

مدل طراحی بهینه مبتنی بر قابلیت اعتماد سدهای تأخیری پاره‌سنگی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه خودتطبیق

محمد مهدی ریاحی^۱، حسین ریاحی مدوار^{۲*} و ایمان چگنی بهرامی^۳

چکیده

در این مقاله با استفاده از مدل شبیه‌ساز-بهینه‌ساز به طراحی بهینه مبتنی بر قابلیت اعتماد سدهای تأخیری پاره‌سنگی پرداخته شد. مطالعه موردی در تحقیق حاضر، حوضه آبخیز رودخانه کرگانرود در غرب استان گیلان است که براساس آمار هیدرومتری سال‌های ۱۳۳۶-۱۳۹۶ طراحی بهینه سد تأخیری پاره‌سنگی در جهت کاهش پیک سیلاب ورودی به شهر تالش با رویکرد طراحی اولیه مبتنی بر بهینه‌سازی تک‌هدفه و تدقیق طراحی براساس بهینه‌سازی چندهدفه انجام شده است. ابتدا با استفاده از معادلات حاکم، مدل شبیه‌سازی سد تأخیری پاره‌سنگی تهیه شده و سپس طرح اولیه سد برای انواع مختلف شیب دیواره سد (۷۰، ۷۵، ۸۰ و ۹۰ درجه) به دست آمد. در ادامه هریک از طرح‌های اولیه به دست آمده با استفاده از بهینه‌سازی به گونه‌ای بازطراحی شدند که قیود اطمینان تأمین شوند. در نهایت نیز براساس طراحی اولیه به دست آمده، طراحی بهینه مبتنی بر قابلیت اعتماد با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو و الگوریتم ژنتیک چندهدفه خودتطبیق انجام شد. نتایج حاصل از طراحی اولیه نشان داد که در این حالت ضرایب اطمینان برای طرح ارائه شده تأمین نمی‌شوند و نیاز به استفاده از ابزار بهینه‌ساز برای تأمین قیود اطمینان است. در نتیجه از ابعاد به دست آمده از طراحی اولیه به عنوان کران پایین برای مسائل بهینه‌سازی استفاده شد. همچنین نتایج حاصل از بهینه‌سازی چندهدفه برای حالات مختلف سد تأخیری نشان داد که بهینه‌ترین حالت سد تأخیری برای حالتی است که زاویه دیواره سد برابر با ۸۰ درجه باشد که در این حالت کمترین هزینه اتفاق می‌افتد و هزینه در این حالت حدود ۲۰ درصد کمتر از سایر حالات است. همچنین نتایج داد که با کاهش مقدار زاویه در سد تأخیری پاره‌سنگی هزینه ساخت سد تأخیری پاره‌سنگی حدود ۴۰ درصد کاهش می‌یابد. مدل توسعه یافته در این تحقیق امکان بازطراحی و تدقیق طرح اولیه براساس مفاهیم عدم قطعیت، بهینه‌سازی و اعتمادپذیری را فراهم می‌کند و می‌تواند در مطالعات کاربردی مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: سد تأخیری پاره‌سنگی، الگوریتم بهینه‌ساز ژنتیک چندهدفه خودتطبیق، طراحی بهینه مبتنی بر قابلیت اعتماد، شبیه‌سازی مونت کارلو.

ارجاع: ریاحی م. م.، ریاحی مدوار ح. و چگنی بهرامی ا. ۱۴۰۱. مدل طراحی بهینه مبتنی بر قابلیت اعتماد سدهای تأخیری پاره‌سنگی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه خودتطبیق. مجله پژوهش آب ایران. ۴۷: ۲۳-۴۰. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2022.14015.2441>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه شهیدچمران اهواز، اهواز.
۲- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان.
۳- مربی و عضو هیات علمی گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه لرستان، خرم آباد.

* نویسنده مسئول: h.riahi@vru.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۰۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۱۹

مقدمه

امروزه وقایع حدی به‌صورت جدی زندگی بشر را مورد تهدید قرار داده‌اند. از جمله مهم‌ترین وقایع حدی می‌توان به وقوع سیل در اثر تغییرات اقلیمی اشاره کرد. روش‌های زیادی برای مدیریت و کنترل سیل ارائه شده است که به دو دسته راهکارهای سازه‌ای و غیرسازه‌ای تقسیم‌بندی شده‌اند. راهکارهایی همچون توسعه مدل‌های پیش‌بینی سیل، سیستم‌های هشدار و کاربرد سیستم‌های پشتیبان تصمیم در مدیریت یکپارچه حوضه آبریز، آموزش و آگاهی عمومی قبل از وقوع سیل را می‌توان نمونه‌هایی از روش‌های غیرسازه‌ای در کنترل سیل دانست (وانگ و همکاران، ۲۰۱۷؛ ویو و همکاران، ۲۰۰۶؛ لی و همکاران، ۲۰۰۶؛ چونتیان و همکاران، ۲۰۰۲؛ یاسین و همکاران، ۲۰۱۹؛ موسوی و همکاران، ۲۰۱۸). در روش‌های سازه‌ای با ساخت سازه، سیل کنترل می‌شود. از جمله این روش‌ها، می‌توان به سدهای تأخیری پاره‌سنگی اشاره کرد که به‌دلایلی از جمله سهولت در ساخت و بهره‌برداری از مقبولیت بالایی برخوردار هستند و برای کاهش پیک سیلاب مورد استفاده قرار می‌گیرند. به‌دلیل آنکه مواد تشکیل‌دهنده این سدها سنگریزه و سنگ هستند، آب ناشی از سیل که در پشت سد جمع شده است، با گذر از منافذ بدنه سد خارج می‌شود و نیاز به بهره‌برداری خاصی نیست، در نتیجه بهره‌برداری از این سدها آسان است. همچنین به جهت وجود چنین ساختاری که دارای منافذ است، این‌گونه سدها از سدهای خاکی ریسک کمتری دارند (سامانی و همکاران، ۲۰۰۳؛ هوشیاری‌پور و طاهرشمسی، ۲۰۱۵؛ هوشیاری‌پور و همکاران، ۲۰۱۷). با این حال مکانیزم خاص جریان ناشی از درون بدنه این نوع سدها، روش طراحی خاصی را نیاز دارد. طراحی سدهای تأخیری پاره‌سنگی شامل سه مرحله است. مرحله اول مکان‌یابی مناسب سد به‌منظور رسیدن به حجم مخزن مناسب است که بتواند پیک سیلاب ورودی را به میزان کافی کاهش دهد تا از خسارت به پایین‌دست جلوگیری کند؛ مرحله بعدی طراحی سد تأخیری پاره‌سنگی به‌منظور به‌دست‌آوردن ابعاد اولیه سد است و گام نهایی استفاده از ابعاد اولیه سد برای طراحی بهینه است.

تاکنون روش‌های مختلفی برای طراحی سد تأخیری ارائه شده است (آکان، ۱۹۹۰؛ مک‌انرو، ۱۹۹۲؛ آبت و گریگ، ۱۹۷۸؛ وایکوف و سینگ، ۱۹۷۶). از جمله این روش‌ها

می‌توان به روش گرافیکی برای طراحی اولیه سد تأخیری اشاره کرد. آکان و همکاران (۱۹۸۷)، هورن (۱۹۸۷) و آکان (۱۹۸۹) به توسعه روش گرافیکی پرداخته‌اند. فرضی که در این مطالعات شده، این است که رابطه حجم مخزن با عمق آب به‌صورت خطی است. نوع سازه خروجی سد در این مطالعات از نوع تخلیه‌کننده تحتانی منفرد یا دوگانه است و جریان از درون بدنه سد وجود ندارد. روش گرافیکی دیگری که توسط سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS) ارائه شده است از دو منحنی به‌منظور طراحی اولیه سد تأخیری استفاده می‌کند (آبت و گریگ، ۱۹۷۸). در دهه ۱۹۹۰ میلادی، آکان (۱۹۹۰) به ارائه روش گرافیکی پرداخت که با استفاده از هیدروگراف ورودی که از روش SCS به‌دست می‌آید، اندازه سازه را به‌دست می‌آورد. در روش دیگر که توسط SCS ارائه شد، از دو منحنی برای طراحی سد تأخیری استفاده می‌شد. یکی از منحنی‌ها نشان‌دهنده نسبت پیک خرجی مخزن به حجم کلی سیلاب است و منحنی دیگر نسبت پیک دبی خروجی به پیک دبی ورودی است (آکان و همکاران، ۱۹۸۷). علاوه بر روش‌های مبتنی بر گراف، یکسری روابط به‌منظور تعیین حجم مخزن سد تأخیری در حالت خروجی آزاد و با توجه به شرایط پایین‌دست و نوع هیدروگراف نیز توسعه داده شده است. یکی از این روابط توسط باکر (۱۹۷۹) ارائه شد که برای حالتی است که هیدروگراف ورودی و خروجی مثلثی باشند. این رابطه در معادله (۱) آورده شده است (مک‌انرو، ۱۹۹۲).

$$\frac{S_f}{V_f} = 1 - \frac{Q_p}{I_p} \quad (1)$$

در این معادله S_f حجم موردنیاز مخزن، V_f حجم سیلاب، Q_p پیک دبی خروجی و I_p پیک دبی هیدروگراف ورودی است. همچنین نسبت S_f به V_f برابر با ضریب ذخیره سیل و نسبت Q_p به I_p به‌عنوان ضریب پیک سیل شناخته می‌شود. رابطه دیگر برای تعیین حجم مخزن سد توسط آبت و گریگ (۱۹۷۸) ارائه شد که معادله آن در زیر آمده است.

$$\frac{S_f}{V_f} = \left(1 - \frac{Q_p}{I_p}\right)^2 \quad (2)$$

معادله بالا برای حالتی است که هیدروگراف ورودی مثلثی و هیدروگراف خروجی ذوزنقه‌ای باشد. رابطه دیگری که توسط وایکوف و سینگ (۱۹۷۶) ارائه شد، براساس نتایج شبیه‌سازی عددی ۵۰ سیل مختلف بود. این ۵۰ سیل مختلف، براساس ۱۰ هیدروگراف متفاوت و ۵ مخزن با

این مطالعات طراحی سدهای پاره‌سنگی مدنظر قرار گرفته است؛ اما بحث پایداری سازه در برابر جریان سیلابی، شکست و قابلیت اعتماد و اطمینان عملکرد سازه بررسی نشده است. با بررسی سوابق تحقیق مشخص می‌شود که کمتر به طراحی سد تأخیری پاره‌سنگی با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه پرداخته شده و مبحث پایداری سازه و قابلیت اطمینان سازه در طراحی لحاظ نشده است. مبحث اعتمادپذیری و طراحی مهندسی براساس اعتمادپذیری یکی از موضوعات بسیار کاربردی در طراحی سازه‌های آبی است. محققان و مهندسان همواره به دنبال حداقل کردن هزینه طراحی یا به عبارتی ارائه طرح بهینه اقتصادی بوده‌اند. غافل از اینکه این طرح اقتصادی که با کمینه‌کردن یا بهینه‌کردن ابعاد یک طرح به دست می‌آید، ممکن است در اثر وجود عدم قطعیت در پارامترهای طراحی دست‌خوش تغییرات شده و حتی آن طرح را از حالت ایمن خارج کند. مقاله پیش‌رو نیز به بررسی همین عامل در طراحی بهینه سد تأخیری پاره‌سنگی پرداخته است. در این مقاله نشان داده شده است که چگونه تنها در نظر گرفتن طراحی اولیه باعث عدم تأمین ضرایب ایمنی سد تأخیری پاره‌سنگی شده است. نوآوری این مقاله استفاده از ترکیب مدل شبیه‌ساز و بهینه‌ساز با مدل شبیه‌سازی مونت کارلو برای به دست آوردن اعتمادپذیری در جهت طراحی مبتنی بر اعتمادپذیری سد تأخیری پاره‌سنگی است. همچنین در این مقاله از یک مورد مطالعاتی واقعی به منظور ارائه ایده طراحی مبتنی بر قابلیت اعتماد استفاده شده است. ویژگی دیگر پژوهش حاضر در استفاده از مدل شبیه‌ساز-بهینه‌ساز و با لحاظ معادلات جریان غیرداریسی محیط متخلخل و اتصال آن به روش تحلیل عدم قطعیت مونت کارلو به منظور محاسبه اعتمادپذیری و مبحث پایداری سازه است. در مدل بهینه‌ساز با استفاده از رویکرد خودتطبیق، تأمین قیود به صورت خودکار توسط الگوریتم بهینه‌ساز فراهم می‌شود. در این مقاله ابتدا طراحی اولیه سد تأخیری پاره‌سنگی انجام شد و سپس با استفاده از بهینه‌سازی تک‌هدفه، بهینه‌ترین حالت برای طراحی سد تأخیری براساس طراحی اولیه به دست آمد. سپس با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه، طراحی بهینه براساس تحلیل پایداری و اعتمادپذیری انجام و مدل توسعه یافته در مطالعه موردی رودخانه کرگانرود برای کنترل سیل شهر

خروجی‌های مختلف شبیه‌سازی شده بودند.

$$\frac{S_f}{V_f} = \frac{129 \left(1 - \frac{Q_p}{I_p}\right)^{0.753}}{\left(\frac{t_b}{T}\right)^{0.411}} \quad (3)$$

در این معادله t_b و T به ترتیب نشان‌دهنده زمان پایه و زمان رسیدن به پیک هیدروگراف ورودی است. همچنین در رابطه بالا، اثر نوع سازه خروجی در نظر گرفته نشده است. در ادامه، مکاترو (۱۹۹۲) دو رابطه دیگر برای سدهای تأخیری ارائه داد که یکی برای تخلیه‌کننده از نوع سرریز روگذر و دیگری برای تخلیه‌کننده تحتانی از نوع دریچه یا روزنه است. معادلات زیر به ترتیب برای دو حالت تخلیه‌کننده فوق هستند.

$$\frac{S_f}{V_f} = 0.97 - 1.42 \frac{Q_p}{I_p} + 0.82 \left(\frac{Q_p}{I_p}\right)^2 - 0.34 \left(\frac{Q_p}{I_p}\right)^3 \quad (4)$$

$$\frac{S_f}{V_f} = 0.97 - 1.17 \frac{Q_p}{I_p} + 0.77 \left(\frac{Q_p}{I_p}\right)^2 - 0.46 \left(\frac{Q_p}{I_p}\right)^3 \quad (5)$$

با توجه به معادلات ارائه شده می‌توان به این نتیجه رسید که در مطالعات قبلی بدنه سد غیرقابل نفوذ فرض شده است و تخلیه توسط سرریز روگذر یا تخلیه تحتانی انجام می‌شود. این در حالی است که با توجه به نفوذپذیر بودن بدنه سدهای تأخیری پاره‌سنگی، این مفروضات با واقعیت سد تأخیری پاره‌سنگی در تعارض است و لازم است مدل طراحی متناسب این نوع سدها تهیه شود (ریاحی و همکاران، ۲۰۱۹). مطالعات متعددی روی هیدرولیک جریان در سدهای تأخیری پاره‌سنگی انجام شده است، از جمله این موارد روندیابی هیدرولیکی جریان غیرداریسی از درون بدنه سدهای تأخیری پاره‌سنگی (سامانی و همکاران، ۲۰۰۳ و ۲۰۰۴)، مدل‌سازی عددی حجم محدود جریان غیرداریسی از درون بدنه سدهای پاره‌سنگی (سرخوش و همکاران، ۲۰۲۰)، اصلاح رابطه مانینگ برای مقاومت جریان از درون بدنه سدهای پاره‌سنگی (صدقی اصل و رحیمی، ۲۰۱۱)، جریان آشفته از درون بدنه سدهای پاره‌سنگی (صدقی اصل و همکاران، ۲۰۱۴) است که اصول هیدرولیکی جریان از درون بدنه سنگریزه‌ای سدهای پاره‌سنگی را مدنظر قرار داده‌اند و کمتر به اصول و مبانی طراحی این سدها پرداخته شده است. در زمینه طراحی سدهای تأخیری پاره‌سنگی می‌توان به ارائه مدل هیدرولیکی طراحی اولیه سدهای تأخیری پاره‌سنگی توسط ریاحی و همکاران (۲۰۱۹) و طراحی سدهای پاره‌سنگی با استفاده از مدل بهینه‌سازی-شبیه‌سازی توسط نیکو و همکاران (۲۰۱۵) اشاره کرد که در هر دوی

هیدروگراف سیل ورودی

یکی از رایج‌ترین معادلاتی که برای مدل‌سازی هیدروگراف سیل ورودی استفاده می‌شود، تابع توزیع احتمال گاما است. این معادله توسط محققان زیادی به منظور شبیه‌سازی هیدروگراف سیل استفاده شده است (نش، ۱۹۵۹؛ گری، ۱۹۶۱؛ آکسوی، ۲۰۰۰؛ مچاجسکی و کوستسکی، ۲۰۱۸). همچنین محققان زیادی از این معادله برای به‌دست‌آوردن هیدروگراف واحد استفاده کرده‌اند (نش، ۱۹۵۹؛ گری، ۱۹۶۱؛ بهونیا و همکاران، ۲۰۰۵؛ سینگ، ۲۰۱۴). در زیر معادله pdf تابع توزیع احتمال گاما آمده است (گری، ۱۹۶۱).

$$I = I_p \left(\frac{t}{t_p} \right)^m \exp \left(-m \left(\frac{t}{t_p} - 1 \right) \right) \quad (۶)$$

در معادله بالا I ، m ، t_p و I_p به ترتیب برابر با زمان رسیدن هیدروگراف ورودی به مقدار پیک دبی سیلاب ورودی، ضریب بدون بُعد شکل هیدروگراف، دبی هیدروگراف ورودی و دبی پیک هیدروگراف ورودی است. پارامتر m یکی از پارامترهای مهم در این معادله است. دلیل این اهمیت این است که با افزایش m میزان حجم سیلاب کاهش پیدا می‌کند و شاخه پایین‌رونده هیدروگراف کوتاه‌تر می‌شود و در نتیجه شکل هیدروگراف تیزتر خواهد شد. می‌توان با استفاده از معادله (۶) و با انتگرال‌گیری از روی زمان، حجم سیل را به‌دست آورد:

$$V_f = I_p t_p m^{-(m+1)} \exp(m) \Gamma(m+1) \quad (۷)$$

در معادله بالا V_f و Γ به ترتیب حجم سیلاب و تابع گاما است.

رابطه حجم-ارتفاع مخزن

رابطه سطح-ارتفاع مخزن برای $H > 0$ به صورت زیر است:

$$A = k(H + z_0)^n \quad (۸)$$

در معادله بالا A برابر با مساحت سطح آب در مخزن و k ، z_0 ضرایب شکل مخزن هستند و n نیز شیب دیواره مخزن است که بین ۱ تا ۲ متغیر است. رابطه حجم-ارتفاع مخزن که از ترکیب معادله (۸) و معادله $A = dS/dh$ به‌دست می‌آید به صورت زیر نمایش داده می‌شود.

$$S = \frac{k}{n+1} [(H + z_0)^{n+1} - z_0^{n+1}] \quad (۹)$$

در این معادله، S حجم مخزن و H ارتفاع آب در مخزن است.

تالش استفاده شد. برای محاسبه شاخص اعتمادپذیری از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو استفاده شد. در این مقاله، انجام بهینه‌سازی دودخانه با استفاده از الگوریتم جدید بهینه‌ساز ژنتیک چندهدفه خود تطبیق انجام شد.

مواد و روش‌ها

هدف اصلی تحقیق حاضر، طراحی بهینه مبتنی بر قابلیت اعتماد سد تأخیری پاره‌سنگی است. بدین‌منظور در گام اول یک طرح اولیه با استفاده از ترکیب معادلات (۷)، (۹)، (۱۰) و (۱۳) برای به‌دست‌آوردن V_f ، H_1 ، L و S_f استفاده شد. سپس از ابعاد به‌دست‌آمده از این طرح اولیه به‌عنوان کران پایین در الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه استفاده شده و در نهایت یک جبهه پارتو از جواب‌های امکان‌پذیر برای طراحی سد تأخیری پاره‌سنگی به‌دست می‌آید.

مطالعه موردی

رودخانه مورد مطالعه در این تحقیق، رودخانه کرگانرود است که در غرب استان گیلان و در شهرستان تالش واقع شده است و یکی از مهم‌ترین رودخانه‌های این استان است. رودخانه کرگانرود همه‌ساله به‌دلیل بارندگی‌های شدید، هندسه رودخانه، شیب زیاد حوضه و ساخت‌وسازهای زیادی که در بستر رودخانه انجام شده است، با سیلاب‌های متعددی روبه‌رو می‌شود و خسارات مالی و جانی زیادی را در پی دارند. این رودخانه از به هم پیوستن رودخانه‌های کوچکی به‌وجود می‌آید. در این حوضه ایستگاه هیدرومتری ماشین‌خانه بر شاخه اصلی رودخانه کرگانرود در ارتفاع ۱۵۲ متری در سال ۱۳۳۶ احداث شده که تا به امروز فعال و در حال بهره‌برداری است. شکل ۱ حوضه رودخانه کرگانرود را نشان می‌دهد. بررسی اطلاعات هیدرومتری رودخانه در سال‌های ۱۳۳۶ تا ۱۳۶۹ در ایستگاه ماشین‌خانه نشان می‌دهد که حداقل دبی رودخانه ۲۰ مترمکعب در ثانیه و حداکثر دبی ۲۸۹ مترمکعب در ثانیه و دبی متوسط ۵۸/۵ مترمکعب در ثانیه است.

معادلات و قیود طراحی سدهای تأخیری پاره‌سنگی

در این قسمت به‌صورت خلاصه معادلات حاکم و همچنین ضرایب اطمینان به‌منظور طراحی سدهای تأخیری پاره‌سنگی ارائه شده است.

دبی اشل سد تأخیری پاره‌سنگی

سدهای تأخیری پاره‌سنگی از مواد متخلخل درشت ساخته شده است. از این جهت برای تعیین جریان از درون بدنه این سدها از رابطه قانون داری و جریان آشفته غیرخطی استفاده می‌شود. رابطه تحلیلی دبی اشل سد تأخیری پاره‌سنگی توسط سامانی و همکاران (۲۰۰۳) ارائه شده است. این معادله از ترکیب معادله جریان غیرداری در محیط درشت‌دانه سنگدانه‌ای با معادلات پیوستگی و معادلات مقاومت جریان غیرخطی به دست آمده است که به صورت زیر است (سامانی و همکاران، ۲۰۰۳).

$$Q = W \left[\frac{H_1^{b+3} - H_2^{b+3}}{L - 0.7H_1 \cot \theta} \times \frac{1}{a(b+3)} \right]^{\frac{1}{b+2}} \quad (10)$$

در معادله بالا α به صورت زیر است:

$$\alpha = \frac{a(a-\sigma)^{b-1}}{2g v^b n_p^{b+1}} \quad (11)$$

در معادله بالا a و b ضرایب ثابت هستند، d اندازه مصالح بدنه سد، σ انحراف معیار اندازه مصالح بدنه سد، g شتاب ثقل، n_p تخلخل مصالح، v گرانروی سیال، L طول سد در جهت جریان، W طول سد در جهت عمود جریان، H_1 عمق آب در سراب، H_2 عمق آب در پایاب و θ زاویه شیب وجوه سراب و پایاب سد است. مقادیر بهینه a و b با استفاده از بهینه‌سازی به ترتیب ۵۴ و -0.077 به دست آمده است (سامانی و همکاران، ۲۰۰۳).

روند یابی جریان در سدهای تأخیری پاره‌سنگی

با ترکیب معادلات (۶) تا (۱۱) با معادله پیوستگی $\left(\frac{dS}{dt} = I - Q\right)$ می‌توان به یک معادله دیفرانسیل معمولی غیرخطی حاکم بر جریان در سدهای تأخیری پاره‌سنگی رسید که به صورت زیر است.

$$\frac{dS}{dt} = I_p \left(\frac{t}{t_p}\right)^m \exp\left(-m\left(\frac{t}{t_p} - 1\right)\right) - \left(W \left(\frac{\alpha}{b+3}\right)^{\frac{1}{b+2}} \left(\frac{\left((A_0 S + A_0)^{\frac{1}{n+1}} - Z_0\right)^{b+3} - H_2^{b+3}}{L - A_2 \left((A_0 S + A_1)^{\frac{1}{n+1}} - Z_0\right)}\right)^{\frac{1}{b+2}}\right) \quad (12)$$

۳۶۰۰۰ شبیه‌سازی انجام شد و در نهایت یک فرمول کاربردی ساده برای طراحی سدهای تأخیری پاره‌سنگی ارائه داده شد که در زیر آمده است (ریاحی و همکاران، ۲۰۱۹).

در این معادله S_f حجم مخزن مورد نیاز و Q_p دبی پیک هیدروگراف خروجی است.

$$\frac{S_f}{V_f} = 1.0166 - 0.231 \frac{Q_p}{I_p} - 2.2433 \left(\frac{Q_p}{I_p}\right)^2 + 1.4661 \left(\frac{Q_p}{I_p}\right)^3 \quad (13)$$

به دست آوردن مقادیر H و L به ترتیب از معادلات (۹) و (۱۰) استفاده کرد. حال برای به دست آوردن پایداری سد تأخیری طراحی شده می‌توان از معادلاتی که در قسمت بعد ارائه خواهد شد، استفاده کرد.

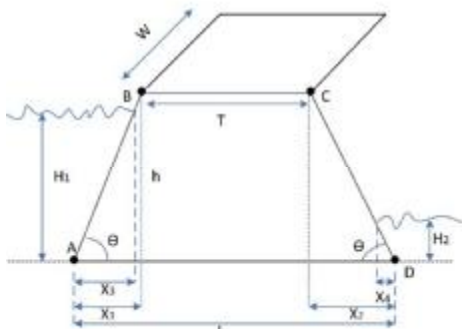
پایداری سازه‌ای و ضرایب اطمینان سد پاره‌سنگی

نیروهای وارد بر سد تأخیری پاره‌سنگی

در این قسمت نیروهای وارد بر سد تأخیری پاره‌سنگی و ممان هریک از این نیروها با فرض اینکه سازه به صورت یک جسم صلب عمل می‌کند، بررسی می‌شود. شماتیک سد تأخیری پاره‌سنگی در شکل ۲ نمایش داده شده است. در این شکل نقطه D ، پنجه سد است. هریک از نیروهای وارد بر سد را می‌توان به دو دسته افقی و قائم تقسیم‌بندی

روند طراحی سد تأخیری پاره‌سنگی

در این قسمت به صورت خلاصه روند طراحی سد تأخیری پاره‌سنگی بیان شده است. بدین منظور بعد از تعیین مقادیر اولیه مانند دبی پیک هیدروگراف خروجی (Q_p) ، عمق آب در پایاب (H_2) ، اندازه مصالح بدنه سد (d) ، انحراف معیار اندازه مصالح بدنه سد (σ) ، شتاب ثقل (g) ، تخلخل مصالح (n_p) ، گرانروی سیال (v) ، طول سد در جهت عمود جریان (W) ، دبی پیک هیدروگراف ورودی (I_p) ، زمان رسیدن هیدروگراف به پیک (t_p) ، ضریب بدون بُعد هیدروگراف (m) ، ضرایب ثابت مخزن (n, k, z_0) ، ضرایب ثابت (a, b) و زیادیه شیب دیواره سد (θ) می‌توان ابتدا از معادله (۷) به منظور به دست آوردن V_f استفاده کرد سپس S_f از معادله (۱۳) تعیین شود و در نهایت برای

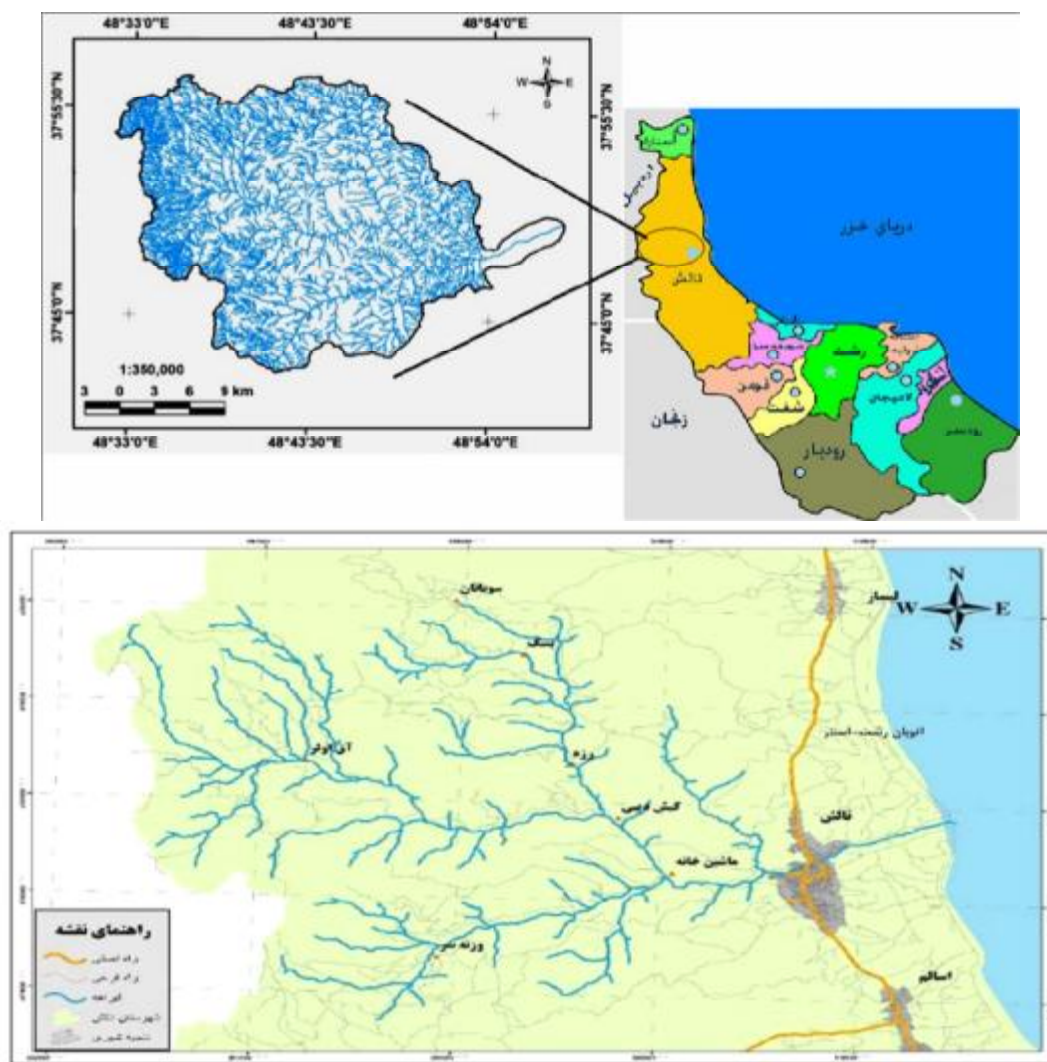


شکل ۲- مقطع سد تأخیری پاره‌سنگی و ابعاد آن

کرد. حال هریک از این نیروهای افقی و عمودی می‌توانند عامل واژگون‌کننده یا مقاوم باشند. جدول ۱ به شرح کامل این نیروها پرداخته است و معادلات هریک و نحوه اثر هر نیرو آورده شده است.

ضرایب اطمینان سد تأخیری پاره‌سنگی

در این قسمت با استفاده از نیروها و ممان‌های ارائه‌شده در جدول ۱، ضرایب ایمنی سد تأخیری پاره‌سنگی به‌دست آورده شده است. فرمول‌های ضرایب ایمنی سد و حدود مجاز هریک در ادامه ارائه شده‌اند (پونمیا، ۱۹۹۲؛ کشیرساگار، ۲۰۱۴؛ دپی‌کیا و سوریبابو، ۲۰۱۵؛ ریاحی و همکاران، ۲۰۲۲؛ مرادی‌کیا و همکاران، ۲۰۲۲).



شکل ۱- موقعیت حوضه آبریز و شبکه هیدروگرافی رودخانه کرگانرود (عابدینی و فتیحی، ۲۰۱۶)

جدول ۱- نیروهای وارد بر سد و ممان هریک

شماره	فرمول	توضیح	نوع نیرو از نظر جهت		نوع نیرو از نظر مقاومت
			عمودی	افقی	
۱	$F_1=1/2*\gamma_w*H_1^2$	نیروی فشار افقی آب در سراب		*	*
۲	$M(F_1)=F_1*H_1/3$	ممان نیروی افقی آب سراب نسبت به پنجه سد (D)			
۳	$F_2=1/2*\gamma_w*H_1*X_3$	نیروی عمودی آب سراب	*		*
۴	$M(F_2)=F_2*(L-(X_3/3))$	ممان نیروی عمودی آب سراب نسبت به پنجه سد (D)			
۵	$F_3=1/2*\gamma_w*H_2^2$	نیروی افقی آب در پایاب		*	*
۶	$M(F_3)=F_3*H_2/3$	ممان نیروی افقی آب پایاب نسبت به پنجه سد (D)			
۷	$F_4=1/2*\gamma_w*H_2*X_4$	نیروی عمودی آب پایاب	*		*
۸	$M(F_4)=F_4*X_4/3$	ممان نیروی عمودی آب پایاب نسبت به پنجه سد (D)			
۹	$W_1=1/2*\gamma_s*X_1*h$	وزن قسمت شماره ۱ سد (W_1)	*		*
۱۰	$M(W_1)=W_1*(L-(2*X_1/3))$	ممان وزن W_1 نسبت به پنجه سد			
۱۱	$W_2=1/2*\gamma_s*T*h$	وزن قسمت شماره ۲ سد (W_2)	*		*
۱۲	$M(W_2)=W_2*(L-T/2-X_1)$	ممان وزن W_2 نسبت به پنجه سد			
۱۳	$W_3=1/2*\gamma_c*X_2*h$	وزن قسمت شماره ۳ سد (W_3)	*		*
۱۴	$M(W_3)=W_3*(2*X_2/3)$	ممان وزن W_3 نسبت به پنجه سد			
۱۵	$U=1/2*\gamma_w*L*(H_1+H_2)$	نیروی زیر فشار U	*		*
۱۶	$M(U)=U*(2*L/3)$	ممان نیروی زیر فشار نسبت به پنجه			
۱۷	$F_{e1}=s*W_1$	نیروی استاتیکی زلزله W_1		*	*
۱۸	$M(F_{e1})=F_{e1}*1/3*h$	ممان نیروی استاتیکی زلزله W_1			
۱۹	$F_{e2}=s*W_2$	نیروی استاتیکی زلزله W_2		*	*
۲۰	$M(F_{e2})=F_{e2}*1/2*h$	ممان نیروی استاتیکی زلزله W_2			
۲۱	$F_{e3}=s*W_3$	نیروی استاتیکی زلزله W_3		*	*
۲۲	$M(F_{e3})=F_{e3}*1/2*h*(L-X_1-T)/(L-X_1)$	ممان نیروی استاتیکی زلزله W_3			
۲۳	$\beta=am(X_1/h)$	زاویه ضلع منتهی به پاشنه سد (A) با خط قائم بر حسب درجه			
۲۴	$Cm=0.73*(90-\beta)/90$	ضریب Cm برای محاسبه نیروی دینامیکی سد			
۲۵	$Pe=\gamma_w*Cm*H_1*a$	ضریب Pe برای محاسبه نیروی دینامیکی سد			
۲۶	$Fe=0.726*pe*H_1$	نیروی دینامیکی زلزله		*	*
۲۷	$Me=0.299*pe*H_1^2$	ممان نیروی دینامیکی زلزله نسبت به پنجه سد D			
۲۸	$W=W_1+W_2+W_3$	وزن کل سد	*		*

ضریب اطمینان در برابر واژگونی

۱/۵ باشد، در این حالت سد در برابر واژگونی مقاوم است.

برای سد پاره سنگی رابطه ضریب اطمینان در برابر واژگونی به صورت زیر آمده است.

$$SFO = \frac{Me(R)}{Me(O)} \quad (14)$$

مجموع ممان‌های مقاوم نسبت به پنجه سد به مجموع ممان‌های واژگونی نسبت به پنجه سد برابر با ضریب اطمینان در برابر واژگونی است. اگر این نسبت بزرگتر از

۱. مدل شبیه‌ساز: این مدل دربرگیرنده معادلات (۷)، (۱۳)، (۹) و (۱۰) به‌منظور طراحی سد و به‌دست‌آوردن V_f ، s_f ، H و L است که عملکرد سد تأخیری پاره‌سنگی را شبیه‌سازی می‌کند.

۲. محاسبه معیار اعتمادپذیری: این گام محاسباتی به‌منظور محاسبه اعتمادپذیری در طراحی سد تأخیری ایجاد شده است. برای به‌دست‌آوردن مقادیر ضرایب اطمینان از معادلات (۱۴) تا (۲۰) می‌توان استفاده کرد که به‌ترتیب مقادیر SFO، SFS و SFF را به‌دست می‌آورد. همچنین نیروها و ممان‌هایی که برای محاسبه این ضرایب مورد نیاز است در جدول ۱ آمده است.

۳. الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک چندهدفه خودتطبیق: این الگوریتم عهده‌دار تعیین پاسخ‌های بهینه است؛ به‌صورتی که هزینه را کمینه و اعتمادپذیری را در طراحی سد تأخیری پاره‌سنگی بیشینه می‌کند.

در ادامه هریک از موارد مطرح‌شده به‌صورت جداگانه بررسی خواهند شد.

طراحی بهینه سد تأخیری پاره‌سنگی

در این قسمت مدل توسعه داده شده برای بهینه‌سازی چندهدفه سد تأخیری پاره‌سنگی آمده است. بهینه‌سازی سد تأخیری پاره‌سنگی به‌منظور کمینه‌کردن هزینه‌های اجرا و تأمین ضرایب اطمینان و همچنین بیشینه‌کردن اعتمادپذیری با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه خودتطبیق انجام شد. اولین تابع هدف الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه سد تأخیری پاره‌سنگی، کمینه‌کردن هزینه اجراست که در زیر آمده است.

$$\text{Minimize } C = A_{DRD} \times \gamma_s \quad (21)$$

در معادله بالا، γ_s وزن مخصوص مصالح سنگی به‌کاررفته در سد تأخیری پاره‌سنگی و A_{DRD} سطح مقطع سد تأخیری پاره‌سنگی است. الگوریتم بهینه‌سازی به‌منظور به‌دست‌آوردن بهینه‌ترین مقطع سد تأخیری پاره‌سنگی استفاده می‌شود. در نتیجه متغیرهای تصمیم‌گیری و متغیرهای ورودی در مسئله بهینه‌سازی، مقاطع سد تأخیری پاره‌سنگی هستند که در شکل ۲ نشان داده شده‌اند و در زیر آمده‌اند.

$$X = [x_1, x_2, T, h] \quad (22)$$

که $Me(O)$ و $Me(R)$ در زیر آمده است.

$$Me(R) = M(W_1) + M(W_2) + M(W_3) + M(F_2) + M(F_3) + M(F_4) \quad (15)$$

$$Me(O) = M(F_1) + M(U) + M(F_{e1}) + M(F_{e2}) + M(F_{e3}) + Me \quad (16)$$

ضریب اطمینان در برابر لغزش

ضریب اطمینان در برابر لغزش برابر با نسبت مجموع نیروهای عمودی به مجموع نیروهای افقی است. اگر ضریب اطمینان در برابر لغزش بزرگ‌تر از $1/5$ باشد، در این حالت سد تأخیری پاره‌سنگی در برابر لغزش پایدار است. در ادامه فرمول ضریب اطمینان در برابر لغزش آمده است.

$$SFS = \frac{\mu F_V}{F_H} \quad (17)$$

که مقادیر F_H و F_V در زیر آمده است.

$$F_V = F_2 + F_4 + W_1 + W_2 + W_3 - U \quad (18)$$

$$F_H = F_1 - F_3 + F_{1e} + F_{2e} + F_{3e} + F_e \quad (19)$$

همچنین μ برابر با ضریب اصطکاک استاتیکی است که تقریباً برابر با 0.77 است.

ضریب اطمینان در برابر اصطکاک

نسبت مجموع نیروی عمودی و تنش برشی مجاز فونداسیون سد پاره‌سنگی به مجموع نیروی افقی برابر با ضریب اطمینان در برابر اصطکاک است. برای ایمنی سد در برابر اصطکاک باید مقدار این ضریب بزرگ‌تر از ۳ باشد. که در این معادله q ، تنش برشی مجاز مواد در سطح برش است.

$$SFF = \frac{\mu F_V + qL}{F_H} \quad (20)$$

بهینه‌سازی و طراحی مبتنی بر قابلیت اعتماد سد تأخیری پاره‌سنگی

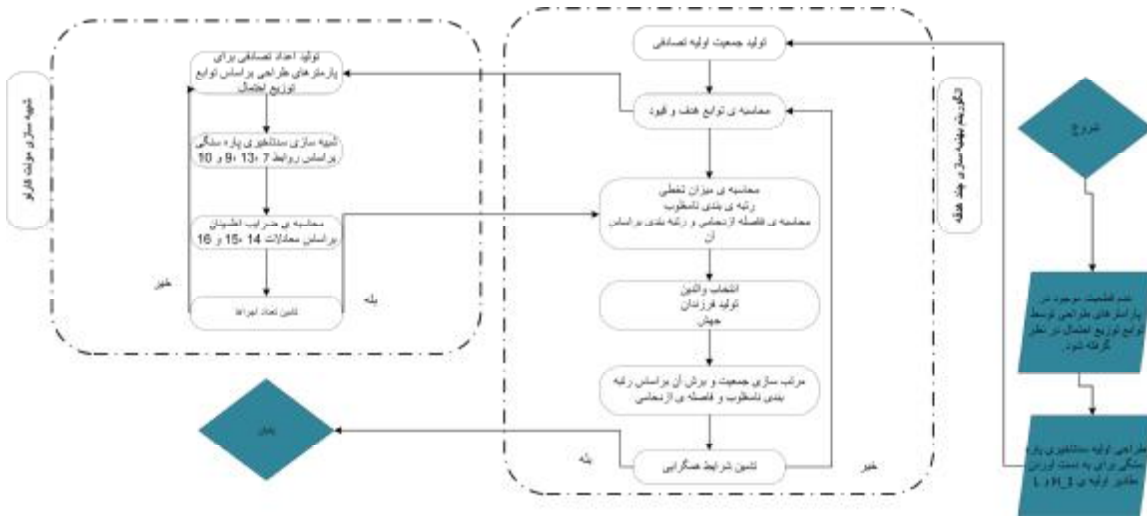
در این قسمت به ارائه روش طراحی و بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر قابلیت اعتماد سد تأخیری پاره‌سنگی پرداخته می‌شود. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، برای طراحی بهینه مبتنی بر قابلیت اعتماد سه هسته اصلی وجود دارد که در زیر به‌صورت خلاصه هرکدام توضیح داده می‌شوند.

در معادله (۲۴) مقادیر H_1' و L' به ترتیب طول اولیه و ارتفاع اولیه سد هستند که از طراحی اولیه به دست می‌آیند. یکی از مزیت‌های طراحی اولیه سد تأخیری پاره‌سنگی محدود کردن فضای جست‌وجوی الگوریتم است که باعث افزایش سرعت الگوریتم برای رسیدن به جواب بهینه می‌شود. دومین تابع هدف الگوریتم بهینه‌سازی سد تأخیری پاره‌سنگی، اعتمادپذیری است که در ادامه شرح داده شده است.

$$\begin{aligned} \text{Input parameters} \\ = [Q_p, I_p, t_p, \theta, W, H_2, n, a, b, \\ k, z_0, d, \sigma, m, \gamma_s, \gamma_w, v, n_p] \end{aligned} \quad (23)$$

پارامترهای x_1, x_2, T و h در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. قیود مسئله بهینه‌سازی سد تأخیری پاره‌سنگی، تأمین ضرایب اطمینان و همچنین مقاطع سد است که از طراحی اولیه به دست می‌آیند. قیود ضرایب اطمینان و قیود مقاطع سد در زیر آورده شده‌اند.

$$\begin{aligned} SFO \geq 1.5, SFS \geq 1.5, SFF \geq 3 \\ H_1 \geq H_1', L \geq L' \end{aligned} \quad (24)$$



شکل ۳- فلوجارت بهینه‌سازی طراحی مبتنی بر قابلیت اعتماد

بر اساس تابع جرم احتمال متغیرهای تصادفی به صورت زیر نوشت (نواک و کولینس، ۲۰۱۲؛ رشکی، ۲۰۱۸).

$$R = \int_{G(X) > 0} f_x(X) dx \quad (26)$$

در معادله بالا f_x بیان‌کننده تابع جرم احتمال متغیرهای تصادفی است. به دست آوردن مقدار R به دلیل پیچیدگی تابع چگالی احتمال به خصوص برای مواردی که توزیع‌های احتمالاتی غیرنرمال باشند، سخت است؛ بنابراین از روش‌های نمونه‌برداری بدین منظور استفاده می‌شود. یکی از روش‌های کارآمد برای محاسبه اعتمادپذیری، روش شبیه‌سازی مونت کارلو است.

شبیه‌سازی مونت کارلو

روش شبیه‌سازی مونت کارلو به دلیل سادگی و مدل‌سازی آسان بسیار مورد استفاده محققان قرار گرفته است. این روش اولین بار توسط متروپولیس و یولیام (۱۹۴۹) ارائه

محاسبه اعتمادپذیری

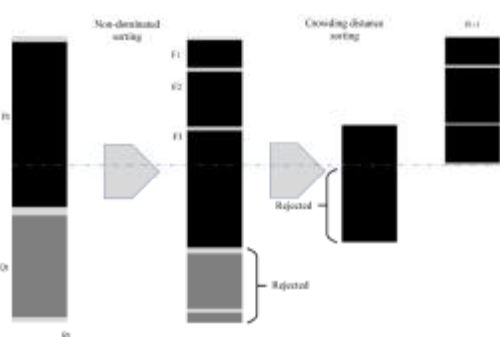
اعتمادپذیری یک سیستم هیدرولیکی به احتمال پایداری^۱ آن سیستم در برابر بارهای وارده^۲ بیان می‌شود (می، ۲۰۱۰)؛ از این رو اعتمادپذیری را می‌توان به عنوان مبثی از آمار و احتمالاتی در نظر گرفت. رابطه ریاضی اعتمادپذیری را می‌توان به صورت زیر بیان کرد (می، ۲۰۱۰).

$$R = P(G(X) > 0) = P(r > l) \quad (25)$$

در معادله بالا R نشان‌دهنده اعتمادپذیری، P نشان‌دهنده احتمال، $G(X)$ بیان‌کننده تابع حالت بین ایمنی و شکست، X برابر با $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)^T$ است که نشان‌دهنده متغیرهای تصادفی، l و r به ترتیب بیان‌کننده پایداری و بار وارده بر سیستم است. می‌توان معادله (۲۵) را

1- Resistance
2- loading

۴. محاسبه میزان تخطی هر عضو از جمعیت از مقادیر قیود
۵. رنک‌بندی جمعیت براساس رتبه‌بندی غیرمغلوب
۶. اندازه‌گیری معیار فاصله ازدحامی برای همه جمعیت
۷. انتخاب والدین
۸. تولید فرزندان
۹. جهش
۱۰. انتخاب جمعیت براساس رتبه‌بندی غیرمغلوب و فاصله ازدحامی
۱۱. اگر شرایط خاتمه برقرار نشده باشد، الگوریتم به گام ۳ برمی‌گردد و محاسبات دوباره انجام می‌گیرد.



شکل ۴- شماتیک الگوریتم ژنتیک مورد استفاده

الگوریتمی که در این پژوهش استفاده شده است، الگوریتم ژنتیک چندهدفه خودتطبیق است. این الگوریتم براین اساس است که به‌جای استفاده از تابع جریمه برای اعمال قیود از مکانیزم خودتطبیقی با تغییر در فرایند انتخاب والدین استفاده شد. در این الگوریتم انتخاب والدین با استفاده از روش چرخ گردان انجام می‌شود. این کار بدین‌صورت انجام می‌گیرد که ابتدا تخطی اعضای جمعیت محاسبه می‌شود و سپس اعضای جمعیت دوبار مرتب می‌شوند. ابتدا اعضای جمعیت از کوچک به بزرگ براساس تابع هدف مرتب می‌شوند. سپس اعضای جمعیت براساس تخطی‌شان مرتب می‌شوند به‌گونه‌ای که هرچه تخطی کمتر داشته باشند، در رنک بالاتر قرار می‌گیرند. حال بعد از مرتب‌سازی جمعیت، به اعضای جمعیت یک احتمال انتخاب نسبت داده می‌شود. این احتمال انتخاب براساس مرتب‌سازی است که صورت گرفته است. سپس برای انتخاب هر والد دوبار از روش چرخ گردان استفاده می‌شود و دو کروموزوم x و y انتخاب می‌شوند. از بین دو

شد. در این روش از توابع چگالی احتمال پارامترهای ورودی به‌منظور تولید اعداد تصادفی استفاده می‌شود. تولید اعداد تصادفی به تعداد زیاد انجام می‌گیرد. سپس مدل براساس پارامترهای تصادفی تولیدشده اجرا می‌شود و از خروجی‌های به‌دست‌آمده می‌توان میزان اعتمادپذیری مدل را محاسبه کرد. روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو یک روش عددی^۱، بر پایه نمونه‌برداری^۲ و روش غیراختلالی است (رجبی و همکاران، ۲۰۱۵). در ادامه معادله روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو بر پایه احتمال ایمنی^۳ آمده است.

$$p_R = \int \dots \int I[G(X) > 0] f_x(X) dx \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{n_s} I[G(X) > 0] \approx \frac{n_s}{N} \quad (27)$$

در معادله بالا n_s تعداد نمونه‌های قرارگرفته در ناحیه ایمن، N تعداد کل نمونه‌های تولیدشده و I تعداد تابع شمارنده^۴ است که اگر در ناحیه ایمن باشد، مقدار یک و اگر در ناحیه شکست^۵ باشد، مقدار صفر می‌گیرد. حال می‌توان با استفاده از دو تابع ۱۷ و ۲۲ و همچنین متغیرهای ورودی و تصمیم‌گیری که در معادله ۱۸ آمده است و بهره‌گرفتن از قیود مسئله بهینه‌سازی که در معادله ۱۹ آمده است، بهینه‌سازی چندهدفه سد تأخیری پاره‌سنگی را انجام داد.

بهینه‌سازی چندهدفه سد تأخیری پاره‌سنگی

در این پژوهش بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم NSGA-II انجام می‌گیرد. این الگوریتم، توسعه‌یافته الگوریتم NSGA است که توسط دب و همکاران (۲۰۰۲) ارائه شده است. در شکل ۴ روند الگوریتم NSGA-II نشان داده شده است (دب و همکاران، ۲۰۰۲؛ لین و یبه، ۲۰۱۲).

به‌طور خلاصه گام‌های الگوریتم ژنتیک را می‌توان به‌صورت زیر برشمرد (ریاحی و بهرامی‌چگنی، ۲۰۲۲):

۱. تنظیم پارامترهای الگوریتم مانند تعداد جمعیت اولیه، تعداد تکرار، نرخ جهش و...

۲. تولید جمعیت اولیه به‌صورت کاملاً تصادفی براساس محدوده باندهای اعلام‌شده

۳. ارزیابی تابع هدف برای جمعیت

1- Numerical method
2- Sampling-based
3- Safety
4- COUNTER FUNCTION
5- FAILURE

معادلات (۲۲) و (۲۳) آورده شده است و قیود مسئله نیز معادله (۲۴) است.

برای هرکدام از حالت‌های سد تأخیری پاره‌سنگی ۱۰ مرتبه بهینه‌سازی انجام می‌شود که از بین این ۱۰ اجرا، بهینه‌ترین خروجی در جدول ۴ آمده است. همچنین خروجی هر ۱۰ اجرا برای همه حالات سد تأخیری در شکل ۵ نشان داده شده است.

همان‌طور که از جدول ۴ مشخص است، با افزایش مقدار زاویه سد، ارتفاع سد کم شده و مقدار طول آن افزایش می‌یابد. همچنین از مقادیر ضرایب اطمینان کاملاً مشخص است، همه ضرایب اطمینان مقادیر حداقل را رعایت کرده‌اند. نکته ارزشمند درباره ضرایب اطمینان این است که بحرانی‌ترین مقدار برای ضرایب اطمینان، مقدار SFO است که اگر این مقدار تأمین شود، مابقی ضرایب اطمینان نیز تأمین خواهند شد. از بین چهار حالت سد تأخیری پاره‌سنگی، بهینه‌ترین حالت زمانی است که زاویه ۸۰ درجه باشد که در این حالت هزینه حدود ۲۰ درصد از بقیه حالات کمتر است.

عدم قطعیت پارامترهای ورودی مدل

در جدول ۵ پارامترهای ورودی به همراه دسته‌بندی، واحد، انحراف معیار، نوع توزیع و مقدار میانگین برای هرکدام از پارامترها آورده شده است. از سه نوع تابع توزیع احتمال برای مدل‌سازی احتمالاتی عدم قطعیت استفاده شده است. تابع توزیع یکنواخت، تابع توزیع گوسین و تابع توزیع مقادیر حدی توزیع یافته، سه تابع توزیع احتمال به‌کاررفته در این تحقیق هستند. برای مدل‌سازی عدم قطعیت در مقادیر پارامترهای حدی مانند مقادیر حداکثر دبی هیدروگراف ورودی، حداکثر مقدار زمان رسیدن هیدروگراف به پیک و حداکثر مقدار دبی هیدروگراف خروجی، از تابع توزیع احتمال مقادیر حدی توزیع یافته و برای مدل‌سازی عدم قطعیت ضرایب ثابت از توزیع گوسین و از توزیع یکنواخت به‌عنوان توزیعی برای مصالح استفاده شد. برای شناسایی عدم قطعیت با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو باید از مدل تعداد زیادی خروجی گرفته شود. بدین‌منظور برای پارامترهای ورودی براساس نوع توزیع احتمالاتی که برای هرکدام در نظر گرفته شده است، ۱۰۰۰۰۰ سری مقدار اولیه برای هرکدام از متغیرهای ورودی تولید می‌شود، سپس هر سری از این

کروموزوم، کروموزوم x به‌عنوان والد انتخاب می‌شود اگر یکی از حالات زیر اتفاق بیافتد:

- اگر x امکان‌پذیر باشد^۱ و y غیرشدنی^۲ باشد.
- اگر هر دوی x و y غیرشدنی باشند، اما مقدار تخطی x از y کمتر باشد.
- اگر هر دوی x و y شدنی باشند و مقدار هزینه x از y کمتر باشد.
- اگر موارد بالا اتفاق نیافتد، y به‌عنوان والد انتخاب می‌شود.

نتایج و بحث

طراحی اولیه سد تأخیری پاره‌سنگی

در این قسمت برای بررسی مدل ارائه‌شده از مثالی که در تحقیق ریاحی و همکاران (۲۰۱۹) آمده است، استفاده شده است. همچنین برای بررسی حالات مختلف، شیب دیواره‌های سد از چهار مقدار مختلف θ که برابر با ۹۰، ۸۰، ۷۵ و ۷۰ درجه است، استفاده شد. پارامترهای به‌کار رفته در این مثال در جدول ۲ آمده است. می‌توان از پارامترهای موجود در جدول ۲ و جای‌گذاری آن‌ها در معادلات (۷) به‌منظور به‌دست‌آوردن V_f ، در معادله (۱۳) برای به‌دست‌آوردن S_f ، در معادله (۹) برای به‌دست‌آوردن آب پشت سد (H_i)، در معادله (۱۰) برای به‌دست‌آوردن طول سد (L) و معادلات (۱۴) تا (۲۰) برای به‌دست‌آوردن SFO، SFS و SFF استفاده کرد. اگر همین طرح اولیه مبنای اجرای سازه سد قرار گیرد، باید ارتفاع سد (H) از ارتفاع آب پشت سد (H_i) بیشتر یا مساوی شود. برای هریک از طرح‌های اولیه مقادیر ضرایب اطمینان SFS، SFO و SFF نیز محاسبه شده‌اند. همان‌طور از جدول ۳ اولیه قابل‌مشاهده است، هیچ‌یک از طرح‌های اولیه نتوانسته‌اند ضرایب اطمینان SFO و SFS را تأمین کنند. حال با استفاده از بهینه‌سازی تک‌هدفه هریک از طرح‌های اولیه به بهینه‌ساز داده می‌شوند تا الگوریتم بهینه‌ساز، طرحی را براساس این طرح‌های اولیه به‌دست آورد که دارای کمینه هزینه است و درعین‌حال ضرایب اطمینان در آن‌ها تأمین شده است. معادله هدف در این مسئله، معادله (۲۱) و متغیرهای تصمیم‌گیری و متغیرهای ورودی در

سری داده می‌شود. سپس براساس معادله (۲۷) مجموع کل اجرایی که مقدار آن‌ها ۱ شده است، به تعداد ۱۰۰۰۰۰ که همان تعداد کل اجراها یا سری داده‌های تولید شده بود، تقسیم می‌شود و اعتمادپذیری سد تأخیری پاره‌سنگی به دست می‌آید و خروجی‌های مورد نیاز گرفته می‌شوند.

مقادیر به ترتیب به معادلات (۷)، (۱۳)، (۹) و (۱۰) به منظور به دست آوردن V_f ، d_f و H و L داده می‌شود. بعد از به دست آوردن مقادیر سد، برای به دست آوردن ضرایب اعتمادپذیری از معادلات (۱۴) تا (۲۰) استفاده می‌شود. اگر ضرایب اطمینان قیود مورد نظر در معادله (۲۴) را تأمین کرد مقدار یک و در غیر این صورت مقدار 0 به آن

جدول ۲- مقادیر مورد استفاده برای طراحی اولیه سد تأخیری پاره‌سنگی

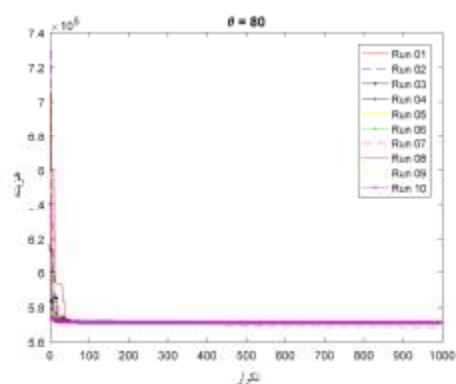
متغیرها	b	a	n	k	z_0	m	t_p	Q_p	I_p
مقادیر	-۰/۰۷۷	۵۴	۲	۱۱۰۰۰	0	۱۰	۳۶۰۰	۱۱	۲۸
متغیرها	θ_4	θ_3	θ_2	θ_1	w	n_p	σ	d	v
مقادیر	۷۰	۷۵	۸۵	۹۰	۲	۲	0	۰/۲۵	۰/۰۰۰۰۰۱

جدول ۳- خروجی طراحی اولیه برای انواع مختلف سد تأخیری پاره‌سنگی

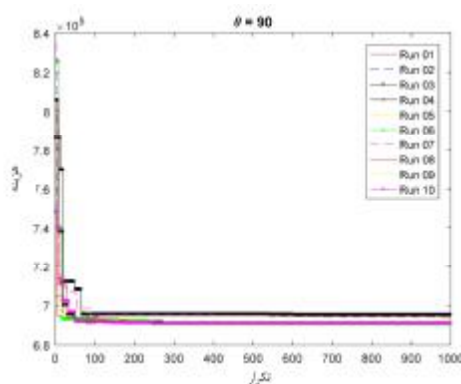
	طول (متر)	ارتفاع (متر)	SFS	SFF	SFO	θ
θ_1	۳/۴۸۴۳	۴/۷۷۸۵	۱/۰۲۷۴	۳/۵۵۶۷	۱/۱۲۷۶	
θ_2	۳/۹۹۱۵	۴/۷۷۸۵	۱/۲۴۳۳	۴/۰۶۹۶	۱/۰۰۳۹	
θ_3	۴/۲۸۲۶	۴/۷۷۸۵	۱/۳۵۷۳	۴/۳۴۷۵	۱/۳۱۸۶	
θ_4	۴/۶۱۶۸	۴/۷۷۸۵	۱/۴۷۶۹	۴/۶۴۳۶	۱/۳۱۱۲	

جدول ۴- بهینه‌ترین خروجی بهینه‌سازی تک‌هدفه برای انواع مختلف سد تأخیری پاره‌سنگی

	طول (متر)	ارتفاع (متر)	هزینه	SFS	SFF	SFO	θ
θ_1	۴/۳۵۱۳	۵/۸۸۱۷	۶۹۱۰۰۰	۱/۵۷۲۷	۴/۳۹۹۴	۱/۵	
θ_2	۴/۷۲۵۶	۵/۶۴۵۷	۵۶۸۵۹۲	۱/۶۸۶۳	۴/۷۳۸۸	۱/۵	
θ_3	۵/۹۲	۵/۰۸۴۰	۶۲۵۶۳۲	۱/۷۷۶۷	۵/۴۵۸۲	۱/۵	
θ_4	۷/۷۴۹۳	۴/۶۷۳۳	۷۶۳۱۷۳	۱/۹۳۰۲	۶/۴۳۵۷	۱/۵	

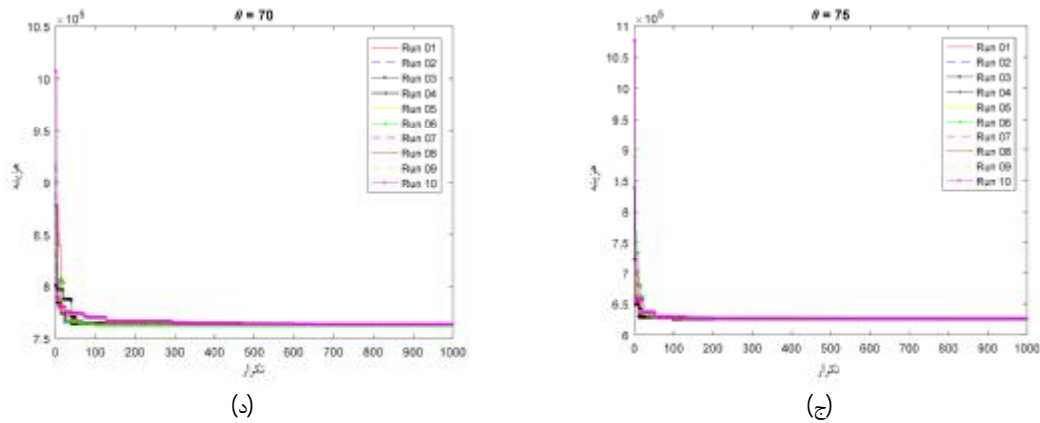


(ب)



(الف)

شکل ۵- خروجی ۱۰ اجرا برای همه حالات سد تأخیری پاره‌سنگی با زوایای، الف - ۹۰ درجه، ب - ۸۰ درجه



ادامه شکل ۵- خروجی ۱۰ اجرا برای همه حالات سد تأخیری پاره‌سنگی با زوایای، ج- ۷۵ درجه و د- ۷۰ درجه

جدول ۵- عدم قطعیت پارامترهای ورودی

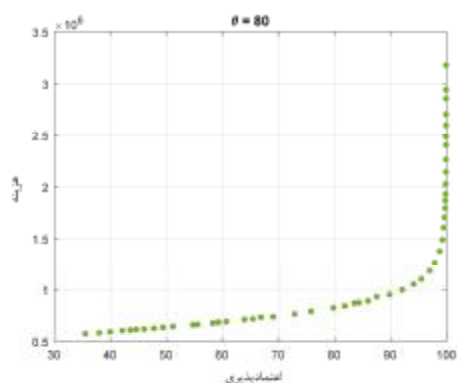
شماره	نوع	پارامتر	تعریف	واحد	نوع تابع توزیع احتمال	انحراف معیار	مقدار میانگین	فرمول	
۱	دبی	I_p	ماکزیمم دبی هیدروگراف ورودی	m^3/s	GEV	%۵	۲۸	۶	
۲		Q_p	دبی پیک هیدروگراف خروجی		GEV	%۵	۱۱	۱۳	
۳	زمان	t_p	زمان رسیدن هیدروگراف ورودی به پیک خودش	s	GEV	%۵	۳۶۰۰	۶	
۴	ضرایب	m	ضریب بدون بُعد شکل هیدروگراف		Gaussian	%۵	۱۰	۶	
۵		z_0	ضرایب ثابت مخزن		Gaussian	%۵	0	۹	
۶		k	ضرایب ثابت مخزن		Gaussian	%۵	۱۱۰۰۰	۹	
۷		n	ضرایب ثابت مخزن		Gaussian	%۵	۲	۹	
۸		a	مقادیر ثابت حاصل از بهینه‌سازی		Gaussian	%۵	۵۴	۱۱	
۹		b	مقادیر ثابت حاصل از بهینه‌سازی		Gaussian	%۵	-۰/۰۷۷	۱۱	
۱۰		s	ضریب زمین‌لرزه		Gaussian	%۵	۰/۱		
۱۱		μ	ضریب اصطکاک استاتیکی		Gaussian	%۵	۰/۷	۱۵	
۱۲		Material	d	اندازه مصالح سد		Uniform	%۵	-۰/۲۵	۱۱
۱۳			σ	انحراف معیار اندازه مصالح سد	m	Gaussian	%۵	0	۱۱
۱۴			n_p	تخلخل مصالح		Uniform	%۵	-۰/۲	۱۱
۱۵	γ_s		وزن مخصوص مصالح (سنگ)	N/m^3	Gaussian	%۵	۲۷۰۰۰	۱۷	
۱۶	طول	H_2	عمق پایاب	m	Gaussian	%۵	۱	۱۰	
۱۷		w	عرض سد		Uniform	%۵	۲	۱۰	
۱۸	زاویه	θ	زاویه شیب وجوه سراب و پایاب سد	degrees	Uniform	%۵	۹۰	۱۰	
۱۹	تنش	q	تنش مجاز مواد در سطح برش	KN/m^2	Gaussian	%۵	۷۰	۱۶	

جمعیت اولیه: ۵۰، تعداد تکرار: ۱۰۰۰، درصد جهش: ۵ درصد، درصد ترکیب: ۹۰ درصد. جبهه پارتوی حاصل از این روش در شکل ۶ نشان داده شده است. از بین جمعیت تشکیل‌دهنده جبهه پارتو، انتخاب بهینه براساس حالت تعادل بین درصد اعتمادپذیری سازه و هزینه انجام می‌شود که هم سازه اعتماد مطلوبی داشته باشد و هم اینکه از نظر هزینه نیز اقتصادی باشد. براین اساس در این تحقیق برای هر حالت از سد تأخیری یک عضو با اعتمادپذیری ۷۰ درصد انتخاب شده است و در جدول ۶ مقادیر آن نمایش داده شده است؛ علاوه بر این در شرایط کاربردی با توجه به بودجه در دسترس و میزان اعتمادی که کارفرما نیاز دارد، می‌توان جواب‌ها را اولویت‌بندی کرد و سپس تعادل بین اعتمادپذیری-هزینه را برای انتخاب طرح بهینه مدنظر قرار داد.

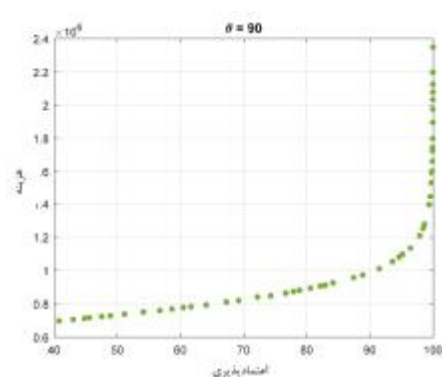
بهینه‌سازی طراحی مبتنی بر قابلیت اعتماد

در این مرحله و بعد از به دست آوردن مدل اولیه سد تأخیری و سپس اعمال عدم قطعیت روی پارامترهای موجود و تأثیرگذار در طراحی سد تأخیری، نوبت به بهینه‌سازی سد تأخیری با استفاده از بهینه‌سازی چندهدفه Self-adaptive NSGA-II می‌رسد. این بهینه‌سازی مبتنی بر اعتمادپذیری است و بدین منظور الگوریتم Self-adaptive NSGA-II به شبیه‌سازی مونت کارلو و مدل شبیه‌سازی سد تأخیری پاره‌سنگی متصل می‌شود. فلوچارت الگوریتم ارائه شده در شکل ۳ نشان داده شده است.

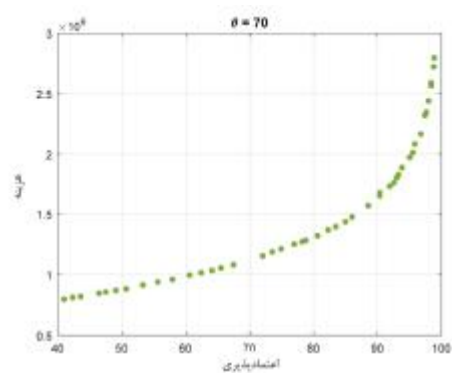
بهینه‌سازی چندهدفه برای همه حالات سد تأخیری پاره‌سنگی انجام می‌شود. مشخصات پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی به کاررفته در این پژوهش عبارتند از: تعداد



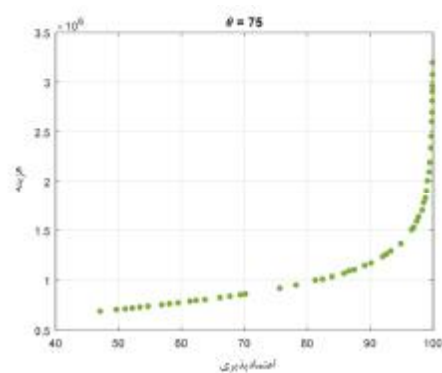
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

ادامه شکل ۶- خروجی جبهه پارتوی بهینه‌سازی چندهدفه برای حالات مختلف سد تأخیری پاره‌سنگی با زوایای، الف - ۹۰ درجه،

ب - ۸۰ درجه، ج - ۷۵ درجه و د - ۷۰

پاره‌سنگی در نظر گرفته شده است، افزایش چشم‌گیری می‌یابد؛ به‌عنوان مثال هزینه اجرای سد تأخیری در حالتی که زاویه برابر با ۷۰ درجه است، نسبت به حالت اول، یعنی

با توجه به خروجی‌های جدول ۶ نتیجه می‌شود که با کاهش مقدار زاویه در سد تأخیری پاره‌سنگی میزان حجم مصالح مصرفی که به‌عنوان هزینه ساخت سد تأخیری

به ۷۰ درجه می‌رسد، این مقادیر به ترتیب به ۱/۷۰۷۹، ۷/۴۹۴۷ و ۲/۲۹۴۷ می‌رسند. نکته دیگری که ارزش ذکر کردن را دارد این مورد است که با کاهش زاویه بدنه سد در سد تأخیری پاره‌سنگی مقدار طول بدنه سد افزایش و مقدار ارتفاع سد کاهش می‌یابد.

حالتی که زاویه ۹۰ درجه است، حدود ۴۰ درصد افزایش یافته است. از سوی دیگر با کاهش زاویه بدنه سد تأخیری، ضرایب اطمینان نیز افزایش می‌یابند؛ برای مثال، مقادیر SFO، SFF و SFS در سد تأخیری پاره‌سنگی در حالتی که زاویه برابر با ۹۰ درجه است به ترتیب برابر با ۱/۶۷۳۶، ۴/۷۴۴۱ و ۱/۸۵۹۸ است که هنگامی که زاویه بدنه سد

جدول ۶- اعضای انتخاب شده از جبهه پارتو برای هر حالت سد تأخیری پاره‌سنگی

طول (متر)	ارتفاع (متر)	هزینه	اعتمادپذیری (%)	SFS	SFF	SFO	
۴/۷۳۹۳	۶/۵۳۹۳	۸۳۶۷۸۰	۷۲/۲۴۵۰	۱/۸۵۹۸	۴/۷۴۴۱	۱/۶۷۳۶	θ_1
۵/۷۱۴۰	۵/۷۹۶۴	۷۳۴۲۹۰	۶۹/۵۷۸۲	۱/۹۴۰۳	۵/۳۵۷۲	۱/۶۳۰۰	θ_2
۷/۳۶۶۱	۵/۳۱۲۶	۸۵۲۴۱۰	۶۹/۴۲۳۱	۲/۰۹۴۳	۶/۶۲۲۷۳	۱/۶۹۰۵	θ_3
۱۰/۴۸۲۴	۴/۸۸۸۵	۱۱۴۸۷۰۰	۷۲/۱۱۵۰	۲/۲۹۴۷	۷/۴۹۴۷	۱/۷۰۷۹	θ_4

با استفاده از معادلات (۷)، (۱۳)، (۹) و (۱۰) به منظور به دست آوردن V_f ، H و L و جای گذاری پارامترهای موجود در جدول ۷ در این معادلات، طرح اولیه سد تأخیری پاره‌سنگی به دست می‌آید. مقادیر ارتفاع آب پشت سد (H_1)، همچنین طول سد (L) از طرح اولیه به دست می‌آیند. مقادیر ضرایب اطمینان SFS، SFO و SFF برای طراحی اولیه در جدول ۸ آمده است. همان‌طور از مقادیر ضرایب اطمینان قابل مشاهده است، هیچ‌کدام از ضرایب اطمینان در این طراحی تأمین نشده‌اند و لازم است بازطراحی شود.

کاربرد مدل در مطالعه موردی رودخانه کرگانرود

در ادامه با استفاده از پارامترهای طراحی موجود در جدول ۷ و مشخصات آماری و هیدرولوژی سیلاب براساس تحلیل فراوانی سیلاب در حوضه کرگانرود و همچنین دبی ایمن طراحی که توسط مهندسان مشاور سفیدرودگیلان (۱۳۹۸) توصیه شده است، سد تأخیری پاره‌سنگی با هدف کنترل سیلاب در رودخانه کرگانرود در سه فاز طراحی مختلف یعنی: طراحی اولیه، طراحی با استفاده از بهینه‌سازی تک‌هدفه و طراحی چندهدفه مبتنی بر قابلیت اعتماد، طراحی شد.

جدول ۷- مقادیر مورد استفاده برای طراحی اولیه سد تأخیری پاره‌سنگی

متغیرها	b	a	n	k	z_0	m	t_p	Q_p	I_p
مقادیر	-۰۰۰۷۷	۵۴	۲	۱۱۰۰۰	۰	۱۰	۳۶۰۰	۵۸/۵	۱۱۷
متغیرها	θ	w	n_p	σ	d	v			
مقادیر	۸۰	۱۰	۲	۰	۰/۲۵	۰/۰۰۰۰۰۱			

جدول ۸- خروجی طراحی اولیه سد تأخیری پاره‌سنگی رودخانه کرگانرود

طول (متر)	ارتفاع (متر)	SFS	SFF	SFO
۱۳/۷۱۷۸	۸/۳۲۸۴	۱/۴۱۸۸	۳/۴۵۲۲	۱/۱۱۹۶

این ۱۰ اجرا بهینه‌ترین خروجی مشخص شده است و در جدول ۹ آمده است. همچنین خروجی هر ۱۰ اجرا برای همه حالات سد تأخیری در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که از جدول ۹ قابل مشاهده است، همانند مثال‌های ارائه شده قبلی بحرانی‌ترین مقدار برای ضرایب اطمینان، مقدار SFO است که اگر تأمین شود، مابقی

حال بعد از به دست آوردن مقادیر طرح اولیه، این مقادیر به عنوان حد پایین به الگوریتم بهینه‌سازی تک‌هدفه داده می‌شوند تا الگوریتم بهینه‌سازی، طرحی را به دست آورد که دارای کمینه هزینه است و درعین حال ضرایب اطمینان در آن تأمین شده‌اند. برای بهینه‌سازی تک‌هدفه سد تأخیری پاره‌سنگی ۱۰ مرتبه بهینه‌سازی انجام می‌شود که از بین

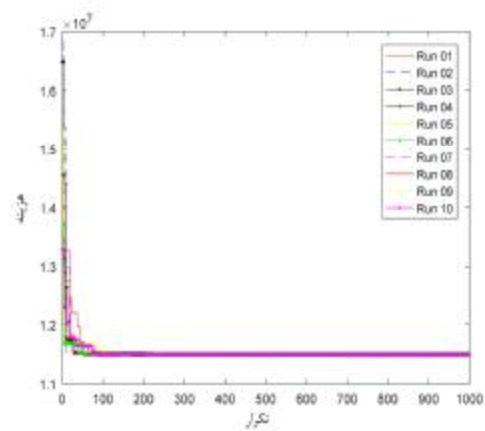
شبیه‌سازی مونت‌کارلو و مدل شبیه‌ساز سد تأخیری پاره‌سنگی استفاده می‌شود. مشخصات پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی به کاررفته در این پژوهش عبارت‌اند از: تعداد جمعیت اولیه: ۵۰، تعداد تکرار: ۱۲۰۰، درصد جهش: ۵ درصد، درصد ترکیب: ۹۵ درصد. خروجی جبهه پارتوی حاصل از این روش در شکل ۸ نشان داده شده است.

ضرایب اطمینان نیز تأمین خواهند شد. برای طراحی مبتنی بر قابلیت اعتماد می‌توان از عدم قطعیت‌های موجود در جدول ۵ استفاده کرد. همچنین از خروجی طراحی اولیه به عنوان مقادیر حد پایین برای الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه استفاده می‌شود. برای انجام بهینه‌سازی مبتنی بر اعتمادپذیری از لینک الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه،

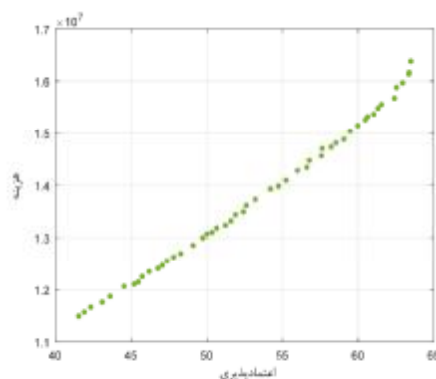
جدول ۹- بهینه‌ترین خروجی بهینه‌سازی تک‌هدفه سد تأخیری پاره‌سنگی رودخانه کرگانرود

<i>SFO</i>	<i>SFF</i>	<i>SFS</i>	هزینه	ارتفاع (متر)	طول (متر)
۱/۵	۵/۸۸۳۸	۲/۹۱۳۰	۱۱۴۷۸۶۹۷	۱۱/۶۸۴۱	۳۸/۴۴۲

مناسب برای احداث سد، طراحی اولیه و طراحی نهایی، تشکیل شده است. برخلاف روش‌های مطرح شده در مطالعات قبلی که بدنه سدهای تأخیری پاره‌سنگی را غیرقابل نفوذ فرض می‌کردند، در این طرح از معادله دی-اشل جریان غیرداری در سد پاره‌سنگی استفاده شده است که نشأت از بدنه سد را نیز در مدل شبیه‌سازی سد تأخیری پاره‌سنگی دیده است؛ اما متأسفانه تاکنون در هیچ‌یک از پژوهش‌ها از رویکردهای مبتنی بر قابلیت اعتماد برای طراحی این‌گونه سدها استفاده نشده است. در تحقیق حاضر از معادلات هیدروگراف ورودی، رابطه حجم-ارتفاع مخزن، معادله دی-اشل جریان غیرداری در سد پاره‌سنگی و معادله روندیابی غیرخطی جریان در سدهای تأخیری پاره‌سنگی، برای شبیه‌سازی سد تأخیری پاره‌سنگی استفاده شد. سپس با در نظر گرفتن چهار حالت برای زاویه دیواره سد، به طراحی اولیه این سد پرداخته شد. برای هر یک از طرح‌های اولیه مقادیر ضرایب اطمینان *SFS*، *SFO* و *SFF* محاسبه شد. نشان داده شد که در هیچ‌یک از طرح‌های اولیه مقادیر حداقل ضرایب اطمینان *SFS* و *SFO* تأمین نشده‌اند. سپس با استفاده از بهینه‌سازی تک‌هدفه هر یک از طرح‌های اولیه به الگوریتم بهینه‌ساز داده شد تا بهینه‌ترین طرح برای سد تأخیری پاره‌سنگی به‌گونه‌ای به دست آید که طرح مورد نظر دارای کمینه‌ترین هزینه باشد و درعین حال نیز ضرایب اطمینان تأمین شوند. برای هر کدام از حالت‌های سد تأخیری پاره‌سنگی ۱۰ مرتبه بهینه‌سازی انجام گرفت. همان‌طور که از خروجی‌های بهینه‌سازی به دست آمد، با افزایش مقدار زاویه سد، ارتفاع سد کم می‌شود و مقدار طول آن افزایش می‌یابد. همچنین در همه خروجی‌ها مقدار حداقل ضرایب اطمینان تأمین شده‌اند. نکته دیگر در مورد ضرایب



شکل ۷- خروجی ۱۰ اجرا برای سد تأخیری پاره‌سنگی رودخانه کرگانرود



شکل ۸- خروجی جبهه پارتوی بهینه‌سازی چندهدفه برای سد تأخیری پاره‌سنگی رودخانه کرگانرود

نتیجه‌گیری

سدهای تأخیری پاره‌سنگی، یکی از روش‌های سازه‌ای برای کنترل و کاهش پیک سیلاب است که به دلیل سهولت در اجرا و بهره‌برداری از مقبولیت بالایی برخوردار هستند. طراحی این‌گونه سدها از سه گام، تعیین محل

- Irrigation and Drainage Engineering. 116(4): 527-536.
5. Akan A. O. Al-Muttair F. F. and Al-Turbak AS. 1987. Design aid for de-tention basins. Design of hydraulic structures. Proc. Int. Symp., Fort Collins, Colo. 177-182.
 6. Aksoy H. 2000. Use of gamma distribution in hydrological analysis. Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences. 24(6): 419-428.
 7. Bhunya P. K. Ghosh N. C. Mishra SK. Ojha CS. and Berndtsson R. 2005. Hybrid model for derivation of synthetic unit hydrograph. Journal of Hydrologic Engineering. 10(6): 458-467.
 8. Chuntian C. and Chau K. W. 2002. Three-person multiobjective conflict decision in reservoir flood control. European Journal of Operational Research. 142(3): 625-631.
 9. Deb K. Pratap A. Agarwal S. and Meyarivan TAMT. 2002. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. IEEE transactions on evolutionary computation. 6(2): 182-197.
 10. Deepika R. and Suribabu C.R. 2015. Optimal design of gravity dam using differential evolution algorithm. Iran University of Science & Technology. 5(3): 255-266.
 11. Gray D.M. 1961. Synthetic unit hydrographs for small watersheds. Journal of the Hydraulics Division. 87(4): 33-54.
 12. Hooshyaripor F. and Tahershamsi A. 2015. Effect of reservoir side slopes on dam-break flood waves. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. 9(1): 458-468.
 13. Hooshyaripor F. Tahershamsi A. and Razi S. 2017. Dam break flood wave under different reservoir's capacities and lengths. Sādhanā. 42(9): 1557-1569.
 14. Horn D.R. 1987. Graphic estimation of peak flow reduction in reservoirs. J. Hydr. Engrg., ASCE. 113(11): 1441-1450.
 15. Kshirsagar D.Y. 2014. Effect of variation of earthquake intensity on stability of gravity dam. J Indian Water Resour Soc. 34(3): 1-6.
 16. Li X. Y. Chau K. W. Cheng C. T. and Li Y. S. 2006. A web-based flood forecasting system for Shuangpai region. Advances in Engineering Software. 37(3): 146-158.
 17. Lin Y. K. and Yeh C. T. 2012. Multi-objective optimization for stochastic computer networks using NSGA-II and TOPSIS. European Journal of Operational Research. 218(3): 735-746.
 18. Machajski J. and Kostecki S. 2018. Hydrological analysis of a dyke pumping station for the purpose of improving its functioning conditions. Water. 10(6): 737.
- اطمینان برای خروجی‌های بهینه این است که بحرانی‌ترین مقدار برای ضرایب اطمینان، مقدار SFO است که اگر تأمین شود، بقیه ضرایب اطمینان نیز تأمین خواهند شد. همچنین نشان داده شد در حالتی که زاویه سد ۸۰ درجه باشد، این حالت بهینه‌ترین طرح از لحاظ اقتصادی است. در گام آخر این مقاله بعد از اعمال عدم قطعیت روی پارامترهای طراحی با استفاده از توزیع‌های احتمالاتی و با لینک مدل شبیه‌ساز به روش شبیه‌سازی مونت کارلو و همچنین الگوریتم بهینه‌سازی Self-adaptive NSGA-II سد تأخیری پاره‌سنگی بر مبنای اعتمادپذیری، طراحی شد. خروجی این گام جبهه پارتو بود که هزینه سد تأخیری را در برابر اعتمادپذیری نشان می‌داد. با توجه به خروجی‌های حاصل از این گام می‌توان به این نکته پی برد که با کاهش مقدار زاویه در سد تأخیری پاره‌سنگی هزینه ساخت سد تأخیری پاره‌سنگی افزایش می‌یابد. همچنین با کاهش زاویه بدنه سد در سد تأخیری پاره‌سنگی مقدار طول بدنه سد افزایش و مقدار ارتفاع آن کاهش می‌یابد. به‌منظور تحقیقات آینده می‌توان تأثیرات عدم قطعیت پارامترهای طراحی بر عملکرد هیدرولیکی و سازه‌ای سد تأخیری پاره‌سنگی را با استفاده از روش‌هایی همچون تئوری فازی مطالعه کرد. همچنین می‌توان تأثیرات طراحی اولیه بر عملکرد طراحی بهینه سد تأخیری پاره‌سنگی را نیز مورد مطالعه قرار داد. یکی از مباحث بسیار کارآمد برای مطالعات آینده، استفاده از روش‌هایی مانند Latin Hypercube Sampling (LHS) و ترکیب آن با روش MCS است. علاوه بر این، کاربرد مدل توسعه‌یافته در طراحی سدهای تأخیری چندگانه (متوالی) و وجود رسوبات نیز قابل توصیه است.

منابع

1. Abedini M. and Fathi Jokadan R. 2016. Flood Risk Zoning in the Karganroud's Catchment Basin Using ArcGIS. Hydrogeomorphology. 3(7): 1-17.
2. Abt S. R. and Grigg N. S. 1978. An Approximate method for sizing detention reservoirs 1. JAWRA Journal of the American Water Resources Association. 14(4): 956-965.
3. Akan A. O. 1989. Detention pond sizing for multiple return periods. Journal of Hydraulic Engineering. 115(5): 650-664.
4. Akan A. O. 1990. Single-outlet detention-pond analysis and design. Journal of

33. Riyahi M. M. and Riahi-Madvar H. 2022. Uncertainty analysis in probabilistic design of detention rockfill dams using Monte-Carlo Simulation model and probabilistic frequency analysis of stability factors.
34. Samani H. M. Samani J. M. and Shaiannejad M. 2003. Reservoir routing using steady and unsteady flow through rockfill dams. *Journal of Hydraulic Engineering*. 129(6): 448-454.
35. Samani J.M.V. Samani H.M.V. and Shaiannejad M. 2004. Reservoir routing with outflow through rockfill dams. *Journal of Hydraulic Research*. 42(4): 435-439.
36. Sarkhosh P. Salama A. and Jin Y.C. 2020. A one-dimensional semi-implicit finite volume modeling of non-inertia wave through rockfill dams. *Journal of Hydroinformatics*, 22(6), pp.1485-1505.
37. Sedghi-Asl M. and Rahimi H. 2011. Adoption of Manning's equation to 1D non-Darcy flow problems. *Journal of Hydraulic Research*. 49(6): 814-817.
38. Sedghi-Asl M. Rahimi H. Farhoudi J. Hoorfar A. and Hartmann S. 2014. One-dimensional fully developed turbulent flow through coarse porous medium. *Journal of Hydrologic Engineering*. 19(7): 1491-1496.
39. Singh P. K. Mishra S. K. and Jain M. K. 2014. A review of the synthetic unit hydrograph: from the empirical UH to advanced geomorphological methods. *Hydrological Sciences Journal*. 59(2): 239-261.
40. Wang W.C. Chau K.W. Xu D.M. Qiu L. and Liu CC. 2017. The annual maximum flood peak discharge forecasting using hermite projection pursuit regression with SSO and LS method. *Water Resources Management*. 31(1): 461-477
41. Wu C. L. and Chau K. W. 2006. A flood forecasting neural network model with genetic algorithm. *International Journal of Environment and Pollution*. 28(3-4): 261-273.
42. Wycoff R. L. and Singh U. P. 1976. Preliminary hydrologic design of small flood detention reservoirs 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*. 12(2): 337-349.
43. Yaseen Z. M. Sulaiman S. O. Deo R. C. and Chau KW. 2019. An enhanced extreme learning machine model for river flow forecasting: State-of-the-art, practical applications in water resource engineering area and future research direction. *Journal of Hydrology*. 569: 387-408.
19. Mays LW. 2010. *Water resources engineering*. John Wiley & Sons.
20. McEnroe B. M. 1992. Preliminary sizing of detention reservoirs to reduce peak discharges. *Journal of Hydraulic Engineering*. 118(11): 1540-1549.
21. McEnroe B. M. 1992. Preliminary sizing of detention reservoirs to reduce peak discharges. *Journal of Hydraulic Engineering*. 118(11): 1540-1549.
22. Metropolis N. and Ulam S. 1949. The Monte Carlo Method, *J. Am. Stat. Assoc.* 44: 335–341.
23. Moradi Kia F. Ghafouri H. R. and Riyahi M. M. 2022. Uncertainty analysis and risk identification of the gravity dam stability using fuzzy set theory. *Journal of Hydraulic Structures*. 7(4): 76-92.
24. Mosavi A. Ozturk P. and Chau K.W. 2018. Flood prediction using machine learning models: Literature review. *Water*. 10(11): 1536.
25. Nash J.E. 1959. Systematic determination of unit hydrograph parameters. *Journal of Geophysical Research*. 64(1): 111-115.
26. Nikoo M. R. Khorramshokouh N. and Monghasemi S. 2015. Optimal design of detention rockfill dams using a simulation-based optimization approach with mixed sediment in the flow. *Water Resources Management*. 29(15): 5469-5488.
27. Nowak A. S. and Collins K. R. 2012. *Reliability of structures*. CRC press.
28. Punmia B.C. 1992. *Irrigation and Water Power Engineering*, Laxmi Publications Pvt Limited.
29. Rajabi M. M. Ataie-Ashtiani B. and Janssen H. 2015. Efficiency enhancement of optimized Latin hypercube sampling strategies: application to Monte Carlo uncertainty analysis and meta-modeling. *Advances in Water Resources*. 76: 127-139.
30. Rashki M. 2018. Hybrid control variates-based simulation method for structural reliability analysis of some problems with low failure probability. *Applied Mathematical Modelling*. 60: 220-234.
31. Riahi-Madvar H. Dehghani M. Akib S. Shamsirband S. and Chau KW. 2019. Developing a mathematical framework in preliminary designing of detention rockfill dams for flood peak reduction. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. 13(1): 1119-1129.
32. Riyahi M. M. and Bahrami Chegeni I. 2022. Gravity retaining wall stability risk analysis based on reliability using fuzzy set theory. *Journal of Structural and Construction Engineering*.