

توسعه مدل طراحی بهینه سیستم کنترل سیلاب با در نظر گرفتن سدهای تأخیری با استفاده از الگوریتم ژنتیک

محمد‌هادی افشار^{۱*}، عباس افشار^۲، سیّد حامد معراجی^۳، مهرداد غفاری^۴

۱- دانشیار دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- استاد دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

۳ و ۴- کارشناس ارشد دانشگاه علم و صنعت ایران

* تهران، صندوق پستی ۱۶۳-۱۶۷۶۵

mhafshar@iust.ac.ir

چکیده- با توجه به این که سیستم‌های کنترل و هدایت سیلاب بسیار گسترده و پر هزینه هستند، طراحی سیستم‌هایی با هزینه کمتر و با ملحوظ کردن تمامی پارامترها و متغیرهای طراحی، ذهن محققان را به خود مشغول کرده است. لذا ایجاد نوعی مدل بهینه‌سازی جهت طراحی این سیستمها ضروری است. با توجه به کاربرد وسیع الگوریتم ژنتیک در علوم مختلف، در این مقاله پس از بررسی تاریخچه تحقیقات و تلاشهای انجام شده در زمینه کاربرد آن در حوزه مهندسی آب، از این الگوریتم به‌عنوان روش جستجو برای طراحی بهینه این سیستم‌ها استفاده شده است. در این مقاله نوعی مدل بهینه‌سازی ارائه شده، که در آن از الگوریتم ژنتیک به‌عنوان ابزار بهینه‌سازی و از بلوک Transport از نرم‌افزار SWMM به‌عنوان ابزار شبیه‌ساز برای تحلیل هیدرولیکی سیستم کنترل سیلاب استفاده شده است. مدل بهینه‌سازی ارائه شده، مجموعه‌ای کارآمد را ایجاد کرده که ضمن بررسی دقیق رفتار هیدرولیکی سیستم، توانایی طراحی بهینه سیستم مورد نظر را دارد. به‌عنوان مطالعه موردی، از مدل مزبور برای طراحی بهینه سیستم کنترل سیلاب پارس جنوبی که ترکیبی از سد تأخیری با تخلیه کننده تحتانی و چند کانال انتقال آب می‌باشد، استفاده شده است. نتایج، نشان دهنده کارآمدی مدل پیشنهادی در کاهش هزینه‌های ساخت تا حدود ۲۳ درصد است.

کلید واژگان: الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی، SWMM-Transport، سیستم کنترل سیلاب.

۱- مقدمه

اقتصادی زیادی را ایجاد می‌کنند. بیشتر آثار اجتماعی و خسارتهای اقتصادی، ناشی از سیلابها است. بر اساس آمار منتشره در سال ۱۹۸۸ توسط سازمان ملل (N.D.R.O.)، تعداد ۱۶۲ سیلاب وجود داشته که هر کدام از آنها منجر به

با وجود پیشرفت چشمگیر فناوری، هنوز حوادث طبیعی مانند توفان، زلزله و سیلاب، زندگی انسانها را به شدت تحت تأثیر قرار داده و آثار اجتماعی نامطلوب و خسارتهای

بهینه‌سازی شبکه آب ارائه کردند (Murphy et al, 1993). همچنین Simpson و همکاران در سال ۱۹۹۴ کارایی روشهای شمارش کامل، برنامه‌ریزی غیرخطی (NLP) و GA را برای یک شبکه لوله نمونه مقایسه کرده و به این نتیجه رسیدند که GA می‌تواند راه‌حلهای قابل قبولی را ارائه کند (Simpson et al., 1994).

Davidson در سال ۱۹۹۵ و Dandy و همکاران نیز در سال ۱۹۹۶، از GA برای بهینه‌سازی شکل شبکه‌های شاخه‌ای مانند سیستمهای توزیع آب یا گاز استفاده کردند (Davidson et al., 1995, Dandy et al., 1996). همکاران در سال ۲۰۰۵ نیز با توسعه مدل ترکیبی GA و CA۱ به بهبود فرایند GA و همچنین Morley و همکاران در سال ۲۰۰۱ با توسعه مدل GAnet به بهینه‌سازی سیستم انتقال آب پرداختند (Keedwel et al., 2005, Morley et al., 2001). در حوزه مسائل آبهای زیر زمینی نیز Ritzel و همکاران در سال ۱۹۹۴ و Mckinney در سال ۱۹۹۴ یک مسأله آلودگی و یک مسأله مدل مدیریت آبهای زیرزمینی را با GA حل کردند (Ritzel et al., 1994, Mckinney et al., 1994). همچنین از GA در استخراج قوانین بهره‌برداری از مخزن استفاده شده که می‌توان به کارهای East و همکاران در سال ۱۹۹۴، Fahmy و همکاران در سال ۱۹۹۴ و Oliveira در سال ۱۹۹۷ اشاره نمود. (East et al., 1994, Fahmy et al., 1994, Oliveira et al., 1997). دربندی نیز در سال ۲۰۰۳ مدل GA-Transport را با تلفیق الگوریتم ژنتیک و بلوک Transport از شبیه‌ساز هیدرولیکی SWMM برای طراحی بهینه شبکه جمع‌آوری آبهای سطحی ارائه کرد (سادات دربندی، ۲۰۰۳).

گزارش مکتوب و مدونی از کاربرد الگوریتم ژنتیک در طراحی بهینه سیستم کنترل سیلاب در دسترس نیست. در این تحقیق برای تهیه مدل طراحی بهینه سیستم کنترل

بیش از ۱۰ کشته و یا خسارت بیش از یک میلیون دلار آسیب شده‌اند و در نتیجه تمامی این سیلابها بیش از ۱۹ میلیون نفر بی خانمان شده‌اند. همچنین آمار مربوط به سالهای ۱۹۸۶ تا ۱۹۹۶ نشان می‌دهد که آثار اجتماعی و خسارتهای اقتصادی ناشی از سیلاب، رو به افزایش است (Munich, 1998).

با انجام اقدامات مدیریتی و ساختمانی می‌توان سیل را مهار کرد و یا از خسارتهای ناشی از آن کاست. برخی اقدامات ساختمانی که در فرایند کنترل سیلاب ممکن است انجام شوند عبارتند از احداث سد، کانال، خاکریز و مانند آن که باید ارتباطی منطقی بین ابعاد این سازه‌ها وجود داشته باشد. به‌عنوان مثال در حوضه‌ای با هیدروگراف سیل طراحی مشخص، هر چه ارتفاع سد بیشتر باشد، حجم مخزن پشت سد افزایش یافته و زمان لازم برای سرریز شدن آن در هنگام وقوع سیل افزایش یافته و میزان حداکثر سیلاب کاهش می‌یابد؛ لذا کانال زمان بیشتری برای هدایت سیل ورودی به پایین در اختیار دارد و می‌تواند با ابعاد کوچکتری، سیلاب را از خود عبور دهد. بنابراین می‌توان با کاهش دبی عبوری از تخلیه‌کننده تحتانی سد، از ابعاد کانال و هزینه‌های اجرایی سیستم کاست.

هدف از این تحقیق ارائه مدلی برای طراحی بهینه سیستم هدایت و کنترل سیلاب است. مرور مقالات و تحقیقات موجود نشان می‌دهد که روشهای بهینه‌سازی متعددی، در شرایط گوناگون، برای بهینه‌سازی سیستمهای مختلف توسعه داده شده‌اند. یکی از این روشها، الگوریتم ژنتیک (GA) است که تاکنون از آن در حوزه‌های مختلف مهندسی عمران استفاده شده است. (Wang (1991 و Franchini (1996)، از GA برای کالیبره کردن مدل مفهومی بارش- رواناب استفاده کردند. در مسائل آب شهری نیز استفاده‌های زیادی از GA مشاهده شده است. Murphy و همکاران در سال ۱۹۹۳ با استفاده از GA ساده، روشی را برای

پایین دست نیز کاهش می‌یابد. بدین ترتیب، برای شیب ثابت، ابعاد کانالهای پایین دست سد - که بر اساس حداکثر جریانی که از آنها خواهد گذشت طراحی می‌شوند - کوچکتر خواهند شد. همچنین با تغییر شیب، ابعاد لازم کانال برای عبور دبی مورد نظر تغییر می‌کند. بنابراین سه عامل ارتفاع سد، شیب کانال (تراز گره‌ها) و ابعاد کانال (عرض و ارتفاع) با هم در تعامل بوده و بهینه‌سازی باید برای این سه متغیر انجام شود تا ابعاد و اندازه‌هایی به دست آید که سیل ورودی را (با اعمال شرطها و قیدها) مهار کرده و با کمترین هزینه انتقال دهد. بدیهی است هر اندازه طول کانال برای هدایت سیل به پایین دست بیشتر باشد، ساخت سد تأخیری با ارتفاع بیشتر - که نتیجه آن کوچکتر شدن ابعاد کانال است - اقتصادی تر است.

۳- الگوریتم ژنتیک و فرآیند بهینه‌سازی

تهیه مدلی که هدف آن طراحی بهینه سیستم باشد، نیازمند یک ابزار بهینه‌ساز قوی است تا علاوه بر به دست آوردن بهینه مطلق (فراگیر)، قیود مسأله را نیز ارضا نماید. الگوریتم ژنتیک یکی از روشهای بهینه‌سازی است که توانایی تعیین بهینه فراگیر، بهینه‌سازی با در نظر گرفتن محدودیتها و در نظر گرفتن متغیرهای تصمیم پیوسته و گسسته را دارد. این الگوریتم با بهره‌گیری از عملگر جهش، توانایی تعیین بهینه فراگیر را به دست می‌آورد. همچنین با تعریف جریمه برای تخلف از قیود، می‌تواند مسائل بهینه‌سازی مقید را به مسائل بهینه‌سازی بدون قید تبدیل کرده و نیز می‌تواند با انجام عملیاتی، متغیرهای پیوسته را به متغیرهای گسسته تبدیل نماید. با توجه به تأمین سه خواسته فوق و برتریهای GA نسبت به سایر روشهای بهینه‌سازی و نیز با توجه به نتایج خوبی که در تحقیقات گذشته در استفاده از این الگوریتم به دست آمده، GA به عنوان روش بهینه‌سازی در مدل مورد نظر انتخاب شد.

سیلاب، از الگوریتم ژنتیک به عنوان روش بهینه‌سازی استفاده شده است. همچنین برای تحلیل جریان در سیستم و برآورده ساختن نیازهای الگوریتم ژنتیک، به کارگیری یک شبیه‌ساز قوی با توانایی تحلیل جریانهای غیر ماندگار در کانالهای باز، نیاز است که بدین منظور بلوک Transport از شبیه‌ساز هیدرولیکی SWMM به کار گرفته شده است.

۲- معرفی سیستم

سیستم کنترل سیلاب مورد نظر، از یک سد تأخیری با تخلیه کننده تحتانی، کانالهای انتقال آب، ورودیهایی برای وارد شدن جریان به کانالها و خروجی‌هایی برای خارج شدن جریان از کانالها، تشکیل می‌شود. همان‌گونه که پیش از این بیان شد با افزایش ارتفاع سد، هزینه ساخت و حجم مخزن سد افزایش یافته و مخزن توانایی ذخیره‌سازی حجم بیشتری از سیل را خواهد داشت. در نتیجه سیل - که در مدت زمان کوتاهی به مخزن وارد می‌شود - به تدریج و با دبی کمتر از دبی ورودی (بسته به اندازه سطح تخلیه‌کننده تحتانی سد و ارتفاع آب در مخزن) در مدت زمان طولانی‌تری از مخزن سد خارج خواهد شد. با کاهش سطح مقطع تخلیه کننده، حداکثر تراز آب پشت سد (برای سیل با هیدروگراف ورودی مشخص) افزایش می‌یابد، زیرا با کوچک شدن سطح مقطع تخلیه کننده، میزان دبی خروجی سد کاهش یافته و مقدار بیشتری از حجم سیل ورودی باید در پشت سد ذخیره شود، لذا آب در پشت سد در تراز بالاتری قرار خواهد گرفت. بدیهی است بیشتر شدن ارتفاع آب، سبب بیشتر شدن سرعت خروج جریان در محل تخلیه کننده نیز خواهد شد. جریان حداکثری که از کانالهای پایین دست سد عبور خواهد کرد، به حداکثر جریانی که از تخلیه کننده سد می‌گذرد، جریانهای ورودی از شاخه‌های فرعی و روند جریان با توجه به توپوگرافی منطقه بستگی دارد. بنابراین با کاهش دبی خروجی تخلیه کننده، دبی عبوری از کانالهای

قبل (والدین برازنده) است. عمل آمیزش می‌تواند به روش آمیزش تک‌نقطه‌ای یا آمیزش دو یا چند نقطه‌ای صورت گیرد. روش استفاده شده در مدل حاضر، روش آمیزش یک نقطه‌ای^۱ با احتمال آمیزش یک است. از آنجا که بعضی از توابع علاوه بر داشتن بهینه مطلق (فراگیر)، بهینه محلی نیز دارند، باید تدبیری اندیشید تا جوابها به سمت بهینه محلی همگرا نشوند. عمل جهش در واقع ایجاد تغییر تصادفی در یکی از ژنهای کروموزوم (یکی از متغیرهای شبکه) است. این تغییر اینگونه انجام می‌شود که به‌طور تصادفی مقدار یکی از بیت‌های یک ژن از کروموزوم، تغییر می‌یابد. یعنی در صورت 1 بودن، به 0 و در صورت 0 بودن، به 1 تبدیل می‌شود. تعداد کروموزومهایی که تحت تأثیر عملگر جهش قرار می‌گیرند، به احتمال جهش (P_m) بستگی دارد. در این مدل از جهش در سطح بیت^۲ با احتمال جهش 0.01 استفاده شده است. تمامی پارامترهای مورد استفاده در الگوریتم پس از سعی و خطا و تحلیل حساسیت مدل انتخاب شده است. پس از گذشت چندین نسل بیشتر کروموزومها، غیر از کروموزومهای جهش یافته، شبیه یکدیگر می‌شوند و کیفیت پاسخها با تولید نسلهای بعدی تغییر چندانی نمی‌کند. ملاک همگرایی و توقف الگوریتم در این مدل، تغییر نکردن پاسخ در تعداد مشخصی نسل متوالی است. این تعداد توسط کاربر قابل تعیین و تغییر است.

۴- فرایند شبیه‌سازی

الگوریتم ژنتیک، افراد هر نسل را از روی افراد ممتاز نسل قبل تولید می‌کند و ملاک ممتاز بودن، علاوه بر کم هزینه بودن، تأمین شرایط مجاز هیدرولیکی و اجرایی است. از جمله شرایط هیدرولیکی که باید تأمین شود، مجاز بودن سرعت جریان، کافی بودن ظرفیت کانالها و مانند آن است.

شکل ۱ روندنمای الگوریتم ژنتیک را نشان می‌دهد. فرایند بهینه‌سازی در GA بدین صورت است که در اولین گام باید متغیرهای تصمیم در GA انتخاب شوند. متغیرهای تصمیم در واقع پارامترهایی هستند که GA باید آنها را در محدوده مشخص شده، متناسب با برازندگی و امتیازشان انتخاب کند. با مشخص شدن متغیرهای تصمیم، نوبت به کدگذاری آنها می‌رسد. متغیرهای تصمیم ممکن است به صورت پیوسته یا گسسته باشند. در مسأله مورد نظر، متغیرهای تصمیم شامل تراز گره‌ها، ابعاد کانال و سطح مقطع تخلیه کننده سدها می‌باشند که همه پیوسته‌اند. در این مدل متغیرهای پیوسته به متغیرهای گسسته تبدیل شده و سپس متغیرهای گسسته شده، به صورت دودویی کدگذاری شده و هر یک به‌عنوان یک ژن در نظر گرفته می‌شوند. با کنار هم قرار گرفتن ژنها (که هر یک نماینده یک متغیر است) کروموزوم پدید می‌آید که در واقع هر کروموزوم، یک شبکه پیشنهادی یا به عبارتی، یکی از راه‌حلهای ممکن (مناسب یا نامناسب) است. در سیستم مورد مطالعه، شبکه‌ای مناسبتر است که کمترین هزینه را داشته و قیود سیستم را نیز ارضا کند. بنابراین اگر بتوان برای تخلف از قیود نیز هزینه‌ای را تعریف کرد، می‌توان ادعا کرد که ملاک و معیار برازنده‌تر بودن، کمتر بودن هزینه است. برای دستیابی به این هدف معمولاً از روش توانی استفاده می‌شود که در آن کروموزومهایی که قیود طرح را ارضا نمی‌کنند، برازندگی کمتری یافته و احتمال خارج شدن آنها از گردونه رقابت، بیشتر شود. یک روش برای محاسبه برازندگی شبکه، کم کردن هزینه شبکه از یک مقدار بزرگ است. روش دیگر استفاده از معکوس هزینه شبکه به‌عنوان برازندگی شبکه است. پس از کدگذاری و محاسبه امتیاز شبکه‌ها، نوبت به انتخاب والدین برای تولید نسل بعدی می‌رسد. در این مدل انتخاب والدین با توجه به برازندگی کروموزومها به روش چرخ گردان انجام می‌شود. یکی از روشهای تولید جمعیت یک نسل، آمیزش افراد منتخب نسل

1. One-Point Crossover
2. Bit-Wise Mutation

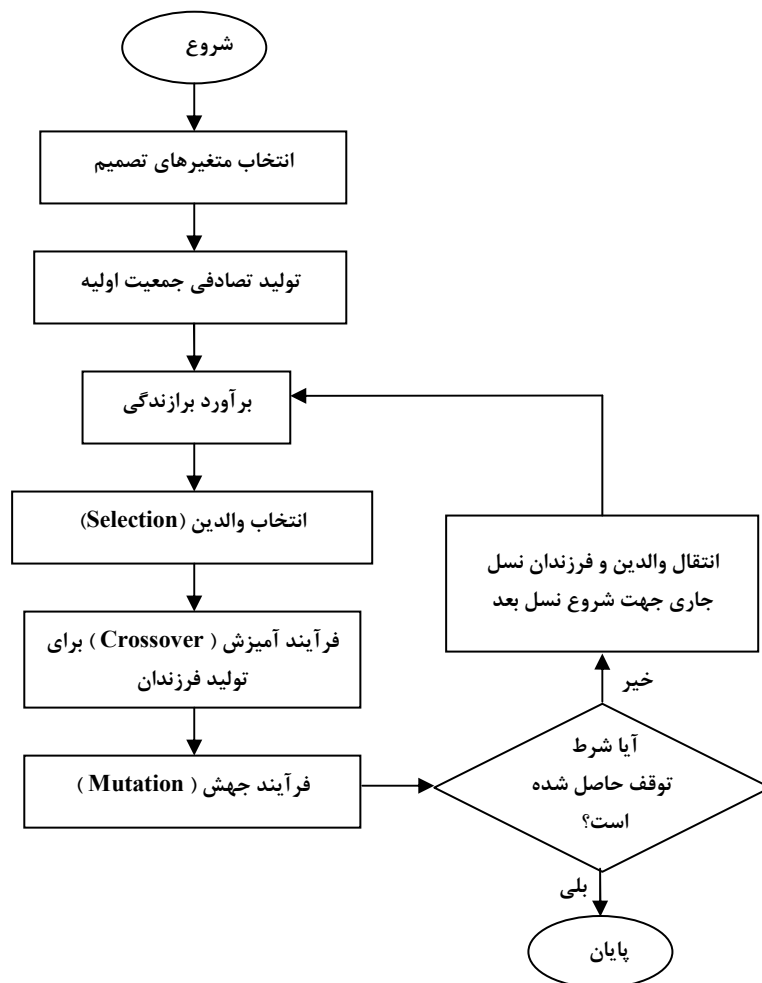
مقطع تخلیه کننده، می‌تواند ارتفاع آب در مخزن را در هر گام زمانی محاسبه کند. بنابراین می‌توان از طریق تعیین حداکثر تراز ارتفاع آب ذخیره شده در پشت سد، ارتفاع سد را با در نظر گرفتن ارتفاع آزاد آن محاسبه کرد.

۵- طراحی بهینه سیستم کنترل سیلاب ۵-۱- فرمول بندی مدل

مدل مورد نظر باید طرحی را ارائه کند که علاوه بر ارضای محدودیتهای هیدرولیکی و اجرایی، کمترین هزینه را نیز داشته باشد.

تحلیلگر هیدرولیکی می‌تواند مقدار پارامترهای لازم برای تعیین امتیاز هر شبکه را محاسبه کند.

بلوک Transport از شبیه‌ساز SWMM، به دلیل امکان تلفیق مطلوب با GA و تأمین تمامی نیازهای GA، از جمله سرعت جریان، ارتفاع آب در کانال، دبی عبوری از کانال و دارا بودن قابلیت شبیه‌سازی مخزن سد و طراحی شبکه مورد نظر با معلوم بودن دبی و شیب کانالها، و همچنین تحلیل جریان ناپایدار در کانالهای باز با ملحوظ کردن هیدروگراف ورودی، به‌عنوان تحلیلگر مدل انتخاب شده است. SWMM با در اختیار داشتن منحنی ارتفاع - حجم مخزن، هیدروگراف ورودی مخزن و همچنین موقعیت و سطح



شکل ۱ روندنمای الگوریتم بهینه سازی ژنتیک

Q_i, i دبی طرح شاخه i, h_i تراز آب در گره i (گره بالا دست)، H_j تراز آب در گره j (گره پایین دست) است.

۶- مدل پیشنهادی

در این بخش ساختار مدل پیشنهادی تشریح می‌شود. اولین گام در GA انتخاب متغیرهای تصمیم و کد گذاری آنها است.

در این مقاله برای اجتناب از افزایش ابعاد مسأله بهینه‌سازی، رقوم گره‌ها و سطح تخلیه‌کننده سدها جزو متغیرهای تصمیم منظور شده و ابعاد کانال‌ها توسط شبیه‌ساز طراحی می‌شوند. در این حالت شبیه‌ساز علاوه بر تحلیل جریان، در صورت ناکافی بودن ظرفیت کانالها، ابعاد کانال‌ها را طوری طراحی می‌کند تا بتوانند دبی طرح را از خود عبور دهند. برای کانالها ابعاد اولیه‌ای در نظر گرفته می‌شود و پس از آن شبیه‌ساز در هر گام زمانی، دبی خروجی تخلیه‌کننده سد را با توجه به ارتفاع آب پشت سد و تراز تخلیه‌کننده محاسبه می‌کند و ابعاد کانال را برای عبور این دبی، با توجه به عمل روند و نیز شیب هر شاخه، محاسبه می‌نماید. این مدل SWMM-GA نامیده می‌شود. شکل ۲ ساختار این مدل را نشان می‌دهد.

۷- بررسی عملکرد مدل

به‌منظور سنجش عملکرد مدل و اطمینان از صحت محاسبات آن، می‌توان نتایج مدل را با نتایج طرحها و پروژه‌های اجرا شده یا در حال اجرا -که به روشهای دیگری طراحی شده‌اند- مقایسه کرد. در این مقاله، طراحی بهینه سیستم کنترل سیلاب پارس جنوبی در نظر گرفته شده و نتایج حاصل از مدل SWMM-GA با طرح موجود ارائه شده توسط مهندسین مشاور بندآب مقایسه می‌شود.

در سیستم معرفی شده، پارامترهای ارتفاع سد، ابعاد کانال، طول شاخه‌ها و متوسط عمق خاکبرداری یا خاکریزی در هر شاخه، در هزینه موثرند. بنابراین، تابع هزینه که جزئی از تابع هدف است، به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{Min Cost} = \sum_{i=1}^n f_i(b_i, d_i, \bar{Z}_{1i}, \bar{Z}_{2i}, L_i) + \sum_{j=1}^k g_j(Hd_j) \quad (1)$$

که در آن b_i عرض کانال در شاخه i, d_i ارتفاع کانال در شاخه i, \bar{Z}_{1i} متوسط عمق خاکبرداری در شاخه i, \bar{Z}_{2i} متوسط ارتفاع خاکریزی در شاخه i, L_i طول شاخه i, Hd_j ارتفاع سد j است.

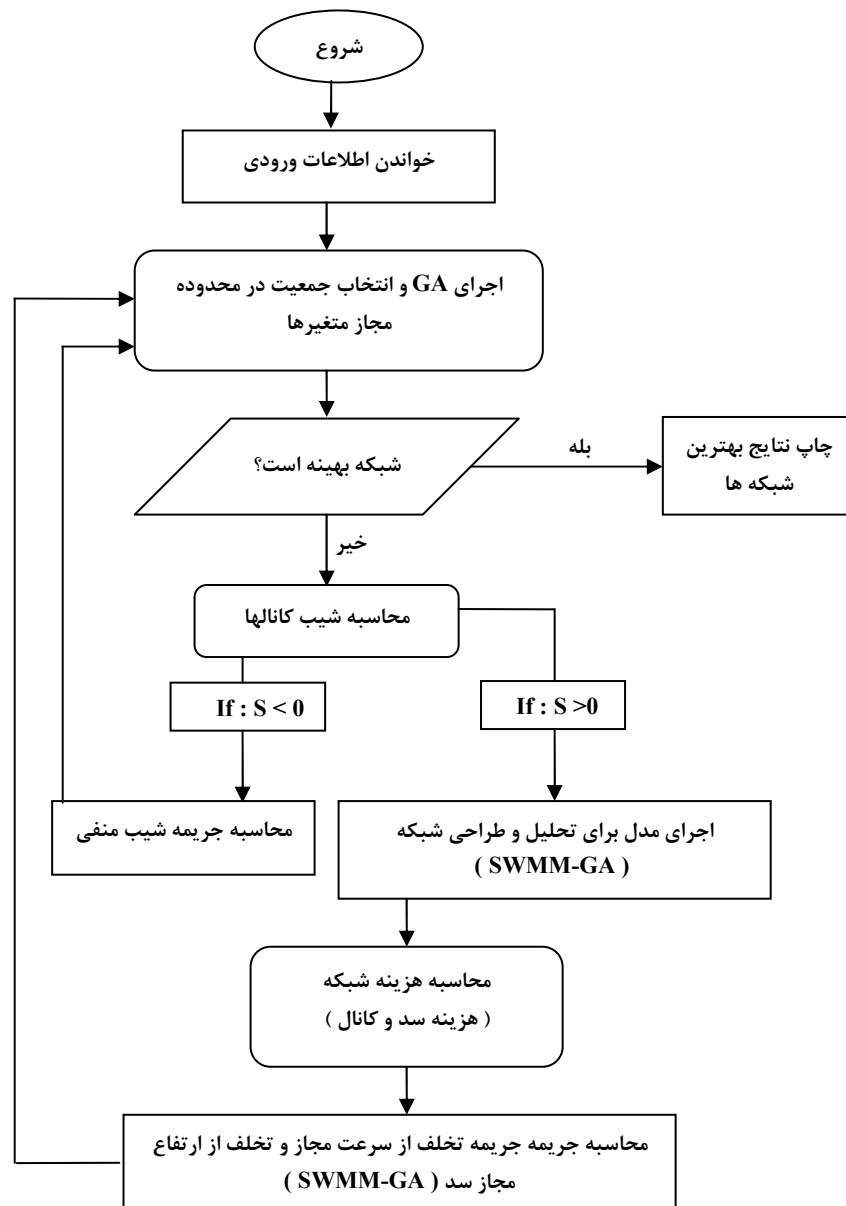
۵-۲- قیود سیستم

قیودی که باید توسط مدل ارضا شود بدین قرار است:

(الف) سرعت جریان در کانالها باید در محدوده حداقل و حداکثر سرعت مجاز باشد، یعنی $V_{Min} \leq V_i \leq V_{Max}$ ؛
 (ب) تراز آب در گره در شاخه پایین‌دست از شاخه بالا دست بیشتر نباشد، یعنی $h_i \geq H_i$ ؛
 (ج) شیب کانالها از شیب مجاز کمتر نشود، یعنی $S_i \geq S_{min}$ ؛
 (د) ارتفاع سد از حد مجاز اجرایی بیشتر نشود، یعنی $Hd_i \leq Hd_{max}$ ؛

(ه) ارتفاع خاکبرداری و خاکریزی از حد مجاز اجرایی بیشتر نشود، یعنی $diff\ 1_i \leq diff\ 1_{max}$ و $diff\ 2_i \leq diff\ 2_{max}$ ؛
 (و) ظرفیت شاخه از دبی ورودی به شاخه کمتر نشود، یعنی $q_i \geq Q_i$ ؛

در این روابط، V_i سرعت جریان در شاخه i, V_{Min} حداقل سرعت مجاز در کانال، V_{Max} حداکثر سرعت مجاز در کانال، $diff\ 1_i$ حداکثر عمق خاکبرداری در شاخه $i, diff\ 1_{max}$ حداکثر عمق خاکریزی در شاخه $i, diff\ 2_i$ حداکثر عمق مجاز خاکبرداری در کانال، $diff\ 2_{max}$ حداکثر عمق مجاز خاکریزی در کانال، q_i ظرفیت شاخه



شکل ۲ ساختار مدل SWMM-GA

۷-۱-۱-۲ مقایسه نتایج

۷-۱-۱-۲-۱ کلیات

منطقه عسلویه به دلیل برخوردار بودن از منابع سرشار انرژی، شاهد سرمایه‌گذاریهای عظیمی در این زمینه است. لذا به منظور ایجاد چتر امنیتی برای تأسیسات این منطقه، طرح کنترل سیلابی در این منطقه تدوین شده و در حال اجرا است. بدین منظور شرکت مشاور، این منطقه را به شش بسته

و هر بسته را به چند سامانه تقسیم کرده و برای هر سامانه، سیستم کنترل سیلاب را طراحی کرده است (مشاور بندآب، ۱۳۸۰). لذا در این مقاله، برای کنترل عملکرد مدل، سیستم کنترل سیلاب یکی از این سامانه‌ها توسط مدل SWMM-GA طراحی شده و نتایج با طرح در حال اجرا مقایسه می‌شود. حوضه‌ای که برای این منظور در نظر گرفته شده است، سامانه سوم از بسته دوم است.

= هزینه اجرای کل شبکه

$$\sum_{i=1}^n [5.1H_i^2 + 6.9H_i] + \sum_{j=1}^m [0.4((b_j \times h_j) \times L_j)] + 0.0124 \times [Eb_j \times (b_j + \frac{2}{3}Eb_i) \times Lb_i] + 0.0046 \times [Er_j \times (b_j + \frac{2}{3}Er_i) \times Lr_i]$$

در رابطه فوق n تعداد سدها و m مجموع تعداد شیب شکن‌ها و کانال‌ها در شبکه است.

جدول ۱ هزینه اجرای واحد حجم عملیات خاکی و بتن‌ریزی (مشاور بندآب، ۱۳۸۰)

هزینه اجرای واحد حجم عملیات [میلیون ریال]		
خاکبرداری	خاکریزی	قالیندی، آرماتوربندی و بتن‌ریزی
۰/۰۱۲۴	۰/۰۰۴۶	۰/۴

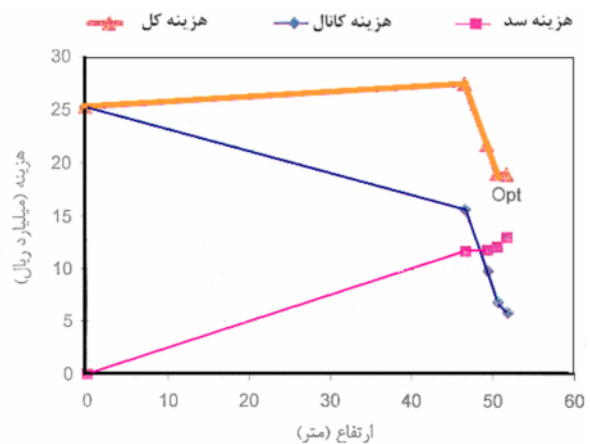
۷-۱-۲- طراحی انجام شده توسط شرکت مشاور

بر طبق محاسبات مشاور، سیستم کنترل سیلاب سامانه سوم این بسته، از سد خاکی به ارتفاع ۵۱/۹ متر، ۲ تبدیل ورودی، کانال در مجموع به طول ۲۲۲۸ متر و یک تبدیل خروجی تشکیل می‌شود. شکل ۴ طرحواره این طرح را نشان می‌دهد. البته در این طرح دو شاخه $P_2S_3C_1$ و $P_2S_3C_2$ در گره 3 دقیقاً به هم متصل نیستند. بلکه جریان شاخه $P_2S_3C_1$ از طریق یک ورودی به شاخه $P_2S_3C_2$ وارد می‌شود. به گره‌های 1، 2 و 3 به ترتیب هیدروگرافهای سیلاب طراحی حوضه‌های بالا دست وارد می‌شود. جدول ۲ مشخصات طرح ارائه شده توسط مشاور را نشان می‌دهد.

۷-۱-۳- طراحی انجام شده توسط مدل

از آنجا که سطح منطقه پستی و بلندی و ناهمواری دارد، بهتر است برای کمتر شدن حجم عملیات خاکی، المان‌های بیشتری در نظر گرفته شود. اما مشاور در طراحی خود، فقط دو شاخه ($P_2S_3C_1$ و $P_2S_3C_2$) را در نظر گرفته است.

نمودار هزینه سد- ارتفاع سد - که مشاور از آن برای این سامانه استفاده کرده- در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳ تغییرات مجموع هزینه‌های المانهای دفع سیلاب سامانه نسبت به ارتفاع سد P2S3D1 (مشاور بندآب، ۱۳۸۰)

برای استفاده از این نمودار در تعیین تابع هزینه‌ای که به مدل معرفی خواهد شد با انتخاب مختصات سه نقطه از آن، رابطه درجه دوم زیر برای محاسبه هزینه سد با توجه به ارتفاع آن به دست می‌آید:

$$5.1H^2 + 6.9H = \text{هزینه ساخت سد} \quad (2)$$

در رابطه فوق H ارتفاع سد است. همچنین با استفاده از آمار و اطلاعات مشاور برای هزینه‌های شبکه‌های طراحی شده برای بسته‌ها و سامانه‌های مختلف، هزینه واحد حجم عملیات خاکبرداری، خاکریزی و عملیات بتنی به صورت آنچه که در جدول ۱ نشان داده شده، ارائه شده است.

بنابراین تابع هزینه کلی سیستم شامل هزینه ساخت سدی به ارتفاع H و ساخت شیب شکن یا کانالی به عرض b ، ارتفاع h و طول L که متوسط عمق خاکبرداری در طول خاکبرداری شده (Lb)، برابر Eb و متوسط ارتفاع خاکریزی در طول خاکریزی شده (Lr) برابر Er است، از رابطه زیر به دست می‌آید:

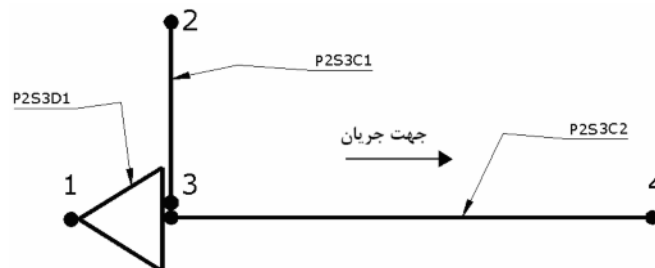
صورت تجاوز سرعت جریان در این المان از سرعت بیشینه، جریمه تخلف از سرعت مجاز برای آن در نظر گرفته نمی‌شود. بدین ترتیب این المان، نقشی شبیه به شیب شکن را ایفا خواهد کرد. مشخصات المان‌های در نظر گرفته شده مانند نوع المان‌ها، تراز گره‌های بالادست و پایین دست المان‌ها و طول المان‌ها در جدول ۳-الف آورده شده است. به گره‌های 10، 20 و 30 به ترتیب هیدروگرافهای سیلاب طراحی حوضه‌های 1، F3 و F2 وارد می‌شود. مشخصات شبکه طراحی شده توسط مدل، در جدول ۳-ب آورده شده است.

بنابراین برای مقایسه نتایج مدل با نتایج مشاور، شبکه برای هر یک از دو حالت فوق طراحی می‌شود.

حالت اول: طراحی شبکه با در نظر گرفتن یک المان سد و دو المان کانال

طرحواره این طرح مانند طرح ارائه شده توسط مشاور (شکل ۴) است. اما برای اینکه بتوان در گره 3 برای دو شاخه $P_2S_3C_1$ و $P_2S_3C_2$ ، ترازهای مختلفی را در نظر گرفت در مدل کردن این شبکه از یک المان اضافی استفاده شده است (شکل ۵).

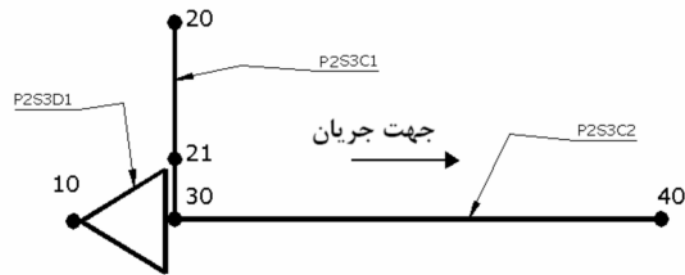
برای المان 2130 که میان دو شاخه مذکور قرار گرفته، طول بسیار ناچیزی در نظر گرفته می‌شود. همچنین در



شکل ۴. پلان طرح ارائه شده توسط مشاور برای پروژه کنترل سیلاب پارس جنوبی (مشاور بندآب، ۱۳۸۰)

جدول ۲. نتایج طراحی شرکت مشاور برای پروژه کنترل سیلاب پارس جنوبی (مشاور بندآب، ۱۳۸۰)

مشخصات کانالها				
نام کانال	ابعاد (m)	طول (m)	رقوم ابتدا (m)	رقوم انتها (m)
$P_2S_3C_1$	2×1.5	۳۲۰	۸۰	۷۰
$P_2S_3C_2$	$2/5 \times 2$	۱۹۰۷/۶	۶۲	۲
مشخصات سدها				
نام سد	طول تاج (m)	ارتفاع (m)	حجم خاکریزی (m^3)	
$P_2S_3D_1$	۱۶۲	۵۱/۹	۵۵۰۰۰۰	
هزینه کل اجرایی (میلیون ریال)			شرح عملیات	
۶۶۱۲/۲			کانال	
۱۴۷۱۳/۷			سد	
۲۱۳۲۵/۹			جمع کل	



شکل ۵. پلان طرح مدل SWMM-GA برای پروژه کنترل سیلاب پارس جنوبی در حالت اول

جدول ۳. مشخصات المان‌ها و نتایج طراحی توسط مدل برای پروژه کنترل سیلاب پارس جنوبی در حالت اول

الف- مشخصات و ترازهای زمین در ابتدا و انتهای هر المان

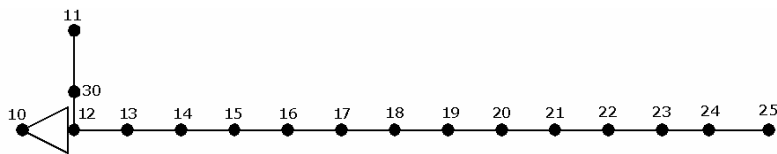
نام المان	نوع المان	رقوم زمین (m)		طول المان
		بالا دست	پایین دست	
1030 (P ₂ S ₃ D ₁)	سد	۱۵۰	۶۸	-
2021 (P ₂ S ₃ C ₁)	کانال	۸۶	۷۲	۳۲۰
2130	شیب‌شکن	۷۲	۶۸	۰/۵
3040 (P ₂ S ₃ C ₂)	کانال	۶۸	۰	۱۹۰۷/۶

ب- نتایج طراحی مدل

نام کانال	رقوم کانال		ابعاد کانال (m)
	گره بالادست	گره پایین دست	
2021 (P ₂ S ₃ C ₁)	۸۵/۴۹	۷۸/۵۶	۱/۴۳×۰/۸۶
2130	۷۸/۵۶	۶۲/۵۱	۰/۴۷×۰/۲۸
3040 (P ₂ S ₃ C ₂)	۶۲/۵۱	۲/۰۰	۳/۸۴×۲/۳۱
مشخصات سد			
نام سد	سطح مقطع تخلیه‌کننده (m ²)	ارتفاع سد (m)	بیشینه دبی عبوری از تخلیه‌کننده سد (m ³ /s)
1030 (P ₂ S ₃ D ₁)	۴/۲۱	۳۷/۰۷	۱۱۳/۶۰
هزینه کل اجرا (میلیون ریال)		شرح عملیات	
۷۲۶۴/۰۷		کانال	
۶۹۴۰/۹		سد	
۱۴۲۰۴/۹۷		جمع کل	

به توپوگرافی منطقه، شبکه‌ای متشکل از ۱۷ گره، یک سد و ۱۵ کانال برای این سامانه در نظر گرفته شده (شکل ۶) که البته المان 3012 که طولش بسیار ناچیز است، نقشی را شبیه به المان 2130 در حالت اول ایفا می‌کند. مشخصات المان‌ها و گره‌های این شبکه در جدول ۴ نشان داده شده است.

حالت دوم: طراحی شبکه با در نظر گرفتن یک المان سد و تعداد نامحدودی المان کانال
همان‌گونه که ذکر شد، با توجه به توپوگرافی ناهموار منطقه، اگر برای مسیرهای ناهموار، به جای یک المان، چند المان در نظر گرفته شود، می‌توان از حجم عملیات خاکی کاسته و شبکه بهینه‌تری را نسبت به حالت اول طراحی کرد. با توجه



شکل ۶ پلان طرح مدل SWMM-GA برای پروژه کنترل سیلاب پارس جنوبی در حالت دوم

جدول ۴ مشخصات و ترازهای زمین در ابتدا و انتهای هر المان برای پروژه کنترل سیلاب پارس جنوبی در حالت دوم

نام المان	نوع المان	رقوم زمین (m)		طول المان
		بالا دست	پایین دست	
1012	سد	۱۵۰	۶۸	-
1130	کانال	۸۶	۷۲	۳۲۰
3012	شیب شکن	۷۲	۶۸	۰/۵
1213	کانال	۶۸	۶۰	۱۳۵
1314	کانال	۶۰	۶۰	۲۸۰
1415	کانال	۶۰	۵۰	۳۰
1516	کانال	۵۰	۵۵	۱۲۰
1617	کانال	۵۵	۵۰	۸۵
1718	کانال	۵۰	۴۰	۵۰
1819	کانال	۴۰	۴۵	۶۰
1920	کانال	۴۵	۳۰	۳۵۰
2021	کانال	۳۰	۲۰	۳۰
2122	کانال	۲۰	۲۰	۹۰
2223	کانال	۲۰	۲۵	۳۰
2324	کانال	۲۵	۰	۴۰۰
2425	کانال	۰	۰	۲۴۷

به گره‌های 10، 11 و 12 به ترتیب هیدروگرافهای سیلاب طراحی حوضه‌های بالادست وارد می‌شود. تابع هزینه نیز در این حالت، مانند حالت اول است. مشخصات شبکه طراحی شده توسط مدل در جدول 5 نشان داده شده است. هزینه طرح ارائه شده توسط شرکت مشاور برای این سامانه برابر 21325/9 میلیون ریال است. در صورتی که طرحی که مدل در حالت اول ارائه می‌کند، مبلغ 14204/97 میلیون

ریال هزینه صرف خواهد کرد. بنابراین استفاده از مدل SWMM-GA سبب کاهش 33 درصدی در هزینه اجرای سیستم کنترل سیلاب این سامانه می‌شود. همچنین هزینه اجرای طرح مدل در حالت دوم برابر 12770/48 میلیون ریال است که 40 درصد کمتر از هزینه صرف شده برای طرح مشاور می‌باشد.

جدول 5 نتایج طراحی مدل در حالت دوم

نام کانال	رقوم کانال (m)		ابعاد کانال (m)
	گره بالادست	گره پایین دست	
1130	۸۶	۷۵	۱/۳۱ × ۰/۷۹
3012	۷۵	۶۸	۰/۴۳ × ۰/۲۶
1213	۶۸	۶۲/۹۶	۴/۴۸ × ۲/۶۹
1314	۶۲/۹۶	۵۲/۴۵	۴/۴۷ × ۲/۶۸
1415	۵۲/۴۵	۵۱/۵۱	۴/۶۱ × ۲/۷۷
1516	۵۱/۵۱	۴۷/۴۲	۴/۵۴ × ۲/۷۲
1617	۴۷/۴۲	۴۵/۴۰	۴/۸۶ × ۲/۹۱
1718	۴۵/۴۰	۴۴/۷۶	۵/۴۵ × ۳/۲۷
1819	۴۴/۷۶	۴۳/۲۰	۴/۷۸ × ۲/۸۷
1920	۴۳/۲۰	۳۳	۴/۶۷ × ۲/۸۰
2021	۳۳	۳۲/۲۵	۴/۸۲ × ۲/۸۹
2122	۳۲/۲۵	۲۸/۳۸	۴/۳۶ × ۲/۶۱
2223	۲۸/۳۸	۲۷/۱۵	۴/۳۹ × ۲/۶۳
2324	۲۷/۱۵	۱۱/۰۷	۴/۴۱ × ۲/۶۴
2425	۱۱/۰۷	۲/۰۰	۴/۴۸ × ۲/۶۹
مشخصات سد			
نام سد	سطح مقطع تخلیه کننده (m ²)	ارتفاع سد (m)	حداکثر دبی عبوری از تخلیه کننده سد (m ³ /s)
1012	۸۷۳	۲۳/۰۵	۱۸۵/۴۱
هزینه کل اجرایی (میلیون ریال)		شرح عملیات	
۲۸۶۹/۲۶		کانال	
۹۹۰۱/۲۲		سد	
۱۲۷۷۰/۴۸		جمع کل	

۸- نتیجه گیری

نتایج ارائه شده نشان می‌دهد که GA نوعی روش بهینه‌سازی قوی و قابل تلفیقِ مطلوب با شبیه‌سازهای هیدرولیکی نظیر SWMM بوده و تلفیق آن با SWMM می‌تواند مدل‌های قوی و کارایی را برای طراحی بهینه سیستم‌هایی مشابه سیستم ارائه شده در این مقاله به وجود آورد. در استفاده از مدل‌هایی که در آنها از GA به‌عنوان بهینه‌ساز استفاده می‌شود، انتخاب مناسب پارامترهایی مانند احتمال آمیزش، احتمال جهش، استفاده یا عدم استفاده از نخبه‌گرایی و انتخاب روش تعیین جمعیت، به نوع متغیرها (پیوسته یا گسسته)، تعداد متغیرها و مانند آن بستگی دارد. در این مقاله، برای کاستن از حجم کار، فرضها و محدودیتهایی در طراحی در نظر گرفته شده است. یکی از فرضها این است که مقاطع تعریف شده برای کانالها، منحصر به مقاطع مستطیلی است. اما شبیه‌ساز این قابلیت را دارد که شکلهای مختلف هندسی مانند مثلث و ذوزنقه را نیز به‌عنوان مقطع کانال در نظر گیرد. همچنین در این مقاله سیستم کنترل سیلاب، فقط به سدهای تأخیری و کانال‌های هدایت آب محدود شده است؛ در حالی که با توجه به قابلیت‌های SWMM، می‌توان پخش سیلاب را نیز در کنترل سیلاب دخیل کرد.

به‌منظور توسعه مدل می‌توان از سدهای صرفاً تأخیری - که فقط جنبه کنترل سیلاب دارند - فراتر رفته و سدهای مخزنی را نیز (که به دو منظور ذخیره آب و کنترل سیلاب احداث می‌شوند) مدل کرد. طراحی سیستم سازه‌ای، با در نظر گرفتن سیستم مدیریتی، از ابعاد و اندازه‌های سیستم سازه‌ای کاسته و هزینه‌ها را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد. برای مثال می‌توان با استفاده از دریچه‌های کنترل شده و قابل تنظیم برای تخلیه‌کننده سد، ارتفاع سد را برای سیل دلخواه مشخص کاهش داد. اما با توجه به اینکه سدهای تأخیری سدهای نسبتاً کوچکی هستند که معمولاً پس از احداث به

حال خود رها می‌شوند و توجیه اقتصادی برای اعمال روشهای مدیریتی و کنترل دائمی ندارند، از این قاعده مستثنی هستند. اما با اتخاذ تدابیر مناسب می‌توان نوعی مدیریت خودکار را برای این نوع سازه‌ها اعمال کرد. به‌عنوان مثال می‌توان دو تخلیه‌کننده در ترازهای مختلف سد در نظر گرفت، به طوری که تخلیه‌کننده پایینی پس از بالا آمدن ارتفاع مشخصی از آب روی آن، بسته شده و پس از آن، جریان ورودی به مخزن، فقط از تخلیه‌کننده بالایی خارج شود. این سبب می‌شود که هد آب در تراز تخلیه‌کننده کاهش یافته و مانع از بزرگ شدن بیشینه جریان خروجی از تخلیه‌کننده شود. در نتیجه با توجه به سطح مقطعی که برای تخلیه‌کننده‌ها انتخاب می‌شود ارتفاع سد یا ابعاد کانال‌های پایین دست آن کاهش خواهد یافت.

۸- فهرست علائم

b_i	عرض کانال در شاخه i
d_i	ارتفاع کانال در شاخه i
\bar{Z}_{1i}	متوسط عمق خاکبرداری در شاخه i
\bar{Z}_{2i}	متوسط ارتفاع خاکریزی در شاخه i
L_i	طول شاخه i
Hd_i	ارتفاع سد i
V_i	سرعت جریان در کانال i
V_{Min}	حداقل سرعت مجاز جریان در کانال
V_{Max}	حداکثر سرعت مجاز جریان در کانال
S_i	شیب کانال i
S_{Min}	حداقل شیب مجاز کانال
Q_i	دبی ورودی به شاخه i
q_i	ظرفیت عبور جریان شاخه i
$diff 1_i$	حداکثر عمق خاکبرداری در شاخه i
$diff 2_i$	حداکثر عمق خاکریزی در شاخه i
$diff 1_{Max}$	حداکثر عمق مجاز خاکبرداری در کانال
$diff 2_{Max}$	حداکثر عمق مجاز خاکریزی در کانال

Franchini, M. (1996). "Use of a Genetic Algorithm Combined with a Local Search Method for the Automatic Calibration of Conceptual Rainfall-Runoff Models", J. Hydro. Sci., 41(1), pp. 21-40.

Keedwell. E. and Khu. S, (2005), "A hybrid genetic algorithm for the design of water distribution networks", Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol:18, pp. 461-472.

Mckinney, D. C., and Lin, M. D. (1994). "Genetic Algorithm Solution of Groundwater Management Models", Water Resources Research, 30(6), pp. 1879-1906.

Morley, M.S., Atkinson, R.M, Savic, D.A, and Walters, G.A, (2001), "Genetic algorithm platform for pipe network optimization", Advanced in Engineering Software, Vol: 32, pp. 467-475.

MUNICH, RE., (1998), Topics, Annual Review of Natural Catastrophes.

Murphy, L. J., Simpson, A. R., and Dandy G. C. (1993). "Design of a Network Using Genetic Algorithms", Water, 20, pp. 40-42.

Oliveira, R., and Loucks, D. P. (1997). "Operating Rules for Multireservoir Systems", Water Resources Research, 33(4), pp. 839-852.

Simpson, A. R., Dandy G. C., and Murphy, L. J. (1994). "Genetic Algorithms Compared with Other Techniques for Pipe Optimization", Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, 120(4), pp. 423-443.

Ritzel, B. J., Eheart, J. W., and Rajithan, S. (1994). "Using Genetic Algorithms to Solve a Multiple Objective Groundwater Pollution Problem", Water Resources Research, 30(5), pp. 1598-1603.

Wang Q. J. (1991). "The Genetic Algorithm and Its Application to Calibrating Conceptual Rainfall-Runoff Models", Water Resource Research, R.,27(9), pp. 2467-2471.

H_i	تراز آب در گره i (گره بالا دست)،
H_j	تراز آب در گره j (گره پایین دست)،
Lb	طول خاکبرداری شده
Lr	طول خاکریزی شده
Eb	متوسط عمق خاکبرداری در طول خاکبرداری شده
Er	متوسط ارتفاع خاکریزی در طول خاکریزی شده
n	تعداد سدها
m	مجموع تعداد شیب شکن ها و کانال ها

۹- منابع

سادات دربندی، احمد علی، "طراحی بهینه شبکه جمع آوری آبهای سطحی با استفاده توأم از الگوریتم ژنتیک و ماجول SWMM-Transport"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۸۱.

مهندسین مشاور بندآب، "مطالعات مرحله یکم طرح مهار و دفع سیلاب مجتمع عسلویه"، نشریه شماره ۳۲۵ و ۳۳۵، بهمن ماه ۱۳۸۰.

Dandy, G. C., Simpson, A. R., and Murphy, L. J. (1996). "An Improved Genetic Algorithm for Pipe Network Optimization", Water Resources Research, 32(2), pp. 449-458.

Davidson, J. W., and Goulter I. C. (1995). "Evolution Program for the Design of Rectilinear Branched Distribution Systems", Journal of Computer in Civil Engineering, ASCE, 9(2), pp. 112-121.

East, V., and Hall, M. J. (1994). "Water Resources System Optimization Using Genetic Algorithms", Hydro informatics 94, Proc., 1st Int. Conf. on Hydro informatics, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp. 225-231.

Fahmy, H. S., King, J. P., Wentzel, M. W., and Seton, J. A., (1994). "Economic Optimization of River Management Using Genetic Algorithms", Paper No. 943034, ASAE 1994 Int. Summer Meeting, American Society of Agricultural Engineers, ST Joseph, Mich.