Archive of SID

مجله پژوهش آب ایران
جلد ۹/ شماره ۳/ پیاپی ۱۸/ پاییز ۱۳۹۴ (۱۹-۲۶)

بهینه‌سازی ابعاد هسته رسی سدهای خاکی با روش تکامل رقابتی جوامع (SCE)

سارا حقیقت‌اندیش[۱*]، کورش قادری[۲]، مرضیه محمدی[۳] و غلامعباس بارانی[۴]

چکیده

سد خاکی غیرهمگن از معمول‌ترین نوع سدهای خاکی است که از دو قسمت هسته و پوسته تشکیل شده است. هسته یکی از مهم‌ترین اجزای سدهای خاکی است و برای آب‌بندی و کنترل نشت از بدنه استفاده می‌شود. از این‌رو طراحی بهینه هسته سدهای خاکی از نظر نوع مصالح، ابعاد و شکل آن بسیارمهم است به طوری که با استفاده از کمترین حجم مصالح ضمن حفظ پایداری، تراوش از بدنه سد به کمترین میزان کاهش یابد. در این پژوهش، مدلی برای بهینه‌سازی هندسه هسته سد حصار سنگی بیرجند براساس تلفیق معادلات حاصل از شبیه‌سازی تراوش، ضریب پایداری و گرادیان هیدرولیکی با رویکرد بهینه‌سازی تکامل رقابتی جوامع (SCE) توسعه داده شده است. نتایج به دست آمده از مدل توسعه داده شده برای تعیین ابعاد بهینه هسته سد خاکی در مقایسه با مقادیر واقعی سد حصار سنگی بیرجند، بیانگر کاهش ۸/۵ درصدی حجم مصالح لازم برای ساخت پوسته سد و کاهش ۲۴ درصدی مصالح هسته سد است. عملکرد مدل توسعه داده شده نشان از توانایی‌های بالای این مدل در طراحی بهینه ابعاد هسته رسی تحت شرایط پایدار سدهای خاکی است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم SCE، بهینه‌سازی، سد خاکی، هسته رسی.

ارجاع: حقیقت‌اندیش س. قادری ک. محمدی م. و بارانی غ. ع. ۱۳۹۴. بهینه‌سازی ابعاد هسته رسی سدهای خاکی با روش تکامل رقابتی جوامع (SCE). مجله پژوهش آب ایران. ۱۸: ۱۹-۲۶.

۱- کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
۲- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
۳- کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
۴- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
*** نویسنده مسئول:** sonia_6f@yahoo.com
تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۰/۰۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۲/۲۱

www.SID.ir

Archive of SID

مقدمه

امروزه با پیشرفت علم مکانیک خاک و توسعه امکانات نرم‌افزاری و سخت‌افزاری، سدهای خاکی به یکی از مهم‌ترین سازه‌های حفظ و ذخیره آب تبدیل شده‌اند (رحیمی، ۱۳۸۹). این سدها به دو نوع همگن و غیرهمگن تقسیم می‌شوند. یکی از اجزاء مهم سدهای خاکی غیرهمگن هسته سد است. هسته در سدهای خاکی عامل مهم آب‌بندی و کنترل تراوش از بدنه سد است. از این‌رو انتخاب نوع مصالح، ابعاد و شکل آن مهم است. از آنجا که هسته به‌دلیل نیاز به نفوذپذیری بسیار کم باید از مصالح ریزدانه ساخته شود، به ناچار مقاومت برشی آن کمتر از سایر قسمت‌های بدنه سد است. بنابراین از نظر پایداری سد، هرچه هسته آن نازک‌تر باشد بهتر است. از طرفی هرچه هسته سد ضخیم‌تر باشد مقاومت آن در برابر نشت آب و فرسایش داخلی بیشتر است و خطر ایجاد شکاف یا ترک حاصل از نشت غیریکنواخت کاهش می‌یابد (ساین و وارشنی، ۱۹۹۵). علاوه بر این ملاحظات اقتصادی یکی از مهم‌ترین عوامل در انتخاب هندسه هسته سد است.

بیشتر طراحی سدهای خاکی به‌صورت تجربی انجام می‌شود. در این روش‌ها هیچ تضمینی برای رسیدن به جواب بهینه و یا حتی نزدیک به بهینه وجود ندارد، پس استفاده از روش‌های بهینه‌سازی در طراحی سدهای خاکی می‌تواند سبب نتایج بهتر و درنتیجه صرفه‌جویی بیشتری در هزینه‌ها و مصالح شود. اولین بار گلدین و راسکازوف (۱۹۹۲) برای بهینه‌سازی هسته رسی سدهای خاکی همگن از روش‌های آزمون عامل کامل و تحلیل عوامل استفاده کردند. آن‌ها روش تحلیل عوامل را برای طراحی بهینه سد خاکی از نظر انتخاب گزینه‌های مختلف منابع قرضه و شیب‌های مختلف پوسته به کار بردند. بنابراین به‌عنوان یک نتیجه نهایی برای مسئله طرح بهینه یک سد ۷۰ متری، چهار گزینه مختلف برای منابع قرضه و شیب‌های متفاوت طرفین سد ارائه کردند. سپس از روش آزمون عامل کامل برای انتخاب نوع مصالح و عوامل مؤثر بر ضریب پایداری یک سد خاکی بلند (۳۰۰ متری) استفاده کردند. اطلاعات جمع‌آوری شده برای سدی با ارتفاع ۳۰۰ متر نشان می‌دهد که شکل‌پذیری بیشتر خاک ریزهای پوسته طرفین هسته نسبت به خود هسته، استفاده از هسته‌ای باریک و قائم را تحمیل می‌کند. از طرف دیگر اگر خاک‌ریزهای طرفین پوسته شکل‌پذیری بسیار کمتری از خاک هسته داشته باشند سدی با هسته مایل قابل توجیه است.

عبدالحسین و همکاران (۲۰۰۷) از روش‌های دیگری مانند روش بهینه‌سازی توابع هدف چندگانه به روش وزنی برای طراحی بهینه سدهای خاکی همگن استفاده کردند. قیدهای مسئله شامل پایداری وجوه سد و وجود فاصله کافی بین سطح آزاد آب مخزن و وجه پایین‌دست سد است و محاسبات با مدل‌های ریاضی دو بعدی انجام شد و به نتایج خوبی رسیدند. در سال‌های اخیر پژوهش‌گران روی روش‌های هوشمند یا فراابتکاری تمرکز کرده‌اند. بهینه‌سازی شکل ظاهری سازه سد با استفاده از الگوریتم ژنتیک توسط هیتاشی و همکاران (۱۹۹۶) بررسی شد. در پژوهش آن‌ها یک سیستم پشتیبانی ساخت و تصمیم‌گیری برای طراحی شکل ظاهری سازه سد توسعه داده شد. شقاقیان (۱۳۸۲) نیز برای طراحی بهینه هسته رسی سدهای خاکی از الگوریتم ژنتیک و برنامه COPED که در محیط ویژوال بیسیک تهیه شده بود، استفاده کرد. تابع هدف این مسئله کمینه کردن حجم هسته در یک متر طول سد بوده است. وی (۲۰۰۴) برای بررسی آنالیز برگشتی پارامترهای نشت در پی سدهای خاکی از الگوریتم ژنتیک و الگوریتمی جدیدی به نام برنامه‌ریزی تکاملی ایمن استفاده کرد. همچنین آنیرودها و آنوپ (۲۰۰۹) الگوریتم ژنتیک را برای بررسی و تعیین سطح شکست بحرانی در آنالیز پایداری شیب سدهای خاکی به کار بردند. این الگوریتم نسبت به روش‌های بهینه‌یابی عمومی مانند روش مونت‌کارلو دارای قدرت محاسباتی بالایی است.

از آنجا که کاهش حجم هسته سد به‌عنوان قسمت ناتراوا در اقتصادی کردن طراحی کمک می‌کند، پس تعیین بهینه ابعاد هسته سد که علاوه بر تأمین خواسته‌ها و قیود دارای حداقل حجم است، امری ضروری است. برای طراحی بهینه هسته رسی سدهای خاکی لازم است از یک روش بهینه‌سازی قدرتمند که توانایی در برگیری یک تابع هدف مرکب و قیود تعیین شده را داشته باشد استفاده کرد. بنابراین، در این پژوهش یک مدل قدرتمند بهینه‌سازی براساس الگوریتم SCE برای یافتن ابعاد بهینه هسته سد خاکی حصار سنگی بیرجند توسعه داده شده است.

www.SID.ir

Archive of SID

مواد و روش‌ها

روش تکامل رقابتی جوامع (SCE)

Shuffled Complex Evolution (SCE) یک روش بهینه‌سازی سراسری هوشمند است که توسط دوآن و همکاران (۱۹۹۲) ارائه شده است (لیانگ و موتیل، ۲۰۰۴). براساس الگوریتم این روش، یک جمعیت اولیه تصادفی از فضای ممکن‌پذیر متغیرها برداشت شده و به یک سری جوامع کوچک‌تر تقسیم‌بندی می‌شوند. هر کدام از جوامع می‌توانند فقط با استفاده از روش‌های تکامل رقابتی براساس روش سیمپلکس گرادیان نزولی به سمت نقطه بهینه سراسری حرکت کنند. در پایان هر مرحله، کل مجموعه نقاط انتخاب شده و اطلاعات آن‌ها در جوامع جدید به اشتراک گذاشته می‌شوند. ترکیب تکامل رقابتی و انتخاب شدن، این اطمینان را حاصل می‌کند که اطلاعات مجزای به دست آمده توسط هر جامعه با کل جوامع به اشتراک گذاشته می‌شود. به این ترتیب جستجوی دقیق و مقاوم در فضای ممکن انجام می‌شود. بنابراین می‌توان گفت که روش SCE براساس ترکیب چهار مفهوم موفق ترکیبات تصادفی و رویکردهای قطعی، دسته‌بندی، تکامل نظام‌گرای نقاط پخش شده در فضای جوامع و تکامل رقابتی به وجود آمده است. موفقیت‌آمیز بودن هر یک از مفاهیم بالا به طور جداگانه در پژوهش‌ها گزارش شده است. ترکیب مفاهیم بالا روش SCE را به یک روش کارا، مؤثر و مقاوم و قابل انعطاف تبدیل کرده است (دوآن و همکاران، ۱۹۹۳). یاپو و همکاران (۱۹۹۶) روش SCE را برای واسنجی یک مدل مفهومی پیش‌بینی سیل بارش-رواناب توسعه دادند. مادسن (۲۰۰۰) به‌عنوان یک الگوریتم بهینه‌سازی برای تخمین پارامترهای مدل خودکار بارش-رواناب استفاده کرد. اسلامی و قادری (۲۰۰۵) با استفاده از داده‌های هیدرولوژیکی و هواشناسی مدلی را براساس رویکرد SCE برای پیش‌بینی سیلاب در رودخانه سیمره توسعه دادند. نتایج نشان داد که SCE یک روش منطقی، قابل اطمینان و دقیق است. همچنین قادری و همکاران (۱۳۸۵) از SCE برای واسنجی اتوماتیک پارامترهای مدل مفهومی بارش رواناب در زیرحوضه گاماسیاب در شمال غربی رودخانه کرخه استفاده کردند و نتایج نشان از عملکرد بالای مدل توسعه داده شده برای واسنجی خودکار پارامترهای مدل‌های مفهومی بارش رواناب است. یورت و همکاران (۲۰۰۶) از الگوریتم SCE، برای تخمین تصادفی پارامترهای مدل‌های زیست‌محیطی استفاده کردند. نتایج آن‌ها در سه بررسی موردی نشان داد که با استفاده از این روش، در مقایسه با روش‌های سنتی زمان زیادی ذخیره می‌شود. زای و یان (۲۰۱۰) از یک روش آماری- دینامیکی استفاده کردند تا در یک کانال نزدیک رودخانه تراز سطح آب ناشی از دبی رودخانه را با یک مدل عددی، تابع مناسب ارتفاع- دبی و یک روش خودکار کالیبراسیون پارامترها، پیش‌بینی کنند. که پارامترهای مدل به طور خودکار با SCE کالیبره می‌شوند. سانگ و همکاران (۲۰۱۲)، یک طرح براساس رویکرد SCE برای طرح وارون منحنی انتشار موج ریلی پیشنهاد کردند. نتایج نشان داد که SCE یک روش قوی، مؤثر و برای تجزیه و تحلیل سطح موج با فرکانس بالا است.

استراتژی روش SCE در بهینه‌سازی

روش SCE یک روش تکامل‌گرا است که از دو بخش کلی به نام SCE و CCE (Competitive Complex Evolution) تشکیل شده است. یک توصیف کلی از الگوریتم روش بالا به‌صورت زیر است:

- برداشت مجموعه تصادفی از نقاط و تقسیم‌بندی آن‌ها به تعدادی جامعه
- تکامل جداگانه هر کدام از جوامع در جهت توسعه سراسری با روش رقابتی (CCE)
- در پایان هر مرحله جوامع دوباره با هم ترکیب می‌شوند.

CCE بخش مهمی از الگوریتم SCE است. (از این روش برای توسعه هر جامعه یا تولید مثل جامعه یا تولید خصوصیات بهتر استفاده می‌شود.). CCE بر این اساس عمل می‌کند که در طول تولید مثل و زاد و ولد، والدین با خصوصیات بهتر امکان مشارکت بیشتری در تولید مثل نسبت به والدین با خصوصیات ضعیف‌تر دارند (دوآن و همکاران، ۱۹۹۴).

در SCE آموزش به‌صورت گروهی یا به‌صورت زیرگروه‌ها انجام می‌شود و هر کدام از اعضای گروه یک پاسخ برای مسئله هستند. در SCE تمام اعضای گروه تمایل به پیروی و حرکت در جهت و موقعیت رهبر گروه را دارند. این در حالی است که خود رهبر گروه نیز دارای موقعیت ثابتی نیست و در هر تکرار به موقعیت نقطه بهینه نزدیک‌تر

www.SID.ir

Archive of SID

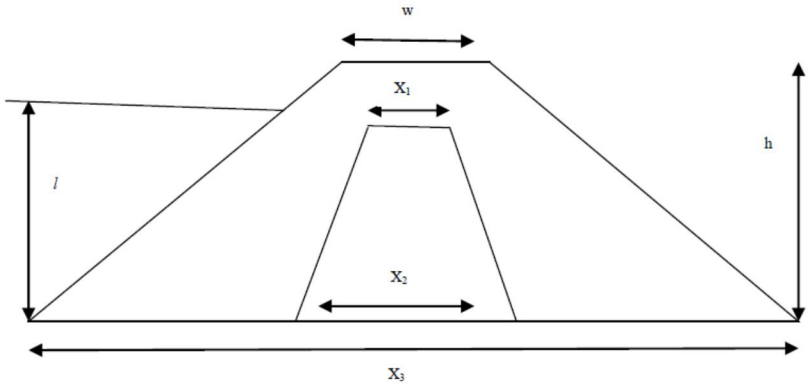
می‌شود.

در این پژوهش با استفاده از روش بهینه‌سازی SCE و با درنظر گرفتن قیود ضریب اطمینان پایداری سد و گرادیان هیدرولیکی ضمن کاهش هزینه کل اجرای سد، میزان تراوش از بدنه آن نیز کمینه می‌شود. در زیر متغیرهای طراحی، تابع هدف و قیود توضیح داده شده است. به طور کلی در طراحی مقطع سدهای خاکی دو نوع متغیر وجود دارد.

۱- متغیرهای محیطی که وابسته به محل اجرای طرح هستند. مانند منابع قرضه و خصوصیات مصالح که در اینجا به‌صورت متغیرهای پارامتری در برنامه تعریف شده‌اند.

۲- متغیرهای هندسی سد که بعضی از آن‌ها مانند زاویه محور هسته ثابت بوده و بعضی مانند ارتفاع و عرض تاج سد به‌عنوان متغیرهای پارامتری تعریف شده و تعدادی به‌عنوان متغیرهای طراحی در تابع هدف ادغام شده‌اند.

در شکل ۱ سه متغیر طراحی شامل عرض تاج هسته (x_1)، عرض قاعده هسته روی پی (x_2) و عرض سد روی پی (x_3) وجود دارد. متغیرهای پارامتری شامل h (ارتفاع کل سد، ارتفاع طراحی)، l (ارتفاع آب بالادست سد)، w (عرض تاج سد) هستند.



شکل۱- متغیرهای طراحی در مدل‌سازی

در این پژوهش دو هدف زیر مطرح است:

۱-کاهش میزان تراوش از بدنه سد

۲-کاهش حجم مصالح خاکی (شامل دو بخش مجزای پوسته و هسته)

برای دستیابی به اهداف هر کدام به‌صورت تابعی از هزینه تعریف شده‌اند. بنابراین مقدار تابع هدف برابر است با:

هزینه اجرای پوسته + هزینه اجرای هسته = هزینه کل

هزینه هدر رفتن آب بر اثر تراوش از بدنه سد+

هزینه اجرای پوسته

حجم مصالح به کار رفته برای پوسته سدهای خاکی از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$F_1 = (\frac{1}{2}[(x_3 + w)\times h] - \frac{1}{2}[(x_2 + x_1)\times h])\times b \qquad (۱)$$

که F_1 حجم مصالح خاکی (m^3/m) و b طول تاج است.

هزینه اجرای پوسته (C_1) برابر است با:

$$C_1 = F_1 \times k_1 \qquad (۲)$$

که K_1 هزینه اجرای هر مترمکعب پوسته برای سد خاکی است. که برابر ۱۴۷۰۶ ریال برای هر مترمکعب درنظر گرفته شده است.

هزینه اجرای هسته

حجم مصالح به کار رفته برای هسته سدهای خاکی (m^3/m) از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$F_2 = (\frac{1}{2}[(x_2 + x_1)\times h])\times b \qquad (۳)$$

هزینه اجرای هسته (C_2) برابر است با:

$$C_2 = F_2 \times k_2 \qquad (۴)$$

که K_2 هزینه اجرای هر مترمکعب هسته برای سد خاکی است. که برابر ۳۶۵۸۰ ریال برای هر مترمکعب درنظر گرفته شده است.

با توجه به اینکه قید پایداری تابعی از پارامترهای بدنه سد است، پس علاوه بر بهینه کردن ابعاد هسته، شیب مناسب برای وجوه سد به دست می‌آید.

www.SID.ir

Archive of SID

میزان تراوش از بدنه سد

برای حداقل کردن میزان تراوش از بدنه سد معادله زیر به‌عنوان یک تابع هدف وارد مسئله شده است و مقدار آن محاسبه می‌شود.

$$q=(2.167-0.958\frac{x_2}{h})\times k\times l\times b \qquad (۵)$$

q میزان هدر رفتن آب (m^3/year) است. هزینه هر مترمکعب آب هدر رفته از بدنه ۱۰۰۰ ریال تعیین شده است. با در نظر گرفتن عمر مفید ۳۰ ساله و نرخ بهره ۱۵ درصد هزینه آب هدر رفته در عمر مفید سد محاسبه می‌شود.

قیود طراحی

۱-ضریب اطمینان پایداری

ضریب اطمینان پایداری (SF) در شرایط تراوش پایدار، برای پایداری استاتیکی سدهای خاکی نباید کمتر از ۱/۵ باشد (گروه مهندسین ارتش ایالات متحده آمریکا، ۲۰۰۳).

۲-قید گرادیان هیدرولیکی

مقدار گرادیان هیدرولیکی (i) باید کمتر از مقدار بحرانی (i_{cr}) باشد. در اینجا به‌دلیل اینکه مقدار گرادیان هیدرولیکی بحرانی محاسبه شده برای مصالح نمونه برابر ۱ بود، این قید به‌صورت زیر تعریف شده است.

$$i=0.76-1.625\frac{l}{s} \qquad (۶)$$

که S طول خط نشت است که از معادله ۱۰ حساب می‌شود.

صحت‌سنجی مدل

قبل از استفاده از مدل توسعه داده شده برای بهینه‌سازی هسته رسی سدهای خاکی، لازم است که از صحت و سقم مدل اطمینان حاصل شود. بدین منظور از ۱۰ تابع استاندارد که هر کدام دارای یک نقطه بهینه سراسری و چندین نقطه بهینه موضعی هستند، استفاده شده است. مقدار بهینه تمام توابع صفر است. این توابع استاندارد توسط پژوهش گران مختلفی استفاده قرار شدند. معیار توقف مدل به‌صورتی است که اگر بعد از ترکیب دوباره جوامع تفاوت مقدار تابع هدف در ده عضو متوالی کمتر از 10^{-6} باشد عملیات توقف می‌یابد. در تمام توابع نقاط بهینه سراسری با دقت بالایی به دست آمد و کارایی، پایداری و همگرایی الگوریتم به اثبات رسید.

بررسی موردی

سد تغذیه‌ای ذخیره‌ای حصارسنگی شهرستان بیرجند با ظرفیت ذخیره‌سازی دو میلیون مترمکعب آب در فاصله ۱۲۰ کیلومتری شمال شهر بیرجند و در پنج کیلومتری بالادست روستای حصارسنگی و روی رودخانه دهنه قرار دارد. این سد دارای هسته رسی قائم است و شیب بالادست و پایین‌دست سد و هسته یکسان است. مشخصات هندسه سد در جدول ۱ و مصالح سد در جدول ۳ ارائه شده است (شقاقیان، ۱۳۸۲).

جدول ۱- مشخصات هندسه سد حصار سنگی

طول تاج (متر)	۲۵۰
عرض تاج (متر)	۶
ارتفاع سد (متر)	۱۵
عرض فوقانی هسته (متر)	۴
عرض هسته روی پی(متر)	۹/۸
عرض سد روی پی (متر)	۷۵
شیب وجوه سد	۱ :۲/۵
شیب وجوه هسته	۱ :۰/۲۱

جدول ۲- مشخصات مصالح بدنه سد حصار سنگی

پارامتر	پوسته	هسته
Ø (درجه)	۴۰	۳۰
$\gamma(\frac{kg}{m^3})$	۲۲۶۰	۲۰۸۰
$\gamma_w(\frac{kg}{m^3})$	۱۰۰۰	۱۰۰۰
$c'(\frac{kg}{cm^2})$	۰/۰۵	۰/۳
$k(\frac{m}{year})$	۱۸۲/۲۸	۰/۰۶

مدل‌سازی

در این پژوهش با توجه به کاربردهای الگوریتم SCE در زمینه علوم آب و اهمیت دستیابی به یک هندسه بهینه برای هسته سد خاکی، مدلی براساس رویکرد بهینه‌سازی SCE برای طراحی بهینه ابعاد هسته سد خاکی حصار سنگی بیرجند در محیط نرم‌افزار MATLAB توسعه داده

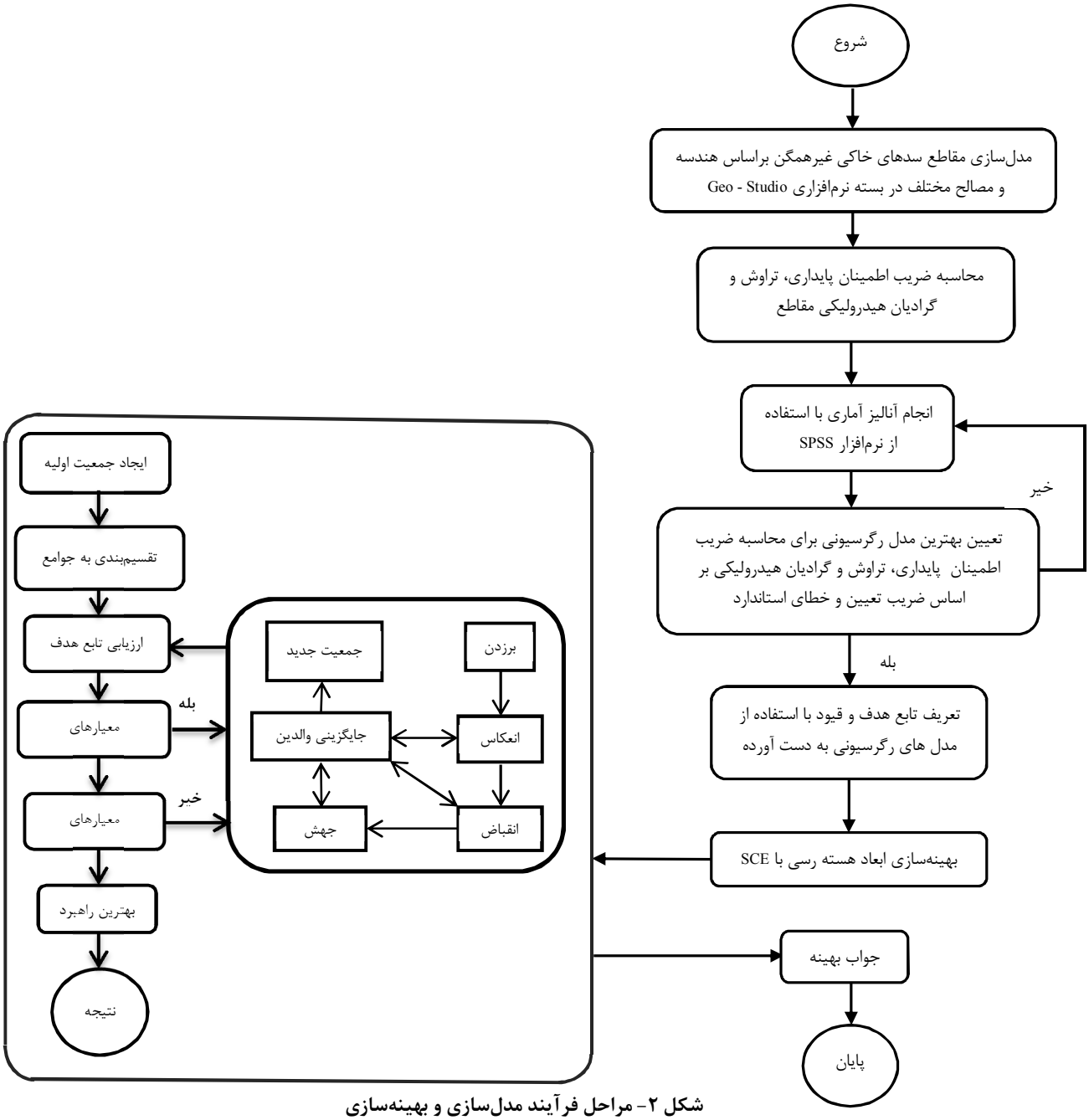
www.SID.ir

Archive of SID

شد. قیود این مسئله تراوش از بدنه سد، گرادیان هیدرولیکی و ضریب اطمینان پایداری شیروانی‌ها است. برای به دست آوردن این قیود ۱۵۰ مقطع سد با ابعاد و دو نمونه مصالح فرضی برای هسته و یک نمونه برای پوسته روی یک بستر نفوذناپذیر با استفاده از بسته نرم‌افزاری Geo-studio مدل شد. شکل ۲ مراحل فرآیند مدل‌سازی و بهینه‌سازی را نشان می‌دهد. جدول ۳ محدوده تغییرات پارامترهای مؤثر در مسئله را نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده با استفاده از نرم‌افزار SPSS به روش رگرسیون خطی تجزیه و تحلیل شد و محدوده مجاز برای هر کدام از قیود تعریف شد.

جدول ۳- محدوده تغییرات پارامترهای هندسی

پارامتر	حد پایین	حد بالا
ارتفاع هسته	۱۵	۴۰
عرض هسته	۳	۶
شیب بالا دست پوسته	۱:۲	۱:۵
شیب پایین دست پوسته	۱:۲	۱:۴
شیب بالا دست هسته	۱ :۰/۱۵	۱ :۰/۵۳
شیب پایین دست هسته	۱ :۰/۱۵	۱ :۰/۵۳



شکل ۲- مراحل فرآیند مدل‌سازی و بهینه‌سازی

www.SID.ir

Archive of SID

۱- مدل تراوش

برای محاسبه تراوش از بدنه سدهای خاکی و معرفی آن به‌عنوان قید در طرح مسئله بهینه‌سازی از یک مدل رگرسیونی استفاده شده است. این مدل براساس مقادیر تراوش محاسبه شده از ۱۵۰ مقطع سد با هندسه و مصالح مختلف فرضی با نرم‌افزار SEEP/W و نیز تجزیه و تحلیل روی داده‌های تولید شده با نرم‌افزار SPSS به دست آمده است. معادله ۷ با ضریب همبستگی ۰/۹۳ و خطای معیار ۰/۰۶۷ به دست آمده است. در این مدل با توجه به اینکه پوسته سد بسیار نفوذپذیرتر از هسته است در برابر هسته نادیده گرفته شده و چنان تصور شد که هسته سد خود، سد همگن بدون زهکش افقی و بدون پنجه سنگی بوده و کلیه ابعاد برای تهیه مدل تراوش براساس ابعاد هسته درنظر گرفته شده است.

$$q = (2.167 - 0.958\frac{d}{h}) \times K \times l \qquad (۷)$$

که q دبی عبوری در واحد طول سد ($m^3/s.m$)، k ضریب هدایت هیدرولیکی (m/s)، l ارتفاع آب مخزن (m)، h ارتفاع سد (m) و d عرض قاعده هسته (m) است.

۲- مدل پایداری شیروانی

برای محاسبه ضریب پایداری شیروانی‌های سد و معرفی آن به‌عنوان قید در طرح بهینه‌سازی از مدل رگرسیونی استفاده شده است. مدل موجود براساس ضریب‌های اطمینان محاسبه شده برای ۱۵۰ مقطع سد توسط نرم‌افزار SLOP/W و تجزیه تحلیل روی داده‌ها با نرم‌افزار SPSS به دست آمده است. معادله ۸ با ضریب همبستگی ۰/۹۰۹ و خطای معیار ۰/۰۰۹۸ به دست آمده است.

$$SF = 0.354 + 1.548\tan(\varphi)0.033\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{x}} + 2.194\frac{c'}{h\gamma} \qquad (۸)$$

که SF ضریب پایداری، Ø زاویه اصطکاک داخلی مؤثر مصالح، d عرض قاعده هسته روی پی (m)، x عرض سد روی پی (m)، c' چسبندگی مؤثر مصالح (kg/cm^2)، h ارتفاع سد (m) و γ وزن مخصوص مصالح (kg/m^3) است.

۳- مدل گرادیان هیدرولیکی

معادله گرادیان هیدرولیکی محاسبه شده برای ۱۵۰ مقطع سد با نرم‌افزار SEEP/W و تجزیه تحلیل روی داده‌ها با نرم‌افزار SPSS به دست آمده است. این معادله با ضریب همبستگی ۰/۹۲ و خطای معیار ۰/۰۰۹۸ در زیر ارائه شده است. در تهیه این مدل دو فرض وجود دارد: در فرض اول محاسبات روی مدل هسته به‌عنوان یک سد خاکی همگن و در فرض دوم خط نشت به‌صورت مستقیم درنظر گرفته می‌شود.

$$i = 0.76 - 1.625\frac{l}{s} \qquad (۹)$$

$$s = (l^2 + (d \times l - 0.35 \times (d-b) \times l)^2)^{0.5} \qquad (۱۰)$$

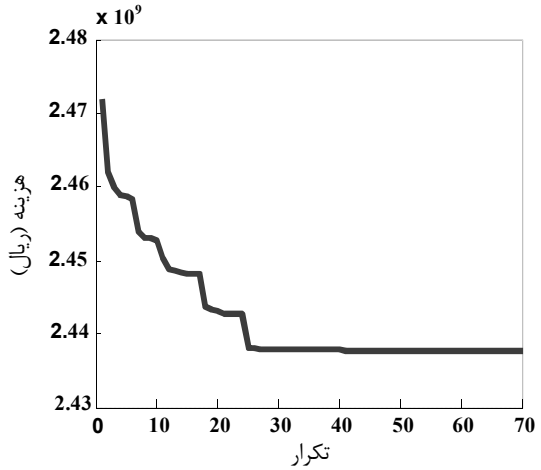
که s طول خط نشت (m)، b عرض تاج هسته (m) و i گرادیان هیدرولیکی است.

نتایج و بحث

شکل ۳ روند همگرایی الگوریتم SCE برای مسئله بهینه‌سازی ابعاد هسته سد حصارسنگی نشان می‌دهد.

در این مدل‌سازی از مشخصات مصالح بدنه سد خاکی حصارسنگی و یک سری از پارامترهای معلوم آن مانند ارتفاع و عرض تاج سد استفاده شده است. در جدول ۴ نتایج حاصل از مدل پیشنهاد شده برای ابعاد بهینه هسته رسی این سد با ابعاد واقعی آن مقایسه شده است.

هزینه اجرای سد حصارسنگی با ابعاد واقعی $۲/۸۲\times۱۰^{۹}$ ریال است. در حالیکه هزینه اجرای این سد با استفاده از مدل ارائه شده $۲/۴۳\times۱۰^{۹}$ ریال است. به‌عبارت دیگر هزینه اجرای این سد ۱۴ درصد کاهش می‌یابد. مقادیر ابعاد هسته، ضریب پایداری، تراوش از بدنه و گرادیان هیدرولیکی به دست آمده از مدل توسعه داده شده با مقادیر واقعی سد مقایسه شد. نتایج نشان دهنده کاهش ۲۴ درصدی حجم مصالح هسته و ۸/۵ درصدی مصالح پوسته است.



شکل ۳- روند همگرایی الگوریتم SCE برای مسئله بهینه‌سازی ابعاد هسته رسی سد خاکی حصارسنگی

www.SID.ir

Archive of SID

جدول۴- مقایسه نتایج بهینه به دست آمده برای هسته رسی سد حصار سنگی با ابعاد واقعی آن

پارامتر	ابعاد واقعی	ابعاد بهینه
عرض فوقانی هسته (متر)	۴	۳
عرض هسته روی پی (متر)	۹/۸	۷/۵
شیب وجوه سد	۱ :۲/۵	۱:۲
شیب وجوه هسته	۱ :۰/۲۱	۱ :۰/۱۵
عرض سد روی پی (متر)	۷۵	۶۶
گرادیان هیدرولیکی	-	۰/۴۵
ضریب پایداری	-	۱/۷۹
تراوش (m^3/year.m)	-	۱/۳

نتیجه‌گیری

در این پژوهش ابتدا مدل‌های رگرسیونی جدید شامل تراوش، گرادیان هیدرولیکی و ضریب اطمینان پایداری برای محاسبه متغیرهای طراحی تهیه شد. پس از تعیین متغیرهای طراحی، قیود و تابع هدف یک مدل براساس تلفیق رویکرد SCE و مدل‌های رگرسیون خطی جدید برای بهینه‌سازی هسته سد خاکی حصار سنگی ارائه شد. مقادیر بهینه پارامترهای هندسه سد و ضریب پایداری، تراوش از بدنه و گرادیان هیدرولیکی محاسبه شد. نتایج به دست آمده بیانگر کارایی و پایداری روش توسعه داده شده برای بهینه‌سازی ابعاد هسته رسی در سدهای خاکی است.

منابع

۱. رحیمی ح. ۱۳۸۹. سدهای خاکی. انتشارات دانشگاه تهران. ۶۷۱ ص.

۲. شقاقیان م. ۱۳۸۲. طرح بهینه هسته‌های رسی در سدهای خاکی با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیکی. چهارمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه شیراز.

۳. قادری ک. سامانی ج. م. و. اسلامی. ح. ر. و ثقفیان ب. ۱۳۸۵. واسنجی اتوماتیک مدل بارش- رواناب با استفاده از روش بهینه‌سازی SCE. تحقیقات منابع آب ایران. ۲(۲). ۳۹-۵۲.

4. Abdul Hussai I. A. Kashyap D. and Hari Prasad K. S. 2007. Seepage Modeling Assisted Optimal Design of a Homogeneous Earth Dam: Procedure Evolution. Irrigation and Drainage Engineering. (ASCE). 133(2): 116-130.
5. Aniruddha S. and Anup U. 2009. Locating the Critical Failure Surface in A Slope Stability by Genetic Algorithm, Applied Soft Computing Journal. 9(1): 387-392.
6. Duan Q. Sorooshian S. and Gupta V. 1992. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. Water Resources Research. 28(4): 1015-1031.
7. Duan Q. Sorooshian S. and Gupta V. 1993. SCE approach for effective and efficient global minimization.Plenum Publishing Corporation. 76(3): 501-521.
8. Duan Q. Sorooshian S. and Gupta V. 1994. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. Hydrology. 158: 265-284.
9. Eslami H. R. and Qaderi K. 2005. Combine Catchments Flood Forecasting Using Shuffled Complex Evolution (SCE) Method. Innovation advances and implementation of flood forecasting technology conference, Norway.
10. Goldin A. L. and Rasskazove L. N. 1992. Design of earth dams, Balkema A. A. Etherlands. pp. 51-63.
11. Hitoshi F. Hideaki H. Eiichi W. Taro T. and Hiroyuki M. 1996. Application of Genetic Algorithm to Aesthetic Design of Dam Structures. Advances in Engineering software. 25(2-3): 185-195.
12. Liong S. Y. and Muttil N. 2004. Superior Exploration–Exploitation Balance in Shuffled Complex Evolution. 130(12): 1202-1205.
13. Madsen H. 2000. Automatic calibration of a conceptual rainfall–runoff model using multiple objectives. Hydrology. 235: 276-288.
14. Singh B. and Varshney R. S. 1995. Engineering for Embankment Dams. A. A. Balkema publishers, Brockfield, USA. 746 p.
15. Song X. Tang L. Lv X. Fang H. and Gu. H. 2012. Shuffled complex evolution approach for effective and efficient surface wave analysis. Computers & Geosciences. 42: 7-17.
16. U. S. Army Corps of Engineering. 2003. Engineering and Design Stability of earth and rock fill dams. Department of the Army, Engineer Manual EM. 1110-2-1902.
17. Vrugt A. Nuallain O. Robinson A. Bouten W. Dekker C. and Sloot M. A. 2006. application of parallel computing to stochastic parameter estimation in environmental models. Computers and Geosciences. 32: 1139-1155.
18. Wei G. 2004. Seepage Parameters Back Analysis for Dam Foundation Based on Bionic Algorithms. Proceeding of the International Conference on Dam Engineering. 369-376.
19. Xie Z. H. and Yuan X. 2010. Prediction of water table under stream– aquifer interactions Over an aridr egion. Hydrological Processes. 24: 160-169.
20. Yapo P. Gupta H. V. and Sorooshian S. 1996. Automatic Calibration of Conceptual Rainfall-Runoff Models: Sensitivity to Calibration Data. Hydrology. 181: 23-48.

www.SID.ir