z	F	f
۰/۰۲۵	۴/۶۱	۲/۶۲	۱/۱۶	۰/۳۹	۰/۷۷	۰/۷۱
۰/۰۵	۴/۳۳	۲/۴۴	۱/۱۹	۰/۴۴	۰/۶۶	۰/۶۰
۰/۰۷۵	۴/۱۵	۲/۳۳	۱/۲۲	۰/۴۷	۰/۵۹	۰/۵۲
۰/۱	۴/۰۱	۲/۲۴	۱/۲۴	۰/۴۹	۰/۵۳	۰/۴۶
۰/۱۲۵	۳/۸۹	۲/۱۷	۱/۲۶	۰/۵۰	۰/۴۸	۰/۴۱
۰/۱۵	۳/۷۹	۲/۱۱	۱/۲۷	۰/۵۱	۰/۴۴	۰/۳۶
۰/۱۷۵	۳/۶۹	۲/۰۶	۱/۲۹	۰/۵۲	۰/۴۰	۰/۳۲
۰/۲	۳/۶۱	۲/۰۲	۱/۳۰	۰/۵۳	۰/۳۶	۰/۲۸
۰/۲۲۵	۳/۵۳	۱/۹۷	۱/۳۱	۰/۵۴	۰/۳۳	۰/۲۴
۰/۲۵	۳/۴۵	۱/۹۴	۱/۳۲	۰/۵۵	۰/۳۰	۰/۲۰
۰/۲۷۵	۳/۳۸	۱/۹۰	۱/۳۳	۰/۵۵	۰/۲۷	۰/۱۶
۰/۳	۳/۳۱	۱/۸۷	۱/۳۴	۰/۵۶	۰/۲۵	۰/۱۱

همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش احتمال سرریز قیمت کل، عرض کف، ارتفاع آزاد کل و ارتفاع آزاد پوشش کاهش یافته‌اند و عمق جریان و شیب جانبی کانال افزایش داشته است. قیمت کل مدل در حالت بدون ارتفاع آزاد پوشش و دارای ارتفاع آزاد پوشش در شکل ۵ به ازای احتمالات سرریز متفاوت نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۵ می‌توان دریافت که با در نظر گرفتن ارتفاع آزاد پوشش در مدل بهینه‌سازی قیمت کل (یا تابع هدف مدل) در مقایسه با حالتی که این ارتفاع در نظر گرفته نشده، کمتر است.



شکل ۵- مقایسهٔ نتایج حاصل از حل مدل بدون در نظر گرفتن ارتفاع آزاد پوشش و مدل دارای ارتفاع آزاد پوشش

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج این پژوهش، در هر دو مدل به ازای احتمال سرریز کم، قیمت ساخت کانال بیشتر شده است. همچنین برای مقادیر کم احتمال سرریز، لازم است ارتفاع آزاد کل (و پوشش) افزایش یابد و کانال عریض‌تر شود. مقایسهٔ مدل دارای ارتفاع آزاد پوشش با مدلی که این ارتفاع در آن لحاظ نشده است، نشان داد که در نظر گرفتن ارتفاع آزاد پوشش یا به نوعی بخش پوشش نشده میزان هزینه کل را کاهش داده است؛ از سوی دیگر به‌طور کلی انتخاب بهترین گزینه از میان همهٔ پاسخ‌های بهینه حاصل شده با احتمالات سرریز متفاوت در هر مدل، بر عهدهٔ مهندس طراح است که با توجه به بودجه، اهمیت و کاربری کانال و بسیاری از عوامل دیگر می‌تواند تعیین شود. پیشنهاد می‌شود که برای توسعهٔ طرح فعلی در پژوهش‌های آینده می‌توان هزینه‌های استملاک اراضی و اتلاف آب (تبخیر و نفوذ) نیز در تابع هدف لحاظ شود و همچنین این امکان وجود دارد که نتایج را با استانداردهای متداول طراحی موجود مقایسه کرد.

منابع

۱. اختیاری م. ۱۳۸۸. برنامه‌ریزی احتمالی چندهدفه برای بهینه‌سازی مسأله تعیین تعداد نیروی انسانی در سیستم‌های تولید کارگاهی. فصلنامه علمی-پژوهشی مطالعات مدیریت صنعتی. ۸(۱۸): ۱۸۹-۲۱۶.

۲. بغلانی ع. و زندی م. ۱۳۹۵. طراحی بهینه مرکب ذوزنقه‌ای با استفاده از الگوریتم بید- شعله. دومین همایش بین‌المللی و چهارمین همایش ملی معماری، عمران و محیط‌زیست شهری. ۳ شهریور ماه، همدان.

۳. بیرامی م. ک. ۱۳۷۶. سازه‌های انتقال آب. دانشگاه صنعتی اصفهان. ۴۶۲ ص.

4. Bhattacccharjya R. K. and Satish M. G. 2008. Flooding probability-based optimal design of trapezoidal open channel using free board as a design variable. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 134: 405-408.
5. Bhattacharjya R. K. 2005. Optimal design of open channel section considering free board. ISH Journal of Hydraulic Engineering. 11: 141-151.
6. Chiang C. S. 2009. Evolutionary multi-objective optimization in investment portfolio management. Phd Thesis, National university of Singapore. 210 p.
7. Chow V. T. 1959. Open channel hydraulics, McGraw-Hill, Singapore. 680 p.
8. Coello C. C. A. 2006. Evolutionary multi-objective optimization: A historical view of

the field. IEEE Computational Intelligence Magazine. 1(1): 28-36.
9. Das A. 2000. Optimal channel cross section with composite roughness. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 126: 68-71.
10. Das A. 2007. Flooding probability constrained optimal design of trapezoidal channels. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 133: 53-60.
11. Guo C. Y. and Hughes C. 1984.Optimal channel cross section with free board. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 110: 304-314.
12. Han Y. C. Gao X. P. and Xu Z. H. 2017. The best hydraulic section of horizontal-bottomed parabolic channel section. Journal of Hydrodynamics. 29(2): 306-313.
13. Muzaffar S. Z. S. Atmapoojya S. L. Agrawal D. K. and Aquil M. 2011. The optimal rounded canal section with considering of free board. International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA). 1: 1317-1322.
14. Muzaffar S. Z. S. Atmapoojya S. L. Agrawal D. K. and Aquil M. 2012. Minimizing the total cost of lining and excavation including free board. International Journal of Innovative Technology and Creative engineering. 2: 2045-8711.
15. Orouji H. Mahmoudi N. Fallah- Mehdipour E. Pazoki M. and Biswas A. 2016. Shuffled Frog-Leaping Algorithm for optimal design of open channels. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 142(10): 1-8.
16. Osman Akan A. 2006. Open channel hydraulics. First edition. Canada. 364 p.