

طراحی بهینه برای ابعاد سیستم انحراف آب در سدها با بررسی و آنالیز عدم قطعیت هیدرولیکی و ریسک هیدرولوژیکی

محمد کارآموز^{1*}، سیامک درودی²، علی مریدی³

1- استاد، دانشکده عمران، دانشگاه تهران، تهران

2- کارشناسی ارشد عمران آب، دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات، تهران

3- استادیار، پردیس فنی شهیدعباسپور، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

*karamouz@ut.ac.ir

چکیده - احداث سیستم انحراف آب به دلیل قابل توجه بودن هزینه اجرای آن در سدها همواره طراحان را با مسائل و مشکلات فراوانی روبرو نموده است. مطالعه ظرفیت حمل سیستم‌های انحراف و نحوه انتخاب سیل طراحی و به طور کلی مشخصات سیستم انحراف، همواره مورد بحث و بررسی محققان بوده است. در این تحقیق الگو و مدلی ارائه شده که با دو رویکرد اقدام به بهینه‌سازی سیستم انحراف آب سد نموده است. در رویکرد اول با مبانی یکسان طرح مشاور و به کارگیری روش‌های بهینه‌سازی ابعاد سیستم انحراف بهینه می‌شود. در رویکرد دوم با در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترهای هیدرولیکی و تحلیل ریسک هیدرولوژیکی یک مدل عددی بر اساس هزینه‌های اولیه پروژه، هزینه‌های ناشی از شکست و میزان کل ریسک سیستم انحراف و سد ارائه شده است. سپس در هر دو رویکرد با الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک و ساختن یک تابع هزینه مناسب که شامل هزینه ساخت سیستم انحراف و خسارات ناشی از شکست سیستم در اثر رخداد سیل که به صورت امید ریاضی می‌باشد، بهترین قطر، تراز، جنس پوشش، طول تونل‌ها و ارتفاع فرازبند و ارتفاع نشیب‌بند تعیین می‌شود و همچنین مشخص می‌شود که فرازبند دارای سرریز باشد یا بدون سرریز طراحی شود. سد کارون 4 که در جنوب غربی ایران واقع است به عنوان مطالعه موردی مورد استفاده قرار گرفته شده است. مشخصات طرح مشاور برای ارتفاع فرازبند، ارتفاع نشیب‌بند، قطر تونل‌ها، به ترتیب 20، 40، 9/5، 9/5 متر می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد ارتفاع فرازبند، ارتفاع نشیب‌بند، قطر تونل‌ها به ترتیب برابر با 16 و 38، 9/5 و 9/5 متر برای رویکرد اول و 33، 5، 9، 9 متر، برای رویکرد دوم می‌باشد. در نتیجه طرح دوم مدل کمترین هزینه سالیانه مورد انتظار ساخت را نسبت به طرح مشاور دارا می‌باشد.

کلیدواژگان: سیستم انحراف آب، بهینه‌سازی، آنالیز ریسک هیدرولوژیکی، عدم قطعیت هیدرولیکی، الگوریتم ژنتیک.

1- مقدمه

سیل می‌تواند به کارهای در دست اجرا وارد سازد، به حداقل برساند. بنابراین لازم است برای ارائه طرح انتقال انحراف به مواردی چون مشخصات هیدرولوژی حوضه آبریز رودخانه، دبی و فراوانی سیل انحراف، نوع انحراف و موارد خاص آن توجه کافی مبذول گردد. سیستم انحراف

انتخاب مناسبترین طرح کنترل جریان رودخانه در حین ساختن سد، اهمیت زیادی از لحاظ صرفه‌جویی در هزینه‌های سد دارد. طرح خوب طرحی است که با کمترین هزینه بتواند خسارت‌های جدی و بالقوه را که

قطعیت هیدرولیکی و هیدرولوژیکی، اقدام به بهینه‌سازی ظرفیت و ابعاد سیستم انحراف آب نمودند. نتایج نشان می‌دهد که این عوامل و همچنین در نظر گرفتن روندیابی سیل، می‌تواند اثر قابل توجهی در ظرفیت طراحی بهینه از سیستم انحراف داشته باشد. همچنین Rasekh et al. (2010) یک مدل بهینه‌سازی چند منظوره، همراه با بررسی عدم قطعیت هیدرولیکی و هیدرولوژیکی توسعه دادند. روش ارائه شده به طور مؤثری محدوده متغیرهای تصمیم را گسترش داد که در نتیجه تأثیر کارآمدتری برای تعیین طراحی بهینه سیستم تدوین شد. Sedighzadeh et al. (2011) با استفاده روش بهینه‌سازی 1^{pso} اقدام به بهینه‌سازی طول، قطر تونل و نوع نگهدارنده تونل و ارتفاع فرازبند نمودند. نتایج نشان می‌دهد که ابعاد بهینه و هزینه نهایی سیستم انحراف بستگی به دبی سیلاب دارند.

Takbiri et al. (2012) برای بهینه کردن شکل فیوز گیت‌ها در سرریز سد، دو مدل چند هدفه را توسعه دادند تا اطلاعات مناسب برای ریسک شکست، هزینه نهایی و افزایش ظرفیت مخزن را تهیه کنند. اولی شامل هزینه سرمایه‌گذاری و مخزن آب بود و دومی شامل مخزن آب و احتمال شکست ذاتی و عدم قطعیت هیدرولوژیکی می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که یک مجموعه گوناگون از جواب‌ها، متغیرهای تصمیم با بینش و فهم بهتری از رفتار سیستم و طرح‌های مختلف جایگزین تهیه می‌کنند. Lerma et al. (2014) با ارزیابی و مقایسه 2 الگوریتم تکاملی اقدام به بهینه کردن طراحی قوانین عملیاتی در سیستم‌های منابع آب نمودند. نتایج نشان می‌دهد الگوریتم 2^{SCE-UA} برای رسیدن به راه حل بهینه احتیاج به تکرار کمتر و نتایج کارآمدتری نسبت به الگوریتم 3^{SSA} دارد.

در این مقاله سعی شده با تدوین مدل بهینه‌سازی بر مبنای طرح مهندسیین مشاور (برای سد کارون-4)، ابعاد سیستم انحراف را بهینه نمود. شایان ذکر است که پس از سیلاب‌های بسیار شدید مشاور اقدام به بازنگری در طراحی سیستم انحراف آب نمود و مشخصات طرح جدید

باید به گونه‌ای ساخته شود که بتواند سیلاب محتمل با دوره بازگشت معین را از خود عبور دهد؛ اگر سیستم توسط سیل مورد نظر دچار شکست شود، خسارت سیل باید کمینه باشد. بنابراین سیستم انحراف بین هزینه ساخت و خسارات سیل شناور می‌باشد.

YEN (1985) با تعریف انواع روش طراحی بر اساس ریسک، سعی در معرفی این خطا در محاسبات طراحی نمود. همچنین Cornell and Tagaras (1986) با در نظر گرفتن ریسک و عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی، اقدام به طراحی اجزای هیدرولیکی سد نمودند و برای کاهش ریسک و هزینه اقدام به طراحی سیستم هشدار نمودند. در ادامه مطالعات Afshar and Marino (1990) با دیدگاهی مشابه ظرفیت تخلیه سرریز سدها را بر مبنای طراحی بر اساس مفهوم ریسک، بهینه نمودند.

Tung and Mays (1981) برای حداقل کردن عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی روشی ارائه نمودند. پارامترهای هیدرولوژیکی با حداقل عدم قطعیت به همراه دو نوع دیگر از عدم قطعیت‌های هیدرولوژی و همچنین عدم قطعیت هیدرولیکی در یک عملیات برای بدست آوردن ابعاد بهینه سیستم جمع شدند. با وجود اینکه پارامترهای هیدرولوژی از نظر عدم قطعیت حداقل شده بودند، ولی هنوز پارامترهای تصادفی با درجه‌ای از عدم قطعیت هستند که غیر قابل چشم پوشی می‌باشند. این موضوع، بخصوص برای پارامترهایی چون ضریب چولگی در توزیع پیرسون نوع III که با درجات بالاتر ممان رابطه دارند، اهمیت پیدا می‌کند. Pingel and Ford (2005) چگونگی استفاده از مدل‌های اجرایی استاندارد را با یک چارچوب آنالیز فراوانی - تصادفی توصیف کردند، تا خسارت بالقوه سیل موجود را با یک روش کاهش خسارت پیشنهادی ارزیابی کنند.

Saiedi (2007) با در نظر گرفتن جنس پوشش تونل، نوع حفاری، نگهدارنده‌ها و فرازبند با حل ریاضیاتی معادلات مفروض، ارتفاع فرازبند و قطر تونل را بهینه کرد. نتایج نشان داد می‌توان از دو تونل با قطر کمتر بجای یک تونل، سیستم انحراف را طراحی نمود. Afshar و همکاران در سال 2010 با روندیابی سیل و همچنین برآورد عدم

1. Particle swarm optimization

2. Shuffled Complex Evolution-University of Arizona

3. Scatter Search algorithm

30 به عنوان بعد جامعه به دست آمده است. در فرایند تزویج، بخش‌هایی از اطلاعات ژنتیکی دو کروموزوم با هم معاوضه می‌شوند. این عملگر عموماً بخش‌هایی از کروموزم والد را به صورت تصادفی انتخاب و با هم جابجا می‌کند. در این تحقیق از روش تزویج دو نقطه‌ای استفاده شده است. با ثابت نگاه داشتن بعد جامعه به همراه احتمال جهش، بازه‌ی 0/9 تا 0/5 برای یافتن مقدار بهینه احتمال تزویج مورد جستجو قرار گرفته و عدد 0/8 به عنوان احتمال تزویج انتخاب شد (Wardlaw et al., 1999).

پس از محاسبه بعد جامعه و احتمال تزویج، با ثابت نگاه داشتن این اعداد، بازه‌ی 0/006 تا 0/011 به منظور انتخاب مقدار بهینه احتمال جهش بررسی شده است. عدد 0/009 به عنوان احتمال جهش انتخاب شده است. در مرحله بعد برای اینکه مقادیر واقعی ژن‌های تولید شده دوباره در مدل به کار گرفته شوند، عکس عمل باینری انجام می‌شود تا مقادیر ژن‌ها برای مبنای 10 تولید شوند. پس از عکس باینری کردن مقادیر، محدودیت‌های هیدرولیکی دوباره در مدل اعمال شده تا کروموزوم‌های نسل جدید از لحاظ طراحی هیدرولیکی، دچار خطا در مقدار نشوند (Michalewicz, 1999).

2-2- آنالیز ریسک هیدرولوژیکی

سیلاب طراحی عموماً بر اساس دوره بازگشت تعیین می‌گردد. سیل انتخابی در طرح‌های کنترل سیلاب بستگی به درجه حفاظت و ریسک پذیری دارد که تابعی از بزرگی و دوره بازگشت سیل و همچنین طول عمر مفید طرح می‌باشد. از نتایج عدم قطعیت در تعیین خسارات سیل وارد بر سیستم انحراف استفاده می‌شود.

عدم قطعیت رخداد سیل با دوره بازگشت معین را می‌توان با استفاده از رابطه متعارف (1) محاسبه نمود (USACE, 1987):

$$p = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^n \quad (1)$$

که در آن: p احتمال رخداد سیل (ریسک سیل)، T دوره بازگشت سیل و n عمر بهره‌برداری از سیستم انحراف است که معادل طول دوره ساخت می‌باشد.

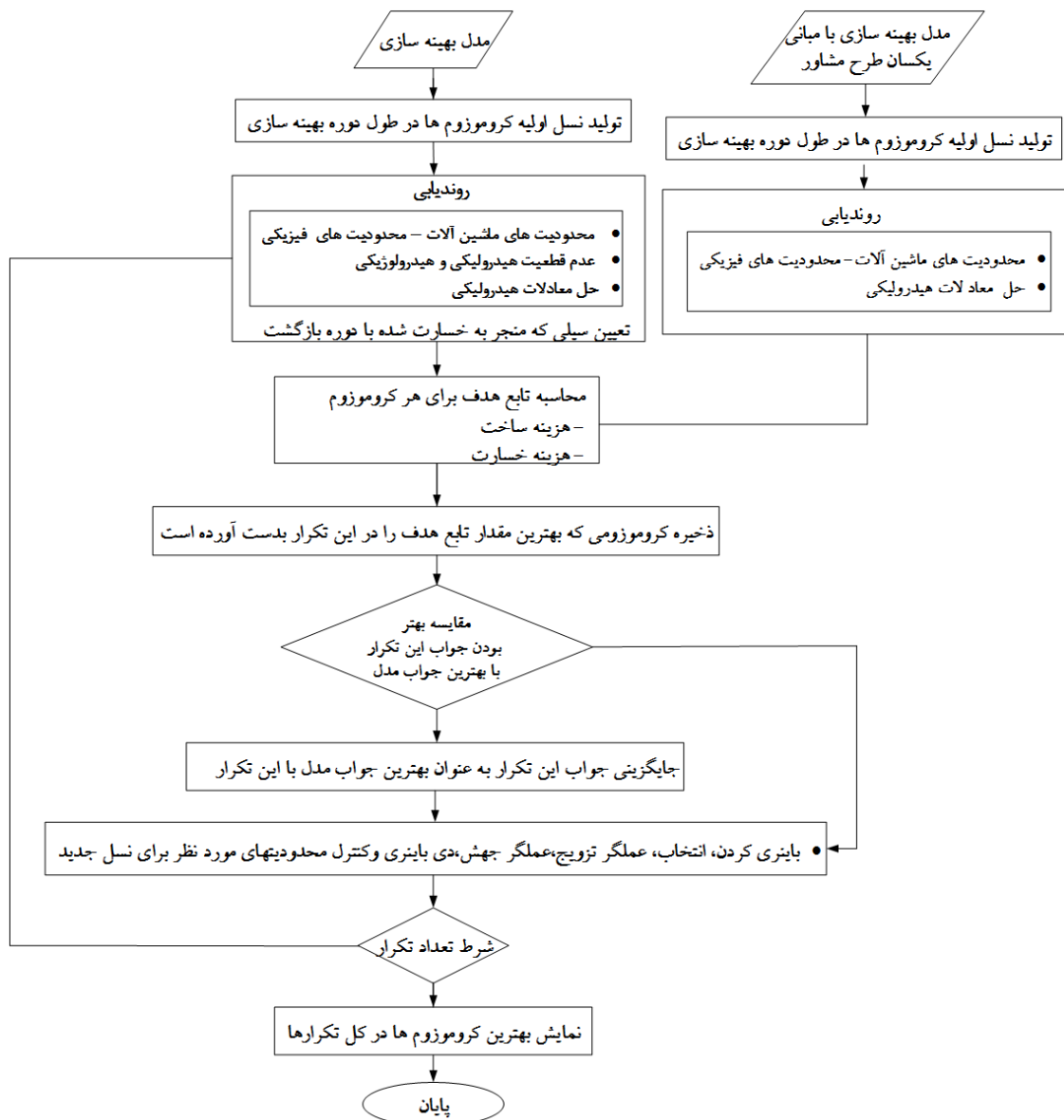
مبنای این تحقیق قرارگرفت (شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس، 1385). بنابراین در رویکرد اول با مبنای یکسان طرح مشاور و به کارگیری روش‌های بهینه‌سازی، ابعاد سیستم انحراف بهینه می‌شود. از طرفی اگر طراحی سیستم انحراف به گونه‌ای باشد که حداکثر سیلاب ممکن را از خود عبور دهد، هزینه ساخت این سیستم بسیار گران تمام می‌شود. بنابراین تعیین ابعاد و پارامترهای سیستم انحراف در برنامه‌ریزی‌ها و طراحی ساخت سدها در یک منطقه تأثیر بسزایی دارد و عدم رعایت این موضوع هر ساله منجر به غیر اقتصادی شدن طرح ساخت سد می‌شود. از این رو طرح دوم مدل بر اساس ارزیابی عدم قطعیت‌های هیدرولیکی و تحلیل ریسک سیل، ارائه شده است. مدل بهینه‌سازی، هزینه ساخت و خسارت متوسط مورد انتظار را کمینه می‌کند.

2- مواد و روش‌ها

در این مطالعه یک مدل بهینه‌سازی برای کمینه کردن تابع هدف تدوین شده است. تابع هدف شامل هزینه‌های ساخت سیستم انحراف و میانگین هزینه خسارات ناشی از سیلاب با دوره‌های بازگشت مختلف به سیستم، خسارت به بدنه اجرا شده سد اصلی و نیروگاه سد می‌باشد. این مدل بهترین قطر و جنس پوشش تونل بر طبق ضریب مانینگ و همچنین تراز ورودی و خروجی و طول تونل، ارتفاع فرازبند و نشیب‌بند را تعیین می‌کند. همچنین نشان می‌دهد که فرازبند با سرریز طراحی شود یا نه؟ الگوریتم تحقیق در شکل 1 آورده شده است. روش بهینه‌سازی بر مبنای الگوریتم ژنتیک می‌باشد. قیدهای مسأله در مدل اعمال می‌شوند. محدودیت‌های ناشی از تجهیزات و ماشین آلات و قیدهای هیدرولیکی در طراحی سیستم انحراف در مدل مد نظر قرار خواهد گرفت.

2-1- روش الگوریتم ژنتیک

روش الگوریتم ژنتیک به وسیله عملگرهای انتخاب، تزویج و جهش و باینری و عکس باینری کردن در ساختار مدل بهینه‌سازی اعمال می‌شود. در این تحقیق از روش مسابقه برای انتخاب کروموزوم‌های برتر استفاده شده است. عدد



شکل 1 الگوریتم تحقیق

2-3- بررسی عدم قطعیت هیدرولیکی

عدم قطعیت‌های هیدرولیکی ممکن است به صورت عدم قطعیت‌های مدل، مصالح، ساخت و بهره‌برداری تقسیم‌بندی شوند. عدم قطعیت مدل ناشی از انتخاب نوع مدل برای شرایط حاکم بر جریان می‌باشد. تغییرات در مصالح، محور سازه، خطاهای مرحله ساخت، ابعاد سازه‌های هیدرولیکی و تکنولوژی ساخت باعث ایجاد عدم قطعیت‌های ساخت و مصالح می‌شوند منبع دیگر عدم قطعیت خطا در شیب طولی است. در این مقاله ابتدا به بررسی عدم قطعیت در تونل‌ها و سپس به بررسی عدم

قطعیت در نشیب‌بند پرداخته شده است. در این تحقیق برای بررسی عدم قطعیت هیدرولیکی از روش میانگین گشتاور دوم مرتبه اول¹ (MFOSM) استفاده شده است. ضریب تغییر Ω_y بر اساس این روش به صورت رابطه (2) می‌باشد (Mays, 2005).

$$\Omega_y = \left[\sum_{i=1}^K a_i^2 \left(\frac{\bar{x}_i}{\mu_y} \right)^2 \Omega_{x_i}^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

1. Mean first order second moment

برابر افت ورودی و افت اصطکاکی و افت ناشی از سرعت h_v می‌شود. بر اساس تئوری برنولی و فرمول دارسی - ویسباخ و رابطه مانینگ مقدار اختلاف ارتفاع دو طرف تونل برابر رابطه (6) نیز می‌شود (Afshar et al., 1994).

$$H_T = \frac{Q^2 \times h_f}{2g \times A^2} \quad (6)$$

در شکل 2 پارامترهای هیدرولیکی تونل نشان داده شده است.

بر اساس روش MFOSM و استفاده از فرمول (2) میزان اثرگذاری ضریب تغییرات هر یک از این متغیرها در فرمول (2)، برابر است با (Mays, 2005):

$$\begin{aligned} \Omega_Q^2 &= \sum_{i=1}^3 \left[\frac{\partial Q}{\partial X_i} \right]^2 \left[\frac{\bar{X}_i}{\bar{Q}} \right]^2 \Omega_{X_i}^2 = \left[\frac{\partial Q}{\partial A} \right]^2 \left[\frac{\bar{A}}{\bar{Q}} \right]^2 \Omega_A^2 \\ &+ \left[\frac{\partial Q}{\partial h_f} \right]^2 \left[\frac{\bar{h}_f}{\bar{Q}} \right]^2 \Omega_{h_f}^2 + \left[\frac{\partial Q}{\partial S_f} \right]^2 \left[\frac{\bar{S}_f}{\bar{Q}} \right]^2 \Omega_{S_f}^2 \\ &= \left[\frac{\sqrt{2g} \times \bar{S}_f^{0.5}}{\bar{h}_f^{0.5}} \right]^2 \left[\frac{\bar{A}}{\bar{Q}} \right]^2 \Omega_A^2 + \left[-\frac{\sqrt{2g} \times \bar{S}_f^{0.5}}{2 \times \bar{h}_f^{1.5}} \right]^2 \\ &\times \left[\frac{\bar{h}_f}{\bar{Q}} \right]^2 \Omega_{h_f}^2 + \left[\frac{\sqrt{2g}}{2 \times \bar{S}_f^{0.5} \times \bar{h}_f^{0.5}} \right]^2 \left[\frac{\bar{S}_f}{\bar{Q}} \right]^2 \Omega_{S_f}^2 \\ &= \left[\frac{\sqrt{2g} \times \bar{S}_f^{0.5} \times \bar{A}}{\bar{Q} \times \bar{h}_f^{0.5}} \right]^2 \Omega_A^2 + \frac{1}{4} \left[\frac{\sqrt{2g} \times \bar{S}_f^{0.5}}{\bar{h}_f^{0.5} \times \bar{Q}} \right]^2 \\ &\times \Omega_{h_f}^2 + \frac{1}{4} \left[\frac{\sqrt{2g} \times \bar{S}_f^{0.5}}{\bar{h}_f^{0.5} \times \bar{Q}} \right]^2 \Omega_{S_f}^2 \Rightarrow \\ \Omega_Q^2 &= \Omega_A^2 + \frac{1}{4} (\Omega_{h_f}^2 + \Omega_{S_f}^2) \end{aligned} \quad (7)$$

که در آن $a_i = \left[\frac{\partial g}{\partial x_i} \right]_{\bar{x}}$ برابر نرخ تغییرات تابع $y=g(x_1, x_2, \dots, x_k)$ نسبت به متغیر x_i در مقدار متوسط μ_x مقدار متوسط متغیر تصادفی y ، Ω_{x_i} ضریب تغییرات متغیر x_i و \bar{x}_i مقدار متوسط متغیر x_i است.

• عدم قطعیت در تونل‌ها

برای یک سیستم انحراف، مقدار دبی خروجی از تونل یا تونل‌های انحراف در حالت تحت فشار، توسط رابطه (3) بیان می‌گردد (Afshar et al., 1994).

$$Q = \sqrt{2g} \times A_T \times \left(\frac{S_f}{h_f} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

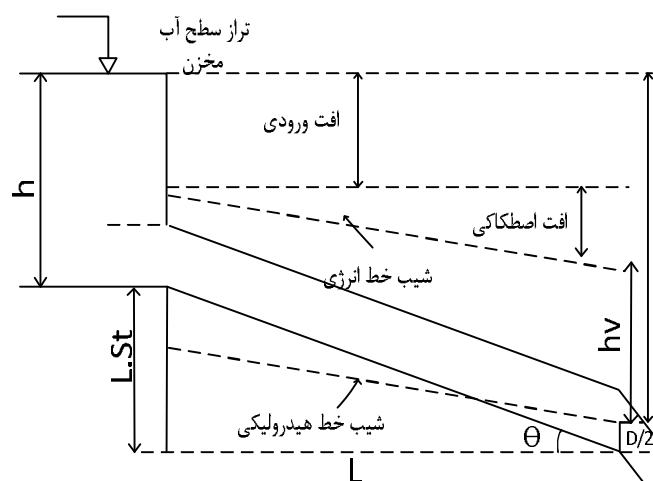
که در رابطه (3) A_T سطح مقطع تونل و g شتاب گرانشی زمین است. پارامترهای S_f و h_f با روابط (4 و 5) بیان می‌گردند (Afshar et al., 1994):

$$H_T = S_f = h + l.S_T - XD \quad (4)$$

$$h_f = 1 + Ke + \frac{2gn_T^2 L}{R^{4/3}} \quad (5)$$

X متغیری است که اگر تونل در انتها به صورت آزاد باشد، برابر 0/5 و اگر تونل در انتها به صورت مستغرق باشد برابر 1 می‌شود. L طول تونل، S_T شیب طولی تونل، Ke ضریب افت ورودی، n_T ضریب مانینگ تونل و R شعاع هیدرولیکی تونل است.

H_T اختلاف ارتفاع دو طرف تونل (آبگذر) می‌باشد که



شکل 2 نمای شماتیک پارامترهای هیدرولیکی تونل

کار قرار داده شده است (Mays, 2005).

$$Q_r = \frac{1}{n_r} A_r R_r^{2/3} \sqrt{S_r} \quad (17)$$

A_r سطح مقطع رودخانه، S_r شیب طولی رودخانه، n_r ضریب زبری رودخانه، Q_r دبی عبوری از رودخانه و R_r شعاع هیدرولیکی رودخانه بوده و مقدار آن وابسته به عمق آب y و عرض سطح مقطع رودخانه b می‌باشد.

بر اساس نقشه مقطع عرضی پایاب خروجی سیستم انحراف، سطح مقطع و عرض مقطع رودخانه با توجه به رابطه‌ای به عمق آب رودخانه ارتباط داده شد. در این تحقیق با توجه به توپوگرافی رودخانه، شیب طولی رودخانه در ابتدای فرازبند تا انتهای نشیب‌بند که شامل محوطه کارگاه نیز می‌شود ثابت و برابر $S_r = 0.00438$ فرض شده است. چون دبی رودخانه در حقیقت همان دبی انتقال آب از تونل‌ها می‌باشد، پس مقدار دبی رودخانه نیز تعیین شده است. بنابراین در فرمول مانینگ n_r و y ، دو متغیر هستند که نسبت به هم مستقل می‌باشند. با اعمال این شرایط و با فرض تقسیم سطح مقطع به دوزنقه‌های کوچک رابطه (17) ساده شده و رابطه (18) بدست می‌آید (شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس 1385) و (Mays, 2005).

$$n_r = \frac{170.5 y^{2.272} \times k}{(5.8445 y + 16.325 + 2 y \sqrt{1 + z_r^2})^{2/3}} \quad (18)$$

که در آن (Mays, 2005):

$$k = \frac{S_r}{Q_r} \quad (19)$$

که z_r شیب جانبی سطح مقطع رودخانه می‌باشد و برابر 2/85 در نظر گرفته شده است.

پس با داشتن ضریب تغییرات ضریب مانینگ و با قابلیت اطمینان هیدرولیکی 90% ضریب مانینگ برای نشیب‌بند به صورت روابط (20 و 21) محاسبه می‌شود (Mays, 2005).

$$n_{90} = -Z_n \times \sigma_n + \bar{n}_r \quad (20)$$

$$\sigma_n = \mu_n \cdot \Omega_n \quad (21)$$

σ_n انحراف از معیار ضریب مانینگ رودخانه و Ω_n ضریب تغییرات ضریب مانینگ می‌باشد. Z_n ضریبی است که با فرض توزیع نرمال استاندارد و با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان 90% برابر 1/29 می‌شود. شایان ذکر است برای

به همین ترتیب فرمول ضریب تغییرات دیگر پارامترها به صورت (8) و (11) (Afshar et al., 1994)، و (9)، (10)، (12) تا (14) (Mays, 2005)، بدست می‌آید:

$$\beta = \bar{h} + \bar{L} \cdot \bar{S}_T - XD \quad (8)$$

$$\Omega_{sf}^2 = \left(\frac{\bar{h}}{\beta}\right)^2 \Omega_h^2 + \left(\frac{S_T L}{\beta}\right)^2 \frac{1}{4} (\Omega_L^2 + \Omega_{S_r}^2) + \frac{1}{4} \left(\frac{\bar{D}}{\beta}\right)^2 \Omega_D^2 \quad (9)$$

$$\Omega_{hf}^2 = \left(\frac{Ke}{\alpha}\right)^2 \Omega_{Ke}^2 + \left(\frac{16g^2 n^4 L^2}{\alpha^2 \times R^{8/3}}\right) \left(\Omega_n^2 + \frac{1}{4} \Omega_L^2 + \frac{4}{9} \Omega_R^2\right) \quad (10)$$

$$\alpha = 1 + \frac{Ke}{R^{4/3}} + \frac{2g\bar{n}^2 \bar{L}}{R^{4/3}} \quad (11)$$

$$\Omega_A = 2\Omega_D \quad (12)$$

$$\Omega_P = \Omega_D \quad (13)$$

$$\Omega_R^2 = \Omega_A^2 + \Omega_P^2 = 4\Omega_D^2 + \Omega_D^2 \quad (14)$$

که در روابط فوق، منظور از Ω ، ضریب تغییرات هر متغیر است. Ω_D ضریب تغییرات قطر تونل، Ω_A ضریب تغییرات سطح مقطع تونل، Ω_Q ضریب تغییرات دبی، Ω_h ضریب تغییرات هد آب، Ω_P ضریب تغییرات پیرامون مرطوب، Ω_{Ke} ضریب تغییرات افت انرژی ورودی تونل، Ω_L ضریب تغییرات محیط مرطوب، Ω_R ضریب تغییرات شعاع هیدرولیکی، Ω_n ضریب تغییرات مانینگ و Ω_{S_r} ضریب تغییرات شیب طولی تونل می‌باشند.

بنابراین با داشتن ضریب تغییرات دبی بر اساس روابط (7) تا (14)، دبی سیل لحظه‌ای با قابلیت اطمینان هیدرولیکی 90% برای هر تونل به صورت روابط (15 و 16) محاسبه می‌گردد (Mays, 2005).

$$Q_{90} = -Z \times \sigma_Q + \mu_Q \quad (15)$$

$$\sigma_Q = \mu_Q \cdot \Omega_Q \quad (16)$$

μ_Q میانگین دبی عبوری از هر تونل است. σ_Q انحراف از معیار دبی و Z ضریبی است که با فرض توزیع نرمال استاندارد و با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان 90%، برابر 1/29 می‌شود.

• بررسی عدم قطعیت نشیب‌بند

برای تخمین عدم قطعیت نشیب‌بند فرمول مانینگ مبنای

نیازمند به نگهدارنده و پوشش بتنی می‌باشند و سنگ بستر تونل‌ها به تنهایی مناسب نمی‌باشد (شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس، 1385). بنابراین در این تحقیق چهار نوع پوشش مختلف بتن با ضریب زبری‌های مختلف در نظر گرفته شده است. مشخصات پوشش بتنی در جدول 2 آورده شده است (Chow.1959).

2-4-1- محدودیت‌ها

محدودیت‌های فنی و اجرایی در ساخت سیستم انحراف به صورت قید در مدل بهینه‌سازی به شرح زیر در نظر گرفته شده است:

$$7.0 \text{ m} < D < 13.0 \text{ m}$$

$$30 \text{ m} < H_{UC} < 75 \text{ m}$$

$$5 \text{ m} < H_{DC} < 30 \text{ m}$$

- سرعت در تونل‌ها دارای مقدار حداقل و حداکثر برابر

$$4 \text{ m/sec} < V < 13 \text{ m/sec}$$

- اختلاف ارتفاع تراز ورودی تونل‌ها با فرازبند باید

طوری باشد که بار هیدرولیکی تأمین شود.

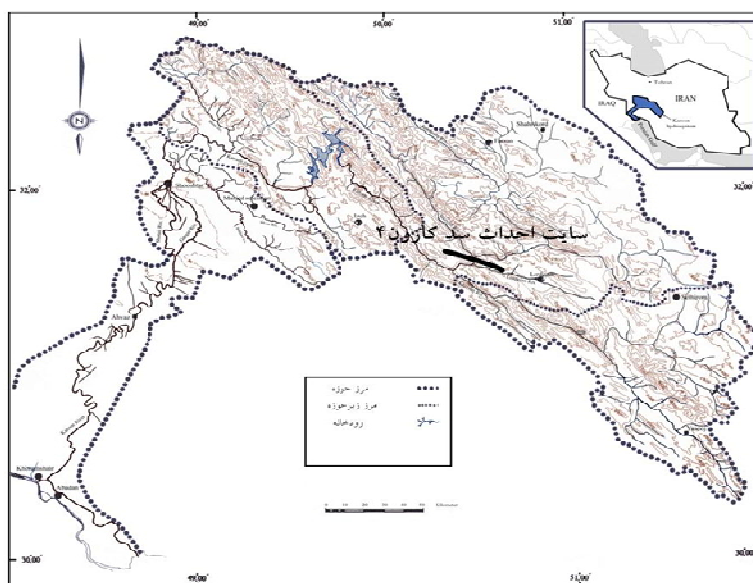
2-4-2- ساختار کروموزوم در الگوریتم ژنتیک

به منظور حداقل کردن هزینه‌ها، نیاز به یک مدل بهینه‌سازی است تا علاوه بر بدست آوردن بهینه مطلق، قیده‌های مسأله را نیز ارضا نماید.

بدست آوردن قابلیت اطمینان هیدرولیکی اقدام به تحلیل حساسیت شده است. با بدست آوردن عدم قطعیت هیدرولیکی نشیب‌بند، مجدداً عمق آب رودخانه را می‌توان با استفاده از فرمول مانینگ حساب کرد و عمق آب را با ارتفاع نشیب‌بند کنترل کرده تا مشخص شود که دبی سیلاب از روی نشیب‌بند رد شده و باعث خسارت به کارگاه می‌شود یا در بستر رودخانه در پایین‌دست سد به مسیر خود ادامه می‌دهد. همان‌طور که مشخص است نتایج بررسی عدم قطعیت هیدرولیکی نشیب‌بند در تعیین خسارت ناشی از سیل مورد استفاده قرار می‌گیرد.

2-4-2- مطالعه موردی

سد کارون 4 بر روی رودخانه کارون در جنوب غربی ایران واقع است. مشخصات حوزه آبریز و سد کارون 4 در جدول 1 آورده شده است. در شکل 3 موقعیت سد کارون 4 نشان داده شده است. رودخانه کارون از ارتفاعات زاگرس سرچشمه گرفته و حوزه آبریز این رودخانه در غرب کشور واقع است. این رودخانه در محل سد کارون 4 از به هم پیوستن رودخانه‌های ارمند و آب بازفت تشکیل شده است. سیستم انحراف سد کارون 4 شامل 2 تونل، یک فرازبند و یک نشیب‌بند می‌باشد. میانگین شیب جانبی فرازبند و نشیب‌بند 1 عمودی به 2/5 افقی می‌باشد. با توجه به زمین شناسی و دیواره‌های کناری سد، تونل‌ها



شکل 3 حوزه آبریز کارون و موقعیت کارگاه احداث سد کارون 4

6. ژن‌های نهم و دهم به ترتیب به جنس پوشش تونل اول و دوم تعلق دارد و مقدار آن‌ها بین یکی از اعداد 0/011-0/013-0/014-0/016 متغیر می‌باشد؛
7. ژن یازدهم به وجود سرریز تعلق دارد، و مقدار آن در صورت وجود سرریز، یک و در غیر این صورت، صفر می‌باشد.

2-5- روندیابی

برای تعیین مقاومت سیستم انحراف با استفاده از سیلاب‌های مشاهداتی اقدام به روندیابی در سیستم انحراف شده است. روش کار بر اساس روندیابی در مخزن می‌باشد. هیدروگراف سیل‌ها با دوره بازگشت مختلف برای هر ارتفاع از مخزن فرازبند روندیابی شده است. منحنی ارتفاع-مخزن فرازبند در شکل 5 نشان داده شده است. در شکل 6، منحنی روندیابی مخزن (منحنی G-O)، مورد استفاده در مدل‌های روندیابی هیدرولوژیکی مخزن، برای ارتفاع 30 تا 40 متر فرازبند ارائه شده است. لازم به ذکر است که قطر تونل در این منحنی 9/5 متر در نظر گرفته شده است.

3- ساختار مدل بهینه‌سازی

تابع هدف مدل بهینه‌سازی بر اساس هزینه ساخت برای متغیرهای تصمیم (قطر تونل‌ها، ارتفاع فرازبند) و خسارت ناشی از سیلاب با دوره بازگشت‌های مختلف به صورت امید ریاضی محاسبه شده است. تابع خسارت سیل با توجه به احتمال روگذری سیلاب رویداده با دوره بازگشت‌های مختلف و با استفاده از مقدار مورد انتظار خسارت سیل و هزینه ساخت سیستم انحراف بررسی می‌شود.

جدول 1 مشخصات حوضه آبریز و سد کارون 4

نیروگاه (Mw)	تعداد خروجی	ظرفیت سد (MCM)	بارش سالانه (mm)	مساحت حوضه (Km ²)
1000	3	2192	680	12813

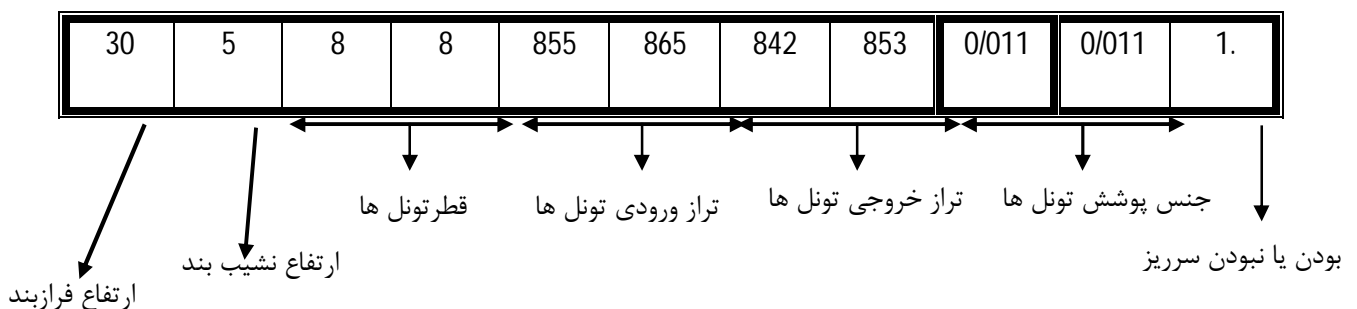
جدول 2 مشخصات پوشش بتنی تونل

میانگین ضریب	نوع بتن	بتن صاف
0/013	نوع 1	بتن صاف
0/0145	نوع 2	بتن ماله کشی
0/017	نوع 3	بتن پرداخت شده
0/019	نوع 4	بتن پاشی با مقطع خوب

در شکل 4 ساختار شماتیک کروموزوم‌های مدل بهینه‌سازی نشان داده شده است.

در اینجا فرضیات مورد نیاز در هر یک از ژن‌های یک کروموزوم الگوریتم پیشنهادی به صورت زیر قابل بیان می‌باشند (Gen and Cheng, 2000).

- ژن اول کروموزوم به ارتفاع فرازبند تعلق دارد، و مقدار آن از 30-75 متر متغیر می‌باشد؛
- ژن دوم کروموزوم به ارتفاع نشیب‌بند تعلق دارد، و مقدار آن از 5-35 متر متغیر می‌باشد؛
- ژن‌های سوم و چهارم به ترتیب به قطر تونل اول و دوم تعلق دارند، و مقدار آن‌ها از 7-13 متر متغیر می‌باشد؛
- ژن‌های پنجم و ششم به تراز ورودی تونل اول و دوم تعلق دارد، و مقدار آن‌ها از 845-900 متر متغیر می‌باشد؛
- ژن‌های هفتم و هشتم به تراز خروجی تونل اول و دوم تعلق دارد و مقدار آن‌ها از 840-890 متر متغیر می‌باشد؛



شکل 4 نمای شماتیک از کروموزوم‌های مدل بهینه‌سازی

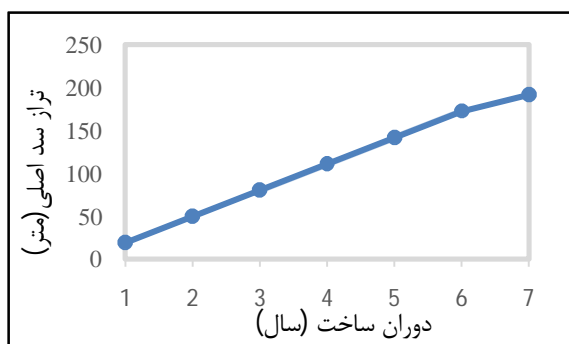
سیل می‌باشد. i شاخص احتمال رویداد سیل با دوره بازگشت معین، $P(i)$ احتمال روگذری سیل از فرازبند با دوره بازگشت معین، D_{T_i} هزینه خسارات ناشی از سیل به فرازبند، نشیب بند؛ تونل و کارگاه می‌باشد. $P_D(i)$ احتمال روگذری سیل از سد اصلی بر اساس منحنی تغییرات تراز سد اصلی، D_{D_i} هزینه خسارات ناشی از سیل به سد اصلی و نیروگاه سد می‌باشد. معادلات (23) تا (25) نحوه محاسبه تابع خسارت را توضیح می‌دهد. معادله (23) برای محاسبه خسارات مورد انتظار سالیانه به سیستم انحراف و سد اصلی و نیروگاه سد می‌باشد. معادله (24) به ترتیب شامل خسارت به فرازبند و تونل‌ها، نشیب‌بند می‌باشد. معادله (25) برای محاسبه خسارت به فرازبند می‌باشد که شامل هزینه ساخت فرازبند و خسارت در صورت وجود سرریز می‌باشد.

$Damege_{i,DC}$ خسارت وارده به فرازبند، $Damege_{i,UC}$ خسارت وارده به نشیب‌بند، $Damege_{i,Site}$ خسارت وارده به کارگاه محل احداث سد، O_1 خسارت ناشی از سرریز، متغیری برای تعیین وجود سرریز بر روی فرازبند که مقدار آن (0,1) می‌باشد. برای تعیین خسارات ناشی از سیل به سد اصلی باید منحنی تغییرات تراز حداکثر سد در سال‌های مختلف ساخت تعیین شود. در شکل 7، بر اساس برنامه زمان‌بندی، نمودار تغییرات تراز سد اصلی بر حسب دوران ساخت آن آورده شده است.

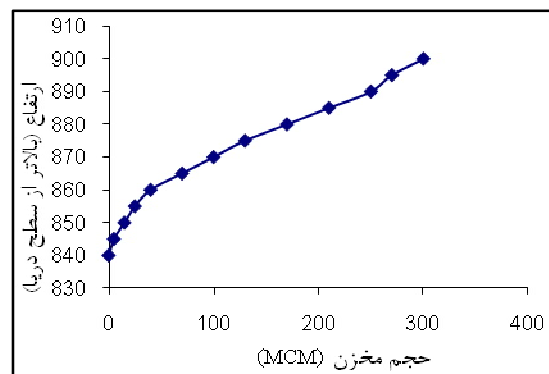
$$Cost_C = CRF * (Cost_{Tunnel} + Cost_{UC} + Cost_{DC}) \quad (26)$$

$$CRF = \frac{j(1+j)^y}{(1+j)^y - 1} \quad (27)$$

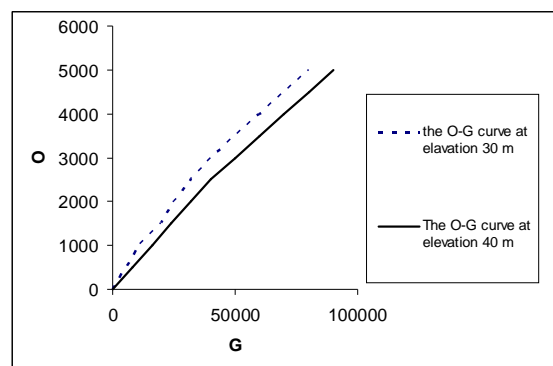
$$Cost_{UC} = U_{UC} * V_{UC} + O_1 * U_{SP} * V_{SP} \quad (28)$$



شکل 7 منحنی تغییرات تراز سد اصلی نسبت به دوران ساخت



شکل 5 منحنی ارتفاع-مخزن فرازبند (شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس 1385)



شکل 6 منحنی OG محاسبه شده برای روندیابی هیدرولوژیکی در مخزن فرازبند در ارتفاع 30 و 40 متر

علاوه بر موارد ذکر شده، تغییرات تراز سد اصلی در سال‌های مختلف ساخت بر اساس برنامه زمان‌بندی برای تعیین احتمال روگذری سیلاب و خسارات ناشی از عبور آن در نظر گرفته شده است. تابع هدف و روابط وابسته به آن در زیر توضیح داده شده است (Karamouz et al., 2009).

$$Minimize Z = E(damage) + Cost_C \quad (22)$$

فرمول (22) تابع هدف است که $Minimize Z$ کمینه تابع هدف، $Cost_C$ هزینه ساخت سیستم انحراف و $E(damage)$ متوسط هزینه خسارت مورد انتظار سالیانه ناشی از سیل می‌باشد.

$$Minimize Z = E(damage) + Cost_C \quad (23)$$

$$D_{T_i} = Damege_{i,UC} + Damege_{i,Tunnel} + Damege_{i,DC} + Damege_{SITE} \quad (24)$$

$$Damege_{i,UC} = Cost_{i,UC} + O_1 * (Damege_{i,SP}) \quad (25)$$

معادله (23) تابع متوسط خسارت مورد انتظار ناشی از

است. رابطه محدودیت تراز ورودی و خروجی تونل طبق معادله (30) تعیین می‌شود. اختلاف ارتفاع تراز ورودی تونل‌ها با فرازبند باید طوری باشد که بار هیدرولیکی تأمین شود و سیلاب از تونل‌ها تخلیه شود. برای این منظور معادله (31) برای مدل کنترل می‌شود. که E تراز ورودی تونل‌ها و E_0 تراز خروجی تونل‌ها می‌باشد.

4- نتایج

در این بخش، نتایج حاصل از اعمال مدل به مطالعه موردی ارائه شده است.

4-1- نتایج بررسی عدم قطعیت

میزان متوسط و ضریب تغییرات متغیرهای در نظر گرفته شده برای محاسبات دبی عبوری از سیستم انحراف در جدول 3 آورده شده است.

جدول 3 مقادیر متوسط به همراه ضریب تغییرات هر پارامتر

پارامتر	مقادیر میانگین	ضریب تغییرات
n type 1	0/013	0/121
n type 2	0/0145	0/089
n type 3	0/017	0/127
n type 4	0/019	0/126
L1	630	0/013
L2	680/5	0/015
Ke1	0/2	0/001
Ke2	0/22	0/0012
St1	0/001	0/0005
St2	0/001	0/0005
D1	9/5	0/015
D2	9/5	0/015

لازم به ذکر می‌باشد که در این تحقیق چهار نوع پوشش برای تونل‌ها در نظر گرفته شده است، بنابراین چهار ضریب زبری مختلف و چهار ضریب تغییرات برای ضریب مانینگ وجود دارد. مقدار متوسط عمق آب (Y) در پایین دست رودخانه 8/0 متر و ضریب تغییرات 0/02 متر می‌باشد.

مقدار ضریب مانینگ رودخانه با استفاده از روابط (17) تا (20) محاسبه شده است. بنابراین ارتفاع نشیب بند بر اساس عمق آب رودخانه با توجه عدم قطعیت و ارتفاع

معادله (26) هزینه ساخت سیستم انحراف به صورت سالیانه می‌باشد که شامل هزینه ساخت تونل، فرازبند و نشیب‌بند می‌باشد. معادله (27) ضریب بازگشت سرمایه است که با استفاده از این ضریب هزینه ساخت سیستم انحراف به صورت سالانه محاسبه می‌شود. معادله (28) هزینه ساخت فرازبند می‌باشد که شامل حجم ساخت فرازبند در قیمت واحد آن و در صورت وجود سرریز، هزینه ساخت سرریز می‌باشد.

CRF ضریب بازگشت سرمایه، y سالی از دوران ساخت سد اصلی که روگذری سیلاب اتفاق می‌افتد، j ضریب بهره پول $j = 7\%$ ، $Cost_{Tunnel}$ هزینه ساخت تونل، $Cost_{UC}$ هزینه ساخت فرازبند، V_{UC} حجم فرازبند، U_{UC} قیمت واحد ساخت فرازبند، V_{SP} حجم سرریز، U_{SP} قیمت واحد سرریز و $Cost_{DC}$ هزینه ساخت نشیب بند است

$$Q_{SP} = C_o W_{SP} h_{SP}^{1.5} \quad (29)$$

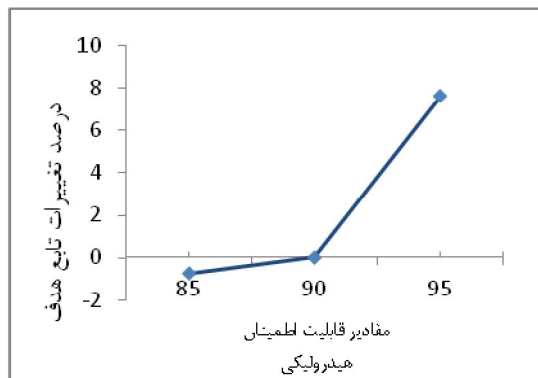
$$\frac{V_{MIN} \times n}{R^{2/3}} < \frac{E - E_0}{L} < \frac{V_{MAX} \times n}{R^{2/3}} \quad (30)$$

$$H_{UC} + 845.0 > E + D \quad (31)$$

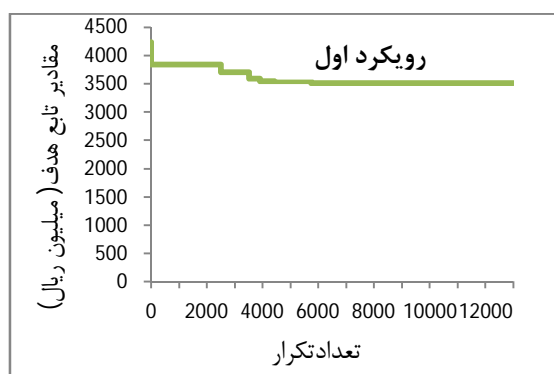
که، Q_{SP} ظرفیت سرریز، h_{sp} هد آب بالای سرریز، W_{sp} عرض سرریز و C_o ضریب دبی است.

از مهمترین مسائل مطرح شده در این تحقیق، تعیین بهترین مقدار سیلی است که سیستم انحراف می‌تواند از خود عبور دهد و همچنین مشخص شود کدام سیلاب با دوره‌های بازگشت مختلف به سیستم انحراف خسارت وارد کرده و سبب تخریب آن می‌شود، تا بتوان تابع خسارات ناشی از سیل را محاسبه کرد. برای نیل به این هدف اقدام به روندیابی سیل در سیستم انحراف شده است. پس از اعمال هیدروگراف‌های سیلاب‌های مشاهداتی مختلف به عنوان ورودی در فرآیند روندیابی، حل معادلات جریان انتقال آب از تونل به عنوان خروجی سیستم و رابطه ظرفیت مخزن با ارتفاع فرازبند و در صورت وجود سرریز معادله (29)، میزان خروجی سیستم انحراف آب با توجه به بازه زمانی انتخاب شده محاسبه می‌شود (USACE, 1987). در این قسمت قید عدم قطعیت هیدرولیکی برای تعیین عملکرد تونل‌ها با استفاده از معادله (15) و همچنین قید عدم قطعیت هیدرولیکی برای تعیین عملکرد نشیب‌بند معادله (20) در مدل در نظر گرفته شده

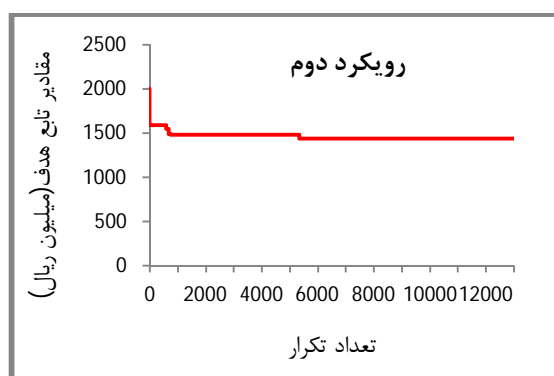
بهینه شود. نتایج اجرای رویکرد دوم در تکرارهای مختلف مدل الگوریتم ژنتیک در شکل 10 نشان داده شده است.



شکل 8 درصد تغییرات تابع هدف نسبت به قابلیت اطمینان هیدرولیکی



شکل 9 همگرایی مقادیر تابع هدف در مدل بهینه‌سازی، رویکرد اول



شکل 10 همگرایی مقادیر تابع هدف در مدل بهینه‌سازی، رویکرد دوم

در تکرار 28 مقدار تابع هدف بیشترین شیب تغییرات را

سطح آزاد¹ محاسبه می‌شود.

تحلیل حساسیت قابلیت اطمینان هیدرولیکی بر مقدار تغییرات تابع هدف بدست آمده است. نتایج در شکل 8 آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد در قابلیت اطمینان هیدرولیکی 85 درصد مقدار تابع هدف کمترین مقدار را دارا می‌باشد، ولی تغییرات تابع هدف به قابلیت اطمینان هیدرولیکی 90 و 85 درصد، اندک است. همچنین از آنجا که فرازبند سیستم انحراف به علت ارتفاع بیش از 30 متر مانند یک سد متوسط می‌باشد، بنابراین تخریب آن سبب ایجاد خسارت به پایین دست سد کارون 4 می‌شود. لذا برای کاهش خسارات احتمالی ظرفیت حمل سیستم با قابلیت اطمینان 90٪ در مدل بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است.

4-2- نتایج بهینه‌سازی

نتایج مدل به صورت نمودار و جدول با در نظر گرفتن همه محدودیت‌ها و سیلاب‌های طراحی نشان داده شده است. در شکل 9 مقادیر تابع هدف حداقل هزینه مورد انتظار سالانه با توجه به رویکرد اول مدل در تکرارهای مختلف مدل الگوریتم ژنتیک نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در طرح اول که دبی سیلاب با دوره بازگشت 25 ساله در نظر گرفته شده است، تا تکرار 15 مقدار تابع هدف بیشترین شیب تغییرات را داشته است و بعد از این تکرار در تکرارهای 2500، 3900 و 5750 دارای سه پرش بوده و از این تکرار به بعد مقدار تابع هدف ایستا شده است که نشانگر جواب بهینه مدل می‌باشد. مقدار آن برابر 25/5 میلیارد ریال در هر سال می‌باشد. به علت اینکه رودخانه کارون سیلاب‌های بسیار شدیدی (اسفند 1383 و بهمن ماه 1384) با دبی بیش از 5000 متر مکعب بر ثانیه را تجربه نموده است که منجر به تخریب کامل سیستم انحراف شده است، از این رو به منظور کاهش ریسک و تعیین بهترین سیلاب طراحی که یکی از مهمترین اهداف این تحقیق می‌باشد، طرح دومی ارائه شده که با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های هیدرولیکی و هیدرولوژیکی مقادیر متغیرهای تصمیم

1. Freeboard

دوران ساخت پروژه نسبت به طراحی مشاور می‌شود. همچنین هزینه طراحی بر اساس طرح اول مدل بهینه‌سازی 71/1% کمتر از طرح مشاور است. شایان ذکر است ضریب زبری مانینگ تونل‌ها بر اساس طرح اول و دوم به ترتیب برابر 0/013 و 0/0145 برای تونل اول و 0/0145 و 0/0145 برای تونل دوم می‌باشد. با توجه به اینکه سیلاب طرح دوم کمتر از سیلاب مشاور بوده و بیش از 20% هزینه ساخت سیستم انحراف به ساخت فرازبند مربوط شده و مهمترین سازه‌ای که در اثر سیلاب آسیب می‌پذیرد، فرازبند است، همچنین فرازبند سیستم انحراف به علت ارتفاع بیش از 30 متر مانند یک سد متوسط می‌باشد؛ بنابراین تخریب آن سبب ایجاد خسارت به پایین‌دست سد کارون 4 می‌شود. از این رو پیشنهاد می‌شود ایمنی سد را با وجود یک سیستم هشدار دهنده قابل اعتماد بهبود بخشید و بدین نحو می‌توان در زمان اعلان هشدار بسیاری از تجهیزات کارگاه را جمع‌آوری کرده و اقدامات مناسب را برای کاهش خسارات و ریسک طرح انجام داد.

داشته است و بعد از این تکرار تقریباً مقدار آن ثابت مانده و تنها در تکرارهای 610، 935 و 6050 دارای سه پرش بوده و از این تکرار به بعد مقدار تابع هدف ایستا شده است که نشانگر جواب بهینه مدل می‌باشد. مقدار آن برابر 20/642 میلیارد ریال در هر سال می‌باشد.

نتایج مدل بهینه‌سازی در جدول 4 آورده شده است. در این جدول مقادیر طراحی سیستم انحراف توسط شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس (1385) به همراه بهترین جواب به ترتیب رویکرد اول و دوم مدل برای پارامترهای مدل و طول بهینه تونل‌ها آورده شده است.

بر اساس روندیابی سیلاب در سیستم انحراف با استفاده از مدل، طراحی ظرفیت بهینه سیستم انحراف سیلاب با دوره بازگشت 20 ساله بدست می‌آید. در طرح مشاور سیستم انحراف بر اساس سیل با دوره بازگشت 25 ساله محاسبه شده است. هزینه سالیانه اجرای طرح مشاور با در نظر گرفتن فهرست بها واحد سال 1386 برابر 27/469 میلیارد ریال است. در نتیجه طراحی بر اساس مدل بهینه‌سازی منجر به 24/8% کاهش هزینه سالیانه در

جدول 4 مشخصات بهینه طراحی سیستم انحراف آب سد کارون 4 و مقایسه آن با طرح مشاور

ردیف	نوع طراحی	ارتفاع نشیببند (متر)		قطر تونل (متر)		پوشش تونل		تراز ورودی تونل 1 (متر)
		ارتفاع نشیببند	ارتفاع نشیببند	قطر تونل 1	قطر تونل 2	پوشش تونل 1	پوشش تونل 2	
اول	طراحی توسط مدل رویکرد اول	ارتفاع فرازبند (متر)	ارتفاع نشیببند (متر)	قطر تونل 1 (متر)	قطر تونل 2 (متر)	پوشش تونل 1	پوشش تونل 2	تراز ورودی تونل 1 (متر)
		38	16	9/5	9/5	نوع 1	نوع 2	864/5
	تراز ورودی تونل 2 (متر)	تراز خروجی تونل 1 (متر)	تراز خروجی تونل 2 (متر)	طراحی سرریز	طول تونل 1 (متر)	طول تونل 2 (متر)	ظرفیت سرریز (متر مکعب بر ثانیه)	
	863	842/5	840/2	با سرریز	650	679	3000	
دوم	طراحی توسط مدل رویکرد دوم	ارتفاع فرازبند (متر)	ارتفاع نشیببند (متر)	قطر تونل 1 (متر)	قطر تونل 2 (متر)	پوشش تونل 1	پوشش تونل 2	تراز ورودی تونل 1 (متر)
		33	5	9	9	نوع 2	نوع 2	863/5
	تراز ورودی تونل 2 (متر)	تراز خروجی تونل 1 (متر)	تراز خروجی تونل 2 (متر)	طراحی سرریز	طول تونل 1 (متر)	طول تونل 2 (متر)	ظرفیت سرریز (متر مکعب بر ثانیه)	
	862/4	842/2	840/2	بدون سرریز	640	672	سرریز ندارد	
مشاور	طراحی توسط مشاور	ارتفاع فرازبند (متر)	ارتفاع نشیببند (متر)	قطر تونل 1 (متر)	قطر تونل 2 (متر)	پوشش تونل 1	پوشش تونل 2	تراز ورودی تونل 1 (متر)
		40	20	9/5	9/5	نوع 1	نوع 2	850/50
	تراز ورودی تونل 2 (متر)	تراز خروجی تونل 1 (متر)	تراز خروجی تونل 2 (متر)	طراحی سرریز	طول تونل 1 (متر)	طول تونل 2 (متر)	ظرفیت سرریز (متر مکعب بر ثانیه)	
	860	842/55	853	با سرریز	655	709	3000	

5- نتیجه گیری

در این مقاله یک مدل به منظور بهینه سازی ابعاد بخش های مختلف سیستم انحراف سد کارون 4 با دو رویکرد توسعه داده شده است. رویکرد اول بر اساس مبانی یکسان با طرح مشاور و با طراحی دبی سیلاب یکسان با دوره بازگشت 25 ساله می باشد. در این تحقیق به دلیل اهمیت بررسی سیل و عدم قطعیت ناشی از آن، مطالعات هیدرولوژیکی بر روی رودخانه کارون تا محل سد کارون 4 واقع در چهار محال بختیاری صورت گرفت. از طرفی عملکرد سازه های هیدرولیکی همراه با عدم قطعیت می باشد. برای تعیین بازه اطمینان عملکرد درست سازه های هیدرولیکی به بررسی عدم قطعیت هیدرولیکی برای تونل ها و نشیب بند پرداخته شد، بنابراین رویکرد دوم مدل بر این مبنا تدوین گردید. با تحلیل حساسیت مدل، دبی با قابلیت اطمینان عبور 90% برای تونل ها و ضریب زبری مانینگ نشیب بند با قابلیت اطمینان 90% تعیین گردید. قیدهای هیدرولیکی از قبیل محدودیت سرعت جریان آب، شیب طولی مجاز تونل، بار هیدرولیکی مورد نیاز سیستم انحراف در نظر گرفته شده است. از موارد دیگر که در مقاله بررسی شده مقاومت سیستم انحراف در برابر سیلاب ها می باشد که از روی آن می توان سیلی را که منجر به خسارت شود، تعیین کرد. برای این منظور اقدام به روندیابی سیستم انحراف گردید. فرایند روندیابی نیز در حقیقت یکی دیگر از قیدهای مسأله می باشد. با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک بهترین ابعاد سیستم انحراف در هر دو طرح تعیین شده است. تابع هدف مدل بهینه سازی بر اساس هزینه ساخت مورد انتظار سالیانه و متوسط هزینه مورد انتظار خسارت سالیانه می باشد.

نتایج نشان می دهد در طرح اول هزینه ساخت مورد انتظار سالیانه سیستم انحراف سد کمتر از هزینه ساخت مورد انتظار سالیانه طرح مهندسین مشاور می باشد و همچنین ارتفاع فرازبند، نشیب بند، طول تونل های اول و دوم، قطر تونل اول نیز نسبت به طرح مشاور تقلیل یافته است. بنابراین ابعاد سیستم انحراف نیز کاهش پیدا کرده است. در طرح دوم، سیستم انحراف بر اساس سیلاب با دوره بازگشت 20 ساله با استفاده از مدل طراحی می شود. هزینه سالیانه مورد انتظار ساخت طرح بهینه نسبت به

طرح مهندسین مشاور 24/8% کمتر می باشد. ارتفاع فرازبند و نشیب بند به ترتیب از 40 و 20 به 33 و 5 متر تقلیل می یابد و نیز طول و قطر تونل اول و دوم به ترتیب 640، 9 و 672، 9 متر طراحی می شود. از این رو طرح دوم کمترین هزینه و مشخصات سیستم انحراف را دارا می باشد. در نهایت به دلیل افزایش اطمینان پذیری و کاهش ریسک و خسارات، با ایجاد سیستم هشدار سیل اگر تصمیم گیری در طراحی بر اساس مدیریت ریسک باشد می توان از طرح دوم استفاده نمود.

6- فهرست علائم

A_T	سطح مقطع تونل
A_r	سطح مقطع رودخانه
C_o	ضریب دبی سرریز
$Cost_c$	هزینه ساخت سیستم انحراف
CRF	ضریب بازگشت سرمایه
$Cost_{Tunnel}$	هزینه ساخت تونل
$Cost_{UC}$	هزینه ساخت فرازبند
$Cost_{DC}$	هزینه ساخت نشیب بند
D_{T_i}	هزینه خسارات سیل به سیستم انحراف و کارگاه
D_{D_i}	هزینه خسارات سیل به نیروگاه و سد اصلی
$Damage_{i,UC}$	خسارت فرازبند
$Damage_{i,DC}$	خسارت وارده به نشیب بند
$Damage_{i,Site}$	خسارت به گارگاه محل احداث سد
$Damage_{sp}$	خسارت ناشی از سرریز
E	تراز ورودی تونل ها
E_o	تراز خروجی تونل ها
$E(damage)$	هزینه خسارت مورد انتظار سالیانه سیل
g	شتاب گرانشی زمین
H_T	اختلاف ارتفاع دو طرف تونل
h_{sp}	هد آب بالای سرریز
j	ضریب بهره پول
K_e	ضریب افت ورودی
L	طول تونل
$Minimize Z$	کمینه تابع هدف
n	عمر بهره برداری از سیستم انحراف
n_r	ضریب زبری رودخانه
n_T	ضریب مانینگ تونل
n_{90}	قابلیت اطمینان هیدرولیکی 90% ضریب مانینگ

Karamouz, M., Doroudi, S., Ahmadi, A. and Moridi, A., (2009). "Optimal design of water diversion system: A case study", ASCE World Environmental and Water Resources Congress, Kansas City, Missouri, USA, May 13-16.

Lerma, N., Paredes-Arquiola, J., Andreu J., Solera A. and Sechi, G.M. (2015). "Assessment of evolutionary algorithms for optimal operating rules design in real water resource systems." Environmental Modelling and Software, Vol. 69, pp. 425-436

Mays, L. W. (2005). *Water Resource Engineering*, John Wiley & Sons, Inc

Michalewicz Z. (1992). *Genetic algorithms data+structure=evolutionary programs*, Springer, New York.

Pate-Cornell, M.E. and Tagaras, G. (1986). "Risk costs for new dams: Economic analysis and effects of monitoring", *Water Resources Res.*, 22(1), 5-14

Pingel, N. and Ford, D. (2004). "Interior floodplain flood-damage reduction study", *J. Water Resour. Plan. Manage.* 130(2), pp. 123-130.

Rasekh, A., Afshar, A., and M. H., Afshar (2010). "Risk-cost optimization of hydraulic structures: methodology and case study", *Water Resource Manage.*, Vol. 24, 2833-2851

Saiedi, S. (2007). "Optimum diameter of diversion tunnels in dam construction." *J. Dam Engineering*, XVIII (1), 51-70.

Sedighzadeh, S. (2011). "A new model for economic optimization of water diversion system during dam construction using PSO algorithm", *J. World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol:5 2011-01-20

Takbiri, Z. and Afshar, A., (2012). "Multi-objective optimization of fusegates system under hydrologic uncertainties", *Water Resour. Manage.*, 26: 2323–2345

Tung, Y. Y. and Mays, L. W. (1981). "Optimal risk-based design of flood levee systems." *Water Resour. Res.*, 17 (4), 843-852.

US. Army Corps of Engineers (1987). *Design of small dams*, pp. 369

Wardlaw, R. and Sharif, M. (1999). "Evaluation of genetic algorithms for optimal reservoir system operation". *J. Water Resour. Plan. Manage.* 125, 25–33.

YEN, B.C. (1985). *Hydrosystems Engineering Reliability Assessment and Risk Analysis*, Springer Netherlands, ISBN: 978-94-010-8100-9

O_1	متغیر تعیین وجود سرریز
P	احتمال رخداد سیل
P_D	احتمال روگذری سیل از سد اصلی
$P(i)$	احتمال روگذری سیل از فرازبند با دوره بازگشت معین
Q	دبی تونل
Q_r	دبی عبوری از رودخانه
Q_{SP}	ظرفیت سرریز
Q_{90}	قابلیت اطمینان هیدرولیکی 90% دبی تونل
R	شعاع هیدرولیکی تونل
R_r	شعاع هیدرولیکی رودخانه
S_T	شیب طولی تونل
S_r	شیب طولی رودخانه
T	دوره بازگشت سیل
U_{SP}	قیمت واحد سرریز
V_{UC}	حجم فرازبند
U_{UC}	قیمت واحد ساخت فرازبند
V_{SP}	حجم سرریز
W_{sp}	عرض سرریز
Z_r	شیب جانبی سطح مقطع رودخانه
μ_Q	میانگین دبی عبوری تونل
σ_Q	انحراف از معیار دبی تونل
σ_n	انحراف از معیار ضریب مانینگ رودخانه
Ω_n	ضریب تغییرات ضریب مانینگ رودخانه
Ω_y	ضریب تغییرمتغیر y

7- مراجع

شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس (1385). "طرح سد و نیروگاه کارون 4 گزارش فرازبند برای سال آبی 85-86".

Afshar, A. and Marino, M. A. (1990). "Optimizing spillway capacity with uncertainty in flood estimator". *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE 116(1): 71-84.

Afshar, A., Barkhordary, A. and Marino, M.A. (1994). "Optimizing river diversion under hydraulic and hydrologic uncertainties." *J. Water Resour. Plng. and Mgmt.*, ASCE, 120(1), 36-47

Afshar, A., Rasekh, A., and M. H., Afshar (2010). "Risk-based optimization of large flood-diversion systems using genetic algorithms", *Engineering Optimization*, Vol. 41, No. 3, pp. 259–273

Chow, Ven Te. (1959). *Open Channel Hydraulics*, New York, Mc Graw-Hill Book Company, Inc.

Gen M.R. and Cheng L. (2000). *Genetic algorithms and engineering optimization*, Wiley, Europe.