

مقایسه کارایی الگوریتم‌های دسته ماهی‌های مصنوعی، تکامل ترکیبی مجموعه‌ها و نورد شبیه‌سازی شده در بهینه‌سازی مقطع سدهای خاکی (مطالعه موردی سد برزک)

حسام قدوسی* و فهیمه وکیلی تنها**

* نگارنده مسئول: گروه مهندسی آب، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. تلفن: ۰۲۴)۳۲۲۸۳۲۰۲. پیام‌نگار: ghodousi_he@yahoo.com

** به‌ترتیب: استادیار؛ و دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب دانشگاه زنجان

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۰/۲۸؛ تاریخ پذیرش: ۹۵/۵/۱۱

چکیده

در این مطالعه، عملکرد روش‌های بهینه‌سازی تکاملی برای طراحی مقطع سدهای خاکی ناهمگن بررسی شده است. این روش‌ها عبارت‌اند از: الگوریتم دسته ماهی‌های مصنوعی (AFSA)، الگوریتم تکامل ترکیبی مجموعه (SCE) و الگوریتم نورد شبیه‌سازی شده (SA). این مسأله به صورت یک تابع بهینه‌سازی غیرخطی با اعمال قیود متفاوتی نظیر محدودیت‌های پایداری شیب و ابعاد هندسی فرمول‌بندی شد. متغیرهای طراحی در فرآیند بهینه‌سازی، پارامترهای هندسی مقطع سد خاکی هستند و قیود ضرایب اطمینان پایداری از نتایج تحلیل‌هایی مانند تحلیل تراوش و پایداری شیروانی‌ها برای مجموعه‌ای از طرح‌های نمونه و به کمک مدل‌های رگرسیونی خطی به صورت توابعی صریح بر حسب متغیرهای طراحی تعیین گردید. کارایی روش‌های بهینه‌سازی در تعیین نقطه بهینه سراسری، بر حسب میانگین عملکرد و متوسط زمان لازم برای محاسبات با یکدیگر مقایسه شد. پس از بهینه‌سازی ابعاد سد برزک با استفاده از روش‌های SA، AFSA و SCE، حجم سد به میزان ۳۸، ۳۷ و ۳۰ درصد نسبت به طرح اولیه کاهش یافته است. بر اساس نتایج به دست آمده، در دستیابی به ابعاد بهینه مقطع سد خاکی روش SCE نسبت به روش‌های SA و AFSA کارایی بهتری دارد.

واژه‌های کلیدی

بهینه‌سازی، تکامل ترکیبی مجموعه‌ها، دسته ماهی‌های مصنوعی، سد خاکی، نورد شبیه‌سازی شده

مقدمه

مصرفی، روشی عددی را برای محاسبه راه‌حل بهینه در سطح مقطع ایده‌آل سد خاکی توسعه دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که ناحیه اشباع نشده خاک نقشی مهم در شکل میدان جریان و طرح بهینه دارد و یک هسته رسی با هدایت هیدرولیکی کمتر نسبت به پوسته، باید در بالادست مقطع قرار گیرد. عبدالحسین و همکاران (Abdul Hussain et al., 2007) کاربرد روش کمینه‌سازی نامقید متوالی^۱ (SUMT) را برای بهینه‌سازی حجم سدهای خاکی همگن بررسی کردند. مورتی و همکاران (Murthy et al., 2013) نیز در تحقیقی برای بهینه‌یابی طرح‌های سد خاکی و محاسبه ضریب اطمینان، به

طراحی مهندسی سدهای خاکی با در نظر گرفتن جنبه‌های ایمنی و اقتصادی طرح، فرآیندی پیچیده است. در روند طراحی این نوع سدها، به‌طور معمول بر تأمین ایمنی تأکید می‌شود و جنبه‌های اقتصادی کمتر مورد توجه قرار می‌گیرند (Murthy et al., 2013). بنابراین، ضرورت طراحی سدهای خاکی به صورت یک مسأله بهینه‌سازی مشخص می‌گردد. زو و همکاران (Xu et al., 2003) با بررسی بهینه‌سازی نوع مصالح خاکی برای استفاده در هر نقطه از مقطع سد با هدف کاهش منطقه اشباع شده و کاهش هزینه مصالح

برای رهایی از به دام افتادن در نقطه کمینه موضعی است که به‌طور گسترده در بهینه‌سازی مسائل مختلف به‌کار گرفته شده است (Dougherty & Marryott, 1991; Goldman & Mays, 1999; Cunha & Sousa, 2001; Khodabakhshi *et al.*, 2009, Zameer *et al.*, 2014). روش SCE یک الگوریتم جستجوی سراسری است که دوان و همکاران آن را توسعه داده‌اند (Duan *et al.*, 1992). تا کنون روش SCE به‌طور موفقیت‌آمیز برای کالیبراسیون مدل‌های بسیاری در زمینه هیدرولوژی به‌کار رفته است (Duan *et al.*, 1992; Yapo *et al.*, 1998; Ajami *et al.*, 2004; Skahill & Doherty, 2006; Huang *et al.*, 2014). در طراحی بهینه مخازن بتنی آب با هدف کمینه کردن هزینه مصالح مخزن، برکت و آلتوبات (Barakat & Altoubat, 2009) روش‌های SA, GA و SCE را با یکدیگر مقایسه کردند. نتایج حاصل از این مقایسه نشان داد که روش SCE در به‌دست آوردن بهترین راه‌حل‌ها نسبت به دو روش دیگر بهتر عمل می‌کند.

لرما و همکاران (Lerma *et al.*, 2015) از الگوریتم‌های تکاملی SCE و جستجوی پراکنده^۵ برای طراحی قوانین بهینه بهره‌برداری از سیستم‌های منابع آب استفاده کردند. نتایج بررسی‌ها نشان داد که در دستیابی به یک راه‌حل بهینه، روش SCE به تعداد تکرارهای کمتری نیاز دارد و در مقایسه با روش جستجوی پراکنده، راه‌حل‌های بهتر و نزدیک به نقطه بهینه سراسری ارائه می‌دهد. الگوریتم AFSA را که لی و همکاران (Li *et al.*, 2002) ارائه دادند روشی بهینه‌یابی تصادفی مبتنی بر رفتارهای جمعی است؛ این روش در مسائل مختلفی از جمله تخمین پارامترها (Jiang *et al.*, 2007)، بهینه‌سازی ترکیبی (Chen *et al.*, 2006) و خوشه‌بندی داده‌ها (Xiao, 2010; Yazdani *et al.*, 2010) به‌کار رفته است.

با توجه به بررسی‌های صورت گرفته و مقایسه مطالعات قبلی مشاهده می‌شود که در زمینه بهینه‌سازی سدهای خاکی بیشتر مطالعات درباره

مدل‌سازی ریاضی پرداختند و به‌منظور یافتن راه‌حل‌های بهینه، روش ابتکاری^۱ ارائه دادند. منتصری و همکاران (Montaseri *et al.*, 2010) برای دستیابی به طرح هندسی بهینه برای هسته رسی سدهای خاکی از الگوریتم ژنتیک استفاده کردند. این طرح علاوه بر دارا بودن شرایط خواسته شده باید دارای حداقل حجم ممکن برای مصالح هسته نیز باشد. ولی تاکنون درباره بهینه‌سازی ابعاد مقطع سدهای خاکی با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی مانند الگوریتم ژنتیک، ازدحام ذرات، SA و... تحقیق نشده است. به‌طور کلی، هزینه‌ی احداث و تأمین پایداری سد خاکی به مقطع سد بستگی دارد و بنابراین طراحی سد خاکی به معنای تعیین پارامترهای مقطع سد خواهد بود. در طراحی این نوع سدها، تعیین مصالح و روش‌های به‌کار رفته در ساخت سد نیز عوامل مهمی هستند (Murthy *et al.*, 2013).

متغیرهای طراحی در فرآیند بهینه‌سازی در این مطالعه، پارامترهای هندسی مقطع سد خاکی هستند و به‌منظور محاسبه ضرایب اطمینان پایداری هر طرح مشخص، در یک روش ابتکاری با استفاده از نتایج تحلیل‌هایی نظیر تحلیل تراوش و پایداری، مدل‌های رگرسیونی جدیدی تهیه شده است. در این پژوهش، مسأله بهینه‌سازی سدهای خاکی ناهمگن به‌صورت مدل برنامه‌ریزی غیرخطی تعریف شده که در آن، سطح مقطع سد (که نشان‌دهنده بخش عمده‌ای از هزینه ساخت است) به‌عنوان تابع هدف و ضرایب اطمینان طراحی به‌عنوان محدودیت‌های اصلی در نظر گرفته شده‌اند. به‌منظور بهینه‌سازی تابع هدف و مقایسه عملکرد، از سه روش بهینه‌سازی تصادفی دسته ماهی‌های مصنوعی^۲ (AFSA)، تکامل ترکیبی مجموعه^۳ (SCE) و نورد شبیه‌سازی شده^۴ (SA) استفاده شده است. روش SA روش بهینه‌سازی عددی با ساختار تصادفی هوشمند است که در آن فرآیند طبیعی بازپخت فلزات شبیه‌سازی می‌شود (Kirkpatrick *et al.*, 1983). از ویژگی‌های اصلی روش SA توانایی آن

1- Heuristic Method

3- Shuffled Complex Evolution

5- Scatter Search Algorithm

2- Artificial Fish Swarm Algorithm

4- Simulated Annealing

به‌عنوان عوامل ثابت انتخاب می‌شوند و برحسب ضوابط طراحی مقادیری برای آنها در نظر گرفته می‌شود و تعدادی دیگر به‌عنوان متغیرهای طراحی وارد تابع هدف خواهند شد.

شکل ۱ نمایی کلی از مقطع سدهای خاکی ناهمگن و متغیرهای طراحی مربوط را نشان می‌دهد. بردار متغیرهای طراحی نیز به‌صورت رابطه ۱ تعریف شده است.

$$X = \{ b_{up}, b_{dn}, h_{up}, h_{dn}, i_{up1}, i_{dn1} \} \quad (1)$$

که در آن،

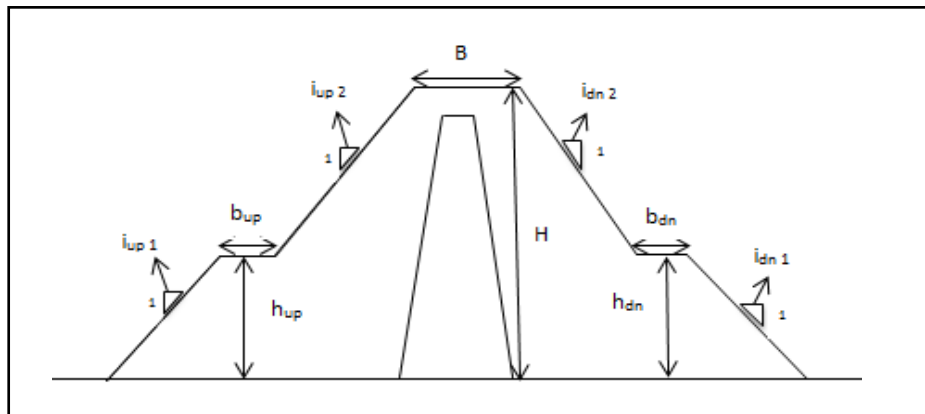
b_{up} و b_{dn} = به‌ترتیب عرض سکوها در بالادست و پایین‌دست؛ h_{up} و h_{dn} = به‌ترتیب ارتفاع سکوها در بالادست و پایین‌دست؛ و i_{up1} و i_{dn1} = شیب ناحیه ۱ام بدنه سد به‌ترتیب در بالادست و پایین‌دست.

روش‌های تأمین پایداری، بهینه‌سازی مصالح و نوع سد یا درباره بهینه‌سازی یکی از تأسیسات هیدرولیکی سد غیر از حجم بدنه و ارزش اقتصادی آن بوده است. همچنین، در بیشتر تحقیقات صرفاً یکی از روش‌های بهینه‌سازی به‌کار رفته است اما در پژوهش حاضر ضمن کاربرد سه روش بهینه‌سازی و مقایسه کارایی آنها، به‌منظور محاسبه ضرایب اطمینان پایداری با استفاده از نتایج تحلیل‌های تراوش و پایداری مدل‌های رگرسیونی جدیدی تهیه شده است.

مواد و روش‌ها

متدولوژی تحقیق

در این مطالعه، پارامترهای هندسی مقطع سد خاکی متغیرهای طراحی در نظر گرفته شده‌اند؛ تعدادی از این پارامترها مانند ارتفاع سد و عرض تاج سد



شکل ۱- نمایی کلی از مقطع سد خاکی

شود. فرمول کلی تابع هدف طبق ابعاد ارائه شده در شکل ۱ به‌صورت رابطه ۲ است.

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

تابع هدف

در این تحقیق هدف از بهینه‌سازی، انتخاب ابعاد مقطع سد خاکی به‌منظور به حداقل رساندن هزینه‌های پروژه ضمن تأمین محدودیت‌های استحکام و پایداری است. بنابراین، تابع هدف در این مسئله F ، حجم بدنه سد در واحد طول است که در فرآیند بهینه‌سازی باید کمینه

قیود طراحی

γ = وزن مخصوص مصالح پوسته در حالت مرطوب؛
 H = ارتفاع سد؛ X = ارتفاع هسته سد؛ F_d = ضریب اطمینان
 پایداری شیب پایین دست و i_{dn1} و i_{dn2} = شیب‌های
 شیروانی پایین دست. به منظور اطمینان از پایداری طرح و
 ساخت سد با ابعاد مجاز، پارامترهای هندسی مقطع و
 ضرایب اطمینان باید با اعمال قیودی محدود شوند.

قیود هندسی

این قیود، محدوده تغییرات قابل قبول پارامترهای
 هندسی مقطع سد هستند و به صورت روابط ۵ تا ۷
 تعریف می‌شوند:

$$4 \leq b_{up}, b_{dn} \leq 10 \quad (5)$$

$$10 \leq h_{up}, h_{dn} \leq H - 10 \quad (6)$$

$$\frac{1}{\tan\phi} \leq i_{up1}, i_{dn1} \leq 5 \quad (7)$$

که در آن‌ها،

H = ارتفاع تاج سد بر حسب متر؛ و ϕ = زاویه اصطکاک
 داخلی مؤثر مصالح پوسته.

قیود ضریب اطمینان

برای طراحی ایمن، برابر توصیه‌ها، ضریب اطمینان در
 مقابل لغزش برای شیب پایین دست F_d (رابطه ۸) معمولاً
 بین ۱/۲۵ تا ۱/۵ در نظر گرفته می‌شود (Ranjan & Rao, 2000; Anon, 2003).
 در این مطالعه، حداقل F_d برابر
 ۱/۵ در نظر گرفته شده است.

$$F_d \geq 1.5$$

$$F_d = 0.271 + 0.105(i_{dn1} \cdot i_{dn2}) + 0.101(\tan\phi \cdot \gamma) - 0.092H + 0.092X - 0.201i_{up1} \quad (8)$$

$$0.201i_{up1} g_1 = 1.5 - F_d \leq 0$$

همچنین ضریب اطمینان در مقابل لغزش برای شیب
 بالادست F_u (رابطه ۹) معمولاً بین ۱/۱۵ تا ۱/۳ در نظر

مدل پایداری شیروانی‌های بالادست و پایین دست
 پایداری سد تابعی از نیروهای محرک و مقاوم است و
 ضریب اطمینان پایداری با استفاده از این نیروها و
 گشتاورهای حاصل محاسبه می‌شود. چندین روش برای
 تعیین ضریب اطمینان پایداری شیروانی خاکی پیشنهاد
 شده است که برخی از آنها عبارت‌اند از روش دایره
 سوئدی، روش عمومی تعادل حدی، روش بیشاپ، روش
 جانبو، روش اسپنسر، و روش مورگان اشترن-پرایس
 (Hammouri et al., 2008). برای تعریف رابطه ریاضی
 ضریب اطمینان شیروانی بالادست و پایین دست سد و
 معرفی آن به عنوان قید در مسأله بهینه‌سازی، مشخصات
 هندسی و مصالح مختلف فرضی ۱۳۰ سد به عنوان نمونه
 در فضای طرح انتخاب و تراوش آنها با استفاده از نرم‌افزار
 SEEP/W تحلیل شد. برای تحلیل‌های پایداری
 شیروانی‌های بالادست و پایین دست از نرم‌افزار
 SLOPE/W استفاده و مقادیر ضریب اطمینان نیز با
 به‌کارگیری روش تعادل حدی مورگان اشترن-پرایس برای
 هر یک از سدها محاسبه شد. با تجزیه و تحلیل آماری
 داده‌های تولید شده با استفاده از نرم‌افزار SPSS، مدل
 رگرسیونی ضریب اطمینان شیروانی بالادست و پایین دست
 با ضرایب تعیینی (R^2) برابر با ۰/۸۸۳ و ۰/۹۰۱ به صورت
 روابط ۳ و ۴ به دست آمد.

$$F_u = -0.599 + 0.082(i_{up1} \cdot i_{up2}) + 0.101(\tan\phi \cdot \gamma) + 0.033H - 0.031X \quad (3)$$

$$F_d = 0.271 + 0.105(i_{dn1} \cdot i_{dn2}) + 0.101(\tan\phi \cdot \gamma) - 0.092H + 0.092X - 0.201i_{up1} \quad (4)$$

که در آن‌ها،

F_u = ضریب اطمینان پایداری شیب بالادست؛
 i_{up1} و i_{up2} = شیب‌های مربوط به شیروانی بالادست؛
 ϕ = زاویه اصطکاک داخلی مؤثر مصالح پوسته؛

گرفته می‌شود (Ranjan & Rao, 2000; Anon, 2003). مختصات $51^{\circ} 15' 46''$ شرقی و $33^{\circ} 44' 13''$ شمالی و در این مطالعه، حداقل F_u ، $1/25$ در نظر گرفته شده است. در فاصله حدود پنج کیلومتری جنوب شرق روستای برزک و ۶۵ کیلومتری جنوب شهرستان کاشان واقع شده است.

سد برزک، سدی خاکی با هسته رسی قائم با ارتفاع $41/5$ متر، عرض تاج سد ۸ متر و ارتفاع نرمال آب در مخزن ۳۹ متر است. طرح مقطع این سد در شکل ۲، مقادیر پارامترهای هندسی مقطع سد در طراحی اولیه در جدول ۱ و مشخصات مصالح بدنه و پی سد در جدول ۲

$$F_u \geq 1.25$$

$$F_u = -0.599 + 0.082(i_{up1} \cdot i_{up2}) + 0.101(\tan\phi \cdot \gamma) + 0.033H - 0.031X \quad (9)$$

$$g_2 = 1.25 - F_u \leq 0$$

مشخصات سد مورد مطالعه

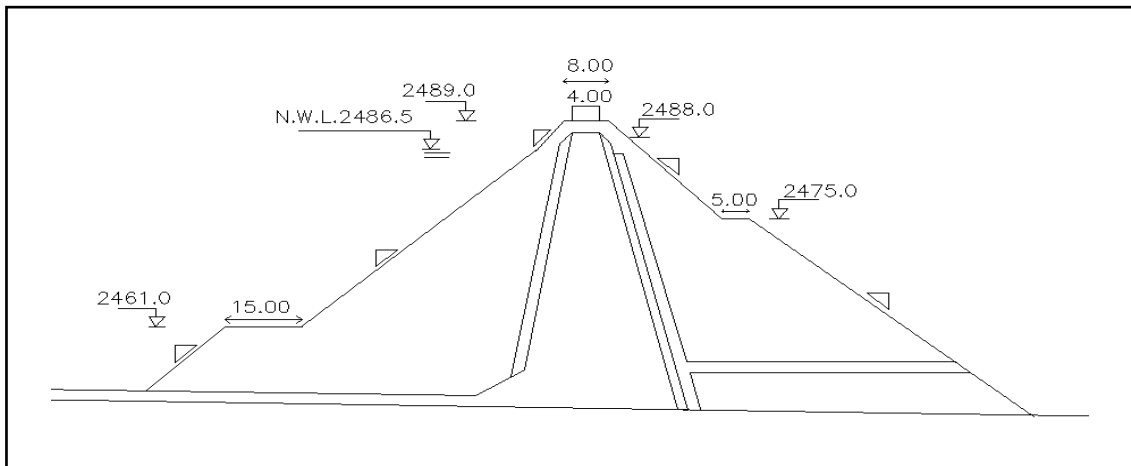
ساختگاه سد برزک در محدوده جغرافیایی با ارائه شده است.

جدول ۱- مقادیر اولیه ابعاد سد برزک

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

جدول ۲- مشخصات مصالح بدنه و پی سد

شرح مصالح	وزن واحد حجم		چسبندگی ظاهری (تن بر مترمربع)	زاویه اصطکاک	
	توده خاک مرطوب (تن بر مترمربع)	توده خاک اشباع (تن بر مترمربع)		داخلی (درجه)	نوع آزمایش
هسته رسی	۱/۹۵	۲/۰۵	۸/۰	۳/۵	UU
	۱/۹۵	۲/۰۵	۴/۰	۱۶	CU
	۱/۹۵	۲/۰۵	۰/۰	۲۵	CD
پوسته شن و ماسه‌ای	-	-	-	-	UU
	-	-	-	-	CU
	۲/۰۵	۲/۱	۰/۰	۳۷	CD
پی آبرفتی	-	-	-	-	UU
	-	-	-	-	CU
	۲/۰	۲/۰	۰/۰	۳۵	CD
سنگ بستر	-	-	-	-	UU
	-	-	-	-	CU
	-	-	۸/۰	۳۰	CD



شکل ۲- مقطع طراحی اولیه بدنه سد برزک

الگوریتم SCE

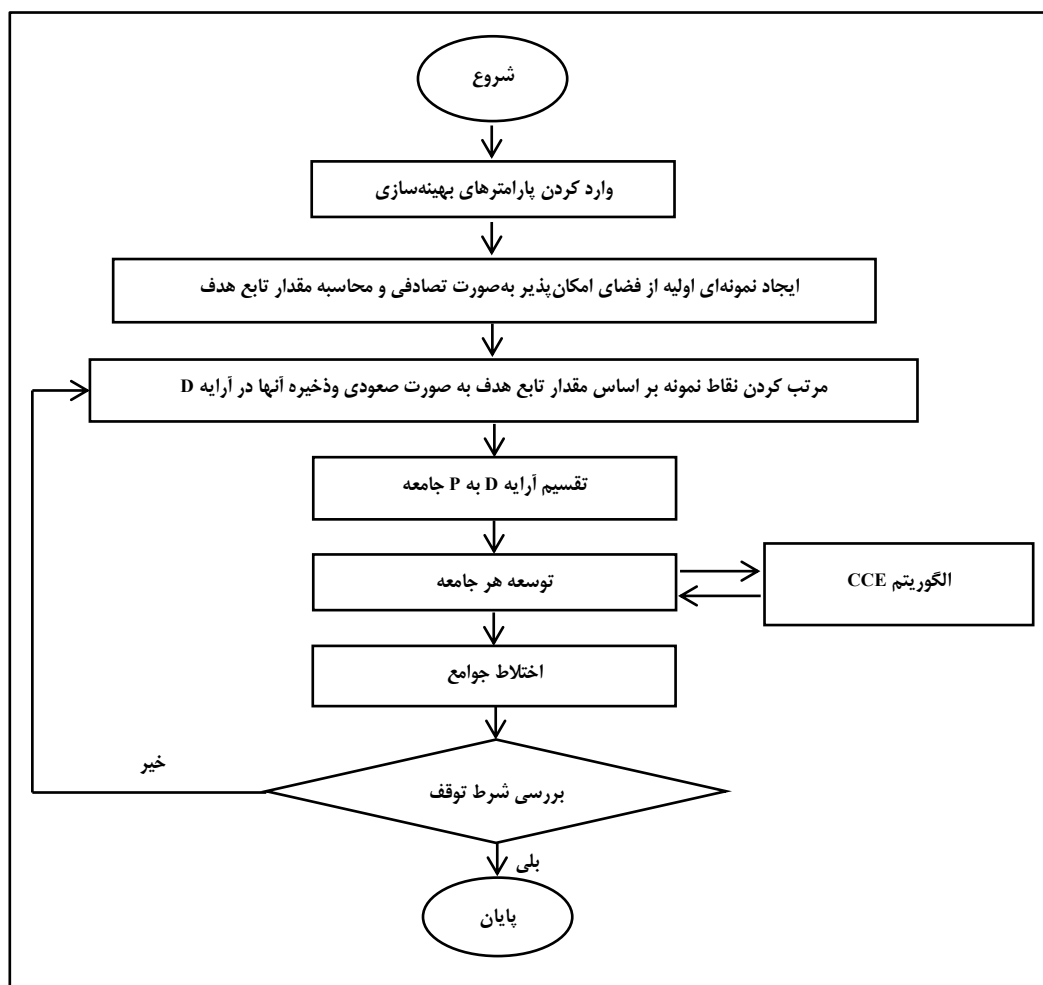
مجموعه‌های مختلف دوباره با هم ترکیب می‌شوند تا تنها یک جمعیت از نقاط وجود داشته باشد (اختلاط مجموعه). مجدداً جمعیت به NP مجموعه تقسیم‌بندی می‌شود. مراحل جستجوی موضعی و اختلاط تا زمانی تکرار می‌شوند که معیار توقف برقرار گردد (Duan *et al.*, 1993, Duan *et al.*, 1994). در الگوریتم تکامل رقابتی، به پارامترهای q ، α و β مقادیر اختصاص داده می‌شود به طوری که $2 \leq q \leq NP$ ، $\beta \geq 1$ و $\alpha \geq 1$ است. بر اساس توزیع احتمالاتی مثلثی (رابطه ۱۰) برای نقاط وزن‌هایی مشخص و q نقطه از هر مجموعه بر اساس $Prob_i$ به‌عنوان والدین انتخاب می‌شود. α تعداد راه‌حل‌های جدید متوالی است که با q نقطه مشخص تولید می‌شود و β تعداد گام‌های تکاملی مجموعه را مشخص می‌کند (Ketabchi & Ataie-Ashtiani, 2015).

$$Prob_i = \frac{2 \times (NP + 1 - i)}{NP \times (NP + 1)} \quad (10)$$

$$i = 1, \dots, NP$$

روند کلی این الگوریتم در شکل ۳ ارائه شده است.

روش SCE یک روش بهینه‌سازی سراسری تکاملی است که به دلیل ارزیابی تابع هدف در نقاط تصادفی از فضای امکان‌پذیر پارامترها به‌عنوان روشی احتمالاتی طبقه‌بندی می‌شود (Barakat & Altoubat, 2009). در این روش، مفاهیم تکامل رقابتی (Holland, 1992)، اختلاط مجموعه، جستجوی تصادفی کنترل شده (Price, 1987) و فرآیند سیمپلکس گرادیان نزولی^۱ با یکدیگر ترکیب می‌شوند. در روش SCE به پارامترهای تعداد مجموعه‌ها (NC) و تعداد نقاط در هر مجموعه (NP) مقادیری اختصاص داده می‌شود به طوری که $NC \geq 1$ و $NP \geq D + 1$ به‌صورت $Pop = NC \times NP$ محاسبه می‌شود. نقاط به‌طور تصادفی در فضای جستجو تولید و بر اساس مقدار تابع هدف ارزیابی می‌شوند، سپس به‌صورت صعودی مرتب خواهند شد (برای مسأله کمینه‌سازی) و به NC مجموعه تقسیم‌بندی می‌شوند. هر مجموعه بر اساس الگوریتم تکامل رقابتی^۲ (CCE) توسعه می‌یابد که بر مبنای فرآیند جستجوی سیمپلکس گرادیان نزولی است (Nelder & Mead, 1965). در مرحله بعد نقاط



شکل ۳- فلوجارت الگوریتم SCE (Duan et al., 1993)

الگوریتم SA

(Van Laarhoven & Aarts, 1987). همان‌طور که در بالا گفته شد، الگوریتم SA در بهینه‌سازی مسائل مختلف به کار گرفته شده است و در این مطالعات عملگرهای تولید همسایگی و تابع سرمایش به‌صورت‌های مختلفی بیان گردیده‌اند. در این مطالعه از بین توابع مختلف موجود، از توابع به‌صورت زیر استفاده شده است. تولید همسایگی یک نقطه آزمایشی جدید x' نسبت به نقطه فعلی x براساس رابطه ۱۱ تولید می‌شود.

$$x' = x + \theta(T) \quad (11)$$

که در آن،

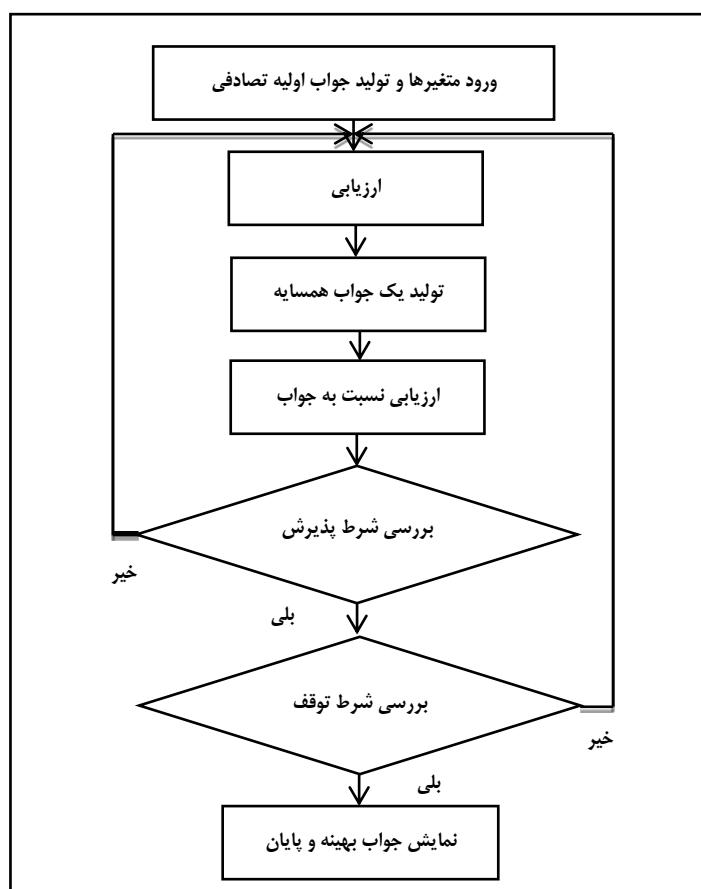
الگوریتم SA یکی از شناخته‌شده‌ترین الگوریتم‌های جستجوی موضعی و سراسری است. ایده اصلی روش بهینه‌سازی SA را اولین بار متروپولیس و همکاران (Metropolis et al., 1953) مطرح کردند. کرک‌پاتریک و همکاران (Kirkpatrick et al., 1983) و به‌دنبال آن سرنی (Cerny, 1985) به‌طور مستقل دریافتند که می‌توان از این ایده برای مسائل بهینه‌سازی ترکیبی سود جست و بر این اساس روش SA را پایه‌گذاری کردند. این روش بر پایه مفهوم مدل‌سازی و شبیه‌سازی یک سیستم ترمودینامیکی است که دو عملگر بنیادی همچون تولید نسل و تابع زمانی سرمایش انتخاب می‌شوند

$$T = T_0 \left(\frac{T_n}{T_0} \right)^{\frac{t}{a}} \quad (12) \quad \theta = \text{میزان دما} = T/a; \theta(T) = T/a = \text{یک پارامتر}$$

مقیاس؛ و $T =$ مقدار فعلی پارامتر کنترل دما که از تابع زمانی سرمایه‌ش حاصل می‌شود. $\theta(T)$ تابعی است که در یک فرایند تصادفی تولید می‌گردد (Peter et al., 1987).

تابع سرمایه‌ش. تابع زمانی سرمایه‌ش به صورت رابطه ۱۲ بیان می‌شود (Van Laarhoven & Aarts, 1987):

که در آن،
 $t =$ شمارنده تغییرات دما؛ $a =$ فاکتور مقیاس؛ $T_0 =$ دمای اولیه و نهایی و $T_n =$ مقادیر اولیه پارامترهای دمای اولیه و نهایی که به ترتیب برابر با یک و 10^{-8} درجه سلسیوس است. روند کلی این الگوریتم در شکل ۴ ارائه شده است.



شکل ۴- فلوجارت الگوریتم SA (Van Laarhoven & Aarts, 1987)

الگوریتم AFSA

ماهی‌ها محقق می‌شود. محیطی که ماهی مصنوعی در آن زندگی می‌کند، اساساً فضای راه‌حل و حوزه ماهی‌های مصنوعی دیگر است. درجه تراکم غذا در منطقه آبی، تابع هدف AFSA است. در نهایت ماهی‌های مصنوعی به مکانی می‌رسند که درجه تراکم و غلظت غذا در آنجا بیشترین مقدار است. مدل ماهی مصنوعی

الگوریتم دسته ماهی‌های مصنوعی (AFSA) جزء الگوریتم‌های هوش جمعی است که از رفتارهای اجتماعی دسته ماهی‌ها در طبیعت الهام گرفته شده است. در دنیای زیر آب، ماهی‌ها می‌توانند مناطقی را پیدا کنند که غذای بیشتری دارند؛ این امر با جستجوی فردی یا گروهی

شامل دو بخش متغیرها و توابع است که متغیرهای آن: دید با استفاده از رابطه (۱۴) انتخاب می‌شود.

$$X_j = X_i + \text{visual} \cdot \text{Rand}(-1,1) \quad (14)$$

رفتار حرکت گروهی ماهی‌ها: فرض کنیم X_c موقعیت مرکزی (موقعیت فعلی ماهی مصنوعی)، δ (فاکتور شلوغی) طول گام حرکت، visual (میدان دید)، try_number (سقف تعداد آزمایش و سعی کردن) و δ (فاکتور شلوغی) می‌باشد (Jiang et al., 2007). همچنین، توابع شامل رفتارهای جستجوی غذا، رفتار حرکت گروهی و رفتار دنباله‌روی هستند که با آنها فضای مسئله جستجو می‌شود (Neshat et al., 2014). در زیر به شرح هر یک از این توابع پرداخته می‌شود، روند کلی این الگوریتم نیز در شکل ۵ ارائه شده است.

$$X_i^{(t+1)} = X_i^{(t)} + \frac{X_c - X_i^{(t)}}{\|X_c - X_i^{(t)}\|} \cdot \text{step} \cdot \text{Rand}(0,1) \quad (15)$$

رفتار حرکت آزادانه: در AFSA، هنگامی که ماهی مصنوعی نتواند به سمت موقعیتی با مقدار غذای بیشتر حرکت کند، یک گام به صورت تصادفی در فضای مسأله با استفاده از رابطه ۱۳ حرکت می‌کند.

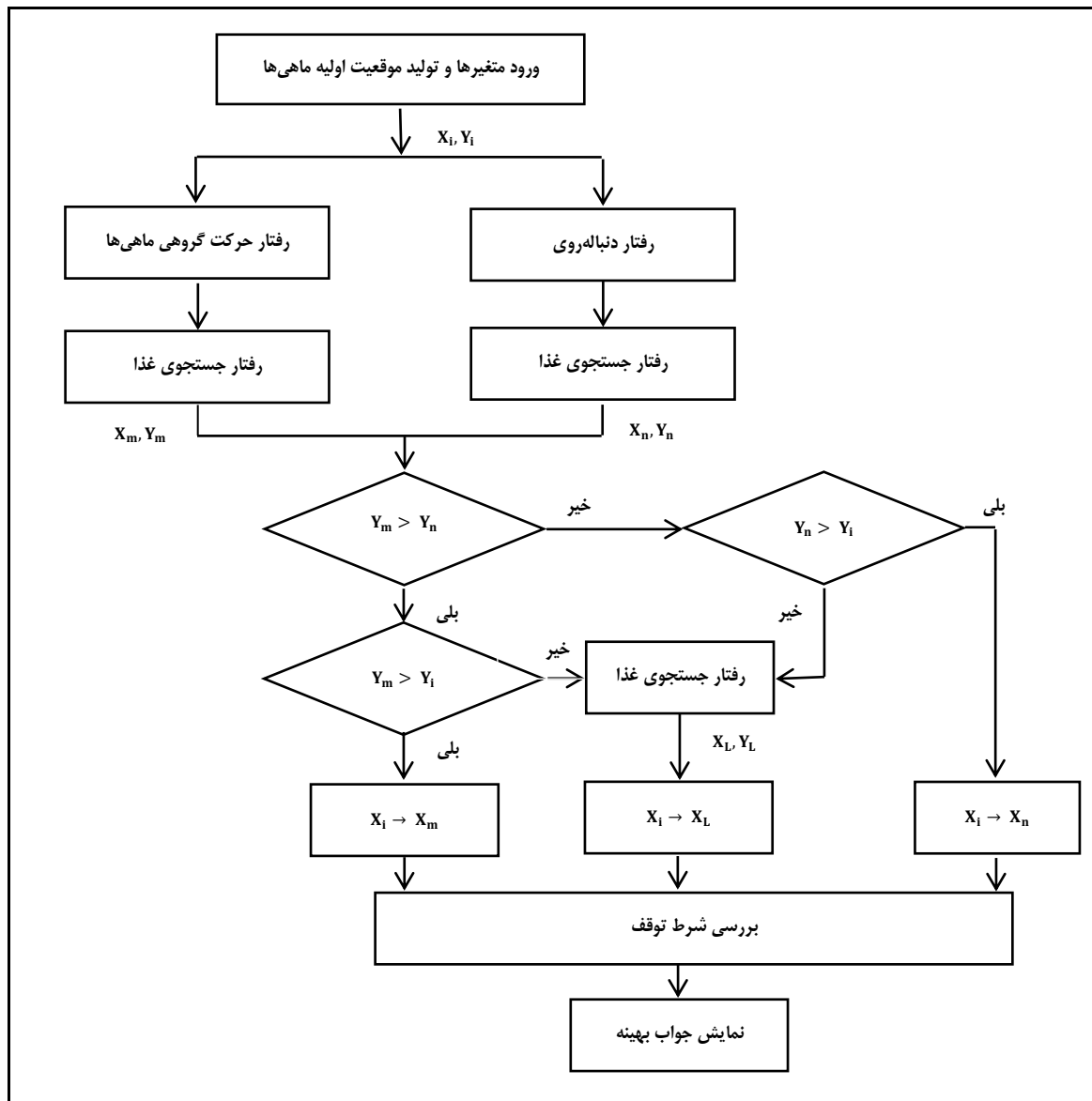
$$X(t+1) = X(t) + \text{step} \times \text{Rand}(-1,1) \quad (13)$$

رفتار جستجوی غذا: اگر X_i وضعیت فعلی ماهی مصنوعی باشد، یک وضعیت X_j به طور تصادفی در میدان

$$X_i^{(t+1)} = X_i^{(t)} + \frac{X_j - X_i^{(t)}}{\|X_j - X_i^{(t)}\|} \cdot \text{step} \cdot \text{Rand}(0,1) \quad (16)$$

جدول ۳- مشخصات توابع استاندارد مورد استفاده

تابع	رابطه	بعد	محدوده	مقدار بهینه
Rosenbrock	$F_1(x) = \sum_{i=1}^{n-1} [100(x_{i+1} - x_i^2)^2 + (x_i - 1)^2]$	۲	$[-30, 30]$	۰
McCormic	$F_2(x) = \sin(x_1 + x_2) + (x_1 - x_2)^2 - 1.5x_1 + 2.5x_2 + 1$	۲	$[-1/5, 4]$ و $[-3, 4]$	-۱/۹۱۳۳
Six Hump Camel Back	$F_3(x) = \left(4 - 2.1x_1^2 + \frac{x_1^4}{3}\right)x_1^2 + x_1x_2 + (-4 + 4x_2^2)x_2^2$	۲	$[-3, 3]$ و $[-2, 2]$	-۱/۰۳۱۶
Ackley	$F_4(x) = -20e^{-0.2\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n x_i^2}} - e^{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n \cos(2\pi x_i)} + 20 + e$	۴	$[-32, 32]$	۰
Ackley	$F_5(x) = -20e^{-0.2\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n x_i^2}} - e^{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n \cos(2\pi x_i)} + 20 + e$	۱۰	$[-32, 32]$	۰



شکل ۵- فلوچارت الگوریتم AFSA (Yin et al., 2012)

بحث و نتایج

بهینه‌سازی برای این توابع ۱۰ بار اجرا شد. جدول ۴ نیز نتایج کاربرد الگوریتم‌های SCE، AFSA و SA را روی توابع استاندارد نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، در مسائل با ابعاد کوچک عملکرد الگوریتم‌ها به‌طور تقریبی یکسان و مناسب است. برای الگوریتم SA انتخابی مورد استفاده در این تحقیق (با توابع مشخص همسایگی و سرمایه‌ش که در روابط ۱۱ و ۱۲ ارائه گردید) با افزایش بعد مسأله و پیچیدگی آن، عملکرد الگوریتم SA

برای اجرای این تحقیق، هر یک از الگوریتم‌های بیان شده در قسمت قبل جداگانه در محیط برنامه‌نویسی MATLAB کدنویسی شد؛ برای بررسی کارآمدی و درستی عملکرد آنها از چندین تابع محک استاندارد استفاده شده است. مشخصات این توابع شامل فرمول ریاضی، محدوده متغیرهای تصمیم و مقدار تابع در نقطه بهینه در جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به ساختار احتمالاتی روش‌های مورد استفاده، هر یک از الگوریتم‌های

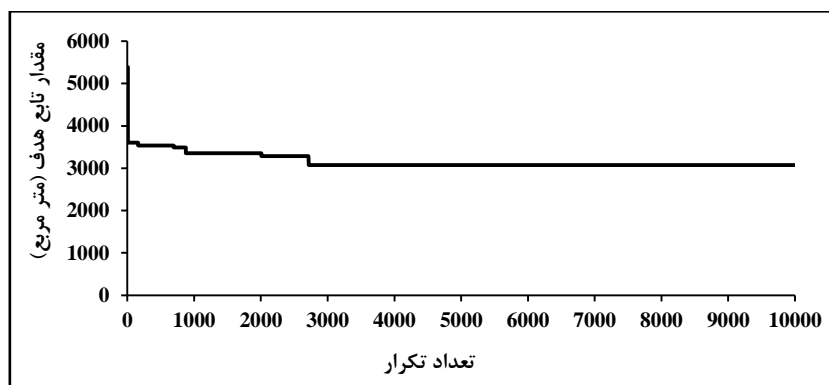
سیر نزولی داشته و از مقدار بهینه فاصله گرفته است. اما دو الگوریتم SCE و AFSA در مسائل با ابعاد بزرگ نیز عملکرد مناسبی دارند. پس از صحت‌سنجی الگوریتم‌های مورد نظر با استفاده از توابع محک استاندارد، مدل بهینه‌سازی ابعاد مقطع سد بزرگ بر اساس الگوریتم‌های AFSA، SCE و SA توسعه داده شد.

جدول ۴- نتایج پیاده‌سازی الگوریتم‌های فراابتکاری روی توابع محک استاندارد

تابع	SCE	AFSA	SA
$F_1(x)$.	.	.
$F_2(x)$	-۱/۹۱۳۳	-۱/۹۱۳۳	-۱/۶۹۵۳
$F_3(x)$	-۱/۰۳۱۶	-۱/۰۳۱۶	-۱/۰۳۱۶
$F_4(x)$	$۰/۵۳۲۱ \times ۱۰^{-۶}$	$۰/۸۸۸۲ \times ۱۰^{-۴}$	۱/۸۹۷۸
$F_5(x)$	$۰/۲۲۹ \times ۱۰^{-۴}$	$۰/۴۹۷۹ \times ۱۰^{-۴}$	۳/۲۷۰۵

توابع هدف حاصل ممکن است طی اجراهای متوالی تغییر یابد و بنابراین هر یک از این الگوریتم‌ها ۱۰ بار اجرا شد و میزان تغییرات متوسط تابع هدف در ۱۰ اجرا و در تکرارهای مختلف در شکل‌های ۶ تا ۸ نمایش داده شده است.

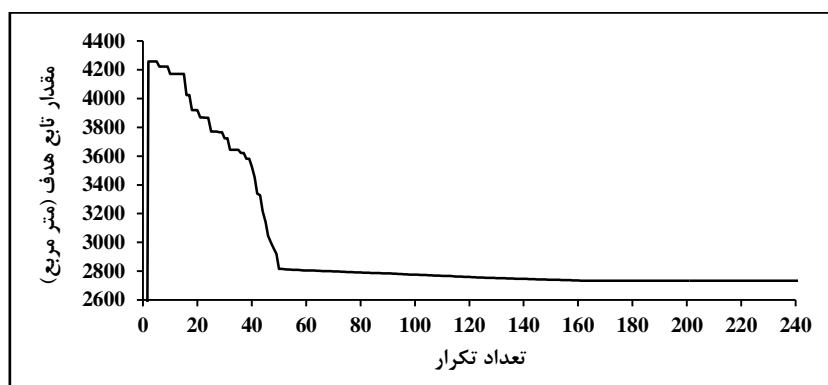
در ادامه تعیین ابعاد بهینه مقطع سد خاکی بر اساس اطلاعات مربوط به سد خاکی بزرگ و با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی SA، SCE و AFSA مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به ساختار تصادفی الگوریتم‌های مورد استفاده، مقادیر پارامترها و



شکل ۶- منحنی همگرایی به مقدار بهینه در مقابل تعداد تکرار با استفاده از روش بهینه‌سازی SA



شکل ۷- منحنی همگرایی به مقدار بهینه در مقابل تعداد تکرار با استفاده از روش بهینه‌سازی SCE



شکل ۸- منحنی همگرایی به مقدار بهینه در مقابل تعداد تکرار با استفاده از روش بهینه‌سازی AFSA

مقدار خود می‌رسند و به نقطه بهینه سراسری همگرا می‌شوند. مقادیر حداقل، میانگین و حداکثر تابع هدف در ۱۰ اجرا و در تعداد تکرارهای مناسب روش‌های بهینه‌سازی و همچنین متوسط زمان لازم برای دستیابی این روش‌ها به بهینه مربوط، در جدول ۵ ارائه شده است.

با توجه به شکل‌های ۶ تا ۸ در تکرارهای اولیه الگوریتم‌های بهینه‌سازی، تابع هدف روند کاهشی سریع‌تری دارد و این روند در شماره تکرارهای بالاتر، کندتر می‌شود. الگوریتم‌های SA، SCE و AFSA به ترتیب در ۲۷۱۵، ۱۳ و ۱۵۹ تکرار تابع هدف به حداقل

جدول ۵- عملکرد میانگین روش‌های بهینه‌سازی بعد از ۱۰ اجرا (متر مربع)

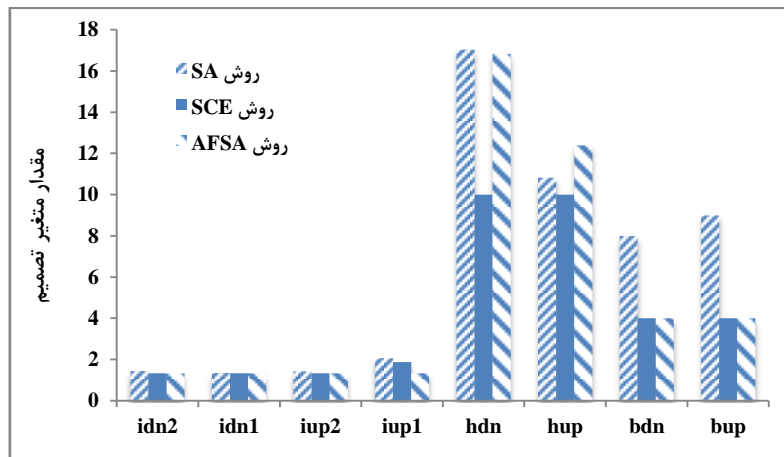
روش بهینه‌سازی	کمینه (۱۰ ^۲)	میانگین (۱۰ ^۲)	بیشینه (۱۰ ^۲)	زمان اجرا (ثانیه)
SA	۳/۰۷۲	۳/۱۳۶	۳/۲۸۹	۱۲/۲۵
SCE	۲/۷۲۵	۲/۷۲۵	۲/۷۲۶	۴/۰۳
AFSA	۲/۷۳۴	۲/۷۴۱	۲/۷۴۶	۱۵/۸۲

مقطع سد بزرگ برابر با ۲۷۲۵/۴ متر مربع تعیین گردید اما در طرح اولیه، مساحت این مقطع برابر ۴۴۰۰/۷ متر مربع بوده است. همچنین، با فرض یکسان بودن مقطع در تمام طول سد، حجم بدنه در حالت بهینه برابر ۵۷۷۷۶۳/۶ مترمکعب است که این حجم در حالت طراحی اولیه برابر ۹۳۲۹۴۵/۸ متر مکعب بوده است. پس از بهینه‌سازی مقادیر ضریب اطمینان پایداری شیروانی‌های بالادست و پایین‌دست نیز به ترتیب برابر ۱/۲۵۳ و ۱/۵۲ تعیین گردیدند که نشان‌دهنده پایداری مقطع بهینه سد نیز هست. همزمان با تعیین مقدار تابع هدف بهینه، متغیرهای تصمیم بهینه نیز شامل ابعاد و اندازه‌ها و شیب‌های بالادست و پایین‌دست بدنه سد تعیین شد که نتایج آن در جدول ۶ و شکل ۹ ارائه شده است.

با توجه به منحنی‌های همگرایی ارائه شده در شکل‌های ۶ تا ۸ و همچنین با مقایسه نتایج ارائه شده در جدول ۵ مشاهده می‌گردد که کمترین تعداد تکرار در رسیدن به همگرایی در روش SCE اتفاق افتاده است. پس از بهینه‌سازی ابعاد سد بزرگ با استفاده از روش‌های SCE، AFSA و SA، حجم سد به میزان ۳۸، ۳۷ و ۳۰ درصد نسبت به طرح اولیه کاهش یافته است. بهترین مقدار تابع هدف، یعنی کمترین حجم مصالح بدنه در واحد طول و کمترین زمان مورد نیاز برای یافتن بهینه نیز از بین سه روش به کار رفته در این تحقیق، مربوط به روش SCE است. این برتری در کمترین، بیشترین و متوسط مقادیر ارائه شده در ده بار اجرای مدل‌ها وجود دارد. با توجه به نتایج به دست آمده از اجرای مدل بهینه‌سازی SCE، مقدار کمینه تابع هدف یعنی مساحت

جدول ۶- مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم

b_{up} (متر)	b_{dn} (متر)	h_{up} (متر)	h_{dn} (متر)	i_{up1}	i_{up2}	i_{dn1}	i_{dn2}	پارامترها
۹/۰۰	۸/۰۰	۱۰/۸۳	۱۷/۰۴	۲/۰۶	۱/۴۳	۱/۳۵	۱/۴۵	روش SA
۴/۰۰	۴/۰۰	۱۰/۰۰	۱۰/۰۰	۱/۸۸	۱/۳۳	۱/۳۳	۱/۳۳	روش SCE
۴/۰۰	۴/۰۰	۱۲/۳۹	۱۶/۸۳	۱/۳۳	۱/۳۳	۱/۳۳	۱/۳۳	روش AFSA



شکل ۹- مقایسه ابعاد بهینه در روش‌های مختلف بهینه‌سازی

به‌نحوی که پایداری و شرایط فیزیکی بدنه حفظ گردد، وجود خواهد داشت.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق به‌منظور طراحی بهینه مقطع سد خاکی بزرگ، ترکیبی از مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. روابط رگرسیونی نیز برای تقریب ضرایب اطمینان پایداری به‌کمک مدل‌های شبیه‌سازی Slope/w و Seep/w تهیه و قابلیت الگوریتم بهینه‌سازی SA، SCE و AFSA برای یافتن پاسخ بهینه ارزیابی شد. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که از سه روش بهینه‌سازی به‌کار رفته در این مطالعه، روش SCE نسبت به روش‌های دیگر با کاهش ۳۸ درصد از حجم کل مصالح بدنه، ضمن برقراری ضرایب اطمینان، عملکرد بهتری را در بهینه‌سازی مقطع سد و در نتیجه حجم مصالح بدنه داشته است. همچنین، از نظر زمانی نیز روش SCE با صرف ۴/۰۳ ثانیه نسبت به دو روش دیگر (۱۲/۲۵ و ۱۵/۸۲ ثانیه) عملکرد بهتری داشته است.

با توجه به جدول ۶ و مقایسه آن با ارقام ارائه شده در جدول ۱ که ابعاد سد در حالت طراحی اولیه است، مشاهده می‌گردد که به‌جز عرض سکوی پایین‌دست که در حالت بهینه با روش SA نسبت به حالت اولیه افزایش داشته است در همه روش‌ها ابعاد و اندازه‌ها در مقطع بهینه کاهش یافته و شیب دیواره‌های بالادست و پایین‌دست سد نیز با حفظ شرایط پایداری بدنه افزایش یافته است. به‌طور نمونه، در روش SCE که روش منتخب بهینه‌سازی در این تحقیق است، 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 پایداری مصالح را در بالادست و پایین‌دست و نیز این موضوع را نشان می‌دهد که بر حسب نوع مصالح به‌کار رفته و با در نظر گرفتن محدودیت‌های طراحی، امکان طراحی با شیب بیشتر بدنه وجود داشته است. همچنین، از نتایج به‌دست آمده مشاهده می‌گردد که امکان کاهش عرض سکوها در بالادست و پایین‌دست به‌ترتیب از ۱۵ متر به ۴ متر و از ۵ متر به ۴ متر،

مراجع

- AbdulHussain, I. A., Kashyap, D. and Hari Prasad, K. S. 2007. Seepage modeling assisted optimal design of a homogeneous earth dam: procedure evolution. *Irrig. Drain. Eng.* 133(2): 116-130.
- Ajami, N. K., Gupta, H., Wagener, T. and Sorooshian, S. 2004. Calibration of a semi-distributed hydrologic model for streamflow estimation along a river system. *J. Hydrol.* 298, 112-135.
- Anon. 2003. Engineering and design: slope stability. *Engineering Manual. EM 1110-2-1902.* U. S. Army Corps of Engineers. Washington, DC.
- Barakat, S. A. and Altoubat, S. 2009. Application of evolutionary global optimization techniques in the design of RC water tanks. *Eng. Struct.* 31, 332-344.
- Cerny, V. 1985. A thermodynamic approach to the traveling salesman problem: An efficient simulation. *J. Optim. Theory Appl.* 45, 41-51.
- Chen, H., Wang, S., Li, J. and Li, Y. 2006. A hybrid of artificial fish swarm algorithm and particle swarm optimization for feed-forward neural network training. *Proceeding of New Weaponry Technology & Application.*
- Cunha, M. C. and Sousa, J. 2001. Hydraulic infrastructures design using simulated annealing. *J. Infrastruct. Syst.* 7(1): 32-39.
- Dougherty, D. E. and Marryott, R. A. 1991. Optimal groundwater management: I. Simulated annealing. *Water Resour. Res.* 27(10): 2493-2508.
- Duan, Q., Sorooshian, S. and Gupta, V. K. 1992. Effective and Efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resour. Res.* 28(4): 1015-1031.
- Duan, Q., Gupta, V. K. and Sorooshian, S. 1993. A shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization. *J. Optimiz. Theory App.* 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. *J. Hydrol.* 158(3-4): 265-284.
- Goldman, F. E. and Mays, L.W. 1999. The application of simulated annealing to the optimal operation of water systems. *Proceedings of the 26th Annual Water Resources Planning and Management Conference.* June 6-9. Tempe. Arizona.
- Hammouri, N. A. Malkawi, A. I. H. and Yamin, M. M. A. 2008. Stability analysis of slope using the finite element method and limiting equilibrium approach. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment.*
- Holland, J. 1992. *Adaptation in Natural and Artificial Systems.* 2nd Ed. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.
- Huang, X., Liao, W., Lei, X., Jia, Y., Wang, Y., Wang, X., Jiang, Y. and Wang, H. 2014. Parameter optimization of distributed hydrological model with a modified dynamically dimensioned search algorithm. *J. Environ. Model. Softw.* 52, 98-110.
- Jiang, M., Wang, Y., Pfletschinger, S., Lagunas, M. A. and Yuan, D. 2007. Optimal Multiuser Detection with Artificial Fish Swarm Algorithm. *Proceeding of 3rd International Conference on Intelligent Computing (ICIC).* Aug. 21-24. Qingdao. China.
- Ketabchi, H. and Ataie-Ashtiani, B. 2015. Evolutionary algorithms for the optimal management of coastal groundwater: a comparative study toward future challenges. *J. Hydrol.* 520, 193-213

- Khodabakhshi, F., Ghirian, A. R. and Khakzad, N. 2009. Applying simulated annealing for optimal operation of multi-reservoir systems. *J. Eng. Appl. Sci.* 2(1): 80-87. (in Persian)
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D. Jr. and Vecchi, M. P. 1983. Optimization by simulated annealing. *Science*. 220, 671-680.
- Lerma, N., Paredes-Arquiola, J., Andreu, J., Solera, A. and Sechi, G. M. 2015. Assessment of evolutionary algorithms for optimal operating rules design in real water resource systems. *Environ. Modell. Softw.* 69, 425-436.
- Li, L. X., Shao, Z. J. and Qian, J. X. 2002. An optimizing method based on autonomous animate: fish swarm algorithm. *Syst. Eng. Theory Pract.* 11, 32-38.
- Metropolis, N., Rosenbluth, A., Teller, A. and Teller, E. 1953. Equation of state calculations by fast computing machines. *J. Chem. Phys.* 21, 1087-1092.
- Montaseri, M., Deiminiat, A. and Ghezelsoufloo, A. A. 2010. Optimization of clay core dimensions in earth dams using genetic algorithm. *Water Soil Sci.* 20(3): 73-76. (in Persian)
- Murthy, G. S. R., Murty, K. G. and Raghupathy, G. 2013. Designing Earth Dams Optimally. 40th Anniversary Vol. Indian Association for Productivity Quality Deformations of the Dam and Reliability (IAPQR).
- Nelder, J. A. and Mead, R. 1965. A simplex method for function minimization. *Comput. J.* 7(4): 308-313.
- Neshat, M., Sepidnam, G., Sargolzaei, M. and Najaran-Toosi, A. 2014. Artificial fish swarm algorithm: a survey of the state-of-the-art, hybridization, combinatorial and indicative applications. *Artif. Intell. Rev.* 42(4): 965-997.
- Van Laarhoven, P. J. and Aarts, E. H. 1987. *Simulated Annealing: Theory and Applications (Mathematics and Its Applications)*. Springer.
- Price, W. L. 1987. Global optimization algorithms for a CAD workstation. *J. Optimiz. Theory App.* 55(1): 133-146.
- Ranjan, G. and Rao, A. S. R. 2000. *Basic and Applied Soil Mechanics*. New Age International Pub.
- Skahill, B. E. and Doherty, J. 2006. Efficient accommodation of local minima in watershed model calibration. *J. Hydrol.* 329, 122-139.
- Xiao, L. 2010. A clustering algorithm based on artificial fish school. 2nd International Conference on Computer Engineering and Technology. Apr. 16-18. Chengdu, China.
- XU, Y. Q., Unami, K. and Kawachi, T. 2003. Optimal hydraulic design of earth dam cross section using saturated-unsaturated seepage flow model. *Adv. Water Resour.* 26, 1-7.
- Yapo, P. O., Gupta, H. V. and Sorooshian, S. 1998. Multi-objective global optimization for hydrologic models. *J. Hydrol.* 204, 83-97.
- Yazdani, D., Golyari, S. and Meybodi, M. R. 2010. A new hybrid approach for data clustering. 5th International Symposium on Telecommunication (IST). Tehran, Iran.
- Yin, Z., Zong, Z., Sun, H., Wu, Z. and Yang, Z. 2012. A complexity-performance-balanced multiuser detector based on artificial fish swarm algorithm for DS-UWB systems in the AWGN and multipath environments. *J. Adv. Signal Proc.* Doi: 10.1186/1687-6180-2012-229.
- Zameer, A., Mirza, S. M. and Mirza, N. M. 2014. Core loading pattern optimization of a typical two-loop 300 MWe PWR using Simulated Annealing (SA), novel crossover Genetic Algorithms (GA) and hybrid GA (SA) schemes. *Ann. Nucl. Energy.* 65, 122-131.



Performance Comparison of Artificial Fish Swarm, Shuffled Complex Evolution and Simulated Annealing Algorithms in the Optimization of Earth Dams Cross Section (Case Study: Barzok Dam)

H. Ghodousi* and F. Vakili-Tanah

* Corresponding Author: Assistant Professor, Department of Water Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran. Email: ghodousi_he@yahoo.com

Received: 18 January 2016, Accepted: 1 August 2016

In this study performance of evolutionary optimization methods for designing of cross section of heterogeneous earth dams is investigated. The methods applied were Artificial Fish Swarm (AFSA), Shuffled Complex Evolution (SCE) and Simulated Annealing (SA) algorithms. The model consisted of a nonlinear optimization function by applying different constraints such as slope stability constraints and geometrical dimensions. Design variables in optimization process were the geometrical parameters in cross section of earthen dam and stability safety factors constraints were determined as explicit functions according to design variables by using analyses results such as seepage and slopes stability analysis for a set of sample designs by using linear regression models. Efficiency of the optimization methods in identifying the global optimum point was compared according to mean performance and mean time required for calculations. After optimization of dimensions in Barzok dam by using SCE, AFSA and SA methods, dam volume was reduced 38, 37 and 30 percent respectively as compared to the primary design volume. Results showed that SCE method is more efficient than the SA and AFSA methods in achieving the optimal dimensions in cross section of earth dam.

Keywords: Artificial Fish Swarm, Earth Dam, Optimization, Shuffled Complex Evolution, Simulated Annealing