تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۴۹، شماره ۲، تیر و خرداد ۱۳۹۷ (ص ۲۴۲-۲۳۳) DOI: 10.22059/ijswr.2017.216401.667541

کاربرد الگوریتم فراکاوشی SCE و مدل LINGO11 در بهینه‌سازی ابعاد سدهای خاکی (مطالعه موردی سد برزک)

حسام قدوسی[1*]، فهیمه وکیلی تنها[2]، کاظم شاه‌وردی[3]

۱. استادیار و عضو هیأت علمی گروه مهندسی آب دانشگاه زنجان

۲. فهیمه وکیلی تنها، دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی دانشگاه زنجان

۳. دکتری سازه های آبی، عضو استعداد درخشان باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

(تاریخ دریافت: ۲۳/ ۷/ ۱۳۹۵- تاریخ بازنگری: ۱۰/ ۹/ ۱۳۹۵- تاریخ تصویب: ۲۷/ ۳/ ۱۳۹۶)

چکیده

سدهای خاکی به‌عنوان سازه‌های مهارکننده آبهای سطحی و کنترل سیلاب، می‌بایست قادر به ذخیره آب و جلوگیری از نفوذ آب از بدنه و پایداری در مقابل نیروهای وارده باشند. مسئله مهم در طراحی سدهای خاکی که با مصالح در دسترس ساخته می‌شود، تعیین طرحی است که عملکرد مورد انتظار را با ایمنی کافی و کمترین هزینه داشته باشد. با توجه به اینکه بررسی و تحلیل همه گزینه‌های ممکن برای انتخاب بهترین طرح، نیازمند صرف وقت و هزینه زیادی می‌باشد، طراحی سدهای خاکی می‌تواند به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی فرمول‌بندی شود. در این تحقیق، به‌منظور طراحی بهینه سدهای خاکی با هدف حداقل نمودن سطح مقطع سد (حجم مصالح مصرفی در واحد طول سد)، مدل برنامه‌ریزی غیرخطی ارائه شده است. بهینه‌سازی با اعمال محدودیت‌هایی که ایمنی شیروانی‌ها را تضمین می‌کنند، انجام شد. بعلاوه اینکه روابط ریاضی برای تقریب مقادیر ضرایب اطمینان شیروانی‌ها، به‌صورت روابط رگرسیونی جدیدی تعریف شد. به‌منظور یافتن پاسخ بهینه، الگوریتم تکامل ترکیبی جوامع (SCE) با استفاده از برنامه‌نویسی توسعه یافت. علاوه بر بهینه‌سازی فوق، متغیرهای طراحی با استفاده از نرم‌افزار LINGO نیز بهینه‌سازی گردید. سپس طرح اولیه سد خاکی برزک ارائه و کارایی مدل پیشنهادی در طراحی بهینه ابعاد سدهای خاکی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که هر دو روش بهینه‌سازی در برآورد مقادیر ابعاد بهینه و در نتیجه حجم مصالح بدنه، عملکرد یکسانی دارند. مساحت مقطع سد در طراحی بهینه برابر با ۲۷۲۵/۳ مترمربع بدست آمد در صورتیکه در طرح اولیه، مساحت مقطع آن برابر ۴۴۰۰/۷ مترمربع تعیین شده بود؛ بنابراین حجم سد به میزان ۳۸ درصد که مقدار قابل توجهی می‌باشد نسبت به طرح اولیه کاهش یافته است.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی غیرخطی، بهینه‌سازی، تکامل ترکیبی جوامع، سد خاکی، نرم‌افزار LINGO

مقدمه

در روند طراحی سدهای خاکی مانند طراحی همه سازه‌ها، باید معیارهای لازم برای امکان‌پذیری و بهینگی طرح تأمین شود. به عبارت دیگر طراحی باید به گونه‌ای انجام شود که قادر به پاسخگویی به نیازها و عملکردهای لازم بوده و در عین حال بهینه باشد. در حالی که در روند متداول طراحی، معیارهای لازم برای اجرایی شدن طرح مورد بررسی قرار می‌گیرد و کمتر به بهینه‌سازی پرداخته می‌شود (Abdul Hussain et al., 2007). در سال‌های اخیر تحقیقاتی در زمینه کاربرد روش‌های بهینه‌سازی در طراحی سازه‌های مختلف از جمله سدهای خاکی انجام گرفته است که در ادامه به معرفی برخی از آن‌ها پرداخته شده است. XU et al. (2003) به‌منظور بهینه‌سازی نوع مصالح خاکی برای استفاده در هر نقطه از مقطع سد با هدف کاهش منطقه اشباع شده و کاهش هزینه مصالح مصرفی، تحقیقی انجام دادند و یک روش عددی برای حل بهینه به منظور تعیین سطح مقطع ایده‌آل سد خاکی توسعه دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که ناحیه اشباع نشده خاک، نقش مهمی در شکل میدان جریان و طرح بهینه ایفا می‌کند و یک هسته رسی با هدایت هیدرولیکی کمتر نسبت به پوسته، باید در بالادست مقطع قرار گیرد. Abdul Hussain et al. (2007) اقدام به مدل‌سازی تراوش در سدهای خاکی همگن نمودند که به طراحی بهینه این سدها منجر شد و

* نویسنده مسئول: ghodousi_he@yahoo.com

Archive of SID
www.SID.ir

روش کمینه‌سازی نامقید متوالی[2] به‌منظور بهینه‌سازی بکار گرفته شد. تابع هدف در این مطالعه از مجموع وزنی چهار تابع هدف بدست می‌آید که این توابع عبارتند از: سطح مقطع، دبی تراوش، ناحیه خیس شده مقطع سد و ناحیه زهکشی. تغییر در طرح بهینه سد بصورت تغییر ارتفاع سد مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج حاصل نشان داد که هرچه ارتفاع سد افزایش یابد، شیب‌های کمتر در پوسته سد و زهکش‌های با ابعاد بزرگتر لازم می‌باشد. Montaseri et al. (2010) برای دستیابی به طرح هندسی بهینه برای هسته رسی سدهای خاکی از الگوریتم ژنتیک استفاده نمودند. این طرح علاوه بر دارا بودن شرایط خواسته شده می‌بایست دارای حداقل حجم ممکن برای مصالح هسته نیز باشد. با توجه به تأثیر متقابل بخش‌های مختلف یک سد بر روی یکدیگر، کاهش ابعاد هسته بر روی بخش‌های دیگر سد تأثیر گذاشته و سبب کاهش حجم آنها و هزینه‌های اجرایی می‌شود. نتایج کار آنها نشان داد که مدل بهینه‌سازی قادر به تهیه طرح بهینه هسته رسی سدهای خاکی منطقه‌ای می‌باشد. Murthy et al. (2013) نیز در تحقیقی اقدام به مدل‌سازی ریاضی برای بهینه‌یابی طرح‌های سد خاکی و محاسبه ضریب اطمینان نموده و به‌منظور یافتن راه‌حل‌های بهینه، یک روش اکتشافی[3] ارائه نمودند. ولی تاکنون مطالعاتی بر روی بهینه‌سازی ابعاد مقطع سدهای خاکی با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی مانند الگوریتم ژنتیک، ازدحام ذرات، SA و... صورت نگرفته است.

احداث سدهای خاکی به عنوان یکی از مهم‌ترین سازه‌های عمرانی، هزینه‌های زیادی را در بر دارد. هزینه‌های احداث سدهای خاکی شامل هزینه تأمین مصالح، کل هزینه ساخت و هزینه نگه‌داری و بهره‌برداری می‌باشد. در احداث سدهای خاکی، عموماً حجم قابل توجهی از مصالح که بعضاً به چند میلیون مترمکعب بالغ می‌شود، مورد استفاده قرار می‌گیرد که گاهی ساخت این نوع از سدها در تهیه مصالح مناسب با مشکل مواجه شده و یا تهیه این مصالح از لحاظ ملاحظات اقتصادی مقرون به صرفه نخواهد بود (Rahimi, 2003). کاهش حجم مصالح مصرفی در ساخت سدهای خاکی از یک‌سو باعث کاهش هزینه تأمین مصالح و از سویی دیگر باعث کاهش عملیات اجرایی ازجمله خاکبرداری، خاکریزی و متراکم نمودن خاک می‌شود. حجم مصالح مصرفی در سدها به سطح مقطع عرضی آنها وابسته است لذا هرچه سطح مقطع سد کوچک‌تر گردد به همان نسبت نیز حجم مصالح کاهش می‌یابد.

با توجه به بررسی‌های صورت گرفته و مقایسه مطالعات قبلی مشاهده می‌شود که در زمینه بهینه‌سازی سدهای خاکی بیشتر مطالعات در مورد روش‌های تأمین پایداری، بهینه‌سازی مصالح و نوع سد و یا بهینه‌سازی یکی از تأسیسات هیدرولیکی سد غیر از حجم بدنه و ارزش اقتصادی آن بوده است. در پژوهش حاضر ضمن کاربرد روش بهینه‌سازیSCE و نرم‌افزار LINGO و مقایسه کارایی آن‌ها به‌منظور محاسبه ضرایب اطمینان پایداری با استفاده از نتایج تحلیل‌های تراوش و پایداری، مدل‌های رگرسیونی جدیدی نیز ارائه شده است.

در این تحقیق، به منظور حداقل سازی حجم مصالح مورد نیاز در ساخت سدهای خاکی غیر همگن، طراحی ابعاد هندسی مقطع عرضی این نوع سدها به صورت یک مسئله بهینه‌سازی تک هدفه تعریف می‌گردد. برای دستیابی به یک هندسه بهینه، تعدادی قید مانند محدوده پارامترهای مورد بررسی و ضرایب اطمینان شیروانی‌های بالادست و پایین‌دست مورد بررسی قرار می‌گیرند. سپس روش SCE برای یافتن طرح بهینه مقطع سدهای خاکی به‌کار گرفته شده است. علاوه بر این پارامترهای بهینه با استفاده از برنامه‌نویسی در محیط نرم‌افزار LINGO 11.0 استخراج می‌شود و با پارامترهای قبلی بدست آمده از روش SCE مقایسه می‌گردد.

مواد و روش‌ها

معرفی مدل کامپیوتری SLOPE/W

برنامه SLOPE/W یکی از اجزای برنامه جامع ژئوتکنیکی GeoStudio می‌باشد که قابلیت تعیین فاکتور ایمنی را دارد. کد اولیه نرم‌افزار SLOPE/W توسط پروفسور D. G. Fredlund در دانشگاه Saskatchewan توسعه یافته و در سال ۱۹۷۷ به بازار عرضه شده است. در تعیین ضریب اطمینان پایداری شیروانی خاکی در نرم‌افزار SLOPE/W از روش‌های تعادل حدی استفاده می‌شود که برخی از روش‌های تعادل حدی عبارتند از: روش عمومی تعادل حدی، روش ساده شده بیشاپ، روش ساده شده جانبو، روش اسپنسر، روش مورگان اشترن- پرایس. چهار چوب کلی این روش‌ها با وجود تفاوت و اختلاف در روند تحلیل و نتایج به دست آمده، یکسان بوده و مبنای نظری آن‌ها استفاده از قطعه‌های عمودی برش خورده از سطح لغزش شیروانی می‌باشد که هر یک با توجه به فرضیه‌ها و اصول کلی خود به تحلیل پایداری قطعه‌ها بر اساس تعادل‌های گشتاور و نیرو و همچنین چگونگی تأثیر نیروهای افقی (برشی) و قائم در روند محاسبات می‌پردازد (Geo-Slope International Ltd., 2008).

1- Sequential Unconstrained Minimization Technique
1- Heuristic Method

Archive of SID

www.SID.ir

مدل پایداری شیروانی بالادست و پایین‌دست

پایداری یک سد تابعی از نیروهای محرک و مقاوم می‌باشد و ضریب اطمینان پایداری با استفاده از این نیروها و گشتاورهای حاصل محاسبه می‌شود. برای تعریف رابطه ریاضیِ ضریب اطمینان شیروانی بالادست و پایین‌دست سد و معرفی آن به عنوان قید در مسئله بهینه‌سازی، مشخصات هندسی و مصالح مختلف فرضی ۱۳۰ سد، به عنوان نمونه در فضای طرح انتخاب گردید و تراوش آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار SEEP/W تحلیل شد. تحلیل‌های پایداری شیروانی‌های بالادست و پایین‌دست با استفاده از نرم‌افزار SLOPE/W انجام شد و مقادیر ضریب اطمینان با استفاده از روش تعادل حدی مورگان اشترن- پرایس برای هریک از سدها محاسبه شد.

با تجزیه و تحلیل آماری داده‌های تولید شده با استفاده از نرم‌افزار SPSS، مدل رگرسیونی ضریب اطمینان شیروانی بالادست و پایین‌دست با ضرایب تعیین (R^2) برابر با ۰/۸۸۳ و ۰/۹۰۱ بصورت روابط (۱) و (۲) بدست آمد.

(رابطه ۱)

$$F_u = -0.599 + 0.082(i_{up1}.i_{up2}) + 0.101(\tan\phi.\gamma) + 0.033H - 0.031X$$

(رابطه ۲)

$$F_d = 0.271 + 0.105(i_{dn1}.i_{dn2}) + 0.101(\tan\phi.\gamma) - 0.092H + 0.092X - 0.201i_{up1}$$

که در آن F_u: ضریب اطمینان پایداری شیب بالادست؛ i_{up1} و i_{up2}: شیب‌های مربوط به شیروانی بالادست؛ ϕ: زاویه اصطکاک داخلی مؤثر مصالح پوسته؛ γ: وزن مخصوص مصالح پوسته در حالت مرطوب؛ H: ارتفاع سد؛ X: ارتفاع هسته سد؛ F_d: ضریب اطمینان پایداری شیب پایین‌دست و i_{dn1} و i_{dn2}: شیب‌های شیروانی پایین‌دست می‌باشند.

پارامترهای مدل بهینه‌سازی

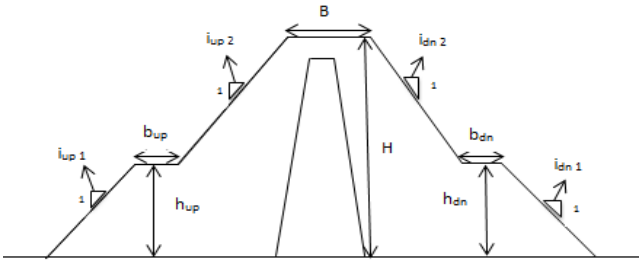
متغیرهای طراحی

به طور کلی در طراحی مقطع سدهای خاکی دو نوع متغیر شامل متغیرهای محیطی و متغیرهای هندسی وجود دارد (Montaseri et al., 2010). متغیرهای محیطی وابسته به محل اجرای طرح بوده و شامل منابع قرضه و خصوصیات فیزیکی مصالح بدنه می‌باشد. متغیرهای هندسی نیز مانند ارتفاع سد، عرض تاج و ... می‌باشند. در این تحقیق متغیرهای محیطی و هندسی بعنوان متغیرهای پارامتری در مدل تعریف گردید. شکل (۱) نمایی کلی از مقطع سدهای خاکی غیر همگن و متغیرهای طراحی مربوطه را نشان می‌دهد. بردار متغیرهای طراحی نیز بصورت رابطه (۳) تعریف گردیده است.

(رابطه ۳)

$$X = \{b_{up}, b_{dn}, h_{up}, h_{dn}, i_{upi}, i_{dni}\}$$

که در آن b_{up} و b_{dn} به ترتیب عرض سکوها در بالادست و پایین‌دست و h_{up} و h_{dn} ارتفاع سکوها در بالادست و پایین‌دست می‌باشند و i_{upi} و i_{dni} شیب ناحیه i ام بدنه سد در بالادست و پایین‌دست می‌باشند.



شکل ۱- نمای کلی از مقطع سد خاکی

تابع هدف

در این تحقیق هدف از بهینه‌سازی، انتخاب ابعاد مقطع سد خاکی به‌منظور حداقل نمودن هزینه‌های پروژه ضمن تأمین محدودیت‌های استحکام و پایداری می‌باشد. بنابراین تابع هدف در این مسئله (F)، حجم بدنه سد در واحد طول بوده که در فرآیند بهینه‌سازی می‌بایست کمینه گردد. فرمول کلی تابع هدف طبق ابعاد ارائه شده در شکل (۱) بصورت زیر می‌باشد.

(رابطه ۴)

$$F = 0.5\, i_{up1}h_{up}^2 + b_{up}h_{up} + 0.5\, i_{up2}(H - h_{up})^2 + i_{up2}(H - h_{up})h_{up} + BH + 0.5\, i_{dn1}h_{dn} + b_{dn}h_{dn} + 0.5\, i_{dn2}(H - h_{dn})^2 + i_{dn2}(H - h_{dn})h_{dn}$$

قیود طراحی

به منظور اطمینان از پایداری طرح و ساخت سد با ابعاد مجاز، پارامترهای هندسی مقطع و ضرایب اطمینان می‌بایست با اعمال قیودی محدود شوند.

قیود هندسی

این قیود، محدوده تغییرات قابل قبول پارامترهای هندسی مقطع سد را بصورت کلی مشخص نموده و بر اساس توصیه‌های ارائه شده از نظر اجرایی در سدها به صورت روابط زیر تعریف می‌شوند:

(رابطه ۵)

$$4 \le b_{up}, b_{dn} \le 10$$

(رابطه ۶)

$$10 \le h_{up}, h_{dn} \le H - 10$$

(رابطه۷)

$$\frac{1}{\tan\phi} \le i_{upi}, i_{dni} \le 5$$

که در آن H ارتفاع تاج سد بر حسب متر و ϕ زاویه اصطکاک داخلی مؤثر مصالح پوسته می‌باشد.

Archive of SID

www.SID.ir

قیود ضریب اطمینان

طبق توصیه‌های انجام شده برای طراحی ایمن، ضریب اطمینان در مقابل لغزش برای شیب پائین‌دست F_d معمولاً بین ۱/۲۵ تا ۱/۵ در نظر گرفته می‌شود (Ranjan and Rao, 2000; USACE, 2003). در این مطالعه، حداقل F_d برابر ۱/۵ در نظر گرفته شده است.

(رابطه ۸)

$$F_d \geq 1.5$$
$$F_d = 0.271 + 0.105(i_{dn1}.i_{dn2}) + 0.101\,(\tan\phi.\gamma) - 0.092\,H + 0.092X - 0.201 i_{up1}$$
$$g_1 = 1.5 - F_d \leq 0$$

همچنین ضریب اطمینان در مقابل لغزش برای شیب بالادست F_u معمولاً بین ۱/۱۵ تا ۱/۳ در نظر گرفته می‌شود (Ranjan and Rao, 2000; USACE, 2003). در این مطالعه، حداقل F_u، ۱/۲۵ در نظر گرفته شده است.

(رابطه ۹)

$$F_u \geq 1.25$$
$$F_u = -0.599 + 0.082(i_{up1}.i_{up2}) + 0.101\,(\tan\phi.\gamma) + 0.033\,H - 0.031\,X$$
$$g_2 = 1.25 - F_u \leq 0$$

الگوریتم بهینه‌سازی SCE و CCE

الگوریتم تکامل ترکیبی جوامع[4] یک روش بهینه‌سازی سراسری است که توسط Duan et al در سال ۱۹۹۲ ارائه شد Duan et (al., 1992). روش SCE توانایی فرآیند سیمپلکس (Nelder and Mead, 1965) را با مفاهیم جستجوی تصادفی کنترل شده (Price, 1987)، تکامل رقابتی (Holland, 1975) و اختلاط جوامع ترکیب می‌نماید (Duan et al., 1992). در حقیقت روش SCE یک روش تکامل‌گرا می‌باشد که از دو بخش کلی به نام SCE و CCE تشکیل شده است. این الگوریتم مفهوم جدید اختلاط جوامع[5] را معرفی می‌نماید و ترکیبی از بهترین ویژگی‌های چندین روش از جمله الگوریتم ژنتیک می‌باشد (Duan et al., 1994). اخیراً روش SCE به‌طور گسترده‌ای برای واسنجی مدل‌های هیدرولوژیکی مختلف (Dakhlaoui et al., 2012; Gan et al., 1997; Skahill and Doherty, 2006) و بهینه‌سازی مدل مخزن (Long et al., 2007; Wu and Chen, 2013) مورد استفاده قرار گرفته است.

روند کلی الگوریتم SCE را می‌توان بصورت زیر خلاصه نمود (Holland, 1975).

۱- برداشت مجموعه تصادفی از نقاط و تقسیم‌بندی آنها به تعدادی جامعه

۲- تکامل جداگانه هر کدام از جوامع در جهت توسعه سراسری با استفاده از تکنیک تکامل رقابتی

۳- ترکیب مجدد کل مجموعه‌های بدست آمده در پایان هر مرحله.

به‌منظور توسعه مدل بهینه‌سازیSCE باید مراحل زیر گام به گام انجام گیرد (Duan et al., 1993):

۱- اختصاص مقادیر اولیه: انتخاب مقادیر p و m طوری که $p \geq 1$ و $m \geq n+1$، در حالی که تعداد جوامع $= p$، تعداد نقاط در هر جامعه $= m$ و ابعاد مسئله $= n$ می‌باشد و محاسبه اندازه نمونه که $S = p \times m$.

۲- ایجاد نمونه اولیه: ایجاد یک نمونه تصادفی در فضای امکان‌پذیر که دارای S نقطه است و به دست آوردن مقدار تابع هدف در هر یک از نقاط. در واقع نمونه S شامل نقاط $x_1, x_2, \dots, x_S$ در فضای امکان‌پذیر و f_i مقدار تابع در هر نقطه x_i می‌باشد.

۳- مرتب‌سازی نقاط: S نقطه نمونه بر اساس افزایش مقدار تابع هدف در این نقاط مرتب می‌شوند و در آرایه‌ای مانند D به صورت $D = \{xi, fi, i = 1,2,\dots,S\}$ قرار داده می‌شوند به صورتی که $i = 1$ بیان‌کننده نقطه‌ای باشد که دارای کوچکترین مقدار تابع است.

۴- تقسیم‌بندی نقاط به مجموعه‌ها: آرایه D به p مجموعه $A^1, A^2, \dots, A^p$ تقسیم می‌گردد که هر مجموعه شامل m نقطه باشد طوری که:

(رابطه ۱۰)

$$A^k = \{X_j^k, f_j^k | X_j^k = X_{k+p(j-1)}, f_j^k = f_{k+p(j-1)}, j = 1, \dots, m\}$$

بر اساس رابطه فوق هر مجموعه شامل نقاط $P(j-1)+k$ می‌باشد. به‌عنوان مثال مجموعه اول و دوم به ترتیب شامل تمام نقاط مرتب شده با شماره‌های $P(j-1)+1$ و $P(j-1)+2$ هستند و به همین ترتیب برای دیگر مجموعه‌ها $k = 1, \dots, P$ می‌باشد.

۵- توسعه هر مجموعه: هر مجموعه A^k، $k = 1, \dots, P$ براساس الگوریتم تکامل رقابتی جامعه[6] (CCE) توسعه می‌یابد. این روش در ادامه توضیح داده شده است.

۶- اختلاط مجموعه‌ها: مجموعه‌های $A^1, A^2, \dots, A^p$ دوباره در D جایگزین می‌شوند طوری‌که $D = \{A^k, k = 1, \dots, p\}$ و D بر اساس مقادیر صعودی تابع هدف مرتب می‌شود.

1- Shuffled Complex Evolution
2- Complex Shuffling

1- Competitive Complex Evolution

Archive of SID

www.SID.ir

۷- بررسی همگرایی و شرط توقف: در صورت برقراری معیارهای همگرایی، برنامه متوقف می‌شود در غیر این‌صورت دوباره به مرحله ۳ برگشته و محاسبات تکرار می‌شوند.

تکامل رقابتی هر مجموعه، بخش مهمی از الگوریتم SCE است. این الگوریتم که برای تکامل هر مجموعه در روش SCE مورد نیاز است، در ادامه ارائه گردیده است (Duan et al., 1993):

۱- انتخاب مقادیر α، β و q طوری که $\alpha \geq 1$، $\beta \geq 1$ و $2 \leq q \leq m$.

۲- یک زیر مجموعه q نقطه‌ای (والدین) به‌طور تصادفی از هر جامعه انتخاب می‌شود.

۳- والدین در آرایه‌ای مانند $B = \{u_i, v_i, i = 1, \dots, q\}$ قرار داده می‌شوند که v_i برابر با مقدار تابع هدف در هر نقطه u_i است.

۴- تولید فرزندان که شامل مراحل زیر می‌باشد:

الف- مرکز ثقل نقاط مرتب شده B از رابطه $g = \left[\frac{1}{(q-1)}\right] \sum_{j=1}^{q-1} u_j$ محاسبه می‌شود.

ب-نقطه جدید $r = 2g - u_q$ ایجاد می‌شود (گام انعکاس). ج- اگر نقطه جدید بدست آمده درون محدوده مورد نظر بود تابع f_r محاسبه شده و به مرحله بعد می‌رود در غیر اینصورت کوچک‌ترین فضای H زیرمجموعه R^n که شامل A^k می‌باشد، محاسبه شده و به طور تصادفی یک نقطه z درون فضای H تولید می‌شود. سپس f_z را محاسبه کرده و با قرار دادن $r = z$، f_r را محاسبه و برابر با f_z قرار می‌دهیم $f_r = f_z$ (گام جهش).

د- اگر $f_r < f_q$ آنگاه نقطه جدید جایگزین بدترین نقطه شده و به مرحله و بروید. در غیر این صورت از گام انقباض استفاده می‌شود. بدین صورت که نقطه‌ای را که در وسط فاصله مرکز ثقل و بدترین نقطه قرار دارد محاسبه کرده و تابع هدف در آن نقطه بدست می‌آید یعنی $c = \frac{g+u_q}{2}$.

ی- اگر ارزش نقطه جدید ایجادشده توسط گام انقباض بهتر از ارزش بدترین نقطه بود یعنی $f_c < f_q$، u_q را با c جایگزین نموده و مرحله بعد انجام می‌شود در غیر این‌صورت به طور تصادفی یک نقطه مثل z درون فضای H تولید شده و f_z محاسبه می‌گردد و سپس u_q با z جایگزین می‌گردد.

و- مراحل (الف) تا (ی) α بار تکرار می‌شود.

۵- جایگذاری فرزندان به‌جای والدین و مرتب‌سازی A^k بر اساس افزایش مقدار تابع هدف.

۶- تکرار مراحل ۲ تا ۴ به اندازه β بار بطوریکه $\beta \geq 1$ و پارامتری است که تعداد گام‌های تکاملی جامعه را مشخص می‌نماید.

مشخصات سد مورد مطالعه

ساختگاه سد برزک در محدوده جغرافیایی با مختصات ″۴۶ ′۱۵ °۵۱ شرقی و ″۱۳ ′۴۴ °۳۳ شمالی و در فاصله حدود پنج کیلومتری جنوب شرق روستای برزک و ۶۵ کیلومتری جنوب شهرستان کاشان واقع شده است. سد برزک، یک سد خاکی با هسته رسی قائم با ارتفاع H=41.5m، عرض تاج سد B=8m و ارتفاع نرمال آب در مخزن h=39m می‌باشد. طرح مقطع این سد در شکل (۲)، مقادیر پارامترهای هندسی مقطع سد در طراحی اولیه در جدول (۱) و مشخصات مصالح بدنه سد در جدول (۲) ارائه شده است.

نتایج و بحث

مثال عددی

براساس مفاهیم ارائه شده از الگوریتم SCE یک مدل کامپیوتری در محیط MATLAB توسعه یافت. این مدل به‌صورت عمومی بوده و قابلیت بهینه‌سازی هر تابعی را دارد. جهت حصول اطمینان از صحت مدل از تابع استاندارد Acley استفاده شد. این مثال بهینه‌سازی، یک تابع پیوسته کمینه‌سازی می‌باشد. بعلاوه این تابع دارای بهینه‌های موضعی منظم و با قاعده می‌باشد. شکل کلی تابع به‌صورت زیر می‌باشد:

$$\text{Min } f(x) = -20.\exp\left(-0.2\sqrt{\frac{1}{2}\sum_{j=1}^{n} x_j^2}\right) \quad \text{(رابطه ۱۱)}$$

$$-\exp\left[\frac{1}{2}\sum_{j=1}^{n}\cos(2\pi x_j)\right] + 20 + e \qquad j = 1,2,\dots,n$$

$$-5 \leq x_j \leq 5$$

در اینجا تابع فوق با دو متغیر تصمیم جهت حل در نظر گرفته شده است. جواب حاصل از حل این مسئله توسط الگوریتم ژنتیک برابر با $f(x_1^*, x_2^*) = -0.005456$ گزارش شده است. الگوریتم SCE در حل این مثال مورد استفاده قرار گرفت که میزان تغییرات متوسط تابع هدف در ۱۰ بار اجرا و در تکرارهای مختلف در شکل (۳) ارائه شده است. در هشت تکرار مقدار تابع هدف به مقدار ۰/۰۰۵۴۶۱۸- که همان جواب بهینه مطلق مسئله می‌باشد، همگرا شده است. جواب حاصل در حدود ۰/۱٪ بهتر (کمتر) از جواب گزارش شده از کاربرد الگوریتم ژنتیک در حل مثال فوق می‌باشد.

Archive of SID

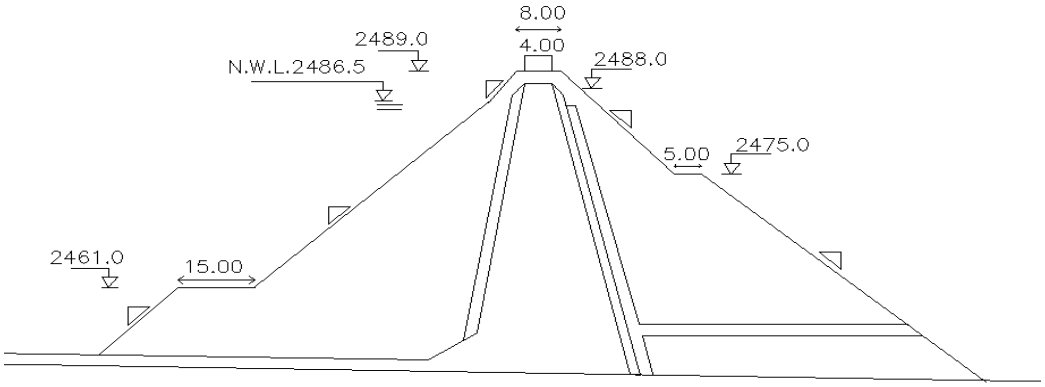
www.SID.ir

جدول ۱- مقادیر اولیه ابعاد سد برزک

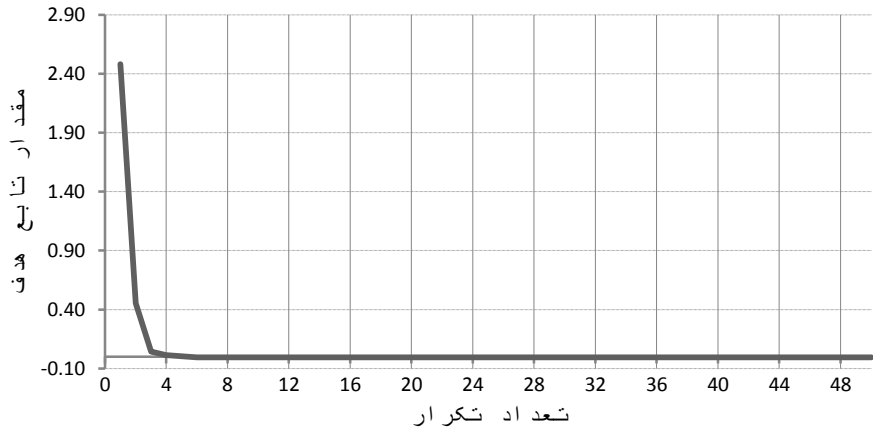
ابعاد (متر)	مقادیر	ابعاد (متر)	مقادیر
طول تاج	۲۱۲/۰۰	ارتفاع سکو در شیب پایین‌دست از تراز روی پی	۲۷/۵۰
عرض تاج	۸/۰۰	شیب ناحیه اول بدنه سد خاکی در بالادست سد	۲/۵۰
ارتفاع سد	۴۱/۵۰	شیب ناحیه دوم بدنه سد خاکی در بالادست سد	۲/۳۰
عرض سکو در شیب بالادست	۱۵/۰۰	شیب ناحیه اول بدنه سد خاکی در پایین‌دست سد	۲/۱۰
عرض سکو در شیب پایین‌دست	۵/۰۰	شیب ناحیه دوم بدنه سد خاکی در پایین‌دست سد	۲/۰۰
ارتفاع سکو در شیب بالادست از تراز روی پی	۱۳/۵۰	عرض سد روی پی	۲۱۱/۱۵

جدول ۲- مشخصات مصالح بدنه و پی سد

شرح مصالح	UU				CU				CD			
	γw (t/m^3)	γs (t/m^3)	C (t/m^2)	Φ (Degree)	γw (t/m^3)	γs (t/m^3)	C (t/m^2)	Φ (Degree)	γw (t/m^3)	γs (t/m^3)	C (t/m^2)	Φ (Degree)
هسته رسی	۱/۹۵	۲/۰۵	۸/۰	۳/۵	۱/۹۵	۲/۰۵	۴/۰	۱۶/۰	۱/۹۵	۲/۰۵	۰/۰	۲۵
پوسته شن و ماسه‌ای	-	-	-	-	-	-	-	-	۲/۰۵	۲/۱	۰/۰	۳۷
پی آبرفتی	-	-	-	-	-	-	-	-	۲/۰	۲/۰	۰/۰	۳۵
سنگ بستر	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۸/۰	۳۰



شکل۲- مقطع طراحی اولیه بدنه سد برزک



شکل۳- تغییرات مقدار تابع هدف اکلی بر حسب تعداد تکرار

www.SID.ir

در ادامه تعیین ابعاد بهینه مقطع سد خاکی بر اساس اطلاعات مربوط به سد خاکی برزک و با استفاده از روش بهینه-سازی SCE و نرم‌افزار LINGO11 مورد بررسی قرار گرفته است.

نتایج حاصل از نرم‌افزار LINGO 11

مدل برنامه‌ریزی غیرخطی جهت بهینه‌سازی ابعاد سد خاکی برزک در نرم‌افزار LINGO 11 تهیه شد و ابعاد بهینه سد که متغیرهای طراحی در مدل بهینه‌سازی می‌باشند، محاسبه گردید که نتایج حاصل در جدول (۳) ارائه شده است. با استفاده از این مدل، مقدار کمینه تابع هدف یعنی مساحت مقطع سد برزک برابر با ۲۷۲۵/۳ مترمربع تعیین گردید.

تعیین پارامترهای الگوریتم و تحلیل حساسیت

روش بهینه‌سازی SCE شامل بخش‌های احتمالاتی و قطعی زیادی می‌باشد که کنترل اصلی در این قسمت‌ها توسط پارامترهای الگوریتم صورت می‌گیرد. روش SCE نسبت به مقادیر این پارامترها بسیار حساس می‌باشد و می‌بایست انتخاب آنها با دقت زیادی انجام شود. برخی از این پارامترها عبارتند از:

تعداد اعضای جوامع (m)، تعداد گام‌های تکاملی در هر جامعه (β)، تعداد فرزندان تولید شده در هر زیر مجموعه (α) و تعداد اعضای هر زیرمجموعه (q) (Holland, 1975). مقادیر توصیه شده برای این پارامترها $m \geq n+1$، ابعاد مسئله:n)، $\alpha \geq 1$، $\beta \geq 1$ و $2 \leq q \leq m$ می‌باشد.

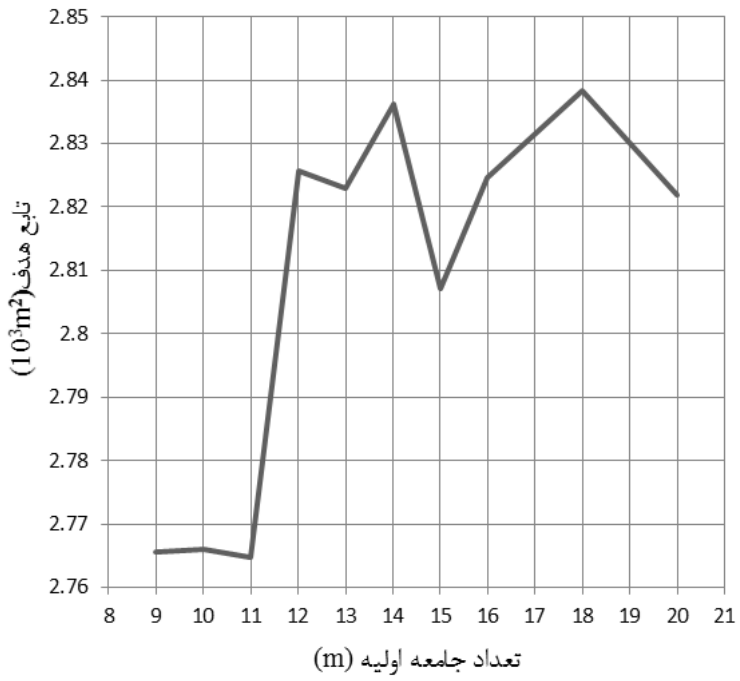
به منظور تعیین بهترین ترکیب از مقادیر پارامترهای الگوریتم توسعه یافته، مدل نسبت به مقادیر این پارامترها تحلیل حساسیت شد که نتایج آن در اشکال (۴) الی (۷) ارائه گردیده است. بهترین عملکرد الگوریتم و بهترین مقدار تابع هدف برای مقادیر m=۹، β=۱۰، α=۷ و q=۶ به دست آمده است.

با در نظر گرفتن نتایج تحلیل حساسیت پارامترها، میزان تغییرات متوسط تابع هدف در ۱۰ اجرا و در تکرارهای مختلف در شکل (۸) نمایش داده شده است.

نتایج حاصل بیانگر این نکته است که در ۱۳ تکرار مقدار تابع هدف به مقدار ثابت ۲۷۲۵/۴ مترمربع که همان جواب بهینه مطلق مسئله می‌باشد همگرا شده است؛ بنابراین تعداد تکرار مناسب در این سد برابر با ۱۳ در نظر گرفته شد. مقادیر بهینه ابعاد سد حاصل از روش بهینه‌سازی SCE نیز بطور خلاصه در جدول (۳) ارائه گردیده است.

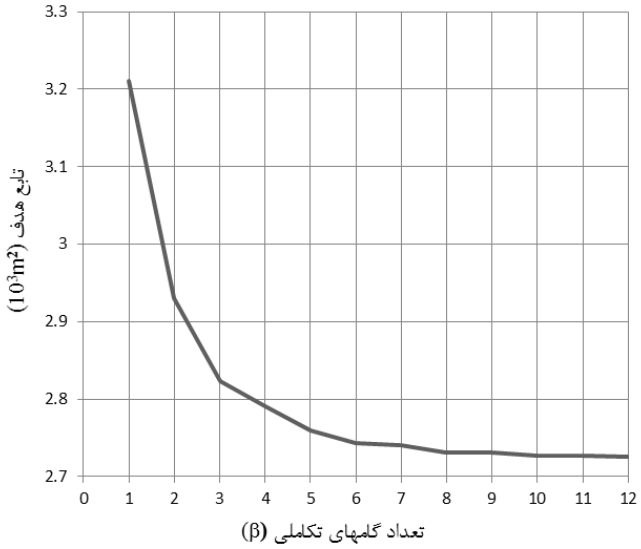
جدول ۳- مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم

$b_{up}(m)$	$b_{dn}(m)$	$h_{up}(m)$	$h_{dn}(m)$	i_{up1}	i_{up2}	i_{dn1}	i_{dn2}
۴/۰۰	۴/۰۰	۱۰/۰۰	۱۰/۰۰	۱/۸۸	۱/۳۳	۱/۳۳	۱/۳۳

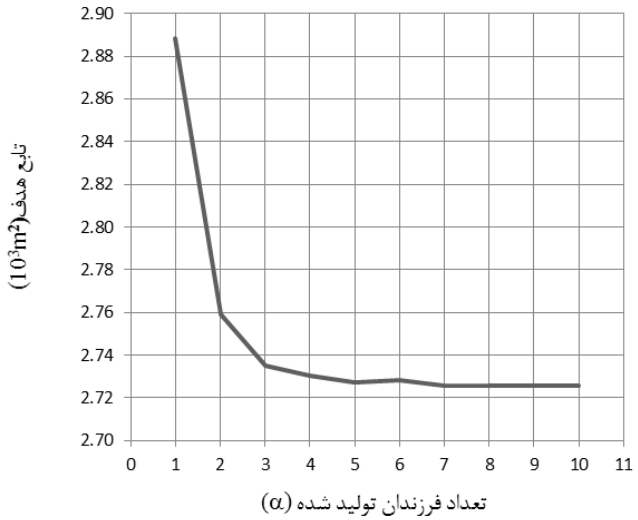


شکل۴- تغییرات مقدار تابع هدف بر حسب تعداد جامعه اولیه

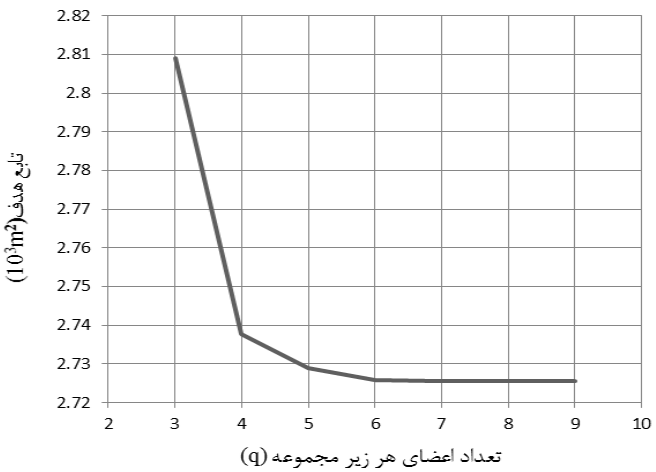
www.SID.ir



شکل۵- تغییرات مقدار تابع هدف بر حسب تعداد گام‌های تکاملی

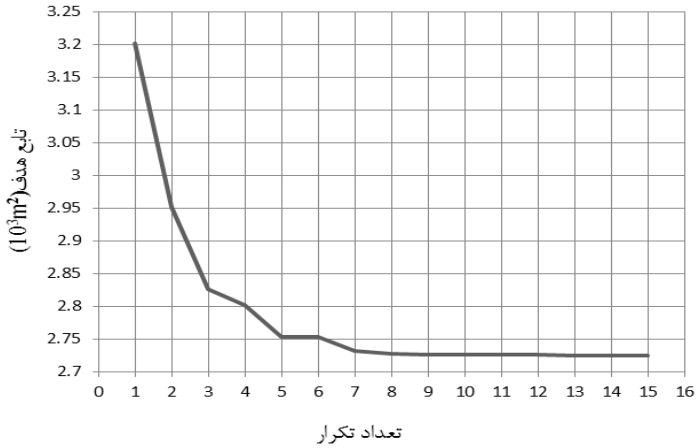


شکل۶- تغییرات مقدار تابع هدف بر حسب تعداد فرزندان



شکل۷- تغییرات مقدار تابع هدف بر حسب تعداد اعضای زیر مجموعه‌ها

www.SID.ir



شکل ۸- تغییرات تابع هدف بر حسب تعداد تکرارها

نتایج به دست آمده از اجرای مدل بهینه‌سازی SCE و مدل LINGO نمایانگر این نکته است که این دو روش بهینه-سازی، در بهینه‌سازی مقطع سد و در نتیجه برآورد حجم مصالح بدنه عملکرد یکسانی دارند و مقدار کمینه تابع هدف یعنی مساحت مقطع سد برزک برابر با ۲۷۲۵/۴ مترمربع تعیین گردید بطوریکه در طرح اولیه، مساحت این مقطع برابر ۴۴۰۰/۷ مترمربع بوده است. در طراحی اولیه حجم مصالح مصرفی در بدنه سد با فرض یکسان بودن مقطع در تمام طول سد برابر ۹۳۲۹۴۵/۸ مترمکعب محاسبه شده بود در حالی که پس از تعیین ابعاد بهینه، این حجم به ۵۷۷۷۶۳/۶ مترمکعب کاهش یافته است. مقادیر ضریب اطمینان پایداری شیروانی بالادست و پایین‌دست در طراحی بهینه به ترتیب برابر ۱/۲۵۳ و ۱/۵۲ محاسبه گردید که نشان دهنده پایداری مقطع بهینه سد نیز می‌باشد. با توجه به جدول (۳) و مقایسه آن با ارقام ارائه شده در جدول (۱) که ابعاد سد در حالت طراحی اولیه می‌باشد، مشاهده می‌گردد که ابعاد و اندازه‌ها در مقطع بهینه کاهش یافته و شیب دیواره‌های بالادست و پایین‌دست سد نیز با حفظ شرایط پایداری بدنه، افزایش یافته‌اند. بطور نمونه شیب ناحیه اول بدنه در پایین‌دست از ۲/۱ به ۱/۳۳ و شیب این ناحیه در بالادست از ۲/۵ به ۱/۸۸ کاهش یافته است. این مطلب نشان دهنده پایداری مصالح در بالادست و پایین‌دست بوده و نشان می‌دهد که برحسب نوع مصالح بکار رفته و با در نظر گرفتن محدودیت‌های طراحی، امکان طراحی با شیب بیشتر بدنه وجود داشته است. همچنین نتایج بهینه‌سازی نشان می‌دهد که امکان کاهش عرض سکوها در بالادست و پایین‌دست به‌ترتیب از ۱۵ متر به ۴ متر و از ۵ متر به ۴ متر به نحوی که پایداری و شرایط فیزیکی بدنه حفظ گردد وجود خواهد داشت.

نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق به منظور طراحی بهینه مقطع سد خاکی برزک، ترکیبی از مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. روابط رگرسیونی نیز برای تقریب ضرایب اطمینان پایداری به کمک مدل‌های شبیه‌سازی Slope/w و Seep/w تهیه شدند و قابلیت الگوریتم بهینه‌سازی SCE و مدل LINGO برای یافتن پاسخ بهینه مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که روش‌های بهینه‌سازی به‌کار رفته در این مطالعه، برآوردهای یکسانی از راه‌حل بهینه ارائه می‌نمایند و با اعمال بهینه‌سازی، حجم بدنه سد ضمن برقراری شرایط پایداری به میزان ۳۸ درصد کاهش می‌یابد.

REFRENCES

Abdul Hussain, I. A., Kashyap, D. and Hari Prasad, K. S. (2007). Seepag modeling assisted optimal design of a homogeneous earth dam: Procedure evolution. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*.

Dakhlaoui, H., Bargaoui, Z. and Bardossy,A. (2012). Toward a more efficient calibration schema for HBV rainfall-runoff model. *Journal of Hydrology* ,444-445,161-179.

Duan, Q., Sorooshian, S. and Gupta, V. k. (1992). Effective and Efficient Global Optimization for Conceptual Rainfall- Runoff Models. *Journal of Water resources research*, 28.

Duan, Q., Gupta, V.K. and Sorooshian, S.(1993). A shuffled complex evolution approach for effective and efficient global theory minimization. *Journal of optimization and applications*.76(3), 501-521.

Duan, Q., Sorooshian, S. and Gupta, V. k. (1994). Optimal use of the SCE-UA global. Optimization method for calibrating watershed models. *Journal of hydrology*,(158), 265-284.

Archive of SID
www.SID.ir

Gan,T.Y., Diamini, E.M. and Biftu,G.F. (1997). Effects of model complexity and structure, data quality, and objective functions on hydrologic modeling. *Journal of Hydrolgy*, (192), 81-103.

Geo-Slope International Ltd.(2008). Stability Modeling with SLOPE/W 2007, An Engineering Methodology, 4th edition. Geo-Slope International Ltd., Calgary: Alberta, Canada.

Holland, J. H.(1975). Adaptation in Natural and Artificial Systems, University of Michigan Press, Ann Arbor.

Long ,L., Henrik, M. and Dan, R. (2007). Simulation and optimization modelling approach for operation of the HoaBinh reservoir, Vietnam. *Journal of Water Resour Manage*,(21), 947–959.

Montaseri,M., Deiminiat,A. and Ghezelsofloo, AA. (2010). Optimization of Clay Core Dimensions in Earth Dams Using Genetic Algorithm. *Journal of water and soil science, water and soil science*, Volume1(3), 73-86 (in Farsi).

Murthy ,G.S.R., Murty, Katta, G. and Raghupathy, G. (2013). Designing earth dams optimally. 40th Anniversary Volume, IAPQR.

Nelder, J. A., and Mead, R. (1965). A simplex method for function minimization, *Cornput. J*., 7(4), 308-313.

Price, W. L. (1987). Global optimization algorithms for a CAD workstation, *Journal of Optimization Theory and Applications*., 55(1), 133-146.

Rahimi, H. (2003).Earth dams. Tehran: University of Tehran (In Farsi).

Ranjan, G., and Rao, A. S. R. (2000). *Basic and applied soil mechanics*, New Age International Publishers.

Skahill, B.E., and Doherty, J. (2006). Efficient accommodation of local minima in watershed model calibration. *Journal of Hydrology*. (329), 122–139.

US. Army corps of engineers. (2003). Engineering and design: Slope stability. Engineering Manual EM 1110-2-1901, Vicksburg, Miss.

Wu, Y. and Chen, Ji. (2013). Estimating irrigation water demand using an improved method an optimizing reservoir operation for water supply and hydropower generation: A case study of Xinfengjiang reservoir in southern China. *Journal of Agricultuarl Water Management*, (116), 110-121.

XU, Y.Q., Unami, K. and Kawachi, T. (2003). Optimal hydraulic design of earth dam cross section using saturated- unsaturated seepage flow model. *Advances in Water Resources*, (26),1-7.

Archive of SID

www.SID.ir