Arshive of SID

تحقیقات آب و خاک ایران، دورهٔ ۴۷، شمارهٔ ۴، زمستان ۱۳۹۵ (ص ۸۴۸-۸۳۹)

بهینه‌سازی مقطع سد انحرافی بر اساس الگوریتم ژنتیک

سمیرا یوسفی[۱]، محمدمهدی حیدری[۲*]، محمدحسین ادیب راد[۳]

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد،گروه مهندسی آب دانشگاه رازی

۲. استادیار، گروه مهندسی آب پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی

۳. استادیار، گروه مهندسی آب پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۱/۱۱- تاریخ تصویب: ۱۳۹۵/۳/۲۴)

چکیده

سدهای انحرافی به‌منظور بالا بردن تراز سطح آب رودخانه و انتقال آب به کانال اصلی شبکه‌های آبیاری طراحی می‌شوند. در صورتی که ابعاد قسمت‌های مختلف سد انحرافی در طراحی بزرگ در نظر گرفته شود، پایداری آن تأمین شده اما به دلیل افزایش حجم مصالح مورداستفاده، هزینه احداث آن بیشتر می‌شود. بنابراین مهندس طراح باید مقطع سدی را انتخاب کند که کمترین حجم مصالح به‌کاررفته را داشته باشد و در ضمن پایدار نیز باشد. مقطع بهینه سد انحرافی را می‌توان با استفاده از روش‌های کلاسیک و هوشمند به دست آورد. هدف از این پژوهش ارائه مدل کامپیوتری بر اساس الگوریتم ژنتیک برای طراحی بهینه ابعاد سد انحرافی می‌باشد که علاوه بر رعایت ضوابط و قوانین طراحی، کمترین حجم مصالح مورداستفاده را داشته باشد. متغیرهای تصمیم مورداستفاده در بهینه‌سازی مقطع سد انحرافی شامل ارتفاع دیواره آب‌بند بالادست و پایین‌دست سد، شیب بدنه در بالادست، ضخامت حوضچه آرامش، ضخامت کف بند بتنی و طول کف بند بتنی بالادست است. تابع هدف نیز حداقل کردن حجم مصالح مورداستفاده و قیدهای طراحی شامل رعایت ضرایب اطمینان پایداری سد در مقابل آبشستگی، لغزش، واژگونی و گسیختگی خاک می‌باشد. در این مطالعه، ابتدا برنامه بهینه‌سازی مقطع سد انحرافی با استفاده از الگوریتم ژنتیک به زبان ویژوال‌بیسیک تهیه شد و سپس مقطع سد انحرافی نازلیان با استفاده از مدل بازطراحی و با مقطع اجراشده، مقایسه گردید. نتایج نشان می‌دهد در صورت استفاده از الگوریتم ژنتیک در طراحی سد انحرافی نازلیان برای ضریب واژگونی مجاز ۲/۱ حدود ۱۵/۴ درصد حجم مصالح کاهش می‌یافت و ازلحاظ اقتصادی مقرون به صرفه‌تر طراحی می‌شد. همچنین مقدار مناسب برای تعداد نسل، اندازه جمعیت، احتمال تزویج و احتمال جهش برای بهینه‌سازی سد انحرافی به ترتیب ۱۰۰، ۳۰، ۰/۵۵ و ۰/۰۵ تعیین شد.

واژه‌های کلیدی: سد نازلیان، ضرایب اطمینان پایداری، تابع جریمه، عملگرهای ژنتیکی

مقدمه

سدهای انحرافی یکی از مهم‌ترین سازه‌های آبی می‌باشند که برای تنظیم سطح آب و انحراف جریان از رودخانه به طرف دهانه آبگیر مورد استفاده قرار می‌گیرند. با توجه به اینکه ابعاد اجزای مختلف آن نسبتاً بزرگ است، هزینه احداث آن نیز قابل‌ملاحظه می‌باشد. بنابراین لازم است ملاحظات دقیق در طراحی هیدرولیکی و سازه‌ای اجزا مختلف آن به‌منظور ارائه بهترین گزینه به عمل آید. طراحی سد انحرافی شامل دو مرحله اصلی است، مرحله اول شامل طراحی هیدرولیکی سرریز، نوع و مشخصات حوضچه آرامش و رقوم کف آن است. برای انجام محاسبات هیدرولیکی نیاز به دبی طرح، رقوم کف رودخانه، رقوم سطح آب موردنیاز شبکه آبیاری و طول سرریز می‌باشد. مرحله دوم شامل بررسی پایداری سد انحرافی است، در این مرحله با فرض کردن مقادیری برای ارتفاع دیواره آب‌بند بالادست و پایین‌دست، شیب وجه بالادست سد، کف بند بتنی و ضخامت کف حوضچه آرامش به بررسی پایداری سد از لحاظ لغزش، واژگونی، آبشستگی و گسیختگی پی پرداخته می‌شود. حجم مصالح مورداستفاده و پایداری سد به فرضیاتی که طراح در مرحله‌ی دوم به‌کاربرده است، بستگی دارد. محاسبات طراحی سد انحرافی بسیار زیاد و زمان‌بر است و علاوه بر دانش و تجربه کافی در طراحی سد انحرافی نیاز به حوصله زیادی در انجام محاسبات دارد. بر این اساس طراح غالباً دو یا سه مرتبه فرضیات استفاده‌شده را تغییر و محاسبات هیدرولیکی و پایداری سد را انجام می‌دهد و از بین آن‌ها طرحی که سد انحرافی پایدار است و کم‌ترین حجم بتن‌ریزی را دارد، انتخاب می‌کند. با توجه به هزینه بالای احداث سدهای انحرافی و عدم امکان انتخاب ابعاد

* نویسنده مسئول: mm.heidari@razi.ac.ir

www.SID.ir

Arshive of SID

بهینه سد انحرافی به‌صورت دستی، نیاز به توسعه یک مدل به‌منظور طراحی بهینه اجزای مختلف سد انحرافی می‌باشد که گزارش‌های طراحی هیدرولیکی و محاسبات پایداری سد را نیز در اختیار طراح قرار دهد. مقطع بهینه سد انحرافی را می‌توان با استفاده از روش‌های کلاسیک و هوشمند به دست آورد. طولانی بودن زمان اجرای برنامه و پیدا کردن نقاط بهینه موضعی به‌جای نقاط بهینه سراسری از معایب روش کلاسیک است. روش‌های غیر کلاسیک در مسایلی مورداستفاده قرار می‌گیرد که تابع هدف در آنها ناپیوسته و یا مشتق ناپذیر و نیز در مسایلی که توابع آنها مشتق‌پذیر است اما تعیین حد نهایی آن پیچیده می‌باشد. در روش‌های هوشمند که الگوریتم ژنتیک یکی از این روش‌هاست، نیاز به داشتن رابطه‌ی صریح بین تابع هدف و متغیرهای تصمیم نبوده و سرعت همگرایی بالایی برای رسیدن به نقاط بهینه سراسری دارند.

Simoes and Lapa (1994) با در نظر گرفتن وزن سد به‌عنوان تابع هدف و با استفاده از الگوریتم برنامه‌ریزی درجه دوم به بهینه‌سازی شکل سد وزنی تحت تأثیر نیروهای استاتیکی و دینامیکی پرداختند، نتایج آن‌ها نشان داد در صورت استفاده از الگوریتم ارائه‌شده، ۱۳ درصد حجم بتن‌ریزی در مثال موردبررسی آنها کاهش می‌یابد. Amiri Tokaldany (1996) نرم‌افزار TABDAM را در محیط Dos برای طراحی هیدرولیکی سد انحرافی و تحلیل پایداری آن توسعه داد، مدل کامپیوتری مزبور قادر است بهینه‌ترین مقطع سد را با استفاده از روش کلاسیک انتخاب کند. در این مدل تمام احجام خاکبرداری، خاکریزی، بتن‌ریزی و غیره محاسبه و بر اساس فهرست‌بهای ابنیه ساختمانی، هزینه اجرای سد محاسبه و ابعادی از سد که کمترین هزینه را داشته باشد، انتخاب می‌شود. ورودی و خروجی‌های این برنامه به‌صورت فایل متنی است و کار کردن با این نرم‌افزار وقت‌گیر و سخت است. Heidari (2006) ضمن به‌روز رسانی مدل کامپیوتری TABDAM زیر برنامه‌های طراحی هیدرولیکی دهانه آبگیر، مجرای تخلیه رسوب و حوضچه ترسیب را به آن اضافه کرد. با توجه به آنکه مدل کامپیوتری TABDAM از روش کلاسیک برای بهینه‌سازی استفاده می‌کند، ممکن است نقطه بهینه موضعی به‌جای نقطه بهینه سراسری انتخاب شده باشد و ابعاد سد به‌صورت دقیق بهینه نباشد.

Wu *et al* (2008)با ترکیب الگوریتم هوش تجمعی[1] (PSO) و برنامه ANSYS به بهینه‌سازی مقطع سد وزنی تحت بارگذاری استاتیکی پرداختند. انتخاب پارامترها در الگوریتم PSO موضوع بسیار مهمی در همگرایی و نتایج حاصل از آن است و ترکیب مختلف از پارامترهای پیشنهادی را می‌توان ارزیابی کرد. (2010) Lin *et al* با ترکیب الگوریتم ژنتیک با برنامه ANSYS به بهینه‌سازی مقطع سد وزنی تحت بارگذاری استاتیکی پرداختند و نشان دادند که انتخاب بهترین مقادیر عملگرها در این روش دقت محاسبات را افزایش خواهد داد. Qi (2012) به‌منظور بهینه‌سازی مقطع سد وزنی مدلی را با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی غیرخطی در محیط برنامه‌نویسی C تهیه کرد، متغیرهای تصمیم شامل شیب سد در بالادست، پایین‌دست و عرض کف سد می‌باشد. تابع هدف در مدل کاهش حجم مصالح و گسیختگی پی و ضریب اطمینان در مقابل لغزش به‌عنوان قید پایداری در نظر گرفته شده است. مدل ایشان برای یک سد وزنی حدود ۱۵ درصد کاهش حجم را همراه داشت. لازم به ذکر است ضریب اطمینان در مقابل واژگونی و آبشستگی در نظر گرفته نشده است. Aslani *et al* (2013) از الگوریتم ژنتیک برای به دست آوردن مقطع و ابعاد بهینه سد وزنی استفاده کردند و مقادیری را برای پارامترهای الگوریتم ژنتیک پیشنهاد نمودند. ایشان یک رابطه ریاضی ساده برای محاسبه وزن و حجم بتن‌ریزی در نظر گرفت و حداقل کردن تابع ریاضی مربوطه را به‌عنوان تابع هدف در نظر گرفته شد. برای بهینه‌سازی سد انحرافی تا به امروز از الگوریتم هوشمند استفاده نشده است و بیشتر تحقیقات گذشته مربوط به بهینه‌سازی سدهای ذخیره‌ای وزنی است. در تمام تحقیقات قبلی با در نظر گرفتن شکل ساده برای سد وزنی، تابع هدف که عمدتاً حجم بتن‌ریزی است بر اساس یک رابطه ریاضی ارائه شده و متغیرهای طراحی به‌طور مستقیم در تابع هدف وجود دارد. اما در سد انحرافی به دلیل نامنظم بودن شکل مقطع و وجود پروفیل اوجی شکل تابع هدف به‌صورت یک تابع ریاضی بیان نمی‌شود. همچنین متغیرهای تصمیم در بهینه‌سازی سد انحرافی به دلیل وجود دیواره‌های آب‌بند بالادست و پایین‌دست، حوضچه آرامش و کف‌بند بتنی بالادست بیشتر از سدهای ذخیره‌ای وزنی است و بهینه‌سازی آن به‌مراتب مشکل‌تر می‌باشد. با توجه به گزینه‌های متعدد برای شکل مقطع سد و طولانی بودن محاسبات طراحی، تهیه‌ی یک مدل کامپیوتری که بتواند ضمن طراحی هیدرولیکی سد و انجام محاسبات پایداری، بهترین شکل مقطع سد را طوری انتخاب کند که کمترین حجم بتن‌ریزی را داشته و در ضمن پایدار نیز باشد، ضروری است. هدف از این پژوهش توسعه مدلی برای طراحی هیدرولیکی و انجام محاسبات پایداری سد انحرافی و نشان دادن کارایی الگوریتم فراکاوشی ژنتیک برای طراحی بهینه اجزای سد می‌باشد.

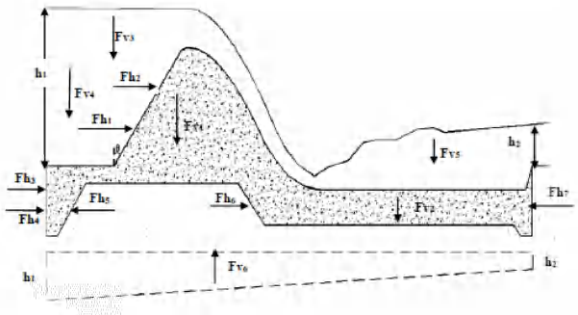
1. Particle swarm optimization

www.SID.ir

Arshive of SID

مواد و روش

داده‌های اساسی موردنیاز برای طراحی سد انحرافی شامل دبی طراحی، تراز سطح آب موردنیاز دهانه آبگیر و در پایین‌دست سد، رقوم کف رودخانه، خصوصیات ژئوتکنیکی و فیزیکی مصالح و ضرایب اطمینان مجاز ایمنی سد است. با استفاده از دبی طراحی و بر اساس گراف‌های ارائه‌شده، ضریب دبی و عمق جریان روی سرریز محاسبه می‌شود، سپس بر اساس آن معادله منحنی سرریز در قسمت اوجی شکل، شعاع قسمت دایره‌ای شکل بالادست سرریز، شعاع انحناء محل تقاطع قسمت پایین‌دست سد با کف حوضچه آرامش تعیین می‌شود. نوع حوضچه آرامش، طول، تراز کف حوضچه و دیگر مشخصات آن با اصلاح سرعت در پنجه سرریز تعیین می‌شود. پس از طراحی هیدرولیکی سد، لازم است مقطع سازه به‌گونه‌ای در نظر گرفته شود که در برابر پدیده‌هایی نظیر آبشستگی، لغزش، واژگونی و گسیختگی خاک ایمن باشد. به‌منظور بررسی پایداری سد در شرایط مختلف باید نیروهای وارد بر سد محاسبه شود، نیروهای وارد بر سد شامل نیروهای محرک و مقاوم می‌باشد. این نیروها شامل نیروی وزن جسم سد، Fv_1، نیروی وزن حوضچه آرامش، Fv_2، نیروی وزن آب روی کف بند بتنی بالادست، Fv_3، نیروی عمودی رسوبات ته‌نشین شده در بالادست سد، Fv_4، نیروی وزن آب در حوضچه آرامش، Fv_5، نیروی زیر فشار، Fv_6، نیروی افقی فشار آب وارد بر بدنه سد، Fh_1، نیروی افقی فشار رسوبات در بالادست سد، Fh_2، نیروی فشار آب وارد بر آب‌بند بالادست، Fh_3، نیروی محرک خاک وارد بر آب‌بند بالادست، Fh_4، نیروی مقاوم خاک وارد بر آب‌بند بالادست، Fh_5، نیروی محرک خاک وارد بر آب‌بند پایین‌دست، Fh_6، نیروی مقاوم خاک وارد بر آب‌بند پایین‌دست، Fh_7، نیروی زلزله ناشی از اینرسی جسم سد، Fh_8، اضافه فشار آب ناشی از زلزله، Fh_9، و اضافه فشار محرک مصالح کف رودخانه ناشی از زلزله، Fh_{10}، می‌باشد. در شکل (۱) تعدادی از نیروهایی وارد بر سد نشان داده شده است.



شکل ۱. نیروهای وارد بر سد انحرافی

مدل کامپیوتری با محاسبه ضرایب پایداری سد و مقایسه با ضرایب ایمنی مجاز در شرایط نرمال و سیلابی، در صورت لزوم نسبت به تقویت مقطع از طریق افزایش طول کف بند بتنی، افزایش عمق آب‌بندهای بالادست و پایین‌دست، کاهش شیب وجه بالادست سد، افزایش ضخامت کف حوضچه آرامش اقدام می‌کند. محاسبات تا آنجا ادامه می‌یابد که مقطع به‌دست‌آمده کم‌ترین حجم بتن‌ریزی را داشته و در عین حال در مقابل لغزش، واژگونی، گسیختگی پی و آبشستگی پایدار باشد. در شکل (۲) مراحل تعیین مقطع بهینه سد انحرافی با استفاده از الگوریتم ژنتیک آورده شده است.

اجزای بهینه‌سازی

متغیرهای تصمیم‌گیری، قیدها و تابع هدف اجزای اصلی هر مسئله بهینه‌سازی می‌باشد. متغیرهای تصمیم در طراحی سد انحرافی شامل ارتفاع دیواره آب‌بند بالادست و پایین‌دست سد (H_1 و H_2)، شیب بدنه در بالادست (θ)، ضخامت حوضچه آرامش (T_2)، ضخامت کف بند بتنی در بالادست (T_1)، طول کف بند بتنی بالادست (L_1) می‌باشد. لازم به ذکر است شیب بدنه در بالادست از نوع متغیر گسسته است و می‌تواند عمودی، ۳:۱ (۱ افقی به ۳ عمودی)، ۳:۲ و ۳:۳ باشد. در شکل (۳) نمایی از متغیرهای طراحی نشان داده شده است.

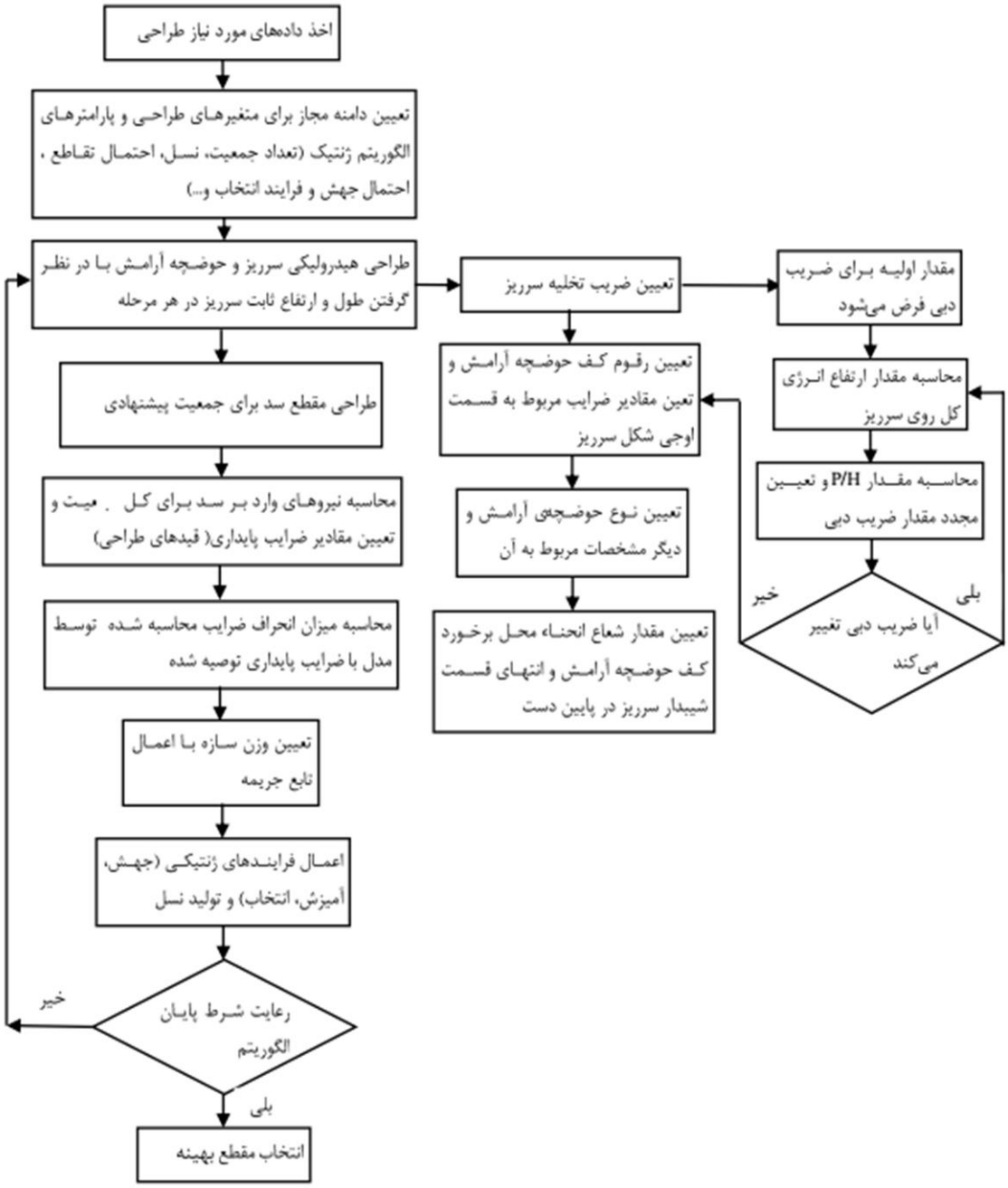
هزینه احداث سد رابطه مستقیم با حجم مصالح و وزن بتن‌ریزی دارد. بنابراین حداقل کردن وزن سد هدف بهینه‌سازی در طراحی سد انحرافی است. در طراحی سدهای انحرافی علاوه بر طراحی هیدرولیکی، بعضی متغیرهای اصلی و یا روابط بین آن‌ها نباید از حد مجاز بیشتر باشد، به این منظور قیود طراحی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این قیود تعیین‌کننده شرایط مرزی مربوط به عوامل مختلف مسئله است. روش‌های مختلفی برای اعمال قیدهای طراحی وجود دارد که یکی از آن‌ها استفاده از تابع جریمه است. با استفاده از تابع جریمه می‌توان تابع هدفی که مقید است به مسئله نامقید تبدیل کرد. محققین متعددی برای جریمه کردن تابع هدف روش‌هایی را پیشنهاد داده‌اند، در این پژوهش از روش Rajeev and Krishnamoorthy (1992) استفاده و تابع هدف به‌صورت رابطه ۱ در نظر گرفته شده است:

$$\text{Maximize}: OF = \frac{1}{W\left(1 + K\sum_{i=1}^{i=n} C_i\right)} \qquad \text{(رابطه ۱)}$$

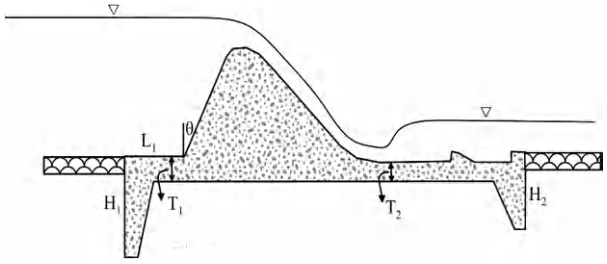
که در آن OF تابع هدف برحسب متر بر تن، W وزن بتن‌ریزی سد برحسب تن بر متر، $\sum C_i$ مجموع تجاوز از قیدها (درصورتی‌که قید رعایت شود صفر است)، n تعداد قیدها و K ضریب جریمه است که با توجه به شرایط مسئله تعیین می‌شود، در این پژوهش با استفاده از تحلیل حساسیت ۲۵ محاسبه گردید.

www.SID.ir

Arshive of SID



شکل ۲. تعیین مقطع بهینه سد انحرافی با استفاده از الگوریتم ژنتیک



شکل ۳. متغیرهای تصمیم‌گیری در طراحی بهینه مقطع سد انحرافی با الگوریتم ژنتیک

قید ضریب اطمینان پایداری در مقابل لغزش[1] که مقدار آن برای پایداری سدهای انحرافی باید بیش از مقدار مجاز در شرایط نرمال و سیلابی باشد، به‌صورت رابطه ۲ برای مدل در نظر گرفته شده است (USBR,1976):

$$\text{Subject to}: SF_s - SF_{cs} \geq 0$$

$$SF_s = \frac{CA + \tan\phi \sum F_V}{\sum F_H} \qquad \text{(رابطه ۲)}$$

1. Sliding

www.SID.ir

Arshive of SID

که در آن، $\sum F_V$ و $\sum F_H$ به ترتیب برآیند نیروهای عمودی و افقی وارد بر سد برحسب تن، C و ϕ به ترتیب ضریب چسبندگی برحسب تن بر مترمربع و زاویه اصطکاک داخلی خاک، A سطح مقطع تماس پی و کف سد برحسب مترمربع، SF_s ضریب اطمینان در مقابل لغزش و SF_{cs} ضریب اطمینان مجاز است.

قید ضریب اطمینان پایداری در مقابل واژگونی[1] یکی دیگر از قیدهای بهینه‌سازی ابعاد سد انحرافی است که مقدار آن برای پایداری باید بیش از مقدار مجاز باشد. این قید به‌صورت رابطه ۳ برای مدل در نظر گرفته شده است (USBR,1976):

$$\text{Subject to}: SF_o - SF_{os} \geq 0$$

$$SF_o = \frac{\sum M_r}{\sum M_d} \qquad \text{(رابطه ۳)}$$

در این رابطه، $\sum M_r$ و $\sum M_o$ به ترتیب مجموع گشتاور نیروهای مقاوم و محرک برحسب تن متر، SF_o ضریب اطمینان پایداری و SF_{os} ضریب اطمینان مجاز در برابر واژگونی است.

برای جلوگیری از تخریب و گسیختگی پی سد انحرافی باید تنش‌های ایجادشده در مصالح پی از ظرفیت باربری مجاز خاک کمتر باشد. قید مربوط به گسیختگی پی سد به‌صورت رابطه ۴ در مدل وارد شده است (USBR,1976):

$$\text{Subject to}: SF_p - SF_{ps} \geq 0$$

$$SF_p = \frac{P_c}{P_{max}} \qquad \text{(رابطه ۴)}$$

$$P_{max} = \frac{R}{B}\left(1 \pm \frac{6e}{B}\right),\ e = \frac{B}{2} - \frac{\sum M}{R}$$

در رابطه فوق، P_{max} حداکثر تنش وارد بر مصالح پی برحسب تن بر مترمربع، P_c فشار مجاز وارد بر مصالح پی برحسب تن بر مترمربع، R برآیند نیروهای قائم وارد بر سد برحسب تن، B عرض کف سد برحسب متر، $\sum M$ برآیند گشتاور حول محور دوران برحسب تن متر، e خروج از مرکز تنش‌های وارده بر سد برحسب متر، SF_p ضریب اطمینان در مقابل گسیختگی و SF_{ps} ضریب اطمینان مجاز در مقابل گسیختگی است.

اختلاف تراز سطح آب بین بالادست و پایین‌دست سد و همچنین نفوذپذیری مصالح پی باعث ایجاد جریان تراوشی از زیر سد انحرافی می‌شود. چنانچه گرادیان هیدرولیکی از مقدار بحرانی بیشتر باشد، پدیده آبشستگی اتفاق می‌افتد. به‌منظور بررسی پدیده آبشستگی پی سد انحرافی می‌توان از روش لین و یا بلای استفاده نمود. قید گرادیان هیدرولیکی خروجی[2] که مقدار آن باید کمتر از مقدار بحرانی باشد، به‌صورت رابطه ۵ تعریف می‌شود (Lane,1934):

$$\text{Subject to}: SF_i - SF_{is} \geq 0$$

$$SF_i = \frac{L_w}{\Delta H} \qquad \text{(رابطه ۵)}$$

که در آن SF_i و SF_{is} به ترتیب ضریب اطمینان واقعی و مجاز سد در مقابل آبشستگی است. ضریب اطمینان مجاز در مقابل آبشستگی به جنس و بافت مصالح پی بستگی دارد، در روابط فوق، L_W طول خزش برحسب متر و ΔH اختلاف تراز سطح آب در بالا و پایین‌دست سد برحسب متر است.

الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک

یکی از روش‌های هوشمند در مسائل بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک است. این الگوریتم مبتنی بر تکرار است و اصول اولیه آن از علم ژنتیک اقتباس شده و با تقلید از فرایندهای مشاهده‌شده در تکامل طبیعی توسعه یافته است. الگوریتم ژنتیک با استفاده از قوانین موجود در علم ژنتیک مانند انتخاب[3]، تزویج[4] و جهش[5] از یک نسل (جواب‌های ممکن مسئله) به تولید فرزندان با خصوصیت بهتر (جواب‌های نزدیک‌تر به هدف مسئله) می‌پردازد. در فرایند تکامل طبیعی، یک جامعه اولیه از موجودات وجود دارند که زوج‌های آن به‌صورت تصادفی با یکدیگر تلاقی نموده و با ترکیب کروموزوم‌ها تولید مثل کرده و نسل بعدی را ایجاد می‌کنند. با توجه به اصل بقای بهترین، نسل‌های بعدی شایستگی بالاتری (نزدیک‌تر بودن به هدف) خواهند داشت. در الگوریتم ژنتیک هر یک از جواب‌های ممکن مسئله به‌وسیله رشته‌های عددی در سیستم دودویی یا سیستم‌های دیگر رمزگذاری می‌شود که هر یک از آن‌ها یک کروموزوم نامیده می‌شوند. هر کروموزم شامل تعدادی ژن صفر و یک است که بیان‌کننده مقادیر متغیرهای تصمیم‌گیری مسئله می‌باشد. تعداد ژن‌هایی که برای کدگذاری متغیرهای تصمیم در نظر گرفته می‌شود به‌دقت لازم برای محاسبه آن‌ها و محدوده انتخاب متغیرها بستگی دارد (Goldberg,1989).

در این تحقیق تعداد ژن‌ها برای تمامی متغیرها ثابت و برابر ۲۰ در نظر گرفته شد. در جدول (۱) نمونه‌ای از یک کروموزوم مورداستفاده در تحقیق حاضر آورده شده است، در این کروموزوم متغیرها به‌صورت سری قرار گرفته و از ۱۲۰ ژن تشکیل شده است.

1 Overturning

2 Exit hydrulic gradient
3. Selection
4. Cross over
5. Mutation

www.SID.ir

Arshive of SID

جدول ۱. نمونه‌ای از کروموزوم مورداستفاده در مسئله بهینه‌سازی ابعاد سد انحرافی

۲۰ ژن ششم	۲۰ ژن پنجم	۲۰ ژن چهارم	۲۰ ژن سوم	۲۰ ژن دوم	۲۰ ژن اول
H_2	H_1	T_2	θ	T_1	L_1

بعد از چیدمان متغیرهای تصمیم، جمعیتی از کروموزوم‌ها به‌عنوان جمعیت اولیه در نظر گرفته‌شده و به‌صورت تصادفی ایجاد می‌گردند. کروموزوم‌ها در محدوده مسئله کدگشایی‌شده و کارایی و عملکرد برازش افراد عضو جمعیت با استفاده از تابع هدف تعیین می‌گردد. بنابراین هر عضوی از جمعیت یک مقدار برازش در تابع هدف دارد. عضوهایی که به ازای آن‌ها تابع هدف نسبت به بقیه بیشتر شود، احتمال انتخاب آن‌ها برای تولید جمعیت جدید و نسل آینده بیشتر می‌باشد. به‌منظور دست‌یابی به جواب بهینه مطلق تعدادی عملگر بر روی جمعیت اولیه اعمال می‌گردد که مهم‌ترین آن‌ها، انتخاب، تزویج، جهش و نخبه‌گرایی است. در مرحله انتخاب تعدادی جفت کروموزوم انتخاب و با هم ترکیب شده و نسل آینده را ایجاد می‌کنند. احتمال انتخاب هر عضو برای تولید نسل بعدی بستگی به میزان برازش آن عضو در تابع هدف دارد. انتخاب باید به‌گونه‌ای صورت گیرد که هر نسل جدید نسبت به نسل قبلی‌اش تطابق میانگین بهتری داشته باشد. عملگر تزویج اصلی‌ترین عملگر الگوریتم ژنتیک است که برای تولید کروموزوم‌ها یا اعضای جدید به کار می‌رود. تزویج با تعویض ژن‌ها بین دو کروموزوم انجام می‌گیرد و هر کدام از کروموزوم‌ها خصوصیاتی از خود به فرزندان انتقال می‌دهند. عملگر تزویج روی کلیه کروموزوم‌های انتخابی اعمال نشده و برای انجام این عملگر یک احتمال بین ۰/۴ تا ۰/۹ در نظر گرفته می‌شود. (Goldberg,1989). نمونه‌ای از عملگر تزویج مورداستفاده در این پژوهش در شکل (۴) آورده شده است.

محل تزویج

والد اول	۰	۱	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۱
والد دوم	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۱
فرزند اول	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۱
فرزند دوم	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۱

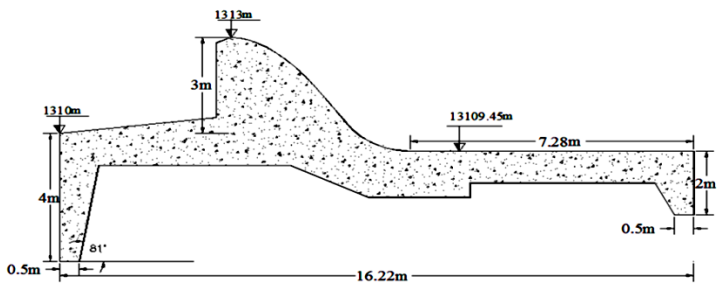
شکل ۴. نمونه‌ای از تزویج یک نقطه‌ای روی کروموزوم‌ها در الگوریتم ژنتیک

علاوه بر عملگر انتخاب و تزویج، برای دست‌یابی به بهینه کلی از عملگر جهش نیز استفاده می‌شود. در این عملگر هر ژن در هر کروموزوم در فضای انتخاب با توجه به احتمال جهش (P_m) مورد بررسی قرار می‌گیرد و در صورت کم بودن احتمال مقدار آن ژن از احتمال جهش، دچار جهش خواهد شد. به کمک این عملگر می‌توان انتظار داشت، کروموزوم‌های خوبی که در مراحل انتخاب و یا تزویج حذف شده‌اند، دوباره احیا شوند. بهترین عضو هر نسل در الگوریتم ژنتیک بدون اینکه تغییری در آن‌ها ایجاد شود، به نسل بعد منتقل می‌گردد که این پدیده نخبه‌گرایی نامیده می‌شود. لازم به ذکر است در این پژوهش در هر نسل تنها یک فرد که بیشترین برازندگی را در بین افراد همان نسل داشت به‌عنوان نخبه انتخاب و بدون تغییر به نسل بعدی منتقل شد. بعد از تولید نسل جدید، درصورتی‌که نتایج مسئله به یکی از شرایط توقف الگوریتم برسد اجرای آن پایان می‌یابد. شرایط توقف الگوریتم ژنتیک می‌تواند تعداد نسل‌های تولیدشده و یا همگرایی به جواب بهینه باشد.

در این پژوهش بعد از تهیه مدل بهینه‌سازی بر اساس الگوریتم ژنتیک در محیط برنامه‌نویسی ویژوال‌بیسیک، سد انحرافی نازلیان واقع در استان کرمانشاه به‌منظور آزمون و کاربرد مدل مورد استفاده قرار گرفت و بازطراحی شد. مشخصات عمومی سد انحرافی نازلیان در جدول (۲) و نمایی از مقطع طراحی‌شده در شکل (۵) آورده شده است.

جدول ۲. مشخصات هیدرولیکی و هندسی سد انحرافی نازلیان

ارتفاع سد (m)	طول سد (m)	دبی سیلابی (CMS)	تراز کف رودخانه (m)	طول حوضچه آرامش (m)	وزن سد در واحد طول (ton/m)
۳	۷۰	۲۶۰	۱۳۱۰	۷/۲۸	۶۸/۷۸



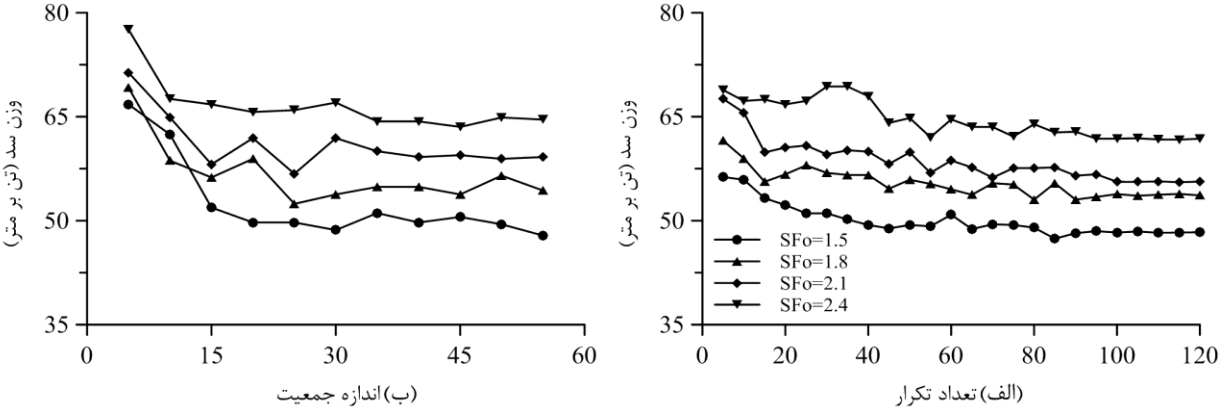
شکل ۵. مقطع طراحی‌شده سد انحرافی نازلیان واقع در استان کرمانشاه

www.SID.ir

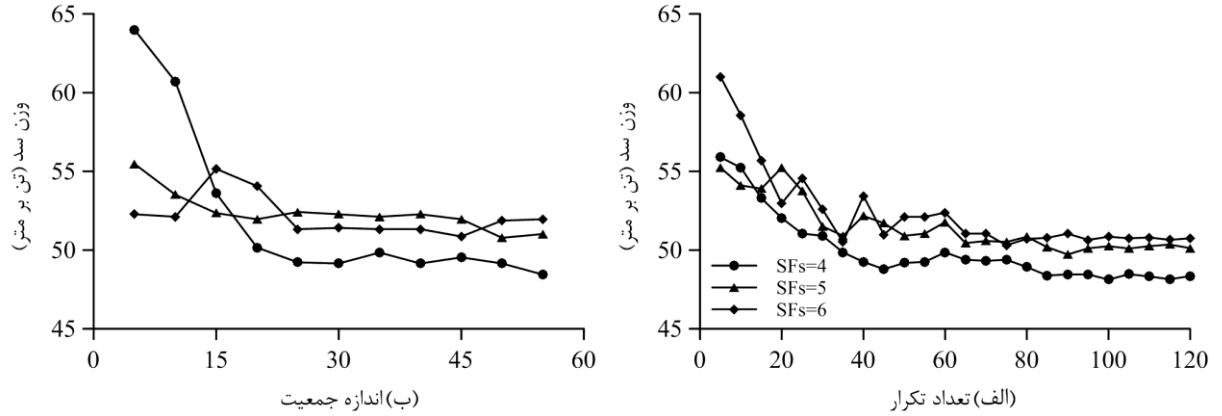
Arshive of SID

نتایج و بحث

متغیرهای ورودی مربوط به الگوریتم ژنتیک شامل تعداد نسل (تکرار)، اندازه جمعیت، احتمال تزویج و جهش می‌باشد. در هر مسئله بهینه‌سازی باید مقدار این متغیرهای ورودی با استفاده از روش تحلیل حساسیت تعیین شود. بدین منظور، در شروع انجام تحلیل حساسیت مقادیر تعداد نسل (تکرار)، اندازه جمعیت، احتمال تزویج و جهش به ترتیب ۱۲۰، ۶۰، ۰/۶ و ۰/۰۱ در نظر گرفته و برنامه اجرا شد. با تغییر دادن پارامترهای ورودی در محدوده قابل‌قبول و بررسی تأثیر آن بر جواب بهینه، مقدار ضرایب عملگرهای ژنتیکی تعیین شد. در شکل‌های (۶) و (۷) تأثیر تعداد نسل و جمعیت بر وزن بهینه سد انحرافی نازلیان به ترتیب برای مقادیر مختلف ضرایب مجاز واژگونی و لغزش آورده شده است.



شکل ۶. تأثیر تعداد تکرار و اندازه جمعیت بر وزن سد برای ضریب لغزش ۴ و مقادیر مختلف ضریب واژگونی



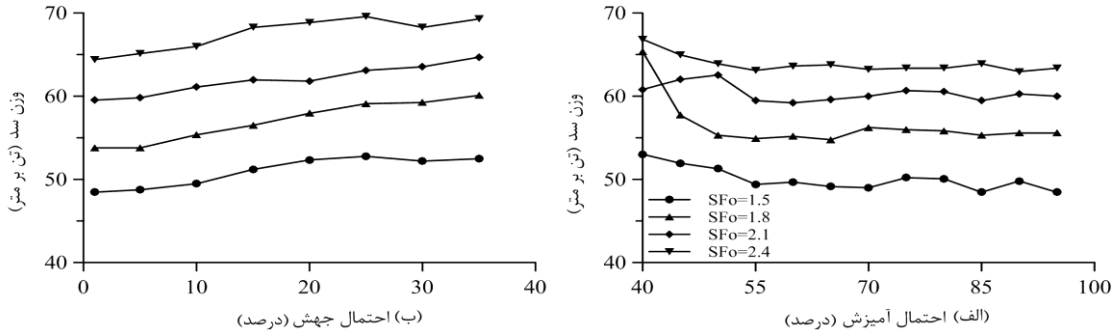
شکل ۷. تأثیر تعداد تکرار و اندازه جمعیت بر وزن سد برای ضریب واژگونی ۱/۵ و مقادیر مختلف ضریب لغزش

همان‌طور که ملاحظه می‌شود مقادیر ضریب مجاز واژگونی و لغزش تأثیر چندانی بر مقادیر نسل و جمعیت بهینه ندارد. برای تکرارهای بیشتر از ۱۰۰ و همچنین جمعیت بیش از ۳۰ وزن سد تقریباً مستقل از تعداد نسل و جمعیت می‌شود و تنها به ضریب اطمینان مجاز بستگی دارد. ضریب مجاز واژگونی، مقدار بهینه وزن سد انحرافی را بیشتر از ضریب مجاز لغزش تحت تأثیر قرار می‌دهد. به‌عبارت‌دیگر طراح باید ضریب مجاز واژگونی سد را با دقت بیشتری انتخاب کند. با افزایش ضریب مجاز واژگونی از ۱/۵ به ۲/۴ وزن بهینه سد حدود ۳۰ درصد افزایش می‌یابد. اما با افزایش ضریب مجاز لغزش از ۴ به ۶ وزن بهینه سد حدود ۵ درصد افزایش می‌یابد. شکل (۸) و (۹) تغییرات وزن بهینه سد انحرافی را نسبت به‌احتمال تزویج و جهش به ترتیب برای مقادیر مختلف ضریب مجاز واژگونی و لغزش نشان می‌دهد.

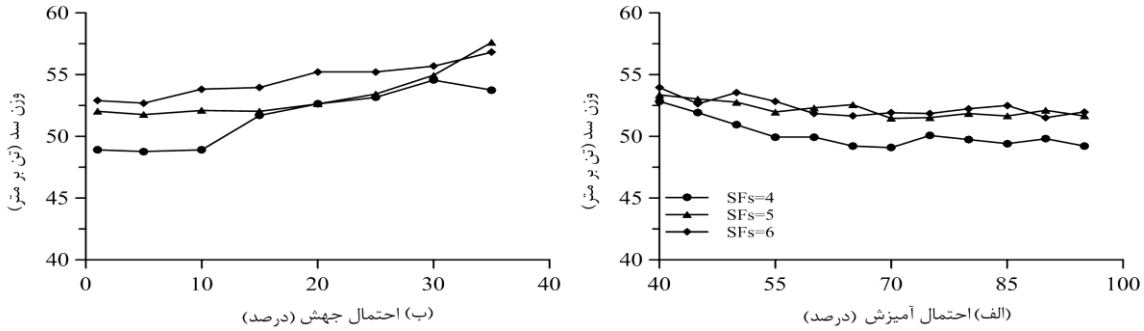
تابع هدف بهینه‌سازی مقطع سد انحرافی برای احتمال تزویج بیش از ۵۵ درصد ثابت و مستقل از آن است و تنها به ضریب اطمینان مجاز وابسته است. همچنین درصورتی‌که احتمال جهش بیشتر از ۵ درصد در نظر گرفته شود، مقدار وزن بهینه سد انحرافی نازلیان افزایش می‌یابد. در جدول (۳) مقادیر بهینه عملگرهای مختلف الگوریتم ژنتیک برای طراحی ابعاد سد انحرافی آورده شده است.

www.SID.ir

Arshive of SID



شکل ۸. تأثیر احتمال تزویج و جهش بر وزن بهینه سد نازلیان برای ضریب لغزش ۴ و مقادیر مختلف ضریب واژگونی



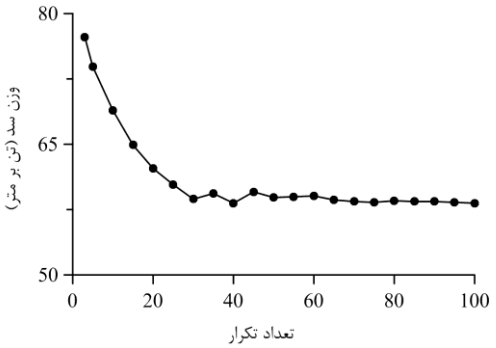
شکل ۹. تأثیر احتمال تزویج و جهش بر وزن بهینه سد نازلیان برای ضریب واژگونی ۱/۵ و مقادیر مختلف ضریب لغزش

جدول ۳. مقادیر بهینه عملگرهای الگوریتم ژنتیک در طراحی بهینه سد انحرافی

تکرار (نسل)	اندازه جمعیت	احتمال تزویج	احتمال جهش
۱۰۰	۳۰	۰/۵۵	۰/۰۵

پس از انجام تحلیل حساسیت و تعیین مقادیر بهینه عملگرهای ژنتیکی، برنامه بهینه‌سازی با اعمال نخبه‌گرایی برای سد انحرافی نازلیان مجدداً اجرا شد. در شکل (۱۰) برای ضریب مجاز واژگونی ۲/۱ و ضریب مجاز لغزش ۴ و مقادیر بهینه عملگرهای ژنتیکی، تغییرات مقدار تابع هدف برای تکرارهای مختلف و با اعمال نخبه‌گرایی آورده شده است.

وزن سد انحرافی نازلیان و مقادیر بهینه ارتفاع دیواره آب‌بند بالادست و پایین‌دست سد، شیب بدنه در بالادست، ضخامت حوضچه آرامش، ضخامت کف بند بتنی در بالادست، طول کف بند بتنی بالادست برای ضریب لغزش مجاز ۴ و ضرایب واژگونی مجاز مختلف به همراه مقادیر طراحی‌شده در جدول (۴) آورده شده است.



شکل ۱۰. مقدار وزن سد انحرافی نازلیان برای تکرارهای مختلف به ازای مقادیر بهینه عملگرهای ژنتیکی

جدول ۴. مقدار وزن سد انحرافی نازلیان و متغیرهای طراحی برای ضرایب اطمینان مجاز مختلف

ضریب واژگونی مجاز	وزن سد (تن بر متر)	شیب بالادست	H_1	H_2	L_1	T_1	T_2
۲/۴	۶۷/۵۳	عمودی	۲	۲/۲	۷	۰/۹	۱
۲/۱	۵۸/۱۳	عمودی	۱/۷۵	۱/۸۵	۳/۵۵	۰/۹۱	۱
۱/۸	۵۳/۰۴	عمودی	۱/۹۳	۱/۷۱	۱/۲۷	۰/۹۱	۱
۱/۵	۴۷/۳۶	عمودی	۱/۷۳	۱/۷۱	۰/۷	۰/۹	۱
۲/۱*	۶۸/۷۸	عمودی	۴	۲	۴	۱	۱

* بر اساس مقادیر طراحی‌شده موجود در گزارش‌های و نقشه‌های اجرایی

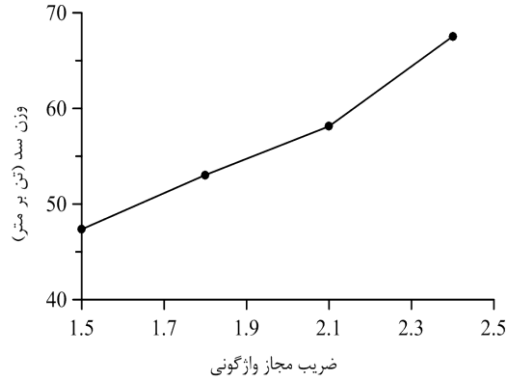
www.SID.ir

Arshive of SID

ضریب واژگونی مجاز نسبت به ضرایب دیگر تأثیر بیشتری بر وزن بهینه سد دارد، درصورتی‌که این ضریب رعایت شود ضریب لغزش نیز رعایت شده است. همچنین طول و ضخامت کف‌بند بتنی بالادست بیشترین تأثیر را بر پایداری در مقابل واژگونی دارد، به دلیل فاصله‌ای که مرکز ثقل این قسمت تا مرکز واژگونی دارد، با افزایش L_1 و یا T_1 مقدار گشتاور مقاوم و ضریب اطمینان پایداری در مقابل واژگونی افزایش می‌یابد. درصورتی‌که سد انحرافی نازلیان با استفاده از الگوریتم ژنتیک طراحی می‌شد، برای ضریب واژگونی مجاز ۲/۱ حدود ۱۵/۴ درصد معادل ۱۰/۶۵ تن در واحد طول، در مصرف بتن صرفه‌جویی می‌شد. در شکل (۱۱) تأثیر ضریب واژگونی مجاز بر وزن بهینه سد نازلیان آورده شده است.

در جدول (۵) مقادیر ضرایب اطمینان پایداری در شرایط نرمال و سیلابی برای مقطع طراحی‌شده سد انحرافی نازلیان و بهینه‌شده با استفاده از الگوریتم ژنتیک آورده شده است.

در مدل حاضر، ارتفاع دیواره آب‌بند بالادست و پایین‌دست سد، شیب بدنه در بالادست، ضخامت حوضچه آرامش، ضخامت کف بند بتنی در بالادست، طول کف بند بتنی بالادست به‌عنوان متغیرهای تصمیم در طراحی سد انحرافی در نظر گرفته شده است. با وارد کردن ارتفاع، طول و دبی طراحی سد انحرافی توسط کاربر تنها شیب بدنه در بالادست از بین متغیرهای تصمیم بر ضریب دبی و عمق آب روی تاج سرریز تأثیر دارد. با توجه به اینکه شیب بالادست مقطع طراحی و بهینه‌شده سد انحرافی نازلیان یکسان است، بنابراین مشخصات هیدرولیکی سد بر اساس مدل و نقشه‌های اجرایی با هم تطابق کامل دارد.



شکل ۱۱. تأثیر ضریب واژگونی مجاز بر وزن بهینه سد انحرافی نازلیان

جدول ۵. مقدار ضرایب اطمینان پایداری در شرایط نرمال و سیلابی

	شرایط نرمال				شرایط سیلابی			
	SF_S	SF_o	SF_p	SF_i	SF_S	SF_o	SF_p	SF_i
طراحی‌شده	>۵	۲/۱	۱/۴۷	۲/۷۱	>۵	۱/۸۱	۲/۴۵	۲/۶۱
الگوریتم ژنتیک	>۵	۲/۱	۱/۴	۱/۳۹	>۵	۱/۷	۲/۶۵	۱/۳۷

نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک مدل در محیط برنامه‌نویسی ویژوال‌بیسیک توسعه داده شد که امکان طراحی بهینه اجزای مختلف سد انحرافی با استفاده از الگوریتم ژنتیک را دارد. این مدل در مرحله طراحی به مهندس طراح کمک می‌کند تا با دقت بالایی بهترین مقطع سد را طراحی و محاسبات هیدرولیکی و پایداری سازه را ارائه نماید. برخی از ویژگی‌های این مدل شامل طراحی مناسب‌ترین مقطع برای طول انتخاب‌شده با توجه به اطلاعات محل سد و با در نظر گرفتن حالت‌های مختلف در بدنه بالادست مقطع سرریز و کنترل محاسبات پایداری سدهای احداث‌شده موجود می‌باشد. مدل توسعه‌یافته برای سد انحرافی نازلیان مورد ارزیابی قرار گرفت و با استفاده از تحلیل حساسیت تأثیر پارامترها و عملگرهای الگوریتم ژنتیک بر وزن سد انحرافی که به‌عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است مورد بررسی قرار گرفت. مقدار بهینه تعداد نسل، اندازه جمعیت، احتمال جهش و تزویج برای سد انحرافی موردنظر ۱۰۰، ۳۰، ۰/۰۵ و ۰/۵۵ تعیین گردید. با استفاده از مدل توسعه‌یافته سد انحرافی نازلیان بازطراحی شد و با در نظر گرفتن ضریب واژگونی مجاز ۲/۱ مقدار وزن بهینه سد ۵۸/۱۳ تن در واحد طول محاسبه گردید. با توجه به اینکه وزن سد انحرافی نازلیان در طراحی ۶۸/۷۸ تن در واحد طول است، درصورتی‌که با استفاده از الگوریتم ژنتیک این سد طراحی می‌شد حدود ۱۵/۴ درصد کاهش وزن و حجم داشت که از لحاظ اقتصادی مقرون به‌صرفه‌تر بود.

REFERENCES

Amiri Tokaldany, A. (1996). TABDAM software for designing of diversion dams. In: Proceedings of the *8th Conference National Committee on Irrigation and Drainage*, Tehran, Iran, pp. 31-58. (In Farsi)

Aslani, M., Emadi, A.R., and Nazarpour, H. (2013). Determination of appropriate values of genetic algorithm parameters in optimization of gravity dams cross section. *Journal of Water and Soil Conservation*, 20(5): 231-239. (In Farsi)

www.SID.ir

Arshive of SID

Goldberg D. (1989). Genetic algorithms in search, optimization and machine learning. Addison Wesley.

Heidari, M.M. (2006). Development of a perfect software for designing diversion dams, including: the computations of hydraulic, stability and economic aspects and hydraulic design of intake and sluiceway. M.SC. dissertation, University of Tehran. (In Farsi)

Lane, E. W. (1934). Security from under-seepage masonry dams on earth foundations, *Trans ASCE* 60(4): 929–966.Leliavsky, S. (1965). Design text book in civil engineering: design of dams for percolation and erosion. Chapman and Hall press.

Lin, G., Wang, Y., and Hu, Z. (2010). *Hydrodynamic pressure on arch dam and gravity dam including absorption effect of reservoir sediments* OP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 19–23 July, Sydney, Australia, 1-10.

Qi, G. (2012). Optimized program design of gravity dam section. In: Proceedings of the *International Conference on Modern Hydraulic Engineering*, 9-11 Mar., Nanjing, China , 419-423.

Rajeev S., and Krishnamoorthy C. S. (1992). Discrete Optimization of Structures Using Genetic Algorithms. *Journal of Structural Engineering*, 118: 1233-1249.

Simoes, L. and Lapa, J. (1994). Optimal shape of dams subject to earthquakes. In: Proceedings of the *Second International Conference on Computational Structures Technology, In Advances in Structural Optimization*, 19-21 jan, Athens, Greece, 119-130.

U.S.B.R. (1976). *Design of gravity dams, design manual for Concrete Gravity Dams*. Washington: U.S. Government Printing Office.

Wu, X., Qie, Z., Zhou, Z., and Zhang, H. (2008). Application of improved PSO to optimization of gravity dam and sluice gate. In: Proceedings of the *7thWorld Congress on Intelligent Control and Automation*, 25-27 Jun., Chongqing international convention, Chongqing, China, pp. 6178-6182.

www.SID.ir